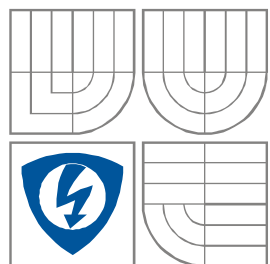


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

# NÍZKOFREKVENČNÍ D/A PŘEVODNÍK PRO LABORATORNÍ VÝUKU

AUDIO D/A CONVERTER USED FOR LABORATORY MEASUREMENTS

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

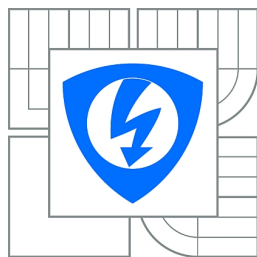
AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. Milan Abrman

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.

BRNO, 2015



**VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií**

**Ústav radioelektroniky**

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor  
**Elektronika a sdělovací technika**

**Student:** Bc. Milan Abrman

**ID:** 125352

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2014/2015

## NÁZEV TÉMATU:

**Nízkofrekvenční D/A převodník pro laboratorní výuku**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

V úvodní teoretické části práce navrhnete koncepci a obvodové zapojení laboratorního přípravku stereofonního D/A převodníku pro předmět Nízkofrekvenční a audio elektronika. Předpokládejte výběr integrovaného multistandardního převodníku 24bit/192 kHz, ke kterému provedte návrh digitálního přijímače, jakostní analogové části výstupních filtrů a dále integrované mikroprocesorové řízení režimu provozu převodníku s vhodně zvolenou indikací pracovního režimu pomocí displeje nebo grafického znázornění.

V praktické části práce vytvořte kompletní konstrukční podklady k realizaci návrhu (schéma zapojení, návrh desky plošného spoje, rozložení a soupiska součástek atd.). Převodník realizujte formou funkčního laboratorního přípravku, jehož správnou činnost ověřte měřeními. Navrhnete samostatnou laboratorní úlohu pro kterou vytvořte kompletní zadání a vzorový protokol o měření.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] POHLMAN, K. C. Principles of digital audio, Fourth Edition. McGraw-Hill, 2000.

[2] TALBOTH-SMITH, M. Audio Engineer's Reference Book, Second Edition. Focal press, 1999.

[3] METZLER, B. Audio Measurement Handbook. Beaverton: Audio Precision, Inc., 1993.

**Termín zadání:** 9.2.2015

**Termín odevzdání:** 21.5.2015

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

**Konzultanti diplomové práce:**

**doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.**

*Předseda oborové rady*

**UPOZORNĚNÍ:**

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## ABSTRAKT

Tato práce se zabývá návrhem laboratorního přípravku stereofonního D/A převodníku pro školní laboratorní účely. Součástí práce je kompletní návrh všech funkčních bloků přípravku pro D/A převod, kterými jsou: Vstupní část, přijímač S/PDIF, D/A převodník, vysoce jakostní výstupní analogová část s aktivním rekonstrukčním filtrem. Tato práce se zabývá také návrhem všech řídicích a indikačních částí laboratorního přípravku, kterými jsou: mikrokontrolér s ovládacími prvky, znakový OLED displej a indikátory nastavení.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Přijímač S/PDIF, D/A převodník, diferenční zesilovač, rekonstrukční filtr, mikrokontrolér, laboratorní přípravek, měření

## ABSTRACT

The aim of this thesis is design stereo digital to analog convertor for school laboratory usage. Scope of the thesis covers the design of all the functional units: input signal circuit, S/PDIF receiver, D/A converter, high quality analog output stage with active low pass filter. Thesis also cover design of all control and indicating parts containing microcontroller with control parts, alphanumeric OLED display and setting indicators.

## KEYWORDS

S/PDIF receiver, D/A converter, differential amplifier, microcontroller, laboratory equipment, measurement

ABRMAN, M. *Nízkofrekvenční D/A převodník pro laboratorní výuku*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2015. 90 s., 20 s. příloh. Diplomová práce. Vedoucí práce: doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.

# PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svoji diplomovou práci na téma Nízkofrekvenční D/A převodník pro laboratorní výuku jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrálního projektu a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)

# PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

# OBSAH

|                                                                   |             |
|-------------------------------------------------------------------|-------------|
| <b>Seznam obrázků</b>                                             | <b>viii</b> |
| <b>Seznam tabulek</b>                                             | <b>x</b>    |
| <b>Úvod</b>                                                       | <b>1</b>    |
| <b>1 Návrh laboratorního přípravku</b>                            | <b>2</b>    |
| 1.1 Blokové schéma navrhovaného laboratorního přípravku.....      | 2           |
| 1.2 Použité integrované obvody v jednotlivých blocích.....        | 4           |
| 1.2.1 Popis použitých integrovaných obvodů.....                   | 4           |
| <b>2 Obvody pro D/A převod</b>                                    | <b>7</b>    |
| 2.1 Vstupní digitální část.....                                   | 7           |
| 2.2 Rozhraní a přijímač S/PDIF.....                               | 9           |
| 2.2.1 Popis zapojení přijímače S/PDIF CS8416.....                 | 12          |
| 2.3 D/A převodník.....                                            | 13          |
| 2.3.1 Popis zapojení D/A převodníku AD1955.....                   | 14          |
| 2.4 Diferenční zesilovače a aktivní rekonstrukční filtr.....      | 16          |
| 2.4.1 Návrh bloku diferenčních zesilovačů a aktivního filtru..... | 18          |
| 2.4.2 Návrh bloku aktivního rekonstrukčního filtru.....           | 19          |
| <b>3 Řídící obvody</b>                                            | <b>22</b>   |
| 3.1 Parametry mikrokontroléru MSP430F5529.....                    | 23          |
| 3.1.1 SPI komunikace.....                                         | 25          |
| 3.2 Popis zapojení mikrokontroléru MSP430F5529.....               | 25          |
| 3.2.1 RESET mikrokontroléru MSP430F5529.....                      | 25          |
| 3.3 Popis zapojení převodníků SPI/paralel.....                    | 26          |
| 3.3.1 Převodník SPI/paralel pro OLED displeje.....                | 26          |
| 3.3.2 Převodníky SPI/paralel pro indikaci nastavení.....          | 29          |
| 3.4 Řízení činnosti přijímače S/PDIF CS8416.....                  | 30          |
| 3.4.1 Řídící registry přijímače S/PDIF CS8416.....                | 31          |
| 3.5 Řízení činnosti D/A převodníku AD1955.....                    | 35          |
| 3.5.1 Řídící registry D/A převodníku AD1955.....                  | 36          |
| <b>4 Napájení</b>                                                 | <b>39</b>   |

|          |                                                         |           |
|----------|---------------------------------------------------------|-----------|
| 4.1      | Popis zapojení bloku stabilizátorů.....                 | 39        |
| <b>5</b> | <b>Ovládání a práce s přípravkem</b>                    | <b>42</b> |
| 5.1      | Menu a ovládání přípravku.....                          | 42        |
| 5.1.1    | Výchozí stav laboratorního přípravku.....               | 42        |
| 5.1.2    | Struktura ovládacího menu.....                          | 43        |
| 5.1.3    | Reset laboratorního přípravku.....                      | 45        |
| 5.2      | Měření na laboratorním přípravku.....                   | 46        |
| <b>6</b> | <b>Měření</b>                                           | <b>48</b> |
| 6.1      | Měření kmitočtové modulové charakteristiky a THD+N..... | 48        |
| 6.2      | Měření separace obou kanálů.....                        | 54        |
| 6.3      | Měření linearity.....                                   | 56        |
| 6.4      | Měření odstupu signálu od šumu.....                     | 60        |
| 6.5      | Měření THD+N v závislosti na úrovni signálu.....        | 62        |
| 6.6      | Měření filtru De-Emphasis.....                          | 65        |
| 6.7      | Použité měřicí přístroje.....                           | 71        |
| 6.8      | Závěr měření.....                                       | 71        |
| 6.9      | Vzorový protokol.....                                   | 73        |
| <b>7</b> | <b>Závěr</b>                                            | <b>86</b> |
|          | <b>Literatura</b>                                       | <b>88</b> |
|          | <b>Seznam symbolů, veličin a zkratk</b>                 | <b>90</b> |



# SEZNAM OBRÁZKŮ

|                                                                                                |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Obr. 1.1.1: Blokové schéma celého zařízení.....                                                | 2  |
| Obr. 2.1.1: Zapojení vstupů u přijímače CS8416.....                                            | 8  |
| Obr. 2.2.1: Formáty komunikace přijímače S/PDIF a D/A<br>převodníku, převzato [2].....         | 9  |
| Obr. 2.2.2: Schéma zapojení přijímače S/PDIF CS8416.....                                       | 10 |
| Obr. 2.2.3: 2. řídicí registr obvodu CS8416, převzato [2].....                                 | 12 |
| Obr. 2.3.1: Schéma zapojení D/A převodníku AD1955.....                                         | 15 |
| Obr. 2.4.1: Schéma zapojení diferenčních zesilovačů a aktivního<br>rekonstrukčního filtru..... | 18 |
| Obr. 2.4.2: Spektrum signálu na výstupu z D/A převodníku.....                                  | 21 |
| Obr. 3.1: Schéma zapojení mikrokontroléru MSP430F5529.....                                     | 22 |
| Obr. 3.3.1: Schéma zapojení převodníku SPI.....                                                | 27 |
| Obr. 3.3.2: Schéma zapojení indikace nastavení CS8416 a AD1955.....                            | 30 |
| Obr. 3.4.1: Řízení činnosti CS8416 v SPI komunikaci, převzato [2].....                         | 31 |
| Obr. 3.4.2: 0. řídicí registr CS8416, převzato [2].....                                        | 31 |
| Obr. 3.4.3: 1. řídicí registr CS8416, převzato [2].....                                        | 32 |
| Obr. 3.4.4: 2.řídicí registr CS8416, převzato [2].....                                         | 32 |
| Obr. 3.4.5: Odezva filtru De-emphasis, převzato [2].....                                       | 33 |
| Obr. 3.4.6: 3. řídicí registr CS8416, převzato [2].....                                        | 33 |
| Obr. 3.4.7: 4. řídicí registr CS8416, převzato [2].....                                        | 33 |
| Obr. 3.4.8: 5.řídicí registr CS8416, převzato [2].....                                         | 34 |
| Obr. 3.5.1: Řízení činnosti AD1955 v SPI komunikaci, převzato [4].....                         | 35 |
| Obr. 3.5.2: Řídicí registry D/A převodníku AD1955, převzato [4].....                           | 36 |
| Obr. 4.1: Zapojení stabilizátorů.....                                                          | 39 |
| Obr. 5.1.1: Uvítací obrazovka na přípravku.....                                                | 44 |
| Obr. 5.1.2: První nabídka po stisku tlačítka Menu UP.....                                      | 45 |
| Obr. 5.1.3: První podnabídka první nabídky po stisku tlačítka SUBMENU.....                     | 45 |
| Obr. 6.1.1: Modulové kmitočtové charakteristiky pro různé $f_{VZ}$ .....                       | 53 |
| Obr. 6.1.2: Harmonická zkreslení D/A převodníku pro různé $f_{VZ}$ .....                       | 53 |
| Obr. 6.2.1: Separace obou kanálu D/A převodníku pro různé $f_{VZ}$ .....                       | 56 |

|                                                                                               |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Obr. 6.3.1: Měření linearity D/A převodníku pro $f_{VZ} = 48$ kHz.....                        | 59 |
| Obr. 6.3.2: Měření linearity D/A převodníku pro $f_{VZ} = 96$ kHz.....                        | 59 |
| Obr. 6.3.3: Měření linearity D/A převodníku pro $f_{VZ} = 192$ kHz.....                       | 60 |
| Obr. 6.5.1: Měření THD+N v závislosti na úrovni vstupního<br>signálu pro různé $f_{VZ}$ ..... | 64 |
| Obr. 6.6.1: Modulové kmitočtové charakteristiky 48 kHz filtru<br>pro různé $f_{VZ}$ .....     | 69 |
| Obr. 6.6.2: Modulové kmitočtové charakteristiky 44,1 kHz filtru<br>pro různé $f_{VZ}$ .....   | 69 |
| Obr. 6.6.3: Modulové kmitočtové charakteristiky 32 kHz filtru<br>pro různé $f_{VZ}$ .....     | 70 |

# SEZNAM TABULEK

|                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tab. 2.2.1: Konfigurace GPO pinů obvodu CS8416, převzato [2].....                          | 11 |
| Tab. 2.3.1: Parametry převodníku AD1955.....                                               | 13 |
| Tab. 2.3.2: Parametry převodníku AD1955, pokračování.....                                  | 14 |
| Tab. 2.4.1: Parametry operačního zesilovače LME49720.....                                  | 17 |
| Tab. 2.4.2: Parametry operačního zesilovače AD8599.....                                    | 17 |
| Tab. 3.1.1: Přehled klíčových parametrů mikrokontroléru MSP430F5529.....                   | 23 |
| Tab. 3.1.2: Přehled klíčových parametrů mikrokontroléru<br>MSP430F5529, pokračování.....   | 24 |
| Tab. 3.3.1: Význam pinů displeje a jejich propojení s převodníkem.....                     | 28 |
| Tab. 3.4.1: Nastavení a výběr formátu sériové komunikace.....                              | 35 |
| Tab. 4.1.1: Přehled použitých stabilizátorů a jejich použití.....                          | 41 |
| Tab. 5.1.1: Výchozí nastavení přípravku D/A převodníku.....                                | 43 |
| Tab. 5.1.2: Struktura ovládacího menu přípravku D/A převodníku.....                        | 43 |
| Tab. 5.1.3: Struktura ovládacího menu přípravku D/A převodníku, pokračování.....           | 44 |
| Tab. 5.2.1: Význam TP v laboratorním přípravku.....                                        | 46 |
| Tab. 5.2.2: Význam TP v laboratorním přípravku, pokračování.....                           | 47 |
| Tab. 6.1.1: Měření modulové kmitočtové char. a THD+N<br>pro $f_{VZ} = 48$ kHz.....         | 49 |
| Tab. 6.1.2: Měření modulové kmitočtové char. a THD+N<br>pro $f_{VZ} = 48$ kHz, pokrač..... | 50 |
| Tab. 6.1.3: Měření modulové kmitočtové char. a THD+N<br>pro $f_{VZ} = 96$ kHz.....         | 50 |
| Tab. 6.1.4: Měření modulové kmitočtové char. a THD+N<br>pro $f_{VZ} = 96$ kHz, pokrač..... | 51 |
| Tab. 6.1.5: Měření modulové kmitočtové char. a THD+N<br>pro $f_{VZ} = 192$ kHz.....        | 52 |
| Tab. 6.2.1: Měření separace obou kanálů při $f_{VZ} = 48$ kHz.....                         | 55 |
| Tab. 6.2.2: Měření separace obou kanálů při $f_{VZ} = 96$ kHz.....                         | 55 |
| Tab. 6.2.3: Měření separace obou kanálů při $f_{VZ} = 192$ kHz.....                        | 55 |
| Tab. 6.3.1: Měření linearity pro $f_{VZ} = 48$ kHz.....                                    | 57 |

|                                                                                                |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tab. 6.3.2: Měření linearity pro $f_{vz} = 96$ kHz.....                                        | 57 |
| Tab. 6.3.3: Měření linearity pro $f_{vz} = 96$ kHz, pokračování.....                           | 58 |
| Tab. 6.3.4: Měření linearity pro $f_{vz} = 192$ kHz.....                                       | 58 |
| Tab. 6.4.1: Měření odstupů signálu od šumu pro $f_{vz} = 48$ kHz.....                          | 61 |
| Tab. 6.4.2: Měření odstupů signálu od šumu pro $f_{vz} = 96$ kHz.....                          | 61 |
| Tab. 6.4.3: Měření odstupů signálu od šumu pro $f_{vz} = 192$ kHz.....                         | 61 |
| Tab. 6.5.1: Měření THD+N v závislosti na úrovni signálu pro $f_{vz} = 48$ kHz.....             | 63 |
| Tab. 6.5.2: Měření THD+N v závislosti na úrovni signálu pro $f_{vz} = 96$ kHz.....             | 63 |
| Tab. 6.5.3: Měření THD+N v závislosti na úrovni signálu pro $f_{vz} = 192$ kHz.....            | 63 |
| Tab. 6.5.4: Měření THD+N v závislosti na úrovni signálu<br>pro $f_{vz} = 192$ kHz, pokrač..... | 64 |
| Tab. 6.6.1: Měření 48 kHz filtru De-Emphasis pro různé $f_{vz}$ .....                          | 65 |
| Tab. 6.6.2: Měření 48 kHz filtru De-Emphasis pro různé $f_{vz}$ , pokračování.....             | 66 |
| Tab. 6.6.3: Měření 44,1 kHz filtru De-Emphasis pro různé $f_{vz}$ .....                        | 66 |
| Tab. 6.6.4: Měření 44,1 kHz filtru De-Emphasis pro různé $f_{vz}$ , pokračování.....           | 67 |
| Tab. 6.6.5: Měření 32 kHz filtru De-Emphasis pro různé $f_{vz}$ .....                          | 67 |
| Tab. 6.6.6: Měření 32 kHz filtru De-Emphasis pro různé $f_{vz}$ , pokračování.....             | 68 |

# ÚVOD

Tato diplomová práce se zabývá podrobným návrhem a realizací laboratorního přípravku D/A převodníku, který má sloužit pro měření v laboratorních cvičeních předmětu Nízkofrekvenční a audio elektroniky. Přípravek musí být odolný, jednoduchý na ovládání a rozmístění testovacích bodů po celém přípravku musí být systematické, aby po proměření všech těchto testovacích bodů získal student velmi dobrou představu o problematice zpracování a převodu vstupního digitálního signálu na nízkofrekvenční audiosignál.

Cílem práce a návrhu laboratorního přípravku je také zvolit co možná nejvhodnější indikaci nastavení požadovaných parametrů převodníku. Přesto že se jedná o laboratorní přípravek, jsou kladeny velké požadavky na kvalitu zpracování celého zařízení a především vysoké požadavky na kvalitu zpracování a převodu digitálního signálu na nízkofrekvenční audiosignál.

Práce se zabývá nejen návrhem zapojení obvodů zprostředkovávajících D/A převod, následných diferenčních zesilovačů a aktivního rekonstrukčního filtru, ale i řídicích obvodů a indikačních obvodů. V první části práce budou tak podrobně teoreticky rozebrány veškeré části navrhovaného laboratorního přípravku. Zdůvodněno použití patřičných klíčových integrovaných obvodů do těchto částí laboratorního přípravku. Na základě zvolených klíčových obvodů budou vytvořeny kompletní návrhy schémat zapojení všech částí laboratorního přípravku D/A převodníku. Ze schémat zapojení budou poté vytvořeny desky plošných spojů.

Posledním krokem návrhu bude naprogramování řídicího algoritmu, který zabezpečí ovládání a řízení všech částí laboratorního přípravku D/A převodníku. Za pomoci interního mikrokontroléru a OLED displeje bude vytvořeno přehledné a intuitivní ovládací menu s možným nastavením parametrů. Mikrokontrolér bude doplněn ovládacími tlačítky pro pohyb v menu, pro výběr konkrétního parametru a pro potvrzení volby. Pro indikaci nastavení přijímače S/PDIF a D/A převodníku bude kromě OLED displeje použita i LED diodová indikace.

Požadavek velmi malého harmonického zkreslení a vysoké věrnosti převodu vstupního S/PDIF signálu na klasickou analogovou úroveň, je zajištěn použitím těch nejmodernějších a nejkvalitnějších integrovaných obvodů do všech částí laboratorního přípravku zpracovávajících audiosignál. Použitý přijímač S/PDIF spolu s D/A převodník musí být schopen zpracovat vstupní signál do vzorkovacího kmitočtu až 192 kHz s hloubkou vstupního slova až 24 bitů. Zároveň se však musí jednat o takové obvody, které umožňují softwarové řízení své činnosti.

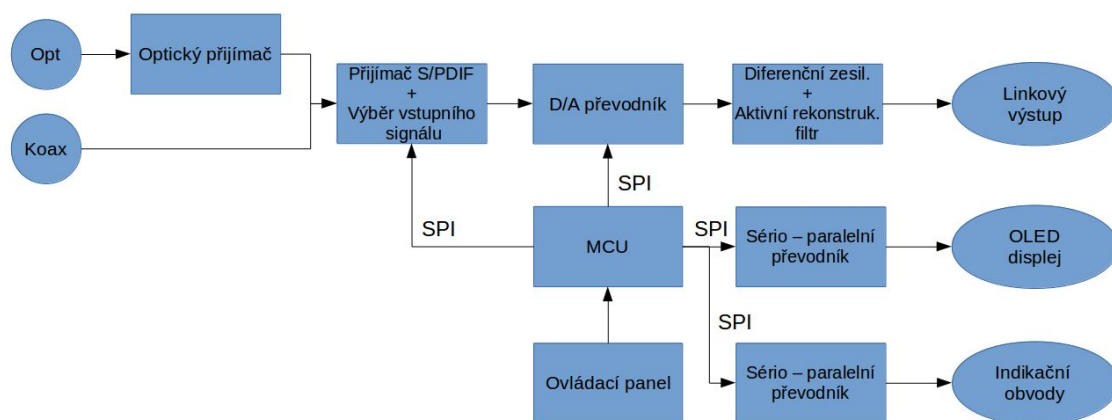
# 1 NÁVRH LABORATORNÍHO PŘÍPRAVKU

V této kapitole bude uvedeno a rozebráno celé blokové schéma navrhovaného zařízení laboratorního přípravku D/A převodníku. Postupně budou popsány jednotlivé bloky z hlediska jejich funkce a také bude u každého bloku uveden nejvýznačnější integrovaný obvod, který zde bude použit. U každého vybraného a použitého integrovaného obvodu bude zdůvodněno použití právě tohoto konkrétního obvodu. V následujících kapitolách, které se budou podrobněji zabývat návrhem každého dílčího bloku navrhovaného zařízení, bude uveden podrobný popis parametrů a vlastností jednotlivých použitých integrovaných obvodů. Dále budou uvedeny požadavky jak na celkové parametry zařízení, tak také na konkrétní parametry jednotlivých bloků.

Protože navržené zařízení bude pracovat jako laboratorní přípravek, budou patřičné signálové cesty vybaveny tzv. Testing Pointy (dále jen TP). Pomocí těchto TP bude možné za pomoci analyzátoru, či osciloskopu analyzovat a identifikovat nejrůznější důležité průběhy v daných částech D/A převodníku. TP budou vyvedeny na vrchní krycí desku laboratorního přípravku a budou se nacházet jak ve vstupních obvodech a v samotných obvodech pro zpracování digitálního signálu, tak také v jakostní analogové části výstupního filtru a aktivního rekonstrukčního filtru. Rozmístění TP je logické za jejichž pomocí bude dobře patrná funkčnost D/A převodníku resp. celého laboratorního přípravku D/A převodníku

Návrh schémat zapojení tohoto laboratorního přípravku D/A převodníku byl proveden za pomoci PC software Eagle od výrobce Cadsoft. K vytvoření kompletního řídicího algoritmu a naprogramování integrovaného MCU, který řídí činnost tohoto laboratorního přípravku, byl použit vývojový kit MSP430F5529LP od firmy Texas Instruments spolu s vývojovým prostředím Code Composer Studio V5.

## 1.1 Blokové schéma navrhovaného laboratorního přípravku



Obr. 1.1.1: Blokové schéma celého zařízení

Blokového schéma navrženého laboratorního přípravu D/A převodníku je možné dle činnosti rozdělit do několika funkčních dílčích bloků. Tyto jednotlivé bloky budou v následujících kapitolách a podkapitolách podrobně rozebrány. Budou stanoveny požadavky na tyto dílčí bloky a na základě požadavků bude proveden návrh všech částí D/A převodníku tak, aby navržené zařízení bylo maximálně spolehlivé, odolné, snadné na obsluhu a bylo schopno pracovat dlouhou dobu v laboratořích Nízkofrekvenční a audio elektronika bez jakýchkoliv potíží. Navíc si přesto všechno musí zařízení zachovat velmi vysokou kvalitu zpracování zvuku. Všechny následující požadavky musí být zohledněny nejen v samotném návrhu, ale také zejména ve výběru součástkové základny do jednotlivých částí D/A převodníku.

Blokové schéma navrženého zařízení viz. Obr. 1.1.1, lze rozdělit:

- Vstupní signálová část
  - Příjem vstupních digitálních signálů z optického kabelu
  - Příjem vstupních digitálních signálů z koaxiálního kabelu
- Přijímač S/PDIF
  - Zpracování vstupních digitálních signálů z optické nebo koaxiální linky
  - Přepínání mezi vstupními signály (výběr aktuálně zpracovávaného signálu)
  - Převod S/PDIF signálu na formát signálu, který dokáže zpracovat následný D/A převodník
- D/A převodník
  - Zpracování signálu z přijímače S/PDIF
  - Převod vstupního digitálního signálu na analogový, který přejímá a zpracovává blok diferenčních zesilovačů a aktivního rekonstrukčního filtru
- Diferenční zesilovače a aktivní rekonstrukční filtr
  - Převod signálu z výstupu D/A převodníku na klasický stereo signál linkové úrovně
- Řídící obvody
  - MCU → řídící činnost celého zařízení
  - Sério/paralelní převodník → převod SPI na paralelní informaci pro displej
  - Sério/paralelní převodník → převod SPI na informaci o nastavení přijímače S/PDIF
  - Sério/paralelní převodník → převod SPI na informaci o nastavení D/A převodníku
  - OLED displej → indikující nastavené předvolbu přijímače S/PDIF a D/A převodníku
  - Ovládací tlačítka → 4 ovládací tlačítka pro pohyb v menu, v podnabídkách a pro potvrzení vybrané předvolby

## 1.2 Použité integrované obvody v jednotlivých blocích

Pro dosažení požadovaných parametrů, správnou činnost a funkčnost je klíčový výběr integrovaných obvodů do jednotlivých bloků D/A převodníku. Laboratorní přípravek D/A převodníku musí být schopen zpracovávat vstupní digitální signály s bitovou hloubkou až 24 bitů a vzorkovacím kmitočtem až 192 kHz a to jak z optické tak koaxiální linky. Přípravek musí sloužit pro měřicí účely a proto musí být D/A převodník schopen měnit své parametry, jako je například právě vzorkovací kmitočet, či bitová hloubka zpracovávaného signálu. S přihlédnutím na tyto požadavky, na požadavky vysoké kvality zpracování signálu a na požadavky činnosti jsou ve všech částech D/A převodníku použity obvody té nejvyšší kvality. V následujícím rejstříku jsou uvedeny použité integrované obvody v jednotlivých blocích blokového schématu dle Obr. 1.1.1. U každého obvodu je navíc uveden typ pouzdra a v závorce pak výrobce tohoto integrovaného obvodu.

Použité IO v jednotlivých částech zařízení:

- Optický přijímač
  - GP1FAV31RK0F (Sharp)
- Přijímač S/PDIF
  - CS8416 (Cirrus Logic) - SOIC28
- D/A převodník
  - AD1955 (Analog Devices) - TSSOP 28
- Diferenční zesilovače + aktivní rekonstrukční filtr
  - LME49720 (Texas Instruments) - SOIC 8
  - AD8599 (Analog Devices) – SOIC 8
- MCU
  - MSP430F5529 (Texas Instruments) - LQFP 80
- Sériové/paralelní převodníky
  - 2 x 74HCT595 (Texas Instruments) - SOIC 16
- OLED displej
  - 20x2 OLED displej s řadičem WS0010, barva zelená

### 1.2.1 Popis použitých integrovaných obvodů

Pro příjem vstupního digitálního signálu z optické cesty byl zvolen optický přijímač GP1FAV31RK0F od renomovaného výrobce Sharp. Optický přijímač je schopný zpracovat vstupní signály do přenosové rychlosti až 15,5 Mb/s, což pro potřeby audiotechniky naprosto dostačuje. Tento optický přijímač nahrazuje dříve velmi rozšířeny TORX177 od výrobce Toshiba. Oba optické přijímače jsou samozřejmě kompatibilní s klasickými optickými kabely (Toslink), které se nachází v běžné spotřební elektronice (TV, DVD, Blu-ray atp.). [1]



Přijímačů S/PDIF je poměrně velké množství ať od výrobce Cirrus Logic, Analog Devices a nebo i od společnosti Texas Instruments. Každý výrobce nabízí přijímače špičkových parametrů, avšak pro potřeby navrženého laboratorního přípravku D/A převodníku byl vybrán S/PDIF přijímač od prvně jmenované firmy, tedy od Cirrus Logic, konkrétně se jedná o přijímač CS8416. Je to přijímač, který je možné za pomoci MCU softwarově řídit a umožňuje tak značnou variabilitu celého navrženého zařízení, což je pro potřeby laboratorního přípravku žádoucí. Navíc je tento přijímač schopný zpracovat vstupní signály se vzorkovacím kmitočtem od 32 kHz až do 192 kHz s bitovou hloubkou až 24 bitů, to je vzhledem k požadavkům na navržené zařízení nutností. [2]

Pokud přijímačů S/PDIF je celá řada tak bezesbýtku to samé platí o D/A převodnících. Ty se vyskytují od Low cost integrovaných obvodů nevalné kvality, která se používají ve většině spotřební elektroniky, až po obvody tzv. audiofilské, či high end třídy. Tyto obvody pochopitelně dosahují naprosto špičkových parametrů v oblasti kvality zpracování signálu, odstupu signálu od šumu, schopnosti zpracovat až 24 bitové vstupní signály s vysokým vzorkovacím kmitočtem až 192 kHz. Nejvýznamnější výrobci opravdu kvalitních D/A převodníků jsou opět Cirrus Logic, Texas Instruments a Analog Devices. V navrženém D/A převodníku je použit prakticky nejvyšší model D/A převodníku od posledně jmenované firmy, tedy od Analog Devices. Navržený převodník je AD1955 a k dnešnímu dni není možné sehnat kvalitnější stereo D/A převodník pro potřeby nízkofrekvenční audio techniky. Jedná se o nástupce velmi kvalitního převodníku AD1853. Samozřejmostí tohoto převodníku je možnost softwarového řízení, bitová hloubka až 24 bitů a vzorkovací kmitočet až 192 kHz, což představuje stejně jako v případě přijímače S/PDIF značnou variabilitu výsledného zařízení. D/A převodník je nejkritičtější částí obvodů pro zpracování vstupních digitálních signálů a největší měrou ovlivňuje výslednou kvalitu výstupního analogového signálu. [3] [4]

Samozřejmě výstupní analogový signál z D/A převodníku není možné přímo odebírat koncovým zařízením a proto za blokem D/A převodníku následuje blok diferenčního zesilovače a aktivního rekonstrukčního filtru. Jedná se o poslední část v řetězci pro zpracování vstupního digitálního signálu a výstup z tohoto bloku je již klasický stereo výstup linkové úrovně, který může přebírat následný výkonový zesilovač, či sluchátkový zesilovač atd. Jedná o velmi zásadní blok v tomto řetězci zpracování vstupního digitálního signálu. Špatným výběrem operačních zesilovačů by došlo k okamžité degradaci vlastností bloků předešlých, tedy přijímače S/PDIF a D/A převodníku, a tím k degradaci kvality celého navrženého zařízení. Výrobce D/A převodníku doporučuje použít své naprosto špičkové operační zesilovače AD8599. Jedná se o duální operační zesilovače s ultra nízkým zkreslením a šumem. Jsou schopny pracovat až do 10 MHz. Velmi důležitým parametrem OZ v tomto zapojení je také rychlost přeběhu, která činí  $\pm 16 \text{ V}/\mu\text{s}$ . Po předchozích zkušenostech s těmito OZ, které byly často nestabilní a kmitaly se v návrhu a realizaci spíše uvažovalo o alternativních OZ od výrobce Texas Instruments, konkrétně o typ LME49720. Jedná se o totožné OZ a mohly tak být zaměněny jeden za druhý, bez jakékoliv změny v zapojení. Většinou svých parametrů navíc už tak velmi kvalitní OZ AD8599 překonává a jsou tedy ještě kvalitnější. Jejich doba přeběhu je až  $\pm 20 \text{ V}/\mu\text{s}$ , šířka pásma až 55 MHz. [5] [6]

Pro řízení činnosti laboratorního přípravku byl vybrán mikrokontrolér od firmy Texas Instruments. Konkrétně byl vybrán MSP430F5529 jedná se o velmi moderní 16

bitový mikrokontrolér, označován jako tzv. „Mixed signal microcontroller“. To znamená, že se jedná o pokročilý mikrokontrolér, který je schopen zpracovat i určité pokročilejší instrukce, které byly dříve doménou pouze signálových procesorů. Texas Instruments navíc tyto mikrokontroléry poskytuje s vývojovými kity za velmi přijatelnou cenu. Velkou výhodou těchto kitů je fakt, že se dají zároveň použít jako programátor pro externí mikrokontroléry řady MSP430FXXXX, jak bylo později s výhodou využito. Mikrokontrolér má širokou konektivitu, díky velkému množství vstupně výstupních pinů. Umožňuje komunikaci po SPI, což je pro navržené přípravek nezbytné, kdy pomocí SPI mikrokontrolér nastavuje přijímač S/PDIF, D/A převodník a také komunikuje s uživatelem pomocí připojeného OLED displeje a obou indikačních obvodů, které indikují konkrétní nastavení příslušných bitů řídicích registrů D/A převodníku a přijímače S/PDIF. Každý indikační obvod je složen ze dvou 8 bitových CMOS shift registrů 74HCT595. Velmi zajímavou vlastností nejen tohoto mikrokontroléru i celé řady MSP430FXXXX je extrémně malá spotřeba elektrické energie a tím velmi malé požadavky na napájení. [7] [8]

Připojený OLED displej s řadičem WS0010 dokáže komunikovat klasicky paralelně, ale volitelně i sériově včetně SPI. Ovšem proto aby displej byl schopný komunikovat po SPI, je nutné provést drobné změny přímo na DPS OLED displeje. Aby však celé zařízení bylo univerzálnější a v případě poškození displeje se nemusela vždy upravovat DPS displeje a přípravek tak dokázal komunikovat s jakýmkoliv běžným LCD displejem, který jinak jako paralelně komunikovat neumí, byl navržen jednoduchý převodník SPI na paralelní informaci. Tuto paralelní informaci je schopný zpracovat jakýkoliv běžný LCD displej s klasickým řadičem Hitachi. Tento převodník zároveň ušetří spoustu pinů na mikrokontroléru, které mohou být použity na jiné účely. V neposlední řadě SPI komunikace s displejem výrazně usnadní vývoj řídicího algoritmu navrženého zařízení. Převodník je tvořen podobně jako u indikačních obvodů opět dvěma jednoduchými 8 bitovými shift registry 74HCT595. Jedná se o klasický CMOS integrovaný obvod, který vyrábí spousta výrobců (NXP, Texas Instruments atd.) [12]

## 2 OBVODY PRO D/A PŘEVOD

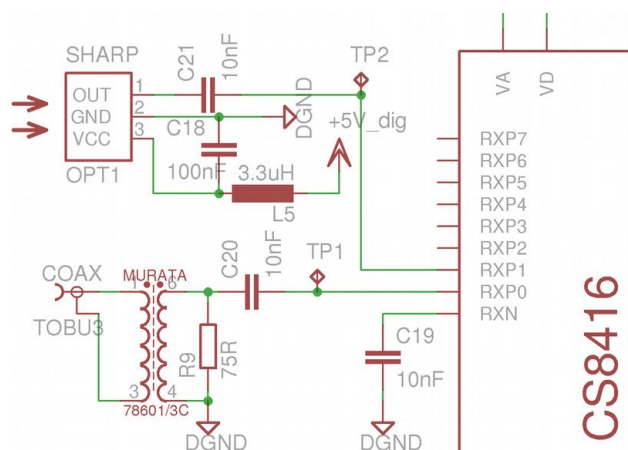
V navrženém laboratorním přípravku jsou tyto obvody patrně nejkritičtější částí. Za pomoci těchto obvodů je zařízení schopno přijmout vstupní digitální signál, zpracovat ho a převést ho do klasické linkové úrovně, která může být zpracována následným nízkofrekvenčním audio zesilovačem a nebo výstup z tohoto bloku může být využit přímo pro měřicí účely, jako tomu je u navrženého laboratorního přípravku. Samostatný D/A převodník není schopen veškerou tuto činnost zajistit sám a proto jsou obvody pro D/A převod složeny ze vstupní digitální části, přijímače S/PDIF, samotného D/A převodníku a následné jakostní analogové části, která je tvořena z diferenčních zesilovačů a aktivního rekonstrukčního filtru.

Obecným požadavkem návrhu na celý tento blok je schopnost zpracování vstupních digitálních signálů se vzorkovacím kmitočtem až 192 kHz a bitovou hloubkou až 24 bitů a to navíc s vysokou jakostí výsledného výstupního signálu. Protože se však jedná o laboratorní přípravek D/A převodníku, musí obvody D/A převodníku umožňovat nastavení nejrůznějších klíčových parametrů, jakými jsou právě například vzorkovací kmitočet, bitová hloubka, formát komunikace mezi přijímačem S/PDIF a vlastním D/A převodníkem a jiné mnohé další. Základní podmínkou pro splnění těchto požadavků na výsledný D/A převodník je použití prakticky té nejmodernější součástkové základny. Podrobný rozbor návrhu všech dílčích částí D/A převodníku spolu s rozбором a konkrétními kritérii na jednotlivé bloky, bude proveden v následujících podkapitolách.

### 2.1 Vstupní digitální část

Vstupní digitální část je částí stojící na úplném začátku řetězce zpracování digitálních vstupních signálů. Za pomoci této části je schopný následný S/PDIF přijímač detekovat vstupní signál z patřičné linky. Navržený laboratorní přípravek D/A převodníku je schopný detekce, příjmu a zpracování signálu z optické cesty a z cesty koaxiální. Tyto dva vstupy představují vstupní konektivitu celého navrženého zařízení.

V případě optického vstupu je za pomoci použitého optického přijímače Sharp transformována informace optická na informaci elektrickou, kterou dokáže bez problémů zpracovat následný přijímač S/PDIF CS8416. Velkou výhodou optického vedení je galvanické oddělení přijímače od vysílače, respektive přijímače od vedení. Tím je zajištěna dokonalá odolnost proti rušení a u takto komunikujících zařízení nemůže vzniku nežádoucí zemní smyčka mezi vysílačem a přijímačem. U koaxiálního vstupu, může být signál od vstupního RCA konektoru veden přímo na vstup následného přijímače S/PDIF. Nemusí docházet tedy k žádné transformaci vstupního signálu, protože v případě koaxiálního vedení je vysílač a přijímač propojen elektricky. Ovšem, jak je naznačeno na Obr. 2.1.1 a popsáno níže, není vhodné signál použít přímo a pro korektní činnost je nutné dodržet jisté obvodové zapojení tohoto koaxiálního vstupu.



Obr. 2.1.1: Zapojení vstupů u přijímače CS8416

Jako optický přijímač byl zvolen přijímač GP1FAV31RK0F od firmy Sharp. Jedná se o přijímač, ke kterému je možno připojit klasické optické kabely, které se vyskytují v běžné spotřební elektronice (Toslink). Jeho přenosová rychlost až 15,5 Mb/s jasně naznačuje, že pro potřeby audiotechniky je přijímač dostatečně rychlý a ani s nejvyšší možnou šířkou vstupního slova a s nejvyšší možnou vzorkovací frekvencí, pro kterou je zařízení navrženo, nebude mít optický přijímač jakýkoliv problém detekce vstupního digitálního signálu. Obvodové zapojení přijímače je snadné viz. Obr. 2.1.1, je nutné použít pouze klasický blokovací 100 nF kondenzátor mezi napájení a zem. Tímto blokovacím keramickým kondenzátorem dochází k odrušení VF složky z napájení. Na výstupu z optického přijímače je navíc ještě nutné použít 10 nF vazební kondenzátor. Tento kondenzátor doporučuje výrobce přijímače S/PDIF Cirrus Logic, ke korektnímu ošetření vstupního pinu jeho integrovaného obvodu CS8416. Použití tlumivky od napájení optického přijímače doporučuje naopak výrobce optického přijímače Sharp. Velikost indukčnosti cívky není kritická a standardně se volí několik  $\mu\text{H}$  (např. 3,3  $\mu\text{H}$ ). Důležitější je však odpor této tlumivky, ten by měl být co možná nejmenší. Tlumivky s odporem cca 0,5  $\Omega$  jsou bez problémů použitelné. Použití tlumivky však není nezbytně nutné. [1] [2]

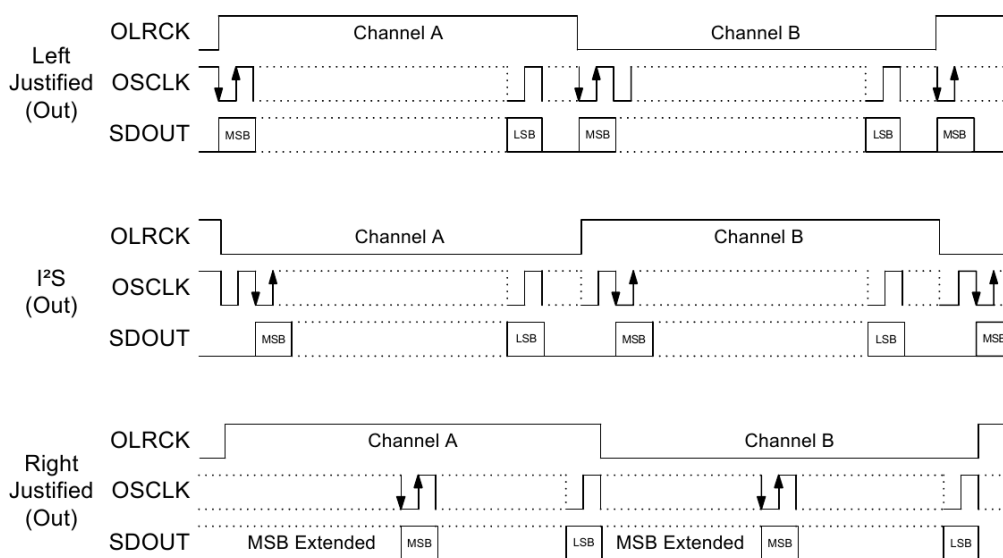
Návrh koaxiálního vstupu ve srovnání s optickým vyžaduje dodržení jistých zásaditostí. V případě nedodržení těchto zásaditostí nebude připojené zařízení přes tuto vstupní linku pracovat korektně. Jako vstupní konektor je použit klasický RCA Cinch konektor, ke kterému se připojuje klasický 75  $\Omega$  koaxiální kabel. Na rozdíl od optických přijímačů, je zde nutné uvažovat možný vznik zemní smyčky a za pomoci vhodného zapojení tohoto vstupu, je nutné tuto zemní smyčku eliminovat. Pro správnou a korektní činnost tohoto vstupu je nezbytně nutné zajistit galvanické oddělení následného přijímače S/PDIF resp. celého zařízení od vedení. Případná zemní smyčka by způsobila síťové rušení v celém zařízení a ve výstupu D/A převodníku by se objevil síťový kmitočet 50 Hz případně další harmonické. V obou případech by se to projevilo velmi nepříjemným brumem ve výstupním analogovém signálu D/A převodníku. Vysílač je s přijímacím konektorem spojen elektricky prostřednictvím koaxiálního kabelu. Ke galvanickému oddělení následných obvodů dochází ihned za vstupním RCA konektorem prostřednictvím použitého pulzního transformátoru od společnosti Murata Power. Jedná se o pulzní transformátor 78601/3C s poměrem 1:1 viz. Obr. 2.1.1. Mezi výstupy z transformátoru je umístěn ještě přizpůsobovací 75  $\Omega$  rezistor, kterým je zajištěno impedanční přizpůsobení vstupu vůči impedanci vedení (75  $\Omega$  koaxiální

vedení), čímž se eliminují případné odrazy na vedení, které by vlivem nepřizpůsobení vznikaly na vstupu a přechází tak 100% energie z vedení do vstupního pinu přijímače S/PDIF. [2] [9]

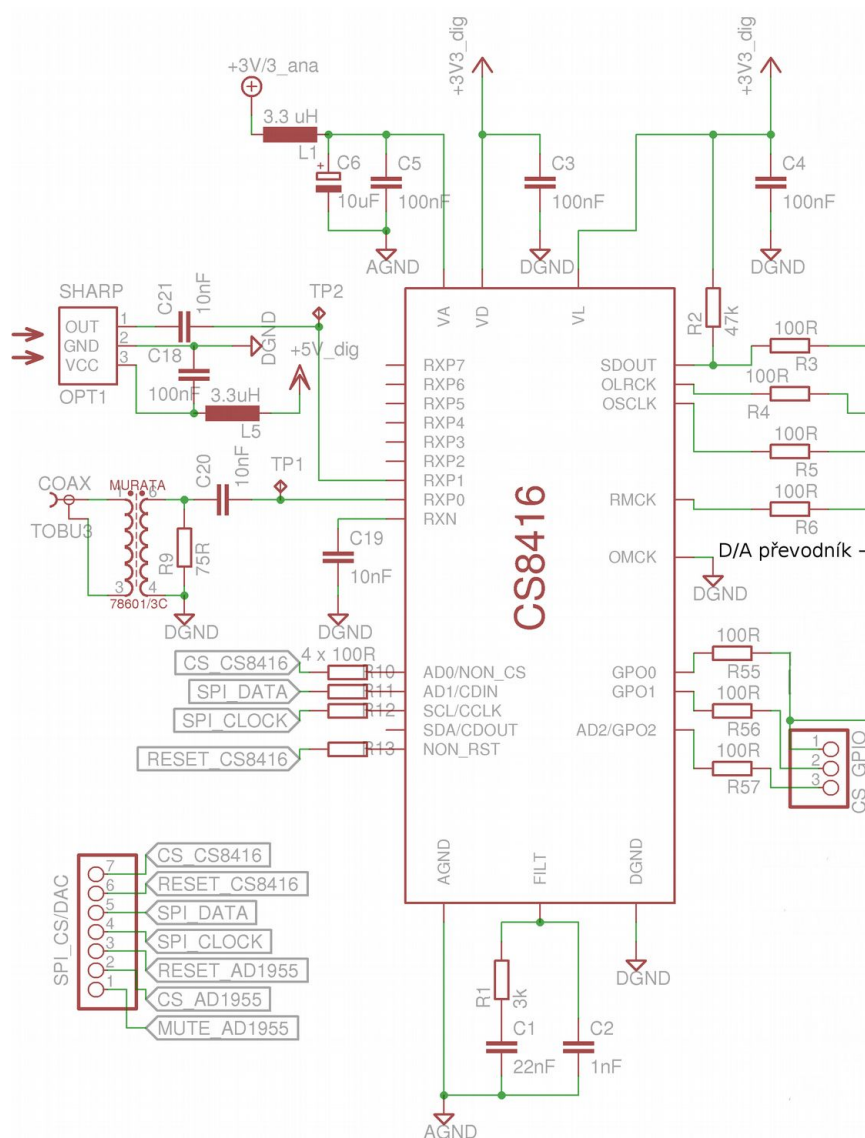
## 2.2 Rozhraní a přijímač S/PDIF

S/PDIF nebo také S/P-DIF jsou zkratky pro Sony/Philips Digital InterFace nebo někdy méně známé označení jako Sony/Phillips Digital Interconnect Format. Jedná se o soubor pravidel, nařízení a zejména protokolů pro přenos digitálně kódovaného audiosignálu mezi různými audio zařízeními. Formát dat digitálního audiosignálu je stanoven normou IEC958. Data mohou být přenášena v profesionálním módu tzv. AES3 a nebo ve spotřebitelském módu tzv. S/PDIF. Hlavní rozdíl mezi těmito módy je zejména v napěťových úrovních přenášeného signálu. Pro navržený D/A převodník je důležitý spotřebitelský mód S/PDIF (Toslink, koaxiál), pro který je D/A převodník navržen. Technologicky se může signál S/PDIF přenášet elektrickou cestou (koaxiální kabel) a nebo cestou optickou (Toslink optický kabel). Obě tyto varianty jsou použity v navrženém zařízení, jak bylo uvedeno v kap. 2.1. [10]

Obecná funkce přijímače S/PDIF je v příjmu signálu ze vstupu ať z cesty optické a nebo elektrické a převodu tohoto vstupního digitálního signálu na formát, který je schopný zpracovat následný D/A převodník. Standardní mód komunikace mezi přijímačem S/PDIF a D/A převodníkem je I<sup>2</sup>S. Existují však další módy komunikace jakými jsou Right Justified (tzv. pravé zarovnání bitů) a Left Justified (tzv. levé zarovnání bitů). Protože navržené zařízení laboratorního přípravku D/A převodníku má sloužit pro měřicí účely a má být různě nastavitelné, je možné za pomoci použitého interního mikrokontroléru MSP430F5529 libovolně nastavovat formát komunikace mezi těmito dvěma zařízeními, viz. Obr. 2.2.1.



Obr. 2.2.1: Formáty komunikace přijímače S/PDIF a D/A převodníku, převzato [2]



Obr. 2.2.2: Schéma zapojení přijímače S/PDIF CS8416

Jako nejvhodnější přijímač S/PDIF pro navržené zařízení byl zvolen přijímač CS8416 od firmy Cirrus Logic. Jedná se přijímač, který splňuje veškeré požadavky návrhu. Je schopen zpracovat vstupní signály se vzorkovacím kmitočtem až 192 kHz a s rozlišením až 24 bitů. Jedná se o vysoce kvalitní integrovaný obvod, který je schopen pracovat ve dvou pracovních režimech. Schéma zapojení integrovaného obvodu CS8416 viz. Obr. 2.2.2 vychází z doporučení výrobce nacházejících se v katalogovém listu k tomuto obvodu. [2]

Prvním pracovním režimem je tzv. hardwarový režim, kdy se funkce integrovaného obvodu přijímače nastaví připojením 47 k rezistorů u příslušných pinů integrovaného obvodu na potenciál země, či potenciál +5V. Funkce obvodu v tomto režimu jsou značně omezené a takto zapojený přijímač by byl pro potřeby navrženého zařízení naprosto nevhodný z důvodu nemožnosti přenastavení činnosti tohoto přijímače dle potřeb měření. Výhodou tohoto režimu je však snadnější použití tohoto obvodu

přijímače a nepotřebnost mikrokontroléru, který by řídil jeho chod. Takové zapojení může být s výhodou použito v D/A převodnících, pro špičkový domácí poslech, kde není třeba přenastavovat činnost obvodu. [2]

Druhý pracovní režim přijímače CS8416 je daleko zajímavější a pro potřeby navrženého D/A převodníku je to nutný režim, ve kterém musí přijímač pracovat. Umožňuje řízení své činnosti za pomoci mikrokontroléru, se kterým komunikuje prostřednictvím I2C nebo SPI a nazývá se jako tzv. režim softwarový. V navrženém zařízení bude využita komunikace mezi přijímačem a použitým mikrokontrolérem MSP430F5529 po SPI lince. O tom zda obvod pracuje v HW nebo SW režimu rozhoduje jeden konkrétní rezistor o hodnotě 47 k u pinu CS8416 nazvaného jako SDOUT. Pokud se rezistor R2 připojí svojí druhou částí na potenciál země, tak přijímač S/PDIF pracuje v HW režimu. V případě připojení rezistoru na potenciál +5V pracuje obvod v SW režimu, viz. Obr. 2.2.2. [2]

V SW režimu se funkce většiny pinů CS8416 oproti HW režimu naprosto mění a obvod je schopný zpracovat signály až z 8 vstupů (RXP0 - RXP7), mezi kterými přepíná a vybírá tak požadovaný vstupní signál, který má být dále zpracován. V HW režimu lze k přijímači S/PDIF připojit pouze 4 vstupy. Navíc v SW režimu poskytuje obvod i 3 piny označované jako GPO (General Purpose Output) a jejich funkce a činnost je modifikovatelná za pomoci řídicího algoritmu od mikrokontroléru, což poskytuje další možnost a rozšiřuje tak možné funkce přijímače S/PDIF. Z důvodu univerzálnosti přijímače a celého navrženého zařízení jsou tyto výstupní piny přijímače vyvedeny na patici a mohou tak být využity jako například vstupní piny mikrokontroléru. Na jejichž základě mikrokontrolér například utlumí (MUTE = 1) D/A převodník v případě absence či chyby vstupního S/PDIF signálu. Pro ještě větší univerzálnost návrhu byl vyveden pin GPO0 přímo na vstupní pin MUTE D/A převodníku AD1955. Tímto opatřením dochází k přímému utlumení výstupu D/A převodníku (bez zásahu mikrokontroléru) v případě výpadku, či absence platného vstupního S/PDIF signálu. Možnost funkce těchto GPO pinů je poměrně široká a uvedena v Tab. 2.2.1

Tab. 2.2.1: Konfigurace GPO pinů obvodu CS8416, převzato [2]

| Function | Code | Definition                                                                                                                                            |
|----------|------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| GND      | 0000 | Fixed low level                                                                                                                                       |
| EMPH     | 0001 | State of $\overline{\text{EMPH}}$ bit in the incoming data stream.                                                                                    |
| INT      | 0010 | CS8416 interrupt output                                                                                                                               |
| C        | 0011 | Channel status bit                                                                                                                                    |
| U        | 0100 | User data bit                                                                                                                                         |
| RERR     | 0101 | Receiver Error                                                                                                                                        |
| NVERR    | 0110 | Non-Validity Receiver Error                                                                                                                           |
| RCBL     | 0111 | Receiver Channel Status Block                                                                                                                         |
| 96KHZ    | 1000 | If the input sample rate is $\leq 48$ kHz, outputs a "0". Outputs a "1" if the sample rate is $\geq 88.1$ kHz. Otherwise the output is indeterminate. |
| AUDIO    | 1001 | Non-audio indicator for decoded input stream                                                                                                          |
| VLCK     | 1010 | Virtual LRCK. Can be used to frame the C and U output data.                                                                                           |
| TX       | 1011 | Pass through of AES/SPDIF input selected by TXSEL[2:0] in the Control 4 register (04h)                                                                |
| VDD      | 1100 | VDD fixed high level                                                                                                                                  |
| HRMCK    | 1101 | $F_S \times 512$ (Note 1)                                                                                                                             |

Codes 1110 to 1111 - Reserved

|       |            |            |            |          |          |          |          |
|-------|------------|------------|------------|----------|----------|----------|----------|
| 7     | 6          | 5          | 4          | 3        | 2        | 1        | 0        |
| DETCI | EMPH_CNTL2 | EMPH_CNTL1 | EMPH_CNTL0 | GPO0SEL3 | GPO0SEL2 | GPO0SEL1 | GPO0SEL0 |

Obr. 2.2.3: 2. řídicí registr obvodu CS8416, převzato [2]

O tom, která funkce připadne GPO0 pinu rozhodují 4 nejnižší bity 2. řídicího registru obvodu CS8416 a aby docházelo k utlumení výstupu D/A převodníku, v situaci popsané výše, je nutné zvolit funkci označenou AUDIO a nastavit tak onu čtveřici nejnižších bitů na hodnotu 1001. [2]

## 2.2.1 Popis zapojení přijímače S/PDIF CS8416

Zapojení přijímače CS8416 uvedené na Obr. 2.2.2 vychází z doporučení výrobce Cirrus Logic a je modifikováno pro potřeby navrženého D/A převodníku. Klíčovou částí návrhu přijímače je vedení napájení a separace zemí. Integrovaný obvod CS8416 striktně vyžaduje separaci napájení svých analogových a digitálních částí. Stejná, ne-li ještě důležitější, je separace zemí. Pokud by nedošlo k separaci zemí a napájení jednotlivých částí, obvod by mohl být nestabilní a nebo pracovat zcela nekorektně. Také by nemuselo dojít k zachycení PLL filtru. Pro správnou činnost je proto nezbytné tyto požadavky integrovaného obvodu dodržet. [2]

Propojení tzv. „analogové“ a „digitální“ země je zajištěno prostřednictvím klasické tlumivky. Může být použita naprosto stejná tlumivka, jaká byla použita ve vstupní digitální části. Opět je důležitý především její ohmický odpor. Ten by neměl být větší než 0,5  $\Omega$ .

U obou napájecích větví přijímače je nutné, kromě samostatného vedení těchto napájení, ještě zařadit mezi zem a toto napájení 100 nF keramické kondenzátory, viz. Obr. 2.2.2. Ty slouží jako blokovací kondenzátory pro odstranění VF rušení, které by mohlo do obvodu pronikat ze sítě. V případě napájení pro analogové části obvodu výrobce doporučuje použít k tomuto blokovacímu kondenzátoru ještě druhý kondenzátor tantalový. Velikost kapacity tohoto tantalového kondenzátoru by dle doporučení měla být okolo 10  $\mu$ F.

U všech vstupních a výstupních pinů (kromě vstupů RXP0 – RXP7) jsou z důvodu jejich ochrany použity sériově malé ochranné rezistory. Jejich použití však není nutné a jejich ohmická hodnota není kritická. Obecně se pro ošetření digitálních vstupů a výstupů mohou použít rezistory od několika desítek ohmů až po několik stovek ohmů. V návrhu a následné realizaci byly pro ostření vstupů použity 100  $\Omega$  rezistory, viz. Obr. 2.2.2.

Velmi důležitým a kritickým návrhem přijímače S/PDIF je filtr PLL (tzv. fázový závěs), viz. Obr. 2.2.2. Jedná se o externí filtr pro obvod fázového závěsu. Za pomoci tohoto externího filtru je ze vstupního signálu generován hodinový signál RMCK pro následný D/A převodník. O funkčnosti či nefunkčnosti celého D/A převodníku rozhoduje právě zachycení tohoto PLL filtru na vstupní signál. Proto musí být použity součástky té nejvyšší kvality. Jsou použity keramické kondenzátory z nejkvalitnějšího materiálu (NPO) s nejmenšími parazitními vlastnostmi a rezistor s co možná nejmenší tolerancí a ohmickou hodnotou, která přesně odpovídá požadovaným 3 k $\Omega$ . Hodnoty součástek do bloku PLL filtru doporučuje výrobce přijímače Cirrus Logic. Kromě hodnot použitých součástek je dále nezbytné nutné připojit PLL filtr na analogovou



zem. Při návrhu DPS je nutné, aby prvky PLL filtru byly u sebe co nejblíže a byly zároveň co možná nejblíže samotnému integrovanému obvodu přijímače. Zároveň v okolí PLL filtru nesmí být veden žádný digitální signál a pod všemi součástkami PLL filtru musí být dokonale „rozlita“ zem. Jedině všemi těmito kroky návrhu je zajištěna dokonalá funkčnost PLL filtru, schopnost zachycení na vstupní signál a generace hodinového signálu pro následný D/A převodník. [2] [4]

Piny pro SPI komunikaci mezi přijímačem a mikrokontrolér MSP430F5529 jsou vyvedeny na příslušné piny patice, ke kterým je připojen mikrokontrolér. Kromě pinů pro SPI komunikaci je na společnou patici s D/A převodníkem vyveden ještě RESET pin přijímače CS8416, viz. Obr. 2.2.2., kterým je přijímač podle potřeby zresetován a nastaven do své výchozí hodnoty.

## 2.3 D/A převodník

Převodník určený pro převod signálu z digitální podoby vstupního signálu na výstupní analogový signál je předposledním blokem v řetězci D/A převodu. Jeho vstupním signálem je výstupní signál přijímače S/PDIF. Výstupní analogový signál z D/A převodníku však nelze použít k buzení koncových zesilovačů a proto je ještě výstupní analogový signál z D/A převodníku dále zpracováván blokem diferenčních zesilovačů a aktivního rekonstrukčního filtru. Teprve tento výstupní analogový signál po převodu vstupní digitální informace je možné použít k buzení například koncových výkonových zesilovačů nebo, jako v případě navrženého zařízení, použít tento výstup pro měřicí účely. D/A převodníků existuje celá řada lišící se kvalitou, počtem zpracovávaných kanálů, principem převodu digitální informace na analogovou atd.. Kvalita použitého D/A převodníku má zásadní vliv na výslednou kvalitu celého zařízení. Proto byl vybrán D/A AD1955 od renomovaného výrobce Analog Devices. Jedná se o velmi moderní stereo D/A převodník, který nejen svou kvalitou převodu, ale i svými ostatními parametry předčí dnes běžně dostupné D/A převodníky pro nízkofrekvenční audio techniku. Přesněji se jedná o špičkový  $\Sigma$ - $\Delta$  stereo D/A převodník, který je schopen zpracovat vstupní signály se vzorkovacím kmitočtem až 192 kHz a bitovou hloubkou vstupního slova až 24 bitů, což je pro potřeby návrhu laboratorního přípravku D/A převodníku nezbytnost. Převodník AD1955 nahrazuje velmi úspěšný a neméně kvalitní AD1853. Výhodou AD1955 oproti AD1853 jsou především širší možnosti v nastavení parametrů pomocí sériové komunikace s mikrokontrolérem. Naopak výhodou AD1853 je možnost použít tento převodník v HW režimu, což použitý převodník AD1955 neumožňuje. Pro potřeby navrženého laboratorního přípravku D/A převodníku je ovšem nezbytné využít SW režim převodníku. Pro přehlednost jsou klíčové parametry použitého převodníku AD1955 uvedeny v Tab. 2.3.1 a Tab. 2.3.2. [3] [4]

Tab. 2.3.1: Parametry převodníku AD1955

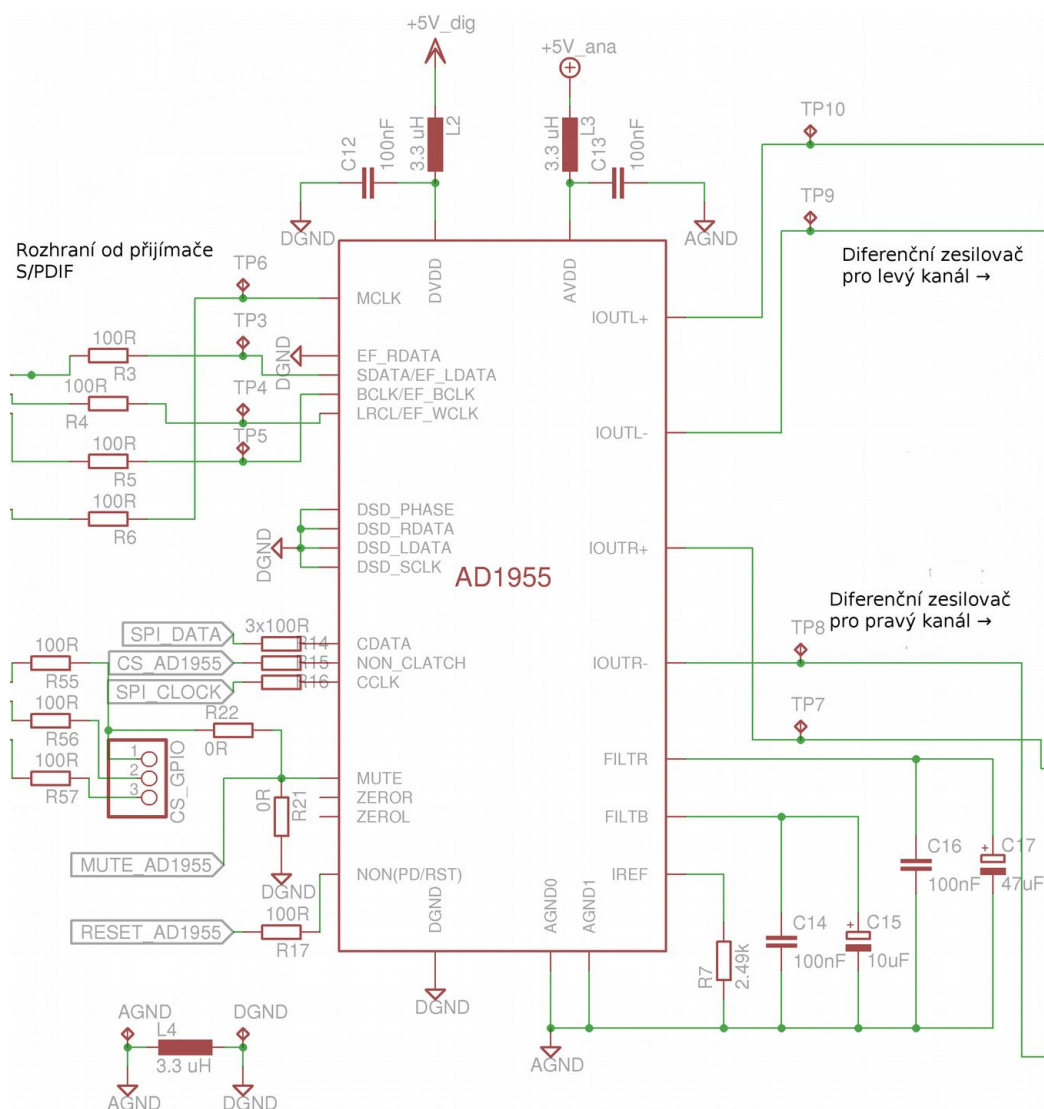
|                                 |                            |
|---------------------------------|----------------------------|
| Akceptuje vzorkovací kmitočet   | 32/44.1/48/88.2/96/192 kHz |
| Akceptuje šířku vstupního slova | 16/18/20/24 bitů           |
| Akceptuje vstupní formát        | Left/right justified, I2S  |
| Převzorkování                   | 48/96/192 kHz              |

Tab. 2.3.2: Parametry převodníku AD1955, pokračování

|                           |                        |
|---------------------------|------------------------|
| Odstup signál/šum SNR     | 120 dB                 |
| Akceptuje hodinový signál | 256·fs, 512·fs, 768·fs |
| Sériové řízení činnosti   | SPI                    |

### 2.3.1 Popis zapojení D/A převodníku AD1955

Schéma zapojení D/A převodníku AD1955 je uvedeno na Obr. 2.3.1. Zapojení vychází z doporučení výrobce převodníku. Pro zapojení zde platí velmi podobné pravidla jako při zapojení přijímače S/PDIF. Stejně jako u přijímače i zde je nutno separovat napájení a země digitálních a analogových částí převodníku. Propojení digitálních a analogových zemí je opět řešeno prostřednictvím malé tlumivky o malém ohmické odporu. Mezi napájení a zem je, opět podobně jako u přijímače CS8416, zapojen blokovací 100 nF keramický kondenzátor. Pro ještě dokonalejší odrušení napájecích pinů AD1955 od napájecích obvodů může být zařazena sériová tlumivka nebo malý feritový prstenec. Zapojení samotného digitálně analogového převodníku je díky použití SW režimu toho převodníku velmi snadné a veškeré nastavení převodníku obstarává až následný řídicí algoritmus. [3]



Obr. 2.3.1: Schéma zapojení D/A převodníku AD1955

Vstupem vlastního D/A převodníku je čtveřice pinů s názvy MCLK, SDATA, BCLK, LRCLK. Pomocí těchto čtyř vstupních pinů je zajištěna komunikace mezi S/PDIF přijímačem a vlastním D/A převodníkem.

- MCLK → je pin určený pro připojení hlavního hodinového signálu (Master Clock).
- SDATA → je pin určený pro příjem vlastních sériových dat přicházejících od dekodéru CS8416
- LRCLK → je pin určený pro příjem hodinového signálu levého a pravého kanálu vstupních sériových dat
- BCLK → je pin určený pro příjem tzv. Bitových hodin vstupního signálu

Pro ošetření a ochranu všech vstupních a výstupních digitálních (datových) pinů je vždy opět sériově zařazen 100  $\Omega$  ochranný rezistor. Nevyužité vstupy převodníku je možné připojit přímo na „digitální“ zem.

Na stejnou patici pinů, kterou využívá přijímač S/PDIF jsou vyvedeny piny AD1955 určené pro SPI komunikaci s mikrokontrolérem. Rozpoznání, zda-li příchozí sériové data jsou určena pro převodník nebo přijímač S/PDIF, je zajištěno patřičnými chip select (CS) signály, které jsou pro každý obvod na SPI lince vedeny samostatně. Krátký puls na tomto vstupním pinu SPI komunikace zajistí zapsání příchozích dat do patřičného registru daného obvodu. Mimo piny SPI rámce je na patici veden opět i RESET samotného převodníku a navíc také pin MUTE. Pomocí tohoto vstupního pinu převodníku, konkrétně vysokou úrovní na tomto pinu, může být výstup převodníku okamžitě ztišen. Této možnosti je využito s výhodou v situaci pokud přijímač S/PDIF nepracuje korektně a nebo pokud nemá na svém vstupu korektní data. Pokud by nebyl D/A převodník přiveden do režimu MUTE, objevoval by se na výstupu celého D/A převodníku nekorektní a pro poslech velmi nepříjemný signál, který by představoval nesmyslné data, které by přejímal převodník od přijímače S/PDIF v době jeho chyby či nepřipojení vstupního S/PDIF signálu.

Zapojení součástek u pinů IREF, FILTB a FILTR vychází z katalogového listu. Jejich hodnota musí být striktně dodržena podobně jako tomu bylo u PLL filtru přijímače S/PDIF. Rezistorem R7 u pinu IREF se nastavuje přesná referenční hodnota proudu pro výstupní pin označený FILTR. [4]

Protože převodník není napájen symetricky, ale pouze jednoduchým napájením +5V, nemůže na svém výstupu nabývat záporných hodnot výstupního signálu a docházelo by tak k ořezávání záporné půl vlny výstupního audio signálu, což by mělo za následek naprosté znehodnocení tohoto signálu. Proto je na pinu FILTR vytvořeno přesné SS napětí 2,39 V. Tímto napětím je výstup převodníku posunut o 2,39 V směrem nahoru, čímž se zajistí neořezávání záporné půl vlny výstupního audio signálu. Pro následující diferenční zesilovače a aktivní rekonstrukční filtr tato napěťová úroveň 2,39 V představuje nulovou úroveň. Tímto posunem vzhůru se zajistí bezproblémový rozkmit výstupního signálu z D/A převodníku a zamezí se tak jakékoliv limitaci tohoto výstupního signálu, který začnou dále zpracovávat operační zesilovače diferenčních zesilovačů a aktivního rekonstrukčního filtru následné jakostní analogové části D/A převodníku. [4]

Druhou, spolehlivější a kvalitnější metodou, jak posunout výstupní úroveň a vytvořit tak referenci pro diferenční zesilovače, je předřadit operačním zesilovačům v bloku diferenčních zesilovačů a aktivního rekonstrukčního jednoduchý dělič napětí. Na výstupu tohoto děliče bude výstupní napěťová úroveň 2,8 V. Pro dosažení co možná nejlepších výsledků a parametrů D/A převodníku je doporučena právě tato metoda posuvu výstupního napětí. [4]

## 2.4 Diferenční zesilovače a aktivní rekonstrukční filtr

Diferenční zesilovače a následný aktivní rekonstrukční filtr jsou posledním blokem v řetězci zpracování a převodu vstupního digitálního signálu (S/PDIF) do klasické analogové podoby linkové úrovně, kterou mohou poté již zpracovávat běžné nízkofrekvenční výkonové zesilovače. Kvalita tohoto bloku výrazně ovlivňuje výslednou kvalitu celého D/A převodu. Špatným návrhem, případně špatnou volbou součástkové základny, především výběrem nevhodných či nekvalitních operačních zesilovačů, může dojít k naprosté degradaci výsledného signálu a tím k degradaci

předešlých obvodů přijímače a D/A převodníku. Proto jsou na použité operační zesilovače kladeny značné kvalitativní požadavky. Navržený blok diferenčních zesilovačů a aktivního rekonstrukčního filtru je postaven na naprosto špičkových duálních operačních zesilovačích LME49720 od společnosti Texas Instruments. Jako velmi dobrou alternativou těchto operačních zesilovačů od společnosti Texas Instruments mohou být operační zesilovače, které jsou doporučovány samotným výrobcem D/A převodníku, tedy společností Analog Devices. Jedná se opět o duální operační zesilovač typu AD8599. Výhodou obou těchto typů operačních zesilovačů je vzhledem ke stejnému typu pouzdra (SOIC8) a stejné vnitřní struktuře integrovaného obvodu operačního zesilovače jejich vzájemná zaměnitelnost bez potřeby jakkoliv zasahovat do zapojení nebo DPS tohoto bloku. Klíčové parametry obou modelů operačních zesilovačů jsou uvedeny v Tab. 2.4.1, respektive v Tab. 2.4.2. [4] [5] [6]

Tab. 2.4.1: Parametry operačního zesilovače LME49720

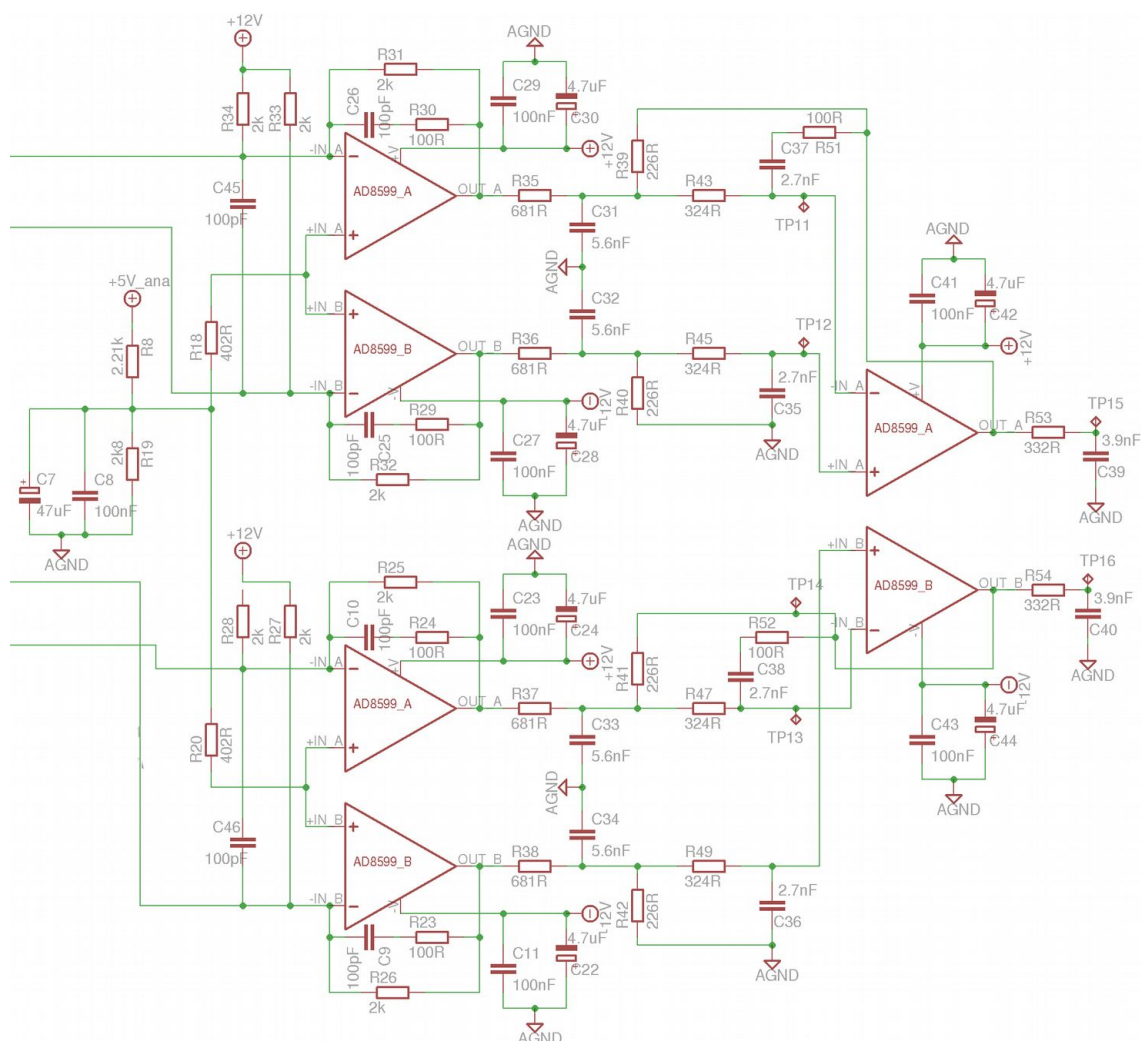
|                   |                      |
|-------------------|----------------------|
| Šum               | 2,7 nV/√Hz při 1 kHz |
| Zkreslení         | 0,000003%            |
| CMRR              | 120 dB               |
| Rychlost přeběhu  | -+20 V/μs            |
| Kmitočtový rozsah | 55 MHz               |

Tab. 2.4.2: Parametry operačního zesilovače AD8599

|                   |                    |
|-------------------|--------------------|
| Šum               | 1 nV/√Hz při 1 kHz |
| Zkreslení         | 0,0004%            |
| CMRR              | 120 dB             |
| Rychlost přeběhu  | -+16 V/μs          |
| Kmitočtový rozsah | 10 MHz             |

Pokud budou operační zesilovače srovnány na základě údajů, které jsou uvedeny v jejich datasheetech a v Tab. 2.4.1 a Tab. 2.4.2., jeví se lepší volbou použití operačního zesilovače LME49720 od společnosti Texas Instruments. LME49720 dosahuje ve srovnání s AD8599 od společnosti Analog Devices, menšího zkreslení, má mnohem větší šířku pásma a také je, vzhledem k jeho době přeběhu, rychlejší. Naopak důvodem použití AD8599 může být jeho nižší šum a naprosto stejná hodnota parametru CMRR. Šířka pásma operačního zesilovače 10 MHz je pro potřeby audiotechniky také naprosto dostačující. U obou operačních zesilovačů by nemělo napájecí napětí přesáhnout +-18 V. Schéma zapojení diferenčního zesilovače a aktivního rekonstrukčního filtru je uvedeno na Obr. 2.4.1. [5] [6]

Z klíčových parametrů obou typů operačních zesilovačů je patrné, že se jedná o velmi kvalitní obvody, jejichž parametry jsou nejen pro potřeby navrženého bloku, ale i celého zařízení laboratorního přípravku D/A převodníku, více než dostatečné. Postupně byly použity a osazeny oba typy operačních zesilovačů. V případě operačních zesilovačů AD8599 se obavy z rozkmitání, či z jiné nekorektní činnosti zesilovačů vzhledem k předchozím zkušenostem nepotvrdily a celý D/A převodník od prvního zapojení s těmito operačními zesilovači pracoval zcela korektně. Zcela korektně pracoval však i výstup z D/A převodníku v situaci, kdy byly osazeny operační zesilovače LME49720. Vzhledem k těmto zkušenostem a nepatrně lepším šumovým parametrům operačních zesilovačů AD8599, viz. Tab. 2.4.2, bylo rozhodnuto o konečném osazení právě těchto operačních zesilovačů v laboratorním přípravku D/A převodníku.



Obr. 2.4.1: Schéma zapojení diferenčních zesilovačů a aktivního rekonstrukčního filtru

## 2.4.1 Návrh bloku diferenčních zesilovačů a aktivního filtru

Schéma zapojení tohoto bloku vychází z doporučení uvedených v katalogovém listu D/A převodníku AD1955. Jak bylo uvedeno a zdůvodněno v kap.2.3.1 o zapojení D/A

převodníku, tak napěťová reference, která složí pro posuv výstupního signálu D/A převodníku, není diferenčními zesilovači přejímána z pinu FILTER D/A převodníku, ale z jednoduchého předřazeného děliče napětí. Tímto posuvem napětí směrem vzhůru je vytvořena jakási nulová úroveň napětí o hodnotě 2,8 V a výstupní signál z D/A převodníku tak může nabývat jak záporných hodnot v rozmezí 0 V až 2,8 V, tak také kladných hodnot v rozsahu od 2,8 V do 5 V, čímž je zajištěn dokonalý rozkmit výstupního napětí z D/A převodníku a nemůže tak dojít k situaci, kdy by výstupní signál z D/A převodníku narazil na meze napájení, projevující se ořezáním špiček a limitací výstupního signálu z D/A převodníku. [4]

Kromě velmi kvalitních operačních zesilovačů je nutné zvolit neméně kvalitní ostatní součástky v tomto bloku. Pro dosažení nejlepších parametrů diferenčních zesilovačů a aktivního rekonstrukčního filtru je nutné zařadit do cesty audio signálu co možná nejkvalitnější kondenzátory s co možná nejmenšími parazitními vlastnostmi. U klasických keramických kondenzátorů, u kterých je jejich keramické dielektrikum tvořeno hmotou X7R nebo ještě hůře hmotou Y5V, dochází při změně napětí také ke změně jejich kapacity, což by se negativně projevilo na zpracovávaném audio signálu, do kterého by se tak vnášelo nežádoucí zkreslení. Obecně je proto doporučeno použití velmi kvalitních svitkových kondenzátorů, které mají mnohem menší negativní vliv na audio signál, který nimi prochází, než-li mají tyto klasické keramické kondenzátory. Špičkové svitkové kondenzátory, které by bylo možné použít v tomto bloku D/A převodníku jsou kondenzátory značky WIMA. Druhou možností je použít moderní keramické kondenzátory, nikoliv však s dielektrikem z hmoty X7R nebo Y5V, ale se špičkovou hmotou NPO. U kondenzátoru tvořeného dielektrikem s hmotou NPO se již neprojevují nežádoucí parazitní vlastnosti jako tomu je u klasických keramických kondenzátorů a mohou tak být použity přímo v cestě signálu. Výhodou oproti svitkovým kondenzátorům je navíc jejich velikost. Vzhledem k tomu, že navržené zařízení má být postaveno v co možná největší míře na SMD prvcích. S přihlédnutím do katalogového listu převodníku AD1955, kde výrobce popisuje blok diferenčních zesilovačů a aktivního rekonstrukčního filtru, je patrné, že i sám výrobce Analog Devices doporučuje použití těchto špičkových keramických kondenzátorů. [15]

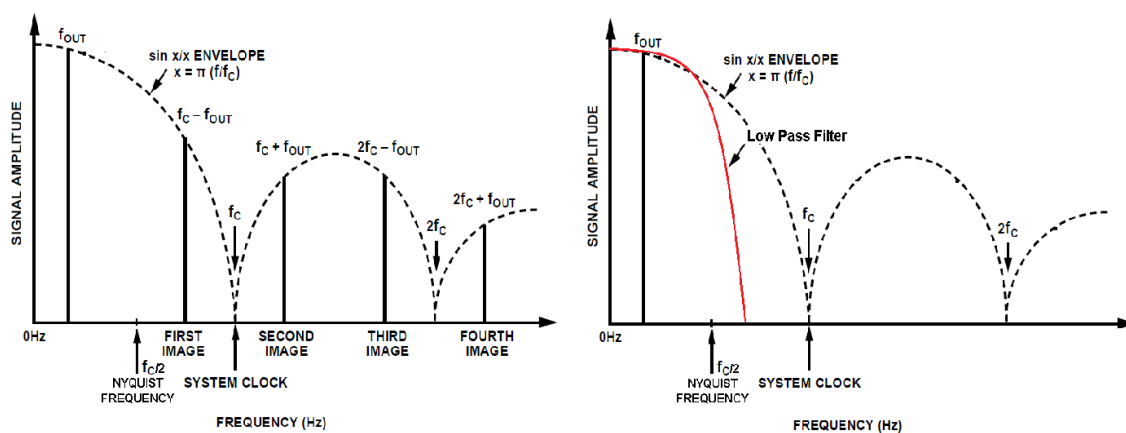
## 2.4.2 Návrh bloku aktivního rekonstrukčního filtru

Blok aktivního rekonstrukčního filtru je úplně poslední částí v řetězci převodu vstupního digitálního signálu na signál analogový. Schéma zapojení aktivního rekonstrukčního filtru vychází stejně jako zapojení diferenčních zesilovačů z doporučení výrobce převodníku AD1955. Použitá součástková základna je totožná a jsou na ni kladeny stejné kvalitativní nároky jako v případě diferenčních zesilovačů. Je proto použit stejný typ operačního zesilovače a v cestě zpracovávaného audio signálu jsou opět použity keramické kondenzátory s dielektrikem z hmoty NPO, důvod použití je uveden v kap.2.4.1. Blok aktivního rekonstrukčního filtru přímo navazuje na výstupy obou diferenčních zesilovačů. Z výstupů obou diferenčních zesilovačů filtr přebírá příslušný levý nebo pravý kanál stereo audio signálu. Výstupem aktivního rekonstrukčního filtru je čistý, vyfiltrovaný stereo analogový signál, v jehož výstupním spektru se již neobjevují žádné harmonické složky, které by odpovídaly diskretním signálům předešlých digitálních obvodů, které tyto diskretní složky do spektra svou činností vnesly. [4] [15]

Jak plyne ze vzorkovacího teorému výstupem D/A převodníku nemůže být spojitý analogový signál, jehož kmitočet by byl větší než polovina vzorkovacího kmitočtu, se kterým pracuje vlastní D/A převodník. Použitý typ D/A převodníku akceptuje 48 kHz jako nejmenší hodnotu kmitočtu pro převzorkování. Tím teoreticky na výstupu celého D/A převodníku při tomto nejmenší převzorkování nemůže být spojitý analogový signál s kmitočtem větším než je 24 kHz. Hodnota 24 kHz je však pro potřeby audiotechniky naprosto dostačující. Protože je D/A převodník diskretní systém (systém pracující s diskretními signály), dochází vlivem jeho činnosti k tzv. periodizaci výstupního spektra a ve výstupním spektru D/A převodníku se tak objevují periodicky se opakující obrazy základního kmitočtu. Navíc jsou tyto obrazy základního kmitočtu symetrické a o zrcadlené přes polovinu vzorkovacího kmitočtu (Nyquistův kmitočet). Tyto ozrcadlené a periodicky se opakující složky spektra jsou však ve výstupním spektru nežádoucí a je nutné je vhodným způsobem potlačit a odfiltrovat. Tento problém řeší právě použití výstupního aktivního rekonstrukčního filtru, který pro kmitočty nad polovinou vzorkovacího kmitočtu představuje filtr typu dolní propust, čímž dochází k výraznému potlačení těchto nežádoucích vyšších harmonických ve výstupním spektru D/A převodníku. Ideální rekonstrukční filtr by přenášel kmitočty přesně do poloviny vzorkovacího kmitočtu a poté by s obrovskou strmostí své amplitudové frekvenční charakteristiky dokonale potlačil všechny vyšší harmonické nad polovinou vzorkovacího kmitočtu. Ovšem ideální filtr není možné realizovat a tak reálný filtr má omezenou strmost své amplitudové frekvenční charakteristiky a je nutné tak počítat s průnikem zrcadlových kmitočtů v nepropustném pásmu. Ovšem vzhledem k omezené strmosti filtru se ve výstupním spektru rekonstrukčního filtru objeví kromě těchto zrcadlových kmitočtů i kmitočty, které odpovídají násobkům základního kmitočtu. Tyto násobky jsou totiž opět zrcadleny podle poloviny vzorkovacího kmitočtu (Nyquistova kmitočtu) a pronikají tak do přenosové oblasti aktivního rekonstrukčního filtru. Z tohoto důvodu tyto přebytečné složky ve výstupním spektru není možné navrženým aktivním rekonstrukčním filtrem potlačit, ovšem amplituda těchto nežádoucích složek spektra je velmi malá ve srovnání se základním kmitočtem. Aktivní rekonstrukční filtr je úplně poslední částí v řetězci zpracování a převodu digitálního vstupního signálu na analogový audiosignál a jejich kvalita a správnost návrhu má zásadní až fatální vliv na výslednou kvalitu výstupního analogového signálu. [15] [16]

Druhým faktorem ovlivňující výslednou kvalitu audio signálu je vzorkovací kmitočet s jakým pracuje D/A převodník. Obecně platí čím vyšší vzorkovací kmitočet tím z pohledu kvality výsledného audio signálu lépe. S vyšším vzorkovacím kmitočtem totiž narůstá i vzdálenost základního kmitočtu od svého obrazu a čím je obraz více vzdálen ve spektrální oblasti od svého základního kmitočtu, tím více leží v pásmu nepropustnosti aktivního rekonstrukčního filtru. Princip činnosti aktivního rekonstrukčního filtru je uveden v pravé části Obr. 2.4.2, v levé části Obr. 2.4.2 je pak uveden princip zrcadlení harmonických složek. [15] [16]



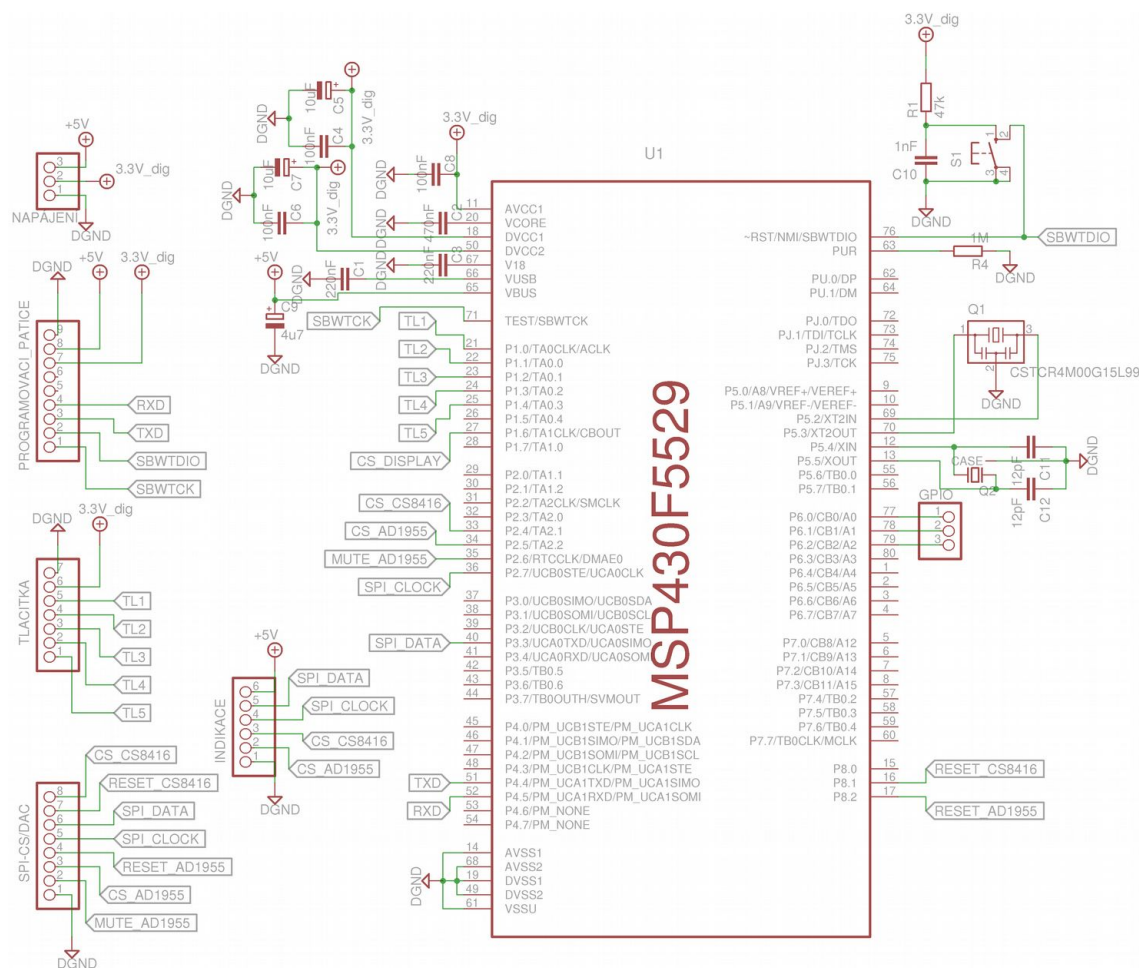


Obr. 2.4.2: Spektrum signálu na výstupu z D/A převodníku

Navržený D/A převodník je schopen pracovat se vzorkovacím kmitočtem až 192 kHz a bylo by zbytečné, vzhledem k výše uvedeným zákonitostem a také k použití v oblasti audiotechniky, aby výstupní analogový signál mohl nabývat poloviny tohoto vzorkovacího kmitočtu (96 kHz). Takto navržený filtr by zejména v nízkých vzorkovacích kmitočtech nemusel pracovat zcela korektně a s nižším vzorkovacím kmitočtem by také zásadně narůstal průnik zrcadlových kmitočtů do propustné oblasti filtru. Proto je mezní kmitočet filtru zvolen jako kompromis mezi špičkovou kvalitou ve zpracování zvuku a správnou funkcí samotného filtru pro celý rozsah vzorkovacích kmitočtů, které akceptuje D/A převodník. Mezní kmitočet filtru pro pokles o -3 dB je 75 kHz. Vzhledem k takto vysokému meznímu kmitočtu není šířka pásma výsledného D/A převodníku pro potřeby audiotechniky nijak limitována a zároveň si filtr zachová potřebné vlastnosti pro svoji korektní činnost.

### 3 ŘÍDÍCÍ OBVODY

Klíčovou částí navrženého laboratorního přípravku D/A převodníku, vzhledem k softwarovému řízení obou obvodů zprostředkovávajících D/A převod, jsou řídicí obvody. Požadavkem návrhu je také vhodná indikace a schopnost za pomoci řídicích tlačítek přenastavit konkrétní parametry D/A převodníku a případně také přijímače S/PDIF. Jako vhodný mikrokontrolér, který bude schopen veškerou tuto činnost zajistit, byl vybrán typ MSP430F5529. Jedná se o pokročilý 16 bitový tzv. Mixed Signal mikrokontrolér, což znamená, že tento mikrokontrolér obsahuje i určité pokročilé instrukce, které byly dříve dominantou pouze signálových procesorů. Výrobce tohoto mikrokontroléru je společnost Texas Instruments. Schéma zapojení mikrokontroléru MSP430F5529 je uvedeno na Obr. 3.1. [7] [8]



Obr. 3.1: Schéma zapojení mikrokontroléru MSP430F5529

### 3.1 Parametry mikrokontroléru MSP430F5529

Požadavky na činnost mikrokontroléru MSP430F5529:

- Komunikace se znakovým OLED displejem
- Řízení činnosti D/A převodníku AD1955
- Řízení činnosti přijímače S/PDIF CS8416
- Indikace nastavení konkrétních bitů registrů D/A převodníku pomocí 16 LED
- Indikace nastavení konkrétních bitů registrů S/PDIF přijímače pomocí 16 LED
- Komunikace s ovládací klávesnicí laboratorního přípravku
  - 1. tlačítko → posun v hlavním menu směrem nahoru
  - 2. tlačítko → posun v hlavním menu směrem dolů
  - 3. tlačítko → výběr konkrétního pod nabídky daného parametru
  - 4. tlačítko → potvrzení nastavení daného parametru
- Komunikace po SPI
  - S D/A převodníkem AD1955
  - S přijímačem S/PDIF CS8416
  - S OLED displejem
  - S indikátory nastavení patřičných bitů u CS8416 a AD1955

Tab. 3.1.1: Přehled klíčových parametrů mikrokontroléru MSP430F5529

|                              |                                         |
|------------------------------|-----------------------------------------|
| Nízké napájení               | 1,8 V – 3,6 V                           |
| Ultra nízký odběr proudu     | Typicky 150 $\mu$ A/MHz                 |
| Systémové hodiny             | 4 MHz – 25 MHz                          |
| Architektura                 | 16-Bit , RISC                           |
| Paměť Flash                  | 128 kB                                  |
| Paměť SRAM                   | 10 kB                                   |
| Počet vstupně/výstupní portů | 63                                      |
| A/D převodníky               | 12-Bit aproximační, s interní referencí |
| Universální kom. rozhraní A  | UART, IrDA, SPI                         |
| Universální kom. rozhraní B  | I2C, SPI                                |

Tab. 3.1.2: Přehled klíčových parametrů mikrokontroléru MSP430F5529, pokračování

|                                                      |           |
|------------------------------------------------------|-----------|
| Časovače                                             | 16-Bit, 4 |
| Časovač reálného času                                |           |
| Hardwarová podpora násobení 32-bitových čísel        |           |
| Integrace Full-Speed USB 2.0 s HID a MSC             |           |
| Sériové programování, bez potřeby externího napájení |           |

Z přehledu důležitých vlastností použitého mikrokontroléru, které jsou uvedeny v Tab. 3.1.1 a Tab. 3.1.2, je patrné se jedná o moderní mikrokontrolér. Velkou výhodou mikrokontroléru MSP430F5529 jsou především minimální požadavky na napájení, kdy odběr proudu v aktivním režimu mikrokontroléru nepřesáhne 150  $\mu\text{A}/\text{MHz}$ . Vzhledem k těmto velmi malým oděrům proudu v aktivním režimu a spolu se 4 standby režimy, které mikrokontrolér umožňuje, kdy jeho odběr proudu poklesne na jednotky  $\mu\text{A}$ , je velmi vhodné použít tento typ mikrokontroléru například v aplikacích, u nichž se předpokládá s provozem na baterie. [7] [8]

Hodinový kmitočet krystalu, ze kterého mikrokontrolér přebírá takt pro své jádro, může být až 25 MHz. Pro potřeby navrženého zařízení. Tedy pro komunikaci s displejem a řízení činnosti obvodů po SPI, bude naprosto dostačovat kmitočet krystalu 4 MHz. Vyšší takt je pro navržené zařízení nejen zbytečný ale i nevhodný. Protože mikrokontrolér komunikuje s řadičem displeje, který je ve srovnání se samotným mikrokontrolérem dosti pomalý, tak by bylo nutné zvyšujícím se taktem do řídicího algoritmu vkládat dlouhé čekací smyčky, které by poskytovaly displeji dostatek času na zpracování příchozích dat či instrukcí. S nižším taktem nutnost vložení těchto zpožďovacích smyček odpadá, případně budou velmi krátké (typicky 100 – 300 cyklů taktovacího kmitočtu). [7] [8]

MSP430F5529 je, jak bylo uvedeno tzv. Mixed Singnal mikrokontrolérem, což znamená, že mikrokontrolér má v sobě implementovány instrukce, které dříve obsahovaly pouze signálové procesory. Jako příklad může být, jak je uvedeno v Tab. 3.1.2, přímá hardwarová podpora násobení 32 bitových čísel atd.. MSP430F5529 je 16 bitový mikrokontrolér s architekturou typu RISC. Označení RISC označuje procesory s redukovanou instrukční sadou, které používají zřetězené zpracování instrukcí. Instrukce mají pevnou délku a jednotný formát, který tak vymezuje význam příslušných bitů. Mezi RISC mikrokontroléry patří i například procesory ARM a Atmel AVR aj..

Paměť typu FLASH o velikosti 128 kB, poskytuje dostatek prostoru pro obsáhlý řídicí algoritmus navrženého laboratorního přípravku. Vyrovnávací paměť typu SRAM o velikosti 10 kB poskytuje mikrokontroléru dostatečnou kapacitu pro mezivýpočty.

Velkou devizou použitého mikrokontroléru MSP430F5529 je především jeho vybavenost. Obsahuje 63 vstupně/výstupních pinů, jejichž počet je pro potřeby navrženého zařízení více než dostatečný. Zároveň tak vysoký počet pinů umožňuje použít tento mikrokontrolér do rozsáhlých aplikací, kde se počítá s řízením velkého počtu externích periférií. Kromě těchto vstupně/výstupních pinů obsahuje také 4

časovače, jejichž šířka je 16 bitů. Každý příslušný časovač má přiřazen příslušný počet komparačních registrů. MSP430F5529 je vybaven také vysoce kvalitním aproximačním 12 bitovým A/D převodníkem s interní referencí. Velkou výhodou poukazující na modernost architektury MSP430F5529 je přímo integrované full-speed USB 2.0 rozhraní pro řízení, přerušení a přenos dat. MSP430F5529 také podporuje prostřednictvím USB modulu třídu HID (Human Interface Device). Třídu HID jsou zařízení, které zpracovávají signály od člověka. Patří sem klávesnice, myš herní ovladače atd. MSP430F5529 tak může být chápán operačním systémem prostřednictvím této třídy jako takovéto zařízení. Druhou třídou, jak může být vnímat mikrokontrolér operačním systémem, je MSC (Master Storage Class), tedy po připojení mikrokontroleru k USB portu PC, se mikrokontrolér nahlásí jako úložné zařízení. [7] [8]

### **3.1.1 SPI komunikace**

Typem sériové komunikace, prostřednictvím které mikrokontrolér komunikuje s obvody přijímače S/PDIF, D/A převodníku, displejem a indikačními obvody, je SPI komunikace. SPI (Serial Peripheral Interface) je sériové periferní rozhraní. Jedná se o standardní rozhraní spotřební elektroniky používající pro komunikaci mikrokontroléru se svými periferiemi společnou sériovou linku (sběrnici). Procesor řídící činnost je chápán jako MASTER. Řídí komunikaci prostřednictvím hodinového signálu, který vstupuje do všech periferií. Příslušným CHIP SELECT (CS) signálem poté procesor určuje, s jakou periferií bude v daný časový okamžik pracovat a říká tím, pro jakou periferii jsou následující sériová data na sběrnici určena. Periferie, jsou vzhledem k jejich postavení na sběrnici a jejich činnosti, chápána jako zařízení typu SLAVE.

## **3.2 Popis zapojení mikrokontroléru MSP430F5529**

Schéma zapojení důležitých pinů mikrokontroléru MSP430F5529 vychází z doporučení uvedených v katalogového listu. Využití, či nevyužití, ostatních pinů, případně o jejich funkci rozhoduje již pouze návrh a konkrétní použití mikrokontroléru. K mikrokontroléru, jak je patrné z Obr. 3.1, jsou připojeno 4 klíčové patice pinů. První patice pinů je určena k programování samotného mikrokontroléru. Ke druhé patici pinů se připojuje ovládací klávesnice laboratorního přípravku. Třetí patice představuje kompletní SPI komunikaci s přijímačem S/PDIF a D/A převodníkem. Navíc jsou k této patici připojeny další piny určené pro separovaný reset S/PDIF přijímače CS8416 a D/A převodníku AD1955. Je zde také pin MUTE, pomocí níž může být D/A převodník okamžitě umlčen. To je velmi výhodné například v případě nekorektní činnosti přijímače S/PDIF. Poslední významnou paticí je patice pro připojení indikačních obvodů. [4] [7] [8]

### **3.2.1 RESET mikrokontroléru MSP430F5529**

Pro korektní rozběhnutí všech mikrokontrolérem řízených částí laboratorního přípravku D/A převodníku, je nutné nejprve korektně rozběhnout samotný mikrokontrolér MSP430F5529. Pin RESET je připojen k jednoduchému RC článku a tlačítku, viz. Obr. 3.1. Logickou úroveň RESET pinu MCU je úroveň logické 0. Po stisknutí tlačítka dojde

k okamžitému uzemnění resetovacího pinu mikrokontroléru. Touto aktivní úrovní resetu, je držen mikrokontrolér v nečinnosti do doby, než-li se pustí stisknuté tlačítko resetu. Poté se začne okamžitě nabíjet kondenzátor na svoji vrcholovou úroveň +5 V. Na svoji vrcholovou hodnotu se kondenzátor nabije za čas  $\tau$ . Těchto +5 V na RESET pinu mikrokontroléru představuje log 1, tedy logickou úroveň, která umožňuje rozběhnutí mikrokontroléru. Naprosto stejná situace nastane v případě připojení celého laboratorního přípravku ke zdroji elektrické energie. Mikrokontrolér udržuje všechny řízené obvody v jejich neaktivním stavu. Teprve až se on sám korektně rozběhne, tak nastaví úroveň logické 0 na RESET piny všech řízených obvodů. Doba  $\tau$ , která je potřebná k rozběhnutí mikrokontroléru vychází opět ze situace, kdy bude kondenzátor v resetovacím RC článku nabit na vrcholovou úroveň log 1 (+5 V). Po odpojení laboratorního přípravku od zdroje napájení se kondenzátor okamžitě vybijí (log 0) a po opětovném připojení napájení k laboratornímu přípravku se mikrokontrolér rozběhne opět až po nabití kondenzátoru na svoji vrcholovou hodnotu. Vložení tohoto zpožděného rozběhnutí mikrokontroléru je pro korektní činnost celého zařízení nezbytné. Po uplynutí tohoto krátkého zpoždění dojde k ustálení všech přechodových stavů a napěťových poměrů uvnitř celého zařízení. Doba potřebná k nabití kondenzátoru na svoji vrcholovou hodnotu je dána vztahem [3.2.1].

$$\tau = R \cdot C [s]$$

$$\tau = R_1 \cdot C_{10} [s] \rightarrow \tau = 47 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot 10^{-9} \rightarrow \tau = 47 \mu s \quad (3.2.1)$$

### 3.3 Popis zapojení převodníků SPI/paralel

V navrženém zařízení jsou využity 3 tyto převodníky SPI komunikace, čili převodníky sériové komunikace na komunikaci paralelní. První z těchto převodníků je využit pro komunikaci se znakovým OLED displejem. Další dva tyto převodníky slouží jako 16 bitová LED indikace nastavení patřičného registru D/A převodníku a přijímače S/PDIF. Každá LED dioda tak představuje patřičný bit daného registru, čím je zajištěn dokonalý a detailní přehled o nastavování obou obvodů zprostředkovávajících D/A převod. Převodníky jsou složeny z jednoduchých 8 bitových CMOS shift registrů 74HTC595. Dodavatelů těchto integrovaných obvodů je spousta. Použity byl však kvalitní integrované obvody od společnosti NXP. [11]

#### 3.3.1 Převodník SPI/paralel pro OLED displeje

Použitý OLED displej, respektive jeho řadič, umožňuje SPI komunikaci. Je však nutné povést jisté drobné změny v rozmístění a použití, či nepoužití rezistorů přímo na DPS. To je však značně neuniverzální a v případě například poškození a nahrazení OLED displeje displejem s klasickým řadičem Hitachi, který SPI komunikaci nepodporuje, by nebylo možné s tímto displejem komunikovat. Proto DPS OLED displeje zůstala beze změny a displej tak komunikuje s deskou mikrokontroléru jakoby prostřednictvím klasické 8 bitové paralelní komunikace.



Tab. 3.3.1: Význam pinů displeje a jejich propojení s převodníkem

| Pin displeje | Patice displeje | Pin 74HCT595 | Úroveň  | Popis                                 |
|--------------|-----------------|--------------|---------|---------------------------------------|
| 1 - VSS      | 1               | -            | GND     | Potenciál země                        |
| 2 - VDD      | 2               | -            | +5 V    | Napájecí nap.                         |
| 3 - NC       | -               | -            | -       | Nepřipojeno                           |
| 4 - RS       | 3               | QA (IC1)     | H/L     | H= zápis dat<br>L= zápis instrukcí    |
| 5 - R/W      | 4               | QB (IC1)     | H/L     | H= čtení z disp.<br>L= zápis do disp. |
| 6 - E        | 5               | QC (IC1)     | H,H → L | Displej eneble                        |
| 7 - DB0      | 6               | QA (IC2)     | H/L     | Data bit 0                            |
| 8 - DB1      | 7               | QB (IC2)     | H/L     | Data bit 1                            |
| 9 - DB2      | 8               | QC (IC2)     | H/L     | Data bit 2                            |
| 10 - DB3     | 9               | QD (IC2)     | H/L     | Data bit 3                            |
| 11 - DB4     | 10              | QE (IC2)     | H/L     | Data bit 4                            |
| 12 - DB5     | 11              | QF (IC2)     | H/L     | Data bit 5                            |
| 13 - DB6     | 12              | QG (IC2)     | H/L     | Data bit 6                            |
| 14 - DB7     | 13              | QH (IC2)     | H/L     | Data bit 7                            |
| 15 - NC      | -               | -            | -       | Nepřipojeno                           |
| 16 - NC      | -               | -            | -       | Nepřipojeno                           |

S takto připojeným OLED displejem se poté komunikuje standardně, jako by byl displej připojen jednotlivými piny přímo na piny mikrokontroléru. Na úplném začátku celého algoritmu řízení displeje je nejprve třeba displej správnou posloupností instrukcí zinicilizovat. Také je samozřejmě potřeba dodržet správné úrovně řídicích signálů pokud mají být zapisována data nebo instrukce do displeje.

Pokud jsou do displeje zapisovány data musí nabývat řídicí signály následujících hodnot:

- RS = H
- R/W = L
- E = H → L



Pokud jsou do displeje zapisovány instrukce musí nabývat řídicí signály následujících hodnot:

- $RS = L$
  - $R/W = L$
- $$E = H \rightarrow L$$

Podle úrovně na pinu RS řadič displeje pozná, zda-li budou zapisována data či instrukce. Ať zápis dat nebo instrukci musí být vždy uvozen změnou úrovně na pinu E. Rychlou změnou z vysoké úrovně do nízké na tomto pinu dojde ke zpracování dat a podle úrovně na pinu RS jsou příchozí data na pinech DB0 – DB7 interpretována jako data a nebo instrukce.

V Tab. 3.3.1 jsou uvedeny jednotlivé piny, které jsou na DPS použitého displeje. Je uvedeno číslo pinu patice OLED displeje dle Obr. 3.3.1, ke kterému je displej připojen. Dále je také uvedeno, který výstupní pin příslušného 8 bitového shift registru je tento konkrétní pin patice připojen a je tedy konkrétní funkce toho pinu.

Velkou výhodou použití moderního OLED displeje je obrovský kontrast a minimální proudový odběr ve srovnání s klasickým LCD displejem. Z principu činnosti totiž nepotřebuje OLED displej žádné dodatečné podsvícení jako je tomu u klasického LCD displeje, neboť jednotlivé znaky svítí přímo. Díky čemuž je hodnota kontrastu displeje teoreticky nekonečná. Další podstatnou výhodou OLED displeje je jeho velmi malá doba odezvy. Jistou nevýhodou OLED displeje může být však omezená životnost panelu. Výrobce displeje Raystar Optronic ovšem garantuje životnost OLED panelu až na 100 000 hodin provozu. Použitý displej je dvouřádkový se 20 znaky v každém řádku a barvou zelenožlutou. [12]

### 3.3.2 Převodníky SPI/paralel pro indikaci nastavení

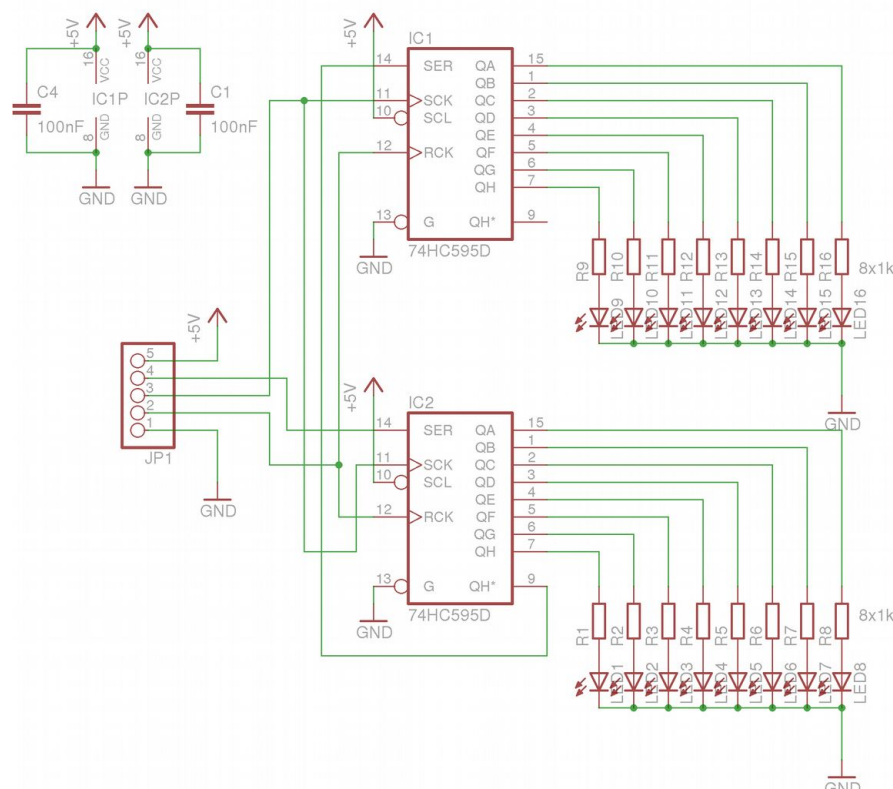
Kromě displeje, který informuje o aktuálně nastavených parametrech přijímače S/PDIF a D/A převodníku. Je laboratorní přípravek vybaven také 2 řadami 16 led diod. Pomocí led diod je ještě patrnější nastavení těchto dvou obvodů. Je tak možné přímo sledovat úroveň příslušných bitů v daném řídicím registru přijímače S/PDIF a D/A převodníku.

Pro přijímač S/PDIF byla zvolena červená barva led diod. Pro D/A převodník zvolena barva zelená. Vstupem převodníku pro indikaci nastavení přijímače S/PDIF je nutné použít naprosto stejný SPI rámec, především tedy CHIP SELECT signál. To stejné platí i pro převodník indikace nastavení D/A převodníku. Příslušným CHIP SELECT signálem se tak zapíší data nejen do řídicích registrů přijímače S/PDIF nebo D/A převodníku, ale zároveň také do jejich indikačních převodníků. Následné rozsvícené led diody tak indikují právě nastavené bity řídicích registrů těchto obvodů. Schéma zapojení jednoho ze dvou použitých indikačních převodníků je na Obr. 3.3.2.

Řídicí registry D/A převodníku jsou 4. První, nejdůležitější a vlastně jediný indikovaný na řadě 16 led diod je přímo 16 bitový. Tedy konkrétní led dioda odpovídá konkrétnímu nastavovanému bitu tohoto registru. Nejnížší dva bity jsou adresou tohoto registru.

V případě indikace nastavení obvodu CS8416 je situace nepatrně složitější. Obvod přijímače S/PDIF má těchto kontrolních a řídicích registrů celkem 6. A ve všech těchto

registrech dochází osobou pracující na přípravku ke změnám jednotlivých bitů, které odpovídají požadovanému režimu činnosti. V řídicím algoritmu tak bylo nezbytně nutné tuto skutečnost ošetřit. Dalším rozdílem oproti indikaci nastavení obvodu D/A převodníku je délka těchto řídicích registrů. Bity 0 až 7 odpovídají jednotlivým bitům v konkrétním řídicím registru. Horní polovina bitů tedy bity 8 až 15 odpovídají adrese příslušného řídicího bitu, do kterého je právě zapisováno. [11]



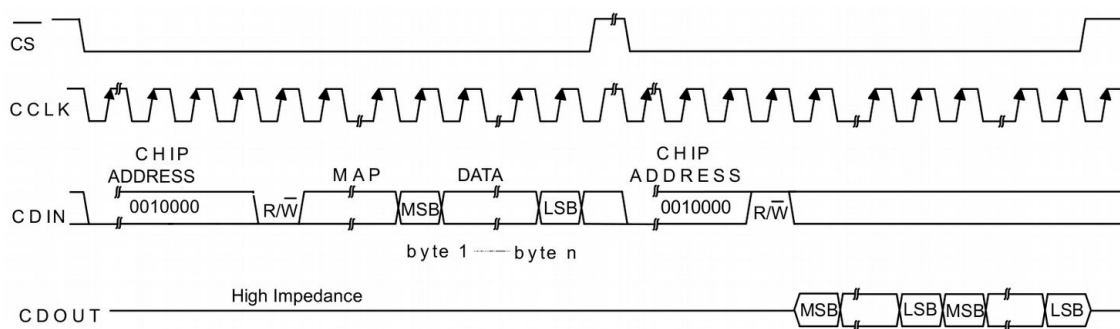
Obr. 3.3.2: Schéma zapojení indikace nastavení CS8416 a AD1955

U všech led diod je nutné zařadit sériový rezistor, který omezuje proud tekoucí do těchto led diod a snižuje tak intenzitu jejich záření na přijatelnou mez, aby sledování indikace nastavení nebylo nepříjemné pro oči člověka pracujícího s laboratorním přípravkem D/A převodníku.

### 3.4 Řízení činnosti přijímače S/PDIF CS8416

K řízení činnosti obvodu přijímače CS8416 je využita, jak bylo mnohokrát uvedeno, SPI linka. Za pomoci SPI komunikace mezi přijímačem a mikrokontrolérem dochází k řízení a nastavování příslušných kontrolních registrů přijímače CS8416. Jak bylo uvedeno výše, přijímač má těchto řídicích a kontrolních registrů 6.

Každý registry je vždy 8 bitový. Těchto 8 bitů představuje spodní polovinu bitů (bit 0 až bit 7). Horní polovinu bitů (bit 8 až bit 15) představuje adresa příslušného kontrolního registru, do kterého je v tento okamžik zapisováno. Ovšem těchto 16 bitů takto přímo poslat po SPI lince i s patřičným CS signálem nelze. Časování SPI a zaslání platného rámce po SPI lince je zobrazeno na Obr. 3.4.1.



MAP = Memory Address Pointer, 8 bits, MSB first

Obr. 3.4.1: Řízení činnosti CS8416 v SPI komunikaci, převzato [2]

Obvod CS8416 vyžaduje zasílání speciální 24 bitové proměnné. Každý rámeček SPI komunikace mezi mikrokontrolérem a tímto obvodem musí být uvozen tzv. CHIP ADDRESS. Poté následuje jeden bit, který musí být trvale v log 0. Logické úroveň tohoto bitu říká, zda-li bude do obvodu CS8416 zapisováno (log 0) a nebo bude z obvodu čteno (log 1), protože však obvod na SPI lince vůči mikrokontroléru pracuje jako SLAVE a navíc protože není potřeba z obvodu přijímače S/PDIF cokoli číst ale zapisovat, musí být tento bit neustále v log 0. Za tímto bitem poté následuje 8 bitů, představující adresu příslušného kontrolního registru označených na Obr. 3.4.1 jako MAP. Tato osmice bitů je již indikována prostřednictvím led diod příslušného indikačního obvodu. Za touto osmicí následuje druhá a poslední osmice bitů označená jako DATA a již podle názvu je jasné, že se jedná o data, která jsou právě zapisována do daného řídicího registru. Řídící algoritmus je vytvořen tak, že nejprve nastaví CS signál na log 0 a naplní výstupní SPI buffer touto 24 bitovou proměnnou. Po naplnění bufferu vyšle data na SPI linku a rychlým pulzem na CS pinu obvodu CS8416 zapíše požadovaná data do tohoto obvodu. Vše je dobře patrné z Obr. 3.4.1. [2]

### 3.4.1 Řídící registry přijímače S/PDIF CS8416

V této podkapitole budou postupně rozebrány všechny řídicí a kontrolní registry obvodu CS8416. Budou popsány příslušné významné bity v těchto registrech a také jak se jejich konkrétní nastavení promítne do výsledného chování obvodu. Jak bylo uvedeno, obvod CS8416 má 6 řídicích registrů, které je nutné při inicializaci obvodu korektně nastavit tak, aby tento přijímač komunikoval a spolupracoval s následným D/A převodníkem ihned po zapnutí laboratorního přípravku. Do určitých bitů v registrech poté přistupuje samotný řídicí algoritmus ovládaný člověkem pracujícím na tomto laboratorním přípravku a dochází tak za pomoci tohoto algoritmu ke změně konkrétních bitů, což je uvozeno změnou chování obvodu a proto u těchto významných bitů budou vždy uvedeny také jejich možné kombinace nastavení.

| Control0 (00h) |        |   |   |      |       |          |          |
|----------------|--------|---|---|------|-------|----------|----------|
| 7              | 6      | 5 | 4 | 3    | 2     | 1        | 0        |
| 0              | FSWCLK | 0 | 0 | PDUR | TRUNC | Reserved | Reserved |

Obr. 3.4.2: 0. řídicí registr CS8416, převzato [2]

V nultém registru, přesněji v řídicím registru na adrese 0x00, je významný především 3.bit, který je označený jako PDUR viz Obr. 3.4.2. Jedná se o Phase Detector

Update Rate a nastavení či nenastavení tohoto bitu rozhoduje o změně použitého fázového detektoru. Výchozí hodnota tohoto bitu je log 0. Tedy je použit tzv. normální fázový detektor na všech vstupech přijímače CS8416. S touto předvolbou je schopen zpracovat přijímač vstupní signály se vzorkovacím kmitočtem až 192 kHz. Nevýhodou je však nepatrně větší jitter (roztřesení hran hodinového signálu RMCK). Pokud je 3.bit nastaven do log 1, je využito tzv. zvýšeného fázového detektoru. Se zvýšeným fázovým detektorem je však obvod přijímače schopen zpracovat vstupní signály pouze do vzorkovacího kmitočtu 96 kHz. Výhodou je však menší jitter hodinového signálu RMCK. Výrobce doporučuje využití této volby při připojení  $\Sigma$ - $\Delta$  D/A převodníku, pro dosažení ještě lepšího výkonu. Použitý převodník AD1955 je tohoto typu a tak změna parametrů PDUR je součástí ovládacího menu laboratorního přípravku. Ostatní bity tohoto registru nejsou důležité a pro funkci přípravku nemají vliv a proto jsou ponechány ve svých výchozích hodnotách (log 0).

#### Control1 (01h)

| 7     | 6       | 5    | 4    | 3     | 2     | 1     | 0   |
|-------|---------|------|------|-------|-------|-------|-----|
| SWCLK | MUTESAO | INT1 | INT0 | HOLD1 | HOLD0 | RMCKF | CHS |

Obr. 3.4.3: 1. řídicí registr CS8416, převzato [2]

V řídicím registru na adrese 0x01 je z hlediska práce na přípravku důležitý opět pouze jeden bit. Konkrétně se jedná o 1.bit označený RMCKF (Recovered Master Clock Frequency), viz. Obr. 3.4.3. Nastavení tohoto bitu rozhoduje o kmitočtu RMCK, tedy o MCLK, který přebírá následný D/A převodník. Pokud je RMCKF bit nastaven do log 0, je hodnota RMCK (MCLK)  $256 \times f_s$ . Naopak pokud je tento bit v log 1, je hodnota hodinového signálu  $128 \times f_s$ . O použití toho či onoho hodinového signálu rozhoduje následný D/A převodník a také fakt, zda-li má být využíván i nejvyšší vzorkovací kmitočet. Vzhledem k použitému převodníku AD1955 a skutečnosti, že musí být schopen zpracovat vzorkovací kmitočet až 192 kHz, je nutné nastavit RMCKF do log 1, tedy na hodnotu  $128 \times f_s$ . Uživatel pracující na přípravku nemá možnost měnit toto nastavení. Nastavení celého tohoto registru je součástí inicializace obvodu CS8416.

Ostatní bity tohoto registru pro využití v laboratorním přípravku nejsou podstatné a nejsou využity. Jsou tedy všechny ponechány ve svém výchozím stavu. Zajímavý je však 6. bit označený MUTESAO. Uvedením tohoto bitu do log 1 dojde k okamžitému umlčení přijímače CS8416. Dalším zajímavým bitem je bit 7. Pokud se tento bit nastaví do log 1 dokáže obvod CS8416 v případě výpadku PLL filtru přepnout na vstupní pin OMCK a využít hodinový signál z tohoto vstupu jako výstupní hodinový signál RMCK (MCLK) pro následný D/A převodník. Tento pin však použit v zapojení není a CS8416 tak nemá žádný zdroj externího hodinového signálu. Proto musí být tento bit nastaven trvale do log 0, kdy je generován hodinový signál RMCK (MCLK) na základě zachycení PLL filtru a vnitřního VCO oscilátoru.

#### Control2 (02h)

| 7     | 6          | 5          | 4          | 3        | 2        | 1        | 0        |
|-------|------------|------------|------------|----------|----------|----------|----------|
| DETCI | EMPH_CNTL2 | EMPH_CNTL1 | EMPH_CNTL0 | GPO0SEL3 | GPO0SEL2 | GPO0SEL1 | GPO0SEL0 |

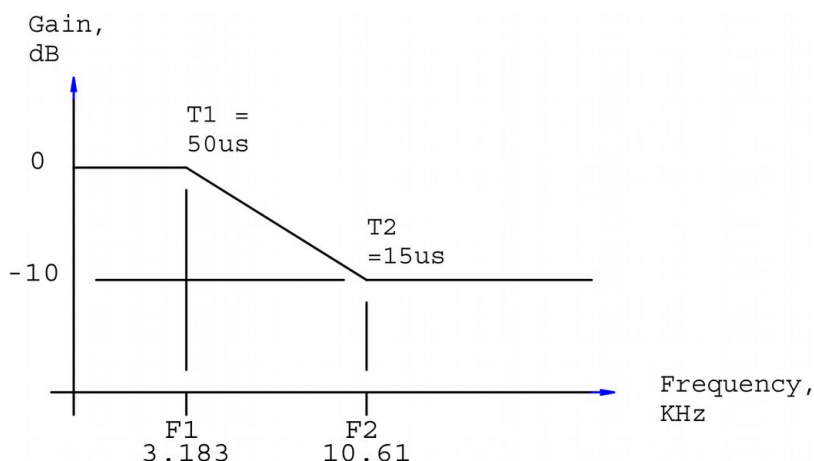
Obr. 3.4.4: 2.řídicí registr CS8416, převzato [2]

Řídicí registr na adrese 0x02 je zajímavý především svými posledními čtyřmi bity. Význam těchto bitů je popsán v kapitole 2.2. Zajímavé jsou však také bit 4 až 6 viz. Obr. 3.4.4. Bity označené jako De-emphasis filter control. Různým nastavením těchto bitů dochází k zapínání filtru De-emphasis s různou odezvou. Tento filtr se snaží u

digitálních nahrávek „vyrovnat“ kmitočtovou charakteristiku. Analogií tohoto filtru může být chápána například korekce RIAA u gramofonových nahrávek a nebo například obvody DEEM fáze u FM radiových přijímačů atd., kdy se tyto korekce snaží o zlepšení dynamiky přenosu. Filtr De-emphasis musí být nastaven vždy stejně i u následného D/A převodníku AD1955. Pokud nahrávka již tuto korekci obsahuje a přesto dojde k zapnutí De-emphasis filtru, projeví se to výrazným ořezáním dynamiky vyšších kmitočtů audio signálu. Celková činnost tohoto filtru je dobře patrná z Obr. 3.4.5. Volba v nastavení filtru De-emphasis je součástí ovládacího menu laboratorního přípravku.

Nastavení bitů filtru De-emphasis:

- 000 → filtr je vypnut
- 001 → 32 kHz
- 010 → 44.1 kHz
- 011 → 48 kHz
- 100 → automatická volba → Obvod sám detekuje zda-li je nutné použít filtr a případně jaký.



Obr. 3.4.5: Odezva filtru De-emphasis, převzato [2]

#### Control3 (03h)

| 7        | 6        | 5        | 4        | 3        | 2        | 1        | 0        |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| GPO1SEL3 | GPO1SEL2 | GPO1SEL1 | GPO1SEL0 | GPO2SEL3 | GPO2SEL2 | GPO2SEL1 | GPO2SEL0 |

Obr. 3.4.6: 3. řídicí registr CS8416, převzato [2]

Prostřednictvím tohoto řídicího registru na adrese 0x03 viz. Obr. 3.4.6 jsou nastavovány zbylé dva GPO piny. Jejich případné nastavení je analogické jako v případě GPO0, jehož nastavení bylo podrobně rozebráno v kap. 2.2. Jejich funkce je nastavována za pomoci příslušné čtveřice bitů a jejich funkce může být různá. Přehled možných nastavení těchto programovatelných výstupních pinů je uvedena v Tab. 2.2.1.

#### Control4 (04h)

| 7   | 6   | 5      | 4      | 3      | 2      | 1      | 0      |
|-----|-----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| RUN | RXD | RXSEL2 | RXSEL1 | RXSEL0 | TXSEL2 | TXSEL1 | TXSEL0 |

Obr. 3.4.7: 4. řídicí registr CS8416, převzato [2]

Čtvrtým řídicím registrem na adrese 0x04 dochází k výběru vstupního S/PDIF signálu a ke spuštění samotného obvodu přijímače. Ke spuštění a k uvedení obvodu CS8416 do činnosti slouží 7.bit označený RUN. Vysokou úroveň (log 1) na tomto bitu se obvod rozběhne a po celou dobu činnosti nesmí dojít ke změně úrovně tohoto 7.bitu.

Bit označený jako RXD viz. Obr. 3.4.7 slouží jako RMCK Control. Pokud je RXD v log 0, což je i stav výchozí, na pinu RMCK obvodu CS8416 platný výstupní hodinový signál, který je dále zpracováván D/A převodníkem (MCLK). Nízká logická úroveň tedy zabezpečí rozběhnutí D/A převodníku a tím zajistí korektní komunikaci mezi přijímačem CS8416 a vlastním D/A převodníkem AD1955. Pokud by na tomto pinu byla vysoká logická úroveň došlo by k „odpojení“ RMCK, OSCLK, OLRCK a sériového datového výstupu SDOUT. Všechny tyto piny sloužící jako rámec komunikace mezi těmito obvody by přešly do stavu vysoké impedance.

Bity s označeními RXSEL2, RXSEL1, RXSEL0 dochází k výběru vstupního signálu. V případě navrženého laboratorního přípravku tak dochází k přepínání mezi signálem z optické (RXP1) a koaxiální cesty (RXP0). Výběr vstupní cesty je první nabídkou ovládacího menu laboratorního přípravku.

Nastavení bitů pro výběr vstupního S/PDIF signálu:

- 000 → RXP0
- 001 → RXP1, výchozí vstup laboratorního přípravku
- 010 → RXP2, atd.

Podobně jako bity pro výběr vstupního signálu slouží poslední trojice bitů k určení, který pin RXPx má být pinem výstupním. Jedná se o TXSEL2, TXSEL1, TXSEL0 viz. Obr. 3.4.7. Obvodu CS8416 je v přípravku však použito čistě jako přijímače a proto je nutné všechny 3 bity uvést trvale do log 1.

#### Serial Audio Data Format (05h)

| 7    | 6    | 5      | 4      | 3      | 2     | 1      | 0       |
|------|------|--------|--------|--------|-------|--------|---------|
| SOMS | SOSF | SORES1 | SORES0 | SOJUST | SODEL | SOSPOL | SOLRPOL |

Obr. 3.4.8: 5.řídicí registr CS8416, převzato [2]

Poslední řídicí registr na adrese 0x05 je pro potřeby změny parametru na laboratorním přípravku nejdůležitější. Prostřednictvím tohoto registru je nastavován mód sériové komunikace mezi přijímačem S/PDIF a D/A převodníkem a také bitová hloubka přijatého a zpracovaného signálu.

Bit SOMS určuje, zda-li obvod přijímače je MASTER a nebo SLAVE vzhledem k postavení následného D/A převodníku. Data jsou vysílána z přijímače do převodníku a proto musí být nastaven bit SOMS na úroveň log 1, čímž je jasné dáno, že přijímač S/PDIF je MASTER a OSCLK a OLRCK jsou výstupy, které zpracovává D/A převodník AD1955.

Bit SOSF umožňuje nastavení kmitočtu OSCLK. Výchozí hodnota je opět log 0 a kmitočet OSCLK je v tomto nastavení 64 x fs. Pokud by byl bit SOSF v log 1 byl by výstupní kmitočet OSCLK 128 x fs. D/A převodník však vyžaduje aby kmitočet OSCLK byl 64 x fs. Je tedy nutné ponechat tento bit ve výchozím nastavení (log 0).

Dvojice bitů SORES1 a SORES0 řídí kolika bity je zpracován vstupní S/PDIF signál. Přijímač CS8416 umožňuje zpracování 16 bity, 20 bity a 24 bity. Je nezbytně

nutné nastavit na D/A převodníku vždy stejný počet bitů, kterými je v daný moment vstupní signál zpracováván přijímačem CS8416. Tento úkon je řešen automaticky na pozadí řídicího algoritmu. Možnost změny bitové hloubky (rozlišení) vstupního signálu je jedna z možností ovládacího menu laboratorního přípravku.

Nastavení bitů SORES1 a SORES0 v závislosti na bitové hloubce (rozlišení):

- 00 → 24 bitů, výchozí stav
- 01 → 20 bitů
- 10 → 16 bitů

Poslední 4 bitů v tomto registru slouží pro nastavení formátu sériové komunikace mezi přijímačem S/PDIF a D/A převodníkem. Vše je přehledně zobrazeno v Tab. 3.4.1.

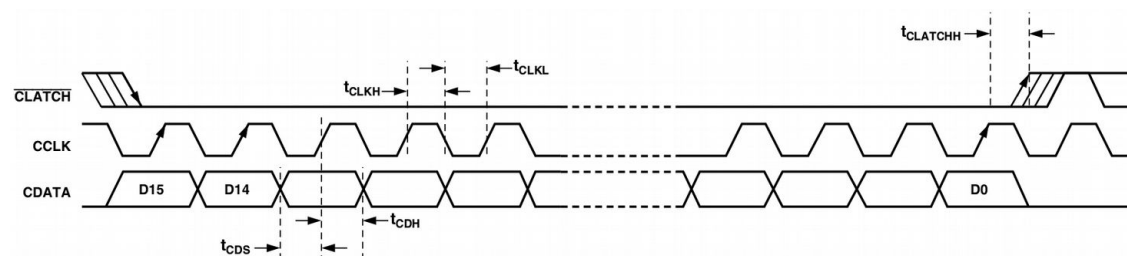
Tab. 3.4.1: Nastavení a výběr formátu sériové komunikace

| Sériový mód     | SOJUST | SODEL | SOSPOL | SOLRPOL |
|-----------------|--------|-------|--------|---------|
| Left-Justified  | 0      | 0     | 0      | 0       |
| I2S             | 0      | 1     | 0      | 1       |
| Right-Justified | 1      | 0     | 0      | 0       |

Možné nastavení jednotlivých bitů je umožněno prostřednictvím ovládacího menu laboratorního přípravku, kdy uživatel jednoduše za pomoci displeje vybere patřičný mód sériové komunikace, který chce v daný moment používat a algoritmus na příslušné pozice tohoto registru dle Tab. 3.4.1 doplní korektní logické úrovně. Vše je pak velmi dobře patrné na indikačních obvodech laboratorního přípravku.

### 3.5 Řízení činnosti D/A převodníku AD1955

Stejně jako u přijímače S/PDIF je ke komunikaci a řízení činnosti D/A převodníku využita SPI linka. Ve srovnání s přijímačem S/PDIF je však SPI rámec a algoritmus řízení komunikace po SPI lince jednodušší. Obvod AD1955. Má pouze 4 řídicí registry, jejichž adresa je vždy dvojce bitů s nejnižší vahou (bit 0 a bit 1). Rámec komunikace po SPI lince mezi převodníkem a mikrokontrolérem je naznačen na Obr. 3.5.1.



Obr. 3.5.1: Řízení činnosti AD1955 v SPI komunikaci, převzato [4]

Jak bylo uvedeno a jak je dobře patrné z Obr. 3.5.1, je SPI komunikace ve srovnání s přijímačem S/PDIF jednodušší. Nevysílá se žádná hlavička a ani potvrzení o tom, zda-li se bude zapisovat či z obvodu číst. Po SPI lince se tak posílá pouze 16 bitová proměnná a opět od MSB k LSB. Algoritmus zápisu dat do D/A převodníku je vytvořen obdobně jako u přijímače S/PDIF, tedy po celou dobu, co je plněn výstupní SPI buffer, musí být CS obvodu D/A převodníku v log 0. Po naplnění a vyslání dat na SPI linku dojde opět k rychlému pulzu na CS pinu AD1955 a zápisu dat do příslušného registru D/A převodníku.

### 3.5.1 Řídící registry D/A převodníku AD1955

Na Obr. 3.5.2 jsou zobrazeny a popsány všechny čtyři řídicí registry, které obsahuje D/A převodník AD1955. V následující kapitole bude popsáno nastavení konkrétních bitů v příslušných řídicích registrech a také popsány možnosti změny parametrů D/A převodníku, které jsou uvozeny změnou logických úrovní těchto bitů.

#### SPI REGISTER DEFINITIONS

Table I. DAC Control Register 0

| Bit   | Description               | Value | Definition       |
|-------|---------------------------|-------|------------------|
| 15    | Power-Down                | 0     | Operation        |
|       |                           | 1     | Powered Down     |
| 14    | Mute                      | 0     | Not Muted        |
|       |                           | 1     | Muted            |
| 13:12 | Data Format               | 00    | PCM              |
|       |                           | 01    | External DF      |
|       |                           | 10    | SACD Slave       |
|       |                           | 11    | SACD Master      |
| 11:10 | Output Format             | 00    | Stereo           |
|       |                           | 01    | Not Allowed      |
|       |                           | 10    | Mono Left        |
|       |                           | 11    | Mono Right       |
| 9:8   | PCM Sample Rate           | 00    | 48 kHz           |
|       |                           | 01    | 96 kHz           |
|       |                           | 10    | 192 kHz          |
|       |                           | 11    | Reserved         |
| 7:6   | De-Emphasis Curve Select  | 00    | None             |
|       |                           | 01    | 44.1 kHz         |
|       |                           | 10    | 32 kHz           |
|       |                           | 11    | 48 kHz           |
| 5:4   | PCM/EF Serial Data Format | 00    | I <sup>2</sup> S |
|       |                           | 01    | Right-Justified  |
|       |                           | 10    | DSP              |
|       |                           | 11    | Left-Justified   |
| 3:2   | PCM/EF Serial Data Width  | 00    | 24 bits          |
|       |                           | 01    | 20 bits          |
|       |                           | 10    | 18 bits          |
|       |                           | 11    | 16 bits          |
| 1:0   | SPI Register Address      | 00    |                  |

Default = 0

Table II. DAC Control Register 1

| Bit  | Description             | Value | Definition       |
|------|-------------------------|-------|------------------|
| 10:9 | MCLK Mode               | 00    | $256 \times f_s$ |
|      |                         | 01    | $512 \times f_s$ |
|      |                         | 10    | $768 \times f_s$ |
|      |                         | 11    | Reserved         |
| 8    | Zero Flag Polarity      | 0     | Active High      |
|      |                         | 1     | Active Low       |
| 7    | SACD Bit Rate           | 0     | $64 \times f_s$  |
|      |                         | 1     | $128 \times f_s$ |
| 6    | SACD Mode               | 0     | Normal           |
|      |                         | 1     | Phase Mode       |
| 5:4  | SACD Phase Select       | 00    | Phase 0          |
|      |                         | 01    | Phase 1          |
|      |                         | 10    | Phase 2          |
|      |                         | 11    | Phase 3          |
| 3    | SACD Bit Inversion      | 0     | Normal           |
|      |                         | 1     | Inverted         |
| 2    | SACD MCLK to BCLK Phase | 0     | Rising Edge      |
|      |                         | 1     | Falling Edge     |
| 1:0  | SPI Register Address    | 01    |                  |

Default = 0

Table III. DAC Volume Registers

| Bit  | Description          | Value    | Definition   |
|------|----------------------|----------|--------------|
| 15:2 | Volume               | 14-Bit   |              |
|      |                      | Unsigned |              |
| 1:0  | SPI Register Address | 10       | Left Volume  |
|      |                      | 11       | Right Volume |

Default = Full Volume

Obr. 3.5.2: Řídící registry D/A převodníku AD1955, převzato [4]

Pro potřeby přípravku je důležitý prakticky pouze první registr, jehož adresa je 0x0000 viz. Obr. 3.5.2. Tento řídicí registr představuje respektive jeho konkrétní bity představují veškeré možnosti v nastavení činnosti převodníku. Řídící algoritmus laboratorního přípravku za pomoci ovládacího menu zasahuje a zapisuje jen do tohoto řídicího registru. Na indikačních obvodech D/A převodníku je tak indikováno nastavení



pouze tohoto jediného řídicího registru a rozsvícené LED diody tak přímo indikují nastavení příslušných bitů do log 1.

Bit 15 označený jako Power-Down viz. Obr. 3.5.2 uvádí obvod D/A převodníku v činnost. Výchozí hodnota tohoto bitu, kterou je převodník v aktivním režimu, je log 0. Po celou dobu činnosti tak musí být tento bit udržován v log 0.

Bit 14 označený jako Mute, provádí okamžité utlumení výstupu D/A převodníku. Nastavení tohoto bitu, tedy uvedení přípravku do režimu MUTE, je součástí ovládacího menu přípravku. S vysokou logickou úrovní bitu Mute je výstup převodníku utlumen. S nízkou logickou je pak výstup netlumen. Výchozím nastavením tohoto bitu po zapnutí přípravku je pochopitelně režim, kdy není výstup převodníku tlumen.

Bit 13 a bit 12 jsou bity nastavující datový formát. V navrženém zapojení přijímač - D/A převodník a vzhledem k samotnému přijímači S/PDIF je jediný možný datový formát PCM. Tento formát využívá lineární PCM audio stream a tento formát souvisí s pulzně kódovou modulací vstupního audio signálu. Nastavení této dvojice bitů je proto nutné nechat ve svém výchozím nastavení a ponechat tak oba bity v log 0. Do nastavení těchto bitů nemá uživatel prostřednictvím ovládacího menu přístup a nemůže tak dojít k nežádoucí změně tohoto datového formátu.

Za pomoci bitů 11 a 10 dochází k nastavení výstupního formátu. Nastavení výstupního formátu je součástí ovládacího menu a uživatel tak může vybrat mezi stereo formátem a nebo mono formátem, který D/A převodník vytvoří duplikací levého či pravého kanálu. Výchozím výstupním formátem po zapnutí přípravku je stereo režim.

Bity 7 a 6 je nastavován filtr De-emphasis. Popis chování a případné použití tohoto filtru byl uveden a rozebrán v kap.3.4.1. Pokud má být filtr použit, je nezbytně nutné nastavit na D/A převodníku a přijímači S/PDIF vždy stejný typ tohoto filtru. Současné nastavení je vyřešeno automaticky řídicím algoritmem a uživatel tak pouze prostřednictvím menu vybírá konkrétní typ filtru, který má být využit. Případně může tento filtr úplně vypnout. Ve výchozím nastavení po zapnutí přípravku je filtr De-emphasis vypnut.

Bity 5 a 4 je vybírán sériový formát komunikace mezi přijímačem S/PDIF a D/A převodníkem. Stejně jako u filtru De-emphasis je nutné nastavení naprosto shodného formátu sériové komunikace u obou těchto obvodů, které mezi sebou komunikují. Opět je tato skutečnost ošetřena v samotném řídicím algoritmu a uživatel tak pouze prostřednictvím menu vybírá, zda-li má být aktuálně použitý formát s levým, pravým zarovnáním bitů a nebo I2S formát.

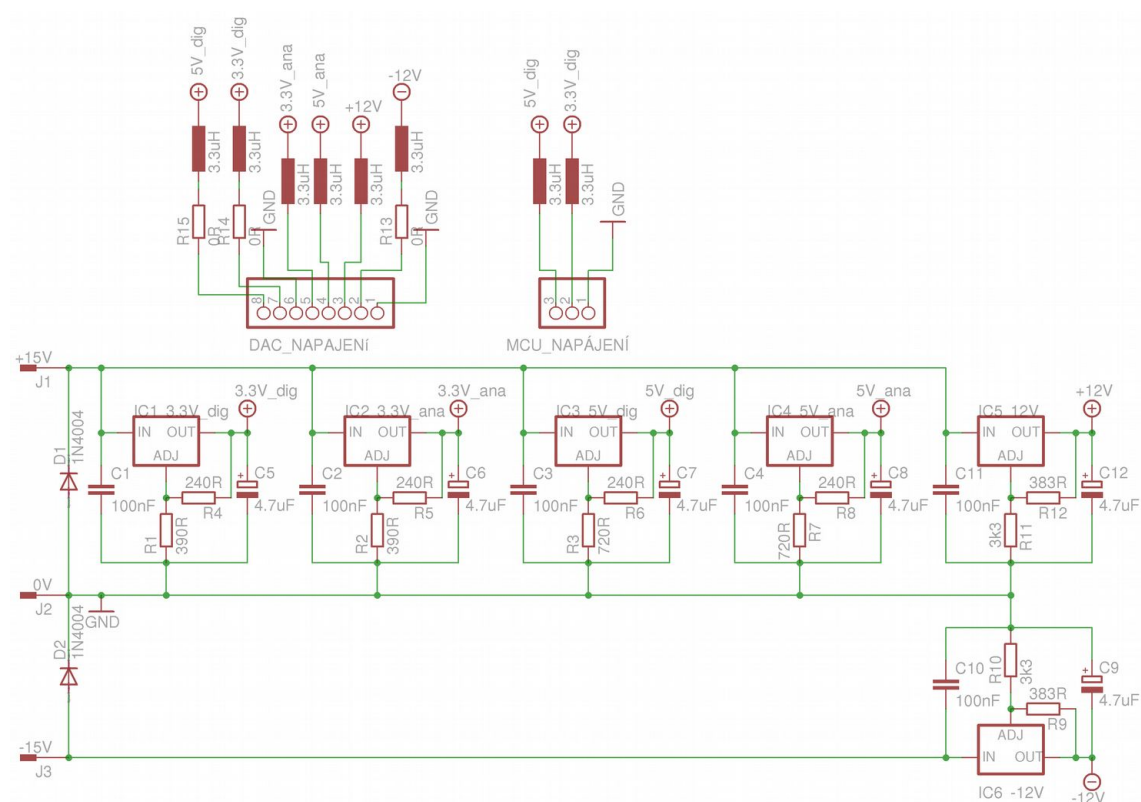
Poslední dvojici bitů (bit 3 a bit 2) je voleno bitové rozlišení zpracovaného signálu. Uživatel tak volí mezi 24, 20 a 16 bity. D/A převodník viz. Obr. 3.5.2 Podporuje i 18 bitové rozlišení. Touto možností však nedisponuje přijímač S/PDIF a tak je možné volit pouze z těchto 3 možností. A stejně jako u předchozích bitů i zde musí být dodrženo současné shodné nastavení bitové hloubky u obou těchto obvodů. Volba bitové hloubky (rozlišení) je součástí menu laboratorního přípravku. Výchozí nastavení je 24 bitové rozlišení.

Ovládání hlasitosti nebylo uvažováno a tak poslední dva 16 bitové registry s adresami 0x0002 a 0x0003 viz. Obr. 3.5.2 nejsou využity vůbec. Výchozí hodnotou nastavení hlasitosti D/A převodníku je tak 100 %. Částečně je pak využit 11 bitový

registr s adresou 0x0001. V tomto registru je nutné při změně vzorkovacího kmitočtu na 192 kHz změnit hodnotu hodinového signálu MCLK z  $256 \times f_s$  na  $512 \times f_s$ . V opačném případě by došlo výpadku komunikace mezi přijímačem S/PDIF a D/A převodníkem. Tato skutečnost se však děje v algoritmu automaticky na pozadí se změnou vzorkovacího kmitočtu, který je volen prostřednictvím ovládacího menu, a uživatel měřící a pracující s přípravkem nemá tak možnost jakkoliv měnit hodnotu MCLK. Tato změna je uvozena i se změnou hodinového signálu RMCK (MCLK), který přebírá D/A převodník od obvodu přijímače S/PDIF.

## 4 NAPÁJENÍ

Podstatnou částí navrženého zařízení laboratorního přípravku D/A převodníku je také jeho napájení. Zařízení bude použito a nasazeno v laboratořích a proto pro napájení bude použit stabilizovaný nastavitelný laboratorní zdroj značky Diametral. Ovšem v navrženém zařízení se nacházejí části s různou napájecí úrovní a proto je nezbytně nutné výstupní napětí z laboratorního zdroje Diametral stabilizovat na patřičné úrovni pro jednotlivé bloky laboratorního přípravku D/A převodníku. Přípravek požaduje symetrické napájení. Schéma zapojení stabilizačního bloku pro přípravek je uvedeno na Obr. 4.1.



Obr. 4.1: Zapojení stabilizátorů

### 4.1 Popis zapojení bloku stabilizátorů

Vzhledem k nejvyššímu potřebnému napětí, které činí  $\pm 12\text{ V}$  pro napájení operačních zesilovačů použitých v diferenčních zesilovačích a aktivním rekonstrukčním filtru, musí laboratorní zdroj Diametral být schopen zajistit symetrické napájení o výstupní úrovni alespoň  $\pm 15\text{ V}$ . Důvodem  $3\text{ V}$  rezervy je použití nastavitelných stabilizátorů LM317 a LM337. U těchto stabilizátorů, ať pro pozitivní nebo negativní napájecí větev, se z principu jejich činnosti nemůže vyskytnout na jejich výstupu napájecí úroveň větší než vstupní napájecí úroveň snížená o zhruba  $3\text{ V}$ . Při vstupním napájení  $\pm 15\text{ V}$  od zdroje

Diametral jsou schopny LM317 a LM337 stabilizovat nejvýše na  $\pm 12$  V, což pro potřeby napájení operačních zesilovačů naprosto dostačuje. [13] [14]

Výhodou použití stabilizátorů LM317 a LM337 je možnost nastavení výstupního napětí v rozmezí  $+1,25$  V až  $37$  V. V případě negativního stabilizátoru LM337 je to analogicky  $-1,25$  V až  $-37$  V. Výstupní proud u obou stabilizátorů může být až  $1,5$  A. Další velkými výhodami těchto obvodů jsou vnitřní teplotní ochrany a také proudové ochrany reagující při zkratu na výstupu, případně při překročení maximálního proudu, který je schopen stabilizátor dodat. Při návrhu a zejména při použití musí být však zohledněn fakt maximálního rozdílu mezi vstupním a výstupním napětím na příslušném stabilizátoru. Rozdíl mezi vstupním a výstupním napětím nesmí překročit  $40$  V. Nastavení požadovaného výstupního napětí je velmi snadné. Integrovaný obvod stabilizátoru je 3 vývodový. Na jeden z pinů se přivádí vstupní napětí, které má být stabilizováno. Dalším pinem je pin výstupní. Třetím a posledním pinem se označovaným jako ADJUST se nastavuje patřičná výstupní úroveň stabilizátoru. K nastavení velikosti výstupního napětí slouží odporový dělič. Jeden z rezistorů je připojen v obvodu ADJUST a druhý rezistor je připojen mezi pin ADJUST a výstup stabilizátoru viz. Obr. 4.1. K výpočtu lze využít nepřeberné množství online kalkulátorů určených speciálně k těmto nastavitelným stabilizátorům, případně využít snadný vzorec, který se nachází v katalogovém listu těchto stabilizátorů (4.1). [13] [14]

$$V_{OUT} = 1,25 \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) + I_{ADJ} \cdot R_2 [V] \quad (4.1)$$

Ukázka výpočtu pro stabilizátor  $+3,3$  V:

$$V_{OUT} = 1,25 \cdot \left(1 + \frac{390}{240}\right) + 100 \cdot 10^{-6} \cdot 390$$

$$V_{OUT} = 3,32 V$$

V katalogovém listu stabilizátorů se uvádí, že velikost proud  $I_{ADJ}$  je menší než  $100$   $\mu A$ . Některé výpočty a online kalkulátory považují dokonce  $I_{ADJ}$  za roven nule. Ovšem tím se vnáší do výpočtu jistá nepřesnost a je proto dobré počítat i s nenulovou hodnotou proudu tekoucím touto řídicí elektrodou. Výrobce doporučuje použití rezistoru  $R_2$  o hodnotě  $240$   $\Omega$ . Ovšem není to dogma a může být použita bez jakýchkoliv problémů i větší hodnota rezistoru  $R_2$ . Tak jako tomu je v navrženém bloku u  $\pm 12$  V stabilizace, viz. Obr. 4.1. Při použití většího rezistoru  $R_2$  se úměrně sníží i velikost rezistoru  $R_1$  v obvodu ADJUST. [13] [14]

Použité vstupní  $100$  nF keramické kondenzátory slouží opět jako ve všech předešlých navržených blocích jako účinné potlačení nežádoucího VF rušení pronikajícího ze sítě. Použití výstupních tantalových kondenzátorů není nutné, avšak je výhodné, protože představuje pro výstup stabilizátoru jakousi krátkodobou zásobu elektrické energie v případě rychle se měnících se potřeb napájení koncových zařízení, které jsou tímto stabilizátorem napájeny. Zařazení vstupních ochranných diod je velmi výhodné v situaci přepólování napájení přípravku D/A převodníku. Pokud by nebyly diody použity došlo by k okamžitému zničení stabilizátoru v horším případě k okamžitému zničení celého přípravku. Pokud jsou však diody použity a zapojeny, jak je uvedeno na Obr. 4.1, dojde v případě přepólování napájení k otevření obou ochranných diod a tím k okamžitému zkratu. Tímto zkratem zareagují proudové ochrany uvnitř laboratorního zdroje Diametral. Okamžitě odpojí výstupy a na

laboratorním zdroji bude signalizován zkrat jeho výstupních svorek. Tím je zcela eliminována možnost chybného zapojení napájení laboratorního přípravku D/A převodníku a jeho následného zničení.

Pro zamezení nežádoucího rušení mezi jednotlivými zařízeními, které jsou příslušným stabilizátorem napájeny, je na výstup opět vložena tlumivka malé indukčnosti 3,3  $\mu$ H. Jedná se typ tlumivky, která již byla použita ke stejným účelům v ostatních částech navrženého laboratorního přípravku D/A převodníku. Protože jsou v zařízení použity obvody, které musí mít separovaně napájeny své digitální a analogové části, je nutné toto hledisko zohlednit i při návrhu bloku stabilizátorů a pro patřičné úrovně napájení použít samostatné stabilizátory. Přehled použití jednotlivých výstupů z bloku stabilizátorů je uvedeno v Tab. 4.1.1.

Tab. 4.1.1: Přehled použitých stabilizátorů a jejich použití

| IC  | Typ stabilizátoru | Vstupní úroveň | Typ napájených obvodů | Napájené obvody       |
|-----|-------------------|----------------|-----------------------|-----------------------|
| IC1 | LM317             | +3,3 V         | Digitální             | MSP430F5529<br>CS8416 |
| IC2 | LM317             | +3,3 V         | Analogové             | MSP430F5529<br>CS8416 |
| IC3 | LM317             | +5 V           | Digitální             | AD1955                |
| IC4 | LM317             | +5 V           | Analogové             | AD1955                |
| IC5 | LM317             | +12 V          | Analogové             | LME49720<br>(AD8599)  |
| IC6 | LM337             | -12 V          | Analogové             | LME49720<br>(AD8599)  |

## 5 OVLÁDÁNÍ A PRÁCE S PŘÍPRAVKEM

Jak bylo již v předešlých kapitolách nesčetněkrát uvedeno navržené zařízení má sloužit jako měřicí přípravek, na kterém budou studenti pracovat v laboratorní výuce předmětu Nízkofrekvenční a audio elektronika. Cílem návrhu je proto navrhnout univerzální zařízení s jednoduchým a intuitivním ovládáním, přehledným menu, s jasnou a srozumitelnou indikací nastavení a především také s logickým a vypovídajícím rozmístěním testovacích bodů. Rozmístění testovacích bodů a především proměření konkrétních bodů dá studentovi pracujícím na tomto přípravku jasnou představu o tom, jak celé zařízení pro D/A převod pracuje. V následující kapitole bude proto podrobně rozebráno ovládání laboratorního přípravku včetně jeho indikace na OLED displeji a indikace pomocí indikačních LED. Dále bude také rozebrán význam jednotlivých testovacích bodů a v neposlední řadě také popsána celá konstrukce zařízení.

### 5.1 Menu a ovládání přípravku

Pro snadnou práci na laboratorním přípravku, u kterého se předpokládá možnost změny významných parametrů, je velmi důležité zvolit správnou indikaci nastavených parametrů, se kterými v daný moment laboratorní přípravek případně daný obvod pracuje. Nejvhodnější a nesrozumitelnější indikace nastavení parametrů je pomocí displeje, kdy za pomoci displeje a především vhodně naprogramovaného řídicího algoritmu mikrokontroléru, bylo vytvořeno intuitivní ovládací menu.

Pro snadnou práci na přípravku je však také klíčové nepoužít zbytečné velké množství ovládacích tlačítek. Velké množství ovládacích prvků by mohlo značně znepráhlednit ovládání navrženého zařízení. Na navrženém přípravku jsou proto použity pouze 4 řídicí a ovládací tlačítka, které svojí činností zabezpečí bezproblémové ovládání a nastavování požadovaných parametrů celého laboratorního přípravku. První dvě tlačítka označované jako Menu UP a Menu DOWN slouží pro pohyb v hlavním menu. Třetí tlačítko (SUBMENU) slouží pro výběr příslušné podnabídky každého konkrétního menu. Algoritmus tohoto tlačítka je vymyšlen tak, že každým stiskem tlačítka se vyvolává neustále další a další podnabídka a neustále dokola, tedy jedná se o kruhové menu. Posledním ovládacím tlačítkem je tlačítko potvrzovací (OK). Stiskem tohoto tlačítka dojde k potvrzení požadované předvolby. Pro správnou činnost tlačítek a pro jejich korektní chování je nezbytně nutné ošetřit zákmity tlačítek. Ošetření zákmitů je provedeno softwarově, kdy stav každého tlačítka je ověřován v době přerušení vyvolené přetečením interního časovače mikrokontroléru MSP430F5529.

#### 5.1.1 Výchozí stav laboratorního přípravku

Pokud se laboratorní přípravek připojí k napájecímu zdroji, nejprve se na displeji objeví uvítací obrazovka viz Obr. 5.1.1. Po stisku ovládacího tlačítka, které slouží pro výběr hlavního menu (Menu UP) dojde k přepnutí z uvítací obrazovky do režimu nastavování a zobrazí se první nabídka z menu viz Obr. 5.1.2. V tomto režimu nastavování je možné za pomoci obou tlačítek určených pro pohyb v menu (Menu UP a Menu DOWN)

vybírat požadovaný parametry, který má být změněn. V tomto momentě pokud jsou procházeny všechny nabídky menu nejsou zobrazeny žádné podnabídky daných parametrů menu, jak je dobře patrné z Obr. 5.1.2, čímž je indikována skutečnost, že doposud nebyl nastaven člověkem pracujícím na tomto laboratorním přípravku žádný parametr a nastavení parametrů je výchozí. Tento výchozí stav je také indikován skutečností, že doposud jsou všechny LED diody u obou indikačních obvodů zhasnuty. Laboratorní přípravek je možné do výchozího stavu uvést přes poslední nabídku menu, která slouží k resetu všech nastavení. Po potvrzení této volby za pomoci tlačítka OK dojde k načtení výchozích hodnot všech řídicích registrů obou obvodů zprostředkovávajících D/A převod. Výchozí nastavení všech důležitých parametrů D/A převodníku a S/PDIF přijímače je uvedeno v Tab. 5.1.1.

Tab. 5.1.1: Výchozí nastavení přípravku D/A převodníku

|                     |          |
|---------------------|----------|
| Vstup               | Optický  |
| Mód komunikace      | I2S      |
| Počet bitů          | 24 bitů  |
| Vzorkovací kmitočet | 48 kHz   |
| De-Emphasis filtr   | Vypnutý  |
| Výstupní formát     | Stereo   |
| Detektor fáze       | Normální |
| Mute                | Ne       |

## 5.1.2 Struktura ovládacího menu

Ke snadnému ovládání, nastavování a práci na přípravku, bylo vytvořeno jednoduché, přehledné a intuitivní menu, jehož struktura je uvedena v Tab. 5.1.2 a Tab. 5.1.3. Tato struktura představuje vlastně veškeré možnosti v nastavení příslušných parametrů obou obvodů resp. celého laboratorního přípravku.

Tab. 5.1.2: Struktura ovládacího menu přípravku D/A převodníku

| Menu č. | Název parametru | Podnabídky      |
|---------|-----------------|-----------------|
| 1.      | Input           | Optical         |
|         |                 | Coaxial         |
| 2.      | Serial Mode     | Right Justified |
|         |                 | I2S Compatible  |
|         |                 | Left Justified  |

Tab. 5.1.3: Struktura ovládacího menu přípravku D/A převodníku, pokračování

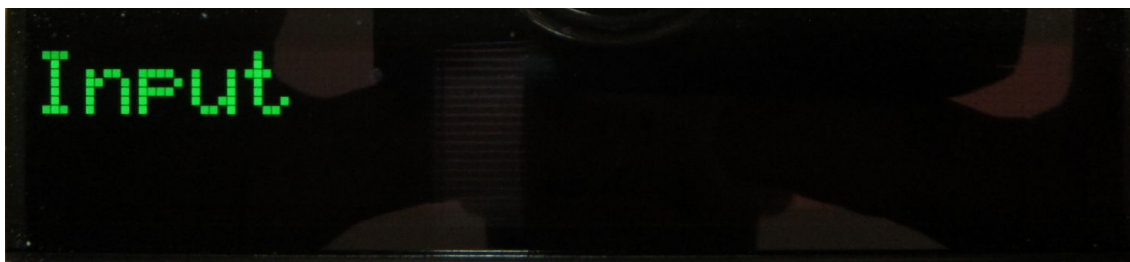
| Menu č. | Název parametru            | Podnabídky   |
|---------|----------------------------|--------------|
| 3.      | Number of Bits             | 16-Bits      |
|         |                            | 20-Bits      |
|         |                            | 24-Bits      |
| 4.      | De-Emphasis for            | None         |
|         |                            | 44.1 kHz     |
|         |                            | 32 kHz       |
|         |                            | 48 kHz       |
| 5.      | Output Format              | Stereo       |
|         |                            | Mono Left    |
|         |                            | Mono Right   |
| 6.      | Phase Detector Update Rate | Normal       |
|         |                            | Higher       |
| 7.      | Mute                       | Yes          |
|         |                            | No           |
| 8.      | Reset                      | All Settings |

Jak bylo uvedeno k ovládání a pro pohyb v menu slouží dvě tlačítka (Menu UP a Menu DOWN) k výběru podnabídky z příslušné položky v menu slouží třetí tlačítko (SUBMENU). Funkce tohoto tlačítka je snadná. Neustálým stiskáváním tohoto tlačítka je pohybováno v kruhových podnabídkách každé položky hlavního menu. První podnabídka první nabídky v menu je zobrazena na Obr. 5.1.3.



Obr. 5.1.1: Uvítací obrazovka na přípravku





Obr. 5.1.2: První nabídka po stisku tlačítka Menu UP



Obr. 5.1.3: První podnabídka první nabídky po stisku tlačítka SUBMENU

Pokud je osobou pracující na laboratorním přípravku nalezen požadovaný parametr, který má být nastaven, například jak je uvedeno na Obr. 5.1.3, stiskne se jednoduše poslední čtvrté (OK) ovládací tlačítko. Tímto stiskem tlačítka dojde k odeslání požadovaných dat do příslušného koncového zařízení (přijímač S/PDIF nebo D/A převodník), čímž dojde k nastavení činnosti tohoto koncového zařízení. Zároveň však dojde k odeslání dat do příslušného indikačního převodníku a také k zapamatování této předvolby ve vlastním menu. Díky čemuž je zajištěna dokonalá kontrola v nastavení požadovaných parametrů převodníku a přijímače. Tedy pokud po odeslání požadovaného parametru, bude zpětně procházeno v hlavním menu (tlačítka Menu UP a Menu DOWN) bude okamžitě na druhém řádku displeje indikována uživatelem nastavená hodnota patřičného parametru a také na LED indikacích indikováno konkrétní nastavení příslušného řídicího registru přijímače S/PDIF a D/A převodníku, která právě odpovídá danému parametru indikovanému na OLED displeji.

### 5.1.3 Reset laboratorního přípravku

V případě dokončení měření na laboratorním přípravku lze snadno uvést přípravek do výchozí hodnoty. Tedy do stavu, který odpovídá připojení laboratorního přípravku ke zdroji napájení. Bylo by však velmi nevhodné připravit pro nastavení výchozích hodnot odpojovat a zpětně připojovat k tomuto napájecímu zdroji. Proto poslední nabídkou menu je RESET. Tento RESET proveden zresetování přijímače S/PDIF a D/A převodníku, čímž dojde k nastavení jejich řídicích registrů do výchozích hodnot. Tato skutečnost je indikována zhasnutím všech indikačních led diod u obou těchto obvodů. Zároveň je však nutné s tímto resetem uvést do výchozí hodnoty i předvolby menu a proto po potvrzení resetu (opět 4.tlačítko OK) dojde i k úplnému vymazání předvoleb, které byly osobou pracující na přípravku po dobu měření postupně nastavené a při pohybu tlačítka menu UP a menu DOWN již na druhém řádku displeje není zobrazen žádný dříve předvolený parametr a všechny indikační led diody obou indikačních

obvodů jsou opět zhasnuty. Zařízení je tak uvedeno do zcela výchozího stavu a je připraveno na další měření.

## 5.2 Měření na laboratorním přípravku

Laboratorní přípravek včetně všech jeho DPS bude implementován do jedné uzavřené krabičky. Veškeré měřicí body budou vyvedeny na vrchní panel a osoba pracující na zařízení se tak bude moc měřícími přístroji připojit na požadovaný testovací bod. Za pomoci osciloskopu nebo analyzátoru si bude možné zobrazit průběh vstupního S/PDIF signálu, rámce komunikace mezi přijímačem a D/A převodníkem, dále také rozdílové výstupy D/A převodníku každého kanálu nebo také výstup z diferenčních zesilovačů či výstupu z aktivního rekonstrukčního filtru atd.. Rozmístění TP je systematické a na horní panel jsou vyvedena všechna důležitá místa všech obvodů sloužících pro D/A převod. Díky čemuž osoba pracující na tomto laboratorním přípravku získá po odměření laboratorní úlohy velmi dobrou představu o činnosti celého zařízení a také o činnosti všech jednotlivých obvodů sloužících pro D/A převod.

Na vrchní panel jsou také vyvedeny napájecí zdířky pro konektory od napájecího laboratorního zdroje Diametral. Jak bylo uvedeno v kap 4.1 o napájení laboratorního přípravku, jsou tyto zdířky z důvodu ochrany opatřeny ochrannými diodami. Ty v případě prepólování přípravku okamžitě sepnou a zkratují tak vstup laboratorního zdroje Diametral. Ten jelikož je vybaven proudovými ochranami okamžitě odpojí svůj výstup od laboratorního přípravku. Tímto opatřením je přípravek dokonale ochráněn. Druhou základní ochranou přípravku je umístění všech částí přípravku do uzavřené krabičky. Do přípravku tak nebude možné během měření nijak neodborně zasahovat. V neposlední řadě jsou také na vrchní panel vyvedeny všechny LED indikátory nastavení přijímače S/PDIF a D/A převodníku a spolu s těmito indikátory je vyveden na vrchní panel také OLED displej. Ten je však z důvodu ochrany proti poškrábání umístěn pod ochranné plexisklo. Poslední a velmi důležitou částí, která je vyvedena na vrchní panel, jsou pochopitelně ovládací prvky laboratorního přípravku.

Tab. 5.2.1: Význam TP v laboratorním přípravku

| Číslo testovacího bodu | Význam testovacího bodu                                 |
|------------------------|---------------------------------------------------------|
| TP1                    | Výstup z přijímacího RCA cinche – S/PDIF signál         |
| TP2                    | Výstup optického přijímače - S/PDIF signál              |
| TP3                    | Sériová data komunikace - přijím. S/PDIF → D/A převod.  |
| TP4                    | Hod. sig. LP kanálu kom. - přijím. S/PDIF → D/A převod. |
| TP5                    | Bitové hodiny komunikace - přijím. S/PDIF → D/A převod. |
| TP6                    | Hod. signál komunikace - přijím. S/PDIF → D/A převod.   |

Tab. 5.2.2: Význam TP v laboratorním přípravku, pokračování

| Číslo testovacího bodu | Význam testovacího bodu                          |
|------------------------|--------------------------------------------------|
| TP7                    | Pozitivní výstup P kanálu (výstup z D/A převod.) |
| TP8                    | Negativní výstup P kanálu (výstup z D/A převod.) |
| TP9                    | Negativní výstup L kanálu (výstup z D/A převod.) |
| TP10                   | Pozitivní výstup L kanálu (výstup z D/A převod.) |
| TP11                   | Výstup z rekonstrukčního filtru                  |
| TP12                   | Výstup z rekonstrukčního filtru                  |
| TP13                   | Výstup z rekonstrukčního filtru                  |
| TP14                   | Výstup z rekonstrukčního filtru                  |
| TP15                   | Výstup z D/A převodníku L kanál                  |
| TP16                   | Výstup z D/A převodníku P kanál                  |

## 6 MĚŘENÍ

Důležitou a poslední kapitolou této diplomové práce a také důležitou součástí při vývoji obecně jakéhokoliv zařízení, je důkladné proměření všech klíčových parametrů navrženého zařízení a ověření tak teoretických předpokladů, se kterými se v průběhu vývoje pracovalo. V případě navrženého laboratorního přípravku, který je přímo určen pro měřicí účely, je toto proměření a zjištění tak klíčových parametrů D/A převodníku ještě důležitější. Změřené údaje ve všech bodech této kapitoly totiž budou sloužit jako kontrolní pro následný vzorový protokol, který bude na závěr této kapitoly také uveden.

Měření přípravku D/A převodníku probíhalo v laboratoři Nízkofrekvenční a audio elektroniky přímo na pracovišti s daným vybavením a přístroji, které budou využity pro měření laboratorní úlohy využívající navržený laboratorní přípravek D/A převodníku. Pro měření parametrů D/A převodníku jsou nejdůležitější výstupní testovací body tohoto laboratorního převodníku, kdy se prostřednictvím těchto TP měří prakticky všechny parametry přípravku. Měření je tak zaměřeno především na měření jakostní analogové části převodníku při změně vlastních parametrů tohoto laboratorního přípravku D/A převodníku. Ostatní TP jsou určeny spíše pro zajímavost a pro případné zobrazení komunikačního rámce mezi obvody přijímače S/PDIF a D/A převodníku, pro zobrazení vstupního S/PDIF signálu, zobrazení rozdílových výstupů D/A převodníku AD1955 atd.. Díky čemuž osoba pracující na přípravku snáze pochopí principy činnosti obou těchto obvodů.

K napájení byl využit laboratorní zdroj Diametral. Ke sledování a kontrole výstupních průběhů D/A převodníku byl využit digitální osciloskop Tektronix TDS 2014. K odečtu úrovně výstupního signálu a harmonického zkreslení D/A převodníku byl využit audio analyzátor Audio Precision Portable One. Jako zdroj S/PDIF signálu byl použit CD rekordér Philips CDR 796, pomocí něhož byly přehrávány patřičné sekvence testovacích CD disků (Sony Test CD Type 3, AVP & Marutech CD generator).

### 6.1 Měření kmitočtové modulové charakteristiky a THD+N

Základním měřením D/A převodníku, ale i obecně jakéhokoliv audio zařízení, je měření jeho kmitočtové modulové charakteristiky. Toto měření poskytne dokonalou představu o kmitočtové šířce pásma, kterou je D/A převodník schopen zpracovat. Na obou stranách výsledné kmitočtové modulové charakteristiky je tak možné odečíst krajní body pro pokles zesílení (přenosu) o -3 dB, mezi kterými se nachází právě ona šířka pásma. K měření bylo využito testovací CD AVP & Marutech, které má jmenovité napětí záznamu  $U_1 = 1$  V. K měření byly využity testovací sekce 6 až 38. V Tab. 6.1.1 až Tab. 6.1.5 jsou k těmto testovacím sekcím uvedeny také konkrétní kmitočty, které se na těchto sekcích nachází. Pro měření se bylo nutné připojit osciloskopickou sondou na výstup laboratorního přípravku. Výstupem přípravku je AGND a TP15 (levý kanál) případně TP16 (pravý kanál). Tato sonda je přes „T člen“ propojena s digitálním osciloskopem Tektronix TDS 2014 a s audio analyzátozem Audio Precision Portable One. Na

analyzátoru bylo kromě úrovně výstupního signálu ( $U_2$ ) D/A převodníku odečítáno také harmonické zkreslení THD+N. Měření se opakovalo pro všechny 3 vzorkovací kmitočty, kterými laboratorní přípravek disponuje (48 kHz, 96 kHz, 192 kHz).

Nastavení přípravku:

- Input → Optical
- Serial Mode → I2S
- Number of Bits → 24-Bits
- Sample Rate → volitelně 48 kHz, 96 kHz, 192 kHz
- De-Emphasis for → None
- Output Format → Stereo
- Phase Detector Update Rate → Normal

Před samotným měřením přípravku D/A převodníku, je nutné přípravek správně nastavit. Na výslednou modulovou kmitočtovou závislost však nemá žádný vliv volba sériového módu ani volba Phase Detector Update Rate. V případě testovacích CD se nijak neprojevila ani změna rozlišení, kterou je vstupní signál zpracován. Přesto je však doporučeno ponechat nastavení tak, jak je uvedeno výše.

V každém bodě měření je z displeje analyzátoru odečtena přímo hodnota THD+N [%] a také úroveň výstupního audio signálu  $U_2$  [V]. Modul přenosu se poté vypočte snadno za pomoci vztahu (6.1.1)

$$A_u = 20 \cdot \log\left(\frac{U_2}{U_1}\right) \quad (\text{dB}; \text{V}; \text{V}) \quad (6.1.1)$$

Příklad výpočtu modulu přenosu (napětového zesílení) pro  $f = 1000 \text{ Hz}$  (Tab. 6.1.1):

$$A_u = 20 \cdot \log\left(\frac{0,957}{1}\right)$$

$$A_u = -0,382 \text{ dB}$$

Tab. 6.1.1: Měření modulové kmitočtové char. a THD+N pro  $f_{vz} = 48 \text{ kHz}$

| Stopa | f [Hz] | $U_1$ [V] | $U_2$ [V] | $A_u$ [dB] | THD+N [%] |
|-------|--------|-----------|-----------|------------|-----------|
| 6     | 1 000  | 1         | 0,957     | -0,382     | 0,0074    |
| 7     | 20     | 1         | 0,954     | -0,409     | 0,0950    |
| 8     | 25     | 1         | 0,955     | -0,400     | 0,0091    |
| 9     | 32     | 1         | 0,956     | -0,391     | 0,0084    |
| 10    | 40     | 1         | 0,956     | -0,391     | 0,0085    |
| 11    | 50     | 1         | 0,957     | -0,382     | 0,0084    |
| 12    | 63     | 1         | 0,957     | -0,382     | 0,0076    |
| 13    | 80     | 1         | 0,957     | -0,382     | 0,0076    |

Tab. 6.1.2: Měření modulové kmitočtové char. a THD+N pro  $f_{VZ} = 48$  kHz, pokrač.

| Stopa | f [Hz] | U <sub>1</sub> [V] | U <sub>2</sub> [V] | A <sub>U</sub> [dB] | THD+N [%] |
|-------|--------|--------------------|--------------------|---------------------|-----------|
| 14    | 100    | 1                  | 0,957              | -0,382              | 0,0072    |
| 15    | 125    | 1                  | 0,957              | -0,382              | 0,0071    |
| 16    | 160    | 1                  | 0,957              | -0,382              | 0,0082    |
| 17    | 200    | 1                  | 0,957              | -0,382              | 0,0077    |
| 18    | 250    | 1                  | 0,958              | -0,373              | 0,0079    |
| 19    | 315    | 1                  | 0,957              | -0,382              | 0,0076    |
| 20    | 400    | 1                  | 0,957              | -0,382              | 0,0073    |
| 21    | 500    | 1                  | 0,957              | -0,382              | 0,0077    |
| 22    | 630    | 1                  | 0,958              | -0,373              | 0,0079    |
| 23    | 800    | 1                  | 0,957              | -0,382              | 0,0079    |
| 24    | 1 000  | 1                  | 0,957              | -0,382              | 0,0081    |
| 25    | 1 250  | 1                  | 0,957              | -0,382              | 0,0078    |
| 26    | 1 600  | 1                  | 0,957              | -0,382              | 0,0082    |
| 27    | 2 000  | 1                  | 0,957              | -0,382              | 0,0088    |
| 28    | 2 500  | 1                  | 0,957              | -0,382              | 0,0078    |
| 29    | 3 150  | 1                  | 0,956              | -0,391              | 0,0081    |
| 30    | 4 000  | 1                  | 0,956              | -0,391              | 0,0085    |
| 31    | 5 000  | 1                  | 0,955              | -0,400              | 0,0079    |
| 32    | 6 300  | 1                  | 0,953              | -0,418              | 0,0081    |
| 33    | 8 000  | 1                  | 0,951              | -0,436              | 0,0088    |
| 34    | 10 000 | 1                  | 0,947              | -0,473              | 0,0078    |
| 35    | 12 500 | 1                  | 0,942              | -0,519              | 0,0085    |
| 36    | 16 000 | 1                  | 0,932              | -0,612              | 0,0110    |
| 37    | 20 000 | 1                  | 0,918              | -0,743              | 0,0185    |

Tab. 6.1.3: Měření modulové kmitočtové char. a THD+N pro  $f_{VZ} = 96$  kHz

| Stopa | f [Hz] | U <sub>1</sub> [V] | U <sub>2</sub> [V] | A <sub>U</sub> [dB] | THD+N [%] |
|-------|--------|--------------------|--------------------|---------------------|-----------|
| 6     | 1 000  | 1                  | 0,957              | -0,382              | 0,0094    |
| 7     | 20     | 1                  | 0,954              | -0,409              | 0,0105    |
| 8     | 25     | 1                  | 0,954              | -0,409              | 0,0076    |
| 9     | 32     | 1                  | 0,955              | -0,400              | 0,0099    |

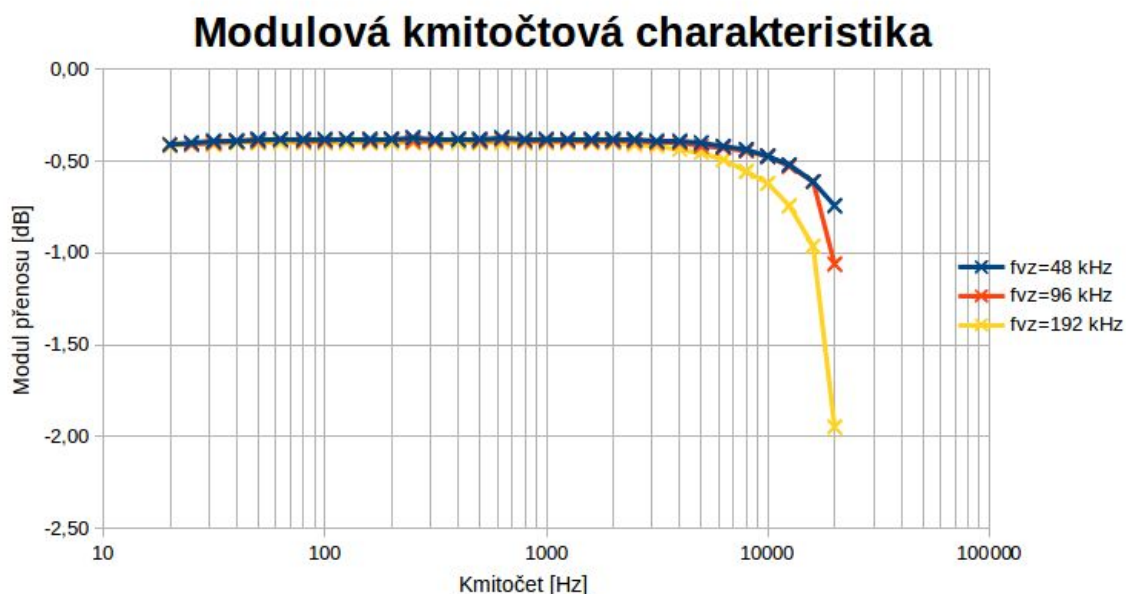
Tab. 6.1.4: Měření modulové kmitočtové char. a THD+N pro  $f_{VZ} = 96$  kHz, pokrač.

| Stopa | f [Hz] | U <sub>1</sub> [V] | U <sub>2</sub> [V] | A <sub>U</sub> [dB] | THD+N [%] |
|-------|--------|--------------------|--------------------|---------------------|-----------|
| 10    | 40     | 1                  | 0,956              | -0,391              | 0,0094    |
| 11    | 50     | 1                  | 0,956              | -0,391              | 0,0085    |
| 12    | 63     | 1                  | 0,957              | -0,382              | 0,0082    |
| 13    | 80     | 1                  | 0,956              | -0,391              | 0,0075    |
| 14    | 100    | 1                  | 0,956              | -0,391              | 0,0650    |
| 15    | 125    | 1                  | 0,957              | -0,382              | 0,0073    |
| 16    | 160    | 1                  | 0,956              | -0,391              | 0,0068    |
| 17    | 200    | 1                  | 0,957              | -0,382              | 0,0074    |
| 18    | 250    | 1                  | 0,956              | -0,391              | 0,0069    |
| 19    | 315    | 1                  | 0,956              | -0,391              | 0,0083    |
| 20    | 400    | 1                  | 0,957              | -0,382              | 0,0070    |
| 21    | 500    | 1                  | 0,956              | -0,391              | 0,0075    |
| 22    | 630    | 1                  | 0,957              | -0,382              | 0,0067    |
| 23    | 800    | 1                  | 0,956              | -0,391              | 0,0072    |
| 24    | 1 000  | 1                  | 0,956              | -0,391              | 0,0085    |
| 25    | 1 250  | 1                  | 0,956              | -0,391              | 0,0087    |
| 26    | 1 600  | 1                  | 0,956              | -0,391              | 0,0078    |
| 27    | 2 000  | 1                  | 0,956              | -0,391              | 0,0094    |
| 28    | 2 500  | 1                  | 0,956              | -0,391              | 0,0091    |
| 29    | 3 150  | 1                  | 0,955              | -0,400              | 0,0078    |
| 30    | 4 000  | 1                  | 0,955              | -0,400              | 0,0101    |
| 31    | 5 000  | 1                  | 0,953              | -0,418              | 0,0092    |
| 32    | 6 300  | 1                  | 0,952              | -0,427              | 0,0095    |
| 33    | 8 000  | 1                  | 0,950              | -0,446              | 0,0117    |
| 34    | 10 000 | 1                  | 0,947              | -0,473              | 0,0191    |
| 35    | 12 500 | 1                  | 0,941              | -0,528              | 0,0122    |
| 36    | 16 000 | 1                  | 0,932              | -0,612              | 0,0263    |
| 37    | 20 000 | 1                  | 0,885              | -1,061              | 2,2200    |

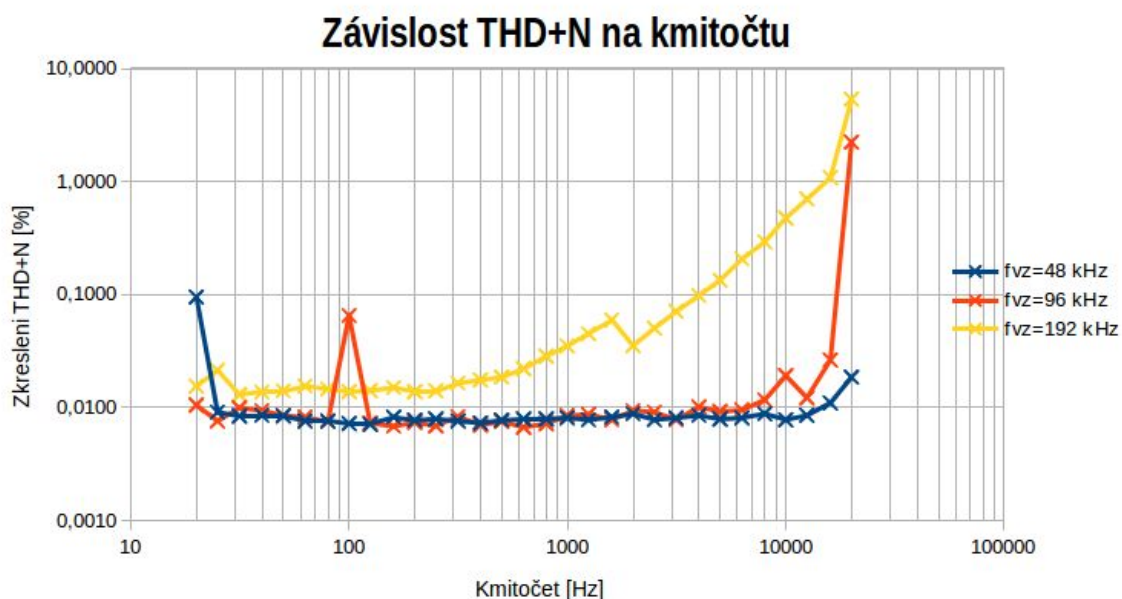
Tab. 6.1.5: Měření modulové kmitočtové char. a THD+N pro  $f_{VZ} = 192 \text{ kHz}$

| Stopa | f [Hz] | U <sub>1</sub> [V] | U <sub>2</sub> [V] | A <sub>U</sub> [dB] | THD+N [%] |
|-------|--------|--------------------|--------------------|---------------------|-----------|
| 6     | 1 000  | 1                  | 0,955              | -0,400              | 0,0356    |
| 7     | 20     | 1                  | 0,953              | -0,418              | 0,0154    |
| 8     | 25     | 1                  | 0,954              | -0,409              | 0,0214    |
| 9     | 32     | 1                  | 0,954              | -0,409              | 0,0130    |
| 10    | 40     | 1                  | 0,955              | -0,400              | 0,0137    |
| 11    | 50     | 1                  | 0,955              | -0,400              | 0,0140    |
| 12    | 63     | 1                  | 0,955              | -0,400              | 0,0154    |
| 13    | 80     | 1                  | 0,955              | -0,400              | 0,0146    |
| 14    | 100    | 1                  | 0,955              | -0,400              | 0,0138    |
| 15    | 125    | 1                  | 0,955              | -0,400              | 0,0141    |
| 16    | 160    | 1                  | 0,955              | -0,400              | 0,0150    |
| 17    | 200    | 1                  | 0,955              | -0,400              | 0,0138    |
| 18    | 250    | 1                  | 0,955              | -0,400              | 0,0140    |
| 19    | 315    | 1                  | 0,955              | -0,400              | 0,0164    |
| 20    | 400    | 1                  | 0,955              | -0,400              | 0,0175    |
| 21    | 500    | 1                  | 0,955              | -0,400              | 0,0185    |
| 22    | 630    | 1                  | 0,955              | -0,400              | 0,0221    |
| 23    | 800    | 1                  | 0,955              | -0,400              | 0,0284    |
| 24    | 1 000  | 1                  | 0,955              | -0,400              | 0,0351    |
| 25    | 1 250  | 1                  | 0,955              | -0,400              | 0,0451    |
| 26    | 1 600  | 1                  | 0,955              | -0,400              | 0,0595    |
| 27    | 2 000  | 1                  | 0,955              | -0,400              | 0,0352    |
| 28    | 2 500  | 1                  | 0,954              | -0,409              | 0,0502    |
| 29    | 3 150  | 1                  | 0,953              | -0,418              | 0,0708    |
| 30    | 4 000  | 1                  | 0,951              | -0,436              | 0,0979    |
| 31    | 5 000  | 1                  | 0,949              | -0,455              | 0,1340    |
| 32    | 6 300  | 1                  | 0,945              | -0,491              | 0,2060    |
| 33    | 8 000  | 1                  | 0,938              | -0,556              | 0,2930    |
| 34    | 10 000 | 1                  | 0,931              | -0,621              | 0,4740    |
| 35    | 12 500 | 1                  | 0,918              | -0,743              | 0,6970    |
| 36    | 16 000 | 1                  | 0,895              | -0,964              | 1,0800    |
| 37    | 20 000 | 1                  | 0,799              | -1,949              | 5,3300    |





Obr. 6.1.1: Modulové kmitočtové charakteristiky pro různé  $f_{vz}$



Obr. 6.1.2: Harmonická zkreslení D/A převodníku pro různé  $f_{vz}$

Po provedení měření pro všechny tři vzorkovací kmitočty D/A převodníku jsou z těchto změřených údajů viz. Tab. 6.1.1, Tab. 6.1.2, Tab. 6.1.3, Tab. 6.1.4 a Tab. 6.1.5 sestaveny grafické závislosti.

Na Obr. 6.1.1 je uvedena modulová kmitočtová charakteristika D/A převodníku pro jednotlivé vzorkovací kmitočty. Všechny tři závislosti vykazují velmi vyrovnanou kmitočtovou závislost modulu přenosu. Tato vyrovnanost modulových kmitočtových charakteristik poukazuje na velmi vysokou kvalitu použitých integrovaných obvodů a to nejen v části D/A převodníku ale i v aktivním rekonstrukčním filtru. Ani u jedné z

těchto charakteristik tak není možné odečíst onu dvojici mezních kmitočtů (pokles o -3 dB) určující šířku přenášeného pásma. Šířka pásma D/A převodníku je tudíž větší než 20 kHz a D/A převodník je tak schopen bez problémů zpracovat kmitočty v celém rozsahu lidské slyšitelnosti.

Druhou charakteristiku viz. Obr. 6.1.2 jsou kmitočtové závislosti harmonického zkreslení D/A převodníku, tedy závislosti harmonického zkreslení THD+N na kmitočtu vstupního audio signálu ze sekvencí testovacího CD. Podobně jako v případě modulových kmitočtových závislostí, bylo měření provedeno pro všechny dostupné vzorkovací kmitočty a závislosti byly vyneseny do jednoho grafu. V případě vzorkovacího kmitočtu 48 kHz je v celém rozsahu harmonické zkreslení nejmenší a prakticky se v celém kmitočtovém pásmu drží pod úrovní 0,01%, což je dobře patrné z Obr. 6.1.2 a také z Tab. 6.1.1 a Tab. 6.1.2. Se vzorkovacím kmitočtem 96 kHz došlo k velmi nepatrnému navýšení harmonického zkreslení v celém kmitočtovém rozsahu ve srovnání se závislostí zkreslení pro vzorkovací kmitočet 48 kHz. Výraznější zhoršení nastává až na posledním testovacím kmitočtu (20 kHz). Dle teoretických předpokladů a vzhledem k údajům uvedených v katalogových listech obou obvodů zprostředkovávajících D/A převod (přijímač S/PDIF, D/A převodník), dosahuje harmonické zkreslení THD+N nejvyšších hodnot pro vzorkovací kmitočet 192 kHz. Toto navýšení je způsobeno samotnou činností a vlastností obou těchto obvodů. U všech vzorkovacích kmitočtů a v celém kmitočtovém pásmu se však úroveň harmonického zkreslení drží na velmi dobré úrovni, což poukazuje na použití velmi kvalitních obvodů. Nejklíčovější kmitočtem při kterém se THD+N běžně uvádí je 1000 Hz. Při tomto kmitočtu přípravek D/A převodníku dosahuje následujících hodnot harmonického zkreslení:

- $f_{vz} = 48 \text{ kHz} \rightarrow \text{THD+N} = 0,0074 \%$
- $f_{vz} = 96 \text{ kHz} \rightarrow \text{THD+N} = 0,0094 \%$
- $f_{vz} = 192 \text{ kHz} \rightarrow \text{THD+N} = 0,0356 \%$

## 6.2 Měření separace obou kanálů

Dalším důležitým parametrem, který poukazuje na kvalitu D/A převodníku je separace obou jeho kanálů. Tímto měřením dochází k měření tzv. přeslechů, kdy se do jednoho z kanálů D/A převodníku pustí plný vstupní signál a měří se úroveň na druhém kanálu, který je v tuto chvíli bez vstupního signálu. Měření probíhalo za použití audio analyzátoru Audio Precision Portable One. Testovací sekvence byly použity z testovacího CD disku Sony. Byly využity sekvence 29 až 32. Tyto testovací sekvence mají nahraný záznam pouze v levém kanálu. V pravém kanálu je obsažena tzv. digitální nula (infinity zero). V tomto bodě měření bylo nutné tedy použít dvě osciloskopické sondy a pomocí těchto sond se připojit na oba výstupy laboratorního přípravku D/A převodníku. Analyzátor bylo nutné přepnout do nabídky LEVEL a nastavit na obou kanálech jednotku dBr. Jednotlivé testovací sekvence pro tento bod měření mají různé kmitočty a proto bylo nezbytně nutné pro každou novou sekvenci vždy zkalibrovat analyzátor (tlačítko dBr zero). Měření separace obou kanálů D/A převodníku bylo provedeno opět pro všechny dostupné vzorkovací kmitočty.

Nastavení přípravku:

- Input → Optical
- Serial Mode → I2S
- Number of Bits → 24-Bits
- Sample Rate → volitelně 48 kHz, 96 kHz, 192 kHz
- De-Emphasis for → None
- Output Format → Stereo
- Phase Detector Update Rate → Normal

Jako v případě měření modulové kmitočtové závislosti a zkreslení THD+N nemá na výsledky měření žádný vliv změna sériového módu, počtu bitů a změna detektoru fáze, ale opět je vhodné nastavit přípravek, jak je uvedeno výše. V tomto bodě měření docházelo tak pouze ke změně vzorkovacího kmitočtu na přípravku.

Tab. 6.2.1: Měření separace obou kanálů při  $f_{VZ} = 48$  kHz

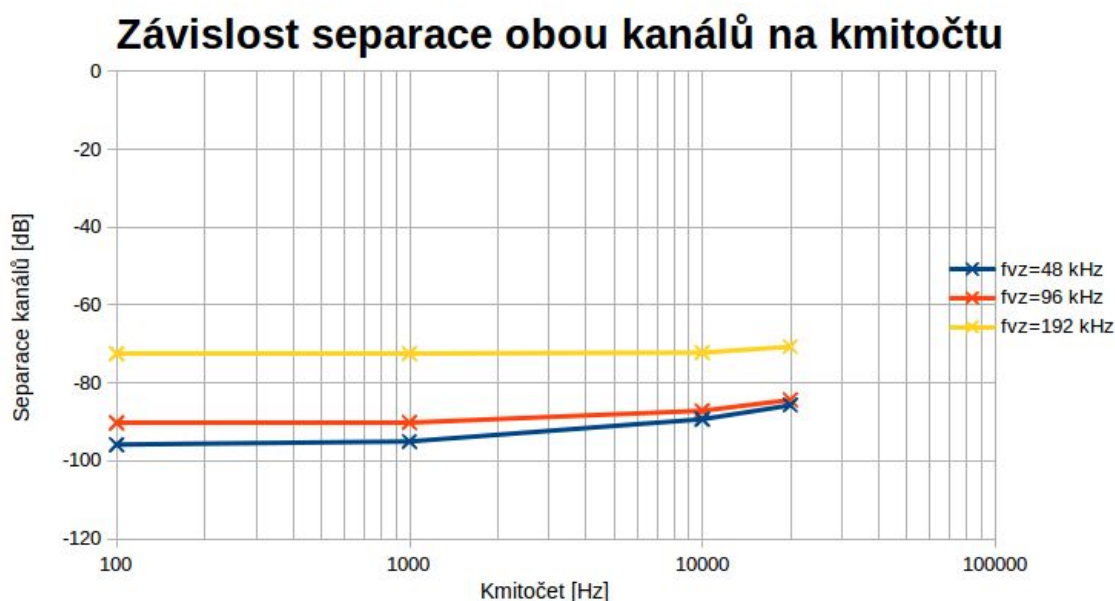
| Stopa | f [Hz] | $U_R$ [dB] | $U_L$ [dB] |
|-------|--------|------------|------------|
| 29    | 100    | 0          | -95,83     |
| 30    | 1 000  | 0          | -95,01     |
| 31    | 10 000 | 0          | -89,32     |
| 32    | 20 000 | 0          | -85,74     |

Tab. 6.2.2: Měření separace obou kanálů při  $f_{VZ} = 96$  kHz

| Stopa | f [Hz] | $U_R$ [dB] | $U_L$ [dB] |
|-------|--------|------------|------------|
| 29    | 100    | 0          | -90,26     |
| 30    | 1 000  | 0          | -90,18     |
| 31    | 10 000 | 0          | -87,13     |
| 32    | 20 000 | 0          | -84,36     |

Tab. 6.2.3: Měření separace obou kanálů při  $f_{VZ} = 192$  kHz

| Stopa | f [Hz] | $U_R$ [dB] | $U_L$ [dB] |
|-------|--------|------------|------------|
| 29    | 100    | 0          | -72,49     |
| 30    | 1 000  | 0          | -72,48     |
| 31    | 10 000 | 0          | -72,21     |
| 32    | 20 000 | 0          | -70,71     |



Obr. 6.2.1: Separace obou kanálů D/A převodníku pro různé  $f_{vz}$

Největší separaci obou kanálů poskytuje D/A převodník v případě použití nejnižšího vzorkovacího kmitočtu viz. Tab. 6.2.1. Se vzorkovacím kmitočtem 96 kHz se separace nepatrně snížila viz. Tab. 6.2.2. Nejhorší separaci obou kanálů poskytuje D/A převodník v případě použití vzorkovacího kmitočtu 192 kHz viz. Tab. 6.2.3. Avšak i s tímto vzorkovacím kmitočtem je separace obou kanálů na velmi dobré úrovni a naměřené údaje separace tak potvrzují kvalitu přípravku D/A převodníku respektive kvalitu jeho součástkové základny, kdy separace v nejlepším případě, tedy v případě použití vzorkovacího kmitočtu 48 kHz, dosahuje úrovně až -95 dB při 1 kHz. Se vzrůstajícím vstupním kmitočtem z testovacích sekvencí separace obou kanálů jen velmi nepatrně poklesává.

### 6.3 Měření linearity

Dalším velmi důležitým měřením, které podává reprezentativní informace o kvalitě D/A převodníku, je měření jeho linearity. Při tomto měření jsou oba kanály buzeny signálem o stejném kmitočtu (1 kHz) a naprosto stejné úrovni. Úroveň příslušné sekvence je známa a uvedena v Tab. 6.3.1, Tab. 6.3.2 a Tab. 6.3.4. K měření bylo opět nutné využít obě osciloskopické sondy připojené ze vstupu audio analyzátoru k výstupu D/A převodníku (TP15, TP16, AGND). K měření byl využit testovací disk Sony a jeho sekvence 14 až 22. Audio analyzátor bylo nutné přepnout do režimu měření úrovně obou kanálů (tlačítko LEVEL) a poté ho zkalibrovat na první testovací stopě (stopa 14) podobně jako v předchozím bodě měření (tlačítko dBr zero). Na dalších stopách se již analyzátor nekalibroval. Cílem měření linearity D/A převodníku je zjistit, zda-li při poklesu úrovně vstupního signálu na známou hodnotu poklesne i výstup obou kanálů D/A převodníku na tuto hodnotu a je samozřejmě žádoucí, aby výstupní úroveň přesně odpovídala vstupní úrovni z testovacího CD, čímž by byl D/A převodník dokonale lineární. Měření linearity bylo provedeno opět pro všechny vzorkovací kmitočty nastavitelné na přípravku.

Nastavení přípravku:

- Input → Optical
- Serial Mode → I2S
- Number of Bits → 24-Bits
- Sample Rate → volitelně 48 kHz, 96 kHz, 192 kHz
- De-Emphasis for → None
- Output Format → Stereo
- Phase Detector Update Rate → Normal

Jako v případě měření modulové kmitočtové závislosti, zkreslení THD+N a měření separace obou kanálů nemá žádný vliv na měření změna sériového módu, počtu bitů a změna detektoru fáze, ale je opět vhodné nastavit přípravek, jak je uvedeno výše. V tomto bodě měření tak docházelo jen zase ke změně vzorkovacího kmitočtu na přípravku.

Tab. 6.3.1: Měření linearity pro  $f_{VZ} = 48$  kHz

| Stopa | $U_1$ [dB] | $U_{2L}$ [dB] TP15 | $U_{2R}$ [dB] TP16 |
|-------|------------|--------------------|--------------------|
| 14    | 0          | 0                  | -0,04              |
| 15    | -1         | -1                 | -0,96              |
| 16    | -3         | -3                 | -2,96              |
| 17    | -6         | -6                 | -5,96              |
| 18    | -10        | -10                | -9,96              |
| 19    | -20        | -20                | -19,97             |
| 20    | -60        | -59,93             | -59,89             |
| 21    | -80        | -78,32             | -77,75             |
| 22    | -90        | -82,86             | -81,61             |

Tab. 6.3.2: Měření linearity pro  $f_{VZ} = 96$  kHz

| Stopa | $U_1$ [dB] | $U_{2L}$ [dB] TP15 | $U_{2R}$ [dB] TP16 |
|-------|------------|--------------------|--------------------|
| 14    | 0          | 0                  | -0,03              |
| 15    | -1         | -1                 | -0,97              |
| 16    | -3         | -3                 | -2,97              |
| 17    | -6         | -6                 | -5,97              |
| 18    | -10        | -10                | -9,97              |
| 19    | -20        | -20                | -19,97             |
| 20    | -60        | -59,58             | -59,57             |

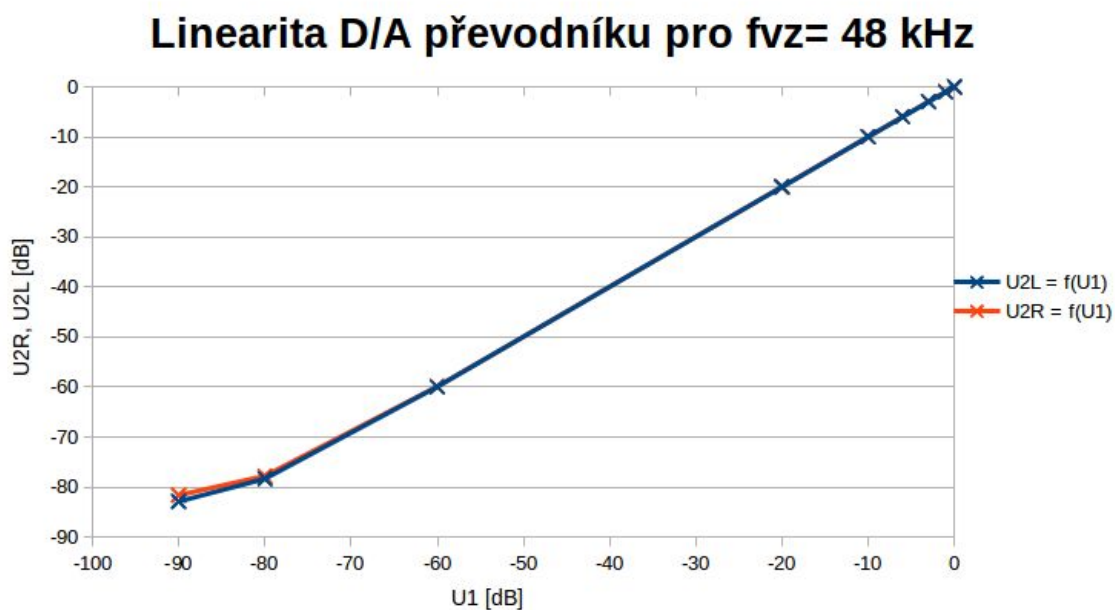
Tab. 6.3.3: Měření linearity pro  $f_{VZ} = 96$  kHz, pokračování

| Stopa | $U_1$ [dB] | $U_{2L}$ [dB] TP15 | $U_{2R}$ [dB] TP16 |
|-------|------------|--------------------|--------------------|
| 21    | -80        | -74,86             | -74,63             |
| 22    | -90        | -76,09             | -75,75             |

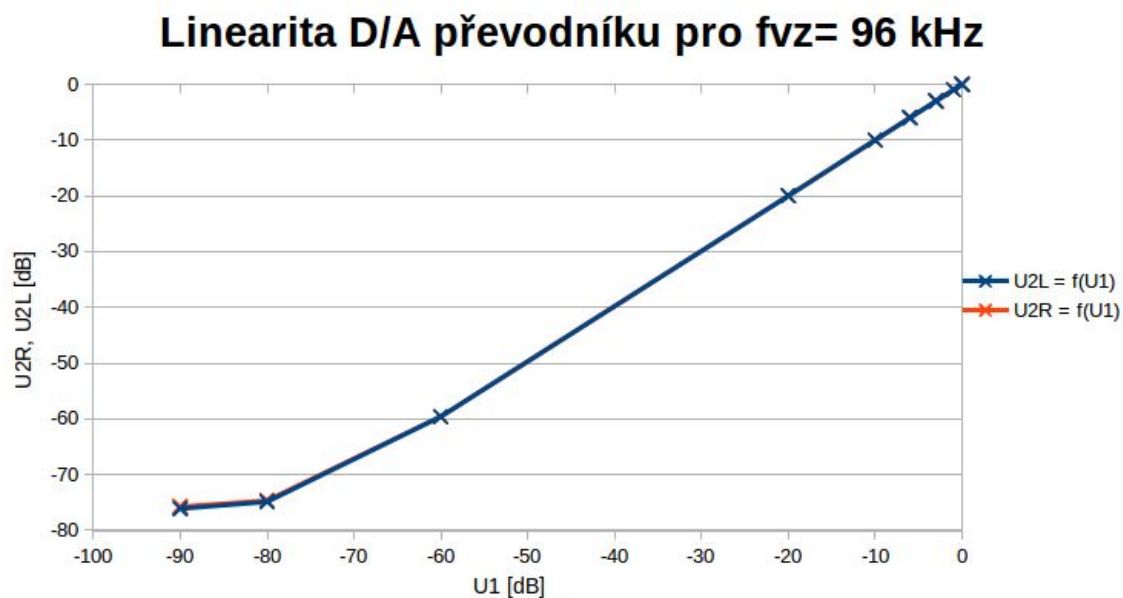
Tab. 6.3.4: Měření linearity pro  $f_{VZ} = 192$  kHz

| Stopa | $U_1$ [dB] | $U_{2L}$ [dB] TP15 | $U_{2R}$ [dB] TP16 |
|-------|------------|--------------------|--------------------|
| 14    | 0          | 0                  | -0,03              |
| 15    | -1         | -1                 | -0,97              |
| 16    | -3         | -3                 | -2,97              |
| 17    | -6         | -6                 | -5,97              |
| 18    | -10        | -10                | -9,97              |
| 19    | -20        | -20                | -19,97             |
| 20    | -60        | -55,23             | -55,23             |
| 21    | -80        | -58,53             | -58,58             |
| 22    | -90        | -58,52             | -57,63             |

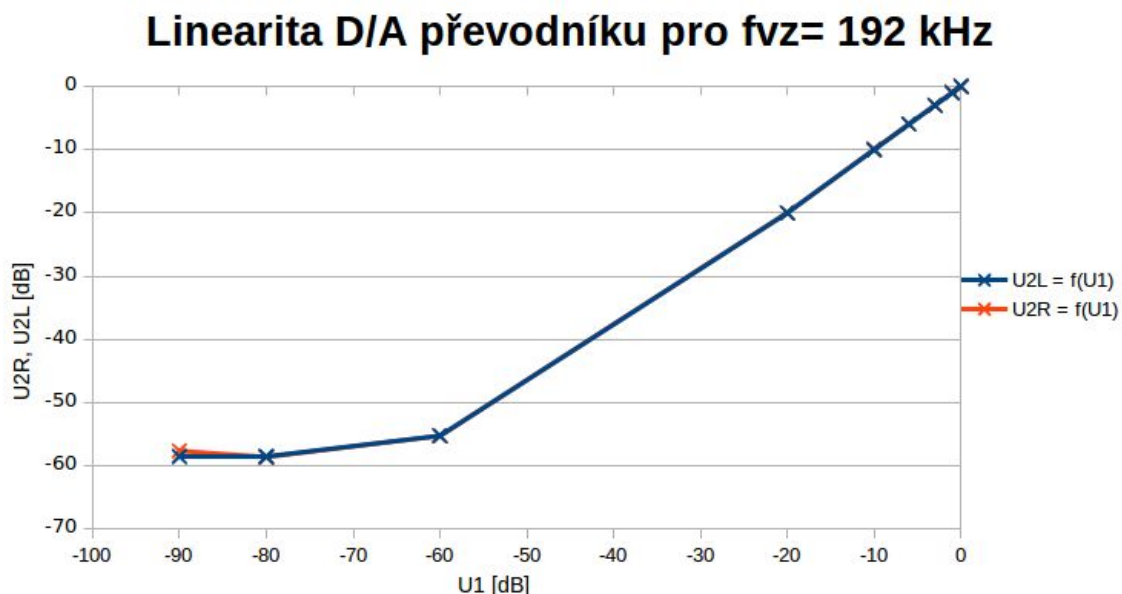
Z naměřených hodnot uvedených v Tab. 6.3.1, Tab. 6.3.2, Tab. 6.3.3 a Tab. 6.3.4 byly vytvořeny grafické závislosti linearity D/A převodníku pro jednotlivé vzorkovací kmitočty viz. Obr. 6.3.1, Obr. 6.3.2, Obr. 6.3.3. Nejlepší linearitu vykazuje D/A převodník při použití nejnižšího vzorkovacího kmitočtu viz. Obr. 6.3.1. Oba kanály klesají prakticky naprosto lineárně až do úrovně -90 dB, což je úroveň testovací sekvence zkušebního CD. Při vzorkovacím kmitočtu 96 kHz se od úrovně -80 dB projevuje mírné odklonění od linearity. Nejhorší odklonění od linearity nastává při použití nejvyššího vzorkovacího kmitočtu viz. Obr. 6.3.3. V případě použití tohoto vzorkovacího kmitočtu nastává výraznější odklonění od linearity již při -60 dB. To je dáno vlastností samotného D/A převodníku a přijímače S/PDIF. Tato skutečnost však navíc koresponduje s relativně nižší separací obou kanálů při použití nejvyššího vzorkovacího kmitočtu (cca -72 dB), která byla uvedena v předchozím bodě měření a zejména pak koresponduje se sníženým poměrem S/N, jehož měření a naměřená hodnota je uvedena v následujícím bodě měření.



Obr. 6.3.1: Měření linearity D/A převodníku pro  $f_{vz} = 48 \text{ kHz}$



Obr. 6.3.2: Měření linearity D/A převodníku pro  $f_{vz} = 96 \text{ kHz}$



Obr. 6.3.3: Měření linearity D/A převodníku pro  $f_{vz}=192$  kHz

Při měření linearity je důležitý také jakýsi souběh obou kanálů. Tedy aby s klesající úrovní signálu z testovacích sekvencí zkušebního CD docházelo ke stejnému poklesu výstupní úrovně obou kanálů D/A převodníku. Z grafických závislostí linearity D/A převodníku pro jednotlivé vzorkovací kmitočty je dobře patrné, že k tomuto souběhu při všech těchto vzorkovacích kmitočtech dochází. Průběhy obou kanálů jsou tak vždy dokonale překryty.

## 6.4 Měření odstupu signálu od šumu

Patrně jedním z nejdůležitějších parametrů D/A převodníku je jeho odstup signálu od šumu. Tento parametr je obecně chápán jako jeden z nejdůležitějších parametrů spolu s harmonickým zkreslením, popisující kvalitu D/A převodníku. Podobně jako harmonické zkreslení THD+N je i měření odstupu signálu od šumového pozadí prováděno na kmitočtu 1 kHz. K měření byl využit opět audio analyzátor Audio Precision Portable One, který byl přepnut do měření úrovní. K jednomu z výstupů laboratorního přípravku D/A převodníku byla připojena osciloskopická sonda, jež byla připojena na vstup analyzátoru. K měření bylo využito zkušební CD Sony se sekvencemi 1 a 23. Na testovací sekvenci 1 je nahrán signál plné úrovně ( $U_1 = 2 \text{ V} = S$ ). Sekvence 23 je tzv. digitální nulou (infinity zero = N). Při přehrávání této sekvence se tak na výstupu D/A převodníku objeví jistá úroveň, která tak představuje pouze úroveň šumu. Při měření tedy došlo nejprve ke změření výstupní úrovně D/A převodníku s plným signálem a poté k odečtení výstupní úrovně D/A převodníku při přehrávání sekvence 23. Měření bylo provedeno opět pro všechny dostupné vzorkovací kmitočty.

Nastavení přípravku:

- Input → Optical
- Serial Mode → I2S



- Number of Bits → 24-Bits
- Sample Rate → volitelně 48 kHz, 96 kHz, 192 kHz
- De-Emphasis for → None
- Output Format → Stereo
- Phase Detector Update Rate → Normal

Jako v případě všech předchozích měření nemá žádný vliv na měření změna sériového módu, počtu bitů a změna detektoru fáze, ale je opět vhodné nastavit přípravek, jak je uvedeno výše. V tomto bodě měření tak docházelo opět pouze ke změně vzorkovacího kmitočtu na přípravku.

Tab. 6.4.1: Měření odstupů signálu od šumu pro  $f_{VZ}= 48\text{kHz}$

| S [V] | N [ $\mu\text{V}$ ] | S/N [-]  | S/N [dB] |
|-------|---------------------|----------|----------|
| 2     | 35,25               | 56737,59 | 95,08    |

Tab. 6.4.2: Měření odstupů signálu od šumu pro  $f_{VZ}= 96\text{kHz}$

| S [V] | N [ $\mu\text{V}$ ] | S/N [-] | S/N [dB] |
|-------|---------------------|---------|----------|
| 2     | 259,5               | 7707,13 | 77,74    |

Tab. 6.4.3: Měření odstupů signálu od šumu pro  $f_{VZ}= 192\text{kHz}$

| S [V] | N [mV] | S/N [-] | S/N [dB] |
|-------|--------|---------|----------|
| 1,998 | 2,332  | 856,78  | 58,66    |

Po odečtení hodnot S v případě přehrávání 1. sekvence a po odečtení úrovně šumu N na výstupu D/A převodníku v případě přehrávání 23. sekvence se jednoduchým poměr těchto dvou napětí určí S/N v absolutní hodnotě. Výsledkem zlogaritmování absolutní hodnoty S/N za pomoci vztahu (6.4.1) je poměr S/N v decibelové míře, což je požadovaný a běžně udávaný údaj o poměru signálu a šumu.

Příklad výpočtu poměru S/N [dB] pro  $f_{VZ}=48\text{ kHz}$ :

$$S = 2\text{ V}$$

$$N = 35,25\text{ }\mu\text{V}$$

$$\frac{S}{N} = \frac{2}{35,25 \cdot 10^{-6}}$$

$$\frac{S}{N} = 56737,59$$

Přepočet poměru S/N z absolutní míry do decibelové:

$$\frac{S}{N} [\text{dB}] = 20 \cdot \log \frac{S}{N}$$

$$\frac{S}{N} [dB] = 20 \cdot \log(56737,59)$$

$$\frac{S}{N} = 95,08 \text{ dB}$$

Z naměřených a vypočtených hodnot poměru signálu a šumu jasně vyplývá, že nejlepších poměrů je dosaženo s nejnižším vzorkovacím kmitočtem. Při tomto vzorkovacím kmitočtu dosahuje hodnota poměru S/N 95,08 dB viz. Tab. 6.4.1. Takto vysoká hodnota poměru signálu a šumu poukazuje opět na použití velmi kvalitních obvodů a potvrzuje tak teoretické předpoklady a splňuje zároveň velmi vysoké požadavky návrhu na kvalitu zpracování a převodu audio signálu. S vyššími vzorkovacími kmitočty poměr signál šum klesá viz. Tab. 6.4.2, Tab. 6.4.3. Se snižujícím se poměrem signál šum se zvyšuje úroveň šumu detekovaná na výstupu D/A převodníku při přehrávání 23. sekvence zkušební CD. Nejhoršího poměru signálu a šumu dosahuje D/A převodník se vzorkovacím kmitočtem 192 kHz. Opět se však jedná o vlastnost obou obvodů zprostředkovávajících D/A převod. Tento pokles poměru signálu a šumu je dobře patrný také ve vychýlení od linearity D/A převodníku, jež je uvedeno na Obr. 6.3.3 v předchozím bodě měření. Odklonění od linearity při zhruba -60 dB je způsobeno právě šumem, který je detekovaný na výstupu D/A převodníku. Neboť se snižující se úrovní vstupního signálu z testovacích sekvencí, již není možné na výstupu D/A převodníku změřit nižší úroveň signálu, než je právě úroveň šumu, která se při vzorkovacím kmitočtu 192 kHz nachází na úrovni přibližně -60 dB.

## 6.5 Měření THD+N v závislosti na úrovni signálu

V tomto bodě měření bylo měřeno za pomoci audio analyzátoru Audio Precision Portable One harmonické zkreslení v závislosti na úrovni vstupního signálu. V prvním bodě měření bylo měřeno harmonické zkreslení THD+N v závislosti na kmitočtu vstupního signálu. K měření je tedy opět použit audio analyzátor přepnutý do režimu měření THD+N v jednotkách % a připojený prostřednictvím osciloskopické sondy na jeden z výstupů přípravku D/A převodníku. Testovací sekvence jsou 14 až 22 z CD Sony. Na těchto stopách se nachází audiosignál vždy o kmitočtu 1 kHz avšak s postupně se snižující úrovní od 0 dB do -90 dB. Měření bylo provedeno opět pro všechny dostupné vzorkovací kmitočty.

Nastavení přípravku:

- Input → Optical
- Serial Mode → I2S
- Number of Bits → 24-Bits
- Sample Rate → volitelně 48 kHz, 96 kHz, 192 kHz
- De-Emphasis for → None
- Output Format → Stereo
- Phase Detector Update Rate → Normal

Nastavení přípravku zůstalo stejné jako u všech předchozích bodů měření. Ke

změnám docházelo opět pouze v nastavení vzorkovacího kmitočtu.

Tab. 6.5.1: Měření THD+N v závislosti na úrovni signálu pro  $f_{vz} = 48$  kHz

| Stopa | f [kHz] | $U_1$ [dB] | THD+N [%]   |
|-------|---------|------------|-------------|
| 14    | 1       | 0          | 0,0028      |
| 15    | 1       | -1         | 0,0031      |
| 16    | 1       | -3         | 0,0067      |
| 17    | 1       | -6         | 0,0096      |
| 18    | 1       | -10        | 0,0154      |
| 19    | 1       | -20        | 0,0293      |
| 20    | 1       | -60        | Neměřitelné |
| 21    | 1       | -80        | Neměřitelné |
| 22    | 1       | -90        | Neměřitelné |

Tab. 6.5.2: Měření THD+N v závislosti na úrovni signálu pro  $f_{vz} = 96$  kHz

| Stopa | f [kHz] | $U_1$ [dB] | THD+N [%]   |
|-------|---------|------------|-------------|
| 14    | 1       | 0          | 0,0031      |
| 15    | 1       | -1         | 0,0047      |
| 16    | 1       | -3         | 0,0043      |
| 17    | 1       | -6         | 0,0095      |
| 18    | 1       | -10        | 0,0101      |
| 19    | 1       | -20        | 0,0296      |
| 20    | 1       | -60        | Neměřitelné |
| 21    | 1       | -80        | Neměřitelné |
| 22    | 1       | -90        | Neměřitelné |

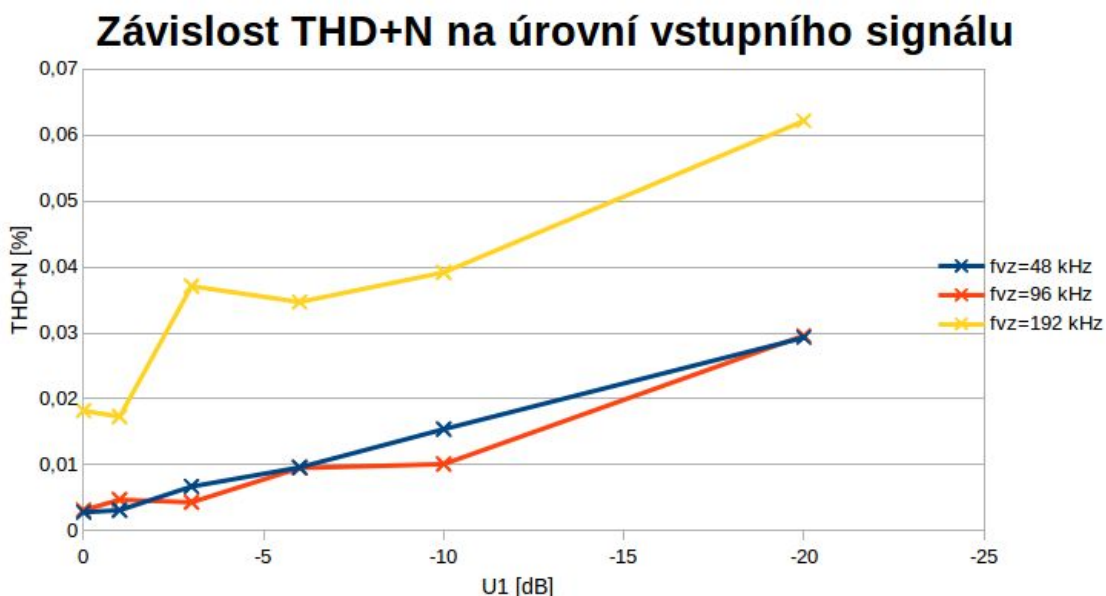
Tab. 6.5.3: Měření THD+N v závislosti na úrovni signálu pro  $f_{vz} = 192$  kHz

| Stopa | f [kHz] | $U_1$ [dB] | THD+N [%] |
|-------|---------|------------|-----------|
| 14    | 1       | 0          | 0,0182    |
| 15    | 1       | -1         | 0,0173    |
| 16    | 1       | -3         | 0,0371    |
| 17    | 1       | -6         | 0,0347    |
| 18    | 1       | -10        | 0,0392    |

Tab. 6.5.4: Měření THD+N v závislosti na úrovni signálu pro  $f_{vz} = 192$  kHz, pokrač.

| Stopa | f [kHz] | $U_1$ [dB] | THD+N [%]   |
|-------|---------|------------|-------------|
| 19    | 1       | -20        | 0,0622      |
| 20    | 1       | -60        | Neměřitelné |
| 21    | 1       | -80        | Neměřitelné |
| 22    | 1       | -90        | Neměřitelné |

Naměřené údaje harmonického zkreslení pro jednotlivé vzorkovací kmitočty viz. Tab. 6.5.1, Tab. 6.5.2, Tab. 6.5.3 a Tab. 6.5.4 odpovídají teoretickým předpokladům a také prvnímu bodu měření uvedenému v kap. 6.1. Nejnižší harmonické zkreslení vykazuje D/A převodník v případě využití nejnižšího vzorkovacího kmitočtu. U vyššího vzorkovacího kmitočtu je ve srovnání s nižším vzorkovacím kmitočtem harmonické zkreslení při stejné úrovni vstupního signálu vždy o něco vyšší. Harmonické zkreslení THD+N také vzrůstá s klesající intenzitou vstupního signálu. Avšak ani u jednoho vzorkovacího kmitočtu nebylo možné měřit harmonické zkreslení pro vstupní signál o úrovni nižší jak -60 dB. Při 20. testovací stopě CD, která odpovídá právě vstupnímu signálu o úrovni -60 dB již audio analyzátor nebyl schopen detekovat harmonické zkreslení. Patrně vstupní úroveň signálu byla již příliš nízká a proto jsou všechny 3 měření provedeny pouze od úrovně 0 dB do -20 dB, přesto i z tohoto omezeného počtu měření jsou dobře patrné trendy grafických závislostí harmonických zkreslení pro příslušné vzorkovací kmitočty viz. Obr. 6.5.1.. Tedy že se klesající úrovní vstupního signálu rostou harmonické zkreslení THD+N odpovídající jednotlivým vzorkovacím kmitočtům.



Obr. 6.5.1: Měření THD+N v závislosti na úrovni vstupního signálu pro různé  $f_{vz}$

## 6.6 Měření filtru De-Emphasis

Posledním bodem měření, který je však prakticky totožný s prvním bodem viz. kap 6.1, je měření modulové kmitočtové charakteristiky D/A převodníku s aktivním filtrem De-Emphasis. Použité měřicí přístroje, použité testovací sekvence z příslušného CD a i postup měření je totožný s kap 6.1. Liší se však nastavení laboratorního přípravku D/A převodníku.

Nastavení přípravku:

- Input → Optical
- Serial Mode → I2S
- Number of Bits → 24-Bits
- Sample Rate → volitelně 48 kHz, 96 kHz, 192 kHz
- De-Emphasis for → volitelně 48 kHz, 44,1 kHz, 32 kHz None
- Output Format → Stereo
- Phase Detector Update Rate → Normal

Kromě změny vzorkovacího kmitočtu bylo nutné v tomto bodě měření měnit také nastavení filtru De-Emphasis. Každý typ filtru byl změřen pro všechny dostupné vzorkovací kmitočty. Měření všech typů De-emphasis filtrů na všech vzorkovacích kmitočtech je uvedeno v následujících tabulkách viz. Tab. 6.6.1, Tab. 6.1.2, Tab. 6.6.3, Tab. 6.1.4, Tab. 6.1.5 a Tab. 6.6.6.

Tab. 6.6.1: Měření 48 kHz filtru De-Emphasis pro různé  $f_{vz}$

| Stopa | f [kHz] | $f_{vz}= 48 \text{ kHz}$ |         | $f_{vz}= 96 \text{ kHz}$ |         | $f_{vz}= 192 \text{ kHz}$ |         |
|-------|---------|--------------------------|---------|--------------------------|---------|---------------------------|---------|
|       |         | U2 [V]                   | Au [dB] | U2 [V]                   | Au [dB] | U2 [V]                    | Au [dB] |
| 6     | 1 000   | 0,867                    | -1,240  | 0,910                    | -0,819  | 0,910                     | -0,819  |
| 7     | 20      | 0,954                    | -0,409  | 0,954                    | -0,409  | 0,954                     | -0,409  |
| 8     | 25      | 0,955                    | -0,400  | 0,956                    | -0,391  | 0,956                     | -0,391  |
| 9     | 32      | 0,955                    | -0,400  | 0,956                    | -0,391  | 0,956                     | -0,391  |
| 10    | 40      | 0,956                    | -0,391  | 0,956                    | -0,391  | 0,956                     | -0,391  |
| 11    | 50      | 0,956                    | -0,391  | 0,956                    | -0,391  | 0,956                     | -0,391  |
| 12    | 63      | 0,956                    | -0,391  | 0,956                    | -0,391  | 0,956                     | -0,391  |
| 13    | 80      | 0,956                    | -0,391  | 0,956                    | -0,391  | 0,956                     | -0,391  |
| 14    | 100     | 0,956                    | -0,391  | 0,956                    | -0,391  | 0,956                     | -0,391  |
| 15    | 125     | 0,956                    | -0,391  | 0,956                    | -0,391  | 0,956                     | -0,391  |
| 16    | 160     | 0,956                    | -0,391  | 0,956                    | -0,391  | 0,956                     | -0,391  |
| 17    | 200     | 0,953                    | -0,418  | 0,954                    | -0,409  | 0,954                     | -0,409  |
| 18    | 250     | 0,952                    | -0,427  | 0,954                    | -0,409  | 0,954                     | -0,409  |

Tab. 6.6.2: Měření 48 kHz filtru De-Emphasis pro různé  $f_{vz}$ , pokračování

| Stopa | f [kHz] | $f_{vz} = 48 \text{ kHz}$ |         | $f_{vz} = 96 \text{ kHz}$ |         | $f_{vz} = 192 \text{ kHz}$ |         |
|-------|---------|---------------------------|---------|---------------------------|---------|----------------------------|---------|
|       |         | U2 [V]                    | Au [dB] | U2 [V]                    | Au [dB] | U2 [V]                     | Au [dB] |
| 19    | 315     | 0,948                     | -0,464  | 0,949                     | -0,455  | 0,951                      | -0,436  |
| 20    | 400     | 0,942                     | -0,519  | 0,949                     | -0,455  | 0,949                      | -0,455  |
| 21    | 500     | 0,933                     | -0,602  | 0,944                     | -0,501  | 0,944                      | -0,501  |
| 22    | 630     | 0,919                     | -0,734  | 0,937                     | -0,565  | 0,937                      | -0,565  |
| 23    | 800     | 0,898                     | -0,934  | 0,926                     | -0,668  | 0,926                      | -0,668  |
| 24    | 1 000   | 0,867                     | -1,240  | 0,910                     | -0,819  | 0,910                      | -0,819  |
| 25    | 1 250   | 0,824                     | -1,681  | 0,887                     | -1,042  | 0,887                      | -1,042  |
| 26    | 1 600   | 0,759                     | -2,395  | 0,851                     | -1,401  | 0,851                      | -1,401  |
| 27    | 2 000   | 0,682                     | -3,324  | 0,806                     | -1,873  | 0,806                      | -1,873  |
| 28    | 2 500   | 0,592                     | -4,554  | 0,750                     | -2,499  | 0,750                      | -2,499  |
| 29    | 3 150   | 0,491                     | -6,178  | 0,683                     | -3,312  | 0,683                      | -3,312  |
| 30    | 4 000   | 0,390                     | -8,179  | 0,609                     | -4,308  | 0,609                      | -4,308  |
| 31    | 5 000   | 0,312                     | -10,117 | 0,541                     | -5,336  | 0,541                      | -5,336  |
| 32    | 6 300   | 0,241                     | -12,360 | 0,477                     | -6,430  | 0,474                      | -6,484  |
| 33    | 8 000   | 0,187                     | -14,563 | 0,422                     | -7,494  | 0,417                      | -7,597  |
| 34    | 10 000  | 0,152                     | -16,363 | 0,381                     | -8,382  | 0,375                      | -8,519  |
| 35    | 12 500  | 0,129                     | -17,788 | 0,350                     | -9,119  | 0,341                      | -9,345  |
| 36    | 16 000  | 0,113                     | -18,938 | 0,326                     | -9,736  | 0,313                      | -10,089 |
| 37    | 20 000  | 0,105                     | -19,576 | 0,301                     | -10,429 | 0,279                      | -11,088 |

Tab. 6.6.3: Měření 44,1 kHz filtru De-Emphasis pro různé  $f_{vz}$

| Stopa | f [kHz] | $f_{vz} = 48 \text{ kHz}$ |         | $f_{vz} = 96 \text{ kHz}$ |         | $f_{vz} = 192 \text{ kHz}$ |         |
|-------|---------|---------------------------|---------|---------------------------|---------|----------------------------|---------|
|       |         | U2 [V]                    | Au [dB] | U2 [V]                    | Au [dB] | U2 [V]                     | Au [dB] |
| 6     | 1 000   | 0,882                     | -1,091  | 0,917                     | -0,753  | 0,917                      | -0,753  |
| 7     | 20      | 0,955                     | -0,400  | 0,954                     | -0,409  | 0,954                      | -0,409  |
| 8     | 25      | 0,955                     | -0,400  | 0,955                     | -0,400  | 0,955                      | -0,400  |
| 9     | 32      | 0,955                     | -0,400  | 0,956                     | -0,391  | 0,956                      | -0,391  |
| 10    | 40      | 0,956                     | -0,391  | 0,956                     | -0,391  | 0,956                      | -0,391  |
| 11    | 50      | 0,956                     | -0,391  | 0,956                     | -0,391  | 0,956                      | -0,391  |
| 12    | 63      | 0,956                     | -0,391  | 0,956                     | -0,391  | 0,956                      | -0,391  |

Tab. 6.6.4: Měření 44,1 kHz filtru De-Emphasis pro různé  $f_{vz}$ , pokračování

| Stopa | f [kHz] | $f_{vz}= 48 \text{ kHz}$ |         | $f_{vz}= 96 \text{ kHz}$ |         | $f_{vz}= 192 \text{ kHz}$ |         |
|-------|---------|--------------------------|---------|--------------------------|---------|---------------------------|---------|
|       |         | U2 [V]                   | Au [dB] | U2 [V]                   | Au [dB] | U2 [V]                    | Au [dB] |
| 13    | 80      | 0,957                    | -0,382  | 0,956                    | -0,391  | 0,956                     | -0,391  |
| 14    | 100     | 0,956                    | -0,391  | 0,956                    | -0,391  | 0,956                     | -0,391  |
| 15    | 125     | 0,956                    | -0,391  | 0,956                    | -0,391  | 0,956                     | -0,391  |
| 16    | 160     | 0,956                    | -0,391  | 0,956                    | -0,391  | 0,956                     | -0,391  |
| 17    | 200     | 0,955                    | -0,400  | 0,955                    | -0,400  | 0,955                     | -0,400  |
| 18    | 250     | 0,952                    | -0,427  | 0,954                    | -0,409  | 0,954                     | -0,409  |
| 19    | 315     | 0,949                    | -0,455  | 0,953                    | -0,418  | 0,953                     | -0,418  |
| 20    | 400     | 0,945                    | -0,491  | 0,951                    | -0,436  | 0,951                     | -0,436  |
| 21    | 500     | 0,937                    | -0,565  | 0,946                    | -0,482  | 0,946                     | -0,482  |
| 22    | 630     | 0,925                    | -0,677  | 0,941                    | -0,528  | 0,941                     | -0,528  |
| 23    | 800     | 0,908                    | -0,838  | 0,931                    | -0,621  | 0,931                     | -0,621  |
| 24    | 1 000   | 0,881                    | -1,100  | 0,917                    | -0,753  | 0,917                     | -0,753  |
| 25    | 1 250   | 0,843                    | -1,483  | 0,897                    | -0,944  | 0,897                     | -0,944  |
| 26    | 1 600   | 0,785                    | -2,103  | 0,864                    | -1,270  | 0,896                     | -0,954  |
| 27    | 2 000   | 0,714                    | -2,926  | 0,824                    | -1,681  | 0,823                     | -1,692  |
| 28    | 2 500   | 0,628                    | -4,041  | 0,773                    | -2,236  | 0,771                     | -2,259  |
| 29    | 3 150   | 0,529                    | -5,531  | 0,708                    | -2,999  | 0,707                     | -3,012  |
| 30    | 4 000   | 0,426                    | -7,412  | 0,649                    | -3,755  | 0,663                     | -3,570  |
| 31    | 5 000   | 0,338                    | -9,422  | 0,569                    | -4,898  | 0,563                     | -4,990  |
| 32    | 6 300   | 0,263                    | -11,601 | 0,498                    | -6,055  | 0,495                     | -6,108  |
| 33    | 8 000   | 0,203                    | -13,850 | 0,439                    | -7,151  | 0,434                     | -7,250  |
| 34    | 10 000  | 0,164                    | -15,703 | 0,394                    | -8,090  | 0,388                     | -8,223  |
| 35    | 12 500  | 0,136                    | -17,329 | 0,361                    | -8,850  | 0,351                     | -9,094  |
| 36    | 16 000  | 0,117                    | -18,636 | 0,335                    | -9,499  | 0,320                     | -9,897  |
| 37    | 20 000  | 0,108                    | -19,332 | 0,306                    | -10,286 | 0,276                     | -11,182 |

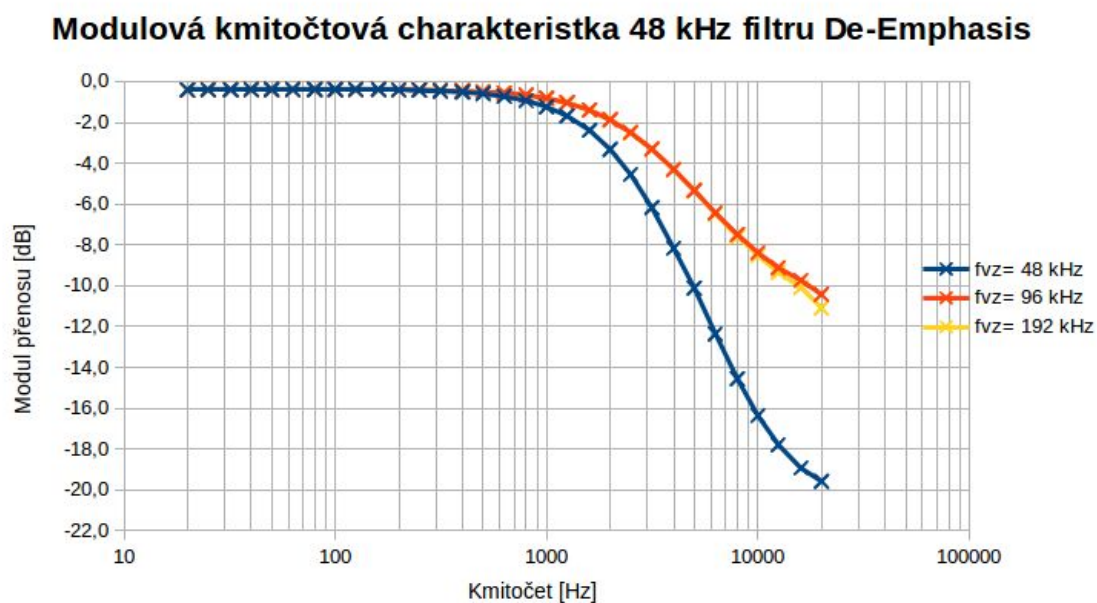
Tab. 6.6.5: Měření 32 kHz filtru De-Emphasis pro různé  $f_{vz}$

| Stopa | f [kHz] | $f_{vz}= 48 \text{ kHz}$ |         | $f_{vz}= 96 \text{ kHz}$ |         | $f_{vz}= 192 \text{ kHz}$ |         |
|-------|---------|--------------------------|---------|--------------------------|---------|---------------------------|---------|
|       |         | U2 [V]                   | Au [dB] | U2 [V]                   | Au [dB] | U2 [V]                    | Au [dB] |
| 6     | 1 000   | 0,916                    | -0,762  | 0,935                    | -0,584  | 0,935                     | -0,584  |

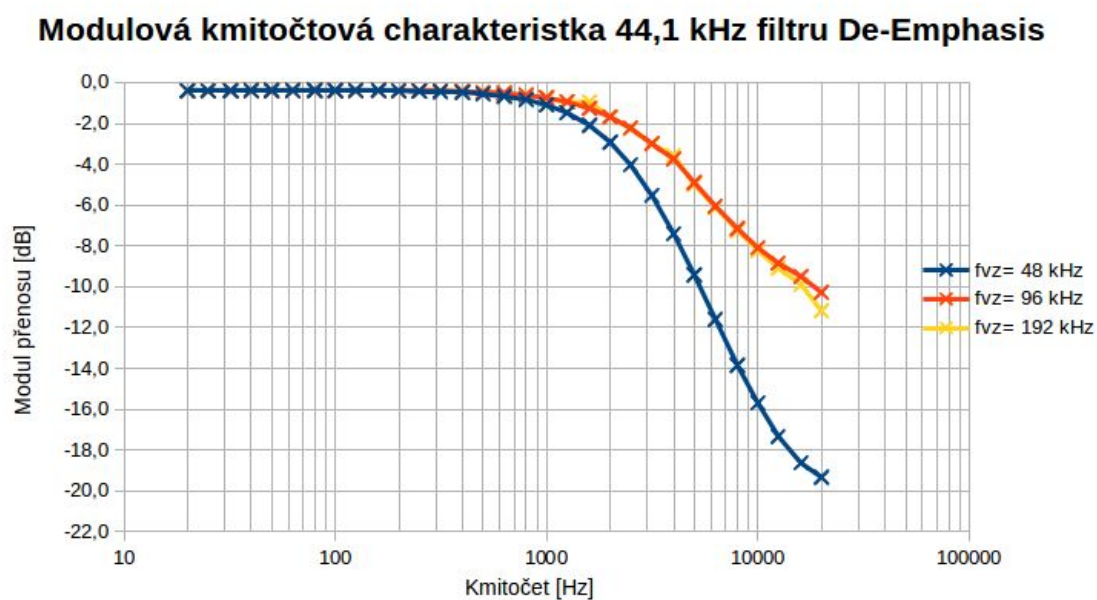
Tab. 6.6.6: Měření 32 kHz filtru De-Emphasis pro různé  $f_{vz}$ , pokračování

| Stopa | f [kHz] | $f_{vz} = 48 \text{ kHz}$ |         | $f_{vz} = 96 \text{ kHz}$ |         | $f_{vz} = 192 \text{ kHz}$ |         |
|-------|---------|---------------------------|---------|---------------------------|---------|----------------------------|---------|
|       |         | U2 [V]                    | Au [dB] | U2 [V]                    | Au [dB] | U2 [V]                     | Au [dB] |
| 7     | 20      | 0,954                     | -0,409  | 0,954                     | -0,409  | 0,954                      | -0,409  |
| 8     | 25      | 0,955                     | -0,400  | 0,956                     | -0,391  | 0,956                      | -0,391  |
| 9     | 32      | 0,956                     | -0,391  | 0,956                     | -0,391  | 0,956                      | -0,391  |
| 10    | 40      | 0,956                     | -0,391  | 0,956                     | -0,391  | 0,956                      | -0,391  |
| 11    | 50      | 0,957                     | -0,382  | 0,956                     | -0,391  | 0,956                      | -0,391  |
| 12    | 63      | 0,957                     | -0,382  | 0,956                     | -0,391  | 0,956                      | -0,391  |
| 13    | 80      | 0,957                     | -0,382  | 0,956                     | -0,391  | 0,956                      | -0,391  |
| 14    | 100     | 0,957                     | -0,382  | 0,956                     | -0,391  | 0,956                      | -0,391  |
| 15    | 125     | 0,957                     | -0,382  | 0,956                     | -0,391  | 0,956                      | -0,391  |
| 16    | 160     | 0,956                     | -0,391  | 0,956                     | -0,391  | 0,956                      | -0,391  |
| 17    | 200     | 0,955                     | -0,400  | 0,956                     | -0,391  | 0,956                      | -0,391  |
| 18    | 250     | 0,955                     | -0,400  | 0,956                     | -0,391  | 0,956                      | -0,391  |
| 19    | 315     | 0,953                     | -0,418  | 0,955                     | -0,400  | 0,955                      | -0,400  |
| 20    | 400     | 0,951                     | -0,436  | 0,953                     | -0,418  | 0,953                      | -0,418  |
| 21    | 500     | 0,947                     | -0,473  | 0,951                     | -0,436  | 0,951                      | -0,436  |
| 22    | 630     | 0,941                     | -0,528  | 0,949                     | -0,455  | 0,949                      | -0,455  |
| 23    | 800     | 0,931                     | -0,621  | 0,943                     | -0,510  | 0,943                      | -0,510  |
| 24    | 1 000   | 0,916                     | -0,762  | 0,935                     | -0,584  | 0,935                      | -0,584  |
| 25    | 1 250   | 0,894                     | -0,973  | 0,924                     | -0,687  | 0,924                      | -0,687  |
| 26    | 1 600   | 0,857                     | -1,340  | 0,905                     | -0,867  | 0,905                      | -0,867  |
| 27    | 2 000   | 0,811                     | -1,820  | 0,879                     | -1,120  | 0,879                      | -1,120  |
| 28    | 2 500   | 0,748                     | -2,522  | 0,843                     | -1,483  | 0,843                      | -1,483  |
| 29    | 3 150   | 0,665                     | -3,544  | 0,793                     | -2,015  | 0,793                      | -2,015  |
| 30    | 4 000   | 0,579                     | -4,746  | 0,731                     | -2,722  | 0,731                      | -2,722  |
| 31    | 5 000   | 0,465                     | -6,651  | 0,663                     | -3,570  | 0,661                      | -3,596  |
| 32    | 6 300   | 0,371                     | -8,613  | 0,591                     | -4,568  | 0,587                      | -4,627  |
| 33    | 8 000   | 0,286                     | -10,873 | 0,519                     | -5,697  | 0,513                      | -5,798  |
| 34    | 10 000  | 0,223                     | -13,034 | 0,459                     | -6,764  | 0,451                      | -6,916  |
| 35    | 12 500  | 0,177                     | -15,041 | 0,410                     | -7,744  | 0,401                      | -7,937  |
| 36    | 16 000  | 0,144                     | -16,833 | 0,369                     | -8,659  | 0,355                      | -8,995  |
| 37    | 20 000  | 0,128                     | -17,856 | 0,334                     | -9,525  | 0,302                      | -10,400 |

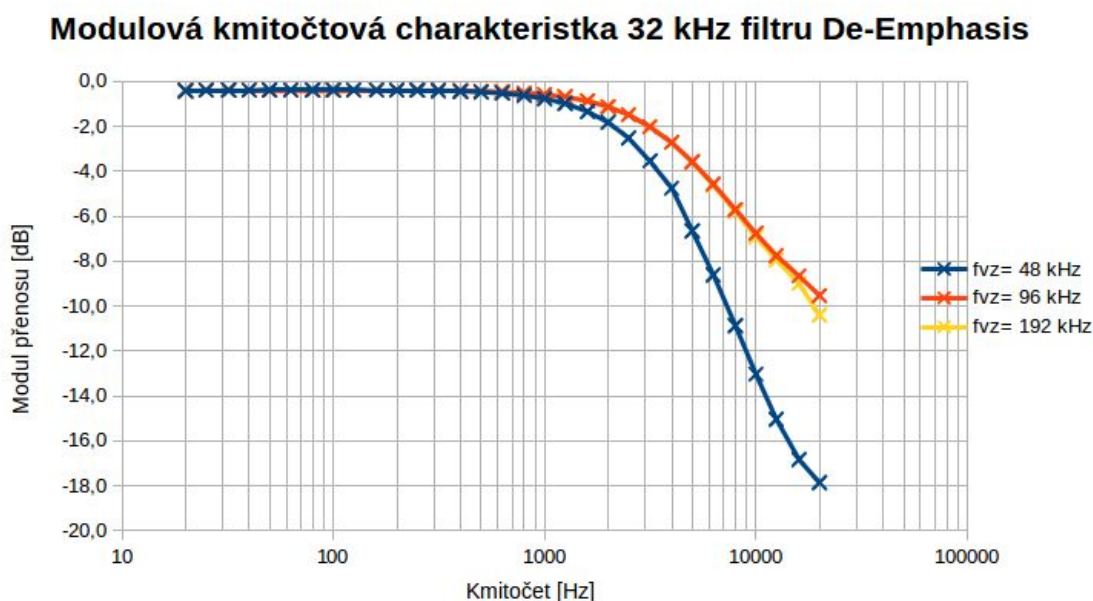




Obr. 6.6.1: Modulové kmitočtové charakteristiky 48 kHz filtru pro různé  $f_{vz}$



Obr. 6.6.2: Modulové kmitočtové charakteristiky 44,1 kHz filtru pro různé  $f_{vz}$



Obr. 6.6.3: Modulové kmitočtové charakteristiky 32 kHz filtru pro různé  $f_{vz}$

Z naměřených údajů výstupních napětí D/A převodníku  $U_2$  [V] je nutné opět přes známý vztah (6.6.1) vypočítat modul přenosu. Vstupní napětí je po celou dobu všech testovacích sekvencí konstantní o hodnotě 1 V.

$$A_u = 20 \cdot \log\left(\frac{U_2}{U_1}\right) \quad (\text{dB}; \text{V}; \text{V}) \quad (6.6.1)$$

Příklad výpočtu modulu přenosu (napěťového zesílení) pro  $f = 1000$  Hz,  $f_{vz} = 48$  kHz, 48 kHz filtr De-emphasis (Tab. 6.6.1):

$$A_u = 20 \cdot \log\left(\frac{0,867}{1}\right)$$

$$A_u = -1,240 \text{ dB}$$

Z takto vypočtených modulů přenosu pro jednotlivé filtry De-emphasis D/A převodníku byly vytvořeny grafické závislosti změny modulu přenosu v závislosti na vstupním kmitočtu audio signálu a také v závislosti na zvoleném vzorkovacím kmitočtu viz. Obr. 6.6.1, Obr. 6.6.2 a Obr. 6.6.3. S přihlédnutím do těchto grafických závislostí modulu přenosu na vstupním kmitočtu je jasně patrná funkce těchto filtrů a odpovídá teoretickým předpokladům o činnosti a funkci těchto filtrů u D/A převodníků uvedených v kap 3.4.1 a 3.5.1. Nízké kmitočty jsou přenášeny se stejnou výstupní úrovní jakoby nebyl filtr použit. Pro vyšší kmitočty pak vzrůstá útlum těchto kmitočtů. Tato vlastnost je právě funkcí filtrů De-emphasis. Filtr se tak snaží „vyrovnat“ nepříznivou charakteristiku vstupního audio signálu z digitální nahrávky a zlepšit tak dynamiku přenosu. Jak bylo také uvedeno v kap 3.4.1 a 3.5.1 analogií tohoto filtru může být chápána korekce RIAA u gramofonových nahrávek a nebo například obvody DEEM fáze u FM radiových přijímačů atd..

Při měření kmitočtové závislosti modulu přenosu bez použití De-emphasis nebylo možné odečíst mezní kmitočty pro pokles o -3 dB od svých maximálních hodnot přenosů. V případě měření kmitočtové závislosti D/A převodníku se zapnutým filtrem

De-emphasis to však již možné je a může tak být odečten horní mezní kmitočet. Odečtení těchto mezních kmitočtu je možné přímo z naměřených údajů uvedených v Tab. 6.6.1, Tab. 6.1.2, Tab. 6.6.3, Tab. 6.1.4, Tab. 6.1.5, Tab. 6.6.6. Vhodnější je pak k odečtení těchto mezních kmitočtů použít grafické závislosti modulu přenosu na kmitočtu, které jsou uvedeny na Obr. 6.6.1, Obr. 6.6.2, Obr. 6.6.3.

Mezní kmitočty pro pokles o -3 dB pro jednotlivé filtry:

- 48 kHz filtr De-emphasis
  - $f_{VZ} = 48 \text{ kHz} \rightarrow f_{h_{mez}} = 2000 \text{ Hz}$
  - $f_{VZ} = 96 \text{ kHz} \rightarrow f_{h_{mez}} = 3150 \text{ Hz}$
  - $f_{VZ} = 192 \text{ kHz} \rightarrow f_{h_{mez}} = 3150 \text{ Hz}$
- 44,1 kHz filtr De-emphasis
  - $f_{VZ} = 48 \text{ kHz} \rightarrow 2200 \text{ Hz}$
  - $f_{VZ} = 96 \text{ kHz} \rightarrow 3500 \text{ Hz}$
  - $f_{VZ} = 192 \text{ kHz} \rightarrow 3500 \text{ Hz}$
- 32 kHz filtr De-emphasis
  - $f_{VZ} = 48 \text{ kHz} \rightarrow 3100 \text{ Hz}$
  - $f_{VZ} = 96 \text{ kHz} \rightarrow 5000 \text{ Hz}$
  - $f_{VZ} = 192 \text{ kHz} \rightarrow 5000 \text{ Hz}$

## 6.7 Použité měřicí přístroje

Seznam měřících přístrojů použitých k měření laboratorního přípravku D/A převodníku v laboratořích Nízkofrekvenční a audio elektroniky:

- Zkušební disky
  - AVP & Marutech CD generator
  - Sony Test CD type 3
- Audio analyzátor Audio Precision Portable One
- Digitální osciloskop Tektronix TDS 2014
- CD rekordér Philips CDR 796
- Propojovací vodiče, osciloskopické sondy, rozbočovací „T členy“ atd.

## 6.8 Závěr měření

V laboratořích Nízkofrekvenční a audio elektroniky proběhlo kompletní a úspěšné proměření navrženého a realizovaného přípravku D/A převodníku. Byly proměřeny všechny význačné a důležité parametry. Jejichž výsledky poukazují na reálnou kvalitu

zvolených a použitých obvodů nejen v oblasti D/A převodu ale i ve kvalitě výstupní vysoce jakostní analogové části D/A převodníku.

V prvním bodě měření byl měřen modul přenosu a harmonické zkreslení D/A převodníku v závislosti na vstupním kmitočtu. Měření proběhlo pro všechny dostupné vzorkovací kmitočty a z grafických závislostí viz. Obr. 6.1.1, především z vyrovnanosti těchto charakteristik, je jasně patrná velmi vysoká kvalita, věrnost přenosu a převodu audio signálu D/A převodníkem.

Druhým bodem měření bylo měření separace obou stereo kanálů D/A převodníku. Opět bylo toto měření realizováno pro všechny dostupné vzorkovací kmitočty. Z změřených hodnot separací kanálů uvedených v Tab. 6.2.1, Tab. 6.2.2 a Tab. 6.2.3 vyplývá opět fakt velmi vysoké kvality použitých obvodů.

Dalším bodem měření bylo proměření linearity D/A převodníku se všemi dostupnými vzorkovacími kmitočty. D/A převodník je vysoce lineární zejména s použitím nejmenšího vzorkovacího kmitočtu. S vyšším vzorkovacím kmitočtem se začíná charakteristika linearity D/A převodníku mírně vychylovat. Nejhorších poměrů linearity dosahuje D/A převodník s nejvyšším vzorkovacím kmitočtem. Toto zhoršení je však dáno samotnou činností a vlastností obvodů zprostředkovávajících D/A převod. Důvodem je snížení poměru SNR s nejvyšším vzorkovacím kmitočtem. Na výstupu D/A převodníku tak s tímto nejvyšším vzorkovacím kmitočtem nemůže být detekován signál nižší úrovně, než je úroveň právě tohoto šumového pozadí, proto se charakteristika od -60 dB vychyluje od své linearity viz. Obr. 6.3.3.

Čtvrtým bodem měření bylo změření jednoho z nejdůležitějších parametrů poukazující na kvalitu obecně jakéhokoliv audio zařízení. Jedná se o poměr signálu a šumu. Velmi vysokého poměru dosahuje převodník při nejnižším vzorkovacím kmitočtu. S vyšším vzorkovacím kmitočtem se poměr signálu a šumu vždy o něco sníží. Tedy dojde ke zhoršení tohoto poměru a na výstupu D/A převodníku se tak nachází šum o vyšší úrovni. Tato skutečnost však zcela odpovídá teoretickým předpokladům a údajům uvedených v katalogových listech přijímače S/PDIF a D/A převodníku. Avšak s přihlédnutím na všechny změřené poměry signálu a šumu přípravku je opět patrná vysoká kvalita nejen použitých součástek ale i jeho návrhu a zpracování

Předposledním bodem měření bylo opět proměření harmonického zkreslení jako v prvním bodě měření. Tentokrát se však jednalo o závislost velikosti zkreslení na intenzitě vstupního signálu, kdy docházelo k měření THD+N na výstupu D/A převodníku s postupně se snižující úrovní vstupního signálu z testovacích sekvencí CD. Měření bylo možné provést pouze do úrovně vstupního signálu -20 dB. Při úrovni -60 dB nebyl analyzátor schopen změřit hodnotu THD+N. Důvodem byla patrně již příliš nízká výstupní úroveň audio signálu z D/A převodníku.

Poslední bodem měření bylo proměření modulových kmitočtových závislostí D/A převodníku s použitým konkrétním typem filtru De-emphasis. Měření bylo velmi podobné prvnímu bodu měření. Z naměřených modulových kmitočtových charakteristik je jasně patrná funkce těchto filtrů. Z modulových kmitočtových charakteristik jednotlivých filtrů a konkrétního použitého vzorkovacího kmitočtu byly odečteny horní mezní kmitočty pro pokles o -3 dB od vrcholové hodnoty modulu přenosu.

Po tomto rozsáhlém proměření a s přihlédnutím na výborné dosažené výsledky je možné konstatovat, že realizovaný laboratorní přípravek splnil veškeré teoretické

předpoklady a požadavky návrhu a je ho možné bez problémů nasadit do laboratorní výuky předmětu Nízkofrekvenční a audio elektronika.

## **6.9 Vzorový protokol**

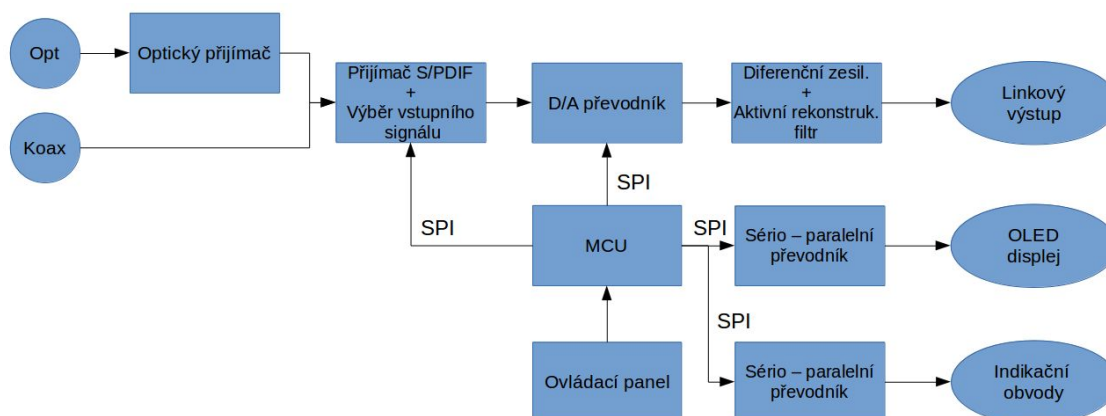
Posledním bodem kapitoly o měření D/A převodníku je vzorový protokol. Na základě všech změřených údajů v předchozích kapitolách byl vytvořen kompletní měřicí protokol s teoretickým úvodem a seznámím se s přípravkem. Veškerá údaje, které bude student v rámci laboratorní výuky doplňovat do protokolu byly změřeny a jsou uvedeny ve všech předešlých podkapitolách kapitoly o měření. Druhou částí navazující na teoretickou část protokolu je část vlastního měření, tedy část protokolu kterou budou dle instrukcí vyplňovat studenti v rámci laboratorní výuky. Navržený protokol je logicky sestavený a po jeho vypracování dává studentovi jasnou představu o činnosti a funkci všech klíčových obvodů a také představu o rozsahu změn chování D/A převodníku, kterou vyvolá případná změna parametrů laboratorního přípravku D/A převodníku. Protokol s jeho teoretickým úvodem je zařazen mimo číslování celé práce. Důvod spočívá v možnosti okamžitého využití protokolu bez jakýchkoliv změn v číslování atd.. Druhým důvodem je dodržení konceptu všech protokolů předmětu Nízkofrekvenční a audio elektronika.

## D/A PŘEVODNÍK

Cílem úlohy je seznámit studenty s vlastnostmi a technickými parametry D/A převodníku. Během měření studenti získají základní představu o jeho technických parametrech v časové i kmitočtové oblasti, o jeho linearitě, separaci kanálů, harmonickém zkreslení, odstupu signálu od šumu a v neposlední řadě také kmitočtových vlastností jeho filtru De-emphasis. Součástí měření je i experimentální proměření všech dostupných parametrů D/A převodníku, čímž student získá jasnou představu o principu a činnosti D/A převodníku.

## ÚVOD

Měření bude probíhat na laboratorním přípravku D/A převodníku. Laboratorní přípravek představuje kompletní obvodové řešení D/A převodníku a je složen ze vstupní části (Optická a Koaxiální cesta S/PDIF signálu), přijímače S/PDIF CS8416, vlastního stereo D/A převodníku AD1955 a jakostní analogové části (diferenční zesilovače a aktivní rekonstrukční filtr). Blokové schéma laboratorního přípravku je uvedeno na Obr. 1.



Obr. 1: Blokové schéma laboratorního přípravku D/A převodníku

Přípravek je schopen zpracovat vstupní signály se vzorkovacím kmitočtem až 192 kHz a s rozlišením až 24 bitů. Přípravek je řízen za pomoci interního mikrokontroléru a prostřednictvím ovládacího menu zobrazovaného na displeji může student měnit libovolné parametry D/A převodníku. Kromě indikace nastavení prostřednictvím displeje obsahuje přípravek ještě tzv. indikační obvody. Jedna se o dvě řady 16 led diod.

Na těle přípravku je popsáno, která z těchto řad přísluší danému obvodu (D/A převodník, přijímač S/PDIF). Na těchto indikačních obvodech je přímo zřetelné a patrné nastavení jednotlivých bitů příslušných řídicích registrů. A tak za pomoci katalogových listů k těmto obvodům je možné ověřit, že při výběru nastavení požadovaného parametru dojde k nastavení příslušných bitů řídicích registrů přijímače S/PDIF a D/A převodníku

Přípravek má 4 ovládací tlačítka. První dvě tlačítka označená jako Menu UP a Menu DOWN složí pro pohyb v hlavní nabídce a výběru příslušného parametru, který má být nastavován. Třetí tlačítko složí pro výběr jednotlivých podnabídek příslušného parametru a je označeno jako SUBMENU. Stiskem posledního tlačítka dojde k potvrzení vybrané podnabídky příslušného parametru.

Ovládací menu je intuitivní. Po zapnutí a nebo resetu přípravku nejsou zobrazeny žádné podnabídky při procházení hlavního menu za pomoci tlačítek Menu UP a Menu DOWN. Při výběru příslušné podnabídky dojde k nastavení a zapamatování požadovaného parametru. Tato skutečnost je dobře patrná při zpětném procházení ovládacího menu, kdy se na druhém řádku displeje zobrazí případné nastavené podnabídky jednotlivých parametrů. Naprosto stejným způsobem pracují oba indikační obvody.

Rozmístění testovacích bodů přípravku je systematické. Jejich proměření dává dokonalou představu o činnosti obvodů zprostředkovávajících D/A převod. Pro potřeby měření jsou však nejdůležitější TP15 (L kanál), TP16 (P kanál) a analogová zem označená jako AGND.

Výchozí nastavení přípravku po zapnutí případně jeho resetu:

- Input → Optical
- Serial Mode → I2S
- Number of Bits → 24-Bits
- Sample Rate → 48 kHz
- De-Emphasis for → None
- Output Format → Stereo
- Phase Detector Update Rate → Normal
- Phase Detector Update Rate → No

S přístrojovým vybavením laboratoře nízkofrekvenčních aplikací lze pomocí měřících disků AVP & Marutech CD generator a Sony Test CD type 3 změřit modulovou kmitočtovou charakteristiku D/A převodníku, jeho linearitu, souhlas polarity obou stereofonních kanálů, dále pak s určitou nepřesností (způsobenou měřením velmi malých veličin) lze měřit odstup signálu od šumu  $S/N$ , separaci kanálů, harmonické zkreslení THD a také kmitočtovou charakteristiku filtru De-emphasis. Měření je prováděno audio analyzátozem Audio Precision Portable One.

## Laboratorní úloha č. 8 - protokol

# D/A PŘEVODNÍK

Jméno a příjmení: ..... Studijní skupina: .....

Datum a čas měření: ..... Hodnocení vyučujícího: .....

### ZADÁNÍ A POZNÁMKY K MĚŘENÍ A VYPRACOVÁNÍ PROTOKOLU

- Měření **modulové kmitočtové charakteristiky a harmonického zkreslení**. Měření probíhá za pomoci disku AVP & Marutech, který má jmenovité napětí záznamu  $U_1 = 1$  V. K měření využijte sekce 6 – 38 a odpovídající kmitočty lze nalézt na obalu disku – shodují se s kmitočty z Tab. 1. Zvolte si vzorkovací kmitočet s jakým budete realizovat měření tohoto bodu a uveďte ho do Tab.1. Kromě výstupní úrovně z D/A převodníku si pro každou testovací sekvenci zaznamenejte i harmonické zkreslení. Modul přenosu vypočítejte podle vzorce (1). Kromě vzorkovacího kmitočtu ponechte nastavení přípravku beze změny ve svém výchozím nastavení.

$$A_u = 20 \cdot \log\left(\frac{U_2}{U_1}\right) \quad (\text{dB; V; V}) \quad (1)$$

Tab. 1: Modulová kmitočtová charakteristika D/A převodníku ( $U_1 = 1$  V)

| Vzorkovací kmitočet= |        | kHz       |            |           |
|----------------------|--------|-----------|------------|-----------|
| Stopa                | f [Hz] | $U_2$ [V] | $A_u$ [dB] | THD+N [%] |
| 6                    | 1 000  |           |            |           |
| 7                    | 20     |           |            |           |
| 8                    | 25     |           |            |           |
| 9                    | 32     |           |            |           |
| 10                   | 40     |           |            |           |
| 11                   | 50     |           |            |           |
| 12                   | 63     |           |            |           |
| 13                   | 80     |           |            |           |
| 14                   | 100    |           |            |           |



Tab. 2: Modulová kmitočtová charakteristika D/A převodníku ( $U_1 = 1 \text{ V}$ ), pokračování

| Vzorkovací kmitočet= |        | kHz       |            |           |
|----------------------|--------|-----------|------------|-----------|
| Stopa                | f [Hz] | $U_2$ [V] | $A_U$ [dB] | THD+N [%] |
| 15                   | 125    |           |            |           |
| 16                   | 160    |           |            |           |
| 17                   | 200    |           |            |           |
| 18                   | 250    |           |            |           |
| 19                   | 315    |           |            |           |
| 20                   | 400    |           |            |           |
| 21                   | 500    |           |            |           |
| 22                   | 630    |           |            |           |
| 23                   | 800    |           |            |           |
| 24                   | 1 000  |           |            |           |
| 25                   | 1 250  |           |            |           |
| 26                   | 1 600  |           |            |           |
| 27                   | 2 000  |           |            |           |
| 28                   | 2 500  |           |            |           |
| 29                   | 3 150  |           |            |           |
| 30                   | 4 000  |           |            |           |
| 31                   | 5 000  |           |            |           |
| 32                   | 6 300  |           |            |           |
| 33                   | 8 000  |           |            |           |
| 34                   | 10 000 |           |            |           |
| 35                   | 12 500 |           |            |           |
| 36                   | 16 000 |           |            |           |
| 37                   | 20 000 |           |            |           |

Z naměřených údajů vynesete grafické závislosti modulu přenosu ( $A_U = f(U_2/U_1)$ ) a také kmitočtovou závislost harmonického zkreslení D/A převodníku. U harmonického zkreslení uveďte jeho hodnotu při 1 kHz vstupního signálu.

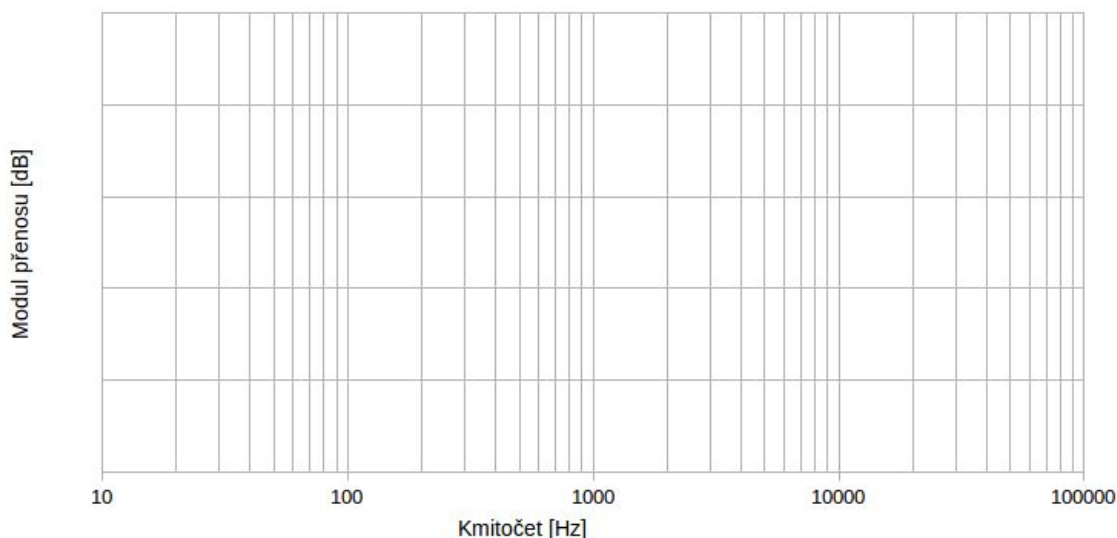
THD+N při 1 kHz = ..... ( $f_{VZ} =$  ..... kHz)

Modulová kmitočtová charakteristika D/A převodníků bývá zpravidla velmi vyrovnaná. Ocejchujte vhodně osu Y a zakreslete průběh modulu. Pokud lze zachytit pokles charakteristiky o -3 dB, vyznačte a odečtěte i mezní kmitočty

$f_d =$  ..... Hz

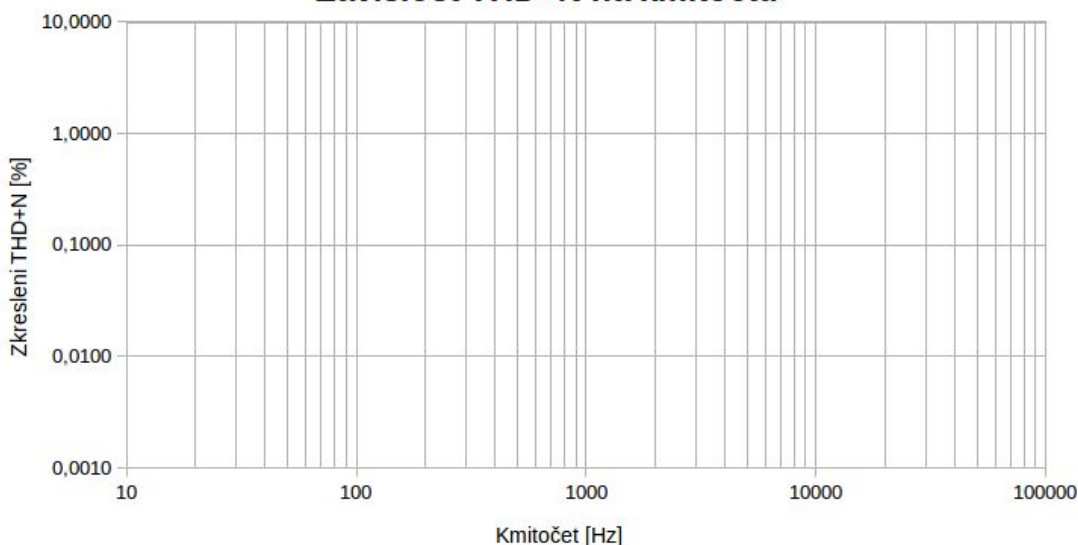
$f_h =$  ..... Hz

## Modulová kmitočtová charakteristika



Graf 1: Modulová kmitočtová charakteristika D/A převodníku

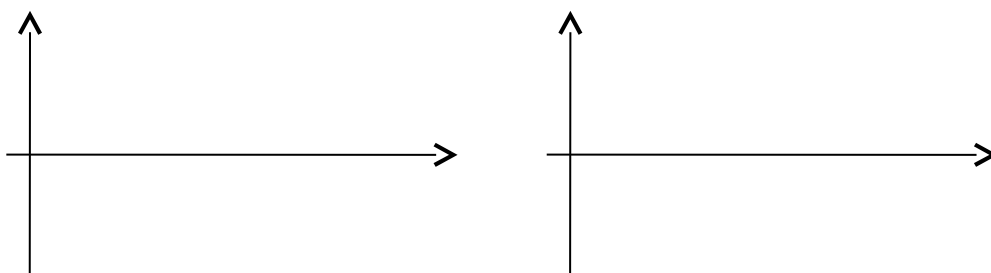
## Závislost THD+N na kmitočtu



Graf 2: Závislost THD+N na kmitočtu

- **Kontrola fáze** (polarity) obou kanálů D/A převodníku. K měření se využívá stopa 58 (sinewave burst) disku AVP & Marutech, což je harmonický sinusový průběh s nulovou počáteční fází a vynechanou každou sudou periodou. Tento test je vhodný pro zjištění správné polarity reproduktorů, kde je možnost chybné fáze zapojení mnohem pravděpodobnější než u CD přehrávače, D/A převodníku atd.. Oba kanály by měly mít stejnou fázi. Zakreslete si průběh testovacího signálu v obou kanálech, ocejchujte jej a popište osy obrázků. Měření proveďte pro vzorkovací kmitočet 48 kHz. Ostatní parametry převodníku ponechte ve

výchozím nastavení.



Graf 3: Kontrola fáze obou kanálů D/A převodníku

- Měření **separace obou kanálů** D/A převodníku. K měření se využije zkušební disk Sony, sekce 29 – 32. Signál o různých kmitočtech je nahrán jen v levém kanálu L. Pravý kanál R obsahuje tzv. digitální nulu (tzv. infinity zero). K měření využijte možnost zvolení referenční úrovně  $U_R = 0$  dBr na audio analyzátoru, kterou je třeba kalibrovat na každé stopě 29 - 32. Měření proveďte pro všechny dostupné vzorkovací kmitočty. Ostatní parametry převodníku ponechte ve výchozím nastavení. Naměřené údaje si poznamenejte do příslušných tabulek.

Tab. 3: Měření separace obou kanálů při  $f_{VZ} = 48$  kHz, ( $U_1 = 2$  V)

| Stopa | f [Hz] | $U_R$ [dB] | $U_L$ [dB] |
|-------|--------|------------|------------|
| 29    | 100    | 0          |            |
| 30    | 1 000  | 0          |            |
| 31    | 10 000 | 0          |            |
| 32    | 20 000 | 0          |            |

Tab. 4: Měření separace obou kanálů při  $f_{VZ} = 96$  kHz, ( $U_1 = 2$  V)

| Stopa | f [Hz] | $U_R$ [dB] | $U_L$ [dB] |
|-------|--------|------------|------------|
| 29    | 100    | 0          |            |
| 30    | 1 000  | 0          |            |
| 31    | 10 000 | 0          |            |
| 32    | 20 000 | 0          |            |

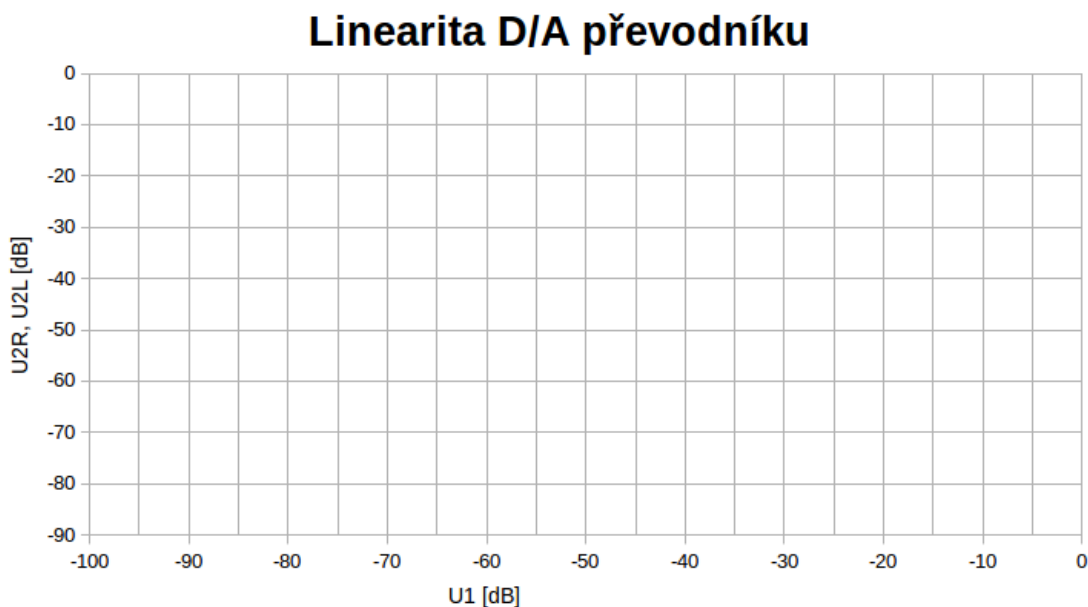
Tab. 5: Měření separace obou kanálů při  $f_{VZ} = 192$  kHz, ( $U_1 = 2$  V)

| Stopa | f [Hz] | $U_R$ [dB] | $U_L$ [dB] |
|-------|--------|------------|------------|
| 29    | 100    | 0          |            |
| 30    | 1 000  | 0          |            |
| 31    | 10 000 | 0          |            |
| 32    | 20 000 | 0          |            |

- Kontrola **linearity D/A převodníku**. K měření se využije zkušební disk Sony, sekce 14 – 22. Signál má v obou kanálech nahrán signál o kmitočtu  $f = 1$  kHz s klesající úrovní až do  $-90$  dB. Malé hodnoty zřejmě neodečtete, výsledky zpracujeme do převodní charakteristiky  $U_2 = f(U_1)$ . K měření využijte možnost zvolení referenční úrovně  $U_R = 0$  dBr na audio analyzátoru, kterou je třeba kalibrovat na stopě 14. Hodnoty napětí odečítáme přímo v [dB]. Zvolte vzorkovací kmitočet, se kterým bude přípravek pracovat, uveďte ho do tabulky a proveďte měření linearity pro tento vzorkovací kmitočet. Z naměřených hodnot sestrojte grafickou závislost linearity D/A převodníku. Ostatní parametry přípravku nechte ve výchozím nastavení.

Tab. 6: Měření linearity D/A převodníku pro  $f_{VZ} = \dots\dots\dots$  kHz

| Stopa | $U_1$ [dB] | $U_{2L}$ [dB] TP15 | $U_{2R}$ [dB] TP16 |
|-------|------------|--------------------|--------------------|
| 14    | 0          |                    |                    |
| 15    | -1         |                    |                    |
| 16    | -3         |                    |                    |
| 17    | -6         |                    |                    |
| 18    | -10        |                    |                    |
| 19    | -20        |                    |                    |
| 20    | -60        |                    |                    |
| 21    | -80        |                    |                    |
| 22    | -90        |                    |                    |



Graf 5: Linearita D/A převodníku ( $f = 1$  kHz)

- Měření **odstupu signálu od šumu**  $S/N$ . Pro měření použijeme disk Sony, sekci 1 (plná úroveň  $S = U_1 = 2 \text{ V}$ ) a srovnáme ji s digitální nulou (infinity zero =  $N$ ) – sekcí 23. Parametr odstupu signálu od šumu je jedním ze základních kvalitativních parametrů, za pomoci kterého se posuzuje kvalita D/A převodníku. Měření proveďte pro všechny dostupné vzorkovací kmitočty a srovnajte naměřené údaje odstupů signálu od šumu pro jednotlivé vzorkovací kmitočty. Ostatní parametry přípravku D/A převodníku ponechte ve výchozím nastavení.
  - $f_{VZ} = 48 \text{ kHz}$   
 $N = \dots\dots\dots \text{ V}$   
 $S/N = \dots\dots\dots$  (absolutní hodnota)  
 $S/N = \dots\dots\dots \text{ dB}$  (v logaritmické míře)
  - $f_{VZ} = 96 \text{ kHz}$   
 $N = \dots\dots\dots \text{ V}$   
 $S/N = \dots\dots\dots$  (absolutní hodnota)  
 $S/N = \dots\dots\dots \text{ dB}$  (v logaritmické míře)
  - $f_{VZ} = 192 \text{ kHz}$   
 $N = \dots\dots\dots \text{ V}$   
 $S/N = \dots\dots\dots$  (absolutní hodnota)  
 $S/N = \dots\dots\dots \text{ dB}$  (v logaritmické míře)
- Měření **harmonického zkreslení THD+N** v závislosti na úrovni signálu (sekce 14 – 22). Na všech stopách je audio signál o kmitočtu  $f = 1 \text{ kHz}$  a každá stopa má nižší úroveň  $U_1$  než stopa předešlá. Úroveň signálu pro každou stopu je uvedena na obalu CD. Zároveň také odečítejte z analyzátoru hodnotu harmonického zkreslení THD+N. U stop s nízkou úrovní patrně neodečtete úroveň harmonického zkreslení. Naměřené hodnoty vynesete do grafu, oceňujte vhodně osu X a Y a zakreslete průběh charakteristiky  $\text{THD} = f(U_1)$ . Měření proveďte pro jeden vybraný vzorkovací kmitočet. Ostatní parametry přípravku D/A převodníku ponechte ve výchozím nastavení.

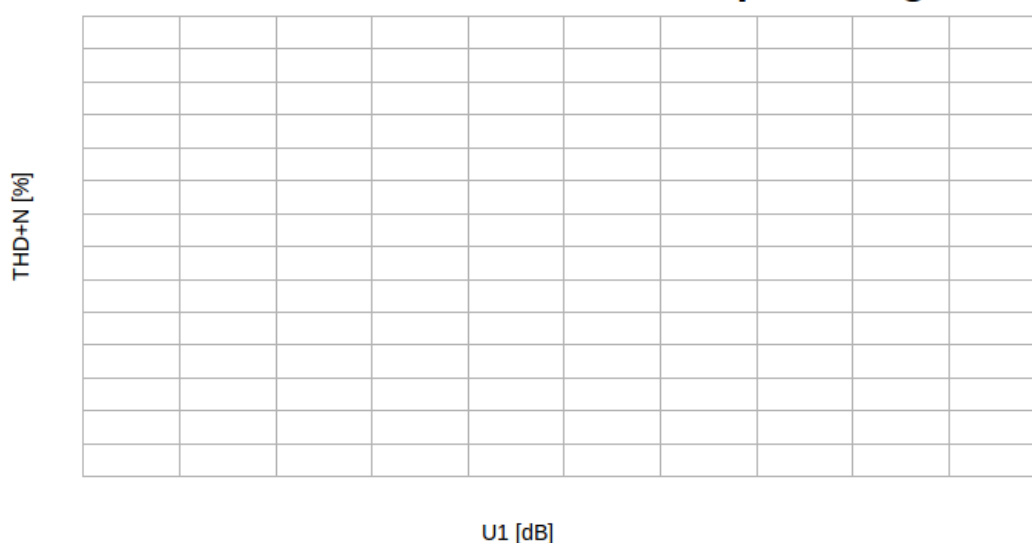
Tab. 7: Měření THD+N v závislosti na úrovni signálu pro  $f_{VZ} = \dots\dots\dots \text{ kHz}$

| Stopa | $f \text{ [kHz]}$ | $U_1 \text{ [dB]}$ | THD+N [%] |
|-------|-------------------|--------------------|-----------|
| 14    | 1                 | 0                  |           |
| 15    | 1                 | -1                 |           |
| 16    | 1                 | -3                 |           |
| 17    | 1                 | -6                 |           |
| 18    | 1                 | -10                |           |

Tab. 8: Měření THD+N v závislosti na úrovni signálu pro  $f_{VZ} = \dots\dots\dots$  kHz, pokračování

| Stopa | f [kHz] | $U_1$ [dB] | THD+N [%] |
|-------|---------|------------|-----------|
| 19    | 1       | -20        |           |
| 20    | 1       | -60        |           |
| 21    | 1       | -80        |           |
| 22    | 1       | -90        |           |

### Závislost THD+N na úrovni vstupního signálu



Graf 6: Závislost harmonického zkreslení THD na úrovni vstupního signálu

- Měření **modulové kmitočtové charakteristiky filtru De-emphasis**. Tento bod měření je totožný s první bodem měření. Využije se stejných testovacích sekvencí a stejného nastavení analyzátoru. V tomto bodě měření se však nebudete z analyzátoru odečítat velikost harmonického zkreslení THD+N. Na laboratorním přípravku je nutné nastavit vzorkovací kmitočet 48 kHz a zapnout filtr De-emphasis. Z dostupných filtrů, kterými disponuje přípravek D/A převodníku, se použije pro měření 48 kHz filtr De-emphasis. Ostatní parametry D/A převodníku se ponechají beze změny a tedy opět ve své výchozí hodnotě.

Tab. 8: Měření modul. kmitoč.char. **48 kHz** filtru De-emphasis,  $f_{VZ} = 48$  kHz

| Stopa | f [Hz] | $U_2$ [V] | $A_U$ [dB] |
|-------|--------|-----------|------------|
| 6     | 1 000  |           |            |
| 7     | 20     |           |            |
| 8     | 25     |           |            |

Tab. 9: Měření modul. kmitoč. char. **48 kHz** filtru De-emphasis,  $f_{vz} = 48 \text{ kHz}$ , pokrač.

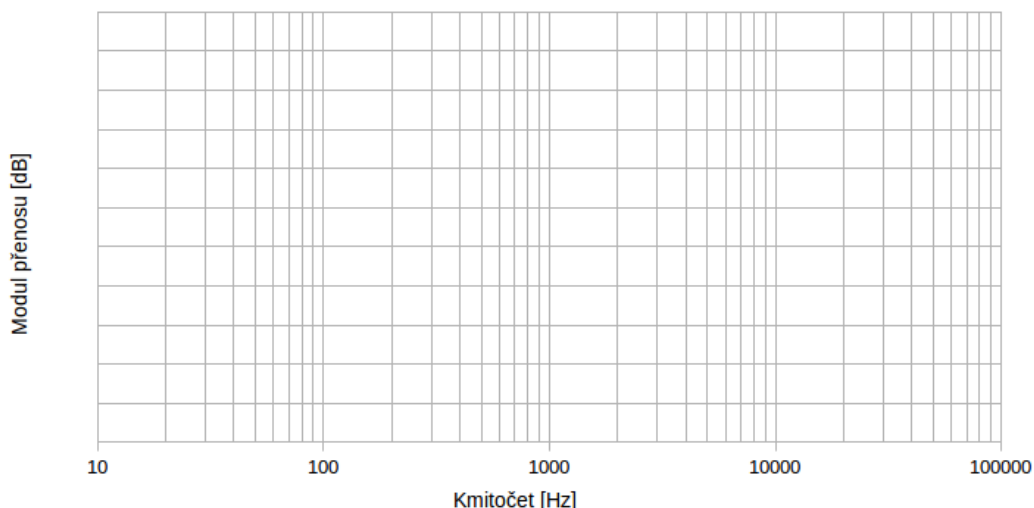
| Stopa | f [Hz] | U <sub>2</sub> [V] | A <sub>v</sub> [dB] |
|-------|--------|--------------------|---------------------|
| 9     | 32     |                    |                     |
| 10    | 40     |                    |                     |
| 11    | 50     |                    |                     |
| 12    | 63     |                    |                     |
| 13    | 80     |                    |                     |
| 14    | 100    |                    |                     |
| 15    | 125    |                    |                     |
| 16    | 160    |                    |                     |
| 17    | 200    |                    |                     |
| 18    | 250    |                    |                     |
| 19    | 315    |                    |                     |
| 20    | 400    |                    |                     |
| 21    | 500    |                    |                     |
| 22    | 630    |                    |                     |
| 23    | 800    |                    |                     |
| 24    | 1 000  |                    |                     |
| 25    | 1 250  |                    |                     |
| 26    | 1 600  |                    |                     |
| 27    | 2 000  |                    |                     |
| 28    | 2 500  |                    |                     |
| 29    | 3 150  |                    |                     |
| 30    | 4 000  |                    |                     |
| 31    | 5 000  |                    |                     |
| 32    | 6 300  |                    |                     |
| 33    | 8 000  |                    |                     |
| 34    | 10 000 |                    |                     |
| 35    | 12 500 |                    |                     |
| 36    | 16 000 |                    |                     |
| 37    | 20 000 |                    |                     |

Z naměřených údajů výstupního napětí vypočtete opět velikost modulu přenosu dle vztahu (1) uvedeného v prvním bodě měření. Sestrojte grafickou závislost modulu

přenosu ( $A_U = f(U_2/U_1)$ ) filtru De-emphasis D/A převodníku. Ocejchujte vhodně osu Y a zakreslete průběh modulu. Vyznačte pokles charakteristiky o -3 dB a odečtěte mezní kmitočet.

$f_h = \dots\dots\dots$  Hz

### Modulová kmitočtová charakteristika 48 kHz filtru De-Emphasis



Graf 7: Modulová kmitočtová charakteristika 48 kHz filtru De-emphasis

- **Nepovinná část měření** – experimentálně vyzkoušejte nastavení různých parametrů přípravku D/A převodníku jako je například separace kanálů, modulová kmitočtová charakteristika, poměr signálu a šumu harmonického zkreslení a ověřte vliv této změny parametrů na chování laboratorního přípravku. Naměřené údaje si poznamenejte. V případně kmitočtových charakteristik zanechte tyto naměřené údaje do příslušných charakteristik a pokuste se v závěru zdůvodnit případnou změnu od původního měření, které bylo dáno zadáním.

### POUŽITÉ MĚŘÍCÍ PŘÍSTROJE:

|            |                                                                       |
|------------|-----------------------------------------------------------------------|
| <b>GEN</b> | disky AVP & Marutech CD generator a Sony Test CD type 3               |
| <b>APA</b> | audio analyzátor Audio Precision Portable One                         |
| <b>OSC</b> | digitální osciloskop Tektronix TDS 2014                               |
| <b>CDR</b> | CD rekordér Philips CDR 796                                           |
| <b>DAC</b> | měřený 192 kHz / 24 bitů stereo D/A převodník                         |
|            | propojovací vodiče, 2x osciloskopická sonda, 2 x rozbočovací „T člen“ |



## **ZÁVĚR:**

(Zde každý student čitelně doplní své individuální hodnocení výsledků měření a potvrdí jej svým podpisem. Je třeba podrobně komentovat každý bod měření, každou měřenou charakteristiku nebo jednotlivý výsledek. Závěr by měl vždy přehledně shrnovat technické parametry měřeného přípravku a jejich vyhodnocení.)

## 7 ZÁVĚR

Cílem a zadáním semestrálního projektu a navazující diplomové práce bylo navrhnout koncepci a obvodové zapojení všech dílčích částí vysoce jakostního laboratorního stereofonního D/A převodníku pro předmět Nízkofrekvenční a audio elektronika. Jakož D/A převodník se měl uvažovat integrovaný multistandardní převodník 24 bit/192 kHz. K tomuto D/A převodníku se měl provést návrh digitálního přijímače, jakostní analogové části složené z diferenčních zesilovačů a aktivního rekonstrukčního filtru a v neposlední řadě také mikroprocesorové řízení režimu provozu převodníku s vhodně zvolenou indikací pracovního režimu pomocí displeje a nebo grafického znázornění.

V práci byl postupně proveden teoretický rozbor a návrh všech dílčích částí laboratorního přípravku D/A převodníku. V každém bloku D/A převodníku bylo zdůvodněno použití konkrétního klíčového integrovaného obvodu tohoto bloku. Pro požadavek vysoké kvality převodu a zpracování vstupního digitálního signálu na klasický analogový signál byl v každé dílčí části tohoto přípravku použit nejmodernější a nejkvalitnější integrovaný obvod. V případně výstupní jakostní analogové části D/A převodníku použity nejmodernější a vysoce kvalitní operační zesilovače. Každý klíčový integrovaný obvod byl doplněn jeho schématem zapojení. Na základě schémat zapojení byl proveden návrh desek plošných spojů všech částí laboratorního přípravku D/A převodníku.

Z důvodu použití navrženého a realizovaného zařízení jakožto laboratorního přípravku bylo nutné navrhnout systematické rozmístění testovacích bodů. Tyto testovací body jsou umístěny ve všech význačných částech laboratorního přípravku a po proměření všech testovacích bodů lze získat velmi dobrou představu o činnosti jednotlivých částí respektive celého zařízení určeného pro D/A převod.

Patrně nejnáročnější částí návrhu laboratorního přípravku D/A převodníku bylo kompletní obvodové zapojení vstupní části, přijímače S/PDIF, D/A převodníku a následných diferenčních zesilovačů a aktivního rekonstrukčního filtru. Požadavek návrhu laboratorního přípravku ve schopnosti zpracovat vstupní signál se vzorkovacím kmitočtem až 192 kHz a šířkou vstupního slova až 24 bitů je splněn výběrem vhodných integrovaných obvodů. Druhou podmínkou návrhu, kterou musely oba klíčové obvody splnit, byla možnost jejich softwarového řízení činnosti za pomoci řídicího algoritmu.

Kromě návrhu všech obvodů zprostředkovávajících D/A převod, bylo nutné provést také návrh řídicích obvodů. Řídicí obvody bylo nutné doplnit vhodnými indikačními a ovládacími obvody. K indikaci byl použit 2 řádkovým znakový OLED displej s vytvořeným intuitivním ovládacím menu. V tomto menu je možné se pohybovat a vybírat konkrétní volbu daného parametru D/A převodníku za pomoci ovládacích tlačítek. Pro korektní napájení všech částí přípravku byl navržen blok stabilizátorů.

Klíčovým a velmi důležitým bodem diplomové práce je měření. Bylo nutné navržený a realizovaný přípravek velmi podrobně proměřit a ověřit tak teoretické a katalogové hodnoty součástek. Zároveň také potvrdit splnění přísných požadavků návrhu na kvalitu zpracování a převodu vstupního digitálního signálu na klasickou

linkovou úroveň. Měření je velmi rozsáhlou kapitolou celé práce. S přihlédnutím do výsledků měření je možné konstatovat, že požadavky na kvalitu byly jednoznačně splněny. Modulová kmitočtová charakteristika D/A převodníku dosahuje vysoké vyrovnanosti přes celé pásmo lidské slyšitelnosti (20 Hz – 20 kHz). Úroveň harmonického zkreslení je na velmi nízké úrovni a naopak odstup signálu od šumu je na velmi vysokých hodnotách. D/A převodník dosahuje také velmi vysoké linearity a minimálních přeslechů mezi svými kanály. Poslední částí kapitoly o měření a také posledním bodem zadání diplomové práce bylo vytvoření vzorového laboratorního protokolu. Součástí navrženého protokolu je také teoretické seznámení s problematikou D/A převodu, seznámení se s vnitřní strukturou a ovládáním laboratorního přípravku D/A převodníku. Navržený laboratorní protokol je systematický a po vypracování tohoto protokolu získá student velmi jasnou představu o principech činnosti všech klíčových obvodů zprostředkovávajících D/A převod. Navíc však díky možnosti změny parametrů obou těchto obvodů získá student představu i o vlivu změny příslušného parametru na celkové chování a parametry D/A převodníku.

S přihlédnutím nejen na dosažené výsledky měření, ale také na splnění všech bodů zadání semestrálního projektu a následné diplomové práce je tuto práci nutno považovat za úspěšně splněnou.

# LITERATURA

- [1] Sharp Microelectronic Inc [on-line]. Datasheet GP1FAV31RK0F - *Fiber Optic Receiver* [citováno 5.10.2014]. Dostupné z: <http://www.sharpsme.com/download/gp1fav31rk-epdf>
- [2] Cirrus Logic Inc [on-line]. Datasheet CS8416 - *192 kHz Digital Audio Interface Receiver* [citováno 5.10.2014]. Dostupné z: [http://www.cirrus.com/en/pubs/proDatasheet/CS8416\\_F3.pdf](http://www.cirrus.com/en/pubs/proDatasheet/CS8416_F3.pdf)
- [3] Analog Devices Inc [on-line]. Datasheet AD1853- *Stereo 24bit, 192kHz, Multibit  $\Sigma$ - $\Delta$  DAC* [citováno 5.10.2014]. Dostupné z: [http://www.analog.com/static/imported-files/data\\_sheets/AD1853.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD1853.pdf)
- [4] Analog Devices Inc [on-line]. Datasheet AD1955- *High Performance Multibit  $\Sigma$ - $\Delta$  DAC with SACD Playback* [citováno 5.10.2014]. Dostupné z: [http://www.analog.com/static/imported-files/data\\_sheets/AD1955.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD1955.pdf)
- [5] Texas Instruments Inc [on-line]. Datasheet LME49720- *LME49720 Dual High Performance, High Fidelity Audio Operational Amplifier* [citováno 10.10.2014]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lme49720.pdf>
- [6] Analog Devices Inc [on-line]. Datasheet AD8599- *Single and Dual, Ultralow Distortion, Ultralow Noise Op Amps* [citováno 10.10.2014]. Dostupné z: [http://www.analog.com/static/imported-files/data\\_sheets/AD8597\\_8599.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD8597_8599.pdf)
- [7] Texas Instruments Inc [on-line]. Datasheet MSP430F5529 - *MSP430F551X, MPS430F552X Mixed Signal microcontroller* [citováno 12.10.2014]. Dostupné z: <http://www.ti.com/general/docs/lit/getliterature.tsp?genericPartNumber=msp430f5529&fileType=pdf>
- [8] Texas Instruments Inc [on-line]. Datasheet MSP430F5529 - *MSP430x5xx and MSP430x6xx Family User's Guide* [citováno 12.10.2014]. Dostupné z: <http://www.ti.com/general/docs/lit/getliterature.tsp?baseLiteratureNumber=slau208&fileType=pdf>
- [9] Murata Power Solutions Inc [on-line]. Datasheet 78601/3C - *General Purpose Pulse Transformers* [citováno 6.11.2014]. Dostupné z: [http://www.murata-ps.com/datasheet?http://www.murata-ps.com/data/magnetics/kmp\\_786.pdf](http://www.murata-ps.com/datasheet?http://www.murata-ps.com/data/magnetics/kmp_786.pdf)
- [10] HEJTMÁNEK, Vladimír. Signál S/PDIF. In: *Elektronika - zapojení, návody a konstrukce* [online]. 2002 [citováno 6.11.2014]. Dostupné z: <http://www.belza.cz/digiaudio/spdif.htm>
- [11] NXP Semiconductors Inc [online]. Datasheet 74HC595;74HCT595- *8 bit serial-in, serial or parallel-out shift register with output latches; 3 states* [citováno 10.11.2014]. Dostupné z: [http://www.nxp.com/documents/data\\_sheet/74HC\\_HCT595.pdf](http://www.nxp.com/documents/data_sheet/74HC_HCT595.pdf)
- [12] Raystar Optronic Inc [online]. Datasheet REC002002AGPP5N00001- *OLED specification Model No. REC002002AGPP5N00001* [citováno 18.11.2014] dostupné z: <http://www.tme.eu/cz/Document/546be9cf09584925b7a25babb61a3bd5/REC002002AGP5N00001.pdf>
- [13] Texas Instruments Inc [on-line]. Datasheet LM317- *LM117/LM317A/LM317-N Three-Terminal Adjustable Regulator* [citováno 18.11.2014] dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm117.pdf>
- [14] Texas Instruments Inc [on-line]. Datasheet LM337- *LM137/LM337-N 3- Terminal*

*Adjustable Negative Regulator* [citováno 18.11.2014] dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symmlink/lm137.pdf>

- [15] ABRMAN, M. *Audio zesilovač s digitálním vstupem a výkonovým a sluchátkovým výstupem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2013. 72 s., 36 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce: doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.
- [16] ČADA, D. *Funkční generátor s DDS*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2013. 36 s., 15 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Šebesta, Ph.D.

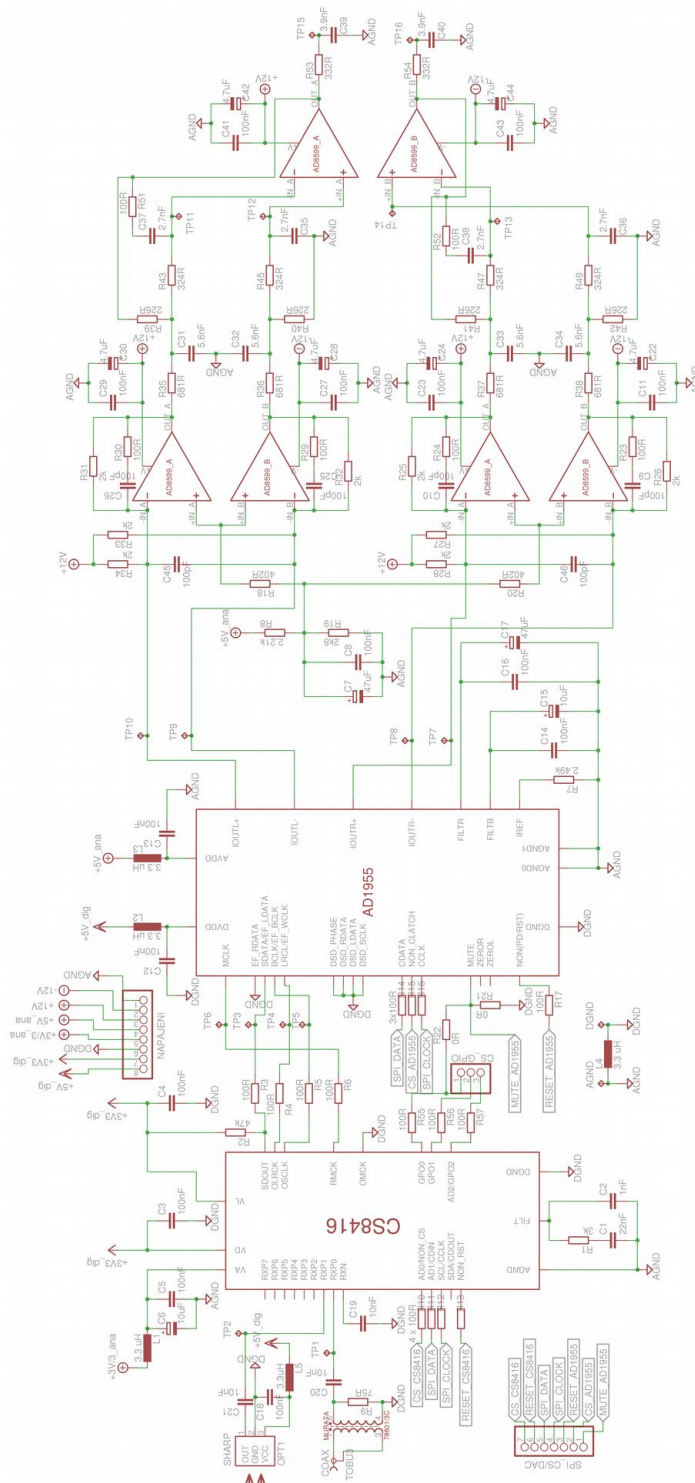
# SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

|                |                                                                   |
|----------------|-------------------------------------------------------------------|
| $f$            | Signál v časové oblasti.                                          |
| $f_{vz}$       | Vzorkovací kmitočet                                               |
| <i>OLED</i>    | Organic Light Emitting Diode – typ displeje složený z těchto diod |
| <i>LED</i>     | Light Emitting Diode- dioda emitující světlo                      |
| <i>S/PDIF</i>  | Sony/Philips Digital InterFace                                    |
| <i>D/A</i>     | Digitálně/analogový převodník                                     |
| <i>TP</i>      | Testing Point – testovací bod                                     |
| <i>PC</i>      | Personal Computer – osobní počítač                                |
| <i>MCU</i>     | Microcontroller unit, mikrokontrolér                              |
| <i>IO</i>      | Integrovaný obvod                                                 |
| <i>GPIO</i>    | Vstupně výstupní piny např. mikrokontroléru                       |
| <i>TV</i>      | Televizní přijímač                                                |
| <i>DVD</i>     | Digital Versatile Disc, přehrávač DVD disků                       |
| <i>Blu-Ray</i> | Tzv. Třetí generace optických disků, přehrávač Blu-Ray            |
| <i>CMOS</i>    | Complementary Metal Oxide Semiconductor, techn. integr. obv.      |
| <i>RCA</i>     | Cinch konektor- standard pro připojení audio a video              |
| <i>Toslink</i> | Komerční optické rozhraní                                         |
| <i>SPI</i>     | Serial Peripheral Interface – sériové periferní rozhraní          |
| <i>VF</i>      | Vysoká frekvence                                                  |
| <i>PLL</i>     | Phase Lock Loop, fázový závěs                                     |
| <i>NPO</i>     | Typ dielektrika keramického kondenzátoru                          |
| <i>X7R</i>     | Typ dielektrika keramického kondenzátoru                          |
| <i>Y5V</i>     | Typ dielektrika keramického kondenzátoru                          |
| <i>THD+N</i>   | Total Harmonic Distortion + Noise, celkové harmonické zkreslení   |
| <i>SNR</i>     | Signal To Noise Ratio – poměr signál/šum                          |
| <i>PCM</i>     | Pulse Code Modulation, pulzně kódová modulace                     |
| <i>AES3</i>    | Profesionální S/PDIF rozhraní                                     |
| <i>DAC</i>     | Digital to Analog Converter, digitálně/analogový převodník        |
| <i>SACD</i>    | Super Audio Compact Disc, formát dat, režim D/A převod            |

|             |                                                               |
|-------------|---------------------------------------------------------------|
| <i>DPS</i>  | Deska plošných spojů                                          |
| <i>I2S</i>  | Integrated Interchip Sound, rozhraní                          |
| <i>SMD</i>  | Surface Mount Device, součástka pro povrchovou montáž         |
| <i>THT</i>  | Through-hole technology, součástka pro montáž do děr          |
| <i>UART</i> | Universal Synchronous / Asynchronous Receiver and Transmitter |
| <i>IrDA</i> | Infrared Data Association                                     |
| <i>USB</i>  | Universal Serial Bus, univerzální sériové rozhraní            |
| <i>HID</i>  | Human Interface Device, protokol USB                          |
| <i>MSC</i>  | Master Storage Class, protokol USB                            |

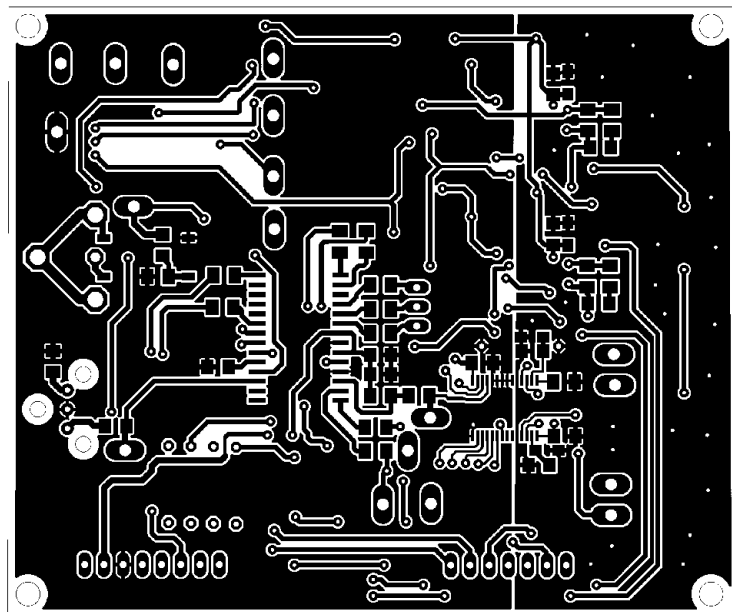
# A OBVODY PRO D/A PŘEVOD

## A.1 Schéma zapojení obvodů pro D/A převod



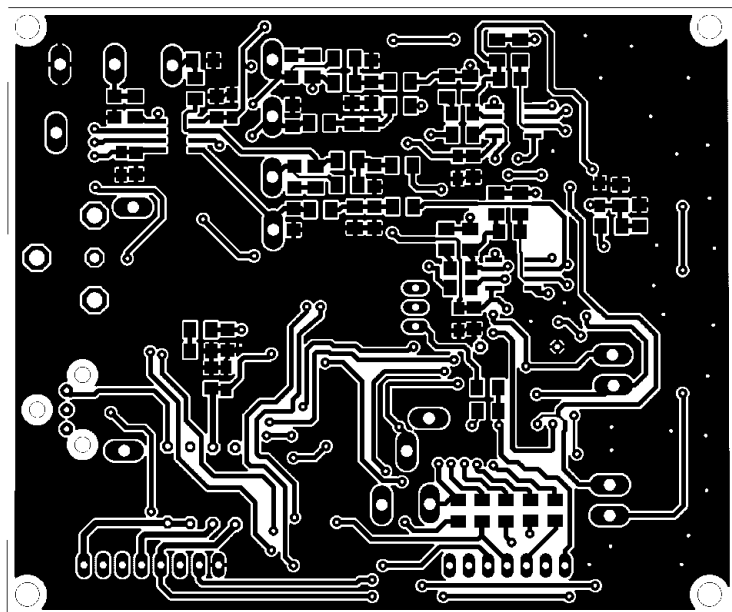


## A.2 Deska plošného spoje – bottom (strana spojů)



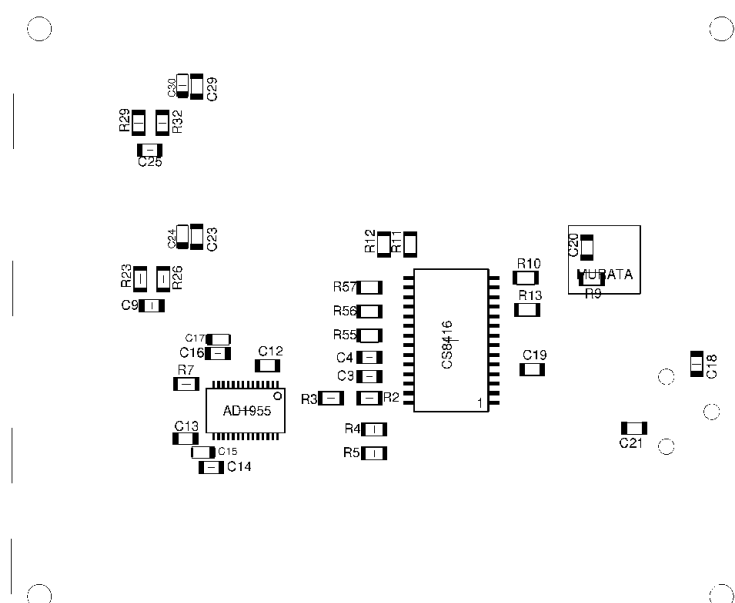
Rozměr desky 96 x 81 [mm], měřítko M1:1

## A.3 Deska plošného spoje – top (strana součástek)



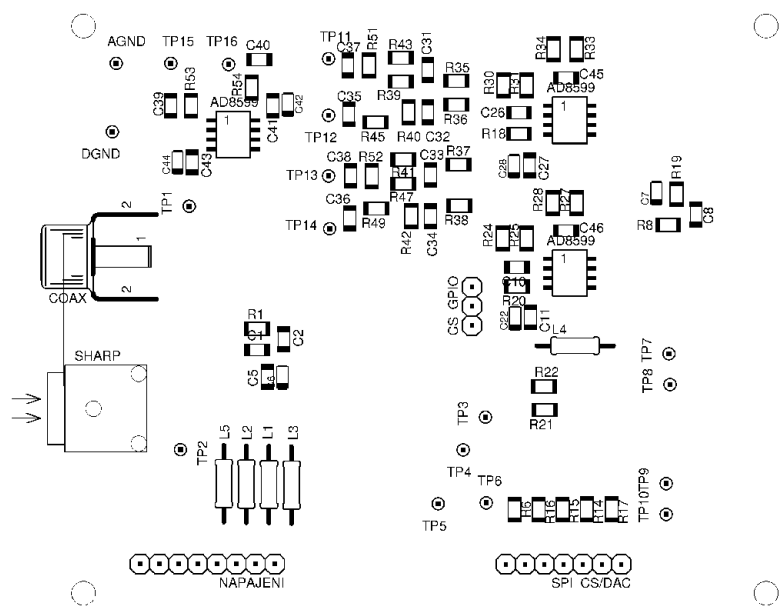
Rozměr desky 96 x 81 [mm], měřítko M1:1

## A.4 Osazovací plán – bottom (strana spojů)



Rozměr desky 96 x 81 [mm], měřítko M1:1

## A.5 Osazovací plán – top (strana součástek)



Rozměr desky 96 x 81 [mm], měřítko M1:1

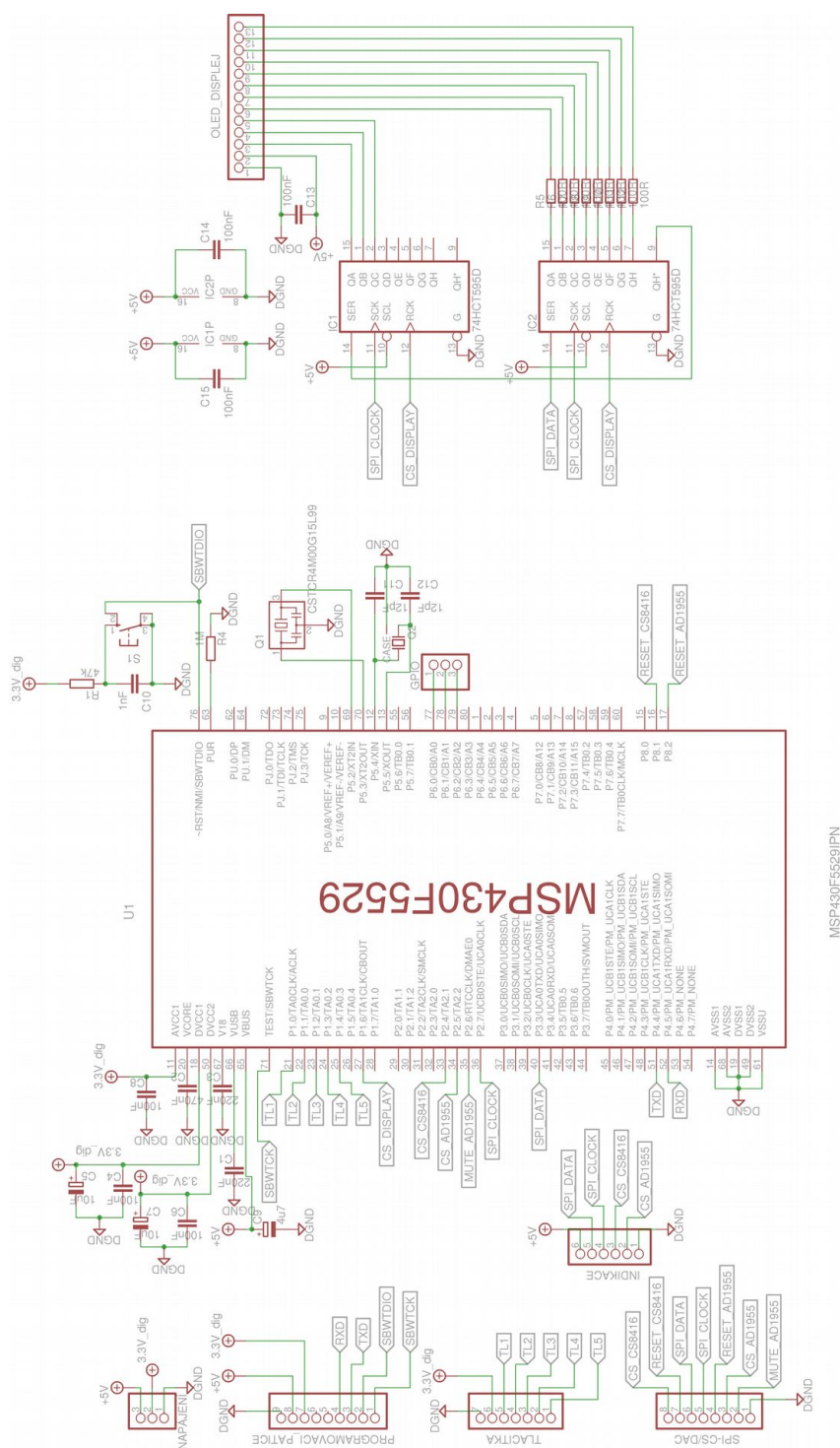
## A.6 Seznam použitých součástek v obvodech pro D/A převod

| Počet | Hodnota | Pouzdro | Označení                                                                                                            | Popis              |
|-------|---------|---------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|
| 1     |         | 1X03    | CS_GPIO                                                                                                             | PIN HEADER         |
| 1     |         | 1X07    | SPI_CS/DAC                                                                                                          | PIN HEADER         |
|       |         | 1X08    | NAPÁJENÍ                                                                                                            | PIN HEADER         |
| 1     | 0R      | M1206   | R21                                                                                                                 | SMD Rezistor       |
| 19    | 100R    | M1206   | R3, R4, R5,<br>R6,R10, R11, R12,<br>R13,R14, R15,<br>R16, R17, R23,<br>R24, R29, R30,<br>R51, R52, R55,<br>R56, R57 | SMD Rezistor       |
| 15    | 100nF   | C1206   | C3, C4, C5, C8,<br>C11, C12, C13,<br>C14, C16, C18,<br>C23, C27, C29,<br>C41, C43                                   | SMD keramický kon. |
| 6     | 100pF   | C1206   | C9, C10, C25,<br>C26, C45, C46                                                                                      | SMD keramický kon. |
| 3     | 10nF    | C1206   | C19, C20, C21                                                                                                       | SMD keramický kon. |
| 2     | 10uF    | SMC_A   | C6, C15                                                                                                             | SMD tantalový kon. |
| 1     | 1nF     | C1206   | C2                                                                                                                  | SMD keramický kon. |
| 1     | 2.21k   | M1206   | R8                                                                                                                  | SMD Rezistor       |
| 1     | 2.49k   | M1206   | R7                                                                                                                  | SMD Rezistor       |
| 4     | 2.7nF   | C1206   | C35, C36, C37,<br>C38                                                                                               | SMD keramický kon. |
| 4     | 226R    | M1206   | R39, R40, R41,<br>R42                                                                                               | SMD Rezistor       |
| 1     | 22nF    | C1206   | C1                                                                                                                  | SMD keramický kon. |

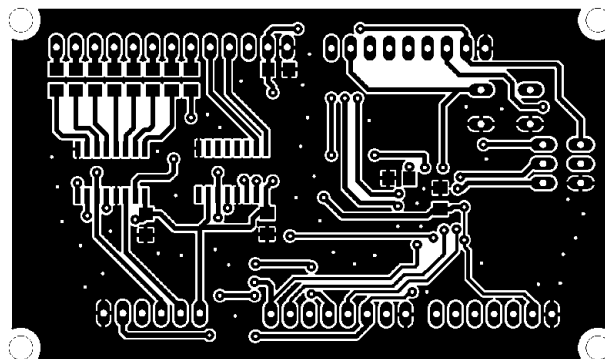
| Počet | Hodnota    | Pouzdro  | Označení                                                                                             | Popis                              |
|-------|------------|----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|
| 8     | 2k         | M1206    | R25, R26, R27,<br>R28, R31, R32,<br>R33, R34                                                         | SMD Rezistor                       |
| 1     | 2k8        | M1206    | R19                                                                                                  | SMD Rezistor                       |
| 5     | 3.3uH      | 0207/10  | L1, L2, L3, L4,L5                                                                                    | THT tlumivka                       |
| 2     | 3.9nF      | C1206    | C39, C40                                                                                             | SMD keramický kon.                 |
| 4     | 324R       | M1206    | R43, R45, R47,<br>R49                                                                                | SMD Rezistor                       |
| 2     | 332R       | M1206    | R53, R54                                                                                             | SMD Rezistor                       |
| 1     | 3k         | M1206    | R1                                                                                                   | SMD Rezistor                       |
| 6     | 4.7uF      | SMC_A    | C22, C24, C28,<br>C30, C42, C44                                                                      | SMD tantalový kon.                 |
| 2     | 402R       | M1206    | R18, R20                                                                                             | SMD Rezistor                       |
| 1     | 47k        | M1206    | R2                                                                                                   | SMD Rezistor                       |
| 2     | 47uF       | SMC_A    | C7, C17                                                                                              | SMD tantalový kon.                 |
| 4     | 5.6nF      | C1206    | C31, C32, C33,<br>C34                                                                                | SMD keramický kon.                 |
| 4     | 681R       | M1206    | R35, R36, R37,<br>R38                                                                                | SMD Rezistor                       |
| 1     | 75R        | M1206    | R9                                                                                                   | SMD Rezistor                       |
| 1     | AD1955     | SSOP28DB | AD1955                                                                                               | SMD Rezistor                       |
| 3     | AD8599     | SOP08    | AD8599                                                                                               | D/A převodník                      |
| 1     | CS8416     | SOP28    | CS8416                                                                                               | Přijímač S/PDIF                    |
| 1     | MURATA     | 78601    | MURATA 78601                                                                                         | Pulzní transformátor               |
| 1     | OPT1       | TORX     | SHARP Optical                                                                                        | FIBER OPTIC<br>RECEIVING<br>MODULE |
| 1     | TOBU3      | TOBU3    | COAX                                                                                                 | RCA Jack                           |
| 16    | TPPAD1-17Y | P1-17Y   | TP1, TP2, TP3,<br>TP4, TP5, TP6,<br>TP7, TP8, TP9,<br>TP10, TP11, TP12,<br>TP13, TP14, TP15,<br>TP16 | Test pad                           |

# B ŘÍDÍCÍ OBVODY

## B.1 Schéma zapojení mikrokontroléru

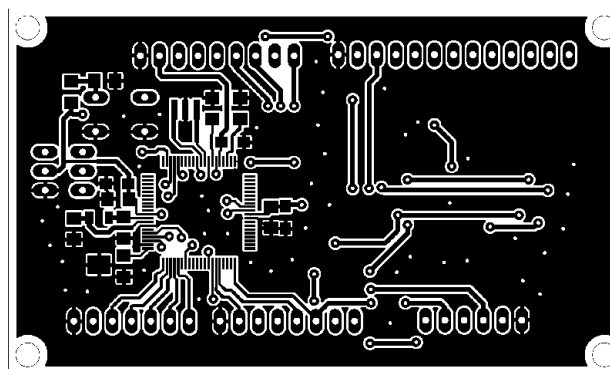


## B.2 Deska plošného spoje – bottom (strana spojů)



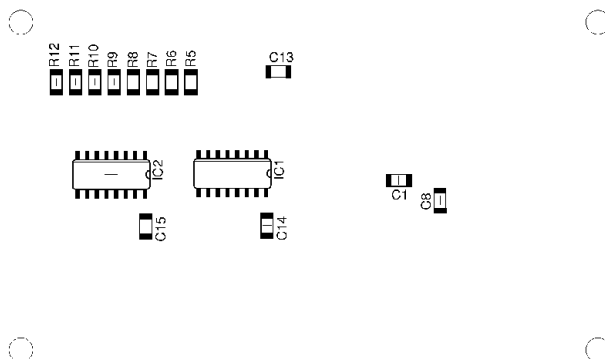
Rozměr desky 81 x 48 [mm], měřítko M1:1

## B.3 Deska plošného spoje – top (strana součástek)



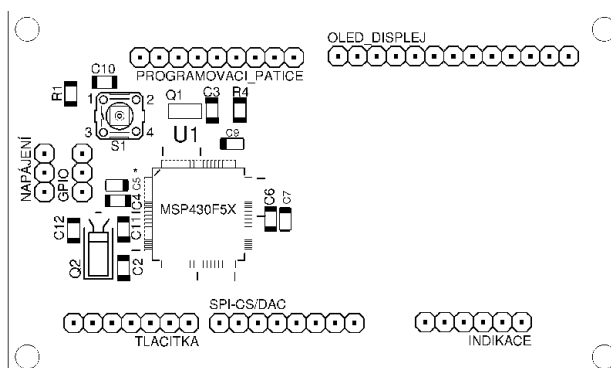
Rozměr desky 81x 48 [mm], měřítko M1:1

## B.4 Osazovací plán – bottom (strana spojů)



Rozměr desky 81 x 48 [mm], měřítko M1:1

## B.5 Osazovací plán – top (strana součástek)



Rozměr desky 81 x 48 [mm], měřítko M1:1

## B.6 Seznam použitých součástek v zapojení mikrokontroléru

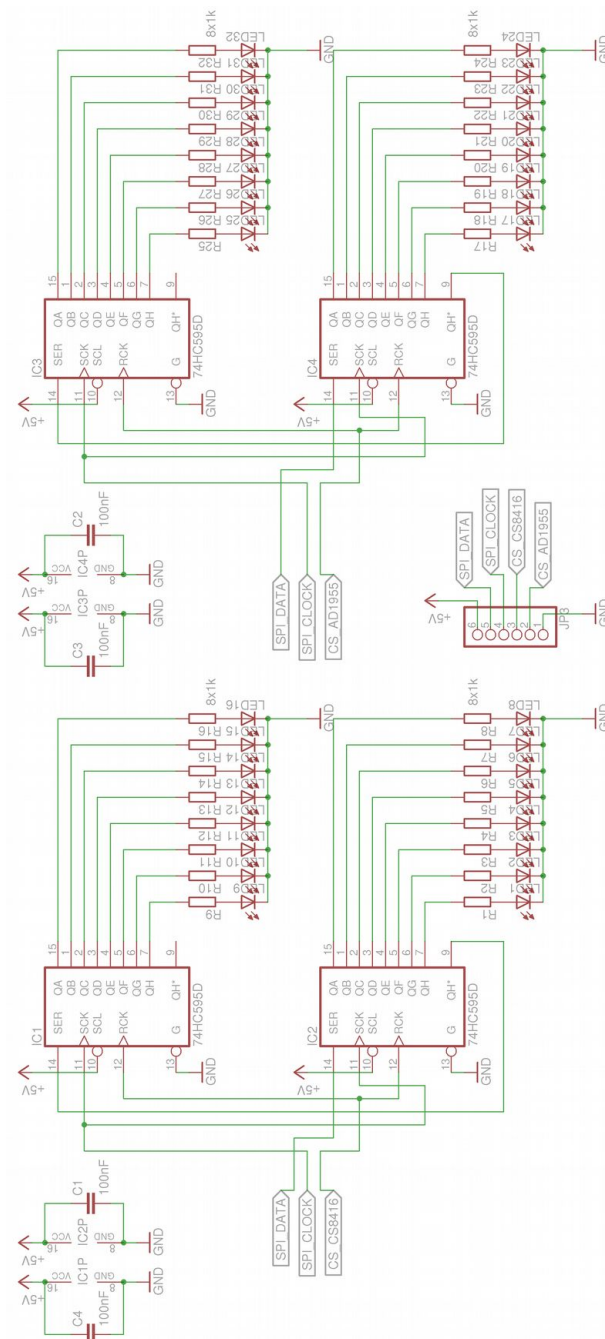
| Počet | Hodnota | Pouzdro  | Označení                          | Popis                |
|-------|---------|----------|-----------------------------------|----------------------|
| 1     |         | B3F-10XX | S1                                | Tlačítko             |
| 1     |         | MS1V-T1K | Q2                                | Krystalový rezonátor |
| 1     |         | 1X13     | OLED_DISPLEJ                      | PIN HEADER           |
| 1     |         | 1X07     | TLACITKA                          | PIN HEADER           |
| 1     |         | 1X08     | SPI-CS/DAC                        | PIN HEADER           |
| 1     |         | 1X09     | PROGRAMOVACI_PATICE               | PIN HEADER           |
| 1     |         | 1X03     | GPIO                              | PIN HEADER           |
| 1     |         | 1X03     | NAPÁJENÍ                          | PIN HEADER           |
| 1     |         | 1X06     | INDIKACE                          | PIN HEADER           |
| 8     | 100R    | R1206    | R5, R6, R7, R8, R9, R10, R11, R12 | SMD rezistor         |
| 6     | 100nF   | C1206    | C4, C6, C8, C13, C14, C15         | SMD keramický kon.   |

| Počet | Hodnota         | Pouzdro    | Označení    | Popis                |
|-------|-----------------|------------|-------------|----------------------|
| 2     | 10uF            | SMC_A      | C5, C7      | SMD tantalový kon.   |
| 2     | 12pF            | C1206      | C11, C12    | SMD keramický kon.   |
| 1     | 1M              | R1206      | R4          | SMD rezistor         |
| 1     | 1nF             | C1206      | C10         | SMD keramický kon.   |
| 1     | 220nF           | C1206      | C1          | SMD keramický kon.   |
| 2     | 470nF           | C1206      | C2, C3      | SMD keramický kon.   |
| 1     | 47k             | R1206      | R1          | SMD rezistor         |
| 1     | 4u7             | SMC_A      | C9          | SMD tantalový kon.   |
| 2     | 74HCT595D       | SOIC16     | IC1, IC2    | 8-bit shift registr  |
| 1     | CSTCR4M00G15L99 | CSTCR6M    | Q1          | Krystalový rezonátor |
| 1     | MSP430F5529IPN  | QFP50P-80N | MSP430F5529 | Mikrokontrolér       |

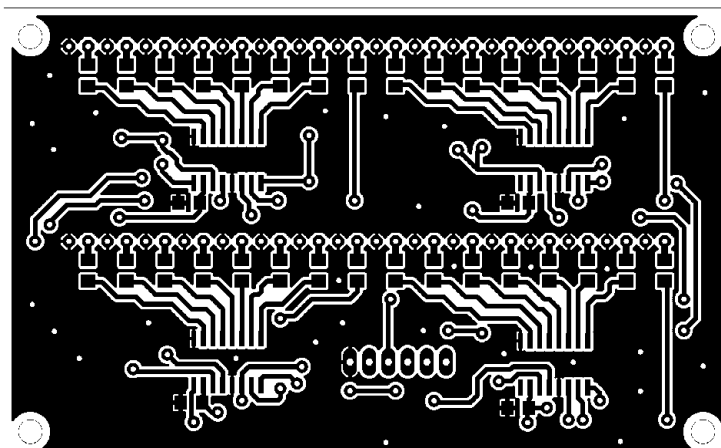


# C INDIKAČNÍ OBVODY

## C.1 Schéma zapojení indikačních obvodů

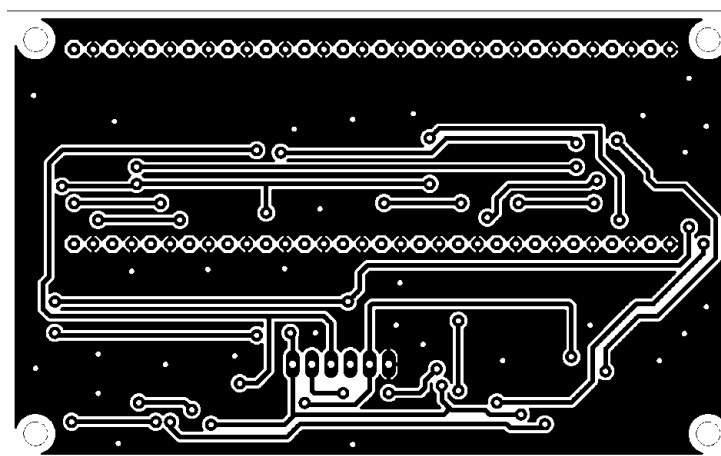


## C.2 Deska plošného spoje – bottom (strana spojů)



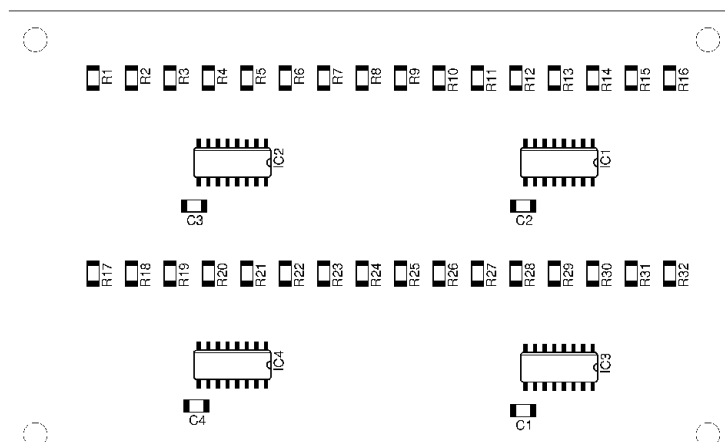
Rozměr desky 97 x 60 [mm], měřítko M1:1

## C.3 Deska plošného spoje – top (strana součástek)



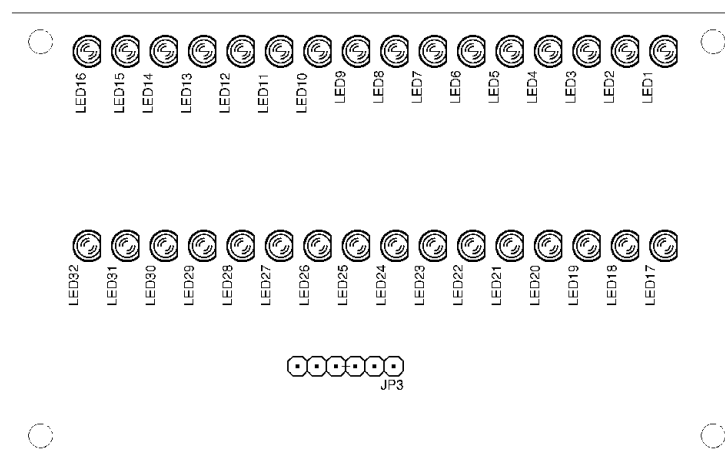
Rozměr desky 97 x 60 [mm], měřítko M1:1

## C.4 Osazovací plán – bottom (strana spojů)



Rozměr desky 97 x 60 [mm], měřítko M1:1

## C.5 Osazovací plán – top (strana součástek)



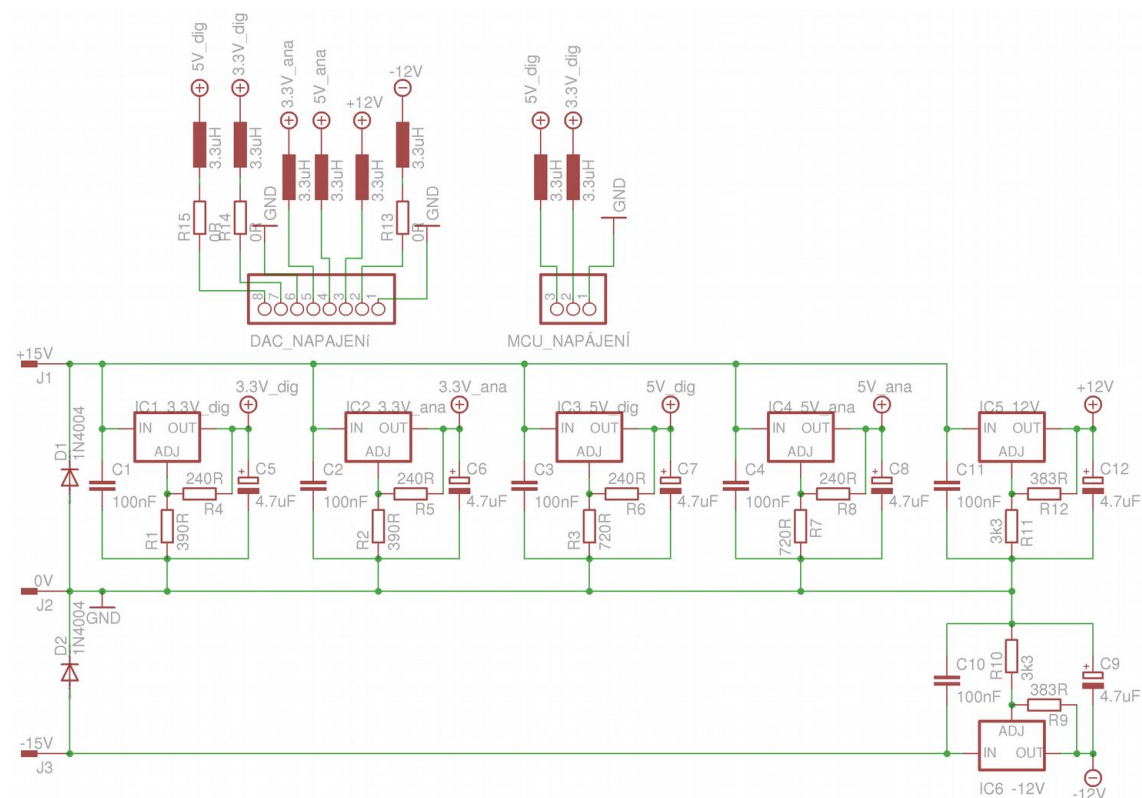
Rozměr desky 97 x 60 [mm], měřítko M1:1

## C.6 Seznam použitých součástek v indikačních obvodech

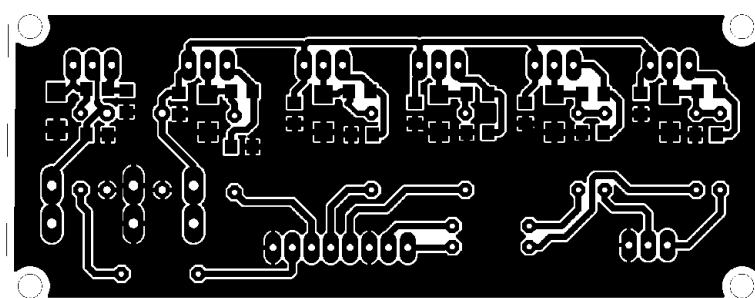
| Počet | Hodnota  | Pouzdro | Označení                                                                                                                                                                                                                                                        | Popis                        |
|-------|----------|---------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|
| 32    |          | 1206    | LED1, LED2, LED3,<br>LED4, LED5, LED6,<br>LED7, LED8, LED9,<br>LED10, LED11,<br>LED12, LED13,<br>LED14, LED15,<br>LED16, LED17,<br>LED18, LED19,<br>LED20, LED21,<br>LED22, LED23,<br>LED24, LED25,<br>LED26, LED27,<br>LED28, LED29,<br>LED30, LED31,<br>LED32 | LED                          |
| 1     |          | 1X05    | JP1                                                                                                                                                                                                                                                             | PIN HEADER                   |
| 32    |          | R1206   | R1, R2, R3, R4, R5,<br>R6, R7, R8, R9, R10,<br>R11, R12, R13, R14,<br>R15, R16, R17, R18,<br>R19, R20, R21, R22,<br>R23, R24, R25, R26,<br>R27, R28, R29, R30,<br>R31, R32                                                                                      | RESISTOR,<br>European symbol |
| 4     | 100nF    | C1206   | C1, C2, C3, C4                                                                                                                                                                                                                                                  | SMD keramický kon.           |
| 4     | 74HC595D | SOIC16  | IC1, IC2, IC3, IC4                                                                                                                                                                                                                                              | 8-bit shift registr          |

## D NAPÁJECÍ OBVODY

### D.1 Schéma zapojení bloku stabilizátorů

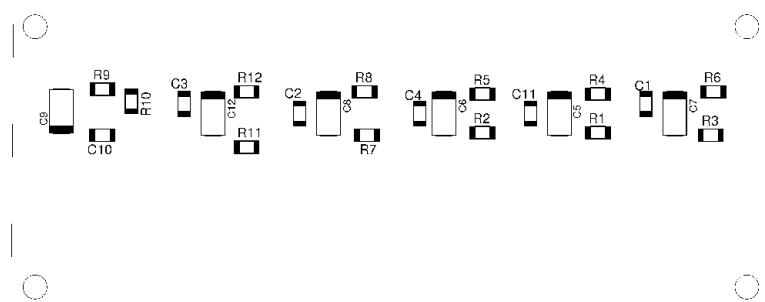


### D.2 Deska plošného spoje – bottom (strana spojů)



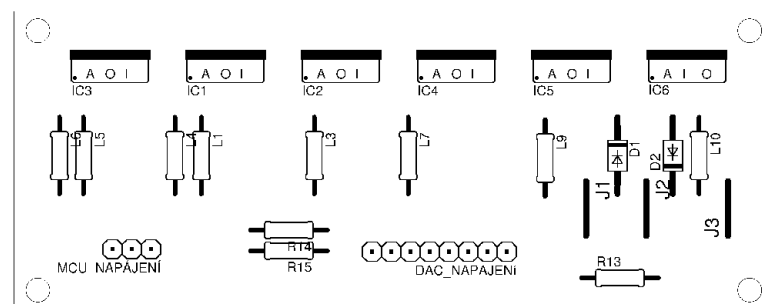
Rozměr desky 100 x 40 [mm], měřítko M1:1

### D.3 Osazovací plán – bottom (strana spojů)



Rozměr desky 100 x 40 [mm], měřítko M1:1

### D.4 Osazovací plán – top (strana součástek)



Rozměr desky 100 x 40 [mm], měřítko M1:1

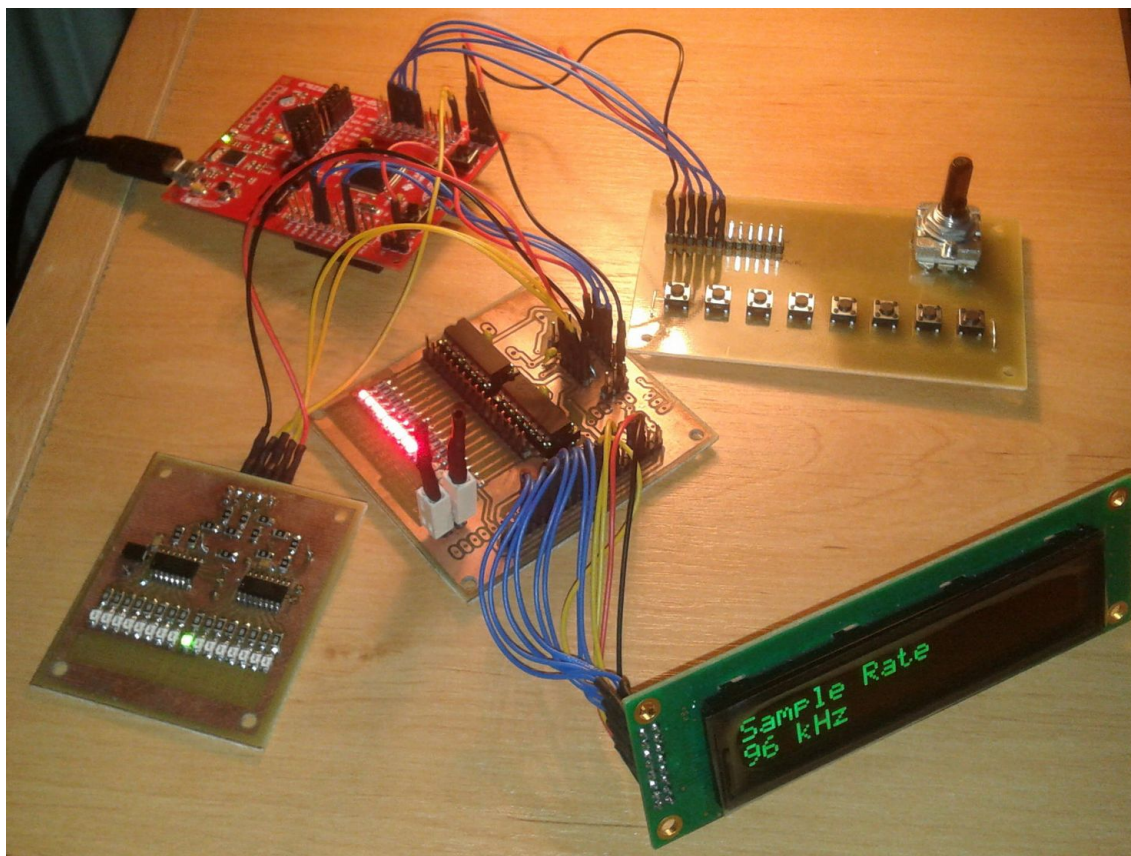
### D.5 Seznam použitých součástek v bloku stabilizátorů

| Počet | Hodnota | Pouzdro  | Označení                 | Popis                 |
|-------|---------|----------|--------------------------|-----------------------|
| 1     | +15V    | F061.100 | J1                       | Faston                |
| 1     | -12V    | 337TS    | IC6                      | LM337 napěťový regul. |
| 1     | -15V    | F061.100 | J3                       | Faston                |
| 1     | 0V      | F061.100 | J2                       | Faston                |
| 6     | 100nF   | C1206    | C1, C2, C3, C4, C10, C11 | SMD keramický kon.    |

| Počet | Hodnota  | Pouzdro | Označení                        | Popis                 |
|-------|----------|---------|---------------------------------|-----------------------|
| 1     | 15V      | 317TS   | IC5                             | LM317 napěťový regul. |
| 2     | 1N4004   | DO41-10 | D1, D2                          | Ochranná dioda        |
| 4     | 240R     | R1206   | R4, R5, R6, R8                  | SMD rezistor          |
| 1     | 3.3V_ana | 317TS   | IC2                             | LM317 napěťový regul. |
| 1     | 3.3V_dig | 317TS   | IC1                             | LM317 napěťový regul. |
| 8     | 3.3uH    | 0207/10 | L1, L3, L4, L5, L6, L7, L9, L10 | THT tlumivka          |
| 2     | 390R     | R1206   | R1, R2                          | SMD rezistor          |
| 6     | 4.7uF    | SMC_C   | C5, C6, C7, C8, C9, C12         | SMD tantalový kon.    |
| 1     | 5V_ana   | 317TS   | IC4                             | LM317 napěťový regul. |
| 1     | 5V_dig   | 317TS   | IC3                             | LM317 napěťový regul. |
| 2     | 383R     | R1206   | R9, R12                         | SMD rezistor          |
| 2     | 3k3      | R1206   | R10, R11                        | SMD rezistor          |
| 2     | 720R     | R1206   | R3, R7                          | SMD rezistor          |
| 3     | 0R       | R1206   | R13, R14, R15                   | SMD rezistor          |
| 1     |          | 1X08    | NAPÁJENÍ<br>DAC                 | PIN HEADER            |
| 1     |          | 1X03    | NAPÁJENÍ<br>MCU                 | PIN HEADER            |

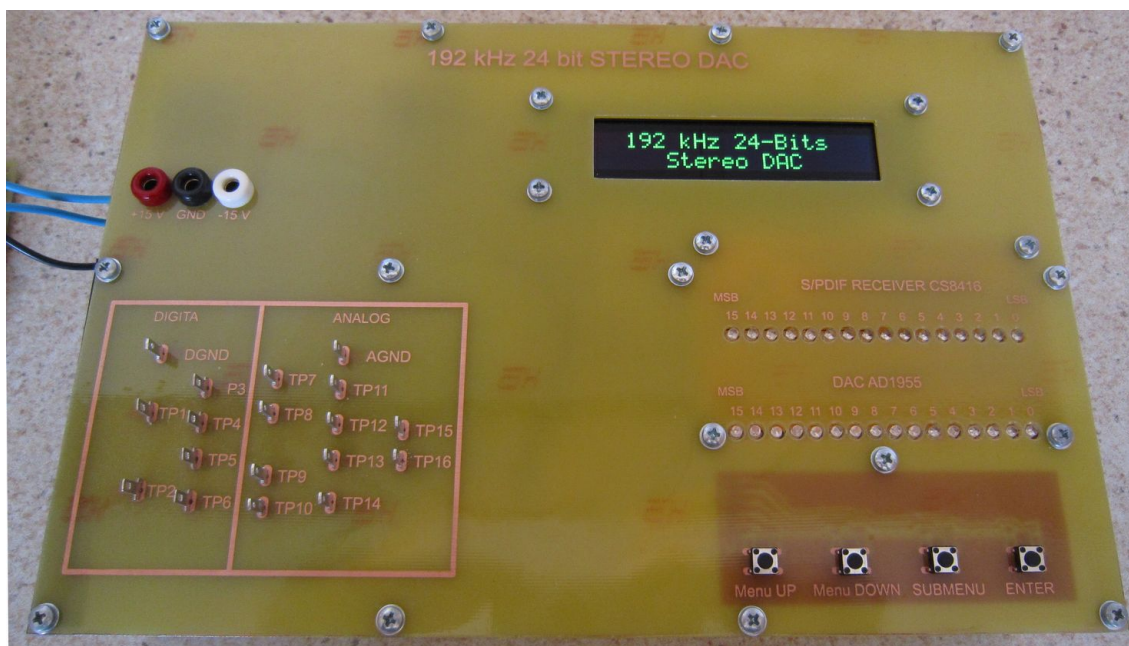
## E FOTODOKUMENTACE

### E.1 Zapojení vývojového kitu

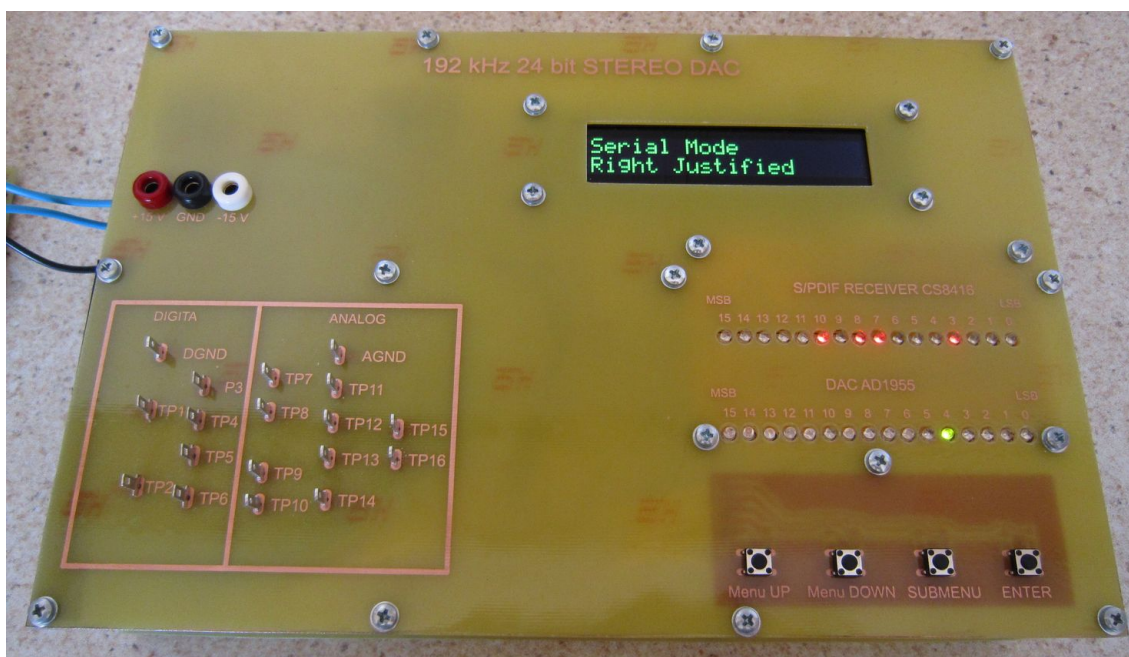




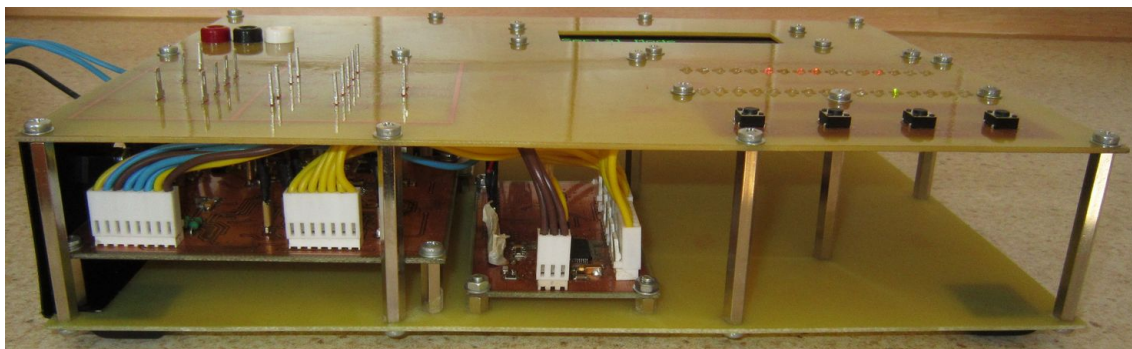
## E.2 Vrchní panel → po zapnutí přípravku



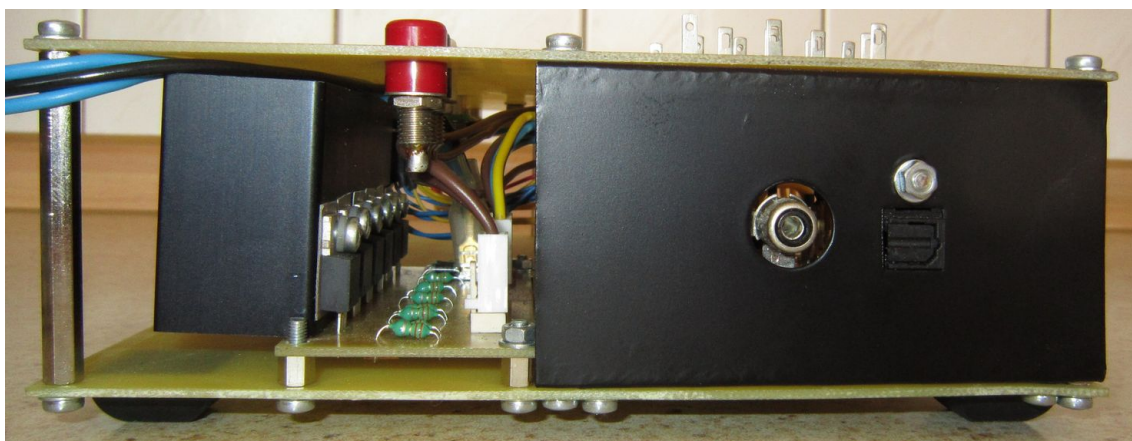
## E.3 Vrchní panel → s nastavenou předvolbou



#### E.4 Čelní pohled



#### E.5 Boční pohled



#### E.6 Zadní pohled





## E.7 Měření na přípravku

