



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

## VÍCEKANÁLOVÝ AUDIO D/A PŘEVODNÍK PRO LABORATORNÍ VÝUKU

MULTICHANNEL AUDIO DAC FOR LABORATORY MEASUREMENTS

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Tomáš Kristek

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.

BRNO 2023

# Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Elektronika a komunikační technologie**

Ústav radioelektroniky

**Student:** Tomáš Kristek

**ID:** 230278

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2022/23

## NÁZEV TÉMATU:

### Vícekanálový audio D/A převodník pro laboratorní výuku

#### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

V teoretické části práce navrhnete blokovou a obvodovou strukturu vícekanálového audio D/A převodníku (24 bitů / 192 kHz), který by byl využitelný v laboratorní výuce předmětu Audio elektronika. Měření by mělo demonstrovat vliv převodu, rekonstrukce a filtrace na kvalitu výstupního signálu. Předpokládejte interní mikroprocesorové řízení přes I2C/SPI sběrnici a volbu režimu převodníku bez použití externího PC. Návrh blokové a obvodové struktury ověřte.

V praktické části práce vytvořte kompletní konstrukční podklady k realizaci návrhu (schéma zapojení, návrh desky plošného spoje, rozložení a soupiska součástek atd.). Navržený D/A převodník realizujte formou funkčního laboratorního přípravku a experimentálním měřením ověřte jeho činnost. Navrhnete koncepci laboratorní úlohy a výsledky měření zpracujte formou standardního protokolu o měření.

#### DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] WIRSUM, S. Abeceda nf techniky. Praha: BEN – technická literatura, 2003.
- [2] Datasheet AD1934. 8-Channel DAC with PLL and Single-Ended Outputs, 192 kHz, 24 Bits. Analog Devices,online: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD1934.pdf>
- [3] METZLER, B. Audio Measurement Handbook. Beaverton, Audio Presision, Inc., 1993.

**Termín zadání:** 6.2.2023

**Termín odevzdání:** 8.8.2023

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

**doc. Ing. Lucie Hudcová, Ph.D.**  
předseda rady studijního programu

#### UPOZORNĚNÍ:

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

## **Abstrakt**

Obsahem této bakalářské práce je návrh a konstrukce vícekanálového audio D/A převodníku, který bude sloužit pro laboratorní výuku. Součástí je vstup digitálního signálu pomocí SPDIF komunikace, samotný D/A převodník, ovládání čipu D/A převodníku pomocí sběrnice SPI, napájecí obvody a symetrický výstup.

## **Klíčová slova**

D/A převod, převodník, audio, Analog Devices, SPDIF, digitální signál, analogový signál.

## **Abstract**

The content of this bachelor thesis is the design and construction of a multi-channel audio D/A converter, which will be used for laboratory use. It includes a digital signal input using SPDIF communication, the D/A converter itself, control of the D/A converter chip using the SPI bus, power circuits and symmetrical output.

## **Keywords**

D/A conversion, converter, audio, Analog Devices, SPDIF, digital signal, analog signal.

## **Bibliografická citace**

KRISTEK, Tomáš. *Vícekanálový audio D/A převodník pro laboratorní výuku* [online]. Brno, 2023 [cit. 2023-08-03]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/154346>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky. Vedoucí práce Tomáš Kratochvíl.

# Prohlášení autora o původnosti díla

**Jméno a příjmení studenta:** *Tomáš Kristek*

**VUT ID studenta:** *230278*

**Typ práce:** *Bakalářská práce*

**Akademický rok:** *2022/23*

**Téma závěrečné práce:** *Vícekanálový audio D/A převodník pro laboratorní výuku*

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 8. srpna 2023

-----  
podpis autora

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu bakalářské práce prof. Ing. Tomáši Kratochvílovi, Ph.D. za cenné rady, jak odborné, tak i k formální stránce práce. Děkuji také kolegům a kamarádům za případné podněty a rady.

V Brně dne: 8. srpna 2023

-----  
podpis autora

# Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	9
SEZNAM TABULEK.....	11
ÚVOD.....	12
<b>1. TEORETICKÝ ROZBOR.....</b>	<b>13</b>
1.1 D/A PŘEVOD.....	13
1.2 VLASTNOSTI A PARAMETRY.....	13
<b>2. FUNKČNÍ ČÁSTI A/D PŘEVODNÍKU.....</b>	<b>15</b>
2.1 BLOKOVÉ SCHÉMA PŘEVODNÍKU.....	15
2.2 DIGITÁLNÍ VSTUPY.....	16
2.2.1 <i>Teoretický a praktický návrh.....</i>	<i>16</i>
2.3 D/A PŘEVODNÍK.....	20
2.3.1 <i>Alternativní D/A převodník.....</i>	<i>21</i>
2.3.2 <i>Návrh zapojení D/A převodníku.....</i>	<i>22</i>
2.3.3 <i>Nastavení vlastností převodníku.....</i>	<i>23</i>
2.3.4 <i>Časovací obvody.....</i>	<i>26</i>
2.3.5 <i>Referenční filtry.....</i>	<i>27</i>
2.3.6 <i>Resetovací obvod.....</i>	<i>28</i>
2.4 ANALOGOVÉ VÝSTUPY A VÝSTUPNÍ FILTRY.....	29
2.4.1 <i>Simulace obvodů.....</i>	<i>29</i>
2.4.2 <i>Praktický návrh.....</i>	<i>32</i>
2.5 NAPÁJENÍ A OCHRANY.....	33
2.5.1 <i>Simulace obvodů.....</i>	<i>33</i>
2.5.2 <i>Praktický obvodový návrh.....</i>	<i>34</i>
<b>3. NÁVRH A REALIZACE CELKOVÉHO ZAPOJENÍ D/A PŘEVODNÍKU A JEHO PROTOTYPU.....</b>	<b>39</b>
3.1 NÁVRH DESKY PLOŠNÉHO SPOJE D/A PŘEVODNÍKU.....	39
3.1.1 <i>Celkové schéma zapojení.....</i>	<i>39</i>
3.1.2 <i>3D vizualizace desky plošného spoje.....</i>	<i>41</i>
3.2 NÁVRH DESKY PLOŠNÉHO SPOJE NAPÁJECÍ ČÁSTI.....	42
3.2.1 <i>Celkové schéma zapojení.....</i>	<i>42</i>
3.2.2 <i>3D vizualizace desky plošného spoje.....</i>	<i>44</i>
3.3 DESKA PRO OVLÁDACÍ OBVOD.....	45
3.3.1 <i>Celkové schéma zapojení.....</i>	<i>45</i>
3.3.2 <i>3D vizualizace desky plošného spoje.....</i>	<i>45</i>
3.4 KRABÍČKA PRO UMÍSTĚNÍ DPS.....	47
3.4.1 <i>Krabička pro D/A převodník.....</i>	<i>47</i>
3.4.2 <i>Krabička pro Arduino.....</i>	<i>48</i>
3.5 PROGRAM PRO ŘÍZENÍ D/A PŘEVODNÍKU PO SPI KOMUNIKACI.....	49
3.6 MĚŘENÍ VÝSLEDNÉHO PROTOTYPU.....	52
3.7 POUŽITÉ MĚŘICÍ PŘÍSTROJE.....	65
3.7.1 <i>V laboratoři.....</i>	<i>65</i>
3.7.2 <i>V domácím prostředí.....</i>	<i>65</i>

<b>4. ZÁVĚR .....</b>	<b>66</b>
<b>LITERATURA .....</b>	<b>67</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>68</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>69</b>



# SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 2.1: Blokový diagram zapojení D/A převodníku.....	15
Obrázek 2.2: Zapojení sběrnice pro připojení externího generátoru.....	16
Obrázek 2.3: Zapojení čipu CS8416 .....	17
Obrázek 2.4: Zapojení pinů CS8416 pro hardwarové nastavení.....	18
Obrázek 2.5: Zapojení filtrů potřebných pro čip CS8416.....	18
Obrázek 2.6: Zapojení optického konektoru [5] .....	19
Obrázek 2.7: Zapojení identifikačních LED diod .....	19
Obrázek 2.8: Blokový diagram čipu AD1934 [6].....	20
Obrázek 2.9: Blokový diagram čipu AD1938 [7].....	21
Obrázek 2.10: Zapojení čipu AD1934 .....	22
Obrázek 2.11: Zapojení konektoru pro SPI komunikaci.....	23
Obrázek 2.12: Převodník z I <sup>2</sup> C komunikace na data pro LCD display.....	23
Obrázek 2.13: Zapojení ovládacího obvodu za pomocí Arduino Nano.....	24
Obrázek 2.14: Finální schéma ovládací části.....	24
Obrázek 2.15: SPI diagram pro komunikaci .....	25
Obrázek 2.16: Zapojení časovacího krystalu .....	26
Obrázek 2.17: Zapojení jumper konektoru pro výběr časování .....	26
Obrázek 2.18: Zapojení filtrů CM a FILTR.....	27
Obrázek 2.19: Zapojení LF filtru .....	27
Obrázek 2.20: Jumper konektor pro výběr filtru.....	28
Obrázek 2.21: Zapojení reset obvodu .....	28
Obrázek 2.22: Doporučené zapojení filtru na analogový výstup převodníku [6].....	29
Obrázek 2.23: Zapojení pro simulaci frekvenční přenosové a fázové charakteristiky .....	30
Obrázek 2.24: Frekvenční přenosová a fázová charakteristika.....	30
Obrázek 2.25: Zapojení pro simulaci odezvy na obdélníkový signál .....	31
Obrázek 2.26: Průběh odezvy na obdélníkový signál.....	31
Obrázek 2.27: Vnitřní zapojení obvodu OP275 [9] .....	32
Obrázek 2.28: Zapojení výstupního filtru s OP275.....	32
Obrázek 2.29: Schéma ochranného obvodu pro simulaci.....	33
Obrázek 2.30: Simulace funkčnosti obvodu na snížení na požadované napětí.....	33
Obrázek 2.31: Simulace funkčnosti obvodu na ochranu proti opačné polaritě napětí.....	34
Obrázek 2.32: Zapojení ochranného obvodu se Zenerovými diodami na 18 V.....	34
Obrázek 2.33: Zapojení stabilizátorů pro symetrické napájení výstupních filtrů .....	35
Obrázek 2.34: Graf závislosti účinnosti na napětí [10].....	36
Obrázek 2.35: Schéma step-down konvertoru .....	36
Obrázek 2.36: Zapojení stabilizátoru napětí pro 3,3 V .....	37
Obrázek 2.37: Blokovací kondenzátory umístěné na desce s AD1934.....	38
Obrázek 2.38: Blokovací kondenzátory umístěné na napájecí desce.....	38
Obrázek 3.1: Schéma zapojení desky D/A převodníku.....	40
Obrázek 3.2: 3D Návrh DPS s D/A převodníkem .....	41
Obrázek 3.3: Schéma zapojení desky napájecí části .....	43
Obrázek 3.4: 3D návrh DPS napájecí části .....	44
Obrázek 3.5: Schéma zapojení desky ovládací části.....	45
Obrázek 3.6: Přední strana desky s LCD displejem a vývodem pro tlačítka .....	46
Obrázek 3.7: Druhá strana desky s Arduino Nano, převodníkem z I <sup>2</sup> C na data pro LCD displej a SPI konektorem .....	46

Obrázek 3.8: 3D model krabičky pro D/A převodník.....	47
Obrázek 3.9: 3D model víka krabičky D/A převodníku .....	48
Obrázek 3.10: 3D model krabičky pro Arduino.....	48
Obrázek 3.11: Kód pro informace z tlačítek .....	49
Obrázek 3.12: Příklad části programu pro jeden parametr menu.....	50
Obrázek 3.13: Import knihoven, deklarace pinů a nastavení základních parametrů.....	50
Obrázek 3.14: Nastavení SPI komunikace .....	51
Obrázek 3.15: Posílání adresy registru a dat do jeho obsahu.....	51
Obrázek 3.16: Signál SPDIF komunikace na 1 kHz .....	52
Obrázek 3.17: Signál SPDIF komunikace na 10 kHz .....	52
Obrázek 3.18: Přípravek digitálního ekvalizéru využívaný k měření v audiotechnice.....	53
Obrázek 3.19: Referenční BCLK signál z přípravku .....	54
Obrázek 3.20: BCLK signál z prototypu bakalářské práce.....	54
Obrázek 3.21: Průběh signálu LRCLK na referenčním přípravku.....	55
Obrázek 3.22: Průběh signálu LRCLK na prototypu.....	55
Obrázek 3.23: SDATA převedena referenčním přípravkem.....	56
Obrázek 3.24: SDATA převedena prototypem .....	56
Obrázek 3.25: Hodinový MCLK signál vygenerovaný z SPDIF komunikace .....	57
Obrázek 3.26: Komerční D/A převodník pro SPDIF .....	58
Obrázek 3.27: Měření na provizorním domácím pracovišti .....	58
Obrázek 3.28: Ořezávaný sinusový průběh o frekvenci 1 kHz.....	59
Obrázek 3.29: Použitý filtr při měření .....	59
Obrázek 3.30: Delší úsek 5 kHz harmonického signálu .....	60
Obrázek 3.31: 1 kHz signál po průchodu komerčním převodníkem.....	61
Obrázek 3.32: 1 kHz signál po průchodu přípravkem D/A převodníku .....	61
Obrázek 3.33: 5 kHz signál po průchodu komerčním převodníkem.....	62
Obrázek 3.34: 5 kHz signál po průchodu měřeným přípravkem .....	62
Obrázek 3.35: 18 kHz signál po průchodu přes komerční převodník.....	63
Obrázek 3.36: 18 kHz zpracovaných měřeným přípravkem.....	63
Obrázek 3.37: 20 kHz signál přivedený na přípravek.....	64
Obrázek 3.38: 25 kHz signál pro vyzkoušení reakce převodníku ze zvědavosti .....	64
Obrázek 3.39: Orientační měření odběru přípravku.....	65

## SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Nastavení jednotlivých pinů CS8416 [4].....	17
Tabulka 2: Formát SPI komunikace pro nastavování registrů .....	25
Tabulka 3: Hodnoty a popis časových úseků SPI komunikace.....	25
Tabulka 4: Označení vstupů/výstupů Pspice modelu OP275.....	29
Tabulka 5: Hodnoty odporů potřebné pro výstupní napětí .....	35

# ÚVOD

Cílem bakalářské práce je návrh a následná konstrukce prototypu D/A převodníku určeného pro laboratorní výuku, ukázka změny parametrů převodu pro studenty v laboratoři.

V dnešní době je D/A převod nedílnou součástí moderního hudebního průmyslu, ať už se bavíme o velkých koncertech, bezdrátových přenosech, mobilních zařízeních či bezdrátových sluchátkách.

Návrh D/A převodníku bude koncipován tak, aby bylo možné vybrat ze kterého přístroje bude převodník přijímat digitální signál. Bude využito dvou možností, a to SPDIF komunikace ze zdroje jako je například CD přehrávač nebo digitální signál z A/D převodníku. Pro vhodné vlastnosti bude použit čip D/A převodníku od výrobce Analog Devices, konkrétně AD1934.

Po samotném převodu na analogový signál bude zapotřebí signál zesílit. Pro dané použití bude dostatečné použít zesilovače doporučené výrobcem.

Zesilovací stupeň však potřebuje vyšší napájení než použité čipy, proto zde bude řešena i napájecí část celého přípravku. Vzhledem k tomu, že bude přípravek používán v laboratoři, bude zde také zavedena ochrana proti přepólování a přepětí. Pro snížení základního napětí bude použit step-down konvertor, dále už jen stabilizátory napětí.

D/A převodník bude navrhován, simulován a následně měřen po blocích. V návrhu však nebude simulována každá část, nýbrž části vybrané. Na konci bude zapotřebí všechny bloky spojit do celkového zapojení a toto zapojení poté vyzkoušet, proměřit, vyhodnotit závěry a následně vypracovat protokol pro následné měření přípravku.

# 1. TEORETICKÝ ROZBOR

Teoretický rozbor, vlastnosti D/A převodu, typy převodníků a jejich parametry jsou popsány v následující kapitole.

## 1.1 D/A převod

Jedná se o převod digitálního (diskrétního, tj. nespojitého) signálu na signál analogový (spojitý). Jak už bylo zmíněno v úvodu, D/A převod se dnes používá všude tam, kde je potřeba převést digitální signál zpět na analogový, například CD přehrávač, mobilní telefon. Jednou z možností je pro převod využít rezistorovou síť (napěťový dělič). Při tomto zapojení je však nutné mít přesné hodnoty odporů a při větším rozlišení (více bitových hladin) je tento typ převodníku nevhodný. Další možností může být zapojení za pomoci elektronických přepínačů řízených binárním kódem. Posledním možným převodníkem můžou být použity operační zesilovače ve funkci součtového zesilovače. [1]

## 1.2 Vlastnosti a parametry

Kapitola je zaměřena na teoretické parametry a vlastnosti D/A převodníků. Budou zde také uvedeny parametry, které jsou voleny pro návrh práce.

### *Rozlišení převodníku*

Rozlišení převodníku musí být voleno na základě přivedeného digitálního signálu. Jestliže bude mít digitální signál délku 20 bitů, nelze na rekonstrukci zpět na analogový použít 16bitový převodník. Proto se u dnešních převodníků nejčastěji objevuje rozlišení 24 bitů, díky němuž máme zajištěno, že převod bude vždy vykonán správně. Mezi další nejčastěji používaná rozlišení se řadí také 8 bitů a 16 bitů. Při použití těchto rozlišení už ale musíme znát délku vstupního bitového řetězce.

### *Frekvenční rozsah*

Nejběžnější použití pro D/A převodníky se nachází v audio průmyslu, proto je frekvenční rozsah nejčastěji v hodnotách slyšitelných kmitočtů pro běžného člověka. Zmíněné hodnoty se pohybují mezi 20 Hz – 20 kHz.

### *Vzorkovací frekvence*

Dalším důležitým parametrem je vzorkovací kmitočet převodníku. Tento kmitočet se volí tak, aby nebyl moc malý z důvodu velkého počtu možných chyb a zároveň moc velký z důvodu náročnosti na celý systém, tudíž větší pořizovací náklady. Vzorkovací kmitočty se pohybují od 8 kHz do 192 kHz. U většiny převodníků je možno v tomto rozmezí hodnotu nastavit po určitém kroku, některé převodníky si hodnotu vzorkovací frekvence dokážou nastavovat sami na základě příchozího digitálního signálu.

### *Vstupní hodnoty napětí pro nízkou a vysokou úroveň*

Jelikož návrh pojednává o D/A převodníku, je také nutno znát hodnoty napětí, které vyvolají na jeho digitálním vstupu hodnotu logické jedničky (vysoká úroveň, 2,0V) a hodnotu logické nuly (nízká úroveň, 0,8V). Pro každý převodník se tato hodnota může lišit, většinou se tyto hodnoty výrazně nemění.

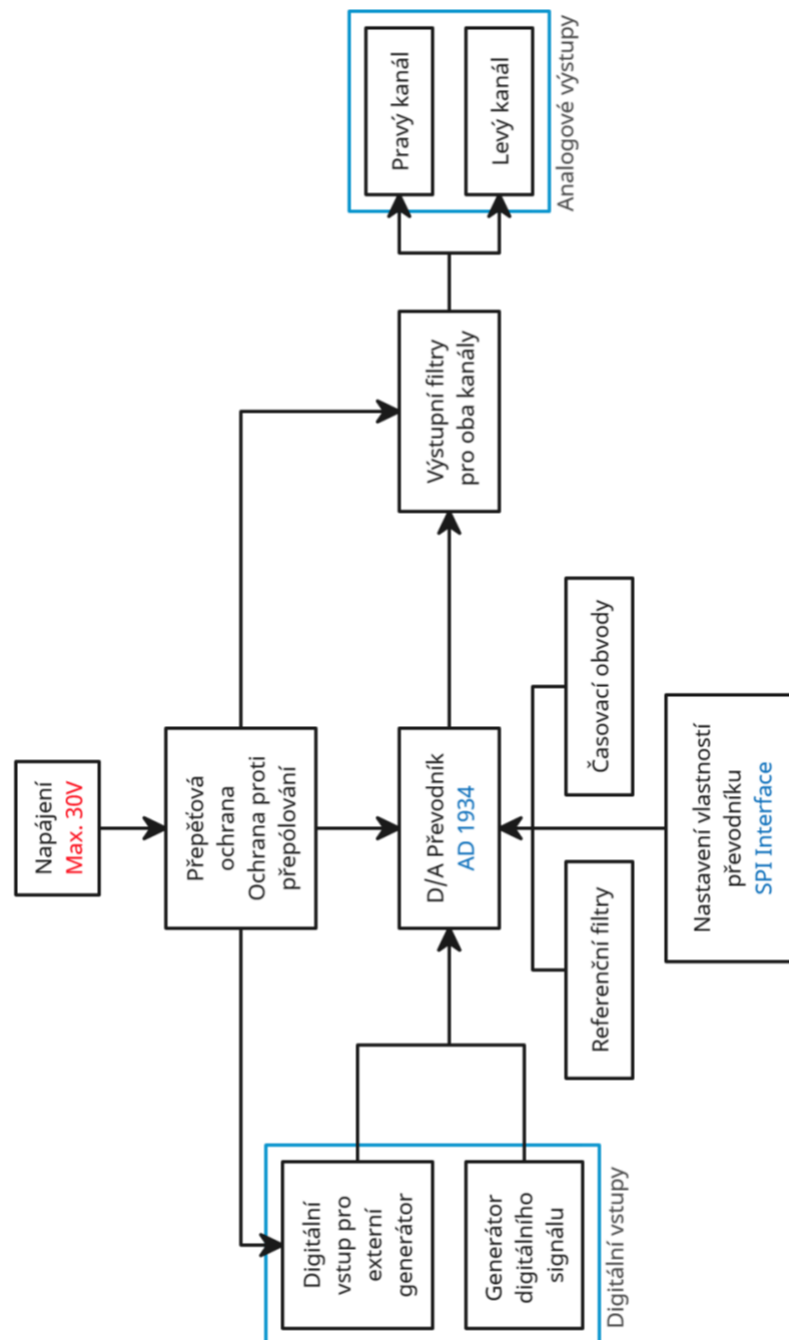
### *Zkreslení (THD)*

Zkreslení je také jedním z důležitějších parametrů u převodníků. U tohoto parametru platí, že má být co nejmenší, aby nedocházelo k chybám. Většinou se zkreslení pohybuje okolo hodnot 0,0025 %. Pro komerční použití je hodnota zkreslení naprosto dostačující, proto jsou hodnoty vcelku zanedbatelné. Nutno dodat, že pokud by se zkreslení pohybovalo v řádech desetin, či dokonce jednotek procent, zde už o zanedbání chyb nelze hovořit.

## 2. FUNKČNÍ ČÁSTI A/D PŘEVODNÍKU

Obsahem této kapitoly je blokové schéma převodníku a rozebrání jednotlivých funkčních bloků, postup při jejich návrhu a simulace některých z nich.

### 2.1 Blokové schéma převodníku



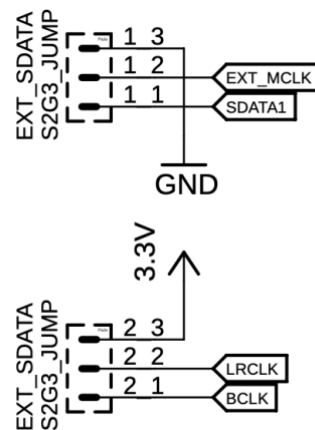
Obrázek 2.1: Blokový diagram zapojení D/A převodníku

## 2.2 Digitální vstupy

Při návrhu je počítáno s možností dvou zdrojů digitálního signálu, tudíž dvou vstupů. Prvním je možnost připojení například CD přehrávače za pomoci SPDIF komunikace (využití optického přenosu SPDIF, díky vyšší stabilitě a kvalitě). Druhou možností bude připojení jiného externího generátoru, a to například v podobě výstupu z A/D převodníku.

### 2.2.1 Teoretický a praktický návrh

Zdroj signálu z externího zdroje nebude zapotřebí navrhovat, jelikož stačí vědět, na které vstupy D/A převodníku přivést signály z daného zdroje. Zapojení sběrnice je vidět na obrázku 2.2. EXT\_MCLK je využíván pro připojení externího časování (nemusí být použit). LRCLK a BCLK jsou hodinové signály pro přenos digitálního signálu a vstup SDATA1 jsou samotná digitální data, která se budou převádět na analogový signál.



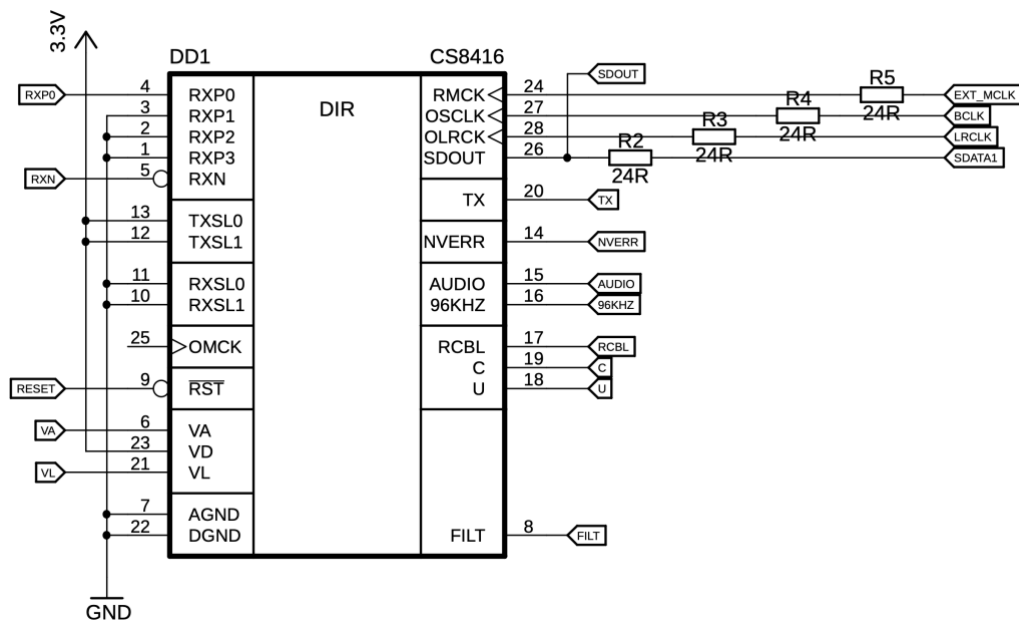
Obrázek 2.2: Zapojení sběrnice pro připojení externího generátoru

Při vstupu digitálního signálu za pomoci SPDIF komunikace bude zapotřebí přidat převodník z již zmíněné komunikace na digitální signál. Převod bude zajištěn přes čip CS8416 od firmy Cirrus Logic.

SPDIF je typ komunikace založený na standardu AES3 a přenáší dva kanály nekomprimovaného PCM nebo komprimovaného prostorového zvuku. Tento standard však nepodporuje bezztrátové formáty prostorového zvuku. V dnešní době jsou možné dva standardy konektorů, a to optický (TOSLINK) či koaxiální (CINCH). Typ kódování je u obou připojení stejný. Na rozdíl od měděného, optický SPDIF přenos netrpí útlumem ani impedancí, takže je možné signál přenášet na libovolnou vzdálenost. Nevýhodou je vyšší cena konektorů a cena samotného optického kabelu pro přenos. [2]

Standard AES3 je využíván k výměně digitálního audio signálu mezi profesionálními audio zařízeními. Tento signál zvládne přenést dva kanály PCM zvuku v několika přenosových médiích včetně vyvážených, nevyvážených linek a optického přenosu. [3]





Obrázek 2.3: Zapojení čipu CS8416

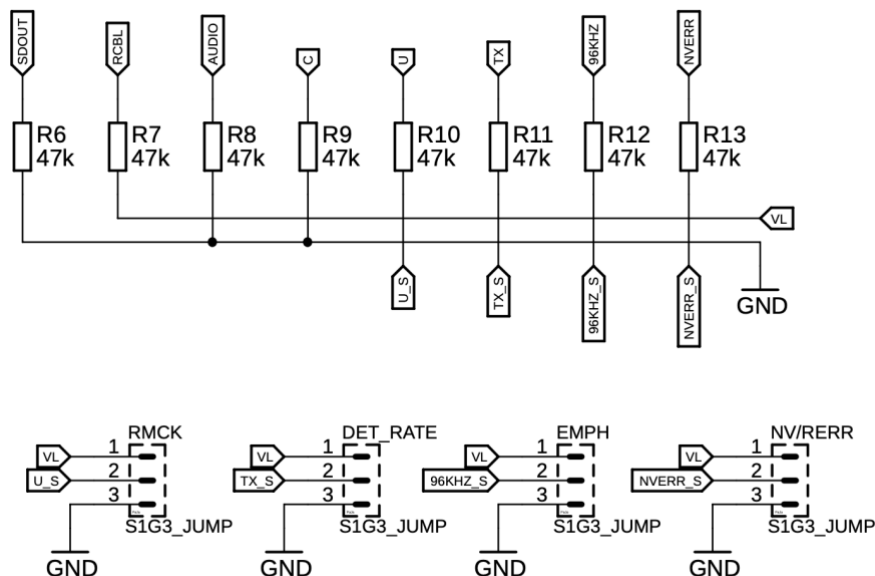
Zapojení všech potřebných vstupů a výstupů je vidět na obrázku 2.3. Vstupy digitálního signálu z optického přenosu jsou RXP0 a RXN. Výstup digitálního signálu je stejný, jako výstup z externího zdroje.

Čip bude zapojen v hardware módu, tudíž bude jeho nastavení prováděno přes rezistory zapojené jako pull-down proti zemi nebo pull-up proti napětí na vstupu VL. Všechna možná nastavení, které čip umožňuje jsou uvedeny v tabulce 1.

Tabulka 1: Nastavení jednotlivých pinů CS8416 [4]

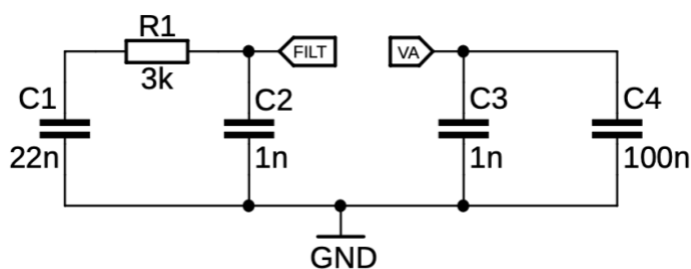
Název pinu	Pull-down rezistor na GND	Pull-up rezistor na VL
SDOUT	Hardware Mode	Software Mode
RCBL	Serial Port Slave Mode	Serial Port Master Mode
AUDIO	Serial Format Select 1 (SFSEL1)=0	Serial Format Select 1 (SFSEL1)=1
C	Serial Format Select 0 (SFSEL0)=0	Serial Format Select 0 (SFSEL0)=1
U	RMCK Frekvence=256*F <sub>s</sub>	RMCK Frekvence=128*F <sub>s</sub>
TX	Normal Phase Detector update rate	Higher Phase Detector update rate
96KHZ	Emphasis Audio Match Off	Emphasis Audio Match On
NV/RERR	NVERR Selected	RERR Selected

Výsledné zapojení pro hardwarové nastavení je viditelné na obrázku 2.4. Pin označený jako SDOOUT je trvale připojen přes pull-down rezistor na zem, jelikož je přes něj čip nastaven do hardware módu. Pin RCBL je také trvale připojen, ale tentokrát přes pull-up rezistor na napětí VL, aby byl čip v nastavení master mode. Ostatní piny lze nastavovat pomocí jumper konektorů.



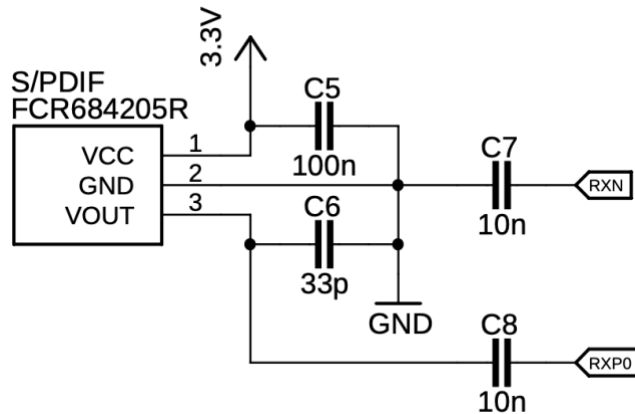
Obrázek 2.4: Zapojení pinů CS8416 pro hardwarové nastavení

Nutné také dodat, že tento čip potřebuje vlastní filtry. Tyto filtry jsou k nalezení v datasheetu výrobce. [4] Filtry jsou zapotřebí pro správnou funkci PLL umístěné v čipu. PLL je zde pro obnovu hodinového signálu z příchozího datového rámce.



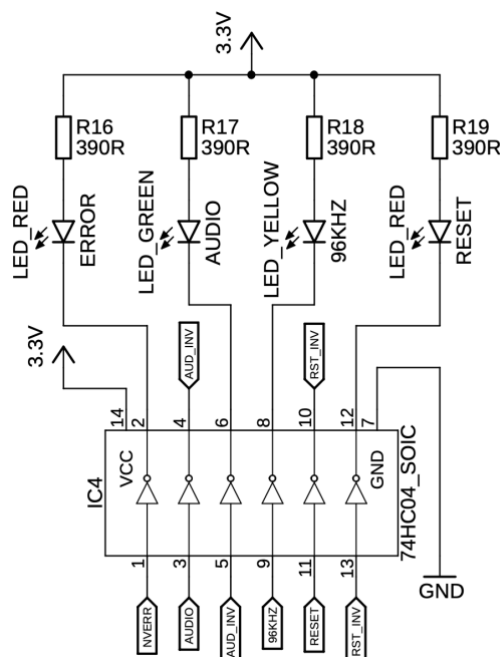
Obrázek 2.5: Zapojení filtrů potřebných pro čip CS8416

Přívod bude zajištěn konektorem FCR684205R od firmy Cliff Electronic Components, který umožní příjem optické komunikace a její převod na dva signály potřebné pro CS8416 a to RXP0 a RXN.



Obrázek 2.6: Zapojení optického konektoru [5]

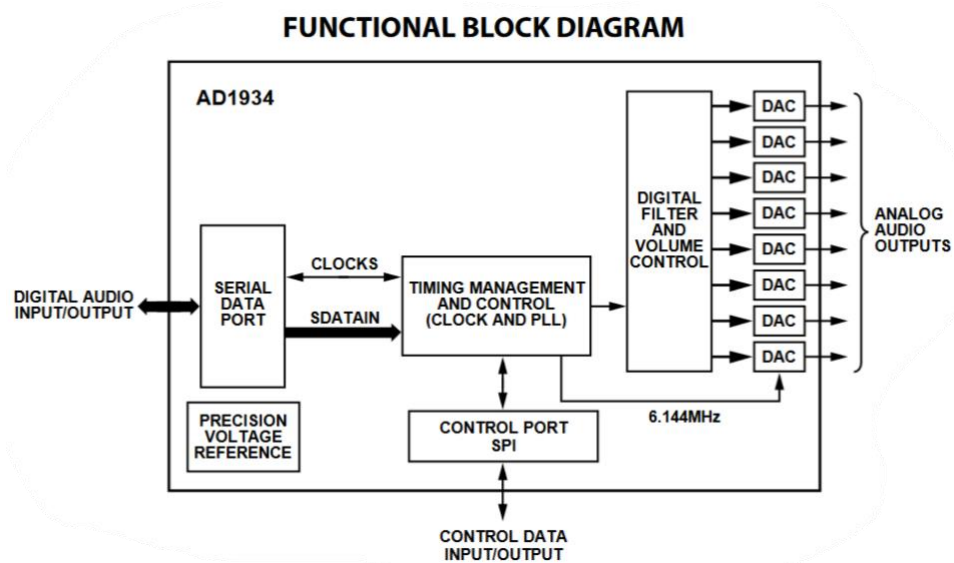
Pro viditelnost správné funkce převodu z SPDIF na digitální data byla v návrhu přidána také část s LED diodami indikujícími stav. První červená dioda symbolizuje error v převodu. Dioda se například rozsvítí, pokud dojde k odpojení či nepřipojení optického kabelu. Podobných vlastností indikace disponuje žlutá dioda. Zelená dioda symbolizuje převod. Pokud dioda svítí, je převod prováděn. Poslední dioda se rozsvítí, pokud dojde ke zmáčknutí tlačítka resetu, o kterém je zmínka v pozdější kapitole. O správnou funkčnost LED diod se stará obvod 74HC04, který obsahuje šest invertorů.



Obrázek 2.7: Zapojení identifikačních LED diod

## 2.3 D/A převodník

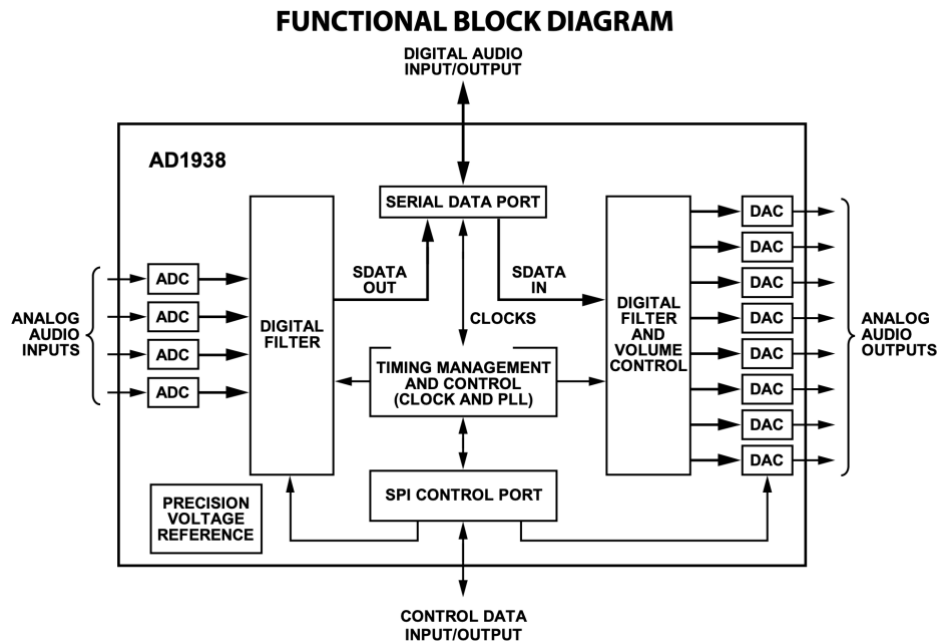
Jako samotný D/A převodník bude využit čip od firmy Analog Devices a to konkrétně AD1934. Čip již obsahuje vše, co je k převodu zapotřebí. Je však potřeba k němu přidat časovací obvody, referenční filtry a ovládání čipu samotného. Převod v čipu je na bázi multibitové sigma-delta architektury. Čip obsahuje osm těchto převodníků vždy po párech. Každý pár tvoří stereo výstupní kanál analogového signálu. Při návrhu byl tedy využit jeden pár pro stereo výstup. [6] Vnitřní zapojení vybraného převodníku je vidět na blokovém schématu zobrazeném na obrázku 2.8.



Obrázek 2.8: Blokový diagram čipu AD1934 [6]

### 2.3.1 Alternativní D/A převodník

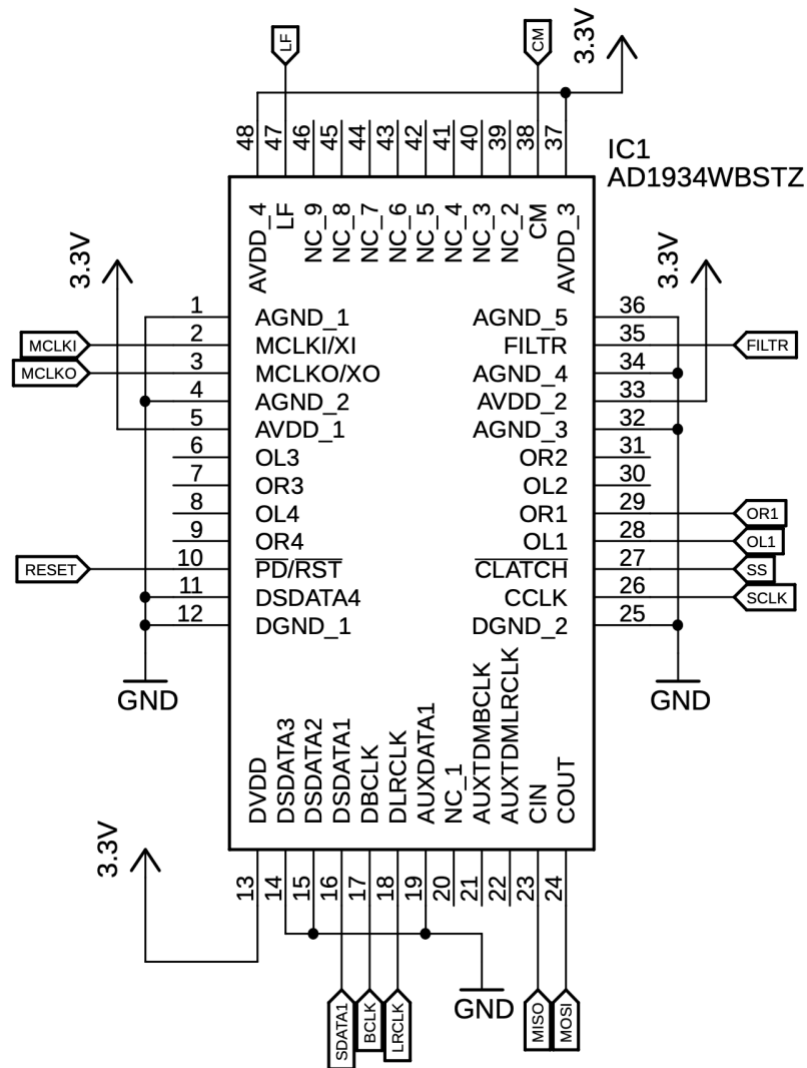
Jako alternativní čip místo AD1934 by šel použit čip taktéž od firmy Analog Devices a to konkrétně AD1938. Převod v alternativním čipu je na bázi multibitové sigma-delta architektury. AD1938 obsahuje čtyři analogově digitální převodníky, které tvoří v párech dva stereo A/D převodníky. Obsahuje také osm D/A převodníků, kdy každý pár opět tvoří stereo výstup. Pro správnou funkčnost je taktéž zapotřebí k čipu přidat filtrační a časovací obvody. [7] Jelikož se ale bakalářská práce zabývá D/A převodníkem pro laboratorní použití, jsou A/D převodníky v čipu AD1938 vcelku zbytečné. Tudíž byl vybrán a použit čip AD1934. Tento čip je také díky absenci již zmíněných převodníků o něco levnější a byl také doporučen vedoucím práce. Vnitřní zapojení AD1938 je vidět na blokovém schématu vyobrazeném na obrázku 2.9.



Obrázek 2.9: Blokový diagram čipu AD1938 [7]

### 2.3.2 Návrh zapojení D/A převodníku

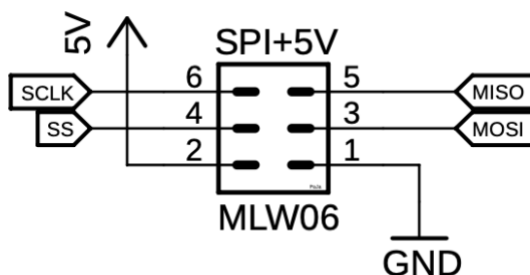
Digitální a analogové napájecí vstupy jsou všechny přivedeny na napětí o hodnotě 3,3 V. Piny FILTR, LF a CM jsou pro filtry, které jsou popsány v kapitole referenční filtry. Na vstupy MCLKI a MCLKO je připojen externí časovací krystal, který je také popsán v kapitole časovací obvody. SDATA1 je vstup pro digitální data v kombinaci s hodinovými signálními vstupy BCLK a LRCLK. Dále je zapojení opatřeno piny pro SPI komunikaci MOSI, MISO, SS a hodinový signál SCLK. Analogové výstupy jsou označeny jako OR1 pro pravý kanál a OL1 pro kanál levý.



Obrázek 2.10: Zapojení čipu AD1934

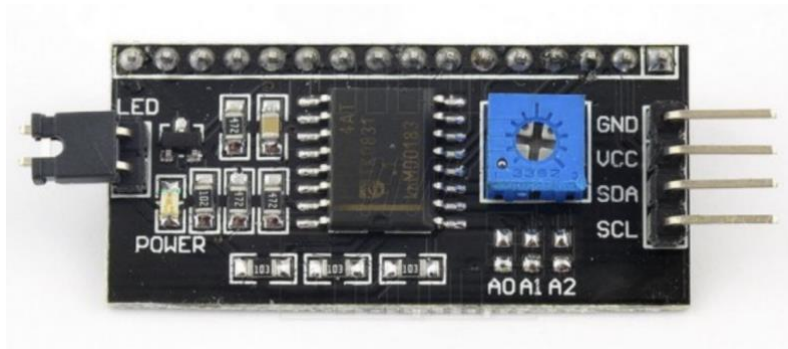
### 2.3.3 Nastavení vlastností převodníku

Ovládání vlastností čipu bude zařízeno za pomoci čipu Arduino Nano, které bude posílat informace přes SPI sběrnici. Jelikož Arduino potřebuje pro správnou funkčnost napájení 5 V, je po konektoru pro SPI sběrnici přivedeno také potřebné napětí. Zapojení konektoru pro SPI sběrnici s 5 V napájením je ukázáno na obrázku 2.11.



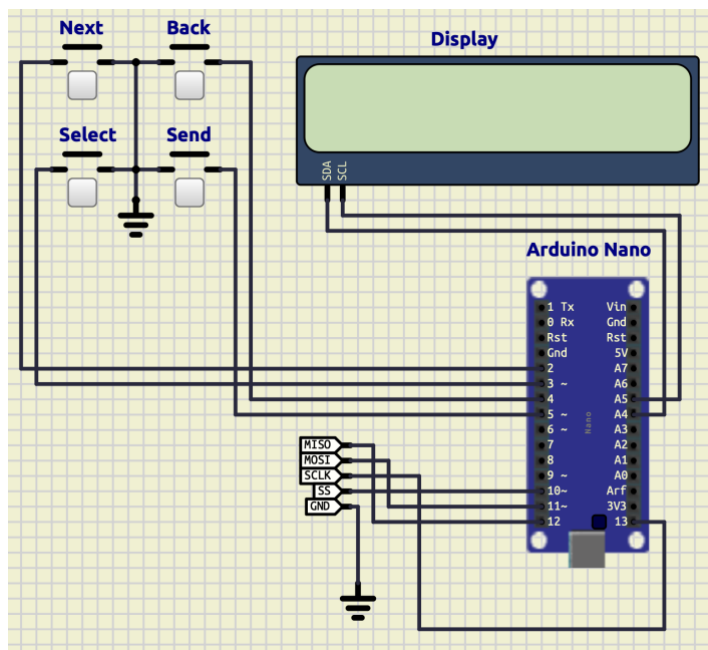
Obrázek 2.11: Zapojení konektoru pro SPI komunikaci

K čipu bude připojen LCD displej, na kterém si bude uživatel moci zvolit nastavení převodníku přes jednoduché menu. Menu bude ovládáno za pomoci čtyř tlačítek. První z tlačítek bude sloužit pro výběr jednotlivých nastavení, druhé pro vstup do podmenu každé možnosti v menu. Třetí tlačítko bude sloužit jako zpáteční a poslední se využije na odeslání informace přes SPI sběrnici. LCD bude připojeno k Arduino přes sběrnici I<sup>2</sup>C. Pro toto připojení je potřebné přidat ještě převodník z I<sup>2</sup>C komunikace na potřebné signály pro LCD displej. Modul s převodníkem také obsahuje trimr na nastavení kontrastu displeje. Tento převodník je viditelný na obrázku 2.12.



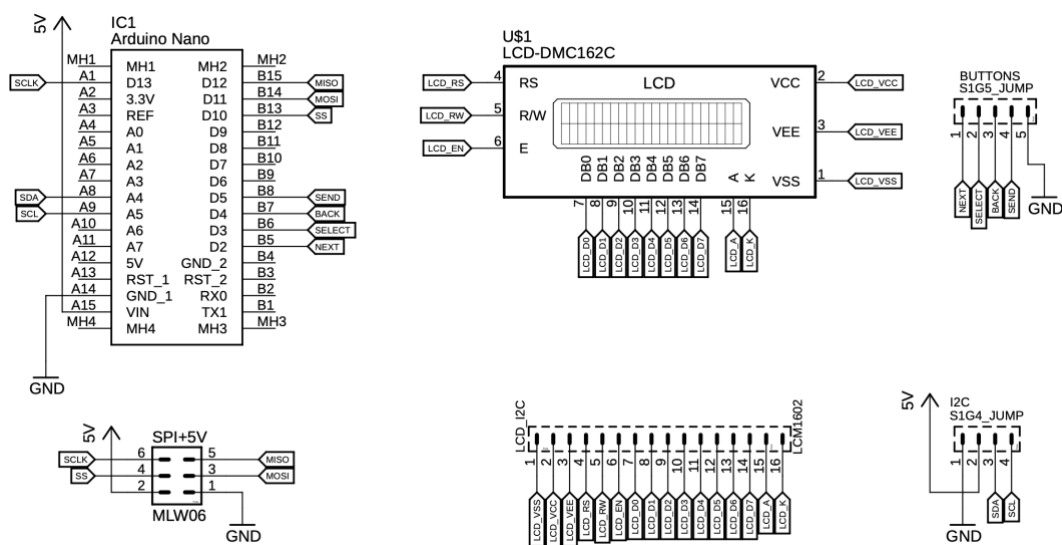
Obrázek 2.12: Převodník z I<sup>2</sup>C komunikace na data pro LCD display

Přesné celkové zapojení je možno vidět na obrázku 2.13. Obrázek je kreslen v programu SimulIDE, kde bude možno také zapojení otestovat s hotovým programem. Program však nepočítá s potřebným napájením všech použitých periférií, tudíž pro LCD displej a samotné arduino bude zapotřebí 5 V napájení. Sběrnice SPI odpovídá praktickému zapojení konektoru zobrazeného na předchozím obrázku 2.11.



Obrázek 2.13: Zapojení ovládacího obvodu za pomocí Arduino Nano

Schéma z programu SimulIDE bylo poté převedeno do programu EAGLE pro dokončení návrhu i s potřebným napájením. Celkové schéma je viditelné na obrázku 2.14.



Obrázek 2.14: Finální schéma ovládací části



SPI komunikace je zajištěna pomocí 4 vodičů plus zem. Pro AD1934 je vstupní slovo po sběrnici 24bitové. První byt komunikace je vždy globální adresa s určením, zda se jedná o zápis či čtení informací. Druhý byt je adresa registru, do kterého chceme informaci zapisovat a dále už se jedná přímo o data. Celkový datový rámeček je zobrazen v tabulce 2.

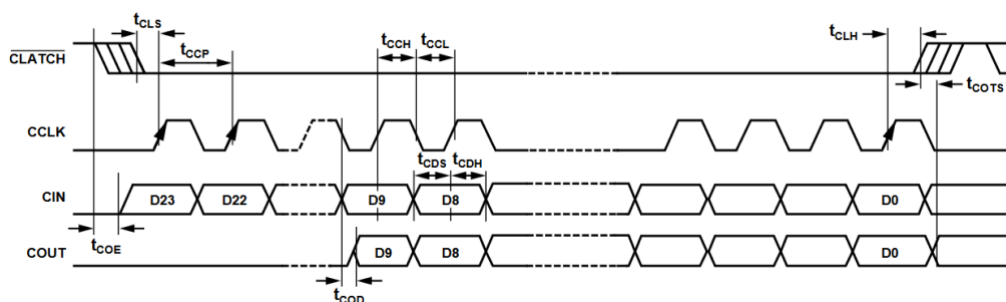
Tabulka 2: Formát SPI komunikace pro nastavování registrů

	Globální adresa	Čtení/zápis	Adresa registru	Data
<b>Bitová adresa</b>	23:17	16	15:8	7:0

Na obrázku 2.15 je vidět diagram pro SPI komunikaci. Jsou zde vyobrazeny všechny potřebné časy pro správnou interpretaci kódu posílaného přes sběrnici. Jednotlivé časy jsou vypsány v tabulce 3.

Tabulka 3: Hodnoty a popis časových úseků SPI komunikace

Označení časového úseku	Popis	Délka	Jednotka
$t_{COE}$	Povolení COUT	30	ns
$t_{CLS}$	Nastavení CLATCH	10	ns
$t_{CCP}$	Perioda CCLK	100	ns
$t_{COD}$	Zpoždění COUT	30	ns
$t_{CCH}$	Vysoká hodnota CCLK	35	ns
$t_{CCL}$	Nízká hodnota CCLK	35	ns
$t_{CDS}$	Nastavení CDATA	10	ns
$t_{CDH}$	Podržení CDATA	10	ns
$t_{CLH}$	Podržení CLATCH	10	ns
$t_{COTS}$	Tří stavový COUT	30	ns

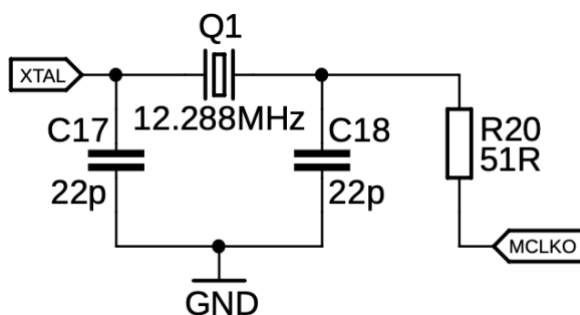


Obrázek 2.15: SPI diagram pro komunikaci

Na převodníku bude možné ovládat vzorkovací frekvenci, vstup hlavního hodinového signálu, rozlišení (délka bitového slova), hlasitosti jednotlivých kanálů, ztlumení jednotlivých kanálů a celkové ztlumení.

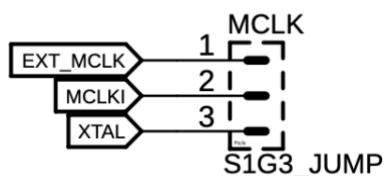
### 2.3.4 Časovací obvody

Pro správnou funkci D/A převodníku je také zapotřebí zapojení správných časovacích obvodů na dané piny použitého čipu. Na časování je využít oscilátor s frekvencí 12,228 MHz v kombinaci s kondenzátory o hodnotách 22 pF a rezistorem 51 Ω.



Obrázek 2.16: Zapojení časovacího krystalu

Další možností časování je využití časovacího signálu přivedeného společně s digitálním signálem na vstup. Výběr mezi externím časováním a časováním pomocí krystalu je prováděn přes jumper konektor. Jeho zapojení lze vidět na obrázku 2.17.



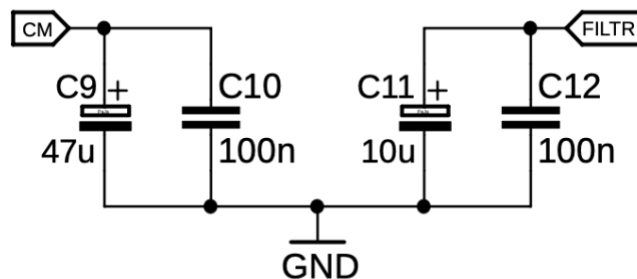
Obrázek 2.17: Zapojení jumper konektoru pro výběr časování

### 2.3.5 Referenční filtry

Je zapotřebí také přidání referenčních filtrů pro správné vyhodnocování hodnot při převodu. Na tyto filtry jsou používány kombinace rezistorů a kondenzátorů. Zapojení lze nalézt v datasheetu výrobce čipu. [6]

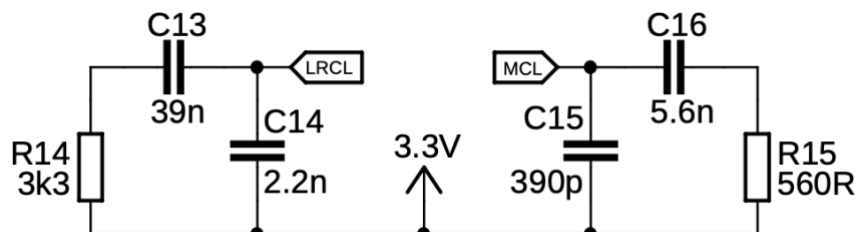
CM (common-mode) zapojení filtru je na pravé straně obrázku 2.18. Jedná se o paralelní zapojení kondenzátorů o hodnotách  $47\ \mu\text{F}$  a  $100\ \text{nF}$ . Napětí, které je nastaveno pomocí tohoto filtru je využito k předpětí externích operačních zesilovačů na soufázové napětí vstupu a piny výstupního signálu. Výstupní proud je omezen na  $0,5\ \text{mA}$ .

FILTR zapojení je ukázané také na pravé straně obrázku 2.18. Opět jde o paralelní zapojení kondenzátorů o hodnotách  $10\ \mu\text{F}$  a  $100\ \text{nF}$ . Tento filtr je využit pro vyfiltrování referenčního napětí převodníku.



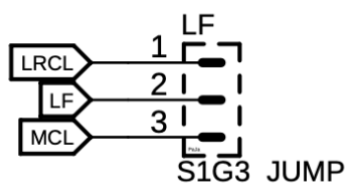
Obrázek 2.18: Zapojení filtrů CM a FILTR

LF filtr, jehož zapojení je na obrázku 2.19, zodpovídá za referenci pro PLL v čipu AD1934.



Obrázek 2.19: Zapojení LF filtru

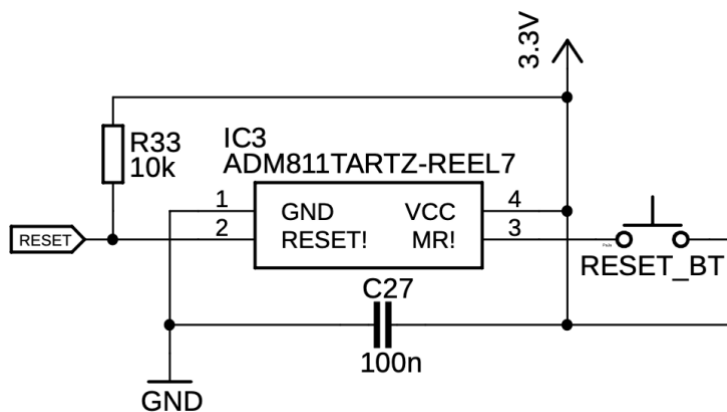
Na předchozím obrázku jsou viditelné dva filtry. Jeden má výstup označený jako MCL, druhý jako LRCL. Filtry je možno opět vybrat pomocí jumper konektoru jehož zapojení je na obrázku 2.20. Filtr s výstupem označeným jako LRCL je nutno použít, pokud je jako referenční hodinový signál použit externí buďto přímo z čipu CS8416 nebo z externího zdroje digitálního signálu. MCL výstup je použit, pokud při převodu používáme vnitřní hodinový signál vytvářený krystalem.



Obrázek 2.20: Jumper konektor pro výběr filtru

### 2.3.6 Resetovací obvod

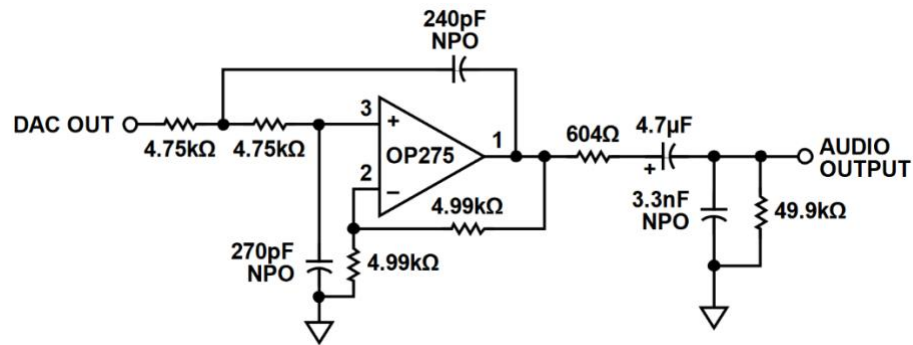
Obvod má úlohu případného resetu AD1934 a CS8416. Pro reset všech obvodů je zapotřebí nízká úroveň napětí, proto je na vstupech trvale vysoká hodnota. Obvod ADM811 zajistí právě tyto podmínky. [8] Pokud bude obvod v normálním stavu, hodnota výstupu bude rovna vysoké úrovni napětí, jak již bylo zmíněno. Jakmile dojde ke zmáčknutí reset tlačítka, výstup se změní na nízkou hodnotu a bude proveden reset všech obvodů, které jsou připojeny.



Obrázek 2.21: Zapojení reset obvodu

## 2.4 Analogové výstupy a výstupní filtry

Na analogové výstupy bude také zapotřebí připojit zesilovací prvky, jelikož výstup samotného převodníku dodává nízkou hodnotu napětí (hodnotu okolo 0,88 Vrms). V datasheetu výrobce se přímo nachází zapojení doporučené pro výstupní filtr, proto zde bude také použito. Bylo vybráno zapojení neinvertujícího zesilovacího stupně. [6]



Obrázek 2.22: Doporučené zapojení filtru na analogový výstup převodníku [6]

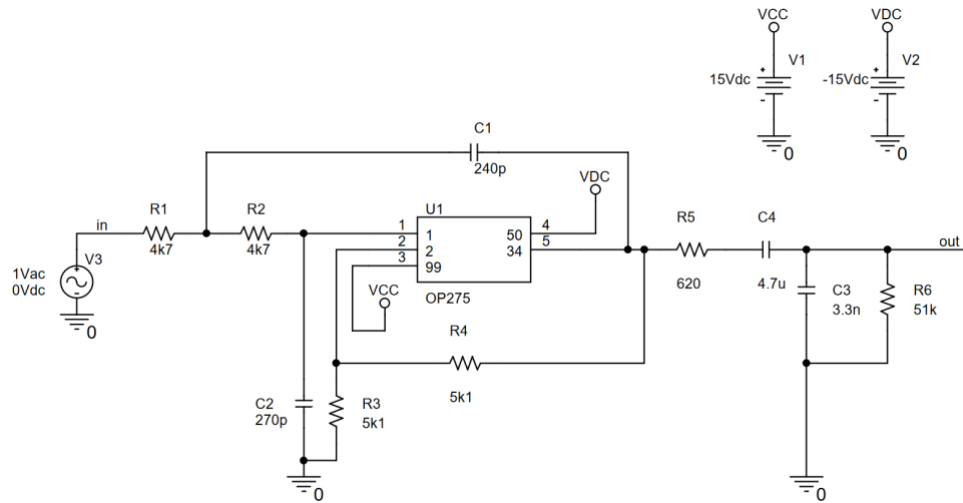
### 2.4.1 Simulace obvodů

Pro ověření správné funkčnosti bylo zapotřebí tento obvod odsimulovat. Při simulaci byl použit Pspice model přímo od výrobce. V uvedené tabulce jsou popsány jednotlivé vstupy bloku OP275.

Tabulka 4: Označení vstupů/výstupů Pspice modelu OP275

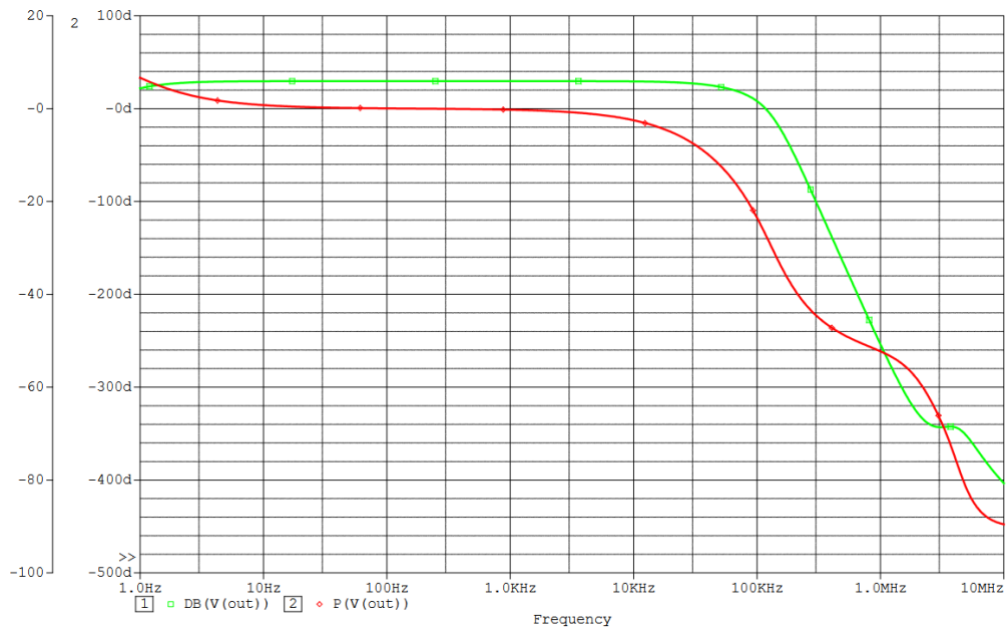
Vstup/Výstup	Číselné označení
Neinvertující vstup	1
Invertující vstup	2
Výstup	34
Kladné napájení	99
Záporné napájení	50

Obrázek 2.23 reprezentuje zapojení pro simulaci frekvenční přenosové a fázové charakteristiky v programu Orcad Pspice.



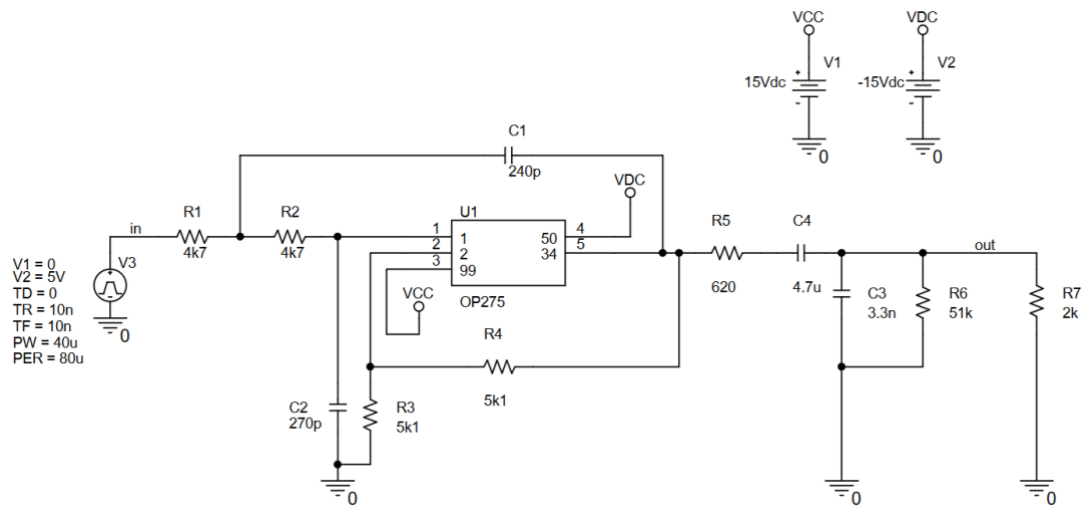
Obrázek 2.23: Zapojení pro simulaci frekvenční přenosové a fázové charakteristiky

Výstup simulace je vidět na obrázku 2.24. Jelikož požadujeme od obvodu, aby byl co nejefektivnější v kmitočtovém rozsahu 20 Hz – 20 kHz, zde je tedy charakteristika rovná. Zhruba okolo kmitočtu 85 kHz už máme pokles od maximální hodnoty o -3 dB. Z frekvenční charakteristiky je také viditelné zesílení obvodu, které je po teoretické simulaci okolo 6 dB při přivedení 1 V na vstup, což znamená, že signál je zhruba 2x zesílen. Pro použití při laboratorním měření tudíž dostačující.



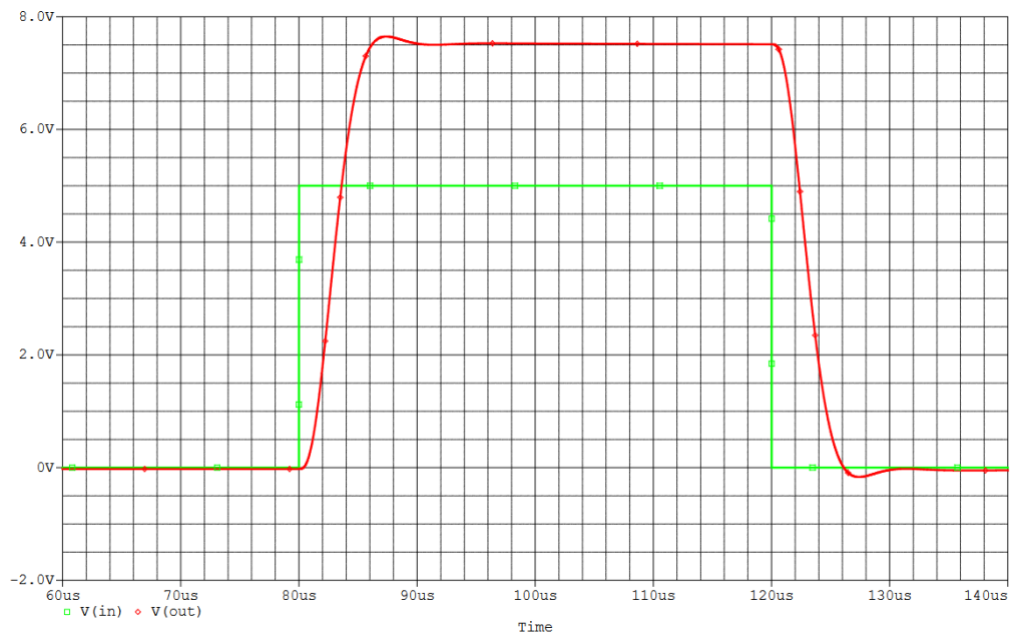
Obrázek 2.24: Frekvenční přenosová a fázová charakteristika

Dále byla provedena simulace odezvy celého obvodu na obdélníkový signál. Na obrázku 2.25 je zobrazeno schématické zapojení pro tento typ simulace. Pro simulaci bylo použito následující nastavení, obdélníkový signál s amplitudou  $U_{OUT\ GEN} = 5\text{ V}$ , periodou  $T_{OUT\ GEN} = 80\ \mu\text{s}$ , střídou 1:1, dobou nástupné hrany  $t_{RISE\ GEN} = 10\text{ ns}$  a sestupné hrany  $t_{FALL\ GEN} = 10\text{ ns}$ . Dle datasheetu byl také na tuto simulaci přidán zatěžovací odpor R7 o hodnotě  $2\text{ k}\Omega$ .



Obrázek 2.25: Zapojení pro simulaci odezvy na obdélníkový signál

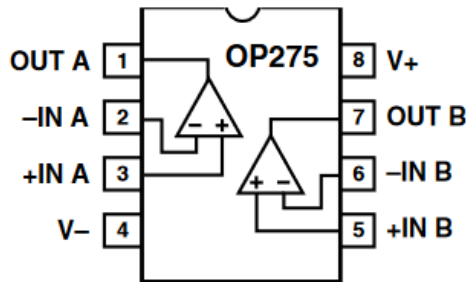
Na výsledném průběhu, obrázek 2.26, je opět viditelné téměř dvounásobné zesílení. Lze pozorovat zpožděný nárůst napětí zhruba  $6\ \mu\text{s}$ .



Obrázek 2.26: Průběh odezvy na obdélníkový signál

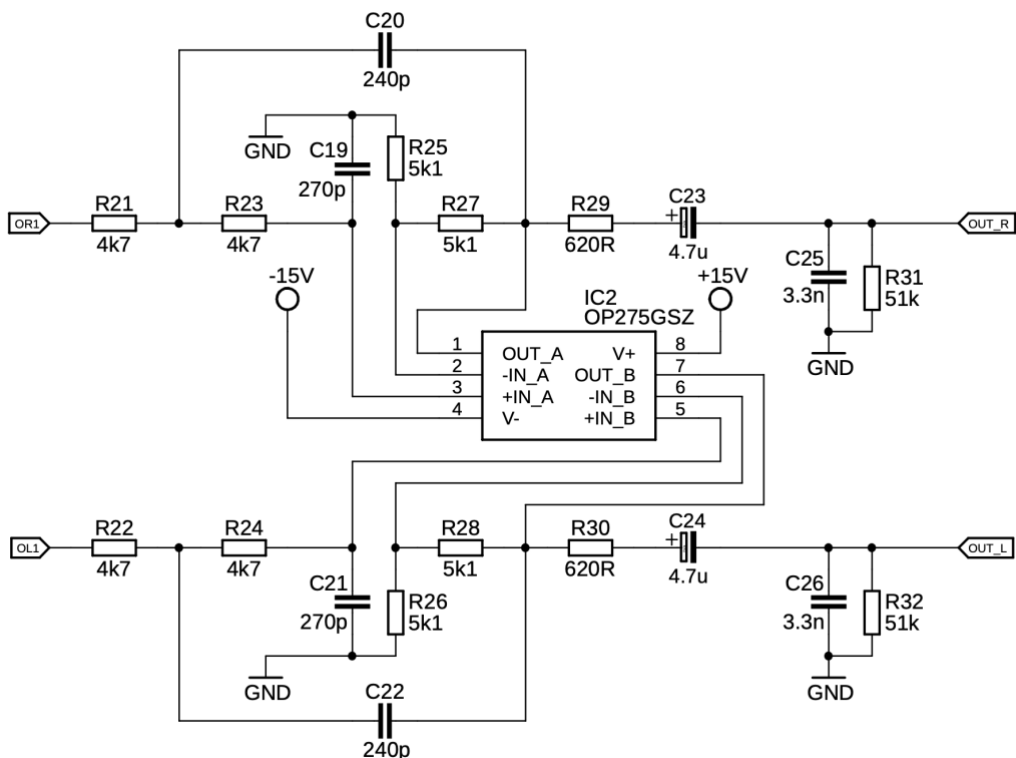
## 2.4.2 Praktický návrh

Na zesílení jsou použity operační zesilovače OP275 od výrobce Analog devices. Obrázek 2.27 reprezentuje vnitřní zapojení obvodu OP275GSZ vhodného pro návrh zesilovací části. Obvod totiž obsahuje dva operační zesilovače, jeden bude využit pro pravý kanál, druhý pro levý.



Obrázek 2.27: Vnitřní zapojení obvodu OP275 [9]

Schéma zapojení zesilovací části bylo zapotřebí po simulacích upravit. Hodnoty všech součástek byli převedeny do tabulkových hodnot vždy na hodnotu nejbližší k hodnotě uvedené na typickém zapojení.



Obrázek 2.28: Zapojení výstupního filtru s OP275

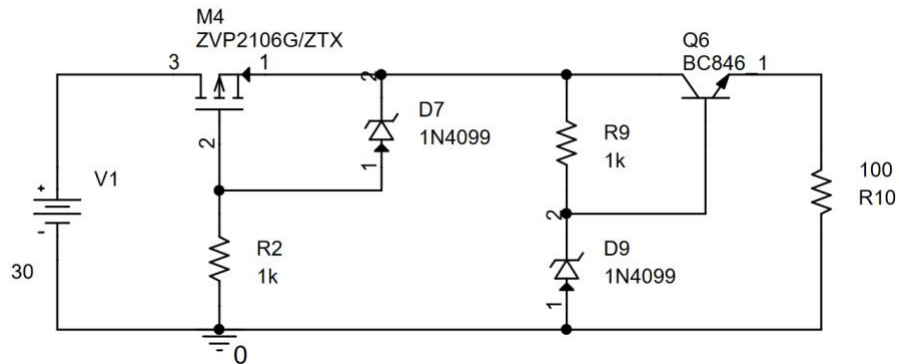


## 2.5 Napájení a ochrany

Z důvodu toho, že bude prototyp využíván pro laboratorní výuku, bude nutné přidat ochrany na nedovolená napětí. V návrhu tedy byla zahrnuta jak ochrana proti přepětí, tak i ochrana proti přepólování.

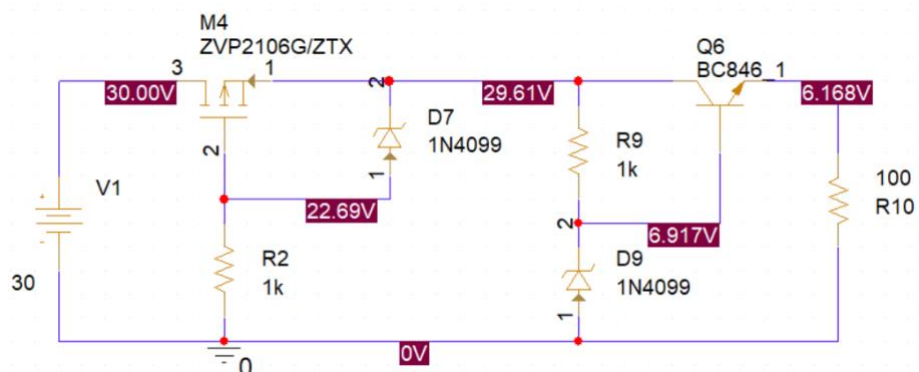
### 2.5.1 Simulace obvodů

Při návrhu bylo počítáno s maximálním napětím 18 V pro všechny obvody. Může se ale stát, že by se na vstupu mohlo objevit napětí až 30 V, tomu muselo být zabráněno. Ochrana proti přepólování je zajištěna kombinací mosfet tranzistoru a zenerovy diody. O snížení napětí se poté stará zenerova dioda s bipolárním tranzistorem. Schéma pro simulaci v programu Orcad Pspice je vyobrazeno na obrázku 2.29.



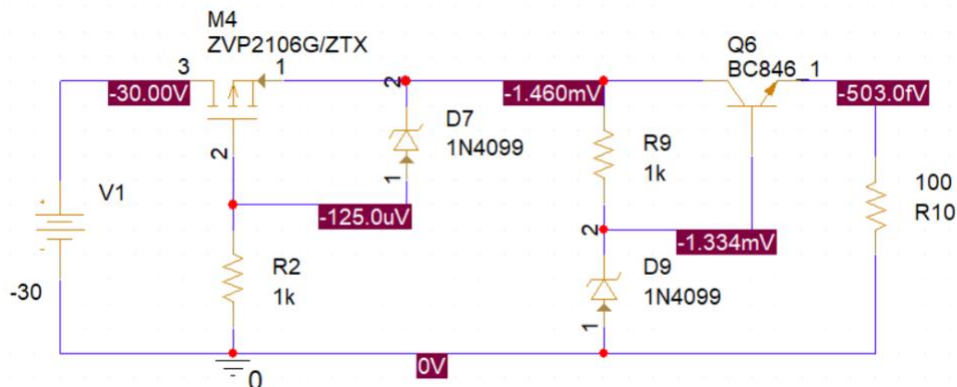
Obrázek 2.29: Schéma ochranného obvodu pro simulaci

Při prvních simulacích byla zjištěna potřeba změny odporů ve schématu z důvodu velkého úbytku napětí na jednotlivých prvcích, tím pádem většího zahřívání a nutnosti chlazení, což by při použití pro laboratorní měření nebylo výhodné. První návrh obsahoval odpory o hodnotách pouze 100  $\Omega$ , poté byli hodnoty zvýšeny na 1 k $\Omega$ . Simulace byla provedena s jinými hodnotami zenerova napětí pro obě diody, než bylo využito v návrhu. Každopádně pro ověření správné funkce je to dostačující.



Obrázek 2.30: Simulace funkčnosti obvodu na snížení na požadované napětí

Simulace obvodu pro opačné napětí dokazuje také správnou funkčnost. Při přivedení záporného napětí se hodnota na výstupu změní na utlumenou hodnotu napětí, aby nedošlo k poškození obvodu.

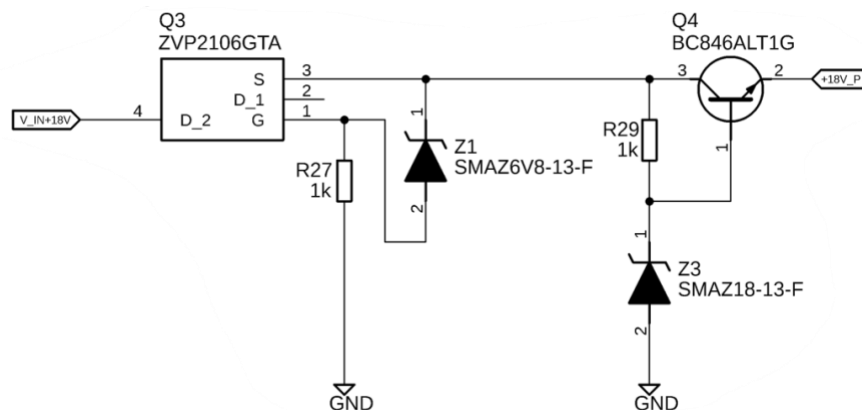


Obrázek 2.31: Simulace funkčnosti obvodu na ochranu proti opačné polaritě napětí

Stejně simulace byli provedeny také pro opačné napětí, tudíž snížení záporného napětí na požadovanou hodnotu a přivedení pouze záporného napětí.

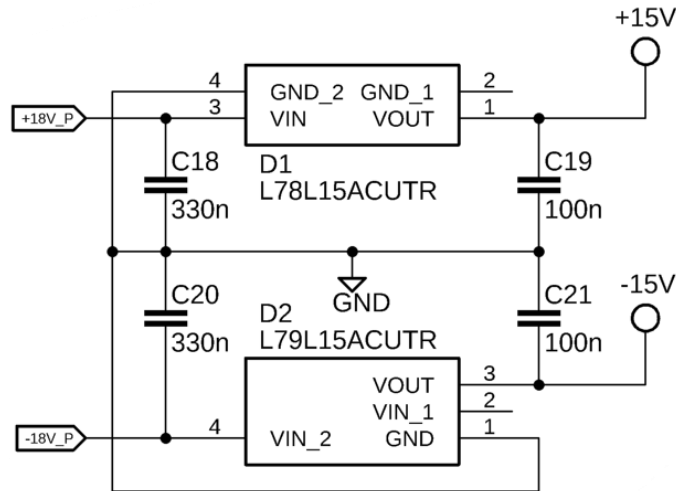
### 2.5.2 Praktický obvodový návrh

Na obrázku 2.32 je zapojení ochranného obvodu se správnými zenerovými diodami pro kladné napájecí napětí. Blok označuje mosfet tranzistor.



Obrázek 2.32: Zapojení ochranného obvodu se Zenerovými diodami na 18 V

Z již zmíněných 18 V, které jsou výstupem ochranného obvodu je poté za pomoci stabilizátoru vytvořeno napětí 15 V. Celé toto zapojení je poté stejné pro záporné napětí, které je v kombinaci s kladným napětím potřebné pro symetrické napájení operačních zesilovačů.



Obrázek 2.33: Zapojení stabilizátorů pro symetrické napájení výstupních filtrů

Z kladné části vstupního napětí 18 V je za pomoci step-down konvertoru vytvořeno napětí 5 V nutné pro napájení ovládací části D/A převodníku. Konvertor je navržen dle typického zapojení použitého čipu MP2307, které je k nalezení v datasheetu výrobce. [10]

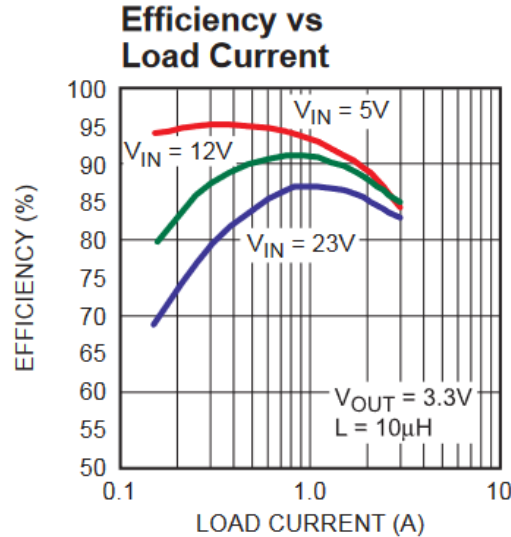
Step-down konvertor pracuje na podobném principu jako spínané zdroje napětí. Ze vstupního napětí generuje pulzy, které jsou následně za pomoci kombinace cívky a kondenzátoru vyhlazeny na konstantní napětí. Změnou šířky jednotlivých pulzů navíc lze měnit velikost výstupního napětí, avšak nikdy se nelze dostat nad hodnotu vstupního napětí. [11]

Tabulka 5: Hodnoty odporů potřebné pro výstupní napětí

VOUT	R1 (R24)	R2 (R26)
1,8 V	9,53 kΩ	10 kΩ
2,5 V	16,9 kΩ	10 kΩ
3,3 V	26,1 kΩ	10 kΩ
5 V	44,2 kΩ	10 kΩ
12 V	121 kΩ	10 kΩ

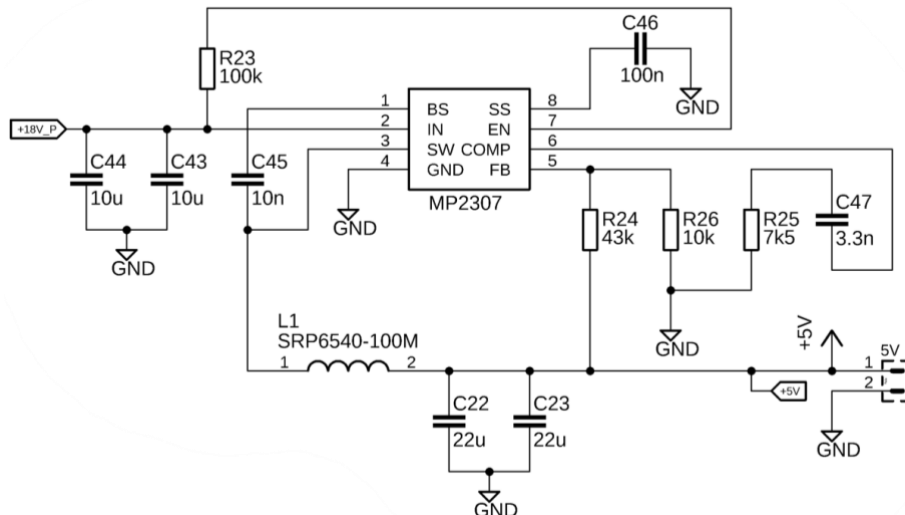
Pro potřebné napětí 5 V je zapotřebí zvolit správné hodnoty odporů. Proto odpor R24 má hodnotu 43 kΩ a odpor R26 10 kΩ. Hodnoty potřebné pro určitá napětí jsou viditelné v tabulce 5.

Výhoda použitého čipu je vcelku velká účinnost na napětí, které po daném obvodu vyžadujeme. Graf účinnosti je viditelný na obrázku 2.34. Na vodorovné ose je napětí, na svislé poté účinnost. Vyobrazeny jsou křivky pro všechna nastavitelná napětí.



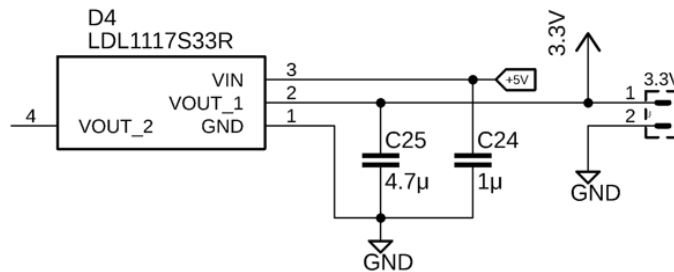
Obrázek 2.34: Graf závislosti účinnosti na napětí [10]

Celkové schéma zapojení použitého step-down konvertoru je vyobrazeno na obrázku 2.35. Namísto step-down konvertoru by bylo možno použít také stabilizátor pro snížení napětí, každopádně úbytek, který by musel stabilizátor zpracovat, by vytvářel velké množství tepla. Obvod by byl tedy velice neefektivní. Z tohoto důvodu je tedy využit step-down konvertor.



Obrázek 2.35: Schéma step-down konvertoru

Po převodu napětí na 5 V za pomoci step-down konvertoru je využito dalšího a zároveň posledního stabilizátoru pro další potřebné napětí. Toto napětí o hodnotě 3,3 V je potřebné pro napájení všech ostatních čipů.

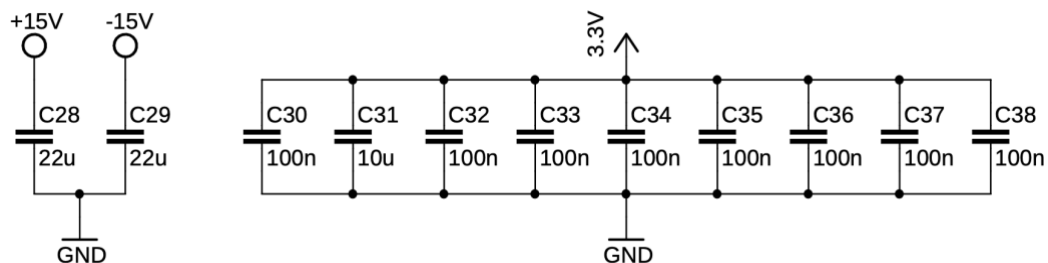


Obrázek 2.36: Zapojení stabilizátoru napětí pro 3,3 V

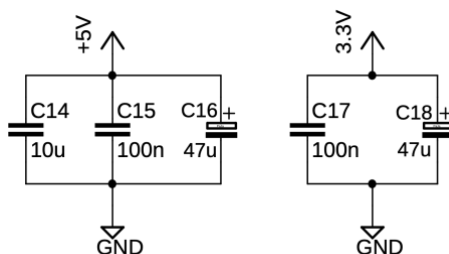
V návrhu jsou také použity blokovací kondenzátory umístěné vždy nejbliže k pinům, jak AD1934, OP275 tak i CS8416, které jsou zapotřebí opatřit napájecím napětím pro správnou funkčnost čipů.

Blokovací kondenzátory jsou zde z důvodu reakce napájecího zdroje na změnu proudu požadovaného daným obvodem, který je na zdroj připojen. Pokud při pevném nastaveném napětí dojde ke změně požadovaného proudu, napájecímu zdroji vždy chvíli trvá, než na změnu zareaguje. Blokovací kondenzátory jsou zde na udržení chvilkového poklesu napětí na pinech ve chvíli, kdy dojde ke změně napájecího napětí zdroje z důvodu většího odebíraného proudu.

Použity jsou na všechny tři napájecí napětí, jak pro 3,3 V, 5 V, tak i pro symetrické napájení 15 V pro zesilovací prvek.



Obrázek 2.37: Blokovací kondenzátory umístěné na desce s AD1934



Obrázek 2.38: Blokovací kondenzátory umístěné na napájecí desce

## **3. NÁVRH A REALIZACE CELKOVÉHO ZAPOJENÍ D/A PŘEVODNÍKU A JEHO PROTOTYPU**

Obsahem této kapitoly je spojení všech zmíněných částí obvodu D/A převodníku a napájecí části, následný návrh desek plošných spojů, umístění jednotlivých desek do krabičky a měření výsledného prototypu.

Při teoretickém návrhu bylo uvažováno nad umístěním všech prvků návrhu na jednu DPS. Kvůli lepšímu otestování jednotlivých částí byl návrh přehodnocen a rozdělen na tři desky. Deska s napájecími obvody, druhá, na které je umístěn převodník s čipem CS8416 a samotný D/A převodník. Na třetí desce se poté nachází Arduino Nano s LCD displejem, rozhraním SPI sběrnice a enkodérem.

Všechny navržené desky byly vyráběné firmou JLCPCB, která sídlí v Číně.

### **3.1 Návrh desky plošného spoje D/A převodníku**

Kapitola pojednává o návrhu schématu a desky plošného spoje D/A převodníku.

#### **3.1.1 Celkové schéma zapojení**

Po navržení jednotlivých částí schéma, které byly uvedeny v předchozích kapitolách bylo zapotřebí tyto části spojit a vytvořit celkové schéma zapojení celé desky D/A převodníku. Na začátku schématu je viditelná část s LED diodami a přijímač SPDIF komunikace. Následuje zapojení čipu CS8416. Pod ním se nachází rezistory pro nastavování registrů přes jumper konektory. Filtry potřebné pro CS8416 jsou ve schématu umístěné nad čipem. AD1934 je další částí schématu, který je umístěn ve stejném uspořádání jako předchozí čip. Tudiž nad ním jsou vyobrazené filtry a časovací obvody. Jelikož tento čip nastavujeme přes ovládací část, je zde zapojení konektoru SPI komunikace. Pod schématem AD1934 je viditelný resetovací obvod. Poslední částí schématu je zapojení zesilovacího prvku. Schéma zapojení je viditelné na obrázku 3.1.





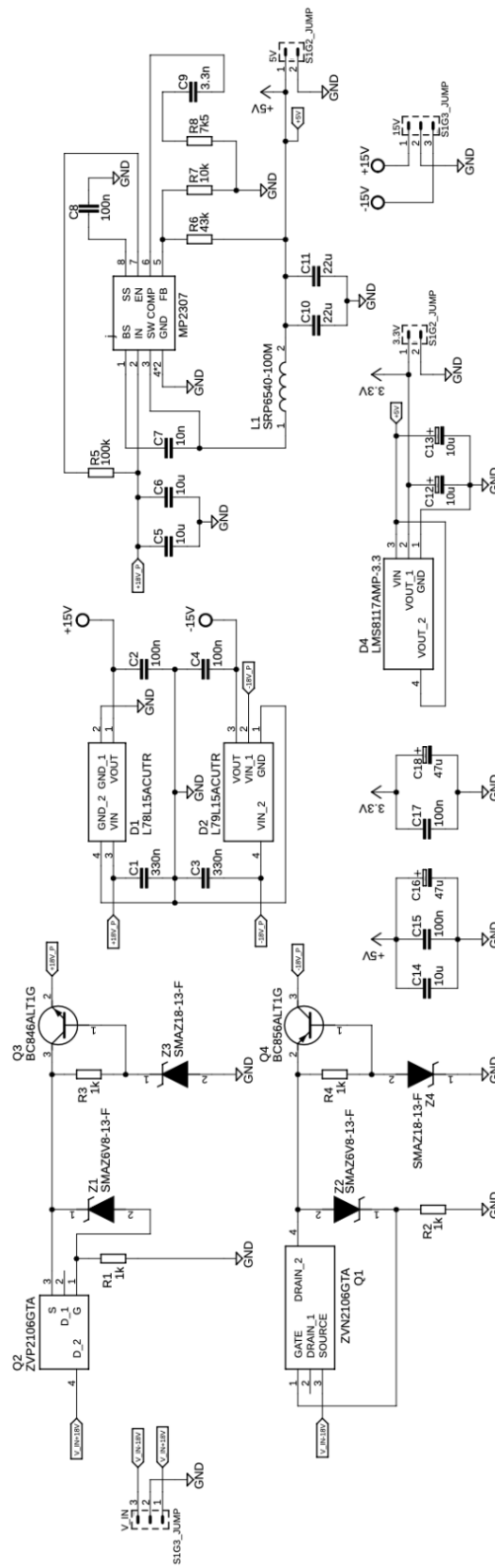


## **3.2 Návrh desky plošného spoje napájecí části**

V této kapitole je zmínka o konečném návrhu schématu zapojení a následného vytvoření desky plošného spoje a její 3D vizualizace.

### **3.2.1 Celkové schéma zapojení**

Schéma zapojení začíná konektorem pro přivedení napájení do desky. Následující část schématu jsou ochrany proti přepólování přes MOSFET tranzistory a ochrany proti přepětí přes bipolární tranzistory v kombinaci se Zenerovými diodami. Další částí je zapojení jsou stabilizátory napětí pro kladné a záporné napětí 15 V, napětí 3,3 V pro napájení čipů následované schématem step-down konvertoru pro snížení napětí 15 V na 5 V. Obrázek 3.3 obsahuje přesné schéma zapojení.



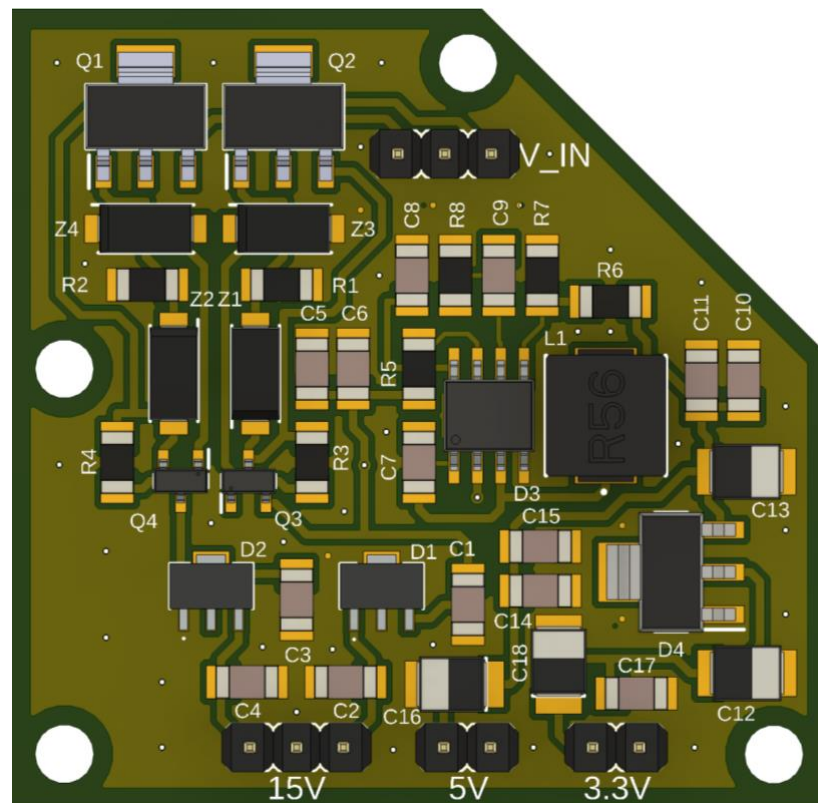
Obrázek 3.3: Schéma zapojení desky napájecí části

### 3.2.2 3D vizualizace desky plošného spoje

Druhá deska je realizací schématu napájecí části. Deska byla v pravé části seříznuta pod úhlem 45° z důvodu umístění zdířek pro napájení do krabičky zhruba v tomto místě. 3D deska je opět viditelná na obrázku 3.4.

Stejně jako na předchozí desce došlo ke změně jedné součástky z důvodu nedostupnosti, a to konkrétně jednoho z MOSFET tranzistorů. Na funkčnosti obvodu to však nic nemění.

Pro vstup a výstupy z desky byly opět použity stejné typy konektorů, a to kolíkové lišty.



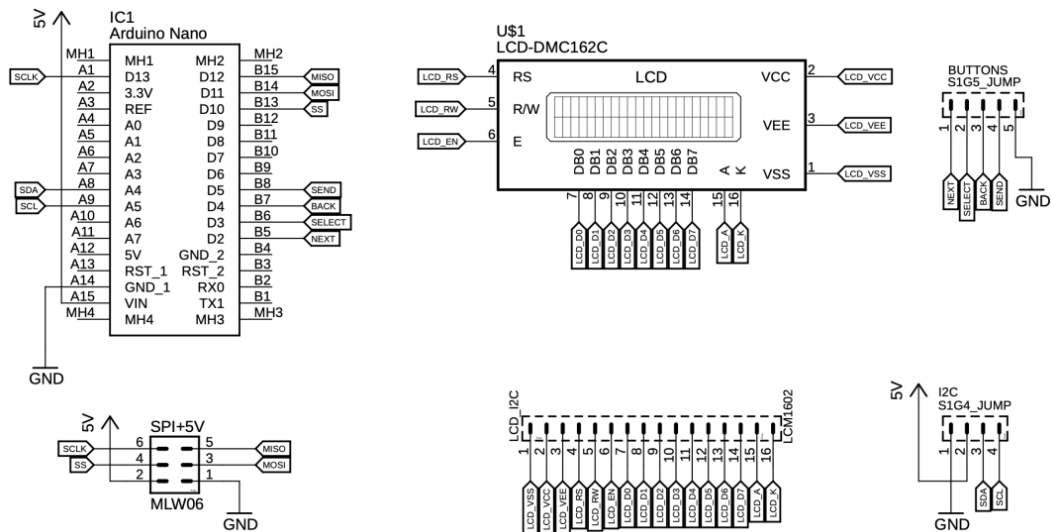
Obrázek 3.4: 3D návrh DPS napájecí části

### 3.3 Deska pro ovládací obvod

Poslední kapitola, která se věnuje deskám plošného spoje. Tentokrát jde o desku ovládací části a její kompletní schéma zapojení.

#### 3.3.1 Celkové schéma zapojení

Schéma obsahuje všechny části již zmíněné v kapitole, která pojednává o ovládací části. Na levé straně je vyobrazeno samotné zapojení Arduino nano pinů s konektorem pro SPI komunikaci. Převodník z I2C na informace pro LCD displej je zde zapojen přes jumper konektory, jelikož jsou stejné jako konektory, jež se nachází na desce samotného převodníku. Jumper označen jako LCD\_I2C je přímé připojení pinů LCD a jumper označen jako I2C je zapojení stejnojmenné sběrnice.

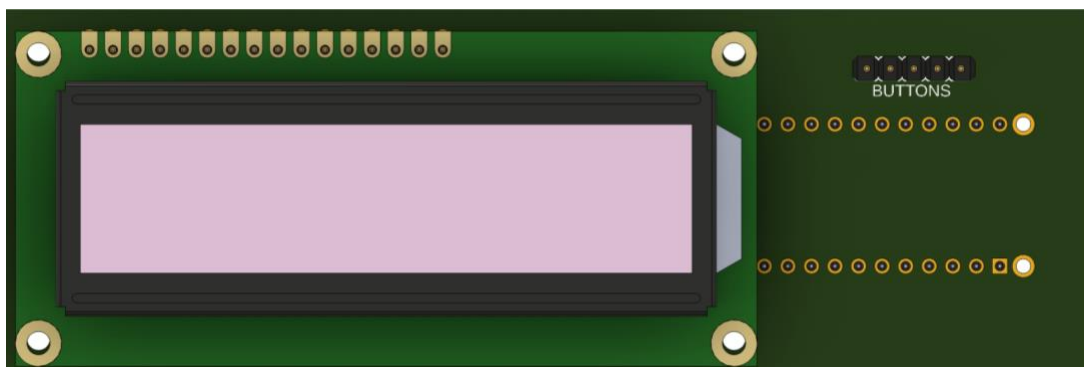


Obrázek 3.5: Schéma zapojení desky ovládací části

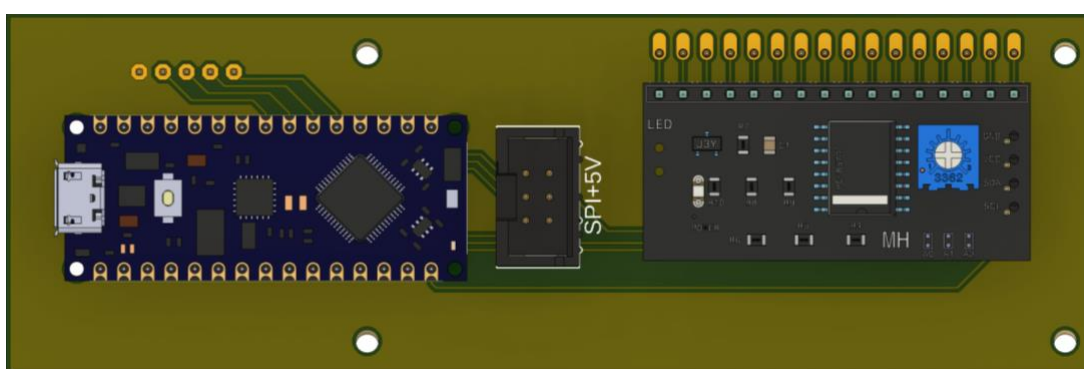
#### 3.3.2 3D vizualizace desky plošného spoje

Třetí a poslední deska obsahuje zapojení mikrokontroleru Arduino nano, vyvedení konektorů pro tlačítka, LCD displeje, převodníku I<sup>2</sup>C komunikace na data pro displej a konektoru pro SPI komunikaci s 5 V napájením. Výsledná 3D deska je viditelná na obrázku 3.6 a 3.7.

Na desku jsou již zmíněné prvky umístěny na obě strany. Na jedné straně se nachází LCD displej s výstupem na tlačítka jako přední panel. Druhá strana obsahuje zbytek zmíněných prvků.



Obrázek 3.6: Přední strana desky s LCD displejem a vývodem pro tlačítka



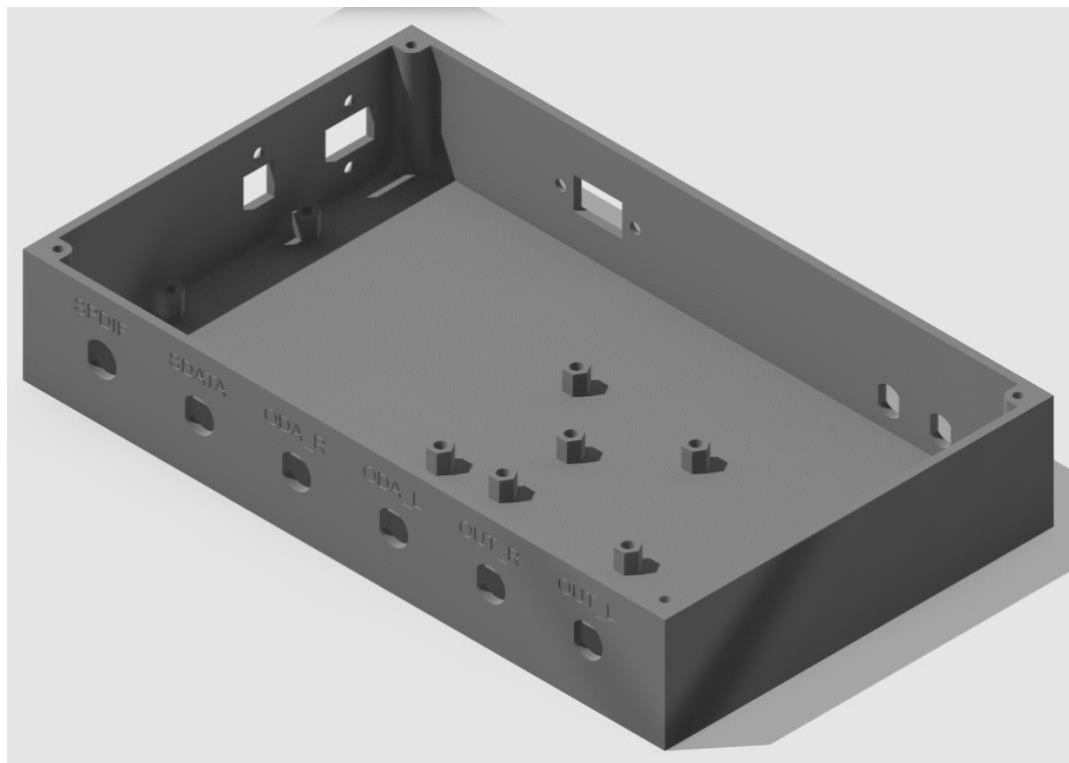
Obrázek 3.7: Druhá strana desky s Arduino Nano, převodníkem z I<sup>2</sup>C na data pro LCD displej a SPI konektorem

### 3.4 Krabička pro umístění DPS

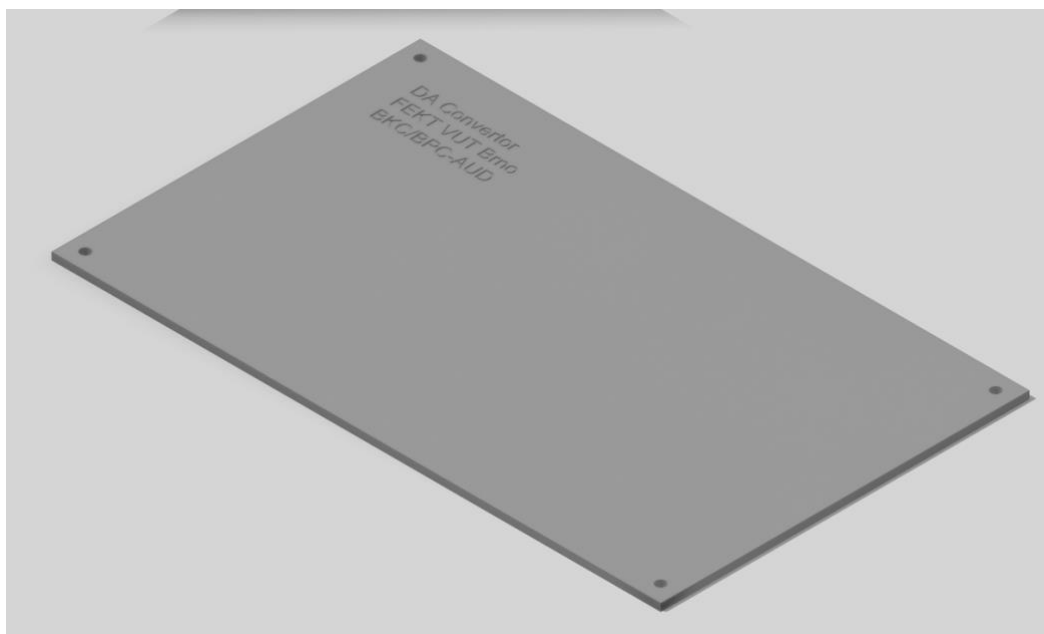
Na návrh krabičky, do které budou desky umístěny byla opět zvolena možnost 3D modelování, konkrétně v programu Shapr3D od stejnojmenné firmy. Krabičky byly poté vytisknuty za pomoci 3D tisku. Návrh byl rozdělen na dvě krabičky, a to krabičku pro napájecí obvody společně s D/A převodníkem a pro Arduino.

#### 3.4.1 Krabička pro D/A převodník

Na připevnění desek do krabičky byly umístěny distanční sloupky do míst, kde se nachází díry pro montáž DPS. Přední panel krabičky bude osazen BNC konektory pro měření. Zadní panel obsahuje konektor pro připojení SPI sběrnice s napájením ovládací části a napájení celého přípravku přes napájecí zdířky banánkových konektorů. Na levé straně z pohledu na přední panel se nachází konektor SPDIF pro připojení optického kabelu a konektor pro připojení externího zdroje digitálního signálu. Krabička je uzavíratelná přes víko, které se přes čtyři šrouby připevní na vrchní stranu krabičky. Nad každým vstupem či výstupem je vmodelovaný text do stěny krabičky. Návrh krabičky je viditelný na obrázku 3.8 a 3.9.



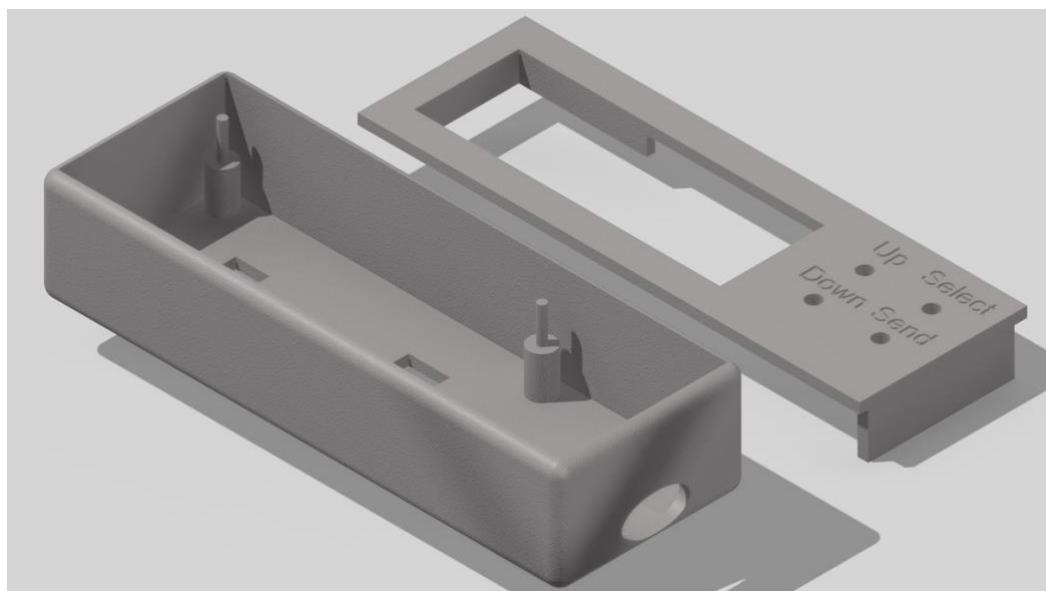
Obrázek 3.8: 3D model krabičky pro D/A převodník



Obrázek 3.9: 3D model víka krabičky D/A převodníku

### 3.4.2 Krabička pro Arduino

Krabička pro Arduino je poté už v celku jednoduchá. Na vrchní straně se nachází výřezy na displej a čtyři díry pro tlačítka. Tato část je odnímatelná od zbytku krabičky. Spodní strana obsahuje výřez na SPI konektor, otvor, přes který je možno Arduino resetovat za pomoci reset tlačítka umístěného přímo na Arduino a trimr pomocí kterého lze nastavit kontrast displeje. Na obrázku 3.10 je vyobrazen 3D model krabičky.



Obrázek 3.10: 3D model krabičky pro Arduino



### 3.5 Program pro řízení D/A převodníku po SPI komunikaci

Program je koncipován následujícím způsobem. Základní menu je opatřeno parametry, které chceme nastavovat. V menu se uživatel pohybuje mezi jednotlivými prvky pomocí tlačítka Up a Down. Po zmáčknutí tlačítka označeného jako Select se uživatel dostane do podmenu daného parametru. Pokud je potřeba se vrátit, je nutné najít v menu a zmáčknout tlačítko označené jako Back. Zde už jsou možnosti, které lze nastavit na D/A převodníku. Tlačítkem Select daného parametru uživatel vybere parametr a pomocí zmáčknutí tlačítka Send odešle nastavení do AD1934 přes sběrnici SPI. Příklad kódu pro takovéto menu je uveden na obrázku 3.11.

```
// Setting up what each button does
void loop()
{
  if (!digitalRead(upButton))
  {
    menu++;
    updateMenu();
    delay(100);
    if (menu >= 6)
    {
      menu = 6;
    }
    while (!digitalRead(upButton))
    ;
  }
  if (!digitalRead(downButton))
  {
    menu--;
    updateMenu();
    delay(100);
    while (!digitalRead(downButton))
    ;
  }
  if (!digitalRead(selectButton))
  {
    executeAction();
    updateMenu();
    delay(100);
    while (!digitalRead(selectButton))
    ;
  }
}
```

Obrázek 3.11: Kód pro informace z tlačítek

Každá podmínka kontroluje zmáčknutí jednotlivého tlačítka. Volba jednotlivých částí menu je prováděna přes funkci case, jejíž příklad pro jednu část je na obrázku 3.12. Case nám kontroluje hodnotu parametru menu a dle ní posílá informace na LCD displej o tom, co se na displeji má zobrazit.

```
case 1:
  lcd.clear();
  lcd.print(">DAC Enable");
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print(" Master Mute");
  break;
```

Obrázek 3.12: Příklad části programu pro jeden parametr menu

Pro správnou funkčnost celého kódu je zapotřebí správná deklarace pinů a proměnných, na které máme připojené jednotlivé prvky pro ovládání či zobrazování. Tento úkon se provádí hned na začátku po provedení importu knihoven, obrázek 3.13. Další částí, která je zde viditelná, je inicializace a nastavení podsvícení displeje. Dále je zde provedeno také nastavení vstupních pinů pro tlačítka přes aktivní pull up rezistory.

```
// Import libraries and declaration of LCD
#include <Wire.h>
#include <SPI.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2); // Can be on adress 0x3f

// Variables for buttons and some parameters of menu
int upButton = 3; // Up Button pin declaration, pin 3
int downButton = 2; // Down Button pin declaration, pin 2
int selectButton = 4; // Select Button pin declaration, pin 4
int sendButton = 5; // Send Button pin declaration, pin 5
int menu = 1;
int submenu = 1;

// Setting up inputs and basic of LCD
void setup()
{
  lcd.init(); // Init the LCD
  lcd.backlight(); // Active backlight of LCD
  pinMode(upButton, INPUT_PULLUP); // Set Up Button as input with pull up
  pinMode(downButton, INPUT_PULLUP); // Set Down Button as input with pull up
  pinMode(selectButton, INPUT_PULLUP); // Set Select Button as input with pull up
  pinMode(sendButton, INPUT_PULLUP); // Set Send Button as input with pull up

  updateMenu();
}
```

Obrázek 3.13: Import knihoven, deklarace pinů a nastavení základních parametrů

SPI komunikace je provedena opět přes knihovnu, která je oficiálně poskytována samotným výrobcem Arduina. Knihovna nese název SPI.h. Úvodní nastavení SPI komunikace probíhá na začátku kódu v části setup, kde se nachází i další základní nastavení, konkrétně počáteční hodnoty všech proměnných použitých v programu.

```
void sendDataSPI(byte address, byte data) {  
    digitalWrite(SS, LOW); // Select the SPI slave  
  
    SPI.transfer(address); // Send the address of the register  
    SPI.transfer(data);    // Send the 8-bit information  
  
    digitalWrite(SS, HIGH); // Deselect the SPI slave  
}
```

Obrázek 3.14: Nastavení SPI komunikace

Je také nezbytné dodat do každé části menu nastavení parametrů SPI komunikace, to znamená hodnotu adresy registru, na které chceme data odesílat a samotná data. Data je možné zadávat buďto v binární nebo hexadecimální soustavě. První číslo udává adresu registru v hexadecimální soustavě. Pro lepší orientaci jsou data odesílaná do registru v podobě binární soustavy, aby bylo jednodušší rozeznat, kam přijde vysoká a kam nízká hodnota napětí (logická 1 nebo 0).

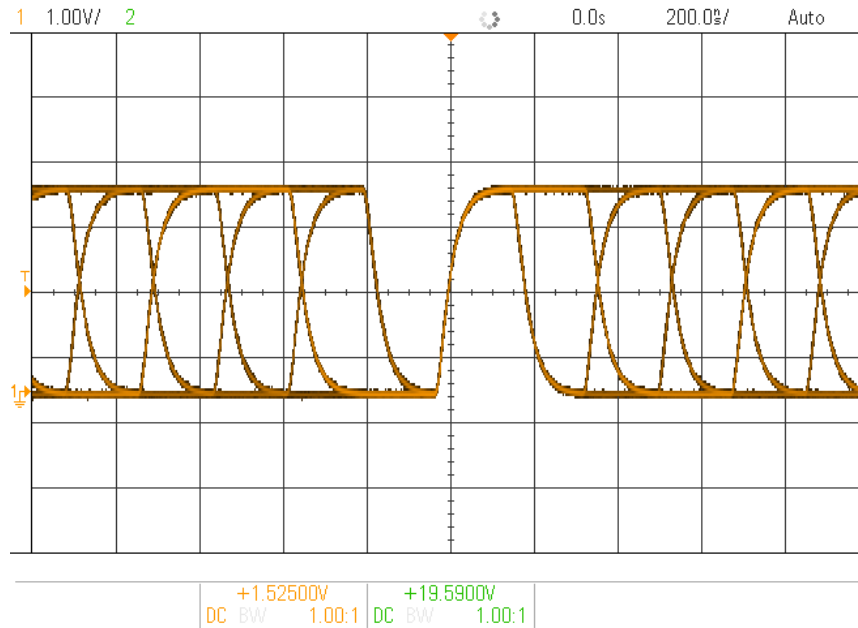
```
sendDataSPI(0x00, 0b10010110); // Send address of register and data to him
```

Obrázek 3.15: Posílání adresy registru a dat do jeho obsahu

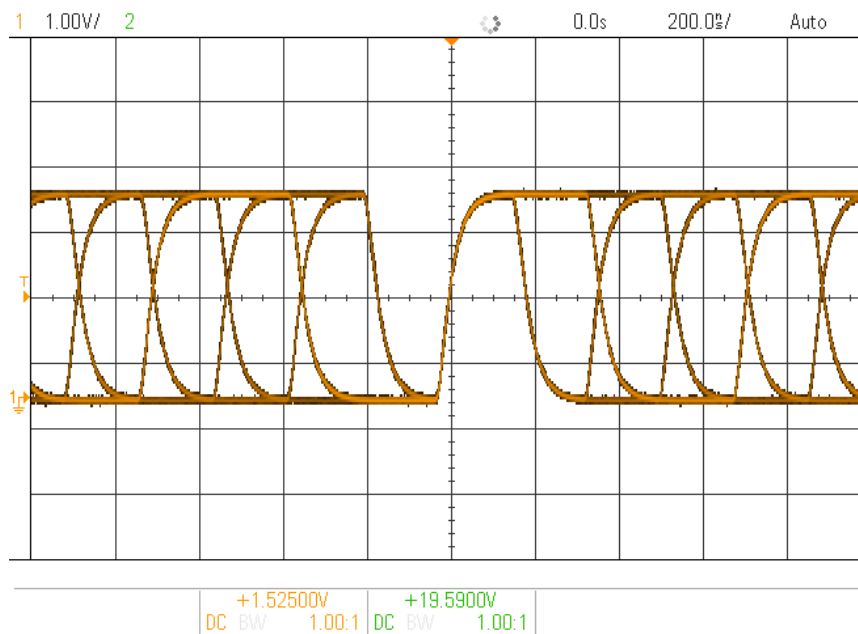
V prvním návrhu ovládací části bylo menu ovládáno pomocí enkodéru. Nicméně zde nastal problém při programování a nebylo možné dosáhnout správné funkčnosti menu, kdy docházelo k náhodným přepnutím částí menu ať už po zmáčknutí tlačítka či jenom při otočení enkodérem. Při rotaci se také zjevovali zákmity, které nevyřešilo ani přidání filtračních kondenzátorů. Proto byl nakonec enkodér vyměněn za tlačítka, která budou v tomto použití spolehlivější. Nebude tedy dosaženo moderního ovládání, jak bylo v původním plánu.

### 3.6 Měření výsledného prototypu

Měření začalo kontrolou výsledného signálu, který byl na výstupu optického přijímače SPDIF komunikace. Měření bylo provedeno na dvou frekvencích a to na 1 kHz a 10 kHz. Oba signály dosáhli předpokládaného průběhu. Jsou viditelné na obrázku 3.16 a 3.17.

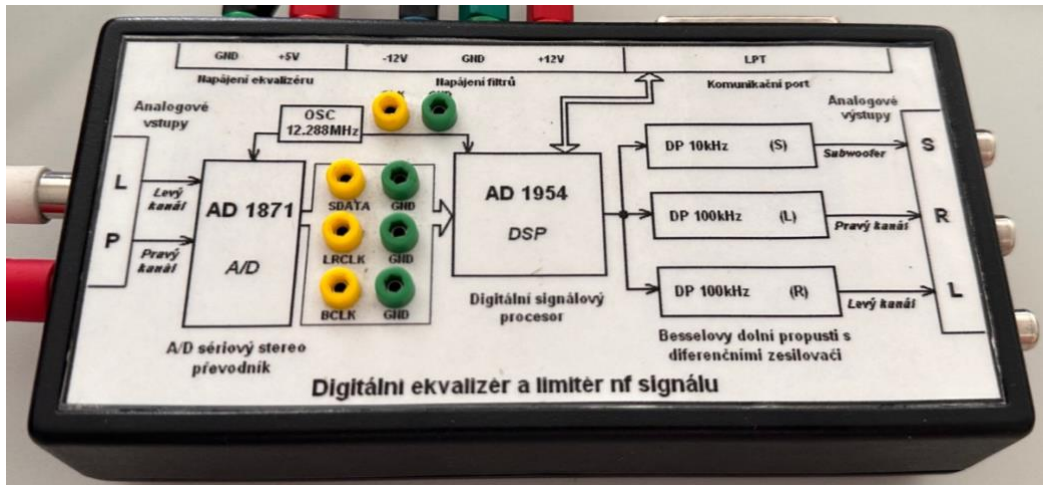


Obrázek 3.16: Signál SPDIF komunikace na 1 kHz



Obrázek 3.17: Signál SPDIF komunikace na 10 kHz

Jelikož bylo zapotřebí nějakým způsobem zjistit, zda signály, které jsou převáděny v čipu CS8416 z SPDIF komunikace byli správné, byl využit již vytvořený přípravek, který je měřen v audiotechnice jako Digitální ekvalizér. Tento přípravek převádí analogový signál na digitální, zpracovává ho přes DSP procesor a převádí zpět na analogový signál. Přípravek je vyobrazen na obrázku 3.18.

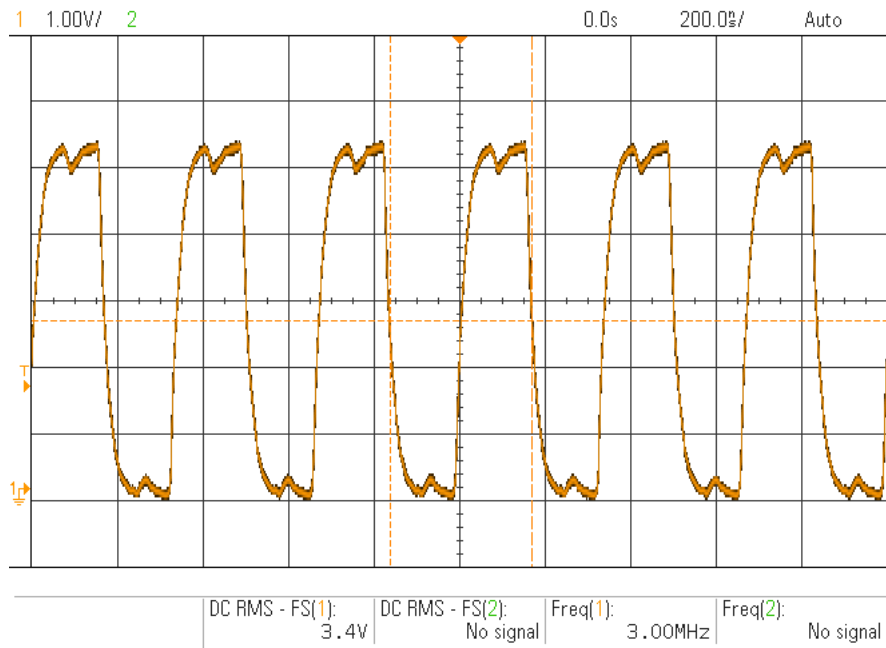


Obrázek 3.18: Přípravek digitálního ekvalizéru využívaný k měření v audiotechnice

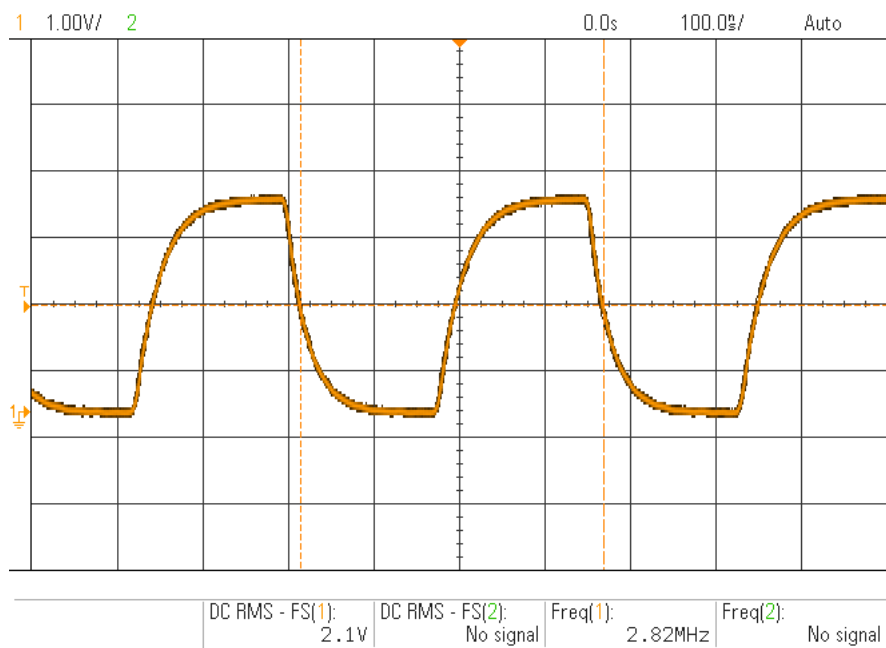
Pro ověření prototypu bakalářské práce stačilo změřit signály SDATA, LRCLK a BCLK, které jsou převáděny pro DSP procesor. Tyto signály by měli být podobné, ne-li stejné v obou případech.

V první řadě byl porovnán signál BCLK, což je hodinový signál digitální komunikace. Jeho průběh na referenčním přípravku je uveden jako první. Obrázek následující je změřen na prototypu. Je viditelné, že signály jsou totožné. Signál vygenerovaný v prototypu se zdá čistější než změřený referenční signál v již používaném přípravku. Oba signály dosahují frekvence kolem 3 MHz.

Větší rozdíl ale nastává v napětí signálů. Referenční signál dosahuje vyššího napětí, o 1,3 V více než signál prototypu. Toto může být způsobeno referenčním napětím, kdy v prototypu je referenční napětí na úrovni 3,3 V, kdežto referenční přípravek může používat 5 V.

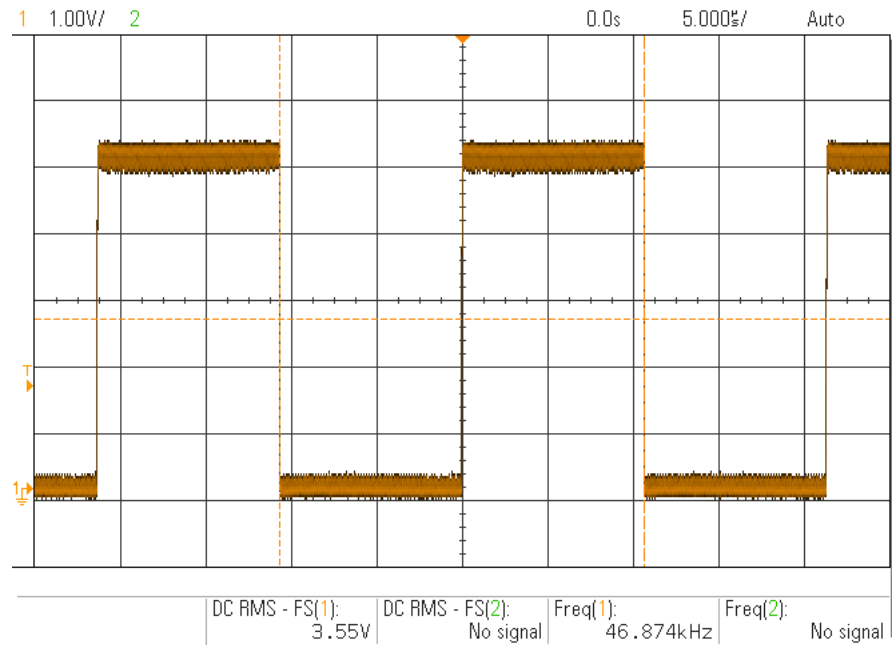


Obrázek 3.19: Referenční BCLK signál z přípravku

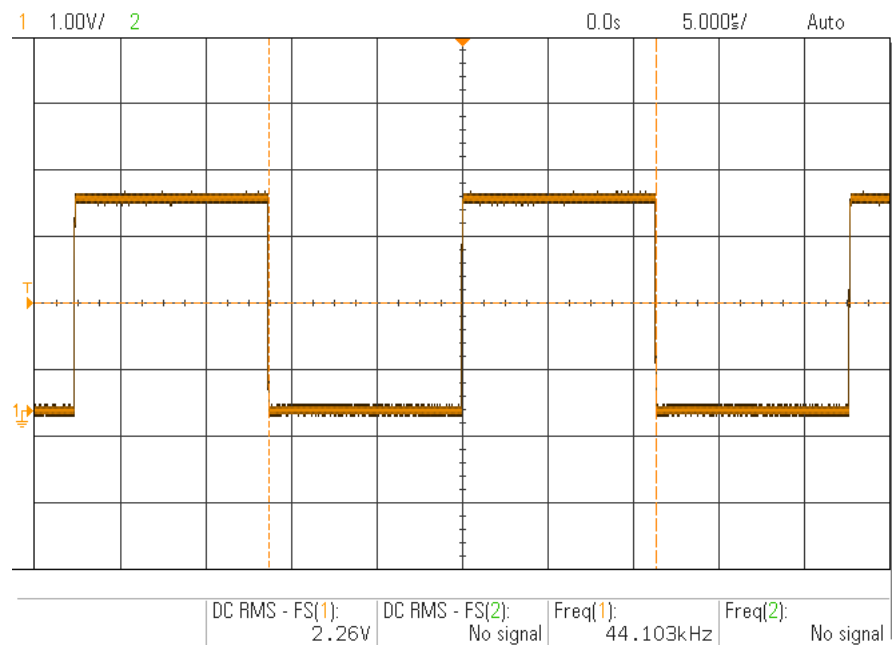


Obrázek 3.20: BCLK signál z prototypu bakalářské práce

Další proměřený signál nese označení LRCLK. Průběh tohoto signálu se projevuje jako obdélníkový periodicky se opakující signál. První obrázek opět ukazuje referenční signál změřený na přípravku. Oba dosahují podobné hodnoty frekvence. Rozdíl mezi signály je opět v napětí.

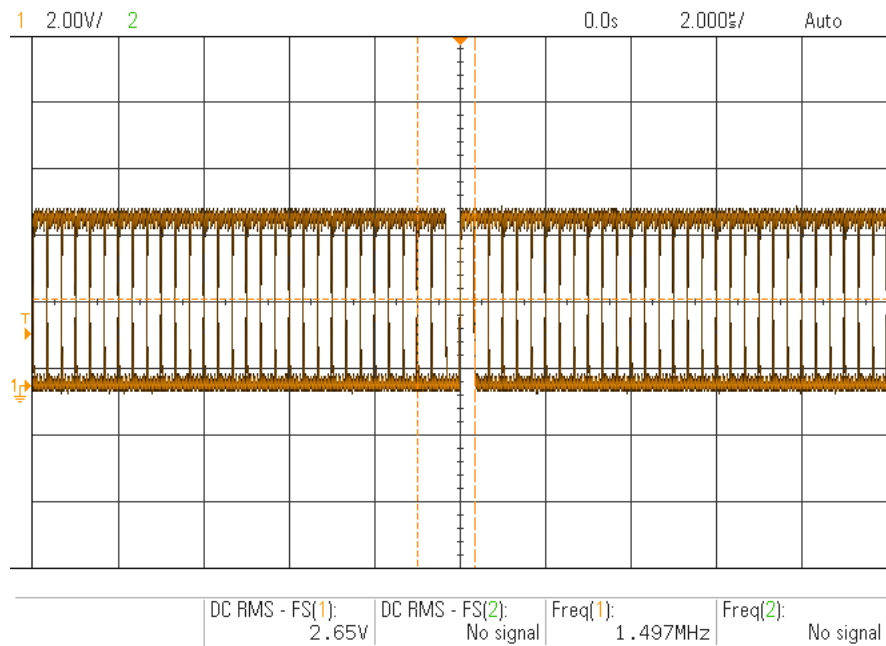


Obrázek 3.21: Průběh signálu LRCLK na referenčním přípravku

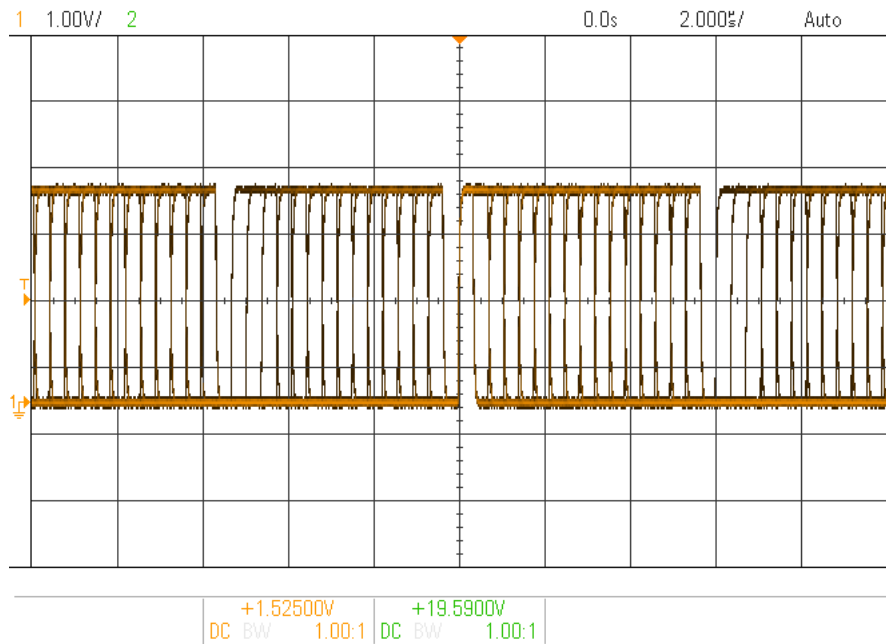


Obrázek 3.22: Průběh signálu LRCLK na prototypu

Sériová data převedena pomocí referenčního přípravku jsou na obrázku 3.23. Na dalším je vyobrazen průběh dat převedených pomocí čipu CS8416 z SPDIF komunikace.



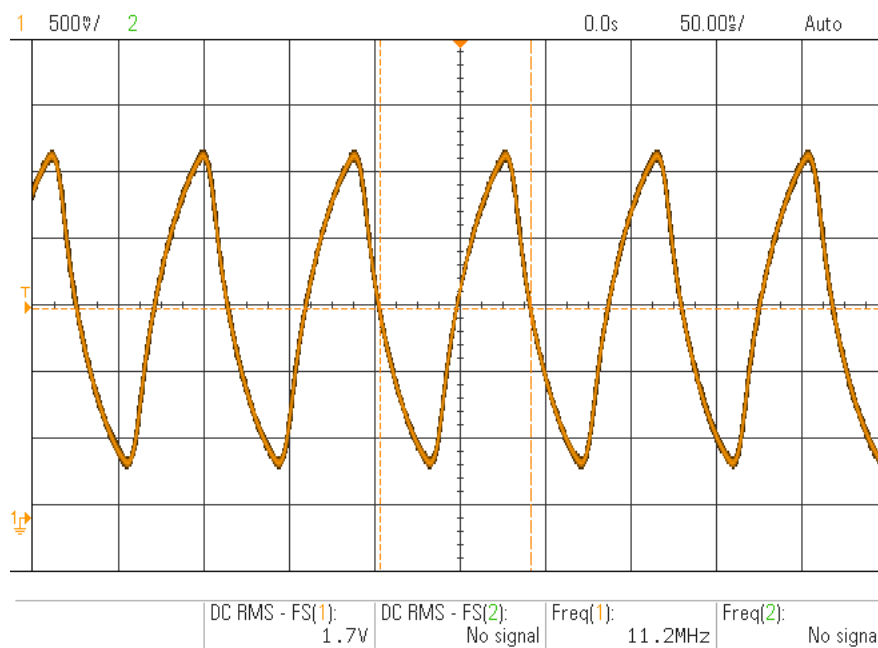
Obrázek 3.23: SDATA převedena referenčním přípravkem



Obrázek 3.24: SDATA převedena prototypem



Další signál, který bylo zapotřebí zkontrolovat byl hodinový signál vygenerovaný z SPDIF komunikace čipem CS8416 pro D/A převod. CS8416 je schopen obnovit nosný signál z SPDIF komunikace pro pozdější využití tohoto signálu na převod. Tento signál by měl mít frekvenci kolem 12 MHz. Výsledný změřený signál dosahuje frekvence 11,2 MHz.



Obrázek 3.25: Hodinový MCLK signál vygenerovaný z SPDIF komunikace

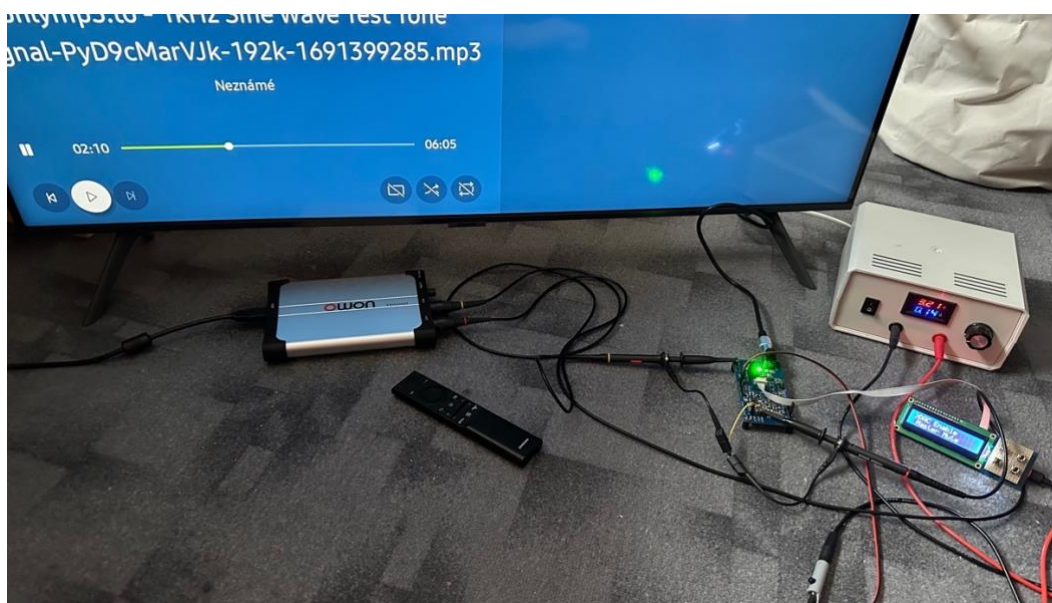
Po změření všech signálů pro správnou funkčnost samotného D/A převodu, už bylo jen zapotřebí změřit analogový signál po převodu. Dosažený převedený signál odpovídá signálu, který je poslán přes optický kabel.

Jako reference signálu byl použit komerčně dostupný převodník z SPDIF na analogový signál, který má podobné parametry jako D/A převodník vytvářený v této bakalářské práci. Komerční převodník je viditelný na obrázku 3.26.



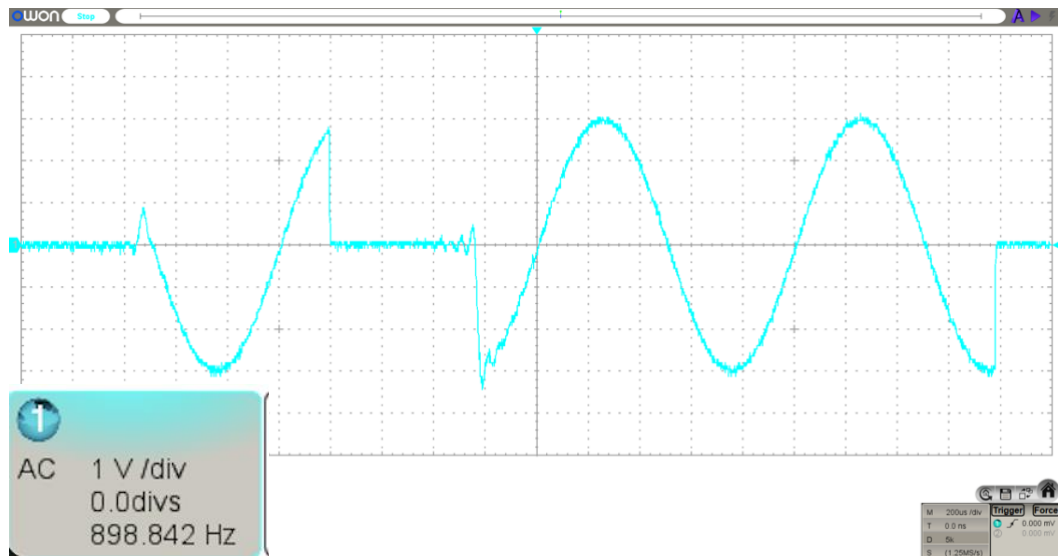
Obrázek 3.26: Komerční D/A převodník pro SPDIF

Měření posledních signálů probíhalo v domácím prostředí. Jelikož nebyl dostupný jiný zdroj optické komunikace, byla použita televize. Měřené signály byli nahrané na USB disku vloženého v televizi. Konkrétně byli měřeny signály o frekvencích 1kHz, 5kHz, 10 kHz, 18kHz, 20kHz a ze zvědavosti, jak budou oba měřené přípravky reagovat, 25kHz. Zapojení domácího měřicího pracoviště je vyobrazeno na obrázku 3.27.



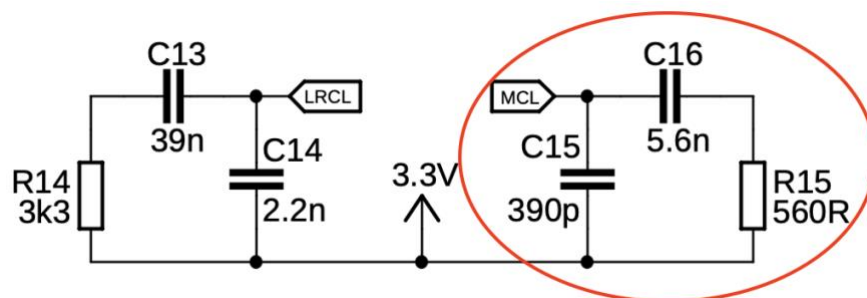
Obrázek 3.27: Měření na provizorním domácím pracovišti

Při měření byl jako hodinový signál využíván signál generovaný čipem CS8416. Prvních pár měření však neproběhlo plně podle představ. Signál, který byl D/A převodníkem zpracováván vypadal, jako kdyby procházel před jednocestný usměrňovač, jelikož byla ořezávána jedna půlvlna sinusového harmonického signálu, jak je viditelné na obrázku 3.28.



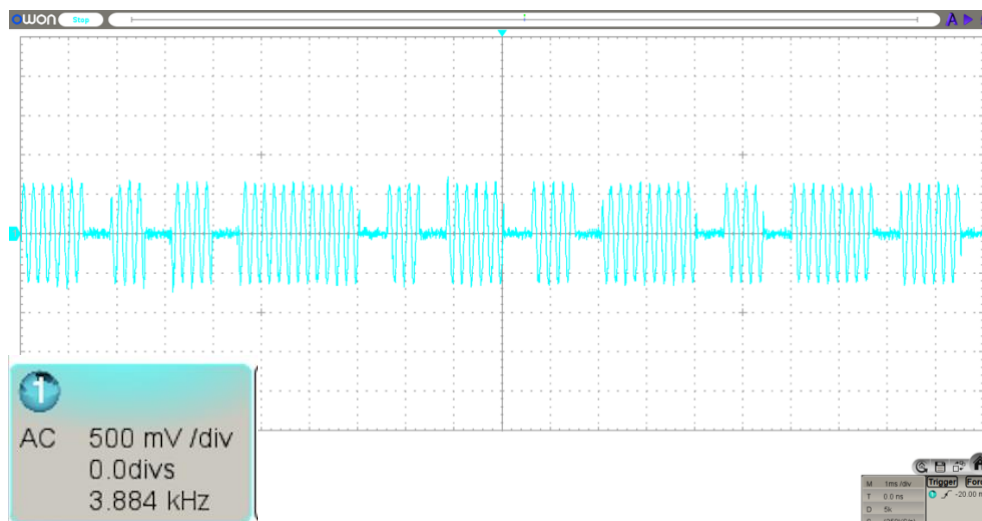
Obrázek 3.28: Ořezávaný sinusový průběh o frekvenci 1 kHz

Po různých prohledávání datasheetů, kontroly schémat, kontroly desek plošných spojů, jsem narazil na možnou chybu v datasheetu výrobce čipu AD1934, to zanemá firmy Analog Devices, kdy je uváděno, že při externím hodinovém signálu má být použit filtr na levé straně (obrázek 3.29). Jakmile byl ale tento filtr použit, rekonstrukce probíhala přesně tak, jak je vidět na obrázku 3.28. Proto byl namísto doporučeného filtru výrobcem, vybrán filtr druhý a po jeho zapojení už se objevoval signál takový, jaký měl. Využitý filtr je vyznačen červeným kroužkem na obrázku 3.29.



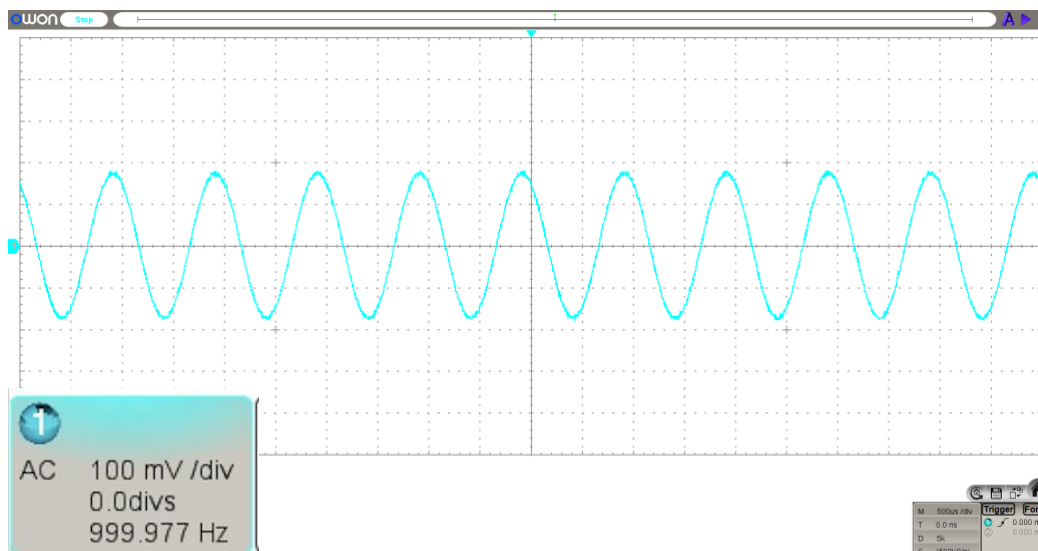
Obrázek 3.29: Použitý filtr při měření

Takto vypadal také každý jiný signál ku příkladu 5 kHz signál, kde je vyobrazena delší část signálu a je viditelné přerušení po časových intervalech, které je způsobeno právě již zmíněným špatným filtrem.

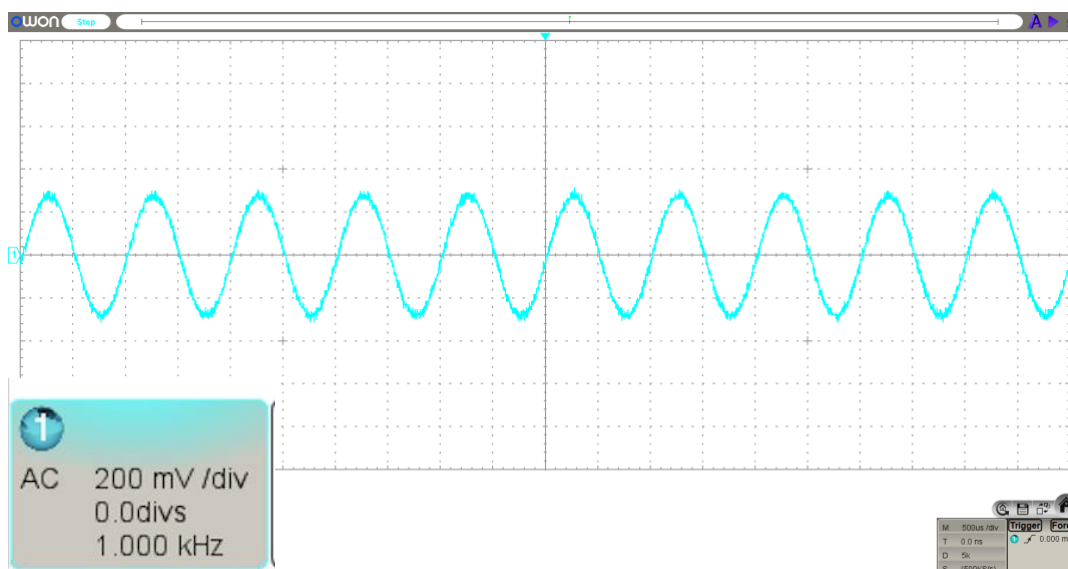


Obrázek 3.30: Delší úsek 5 kHz harmonického signálu

Po přepojení filtru jsou již všechny průběhy srovnatelné z průběhy komerčního převodníku. Na prvním oscilogramu je signál z komerčního převodníku, druhý je signál z konečné a upravené verze přípravku. Oba signály dosahují daného signálu, jež je vysílán po SPDIF komunikaci.

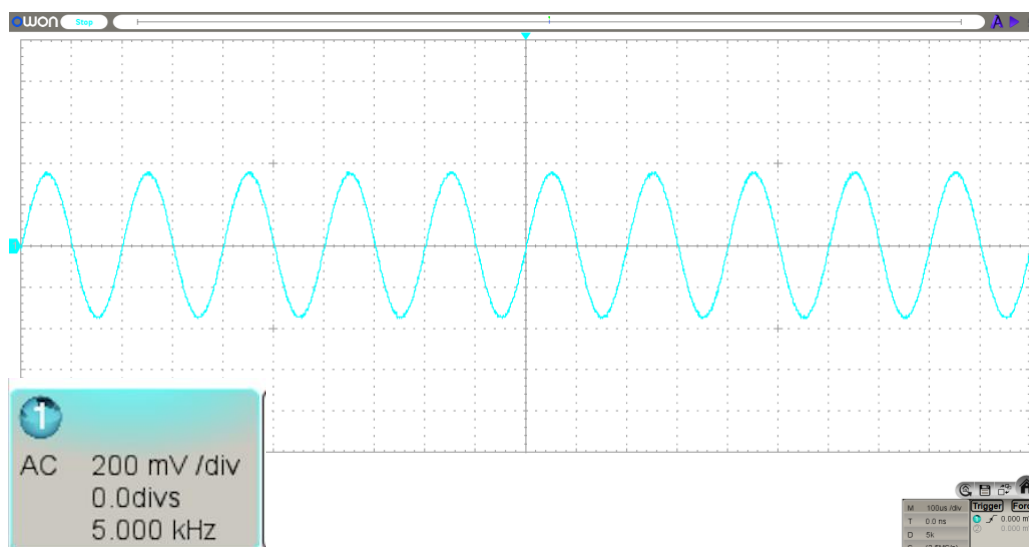


Obrázek 3.31: 1 kHz signál po průchodu komerčním převodníkem

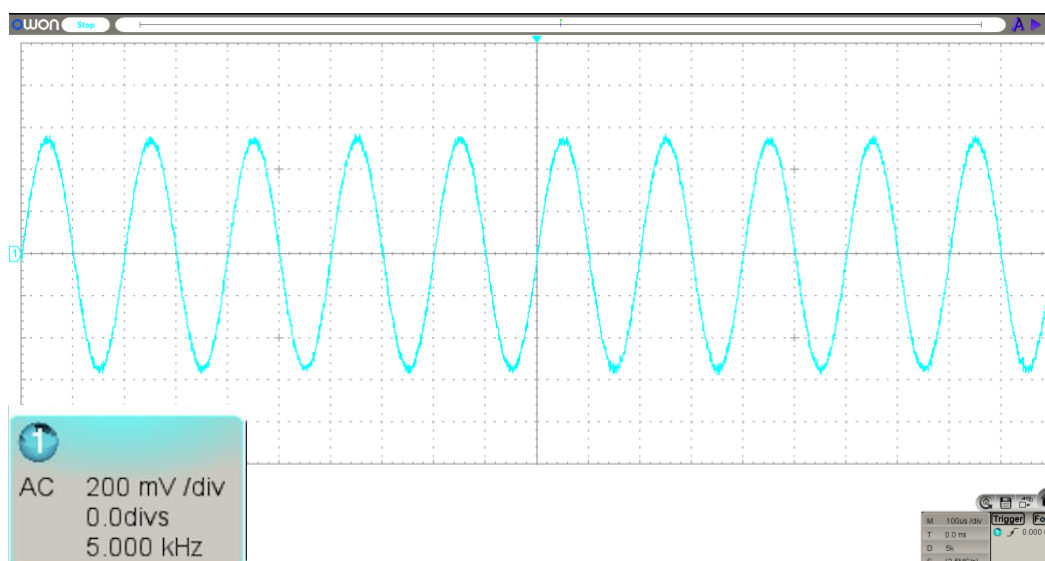


Obrázek 3.32: 1 kHz signál po průchodu přípravkem D/A převodníku

To stejné platí pro signál s frekvencí 5 kHz, který je po převodu zobrazen na následujících průbězích.

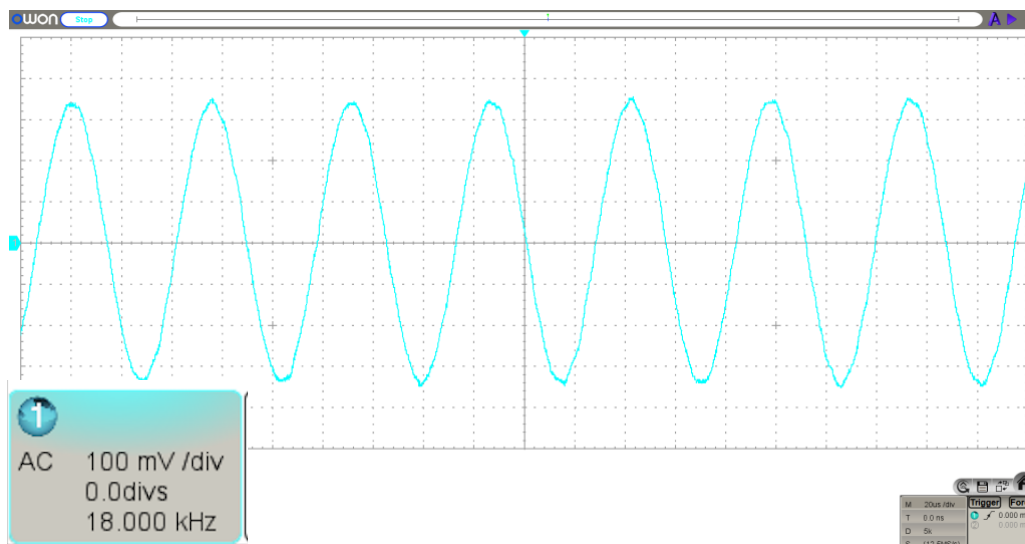


Obrázek 3.33: 5 kHz signál po průchodu komerčním převodníkem

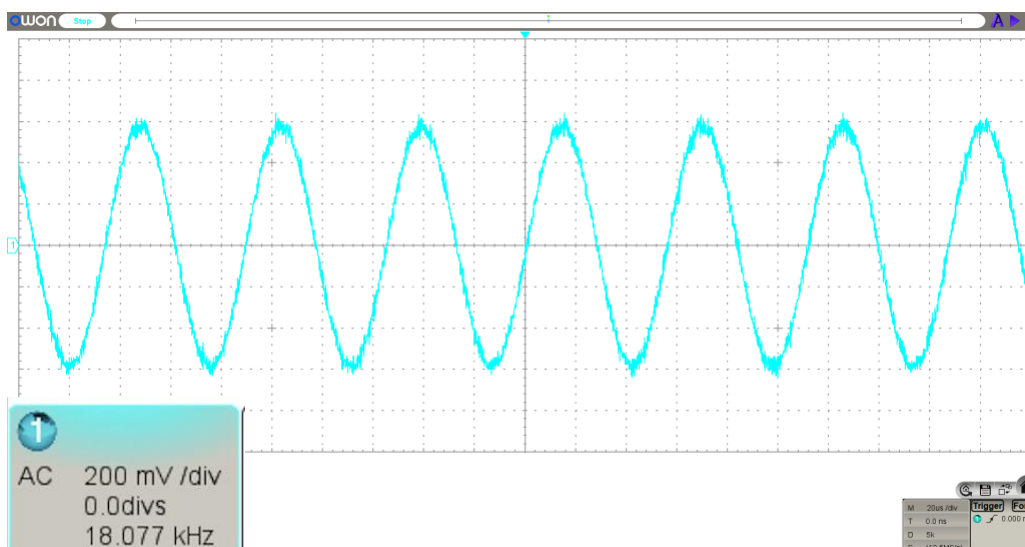


Obrázek 3.34: 5 kHz signál po průchodu měřeným přípravkem

Při signálu o frekvenci 18 kHz už se začíná objevovat u obou signálů nějaké minimální zkreslení. U komerčně využívaného D/A převodníku je viditelné, že maxima sinusového signálu se z obloukového tvaru mění na špičky a signál měřeného přípravku se začíná mírně zkreslovat, spíše by se dalo říci, že signál vypadá jako mírně zašuměný.

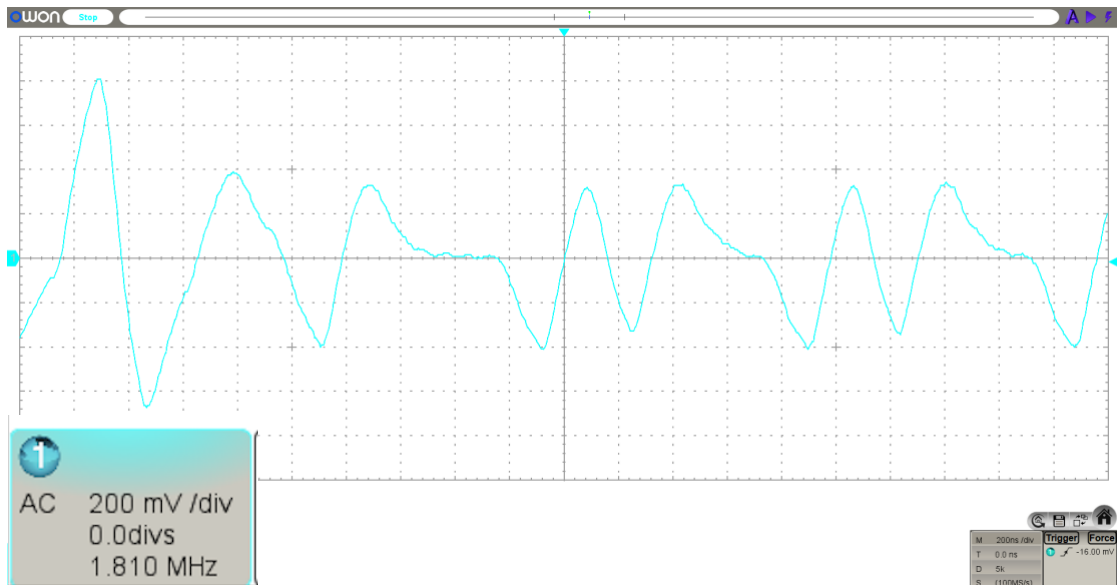


Obrázek 3.35: 18 kHz signál po průchodu přes komerční převodník



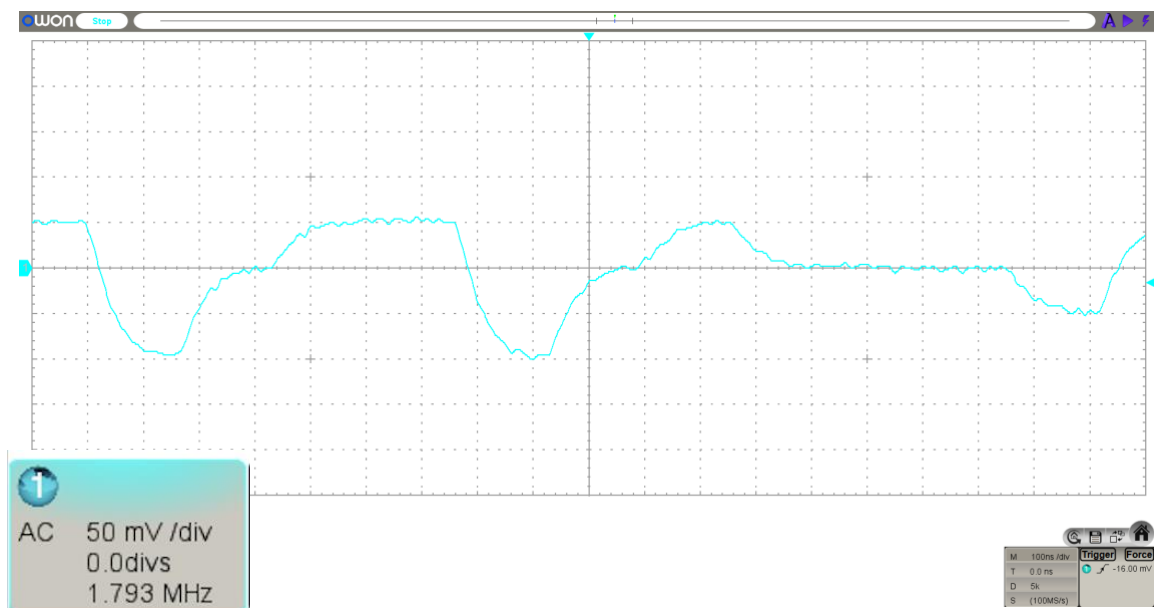
Obrázek 3.36: 18 kHz zpracovaných měřeným přípravkem

Posledními měřeními signály byli signály už jen na přípravku, o kterém pojednává bakalářská práce. I když je přípravek využíván jako audio zařízení, což znamená, že by měl zvládat kmitočty od 20 Hz do 20 kHz, na následujícím oscilogramu, konkrétně se jedná o obrázek 3.37, kdy je do přípravku posílán sinusový signál o frekvenci 20 kHz a vzorkovacím kmitočtu D/A převodníku na 64 kHz, je viditelné, že převodník zde už nefunguje dle očekávání.



Obrázek 3.37: 20 kHz signál přivedený na přípravek

Spíše jen tak pro zajímavost byl také změřen signál o frekvenci 25 kHz, s tímto signálem si už převodník neporadí.



Obrázek 3.38: 25 kHz signál pro vyzkoušení reakce převodníku ze zvědavosti



Závěrem měření bych chtěl ještě dodat, že samotný obvod je velice energeticky nenáročný. Při měření v domácích podmínkách byl použit napájecí zdroj s ampérmetrem na jeho výstupu. Tento měřicí přístroj je sice jen velice orientační, ale ukazoval odebíraný proud po větvi 3,3 V něco okolo 140 mA jak je viditelné na obrázku.



Obrázek 3.39: Orientační měření odběru přípravku

## 3.7 Použité měřicí přístroje

### 3.7.1 V laboratoři

Sony Multi channel CD player

CD disk se stopami signálů

2x napájecí laboratorní zdroj DIAMETRAL (dva byli používány pouze pro experimentální měření, jinak je počítáno s jedním)

Digitální osciloskop Keysight EDUX1002A

2x osciloskopická kompenzovatelná sonda

### 3.7.2 V domácím prostředí

Televizor Samsung (zdroj optického signálu)

Napájecí zdroj, regulovatelný 1,5 – 30 V

Digitální osciloskop OWON VDS1022i

2x osciloskopická kompenzovatelná sonda

## 4. ZÁVĚR

Teoretická část návrhu proběhla bez sebemenších problémů. Všechny simulace odpovídali teoretickým předpokladům a vyhovovali parametrům potřebným pro správnou funkčnost obvodů. Zapojení samotných čipů, jak CS8416, tak i AD1934, nebyli odsimulováni díky absenci Pspice modelů. Pokud by ale dostupné byli, i tak by byl výpočet pro simulaci velmi časově náročný.

Vzhledem k cílům bakalářské práce podle zadání bylo dosaženo téměř plné úspěšnosti návrhu. Byly ověřeny všechny signály, které je možno při převodu naměřit. Jejich hodnoty (průběhy) se pohybovali v rámci teoretických předpokladů, případně s malými odlišnostmi. Některé průběhy byly také porovnány s komerčními výrobky, které jsou dostupné široké veřejnosti do domácností.

Při měření byla zjištěna chyba nejspíše v datasheetu výrobce při nastavení hodinového signálu na synchronizaci D/A převodníku. Tato chyba byla při experimentálním měření odchycena a opravena.

Na základě zjištěných výsledků byl také zhotoven koncept laboratorní úlohy pro měření v předmětu audioelektronika.

Můžeme tedy prohlásit, že je přípravek plně funkční, jediné, co chybí je ho umístit do krabiček, které jsou navrženy a vše sedí, ale bohužel došlo k rozbití 3D tiskárny a její oprava nebyla možná dokončit do data odevzdání bakalářské práce. Každopádně na obhajobu by už měla být bakalářská práce umístěna do krabičky.

Závěrem bych rád práci označil jako velice přínosnou. Doufám, že práce bude jako laboratorní úloha sloužit budoucím studentům pro základní pochopení D/A převodu, jak funguje, co je k němu zapotřebí a například proč je v dnešní době tak moc využívaná samotná digitální elektronika. Samotné zařízení by se při mírné úpravě dalo použít i v domácnosti.

## LITERATURA

- [1] D/A převod. *Vzdělávací služby* [online]. [cit. 2023-01-01]. Dostupné z: <https://www.vzdelavacisluzby.cz/dokumenty/vzdelavaci-dokumenty/2462757.pdf>
- [2] Protokol SPDIF. *Tab-TV* [online]. [cit. 2023-01-01]. Dostupné z: <https://cz.tab-tv.com/co-znamena-digitalni-audio-vystup-s-pdif-vystup-spdif/>
- [3] Protokol AES3. *Wikipedia* [online]. [cit. 2023-01-01]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/AES3>
- [4] Datasheet CS8416: 192 kHz Digital Audio Interface Receiver. *Cirrus Logic* [online]. [cit. 2023-01-01]. Dostupné z: [https://statics.cirrus.com/pubs/proDatasheet/CS8416\\_DS578F5.pdf](https://statics.cirrus.com/pubs/proDatasheet/CS8416_DS578F5.pdf)
- [5] Datasheet FCR684205R: Optical receiver jack. *Cliff Electronics Components* [online]. [cit. 2023-08-03]. Dostupné z: <https://www.cliffuk.co.uk/products/optical/FCR684205R.pdf>
- [6] Datasheet AD1934: 8 – Channel DAC with PLL and Single-Ended Outputs, 192 kHz, 24 Bits. *Analog Devices* [online]. [cit. 2023-01-01]. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ad1934.pdf>
- [7] Datasheet AD1938: 4 ADC/8 DAC with PLL, 192 kHz, 24-Bit Codec. *Analog Devices* [online]. [cit. 2023-08-03]. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD1938.pdf>
- [8] Datasheet ADM811: Microprocessor Supervisory Circuit. *Analog Devices* [online]. [cit. 2023-08-03]. Dostupné z: [https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADM811\\_812.pdf](https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADM811_812.pdf)
- [9] Datasheet OP275: Dual Bipolar/JFET, Audio Operational Amplifier. *Analog Devices* [online]. [cit. 2023-01-01]. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/OP275.pdf>
- [10] Datasheet MP2307: 3A, 23V, 340KHz Synchronous Rectified Step-Down Converter. *Monolithic Power Systems* [online]. [cit. 2023-01-01]. Dostupné z: [https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/MP2307\\_r1.9.pdf](https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/MP2307_r1.9.pdf)
- [11] Step-down konvertor. *Láskakit* [online]. [cit. 2023-01-01]. Dostupné z: <https://www.laskakit.cz/step-down-menice/>

# SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

## Zkratky:

FEKT	Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
VUT	Vysoké učení technické v Brně
SPDIF	Sony/Philips Digital InterFace
LED	Elektroluminiscenční dioda
SPI	Sériové periferní rozhraní
I <sup>2</sup> C	Inter-Integrated Circuit (I-squared-C)
CD	Kompaktní disk
AES3	Pokročilý standard šifrování
PCM	Pulzně kódová modulace
PLL	Fázově uzamčená smyčka
LCD	Display z tekutých krystalů
CM	Běžný režim
LF	Smyčkový filtr
DPS	Deska plošného spoje
PWM	Pulzně šířková modulace
V <sub>cc</sub>	Napájecí napětí
GND	Zem
V <sub>out</sub>	Výstupní napětí

## Symboly:

$U$	napětí	(V)
$t$	perioda (čas)	(ns)
$I$	proud	(mA)
$F_s$	vzorkovací frekvence	(kHz)
$F$	frekvence	(MHz)

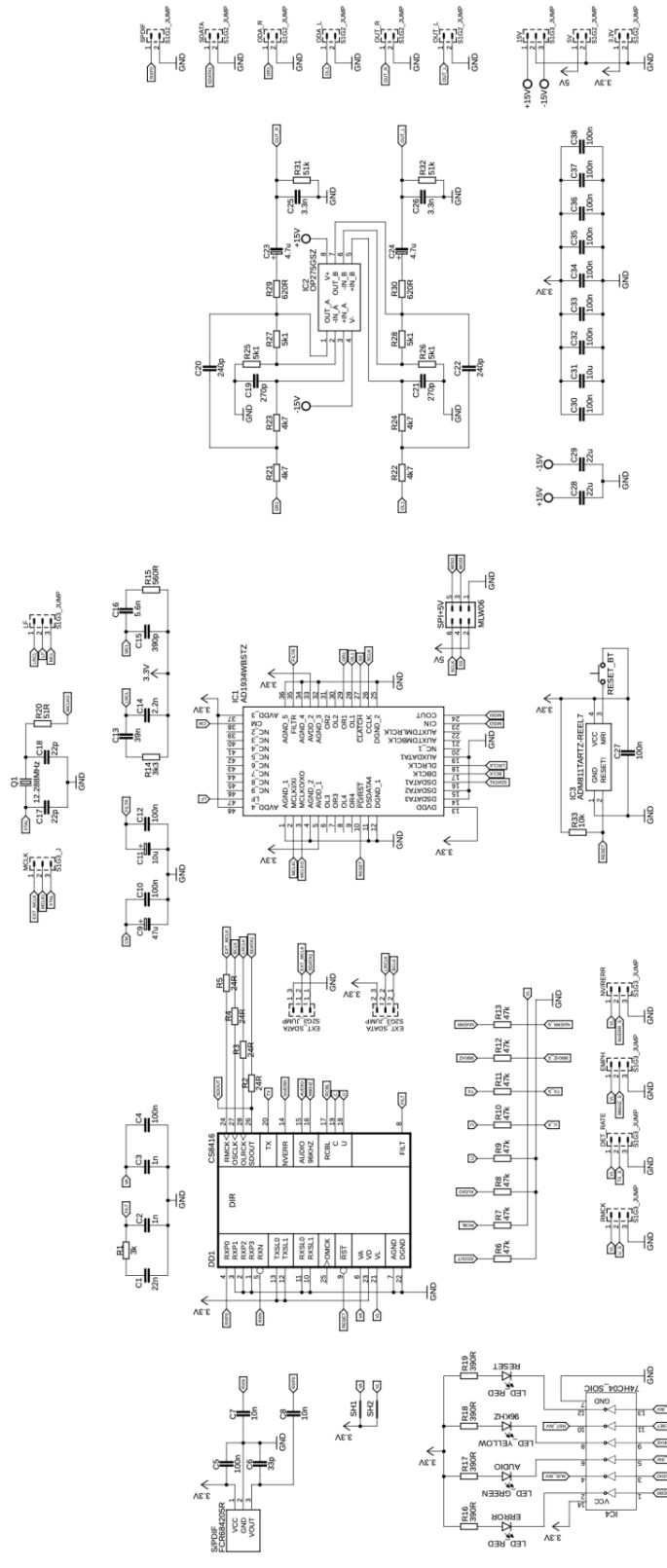
# SEZNAM PŘÍLOH

<b>PŘÍLOHA A - SCHÉMATA ZAPOJENÍ.....</b>	<b>71</b>
A.1 SCHÉMA ZAPOJENÍ D/A PŘEVODNÍKU.....	71
A.2 SCHÉMA ZAPOJENÍ NAPÁJECÍ ČÁSTI .....	72
A.3 SCHÉMA ZAPOJENÍ OVLÁDACÍ ČÁSTI.....	73
<b>PŘÍLOHA B - SEZNAMY SOUČÁSTEK.....</b>	<b>74</b>
B.1 REZISTORY – D/A.....	74
B.2 KONDENZÁTORY – D/A .....	75
B.3 OSTATNÍ – D/A.....	76
B.4 REZISTORY – NAPÁJECÍ ČÁST .....	77
B.5 KONDENZÁTORY – NAPÁJECÍ ČÁST .....	77
B.6 OSTATNÍ – NAPÁJECÍ ČÁST .....	78
B.7 SOUČÁSTKY PRO OVLÁDACÍ ČÁST .....	78
<b>PŘÍLOHA C - DESKY PLOŠNÉHO SPOJE.....</b>	<b>79</b>
C.1 DESKA D/A PŘEVODNÍKU – TOP.....	79
C.2 DESKA D/A PŘEVODNÍKU – BOTTOM .....	80
C.3 DESKA NAPÁJECÍ ČÁSTI – TOP .....	81
C.4 DESKA NAPÁJECÍ ČÁSTI – BOTTOM.....	82
C.5 DESKA OVLÁDACÍ ČÁSTI.....	83
<b>PŘÍLOHA D - OSAZOVACÍ PLÁNY .....</b>	<b>84</b>
D.1 OSAZOVACÍ PLÁN D/A PŘEVODNÍKU .....	84
D.2 OSAZOVACÍ PLÁN NAPÁJECÍ ČÁSTI .....	85
D.3 OSAZOVACÍ PLÁN OVLÁDACÍ ČÁSTI.....	86
<b>PŘÍLOHA E - FOTODOKUMENTACE .....</b>	<b>87</b>
E.1 DESKA D/A PŘEVODNÍKU Z JLCPCB .....	87
E.2 OSAZENÁ DESKA D/A PŘEVODNÍKU .....	87
E.3 DESKA NAPÁJECÍ ČÁSTI Z JLCPCB .....	88
E.4 OSAZENÁ DESKA NAPÁJECÍ ČÁSTI.....	88
E.5 DESKA OVLÁDACÍ ČÁSTI Z JLCPCB.....	89
E.6 OSAZENÁ DESKA OVLÁDACÍ ČÁSTI – TOP.....	89
E.7 OSAZENÁ DESKA OVLÁDACÍ ČÁSTI – BOT.....	89
E.8 KRABÍČKA D/A PŘEVODNÍK – BOČNÍ PANEL.....	90
E.9 KRABÍČKA D/A PŘEVODNÍK – SPI KONEKTOR.....	90
E.10 KRABÍČKA D/A PŘEVODNÍK – NAPÁJENÍ .....	91
E.11 KRABÍČKA NA D/A PŘEVODNÍK – ZE VNITŘ.....	91
E.12 TLAČÍTKA PRO LCD DISPLEJ – TOP .....	92
E.13 TLAČÍTKA PRO LCD DISPLEJ – BOT .....	92
E.14 LCD DISPLEJ S TLAČÍTKY – PŘÍKLAD MENU .....	92
E.15 ARDUINO S D/A PŘEVODNÍKEM.....	93
E.16 MĚŘÍCÍ PRACOVISTĚ PRO LABORATORNÍ ÚLOHU .....	93
E.17 DOMÁCÍ MĚŘENÍ.....	94
E.18 DOMÁCÍ MĚŘENÍ 2 .....	94

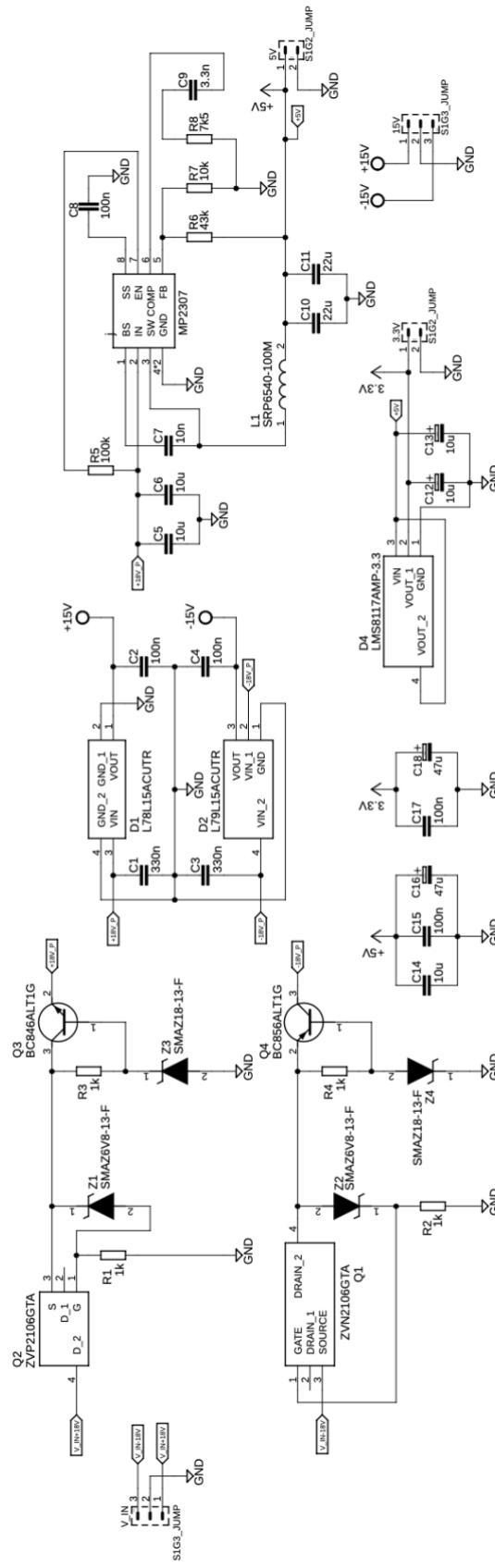


# Příloha A - Schémata zapojení

## A.1 Schéma zapojení D/A převodníku



## A.2 Schéma zapojení napájecí části







## Příloha B - Seznamy součástek

### B.1 Rezistory – D/A

Rezistory				
Označení	Popis	Hodnota	Napětí	Pouzdro
R1	Rezistor	3k	--	1206
R2	Rezistor	24R	--	1206
R3	Rezistor	24R	--	1206
R4	Rezistor	24R	--	1206
R5	Rezistor	24R	--	1206
R6	Rezistor	47k	--	1206
R7	Rezistor	47k	--	1206
R8	Rezistor	47k	--	1206
R9	Rezistor	47k	--	1206
R10	Rezistor	47k	--	1206
R11	Rezistor	47k	--	1206
R12	Rezistor	47k	--	1206
R13	Rezistor	47k	--	1206
R14	Rezistor	3k3	--	1206
R15	Rezistor	560R	--	1206
R16	Rezistor	390R	--	1206
R17	Rezistor	390R	--	1206
R18	Rezistor	390R	--	1206
R19	Rezistor	390R	--	1206
R20	Rezistor	51R	--	1206
R21	Rezistor	4k7	--	1206
R22	Rezistor	4k7	--	1206
R23	Rezistor	4k7	--	1206
R24	Rezistor	4k7	--	1206
R25	Rezistor	5k1	--	1206
R26	Rezistor	5k1	--	1206
R27	Rezistor	5k1	--	1206
R28	Rezistor	5k1	--	1206
R29	Rezistor	620R	--	1206
R30	Rezistor	620R	--	1206
R31	Rezistor	51k	--	1206
R32	Rezistor	51k	--	1206
R33	Rezistor	10k	--	1206

## B.2 Kondenzátory – D/A

Kondenzátory				
Označení	Popis	Hodnota	Napětí	Pouzdro
C1	Keramický	22n	10V	1206
C2	Keramický	1n	10V	1206
C3	Keramický	1n	10V	1206
C4	Keramický	100n	10V	1206
C5	Keramický	100n	10V	1206
C6	Keramický	33p	10V	1206
C7	Keramický	10n	10V	1206
C8	Keramický	10n	10V	1206
C9	Tantalový	47u	10V	3528
C10	Keramický	100n	10V	1206
C11	Tantalový	10u	10V	3528
C12	Keramický	100n	10V	1206
C13	Keramický	39n	10V	1206
C14	Keramický	2,2n	10V	1206
C15	Keramický	390p	10V	1206
C16	Keramický	5,6n	10V	1206
C17	Keramický	22p	10V	1206
C18	Keramický	22p	10V	1206
C19	Keramický	270p	10V	1206
C20	Keramický	240p	10V	1206
C21	Keramický	270p	10V	1206
C22	Keramický	240p	10V	1206
C23	Tantalový	4,7u	10V	3528
C24	Tantalový	4,7u	10V	3528
C25	Keramický	3,3n	10V	1206
C26	Keramický	3,3n	10V	1206
C27	Keramický	100n	10V	1206
C28	Keramický	22u	25V	1206
C29	Keramický	22u	25V	1206
C30	Keramický	100n	10V	1206
C31	Keramický	10u	10V	1206
C32	Keramický	100n	10V	1206
C33	Keramický	100n	10V	1206
C34	Keramický	100n	10V	1206
C35	Keramický	100n	10V	1206
C36	Keramický	100n	10V	1206
C37	Keramický	100n	10V	1206
C38	Keramický	100n	10V	1206

## B.3 Ostatní – D/A

Ostatní				
Označení	Popis	Hodnota	Napětí	Pouzdro
DD1	Převodník SPDIF	CS8416 Hardware	--	TSSOP28
IC1	D/A Převodník	AD1934WBSTZ	--	--
IC2	Operační zesilovač	OP275GSZ	--	SOIC127-8N
IC3	Reset obvod	ADM811TARTZ-REEL7	--	SOT-143
IC4	Invertor	74HC04	--	SOIC127-14N
ERROR	LED dioda	LED Red	--	1206
AUDIO	LED dioda	LED Green	--	1206
96KHZ	LED dioda	LED Yellow	--	1206
RESET	LED dioda	LED Red	--	1206
S/PDIF	Optický přijímač	FCR684205R	--	--
Q1	Krystal	12,288 MHz	--	SM49
RESET_BT	Button	PushButton Micro	--	--
SPI+5V	Konektor SPI	MLW06	--	MLW06G
S1G2	Jumper konektory	8x S1G2	--	S1G2_JUMP
S1G3	Jumper konektory	7x S1G3	--	S1G3_JUMP
S2G3	Jumper konektory	1x S2G3	--	S2G3_JUMP

## B.4 Rezistory – Napájecí část

Rezistory				
Označení	Popis	Hodnota	Napětí	Pouzdro
R1	Rezistor	1k	--	1206
R2	Rezistor	1k	--	1206
R3	Rezistor	1k	--	1206
R4	Rezistor	1k	--	1206
R5	Rezistor	100k	--	1206
R6	Rezistor	43k	--	1206
R7	Rezistor	10k	--	1206
R8	Rezistor	7k5	--	1206

## B.5 Kondenzátory – Napájecí část

Kondenzátory				
Označení	Popis	Hodnota	Napětí	Pouzdro
C1	Keramický	330n	25V	1206
C2	Keramický	100n	25V	1206
C3	Keramický	330n	25V	1206
C4	Keramický	100n	25V	1206
C5	Keramický	10u	25V	1206
C6	Keramický	10u	25V	1206
C7	Keramický	10n	10V	1206
C8	Keramický	100n	10V	1206
C9	Keramický	3,3n	10V	1206
C10	Keramický	22u	10V	1206
C11	Keramický	22u	10V	1206
C12	Tantalový	10u	10V	3528
C13	Tantalový	10u	10V	3528
C14	Keramický	10u	10V	1206
C15	Keramický	100n	10V	1206
C16	Tantalový	47u	10V	3528
C17	Keramický	100n	10V	1206
C18	Keramický	47u	10V	3528

## B.6 Ostatní – Napájecí část

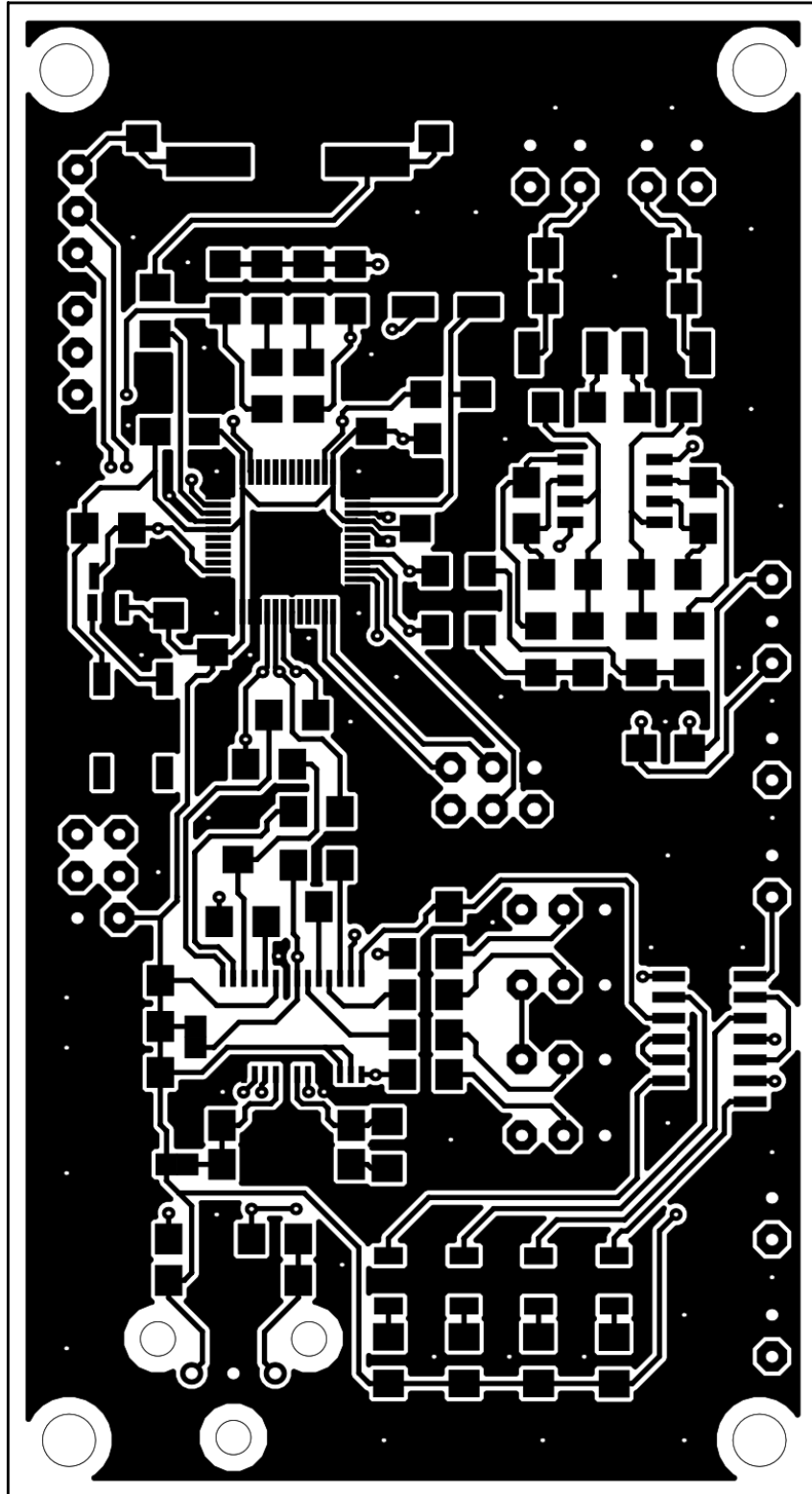
Ostatní				
Označení	Popis	Hodnota	Napětí	Pouzdro
D1	Stabilizátor +15 V	L78L15ACUTR	+15V	SOT-89
D2	Stabilizátor -15 V	L79L15ACUTR	-15V	SOT-89
D3	Step-down	MP2307 Step-down	--	SO8-TH
D4	Stabilizátor +3,3 V	LMS8117AMP-3.3	+3,3V	SOT230
Q1	MOSFET-N tranzistor	ZVN2106GTA	--	SOT230
Q2	MOSFET-P tranzistor	ZVP2106GTA	--	SOT230
Q3	Bipolar NPN	BC846ALT1G	--	SOT95
Q4	Bipolar PNP	BC856ALT1G	--	SOT95
L1	Výkonový induktor	SRP6540-100M	10uH/4A	--
Z1	Zenerova dioda	SMAZ6V8-13-F	6,8V/1W	DIOM5226
Z2	Zenerova dioda	SMAZ6V8-13-F	6,8V/1W	DIOM5226
Z3	Zenerova dioda	SMAZ18-13-F	18V/1W	DIOM5226
Z4	Zenerova dioda	SMAZ18-13-F	18V/1W	DIOM5226
S1G2	Jumper konektory	2x S1G2	--	S1G2_JUMP
S1G3	Jumper konektory	2x S1G3	--	S1G3_JUMP

## B.7 Součástky pro ovládací část

Arduino NANO	USB-C verze
LCD Display 2x16	Modrý, podsvícený
I <sup>2</sup> C Převodník	LCM1602
Tlačítko	4x PushButton SMD
S1G5	Jumper konektor
SPI+5V	MLW06

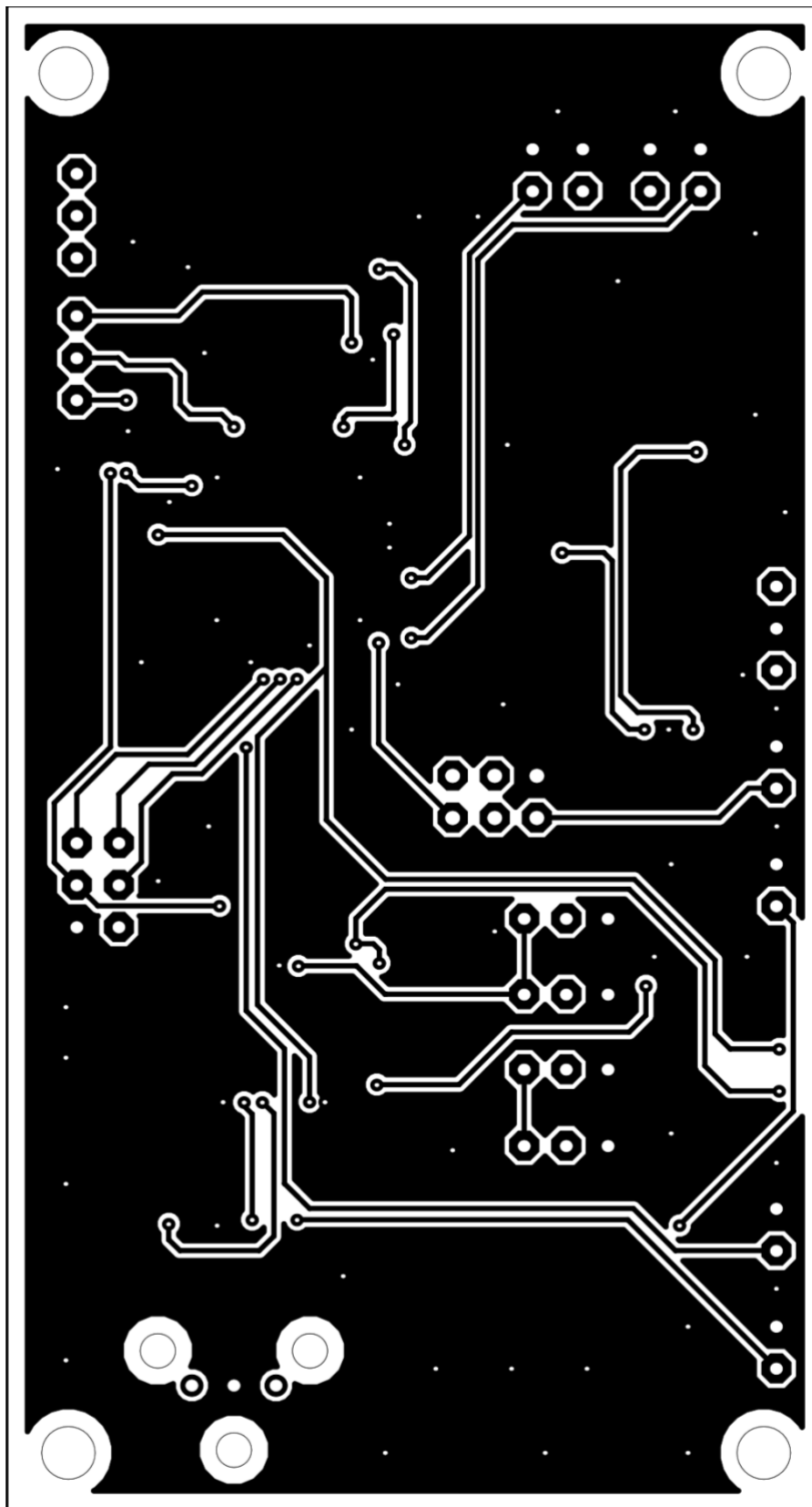
## Příloha C - Desky plošného spoje

### C.1 Deska D/A převodníku – Top



*Rozměry desky 90,93 x 49,28 [mm], měřítko M2:1*

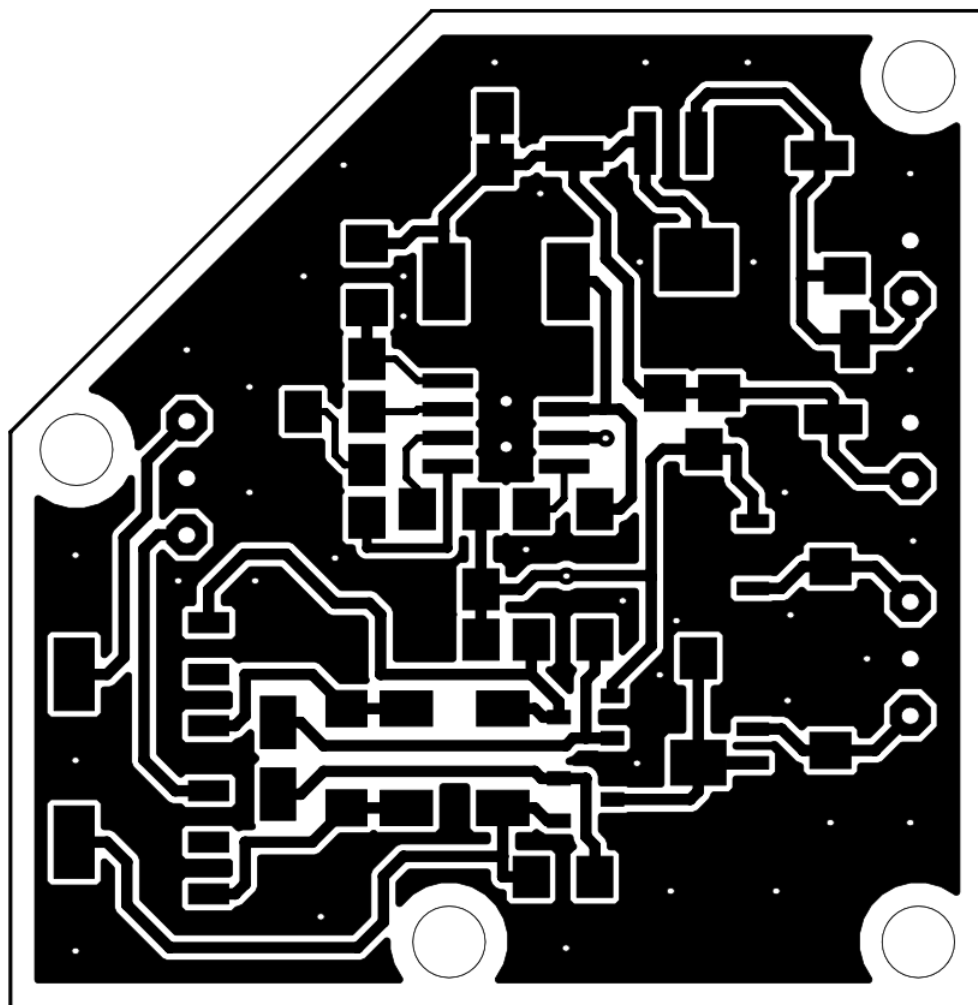
## C.2 Deska D/A převodníku – Bottom



*Rozměry desky 90,93 x 49,28 [mm], měřítko M2:1*

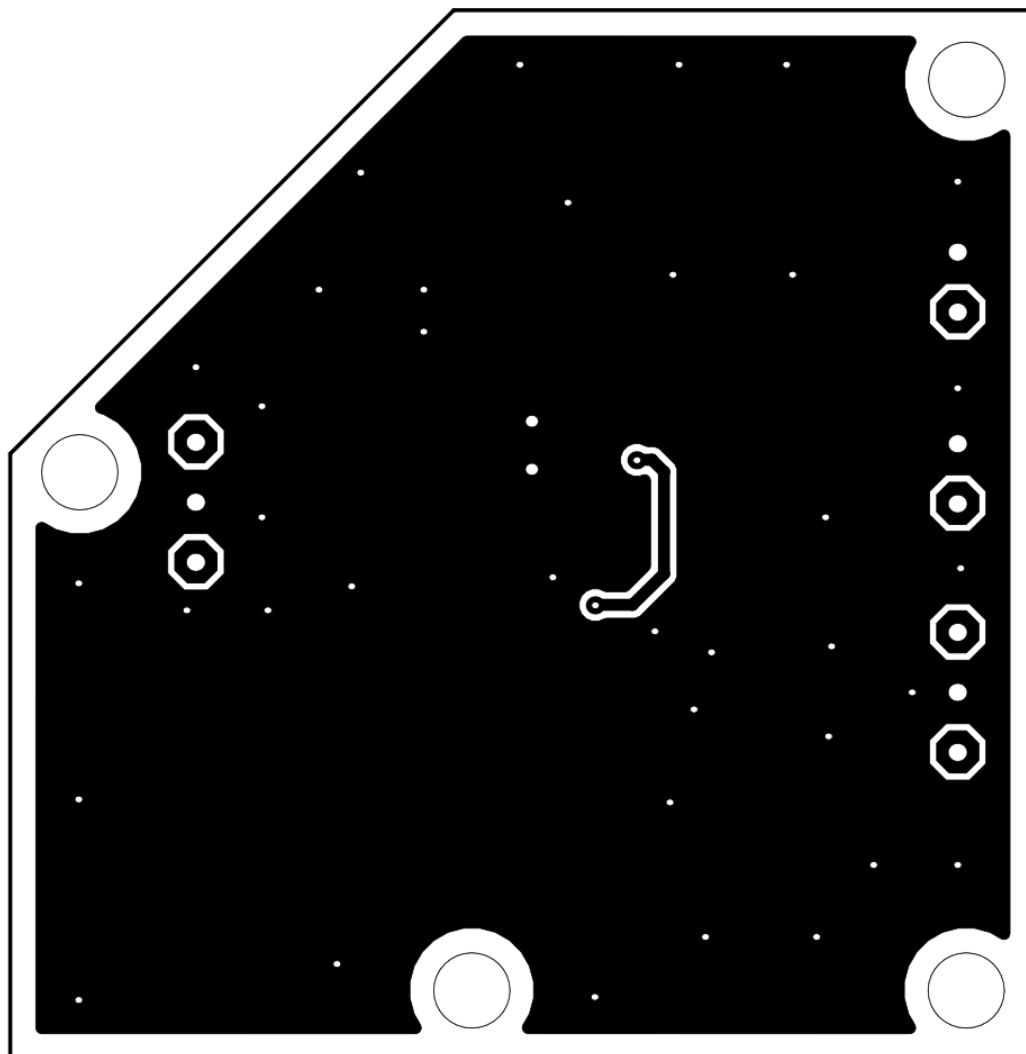


### C.3 Deska napájecí části – Top



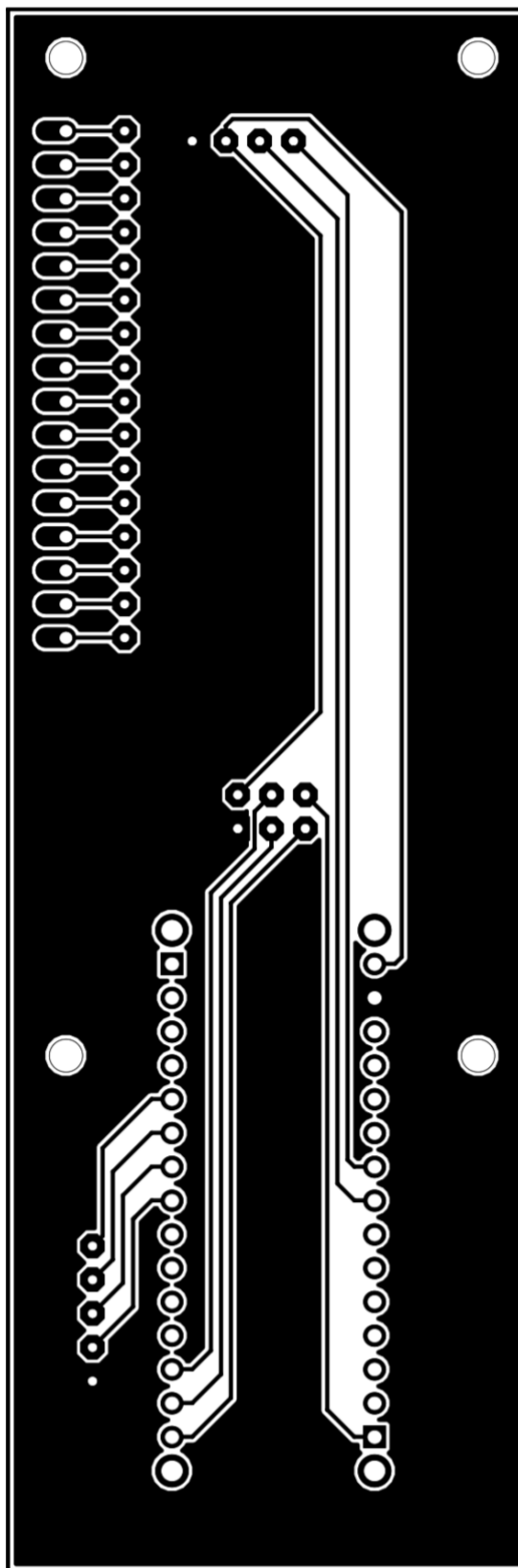
*Rozměry desky 43,43 x 44,45 [mm], měřítko M3:1*

## C.4 Deska napájecí části – Bottom



*Rozměry desky 43,43 x 44,45 [mm], měřítko M3:1*

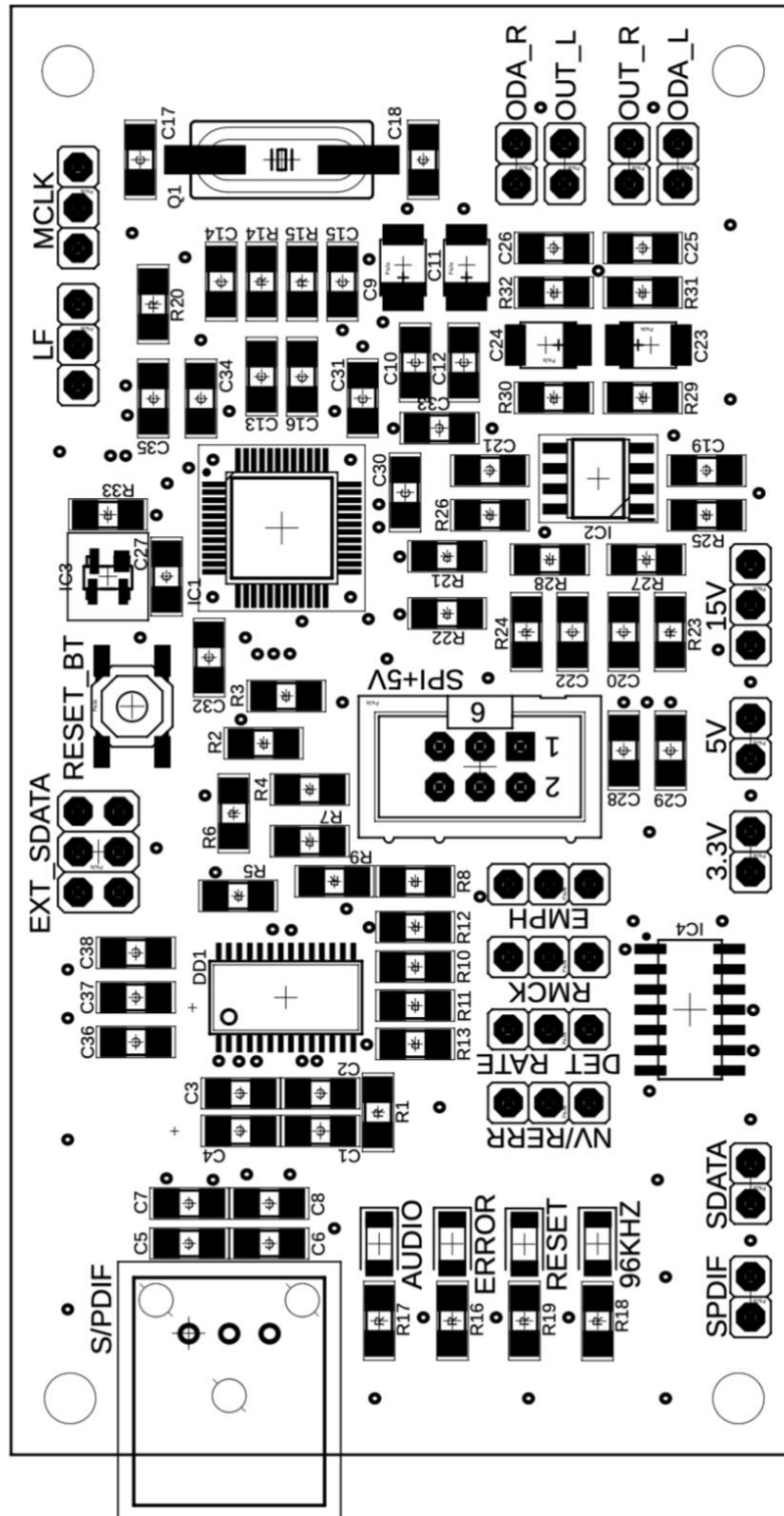
## C.5 Deska ovládací části



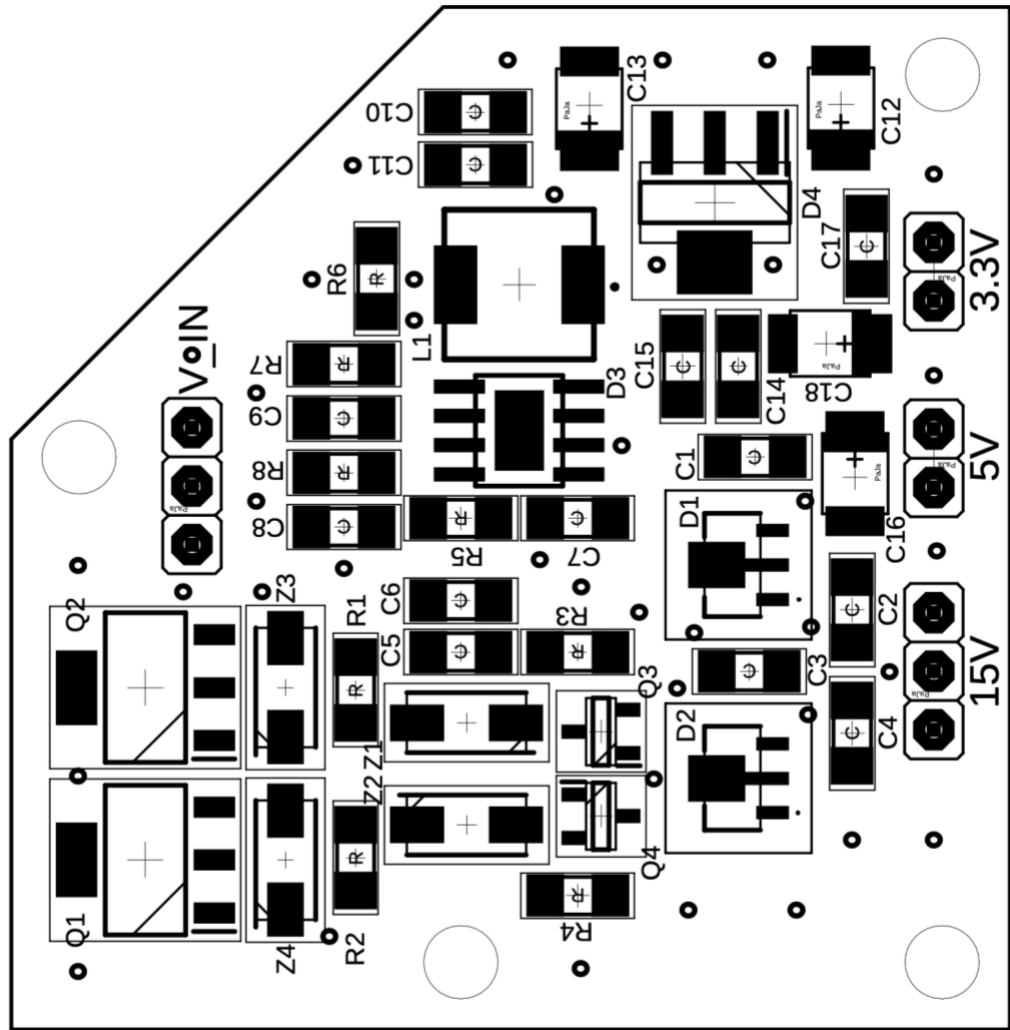
*Rozměry desky 117,48 x 38,99 [mm], měřítko M2:1*

# Příloha D - Osazovací plány

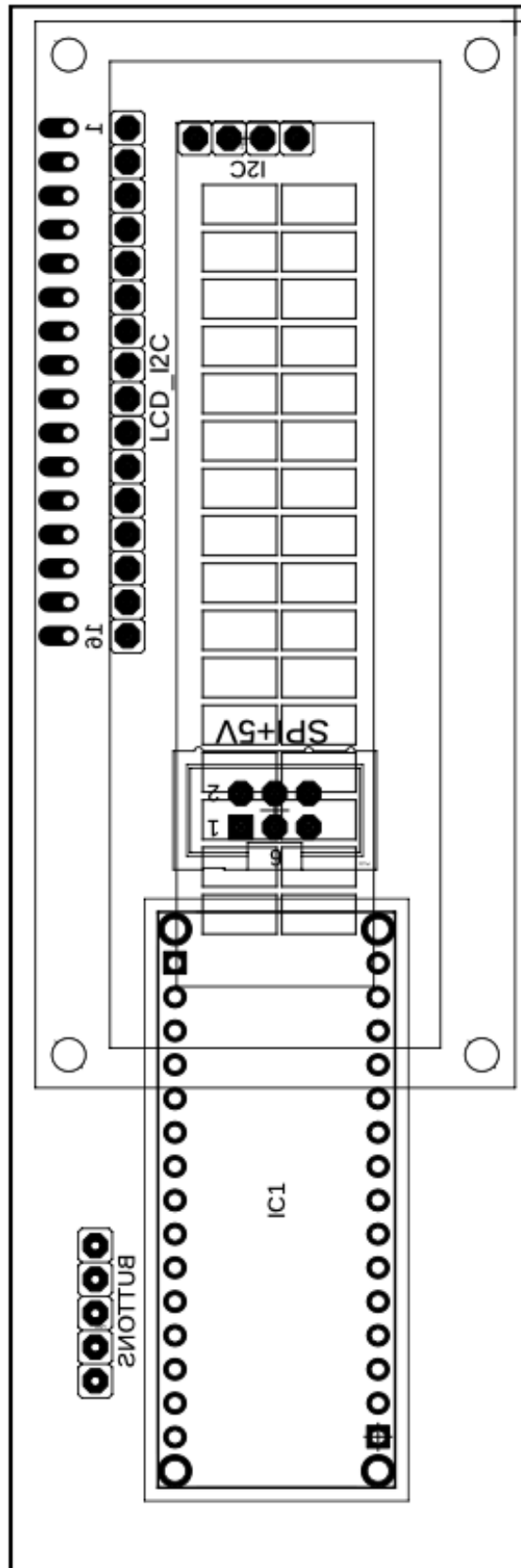
## D.1 Osazovací plán D/A převodníku



## D.2 Osazovací plán napájecí části

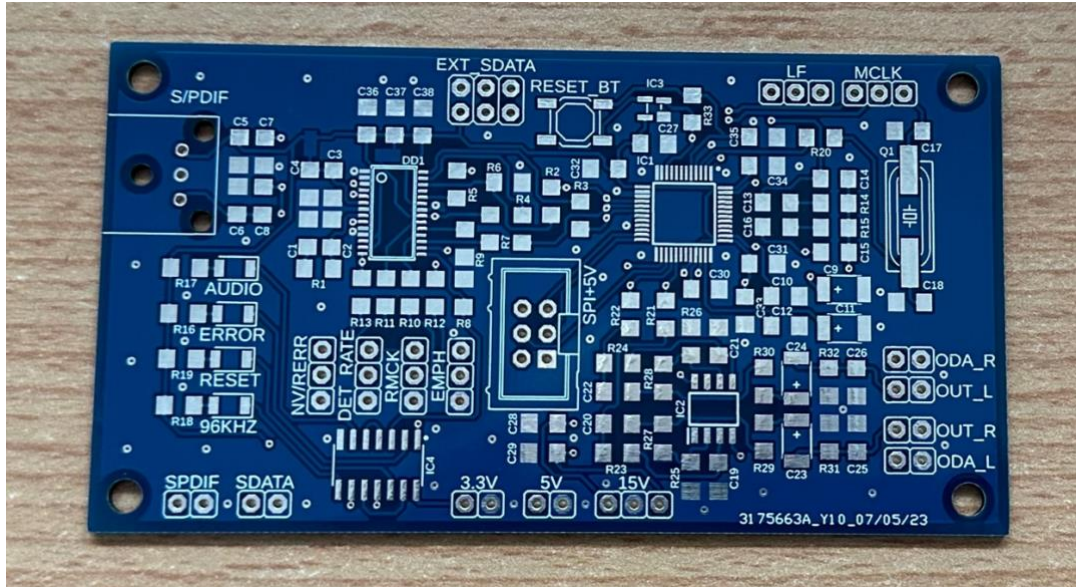


## D.3 Osazovací plán ovládací části

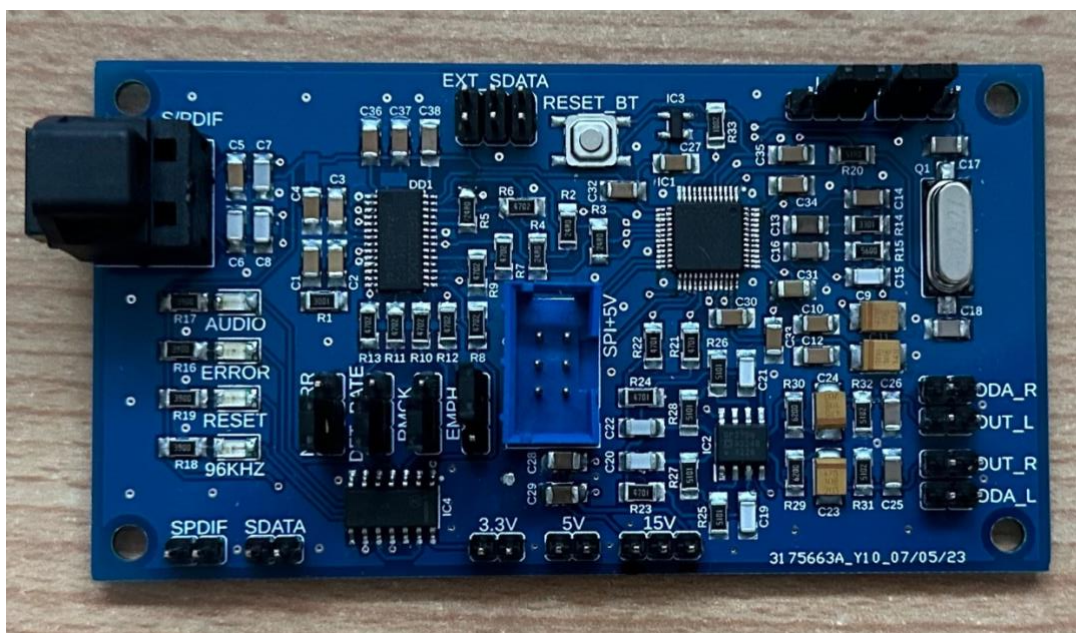


## Příloha E - Fotodokumentace

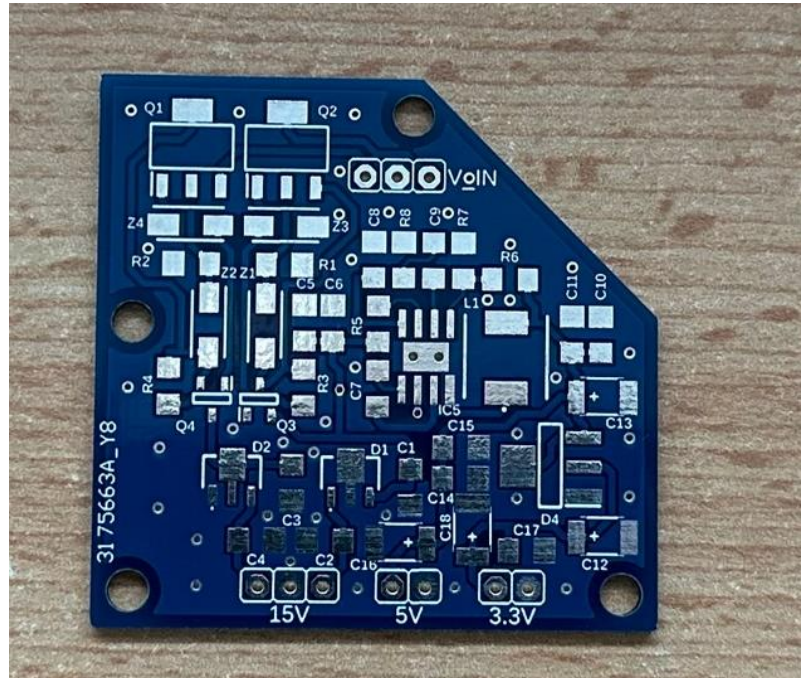
### E.1 Deska D/A převodníku z JLCPCB



### E.2 Osazená deska D/A převodníku



### E.3 Deska napájecí části z JLCPCB

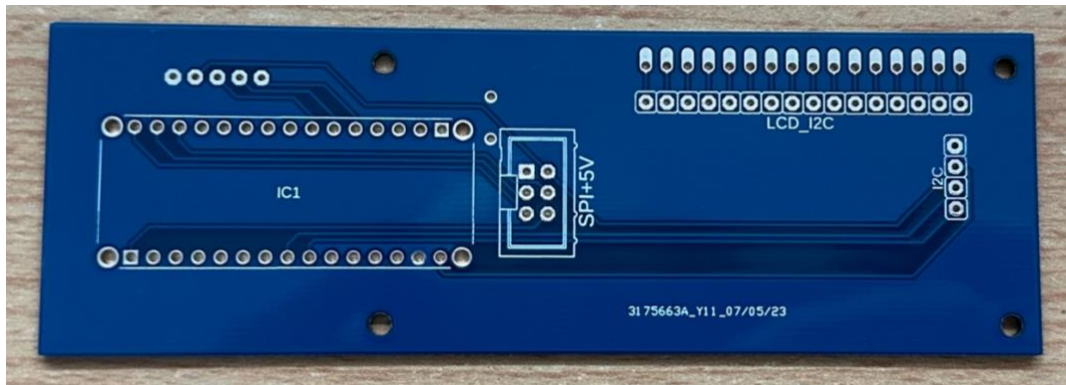


### E.4 Osazená deska napájecí části

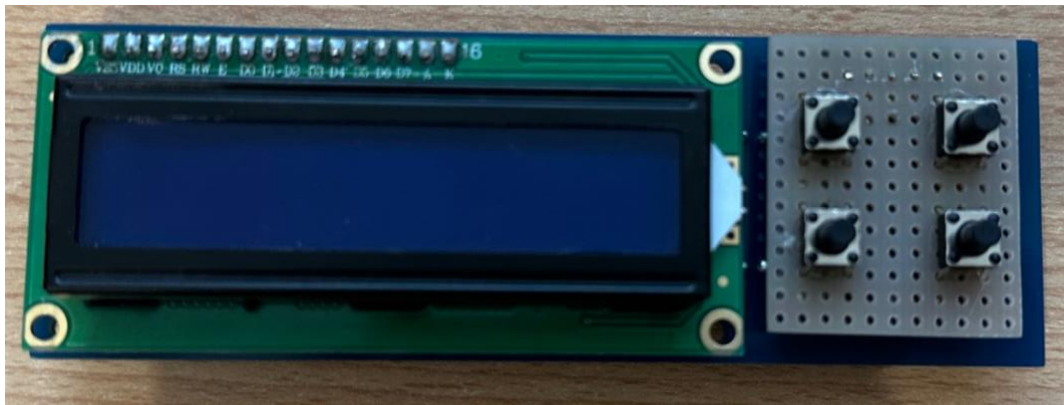




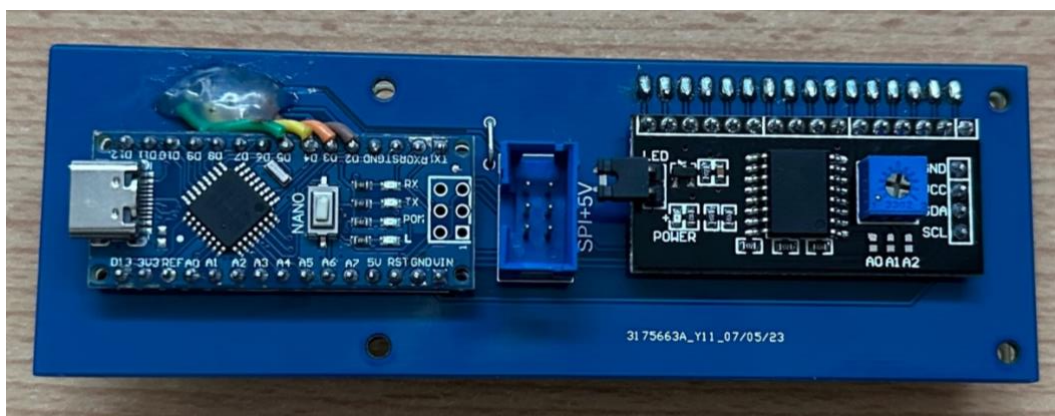
## E.5 Deska ovládací části z JLCPCB



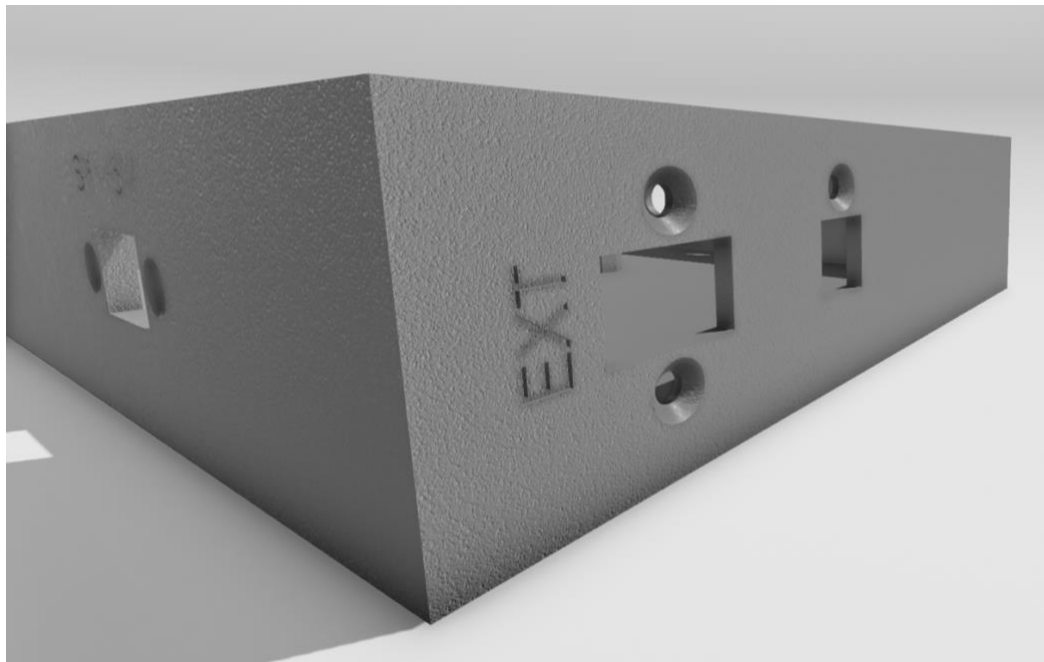
## E.6 Osazená deska ovládací části – Top



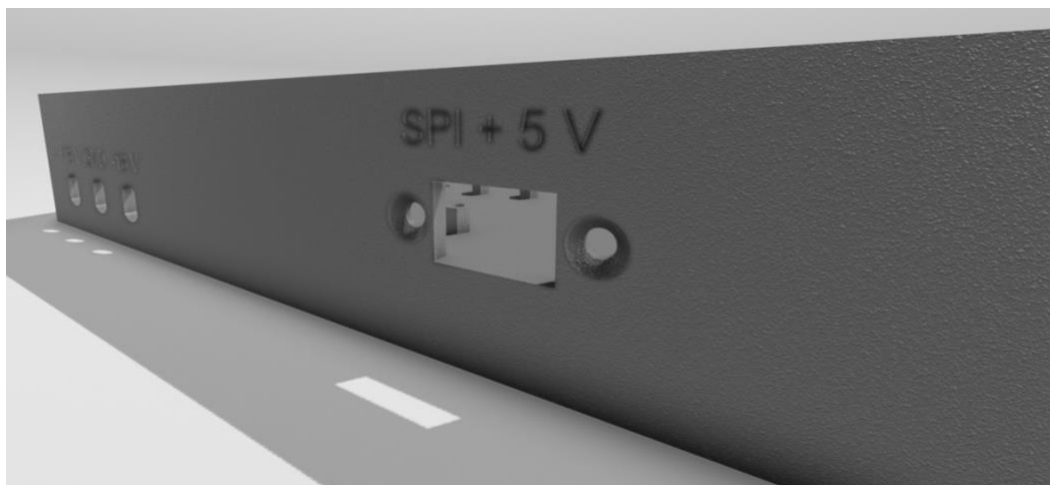
## E.7 Osazená deska ovládací části – Bot



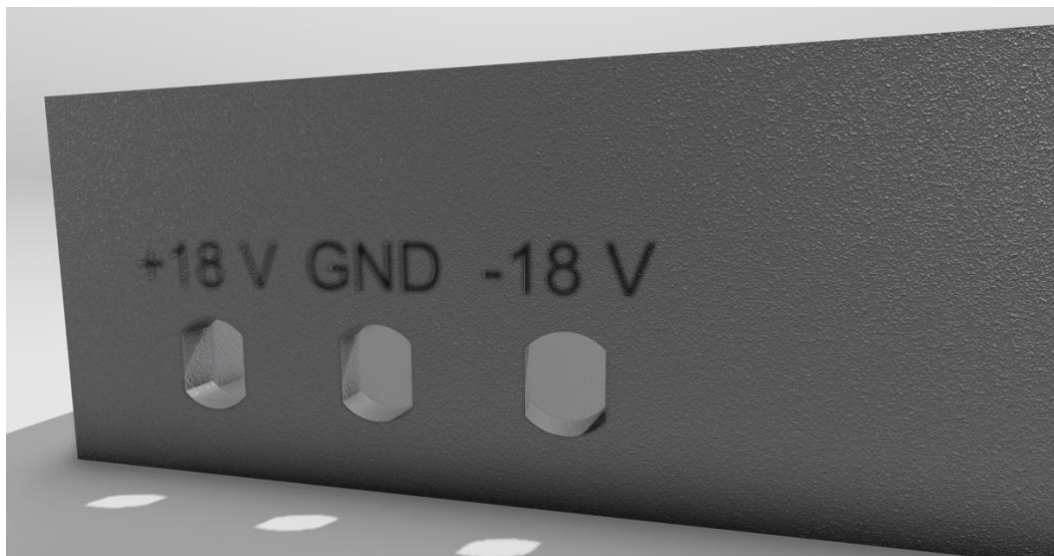
## E.8 Krabička D/A převodník – boční panel



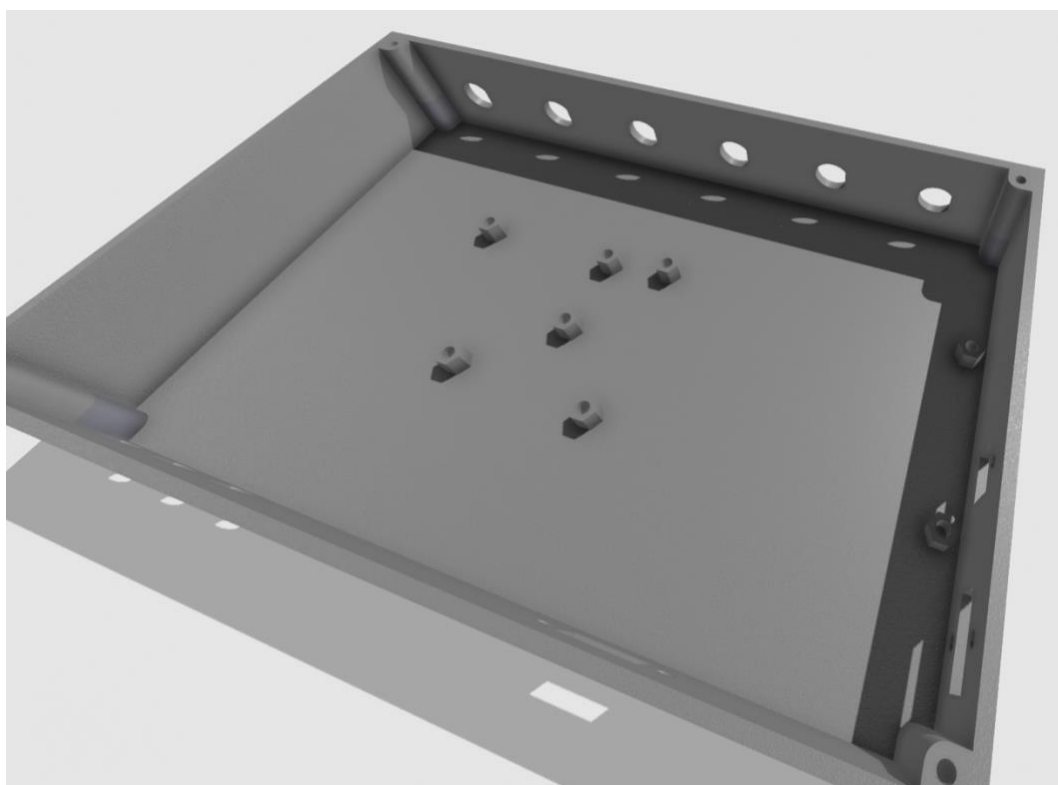
## E.9 Krabička D/A převodník – SPI konektor



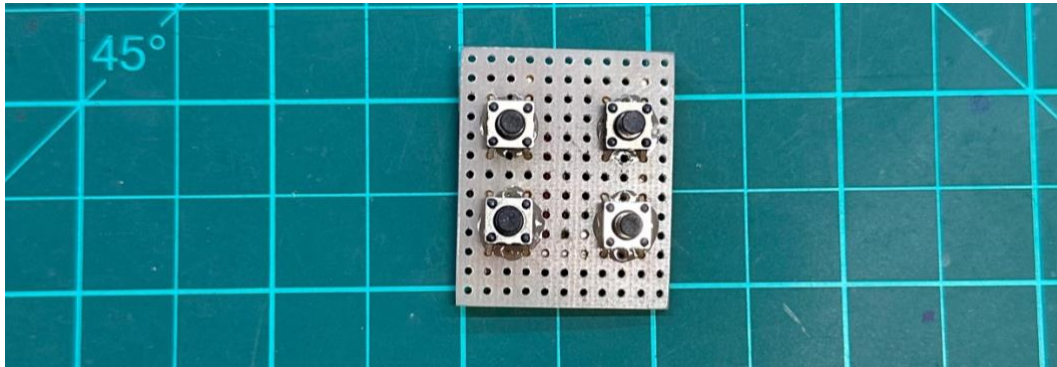
## E.10 Krabička D/A převodník – napájení



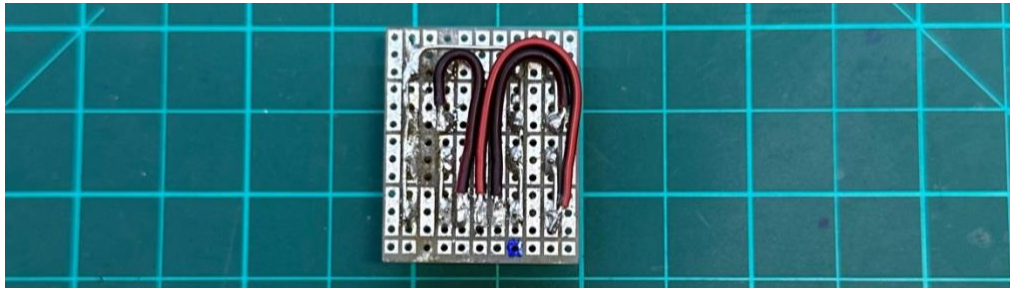
## E.11 Krabička na D/A převodník – zevnitř



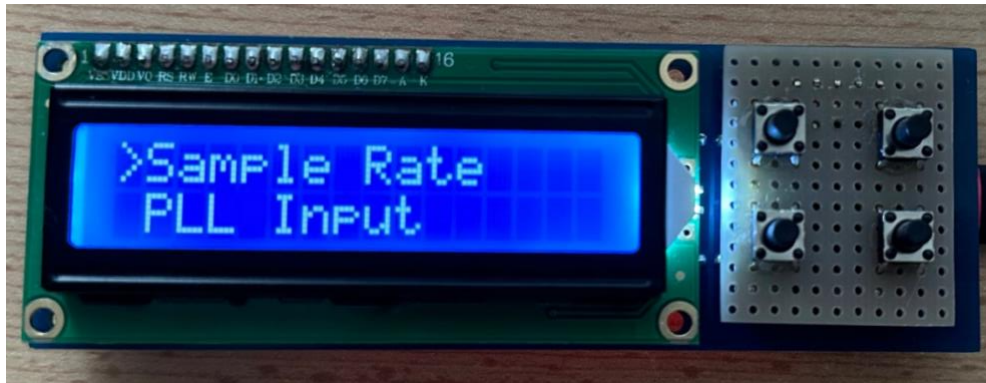
## E.12 Tlačítka pro LCD displej – Top



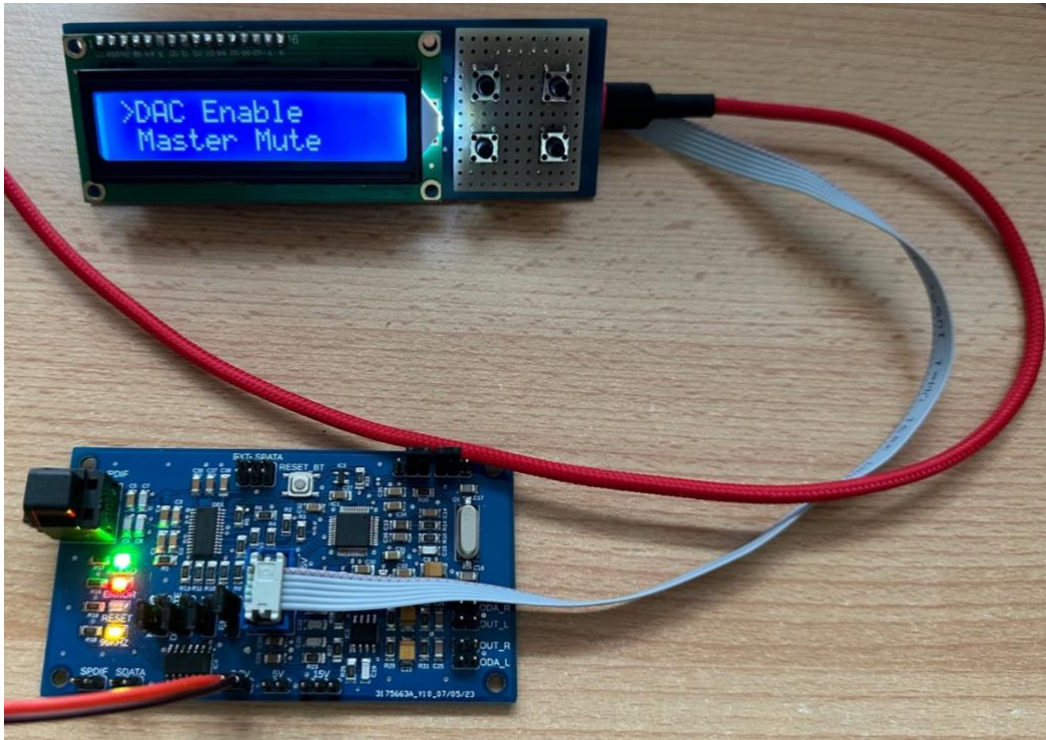
## E.13 Tlačítka pro LCD displej – Bot



## E.14 LCD displej s tlačítky – příklad menu



## E.15 Arduino s D/A převodníkem

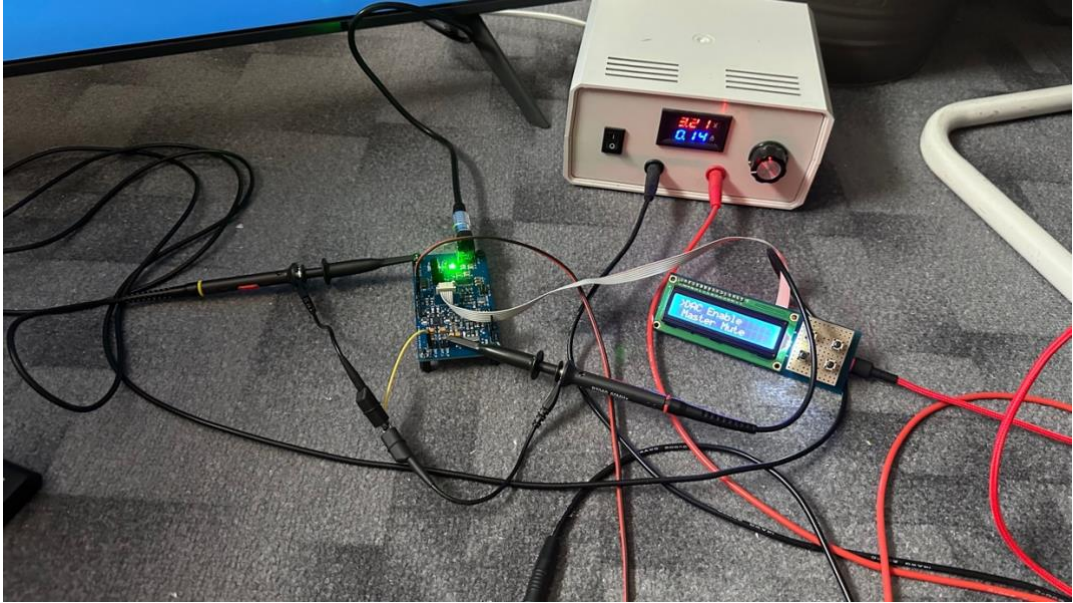


## E.16 Měřicí pracoviště pro laboratorní úlohu



*Pozn.: Pro měření nejsou potřeba oba zdroje, byli zde používány jen na experimentální měření*

## E.17 Domácí měření



## E.18 Domácí měření 2

