

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV POČÍTAČOVÝCH SYSTÉMŮ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY
DEPARTMENT OF COMPUTER SYSTEMS

HIFI D/A PŘEVODNÍK A SLUCHÁTKOVÝ ZESILOVAČ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. PAVEL DOLEŽAL

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV POČÍTAČOVÝCH SYSTÉMŮ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY
DEPARTMENT OF COMPUTER SYSTEMS

HIFI D/A PŘEVODNÍK A SLUCHÁTKOVÝ ZESILOVAČ

HIFI D/A CONVERTER AND HEADPHONE AMPLIFIER

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. PAVEL DOLEŽAL

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. VÁCLAV ŠIMEK

BRNO 2014

Zadání diplomové práce

Řešitel: **Doležal Pavel, Bc.**

Obor: Počítačové a vestavěné systémy

Téma: **HiFi DA převodník a sluchátkový zesilovač**

HiFi DA Converter with Integrated Headphones Amplifier

Kategorie: Vestavěné systémy

Pokyny:

1. Prostudujte protokoly pro digitální bezztrátový přenos zvuku. Zaměřte se na standardy SPDIF, Toslink a AES.
2. Seznamte se s příslušnými dekodéry, rodinou advanced-segment převodníků BurrBrown PCM179x a sběrnici I2S.
3. Zvolte (po dohodě s vedoucím) vhodný dekodér, řídicí mcu a navrhnete koncepci zařízení s ohledem na co možná nejvyšší kvalitu reprodukce.
4. Zabývejte se problematikou návrhu desek plošných spojů v návrhovém systému Eagle.
5. Zařízení realizujte včetně symetrického napájecího zdroje a proveďte implementaci obslužného firmware.
6. Demonstrujte funkčnost zařízení, dosažené parametry a možnosti dalšího rozšíření.

Literatura:

- Dle pokynů vedoucího.

Při obhajobě semestrální části diplomového projektu je požadováno:

- Splnění bodů 1 až 4 zadání.

Podrobné závazné pokyny pro vypracování diplomové práce naleznete na adrese

<http://www.fit.vutbr.cz/info/szz/>

Technická zpráva diplomové práce musí obsahovat formulaci cíle, charakteristiku současného stavu, teoretická a odborná východiska řešených problémů a specifikaci etap, které byly vyřešeny v rámci ročníkového a semestrálního projektu (30 až 40% celkového rozsahu technické zprávy).

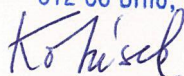
Student odevzdá v jednom výtisku technickou zprávu a v elektronické podobě zdrojový text technické zprávy, úplnou programovou dokumentaci a zdrojové texty programů. Informace v elektronické podobě budou uloženy na standardním nepřepisovatelném paměťovém médiu (CD-R, DVD-R, apod.), které bude vloženo do písemné zprávy tak, aby nemohlo dojít k jeho ztrátě při běžné manipulaci.

Vedoucí: **Šimek Václav, Ing.,** UPSY FIT VUT

Datum zadání: 1. listopadu 2013

Datum odevzdání: 28. května 2014

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta informačních technologií
Ústav počítačových systémů a sítí
612 66 Brno, Božetěchova 2



doc. Ing. Zdeněk Kotásek, CSc.
vedoucí ústavu

Abstrakt

Tato práce se zabývá návrhem a konstrukcí D/A převodníku a sluchátkového zesilovače pro stereofonní reprodukci ve třídě Hi-Fi. V úvodní kapitole je popsána problematika digitálního přenosu zvuku, dále je rozebrán návrh zařízení, volba vhodných komponent a komunikačních protokolů, návrh a výroba zařízení, oživení zapojení a programování oblužného firmware. Závěrečná kapitola se zabývá možnostmi rozšíření o HDMI vstupy vícekanálový zvuk.

Abstract

This thesis is dealing with a design and fabrication of D/A converter and headphone amplifier for stereo reproduction in Hi-Fi class. In opening chapter, overall problematics of digital audio signal distribution is discussed. Following chapters are dedicated to converter design, communication protocols, component selection, converter production, circuitry design and firmware programming. The final chapter is dealing with expansion options such as HDMI inputs and surround sound.

Klíčová slova

Audio, zesilovač, DAC, převodník, HiFi, S/PDIF, Toslink, AES, IEC 60958, IEC 61937, I²S, Bluetooth, STM32

Keywords

Audio, amplifier, DAC, converter, HiFi, S/PDIF, Toslink, AES, IEC 60958, IEC 61937, I²S, Bluetooth, STM32

Citace

Pavel Doležal: HiFi D/A převodník a sluchátkový zesilovač, diplomová práce, Brno, FIT VUT v Brně, 2014

HiFi D/A převodník a sluchátkový zesilovač

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením pana Václava Šimka.

.....
Pavel Doležal
27. května 2014

Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Václavu Šimkovi za vedení této práce.

© Pavel Doležal, 2014.

Tato práce vznikla jako školní dílo na Vysokém učení technickém v Brně, Fakultě informačních technologií. Práce je chráněna autorským zákonem a její užití bez udělení oprávnění autorem je nezákonné, s výjimkou zákonem definovaných případů.

Obsah

1 Úvod	5
2 Digitální přenos zvuku	6
2.1 Normy EIC60958 a EIC61937	6
2.2 Digitální nosiče	7
2.3 Pulzně kódová modulace – PCM	8
2.4 Nyquistův–Shannonův vzorkovací teorém	8
2.5 Delta-sigma modulace	9
2.6 Distribuce hodinového signálu	9
2.7 Jitter	10
2.8 Sběrnice I ² S	11
3 Koncepce převodníku	13
3.1 Vstupní obvody	14
3.2 Základní deska	15
3.2.1 Řídící mikrokontrolér	15
3.2.2 S/PDIF Dekodér	15
3.2.3 Bluetooth modul	16
3.2.4 Konfigurační konzole	17
3.2.5 LCD displej	17
3.3 Ovládací prvky	19
3.4 D/A Převodníky	20
3.5 Operační zesilovače	21
3.6 Modul linkového výstupu s PCM1794	21
3.7 Modul sluchátkového zesilovače s PCM1792	22
3.8 Napájecí zdroj	23
3.8.1 Princip činnosti	24
4 Návrh software	25
4.1 Použité programové vybavení	25
4.1.1 Keil μ Vision	25
4.1.2 ST-LINK utility	25
4.1.3 ST MicroXplorer	25
4.2 Standardní knihovna periférií STM32	27
4.2.1 Popis konfigurace pomocí standardní knihovny	27
4.3 Návrh aplikace	28
4.3.1 Komunikace s bluetooth modulem	28
4.3.2 Komunikace s LCD displejem	30

4.3.3	Nastavení parametrů převodníků	30
4.3.4	Komunikace s dekodérem	31
5	Oživení zařízení	33
5.1	Základní deska	33
5.1.1	Osazení základní desky	33
5.1.2	Navázání komunikace s mikrokontrolérem	34
5.1.3	Naprogramování mikrokontroléru	35
5.2	Modul linkového výstupu s PCM1794	35
5.2.1	Osazení modulu	36
5.2.2	Oživení	36
5.3	Modul linkového výstupu s PCM1792	38
5.3.1	Pájení pouzdra PowerPAD	38
5.3.2	Osazení modulu	38
5.4	Napájecí zdroj	39
5.4.1	Osazení desky napájecího zdroje	39
5.4.2	Zátěžový test	40
6	Závěr	41
A	Obsah CD	46
B	Schémata	47
B.1	Základní deska	48
B.2	Modul sluchátkového zesilovače s PCM1792	50
B.3	Modul linkového výstupu s PCM1794	52
B.4	Napájecí zdroj	54
C	Finální vzhled zařízení	56

Seznam obrázků

2.1	Konkureční digitální kazety DCC a R-DAT.	7
2.2	Porovnání lineární a nelineární PCM modulace.	8
2.3	Sinusové signály o frekvencích $1/2f_s$, $1/4f_s$, $1/8f_s$ a $1/16f_s$	9
2.4	Diferenciální Manchesterké kódování, převzato z [26].	10
2.5	Datové a řídicí signály sběrnice I ² S, převzato z [26].	11
2.6	Blokové schéma sběrnice I ² S v převodníku, převzato z [26].	12
3.1	Blokové schéma navrženého převodníku.	13
3.2	Přijímač vstupního signálu uvnitř dekodéru CS8416, převzato z [14].	14
3.3	Doporučená zapojení vstupního obvodu, převzato z [14].	15
3.4	Přiřazení pinů řídicího mikrokontroléru.	16
3.5	Blokové schéma přijímače Cirrus Logic CS8416, převzato z [14].	16
3.6	Zapojení pinů bluetooth modulu HC-05.	17
3.7	Konfigurační bluetooth konzole.	18
3.8	Připojení torza telefonu k logickému analyzátoru.	18
3.9	Analýza komunikačního protokolu LCD displeje.	19
3.10	Ošetření zákmitů rotačních enkodérů, převzato z letáku firmy Bourns.	20
3.11	Celkové harmonické zkreslení, převzato z [6], [21], [5].	21
3.12	Zapojení analogové části linkového výstupu.	22
3.13	Zapojení analogové části sluchátkového zesilovače.	23
3.14	Zapojení jedné větve napájecího zdroje.	24
4.1	Vývojové prostředí prostředí Keil μ Vision.	26
4.2	Programovací utilita ST-LINK.	26
4.3	Prostřední programu ST MicroXplorer.	27
4.4	Příklad konfigurace periferie pomocí standardní knihovny.	29
5.1	Komponenty filtru fázového závěsu a doporučený layout PCB, převzato z [14].	34
5.2	Osazená základní deska převodníku.	35
5.3	Osazený modul linkového výstupu.	36
5.4	Hrot z měděného hranolu, pouzdro PowerPAD a nastavení teploty.	38
5.5	Osazený modul sluchátkového zesilovače.	39
5.6	Osazený zdroj napájení.	40
C.1	Výroba skříně pro převodník.	56
C.2	Celkový pohled na sestavu převodníku.	56

Seznam tabulek

2.1	Porovnání digitálních nosičů.	7
3.1	Inicializační sekvence příkazů pro LCD displej.	19
3.2	Přehled základních parametrů vybraných D/A převodníků.	20
3.3	Přehled základních parametrů operačních zesilovačů.	21
4.1	Konfigurace formátu vstupních dat pro PCM1794, převzato z [11].	31
4.2	Seznam konfiguračních registrů PCM1792, převzato z [10].	31
4.3	Seznam konfiguračních registrů CS8416, převzato z [14].	32
5.1	Doporučené materiály součástek fázového závěsu.	34
5.2	Zapojení rozhraní SWD mikrokontrolérů STM32.	35
B.1	Seznam součástek pro základní desku.	49
B.2	Seznam součástek pro modul s PCM1792.	51
B.3	Seznam součástek pro modul s PCM1794.	53
B.4	Seznam součástek pro napájecí zdroj.	55

Kapitola 1

Úvod

Příchod digitálních metod záznamu zvuku CD-DA a R-DAT v osmdesátých letech 20. století byl počátkem revoluce v uchovávání zvukových dat. U analogových systémů, ať už pracujících na principu mechanického či magnetického záznamu byla kvalita nahrávky i samotné reprodukce ovlivněna velkým množstvím faktorů. Od preciznosti výroby a jakosti materiálu nosiče, přes kvalitu snímače a konstrukce přehrávače, po těžko ovlivnitelné jevy jako kolísání způsobené odchylkami frekvence 50 Hz v rozvodné síti. Rovněž vystavení nahrávek vnějším vlivům, jejich přirozená degradace strárnutím či sebemenší znečištění měly přímý dopad na kvalitu reprodukce.

Digitální záznam tyto problémy zcela eliminuje. Pokud zdroj digitálních dat funguje bez chyb, je jediným prvkem určujícím kvalitu reprodukce digitálně-analogový převodník neboli DAC. Kvalitnímu a univerzálnímu převodníku je jedno, zda jsou data čtena z optického disku, magnetické pásky, počítače. Také zda se na vstup převodníku dostanou kabelem, optickým vláknem nebo bezdrátově. Kvalita a cena přehrávačů, která měla u analogového záznamu dramatický dopad na výslednou kvalitu reprodukce je u digitálního záznamu zcela irelevantní.

Přestože hudební CD jsou dnes, po více jak třech desetiletích na ústupu, formát dat a princip jejich přenosu se prakticky nezměnil. U kvalitních nahrávek, kterých stále není mnoho, pouze vzrostl počet bitů a vzorkovací frekvence. Teprve nedávno s příchodem formátu Blu-Ray se objevily nové bezdrátové formáty Dolby True HD a DTS-HD Master Audio, které se ovšem liší pouze schopností přenášet vícekanálový zvuk. Při stereo reprodukci není mezi nimi a digitálním výstupem 35 let starého CD přehrávače žádný rozdíl. Proto stavba kvalitního D/A převodníku dává smysl.

Následující kapitoly jsou věnovány vývoji a výrobě převodníku, od obecné problematiky při přenosu digitálního zvuku přes návrh jednotlivých částí, vývoj software až po vlastní zhotovení a oživení zařízení.

Kapitola 2

Digitální přenos zvuku

V této kapitole jsou vysvětleny základní pojmy související s digitálním přenosem zvuku jak mezi jednotlivými obvody, tak mezi celými zařízeními. Popsány jsou standardy AES/EBU jak pro profesionální, tak domácí použití, komunikační protokoly a principy jejich kódování. Dále jsou porovnány původní i současné digitální nosiče a jejich vlastnosti.

2.1 Normy IEC60958 a IEC61937

Nejrozšířenější standard pro digitální přenos zvuku je dnes definovaný normou IEC60958. Jde o běžně známé rozhraní ne vždy správně označované jako S/PDIF či Toslink. Norma obsahuje jak popis komunikačního protokolu, tak i elektrické a mechanické vlastnosti distribučních médií. Původní specifikace odráží technické parametry přehrávačů CD a DAT, tedy rozlišení 16 bitů a vzorkovací frekvence 44,1 nebo 48 kHz.

Rozdílné vzorkovací frekvence CD a DAT byly v době svého vzniku zvoleny záměrně s cílem znesnadnit přímé kopírování disků na pásky v nezměněné kvalitě. Kvůli zachování kompatibility s oběma technologiemi nemá protokol pevně definovanou přenosovou rychlost.

Aby bylo možné po jednom vodiči realizovat synchronní přenos dat, byl hodinový signál zakódován do dat pomocí diferenciálního Manchesterského kódování. Současná verze IEC 60958-2 z roku 2004 umožňuje po stejné lince bezztrátově přenášet dva kanály do rozlišení 24 bitů a vzorkovací frekvence 192 kHz.

Vícekanálový přenos zvuku AC-3 definuje norma IEC 61937. Protože šířka pásma není pro přenos prostorového zvuku dostatečná, je použito ztrátové komprese. Podobně jako u long play módu kazet DAT je použito nelineární PCM kódování. Maximální vzorkovací frekvence je 48 kHz. K doplnění chybějící informace se používá sčítání vzájemně posunutých kanálů. Konkrétní metody popisuje standard ATSC pro digitální kompresi audia [2].

2.2 Digitální nosiče

V průběhu posledních třech desetiletí vniklo několik významných typů datových nosičů pro digitální přenos zvuku. Protože optická mechanika kompaktního disku byla velmi drahá a výrobně náročná, objevily se záhy formáty DAT a DCC (na obrázku 2.1) využívající magnetického záznamu. V počátku lze o DAT mluvit jako o silném konkurentovi. Mechanika používá podobně jako videorekordéry šikmý zápis a rotační čtecí hlavu. Stejně jako CD má lineární PCM a navíc vyšší vzorkovací frekvenci díky které CD kvalitativně překonává. Naproti tomu DCC využívá standardní magnetofonovou mechaniku, běžnou čtecí hlavu (která ani nemusela být stereofonní) a kazety odlišené plechovou krytkou pásku podobně jako u 3,5" disket. Komprese je ztrátová, používá se nelineární verze PCM s rozlišením 12 bitů. DCC byla vyvinuta jako levný, masový formát kvalitativně horší než CD. Přesto hrozilo její masové rozšíření a dominance CD na trhu byla z velké části výsledkem intenzivního lobbingu výrobců.



Obrázek 2.1: Konkureční digitální kazety DCC a R-DAT.

S dalším „krokem zpět“ přichází v roce 1992 firma Sony když uvádí na trh MiniDisc. Výhodou je menší velikost a magneto-optický záznam díky kterému je možné na MD nahrávat. Média díky své velikosti bohužel nemají potřebnou kapacitu a záznam je komprimovaný v poměru 1:5 vlastní proprietární metodou ATRAC.

Nárůst kvality přichází až s formáty SA-CD, DVD-Audio a nově DXD. SA-CD je v mnoha ohledech revoluční. Může nést vícekanalový zvuk, používá Delta-Sigma modulaci která umožňuje věrnější kopírování originálního analogového signálu. Oproti CD je vzorkovací frekvence 64× vyšší. Kvůli zachování zpětné kompatibility a možnosti přehrávat SA-CD v běžném CD přehrávači jsou lisovaná média dvouvrstvá a pro přehrávání SA-CD záznamu je nutný speciální přehrávač osazený nejen delta-sigma převodníkem, ale i mechanikou schopnou přeostržit na druhou stopu. SA-CD se tak výrazněji rozšířilo jen mezi audiofilly, kteří jsou ochotni přehrávač zaplatit a kupovat drahá, malosériově vyráběná (a špatně kopírovatelná) média.

	CD-DA	R-DAT	DCC	MiniDisc	DSD (SACD)	DVD-A	DXD
Loseless	Ano	Ano	Ne	Ne	Ano	Ano	Ano
Modulace	PCM	PCM	PCM	PCM	Delta-Sigma	PCM	PCM
Kanálů	2	2	2	2	2 – 6	1 – 6	2
Bitů.	16	12 – 16	16	16	1	24	24
Vz. Frek.	44.1	32 – 48	32 – 48	–	2822,4	192	384

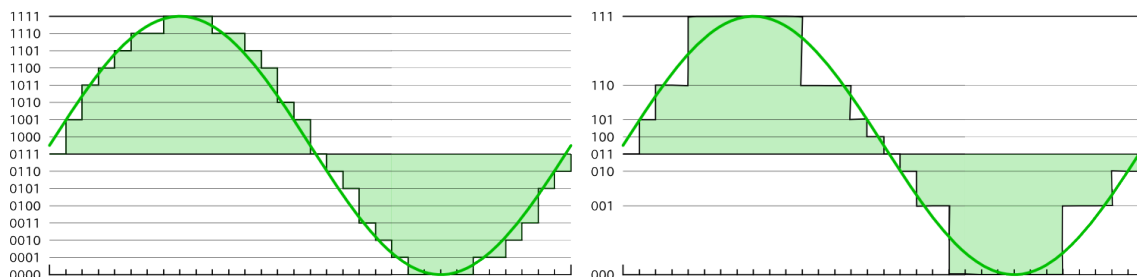
Tabulka 2.1: Porovnání digitálních nosičů.

V roce 2000 přichází formát DVD-Audio. Používá klasické DVD disky a PCM modulaci. Pro přehrávání ve vysoké kvalitě není na rozdíl od SA-CD nutný žádný speciální hardware. DVD-Audio přichází jako první s široce konfigurovatelnou podporou vícekanalového zvuku a je schopné bezztrátově zaznamenat až šest kanálů při rozlišení 24 bitů a vzorkovací frekvenci 192 kHz.

Posledním, v současnosti nejpokročilejším formátem, je Digital eXtreme Definition – DXD. Používá PCM modulaci, rozlišení 24 bitů a vzorkovací frekvenci 352,8 kHz ($8 \times 44,1$). Datový tok dosahuje 9 Mbit/s na kanál. Hlavní využití je pro mastering. Návrat k PCM je zdůvodněn mnohem snazší editací. Porovnání všech formátů je v tabulce 2.1.

2.3 Pulzně kódová modulace – PCM

Pulzně kódová modulace, na obrázku 2.2, je základní modulační metodou pro převod analogového zvukového signálu na digitální. Princip PCM spočívá v pravidelném odečítání analogové hodnoty signálu a jejím ukládání v digitální formě. Základními parametry jsou počet bitů A/D převodníku a vzorkovací frekvence se kterou jsou jednotlivé vzorky snímány. Funkce převodu analogové úrovně na její digitální obraz nemusí být vždy lineární. Úsporné varianty kopírují zvolenou exponenciálu pomocí po částech spojitě lineární funkce. Jednotlivé lineární úseky jsou označovány jako segmenty, celek se stále nazývá jako pulzně kódová modulace a původní lineární varianta pro srovnání přeznačena jako LPCM.



Obrázek 2.2: Porovnání lineární a nelineární PCM modulace.

Z principu činnosti je zřejmé, že výstupní signál je vždy oproti svému analogovému vzoru znehodnocen. Od 16 bitů výš kvalita výsledného po částech lineárního signálu (hlavně pro vysoké frekvence) závisí mnohem více na vzorkovací frekvenci než na rozlišení vzorků. Maximální frekvence odpovídá Shannonovu vzorkovacímu teorému a je rovna polovině vzorkovací frekvence.

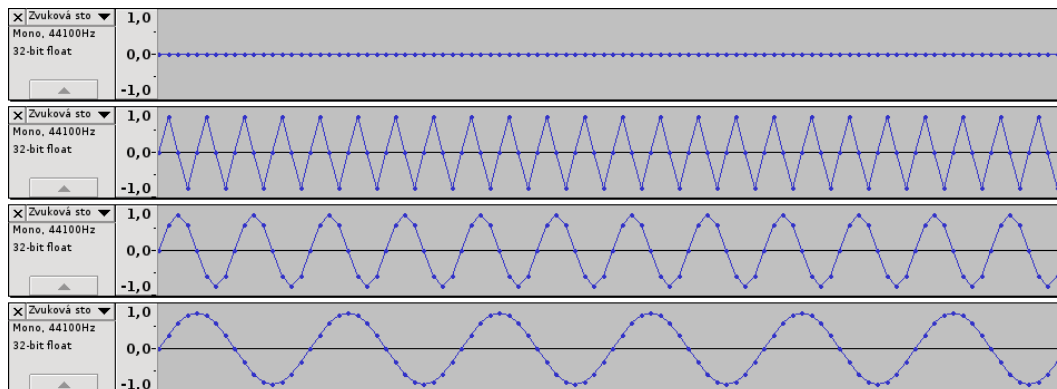
2.4 Nyquistův–Shannonův vzorkovací teorém

Shannonův, v audiotechnice mnohem častěji označovaný jako Nyquistův, teorém určuje minimální vzorkovací frekvenci vzhledem k nejvyšší frekvenci v záznamu tak, aby při rekonstrukci nedošlo k degradaci původního singálu. V plném znění:

„Přesná rekonstrukce spojitého, frekvenčně omezeného, signálu z jeho vzorků je možná tehdy, pokud byla vzorkovací frekvence vyšší než dvojnásobek nejvyšší harmonické složky vzorkovaného signálu.“

Teorém lze matematicky vyjádřit jako $f_{vz} \geq 2 \cdot f_s$ kde f_s je maximální frekvence ve vzorkovaném signálu a f_{vz} výsledná vzorkovací frekvence. Je zřejmé, že navozkovaním sinusového

signálu o frekvenci f_s vzorkovací frekvencí $f_{vz} = 2 \cdot f_s$ vznikne při zpětné rekonstrukci pilový sinál. V praxi se proto vypočtený dvojnásobek o malý přírůstek navyšuje. Překročení maximální vzorkovací frekvence lze také řešit instalací tzv. antialiasingového filtru který má za úkol odfiltrovat ze vstupního signálu vyšší frekvence než dovoluje zaznamenat nastavená vzorkovací frekvence.



Obrázek 2.3: Sinusové signály o frekvencích $1/2f_s$, $1/4f_s$, $1/8f_s$ a $1/16f_s$.

Na obrázku 2.3 je patrný problém při vzorkování nízkou vzorkovací frekvencí. První průběh ukazuje speciální případ, kdy pro polovinu vzorkovací frekvence sinusoida zcela zmizela. Je to proto, že generování i vzorkování začalo přesně ve stejný čas a ve chvíli odečtení vzorku signál vždy prochází nulou. Tento problém lze odstranit právě zmiňovaným „malým“ navýšením vzorkovací frekvence. Z druhého průběhu je patrné, že všechny frekvence $f > 1/4f_{vz}$ se velmi přibližují obdélníkovému až trojúhelníkovému průběhu, který je velmi pronikavý až nepříjemný. S klesající frekvencí je perioda sinusového signálu tvořena stále větším počtem vzorků, což umožňuje dostatečně „měkkou“ reprodukci.

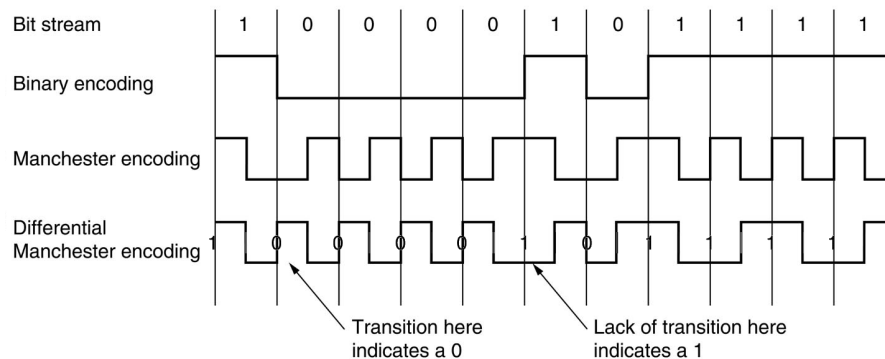
2.5 Delta-sigma modulace

Delta-sigma modulace je typ modulace, který je v audiotechnice spojován hlavně s SA-CD a standardem Direct stream digital neboli DSD. Princip činnosti je naprosto odlišný od PCM. Delta-sigma převodník je vždy pouze jedno-bitový, ale pracuje na mnohonásobně vyšší frekvenci. Pro zmíněné super audio CD je vzorkovací frekvence DS signálu 2,822 MHz což je $64\times$ více než u běžného CD. Střední hodnota výstupního signálu je dána poměrem hodnot 0 a 1 ve vstupních datech. Pro získání střední hodnoty slouží na výstupu delta-sigma převodníku komparátor a externí integrační článek.

2.6 Distribuce hodinového signálu

Protože zařízení využívající AES/EBU komunikují v synchronním režimu a zároveň jsou propojena pouze jedním datovým vodičem, je třeba zakódovat hodinový signál do přenášených dat. K tomu je použito diferenciálního Manchesterského kódování (na obrázku 2.4). Základním předpokladem pro zakódování do Manchesterského kódu je přítomnost synchronizovaného hodinového signálu o dvojnásobné frekvenci na straně vysílacího zařízení. Každý bit ve vstupním streamu je nahrazen vzorkem obsahujícím vzestupnou či sestupnou hranu. Diferenční varianta Manchesterského kódování se od běžné verze mírně liší. Zatímco běžná

varianta dekoduje binární hodnoty podle přítomnosti vzestupné či sestupné hrany v příslušném úseku signálu, u diferenciální varianty záleží pouze na přítomnosti či nepřítomnosti libovolné hrany.



Obrázek 2.4: Diferenciální Manchesterské kódování, převzato z [26].

To přináší kromě vyšší odolnosti proti rušení signálu i výhodu v podobě tolerance vůči připojení vstupního signálu s obrácenou fází. V takovém případě se pouze změni orientace hran, nikoli však jejich přítomnost. K synchronizaci hodin v přijímači je použit fázový závěs PLL, který je spouštěn přítomností hran v přijímaném signálu. Z principu činnosti je jasné že vstupní signál obsahuje vzestupnou či sestupnou hranu v každém bitu přenášeného signálu a synchronizační impuls tedy přichází nejdéle v každém druhém hodinovém taktu.

2.7 Jitter

Pojem jitter v informatice znamená rozsynchronizování hodinového signálu. S přihlédnutím k použitému typu kódování je jasné, že fázový závěs je synchronizován velmi často a velmi přesně. Ke vzniku chyby na straně přijímače by teoreticky mohlo dojít pouze v případě, že by se generovaný hodinový signál rozešel o více jak polovinu periody signálu za jediný takt. To je při reálné situaci nemyslitelné, správně fungující fázový závěs bude mít chybu vždy o několik řádů nižší.

Mezi posluchači se bohužel termínem jitter rozumí leccos. Od neschopnosti přehrávače dodat včas požadovaná data, což je nejčastěji způsobeno špatnou čitelností média, pohybem čtecí hlavy nebo v případě počítače vyprázdněním vyrovnávací paměti zvukové karty či pomalou obsluhou přerušeni ze strany operačního systému po nepřesné umístování vzorků na výstupu D/A převodníku vlivem skutečného posunu hlavního hodinového signálu sběrnice I²S. Problematika jitteru se stala temnou magií marketingových zaklánačů. Teoreticky může „jitter“ vznikat na těchto místech:

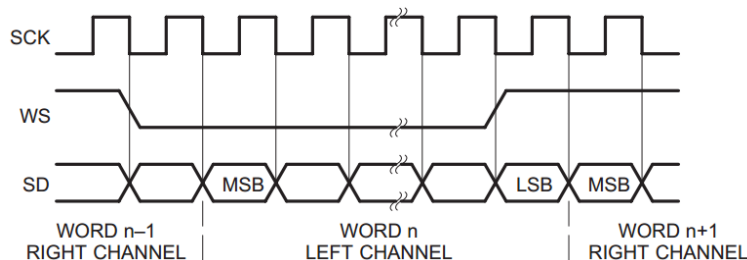
- **Na straně vysílače** nesprávným zakódováním hodinového signálu.
- **Rušením přenášeného signálu** kvůli vedení v blízkosti zdrojů EMI.
- **Indukčností linky** při použití nevhodného typu kabeláže.
- **Na straně přijímače** nesprávnou synchronizací fázového závěsu.
- **Časováním převodníku** kvůli nestabilnímu časování sběrnice I²S.

Uvažme standardní přenos stereo signálu o maximální možné vzorkovací frekvenci 192 kHz, který vzniká na straně vysílače nikoli sčítáním signálů, ale sekvenčním vysíláním dvojbitů 01 a 10, díky kterému (je-li co vysílat) nemůže dojít ke vzniku jitteru na straně vysílače. Signál je distribuován optickým vláknem a proto nemůže dojít k zarušení vlivem elektromagnetického záření ani deformaci signálu vlivem špatného impedančního přizpůsobení linky. Při 192 kHz je každou vteřinu odesláno 1000 audio bloků, což odpovídá přenosové rychlosti 12288 kb/s. Frekvence hodinového signálu bude v souladu s Manchesterským kódováním dvojnásobná. Výsledná frekvence signálu je necelých 25 MHz. Na straně přijímače díky nepřesnému vkládání vzorku na výstup zpoždění vznikat může. V katalogových listech jsou uvedeny hodnoty „výstupního jitteru“ dekodérů, konkrétně 50 ps u DIR9001 proti 150 ps u CS8416. Na internetových fórech je toto zpoždění zdrojem vášnivých diskuzí. Dobrá trvání jedné periody signálu o frekvenci 192 kHz je $0,52 \mu\text{s}$. Při jitteru až 150 ps to znamená chybu až 0,028 % pro každý ze 192000 vzorků za vteřinu. Aby byl tento rozdíl slyšitelný lidským uchem, musel by být jedinec schopen rozpoznat nesrovnalost při frekvenci 44,4 MHz o čemž lze zcela úspěšně pochybovat.

2.8 Sběrnice I²S

Sběrnice inter IC sound neboli I²S popisuje rozhraní vytvořené pro vzájemné předávání digitálních audio dat mezi integrovanými obvody jako jsou A/D a D/A převodníky, signálové procesory a filtry. Narozdíl od norem pro komunikaci mezi zařízeními je specifikace sběrnice I²S je volně dostupná.

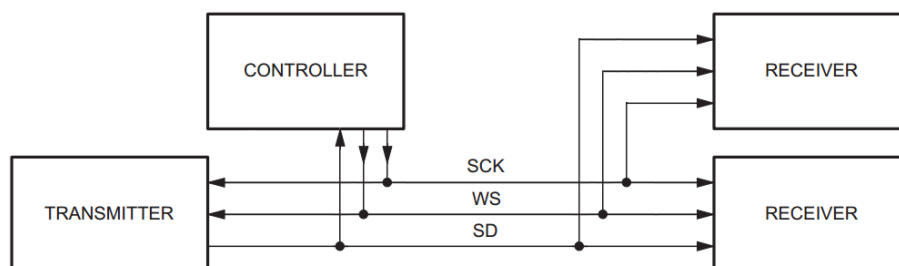
Po sběrnici lze přenášet pouze audio data. Maximem jsou dva kanály, přičemž počet bitů jednotlivých vzorků není omezen. Sběrnice je třívodičová, koncová zařízení mohou pracovat v režimu master nebo slave. U rozsáhlých systémů je možné jako master obvod použít mikrokontrolér. Master generuje hodinový signál SCK a výběr kanálu WS, které jsou distribuovány do všech obvodů v systému. Datový signál SD je vždy generován vysílačem, bez ohledu na to, zda je vysílač v režimu master či slave. Časový diagram je na obrázku 2.5.



Obrázek 2.5: Datové a řídicí signály sběrnice I²S, převzato z [26].

Data jsou přenášena v kódu dvojkového doplňku, MSB je odeslán jako první. Tím je elegantně zaručena kompatibilita mezi obvody pracujícími s různou bitovou přesností. Vysílač i přijímač interně fungují jako posuvné registry. Je-li odesláno více bitů než je schopen přijímač přijmout dojde k jejich zahození, v opačném případě přijímač chybějící počet LSB nastaví na nulu.

Sběrnice v konstruovaném převodníku propojuje čtyři zařízení. Digitální dekodér Cirrus Logic CS8416, dvojici převodníků Burr Brown PCM197x a I²S rozhraní řídicího mikrokontroléru. Zapojení počítá s provozem dekodéru CS8416 v režimu master a mikrokontrolérem naslouchajícím na sběrnici. V případě potřeby je možno dekodér odpojit a odesílat audio data z mikrokontroléru. Blokové schéma zapojení je na obrázku 2.6.

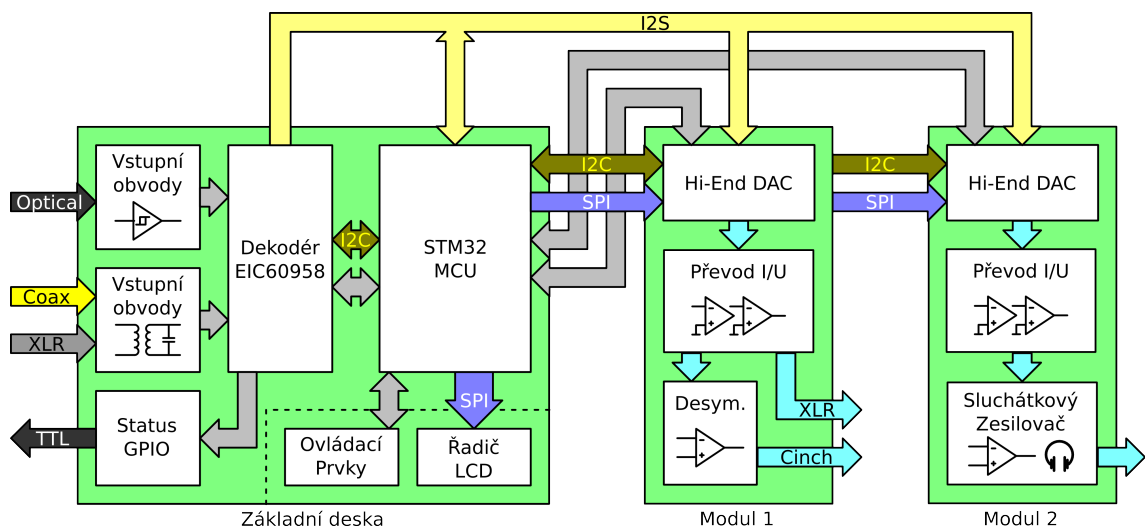


Obrázek 2.6: Blokové schéma sběrnice I²S v převodníku, převzato z [26].

Kapitola 3

Koncepce převodníku

Převodník je navržen jako modulární zařízení s ohledem na možnost výměny DACů a analogových komponent za kvalitnější. Skládá se ze základní desky obsahující dekodér, řídicí mikrokontrolér s ovládacími prvky a společnou elektroniku mimo napájecího zdroje. Do této desky je možno osadit dva identické moduly obsahující DAC a příslušné analogové obvody. Pro každý modul je k dispozici napájecí napětí +15/-15 V pro analogovou a 6,3 V pro digitální část, sběrnice I²S a signály pro ovládání modulu z mikrokontroléru. Ty jsou rozděleny na nezávislé piny GPIO a sběrnice SPI a I²C, které jsou sdílené pro oba moduly. Blokové schéma převodníku je na obrázku 3.1.



Obrázek 3.1: Blokové schéma navrženého převodníku.

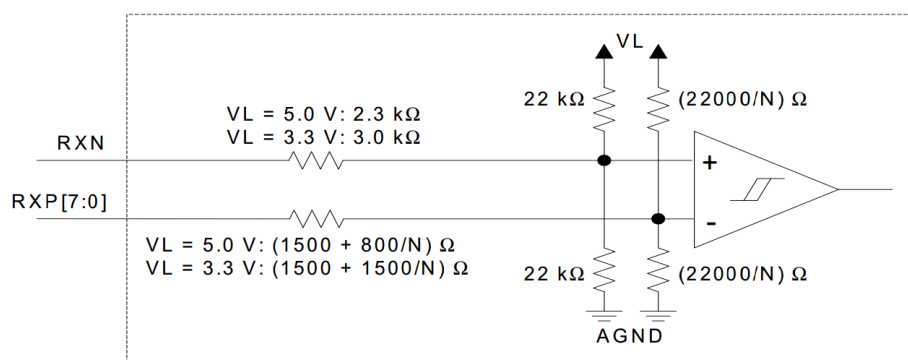
Přítomnost velkého množství signálů na konektorech pro moduly není pro činnost v projektovaném osazení obvody PCM 1792 a PCM 1794 nutná, nicméně umožňuje osadit převodník různými kombinacemi modulů s různými obvody podle potřeby. Protože některé obvody vyžadují vlastní stabilizátory a přesné napěťové reference, jsou všechny digitální části podle potřeby napájeny z vlastních nízkoúbytkových stabilizátorů LE50 a LE33, které jsou připojeny k 6,3 V větvi napájecího zdroje. Symetrické napájení pro analogové obvody je na modulech dostupné přímo.

3.1 Vstupní obvody

Elektrické vlastnosti a provedení kabelů pro propojení zařízení specifikuje norma EIC60958-4. Původním požadavkem byla možnost použít standardní $75\ \Omega$ kabely pro přenos videosignálu, nicméně v současné době jsou používány čtyři typy kabeláže.

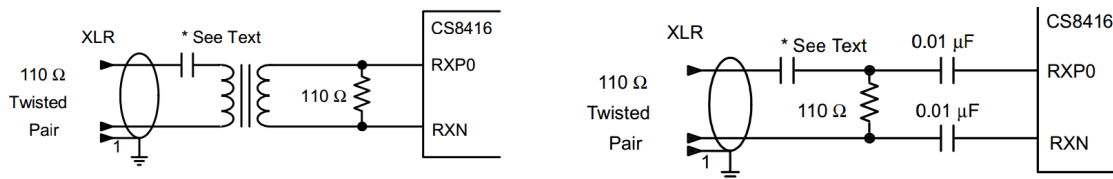
- Koaxiální kabel, konektory RCA, impedance $75\ \Omega$ a napětí 0,5-1,0 V.
- Koaxiální kabel, konektory BNC, impedance $75\ \Omega$ a napětí 0,5-1,0 V.
- Kroucená dvojlinka, konektory XLR, impedance $110\ \Omega$ a napětí $+5/-5$ V.
- Optické vlákno, průměr 1 mm, konektory Toslink, LED s vlnovou délkou 660 nm.

Protože vstupy dekodéru neodpovídají elektrickým parametrům kabelů, je nutné vstupy nejprve elektricky přizpůsobit. Parametry pro $75\ \Omega$ kabely vycházejí ze specifikace rozhraní RS-422 a teoreticky je možné obvody pro tuto sběrnici použít jako vysílač a přijímač. Podobným přijímačem schopným přijímat diferenční signál je vybaven i dekodér. Pro příjem signálu po optickém kabelu jsou použity integrované přijímače Sharp GP1FAV50RK0F [13] nebo GP1FAV31RK0F [12]. Plošný spoj je navržen univerzálně tak, aby bylo možné použít oba uvedené přijímače. Šířka přenosového signálu pro 192 kHz/24 bit je necelých 25 MHz. Uvedené optické přijímače mají garantované pásmo pouze 13 MHz a jsou spolehlivě schopny přenést pouze 96 kHz/24 bit signál. Pokud je to možné, je vhodnější z uvedené dvojice použít GP1FAV31RK0F, který je mírně rychlejší.



Obrázek 3.2: Přijímač vstupního signálu uvnitř dekodéru CS8416, převzato z [14].

Schéma vstupní části přijímače signálu je na obrázku 3.2. Záporný pól RXP je multiplexovaný a umožňuje volbu až 8 zdrojů signálu. Kladný pól RXN může být použitý pro připojení diferenčního signálu nebo ponechán nepoužitý. Katalogový list obvodu obsahuje doporučená zapojení vstupů pro jednotlivé typy kabeláže. Tato zapojení lze rozdělit na dva druhy. S oddělovacím transformátorem a bez něj. Obě varianty pro diferenční signál jsou na obrázku 3.3. Vzhledem k povaze konstrukce jsou všechny elektrické vstupy bez výjimky zapojeny s transformátorem.



Obrázek 3.3: Doporučená zapojení vstupního obvodu, převzato z [14].

3.2 Základní deska

Základní deska převodníku obsahuje řídicí mikrokontrolér, dekodér a bluetooth modul. Kromě těchto komponent, jejichž popis následuje v této sekci je vybavena dvěma sadami konektorů pro moduly s převodníky. Každý modul je se základní deskou spojen pomocí 30 pinů. Datový konektor 2×10 slouží k připojení komunikačních sběrnic I²C, I²S, SPI, přídatných GPIO signálů a napájecího napětí pro čip převodníku. Napájecí konektor přivádí do modulu symetrické napájecí napětí $+15/-15$ V a pomocné napětí 6,3 V, které není u modulů vyrobených v rámci této práce využito. Sběrnice I²C, I²S a SPI jsou sdílené pro oba dva moduly, signály GPIO jsou dostupné pro každý modul zvlášť. Na sběrnici I²C je připojen dekodér CS8416 s adresou $0x20$. Při návrhu modulů, které pro své nastavení používají sběrnici I²C, je nutné s tímto faktem počítat. Následuje popis hlavních komponent základní desky.

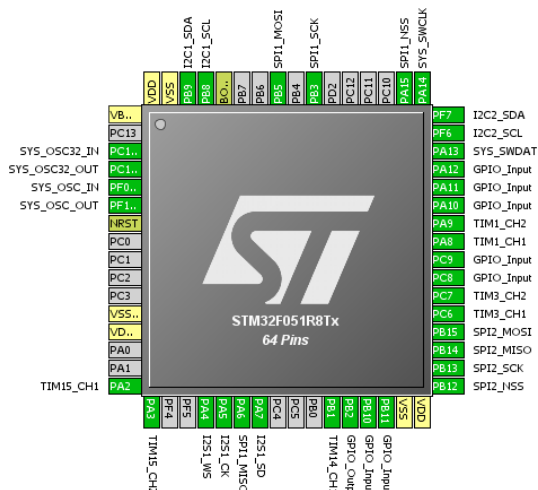
3.2.1 Řídicí mikrokontrolér

Celý převodník je ovládán mikrokontrolérem STM32F051R8T6 [19]. Jde o 32 bitový mikrokontrolér s jádrem ARM a maximální frekvencí 48 MHz. K dispozici je 64kB paměti, 8kB SRAM, dvojice SPI, I²C a I²S rozhraní. Mezi požadavky při výběru patřilo 3,3 V napájení, volně dostupné vývojové nástroje pro jazyk C a možnost použít levný vývojový kit STM32L-Discovery [22] jako programátor a debugger. K mikrokontrolérům STM32 výrobce poskytuje nástroj MicroXplorer [32], který umožňuje interaktivně konfigurovat jádro, vestavěné periferie a přiřazovat funkce jednotlivým výstupním pinům. Výstupem programu je zdrojový kód konfigurace v jazyce C a hlavičkový soubor, který stačí vložit do projektu. Nastavení celého mikrokontroléru se následně provede zavoláním funkce `mx_init()` z příslušného místa v kódu. Výsledný pinout pro převodník je na obrázku 3.4.

K mikrokontroléru jsou připojeny krystaly o frekvencích 32,768 kHz pro obvod reálného času a 8 MHz pro jádro. V této konfiguraci je možné měnit pracovní frekvenci mikrokontroléru v rozmezí od 500 kHz do 48 MHz.

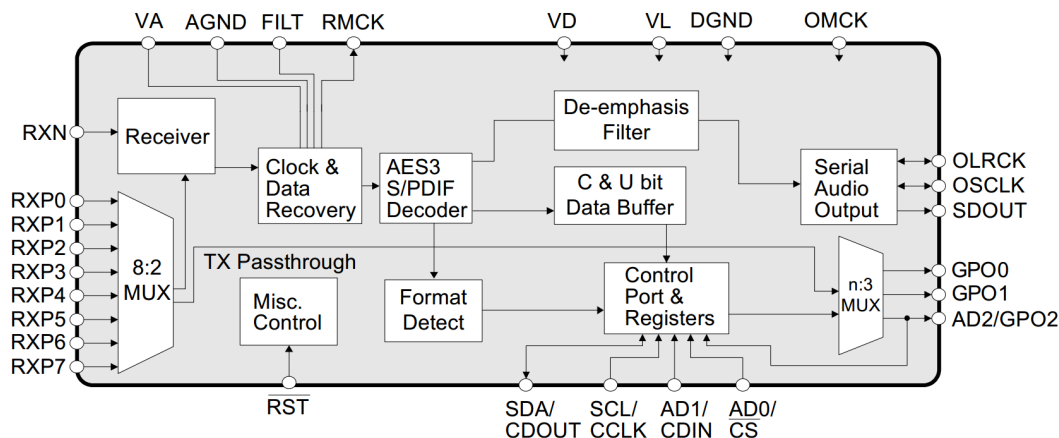
3.2.2 S/PDIF Dekodér

Jako hlavní zdroj dat pro převodník je uvažován osobní počítač nebo případně CD přehrávač s digitálním výstupem. Data z těchto zařízení jsou elektricky přizpůsobena a přivedena na vstup S/PDIF dekodéru. Výstupem dekodéru je sběrnice I²S. Výběr konkrétního obvodu nebyl příliš složitý. Na trhu jsou v současné době pouze dva obvody vhodné pro toto využití. Texas Instruments DIR9001 a Cirrus Logic CS8416. DIR9001 je starší, podporuje maximální vzorkovací frekvenci 96kHz a má velmi nízkou hodnotu jitteru 50 ps. CS8416 nabízí kompletní podporu norem IEC60958, EIAJ CP1201 a podporuje maximální vzorkovací frekvenci 192 kHz. Nevýhodou je mírně vyšší jitter 150 ps. Do frekvence 96 kHz lze změnit



Obrázek 3.4: Přiřazení pinů řídicího mikrokontroléru.

nastavení detektoru fáze (PDUR) a jitter snížit na 122 ps.



Obrázek 3.5: Blokové schéma přijímače Cirrus Logic CS8416, převzato z [14].

Na obrázku 3.5 je blokové schéma dekodéru. Na vstupu je multiplexor umožňující výběr jednoho z celkem osmi vstupů označených jako RXP0 až RXP7. Vstup RXN je kladným vstupem tvarovače signálu a při kombinaci běžných a diferenčních vstupů není použit.

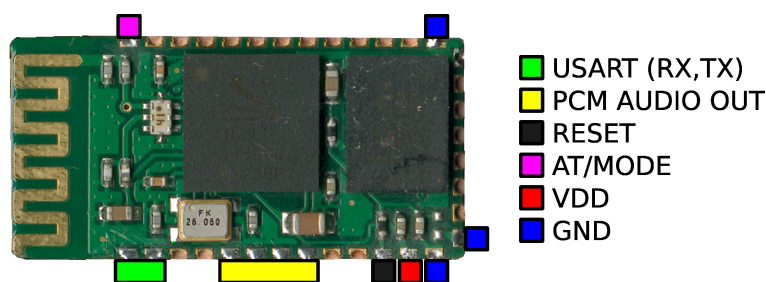
Dekodér CS8416 je z hlediska komunikace velmi univerzální integrovaný obvod. Je možné ho ovládat jak v hardwarovém režimu pomocí GPIO pinů, tak softwarově po sběrnících SPI nebo I²C. Základní volba HW/SW režimu se provádí připojením 47kΩ rezistoru k výstupu SDOU_T proti zemi nebo napájecímu napětí. Pokud je po probuzení z resetu na pinu CS/AD0 zjištěna sestupná hrana, obvod se přepne do SPI režimu, jinak zůstává v režimu I²C. Adresa čipu v I²C režimu je nastavena pomocí pull-up či pull-down rezistorů AD0 až AD2.

3.2.3 Bluetooth modul

Nad rámec zadání práce je základní deska převodníku vybavena bluetooth modulem HC-05 [18]. Moduly HC-03 až HC-06 lze objednat z čínských obchodů jako je aliexpress nebo

dealextrême za cenu mírně přesahující 100 Kč. Zapojení modulu je na obrázku 3.6. Layout plošného spoje modulu je vždy stejný, jednotlivé verze se liší pouze vybavením. Plně osazený modul se umí chovat nejen jako bezdrátová sériová linka, ale i jako paralelní, SPI, audio a USB periferie. Osazenou verzi HC-05 lze navíc přepnout do režimu master a iniciovat bluetooth komunikaci z vyvíjené aplikace.

Modul je do aplikace osazen za účelem servisní komunikace. Připojení probíhá standardně přes terminál, podobně jako je tomu například u síťových prvků Cisco. Rychlost komunikace je řízena automaticky. K mikrokontroléru je modul připojen pomocí dvojice vodičů RX, TX a používá řízení toku Xon, Xoff. Jako jediná periferie není bluetooth modul po startu resetován mikrokontrolérem. Komunikace přes bluetooth tím pádem není při resetování mikrokontroléru přerušena.



Obrázek 3.6: Zapojení pinů bluetooth modulu HC-05.

Samotný bluetooth modul lze konfigurovat pomocí AT příkazů. Jejich kompletní sadu lze nalézt v datasheetu [17]. Bohužel výrobců modulů je velké množství a většina z nich ke svým produktům neposkytuje žádnou nebo velmi strohou dokumentaci. Dokumenty nalezené on-line proto často neodpovídají skutečnosti a pokročilé funkce často nemusí být dostupné. Přepnutí do módu AT příkazů se provádí uvedením příslušného pinu modulu do logické nuly.

3.2.4 Konfigurační konzole

Osazení bluetooth modulem přineslo snadné možnosti konfigurace pomocí uživatelské konzole, viz. 3.7. Například přepínač vstupů na předním panelu umožňuje volbu až osmi zdrojů digitálních audio dat, přestože jsou na zadní straně dostupné pouze čtyři konektory. Aby nepoužívané vstupy zbytečně nepřekážely při přepínání, lze je pomocí servisní konzole vypnout. Stejně tak je možné vstupy uživatelky pojmenovat (například „DVD přehrávač“ místo „Optický 1“) a měnit nastavení dekodéru.

3.2.5 LCD displej

Pro zobrazování informací byl použit černobílý grafický LCD displej z mobilního telefonu Nokia 3410. Kromě zvoleného vstupu, útlumu kanálu, vzorkovací frekvence a chybových hlášení je možné na displeji zobrazovat i uživatelská data získaná ze čtveřice nejnižších bitů přijímaného signálu. Rozlišení displeje je 96×65 px a lze ho řídit přes rozhraní SPI. Displej používá řadič Philips OM6208, který není narozdíl od běžně rozšířeného PCD8544 tak dobře zdokumentován, nicméně oba displeje jsou pinově kompatibilní a mají stejnou instrukční sadu. Pro pochopení, jakým způsobem displej funguje byl velmi nápomocný článek „Nokia 3410 LCD on STM32“ zveřejněný na webu Micromouse [27].

```

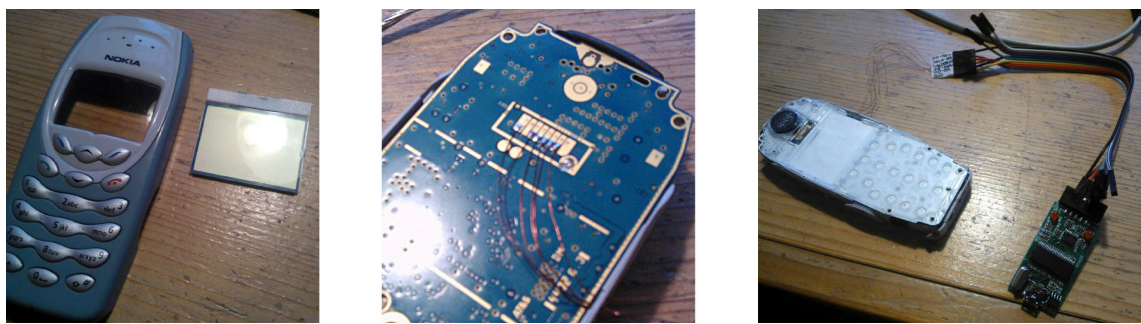
pidi@nataalka: /dev
HiFi DAC configuration console - 24,5,2014 xdolez08.
-----
1) - Print out decoder status
2) - Rename input
3) - Send command

Choice?
Vypis Pameti Dekoderu CS8416

0000 0000 0000 0000 00B0 0080 0000 0000
0000 0000 000E 0001 0000 0000 0000 0000
0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000
0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000
0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000
0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000
0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000
0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000
0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000
0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000
0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000
0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000
0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000
0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000
0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000
0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000
0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000
0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000
0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000
0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000
0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000
0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000
0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000
0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000
0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 002F

```

Obrázek 3.7: Konfigurační bluetooth konzole.



Obrázek 3.8: Připojení torza telefonu k logickému analyzátoru.

Problém je, že nevhodným nastavením provozních hodnot lze displej nevratně poškodit. V katalogovém listu radiče jsou sice uvedené rozsahy hodnot, ale jejich nastavení je třeba zvolit podle materiálů ze kterých je displej vyroben.

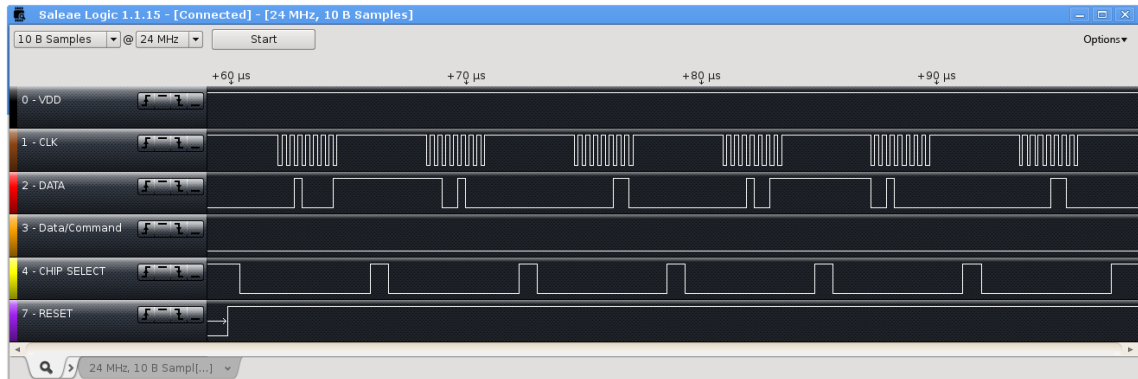
Ke zjištění hodnot bylo nakonec použito torzo samotného telefonu, který byl před vynášením LCD plně funkční. Na kontakty pro displej byly naletovány slabé smaltované drátky z primárního vinutí starého transformátoru (sada obrázků 3.8) a výstupy připojeny k logickému analyzátoru. Pro přečtení celé inicializační sekvence stačilo vložit baterii a telefon zapnout. Vyčtená konfigurační sekvence je na obrázku 3.9. Samotná inicializační sekvence displeje se skládá z následujících kroků:

- Čekání na ustálení napájecích napětí
- Uvedení LCD do resetu
- Konfigurace SPI rozhraní řídicího mikrokontroléru
- Podržení LCD v resetu po dobu 50 ms
- Odeslání konfigurační sekvence

Po odeslání šestice příkazů uvedených v tabulce 3.1 je displej připraven pro příjem dat. Každý následující byte přijmutý po SPI je vykreslen na sloupec osmi pixelů. Knihovny pro

práci s grafickými displeji z mobilních telefonů Nokia existují zhruba od roku 2003. Všechny jsou napsány pro LCD s řadičem PCD8544, který byl osazován do nejrozšířenějších telefonů jako 5110 a 3310. Bohužel u Nokia 3410 fyzické rozlišení displeje neodpovídá velikosti framebufferu s čímž knihovny nepočítají. Bylo tedy nutné napsat knihovnu vlastní.

Jako vzor byla použita knihovna napsaná pro arduino [31], ze které byla převzata look-up tabulka s fontem v rozlišení 5×8 px. Funkce pro inicializaci, odesílání příkazů, dat a zobrazování grafiky bylo nutné přepsat pro mikrokontrolér STM32 a doplnit o automatické ignorování nezobrazitelných oblastí.



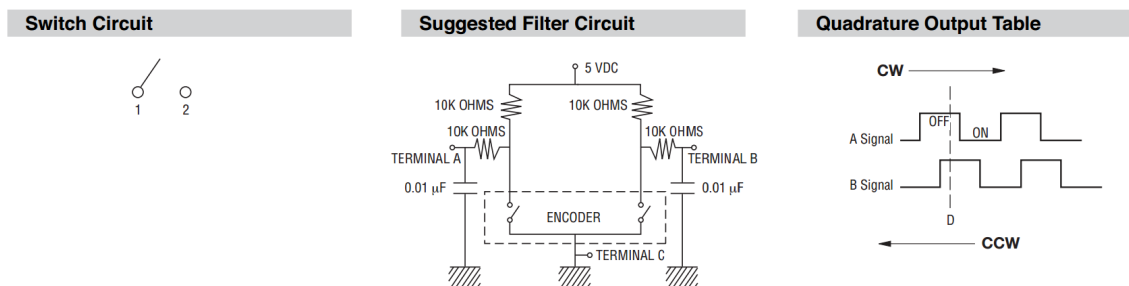
Obrázek 3.9: Analýza komunikačního protokolu LCD displeje.

Hodnota	Popis
0x21	Zapnutí podpory rozšířených příkazů
0xC8	Nastavení V_{op} (kontrast displeje)
0x06	Nastavení teplotního koeficientu
0x13	Nastavení bias na hodnotu 1:48
0x20	Nastavení horizontálního adresování standardními příkazy
0x0C	Přepnutí do normálního režimu

Tabulka 3.1: Inicializační sekvence příkazů pro LCD displej.

3.3 Ovládací prvky

Hlavními ovládacími prvky je dvojice rotačních enkodérů. Většina výrobců nabízí rotační enkodéry v rozlišení 12, 18 a 24 poloh na otáčku. Je možné volit mezi pevnou a volnou aretací a doplňkovým spínačem. Pro ovládání hlasitosti je preferován enkodér s vysokým počtem poloh na otáčku a bez aretace, pro přepínání kanálů naopak enkodér s nízkým počtem poloh a aretací. Bohužel sehnat v České republice jakékoli enkodéry se ukázalo jako nečekaně obtížný úkol. Cena kvalitních enkodérů od firmy Bourns se blížila k 250 Kč za kus a žádný obchod je neměl skladem. Pro konstrukci byly nakonec použity čínské enkodéry PE24 zakoupené v GM electronics s vědomím, že je bude nutné při prvních potížích vyměnit. Při návrhu je třeba pamatovat na vhodné ošetření enkodérů proti zákmitům, jak je zobrazeno na obrázku 3.10.



Obrázek 3.10: Ošetření zákmitů rotačních enkodérů, převzato z letáku firmy Bourns.

3.4 D/A Převodníky

Nejdůležitější částí celého systému jsou samotné D/A převodníky. Cílem bylo použít co možná nejkvalitnější převodníky bez ohledu na cenu. Základním požadavkem bylo rozlišení minimálně 24 bitů, vzorkovací frekvence 192 kHz, odstup signálu od šumu lepší než 120 dB a symetrický výstup. Obvodů splňujících tyto parametry není mnoho. Do výběru se dle očekávání žádná vícekanálové převodníky. Kromě nakonec použité rodiny převodníků Burr Brown PCM179x od Texas Instruments splňuje požadavky jen obvod AD1955 [7] od Analog Devices, WM8741 [20] od Wolfson Microelectronics a CS4398 [9] od Cirrus Logic. Srovnání základních parametrů obvodů je v tabulce 3.2. Není-li uvedeno jinak, jsou hodnoty platné pro přehrávání 192 kHz stereo signálu při napájení analogové části napětím 5,0 V.

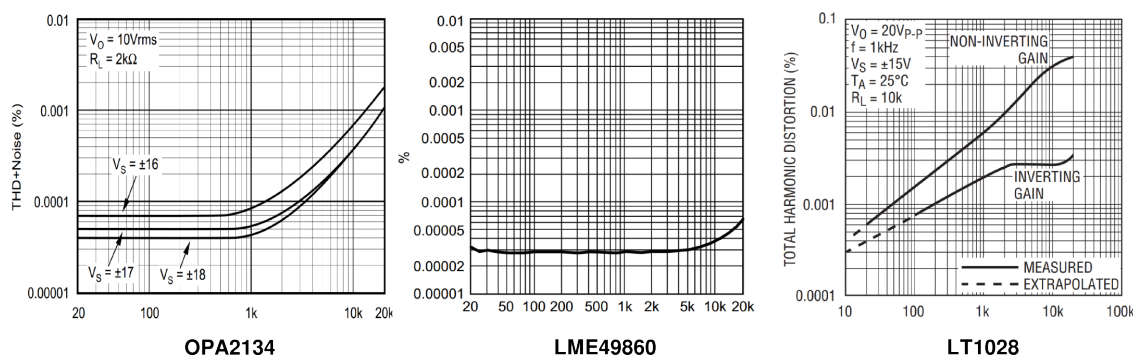
	PCM1792	PCM1794	PCM1795	PCM1796	AD1955	CS4398	WM8741
Rozlišení bit	16–24	16–24	16–32	16–24	16–24	16–24	16–24
Vzorkovací frekvence kHz	10–200	10–200	10–200	10–200	32–192	32–216	32–192
Ovládání obvodu	SPI/I ² C	HW	SPI/I ² C	SPI/I ² C	SPI	SPI/I ² C	SPI/HW
THD+N _{48kHz} %	0,0004	0,0004	0,0005	0,0005	0,0003	0,0004	–
THD+N _{192kHz} %	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015	–	–	0,0010
Odstup signál/šum dB	129	129	123	123	120	120	120
Dynamický rozsah dB	129	129	123	123	120	120	125
Separace kanálů dB	120	121	117	117	125	110	130
Převzorkování	8×	8×	8×	8×	8×	3 úrovně	3 úrovně
DSD režim (SACD)	Ano	Ne	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano
Regulace hlasitosti	Ano	Ne	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano

Tabulka 3.2: Přehled základních parametrů vybraných D/A převodníků.

Pro samotnou práci byly vybrány převodníky PCM1794 pro linkový a PCM1792 pro sluchátkový výstup. Výstupy těchto převodníků jsou proudové a k převodu na napětí používají blok operačních zesilovačů. Jelikož jsem s operačními zesilovači jako převodníky proudu na napětí nikdy předtím nepracoval, bylo nutné pochopit princip činnosti. Neustále jsem měl problém přestat na toto zapojení nahlížet jako na klasický komparátor, pouze se zpětnou vazbou a přijmout fakt, že napětí na vstupech není závislé na průběhu signálu a jeho hodnota měřená proti napájecí zemi (středu) nemusí být konstantní. Pro základní seznámení s chováním operačních zesilovačů jsem využil Příručku pro navrhování elektrických obvodů [24], strany 188–204 a skvěle popsaná typová zapojení s vysvětlenými principy činnosti v publikaci Elektronika [4] na stranách 219–260.

3.5 Operační zesilovače

Operační zesilovače slouží na modulech s převodníky ke dvěma základním účelům. Prvním je konverze proudových výstupů převodníků na napěťové, druhým pak převod získaného symetrického signálu. Pro účely oživování a testování byly moduly osazeny levnými, ale vzhledem k ceně velmi dobrými operačními zesilovači NE5532 [15]. Po odladění se předpokládá použití kvalitnějších součástek s ohledem na jejich roli v zapojení. Pro převod proudu na napětí jsou doporučeny obvody OPA2134 od Texas Instruments, pro desymetrizaci LT1028 od Linear technology. Na obrázku 3.11 je porovnáno celkové harmonické zkreslení a v tabulce 3.3 základní parametry uvažovaných obvodů při napájení symetrickým napětím.



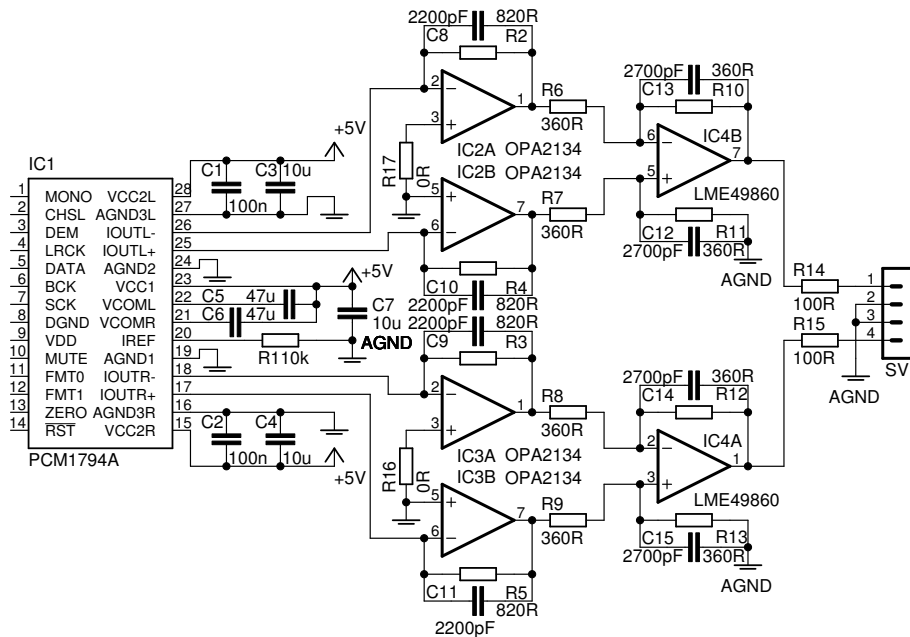
Obrázek 3.11: Celkové harmonické zkreslení, převzato z [6], [21], [5].

Obvod	OPA2134	LME49860	LT1028
Vstupní šum	8 nV	2,7 nV	0,85 nV
Rychlost přeběhu	20 V/μs	20 V/μs	11 V/μs
Šířka pásma	8 MHz	55 MHz	50 MHz
Celkové zkreslení	0,00008 %	0,00003 %	0,0015 %

Tabulka 3.3: Přehled základních parametrů operačních zesilovačů.

3.6 Modul linkového výstupu s PCM1794

Modul linkového výstupu je základním modulem převodníku. Zapojení prakticky kopíruje doporučený návrh uvedený v katalogovém listu [11]. Vodiče výstupních proudových signálů jsou vyvedeny z boku pod čipem a důkladně odděleny od filtrů zemními plochami. Signály jsou přivedeny na záporné vstupy čtveřice operačních zesilovačů, které převádí proudový signál na napěťový. Jejich zpětné vazby, které se skládají vždy z SMD rezistoru a fóliového kondenzátoru jsou umístěny co nejblíže čipu. Samotné operační zesilovače jsou výměnné a jejich napájení je ošetřeno blokovacími kondenzátory. Takto získaný symetrický signál je veden do desymetrizačního operačního zesilovače. Operační zesilovač osazený na tomto místě by měl mít co možná nejnižší vstupní šum. V současné době není třeba trvat na doporučeném obvodu Linear Technology LT1028. Ačkoli je jeho hodnota vstupního šumu špičková, v ostatních parametrech, především pak v hodnotě celkového harmonického zkreslení je v průměru o řád horší než ostatní uvažované obvody. Zapojení analogové části modulu je na obrázku 3.12, celé schéma zapojení včetně stabilizátorů a digitální části je k dispozici v příloze B.3. Seznam součástek je na stejném místě.



Obrázek 3.12: Zapojení analogové části linkového výstupu.

3.7 Modul sluchátkového zesilovače s PCM1792

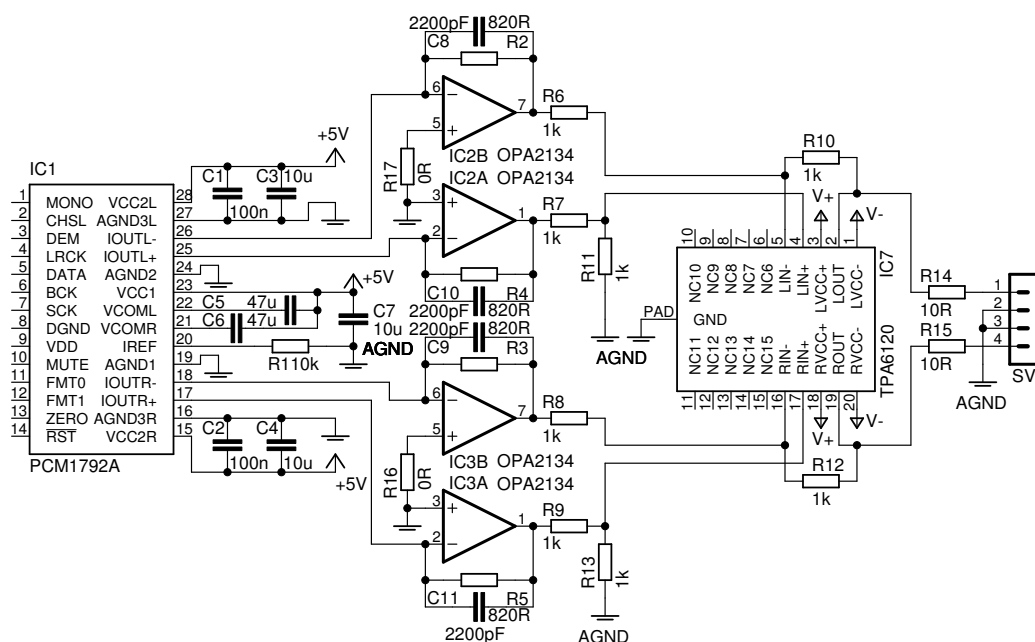
Pro modul vybavený sluchátkovým zesilovačem byl zvolen velice dobře hodnocený obvod TPA6120 [8] od Texas Instruments. Obvod má diferenční napěťové vstupy a velký rozsah přípustné impedance sluchátek $10 - 600 \Omega$, proto není nutné po převedení na napětí výstupní signál z převodníku dále upravovat. Přímou v katalogovém listu je jako referenční zdroj signálu použitý převodník PCM1792. Pro ovládání hlasitosti je využito digitálně říditelného útlumu přímo v převodníku s jemným krokem $0,5 \text{ dB}$. Útlum je nastavitelný 8 bitovou hodnotou a jeho průběh je skutečně logaritmický. Tím je zaručena dostatečná jemnost při malých hlasitostech.

Stejně jako u modulu linkového výstupu jsou signály přivedeny na záporné vstupy čtveřice operačních zesilovačů, které převádí proudový signál na napěťový. Jejich zpětné vazby, které se skládají vždy z SMD rezistoru a fóliového kondenzátoru jsou umístěny co nejblíže čipu. Operační zesilovače jsou výměnné a jejich napájení je ošetřeno blokovacími kondenzátory. Takto získaný symetrický signál je veden na vstupy TPA6210. Koncový stupeň TPA6120 pracuje s poměrně vysokým klidovým proudem jehož důsledkem je velké zrátové teplo až $2,8 \text{ W}$ při napájení $+12/-12 \text{ V}$. Při plné zátěži dosahuje teplota modulu 60°C . Při návrhu plošného spoje modulu bylo na tuto skutečnost pamatováno a lze jej osadit dodatečným chladičem.

Kromě převodníku PCM1792 je modul možné osadit i převodníkem PCM1795 [16], který nabízí rozlišení 32 bitů a odstup signál od šumu „pouhých“ 123 dB . Všechny obvody rodiny PCM179x mají stejné zapojení analogové části a v digitální se liší pouze typem ovládání.

Teoreticky není problém osadit i ostatní obvody rodiny PCM179x. Vždy je však doporučeno používat obvody s digitálním řízením hlasitosti. Sluchátkový výstup je v tomto

zapojení velmi silný a mohl by snadno poškodit připojená sluchátka. Zapojení analogové části modulu je na obrázku 3.13, celé schéma zapojení včetně stabilizátorů a digitální části stejně jako seznam součástek je k dispozici v příloze B.2.



Obrázek 3.13: Zapojení analogové části sluchátkového zesilovače.

3.8 Napájecí zdroj

Kvůli eliminaci rušení je napájecí zdroj navržen klasicky se spojitou regulací výstupních napětí. Základem jsou dva stíněné toroidní transformátory značky Talema určené k montáži do DPS. Konkrétně 15 VA model 70053K pro analogovou a 3,2 VA 70010K pro digitální část.

Po delším studiu napájecích zdrojů s nízkým výstupním zvlněním a odolností proti kmitání jsem se rozhodl nepoužít v zapojení stabilizátory řady L78xx a L79xx, ale navrhnout napájecí zdroj z diskretních součástek. Původně bylo v plánu využít osvědčených a spolehlivých obvodů LM723 pro regulovatelné napájecí zdroje. Ačkoli jejich parametry nejsou v dnešní době výjimečné, lze je jen velmi těžko rozkmitat, což je pro tento účel velmi žádaná vlastnost.

Nakonec byla ke stavbě zdroje využita konstrukce zdroje ZT15VA [30], která je součástí projektu gramofonového předzesilovače OpenAmp1 Ing. Pavla Macury. Původní symetrický zdroj s napětími +15/-15 V byl rozšířen o zdroj dvojice pomocných napájecích napětí 6,3 V ze kterých jsou napájeny všechny logické obvody. Navržena byla nová deska plošných spojů pro osazení výhradně součástkami SMD. Místo zenerových diod byly použity precizní 2,50 V napěťové reference TL431 s garantovanou odchylkou do 2 %. Kvůli vysoké citlivosti celého zapojení na kvalitu napájecího napětí je každý modul či obvod osazen vlastním nízkoúbytkovým stabilizátorem 5,0 V nebo 3,3 V.

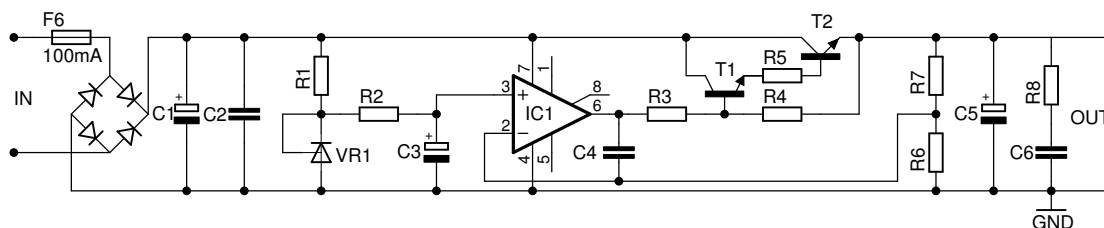
3.8.1 Princip činnosti

Napájecí zdroj obsahuje celkem čtyři nezávislé větve. Jejich zapojení odpovídá obrázku 3.14. Schéma zapojení celého zdroje je k dispozici v příloze B.4. Činnost každé větve je možné popsat těmito kroky:

- Vstupní napětí ze sekundárního vinutí síťového transformátoru je přivedeno na svorky označené jako IN ve schématu 3.14. Je usměrněno usměrňovacím můstkem B1 a vyhlazeno filtračními kondenzátory C1 a C2.
- Usměrněním je získáno napětí o přibližné hodnotě $V_{in} = V_{tr} * \sqrt{2} - 2 \cdot 0,7$, kde V_t značí střídavé napětí na vinutí transformátoru a $\sqrt{2} - 2 \cdot 0,7$ je nárůst napětí vzniklý usměrněním bez úbytků na diodách usměrňovače.
- Tímto napětím je napájena napěťová reference VR1 a operační zesilovač IC1. Rezistorem R1 je nastaven proud protékající napěťovou referencí VR1. Kladné napětí 2,50 V z napěťové reference je přivedeno na neinvertující vstup operačního zesilovače IC1. Ten je ošetřen proti zákmitům pomocí R2 a C3.
- Na výstup operačního zesilovače je připojena kaskáda tranzistorů T1 a T2 s příslušnými rezistory R3, R4, R5 a filtračním kondenzátorem C4. Napětí na výstupu je určeno odporovým děličem složeným z rezistorů R6 a R7, jehož střed je zapojen jako zpětná vazba na invertující vstup operačního zesilovače IC1.
- Aby operační zesilovač dosáhl vyrovnání napětí na svých vstupech, upravuje výstupní napětí takovým způsobem, aby pomocí pootevření tranzistorů T1 a T2 dosáhl na rezistoru R6 stejného úbytku napětí jako na napěťové referenci VR1. Výsledné napětí lze vyjádřit pomocí vztahu 3.1.

$$V_{out} = V_{VR} \cdot \left(1 + \frac{R7}{R6}\right) \quad (3.1)$$

- Výstup je dále doplněn o vyhlazovací kondenzátor C5 a filtr složený z R8 a C6. Napájecí napětí +15 V a -15 V je využíváno přímo, napětí z pomocných zdrojů je dále usměrněno nízkouúbytkovými stabilizátory LE33 a LE50 dle nároků jednotlivých komponent.



Obrázek 3.14: Zapojení jedné větve napájecího zdroje.

Kapitola 4

Návrh software

Jednou z výhod platformy STM32 je dostupnost celé řady kvalitních vývojových nástrojů zdarma. Dostupná jsou nejen integrovaná vývojová prostředí, ale i programátory, debuggery a nástroje pro grafickou konfiguraci pinů mikrokontroléru.

4.1 Použité programové vybavení

Existuje mnoho možností v čem programovat STM32. Pro účely této práce byly zvoleny tyto programy.

4.1.1 Keil μ Vision

Z dostupných integrovaných vývojových prostředí bylo zvoleno Keil μ Vision, na obrázku 4.1, které se jeví jako uživatelsky nejpřívětivější. Jediným omezením je limit na 32 kB zkompilevaného kódu. Toto omezení naštěstí neznamená pro tuto práci žádný problém.

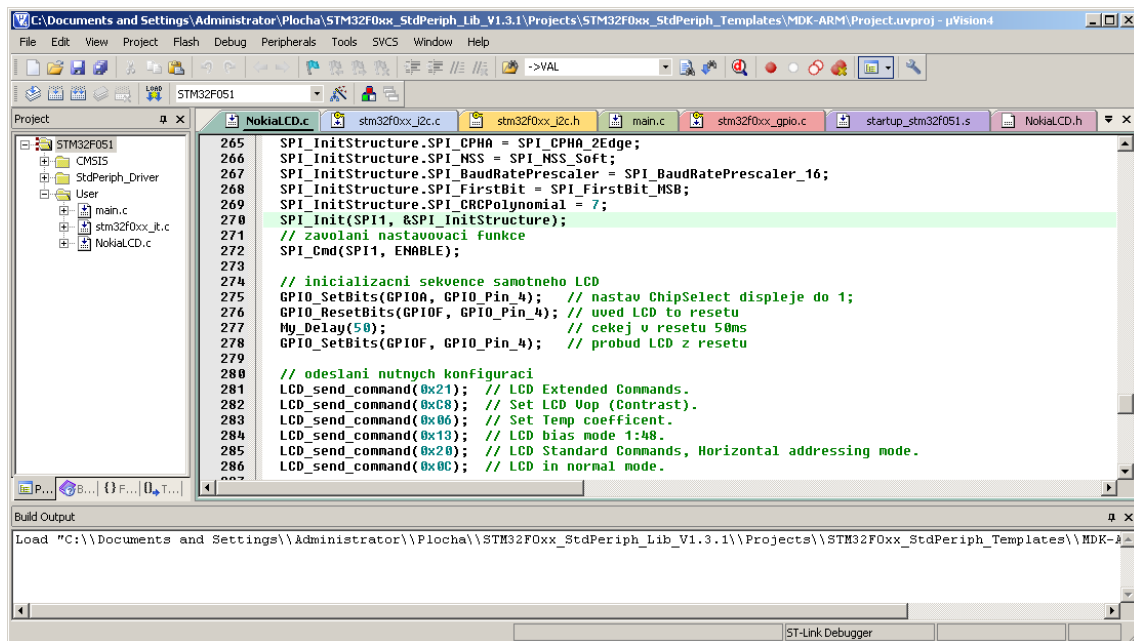
μ Vision po nainstalování nabídne možnost stažení balíčků pro jednotlivé rodiny mikrokontrolérů. Balíčky jsou instalovány plně automaticky. Po jejich stažení stačí v nastavení nakonfigurovat správný typ programátoru a celé prostředí včetně ladících nástrojů je plně funkční.

4.1.2 ST-LINK utility

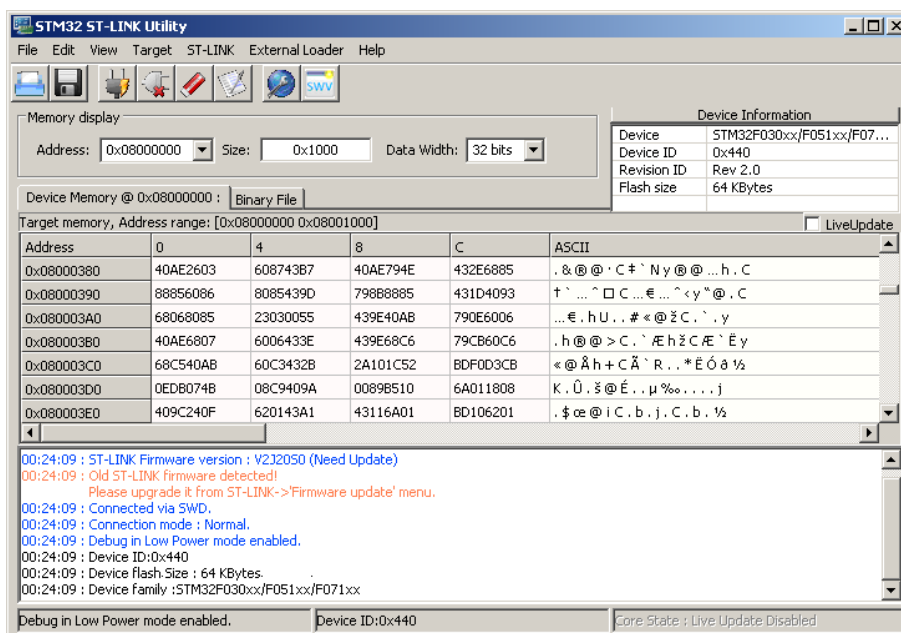
ST-LINK utility je jednoduchá aplikace sloužící pro čtení a zápis programu do mikrokontroléru. Podporuje všechny běžné formáty včetně *.bin a *.hex. V průběhu práce na převodníku byla použita pro navázání komunikace s mikrokontrolérem a obecné seznámení s možnostmi programování architektury STM32. Vzhled utility je na obrázku 4.2.

4.1.3 ST MicroXplorer

MicroXplorer, na obrázku 4.3 je velmi užitečná aplikace hlavně na začátku vývoje aplikace. Jedná se o grafický nástroj pro konfiguraci periférií na čipu schopný generovat konfigurační kód v jazyce C. Je sice pravděpodobné, že výslednou konfiguraci bude nutné z větší části přizpůsobit konkrétním podmínkám, protože aplikace neumožňuje detailní konfiguraci periférií, nicméně zabraňuje zvolení nekompatibilního nastavení. Mnoho pinů má multiplexované funkce a mnoho vystavěných jednotek může být multiplexováno na různé piny. MicroXplorer vývojáři nedovolí udělat chybu při přiřazování funkcí jednotlivým pinům. Mírnou

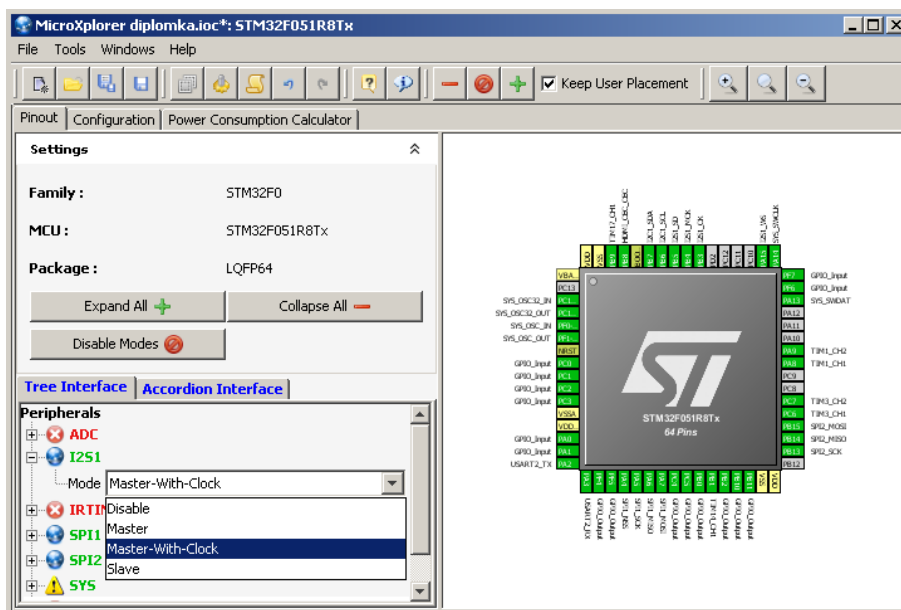


Obrázek 4.1: Vývojové prostředí prostředí Keil µVision.



Obrázek 4.2: Programovací utilita ST-LINK.

nevýhodou programu je fakt, že po vybrání jednotky v menu se její výstupy namapují vždy na výchozí piny, na kterých změni již existující nastavení. To je škoda, protože prakticky vždy existuje alternativní nastavení na jiných (volných) pinech, ale tuto skutečnost je třeba zjistit projitím menu všech 64 pinů mikrokontroléru.



Obrázek 4.3: Prostřední programu ST MicroXplorer.

4.2 Standardní knihovna periferií STM32

Ke každému mikrokontroléru STM32 je dostupná standardní knihovna, pomocí které lze snadno a rychle nastavovat periferie mikrokontroléru. K samotné knihovně je dostupná automaticky generovaná dokumentace. Díky tomu jsou samotné zdrojové kódy jsou podrobně komentované. Vyhledávání parametrů pak velmi urychluje vestavěná funkce „Go to the definition“ vývojového prostředí Keil μ Vision. Každý hlavičkový soubor obsahuje detailní popis funkcí včetně výčtu možných hodnot.

4.2.1 Popis konfigurace pomocí standardní knihovny

Protože mikrokontroléry STM32 kladou důraz na spotřebu, je při konfiguraci periferií nutné nastavit větší množství parametrů. Obecně lze říci, že nastavení každé periferie se skládá z následujících kroků:

- Definice konfiguračních struktur pomocí kterých probíhá nastavení periferie. Budeme-li nastavovat například USART, je třeba definovat strukturu pro nastavování GPIO a strukturu pro nastavování USART.
- Povolení hodin pro periferii a příslušnou sběrnici. Všechny periferie nemusí být interně připojeny ke stejné sběrnici. Při konfiguraci je třeba věnovat tomuto faktu dostatečnou pozornost.
- Povolení hodin pro bránu na které se nacházejí piny periferie
- Většina periferií sdílí své vstupní a výstupní piny. Výběr funkce dostupné na konkrétním pinu se provede zvolením jedné z alternativních funkcí pro piny na kterých bude periferie aktivní.

- Přestože na pinech periferie využíváme alternativní funkce, je třeba nastavit ještě vlastnosti pinů. Týká se to hlavně interních pull-up a pull-down rezistorů a typů výstupu. Například při konfiguraci sběrnice I²C musí být oba piny v logické jedničce typu otevřený kolektor, jinak by při komunikaci docházelo ke zkratu. Vlastnosti pinů jsou nastavovány vyplněním konfigurační struktury a následným zavoláním konfigurační funkce které je tato struktura předána jako parametr.
- V tuto chvíli jsou piny nakonfigurovány a příslušné multiplexory přepnuty tak, že jsou na těchto pinech dostupné vstupy a výstupy periferie kterou hodláme používat.
- Některé periferie mohou mít dostupná zvláštní nastavení. Jejich konfigurace se provádí v tomto kroce.
- Naplnění konfigurační struktury dané periferie, v tomto případě sériové linky, a zavolání konfigurační funkce pro sériovou linku, které je naplněná struktura předána jako parametr.
- Posledním krokem je samotné zapnutí nakonfigurované periferie.

Je dobré si uvědomit, že periferie které sdílejí stejné výstupní piny mohou být nakonfigurovány nezávisle na sobě, aniž by došlo ke kolizi. Samotné přepínání funkcí na výstup je řešeno přepínáním multiplexorů pomocí volání funkce konfiguruující takzvané „Alternativní funkce“. Interní pull-up/pull-down rezistory jsou umístěny až za tímto multiplexorem a proto je jejich nastavení nedílnou součástí konfigurace. Konkrétní příklad konfigurace periferie (v projektu pro komunikaci s bluetooth modulem) ukazuje zdrojový kód [4.4](#).

4.3 Návrh aplikace

Jako u většiny vestavěných aplikací se firmware mikrokontroléru skládá z inicializační části prováděné po startu zařízení a hlavní smyčky programu. V rámci inicializace jsou postupně nakonfigurovány všechny periferie s spuštěno přehrávání. V hlavní smyčce je periodicky kontrolován stav ovládacích prvků, aktualizován obsah framebufferu LCD displeje a čtena konfigurace dekodéru, podle které je nastavován formát dat pro osazené moduly s převodníky.

4.3.1 Komunikace s bluetooth modulem

Bluetooth modul je připojen k periférii USART2 a je ovládán pomocí celkem osmi pinů mikrokontroléru. Kromě datových pinů RX a TX je k dispozici ještě přepínač módu, který umožňuje nastavovat parametry modulu pomocí AT příkazů a reset, který je připojen pro případ závažné chyby komunikace a za běžných podmínek není používán.

Zbývající čtveřice pinů je připojena k PCM výstupu bluetooth modulu. Z hlediska této práce se jedná o neplánované rozšíření nad rámec zadání. Originální bluetooth modul HC-05 by po změně identifikace měl být schopen na těchto pinech zprostředkovat audio data přenášená protokolem A2DP ve formátu PCM. To by umožnilo bezdrátové přehrávání zvuku z mobilních zařízení výměnou za nedostupnost konfigurační konzole. Z tohoto důvodu byla doplněna možnost odpojit dekodér CS8416 a přepnout mikrokontrolér do režimu I²S master. Otázkou zůstává, zda bude mikrokontrolér schopen dostatečně rychle přeposílat vzorky z modulu na sběrnici a zda se povede objednat bluetooth modul, který je bez ohledu na uvedený popis produktu touto funkcí skutečně vybaven. Situaci dále komplikuje fakt,

```

void Init_USART()
{
    // Definice struktur pro nastaveni periferii
    GPIO_InitTypeDef GPIO_InitStructure;
    USART_InitTypeDef USART_InitStructure;

    // Povoleni hodin pro branu A (GPIOA) a pro periferii USART2
    RCC_AHBPeriphClockCmd(RCC_AHBPeriph_GPIOA, ENABLE); //Je na sbernici AHB
    RCC_APB1PeriphClockCmd(RCC_APB1Periph_USART2, ENABLE); //Je na sbernici APB1

    // Prepnuti prislusnych pinu do AF (alternative function)
    GPIO_PinAFConfig(GPIOA, GPIO_PinSource2, GPIO_AF_1); //Na pinu 2 zvol AF1
    GPIO_PinAFConfig(GPIOA, GPIO_PinSource3, GPIO_AF_1); //Na pinu 3 zvol AF1

    // Naplneni konfiguracni struktury pro tyto piny
    GPIO_InitStructure.GPIO_Pin = GPIO_Pin_2 | GPIO_Pin_3; //Lze pouzivat OR
    GPIO_InitStructure.GPIO_Mode = GPIO_Mode_AF; //Piny jsou prepnuty do AF
    GPIO_InitStructure.GPIO_Speed = GPIO_Speed_2MHz; //Nast. rychlost rozhrani
    GPIO_InitStructure.GPIO_OType = GPIO_OType_PP; //PP=PushPull, OD=OpenDrain
    GPIO_InitStructure.GPIO_PuPd = GPIO_PuPd_NOPULL; //Zadny interni pull-up/down

    // Zavolani konfiguracni funkce pro tyto piny
    GPIO_Init(GPIOA, &GPIO_InitStructure); //Predani prave nastavene struktury

    /** Nyni je hotova konfigurace GPIO, nasleduje konfigurace USART2 **/

    // Reset a naplneni vychozimi hodnotami
    USART_DeInit(USART2);
    USART_StructInit(&USART_InitStructure);

    // Naplneni konfiguracni struktury pro USART
    USART_InitStructure.USART_BaudRate = 9600;
    USART_InitStructure.USART_WordLength = USART_WordLength_8b;
    USART_InitStructure.USART_StopBits = USART_StopBits_1;
    USART_InitStructure.USART_Parity = USART_Parity_No;
    USART_InitStructure.USART_Mode = USART_Mode_Rx | USART_Mode_Tx; //Duplex
    USART_InitStructure.USART_HardwareFlowControl = USART_HardwareFlowControl_None;

    // Zavolani konfiguracni funkce pro periferii USART2
    USART_Init(USART2, &USART_InitStructure);

    // Samotne zapnuti periferie USART2
    USART_Cmd(USART2, ENABLE); //Hlavni ZAPnuti
}

```

Obrázek 4.4: Příklad konfigurace periferie pomocí standardní knihovny.

že periferie SPI1 nemůže být současně používána s periferií I²S, přestože mohou být a jsou fyzicky namapovány na jiné piny pouzdra.

V hlavičkovém souboru `Bluetooth.h` jsou definovány funkce pro práci s modulem. Po spuštění je nutné modul inicializovat voláním funkce `InitBluetooth()`. Dále je možné pracovat se vstupem pomocí připravených funkcí pro tisk čísel a znakových řetězců. Pomocí těchto funkcí je v hlavní smyčce programu vytvořena konfigurační konzole. K té se lze po spárování modulu s počítačem připojit v linuxu příkazem `screen /dev/rfcomm0`, případně programem Hyperterminál ve Windows.

4.3.2 Komunikace s LCD displejem

Pro komunikaci s LCD displejem je použita periferie SPI1. Většina amatérských návodů dostupných online uvádí, že displej s řadičem PCD8544 lze ovládat po sběrnici SPI. Toto tvrzení není zcela pravdivé, protože celkem je pro obsluhu displeje potřeba pět pinů mikrokontroléru. Pokud je periferie SPI dostupná, je výhodné k odesílání dat do řadiče displeje využít vodiče SCK a MOSI (displej je vždy v roli slave). Zbývající trojice pinů je nutná pro `chipselect`, `reset` a přepínač `data/command`, který určuje jak budou data odeslána do LCD interpretována.

Funkce pro práci s displejem jsou v hlavičkovém souboru `NokiaLCD.h`. Po spuštění je nutné uvést displej do resetu a následně inicializovat odesláním konfigurační sekvence. To se provede voláním funkce `InitLCD()`. Knihovna pro práci s displejem byla pro účely této práce přepsána pro použitý mikrokontrolér a upravena tak, aby zohledňovala rozdílnou velikost framebufferu a viditelné oblasti displeje. Ve srovnání s hotovými knihovnami dostupnými pro jiné mikroprocesorové platformy (například Atmel) obsahuje pouze základní funkce.

4.3.3 Nastavení parametrů převodníků

Konkrétní nastavení převodníků závisí na osazení modulů. Výchozí nastavení počítá s převodníkem PCM1792DB v roli sluchátkového zesilovače a převodníkem PCM1794DB v roli linkového výstupu. Obvod PCM1794 je ovládaný hardwarově pomocí GPIO pinů. Výměnou za malé možnosti konfigurace a absenci digitálního ovládání hlasitosti nabízí mírně lepší parametry ve srovnání se softwarově řízeným PCM1792 ze stejné rodiny.

PCM1794 je s řídicím mikrokontrolérem propojen pomocí celkem osmi GPIO pinů. Režim činnosti se nastavuje pomocí čtveřice `MONO`, `CHSL`, `FMT0` a `FMT1`. Formát dat je určen dvojicí `FMT0` a `FMT1`. `CHSL` ve stereorežimu nastavuje rolloff. Více v tabulce 4.1.

Druhou čtveřici tvoří `MUTE`, `DEM`, `RESET` a vstupní příznak `ZERO`. Funkce `MUTE` a `RESET` jsou zřejmé. `DEM` umožňuje zapnutí deemfáze, pokud byla část spektra příchozího signálu před přenosem tímto způsobem zesílena (tato funkce může být užitečná například při přehrávání záznamu FM rádia, kde se tato úprava používá k potlačení šumu v přenosovém pásmu). Příznak `ZERO` je vyvolán převodníkem v případě, kdy bylo na obou kanálech po dobu delší než 1024 vzorků detekováno digitální ticho.

PCM1792 je řízen pomocí sběrnice SPI. Na rozdíl od PCM1794 umožňuje detailnější nastavení a hlavně možnost digitálně nastavovat útlum v rozmezí 0 až -120 dB. Komunikace je 16 bitová. Konfigurační registry jsou očíslovány nezvykle čísly 16 až 23. Nejvyšší bit určuje typ transakce, následuje sedmibitové číslo registru a zbývajících osm bitů reprezentuje data.

MONO	CHSL	FMT1	FMT0	FORMAT	STEREO/MONO	DF ROLLOFF
0	0	0	0	I ² S	Stereo	Sharp
0	0	0	1	Left-justified format	Stereo	Sharp
0	0	1	0	Standard, 16-bit	Stereo	Sharp
0	0	1	1	Standard, 24-bit	Stereo	Sharp
0	1	0	0	I ² S	Stereo	Slow
0	1	0	1	Left-justified format	Stereo	Slow
0	1	1	0	Standard, 16-bit	Stereo	Slow
0	1	1	1	Digital filter bypass	Mono	–
1	0	0	0	I ² S	Mono, L-channel	Sharp
1	0	0	1	Left-justified format	Mono, L-channel	Sharp
1	0	1	0	Standard, 16-bit	Mono, L-channel	Sharp
1	0	1	1	Standard, 24-bit	Mono, L-channel	Sharp
1	1	0	0	I ² S	Mono, R-channel	Sharp
1	1	0	1	Left-justified format	Mono, R-channel	Sharp
1	1	1	0	Standard, 16-bit	Mono, R-channel	Sharp
1	1	1	1	Standard, 24-bit	Mono, R-channel	Sharp

Tabulka 4.1: Konfigurace formátu vstupních dat pro PCM1794, převzato z [11].

Pokud používáme pouze 8 bitové rozhraní SPI, lze odesílat dvojice příkazů za sebou. Jen je třeba dát pozor na signál `chipselect`, který musí být sepnutý po celou dobu přenosu obou bytů. Více v tabulce 4.2.

	B15	B14	B13	B12	B11	B10	B9	B8	B7	B6	B5	B4	B3	B2	B1	B0
Register 16	R/W	0	0	1	0	0	0	0	ATL7	ATL6	ATL5	ATL4	ATL3	ATL2	ATL1	ATL0
Register 17	R/W	0	0	1	0	0	0	1	ATR7	ATR6	ATR5	ATR4	ATR3	ATR2	ATR1	ATRO
Register 18	R/W	0	0	1	0	0	1	0	ATLD	FMT2	FMT1	FMT0	DMF1	DMF0	DME	MUTE
Register 19	R/W	0	0	1	0	0	1	1	REV	ATS1	ATS0	OPE	RSV	DFMS	FLT	INZD
Register 20	R/W	0	0	1	0	1	0	0	RSV	SRST	DSD	DFTH	MONO	CHSL	OS1	OS0
Register 21	R/W	0	0	1	0	1	0	1	RSV	RSV	RSV	RSV	RSV	DZ1	DZ0	PCMZ
Register 22	R	0	0	1	0	1	1	0	RSV	RSV	RSV	RSV	RSV	RSV	ZFGR	ZFGL
Register 23	R	0	0	1	0	1	1	1	RSV	RSV	RSV	ID4	ID3	ID2	ID1	ID0

Tabulka 4.2: Seznam konfiguračních registrů PCM1792, převzato z [10].

Řízení útlumu, neboli ovládání hlasitosti, je po startu vypnuto a je nutné jej povolit v registru 18 nastavením hodnoty ATLD. K samotnému nastavení hlasitosti slouží registry 16 a 17. Řízení útlumu je osmibitové s krokem 0,5 dB. Spodní hodnoty 0 až 14 jsou interně interpretovány jako MUTE. Po probuzení z resetu je převodník proti předpokladu již zapnutý, příznak OPE v registru 19 není nutné nastavovat. Pro správnou činnost stačí pouze zvolit formát v registru 18.

4.3.4 Komunikace s dekodérem

Díky čtveřici pull-up a pull-down rezistorů je obvod dekodéru po probuzení z resetu přepnutý do I²C režimu a adresa nastavena 0x20. Nastavení periferie mikrokontroléru se provede zavoláním funkce `Init_CS8416` z hlavičkového souboru `CS8416.h`. Konfigurace sběrnice I²C byla značně problematická. Na vině našťastí nebyla chyba některé ze součástek, ale chyba při návrhu, kdy jsem při vývoji desky zcela nepochopitelně zapomněl na pull-up rezistory.

To je u I²C sběrnice zásadní problém. Ve snaze elegantně vyřešit tento omyl jsem zapnul interní pull-up rezistory na pinech mikrokontroléru. Jejich hodnota se bohužel podle katalogového listu pohybuje v rozmezí 20 – 30 kΩ a jsou tak proti doporučeným 2,2 kΩ příliš slabé. Odesílání dat přesto začalo fungovat a bylo bez problémů čitelné logickým analyzátozem. Toto zjištění odvedlo moji pozornost od hardwarového problému, kdy jsem předpokládal že absence potvrzení o odeslání dat a následné odpovědi je problémem chybně nastavených příznaků. Problém trvající několik dnů nakonec vyřešilo prosté doletování chybějících pull-up rezistorů na vodiče sběrnice.

Dekodér obsahuje celkem 128 konfiguračních registrů, viz. tabulka 4.3. Při čtení je čítač adresy automaticky inkrementován (dekodér se v tomto hledu chová jako naprosto standardní I²C sériová paměť) a není tak problém kdykoli zjistit stav ve kterém se nachází.

Addr (HEX)	R/W	Function	7	6	5	4	3	2	1	0
00	R/W	Control0	0	FSWCLK	0	0	PDUR	TRUNC	Reserved	Reserved
01	R/W	Control1	SWCLK	MUTSAO	INT1	INT0	HOLD1	HOLD0	RMCKF	CHS
02	R/W	Control2	DETCI	EMPH_CN TL2	EMPH_CN TL1	EMPH_CN TL0	GPO0SEL3	GPO0SEL2	GPO0SEL1	GPO0SEL0
03	R/W	Control3	GPO1SEL3	GPO1SEL2	GPO1SEL1	GPO1SEL0	GPO2SEL3	GPO2SEL2	GPO2SEL1	GPO2SEL0
04	R/W	Control4	RUN	RXD	RXSEL2	RXSEL1	RXSEL0	TXSEL2	TXSEL1	TXSEL0
05	R/W	Serial Audio Data Format	SOMS	SOSF	SORES1	SORES0	SOJUST	SODEL	SOSPOL	SOLRPOL
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

Tabulka 4.3: Seznam konfiguračních registrů CS8416, převzato z [14].

Nejpodstatnějších je spodních šest konfiguračních registrů `Control0` až `Control4` a `SerialAudioDataFormat`, pomocí kterých se realizuje výběr vstupu a základní funkce. Pro samotné zapnutí převodníku je potřeba

- Zapsat hodnotu `0x80` do registru `Control4`.
- Přepnout dekodér do master módu zapsáním `0x80` do registru `SerialAudioDataFormat`.

Po této inicializaci se rozběhne generátor hlavního hodinového signálu `RMCK`, který je rekonstruován pomocí fázového závěsu z příchozích dat na kanálu 0. Fázový závěs dosáhne zasynchronizování přibližně za 12 ms. Podle osazených D/A převodníků na modulech je zvolen odpovídající formát výstupních dat. Pokud jsou převodníky nastaveny správně, na výstupech modulů se objeví analogový audio signál. Převodník začne hrát.

Kapitola 5

Oživení zařízení

5.1 Základní deska

Základní deska na sobě nese řídicí mikrokontrolér, dekodér a bluetooth modul. Parametry těchto obvodů jsou popsány v kapitole č.3, Koncepce převodníku. Tato kapitola se zabývá způsobem osazení a oživení jednotlivých desek. Také detailně popisuje problémy vzniklé při vývoji, které se projeví až při výrobě převodníku.

5.1.1 Osazení základní desky

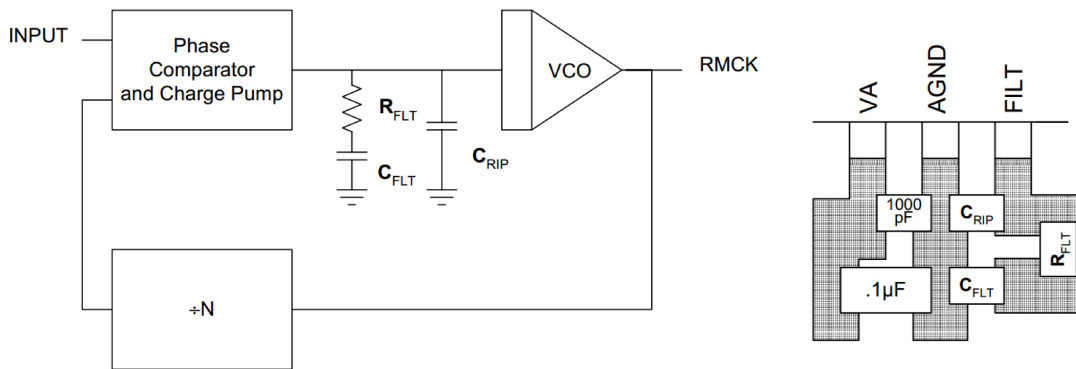
Základní deska jako jediný plošný spoj navržený v rámci této práce obsahuje větší množství propojek a má smysl uvažovat o její výrobě v dvouvrstevném provedení. Osazená základní deska v jednostranném provedení tak, jak vznikla v rámci této práce, je na obrázku 5.2.

- Při osazování se začíná propojkami pro datové sběrnice a silnějšími propojkami pro napájení. Dokud na plošném spoji nejsou žádné elektronické komponenty, je možné propojky kvalitně zarovnat přitlačením plošného spoje k desce stolu.
- Následně se osadí konektory, oboustrané kolíky, dutinkové lišty a resetovací tlačítko S1. V této fázi je možné pro zapájení použít trafopájkku, která dostatečně rychle ohřeje velké plochy a piny konektorů, aniž by došlo k roztavení jejich plastových částí.
- V další fázi se osadí stabilizátory LE50 a LE33 a jejich pasivní komponenty. Po osazení je vhodné základní desku připojit ke zdroji a ověřit přítomnost a stabilitu napájecích napětí. Taktéž je třeba zkontrolovat přítomnost příslušných napájecích napětí na odpovídajících ploškách pouzder mikrokontroléru, dekodéru a bluetooth modulu.
- Nyní je třeba osadit mikrokontrolér a blokové kondenzátory na pinech VSS, VDD, VSSA a VDDA. Dále se osadí kondenzátor C10 a rezistor R12, které jsou nutné pro správné chování mikrokontroléru při resetu a při programování.
- Před pájením mikrokontroléru je třeba odstranit nečistoty a mastnotu acetonem a na plošky nanést pájecí pastu pro letování BGA pouzder. Na důkladně očištěný hrot pájecí stanice se nanese velmi malé množství cínu s nízkou teplotou tání a obvod se zafixuje na místě pomocí několika krajích pinů. Následuje kontrola přesného umístění a zaletování zbývajících vývodů. Poté je třeba zkontrolovat, že při letování nedošlo ke zkratování pinů mikrokontroléru.

- Deska se připojí ke zdroji napájecích napětí a pomocí pětipinového konektoru k programátoru. V programu ST-LINK Utility se zvolí rodina mikrokontrolérů STM32F051x8x a vyčte se obsah paměti. Pokud je vše v pořádku, budou z paměti přečteny výhradně samé jedničky. V této chvíli je zřejmé, že mikrokontrolér funguje a je možné přejít k osazení zbylých komponent.
- Nyní je vhodné osadit krystaly mikrokontroléru a zbytek pasivních součástek. Bluetooth modul a dekodér CS8416 se osazuje jako poslední. Při osazování dekodéru je nutné velmi pečlivě osadit filtr fázového závěsu složený z kondenzátorů C5 až C8 a rezistor R5.
- U kondenzátorů C7 a C8 je nezbytně nutné dodržet materiál dielektrika (viz. tabulka 5.1). Fázový závěs slouží pro generování hlavního hodinového signálu RMCK pro sběrnici I²S. Nevhodný typ součástek a nedodržení tvaru plošného spoje (obr. 5.1) mají přímý vliv na kvalitu rekonstruovaného hodinového signálu a tím i na výsledný jitter. Frekvence generovaná fázovým závěsem se v závislosti na vzorkovací frekvenci pohybuje v rozmezí 11 – 25 MHz.

Součástka	Hodnota	Doporučený	Alternativní	Nevhodný
C_{RIP}	1000p	NPO	C0G	Z5U, Y5V
C_{FLT}	22n	X7R	–	Z5U, Y5V
R_{FLT}	3k0	1 %		

Tabulka 5.1: Doporučené materiály součástek fázového závěsu.

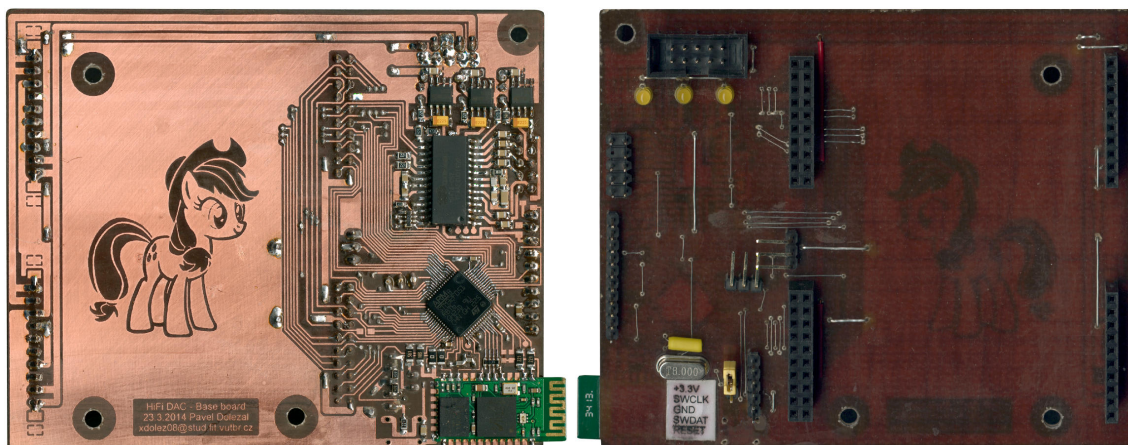


Obrázek 5.1: Komponenty filtru fázového závěsu a doporučený layout PCB, převzato z [14].

5.1.2 Navázání komunikace s mikrokontrolérem

Pro programování mikrokontroléru je vyvedeno rozhraní serial wire debugging – SWD, kterým jsou vybaveny všechny mikrokontroléry STM32. Toto rozhraní podporují všechny programátory ST-Link a je dostupné na drtivě většině vývojových kitů od ST microelectronics. Jakýkoli vývojový kit ST je zároveň programátor.

Rozhraní umožňuje nejen programování, ale i online ladění kódu. Komunikace probíhá pomocí dvojice signálů SWD (data) a SWC (hodiny). Dále je třeba resetovat cílový mikrokontrolér přímo z programátoru (signál reset). Některé mikrokontroléry STM32 mají



Obrázek 5.2: Osazená základní deska převodníku.

Pin	Název	Popis
1	VDD	Napájecí napětí 3,3 V (není podmínkou)
2	SWC	Hodinový signál rozhraní SWD
3	GND	Zem
4	SWD	Datový signál rozhraní SWD
5	RST	Reset (aktivní v logické nule)
6	SWO	Doplňkový signál SWD pro JTAG (není podmínkou)

Tabulka 5.2: Zapojení rozhraní SWD mikrokontrolérů STM32.

vyvedený ještě signál SWO který je používán při emulaci JTAG rozhraní. Ani programátor ST-Link V2 dostupný na kitu STM32L-Discovery pomocí kterého byl mikrokontrolér programován nemá tento pin připojený.

5.1.3 Naprogramování mikrokontroléru

Osazenou základní desku lze naprogramovat pomocí pětipinového konektoru SWD rozhraní poblíž krystalu. Pořadí pinů odpovídá tabulce 5.2. Pro programování lze využít prostředí Keil μ Vision nebo utilitu ST-LINK. Kompletní zdrojové kódy včetně linkované standardní knihovny jsou dostupné ve složce `firmware` na příloženém CD.

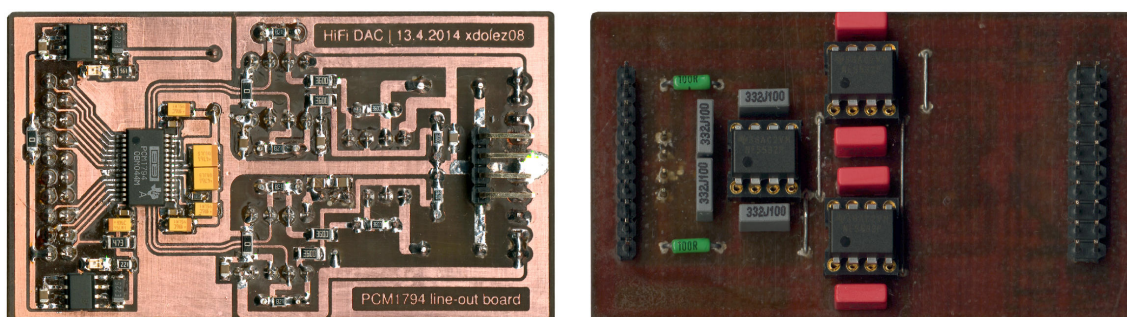
5.2 Modul linkového výstupu s PCM1794

Modul linkového výstupu lze rozdělit na digitální a analogovou část. Obě části se spojují v místě pod čipem převodníku, kde se setkává digitální a analogová zem. V digitální části jsou osazeny stabilizátory napětí pro převodník, v tomto případě pro 3,3 a 5,0 V, samotný převodník a filtry napájecích napětí. V analogové části je výstupní proudový diferenční signál z převodníku převeden na napěťový signál pomocí čtveřice operačních zesilovačů. Následná úprava na klasický linkový výstup s úrovněmi 1 V p-p je řešena další dvojicí operačních zesilovačů.

5.2.1 Osazení modulu

Každý modul na sobě nese nejdražší součástku celého zařízení kterou je samotný D/A převodník. V případě obvodu BurrBrown PCM1794DB se jedná o částku 600 Kč. Jeho osazení a osazení filtrů v jeho okolí je třeba věnovat dostatečnou pozornost a pečlivost.

- Nejprve se osadí konektory, oboustranné kolíky a precizní patice pro operační zesilovače v pouzdrech DIL8.
- Dále jsou osazeny stabilizátory LE50 a LE33 včetně jejich pasivních komponent a otestována přítomnost správných napájecích napětí na jejich výstupech a na příslušných ploškách TSSOP pouzdra převodníku.
- Nyní jsou osazeny všechny pasivní komponenty. U rezistorů v analogové části je velmi vhodné dodržet 1% toleranci.
- Do patic jsou osazeny vhodné operační zesilovače (levné, například NE5532) a modul je vyzkoušen bez osazeného převodníku. Po připojení výstupu k audio aparatuře nesmí být slyšet brum, praskání ani jiné nežádoucí jevy.
- Před pájením převodníku je třeba odstranit nečistoty a mastnotu acetonem a na plošky nanést pájecí pastu pro letování BGA pouzder. Na důkladně očištěný hrot pájecí stanice se nanese velmi malé množství cínu s nízkou teplotou tání a obvod se zafixuje na místě pomocí několika krajích pinů. Následuje kontrola přesného umístění a zaletování zbývajících vývodů. Poté je třeba zkontrolovat, že při letování nedošlo ke zkratování pinů převodníku.
- Nyní je nutné osadit blokovací kondenzátory C1, C2, C26 a rezistor R1, které jsou ve velikosti 0603 a k nimž by po osazení okolních tantalových kondenzátorů filtru nebyl možný přístup. Poté jsou osazeny zbývající komponenty.



Obrázek 5.3: Osazený modul linkového výstupu.

5.2.2 Oživení

Po prvním připojení modulu se ozval pouze hlasitý šum a praskání. Po návratu ke schématu zapojení jsem objevil chybu, které jsem se dopustil pravděpodobně ve chvíli, kdy jsem zpřehledňoval schémata zapojení v programu Eagle. Aby nedocházelo ke zbytečnému křížení vodičů ve schématu, otočil jsem symboly operačních zesilovačů, s nimi i jejich vstupy, ale

nikoli další komponenty. Zpětné vazby byly chybně vedeny na neinvertující vstupy a invertující vstupy byly uzemněné.

Problém se nakonec ukázal řešitelný esteticky přijatelným přemístěním součástek na desce plošného spoje. Praskání bohužel neustalo, pouze se změnila barva šumu. Neplánovaná záměna zavedla chybu i na desymetrizační operační zesilovač na výstupu, kde bylo díky předchozí neplánované úpravě také nutné zaměnit vstupy. Tato úprava se již neobešla bez přerušování dvou vodičů na desce plošného spoje, které jsem se snažil celou dobu vyhnout. Po zapnutí se již převodník choval dle očekávání.

Po připojení desky s digitálními vstupy následoval další problém. Slyšet bylo pouze silné praskání a zvonivý zvuk po připojení zdroje signálu. Po připojení k bluetooth konzoli a sledování stavu dekodéru se ukázalo, že dekodér neustále přepíná typ detekovaného signálu, vzorkovací frekvenci a že dochází k rozsynchronizování fázového závěsu. V tento okamžik jsem měl z celé práce velmi špatný pocit. Nedokázal jsem si představit jakým způsobem a zda vůbec bude tato situace řešitelná. Jediným logickým závěrem se zdála být nedostatečně precizně navržená základní deska. Po překontrolování hodnot a typů součástek ve fázovém závěsu dekodéru, tvarů pájecích ploch na plošném spoji a zapojení konektoru pro digitální vstupy nebyla zjištěna žádná chyba. Po odpojení desky vstupů problém ustal a dekodér se choval dle očekávání.

O několik hodin později jsem náhodou připojil uzemnění sondy osciloskopu na jiný pin a šum skoro kompletně zmizel. Odpojil jsem desku vstupů a přivedl signál na vstup dekodéru pouze přes kondenzátor. Praskání prakticky zmizelo a v šumu pozadí byl slyšet slabý, ale čistý zvuk. Po připojení zemnicí krokosvorky sondy začal převodník hrát. Řešení bylo nasnadě. Jak osciloskop, tak počítač který sloužil jako zdroj signálu byly připojeny do zásuvky tříkolíkovou vidlicí, zatímco převodník pouze dvoukolíkovou. Zemní potenciály počítače a osciloskopu byly tím pádem stejné.

Dvoukolíková vidlice u převodníku je použita záměrně, aby se zabránilo šíření brumu a problému zemních smyček. Ze stejného důvodu jsou i všechny vstupy převodníku galvanicky oddělené. Pokud připojení sondy vyřešilo problém, existuje jen jedno rozumné vysvětlení. Operační zesilovač integrovaný v dekodéru pravděpodobně nemá správně zapojeny oba vstupy.

V katalogovém listu [14] je na straně 27 v kapitole o vstupním multiplexoru uvedeno, že nepoužívané vstupy mají zůstat nepřipojené, případně přizemněné k analogové zemi. Druhý vstup operačního zesilovače má být v případě použití nesymetrických zdrojů signálu uzemněn. Tuto úlohu na desce digitálních vstupů řeší jumper J1. Ten však měl na změnu chování jen minimální vliv, zatímco připojená sonda problém prakticky zcela vyřešila. Celý problém byl nakonec v délce propojovacího kabelu mezi základní deskou a deskou digitálních vstupů. Jeho délka byla skoro 30 cm, vstupní signály o frekvencích až 25 MHz v této délce nejsou stíněné a referenční zem pro záporný vstup operačního zesilovače převodníku vede přímo vedle nich. Připojením záporného vstupu nejkratší možnou cestou pomocí můstku přímo na základní desce problém vyřešilo.

Převodník nyní hrál na první poslech bez problémů. Bohužel po přepnutí digitálního výstupu počítače na frekvenci 192 kHz se několikrát do minuty se ozvaly shluky zapraskání. Celé zapojení se zdálo být v pořádku. Až na počítači vyskočila hláška o aktualizaci antiviru a místo systémového zvuku Windows se ozval jen šum. Počítač jsem restartoval a problém zmizel. Úplně poslední problém s praskáním v signálu byl způsoben starými ovladači zvukové karty.

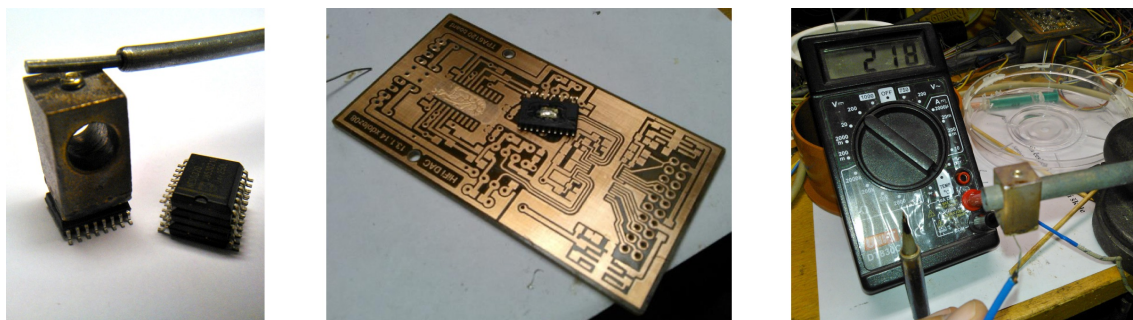
5.3 Modul linkového výstupu s PCM1792

Modul linkového výstupu lze rozdělit na digitální a analogovou část. Digitální zem GND a analogová AGND jsou propojeny v jednom místě pod čipem. Modul je navíc vybaven monolitickým koncovým stupněm pro sluchátkový zesilovač TPA6210A2. V digitální části jsou osazeny stabilizátory napětí pro převodník, v tomto případě pro 3,3 a 5,0 V, které napájejí samotný převodník a jeho filtry. V analogové části je výstupní proudový diferenční signál z převodníku převeden na napěťový signál pomocí čtveřice operačních zesilovačů, který je přiveden na vstupy TPA6120.

5.3.1 Pájení pouzdra PowerPAD

Na rozdíl od modulu linkového výstupu zde nastává problém s pájením v domácích podmínkách. Obvod TPA6120 se dodává pouze v provedení PowerPAD se zemní pájecí plochou pod čipem. Tento obvod je proto nutné osadit jako první. Plošný spoj je nutné předeheat na teplotu 150 – 200 °C aby tepelná kapacita nutná k prohřátí zemní plochy zkrz pouzdro čipu byla co možná nejnižší. Maximální povolená teplota pouzdra je navíc jen relativně nízkých 235 °C což situaci dále komplikuje.

Při prvním pokusu bez předeheatu plošného spoje bylo použito 125 W traťpájkky se silným okem, ke kterému byla přiletována měděná destička o velikosti pouzdra a síle 1 mm tak, aby na vrchní stranu čipu bylo možná působit v celé ploše. Na plošný spoj byla nanášena pájecí pasta, na problematickou plochu čipu nízkotavitelný cín. Vrchní strana obvodu byla namazána tepelně vodivou pastou. Bohužel i přes snahu udržet teplotu oka jen o málo vyšší než je teplota pouzdra, došlo před dosednutím čipu k jeho roztržení tepelným namáháním.



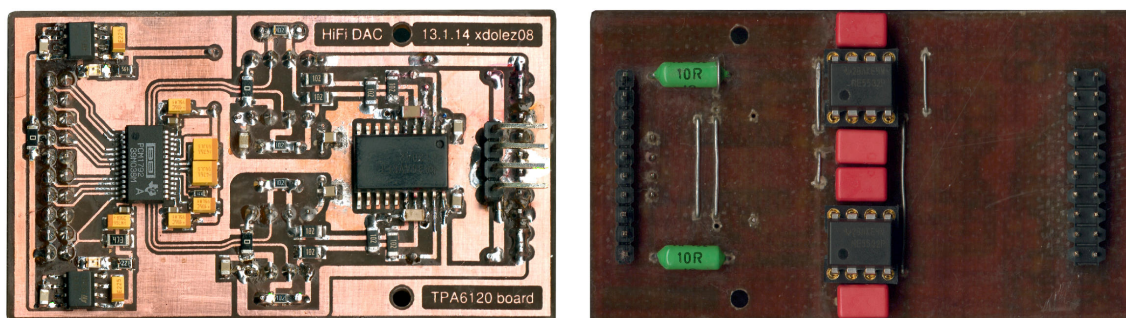
Obrázek 5.4: Hrot z měděného hranolu, pouzdro PowerPAD a nastavení teploty.

Při druhém pokusu byl plošný spoj předeheat horkovzdušnou pistolí s možností regulace teploty vzduchu. Pro měření teploty horní strany plošného spoje byl použit termistor s voltmetrem a pro ohřev pouzdra speciální hrot na pájecí stanici Tesla ERS-50, který vznikl provrtáním měděného hranolu. To umožnilo velmi přesně přednastavit teplotu hrotu a přitom mít díky relativně velkému kusu mědi k dispozici dostatečnou tepelnou kapacitu pro prohřátí pouzdra. Zaletování TPA6120 se tak stalo největší technickou výzvou při mechanické konstrukci zařízení.

5.3.2 Osazení modulu

Modul je osazen převodníkem BurrBrown PCM1792DB v ceně 850 Kč. Jeho osazení a osazení filtrů v jeho okolí je vhodné věnovat dostatečnou pozornost a pečlivost.

- Po úspěšném zapájení TPA6120 jsou osazeny konektory, oboustranné kolíky a precizní patice pro operační zesilovače v pouzdrech DIL8.
- Dále jsou osazeny stabilizátory LE50 a LE33 včetně jejich pasivních komponent a otestována přítomnost správných napájecích napětí na výstupech a na příslušných ploškách TSSOP pouzdra převodníku.
- Nyní jsou osazeny všechny pasivní komponenty. U rezistorů v analogové části je velmi vhodné dodržet 1 % toleranci.
- Do patic jsou vloženy vhodné operační zesilovače (levné, například NE5532) a vyzkoušíme modul bez osazeného převodníku. Po připojení sluchátek nesmí být slyšet brum, praskání ani jiné nežádoucí jevy.
- Před pájením převodníku je třeba odstranit nečistoty a mastnotu acetonem a na plošky nanést pájecí pastu pro letování BGA pouzder. Na důkladně očištěný hrot pájecí stanice se nanese velmi malé množství cínu s nízkou teplotou tání a obvod se zafixuje na místě pomocí několika krajích pinů. Následuje kontrola přesného umístění a zaletování zbývajících vývodů. Poté je třeba zkontrolovat, že při letování nedošlo ke zkratování pinů převodníku.
- Nyní je nutné osadit blokovací kondenzátory C1, C2, C26 a rezistor R1, které jsou ve velikosti 0603 a k nimž by po osazení okolních tantalových kondenzátorů filtru nebyl možný přístup. Poté jsou osazeny zbývající komponenty.



Obrázek 5.5: Osazený modul sluchátkového zesilovače.

5.4 Napájecí zdroj

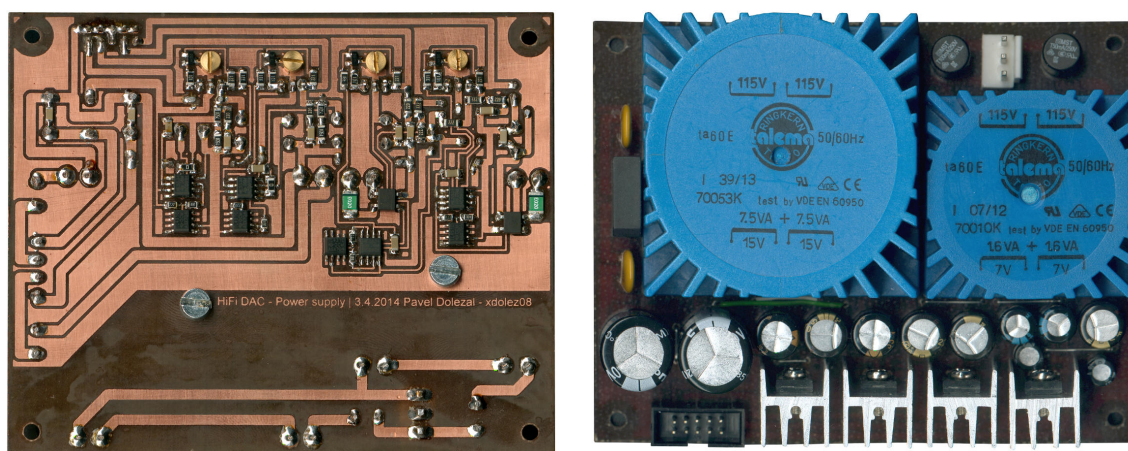
Deska napájecího zdroje na sobě nese oba napájecí transformátory Talema, přívod síťového napětí 230 V, usměrňovače a obvody stabilizátorů.

5.4.1 Osazení desky napájecího zdroje

Deska napájecího zdroje je navržena jako jednovrstvá s převahou SMD součástek.

- Při osazování se začíná propojkami. Následně jsou upevněny transformátory pomocí šroubů M4 a zaletovány jejich vývody. Poté jsou osazeny tavné pojistky, konektory síťového přívodu a výstupních napětí, usměrňovače a vstupní kondenzátory. Následuje kontrola průchodnosti tavných pojistek.

- Zdroj jen připojen k síťovému napětí 230 V a je zkontrolována přítomnost střídavých a usměrněných napětí na vstupech usměrňovače a na kondenzátorech.
- Jsou osazeny napěťové reference TL431 a rezistory R1, R2, R17 a R25. Zdroj je znovu spuštěn a je ověřena přítomnost referenčního napětí 2,50 V na všech větvích.
- Pokračuje se osazením operačních zesilovačů NE5534 a všech zbývajících součástek. Pozornost je nutné věnovat hlavně děličům výstupních napětím, které určují hodnotu výstupního napětí příslušné větve zdroje. Pokud to situace dovoluje, jsou osazovány rezistory s přesností 1 % nebo alespoň rezistory ze stejné várky, jejichž hodnoty netrpí velkou vzájemnou chybou. Napěťové reference pro větve +15 V a -15 V pracují s relativně vysokou tepelnou ztrátou. Je proto vhodné zaletovat všechny piny pouzdra SO8 kvůli lepšímu chlazení.



Obrázek 5.6: Osazený zdroj napájení.

5.4.2 Zátěžový test

Při bezchybném osazení by měl zdroj fungovat na první pokus. Po zapnutí je ověřena stabilita a zvlnění výstupních napětí a připojena vhodná zátěž. Zdroj je ponechán v provozu s touto zátěží po dobu několika hodin. Průběžně je kontrolována stabilita napětí a teplota koncových tranzistorů.

Kapitola 6

Závěr

Cílem práce bylo navrhnout převodník digitálního signálu na analogové audio s ohledem na co možná nejvyšší kvalitu reprodukce. Výsledkem je konfigurovatelné modulární zařízení s kvalitním napájecím zdrojem a univerzální základní deskou, do které je možné osadit moduly s profesionálními převodníky různých výrobců. Rozhraní modulů je unifikováno, což usnadňuje vývoj nových modulů osazených kvalitnějšími obvody, které přijdou na trh v následujících letech.

V průběhu práce na převodníku se nezávisle na sobě objevilo několik zájemců. Bohužel konstrukce, tak jak vznikla v této práci, nepřipouští mnoho kompromisů, což se nepříznivě odráží na celkové ceně, která v plném osazení jen na součástkách a materiálu činí necelých 8000 Kč.

V rámci dotazů byla poptávána možnost dekodování zvuku přímo z rozhraní HDMI, Display Port, dálkové ovládání a rozhraní USB. Technicky se nezdá být překážkou doplnění základní desky o průchozí HDMI konektory, protože použitý mikrokontrolér je vybaven periferií HDMI-CEC pro komunikaci mezi zařízeními propojenými tímto rozhraním. V době psaní závěru této práce (květen 2014) také začíná být dostupný nový převodník USB na I²S CP2114 [23] od společnosti Silicon Labs, který kromě přenosu zvuku z PC podporuje i streamování z mobilních zařízení iPhone a iPad.

V tuto chvíli je velmi pravděpodobné, že převodník vznikne v malé sérii 5-10 ks. Otázkou zůstává množství úprav, které by měly výrobě předcházet. Nabízí se zjednodušení napájecího zdroje, výše zmíněné doplnění o HDMI a další úpravy. U žádné z použitých komponent nehrozí v brzké době ukončení výroby, pouze dekodér CS8416 je nyní mnohem lépe dostupný v pouzdře TSSOP. Rozhodně zůstane zachována koncepce s výměnými moduly, které představují velkou výhodu proti konkurenčním řešením. Jako největší nedostatek práce vnímám málo prostoru věnovaného měření odchylek katalogových a skutečných parametrů.

Vlastní přínos a další vývoj

Možnosti dalšího vývoje této práce vidím v návrhu nové základní desky, která by nebyla jen evolucí současného řešení. V roce 2013 se objevily první externí zvukové karty s obvody C-media CM6631/CM6632 [28], které jako první implementují nový standard USB Audio Class 2.0. Pomocí něj je konečně možné přenést přes USB nekomprimované vícekanálové audio. Původní standard Audio Class 1.0, tak jak je popsán například v knize USB complete [1] na stranách 181-189, neumožňuje díky rozdělení samotných USB rámců spolehlivý přenos více jak dvou kanálů při vzorkovací frekvenci 48 kHz, což využití USB pro přenos

zvuku ve vysoké kvalitě velmi omezuje.

Výsledkem tohoto rozšíření by mohl být D/A převodník pro prostorový zvuk s možnostmi připojení nejen pomocí S/PDIF, Toslink a AES rozhraní, ale navíc ještě HDMI, USB a Bluetooth. Možnost výměnných modulů by byla zachována, protože výrazně prodlužuje morální životnost zařízení jako celku. Pro prostorový zvuk by samozřejmě bylo nutné tuto základní desku vybavit konektory pro trojici modulů. Kromě modulů prezentovaných v této práci jsou v tuto chvíli ve stádiu návrhu ještě moduly s obvody AD1955 [7] a CS4398 [9], od kterých se podařilo získat vzorky. Ve srovnání s výše uvedenými se nízkonapěťový a nízkospotřebový převodník Wolfson WM8741 [20] bohužel tímto způsobem nepodařilo získat.

Ocenění EEICT

Tato práce byla oceněna zvláštní cenou společnosti ON Semiconductor na studentské konferenci EEICT 2014. Odpovídající článek lze nalézt ve sborníku 20. ročníku konference na stranách 220-222.

Literatura

- [1] Alexon, J.: *USB Complete – third edition*. Lakeview Research, 2006, ISBN 978-1-931448-02-4.
- [2] ATSC Standard: Digital audio compression AC-3 [online]. 2012-12-07 [cit. 2014-01-07].
URL [http://www.atsc.org/cms/standards/A52-2012\(12-17\).pdf](http://www.atsc.org/cms/standards/A52-2012(12-17).pdf)
- [3] Jan Leinveber, P. V.: *Strojnické tabulky – čtvrté doplněné vydání*. ALBRA, 2008, ISBN 978-80-7361-051-7.
- [4] Jindřich Hála, J. D.: *Elektronika*. Nakladatelství dopravy a spojů, 1984.
- [5] Katalogový list: Operační zesilovač LT1028 [online]. 1992 [cit. 2013-11-20].
URL <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/1028fb.pdf>
- [6] Katalogový list: Operační zesilovač OPA2134 [online]. 1996-11-01 [cit. 2014-01-05].
URL <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/opa2134.pdf>
- [7] Katalogový list: AD1955 – High Performance Multibit DAC [online]. 2002 [cit. 2014-05-25].
URL http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD1955.pdf
- [8] Katalogový list: HiFi sluchátkový zesilovač TPA6120 [online]. 2004-03-01 [cit. 2013-11-20].
URL <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tpa6120a2.pdf>
- [9] Katalogový list: CS4398 Multibit DAC with volume control [online]. 2005-07-01 [cit. 2013-11-20].
URL http://www.cirrus.com/jp/pubs/proDatasheet/CS4398_F1.pdf
- [10] Katalogový list: Advanced segment D/A převodník PCM1792 [online]. 2006-11-01 [cit. 2013-11-20].
URL <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/pcm1792a.pdf>
- [11] Katalogový list: Advanced segment D/A převodník PCM1794 [online]. 2006-11-01 [cit. 2013-11-20].
URL <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/pcm1794a.pdf>
- [12] Katalogový list: Fiber Optic Receiver GP1FAV31RK0F [online]. 2006-12-01 [cit. 2014-01-06].
URL http://sharp-world.com/products/device/lineup/data/pdf/datasheet/gp1fav31rk_e.pdf

- [13] Katalogový list: Fiber Optic Receiver GP1FAV50RK0F [online]. 2006-12-01 [cit. 2014-01-06].
URL http://sharp-world.com/products/device/lineup/data/pdf/datasheet/gp1fav50rk_e.pdf
- [14] Katalogový list: 192 kHz Digital audio interface receiver [online]. 2007-08-01 [cit. 2013-11-20].
URL http://www.cirrus.com/en/pubs/proDatasheet/CS8416_F3.pdf
- [15] Katalogový list: Operační zesilovač NE5532 [online]. 2009-04-01 [cit. 2014-01-05].
URL <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ne5532.pdf>
- [16] Katalogový list: Advanced segment D/A převodník PCM1795 [online]. 2009-05-01 [cit. 2013-11-20].
URL <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/pcm1795.pdf>
- [17] Katalogový list: HC-05 Bluetooth Module AT command Set [online]. 2011-04-01 [cit. 2013-05-08].
URL http://www.linotux.ch/arduino/HC-0305_serial_module_AT_command_set_201104_revised.pdf
- [18] Katalogový list: HC-05 Bluetooth to Serial Port Module [online]. 2011-04-01 [cit. 2013-05-08].
URL <http://www.electronicastudio.com/docs/istd016A.pdf>
- [19] Katalogový list: STM32F051x advanced ARM-based 32 bit MCU [online]. 2012-07-01 [cit. 2013-10-16].
URL <http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/datasheet/DM00039193.pdf>
- [20] Katalogový list: WM8741 24-bit 192 kHz DAC with Advanced Digital Filtering [online]. 2013-02-01 [cit. 2014-05-24].
URL http://www.wolfsonmicro.com/documents/uploads/data_sheets/en/WM8741.pdf
- [21] Katalogový list: Operační zesilovač LME49860 [online]. 2013-04-01 [cit. 2014-01-05].
URL <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lme49860.pdf>
- [22] Katalogový list: Vývojový kit STM32L-Discovery [online]. 2013-04-16 [cit. 2014-01-07].
URL http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/data_brief/DM00027566.pdf
- [23] Katalogový list: Single-chip USB audio to I²S digital audio predege [online]. 2014-01-30 [cit. 2014-05-19].
URL <http://www.silabs.com/Support%20Documents/TechnicalDocs/CP2114.pdf>
- [24] Luděk Křišťan, V. V.: *Příručka pro navrhování elektronických obvodů*. SNTL Praha, 1982.
- [25] Miroslav Hrabovský, A. J.: *EAGLE pro začátečníky – Návrhový systém pro plošné spoje*. BEN – Technická literatura, 2009-01-09, ISBN 80-7300-213-2.

- [26] Popis protokolu: I²S bus specification [online]. 1996-06-05 [cit. 2014-01-02].
URL <https://www.sparkfun.com/datasheets/BreakoutBoards/I2SBUS.pdf>
- [27] WWW stránka: Nokia 3410 LCD on STM32 [online]. 2009-05-26 [cit. 2014-01-07].
URL <http://www.micromouseonline.com/2009/05/26/nokia-3410-lcd-on-the-stm32/>
- [28] WWW Stránka: Nokia LCD library [online]. 2009 [cit. 2014-04-08].
URL <http://www.microsyl.com/index.php/2010/03/24/nokia-lcd-library/>
- [29] WWW stránka: Knihovna součástek STM32F pro Eagle [online]. 2011-08-23 [cit. 2014-01-07].
URL <https://github.com/centeye/Eagle-Libraries>
- [30] WWW stránka: Stabilizovaný zdroj ZT15VA [online]. 2013-05-01 [cit. 2013-12-29].
URL <http://web.telecom.cz/macura/zt15va.htm>
- [31] WWW Stránka: Kodeky C-media pro USB 2.0 High Speed [online]. 2014 [cit. 2014-05-25].
URL <http://www.cmedia.com.tw/ProductsIndex/ClassifySerno-27.html>
- [32] WWW stránka: MicroXplorer MCU graphical configuration tool [online]. [cit. 2014-01-07].
URL <http://www.st.com/web/en/catalog/tools/PF251717>
- [33] WWW stránka: Knihovna součástek pro Eagle vč. CS8416 a PCM179x [online]. [cit. 2014-02-20].
URL <http://pavouk.org/sw/eagle/pavouk.lbr>

Příloha A

Obsah CD

Příložené CD obsahuje veškeré soubory použité při tvorbě této práce. Součástí jsou kompletní schémata a desky plošných spojů vytvořené v programu CadSoft Eagle včetně upravených knihoven třetích stran. Na CD je rovněž obsažena kompletní sada nástrojů pro programování mikrokontrolérů STM32 ve verzích, na kterých vznikala tato práce. Vývoj probíhal ve virtuálním stroji pod systémem Windows XP.

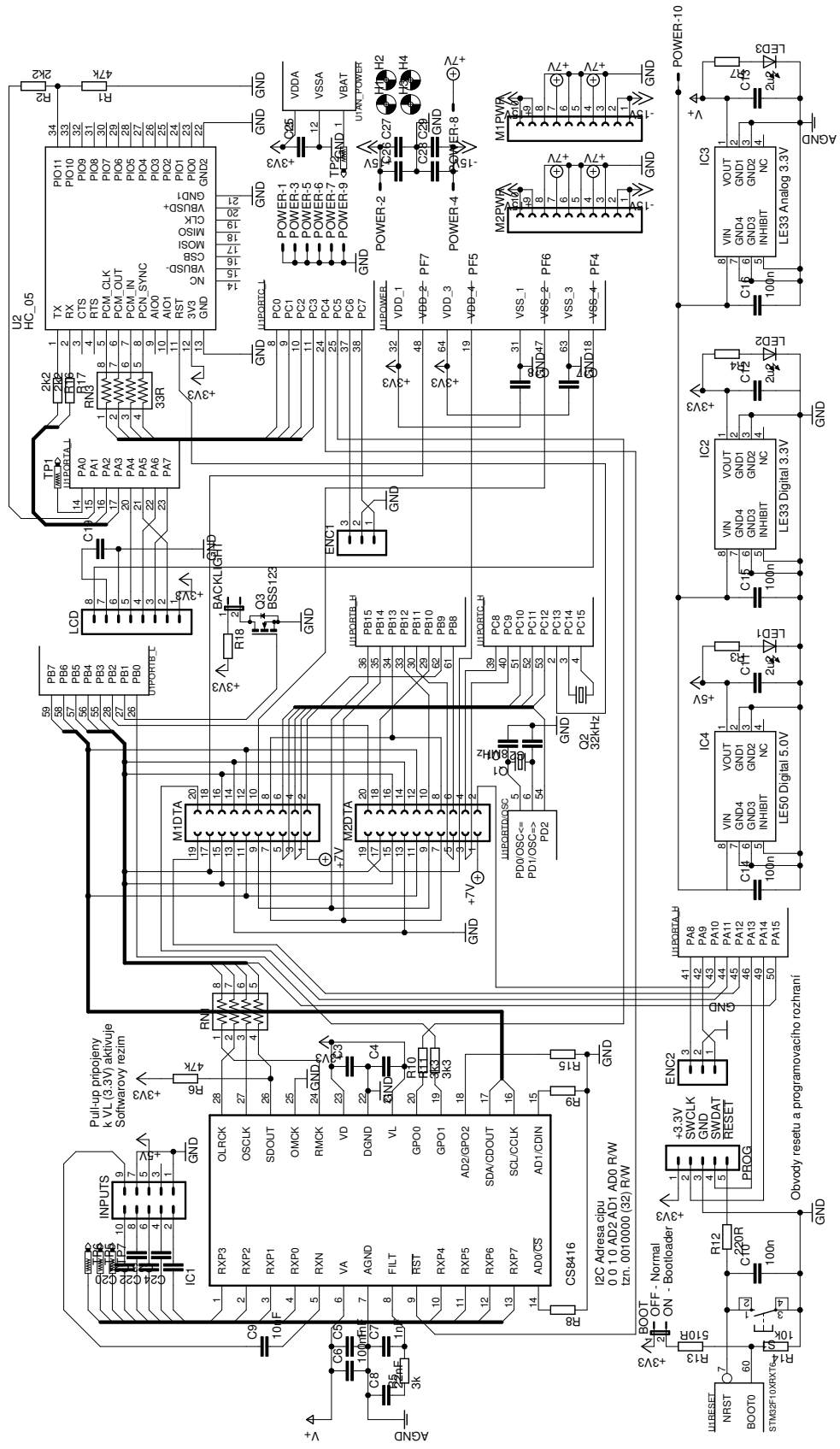
- **Datasheety** – katalogové listy použitých součástek.
- **Doplňky** – pomocné programy napsané v průběhu programování. Například převodník černobílých obrázků do hexadecimálního formátu pro grafický displej a další drobnosti.
- **EEICT** – článek otištěný ve studentské konferenci EEICT 2014
- **Firmware** – zdrojové kódy řídicího programu převodníku
- **Fotodokumentace** – fotografie z výroby zařízení
- **PlošnéSpoje** – schémata a desky plošných spojů navržené v rámci práce včetně včetně neprezentovaných uchycení pro displej a ovládací prvky
- **TextPráce** – zdrojové texty a grafika pro sestavení této práce
- **ToolChain** – sada použitých vývojových nástrojů (volně dostupné verze)

Příloha B

Schémata

Tato příloha obsahuje kompletní schémata zapojení převodníku vytvořené v programu Cad-Soft Eagle verze 6.5.0. Většina schémat je zobrazitelná ve volně šiřitelné verzi programu, pouze deska napájecího zdroje a poslední revize základní desky, kam byly dodatečně přidány kondenzátory mají větší rozměry než povolených 80×100 mm. Ke každému schématu je dostupný i seznam použitých součástek. Schémata zapojení desky digitálních vstupů, analogových výstupů, rotačních enkodérů a LCD displeje jsou dostupné pouze na přiloženém CD. Eagle není příliš uživatelsky přívětivý, jeho rozhraní se za 20 let jeho existence změnilo jen minimálně. Při navrhování nových součástek bylo třeba sáhnout k příručce Eagle pro začátečníky [25], kde jsou odlišnosti proti standardním zvyklostem popsány. Při návrhu plošných spojů byly využity volně šiřitelné knihovny třetích stran. Jedná se především o knihovnu STM32library [29] obsahující starší pinově kompatibilní verzi mikrokontroléru a knihovnu Pavouk [33] obsahující součástky CS8416 a PCM179x.

B.1 Základní deska

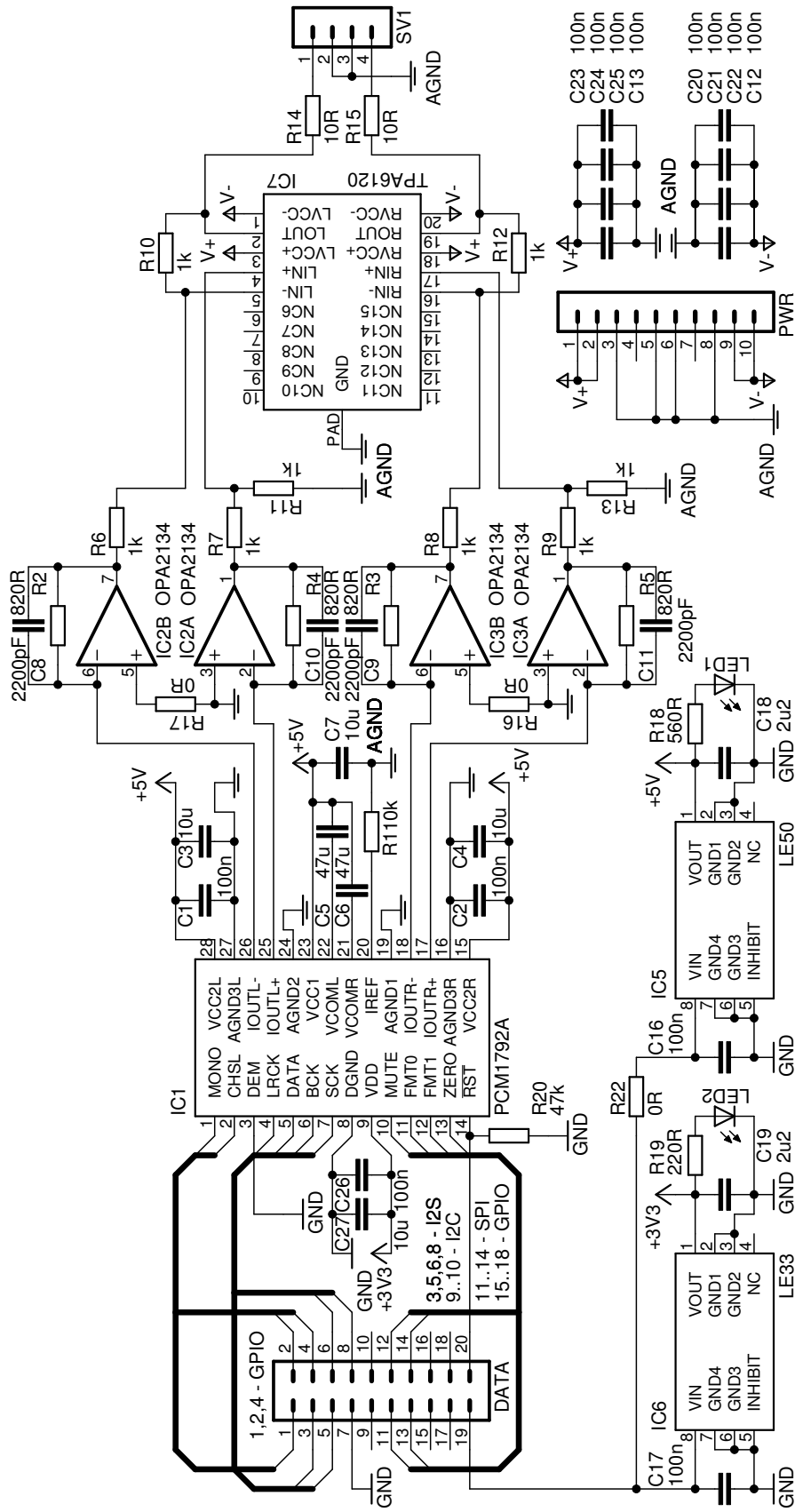


Základní deska – seznam součástek

Počet	Typ	Pouzdro	Popis
1	STM32F0851R8T6	TQFP64	STM32 ARM Cortex M3 MCU
1	CS8416	SO28	Cirrus Logic IEC 60958 decoder
1	HC-05	–	Bluetooth master/slave audio module
1	LE50	SO8	Low drop voltage regulator
2	LE33	SO8	Low drop voltage regulator
1	BSS123	SOT23	NFET tranzistor
1	8MHz	HC49	Krystal nízký
1	32kHz	H26	Krystal hodinkový
3	2u2/10	C1206	Kondenzátor tantalový
3	100n/35	C0603	Kondenzátor keramický
7	100n/50	C0805	Kondenzátor keramický
5	10n/100	C0805	Kondenzátor keramický
2	22p/100	C0603	Kondenzátor keramický
1	10k	R0603	Rezistor
1	10k	R1206	Rezistor
1	47k	R1206	Rezistor
2	33R	RR0612	Rezistorová síť
1	82R	R0805	Rezistor
1	560R	R1206	Rezistor
1	560R	R0805	Rezistor
4	47k	R0805	Rezistor
1	47k	R0603	Rezistor
3	2k2	R0805	Rezistor
2	0R	R1206	Rezistor – můstek
2	0R	R0805	Rezistor – můstek
3	LED	3mm	LED žlutá
1	Reset	TC109	Mikrospínač
2	Kolíky	1×3	Oboustrané kolíky zahnuté
1	Kolíky	1×2	Oboustrané kolíky do DPS
1	Kolíky	1×5	Oboustrané kolíky do DPS
1	Kolíky	1×10	Oboustrané kolíky do DPS
1	Kolíky	2×5	Oboustrané kolíky do DPS
2	BL810G	1×10	Dutinková lišta do DPS
2	BL820G	2×10	Dutinková lišta do DPS
1	ML810	–	Konektor 2×5 kolíky se zámkem

Tabulka B.1: Seznam součástek pro základní desku.

B.2 Modul sluchátkového zesilovače s PCM1792

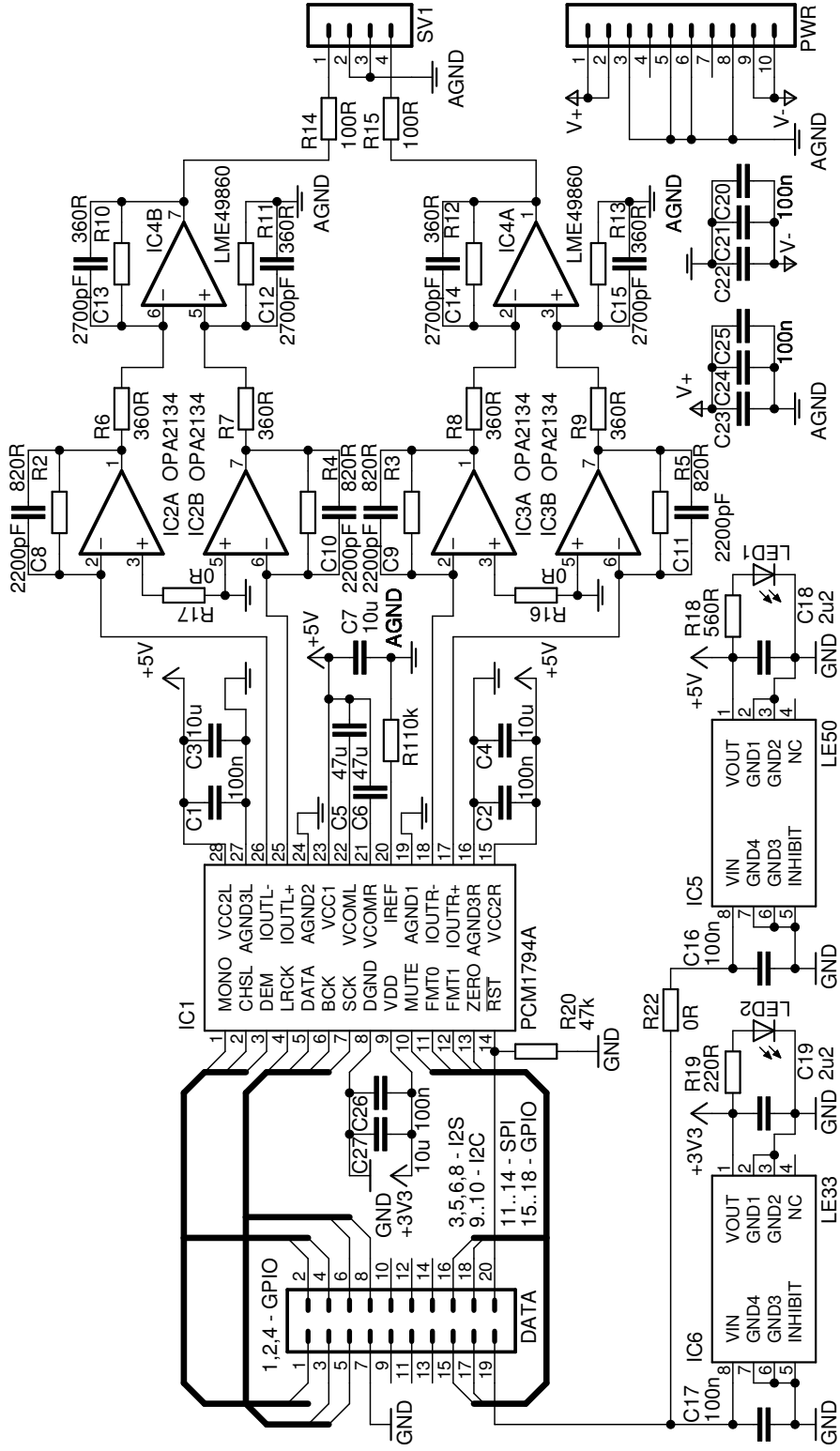


Modul sluchátkového zesilovače s PCM1792 – seznam součástek

Počet	Typ	Pouzdro	Popis
1	PCM1792	TSSOP	Advanced segment DAC 24bit 192kHz
2	OPA2134	DIL8	High performance audio opamp
1	TPA6120	PowerPAD	High fidelity headphone amplifier
1	LE50	SO8	Low drop voltage regulator
1	LE33	SO8	Low drop voltage regulator
3	10uF/16	C1206	Kondenzátor tantalový
2	47uF/10	C1210	Kondenzátor tantalový
2	2u2/10	C1206	Kondenzátor tantalový
3	100n/35	C0603	Kondenzátor keramický
8	100n/50	C0805	Kondenzátor keramický
2	100n/50	C1206	Kondenzátor keramický
4	2u2/400	PCM5	Kondenzátor fóliový, materiál FKS2
2	10R	R0204	Rezistor THT
1	10k	R0603	Rezistor
1	47k	R1206	Rezistor
1	560R	R0805	Rezistor
1	220R	R0805	Rezistor
4	1k	R0805	Rezistor
8	1k	R1206	Rezistor
3	0R	R1206	Rezistor – můstek
2	LED	0805	LED žlutá
2	Patice	DIP8	Precizní patice
1	Kolíky	2×10	Oboustrané kolíky do DPS
1	Kolíky	1×10	Oboustrané kolíky do DPS
1	Kolíky	1×4	Oboustrané kolíky zahnuté

Tabulka B.2: Seznam součástek pro modul s PCM1792.

B.3 Modul linkového výstupu s PCM1794

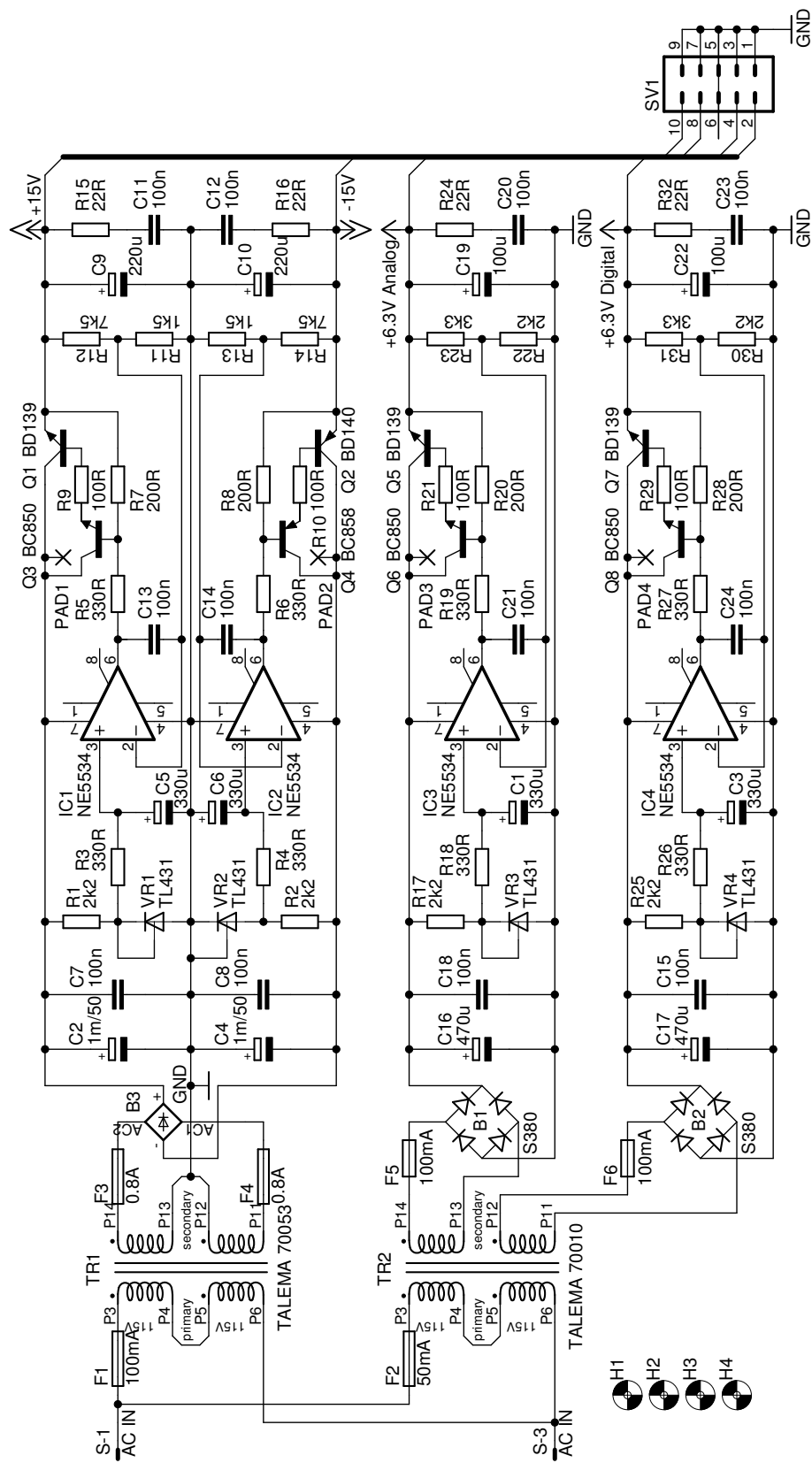


Modul linkového výstupu s PCM1794 – seznam součástek

Počet	Typ	Pouzdro	Popis
1	PCM1794	TSSOP	Advanced segment DAC 24bit 192kHz
2	OPA2134	DIL8	High performance audio opamp
1	LME49860	DIL8	High fidelity audio opamp
1	LE50	SO8	Low drop voltage regulator
1	LE33	SO8	Low drop voltage regulator
3	10uF/16	C1206	Kondenzátor tantalový
2	47uF/10	C1210	Kondenzátor tantalový
2	2u2/10	C1206	Kondenzátor tantalový
3	100n/35	C0603	Kondenzátor keramický
8	100n/50	C0805	Kondenzátor keramický
4	2u2/400	PCM5	Kondenzátor fóliový, materiál FKS2
4	2u7/400	PCM5	Kondenzátor fóliový, materiál FKS2
2	100R	R0204	Rezistor THT
1	10k	R0603	Rezistor
1	47k	R1206	Rezistor
1	560R	R0805	Rezistor
1	220R	R0805	Rezistor
4	360R	R0805	Rezistor
4	360R	R1206	Rezistor
4	820R	R1206	Rezistor
3	0R	R1206	Rezistor – můstek
2	LED	0805	LED žlutá
3	Patice	DIP8	Precizní patice
1	Kolíky	2×10	Oboustrané kolíky do DPS
1	Kolíky	1×10	Oboustrané kolíky do DPS
1	Kolíky	1×4	Oboustrané kolíky zahnuté

Tabulka B.3: Seznam součástek pro modul s PCM1794.

B.4 Napájecí zdroj



Napájecí zdroj – seznam součástek

Počet	Typ	Pouzdro	Popis
1	TALEMA 70053K	–	Transformátor toroidní 2×15 V, 15 W
1	TALEMA 70010K	–	Transformátor toroidní 2×7 V, 3,2 W
4	TL431	SO8	Precizní napěťová reference 2,50 V
4	NE5534	SO8	Operační zesilovač
2	S380	SlimSMD	Usměrňovač SMD
1	B380C	RS207	Usměrňovač 2A
3	BD139	TO126	Tranzistor výkonový NPN
1	BD140	TO126	Tranzistor výkonový PNP
3	BC850	SOT23	Tranzistor NPN
1	BC858	SOT23	Tranzistor PNP
2	1000uF/50	CAP-GL	Kondenzátor elektrolytický
2	470uF/35	CAP-GL	Kondenzátor elektrolytický
2	330uF/35	CAP-GL	Kondenzátor elektrolytický
4	220uF/35	CAP-GL	Kondenzátor elektrolytický
2	100uF/16	CAP-GL	Kondenzátor elektrolytický
12	100n/50	C1206	Kondenzátor keramický
4	100R	R1206	Rezistor
4	220R	R1206	Rezistor
4	330R	R1206	Rezistor
4	22R	R1206	Rezistor
2	1k5	R1206	Rezistor
2	7k5	R1206	Rezistor
2	2k2	R1206	Rezistor
2	3k3	R1206	Rezistor
4	330R	R0805	Rezistor
4	2k2	R0805	Rezistor
1	T=100mA	MST250	Pojistka radiální nevratná
1	T=50mA	MST250	Pojistka radiální nevratná
1	T=750mA	RA075	Pojistka polyswitch vratná
1	T=200mA	1812	Pojistka polyswitch vratná SMD
1	JST-B2P3	–	Konektor napájecí 250 V dvoupinový
1	ML810	–	Konektor 2×5 kolíky se zámkem

Tabulka B.4: Seznam součástek pro napájecí zdroj.

Příloha C

Finální vzhled zařízení

Převodník navržený v této práci byl svým vzhledem a rozměry od začátku přizpůsobován počítači Apple Mac Mini, se kterým má tvořit designový celek. Všechny díly převodníku jsou sestaveny na nosném kovovém chassis, které slouží jako stínění celého zařízení. Vnější skříň převodníku je vyrobena ručně z dýhované překližky o síle 0,8 a 2 mm v barvě břízy, jak je na obrázku C.1.



Obrázek C.1: Výroba skříně pro převodník.

Skříň je napuštěna epoxydovou pryskyřicí, přebroušena do lesku a opatřena klavírním lakem. Hliníkové dekorace kolem LCD a přepínače kanálů budou vysoustruženy z hliníkové trubky o vnějším průměru 30/2 mm. Hmatníky budou rovněž hliníkové. Informace o dostupných typech materiálů byly čerpány ze strojnických tabulek [3], strany 330-339.



Obrázek C.2: Celkový pohled na sestavu převodníku.

V budoucnu je plánováno takto vzniklý komponentní audio systém doplnit o kvalitní koncový stupeň stereofonního zesilovače ve stejném provedení jako převodník.