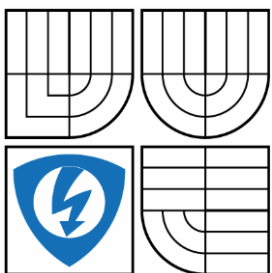


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

UNIVERZÁLNÍ MĚŘICÍ ROZHRANÍ PRO DIGITÁLNÍ AUDIO SIGNÁL

UNIVERSAL MEASUREMENT INTERFACE FOR DIGITAL AUDIO SIGNAL

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. MAREK GÁL

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. PETR PETYOVSKÝ

BRNO 2016

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Kybernetika, automatizace a měření**

Ústav automatizace a měřicí techniky

Student: Bc. Marek Gál

ID: 146821

Ročník: 2

Akademický rok: 2015/16

NÁZEV TÉMATU:

Univerzální měřicí rozhraní pro digitální audio signál

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem diplomové práce je vyhodnotit zkušenosti s nasazením existujícího zařízení realizující Polymorfni USB – I2S audio rozhraní. Navrhnout a realizovat možná vylepšení a rozšíření.

1. Popište vlastnosti a analyzujte omezení existujícího zařízení realizující Polymorfni USB – I2S rozhraní. Shrňte zkušenosti s nasazením zařízení v praxi a definujte požadavky na budoucí modifikace a rozšíření (nízko-šumová referenční analogovou část, bluetooth audio rozhraní).
2. Navrhněte požadované modifikace současné platformy a diskutujte jejich význam.
3. Navrhněte modifikovaný hardware celého zařízení. Přizpůsobte řešení celého zařízení požadavkům na kompaktní rozměry a výrobní cenu.
4. Realizujte a oživte hardware navrženého zařízení.
5. Rozšiřte firmware původního zařízení o ovládání modifikované části.
6. Proveďte měření hlavních parametrů analogové části zařízení a prezentujte dosažené výsledky.
7. Doplňte stávající firmware o obsluhu bezdrátového bluetooth modulu.
8. Zhodnoťte funkce nově realizovaného zařízení, funkčnost demonstруйте na praktickém příkladu, navrhněte další možná vylepšení.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] STEJSKAL, M.: Polymorfni USB-I2S rozhraní, diplomová práce Brno: UREL, FEKT VUT, 2014.

[2] Bluetooth SIG organization: Bluetooth Core Specification 4.2, 2014

Termín zadání: 8.2.2016

Termín odevzdání: 16.5.2016

Vedoucí práce: Ing. Petr Petyovský

Konzultant diplomové práce: Ing. Josef Nevrlý (ALPS Electric Czech, s.r.o.)

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc., předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá modifikací již existujícího zařízení sloužícího jako pomocný prostředek pro sledování a měření digitálního audio rozhraní I2S. Původní návrh vychází z diplomové práce Ing. Martina Stejskala, Polymorfni USB - I²S rozhraní. Modifikace jsou založeny na praktických poznatcích z ročního testovacího provozu a nových požadavcích na rozšíření tohoto zařízení. Práce popisuje a odůvodňuje jednotlivé změny v hardwarové i softwarové části projektu.

Klíčová slova

Digitální audio zpracování, I2S, USB, Bluetooth, MCU, Kodek, Izolátor

Abstract

This master's thesis deals with a modification of existing project which is used as a helpful tool for tracking and measuring digital audio interface I2S. The original design was created by Ing. Martin Stejskal, Polymorphic USB – I²S Interface. Modifications are based on practical one year experience when the device was tested and deals with new requirements for extension. This work describes and justify individual changes of hardware and software part of project.

Keywords

Digital audio processing, I2S, USB, Bluetooth, MCU, Codec, Isolator

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Univerzální měřicí rozhraní pro digitální audio signál jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

V Brně dne 13. května 2016

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Petru Petyovskému a konzultantovi Ing. Josefu Nevrlému za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne 13. května 2016

.....

podpis autora

GÁL, M. *Univerzální měřicí rozhraní pro digitální audio signál*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 84 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Petyovský.

Obsah

1	Úvod.....	8
2	Teoretický úvod.....	9
2.1	I2S standard.....	9
2.2	Definice pojmů.....	10
3	Původní řešení	11
3.1	Základní fakta původního návrhu	11
3.2	Standardizovaný I2S konektor	13
3.3	Náměty na rozšíření	15
3.4	Shrnutí požadavků na nový návrh.....	16
4	Návrh nového zařízení.....	17
4.1	Digitální část	17
4.1.1	MCU.....	18
4.1.2	Zdroj hodinového signálu	19
4.1.3	LCD display	20
4.1.4	Bluetooth modul.....	21
4.1.5	Přepínač I2S sběrnice.....	22
4.2	Analogová část.....	26
4.2.1	Kodek	27
4.2.2	Výstupní filtr	29
4.2.3	Mikrofon	30
4.3	Izolátory	31
4.3.1	Izolace I2S části	31
4.3.2	Izolace analogové části	35
4.4	Napájení	36
4.4.1	Digitální část	37
4.4.2	Izolovaná I2S část	37
4.4.3	Analogová část.....	39
4.5	Verzování	43
5	Fyzické provedení	44
5.1	Deska plošného spoje.....	44
5.2	Box	46
5.3	Uživatelské rozhraní.....	47

5.4	Výsledné zařízení	50
5.5	Oživení hardwaru	51
6	Firmware	52
6.1	Metoda nastavení parametrů	53
6.2	Mapování vstupů a výstupů	53
6.3	Uživatelské rozhraní.....	54
6.4	Řízení směru hodinových signálů sběrnice I2S	55
6.5	Měření frekvencí na sběrnici I2S	58
6.6	Obsluha přepínače linky I2S	61
6.7	Ovládání nové analogové části.....	62
6.8	Ovládání modulu Bluetooth	63
7	Testování	65
7.1	Ověření základní funkčnosti	65
7.2	Měření analogové části	66
7.2.1	Použité přístroje	67
7.2.2	Srovnání výsledků s předchozí verzí.....	68
7.2.3	Parametry nízkošumového výstupu	70
7.2.4	Ověření vstupní analogové části	71
8	Závěr.....	74

1 ÚVOD

Obsah této práce přímo navazuje na již existující zařízení Ing. Martina Stejskala pojmenované Polymorfni USB-I²S rozhraní, které bylo vytvořeno v rámci diplomové práce na Ústavu radioelektroniky, Fakulty elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně [1]. Zadání práce bylo specifikováno firmou Alps Electric Czech, pro kterou bylo zařízení primárně vyvinuto. Jedná se o specifický druh externí zvukové karty s typickým analogovým výstupem ovšem doplněným o fyzicky zpřístupněné digitální audio rozhraní I2S. To umožňuje zvukovou kartu využít jako velmi užitečný nástroj při ladění a testování audiozařízení založených na tomto rozhraní. Konkrétní využití lze uvést například pro sledování komunikace mezi třetími stranami, či injektování I2S signálu do testovaného digitálního kanálu.

Motivaci pro sestrojení podobného zařízení hledal již Ing. Stejskal. Jedním z hlavních důvodů byly pořizovací náklady na komerčně dostupné prostředky, které se pohybují v řádu stovek dolarů. Při testování je zcela běžné použití více takovýchto jednotek, s čím dále rostou pořizovací náklady. U levnějších variant jsou značným omezením jejich hardwarově nedostačující parametry (nepodporované zvukové frekvence, rozlišení aj.). Vše nahrávalo rozhodnutí vytvořit vlastní univerzální prostředek na podobné bázi. Funkční prototyp je výsledkem téměř dvouleté práce a testování, během které byla zajištěna základní požadovaná funkčnost a vytvořen nástroj pro nastavení zařízení prostřednictvím USB.

V této podobě byla zvuková karta nasazena při vývoji audiozařízení ve zmíněné firmě, kde podstoupila přibližně roční testovací provoz. Ten odhalil jisté hardwarové omezení a potíže, ale také nový potenciál pro další možná využití a rozšíření. Právě tyto aspekty vedly k znovuotevření projektu a jsou cílem a obsahem této diplomové práce.

Velký důraz je kladen na doplnění a opravu samotného hardwaru, který je chápán jako základ kvalitního výsledku. Tvoří tedy zásadní část této práce. V jednotlivých kapitolách jsou popsány dílčí změny a jejich odůvodnění. V další části jsou shrnuty výsledky a parametry nově navrženého hardwaru. Především pak audio parametry analogové části. Dokumentace se týká také použitého Bluetooth modulu, který je základem rozšíření funkcionality zvukové karty. Tento modul zvyšuje komplexitu návrhu a jeho plné využití není předmětem této práce.

Předpokládaný výstup práce je tedy přepracovat hardware s ohledem na nové požadavky, oživit jednotlivé části rozšířením ovládacího firmwaru a připravit projekt pro další pokračování, které by mělo již za cíl tvorbu uživatelského rozhraní v osobním počítači a plné využití Bluetooth modulu.

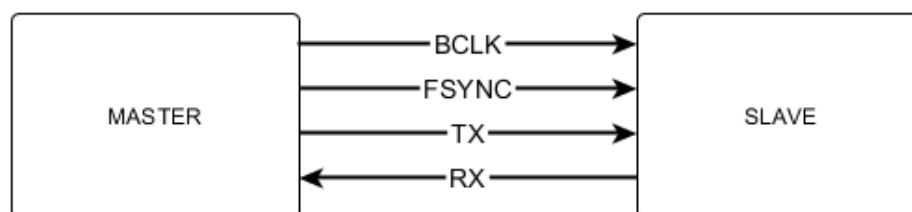
2 TEORETICKÝ ÚVOD

Tato kapitola shrnuje poznatky, postupy a metody, které jsou obecné známé a jsou použity pro modifikaci popisovaného zařízení. Nezanášá nové věci do návrhu, pouze informuje čtenáře a doplňuje odborný obsah.

2.1 I2S standard

Tento standard je jakýmsi nosným pilířem pro stavbu popisovaného audio zařízení. Provází jej celá dokumentace. Základní princip a použití shrnuje právě tato kapitola.

Jedná se o sériové digitální rozhraní pro přenos audia ve stereo formátu vyvinuté firmou Philips (v dnešní době NXP) a uvedené v roce 1986. Parametry linky specifikuje dokument vydaný právě zmíněným výrobcem [3]. Typ přenosu dat je primárně point to point (pouze dvě komunikující zařízení vzhledem k datovým linkám – případně třetí zařízení smí pouze naslouchat). Jedná se o synchronní přenos, obsahující hned dva zdroje hodin. Běžné zapojení znázorňuje obrázek 1.

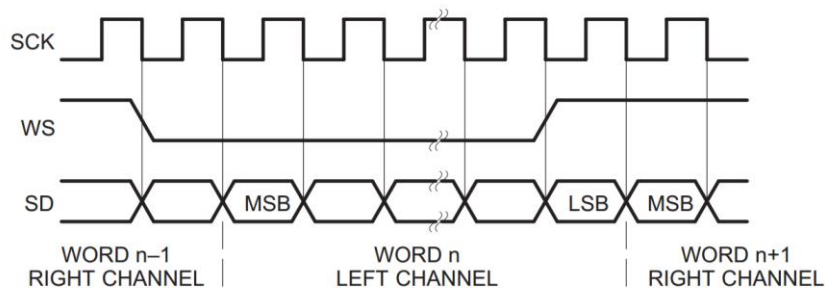


Obrázek 1 - Běžná konfigurace připojení zařízení na I2S

Význam jednotlivých linek je následující:

- BCLK (SCK) – zdroj hodin synchronizující jednotlivé bity na linkách TR/RX
- FSYNC (WS) – zdroj hodin synchronizující data pro levý/pravý kanál
- TX/RX (SD) – bitový tok dat

Pro lepší představu zobrazuje a popisuje jednotlivé linky obrázek 2



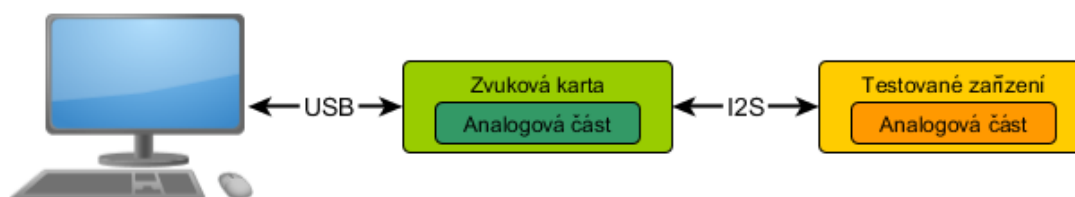
Obrázek 2 - Časování a význam signálů na I2S [3]

Zdroj hodin generuje typicky master ovšem i jiná konfigurace je možná. Například použití externího zdroje hodin pro obě strany. Přenosové rychlosti se odvíjí od použité vzorkovací frekvence audiosignálu. V případě tohoto projektu je limitující maximální vzorkovací frekvence audiosignálu z MCU, která je 48kHz s rozlišením 24bitů. Přenosový kanál je ovšem v základu nastaven na 32 bitové rozlišení. Tyto parametry připouští nejvyšší frekvenci na lince BCLK na 3,072MHz. Výpočet lze snadno provést ze vztahu: $(\text{vzorkovací frekvence}) * (\text{počet kanálů}) * (\text{bitové rozlišení})$.

Linka umožňuje přenášet i vyšší frekvence, například pro audiosignály vzorkované dvojnásobnou rychlostí, tedy 96kHz. Vše však záleží také na konkrétně použitém hardwaru a různých parazitních vlivech, působících na přenosovou cestu.

2.2 Definice pojmů

Tato diplomová práce v mnoha případech popisuje vzájemnou interakci zvukové karty, s testovaným zařízením. Pro jednoznačnost a přehlednost je zde objasněn typický měřicí řetězec a zavedeny pojmy „zvuková karta“, představující zařízení popisované v tomto dokumentu, a „testované zařízení“, které reprezentuje prvek, na němž je měření či testování prováděno. Graficky tuto strukturu znázorňuje obrázek 3.



Obrázek 3 - Základní měřicí řetězec

Zvuková karta je s ovládacím PC spojena prostřednictvím USB rozhraní. Propojení zvukové karty s testovaným zařízením je právě za pomoci I2S sběrnice.

3 PŮVODNÍ ŘEŠENÍ

Rozsah prací na původní variantě [1] je skutečně značný a svědčí o velkém úsilí zmíněného autora. Vše bylo řešeno od návrhu prvotního hardwaru, který se v průběhu projektu i několikrát změnil. Výchozí stav nese označení MKII, tedy hardware po první celkové revizi, která byla nutná pro zajištění základní funkčnosti. Podobu aktuálního stavu zachycuje obrázek 4.



Obrázek 4 - Původní varianta zvukového zařízení [1]

3.1 Základní fakta původního návrhu

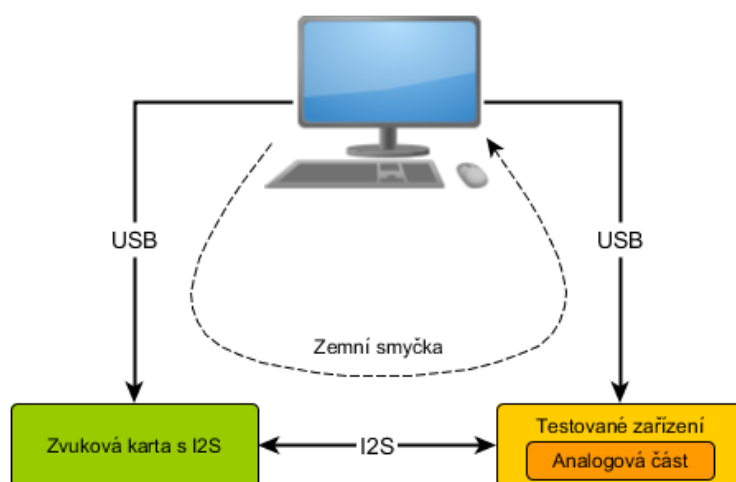
Zařízení je založeno na open source projektu s názvem SDR-Widget, který zahrnuje rozhraní pro USB audio class 1 (AC1). Existuje zde i podpora pro novější třídu USB přenosu, audio class 2 (AC2), tu ovšem nativně nepodporují všechny běžné operační systémy a je nutné do počítače nainstalovat ovladač. Tímto směrem se projekt tedy neodvíjel. Přepřacování na podporu AC2 není předmětem ani této diplomové práce. V případě AC1 je zařízení na USB automaticky operačním systémem rozpoznáno jako externí zvukové zařízení.

Prototyp je postaven na mikrokontroléru firmy Atmel z rodiny UC3 [4]. Ten disponuje žadáným výkonem a patřičnými periferiemi, jako je USB rozhraní či SSC modul (Synchronous Serial Controller) jehož součástí je i I2S standard. Firmware běží na real-time operačním systému FreeRTOS [5] (RTOS – *real-time operating system*), který byl převzat také jako open source řešení.

Součástí návrhu je i audiokodek, který sleduje I2S linku a její signál převádí na sluchátkový výstup. Jedná se o snadnou a rychlou kontrolní funkci, zda je na lince požadovaný signál.

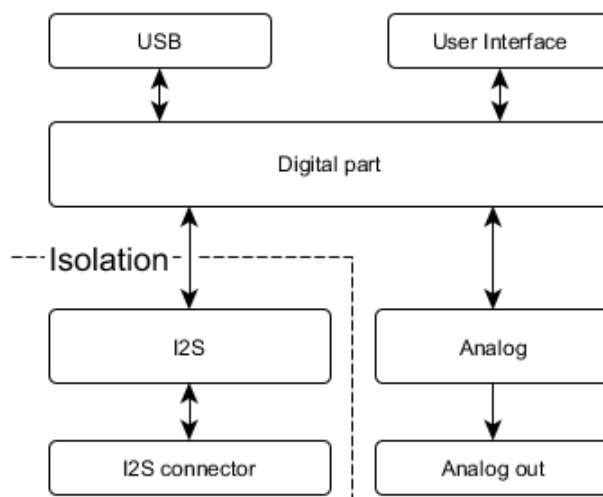
I2S standard je vyveden na konektor pro plochý kabel. Celé provedení připojení I2S je však velmi specifické. V měření a testování audiozařízení pomocí tohoto nástroje

se objevuje velký problém v případě, že obě zařízení jsou spojena s jedním PC. V případě zvukové karty je důvod spojení zřejmý. Testované zařízení je nastavováno pomocí standardu USB (spojení testovaného zařízení se stejným PC). V zapojení zde vzniká tzv. zemní smyčka, která silně degraduje vlastnosti audiosignálu na analogové úrovni v testovaném zařízení. Pro úplnost zobrazuje možný vznik této smyčky obrázek 5. Právě tento fakt si žádal galvanické oddělení připojené části I2S od zbytku obvodu. Vše je vyřešeno použitím digitálních izolátorů od společnosti Silicon Labs. Právě tímto prvkem se původní zařízení odlišuje od běžně dostupných prostředků na trhu.



Obrázek 5 - Příklad zemní smyčky v testovacím zapojení

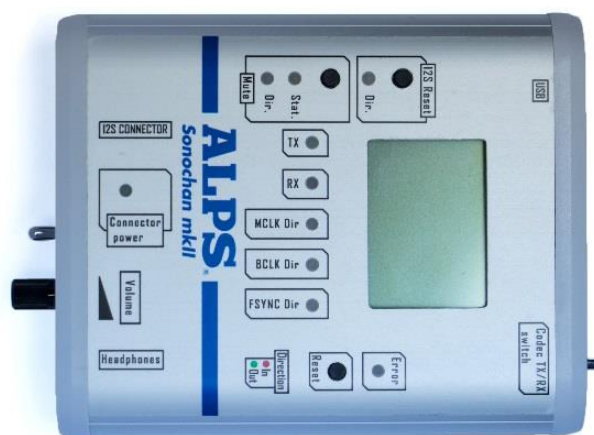
Pro lepší pochopení principiálního vnitřního uspořádání a galvanického oddělení I2S části může posloužit následující obrázek 6. Blokové schéma také poslouží k porovnání nově navrhovaných částí s tímto původním rozložením.



Obrázek 6 - Základní blokové uspořádání původního návrhu zvukové karty

Součástí zařízení je LCD display a jednoduchý uživatelský interface. Několik LED diod indikuje směr toku dat na I2S (master/slave) a aktivitu linek. Uživatel má možnost tlačítkem resetovat jak samotnou zvukovou kartu, tak testované zařízení připojené prostřednictvím I2S konektoru. Typická aktivní úroveň signálu RST je logická 0. Na konektoru je i pin pro uvedení testovaného zařízení do stavu MUTE (aktivace je také možná pomocí tlačítka). Dalším ovládacím prvkem je přepínač sledované linky kodekem (volba mezi TX a RX) a spínač spojující napájení galvanicky oddělené části s obvodem zvukové karty. Finální podobu včetně těchto prvků zachycuje obrázek 7.

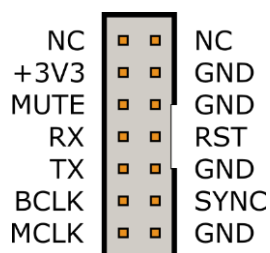
Velkou část vývoje věnoval autor také vytvoření přemostění prostřednictvím USB HID standardu (Human Interface Device). Tento prostředek umožňuje jednoduchou konfiguraci externí zvukové karty, který je vždy nutná v závislosti na požadavcích připojení měřicího ústrojí. Částí této práce je také rozšíření obslužného firmwaru o ovládání nově přidávaných a upravených částí.



Obrázek 7 - Konečná podoba první verze zvukové karty

3.2 Standardizovaný I2S konektor

V rámci tohoto projektu bylo nutné zavést jakýsi standard v použití konektoru, který bude respektován i u testovaných zařízení. Tento konektor byl definován již při tvorbě první varianty a je žádoucí, aby byl zachován. Zapojení je vyneseno do obrázku 8.



Obrázek 8 - Zapojení I2S konektoru (samec)

Linky *BCLK*, *FSYNC*, *TX* a *RX* jsou základní pro funkci I2S rozhraní. Na konektoru také nalezneme zem a napájení s hodnotou 3,3V. Toto napájení má hned dva významy:

1. **Napájení testovaného zařízení** – v tomto případě je nutné zapnout galvanické spojení izolované I2S části. Zvuková karta poskytuje tímto pinem napájecí napětí testovanému zařízení, které tak není dále nutné napájet jiným zdrojem.
2. **Napájení izolované I2S části** – testované zařízení poskytuje napájecí napětí izolované části I2S rozhraní na zvukové kartě. Testované zařízení má vlastní napájení a zvuková karta má galvanicky oddělenou izolovanou část.

Právě toto napájení bylo příčinou několika potíží při testovacím provozu. Pro první případ nastávala situace, když uživatel ponechal spojenou izolovanou část a připojil testované zařízení s vlastním napájením. Vlivem rozdílných napětí, ač nepatrných, tečou mezi přístroji vyrovnávací proudy, které zbytečně zatěžují celou soustavu. Tato situace mohla v krajním případě vést i k poškození, ať už samotné zvukové karty nebo testovaného zařízení. Dalším problémem, který se však nakonec povedlo eliminovat, byl pokles napětí ve zvukové kartě v okamžiku připojení testovaného zařízení. Tato skutečnost vedla k restartu zvukové karty vlivem tzv. *Brown-out* jevu. Řešením obou těchto problémů je použití dedikovaného stabilizátoru napětí s ochranou proti zpětnému proudu (například obvody určené pro nabíjení, či udržování baterií).

Druhý případ představuje problém především pro zařízení, které je testováno. Klade požadavek na vyvedení jeho vlastní napájecí větve pro napájení izolované I2S části zvukové karty, což nemusí být ve všech případech jednoduše možné. Další potíž nastává v okamžiku připojení testovaného zařízení. Kapacity a samotná spotřeba izolátorů občas způsobí *brown-out* jev, podobně jako v prvním případě. Tentokrát však nedojde k resetu zvukové karty, ale samotného testovaného zařízení, což je nežádoucí. Řešení tohoto problému spočívá v použití izolovaného DC-DC měniče pro napájení logiky v izolované části. Možnost zachování původního řešení však musí být také zachována a to pro případ, kdy logické úrovně signálů nebudou odpovídat hodnotě 3.3V. Podrobnostmi návrhu se zabývá samostatná kapitola 4.4.2.

Dalším signálem na konektoru I2S je *RST*, který umožňuje restart připojeného testovaného zařízení, a *MUTE* pomocí kterého jsme schopni okamžitě umlčet výstupní audiosignál.

Posledním signálem, který je na konektoru umístěn je *MCLK* – master clock. Je přímo svázaný s linkou I2S, ovšem jeho použití není nezbytně nutné. Poskytuje hodiny zařízení pracující s I2S. Obvykle dosahuje hodnoty $256x$ (*vzorkovací frekvence*). V případě použití rychlosti 48kHz je frekvence signálu *MCLK* 12,288MHz. Na tuto frekvenci je třeba brát zřetel při navrhování logických obvodů v signálu. Linky *MCLK* a stejně tak *BLCK* a *FSYNC* jsou obousměrné, respektive uživatel si jejich směr volí v závislosti na požadované konfiguraci měřicího ústrojí.

V současné době není MCLK z I2S konektoru přivedeno na vstup MCU, aby bylo možné signál distribuovat i na ostatní periferie. Právě tato skutečnost je dalším předmětem rozšíření nové verze.

3.3 Náměty na rozšíření

Jak již bylo zmíněno, projekt prošel přibližně ročním testovacím provozem. Bylo dokonce vyrobeno celkem 11 prototypů. Provoz odhalil několik nedostatků a ukázal možnosti nového potenciálu tohoto zařízení.

Základní motivací do těchto razantních změn bylo zahrnutí Bluetooth modulu, který zásadním způsobem rozšíří potenciální funkcionalitu zvukové karty. Tato skutečnost umožní sledovat zvukový kanál i v této bezdrátové podobě a rozšíří testování i na konečný výstup například handsfree produktů, které mají silné zastoupení v automobilovém průmyslu. Začlenění Bluetooth modulu do návrhu sebou nese komplikaci, která významným způsobem zasahuje do hardwaru. Výstupní formát Bluetooth modulu opět koresponduje se standardem I2S. Tato linka je ovšem typu point to point. Není tedy možné, aby najednou komunikovaly více než dvě zařízení. Právě tato skutečnost udává nutnost použít přepínače digitální linky.

S ohledem na rozšíření o Bluetooth je dále žádoucí, aby byla zvuková karta opatřena analogovým vstupem signálu. Ten dobře poslouží například pro emulaci Bluetooth handsfree, který se může stát součástí testovacího řetězce. Aktuální stav disponuje pouze sluchátkovým výstupem pro kontrolní odposlech signálu na digitální lince. Použitý kodek tuto funkcionalitu umožňuje, řešením je tedy pouze rozšíření o nevyužité části kodeku. Nový návrh by měl obsahovat integrovaný mikrofon a možnost připojení stereo vstupu audiosignálu, případně externího mikrofonu.

Změna se z části bude týkat také analogového výstupu zvukové karty. Kromě zachovaného sluchátkového výstupu bude karta disponovat kvalitním linkovým výstupem, který bude sloužit pro měření parametrů audio signálu vzorkovaného pomocí testovaného zařízení. Tento aspekt klade důraz na nízkošumové vlastnosti a zkruslení signálu. Praktické zkušenosti s použitým kodekem ukázaly, že je dostatečně vhodný pro takovéto použití. Problémem je však napájení z USB portu, které je silně zarušené a jeho filtrace značně problematická. Při testování audiozařízení se osvědčilo použití jednoduchého prvku, založeného na tomto kodeku, kde bylo napájení řešeno z akumulátoru. Ten se tak stane významnou součástí zvukové karty a přispěje ke zkvalitnění audio výstupu. Součástí řetězce bude také výstupní filtr typu dolní propust. Jeho význam a parametry jsou popsány v samostatné kapitole 4.2.2.

Posledním rozšířením funkcionality je možnost měření frekvencí na hodinových linkách I2S sběrnice, pro případ, že master je testované zařízení a tyto signály samo produkuje. Aby v tomto případě bylo možné na I2S komunikovat, je nutné nastavit stejné parametry linky i na zvukové kartě. Změřené hodnoty mohou být použity

k automatickému nastavení parametrů, případně poslouží uživateli jako užitečná informace pro jejich manuální nastavení.

3.4 Shrnutí požadavků na nový návrh

Kromě rozšiřujících aspektů nového návrhu projde zvuková karta i dalšími drobnými změnami. Ty ovšem nezasahují do samotné funkcionality. Jednou z těchto změn je i náhrada původního LCD zobrazovače, který se při testování projevil jako nevhodný a problematický. Příčinou je především jeho nekvalitní zpracování, které často vedlo k nečitelnosti, výpadkům a podobným potížím.

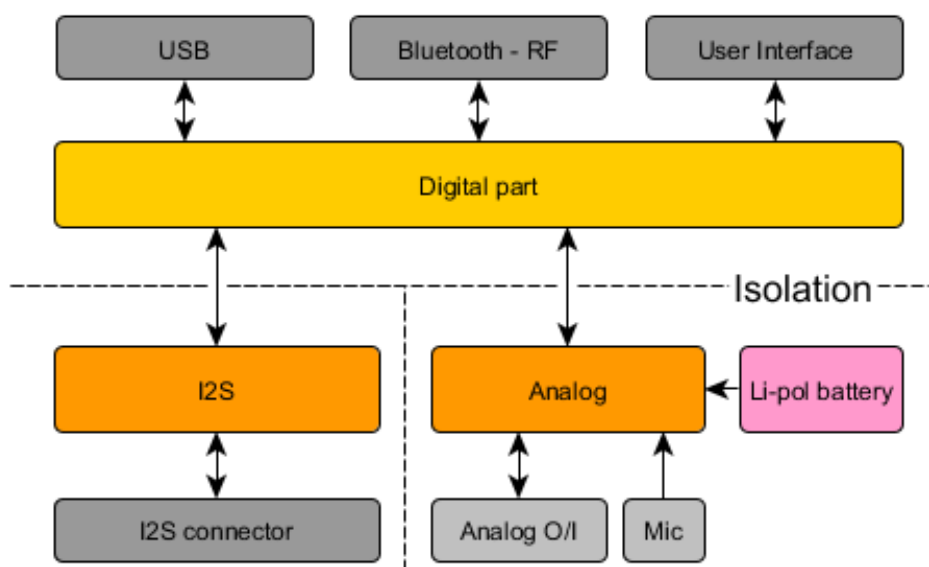
Změněn bude také úložný box. Současný nevyhovuje svou velikostí vzhledem k rozšíření a navýšení počtu komponent. Změna však nesmí být nijak razantní. Je nutné zachování kompaktní rozměry zařízení. Jednotlivé změny shrnuje následující seznam:

- Implementace Bluetooth modulu
- Vyřešení problému napájení testovaného zařízení na straně izolované části I2S
- Izolace analogové části a použití bateriového napájení
- Rozšíření audio části o nový, nízkošumový výstup
- Aplikace filtru typu dolní propust na nízkošumový výstup
- Přidání interního mikrofonu
- Zavedení přepínače linky I2S (s ohledem na propojení nových částí)
- Přivedení signálu MCLK na vstup MCU
- Přivedení signálů I2S (MCLK, BCLK, FSYNC) na vstupní piny časovače MCU (umožnění měření frekvence na linkách)
- Nalezení vhodnějšího boxu
- Výměna LCD za spolehlivější a vhodnější typ
- Drobné změny uživatelského rozhraní v závislosti na předchozích bodech

Podrobnostem jednotlivých změn je dále věnována celá následující kapitola.

4 NÁVRH NOVÉHO ZAŘÍZENÍ

Jednotlivé hardwarové změny a rozšíření nového zařízení jsou popsány v této kapitole. Popis zahrnuje části blokových i elektrických schémat a podrobně nastiňuje problémy v konstrukci a jejich řešení. Následující blokové schéma na obrázku 9 ukazuje rozšíření a modifikace oproti původnímu návrhu zobrazenému na obrázku 6.



Obrázek 9 - Přehledové schéma základních částí zvukové karty

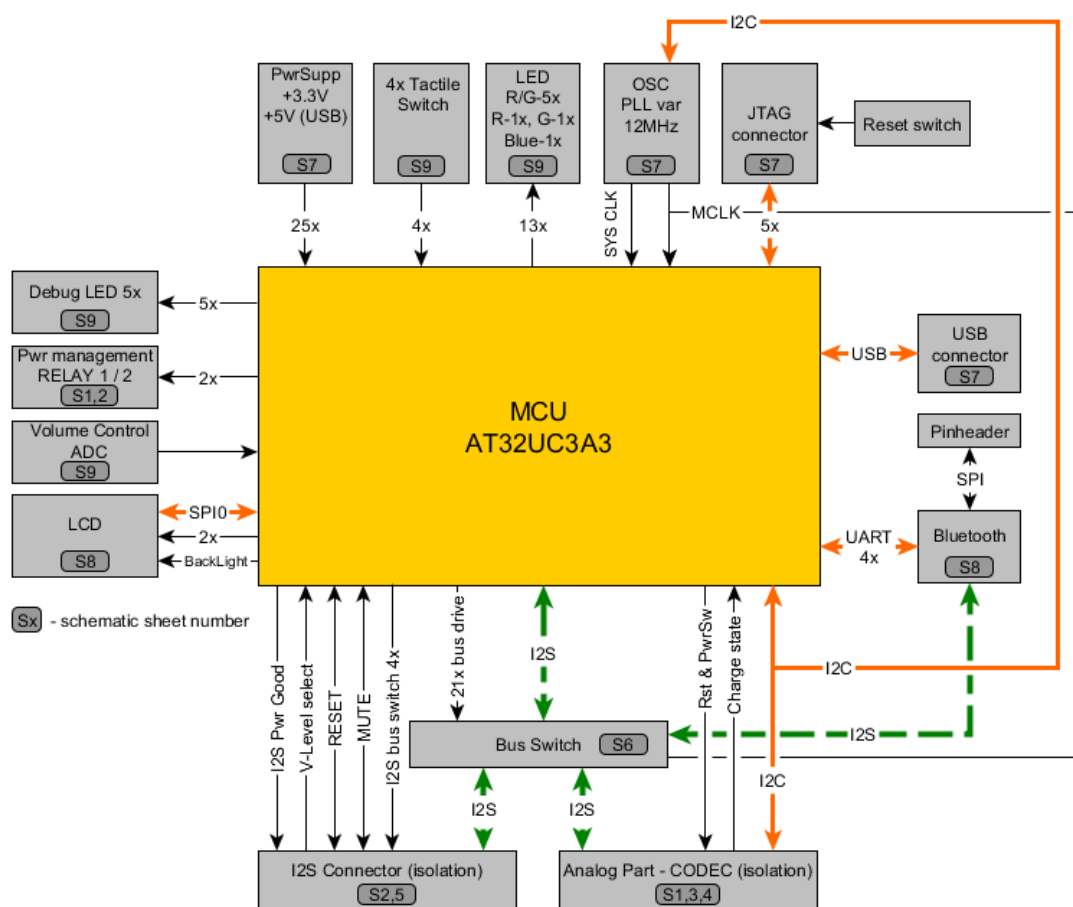
Schéma je pouze přehledové a doplňující, jednotlivé bloky jsou dále podrobněji rozkresleny a popsány v následující části. V základu lze rozlišit postup při návrhu na čtyři základní etapy, podle kterých se řídí i struktura dokumentace:

- Digitální část
- I2S rozhraní
- Analogová část s kodekem
- Izolace předchozích dvou částí
- Napájení

4.1 Digitální část

Digitální část zahrnuje asi největší část celého zařízení. Samotným srdcem je 32 bitový MCU firmy Atmel z rodiny UC3, konkrétně typ AT32UC3A3256 [4]. Dále nově doplněný Bluetooth modul, přepínač I2S sběrnice a uživatelské rozhraní, pod které spadají indikační LED diody, ovládací tlačítka a LCD display.

Přehledové blokové schéma této části je zprostředkováno na obrázku 10. Pro snazší orientaci jsou u jednotlivých bloků označena čísla listů schématu zapojení.



Obrázek 10 - Přehledové blokové schéma nové digitální části

Základní koncepce této části zůstala zachována, především pak USB komunikace, zdroje hodinového signálu pro MCU a I2S, analogový vstup z potenciometru pro nastavení hlasitosti sluchátkového výstupu či samotné linky I2S. Na ty je již externě připojen nově aplikovaný I2S přepínač. Pojmem zachování se zde rozumí ponechání připojení na stejné piny jako v první verzi projektu. Tato skutečnost usnadní oživení zařízení, bez nutnosti výrazně upravovat firmware.

4.1.1 MCU

Výběr vhodného mikrokontroléru byl již na autorovi původního řešení a korespondoval s požadavky na periferie mikrokontroléru. Především pak na sériové rozhraní podporující I2S. Dalším omezením byla podpora opensource aplikace SDR-Widget. Právě tento projekt byl založen za zmíněném MCU Atmel rodiny UC3 [4]. Jeho podrobnostmi se zabýval již Ing. Stejskal ve své práci, proto jsou zde pouze stručně uvedeny jeho hlavní přednosti.

Mikrokontroler disponuje programovou pamětí o velikosti 256kB a pamětí RAM o velikosti 64kB. S výhodou je použita také jeho 32 bitová architektura, která napomáhá jednoduššímu zpracování audiosignálu. Maximální pracovní frekvence mikrokontroléru

je 84MHz. Právě těmito parametry se MCU jevil jako vhodná volba pro použití v projektu.

Dalšími aspekty je obsazení zásadních periférií pro činnost celého zařízení. MCU disponuje dostatečným počtem linek SPI, I2C a UART (Universal Asynchronous Receiver and Transmitter). Pro první projekt možná až zbytečným, ovšem nyní velmi užitečným celkovým počtem vstupně výstupních pinů. Pouzdro MCU celkem čítá 144 pinů, z toho 110 GPIO (*general purpose input/output*). Většina z nich neměla v první verzi využití. Nyní bude třeba 21 těchto pinů na řízení přepínače sběrnice I2S.

Součástí MCU je také DMA modul (*Direct memory access*). V dané aplikaci nenahraditelný pomocník při přesouvání velkého objemu dat. Automaticky kopíruje obsah zásobníku (v tomto případě například zásobník sběrnice I2S) na určité místo v paměti, specifikované ukazatelem. MCU se tak nezatěžuje touto činností a jeho výpočetní výkon může být účelně využit pro zpracování jiných dat.

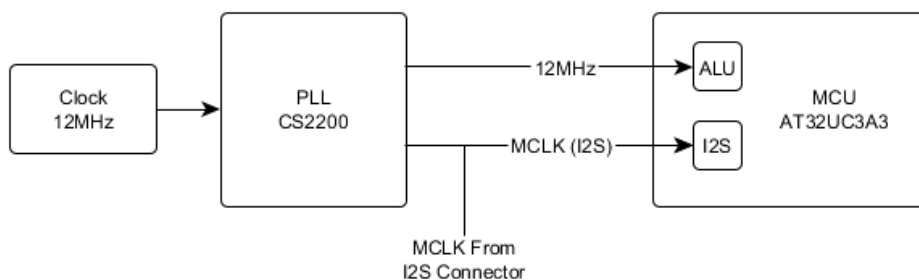
Nově se v tomto projektu plánuje využít jednoho z modulů TC (*timer/counter*). MCU disponuje hned třemi těmito moduly. TC2 je již využit pro samotný RTOS. Zbylé dva jsou zatím neobsazené. Zařízení by mělo být schopno měřit frekvence na I2S hodinových linkách (MCLK, BCLK, FSYNC). Za tímto účelem jsou tyto signály přivedeny na piny MCU spojené právě s jednou z těchto periférií, konkrétně s modulem TC0. Na jeho vstup lze multiplexovat všechny tyto tři signály. Není nutné, aby všechny tři frekvence byly odečteny synchronně, což právě umožňuje multiplexované měření. Samotné zjištění frekvence lze realizovat počítáním jednotlivých period v čítači a pomocí jiného časovače měřit čas naplnění tohoto čítače. Samotné měření nemusí být extrémně přesné, jelikož jsou známé typicky používané frekvence v audio přenosech odvozené od samotné vzorkovací frekvence. Pro určení kmitočtu je tedy nutná přibližná hodnota, ze které algoritmus vyhodnotí nejbližší shodu se známým taktem.

4.1.2 Zdroj hodinového signálu

V této části zapojení dojde ke dvěma nepatrným změnám oproti původnímu návrhu. První z nich je náhrada velkého THD krystalu (*through hole device*) na SMD oscilátor (*surface mount device*). Důvody jsou hned dva. Krystal sám o sobě potřebuje externí pasivní prvky (kapacitory), které významným způsobem ovlivňují výslednou frekvenci rezonátoru. Fyzicky je velmi obtížné navrhnout cesty k obvodu zpracovávající tento signál. Nesnadno se odhadují či měří parazitní kapacity cesty, které se sčítají s hodnotou kompenzačních kondenzátorů. Mnohem výhodnější je použití oscilátoru, jehož výstupem je již obdélníkový signál s napětíovými úrovněmi použitého napájecího napětí. Druhým důvodem jsou rozměry. Tyto oscilátory se běžně vyrábí v SMD pouzdrech s rozměry pouhé 3,2x5mm.

Samotným zdrojem hodin pro MCU není přímo tento krystal ale obvod PLL (*Phase lock loop*) od firmy Cirrus Logic CS2200 [6]. Ten disponuje dvojicí výstupů. První AUX, na který je možné odeslat hodinový signál ze vstupního krystalu. Právě

tento výstup je použit k poskytnutí hlavního signálu pro MCU (v blokovém schématu na obrázku 10 je signál označen jako SYS CLK). Nominální frekvence je 12MHz, kterou MCU interně dále násobí na frekvenci nutnou k provozu USB a dalších periférií. Druhý výstup PLL je již násobená frekvence, sloužící jako nastavitelný zdroj MCLK pro I2S sběrnici. Signál je přiveden na MCU, kde je dle uživatelského nastavení podělen také na BCLK a FSYNC a distribuován zbylým perifériím. Obvod CS2200 se pro tuto funkci skutečně osvědčil díky možnosti poměrně precizně nastavit svou výstupní frekvenci. Není tedy nutné zařízení opatřovat sérií oscilátorů pro dané vzorkovací frekvence audiosignálu. PLL také umožňuje velmi jemné změny výstupní frekvence pro případ, kdy USB AC1 komunikace nestíhá dostatečně rychle přenášet vzorky audio signálu. V tomto okamžiku je možné MCLK mírně zpomalit, aby nedošlo k podtečení bufferu. Je tím zamezeno ztrátě vzorku a výstup je kontinuální. Právě tímto mechanismem se zabýval Ing. Stejskal a podrobně jej popsal ve své diplomové práci [1] v kapitole 2.3. Může se zdát trochu kompromitující vyžadovat kvalitní audio, kterému se uměle zanáší jitter (drift synchronizační frekvence). Pro případ kvalitního měření však lze rychlost MCLK uzamknout, čímž se tento jev eliminuje. Také je možné použití externího zdroje hodin, například ze samotného testovaného zařízení, které má definovanou frekvenci. Nové zapojení zdroje hodin pro MCU je znázorněno na obrázku 11.



Obrázek 11 - Zdroj hodinového signálu pro MCU

Oproti prvnímu návrhu zde přibude přivedení signálu také z MCLK na I2S konektoru. Signál musí být odpojitelný, což se zajistí třístavovým bufferem. Více o této komponentě bude popsáno v kapitole s přepínačem I2S signálu. PLL umožňuje svůj výstup přivést do stavu vysoké impedance, což dovolí připojení právě MCLK z I2S sběrnice.

4.1.3 LCD display

Právě LCD display byl výrazným nedostatkem prvního zapojení. Bylo rozhodnuto o použití velmi levné a jednoduché varianty v podobě displeje použitého v telefonech Nokia 5110, kterých se na trhu objevil ve skutečně obrovském množství. Stal se také poměrně vyhledávaným prvkem v elektrotechnické komunitě. Bohužel jeho kvalita silně pokulhávala za běžně dostupnými a vyráběnými grafickými displeji. Obvykle LCD vykazovalo chybu v podobě nedoléhající zobrazovací části, což vedlo k výpadkům

zobrazení. Pro napravení závady bylo nutné vyvinout tlak na zobrazovací část LCD. Jeho výhodou je skutečně pouze cena a jednoduchá komunikace. Rozlišení tohoto displeje je 84x48 bodů, tedy menší než běžné 128x64, což jeho použití také limituje. Teoreticky lze na LCD se standardním displejem zobrazit více informací, než na verzi LCD z Nokia 5110. Displej je nabízen například distributorem Sparkfun[7]. Displej ukazuje obrázek 12.



Obrázek 12 - Původní použité LCD [7]

Namísto něj byl vybrán display firmy Display Elektronik GmbH [8] disponující standardním rozlišením 128x64 pixelů. Konkrétní typ nese označení DEM 128064N FGH-PW[9] (obrázek 13). Je založen na řadiči ST7565R[10] umožňující komunikovat prostřednictvím SPI. Oproti původní variantě je také větší v úhlopříčce o 0.1“, má více homogenní podsvícení a jeho zpracování je na dobré úrovni. Jeho velkou výhodou je také výška, která je pouhých 5.3mm. Spolu s možností montáže přímo na DPS (*deska plošného spoje*) se jeví jako téměř ideální pro umístění do boxu. Nevýhodou této volby je nutnost přepracovat firmware pro ovládání tohoto nového prvku.



Obrázek 13 - Nově zvolený LCD Display [11]

4.1.4 Bluetooth modul

Právě Bluetooth modul se stal základním kamenem pro kompletní revizi celého zařízení. Poslouží pro testování kvality a vlastností audia zpracovaného bezdrátovým zařízením pracujícím na tomto standardu. Výběr vhodného modulu byl omezen pouze na typy vyráběných samotnou firmou Alps Electric, především kvůli jejich dostupnosti.

Byl zvolen Bluetooth modul kombinovaný s Wi-Fi ze série UGKZ2 [34]. Část bezdrátové sítě LAN (*Local Area Network*) však nebude využita. Volba tohoto modulu byla opodstatněná jeho častým použitím v aplikacích vyvíjených právě zmíněnou firmou. Samotný modul je osazen Bluetooth čipem CSR8350 [35] podporující verzi BT 4.1. Modul je vybaven analogovými vstupy pro mikrofony, stejně tak analogovými výstupy pro připojení audiosystému. Primární použití modulu UGKZ2 se předpokládá pro automobilový průmysl, odkud plyne jejich opodstatnění. Kromě tohoto analogového rozhraní však modul disponuje i digitální audiolinkou I2S, která byla zásadní pro použití v aplikaci zvukové karty. Modul také podporuje Bluetooth profil A2DP (*Advanced Audio Distribution Profile*), který dovoluje bezdrátově přenášet audio v lepším rozlišení než standardní HFP (*Hands Free Profile*). Ten byl uzpůsoben k přenosu audia pro telefonii, kde se běžně používá vzorkovacího kmitočtu pouze 8kHz.

Pro komunikaci a nastavení používá BT modul rozhraní USB (to v zařízení nebude využito) SPI a UART. Právě UART bude použit jako primární komunikační médium mezi MCU a BT modulem. SPI slouží k nahrání firmwaru do BT modulu a bude vyvedeno pouze na pinheader.

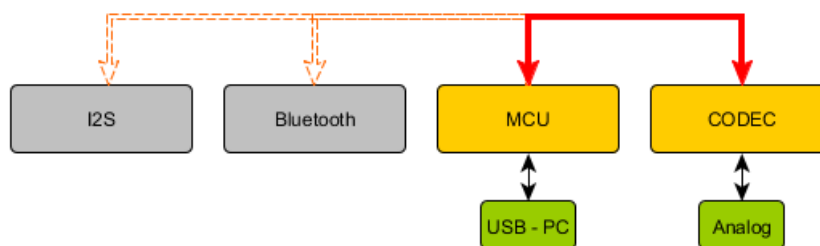
Velká výhoda použití modulu Bluetooth oproti přímému zapojení integrovaného obvodu na desku plošného spoje spočívá ve vyřešené RF (*Radio Frequency*) části.

4.1.5 Přepínač I2S sběrnice

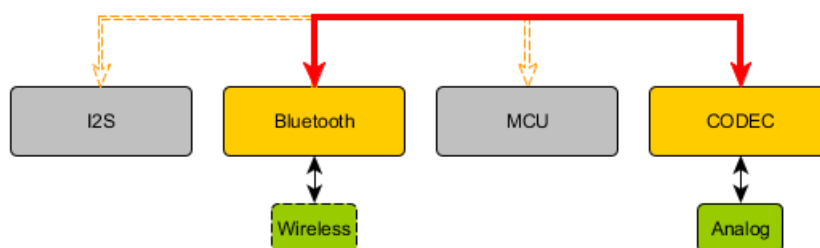
Zcela novou, ale nezbytnou, součástí zvukové karty je přepínač linky I2S. S rozšířením zařízení o modul Bluetooth a požadavkem na analogové vstupy prostřednictvím audiokodeku, vznikl problém s komunikací mezi těmito jednotlivými moduly. Řešením je přepínač linky I2S, který se postará o požadované spojení dvou stran. Celkově se v zapojení vyskytují 4 zdroje audiosignálu v této digitální podobě:

- MCU - zdroj signálu z PC
- Bluetooth modul
- Audiokodek – analogové vstupy/výstupy
- Izolovaný I2S konektor – připojení externího testovaného zařízení

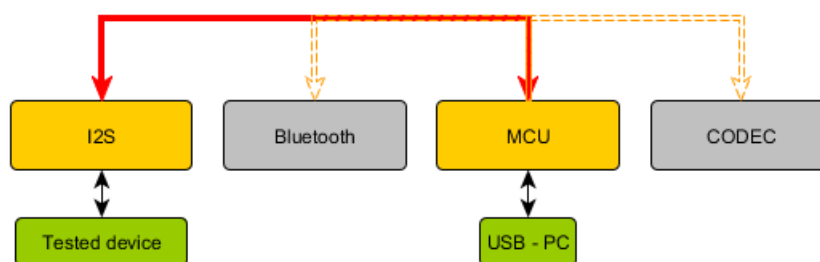
Funkční model bude navržen tak, že dvě tyto části budou linkou přímo spojeny, zatímco dvěma „třetím stranám“ bude umožněno pouze naslouchat komunikaci. Pro lepší názornost jsou na obrázcích 14, 15 a 16 uvedeny příklady konfigurace přepínače linky v různých případech využití.



Obrázek 14 - Příklad konfigurace přepínače linky: běžná zvuková karta

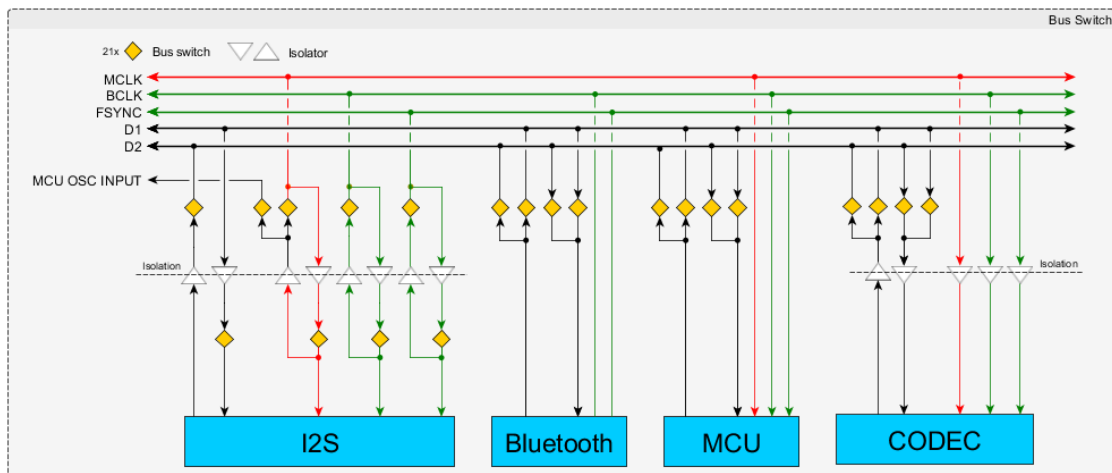


Obrázek 15 - Příklad konfigurace přepínače linky: Bluetooth test



Obrázek 16 - Příklad konfigurace přepínače linky: test externího zařízení na I2S

Problém v této části návrhu nastal díky absenci potřebné komponenty na trhu. Žádný výrobce nenabízí vhodný integrovaný obvod za účelem přepínání, či odpojování linek I2S mezi více zařízeními. Řešením bylo například přivádět výstupy jednotlivých I2S komponent do stavu vysoké impedance. Pokud modul zkrátka nebyl třeba, jeho výstup je odpojen nastavením ve firmwaru. Toto řešení však neposkytuje například audiokodek či výstupy izolátorů (viz následující kapitola). Nelze také zcela jednoznačně definovat, která linka je „vysílací“ a která „přijímací“, jelikož je tok dat obousměrný. Linky jsou de-facto zapojené křížově. Obdobu lze najít například u sériového rozhraní RS-232. Třetí strana, pokud chce sledovat jednu z těchto linek, musí mít možnost výběru sledovaného signálu, což klade další rozšiřující požadavky na přepínač I2S. Nejjednodušší variantou bylo použití sady separovaných spínačů na každý I2S prvek. Přehled těchto částí a celkový počet takovýchto spínačů znázorňuje blokové schéma na obrázku 17.



Obrázek 17 - Blokové schéma přepínače I2S

Oranžové kosočtverce znázorňují jednotlivá místa odpojení. Přepínání se týká převážně datových linek (D1, D2). U zdroje hodin většinou existuje možnost odpojení signálu přivedením výstupu do stavu vysoké impedance. Možné to není například u izolátoru (část oddělení izolované I2S linky). U této části si také lze všimnout, že zde chybí přepínač, který je použit u všech ostatních částí (čtveřice spínačů na datových linkách). Důvodem je ušetření počtu použitých komponent. Vzhledem k tomu, že všechna ostatní zařízení lze přepínat, je stále možné na výstup izolované I2S části přivést libovolný signál. Přepnutí je pouze nutné u zdroje signálu. Omezení je pouze v nemožnosti vytvořit zpětnou smyčku na konektoru I2S. Tato funkce však není vyžadována.

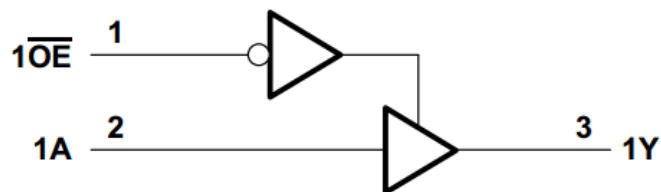
Schéma také znázorňuje výstup MCLK oddělený samostatným spínačem, který poslouží jako vstup hodin pro MCU. Odpojitelnost je zde nutná, jelikož hlavním zdrojem hodin zůstává PLL.

Pro realizaci se nabízely dvě základní varianty:

- **Přepínání pomocí relé** – ideální možnost díky absolutnímu odpojení signálů. V cestě jsou zaneseny pouze minimální odpory kontaktů. Tato varianta, co se elektrických vlastností přenosu týče, se jeví jako nejvhodnější, nese sebou však i nevýhody a to především vysokou cenu. Pokud vezmeme v úvahu počet spínačů, což je 21, a průměrnou cenu signálového relé kolem 40Kč, dostaneme se na částku 880Kč, což není zadavatelem akceptovatelná hodnota. Částečně by se cena zredukovala použitím ne spínačích, ale přepínacích relé, ovšem ne výrazně. Dalším záporem je velká spotřeba proudu pro obsluhu takovéto soustavy. USB má obecně definován strop odběru na 500mA. Velká část této energie by šla právě do přepínače. Posledním záporem je fyzická velikost těchto komponent. Zachování malých a kompaktních rozměrů je jedním ze základních požadavků na modifikaci zařízení.
- **Polovodičový odpojovač** – Výhodou této komponenty jsou velmi malé rozměry a umístění několika takovýchto spínačů do jednoho pouzdra. Rozhodně se tedy

jedná o ekonomičtější variantu. Nevýhodou jsou však elektrické parametry, které jsou zcela jistě horší než v případě použití relé. Je třeba brát ohledy na maximální možné přenášené frekvence, které omezují především parazitní kapacity těchto obvodů.

Vzhledem k nižším pořizovacím nákladům a kompaktnosti řešení bylo rozhodnuto o použití druhé varianty. Zbývalo najít vhodnou součástku dostupnou na trhu. Zásadním požadavkem na takovýto odpojovač je možnost přivedení výstupu do stavu vysoké impedance. Například firma Texas Instruments nabízí zajímavé portfolio takovýchto obvodů, které prezentují v poměrně zajímavé příručce [12]. Na výběr jsou různé přepínače a spínače. Nejvhodnější se však jeví použití obvodu z řady 74xx125 [13]. Jedná se o integrovaný obvod obsahující hned čtveřici třístavových digitální odpojovačů (buffer) s individuálně řízeným výstupem. Schématická reprezentace je znázorněna na obrázku 18.



Obrázek 18 - Jeden ze čtveřice spínačů v obvodu 74xx125 [13]

Výstup 1A je promítnut na výstup 1Y v případě, že na vstupu 1OE je logická nula. V opačném případě je výstup ve stavu vysoké impedance. Celá pravdivostní tabulka je na obrázku 19.

**FUNCTION TABLE
(EACH BUFFER)**

INPUTS		OUTPUT
\overline{OE}	A	Y
L	H	H
L	L	L
H	X	Z

Obrázek 19 - Pravdivostní tabulka jednotlivého segmentu [13]

Důležitý je také výběr technologie, kterou je součástka vyrobena. Vzhledem k výskytu relativně vysokých frekvencí, především pak na MCLK, kde může být kmitočet až 12.288MHz, je nutné vybírat obvody s velmi malým zpožděním přenosu a nízkými parazitními kapacitami. Tyto potřebné parametry splňují například obvody AHC (advance high-speed CMOS) [14]. Díky kompatibilitě pouzder těchto obvodů je však možná tento typ nahradit ještě rychlejší řadou, například VHC (very high-speed CMOS). Tyto obvody jsou dostupné také v pouzdech VQFN (*very thin quad flat no-lead*), což nahrává minimálním rozměrů výsledného zařízení.

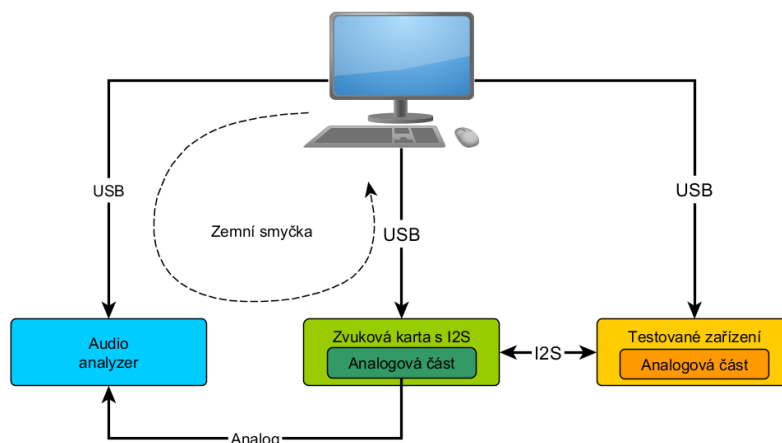
V přepínači I2S je použito celkem 21 spínačů. Je tedy nutno použít 5 těchto obvodů. Pro poslední zbývající spínač se nabízí možnost využít jednohradlový obvod stejné série, a to 74AHC1G125.

Cena jednoho obvodu je menší než 20Kč. V případě použití pěti těchto kusů a jednoho pomocného je výsledná cena I2S přepínače přibližně 100Kč, což je značná úspora oproti řešení s relé.

Částečné řešení tohoto přepínače za použití obvodů 74AHC125 bylo prakticky testováno s původní variantou zvukové karty. Výstupní signál I2S byl experimentálně přiveden právě přes tento obvod a kontrolován osciloskopem. Prvotní testy potvrdili vhodnost tohoto obvodu pro použití v přepínači signálů.

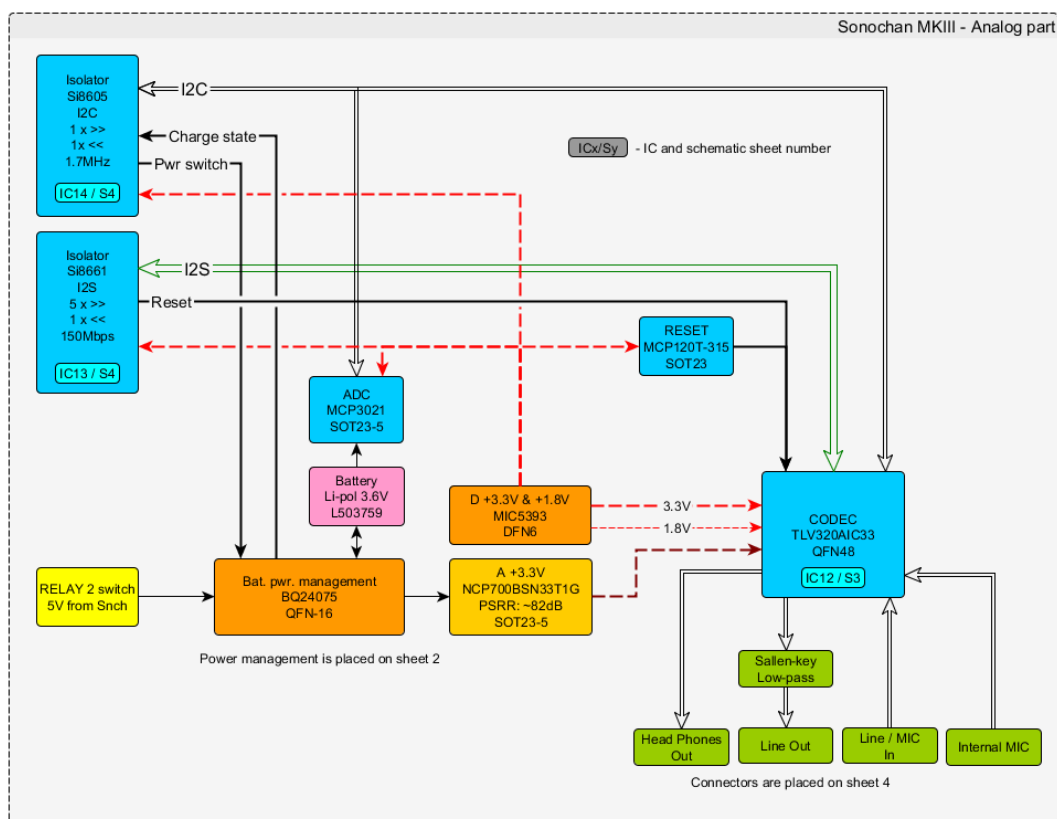
4.2 Analogová část

Velkou změnou prošla i tato část zvukového zařízení. Předchozí zkušenosti poukázaly na požadavek nízkošumého analogového výstupu pro měření audioparametrů přenášeného digitálního signálu. Pro tento aspekt je důležité použití akumulátoru pro napájení celé analogové sekce. Aby bylo toto napájení účinné, je nutné i analogovou část izolovat od zbylého obvodu za pomoci izolátorů. Důvodem galvanického oddělení však byl také obdobný problém se zemní smyčkou, která byla prezentován již v úvodní kapitole. K tomuto jevu a tím zkreslení signálu dojde v případě, že chceme měřit vlastnosti výstupního signálu například audio analyzátořem připojeným k PC prostřednictvím USB. Problém je opět graficky znázorněn na obrázku 20.



Obrázek 20 - Zemní smyčka při použití audio analyzátořu

Rozšíření o Bluetooth modul také vyžaduje analogový vstup do zařízení, aby bylo možné připojit například mikrofon a řeč bezdrátově přenášet na testované zařízení. Součástí tohoto rozšíření je i interní mikrofon a analogový stereo vstup s možností phantomového napájení linek. To umožní připojení externího mikrofonu a jeho napájení přímo z audio linky. Přehledové blokové schéma izolované analogové části je znázorněno na obrázku 21.



Obrázek 21 - Přehledové schéma izolované analogové části

Ve schématu jsou zahrnuty také části napájení a galvanického oddělení, které jsou podrobněji popsány v dalších kapitolách.

4.2.1 Kodek

Pomyslným srdcem analogové části je audio kodek výrobce Texas Instruments TLV320AIC33 [15]. Ten byl použit již v první variantě zařízení a zcela jistě se osvědčil. Disponuje potřebným digitálním I2S rozhraním, třemi stereo vstupy, stereo sluchátkovým výstupem, linkovým a mono výstupem. Část těchto vstupně výstupních obvodů je diferenčního typu. V zapojení však tato konfigurace není využita a všechny vstupní a výstupní části jsou v zapojení single-ended. Jeho předností je také poměrně snadné ovládání, které je zprostředkováno I2C nebo SPI rozhraním (v projektu je využito I2C). Digitální část obvodu zůstala zachována, kromě doplnění resetovacího obvodu, který po zapnutí pozdrží kodek definovanou dobu ve stavu reset pro zajištění správné inicializace. Tato procedura je doporučována v katalogovém listu komponenty.

Komponenta je napájena třemi větvemi napájení. Digitální část vyžaduje napětí pouze 1.8V. Pro logické úrovně lze zvolit napětí 3.3V. Zvláště je pak napájena samotná analogová část napětím také 3.3V. Kodek má poměrně dobré zvukové vlastnosti a to zkreslení signálu AD převodníku typicky 0.003% a odstup signál k šumu 92dB. Výstup kodeku dosahuje odstup signál-šum až 100dB pro linkový výstup a 94dB pro

sluchátkový výstup. Díky těmto parametrům je zvolený kodek vhodný k měření vlastností signálu, získaného z testovaného zařízení.

Oproti předchozí verzi zvukové karty, je u kodeku využita i vstupní část obvodu, kterou bude třeba doplnit o obsluhu ve firmwaru MCU. V cestě je například směšovač signálu ze všech vstupů či modul programovatelného zesilovače (PGA – programmable gain amplifier) a modul automatické korekce hlasitosti (AGC – automatic gain control), sloužící především pro předzpracování signálu z mikrofону. Součástí obvodu je také napájecí výstup pro mikrofóny (bias), který je možné připojit či odpojit. Poslouží pro napájení linkového vstupu v případě uživatelské volby mikrofónu. Ukázka zapojení jednoho vstupu je na schématu 1.

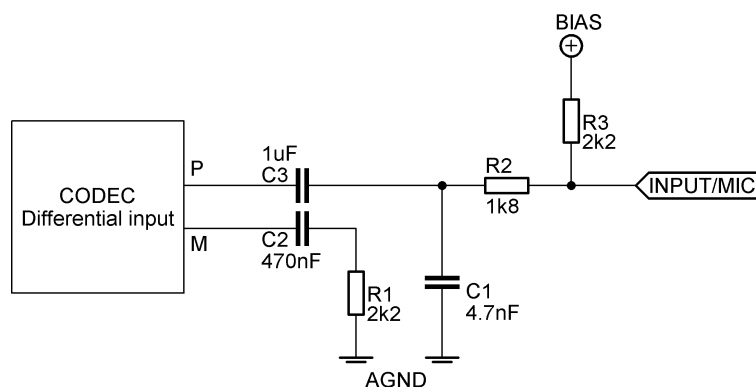


Schéma 1 - Příklad zapojení vstupu kodeku

V zapojení je potřeba správně ošetřit všechny nevyužité vstupy sloužící pro diferenčního připojení (single-ended konfigurace). To je provedeno sériovým RC členem přivedeným na analogovou zem (R1, C2). Vstupy signálu jsou dále ošetřeny jednoduchým antialiasingovým filtrem složeného také z RC článku (C1, R2). Jeho zlomovou frekvenci můžeme určit ze vztahu 1.

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (1)$$

Zlomová frekvence je zde určena na přibližně 19kHz což je dostačující s ohledem na předpokládaný výskyt signálu v podobě lidské řeči.

Trochu komplikované je zapojení sluchátkového výstupu, který musí být oddělen vazebními kondenzátory pro separaci stejnosměrné složky. Vzhledem k tomu, že sluchátka mají poměrně nízkou impedanci, například 16Ω , je nutné jako vazební člen použít kondenzátor s velkou kapacitou, aby nedošlo k tlumení nízkých kmitočtů. Vhodná hodnota je například 220uF, která při úvaze sluchátek se zmíněnou impedancí dle vztahu 1 tvoří horní propust se zlomovou frekvencí kolem 45Hz. Toto zapojení bylo již ověřeno v první verzi přístroje. Konkrétně byly vybrány kondenzátory SMD elektrolytické. Pro ušetření potřebného místa na DPS však v nové verzi dojde ke změně a budou použity kondenzátory tantalové, které také poměrně vynikají svými vlastnostmi pro přenos signálů a mohou tak přispět ke zkvalitnění audiovýstupu.

4.2.2 Výstupní filtr

Rekonstrukce signálu z kodeku TLV320AIC33 je řešena delta-sigma DA převodníkem. Ten je znám svou vlastností odsouvat kvantizační šum do pásma mimo pracovní frekvenci (tzv. Out-of-Band noise), který zásadním způsobem ovlivňuje kvalitu výstupního signálu [16]. Za převodník tohoto typu je tedy nutné umístit filtr typu dolní propust. Na základě praktických zkušeností s tímto typem kodeku bylo rozhodnuto o použití aktivního filtru druhého řádu typu Sallen-key. Typické zapojení pro tento dolnopropropustný filtr je na schématu 2.

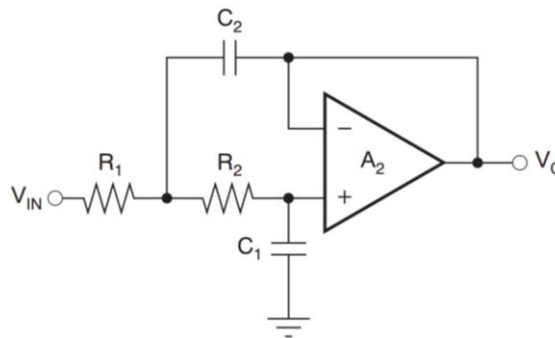
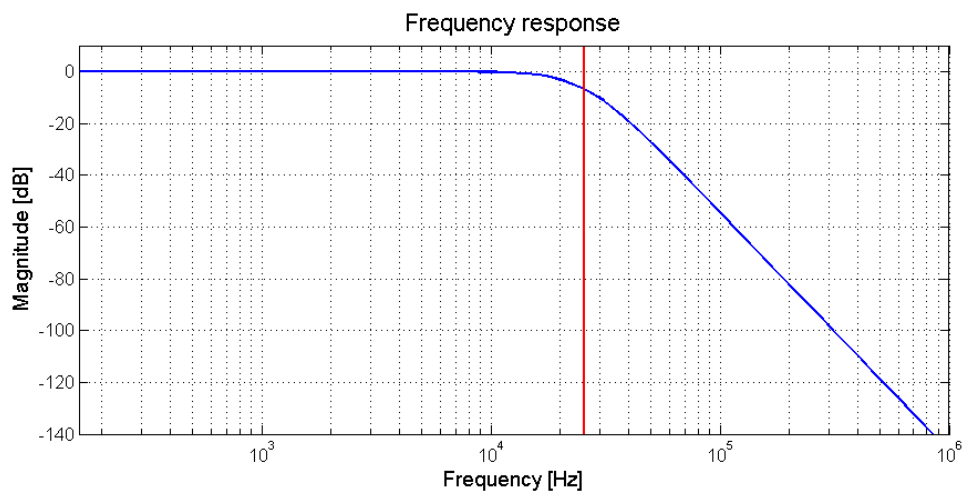


Schéma 2 - Filtr typu dolní propust - topologie Sallen-key [18]

Výhoda tohoto typu filtr je především v použití jednoho operačního zesilovače na propust 2. řádu, která zajišťuje útlum 40dB/dekádu. Frekvenční odezva pro nastavenou zlomovou frekvenci okolo 25kHz je na obrázku 22.



Obrázek 22 - Frekvenční odezva výstupního filtru

Zlomovou frekvenci lze snadno vypočítat ze vztahu 2.

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}} \quad (2)$$

Samotná přenosová funkce je pak dána vztahem 3.

$$F(p) = \frac{(2\pi f_c)^2}{p^2 + 2\zeta(2\pi f_c)p + (2\pi f_c)^2} \quad (3)$$

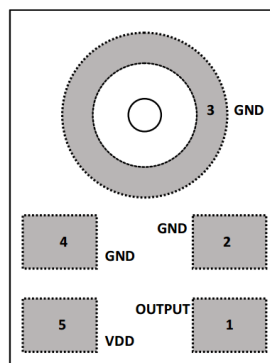
Kde ζ je činitel tlumení, který je nutno zohlednit vzhledem k použitému 2 řádu. Ten byl experimentálně stanoven na hodnotu 0.7, která pomáhá vyrovnat přenosovou funkci v oblasti zlomu. Hodnoty pasivních součástek jsou:

- R1 = 11k
- R2 = 7k5
- C1 = 470pF
- C2 = 1nF

Zásadní pro stavbu filtru je také volba operačního zesilovače, který musí poskytovat co možná nejmenší zkreslení signálu. Volba padla na odzkoušený typ od Analog Devices AD8656 [17], jehož zkreslení udává výrobce na pouhých 0.0007%.

4.2.3 Mikrofon

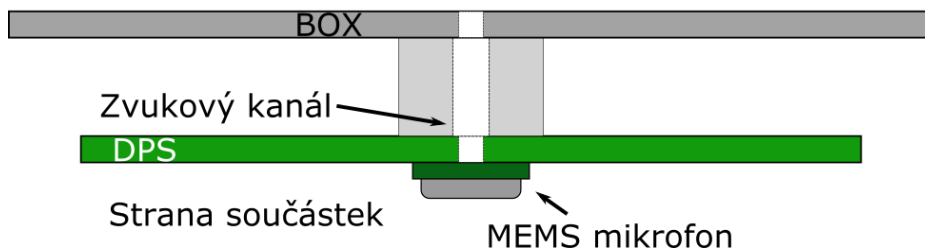
Další částí, o kterou je rozšířena analogová část zařízení je interní mikrofon, který poslouží především jako vstupní prvek pro použití Bluetooth modulu. Trh nabízí skutečně velké množství těchto akustických snímačů. V rámci tohoto projektu padla volba na MEMS mikrofon firmy Invent Sense ICS-40180 [19], který disponuje velmi malými rozměry a vyniká i parametry. Má velký odstup signál šum na svém analogovém výstupu a to 65dBA, plochou šířku pásma 60Hz-20kHz a má zvýšenou imunitu vůči RF rušení. Napájecí napětí je do 3.6V. Zajímavostí tohoto mikrofonu je jeho fyzické provedení, které je zachyceno na obrázku 23.



Obrázek 23 - Spodní strana mikrofonu a zapojení pinů [19]

Vstupní zvukový otvor je umístěn na spodní straně mikrofonu (na straně pájecích pinů). Provedení součástky je SMD. Je tedy nutné do desky plošného spoje vyvrtat otvor aby bylo umožněno průchodu zvuku na mikrofon. Tato varianta je zde použita s výhodou, jelikož usnadní osazování DPS. Součástku lze umístit stejnou stranu desky, jako jsou zbylé součástky, zatímco otvor bude stále směřovat požadovaným

směrem. Na druhé straně DPS také nebude vyčnívat žádný prvek, což zjednodušuje případnou montáž zvukového kanálku, který může být užitečný ke zlepšení kvalitativních vlastností snímaného zvuku. Model je znázorněn v řezu na obrázku 24.



Obrázek 24 - Montáž mikrofonu se vstupním otvorem na straně spoje

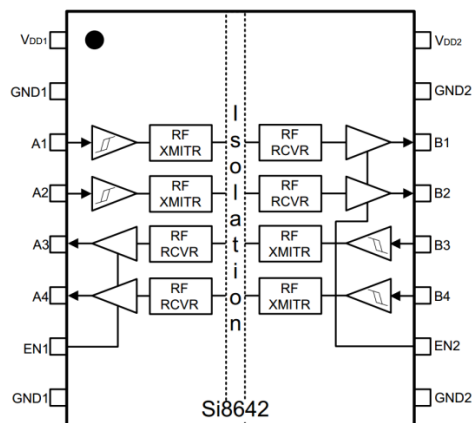
4.3 Izolátory

Základní částí celé zvukové karty, která byla prezentována již od začátku je izolace vstupní části I2S. Důvody vedoucí k tomuto aktu byly zmíněny v kapitole 3. Jen pro připomenutí, jde o zamezení vzniku nežádoucích zemních smyček při interakci zvukové karty a měřeného zařízení. Změnou oproti původní variantě je aplikace této izolace také na analogovou část zvukové karty. V původní zapojení však nezůstala ani oddělená část I2S. Místo galvanického oddělení jsou patrná z přehledových blokových schémat na obrázcích 9 a 17.

4.3.1 Izolace I2S části

Řešení, které bylo již aplikováno v první variantě zařízení, bylo otestováno a jeho přednosti byly prakticky ověřeny. Zcela jistě se jednalo o správný krok ve vývoji tohoto přístroje. Zdálo se, že do této části nebude třeba zasahovat, ovšem nakonec se povedlo nalézt řešení, které vedlo k součástkové redukci a tím i finanční úspoře.

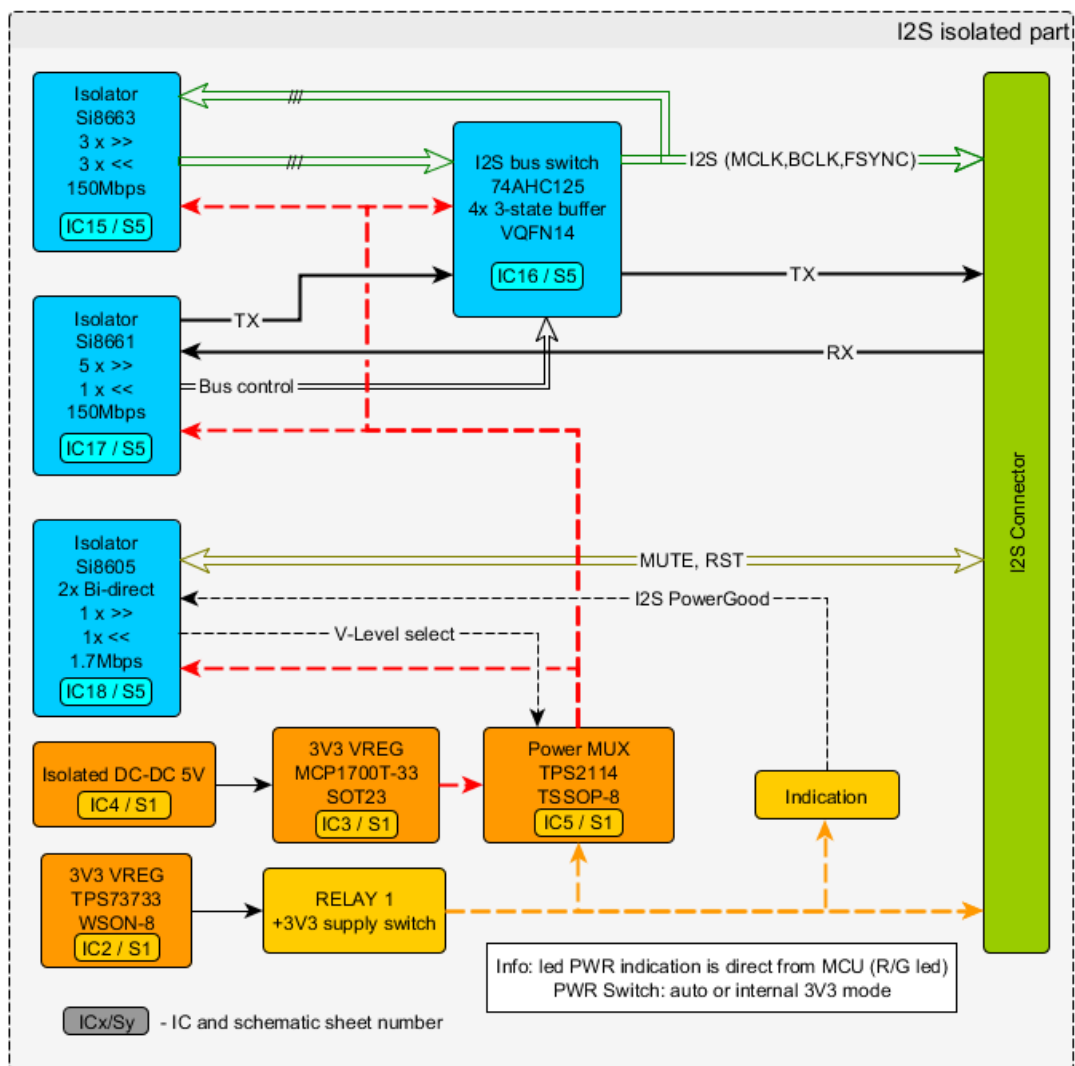
V první variantě bylo použito izolátorů firmy Silicon Labs z řady Si864x [20]. Jejich výhoda spočívá v možnosti přenášet DC složku (pro signály MUTE a RESET), což například neumožňují izolační transformátory, jejichž vstupní signál by bylo třeba modulovat. Samotný přenos je řešen RF vazbou v pouzdru tohoto izolátoru. Další výhodou a základním požadavkem, je přenos signálů na poměrně vysokých frekvencích. Nejvyšší vyskytovaný kmitočet je na MCLK signálu kolem 12MHz. Zmíněný izolátor umožňuje přenášet signály až do rychlosti 150Mbps, což je zcela jistě dostačující. Konkrétní použité izolátory disponovaly také třístavovým výstupem, což umožňovalo dle požadavku uživatele odpojení některého signálu na I2S lince. Problém však byl, že řízení výstupu bylo vždy spřaženo ve dvou kanálech, viz interní blokové schéma tohoto izolátoru na obrázku 25.



Obrázek 25 - Interní blokové schéma izolátoru použitého v první verzi

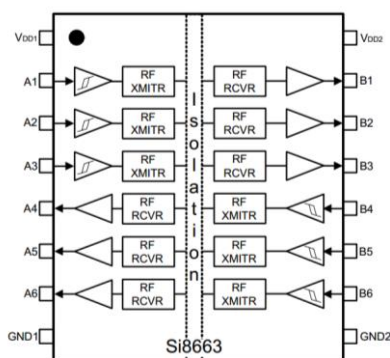
Díky tomu zůstala vždy polovina izolátoru nevyužita, respektive průchod signálu izolátorem byl zdvojen i na nevyužitý kanál. Nutnosti umožnit především hodinovým signálům (MCLK, BCLK, FSYN) průchod oběma směry, znamenala použití jednoho izolátoru na každou z linek. Problematické bylo dále oddělení signálů MUTE a RESET, jejichž směr se musel nelogicky definovat. Modifikace se zaměřila i na vylepšení této části. Oddělení musí dále podléhat i signály, které řídí odpojitelnost jednotlivých výstupů na izolované části. Celkový počet izolátorů v první verzi byl 8. Při ceně za jeden tento izolátor okolo 70Kč dosahuje konečná částka izolace 560Kč.

Nový návrh výrazně redukuje počet použitých izolátorů a elegantně řeší problém s definicí směru na linkách MUTE a RESET. Přehledové blokové schéma nové izolované I2S části je na obrázku 26.



Obrázek 26 - Blokové schéma izolované I2S části

Ze schématu je zřejmé, že z původních osmi použitých izolátorů jsou v nové variantě pouze tři. Nejsou zde však použity původní typy s odpojitelným výstupem. Díky tomu se však v pouzdru izolátoru nachází dva kanály navíc. Konkrétní typy jsou z řady Si866x. Výrobce produkuje varianty s různými počty vstupních a výstupních kanálů. V tomto případě byl použit jeden v konfiguraci 3x dopředný / 3x reverzní (Si8663) a druhý 5x dopředný / 1x reverzní (Si8661). Aby bylo možné některé signály odpojovat, bylo nutné do cesty zařadit jeden z odpojovačů použitých pro přepínání linky. Je znázorněn také na obrázku 18. Pro úplnost a srovnání s původní verzí izolátorů, je struktura Si8663 zobrazena na obrázku 27.



Obrázek 27 - Ukázka nově použitého izolátoru pro separaci I2S části

Velká změna je především u signálů MUTE a RESET. Jejich funkčnost by měla být v ideálním případě obousměrná, což v první variantě bylo umožněno po přepnutí směru. Nabízí se možnost využití I2C izolátoru. Podstata signálové linky tohoto standardu se fyzikálně velmi úzce blíží funkčnosti linek MUTE a RESET. Obvykle jsou tyto signály uvedeny na neaktivní high úroveň za pomoci rezistoru. V případě aktivace jedné z těchto funkcí dojde k uzemnění signálu. Izolátory I2C linky poskytuje právě i firma Silicon Labs. Například Si8605, který disponuje ještě dvojicí jednosměrných linek (jedna dopředná, druhá reverzní). Maximální přenášená frekvence tímto izolátorem je však pouze 10MHz, na což je třeba brát zřetel, vzhledem k možnosti výskytu i vyšších kmitočtů. Zmíněné dvě linky se však ideálně hodí například na řízení napájení, kde nároky na rychlost nejsou nijak vysoké. Všechny signály procházející izolátory pro přehled shrnuje tabulka 1.

Funkce	Signál	Směr	Poznámka	
I2S	MCLK	IN	Vstup signálu do zvukové karty	
	BCLK	IN		
	FSYNC	IN		
		MCLK	OUT	Výstup signálu ze zvukové karty
		BCLK	OUT	
		FSYNC	OUT	
		TX	OUT	Datové signály I2S
		RX	IN	
	Řízení Bufferu	MUTE	IN/OUT	Obousměrně řízené signály
RESET		IN/OUT		
Buf. MCLK		OUT		
Buf. BCLK		OUT		
Napájení	Buf. FSUNC	OUT	Umožní odpojení výstupu	
	Buf. TX	OUT		
	Přepínač napájení	OUT	Řízení napájení izolované části	
	Indikace napájení	IN		

Tabulka 1 - Souhrn izolovaných signálů v galvanicky oddělené I2S části

Díky těmto třem zmíněným izolátorům se povedlo zcela izolovat všechny potřebné signály pro I2S kanál a obsluhu této izolované části.

4.3.2 Izolace analogové části

Jedná se o zcela novou modifikaci spojenou s požadavkem na nízkošumový analogový výstup. Izolace zamezí průniku vysokofrekvenčního šumu ze společné napájecí části zařízení. Dalším důvodem je zamezení vzniku zemních smyček při použití měřicího ústrojí ke zjištění vlastností výstupního signálu. Problém znázorňuje obrázek 20. Na rozdíl od izolace I2S rozhraní zde není požadavek na obousměrný provoz I2S linky. Ta je pevně definována a redukuje tak celkový počet izolovaných kanálů. Izolace je znázorněna již na blokovém schématu v popisu analogové části (obrázek 21). Je použita dvojice izolátorů stejné série (Si86xx) jako u izolované I2S části. Vzhledem k tomu, že kodek je řízen prostřednictvím sběrnice I2C, je jedním z izolátorů i Si8605, který je slouží právě k oddělení této datové linky. Sběrnice I2C je také použita pro komunikaci s AD převodníkem, sloužícím k měření aktuálního napětí akumulátoru. Tento element bude dále diskutován v kapitole 4.4. Počet izolačních obvodů v analogové části je zredukován na pouhé dva. Opět se povedlo maximálně využít jednotlivé kanály izolátorů a nezůstal ani jeden nezapojen. Celkově tedy zařízení obsahuje pět komponent izolující signály od digitálního obvodu. To znamená finanční úsporu oproti původní verzi zvukového zařízení.

V následující tabulce 2 je opět uveden výpis signálů pro galvanické oddělení analogové části zařízení.

Funkce	Signál	Směr	Poznámka
I2S	MCLK	OUT	Signály pro řízení I2S kodeku
	BCLK	OUT	
	FSYNC	OUT	
	TX	OUT	Datové signály
	RX	IN	
	RESET	OUT	Reset kodeku
I2C	SDA	IN/OUT	I2C sběrnice
	SCL	IN/OUT	
Napájení	Spínač napájení	OUT	Řízení napájení izolované části
	Indikace nabíjení	IN	

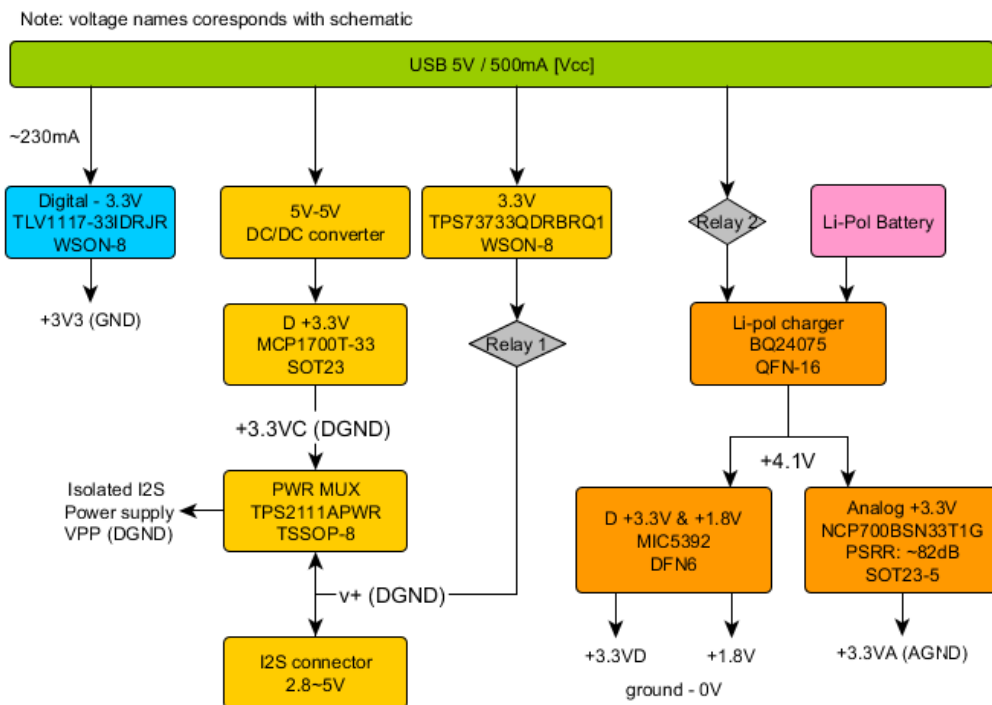
Tabulka 2 - Souhrn signálních linek na izolované analogové části

4.4 Napájení

Kvalitně zpracovaná napájecí větev je základem celého zařízení. V rámci modifikace se zvuková karta dočkala totálního přepracování, které si však vyžádaly především požadavky na rozšíření. Z napájecí větve nezůstala zachována jediná část. Jednotlivé větve lze rozdělit na tři základní skupiny zřetelné i ze schématu na obrázku 28:

- Digitální část (modrá)
- Izolovaná část I2S (žlutá)
- Izolovaná analogová část (oranžová)

Tyto tři jednotlivé části budou dále popsány podrobněji v příslušných podkapitolách. Základ napájení je tvořen zdrojem z USB portu, jehož maximální odebíraný proud je omezen USB standardem na 500mA [21]. Celkový počet integrovaných obvodů zajišťující napájení soustavy je 9 oproti původním 3. Toto rozšíření však bylo nezbytně nutné pro zajištění požadované funkčnosti.



Obrázek 28 - Napájecí větev nového zařízení

Napájecí větev obsahuje také některé ochranné prvky, které ošetřují jak zdroj napájení (PC či notebook) tak i samotnou zvukovou kartu v případě zkratu či jiné neočekávané poruchy. Vstupní řetězec je znázorněn na schématu 3.

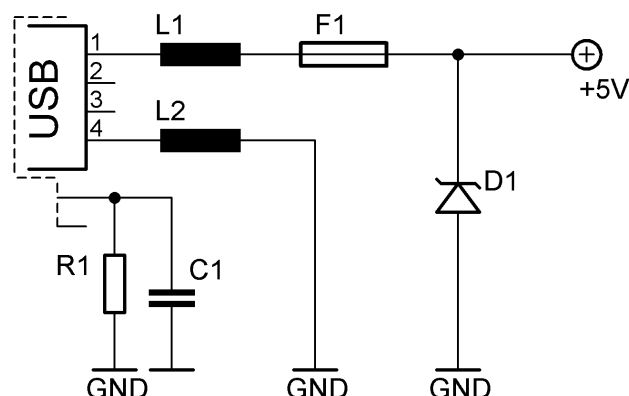


Schéma 3 - Zapojení vstupního obvodu napájení

Na 1. a 4. pinu jsou hned za konektorem umístěny dvě feritová jádra pro filtraci vysokofrekvenčního rušení, kterého běžné počítače produkují značné množství. Jedná se o prvotní filtr veškerého napájení obvodu. Na kladném pólu je dále umístěna pojistka, chránící obvod před přetížením. Za ní pak nalezneme ještě transil, který chrání především obvod zvukové karty před případným přepětím z USB portu. Součástka se trvale zkratuje v případě přesáhnutí nominální hodnoty napětí. Následně dojde také k přetavení pojistky, která zamezí dalšímu tepelnému namáhání transilu a ušetří také samotný napájecí zdroj, který by jinak byl zatížen zkratovým proudem. Dvojice odpor a kondenzátor pak impedančně zakončuje stínění USB kabelu. Jedná se také o opatření snižující šum v soustavě. Nesprávně by stínění bylo připojeno přímo k zemi v obvodu. Vznikla by tím zemní smyčka v přívodním USB kabelu.

4.4.1 Digitální část

Nejjednodušší částí napájecí soustavy je právě digitální část. Veškerá logika je napájena napětím 3.3V. Není třeba také brát zvláště velký ohled na jednotlivé cesty na desce plošných spojů. Změna oproti první verzi zde spočívá ve volbě odlišného stabilizátoru, který byl zbytečně předdimenzován a zabírat velké místo na DPS. Nový stabilizátor nese označení TLV1117-33 [22] a je obsažen ve WSON pouzdru (*Very Very Thin Small Outline No Lead Package*). Původní varianta byla LF33 v pouzdru DPAK. Celkový odebíraný proud této sekce byl testován již v první verzi zařízení. Pohyboval se okolo 230mA. Vzhledem k rozšíření zařízení o některé části lze předpokládat mírný nárůst spotřebovaného proudu. Výsledek však ukážou až testy při oživení zařízení.

4.4.2 Izolovaná I2S část

Návrh této části vyžadoval pro své vylepšení skutečně komplexní řešení. Vzhledem k použitému galvanickému oddělení není možné jakýmkoliv přímým způsobem napájet tuto větev. Původní zvuková karta vyžadovala přivedení napájení na izolovanou část přímo z testovaného zařízení. S tímto se vyskytovalo hned několik problémů. Při připojení testovaného zařízení občas došlo k jeho restartu. Ten způsobovalo nabíjení

kapacit v izolované části a i odběr proudu samotných izolátorů. Důvodem pro napájení jsou především izolátory a v nové verzi i odpojovač sběrnice, které jsou důležité pro funkci separace I2S linky.

Pro případ absence napájení z testovaného zařízení měla zvuková karta možnost manuálním přepínačem spojit galvanicky oddělené části a napájet je přímo. Zařízení také detekovalo, zda na izolované části napětí je či není. Pokud nebylo, na displeji se zobrazila chybové hlášení informující o této skutečnosti. Stalo se tak i v případě, kdy testované zařízení sice napájení distribuovalo, ale došlo k odpojení I2S konektoru. V tento okamžik musel uživatel přepnout spínač a spojit galvanicky oddělené části. V opačném případě zůstalo zařízení v chybě a nebylo možné se zvukovou kartou pracovat. Praxe ukázala, že uživatel často po zpětném připojení I2S konektoru zapomněl opětovně přepínače vypnout. Mezi zařízeními tak tekla i vyrovnávací proud na napájecí větvi, která byla přímo spojena. Problém by mohl nastat, pokud by byly použity rozdílné napětí logiky v obou stranách. Mohlo by dojít i k poškození jednoho ze zařízení. Tento fakt představoval riziko, které bylo třeba v nově modifikované verzi eliminovat.

Řešením je použití vlastního izolovaného zdroje napětí pro izolátory a buffer. Tímto způsobem lze zajistit kontinuální napájení izolované části nezávislé na napájení v připojeného testovaného zařízení. K tomuto účelu byl využit izolovaný DC/DC měnič firmy Traco Power TME0505S [23] (obrázek 29). Pro zajištění nejběžněji používaného napětí 3.3V je za zdrojem zařazen také stabilizátor napětí MCP1700-33 [24]. Ten poskytuje dostatečný proud pro napájení izolátorů a odpojovačů.



Obrázek 29 - DC/DC měnič pro napájení izolovaného I2S rozhraní

Požadavkem však bylo zachovat možnost napájet testované zařízení ze zdroje zvukové karty. Řešení je v použití separovaného stabilizátoru napětí z hlavní napájecí větve USB. Ten však musí být robustní a musí umožnit dodání dostatečného napájecího proudu. V případě že by byl použit stabilizátor pro digitální část, mohlo by docházet ke kolísání napětí na MCU a nechtěným restartům zvukové karty. Stejně tak by nebylo eliminováno riziko poškození zvukové karty v případě, že na konektoru I2S se vyskytne větší napájecí napětí, než je nominální hodnota 3.3V. Na trhu jsou k dispozici obvody jako Texas Instruments TPS73733 [25], které obsahují ochranný prvek před zpětným proudem do obvodu. Je to velice užitečná funkce, která může zabránit poškození

zvukové karty. Tento obvod také disponuje proudovou a tepelnou ochranou. Připojení tohoto napájení bude řešeno za pomoci relé, čímž bude možné sepnutí či rozepnutí částečně automatizovat a kontrolovat. Uživateli bude zapnutí napájení umožněno v obslužném počítačovém softwaru nebo manuálně jedním z tlačítek na zařízení.

S vlastním zdrojem napájení izolované I2S části vznikl ještě jeden problém, a to nemožnost přizpůsobit se jiné úrovni napětí logiky v testovaném zařízení. Tuto záležitost se povedlo vyřešit umístěním napájecího multiplexu, který umožní přepnout napájení izolátorů a bufferu na přivedené napětí na I2S konektoru. Tuto funkci umožňuje například TPS2111A [26]. Přepínání je možné také automatizovat dle rozhodovací tabulky 3.

Vynucen DC/DC měnič	Napětí na I2S konektoru	Sepnuto relé	Zdroj napájení
0	0	0	Interní
0	1	0	Externí (I2S konektor)
1	x	0	Interní
x	x	1	Externí (I2S konektor)

Tabulka 3 - Rozhodovací tabulka pro volbu napájení izolované I2S části

Jsou tedy dvě možnosti, kdy bude připojen interní DC/DC měnič. Pokud na I2S konektoru nebude detekováno žádné napětí (signál přiveden před jeden z izolátorů) nebo uživatel přímo definuje, že bude použit tento zdroj napájení. Výjimku tvoří okamžik, kdy bude sepnuto relé a je tedy jasné, že je použito napájení I2S konektoru přímo ze zvukové karty.

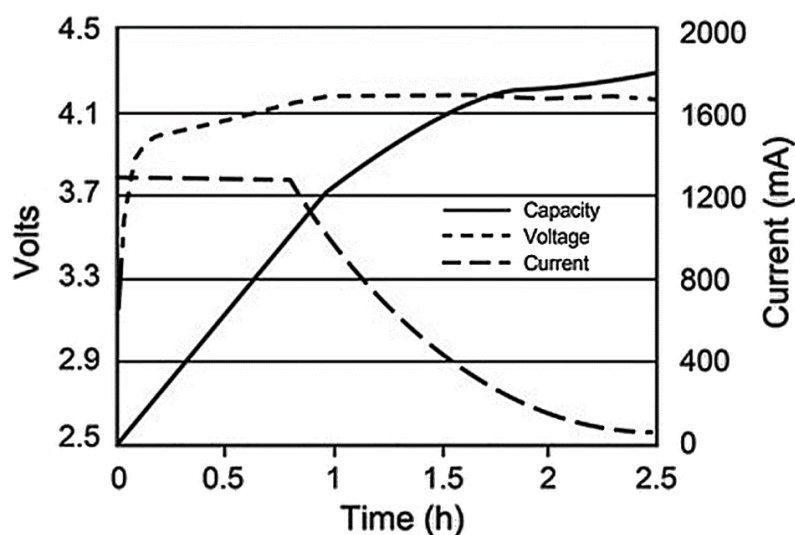
O typu napájení bude informovat také dvoubarevná LED dioda. Zelená barva bude indikovat přítomnost napájecího napětí z testovaného zařízení (galvanicky odděleno), červená pomocí relé galvanicky spojené části a napájení ze zdroje zvukové karty. Pokud bude LED zhasnuta, bude to znamenat, že na konektoru se nevyskytuje žádné napájecí napětí. Pouze logika je napájena z interního DC/DC měniče čímž je zachována funkčnost I2S portu.

4.4.3 Analogová část

Vzhledem k rozhodnutí plně galvanicky oddělit také analogovou část zařízení, bylo nutné vyřešit i její napájení. Použití izolovaného DC/DC měniče, jako tomu bylo v případě I2S části zde nepřichází v úvahu, především z důvodu, že tento konvertor je sám zdrojem hodinového signálu, který zajišťuje jeho konverzní funkci. Jeho přítomnost by se mohla negativně projevit na kvalitě výstupního audiosignálu, což je nežádoucí. Z předešlých pokusů s kodekem TLV320AC33 se jako velmi vhodné řešení jevílo bateriové napájení a právě tento způsob byl zvolen jako výchozí.

Použití klasických alkalických baterií se jeví jako velmi nevhodné, vzhledem k předpokladu i několikahodinového nasazení. Klasický alkalický článek dosahuje nominálního napětí 1.5V, což by vedlo k použití nejméně 3 těchto baterií. To

také zvětšuje rozměry konečné podoby zvukové karty. Volba tedy padla na dobíjecí akumulátory i přes vyšší pořizovací náklady. Vzhledem k častému nasazení se tato volba zcela jistě vyplatí. Články typu Ni-Cd (*nickel-cadmium*) a Ni-Mh (*Nickel-metal hydride*), které jsou již dobíjecí, však nesplňují požadavek na potřebné napětí na článek. Naopak jako velmi vhodné se jeví použití akumulátorů Li-Ion (*lithium-iont*) či Li-Pol (*lithium-polymer*), jejich napětí jednoho článku dosahuje hodnoty 3.6V a jsou vhodné také z jiných hledisek. Především jejich mnohonásobně větší hustota energie oproti předešlým zmíněným článkům, čímž dosahují poměrně malých rozměrů při zachování velké kapacity. V dnešní době je na trhu také velká spousta nabíjecích obvodů podporující právě tyto články. Právě proces nabíjení je trochu problematický, jsou na něj kladeny relativně přísné nároky. Jejich nedodržení může vést v extrémním případě i k fatálním následkům (výbuch, požár). Je nutné především dodržet dovolené nabíjecí teploty, které se typicky pohybují mezi 0~45°C [27]. Samotné nabíjení pak probíhá dvoufázově (obrázek 31).

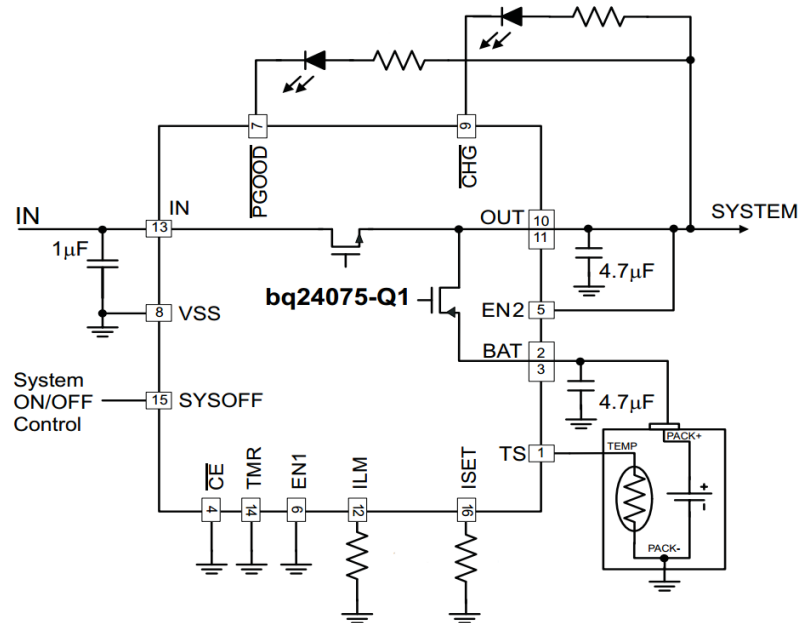


Obrázek 30 - Typická nabíjecí křivka Li-Ion / Li-Pol akumulátoru [28]

První fáze je proudová, kdy je článek nabíjen konstantním proudovým zdrojem až do dovršení nominálního nabíjecího napětí, které je typicky 4.2V. Poté přechází nabíjecí obvod do napěťového režimu, kdy udržuje nastavené napětí s odchylkou nejhůře 1%. Nabíjení terminuje buď časovým spínačem, nebo dosažení definované hodnoty proudu (většinou zlomek nastaveného nabíjecího proudu). Zahájení nabíjení iniciuje uživatel stisknutím patřičného tlačítka v uživatelském rozhraní, případně příkazem prostřednictvím USB komunikace.

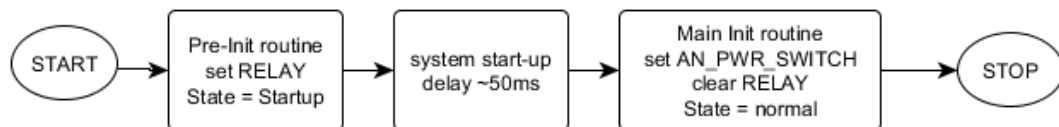
K nabíjení akumulátoru poslouží velmi dobře například integrovaný obvod BQ24075 [29]. Ten je kromě samotné funkce nabíjení vybaven také technologií, pro rozdělení dostupného proudu mezi akumulátor a napájení systému. V případě nedostupnosti externího zdroje pak připojí k systému samotný akumulátor. Obvod je také vybaven pinem pro odpojení systému od napájení, což je velmi důležitá funkce.

Pomocí ní bude zamezeno vybití akumulátoru v době, kdy bude zařízení vypnuté. Funkce nabíjecího obvodu je zřejmá z vnitřního zapojení a základní konfigurace na obrázku 31. Přehledové schéma celého napájecího systému pro analogovou část zvukové karty lze nalézt na obrázku 21.



Obrázek 31 - Základní zapojení nabíjecího obvodu BQ24075 [29]

S odpojením akumulátoru vzniká jeden velmi zajímavý problém, v podobě nemožnosti jednoduše aktivovat systém. Signály do analogové části jsou odděleny izolátory, jejichž napájení bude při odpojení také odstaveno. Nastartování analogové části tak není možné jednoduchým nastavením pinu na patřičném izolátoru. Přesto je však možné řešení v podobě krátkého sepnutí relé, které se stará o napájení celé analogové sekce v případě nabíjení. Přivedením napětí na vstup nabíjecího obvodu dojde také k sepnutí systému, tedy i napájení izolátorů. Tento okamžik, stejně tak po celou dobu nabíjení, nejsou obě části galvanicky odděleny. Startovací sekvence je zobrazena na vývojovém diagramu na obrázku 32.



Obrázek 32 - Vývojový diagram sepnutí analogové části

Po sepnutí relé bude vyčkáno inicializace systému, především pak izolátorů. Poté dojde k nastavení patřičného pinu z MCU. Ten izolovanou cestou „podrží“ pin nabíjecího obvodu, který určuje, zda systém bude napájen. V tento okamžik může opět dojít k odpojení relé, přičemž analogová část zůstává napájena. Odpojení celé části od

napájení je velmi jednoduché. Stačí přivést patřičný pin izolátoru na hodnotu logické nuly, čímž dojde k pokynu BQ24075 odstavit systém od napájení.

Mezi dalšími přednostmi tohoto obvodu lze vyzdvihnout například možnost nastavení maximálního proudu do obvodu. Ten je dále rozdělen na proud nabíjecí a napájecí pro systém. Tato funkce je velmi užitečná pro napájení z USB, kde je definován limit maximálně odebíraného proudu na 500mA. Proud tak lze velmi snadno kontrolovat. Obvod také umožňuje sledovat teplotu akumulátoru a případně přerušit nabíjení, pokud se dostane mimo nastavené meze. Tato funkčnost však nebude využita vzhledem k relativně malým nabíjecím proudům, které eliminují riziko přehřátí. Jako další ochrana je poskytnut časovač, po jehož vypršení dojde také k terminaci nabíjení. Dobu lze nastavit externím odporem. To bude předmětem praktického testování s konkrétním akumulátorem. Dále poskytuje obvod informaci o stavu nabíjení (nabíjí/dokončeno). Ta bude prostřednictvím izolátoru poskytnuta také MCU.

Kromě informace o nabíjení je však nutné, aby zařízení znalo i okamžitý stav akumulátoru, především pak pro předání informace uživateli o míře nabití či vybití. Za tímto účelem je analogová část vybavena také jednokanálovým AD převodníkem MCP3021[30]. Ten disponuje I2C rozhraním, které bylo nutné již kvůli kodeku rozvést prostřednictvím izolátorů do galvanicky oddělené části. Jeho rozlišení je 10 bitové a umožňuje vzorkovat signál rychlostí až 22.3kbps. Tato hodnota je více než dostatečná. Skutečná vzorkovací rychlost bude experimentálně nastavena například na 1s, což je dostatečné s ohledem na ne příliš dynamické změny v napětí akumulátoru.

Poslední částí napájení analogové části jsou samotné stabilizátory napětí. Tato sekce vyžaduje hned tři větve a to 3.3V pro digitální část, 3.3V pro analogovou část a 1.8V pro napájení digitální části kodeku. Vše znázorňuje obrázek 21. Vzhledem k provoznímu rozsahu napětí Li-Ion akumulátoru je žádoucí, aby stabilizátory byly typu s velmi nízkým úbytkem napětí. Takový požadavek splňuje například obvod NCP700 [31] použitý pro napájení analogové části meziobvodu. Jeho přednosti jsou však také ve velmi nízkém výstupním šumu, tzv. PSRR (*power supply rejection ratio*), což napomáhá samotnému analogovému výstupu, na který jsou kladeny požadavky právě na co nejnižší šum a zkreslení. Parametr udává odstup šumu od samotné hodnoty napájecího napětí. Obvod dosahuje až hodnoty 80dB. Úbytek napětí na tomto obvodu pro hodnotu 3.3V je pouhých 130mV při odběru 200mA, což je zcela dostačující. Odtud však plynou omezení na pokles napětí baterie na hodnotu ~3.5V, kdy již obvod přestane být spolehlivý a je třeba informovat uživatele o nutnosti nabít akumulátor.

Druhá část napájecí větve je čistě digitální, kde již nebyl kladen požadavek na co možná nejnižší šum v signálu. Trh také nabízí duální stabilizátory, což by přineslo úsporu místa na DPS ale i úsporu finanční. Byl zvolen obvod MIC5393 [32], který disponuje právě dvojitým výstupem s hodnotami 1.8V a 3.3V. Je také v provedení DFN6 (*Dual Flat No Lead*), což šetří další místo na DPS. Výhoda těchto pouzder je v jejich chlazení. Obsahují malou plošku na spodní straně pouzdra, která předává teplo

měděným plochám na DPS. Není tak třeba se zbytečně obávat přehřátí těchto malých obvodů. MIC5393 dokáže dodat na každé větvi proud 150mA, což je dostačující pro napájení digitální části. Větší odběr proudu lze předpokládat především na analogové části, kde mohou být do systému připojeny nízkoimpedanční sluchátka.

4.5 Verzování

Vzhledem k rozsáhlosti projektu je nutné nastavit jistý systém pro jednoznačné označení jednotlivých verzí při vývoji zařízení, ať už v hardwaru či firmwaru. Výchozí verze nese označení MKII (Mark II). Takovéto jednoduché značení však není zcela dostatečné pro popis hardwarových částí, které se mohou často měnit i v rámci jedné generace zařízení. Stačí jedna změna komponenty, která povede k přerozvržení desky plošného spoje ovšem se zachováním původní funkčnosti.

Nově sestavované zařízení dostalo značku MKIII, aby zbytečně nevybočovalo od původního členění a nezpůsobovalo zmatek u koncového uživatele. Pro označení desek plošného spoje však bylo zvoleno značení ve formě tří číslic oddělených tečkou. Forma značení je tedy xx.yy.zz. První verze desky plošného spoje nové verze nese označení 0.3.0. První číslice je zpravidla ponechána pro označení konečného výrobku, na němž již není prováděn vývoj, což není tento případ. Třetí generace se tedy promítá do druhé číslice. Poslední číslice je ponechána pro případné drobné změny v hardwaru v rámci jedné verze. Pokud dojde ke změnám, je možné se díky značení vyhnout situaci, kdy budou na vadnou desku plošného spoje starší verze osazeny komponenty.

5 FYZICKÉ PROVEDENÍ

Vzhledem k razantním hardwarovým změnám nebylo možné zachovat původní box a rozvržení zařízení. Byla přidána zcela nová funkcionalita, která vedla k totálnímu přepracování fyzického provedení hardwaru včetně změn v uživatelském rozhraní.

5.1 Deska plošného spoje

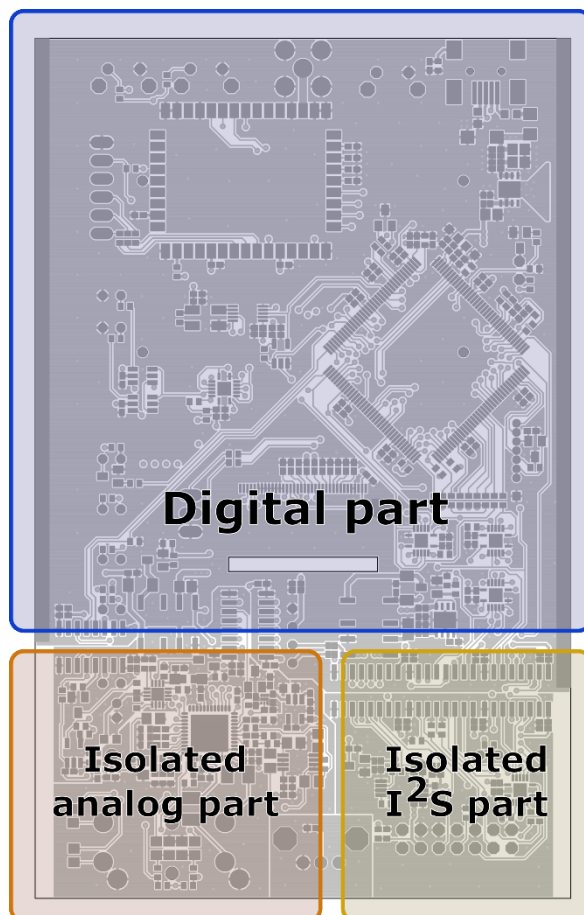
Návrh desky plošného spoje (DPS), která je nosným prvkem celého zařízení, zabrala poměrně značnou část úsilí při tvorbě tohoto projektu. Vzhledem ke složitosti a nutnosti zachovat kompaktní rozměry, byla zvolena 4 vrstvá varianta DPS. Takovouto desku již není možné vyrobit v domácích amatérských podmínkách. Návrh byl tedy od začátku koncipován s požadavky na profesionální výstup vhodný pro zpracování v externí firmě zabývající se výrobou DPS. Nástrojem pro tvorbu schématu a dále jednotlivých vrstev plošného spoje byl známý software společnosti CadSoft, EAGLE, jehož licence byla k dispozici ve firmě Alps Electric Czech.

Zvláštní pozornost je v návrhu věnována rozmístění komponent. Ty jsou alokovány prioritně pouze na jednu ze stran DPS. To také udává převážně použitou technologii, tedy SMT (*Surface Mount Technology*). Tato skutečnost silně usnadní osazování v případě, že bude použito pájky v podobě pasty a zařízení bude napájen ve speciální peci. Na druhé straně se nachází pouze prvky uživatelského rozhraní (LED, LCD display) a jeden z trojice konektorů typu JACK. Část těchto komponent bude typu THD (především LED), které je třeba ručně dopájet. Těchto prací je však na desce minimum.

Vícevrstvá deska plošného spoje umožnila velmi efektivní rozložení jednotlivých komponent včetně rozvedení napájení a země, na které je též brán velký zřetel. Vhodným rozvržením bylo možné dosáhnout odstínění kritických částí náchylných na rušení, jako jsou například analogové části, či izolací samotných zdrojů rušení, mezi které se řadí například linky sběrnice I2S, na nichž se vyskytují frekvence v řádu MHz. Spojení signálů jsou vedeny prioritně ve vrstvě s osazenými komponenty. Vrstva pod ní byla zvolena pro rozvedení země, což umožní odstínění signálů od zbylého obvodu. Ve třetí vrstvě je distribuováno napájení pro všechny části obvodu. Poslední vrstva, zároveň vrstva horní (pohledová), byla určena pro rozvod zbylých signálů a také země. Propojení mezi vrstvami je řešeno pomocí prokůvů skrz všechny vrstvy. Použití mikro prokůvů (například pouze mezi dvěma vrstvami) nebylo možné, jelikož zvolený výrobce nepodporoval tuto technologii. Přesto tento aspekt nebyl nijak výrazně limitující při tvorbě DPS.

Návrh zařízení zahrnuje také dvě galvanicky oddělené části. Obecně je nežádoucí, aby docházelo k překrývání země mezi jednotlivými separovanými oblastmi, kde by vznikala kapacitní vazba. Nejkritičtější místem je analogová část, kde by

průnik rušení mohl zapříčinit zhoršení výsledných vlastností zvukové karty. Zvolené rozvržení zemí, které vychází také z rozmístění konektorů a prvků uživatelského rozhraní, je znázorněno na obrázku 33. Barvy vyznačených oblastí korespondují z rozvržením napájení na blokovém schématu na obrázku 28.

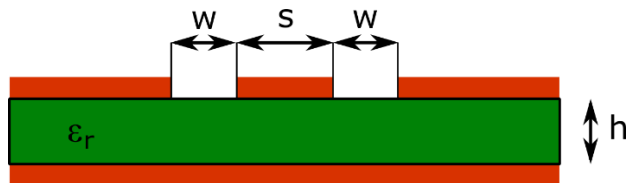


Obrázek 33 - Rozložení zemí při návrhu desky plošného spoje zvukové karty

S jistou opatrností bylo třeba nutné navrhovat i samotnou analogovou subčást. Polovina tohoto obvodu je digitálního charakteru a i zde není vhodné ji prolínat s čistě analogovou oblastí. Z toho důvodu, jak již bylo popsáno v kapitole 4.4, obsahuje napájení galvanicky oddělené analogové části dva stabilizátory napětí. Jeden čistě pro analogovou část a druhý pro digitální prvky obvodu. Země mezi těmito dvěma oblastmi jsou také odděleny a vzájemně spojeny v jednom místě u obou stabilizátorů napětí. Tím je zajištěno odrušení a zamezeno vzniku zemních smyček na samotné desce plošných spojů.

Kritickým místem na desce plošného spoje je také propojení antény s Bluetooth modulem. Technologie pracuje v 2.4GHz ISM (*Industrial scientist medical*) pásmu. Vedení radiofrekvenčních signálů na těchto frekvencích na desce plošného spoje je relativně složitou a komplexní záležitostí. V principu jde o to, aby impedance cesty byla co nejvíce přizpůsobena impedanci ostatních bloků v signálové cestě, v tomto případě standardních 50 Ω . Zamezuje se tím odrazům signálu na přechodu dvou rozdílných

rozhraní, čímž dochází ke ztrátám vysílaného výkonu. K výpočtu parametrů bylo využito programu Saturn PCB Design [33], který v sobě obsahuje i kalkulátor impedance cesty DPS. Typ vedení byl zvolen zemněný koplanární jehož průřez je zobrazen na obrázku 34.



Obrázek 34 - koplanární zemněné vedení signálu na DPS

Zásadními parametry jsou šířka samotné cesty (s), tloušťka mezery (w), síla dielektrika (h) a použitý materiál dielektrika DPS. V případě návrhu na čtyř vrstvou desku byl problém s neznámým údajem tloušťky dielektrika. Nebyl znám údaj o jeho síle mezi horní a první vnitřní vrstvou. Vnitřní vrstvy v místě vedení RF signálu tedy v návrhu nebyly pokryty měděnou zemnicí vrstvou. Ta je až na spodní straně DPS.

Důležitým aspektem desky plošného spoje je i výběr komponent a jejich velikostí. Ten se orientuje primárně na součástky typu SMD. V případě odporů a kondenzátorů byla zvolena varianta pouzdra 0402, kterou lze ještě ručně osazovat a pájet, na druhou stranu je již dostatečně malá a umožňuje vytvoření zařízení kompaktních rozměrů. Roli hrála také dostupnost součástek v evropských distribučních skladech a jejich cena.

5.2 Box

Původní úložná krabička (obrázek 7) byla nahrazena o něco větší, ovšem mnohem přívětivější pro rozmístění komponent. Konkrétní typ nese označení Hammond 1455J1202 [34]. Jeho rozměry jsou 120x78x27mm. Jedná se o hliníkový box s plastovými čely, které usnadňují závěrečné opracování pro vytvoření otvorů na konektory a ovládací prvky. Přesto však bude nutné opracovat i hliníkovou část boxu a to především pro display a indikační LED diody, které jsou umístěny na horní pohledové straně krabičky. Uvnitř je box vybaven žebrováním sloužícím pro uchycení desky plošného spoje. Tato krabička dovoluje vyrobiť DPS s rozměry 75x120mm. Tento rozměr byl také zvolen jako výchozí pro výrobu DPS. Zajistí to řádné upevnění do krabičky bez vůlí ve všech směrech. Zatím neopracovaný box je zachycen na obrázku 35.



Obrázek 35 - neopracovaný hliníkový box Hammond

Vzhledem k použitému materiálu na zvolené krabičce, tedy hliníku, bylo pro lepší stínění celého zařízení vhodné propojit digitální zem zvukové karty s tímto obalem. Za tímto účelem byla po obou stranách desky plošného spoje odstraněna zelená krycí maska, která odhalila rozlitou zem digitální části, což umožní její propojení s kovovým tělem boxu.

5.3 Uživatelské rozhraní

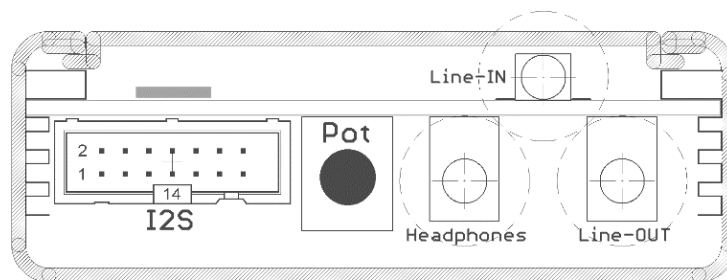
Právě uživatelské rozhraní je zasaženo poměrně výraznými změnami. Požadavkem bylo však přesto část původních prvků zanechat. Jedná se především o indikaci nastavení směru hodinových signálů na I2S. Původní pozice těchto prvků byla pod displejem, ovšem toto umístění je v modifikované verzi velmi komplikované. Display je k MCU připojen plochým kabelem (FFC), který vede právě směrem LED diod, čímž brání těsného umístění pod displejem. Jako alternativa se nabízelo rozmístit LED na jednu ze stran do sloupce jak je vidět na obrázku 37 horní strany DPS. LED jsou dvoubarevné a indikují směr těchto signálů (zelená – zdroj hodin je zvuková karta, červená – zdrojem hodin je externí testované zařízení na I2S). Přibude zde ještě jedna funkce této indikace a to pro případ, kdy je aktivován Bluetooth modul, který je vždy jako master na I2S. V tento okamžik indikační diody zhasnou a rozsvítí se modrá LED upozorňující právě na aktivní BT modul.

V pomyslné řadě LED se nachází ještě další prvky. Hned vedle LCD je dvojice diod znázorňující aktivitu na RX a TX kanálech I2S. Jedná se o velmi užitečnou funkcionalitu, pro velmi rychlé ověření, zda je na linkách přítomný alespoň nějaký signál. Tato indikace je vhodná především při sestavování testované sestavy. S touto indikací se však objevila i komplikace. Díky přepínači I2S sběrnice nelze zcela jednoznačně určit, která z linek je vysílací a která přijímací. Z toho důvodu jsou LED osazeny v blízkosti LCD a patřičná náležitost bude zobrazena jako aditivní informace v pravém dolním rohu LCD.

Pod touto dvojicí LED se nachází ještě tlačítko. To umožní uživateli přepínat, která z linek I2S (Rx, Tx) bude sledována třetí stranou, například kodekem. Umístění

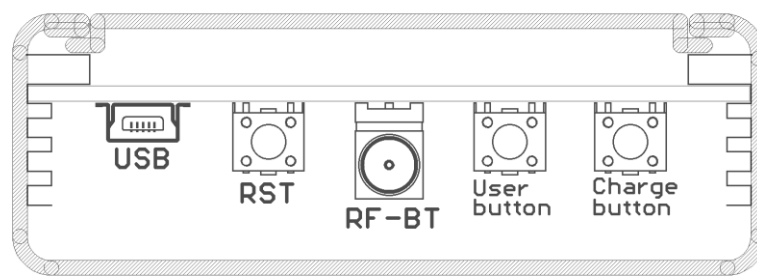
V levé části je to JTAG konektor, sloužící k nahrání firmwaru do mikrokontroléru. Významnými prvky jsou také testovací body napájecích napětí v izolovaných částech či vyvedené piny I2C rozhraní sloužícího prioritně ke komunikaci s periferiemi, ať už audio kodekem, či PLL násobičkou. To ulehčí práci především při testování korektní funkčnosti celku. Zajímavostí je vyvedení UART rozhraní (*Universal Asynchronous Receiver and Transmitter*) na kolíkovou lištu přibližně ve středu zařízení. Jedná se o značné usnadnění při ladění firmwaru v mikrokontroléru, na který lze zaslat textové informace z průběhu programu. Problémem v tomto ohledu je použitý firmware RTOS, který spouští některé rutiny asynchronním způsobem, díky čemuž se standardní metody ladění stávají nepohodlnými. Obtížně se zjišťuje aktuální stav běhu programu, který je nutný ke správné diagnostice některých potíží. Právě UART usnadňuje ladění díky zprávám, které si můžeme v programu definovat a ve výpisu v terminálu vše sledovat. Posledním prvkem na této straně desky je další kolíková lišta, sloužící k nahrání firmwaru do Bluetooth modulu.

Na pomyslně spodním čele krabičky jsou pak umístěny prvky pro připojení I2S sběrnice (konektor pro plochý kabel 2x7), trojice konektorů typu JACK, sloužící sluchátkovému výstupu, kvalitnímu audio výstupu a linkovému či mikrofonnímu vstupu. Zde bylo nutné zachovat minimální vzdálenost mezi jednotlivými konektory, aby bylo možné současně připojit kabel do všech tří zdírek současně. Mezi prvky se našlo ještě místo pro potenciometr, kterým lze nastavit hlasitost sluchátkového výstupu. Úroveň výstupního signálu kvalitního linkového signálu nebude tímto prvkem ovlivněna. Bude možné jej nastavit prostřednictvím USB rozhraní z ovládacího PC. Rozvržení těchto prvků je zobrazeno na obrázku 38.



Obrázek 37 - Rozmístění prvků na spodním čele krabičky

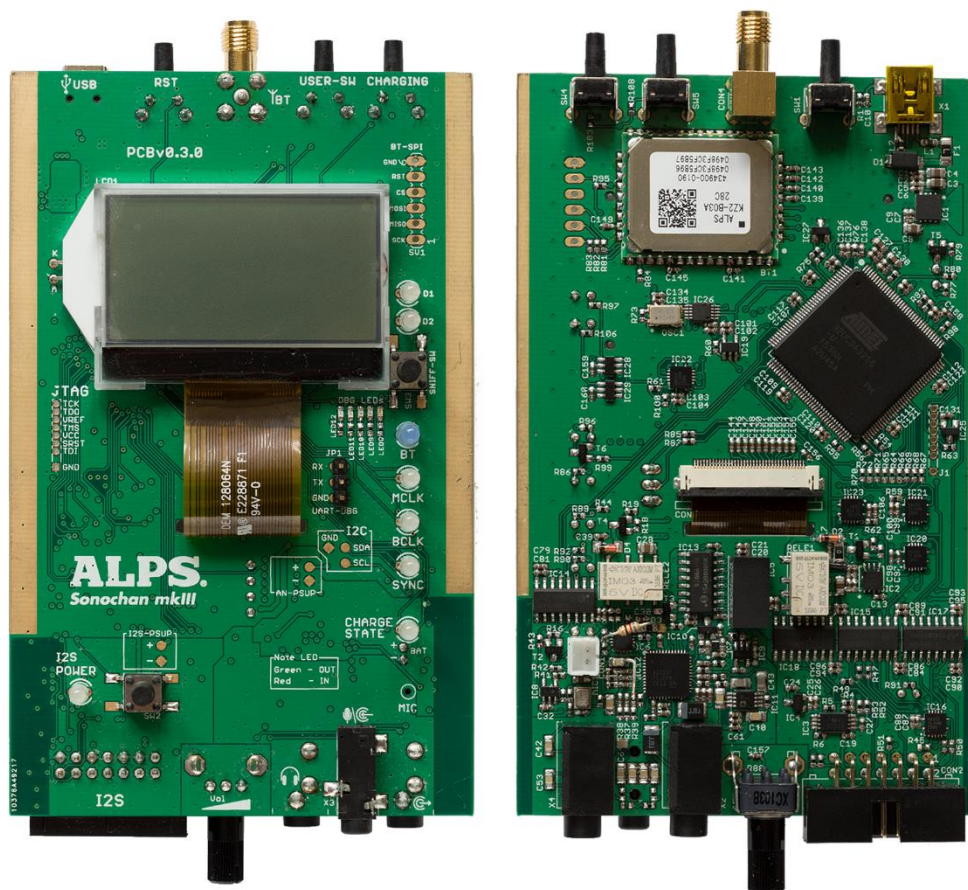
Zbývá horní čelo krabičky, které obsahuje USB mini konektor, RF konektor pro připojení BT modulu a trojici tlačítek. Jedno z nich slouží k restartu celého zařízení, druhé k zapnutí nabíjení a poslední je uživatelské tlačítko, které zatím nemá definovanou funkci. Nemusí být tedy ani osazeno. Na DPS bylo umístěno, jelikož v prostoru mezi USB a RF konektorem zbylo místo. Jeho využití může být například pro rychlé přepínání různých režimů konfigurace, které mohou být do zvukové karty nahrány jako šablona. S touto funkcí současný návrh nepočítá, jedná se pouze o příklad. Rozvržení horního čela je znázorněno na obrázku 38.



Obrázek 38 - Rozmístění prvků na horním čele krabičky

5.4 Výsledné zařízení

Na obrázku 39 je zachycena výsledná podoba prvního prototypu. Sestavení probíhalo ručně, přičemž na desku plošného spoje byla za pomoci dispenseru nanесena pájecí pasta a součástky byly manuálně rozmístěny na své pozice. Samotné zatavení komponent proběhlo průchodem pecí.



Obrázek 39 - Výsledná podoba zařízení

5.5 Oživení hardwaru

Oživení samotného hardwaru bylo téměř bezproblémové. Velkou výhodou byly galvanicky oddělené části, které bylo možné elektricky otestovat bez jakýchkoliv obav z poškození ostatních segmentů. Nejkomplikovanější částí byla část digitální. Před prvním nahráním firmwaru do mikrokontroléru bylo také nutné se ujistit, že nejsou ovládnuty žádné výstupní piny, které by mohly poškodit nově připojené periferie. U mnoha pinů došlo k přemapování funkcí v rámci desky plošného spoje. Do bezpečného stavu bylo třeba nastavit i přepínač linky I2S.

Verze desky 0.3.0, tedy první návrh plošného spoje v rámci 3 generace zařízení, vykazovala jen minimum chyb, které bylo možné velmi snadno opravit a desku plošného spoje nakonec použít. Chyby při návrhu DPS jsou známé pouze tři a to vyvedení země na USB konektoru na špatný (vedlejší) pin, nesprávný tvar pouzdra stabilizátoru napětí IC2 a opačná polarita napětí na cívce relé 1. První a poslední problém se povedlo vyřešit jednoduchým přepojením cest za pomoci vodiče. Zásah byl však minimální díky dobrému vedení spojů na DPS. Komplikace s velikostí pouzdra IC2 spočívala v nepatrné odlišnosti skutečné velikosti pouzdra a navržené předloze na desce plošného spoje. S jistou opatrností se však pouzdro DFN nakonec i na nesprávnou pozici povedlo ručně dopájet.

Znám je již také jeden logický problém, spočívající v nevhodném zvolení vstupu do audio kodeku pro připojení interního mikrofonu. Tento vstup, jako jediný, neumožňoval rozdělení mono signálu z jednoho vstupu do obou stereo kanálů. Úprava spočívala opět v přepojení pomocí vodiče na jiný, pro tento účel vhodnější vstup.

Zajímavý problém se vyskytnul v analogové části zvukové karty a týkal se nízkošumového stabilizátoru napětí NCP700. Po připojení napětí došlo k poškození tohoto obvodu i přes zjevné dodržení pracovních parametrů. Součástka byla vyměněna za náhradní, ovšem stejná situace se opakovala. Proto bylo přistoupeno k použití náhrady za tento obvod, pinově kompatibilní MCP1801[37] od výrobce Microchip, který byl již v dřívějších projektech k napájení stejného kodeku použit. Stabilizátor má o 10dB horší parametr PSRR oproti původně navrhovanému obvodu. Přesto však stále spadá do přísných kritérií návrhu analogové části zvukové karty. Tato náhrada problém vyřešila. Příčina však z časových důvodů zůstala nevyjasněna.

6 FIRMWARE

Obslužný firmware zařízení představuje velmi komplexní a rozsáhlou část práce, jehož tvorba vyžaduje skutečně nemálo času na vývoj a testování. Vše je zjevné z viditelného úsilí o dokumentaci celého zdrojového kódu. Každá funkce programu je pečlivě zdokumentována, stejně tak použité proměnné. Důvodem je především předpoklad zapojení více osob do projektu. Je více než žádoucí, aby další vývoj firmwaru byl veden v podobném stylu a zachovala se tak jeho čitelnost a přehlednost.

Pro připomenutí, původní projekt vycházel z kompilace několika dílčích prací, které již byly zmíněny v kapitole 3.1. Jedná se především o použitý operační systém FreeRTOS[5], na jehož základu běží jednotlivé procesy zvukové karty. Druhým zásadním dílem je SDRWidget[39], který se stal základním stavebním kamenem pro zprostředkování audia skrze USB rozhraní využívající třídu AC1, případně AC2. V rámci projektu bylo dále již v minulosti vyvinuto rozhraní, využívající komunikaci USB s PC, které dovoluje nahrát konfigurační soubor do zvukové karty. To je opodstatněno universálním použitím zvukové karty a tedy nutností umožnit různá nastavení.

Aktuální vývoj se zaměřil na razantní změny hardwaru, které korespondují s odhalenými problémy a požadavky na rozšíření. Tato kapitola obsahuje dokumentaci nejzásadnějších změn v obsluze hardwaru z MCU a popisuje řešení několika problémů, které se projevovali u verze MKII.

Největší změny ve zdrojovém kódu projektu jsou patrné především v souboru *brd_driver_hw_mkIII.c*. Jedná se o hlavní soubor obsluhující hardwarovou část zařízení. Přímě vychází z předešlé verze souboru *brd_driver_hw_03.c*, který obsluhoval zvukovou kartu MKII. Název je trochu zavádějící, jelikož se jednalo o třetí verzi ovladače pro MKII. Původní myšlenka byla zachovat stávající soubor a pouze podmíněným překladem určit části pro rozdílné verze zvukové karty. Změna je však tak komplexní, že rozumnějším řešením byla tvorba nového zdrojového souboru a podmíněně vybírat mezi ovladačem druhé a třetí verze.

6.1 Metoda nastavení parametrů

Pro úplnost a objasnění shrnuje tato kapitola v krátkosti metodu, která uživateli umožňuje nastavení parametrů zvukové karty. V současné době zcela chybí jakékoliv grafické rozhraní pro ovládání tohoto zařízení. Vše je řešeno nahráním konfiguračního souboru, který textově sdružuje všechny dostupné atributy zvukové karty. Nejlépe bude princip vysvětlen na příkladu. Následující řádky zobrazují ukázkou jednoho atributu z konfiguračního souboru:

```
[0: MCLK source - applied only if BT module is disabled]
; 1 - internal; 2 - external (i2s)
; type: uint32 < 1 : 2 > | current value: 1
value = 2
```

Ostatní parametry jsou uvedeny ve stejném souboru na dalších řádcích. Pro nahrání do paměti zvukové karty byl vytvořen skript, který přečte konfigurační soubor a hodnoty předá do zařízení. Ukázka představuje parametry volby zdroje hodinového signálu pro MCLK. Obsahuje popis parametru, jeho rozsah, datový typ, aktuální hodnotu a nově zvolenou hodnotu (value). Touto částí zařízení se podrobně zabýval ve své práci již autor předešlé verze [1]. Úkolem ve verzi MKIII je rozšířit atributy nastavení o řízení nových částí zvukové karty.

6.2 Mapování vstupů a výstupů

Hardwarová změna zvukové karty obsahovala z velké části také přemapování především vstupně výstupních (I/O – *in/out*) pinů obsluhující jednotlivé komponenty na zvukové kartě. Snahou při návrhu bylo do jisté míry původní funkce zachovat. Jednalo se především o MCU periferii SSC, která obsahuje I2S kontrolér, USB rozhraní, které je pevně definováno fyzickým provedením AT32UC3, I2C sběrnice pro obsluhu kodeku a PLL násobičky, či SPI sběrnice při komunikaci s LCD displejem. Ostatní piny, jejichž funkce je primárně pouze jako binární vstup či výstup, byly od základu pozměněny a to především s ohledem na rozvržení desky plošného spoje. Nejvýraznější změnou v zapojení těchto pinů přineslo rozšíření o přepínač sběrnice I2S, který obsahuje 21 řídicích signálů. Popisovat jednotlivé piny a jejich význam textovou podobou na 144 vývodovém pouzdru je poměrně neefektivní. Pro přehlednost uvádí mapování všech použitých pinů tabulka v příloze této práce, která shrnuje veškeré připojení MCU s deskou plošného spoje. Obsahuje také názvy použité ve schématu a samotném zdrojovém kódu. Pinům jsou definovány logické textové názvy, které s nimi významným způsobem ulehčují práci. Součástí zmíněné tabulky jsou i hodnoty pro bezpečné oživení DPS, směr I/O, číslo pinu na 144 vývodovém pouzdru a náležitost pinu danému portu.

6.3 Uživatelské rozhraní

Změna firmwaru týkající se uživatelského rozhraní je nejpatrnější na nově použitém LCD displeji s řadičem ST7565. Velkou výhodou při oživení tohoto displeje byla podobnost řadiče s předešlým typem LCD z Nokie 5110, jehož základ bylo možné použít i pro ovládání nového typu. Driver je obsažen v souborech *LCD_ST7556.c*, který je hlavním rozhraním displeje a zprostředkovává funkce LCD vyšším vrstvám, a *LCD_ST7556_HAL_AVR32_UC3A3_HW_interface.c*, který je úzce spjat s prvním zmíněným, leží na hardwarové úrovni celého řetězce a obsluhuje periferii SPI, na které MCU s displejem komunikuje. Změny oproti původnímu řadiči spočívali v drobné úpravě inicializační sekvence LCD a změně počtu zobrazovaných znaků z původních 84x48 na 128x64.

Se změnou LCD bylo žádoucí také poupravit samotným zobrazované informace na LCD. O obsah uživatelských zpráv se starají rutiny obsažené v souboru *Display.c*. Kód byl doplněn o nové znaky, například pro zobrazení stavu baterie či aktivace Bluetooth modulu. Nově přibylo také logo firmy a verze zařízení při zapnutí zvukové karty. Oživený displej je zobrazen na obrázku 40.



Obrázek 40 - Nově oživený displej ve verzi MKIII

Uživatelské rozhraní zahrnuje také osm indikačních LED diod, z nichž šest je dvoubarevných plně řízených z MCU. Oproti verzi MKII zde byly použity bipolární LED diody, na kterých jejich barva závisí na polaritě přiloženého napětí. Ušetřilo se tím místo na desce plošného spoje, jelikož LED je připojena pouze 2 vývody. Výhoda tohoto připojení je také při pájení. LED nemají společnou katodu, která se problematicky pájí díky rozlitém zemi polygonům, které výrazně odebírají teplo od přiložené páječky a můžou vést ke studeným spojům. Připojení k MCU zobrazuje schéma 4.

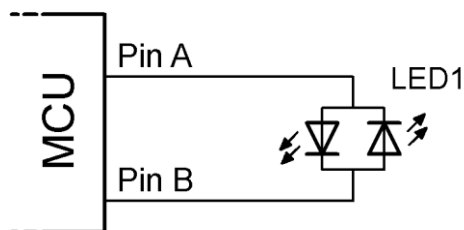


Schéma 4 - Připojení dvoubarevné LED k MCU

Díky tomu však nebylo možné jednoduše řídit barvu LED. Je zapotřebí použít triku v podobě změny stavu obou připojených pinů k MCU současně. Vysvětlení nejlépe vystihuje pravdivostní tabulka 4. K řízení LED byla vytvořena funkce s parametrem konkrétní LED a požadované barvy.

Pin A	Pin B	Stav LED
0	0	nesvítí
0	1	červená
1	0	zelená
1	1	nesvítí

Tabulka 4 - Pravdivostní tabulka řízení dvoubarevné LED

6.4 Řízení směru hodinových signálů sběrnice I2S

S modifikací ovládání přepínače linky I2S bylo nutné zasáhnout i do řízení hodinových signálů používaných na sběrnici. Novinkou byl modul Bluetooth, kterému bylo nutné umožnit stát se samotným zdrojem tohoto signálů ba dokonce tuto skutečnost podmínit. V případě jeho aktivace tedy dojde k automatickému nastavení do režimu se zdrojem hodinových signálů právě z modulu Bluetooth. Jiná varianta v tomto případě není.

Ve verzi MKII byly zdroje hodinových signálu dva. Samotné MCU, které interpretovalo audio přehrávané z PC a externí testované zařízení na sběrnici I2S. Z toho důvodu bylo řízení značně zjednodušeno a vztahovalo se k uživatelskému konektoru sběrnice I2S. Nastavující parametry dostupné uživateli byly pro každý ze signálů (MCLK, BCLK, FSYNC) zvlášť, z nichž každý měl tři atributy. Ty jsou shrnuty v tabulce 5.

CLK	Možnost	Význam
MCLK/ BCLK/ FSYNC	In	Vstup
	Out	Výstup
	Hi-z	Odpojeno, zdroj hodin byl pouze interní (obsluha kodeku)

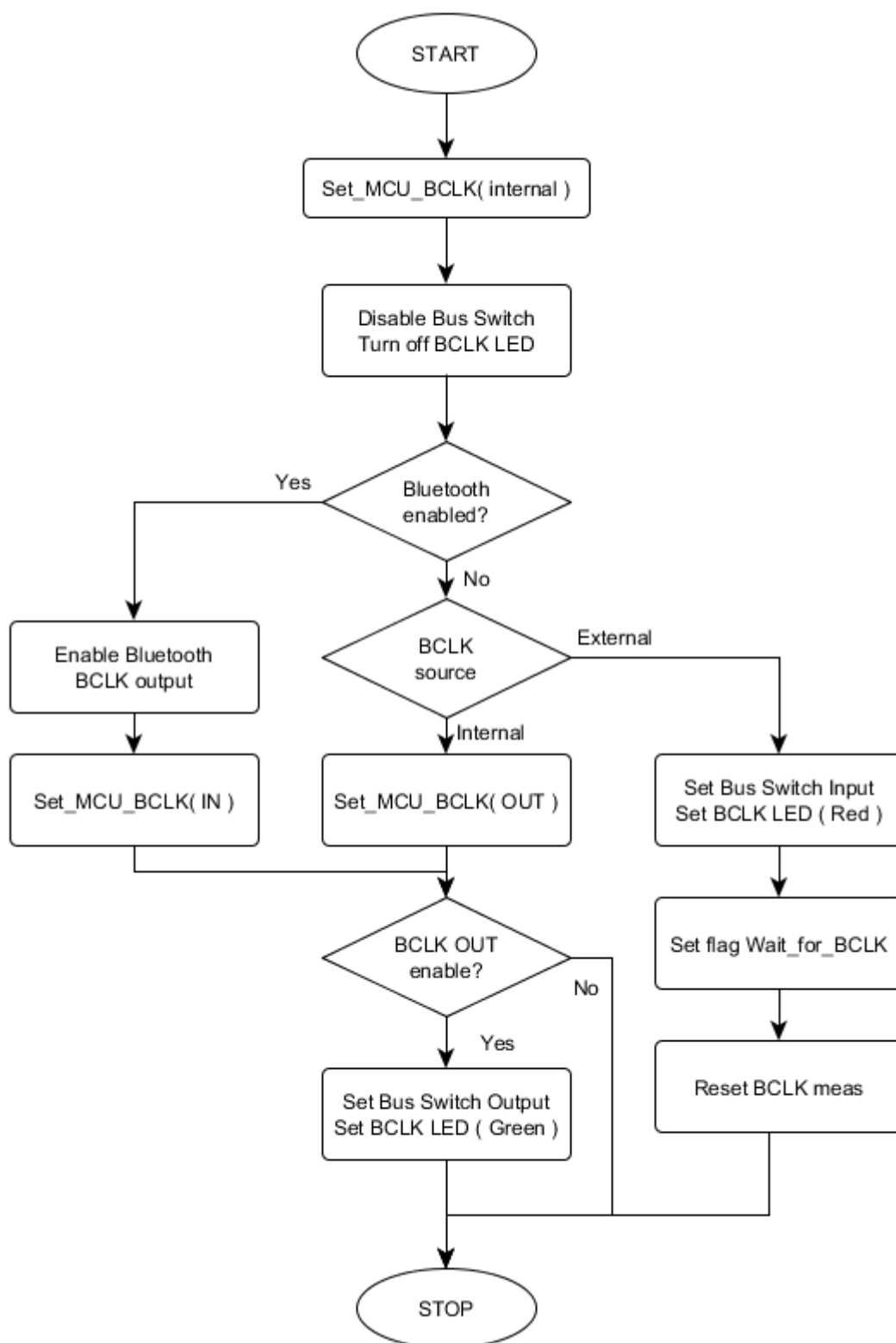
Tabulka 5 - Původní parametry nastavení směru hodinových signálů I2S

Jako přehlednější a logičtější ovládání se z uživatelského pohledu na zařízení jevílo přidat nový atribut a to povolení či zakázání výstupu signálu na konektoru I2S. Zdroj hodin pak uživatel volí mezi externím a interním. V případě interního zdroje hodin je aktivním prvkem buď MCU, nebo Bluetooth modul a výstup daného

hodinového signálu je povolen, či zakázán dalším parametrem. Pokud uživatel zvolí externí zdroj hodinového signálu, je směr linky I2S nastaven jako vstup a přídavný parametr je ignorován.

S nastavením zdroje hodin se již ve verzi MKII objevil zajímavý problém v SSC modulu MCU. Docházelo k zablokování celého běhu programu MCU v případě, že probíhaly změny v nastavení této periferie (SSC), například při změně zdroje hodinového signálu, a současně nebyl dostupná BCLK signál pro SSC. Upozornění na neočekávané chování MCU v tomto případě lze nalézt i v dokumentaci mikrokontroléru. Typickou situací, kdy k zamrznutí došlo, byl okamžik, kdy uživatel nastavoval BCLK signál jako vstupní, ovšem na konektoru I2S se zatím žádný nevyskytoval. Nebylo tedy připojeno testované zařízení. Z části se problém ve verzi MKII povedlo vyřešit tak, že pokud uživatel provedl popsanou změnu, MCU na chvíli přepnulo zdroj hodin modulu SSC na interní (uvnitř MCU), nastavilo vstupní pin hodinového signálu jako GPIO vstup a chvíli sledovalo, zda se na vstupním pinu objeví hrana jakéhokoliv signálu. Pokud se signál objevil, došlo k přepnutí zdroje signálu do SSC modulu na vstupní pin. Pokud se tak však nestalo v definovaném časovém intervalu, objevilo se na LCD chybové hlášení a zařízení bylo blokováno do vyřešení problému.

Zcela nové řešení ve verzi MKIII spočívá ve využití modulu měření frekvence na hodinových signálech, které podrobněji popisuje následující kapitola. Díky tomuto měření má nyní MCU kontinuální informaci o dostupných externích zdrojích signálu. Mechanismus používá podobného triku, jaký byl využit již ve verzi MKII. Rozdíl je v ponechání připojení SSC modulu na interním zdroji hodin do doby, než je detekován externí zdroj tohoto signálu měřicím modulem. Při nastavení I2S na externí zdroj hodin je pouze nastaven flag bit, informující hlavní smyčku programu (jako jedna z úloh RTOS), o tom, že má kontrolovat přítomnost daného hodinového signálu. Jakmile je signál detekován, je vyžádána rutina, která opět přenastaví zdroj hodin z bezpečné interní varianty na externí zdroj, přivedený na pin MCU. Tento mechanismus byl aplikován především na BCLK a FSYNC, které jsou přímo spjaté s I2S rozhraním. Signálu MCLK se tento problém netýkal. Není pro chod SSC modulu nutný. Je použit pouze jako zdroj hodin pro audio kodek a vyveden na konektor I2S sběrnice. Pro lepší pochopení mechanismu je podrobnější algoritmus řízení signálu BCLK uveden na vývojovém diagramu na obrázku 41.



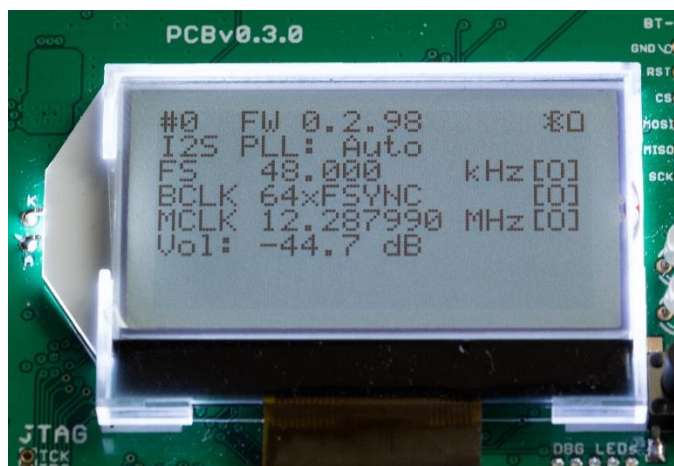
Obrázek 41 - Vývojový diagram změny BCLK dle uživatelského nastavení

Nejprve je zvolen vždy interní zdroj hodinového signálu a přepínač linky je odpojen ve všech směrech. Jedná se o jakýsi bezpečný výchozí stav před dalším

přepnutím. Je zjištěno, zda je aktivován modul Bluetooth (speciální případ, kdy je zdroj hodin pevně definován na interní). Pokud BT není aktivní, dotazuje se algoritmus na 1. uživatelské nastavení (interní/externí zdroj). Pokud se jedná o interní, je nastaven BCLK jako výstup a v případě, že je povoleno uživatelem, vyveden přes přepínač linky na konektor I2S (stav indikuje také jedna z LED diod). Pokud je zdroj nastaven jako externí, je aktivován přepínač linky a nastaven flag bit. Ten je dále čten v hlavní smyčce a vyčkává na detekci hodinového signálu. Teprve poté je BCLK pro MCU nastaven jako vstup přes pin 91.

6.5 Měření frekvencí na sběrnici I2S

Měření frekvence bylo jednou z funkcionalit aplikovaných na novou verzi zvukové karty. Jedná se o velice užitečnou funkci, sloužící ke kontrole, zda jsou přítomné zdroje hodinového signálu na linkách MCLK, BCLK a FSYNC. Typický příklad použití je například v situaci, kdy oživujeme testované zařízení připojené prostřednictvím I2S k vyvíjené zvukové kartě a nejsme si zcela jistí konfigurací. Obvyklý postup v této situaci bylo ověření osciloskopem, zda je na lince přítomen požadovaný signál. Tento časově zdržující moment odpadá díky zakomponování kontroly přímo do zvukové karty. Měření probíhá vždy, kdy uživatel nastaví daný signál jako externí. Výsledná frekvence je zobrazena na LCD displeji u patřičného signálu. Pokud je zdroj hodin interní, je zobrazovaná informace ne měřená, ale přesná nastavená (informace o frekvenci je známá). Ukázka zobrazení frekvencí je na obrázku 42 (3. – 5. řádek).



Obrázek 42 - Ukázka zobrazení frekvence hodinových signálů I2S na LCD

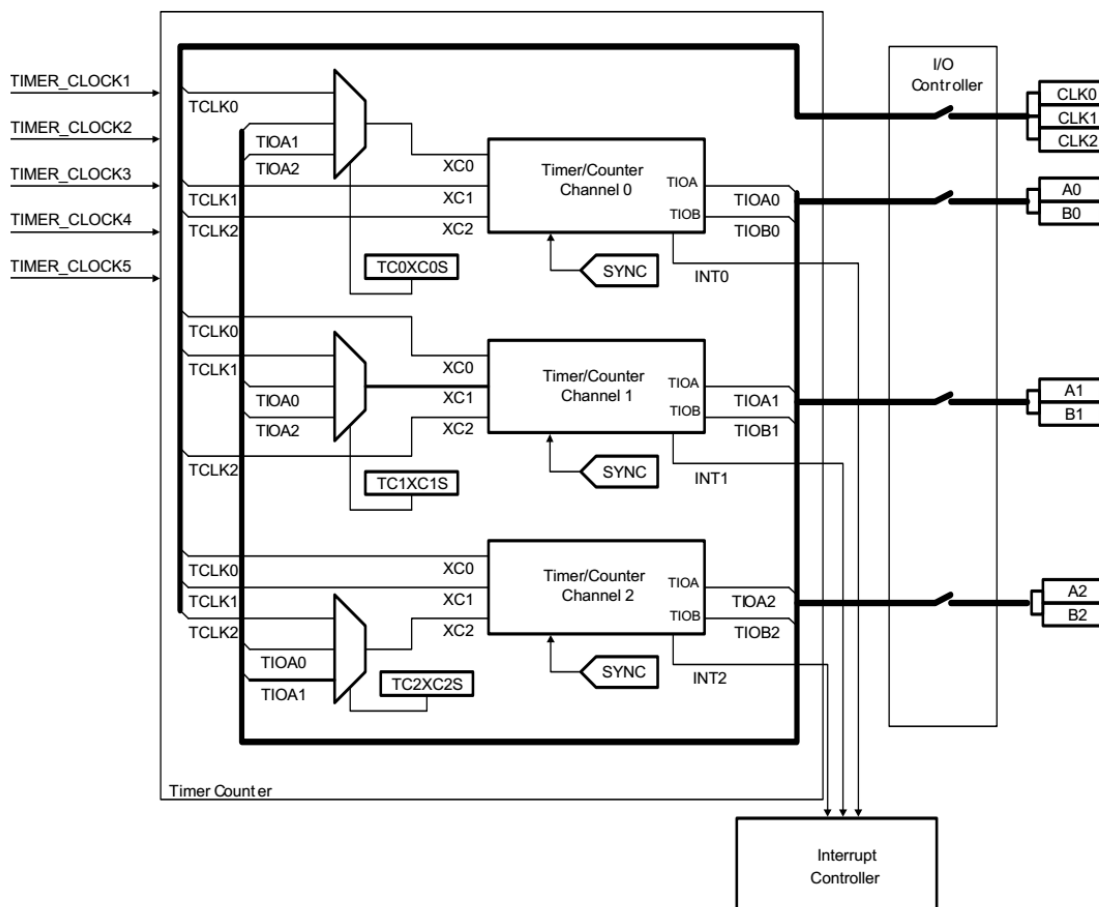
K měření byl využit jeden ze dvou TC modulů MCU. Každý z nich obsahuje dále 3 kanály konfigurovatelné pro různé aplikace timer/counter modulu. Každý z kanálů lze dále obsluhovat ve dvou režimech. Generační „Waveform mode“ sloužící pro vytváření signálů (typicky PWM - Pulse width modulation) a „Capture mode“, který lze využít pro čítání a časování. Při měření byly využity oba tyto módy. Bylo tedy nutné použít dva kanály TC modulu pro zajištění správné funkce měření. Metoda byla zvolena

s ohledem na vyskytující se vysoké frekvence (řády MHz) v podobě načítání počtu pulsů za danou periodu. Perioda současně určuje rozlišení měření. Jednoduché vysvětlení je uvedeno na příkladu. Pokud bychom počítali pulsy signálu po dobu 1s, výsledná frekvence se bude shodovat s počtem napočítaných impulsů. Získáme tím také rozlišení v řádu Hz, zatížené pouze chybou měření času. V případě požadavku na měření signálu v řádech MHz, nebyla takováto přesnost nutná. Jedná se pouze o orientační informaci o frekvenci. Doba měření byla stanovena na 1ms, což snižuje rozlišení měření na MCLK na dostatečný 1kHz. Ne však pro případ měření BCLK a už vůbec ne FSYNC, jehož hodnota se typicky pohybuje okolo 48kHz. V případě těchto dvou signálů bylo nutné rozlišení měření upravit čítáním do 10ms pro BCLK (rozlišení 100Hz), či pro FSYNC do 100ms s rozlišením 10Hz. Časy byly zvoleny také s ohledem na maximální hodnotu čítače, která je omezena svou 16 bitovou hodnotou. Pokud maximální dosažitelnou hodnotu čítače (65 535) vynásobíme zvoleným rozlišením, získáme maximální možnou měřenou hodnotu frekvence. Parametry měření nejlépe shrnuje tabulka 6.

Signál	Doba měření	Rozlišení	f_{\max}
MCLK	1ms	1 kHz	65.535 MHz
BCLK	10ms	100 Hz	6.5535 MHz
FSYNC	100ms	10 Hz	655.35 kHz

Tabulka 6 - Parametry měření frekvence na lince I2S

Princip činnosti dvou kanálů TC modulu je tedy ten, že jeden z kanálů provádí měření času a generuje obdélníkový signál, který je dále použit pro hradlování druhého kanálů, na jehož vstup je přiveden měřený signál. Je také patrné, že měření neprobíhá současně na všech třech kanálech, ale postupně za sebou. Pro další lepší vysvětlení činnosti je na obrázku 43 uvedeno blokové schéma jednoho z TC modulu MCU.



Obrázek 43 - Blokové schéma TC modulu MCU [4]

Z blokového schématu je patrné, že každý z kanálů TC modulu má tři vstupy. Na ně je možné buď přímo nebo přes další multiplexor přivést požadovaný signál interní, externí či výstup z jiného kanálu TC modulu. Externí vstupy jsou pouze tři, na něž jsou přes piny MCU 72, 73 a 80 přivedeny signály MCLK, BCLK a FSYNC. Díky tomuto provedení TC modulu není bohužel možné definovat, který z kanálů bude použit pro měření času a který pro čítání. Je nutné mezi nimi přepínat v závislosti, který z externích zdrojů je požadováno měřit.

Časově měřicí modul je nastaven do režimu „Waveform mode“. Zdrojem hodinového signálu pro tento modul je interní signál 66MHz, který je distribuován mezi periferie MCU. Čítač počítá do hodnoty odpovídající v absolutní hodnotě požadované době měření daného signálu. Na začátku, kdy je čítač vynulován, dojde k nastavení výstupu kanálu TIOA do logické 1. Při ukončení čítání je signál opět shozen do logické nuly. Právě TIOA signál slouží k hradlování měřeného signálu ve druhém kanálu TC modulu. Stejný signál slouží i obslužnému programu jako indikace probíhajícího, či dokončeného měření.

Obsluha celého systému byla zapouzdřena do souboru *freq_meas.c*. Funkce měření jsou dále volány z hlavní smyčky programu. Vždy po dokončení jednoho měření

je připraveno měření další. Perioda měřicích cyklů bude předmětem dalšího zkoumání, především na základě zkušeností s praktickým použitím zařízení. Funkce byla otestována na signálu ze zvukové karty 2. generace.

6.6 Obsluha přepínače linky I2S

Firmwarová obsluha přepínače linky je, ač se na první pohled zdát nemusí, poměrně sofistikovanou a složitou záležitostí. Princip přepínání již byl popsán v kapitole 4.1.5. Jde především o správnou konfiguraci 21 signálů na GPIO pinech mikrokontroléru, které jsou připojeny k řídicím vstupům třístavových digitálních odpojovačů. Hardwarové zapojení umožňuje konfiguraci v téměř libovolném spojení dvou I2S členů ve zvukové kartě. Volba spojení je omezena na zdroje I2S signálu, kterými jsou mikrokontrolér, Bluetooth modul, audio kodek a externí zařízení na I2S. Konfigurace jsou patrné z obrázku 17. Pro přehlednost je ještě shrnuje tabulka 7.

I2S část	MCU	Bluetooth	Kodek	Ext. I2S
MCU	✓	✓	✓	✓
Bluetooth	✓	✓	✓	✓
Kodek	✓	✓	✓	✓
Ext. I2S	✓	✓	✓	✗

Tabulka 7 - Možné konfigurace přepínače linky I2S

Téměř všechny možné kombinace spojení zařízení na lince I2S jsou možné. Diagonála tabulky interpretuje vazbu výstupního signálu zpět do svého vstupu, tedy propojení své TX linky na vlastní RX (loopback). Spojením, které není možné, je zpětná vazba na externím testovaném zařízení. Je to dáno hardwarovým uzpůsobením přepínače linky I2S. Došlo tím k ušetření jednoho obvodu 74AHC125, ovšem na úkor této funkcionality. Zároveň byla do řízení přepínače linky zavedena jistá složitost samotné realizace přepínání. Není možné stanovit, která společná datová linka I2S přepínače, náleží konkrétnímu zdroji I2S signálu. Je to dáno pouze v případě připojení externího testovaného zařízení na I2S. Signál TX je zde přiveden pouze na datovou linku D1, RX na D2. V ostatních případech je přiřazení volitelné v závislosti na konfiguraci přepínače linky. Právě na zmíněnou vázanost je nutné brát zřetel a s ohledem na uživatelskou konfiguraci prohazovat role linek D1 a D2.

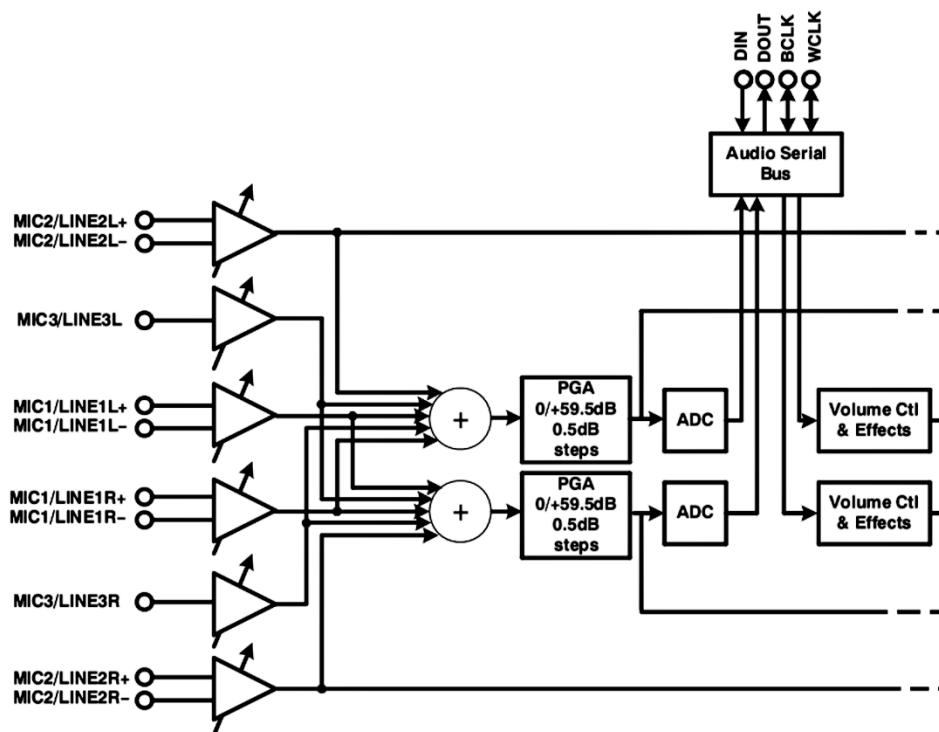
Uživatelské nastavení je řešeno opět pomocí konfiguračního souboru a v něm dvojice parametrů. Oba slouží pro přiřazení zvolené části zvukové karty. Uživatel vybírá mezi hodnotami 0-4. Nulová hodnota slouží pro žádné vybrané zařízení. Je tedy možná i varianta, kdy pouze jedno zařízení vysílá data na sběrnici, a ostatní naslouchají. Hodnoty 1-4 interpretují jedno ze 4 možných variant připojení podle tabulky 7.

Aplikace řízení této části v obslužném firmwaru zatím nebyla zcela realizována. Funkčnost bloku však byla jednotlivě ověřena pomocí manuálního nastavení v inicializaci řízení přepínače linky. Lze jej považovat z hardwarového hlediska za zcela funkční. Ve firmwaru také proběhla příprava kódu pro doplnění rutin ovládajících tuto část a rozšířena byla i sada konfiguračních parametrů pro uživatelské nastavení.

6.7 Ovládání nové analogové části

Analogová část zvukové karty byla rozšířena o interní mikrofon, vstup externího zdroje analogového signálu a nízkošumový linkový výstup. Všechny tyto signály jsou připojeny k audio kodeku TLV320AIC33 jehož ovládání bylo nutné doplnit právě o obsluhu těchto částí.

Zcela nově ve verzi MKIII bylo třeba oživit i vstupní část kodeku, která obsahuje hned tři stereo vstupy. Využit byl vstup číslo 1 a 3. V prvním případě je nutné konfigurovat variantou vstupu, přičemž je rozhodováno mezi diferenční a jednoduchou verzí (single-ended). Každému ze vstupů je dále možné nastavit vstupní potlačení signálu, za kterým následuje směšovač. Posledním prvkem v cestě analogového signálu vstupní části kodeku je programovatelný zesilovač PGA (Programmable gain amplifier). Pro přehlednost je na obrázku 44 znázorněno blokové schéma vstupního obvodu kodeku.



Obrázek 44 - Vstupní část audio kodeku [15]

Aplikaci ovládání usnadňuje fakt, že použitý kodek byl již v minulosti osazen v několika předešlých projektech a k dispozici je díky tomu poměrně propracovaný ovladač, zahrnující právě i obsluhu této nové části zařízení. Úkolem rozšíření je tedy především modifikovat konfigurační části firmwaru, kde bylo doplněn 5 parametrů shrnutých v tabulce 8.

Atribut	Hodnota	Poznámka
Aktivace interního mikrofonu	<0,1>	0 – vypnuto; 1 – zapnuto
Aktivace externího analogového vstupu	<0,1>	0 – vypnuto; 1 – zapnuto
Zesílení interního mikrofonu	<0,8>	0db až -12db po kroku -1.5dB
Zesílení externího vstupu	<0,8>	0db až -12db po kroku -1.5dB
Nastavení PGA	<0,127>	0db až 59.5dB po kroku 0.5dB

Tabulka 8 - Nové nastavovací parametry analogové části

Komplexní řešení ovládání kodeku ve firmwaru mikrokontroléru zatím však nebylo plně implementováno. Proběhla pouze příprava a základní modifikace. Důvodem je časová náročnost implementace s ohledem na nutnou podrobnou dokumentaci zdrojového kódu a universální řešení. Analogová část však byla kompletně ověřena dílčími testy jednotlivých částí za pomoci externího zařízení připojeného ke sběrnici I2C, po níž je kodek nastavován. Zásadní výsledky měření jsou shrnuty v závěrečné kapitole.

Součástí rozšíření byla i aktivace dalšího analogového výstupu z kodeku. Vedle sluchátkového výstupu je to linkový výstup se zařazenou dolní propustí pro odfiltrování šumu ve vyšších kmitočtech signálu. K tomuto účelu byla rozšířena konfigurace o další parametr nastavení hlasitosti výstupu.

6.8 Ovládání modulu Bluetooth

Bluetooth modul použitý v zařízení je sám o sobě velmi komplikovaným prvkem z hlediska řízení a konfigurace. Implementace nutných částí firmwaru je proto časově náročná a v rámci této práce k ní nedošlo. Ukázalo se, že nemá význam realizovat částečné a úsporné řešení bez hloubkové analýzy využití prvku. Snadno se tím dojde k závěru, že použité nástroje nedostačují a zdrojový kód je nutné od základu předělat. V tomto případě je nutné analyzovat i uživatelské rozhraní při práci s modulem. Nastavení pomocí konfiguračního souboru se stává s rostoucím počtem prvků poměrně nepřehledné. Vhodnou variantou bude začít rozšiřovat projekt také o ovládací počítačový software.

Ve firmwaru mikrokontroléru byl prozatím aplikován pouze ovladač, umožňující předávat modulu příkazy textovou formou. Obsahem jsou AT příkazy zasílané na rozhraní UART, kterým je modul Bluetooth spojen s mikrokontrolérem. Je to jeden

z běžných způsobu komunikace s periferií podobného typu. Modul zasilání dat na rozhraní UART je přímo převzat z rutiny zasilání odlaďovacích zpráv. Je využito konkrétně MCU periferie USART1.

AT příkazy spadají do skupiny Hayes poprvé zprostředkovaných v roce 1981 stejnojmenným autorem. Jedná se o standardizovanou formu instrukcí posílaných cíli v textovém řetězci. Na začátku každého příkazu se nachází dvojice znaků AT. Za nimi následuje samotný příkaz. Na tomto komunikačním protokolu bude s největší pravděpodobností založeno samotné řízení modulu. Modul Bluetooth však navíc umožňuje ještě další nastavení a funkčnost díky SPI rozhraní, pomocí kterého lze přehrát samotný firmware modulu.

7 TESTOVÁNÍ

Součástí realizace tohoto zařízení bylo i závěrečné testování funkčnosti jako celku. Spousta částí byla již průběžně ověřována při jejich prvotním ožívování. Zásadními kritickými prvky byl například přepínač linky I2S, který nakonec bezproblémově plně zastává svou funkčnost. Pozornost také směřovala na modifikovanou analogovou část, která prošla rozšířením a především odrušením od nežádoucího šumu a zkreslení. Tato kapitola shrnuje nejzásadnější poznatky při ověřování těchto částí.

7.1 Ověření základní funkčnosti

Ověřením základní funkčnosti je myšleno především srovnání v chování s předešlou verzí MKII. V projektu se jednalo primárně o rozšíření a vylepšení parametrů výchozí verze. Původní funkcionalitu bylo tedy nutné zachovat a pouze implementovat na nový hardware.

Zařízení se po připojení k osobnímu počítači přihlásí jako nový USB hardware a automaticky načte zvukový ovladač. K přehrání zvukové stopy bylo využito freewaru Audacity a pomocného ovladače ASIO4ALL (ten však není nutný k přehrání zvukové stopy). Audio se povedlo úspěšně přehrát jak na analogových výstupech zvukové karty, tak zaslat v digitální podobě na sběrnici I2S externímu zařízení. Jako testované externí zařízení bylo s výhodou snadné konfigurace použito zvukové karty MKII. Testovaná konfigurace je zachycena na obrázku 45



Obrázek 45 – Ukázka zapojení při ověření základní funkčnosti zvukové karty

Součástí ověření byl i opačný směr toku dat na sběrnici I2S. Externí zařízení bylo tedy naopak zdrojem digitálního signálu, přičemž zvuková karta úspěšně konvertovala audio do analogové podoby. Tímto testem byla plně ověřena vlastnost původního řešení v nové verzi MKIII.

7.2 Měření analogové části

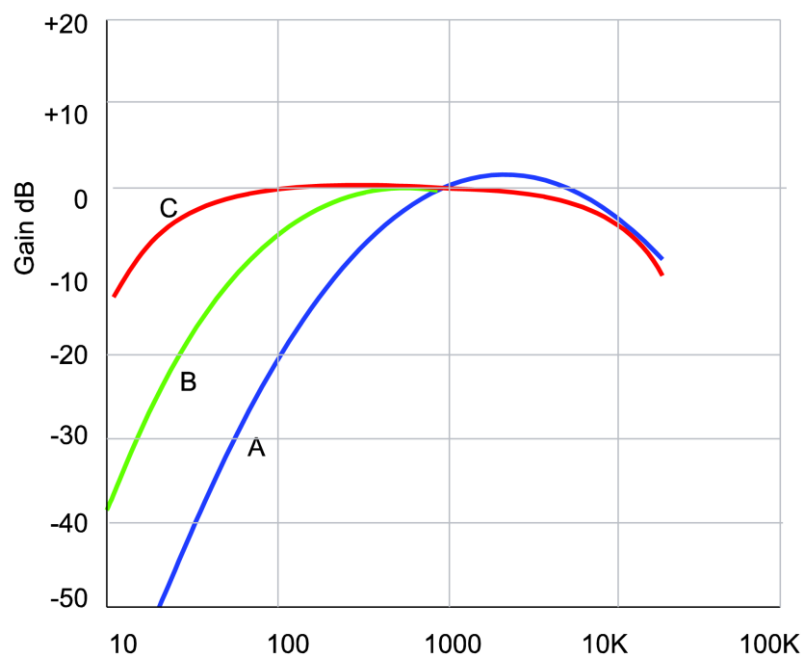
Důležitými výsledky byly právě z měření nové analogové části zvukové karty. Její galvanická izolace spolu s bateriovým napájením měly zajistit výrazné zlepšení parametrů audio výstupu. Zkoumanými aspekty byly především totální harmonické zkreslení THD (total harmonic distortion), odstup signál-šum SNR (signal- noise ratio), kombinace předchozích hodnot označovaná jako THD+N (+noise) a podoba frekvenčního spektra s ohledem především na zemní smyčky.

Parametr THD určuje míru zkreslení signálu (první harmonické složky) v porovnání s kvadratickým součtem vyšších harmonických složek. Špičkové audio aplikace obecně dosahují hodnot THD v řádu tisícín procent. Numericky lze výpočet interpretovat vztahem 4.

$$THD = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}}{U_1^2} * 100 [\%] \quad (4)$$

Parametr SNR uvádí odstup užitečného signálu od úrovně hladiny šumu. Typicky je tato hodnota uvedena v jednotkách dB.

V případě zkoumání frekvenčního spektra audiosignálu je vhodné použít A-váhování měření. Tento atribut upravuje hodnoty frekvenčního spektra podle křivky interpretující citlivost lidského ucha. Je nazývána též psychoakustickou křivkou. Lidské ucho má fyziologicky rozlišené vnímání citlivosti v různých frekvenčních oblastech. Obecně lze říct, že vnímá s jinou hlasitostí hluboké a vysoké tóny. Maximum citlivosti se pohybuje okolo 2kHz. Kromě A-váhování se v praxi používají ještě další křivky, určené pro speciální případy audio aplikací. Dostupná měřicí technika však podporovala pouze první a nejznámější typ A. Křivka i v porovnání s jinými typy je na obrázku 46.



Obrázek 46 - Psychoakustické váhovací křivky [38]

7.2.1 Použité přístroje

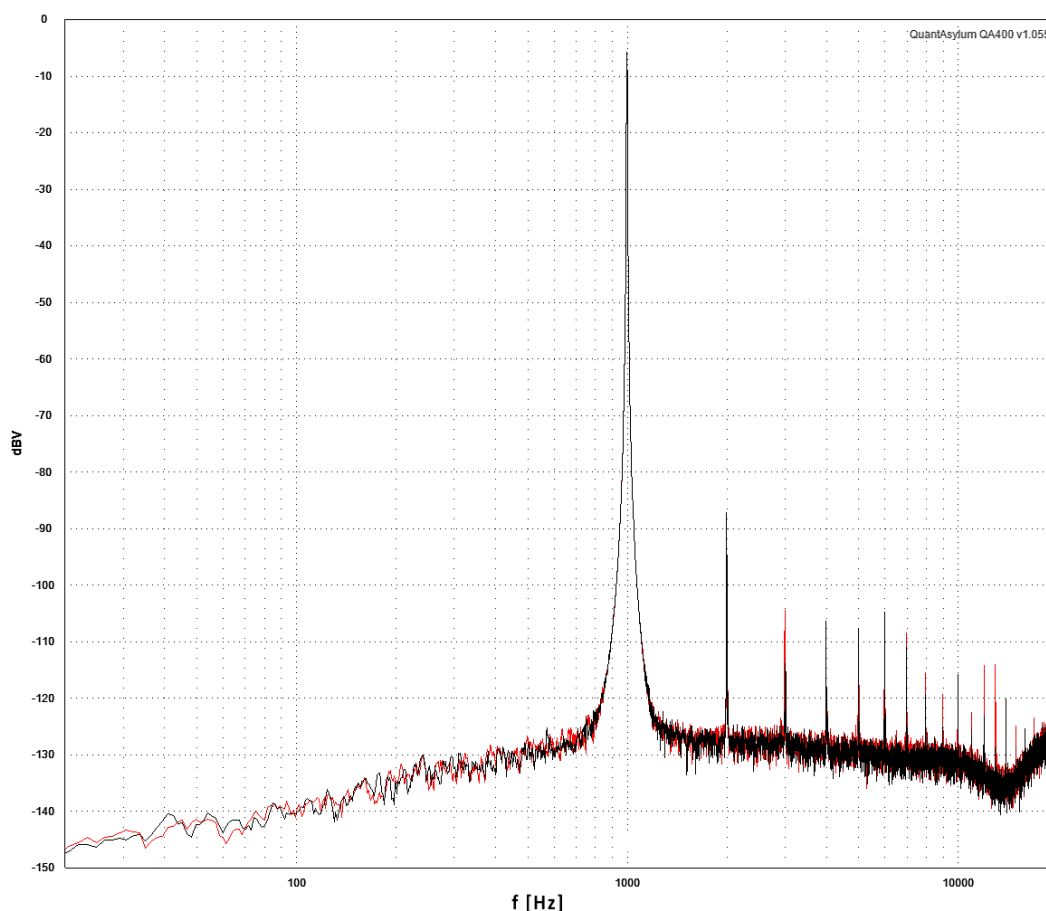
K měření vlastností audio parametrů analogových výstupů zvukové karty bylo použito dostupných zařízení ve firmě Alps Electric Czech. Primárně bylo využito audio analyzery QuantAsylum QA400. Ten disponuje dvojicí generátorů signálu a dvěma vstupy pro samotné měření. Rozlišení je 24 bitů při frekvenci vzorkování 192kHz. Zařízení je obsluhováno z PC prostřednictvím USB rozhraní. Výrobce dodává k testovacímu přístroji i obslužný software, který automaticky měří parametry audiosignálu zmíněné v předchozí kapitole. Výstupem je také frekvenční spektrum navzorkovaného signálu v oblasti slyšitelného zvuku (do 20kHz). Podoba měřicího přístroje je na obrázku 47.



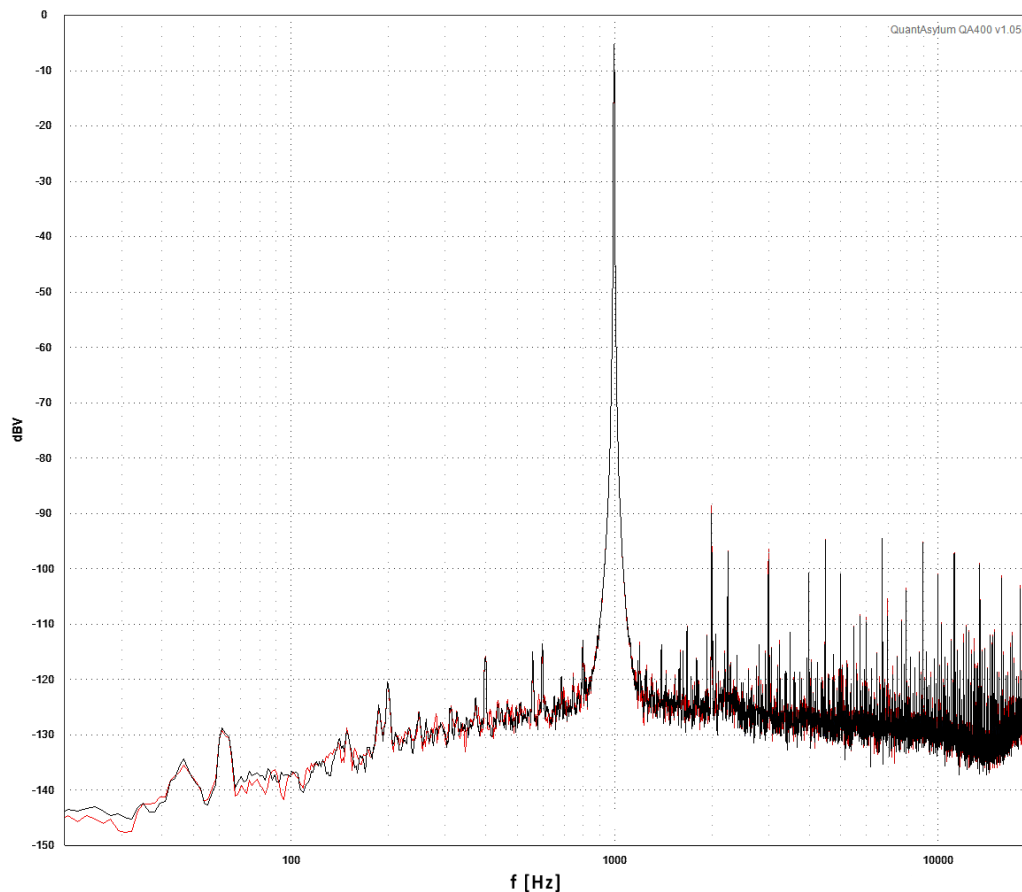
Obrázek 47 - V měření použitý audio analyzátor[40]

7.2.2 Srovnání výsledků s předchozí verzí

Právě porovnání naměřených výsledků mezi verzemi zvukové karty MKII a MKIII bylo nejvýraznějším ukazatelem zlepšení oproti původní variantě. K měření bylo využito audio analyzeru popsaného v předchozí kapitole. Při měření byly zajištěny stejné okolní podmínky i stejná konfigurace měření. Zvuková karta byla spojena s PC prostřednictvím USB rozhraní. Ke stejnému počítači byl připojen i audio analyzer Quant Asylum do kterého byl přiveden sluchátkový výstupní audiosignál ze zvukové karty. Jiná možnost, než porovnání na tomto výstupu nebyla možná, jelikož verze MKII jiným výstupem nedisponuje. V případě verze MKII byl také očekáván vliv zemní smyčky, která se při této konfiguraci vyskytla. Verze MKIII již tento jev eliminovala díky galvanickému oddělení analogové části. Signál byl generován z počítače za použití programu Audacity. Frekvence signálu byla zvolena na 1kHz s amplitudou -6dBV. Při této úrovni signálu vykazoval audio analyzer nejlepší vlastnosti měření. Jako první byla měřena nová verze zvukové karty MKIII. Frekvenční spektrum signálu je zobrazeno na obrázku 48. Verze MKII pak na obrázku 49. Zobrazeny jsou vždy oba kanály stereo signálu, které jsou barevně odlišeny.



Obrázek 48 - Frekvenční spektrum sluchátkového výstupu verze MKIII
(černá = levý kanál)



Obrázek 49 - Frekvenční spektrum sluchátkového výstupu verze MKII
(černá = levý kanál)

Pro úplnost jsou v tabulce 9 uvedeny naměřené výsledky několika vybraných parametrů.

Verze	Kanál	THD [%]	THD+N [%]	SNR [dB]
MKII	Levý	0.00782	0.01244	81.3
	Pravý	0.00833	0.01340	81.1
MKIII	Levý	0.00873	0.01036	88.7
	Pravý	0.00719	0.00896	88.3

Tabulka 9 - Naměření parametry audio signálu a jejich srovnání mezi MKII a MKIII

Ze získaných výsledků je zřejmé zlepšení parametrů v nové verzi MKIII. Pokrok se dotýká především zjištěné úrovně a charakteru šumu analogového výstupu. Rozdíl je nejvíce patrný ze zaznamenaných frekvenčních spekter na obrázcích 48 a 49. Lze si i povšimnout rozdílu působení zemní smyčky na frekvenci 50Hz. Jedná se právě o frekvenci sítě napájecího napětí, přes kterou se zemní smyčka uzavírá. Přesněji přes ochranný vodič sítě TN-S. V číselném porovnání šumu z tabulky 8 je patrný především větší odstup signál-šum o přibližně 7dB. Dokumentace předchozího autora uváděla úroveň SNR ve verzi MKII přibližně 50dB. Tato hodnota však neodpovídá nově

naměřeným údajům. Lze předpokládat, že zde došlo k nějaké chybě měření, ať už metody, či samotného přístroje. Zde byl k měření využit starší audio analyzer firmy Kenwood VA-2230A, také dostupný v laboratoři Alps Electric Czech.

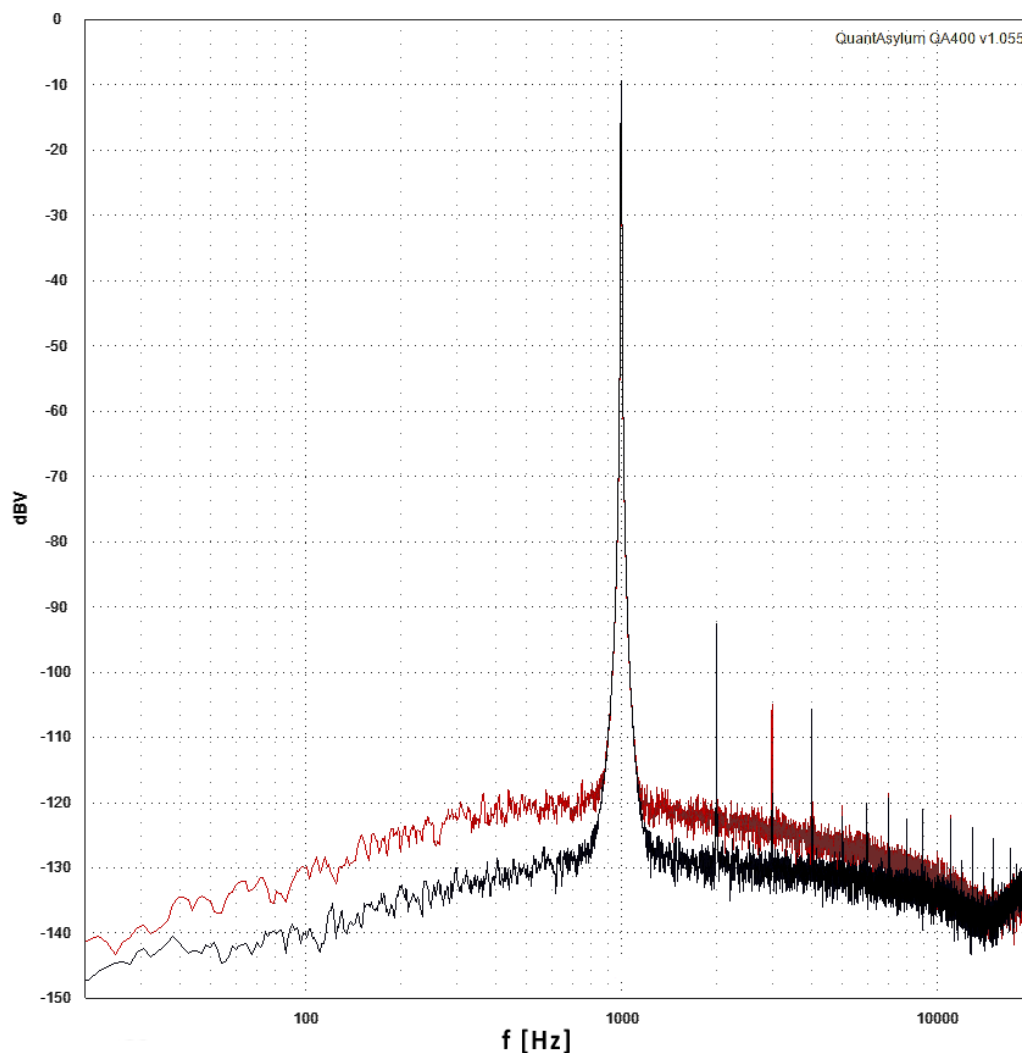
Hodnota THD se podle předpokladů téměř shoduje, jelikož se jedná o vlastnost výstupu samotného audio kodeku. Zlepšení je patrné v parametru THD+N, který lépe specifikuje zkreslení signálu díky zahrnuté šumové složce.

V signálu lze pozorovat také nárůst úrovně šumu v oblasti okolo 15kHz. Jedná se o vlastnost audio kodeku, která byla pozorována již dříve i v jiných zařízeních se stejnou komponentou.

7.2.3 Parametry nízkošumového výstupu

Nová verze zvukové karty byla rozšířena o druhý linkový audio výstup, na který byla aplikována také dolní propust druhého řádu popsána v kapitole 4.2.2. Ta měla za úkol vyfiltrvat kvantizační šum vznikající na delta-sigma DA převodníku výstupu audio kodeku, který se typicky vyskytoval na frekvencích okolo 200kHz. Měření bylo prováděno na spektrálním analyzátoru Rhode & Schwarz FSP Spectrum Analyzer. Ten ovšem neumožňoval uložení naměřených spekter do formátu vhodného ke zpracování libovolným softwarem. Zapotřebí bylo aplikace výrobce analyzátoru, která nebyla k dispozici. Došlo však k viditelnému potlačení vlivu kvantizačního šumu na vyšších kmitočtech, které lze považovat za uspokojivé.

Při měření byla odhalena také jedna zvláštnost tohoto výstupu, a to že jeho parametry jsou ve srovnání se sluchátkovým výstupem o něco horšího charakteru. Především pak v parametru SNR, který je z naměřených parametrů o 5dB horší než v případě sluchátkového výstupu. Obě spektra jsou porovnána na zobrazena v jednom grafu na obrázku 50.



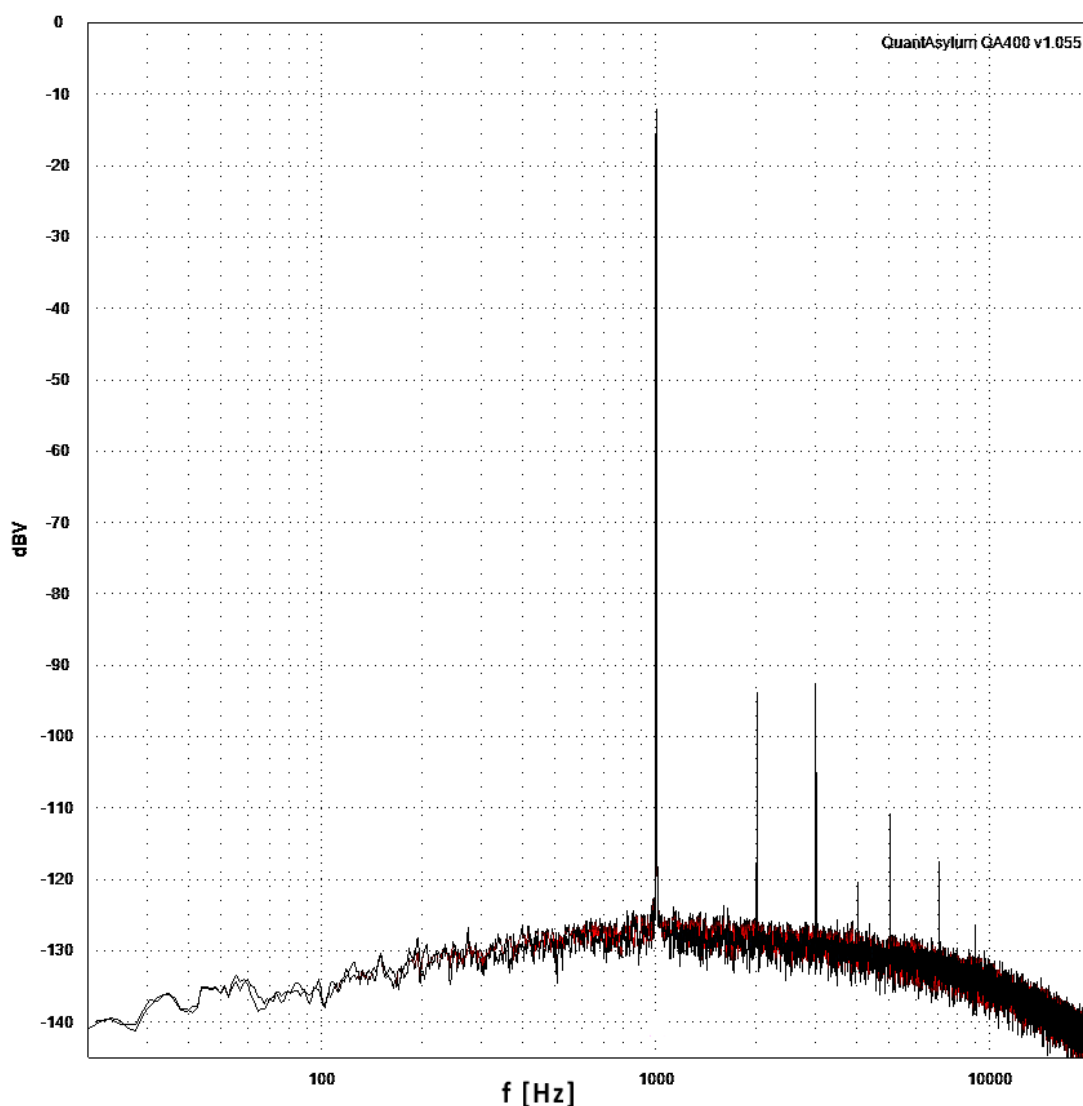
Obrázek 50 - Srovnání parametrů mezi sluchátkovým výstupem (černá křivka) a linkovým nízkošumovým výstupem (červená křivka)

7.2.4 Ověření vstupní analogové části

Ověřena byla i funkčnost analogových vstupů kodeku a to jak interního mikrofonu, tak externího linkového vstupu. K testu byla využita analogová cesta kodeku (bypass) z jeho vstupní části na část výstupní. Při ověření byla také deaktivována digitální část kodeku, která zahrnuje AD, DA převodník a rozhraní I2S. Na kodek taky nebyl přiveden signál MCLK. Tyto neprovozní podmínky při měření byly do testu zahrnuty záměrně. Cílem bylo ověření teoreticky co možná nejlepších a dosažitelných vlastností kodeku. Zároveň byla prověřena také analogová cesta na desce plošného spoje.

Interní mikrofonní vstup byl ověřen pouze z hlediska jeho funkčnosti. Měření audio parametrů je značně náročné a klade požadavky na dobře vybavenou akustickou laboratoř. Výstup mikrofonu byl přiveden přes analogovou cestu kodeku na sluchátkový výstup zvukové karty, kde byl pokusně odposlechnut. Signál nejevil žádné známky poruch a nebyl zaznamenán ani zvýšený šum v pozadí signálu.

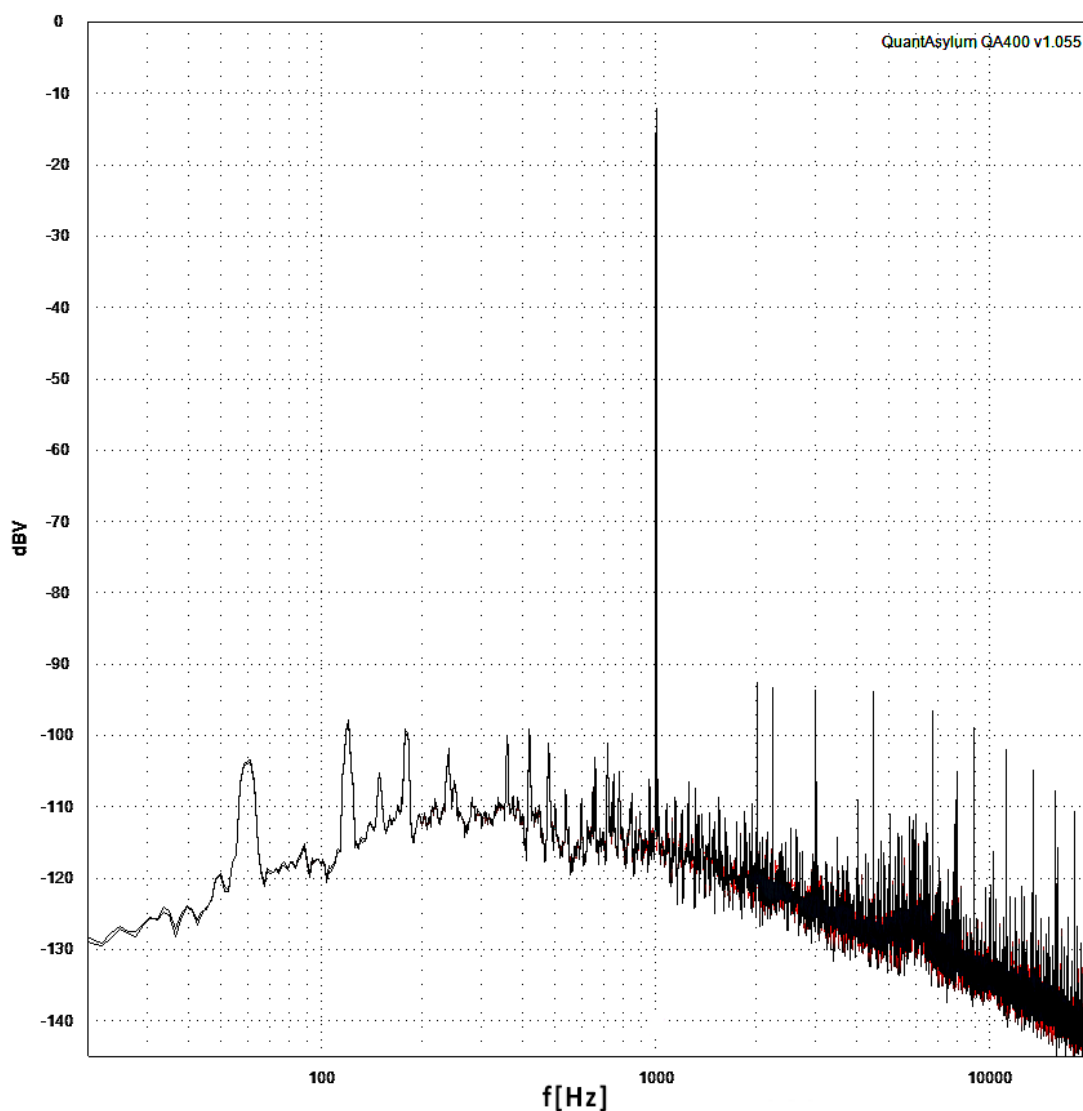
Měření na audio analyzátoru však již podstoupil externí linkový stereo vstup zvukové karty. Opět bylo využito audio analyzátoru Quant Asylum QA400. Tentokrát byla využita i generační část tohoto přístroje, která se stala zdrojem signálu vpuštěného do vstupu zvukové karty. Opět byla aktivována analogová cesta přes audio kodek a signál vyveden na sluchátkový výstup. Záznam měření je zobrazen na obrázku 51.



Obrázek 51 - Ověření analogové cesty z linkového vstupu na sluchátkový výstup

Byl použit signál o amplitudě -12dBV a frekvenci 1kHz. Naměřená hodnota SNR dosahovala hodnoty okolo 85dB. THD+N pak vykazovalo údaje okolo 0.013% zkreslení. Horší parametry oproti předchozímu měření je s největší pravděpodobností způsobeno použitím slabšího vstupního signálu. Nebylo možné zajistit stejnou amplitudu (-6dBV) jako v předchozím měření, jelikož vstupní část kodeku při této hodnotě již výrazně zkreslovala signál. Vstup kodeku je uzpůsoben primárně na nízkoúrovňové signály z mikrofону, čemuž tato vlastnost zkreslení odpovídá.

Zajímavým srovnáním však je vliv zemní smyčky uzavírající se přes zařízení (Raspberry PI), použité k nastavení kodeku za účelem tohoto měření. Jedná se o ukázkový příklad možného praktického použití zvukové karty, kdy je digitální cestou, která není galvanicky oddělná, připojeno neznámé testované zařízení. Vliv takovéto konfigurace na analogový signál ukazuje obrázek 52.



Obrázek 52 - Ověření analogové cesty z linkového vstupu na sluchátkový výstup se zemní smyčkou v zapojení

8 ZÁVĚR

Tato diplomová práce se zabývala modifikací a rozšířením hardwarové části zařízení, které vychází z diplomové práce Ing. Martina Stejskala [1]. Zadání práce specifikovala firma Alps Electric Czech. Jedná se o atypický druh externí vstupně-výstupní zvukové karty, využívající USB Audio Class 1. Výstupem této karty je kromě běžného analogového signálu také speciální digitální formát ve standardu I2S. Z důvodu zamezení vzniku zemních smyček přes zařízení, které je do systému dále zapojeno, je také toto digitální rozhraní galvanicky izolováno.

V první části se práce zabývala popisem a rozbořem původního hardwaru, jeho funkcionalitou, firmwarovým základem a především omezením, zjištěným z předchozího ročního testovacího provozu, a také novým potenciálem celého zařízení. Vznikl zde požadavek na rozšíření zvukové karty o bezdrátové Bluetooth rozhraní, které umožní testovat zařízení založené na tomto standardu. Začlenění modulu znamenalo také značný zásah do řízení toku dat na I2S sběrnici a nutnosti vytvořit přepínač této linky. Analyzovány byly také problémy s napájením izolované části I2S. Nové požadavky dále kladly za cíl získat nízkošumový analogový výstup pro měření analogových parametrů audio signálu. Všechny požadavky shrnuje kapitola 3.4.

S ohledem na analýzu vhodných změn v nové verzi zařízení jsou v kapitole 4 podrobně popsány jednotlivé hardwarové úpravy. Rozebrány jsou konkrétní komponenty, které zahrnují jejich funkčnosti v rámci tohoto projektu. Zásadní části zařízení, především pak mikrokontrolér Atmel AT32UC3A a použitý audio kodek, byly zachovány, stejně tak plná funkcionalita výchozí verze. Nově byla navržena také galvanická izolace analogové části s využitím napájení z akumulátoru. Při návrhu jednotlivých částí nebyl nalezen ani jeden limitující faktor, který by požadovanou funkcionalitu nové verze jakýmkoliv způsobem omezoval.

Následovala praktická část v podobě návrhu desky plošného spoje a výběru vhodné úložné krabičky. Byl vybrán hliníkový box od firmy Hammond s rozměry 120x78x27mm. Zachovány tedy byly kompaktní rozměry a díky použitému kovovému materiálu vnesena i dostatečná robustnost. Návrh desky plošného spoje probíhal v prostředí programu Eagle. S ohledem na složitost a rozměry byla zvolena čtyřvrstvá varianta DPS. Pro snazší osazení byly komponenty prioritně umístěny na jedné straně desky plošného spoje. Tato část práce zahrnovala i uživatelské rozhraní. Na desku plošného spoje bylo nutné vhodně a účelně rozmístit prvky jako LED diody, tlačítka a konektory. Podrobněji se touto problematikou zabývá kapitola 5.3. O vhodnosti či nevhodnosti rozmístění těchto prvků rozhodne až prvotní nasazení v praxi.

Deska plošného spoje byla vyrobena specializovanou externí firmou. Samotné osazení komponent pak proběhlo ručně za použití pece ve firmě Alps Electric Czech. Deska vykazovala při svém oživení jen minimální a snadno řešitelné závady, což

umožňovalo její použití bez dalšího návrhu a výroby opravené verze. Znamé chyby v návrhu a jejich řešení jsou uvedeny v kapitole 5.5.

Následující část již obsahovala rozšíření firmwaru o obsluhu nového hardwaru. V první etapě bylo nutné zajistit základní změny vedoucí ke zprovoznění původních funkcí zařízení. Zvláštní pozornost byla věnována vstupně výstupním pinů mikrokontroléru, které musely být nastaveny do bezpečného stavu vzhledem k novému připojení jednotlivých komponent. Především pak v případě přepínače linky I2S. Součástí těchto prací bylo i oživení nového LCD displeje. Výsledkem těchto modifikací byl funkční hardware s vlastnostmi výchozí verze zvukové karty. Zařízení se po připojení k počítači úspěšně nahlásí jako externí zvuková karta a načte se ovladač. Potíže se nevyskytly ani s nahráním konfiguračního souboru do zařízení prostřednictvím USB.

Rozšíření stávajícího firmwaru o nové části je časově velmi náročnou záležitostí. Rozsah projektu je skutečně velký, což klade vysoké nároky na pochopení stávajících algoritmů, zvláště pak na jejich chování v operačním systému FreeRTOS. Předchozí autor také vynaložil značné úsilí k podrobnému zdokumentování zdrojového kódu. Tato skutečnost je nezbytná pro předání projektu dalším vývojářům, ovšem výrazně zpomaluje rozšiřování samotného projektu. Také díky tomu se nové funkce zvukové karty nepovedlo implementovat v plném rozsahu.

Nově bylo aplikováno měření frekvence na hodinových signálech sběrnice I2S. Tento prvek napomůže uživateli při ladění testované konfigurace a usnadní nastavení zkušebního řetězce. Naměřená data slouží také dalšímu modifikovanému prvku firmwaru, kterým je řídicí modul směru hodinových signálů na sběrnici I2S. Ve výchozí verzi zařízení docházelo k problémům se zablokováním mikrokontroléru v případě, že byl zvolen externí vstup hodinového signálu, který však ve stejnou chvíli ještě nebyl na konektoru k dispozici. Díky měření frekvence MCU nyní zná, zda se na konektoru potřebný signál nachází a pokud ne, provede opatření zamezující zastavení běhu programu.

Dalším novým hardwarovým prvkem byla modifikovaná analogová část. Její firmwarová obsluha však nebyla zcela dořešena. Doplněn byl především konfigurační algoritmus o nové atributy umožňující její nastavení. Za použití Raspberry PI a jednoduchého předpřipraveného skriptu byl kodek nastaven v různých konfiguracích, ve kterých byly otestovány jednotlivé analogové části. Výsledky jsou diskutovány dále v závěru.

Jednou z částí, kterou se z časových důvodů nepovedlo implementovat byl nový Bluetooth modul. Jeho ovládání je velmi náročné a problematické. Z důvodu zajištění komplexnosti řešení bude před jeho uvedením do provozu nutná hloubková analýza možného využití. Zvážení bude nutné také v možnostech uživatelské konfigurace Bluetooth modulu. Současné řešení pomocí konfiguračního souboru se stává poměrně neefektivním a chaotickým. Dalším krokem bude tedy s největší pravděpodobností i

návrh softwaru uživatelského rozhraní pro osobní počítač. Prozatím byl firmware rozšířen o rutinu obsluhující rozhraní UART, na kterém Bluetooth modul komunikuje. To umožňuje zasílání textových zpráv v podobě AT příkazů, pomocí kterých je modul ovládán.

V samotném závěru práce jsou prezentovány výsledky měření, především pak analogové části zařízení. Za použití audio analyzátoru byly změřeny vlastnosti sluchátkového výstupu nové, ale i staré verze. Měření je zaznamenáno v kapitole 7.2. Zkoumanými parametry byly především šumové vlastnosti výstup, celkové harmonické zkreslení a podoba frekvenčního spektra ve slyšitelném pásmu. U nové verze lze pozorovat výrazné zlepšení parametrů, především nárůst odstupů signál-šum o 7dB, což vedlo i ke zlepšení parametru THD+N. Z frekvenčního spektra je také patrné odstranění zemní smyčky (především v oblasti frekvence 50Hz) a to díky galvanické izolaci analogové části od zbytku obvodu. Prezentovány jsou také výsledky měření nízkošumové části sekundárního výstupu zvukové karty. Zde je šum o 5dB horší oproti sluchátkového výstupu. Byl však odfiltrován šum z vyšších kmitočtů (okolo 200kHz), který vzniká díky použitému delta-sigma DA převodníku. Ověřena byla také funkčnost vstupní části analogového obvodu. Obecně lze výsledky považovat za více než uspokojivé. Oproti původní verzi došlo zcela jistě k výraznému zlepšení vlastností sluchátkového výstupu. Podobné audio parametry vykazovalo také měření rozšířené analogové části.

Všechny měření a testy provedené na novém hardwaru zvukové karty zatím nevykazovaly známky žádných závažnějších závad, které by zásadním způsobem omezovali její funkčnost. Deska plošného spoje s největší pravděpodobností bude muset být revidována z důvodu drobných chyb při jejím prvním návrhu, ovšem z hlediska zajištění její principiální funkce se vše jeví být v pořádku. Dalším krokem při vývoji zařízení bude dokončení obslužného firmwaru. Především pak dořešení řízení analogové části, přepínač linky I2S a největší částí, obsluhy modulu Bluetooth. Právě jeho začlenění by mělo výrazným způsobem posunout možnosti současné verze zvukové karty. Vývoj se dále bude také soustředit na tvorbu PC softwaru, který bude mít za úkol usnadnit uživateli obsluhu a konfiguraci zvukové karty.

Závěrečným výstupem práce by mělo být open source řešení tohoto netypického, ovšem v audio oboru velmi užitečného nástroje pro ladění zařízení postavených na digitální sběrnici I2S.

Tato práce již také zaznamenala pozitivní odezvu, když zaujala porotu ve studentské soutěži EEICT ročníku 2016 a zvítězila v kategorii magisterských projektů oboru automatizace.

Literatura

- [1] STEJSKAL, M.: Polymorfní USB-I2S rozhraní, diplomová práce Brno: UREL, FEKT VUT, 2014.
- [2] Bluetooth SIG organization: Bluetooth Core Specification 4.2, 2014
- [3] PHILIPS SEMICONDUCTORS. *I2S bus specification* [pdf]. 1986 [cit. 2015-12-28].
- [4] ATMEL CORPORATION. *32-bit AVR Microcontroller: AT32UC3A3* [pdf]. ©2012, 1020 s. [cit. 2015-12-30].
- [5] FreeRTOS: Market leading RTOS (Real Time Operating System) for embedded systems with Internet of Things extensions [online]. 2016 [cit. 2016-05-02]. Dostupné z: <http://www.freertos.org/>
- [6] CIRRUS LOGIC. *CS2200-CP: Fractional-N Frequency Synthesizer* [pdf]. 2015 [cit. 2015-12-30].
- [7] Sparkfun. *SparkFun Elektronik* [online]. 2015 [cit. 2015-12-30]. Dostupné z: <https://www.sparkfun.com/>
- [8] *Display Elektronik GmbH*. [online]. 2015 [cit. 2015-12-30]. Dostupné z: <http://www.display-elektronik.de/>
- [9] DISPLAY ELEKTRONIK GMBH. *LCD Module: DEM 128064N FGH-PW* [pdf]. 2010 [cit. 2015-12-30].
- [10] SITRONIX. *ST7565R: 65 x 132 Dot Matrix LCD Controller/Driver* [pdf]. 2006 [cit. 2015-12-30].
- [11] TME. *DISPLAY ELEKTRONIK: DEM 128064N FGH-PW* [online]. 2015 [cit. 2015-12-30]. Dostupné z: <http://www.tme.eu/cz/details/dem128064nfgh-pw/graficke-lcd-displeje/display-elektronik>
- [12] TEXAS INSTRUMENTS. *Digital Bus Switch Selection Guide* [pdf]. 2004 [cit. 2016-01-02].
- [13] TEXAS INSTRUMENTS. *SN74AHC125: QUADRUPLE 2-INPUT POSITIVE-NAND GATES* [pdf]. 2013 [cit. 2016-01-02].
- [14] TEXAS INSTRUMENTS. *Advanced High-Speed CMOS (AHC) Logic Family* [pdf]. 2002 [cit. 2016-02-01].
- [15] TEXAS INSTRUMENTS. *TLV320AIC33: Low Power Stereo Audio CODEC for Portable Audio/Telephony* [pdf]. 2008 [cit. 2016-01-02].

- [16] TEXAS INSTRUMENTS. Out-of-Band Noise and Filtering for PCM DAC: Application Report [pdf]. 2005 [cit. 2016-01-02].
- [17] ANALOG DEVICES. *AD8656: Low Noise, Precision CMOS Amplifier* [pdf]. 2013 [cit. 2016-01-02].
- [18] TEXAS INSTRUMENTS. FilterPro™ User's Guide: High-Performance Analog [pdf]. 2011 [cit. 2016-01-03].
- [19] INVEN SENSE. ICS-40180: RF-Hardened, Low-Noise Microphone with Bottom Port and Analog Output [pdf]. 2014 [cit. 2016-01-03].
- [20] SILICON LABS. *Si864x Data Sheet* [pdf]. 2015 [cit. 2016-01-03].
- [21] COMPAQ, HEWLETT-PACKARD, INTEL, LUCENT, MICROSOFT, NEC, PHILIPS. *Universal Serial Bus Specification* [pdf]. 2000 [cit. 2016-01-03].
- [22] TEXAS INSTRUMENTS. TLV1117 Adjustable and Fixed Low-Dropout Voltage Regulator [pdf]. 2014 [cit. 2016-01-03].
- [23] TRACO POWER. *DC/DC Converters: TME Series, 1 Watt* [pdf]. 2010 [cit. 2016-01-03].
- [24] MICROCHIP TECHNOLOGY INC. *MCP1700: Low Quiescent Current LDO* [online]. 2013 [cit. 2016-01-03].
- [25] TEXAS INSTRUMENTS. TPS73733: 1-A LOW-DROPOUT REGULATOR WITH REVERSE CURRENT PROTECTION [pdf]. 2008 [cit. 2016-01-03].
- [26] TEXAS INSTRUMENTS. *TPS2111A: AUTOSWITCHING POWER MUX* [pdf]. 2010 [cit. 2016-01-03].
- [27] BU-410: Charging at High and Low Temperatures. Battery University [online]. 2016 [cit. 2016-01-07]. Dostupné z: http://batteryuniversity.com/learn/article/charging_at_high_and_low_temperatures
- [28] BU-409: Charging Lithium-ion. Battery University [online]. 2016 [cit. 2016-01-07]. Dostupné z: http://batteryuniversity.com/learn/article/charging_lithium_ion_batteries
- [29] TEXAS INSTRUMENTS. BQ24075-Q1: 1.5A USB-FRIENDLY Li-Ion BATTERY CHARGER AND POWER-PATH MANAGEMENT IC [pdf]. 2012 [cit. 2016-01-07].
- [30] MICROCHIP TECHNOLOGY INC. MCP3021: Low Power 10-Bit A/D Converter With I2C™ Interface [pdf]. 2013 [cit. 2016-01-07].
- [31] ON SEMICONDUCTOR. NCP700: 200 mA, Ultra Low Noise, High PSRR, BiCMOS RF LDO Regulator [pdf]. 2008 [cit. 2016-01-07].

- [32] MICREL INC. *MCP5393: Dual Flat No Lead* [pdf]. 2013 [cit. 2016-01-07].
- [33] *Saturn PCB Design Inc.: PCB design service and turnkey electronic engineering solutions* [online]. [cit. 2016-05-11]. Dostupné z: <http://www.saturnpcb.com/>
- [34] HAMMOND MANUFACTURING. *1455J1202* [pdf]. 2015 [cit. 2016-01-07].
- [35] UGKZ2. ALPS ELECTRIC CO. *Wireless LAN/Bluetooth® Combination Module for Automotive* [online]. 2015 [cit. 2016-01-08]. Dostupné z: <http://www.alps.com/prod/info/E/HTML/Communication/Combination/UGKZ2/UGKZ2.html#Packing%20Specifications>
- [36] CSR. CSR8350A08: BlueCore® CSR8350 A08 QFN Automotive [pdf]. 2015 [cit. 2016-01-08].
- [37] *MCP1801: 150 mA, High PSRR, Low Quiescent Current LDO* [pdf]. In: . Microchip Technology Inc., 2010 [cit. 2016-05-05].
- [38] *Digital Sound & Music: Chapter 4: Sound Perception and Acoustics* [online]. 2014 [cit. 2016-05-07]. Dostupné z: <http://digitalsoundandmusic.com/chapters/ch4/>
- [39] *SDR Widget Project* [online]. 2011 [cit. 2016-05-09]. Dostupné z: https://sites.google.com/site/lofturj/sdr_widget
- [40] *Quant Asylum: QA400 48K/192Ksps 24-bit USB Audio Analyzer* [online]. ©2010-2016 [cit. 2016-05-09]. Dostupné z: <http://www.quantasylum.com/content/Products/QA400.aspx>

Seznam zkratek

USB - Universal serial bus

AC1 - Audio class 1

AC2 - Audio class 2

RTOS - Real-time operating system

SSC - Synchronous Serial Controller

HID - Human interface device

MCU - Microcontroller unit

LCD - Liquid crystal display

RAM - Random access memory

GPIO - General purpose input/output

DMA - Direct memory access

TC - Timer/Counter

THD - Through hole device

SMD - Surface mount device

PLL - Phase lock loop

DPS - Deska plošného spoje

LAN - Local Area Network

A2DP - Advanced Audio Distribution Profile

HFP - Hands Free Profile

RF - Radio Frequency

CMOS - Complementary metal–oxide–semiconductor

PGA - Programmable gain amplifier

AGC - Automatic gain control

WSON - Very Very Thin Small Outline No Lead Package

Ni-Cd - Nickel-cadmium

Ni-Mh - Nickel–metal hydride

Li-Ion - Lithium ion

Li-Pol - Lithium polymer

PSRR - Power supply Rejection Ratio

DFN - Dual Flat No Lead

SMT - Surface Mount Technology

ISM - Industrial scientist medical

UART - Universal Asynchronous Receiver and Transmitter

I/O - in/out

PWM - Pulse width modulation

THD - total harmonic distortion

SNR - signal-noise ratio

PGA - Programmable gain amplifier

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Běžná konfigurace připojení zařízení na I2S	9
Obrázek 2 - Časování a význam signálů na I2S [3]	9
Obrázek 3 - Základní měřicí řetězec	10
Obrázek 4 - Původní varianta zvukového zařízení [1]	11
Obrázek 5 - Příklad zemní smyčky v testovacím zapojení	12
Obrázek 6 - Základní blokové uspořádání původního návrhu zvukové karty	12
Obrázek 7 - Konečná podoba první verze zvukové karty	13
Obrázek 8 - Zapojení I2S konektoru (samec)	13
Obrázek 9 - Přehledové schéma základních částí zvukové karty	17
Obrázek 10 - Přehledové blokové schéma nové digitální části	18
Obrázek 11 - Zdroj hodinového signálu pro MCU	20
Obrázek 12 - Původní použité LCD [7]	21
Obrázek 13 - Nově zvolený LCD Display [11]	21
Obrázek 14 - Příklad konfigurace přepínače linky: běžná zvuková karta	23
Obrázek 15 - Příklad konfigurace přepínače linky: Bluetooth test	23
Obrázek 16 - Příklad konfigurace přepínače linky: test externího zařízení na I2S	23
Obrázek 17 - Blokové schéma přepínače I2S	24
Obrázek 18 - Jeden ze čtveřice spínačů v obvodu 74xx125 [13]	25
Obrázek 19 - Pravdivostní tabulka jednotlivého segmentu [13]	25
Obrázek 20 - Zemní smyčka při použití audio analyzátoru	26
Obrázek 21 - Přehledové schéma izolované analogové části	27
Obrázek 22 - Frekvenční odezva výstupního filtru	29
Obrázek 23 - Spodní strana mikrofonu a zapojení pinů [19]	30
Obrázek 24 - Montáž mikrofonu se vstupním otvorem na straně spoje	31
Obrázek 25 - Interní blokové schéma izolátoru použitého v první verzi	32
Obrázek 26 - Blokové schéma izolované I2S části	33
Obrázek 27 - Ukázka nově použitého izolátoru pro separaci I2S části	34
Obrázek 28 - Napájecí větve nového zařízení	36
Obrázek 29 - DC/DC měnič pro napájení izolovaného I2S rozhraní	38
Obrázek 30 - Typická nabíjecí křivka Li-Ion / Li-Pol akumulátoru [28]	40
Obrázek 31 - Základní zapojení nabíjecího obvodu BQ24075 [29]	41
Obrázek 32 - Vývojový diagram sepnutí analogové části	41
Obrázek 33 - Rozložení zemí při návrhu desky plošného spoje zvukové karty	45

Obrázek 34 - koplanární zemněné vedení signálu na DPS	46
Obrázek 35 - neopracovaný hliníkový box Hammond	47
Obrázek 36 - rozmístění uživatelských prvků na horní straně zařízení	48
Obrázek 37 - Rozmístění prvků na spodním čele krabičky	49
Obrázek 38 - Rozmístění prvků na horním čele krabičky	50
Obrázek 39 - Výsledná podoba zařízení	50
Obrázek 40 - Nově oživený displej ve verzi MKIII.....	54
Obrázek 41 - Vývojový diagram změny BCLK dle uživatelského nastavení.....	57
Obrázek 42 - Ukázka zobrazení frekvence hodinových signálů I2S na LCD.....	58
Obrázek 43 - Blokové schéma TC modulu MCU [4]	60
Obrázek 44 - Vstupní část audio kodeku [15].....	62
Obrázek 45 – Ukázka zapojení při ověření základní funkčnosti zvukové karty	65
Obrázek 46 - Psychoakustické váhovací křivky [38].....	67
Obrázek 47 - V měření použitý audio analyzátor[40].....	67
Obrázek 48 - Frekvenční spektrum sluchátkového výstupu verze MKIII (černá = levý kanál) .	68
Obrázek 49 - Frekvenční spektrum sluchátkového výstupu verze MKII (černá = levý kanál)...	69
Obrázek 50 - Srovnání parametrů mezi sluchátkovým výstupem (černá křivka) a linkovým nízkošumovým výstupem (červená křivka)	71
Obrázek 51 - Ověření analogové cesty z linkového vstupu na sluchátkový výstup	72
Obrázek 52 - Ověření analogové cesty z linkového vstupu na sluchátkový výstup se zemní smyčkou v zapojení.....	73

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Souhrn izolovaných signálů v galvanicky oddělené I2S části	34
Tabulka 2 - Souhrn signálních linek na izolované analogové části	35
Tabulka 3 - Rozhodovací tabulka pro volbu napájení izolované I2S části	39
Tabulka 4 - Pravdivostní tabulka řízení dvoubarevné LED	55
Tabulka 5 - Původní parametry nastavení směru hodinových signálů I2S	55
Tabulka 6 - Parametry měření frekvence na lince I2S	59
Tabulka 7 - Možné konfigurace přepínače linky I2S	61
Tabulka 8 - Nové nastavovací parametry analogové části	63
Tabulka 9 - Naměření parametry audio signálu a jejich srovnání mezi MKII a MKIII	69

Seznam schémat

Schéma 1 - Příklad zapojení vstupu kodeku	28
Schéma 2 - Filtr typu dolní propust - topologie Sallen-key [18]	29
Schéma 3 - Zapojení vstupního obvodu napájení	37
Schéma 4 - Připojení dvoubarevné LED k MCU	55

Přílohy

Mapování pinů MCU

Skupina	Pin	Název pinu	Směr	Funkce	Poznámka	Značení ve schématu	Bezpečná hodnota
MCU Power	2	VDDIO	-	PwrSupply			-
	10	VDDIO	-	PwrSupply			-
	21	VDDIO	-	PwrSupply			-
	48	VDDIO	-	PwrSupply			-
	64	VDDIO	-	PwrSupply			-
	81	VDDIO	-	PwrSupply			-
	103	VDDIO	-	PwrSupply			-
	130	VDDIO	-	PwrSupply			-
	4	GNDIO	-	PwrSupply			-
	7	GNDIO	-	PwrSupply			-
	20	GNDIO	-	PwrSupply			-
	47	GNDIO	-	PwrSupply			-
	65	GNDIO	-	PwrSupply			-
	82	GNDIO	-	PwrSupply			-
	102	GNDIO	-	PwrSupply			-
	131	GNDIO	-	PwrSupply			-
	142	VDDIN	-	PwrSupply			-
	143	VDDIN	-	PwrSupply			-
	144	GNDPLL	-	PwrSupply			-
	118	VDDANA	-	PwrSupply			-
117	GNDANA	-	PwrSupply			-	
141	VDDCORE	-	PwrSupply			-	
140	GNDCORE	-	PwrSupply			-	
Basic	13	PC04	I	XIN1	PLL input	PLL_MCLK	x
	18	PC02	I	XIN0	12MHz input	PLL_AUX	x
	106	RESET_N	I	RESET	Reset	MCU_RST	x
	104	TMS	-	TMS	JTAG	TMS	x
	105	TDO	-	TDO		TDO	x
	107	TCK	-	TCK		TCK	x
	108	TDI	-	TDI		TDI	x
USB	5	DMHS	-	DMHS		USB_D-	x
	6	DPHS	-	DPHS		USB_D+	x
	8	DMFS	-	DMFS		USB_D-	x
	9	DPFS	-	DPFS		USB_D+	x
	3	USB_VBIAS	-	USB_VBIAS	Cap		x
1	USB_VBUS	-	USB_VBUS	+V5		x	
I2S	86	PX24	O	TX - DATA	I2S TX	TX_MCU	x
	85	PX23	O	TX - CLK		BCLK	x
	89	PX27	O	TX - Sync		SYNC	x
	92	PX25	I	RX - DATA	I2S RX	RX_MCU	-
	91	PX28	O	RX - CLK		BCLK	x
	90	PX26	O	RX - Sync		SYNC	x
	62	PX02	O	MCLK	I2S CLK Srcs	MCLK	x
	38	PX35	O	BCLK		BCLK	x
	44	PX36	O	SYNC		SYNC	x
	72	PX22	I	TC0 - CLK2	meas BCLK	BCLK	-
	73	PX20	I	TC0 - CLK0	meas MCLK	MCLK	-
80	PX21	I	TC0 - CLK1	meas SYNC	SYNC	-	

Skupina	Pin	Název pinu	Směr	Funkce	Poznámka	Značení ve schématu	Bezpečná hodnota
LCD	132	PA12	O	TC1-A0	LCD PWM	LCD_BACKLIGHT	x
	68	PX14	O	GPIO	LCD RST	LCD_RST	x
	67	PX11	O	GPIO	LCD data/instruction	LCD_A0	x
	136	PA11	-	SPI0 - MISO	LCD SPI	not connected	-
	137	PA08	-	SPI0 - SCK		LCD_SPI_SCK	-
	138	PA10	-	SPI0 - MOSI		LCD_SPI_DO	-
	139	PA09	-	SPI0 - SS[0]		LCD_SPI_CS	-
I2C	119	PA25	-	SDA	Codec, ADC, PLL...	SDA	-
	120	PA26	-	SCL		SCL	-
Bluetooth	53	PX04	-	USART1 - RX	Bluetooth UART	BT_UART_RX	-
	54	PX05	-	USART1 - TX		BT_UART_TX	-
	58	PX06	-	USART1 - CTS		BT_UART_CTS	-
	60	PX07	-	USART1 - RTS		BT_UART_RTS	-
	15	PA02	O	GPIO	RST BT	BT_RST	x
RST pins	70	PX45	I/O	GPIO	RST I2S	RESET_I2S*	x
	69	PX42	O	GPIO	RST CODEC	RESET_CODEC*	x
MUTE	75	PX50	I/O	GPIO	MUTE_I2S	MUTE_I2S*	x
RELAY	43	PX49	O	GPIO	RELE ANALOG	RELE_ANALOG	0
	83	PX17	O	GPIO	RELE I2S	RELE_I2S	0
Switch	14	PA30	I	GPIO	Charging EN	BUTTON_CHARGE_EN	-
	113	PA20	I	GPIO	Pwr I2S connector	BUTTON_I2S_PWR	-
	30	PB0	I	GPIO	Switch sniffer	BUTTON_CODEC_SNIFF	-
	12	PC05	I	GPIO	Usr Button	BUTTON_USER	-
Board PWR	74	PX46	O	GPIO	I2S V-LEVEL SELECTS (I2S input or internal 3.3V level)	I2S_VLEV_SEL*	1
	36	PX40	I	GPIO	Charge state	CHARGE_STATE*	-
	37	PX10	O	GPIO	Analog pwr switch	AN_PWR_SWITCH*	0
	71	PX41	I	GPIO	I2S Power Good	I2S_PGOOD*	-
LEDs	32	PX16	O	GPIO	LED R MCLK	LED_R_MCLK	x
	33	PX13	O	GPIO	LED G MCLK	LED_G_MCLK	x
	34	PX12	O	GPIO	LED R BCLK	LED_R_BCLK	x
	35	PX19	O	GPIO	LED G BCLK	LED_G_BCLK	x
	41	PX48	O	GPIO	LED R SYNC	LED_R_SYNC	x
	42	PX53	O	GPIO	LED G SYNC	LED_G_SYNC	x
	116	PA17	O	GPIO	LED R PSUP	LED_R_PSUP	x
	115	PA18	O	GPIO	LED G PSUP	LED_G_PSUP	x
	39	PX47	O	GPIO	LED R Charge	LED_R_CHRG	x
	40	PX15	O	GPIO	LED G Charge	LED_G_CHRG	x
	134	PB6	O	GPIO	LED Dir select D1	LED_D1_DIR	x
133	PA07	O	GPIO	LED Dir select D2	LED_D2_DIR	x	
31	PB11	O	GPIO	LED blue (Bluetooth)	LED_BT	x	
Analog	114	PA19	I	An	Pot V meas	VOL_ADC	-
I2S bus switch (isolated)	112	PA24	O	GPIO	MCLK OUT	BS_I2S_MCLK_OUT*	1
	111	PA23	O	GPIO	BCLK OUT	BS_I2S_BCLK_OUT*	1
	110	PA22	O	GPIO	SYNC OUT	BS_I2S_SYNC_OUT*	1
	109	PA21	O	GPIO	TX OUT	BS_I2S_TX*	1

Skupina	Pin	Název pinu	Směr	Funkce	Poznámka	Značení ve schématu	Bezpečná hodnota
Bus switch	28	PA28	O	GPIO	BT TX to D1	BS_BT_TX_TO_D1	1
	27	PB01	O	GPIO	BT TX to D2	BS_BT_TX_TO_D2	1
	26	PA27	O	GPIO	BT D1 to RX	BS_BT_D1_TO_RX	1
	29	PA31	O	GPIO	BT D2 to RX	BS_BT_D2_TO_RX	1
	77	PX51	O	GPIO	CODEC TX to D1	BS_CODEC_TX_TO_D1	1
	76	PX57	O	GPIO	CODEC TX to D2	BS_CODEC_TX_TO_D2	1
	79	PX55	O	GPIO	CODEC D1 to RX	BS_CODEC_D1_TO_RX	1
	78	PX56	O	GPIO	CODEC D2 to RX	BS_CODEC_D2_TO_RX	1
	95	PX33	O	GPIO	MCU TX to D1	BS_MCU_TX_TO_D1	1
	97	PX31	O	GPIO	MCU TX to D2	BS_MCU_TX_TO_D2	1
	96	PX30	O	GPIO	MCU D1 to RX	BS_MCU_D1_TO_RX	1
	94	PX29	O	GPIO	MCU D2 to RX	BS_MCU_D2_TO_RX	1
	101	PA15	O	GPIO	MCLK I2S isolated	BS_I2S_MCLK_IN	1
	100	PA14	O	GPIO	BCLK I2S isolated	BS_I2S_BCLK_IN	1
	98	PC1	O	GPIO	SYNC I2S isolated	BS_I2S_SYNC_IN	1
	99	PC0	O	GPIO	RX I2S isolated	BS_I2S_RX	1
	50	PX8	O	GPIO	MCLK to PLL MCU	BS_MCLK	1
Debug LEDs	19	PC3	O	GPIO	LED 1	DBG_LED_1	x
	22	PB04	O	GPIO	LED 2	DBG_LED_2	x
	23	PA29	O	GPIO	LED 3	DBG_LED_3	x
	24	PB03	O	GPIO	LED 4	DBG_LED_4	x
	25	PB02	O	GPIO	LED 5	DBG_LED_5	x
Debug	55	PX0	-	USART0 - RX	Debug UART	-	-
	59	PX1	-	USART0 - TX		-	-

* same marking on isolated side (added suffix _I)

Příloha

Výpis konfiguračního souboru zvukové karty

```
[0: Board driver for Sonochan mkII v0.6.1]
; device id (did): 0
; serial number: 15
```

```
[0: Initialize board hardware]
; initialize i/o and prepare codec
; set call_function to non zero if you want call this function
call_function = 0
```

```
[0: Reset connector I/O's]
; set all signals to hi-z. codec on board will work.
; set call_function to non zero if you want call this function
call_function = 0
```

```
[0: MCLK source - applied only if BT module is disabled]
; 1 - internal; 2 - external (i2s)
; type: uint8 < 1 : 2 > | current value: 1
value = 1
```

```
[0: BCLK source - applied only if BT module is disabled]
; 1 - internal; 2 - external (i2s)
; type: uint8 < 1 : 2 > | current value: 1
value = 1
```

```
[0: FSYNC source (word clock) - applied only if BT module is disabled]
; 1 - internal; 2 - external (i2s)
; type: uint8 < 1 : 2 > | current value: 1
value = 1
```

```
[0: MCLK output enable]
; 0 - disabled; 1 enabled
; type: uint8 < 0 : 1 > | current value: 0
value = 0
```

```
[0: BCLK output enable]
; 0 - disabled; 1 enabled
; type: uint8 < 0 : 1 > | current value: 0
value = 0
```

```
[0: FSYNC output enable]
; 0 - disabled; 1 enabled
; type: uint8 < 0 : 1 > | current value: 0
value = 0
```

```
[0: TX output enable]
; 0 - disabled; 1 enabled
; type: uint8 < 0 : 1 > | current value: 0
value = 0
```

[0: Data line 1 source select]
; 0 - none; 1 - mcu; 2 - i2s; 3 - codec; 4 - bluetooth
; type: uint8 < 0 : 4 > | current value: 0
value = 0

[0: Data line 2 source select]
; 0 - none; 1 - mcu; 2 - i2s; 3 - codec; 4 - bluetooth
; type: uint8 < 0 : 4 > | current value: 0
value = 0

[0: Set mute flag]
; 0 - mute off ; 1 - mute on
; type: uint8 < 0 : 1 > | current value: 0
value = 0

[0: Set reset I2S flag]
; 0 - off ; 1 - on
; type: uint8 < 0 : 1 > | current value: 0
value = 0

[0: Enable internal MIC]
; 0 - disabled; 1 enabled
; type: uint8 < 0 : 1 > | current value: 0
value = 0

[0: Set gain for internal MIC]
; value: 0~8, range: 0db to -12db by -1.5db step
; type: uint8 < 0 : 8 > | current value: 8
value = 8

[0: Enable external analog in/MIC]
; 0 - disabled; 1 enabled
; type: uint8 < 0 : 1 > | current value: 0
value = 0

[0: Set gain for external analog input]
; value: 0~8, range: 0db to -12db by -1.5db step
; type: uint8 < 0 : 8 > | current value: 8
value = 8

[0: Set master gain for analog input]
; value: 0~127, range: 0db to +59.5db by 0.5db step
; type: uint8 < 0 : 127 > | current value: 0
value = 0

[0: Set line out volume]
; value: 0~127, range: 0db to -78.3db, to mute set 118 or higher
; type: uint8 < 0 : 127 > | current value: 80
value = 80

[0: Set word size]
; data size in bits. usually 16, 20, 24 and 32
; type: uint8 < 1 : 32 > | current value: 24
value = 24

```

[0: MCLK frequency]
; options: 16, 32, 64, 128, 256, 512 fsync
; type: uint16 < 1 : 1024 > | current value: 256
value = 256

[0: Offset of MCLK in PPM]
; allow slightly change mclk frequency. auto tune pll have to be
disabled!
; type: int32 < -1000000 : 1000000 > | current value: 0
value = 0

[0: BCLK frequency]
; options: 16, 32, 64, 128, 256, 512 fsync
; type: uint16 < 1 : 512 > | current value: 64
value = 64

[0: Digital audio interface mode]
; 0-i2s ; 1-dsp ; 2-left justified ; 3-right justified
; type: uint32 < 0 : 3 > | current value: 0
value = 0

[0: Word offset (delay between FSYNC and TX/RX_DATA)]
; 0 ~ 255. codec safe limit is 16. value 256 means default value
; type: uint16 < 0 : 256 > | current value: 256
value = 256

[0: RX FSYNC edge]
; rx fsync sync edge ; 0 - falling ; 1 - rising ; 2 - default
; type: uint32 < 0 : 2 > | current value: 2
value = 2

[0: TX FSYNC edge]
; tx fsync sync edge ; 0 - falling ; 1 - rising ; 2 - default
; type: uint32 < 0 : 2 > | current value: 2
value = 2

[0: RX BCLK sampling edge]
; rx bclk sync edge ; 0 - falling ; 1 - rising ; 2 - default
; type: uint32 < 0 : 2 > | current value: 2
value = 2

[0: TX BCLK transmitting edge]
; tx bclk sync edge ; 0 - falling ; 1 - rising ; 2 - default
; type: uint32 < 0 : 2 > | current value: 2
value = 2

[0: Auto tune PLL when audio feedback not work]
; enable (1) or disable (0)
; type: uint8 < 0 : 1 > | current value: 1
value = 1

```

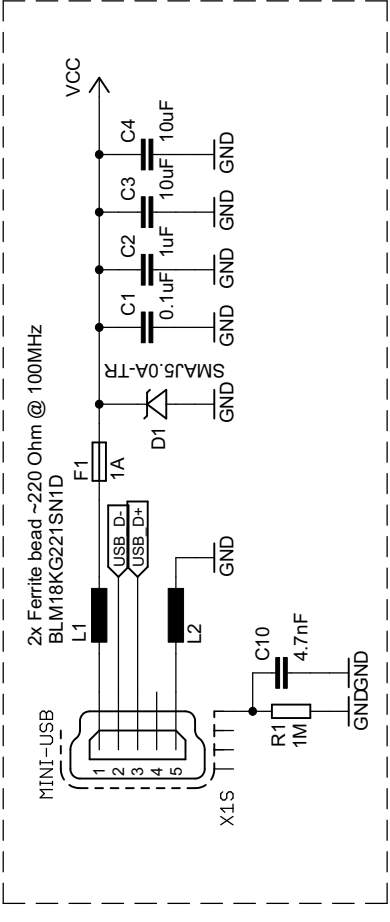
```
[0: Add number behind device name]
; after that, device must be restarted. 0 means no number (erase
number).
; type: uint8 < 0 : 15 > | current value: 0
value = 0
```

```
[0: Restore saved settings]
; load and apply saved settings
; set call_function to non zero if you want call this function
call_function = 0
```

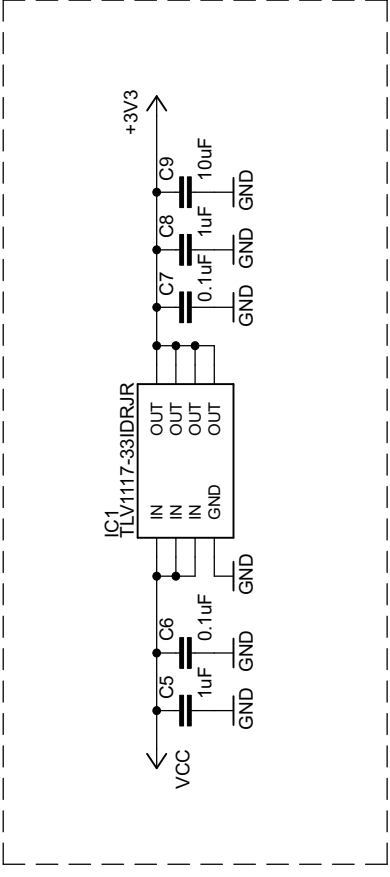
```
[0: Load default factory settings (Erase actual settings!)]
; this function also erase saved settings! so think twice!
; set call_function to non zero if you want call this function
call_function = 0
```

```
[0: Save all settings]
; just save variables to flash memory
; set call_function to non zero if you want call this function
call_function = 0
```

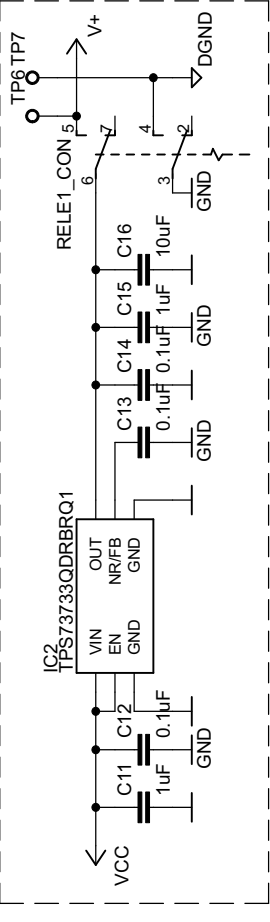
USB / Main power supply



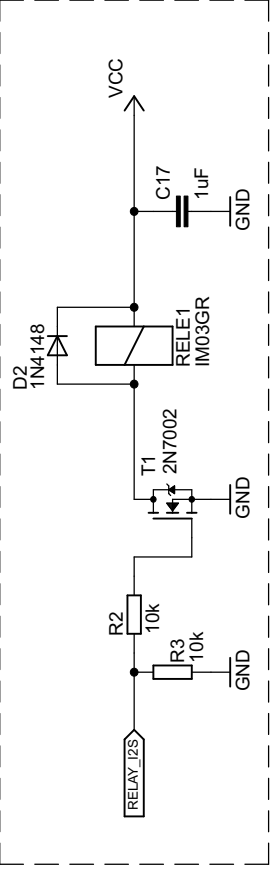
3V3 VREG - main digital part



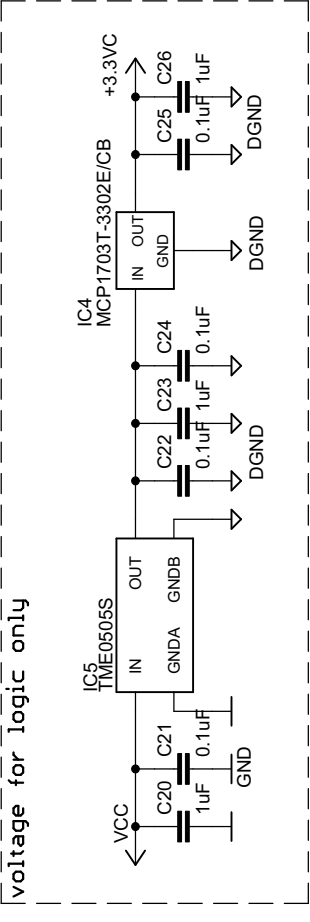
3V3 VREG - direct power supp. from Sonochan to device under test



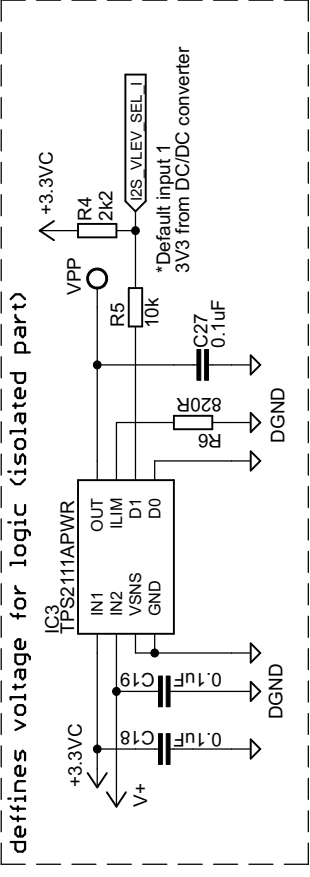
RELAY - direct pur supply for isolated I2S part



isolated DC/DC converter + 3V3 VREG for I2S voltage for logic only



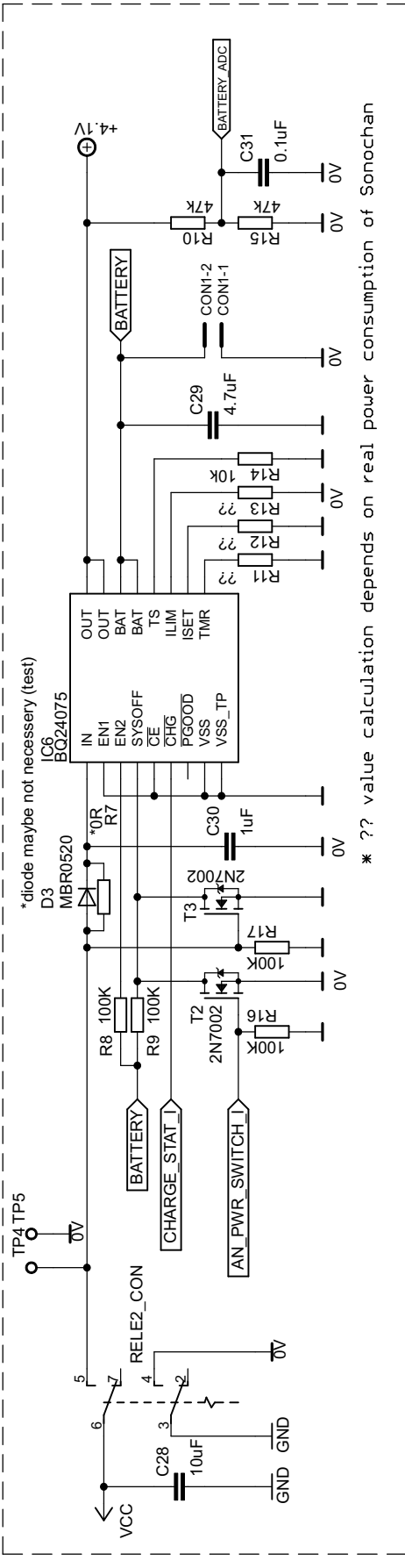
Power MUX (from I2S connector/internal) defines voltage for logic (isolated part)



Power Supply Main + isolated I2S

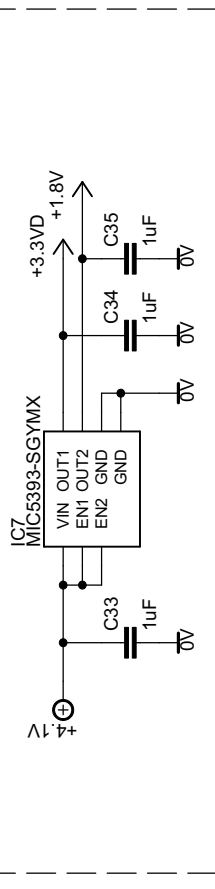
Marek Gal
 Sonochan_MKIII_0.3.1
 not saved!
 Sheet: 1/9

Battery power management - analog power supply

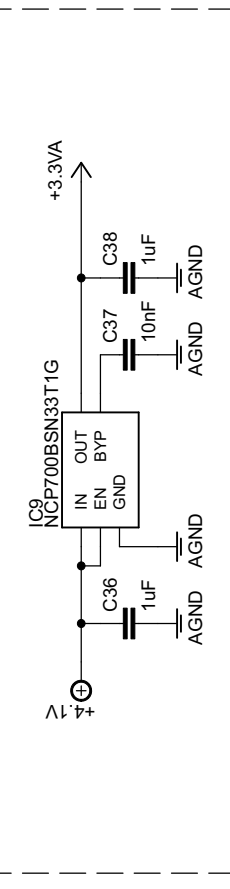


* ?? value calculation depends on real power consumption of Sonochan

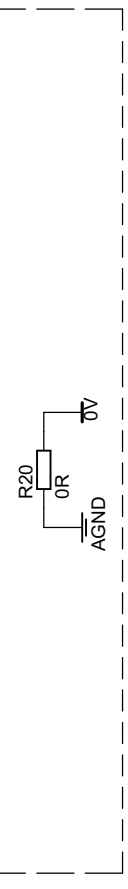
+3V3 & +1V8 VREG - digital part



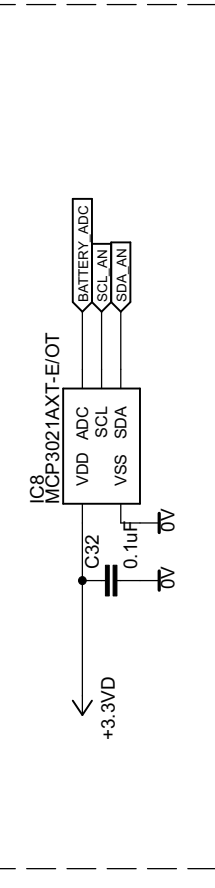
+3V3 analog branch - low noise VREG



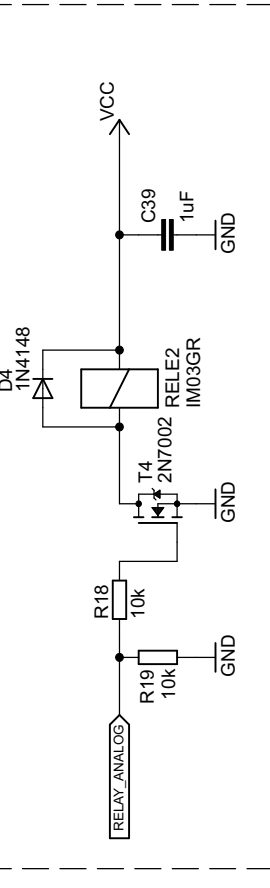
ground connection analog - digital



ADC for battery voltage measurement

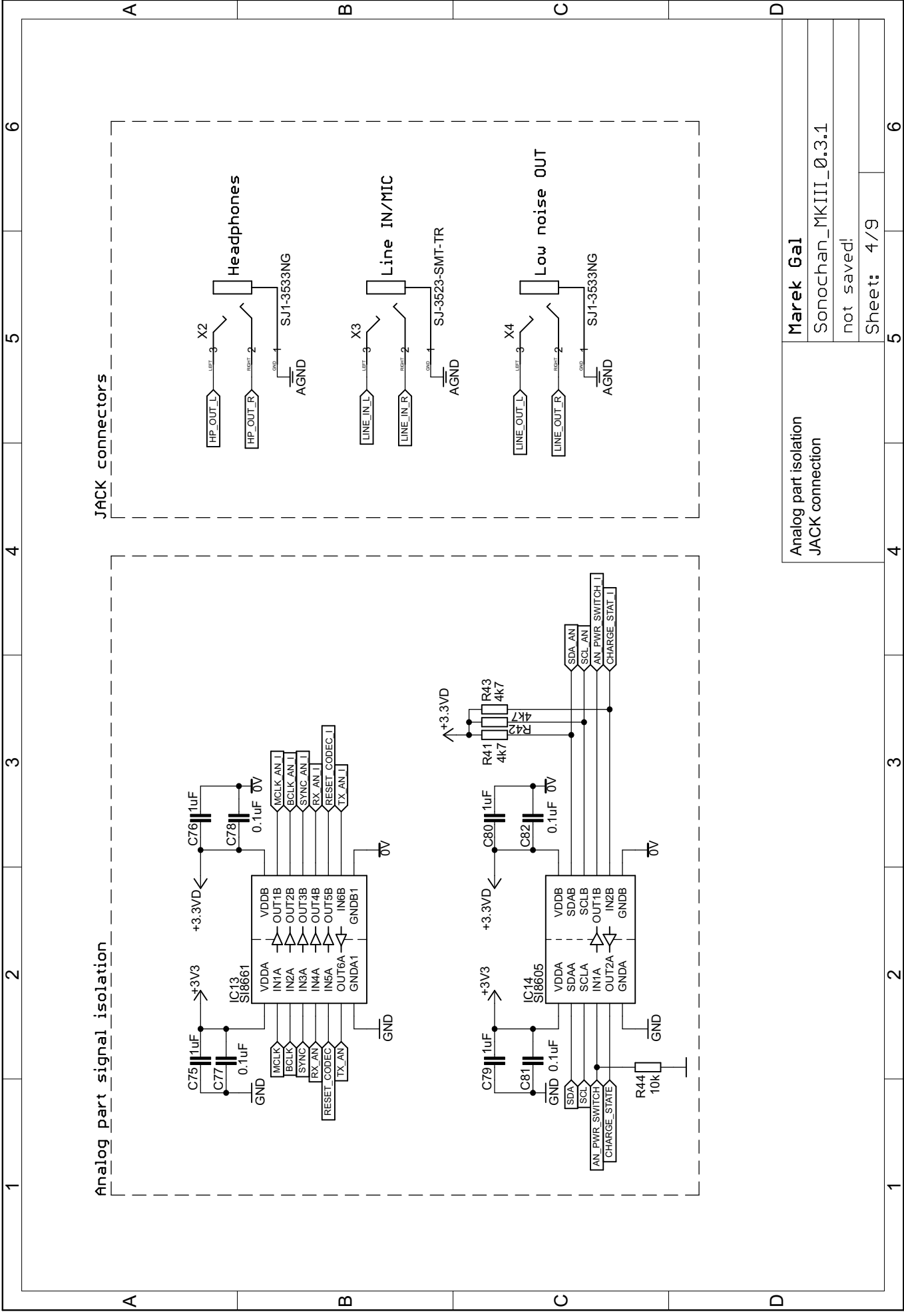


RELAY switch for analog part (for charging)



Isolated analog part
- power management

Marek Gal
Sonochan_MKIII_0.3.1
not saved!
Sheet: 2/9

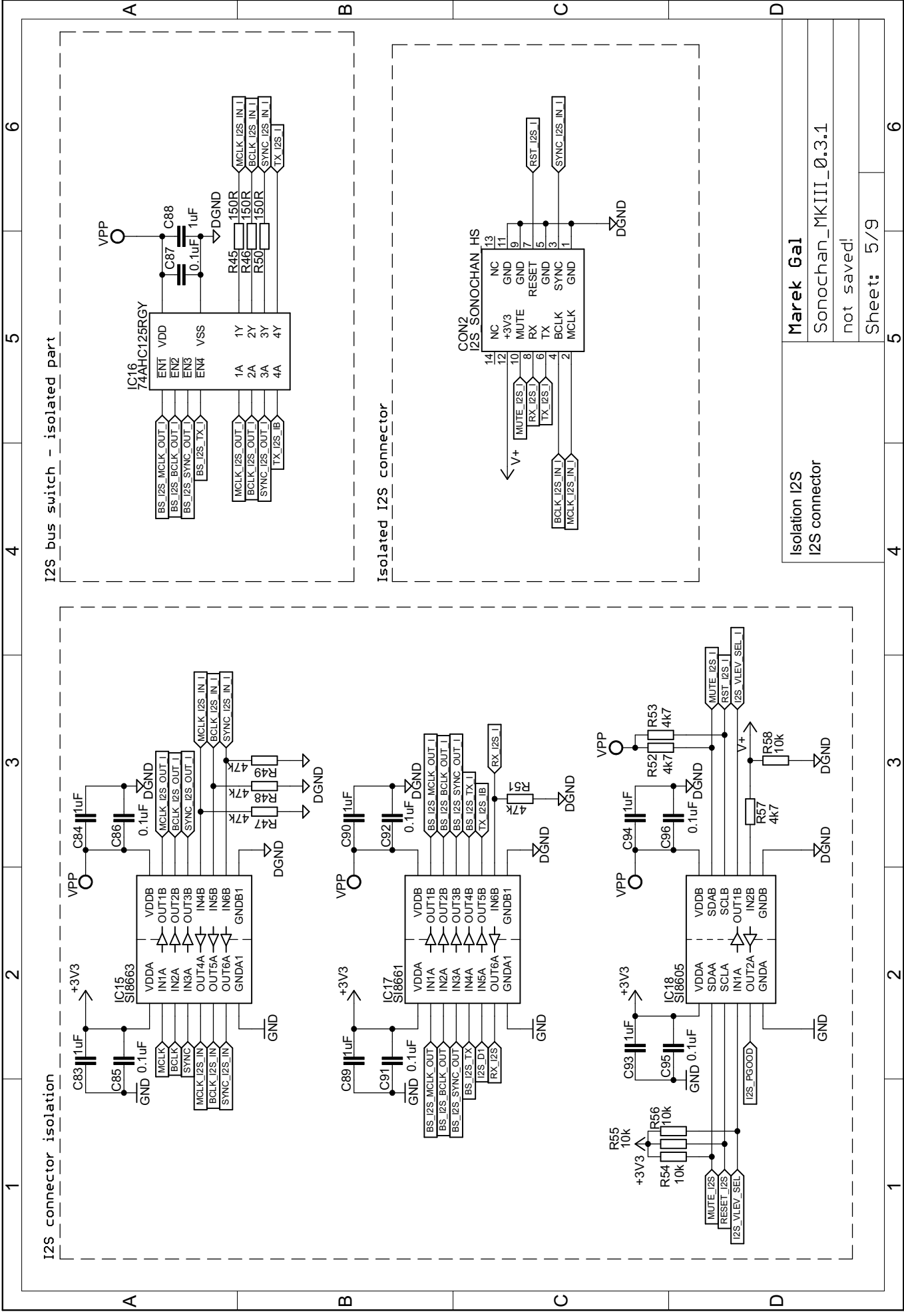


Analog part signal isolation

JACK connectors

Analog part isolation
JACK connection

Marek Gal
Sonochan_MKIII_0.3.1
not saved!
Sheet: 4/9



I2S bus switch - isolated part

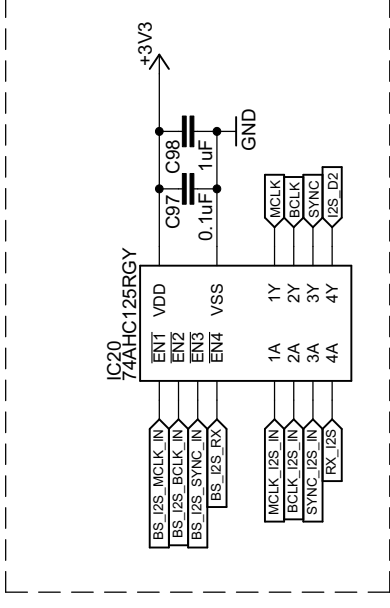
Isolated I2S connector

Isolation I2S I2S connector

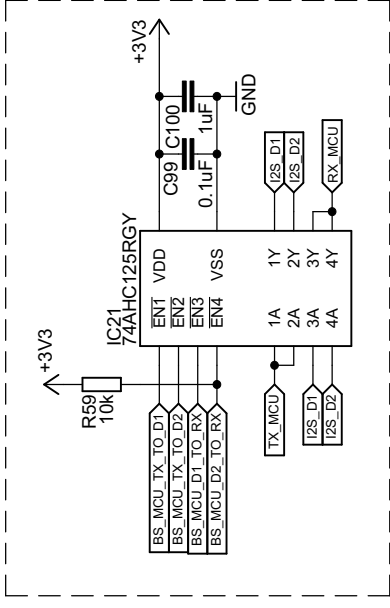
Marek Gal
 Sonochan_MKIII_0.3.1
 not saved!
 Sheet: 5/9

A B C D

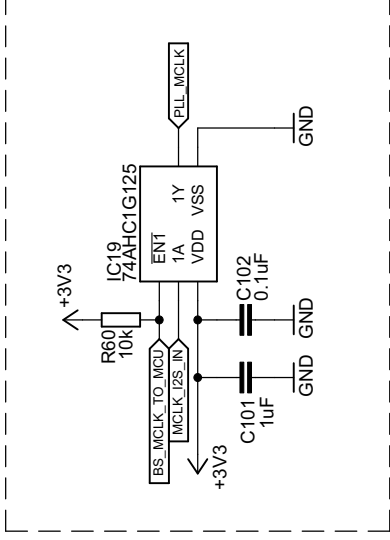
I2S Bus switch - clock + RX from isolated I2S



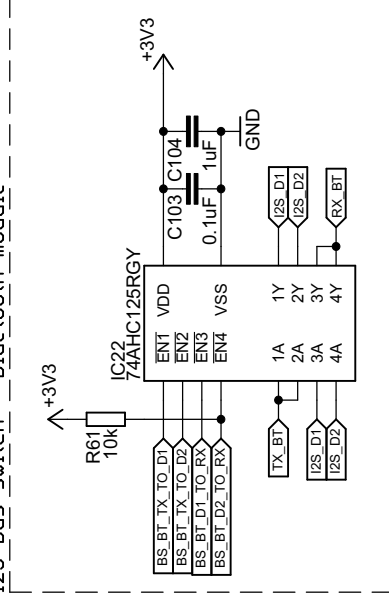
I2S Bus switch - MCU



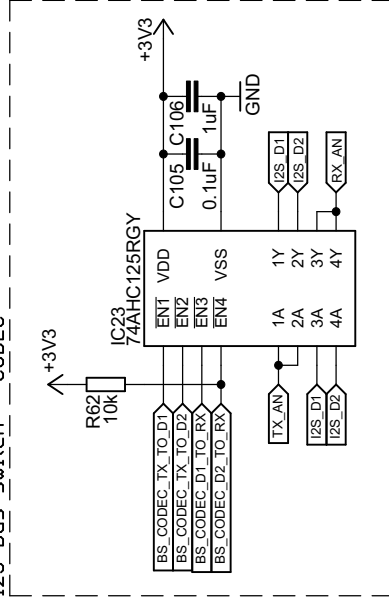
switch - MCLK to master clock for MCU



I2S Bus switch - Bluetooth module

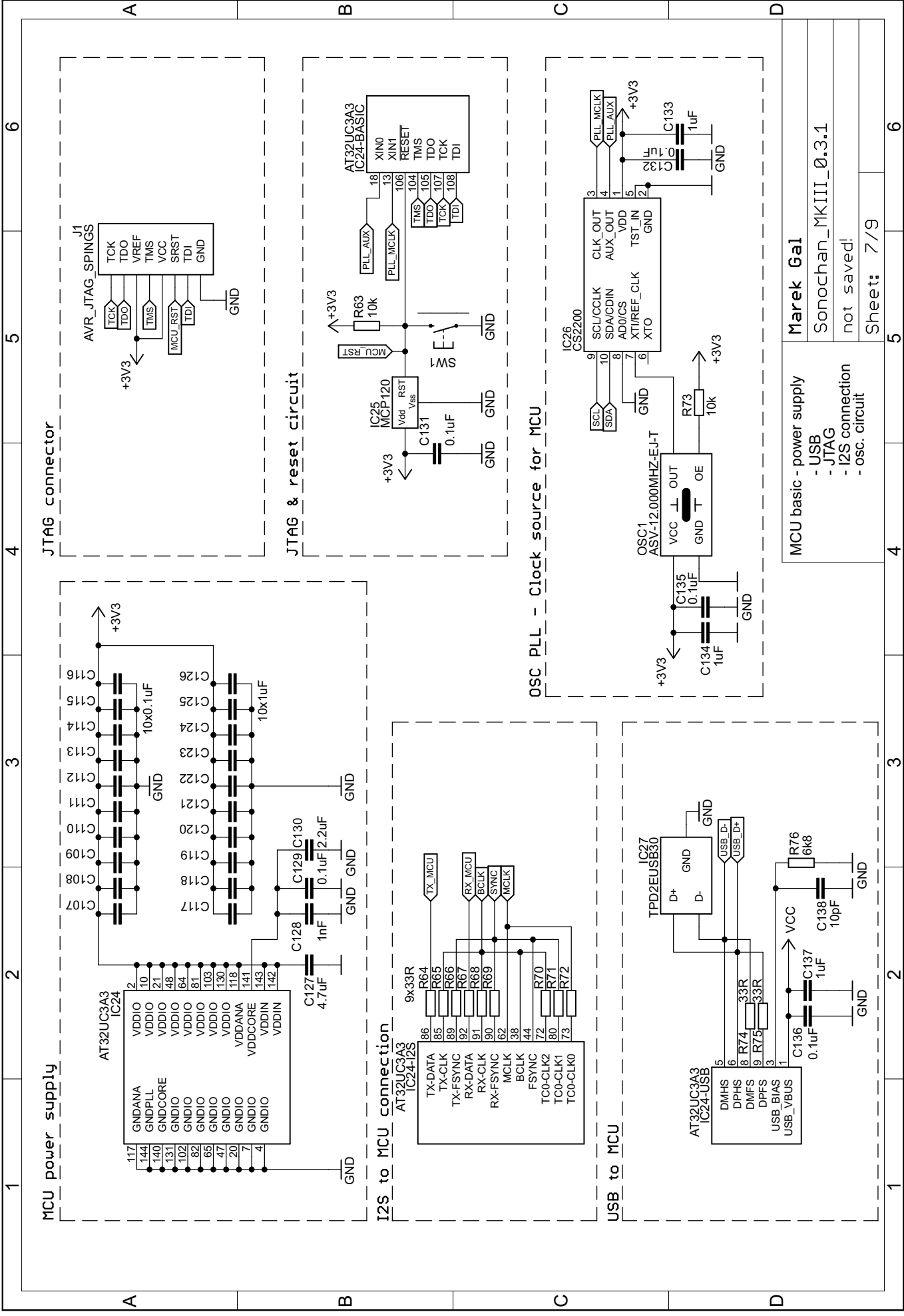


I2S Bus switch - CODEC

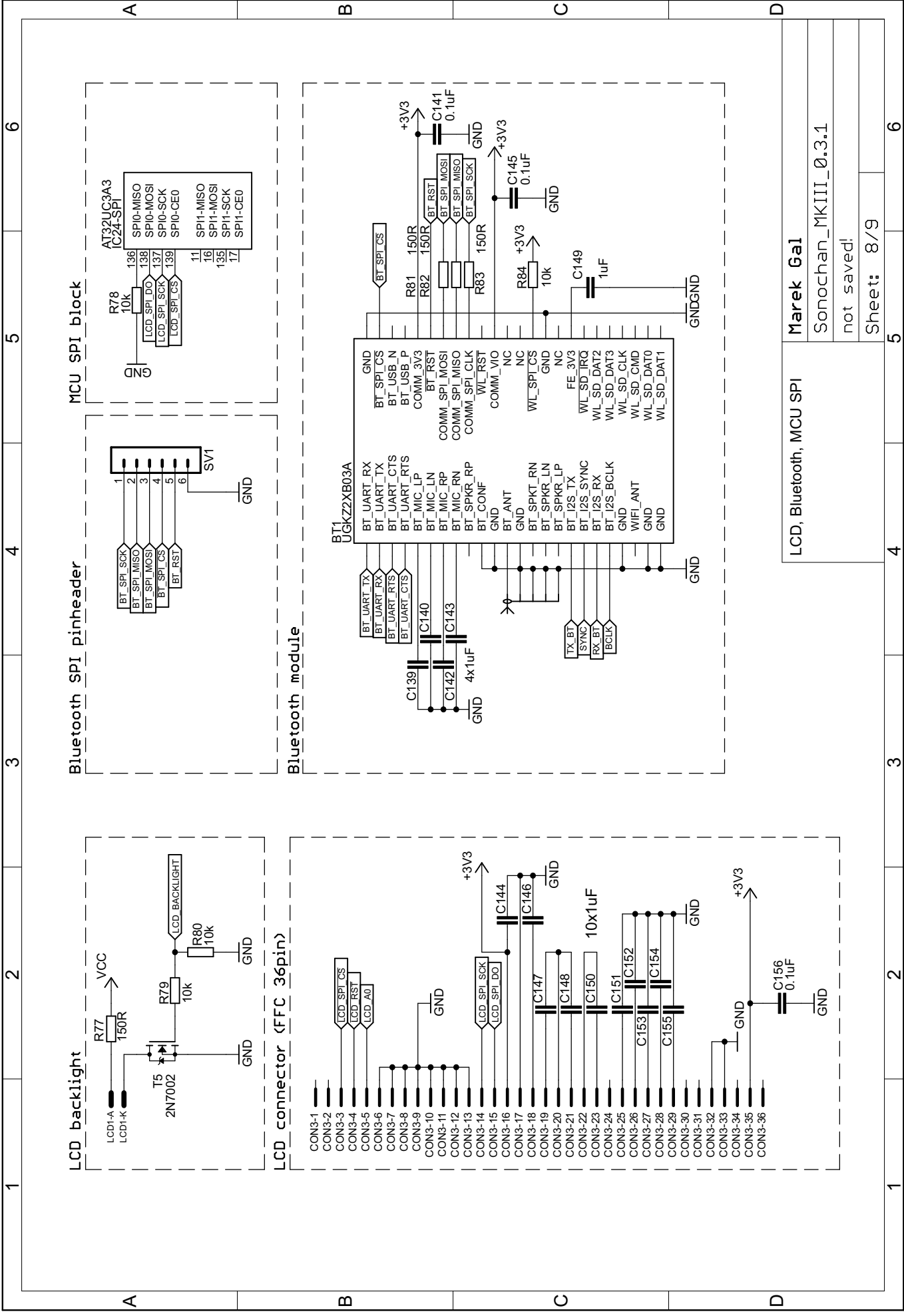


Bus switch

Marek Gal
 Sonochan_MKIII_0.3.1
 not saved!
 Sheet: 6/9



MCU basic - power supply	Marek Gal
- USB	Sonochan_MKIII_0.3.1
- JTAG	not saved!
- I2S connection	
- osc. circuit	



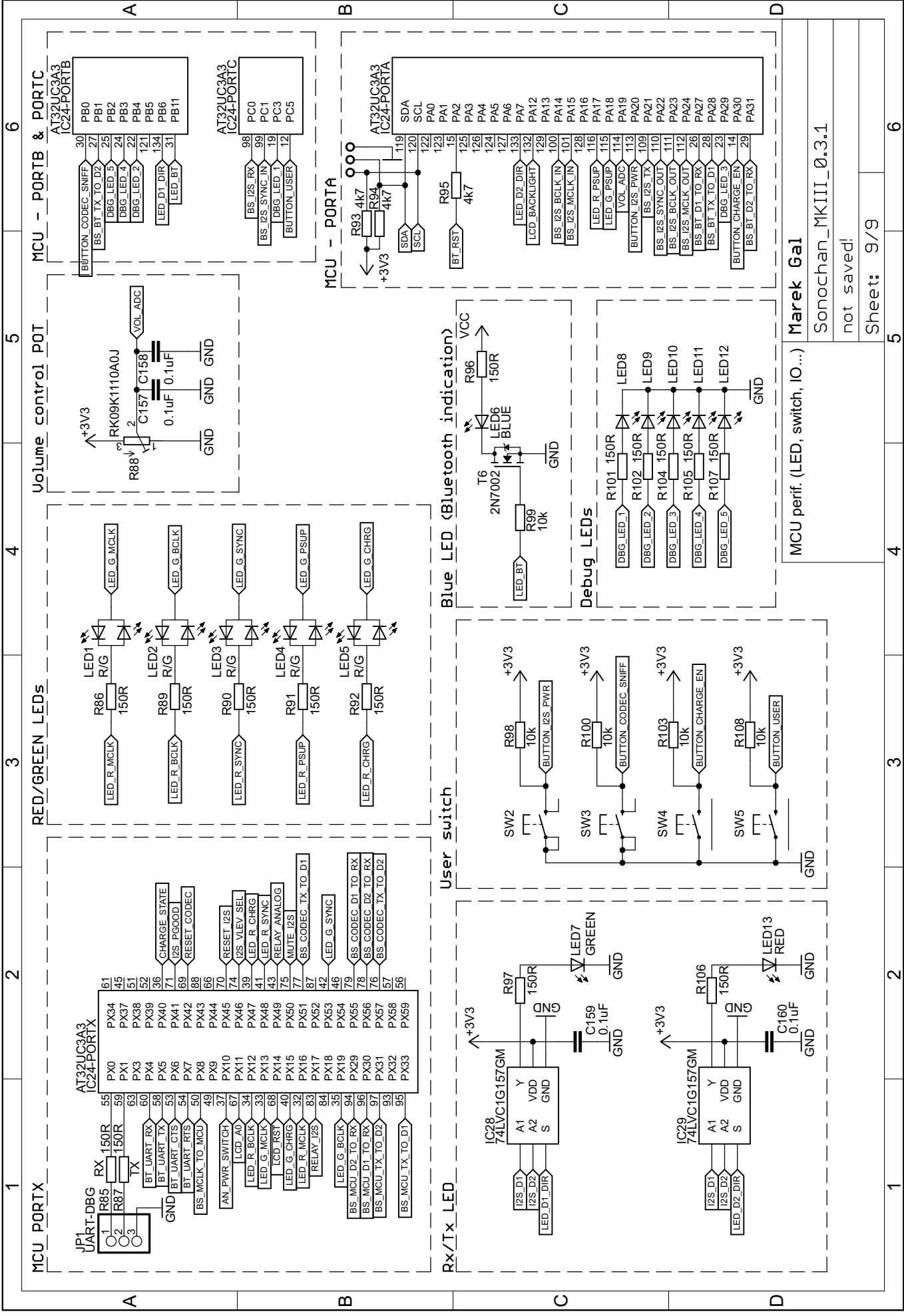
LCD, Bluetooth, MCU SPI

Marek Gal

Sonochan_MKIII_0.3.1

not saved!

Sheet: 8/9



MCU perif. (LED, switch, IO...)

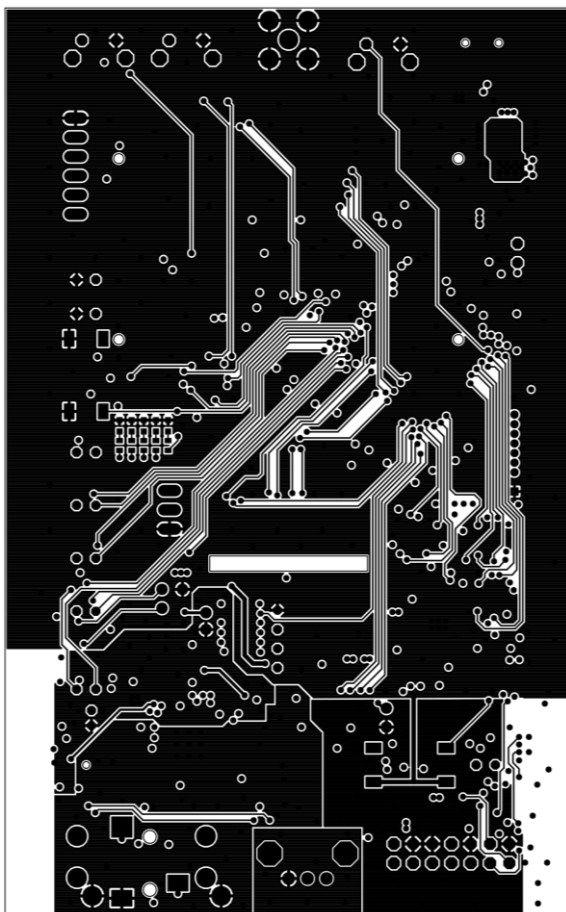
Marek Gal

Sonochan_MKIII_0.3.1

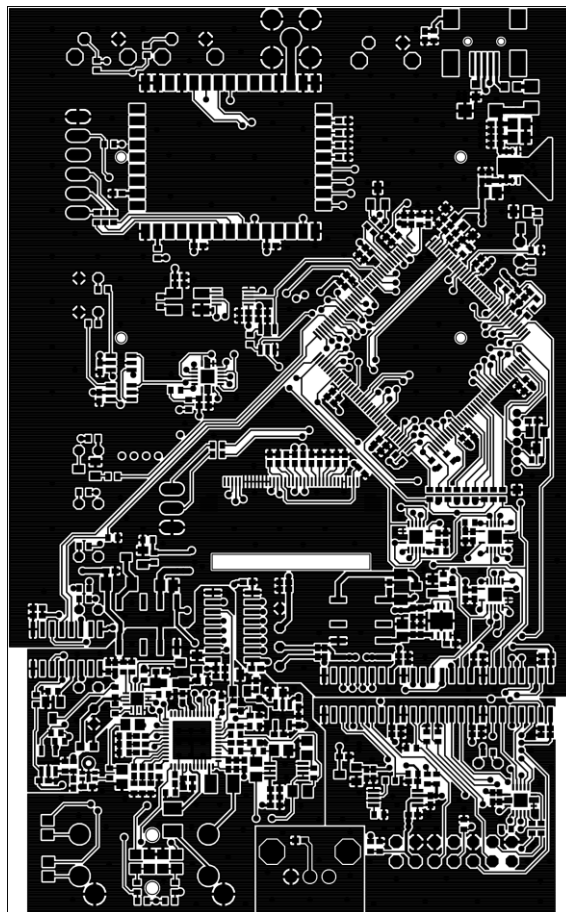
not saved!

Sheet: 9/9

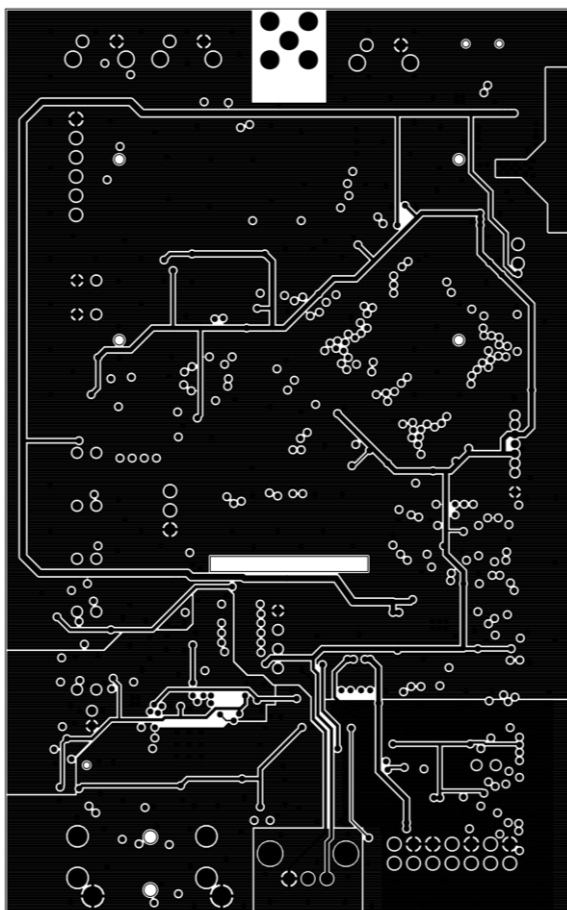
Předloha desky plošného spoje



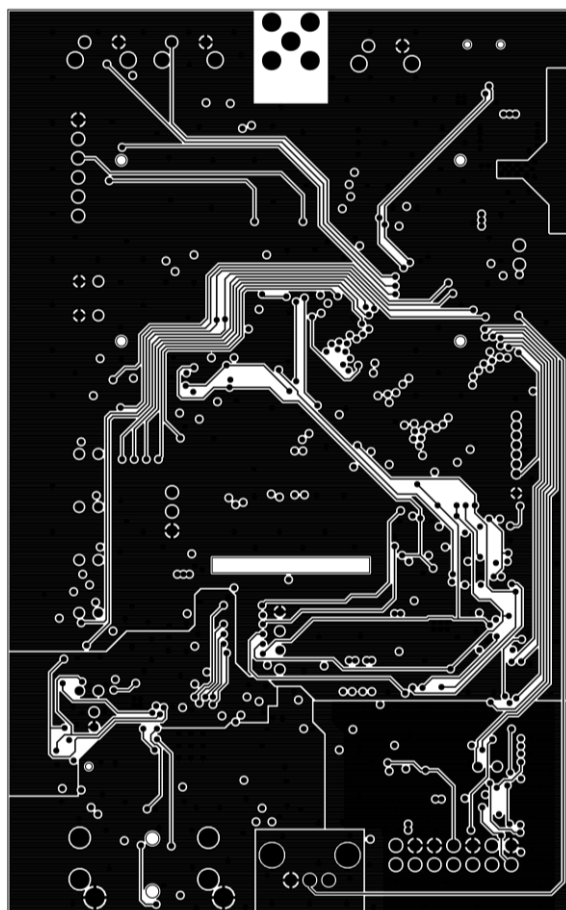
1 - horní vrstva



2 - spodní vrstva

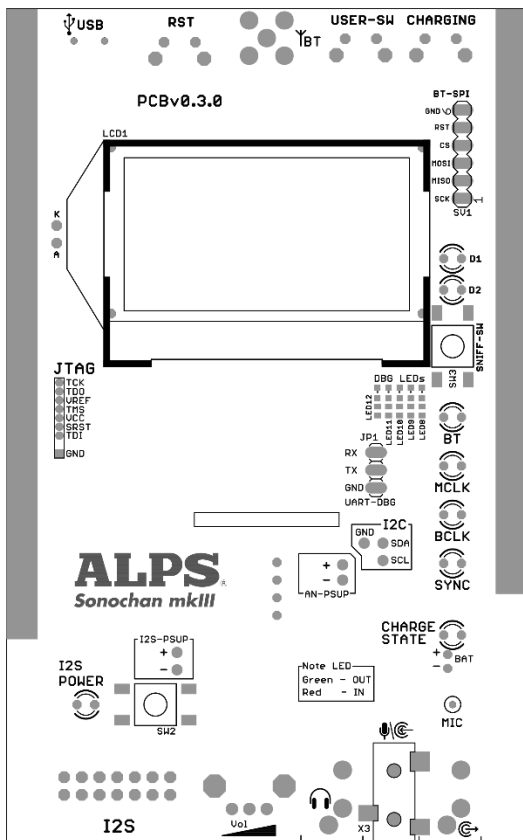


3 - 1. vnitřní vrstva

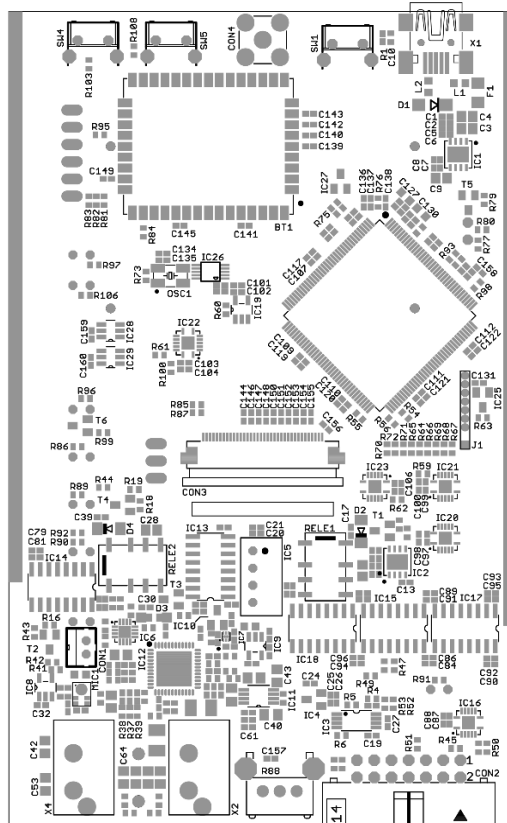


4 - 2. vnitřní vrstva

Rozmístění komponent na desce plošného spoje



1 - horní strana (pohledová)



2 - spodní strana (součástková)