

Bakalářská práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická
Katedra radioelektroniky

Návrh sférického mikrofonního pole

David Vagner

Vedoucí práce: Ing. Petr Honzík, Ph.D.
Studijní program: Elektronika a komunikace
Květen 2021

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Vagner** Jméno: **David** Osobní číslo: **483885**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra radioelektroniky**
Studijní program: **Elektronika a komunikace**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Návrh sférického mikrofonního pole

Název bakalářské práce anglicky:

Design of Spherical Microphone Array

Pokyny pro vypracování:

Seznamte se s principy mikrofonních polí se zaměřením na sférická pole. Seznamte se s vlastnostmi MEMS mikrofonů s digitálním výstupem. Navrhněte sférické mikrofonní pole malých rozměrů s možností využití 3D tisku, použijte 16 MEMS mikrofonů s digitálním výstupem typu TDM, realizujte prototyp. Funkčnost demonstруйте na vybrané aplikaci, tu navrhněte a implementujte.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Škvor, Z.: Elektroakustika a akustika, ČVUT, Praha, 2012
- [2] Bradstein, M., Ward, D.: Microphone Arrays, Signal Processing Techniques and Applications, Springer, 2001
- [3] Plessas, P.: Rigid Sphere Microphone Arrays for Spatial Recording and Holography, Graz University of Technology, 2009

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Petr Honzík, Ph.D., UBI FD ČVUT

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **29.01.2021**

Termín odevzdání bakalářské práce: **21.05.2021**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2022**

Ing. Petr Honzík, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Josef Dobeš, CSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Poděkování

Děkuji Ing. Petru Honzíkovi, Ph.D. za uvedení do tématu, pravidelné konzultace (díky kterým práce nezažálela) a vysvětlení teoretických základů dané problematiky a taktéž Ing. Františku Rundovi, Ph.D. za výpomoc při tvorbě semestrálního projektu, který předcházal této práci. Děkuji i za finanční podporu této práce RPAPS 2021 „Vývojové kity pro otevřenou audio laboratoř“.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze, 21. května 2021

Abstrakt

Práce se zabývá návrhem hardwarové části sférického mikrofonního pole pro univerzální použití. Pole je navrženo pro realizaci pomocí 3D tisku z důvodu snadné změny rozmístění akustických senzorů a snadné realizace ve školním nebo domácím prostředí. Signálové rozhraní je realizováno pomocí sběrnice TDM, která zajistí připojení až 16 jednotlivých mikrofonů pomocí 5 vodičů. Pro snímání akustického pole jsou použity MEMS mikrofony ICS-52000 s integrovaným A/D převodníkem i TDM rozhraním.

Klíčová slova: sférické mikrofonní pole, MEMS mikrofon, 3D tisk, Raspberry Pi

Vedoucí práce: Ing. Petr Honzík, Ph.D.
K13137 katedra radioelektroniky,
Technická 2, Praha 6

Abstract

This thesis deals with design of hardware for spherical microphone array for universal application. The array is designed for easy realisation using 3D printing which ensures rearrangement and realisation at university or home environment to be possible. In order to connect up to 16 microphones to the signal processing device using minimised number of wires the TDM interface is used. The designed field uses MEMS microphones ICS-52000 with integrated TDM interface.

Keywords: spherical microphone array, MEMS microphone, 3D print, Raspberry Pi

Title translation: Design of Spherical Microphone Array

Obsah

Úvod	1	5 Návrh konstrukce pro 3D tisk	33
Část I		5.1 Koncept	33
Teoretická část		5.2 Rozdělení pro tisk	34
1 Úvod do sférických mikrofonních polí	5	5.3 Spojení polosfér	34
1.1 Lineární pole	5	5.4 Vývodka kabelů a montážní závit	35
1.2 Sférické pole	7	6 Průběh realizace	37
1.2.1 Koncepce konstrukce	7	6.1 Plošné spoje	37
1.2.2 Teorie návrhu mikrofonního pole	8	6.1.1 Testování s ADAU1452	37
1.3 Programy pro parametrický návrh	9	6.1.2 Testování na Raspberry Pi ..	38
1.4 Schopnosti FDM 3D tisku	9	6.2 Tisk a osazení konstrukce	40
2 MEMS mikrofony	11	6.2.1 Tisky	40
2.1 Teorie elektrostatických měničů.	11	6.2.2 Osazení	40
2.1.1 Podmínky kvazistatické stability	11	6.2.3 Návrh budoucího pokračování	40
2.1.2 Citlivost měniče	12	Závěr	43
2.2 Technologie a vlastnosti MEMS mikrofonů	13	Literatura	45
2.3 Vybrané parametry MEMS mikrofonů	14	Přílohy	
2.4 Typy audio-rozhraní	16	A Seznam zkratk	51
2.4.1 Rozhraní PDM	16	B Ukázky korekčních filtrů v pluginu SPARTA Array2SH	53
2.4.2 Rozhraní I2S	17	C Plošné spoje	55
2.4.3 Rozhraní TDM	17	D Konstrukce pro 3D tisk	61
Část II		E Test TDM adaptéru	65
Praktická část		F Test spojení TDM k ADAU1452	67
3 Návrh elektrické hardwarové části	21	G Seznam datových příloh	69
3.1 Výběr vhodného typu mikrofonu	21		
3.2 Návrh plošných spojů	23		
3.2.1 DPS pro MEMS mikrofon ...	24		
3.2.2 DPS - adaptér pro uchycení v konstrukci	26		
3.3 Vyvedení signálu	28		
3.3.1 Signálové a napájecí vedení ..	28		
3.3.2 Adaptér pro zapojení do Raspberry Pi	28		
4 Zpracování signálu	31		
4.1 Zpracování signálovým procesorem	31		
4.2 Zpracování mikropočítačem	32		

Obrázky

1.1.1 Nákres lineárního mikrofonního pole se 7 měničů	5	C.0.5 Návrh DPS - adaptér	57
1.1.2 Směrová charakteristika lineárního pole	6	C.0.6 Zadní strana DPS - adaptér ..	57
2.1.1 Vnitřní struktura obecného elektrostatického měniče	11	C.0.7 Schéma DPS - TDM adaptér .	58
2.1.2 [18] Náhradní schéma elektrostatického měniče	13	C.0.8 Návrh DPS - TDM adaptér ..	59
2.2.1 Vnitřní struktura MEMS elektrostatického měniče	14	C.0.9 Zadní strana DPS - TDM adaptér	59
2.4.1 [8] Zapojení mikrofonů na sběrnici TDM	18	C.0.10 Připojený DPS - TDM adaptér	60
2.4.2 [8] Časování sběrnice TDM - celkový přehled	18	D.0.1 Pohled na vložení mikrofonu do konstrukce 1	61
2.4.3 [8] Časování sběrnice TDM - detail 1 časového okna WS	18	D.0.2 Pohled na vložení mikrofonu do konstrukce 2	61
3.1.1 [8] Výkres pouzdra mikrofonu ICS-52000	21	D.0.3 Návrh konstrukce dolní polosféry	62
3.1.2 [8] Bloková struktura vnitřku mikrofonu ICS-52000	22	D.0.4 Návrh konstrukce v řezu	62
3.1.3 [8] Frekvenční charakteristika mikrofonu ICS-52000	22	D.0.5 Vytištěná horní polosféra	63
3.2.1 Vyrobena sestava plošných spojů	23	D.0.6 Vytištěná spodní polosféra ...	63
3.2.2 Vyroběný plošný spoj pro mikrofon	25	D.0.7 Vytištěná spojka polosfér	64
3.2.3 Vyroběný plošný spoj pro uchycení	27	E.0.1 Test přeslechu na TDM adaptéru	65
3.3.1 Vyroběný TDM adaptér	30	E.0.2 Test dělení frekvence	65
5.1.1 Koncept konstrukce pole	34	F.0.1 Test SCK bez rezistoru	67
6.1.1 Program testu ADAU1452	37	F.0.2 Test SCK s rezistorem	67
6.1.2 Impuls WS z TDM adaptéru .	39	F.0.3 Test DATA bez rezistoru	68
6.1.3 Impuls WS z ICS-52000	39	F.0.4 Test DATA s rezistorem	68
6.2.1 Osazená horní polosféra	41		
6.2.2 Hotové mikrofonní pole	41		
B.0.1 Korekční filtr pro mikrofonní pole Zylia ZM-1	53		
B.0.2 Korekční filtr pro mikrofonní pole s malou pevnou sférou	54		
C.0.1 Schéma DPS - mikrofon	55		
C.0.2 Návrh DPS - mikrofon	55		
C.0.3 Zadní strana DPS - mikrofon .	56		
C.0.4 Schéma DPS - adaptér	56		



Úvod

Pro diagnostiku akustiky místností nebo zvuk vyzařujících zařízení jsou hojně využívána sférická mikrofonní pole. Často jde o drahá zařízení s vysokou kvalitou záznamu, která jsou vhodná i pro použití pro studiový záznam prostorového zvuku. Stejně tak je možno taková zařízení používat pro elektronické napodobení směrových charakteristik mikrofonů (tzv. beamforming), a tím např. vyzkoušet, který typ mikrofonu bude nejvhodnější pro nahrávku v dané situaci. V poslední době se na trhu objevují poměrně kvalitní mikrofony na bázi MEMS technologie, vyznačující se nízkou cenou a malou velikostí.

Tato práce si klade za cíl vytvořit základní realizační návrh sférického mikrofonního pole pro obecné použití a vymezit požadavky pro jeho realizaci. Aby bylo možné napodobování i složitějších směrových charakteristik (a nebo byl prostorový záznam přesnější), půjde o mikrofonní pole takové, které bude možno použít jako ambisonický mikrofón alespoň 3. řádu. Z tohoto požadavku plyne především minimální počet mikrofonů v poli - 16. Důraz bude kladen především na cenu zařízení, snadnou konstrukci a v neposlední řadě na flexibilní metody realizace, které umožní rychlou optimalizaci a snadné prototypování, jako je 3D tisk.



Část I

Teoretická část

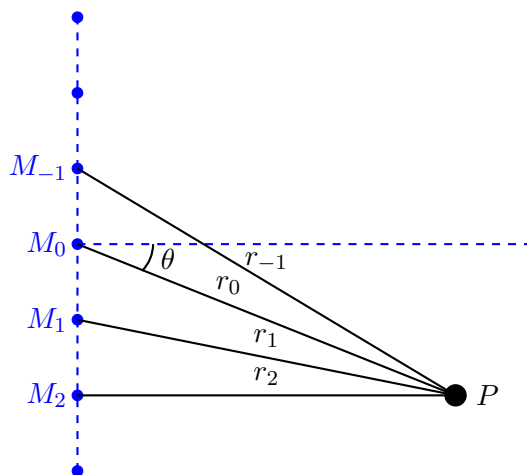
Kapitola 1

Úvod do sférických mikrofonních polí

Cílem této bakalářské práce je navržení a vytvoření funkčního sférického mikrofonního pole. Za mikrofonní pole je obecně pokládána soustava mikrofónů, přičemž je žádoucí, aby si byly mikrofony vlastnostmi co nejpodobnější. Mikrofonní pole dále můžeme dělit dle tvaru, na kterém jsou samotné akustické senzory umístěny, přičemž nejčastěji jde [5] o přímku (lineární pole), rovnou plochu (plošné pole) nebo sféru (povrch koule), odtud sférické pole.¹

1.1 Lineární pole

Nejjednodušším typem mikrofonního pole je zmíněné pole lineární, na kterém je vhodné si vysvětlit základní principy. Nákres lineárního pole [4] je na obr. 1.1.1.



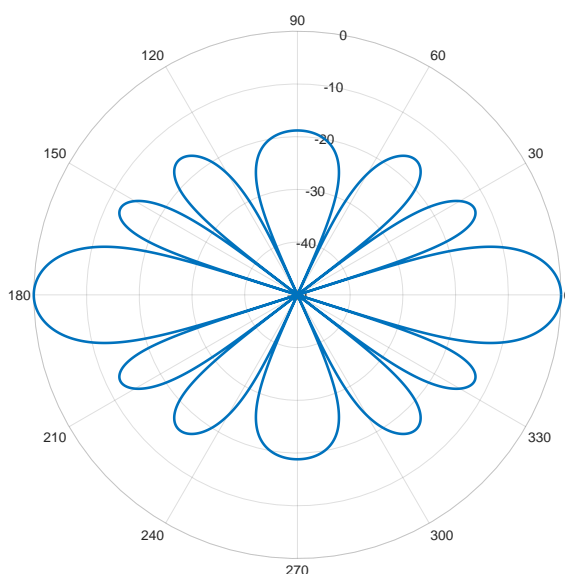
Obrázek 1.1.1: Nákres lineárního mikrofonního pole se 7 měniči, kde M_x představují pozice mikrofónů, P je pozice zvukového zdroje a r_x vzdálenosti mikrofónů od zdroje

¹V této práci bude hojně používáno výrazu sféra, i přes to, že nejde o výraz příliš český, jelikož jazyk český nenabízí vhodnější jednoslovné pojmenování (pouze dvouslovné - povrch koule).

Představme si situaci, kdy vyše akustický zdroj zvukový impuls. Okamžik, ve kterém impuls zaznamenají jednotlivé mikrofony je odlišný pro každý z nich a závisí na vzdálenosti od zdroje. Ta se mění se změnou úhlu θ . Při záznamu signálu z mikrofونů dokážeme tento úhel θ zpětně vypočítat z fázových posunů těchto signálů. Podle zdroje [4] lze odvodit vzorec pro směrovou funkci tohoto pole, která je rovna

$$h(\theta) = \frac{\sin(nkd \sin(\theta))}{n \sin(kd \sin(\theta))}, \quad (1.1.1)$$

kde n je počet mikrofونů, k vlnové číslo, d rozestup mikrofونů v poli a θ úhel dle obrázku 1.1.1. Směrová charakteristika pro lineární pole s parametry $d = 8$ cm, $n = 7$ pro frekvenci $f = 2$ kHz je na obr. 1.1.2.



Obrázek 1.1.2: Směrová charakteristika lineárního pole dle obr. 1.1.1

Lineární pole je schopno pouze omezené detekce pozice objektu v prostoru. Chceme-li dosáhnout lepší lokalizace zvuku v prostoru, musíme použít planární, či ještě lépe, sférická mikrofonní pole, která již umožňují plnou lokalizaci zdroje zvuku v prostoru [5].

1.2 Sférické pole

Sférické pole má akustické senzory uspořádané na sféře, existuje však více možností, jak toho dosáhnout - přes uchycení mikrofonů ve volném prostoru až po jejich zabudování do pevné kulové slupky.² [14, str. 26-31] rozebírá základní možnosti konstrukce sférických mikrofonních polí realizovaných s všesměrovými i kardioidními (směrovými) mikrofony.

1.2.1 Koncepce konstrukce

Sférická pole můžeme obecně rozdělit do 2 kategorií: otevřená a pevná [14]. Otevřená pole jsou charakteristická uchycením mikrofonů ve volném prostoru s minimalizovanými konstrukčními prvky. Pevná sférická pole vznikají doplněním otevřeného pole o pevnou sférickou (či kulovou) konstrukci, umístěnou obvykle do středu tohoto pole [5], přičemž v extrémním případě jsou poloměry pole a pevné sféry shodné.

Otevřené pole

Práce [15] se zabývá konstrukcí otevřených sférických polí, přičemž vyzdvihuje jejich pozitivní vlastnosti na nízkých frekvencích, ale upozorňuje na problém s velkým šumem vznikajícím na frekvencích, které odpovídají prostorovým sférickým módům. Tento problém vzniká pouze s použitím všesměrových mikrofonů, to je však prakticky jediný vyráběný typ MEMS mikrofonu, jak rozebírá kapitola 2.3. Jako řešení, práce navrhuje použití pole se dvěma sférami, avšak taková konstrukce je v rozporu se zadáním této práce, a navíc MEMS mikrofony svojí frekvenční charakteristikou nedovolí využít zmíněnou výhodu dobrých vlastností na nízkých frekvencích. Navíc práce uvádí, že pro takové vlastnosti je třeba sestavit rozměrné pole (to opět neodpovídá zadání). Jistou výhodou je jediné, v práci zmíněná, malá interakce pole se zvukovými vlnami, což se může projevit lepšími vlastnostmi oproti pevnému poli, v prostředí se zvýšenou odrazivostí povrchů (kde dochází k odražení zkreslených zvukových vln zpět k poli a jejich interferencí s původním signálem).

Dále je třeba zhodnotit proveditelnost zhotovení otevřeného pole pomocí 3D tisku. Při zajišťování mikrofonů ve volném prostoru je totiž nutné minimalizovat rozměry nosných částí (např. sestavením z tenkých tyčových dílů), což běžně dostupné technologie 3D tisku (Fused Deposition Modeling (FDM), Stereolithography (SLA)) nedokážou v požadované pevnosti. Jediné díly, které by bylo takto proveditelné vyrobit, by mohly být spojky tyčí, což ale nepřináší požadovanou modularitu (bylo by stále nutné ručně řezat spojovací tyče). Konstrukce otevřeného pole proto není vhodná pro účely této práce a nebude dále rozebírána.

²Kulovou slupkou zoveme rozdíl dvou koulí s různými poloměry.

■ Pevné pole

Stejně tak práce [14] uvádí problémy při konstrukci otevřeného pole se všesměrovými mikrofony, zároveň však ukazuje, že pevné mikrofonní pole problémy se šumem netrpí.

Pevná mikrofonní pole můžeme dále rozdělit podle poloměru pevné sféry - zda je shodný s poloměrem umístění mikrofonů, nebo menší. Takovou konstrukci rozebírá zdroj [7], jde ale o konstrukci používanou v menší míře, která byla navíc již odkazovanou prací realizována (modulárně s využitím 3D tisku). Krátkým experimentem v pluginu SPARTA | Array2SH [10] se lze navíc přesvědčit, že tento typ konstrukce se kompenzuje filtrem se složitější frekvenční charakteristikou (kompenzuje se amplitudová frekvenční charakteristika), než typ se shodnými poloměry, což může způsobit další problémy se zpracováním. Ukázky z tohoto pluginu pro oba typy konstrukce jsou v příloze B. V této práci se proto zaměříme na pevné sférické pole s poloměrem pevné sféry shodným s poloměrem umístění akustických senzorů, a tím zajistíme mj. i snadné zpracování nahrávek na PC, jelikož tento typ konstrukce používají mnohá další (např. [23]) sférická pole.

■ 1.2.2 Teorie návrhu mikrofonního pole

Zvolený typ pole vyžaduje vytvoření pevné sférické (přesněji „mezikulové“³) konstrukce, jejímž návrhem se zabývá kapitola 5.1. Aby bylo možno zajistit všestrannost použití, je třeba vytvořit pole s dostatečnou velikostí a počtem mikrofonů, aby bylo možno jejich rozmístění snadno změnit bez většího rizika jejich kolize. Jak totiž rozebírá např. práce [22], optimální rozmístění mikrofonů na sféře je odlišné pro různé aplikace. Jelikož je cílem budoucí práce návrh takového mikrofonního pole, které bude možno snadno vytisknout na 3D tiskárně, je z hlediska flexibility ideální, použít parametrického návrhu. Pro výrobu prototypu bylo zvoleno rozložení mikrofonů dle rozložení 16 bodů na sféře ze zdroje [6].

³Z málo používaného českého výrazu „mezikulí“ - tj. kulová slupka

1.3 Programy pro parametrický návrh

Parametrický návrh umožňuje tvořit objekty takovým způsobem, že je snadné měnit jejich rozměry, nebo jiné parametry. Podporují ho však jen některé Computer-Aided Design (CAD) programy, např. open-source program OpenSCAD [12] nebo komerční program Fusion 360 od společnosti Autodesk. OpenSCAD je nástroj, používající k modelování skriptovací rozhraní (tj. model je vykreslen pomocí skriptu). To přináší velkou flexibilitu, ale zároveň požaduje znalosti a zkušenosti s použitím daného skriptovacího jazyka pro úpravy i vytváření modelů. Fusion 360 je zástupcem skupiny „klasických“ CAD programů a je v komunitě 3D tisku oblíbený a známý. Parametrické modelování v něm není tak flexibilní, ale stále umožňuje jednoduché změny, jako jsou změny rozměrů, změny úhlů, či změny počtu objektů v poli. Oproti programu OpenSCAD je v něm těžké (možná i nemožné) implementovat složitější omezení parametrů tak, aby např. některé objekty při posunu nekolidovaly. Zde budeme předpokládat, že taková omezení nejsou pro návrh mikrofonního pole nezbytně nutná, a návrh mikrofonního pole vytvoříme v tomto programu, zejména pro jeho rozšířenost.

1.4 Schopnosti FDM 3D tisku

Technologie FDM tisku se stala masově rozšířenou a cenově dostupnou technologií aditivní výroby [17], což ji předurčuje pro použití na účely této práce. [17] dále uvádí základní charakteristiky této technologie. Výrobek je vytvořen souvislým nanášením rozehřátého termoplastu a jeho chladnutím, ve vrstvách. Materiál je navinut ve formě vlákna s konstantním průměrem na cívce, ze které je odebírán tzv. extrudérem. Ten tlačí vlákno do vyhřívané trysky s malým průměrem, skrz kterou je roztavený materiál nanášen pro tvorbu další vrstvy. Po nanesení materiál zchladne pod teplotu skelného přechodu (tím je výrobek až do aktuálně vytisknuté vrstvy relativně pevný). Místo, kde dojde k nanesení materiálu, je určeno pohybem v osách x a y, což může být zajištěno pohybem trysky nebo tisknutého výrobku.

Slabé místo této technologie spočívá v nutnosti tisknout i tzv. podpěry [17], které zajišťují chladnoucí materiál při tisku výčnělků nebo jinak málo podepřených struktur. Kvalita tisku na podpěrách je přitom nižší, než jinde (z důvodu velkých vůlí mezi podpěrou a tisknutým dílcem, ve kterých se materiál během chladnutí „krotí“), je proto dobré během návrhu zjednodušit model tak, aby se omezil počet a velikost potřebných podpěr. Tento fakt je brán v potaz při návrhu celé konstrukce v části 5.2, která poznatky z této části aplikuje v praxi.

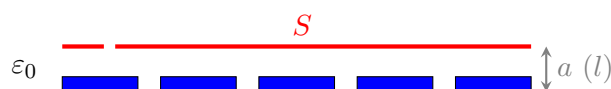
Kapitola 2

MEMS mikrofony

Pro konstrukci kompaktních polí je vhodné užít malých mikrofonů, aby bylo možné pole minimalizovat. Dalším požadavkem je podobnost mikrofonů z hlediska akustických vlastností. Takové požadavky splňují zejména MEMS mikrofony, což jsou v podstatě specificky konstruované elektrostatické měniče.

2.1 Teorie elektrostatických měničů

O teorii elektrostatických měničů pojednává zdroj [18]. Elektrostatický měnič je struktura schopná převodu akustického vlnění na změny kapacity. Tvoří ji 2 vzduchem oddělené elektrody - pevná a pohyblivá (membrána). Představu si lze udělat díky obrázku 2.1.1.



Obrázek 2.1.1: Vnitřní struktura elektrostatického měniče. Modře je vykreslena pevná elektroda s perforací, červeně membrána s otvorem pro vyrovnání statického tlaku

2.1.1 Podmínky kvazistatické stability

Aby byla struktura měniče použitelná pro účely snímání zvuku, musí být kvazistaticky stabilní. Kvazistatická stabilita určuje podmínky, za kterých nedojde k porušení izolační pevnosti dielektrika izolační mezery (vzduchu) mezi elektrodami, či dokonce zhroucení membrány. V rámci modelování soustavy pro účely stability uvažujeme pohyblivou membránu připojenou k elastoru, rezistoru a inertoru [18]. Mezi elektrody je přiloženo napětí, které umožňuje snímání kapacity a zároveň silově působí na elektrody tak, že dojde ke zmenšení tloušťky vzduchové mezery. Pokud se pokusíme odvodit podmínky kvazistatické stability systému, zjistíme, že aby byl systém stabilní, musí být tuhost elastoru větší než

$$s_{12} = \frac{\varepsilon_0 S U_0^2}{\left(\frac{2}{3}a\right)^3}, \quad (2.1.1)$$

při vzdálenosti elektrod

$$l_{12} = \frac{2}{3}a, \quad (2.1.2)$$

kde ε_0 je permitivita vakua, S plocha elektrod, U_0 přiložené napětí a a vzdálenost elektrod bez přiloženého napětí.

Z konstrukčních důvodů se často pevná elektroda opatřuje dírami. Podmínka minimální tuhosti pro kvazistatickou stabilitu se potom změní na

$$s > \frac{\varepsilon_0 S (1 - \frac{S_d}{S}) U_0^2}{(\frac{2}{3}a)^3}, \quad (2.1.3)$$

kde S_d je plocha děr a S plocha pevné elektrody.

2.1.2 Citlivost měniče

Pokud platí podmínky kvazistatické stability, můžeme dále rozvinout pracovní režimy měniče - režim konstantního napětí a konstantního náboje. U mikrofonů je využíván režim konstantního náboje, proto se zaměříme na něj.

Pevná elektroda je připojena přes velmi velký odpor na zdroj konstantního polarizačního napětí a přes sériovou kapacitu na signálové rozhraní. Membrána je připojena na společný pól (GND). Po zapnutí polarizačního zdroje dojde k přechodovému jevu, kterým se pomalu nabije pevná elektroda na napětí, které se v čase limitně blíží polarizačnímu. Při nabíjení protéká do pevné elektrody proud a hromadí se v ní náboj. Po nabití se náboj v elektrodě nemění. Pokud se v okolí měniče objeví akustické vlnění, začne membrána kmitat. Při odvozování citlivosti měniče vyjdeme z upraveného vztahu pro výpočet kapacity deskového kondenzátoru (neboť se jeho konstrukce podobá konstrukci měniče):

$$Q = CU = \frac{\varepsilon_0 S U}{l}, \quad (2.1.4)$$

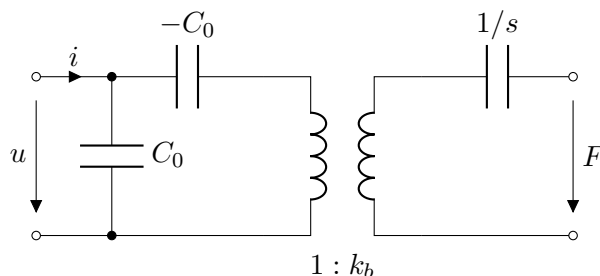
kde C je kapacita měniče, U napětí na měniči, ε_0 permitivita vakua, S plocha elektrod a l vzdálenost elektrod. Dále vyjádříme totální diferenciál Q :

$$dQ = -\frac{\varepsilon_0 S}{l^2} U dl + \frac{\varepsilon_0 S}{l} dU \quad (2.1.5)$$

Kmitavý pohyb membrány se zjednodušeně dá pokládat za pístový, avšak pro reálné případy je lepší vzít v úvahu obecnější případ. Počítáme proto s tzv. průměrnou výchylkou $\bar{\xi}$, která vyjadřuje, jak velká výchylka pístového kmitání by měla stejné účinky na výstupní signál, jako aktuální kmitání membrány. Ve výpočtu ji substituujeme za dl . Pokud uvažujeme, že náboj v měniči zůstává stejný (neboť je odpor polarizačního zdroje velmi velký), můžeme položit $dQ = 0$. Dále uvažujeme, že střídavé napětí u na měniči vyvolané vnější silou (zvukovým vlněním) je zanedbatelné vůči polarizačnímu napětí U_0 , tj. $u \ll U_0$ a můžeme si vyjádřit hodnotu u :

$$dU \approx u = U_0 \frac{\bar{\xi}}{l}. \quad (2.1.6)$$

Z podrobnějšího rozboru systému [18] lze dospět k náhradnímu schématu elektrostatického měniče (viz obr. 2.1.2), kde C_0 je kapacita měniče v klidovém stavu, $k_b = \frac{\varepsilon_0 S U_0}{l_0^2}$ činitel měniče (l_0 je vzdálenost elektrod v klidovém stavu), s tuhost elastoru, u střídavá složka napětí, i střídavá složka proudu a F střídavá složka síly působící na membránu.



Obrázek 2.1.2: [18] Náhradní schéma elektrostatického měniče

Jelikož se bavíme o elektrostatickém měniči zvukovém, je vhodné zavést i citlivost na akustický tlak:

$$\sigma = \frac{u}{p} = U_0 \frac{\bar{\xi}}{p l_0}. \quad (2.1.7)$$

Tento obecný výraz se podle zdroje [18] dá dále upravit na méně obecný tvar, pokud známe hodnotu vnitřní mechanické impedance měniče \mathbf{Z}_m :

$$\sigma = \frac{S k_b}{j\omega C_0 \mathbf{Z}_m} \quad (2.1.8)$$

2.2 Technologie a vlastnosti MEMS mikrofonů

Micro-Electro-Mechanical System (MEMS) je, jak název napovídá, technologie výroby malých (v řádech μm) elektro-mechanických struktur. Jedním z vyráběných typů MEMS zařízení je i elektrostatický mikrofon. Zdroj [19] dále uvádí přednosti mikrofonů vyráběných touto technologií, kterými jsou např.

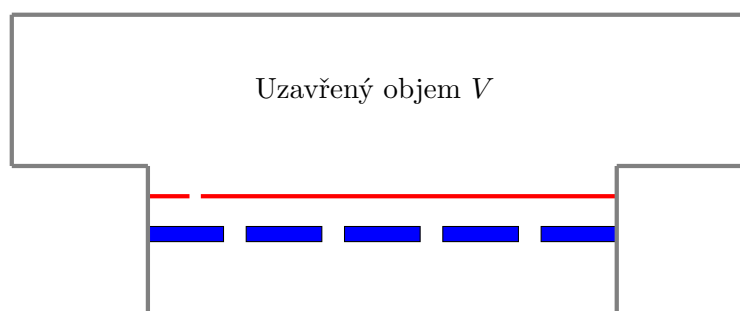
- Výdrž vysokých teplot a snadná miniaturizace do SMD součástky
- Levná výroba
- Výrobní reprodukovatelnost vlastností a charakteristik
- Malé rozměry
- Dobrá citlivost a fázová frekvenční odezva

Pro aplikaci MEMS mikrofonů v mikrofonních polích je důležitá zejména zmíněná reprodukovatelnost, která zaručuje, že všechny mikrofony v poli budou mít téměř stejné vlastnosti. Pouze malý rozdíl, např. ve fázové charakteristice,

by totiž mohl způsobit zcela nepřesné vyhodnocení např. směru, ze kterého zvuk vychází. MEMS mikrofony jsou obvykle vyráběny technologií podobnou výrobě polovodičových čipů, tedy fotolitografií.

■ Vnitřní struktura

Článek [21] popisuje vnitřní strukturu a její vlastnosti. Ta je tvořena membránou a pevnou elektrodou, která je charakteristická perforováním, které je v některých případech nutné (pokud je membrána umístěna zevnitř mikrofону, potom perforací prochází zvukové vlnění), jindy je přítomno z technologických důvodů. Boční pohled na strukturu MEMS mikrofону je na obr. 2.2.1.



Obrázek 2.2.1: Vnitřní struktura MEMS elektrostatického měniče. Modře je vykreslena pevná elektroda s perforací, červeně membrána s otvorem pro vyrovnání statického tlaku, šedě okolní konstrukce

Vlivem perforování a změnou konstrukčního uspořádání (jako je např. změna vzdálenosti elektrody od membrány) dochází ke změně akustických rezonančních parametrů (např. rezonanční frekvence, vlastní tlumení) struktury. Tato rezonance bývá u MEMS mikrofónů poměrně výrazná a patří jistě k nevýhodám.

Během provozování mikrofónu může docházet k významným změnám okolních podmínek, zejména tlaku vnějšího média (obvykle vzduchu), ať už meteorologickými vlivy nebo změnou nadmořské výšky. Aby u mikrofónu mohlo docházet k vyrovnání statického tlaku s tlakem okolním, obsahuje membrána malý otvor. Technologická snaha vede k co možná nejmenšímu otvoru, který bude procházejícímu vzduchu klást velký odpor (a tedy limitovat jeho proud). To je důležité kvůli omezení akustického zkratu. Na nízkých frekvencích se však zkrat stejně projeví - jako horní propust.

■ 2.3 Vybrané parametry MEMS mikrofónů

■ Frekvenční charakteristika

Frekvenční charakteristika MEMS mikrofónu je ovlivněna především výše zmíněnou rezonancí, ovlivněnou vnitřními rozměry struktury a perforací pevné elektrody. Při nízkých frekvencích se navíc projeví akustický zkrat způsobený otvorem v membráně. Frekvenční charakteristika mikrofónu zvoleného pro

tuto bakalářskou práci (později v praktické části - kapitola 3.1) je na obrázku 3.1.3. Je vidět projev akustického zkratu na frekvencích v desítkách Hz a rezonance nad frekvencí 20 kHz.

■ Šum

U mikrofonů bývá šum charakterizován obvykle dvěma důležitými parametry [20]: odstup signálu od šumu SNR a ekvivalentní vstupní šum EIN [8].

Odstup signálu od šumu je u mikrofonů obvykle definován jako poměr amplitudy výstupního signálu při buzení referenčním zdrojem 1 kHz, 94 dB SPL (tj. 1 Pa), ku amplitudě výstupního šumu v klidovém stavu (tedy bez buzení). Ekvivalentní vstupní šum EIN udává, jak velkou hladinou akustického tlaku bychom museli budit mikrofon, aby jeho výstupní signál měl stejnou amplitudu, jako má v klidovém stavu v důsledku vlastního šumu.

MEMS mikrofony nebyvaly dříve používány v aplikacích na snímání tichých signálů, jelikož se u nich projevoval vysoký ekvivalentní vstupní šum EIN. Podle [20] je dominantním šumem v MEMS strukturách zejména tzv. tepelný šum, vznikající ve vstupním otvoru, perforaci pevné elektrody a otvoru membrány. Je důsledkem náhodného pohybu molekul vzduchu při jejich průchodu těmito strukturami, které mají z hlediska toku vzduchu odporovou povahu. Tento šum tedy není redukovatelný zvýšením citlivosti, právě naopak - při vyšší citlivosti se tento šum zesílí dohromady se signálem a SNR tak zůstane stejné. Snížení hodnoty šumu se tedy provádí optimalizací konstrukce vnitřní struktury. Jako u všech elektronických zařízení přispějí ke zmenšení šumu i nízkošumové analogové obvody, které signál zpracovávají (např. nízkošumový zesilovač).

Mikrofon vybraný pro tuto práci (v části 3.1) má udávaný SNR typ. 65 dBA a EIN typ. 29 dBA SPL.

■ Směrnost

MEMS mikrofony se dají dále charakterizovat směrností, přičemž jsou téměř výlučně všesměrové. To je zejména z důvodu menších rozměrů pouzdra, do kterého se dá jen obtížně zintegrovat vícero nezávislých struktur. Navíc na vývoj směrového MEMS mikrofonu ani není velký tlak, neboť se (právě díky rozměrům pouzdra) dají snadno realizovat mikrofonní pole s definovanou směrností.

■ THD

U aplikací, které vyžadují velký dynamický rozsah snímání, je důležité brát v potaz koeficient Total Harmonic Distortion (THD), který určuje míru nelineárního zkreslení výstupního signálu, vzhledem ke vstupnímu signálu, viz rovnice 2.3.1:

$$\text{THD} = \frac{\sqrt{U_1^2 + U_2^2 + \dots}}{U_0}, \quad (2.3.1)$$

kde U_0 je efektivní hodnota napětí základní (budící) frekvence a U_1, U_2, \dots jsou efektivní hodnoty napětí vyšších harmonických frekvencí od frekvence budící. THD je závislý na vstupní hladině akustického tlaku a udává se v %. S koeficientem THD úzce souvisí také tzv. Acoustic Overload Point (AOP), který udává, při jaké hladině akustického tlaku dojde k překonání určené „mezni“ hodnoty THD, za kterou už měnič signál zkresluje příliš. Typicky se udává při překonání THD o 10 % [8]. Mikrofon vybraný pro tuto bakalářskou práci (viz 3.1) se vyznačuje koeficientem THD max. 1 % (avšak typicky 0,3 %) při buzení zdrojem 105 dB SPL a koeficientem AOP typ. 117 dB SPL při podmínce THD = 10 %.

■ Další parametry

Citlivost je dalším důležitým parametrem. Byla popsána v části 2.1.2, a tak se jí zde již nebudeme blíže věnovat. K dalším parametrům patří mj. rozsah napájecího napětí, dynamický rozsah, činitel potlačení změn napájecího napětí, či proud odebíraný ze zdroje [8].

■ 2.4 Typy audio-rozhraní

Obecně se dají mikrofony rozdělit dle typu signálového rozhraní na analogové a digitální.

Analogové mikrofony jsou pro návrh sférického pole méně vhodné, jelikož je třeba řešit umístění externího A/D (analogově-digitálního) převodníku, který zapříčiňuje zvětšení plošných spojů (jelikož je třeba více součástek), nebo, v případě umístění A/D převodníků vně sférického pole, zvyšuje počet nutných signálových vodičů, jelikož každý mikrofon potřebuje samostatný vývod signálu. Při takové konstrukci rovněž může docházet ke zkreslení signálu v důsledku rušení nebo přeslechů.

Mikrofony s digitálním rozhráním tyto nedostatky řeší integrovaným A/D převodníkem i výstupním rozhráním přímo v pouzdře mikrofonu. Existuje vícero rozšířených typů digitálních rozhraní, které jsou rozebrány dále. Informace jsou převzaty primárně ze zdroje [9].

■ 2.4.1 Rozhraní PDM

Zdroj [16] popisuje vlastnosti rozhraní Pulse-Density Modulation (PDM), které umožňuje přenos až 2 kanálů na jedné lince. Linku tvoří vodiče Clock (CLK) a Data (DATA). Kanály se na společné lince DATA střídají podle polaritty hrany signálu CLK. Zdroje signálu PDM navíc mají vstup Left/Right (LR) [16], který určuje, na kterou hranu signálu CLK mají reagovat (poslat data). V každém mikrofonu je přítomen zesilovač, jehož výstup směřuje do PDM modulátoru, který obsahuje sigma-delta modulátor. Ten převádí analogový signál na digitální - ve formátu PDM. Data se přenáší ve formě slov o délce 32 bitů, tedy při 2 kanálech frekvencí 64x vyšší, než je vzorkovací frekvence zvukového signálu. Je-li tedy nutné přenést signál o širší pásma

např. 24 kHz (jehož vzorkovací frekvence je tedy min. 48 kHz), je taktovací frekvence:

$$f_{CLK} = f_s \cdot 64 = 3\,072 \text{ MHz}, \quad (2.4.1)$$

kde f_{CLK} je frekvence taktování a f_s je vzorkovací frekvence. Ve chvíli, kdy vysílač nemá vysílat data (nastala opačná polarita hrany CLK signálu, než je pro mikrofon určující), přepne se výstup DATA do stavu vysoké impedance a tím umožní odesílat data druhému vysílači. PDM rozhraní má minimalizovaný počet komponentů (nebo funkcionalit) ve zdroji signálu (mikrofonu). Proto je přijímač PDM dat poměrně složitý a mj. musí obsahovat decimální filtr. Navíc toto rozhraní umožňuje připojení pouze 2 mikrofonů na 1 lince, nebudeme se mu proto hlouběji věnovat (jde nám o vytvoření pole o alespoň 16 mikrofonech - viz Úvod).

2.4.2 Rozhraní I2S

Název tohoto rozhraní vznikl zkrácením pojmenování „Inter-IC Sound“ na „IIS“, což časem přešlo ve tvar I2S (čti „I-squared-S“). Jak název napovídá, jeho účel je přenášet zvuková data mezi čipy. Řeší problém se složitostí přijímače přemístěním decimálního filtru na vysílací stranu a na lince tedy může být standardizovaná vysílací frekvence (např. 48 kHz). Data jsou vysílána ve formě dvojkového doplňku celého čísla [13].

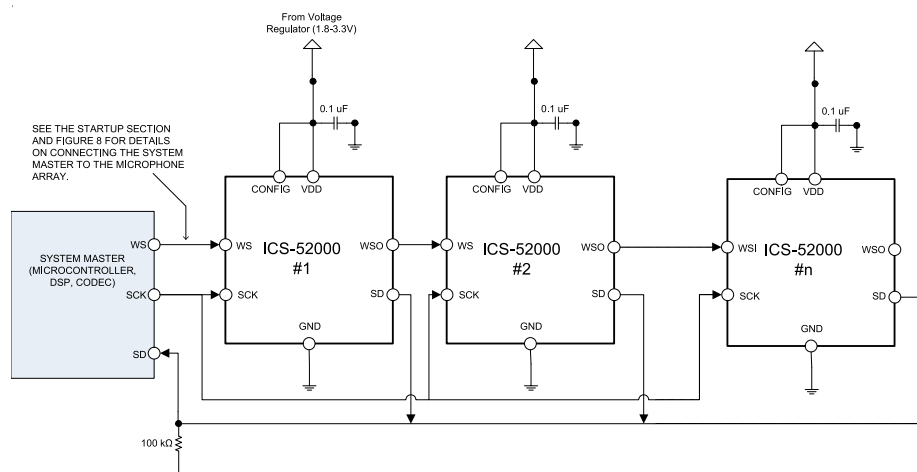
Rozhraní I2S je tvořeno třemi signálovými vodiči SCK, SD a Left-Right Clock (LRCLK), který volí kanál (L nebo R), který může právě vysílat svá data. Taktovací signál zde tedy nepřepíná kanály, ale jen řídí rychlost přenosu dat. Poměr taktovací frekvence ku vzorkovací je totožný s PDM (viz 2.4.1 - tj. 64). Délka přenášených slov jednoho kanálu je tedy až 32 bitů. Bohužel však toto rozhraní umožňuje připojit také jen maximálně 2 mikrofony na 1 linku, takže je pro naše použití také nevhodné.

2.4.3 Rozhraní TDM

Podobá se rozhraní I2S, ale používá zřetězený signál WS. Místo paralelního zapojení všech mikrofonů na vodič LRCLK je veden 1 vodič WS vždy mezi dvěma mikrofony (jak je patrné na obrázku 2.4.1).

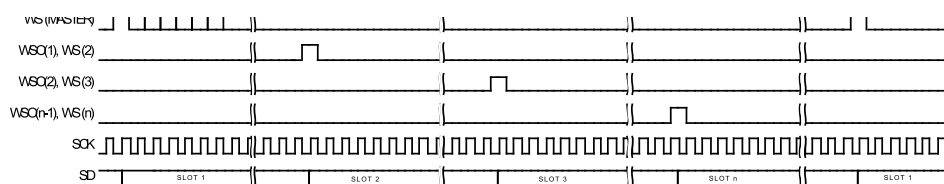
Na počátku odešle přijímač dat signál po vodiči WS 1. mikrofonu. Mikrofon po detekci vzestupné hrany tohoto signálu začne vysílat data souvisle s taktovacím kmitočtem (signálem SCK). Když se blíží odvysílání všech dat (obvykle - časově - méně než 1 bit před koncem), tak tento mikrofon odešle signál WS na svůj výstup WSO a tento signál přijímá další mikrofon. Mikrofony se takto postupně střídají, po odeslání dat posledním mikrofonem přichází nový signál od přijímače dat. Vysílání dat je uskutečněno a taktováno stejně jako u I2S. Jelikož je však nutné zajistit přenos větší datovou rychlostí (při použití více než 2 mikrofonů), je zde dosahováno vyšších taktovacích kmitočtů. Délka přenášených slov je až 32 bitů, jako u I2S. Např. pro $n = 16$ mikrofonů se vzorkovací frekvencí $f_s = 48 \text{ kHz}$ je taktovací kmitočet f_{SCK}

$$f_{SCK} = n \cdot f_s \cdot 32 = 16 \cdot 48\,000 \cdot 32 = 24,576 \text{ MHz}. \quad (2.4.2)$$

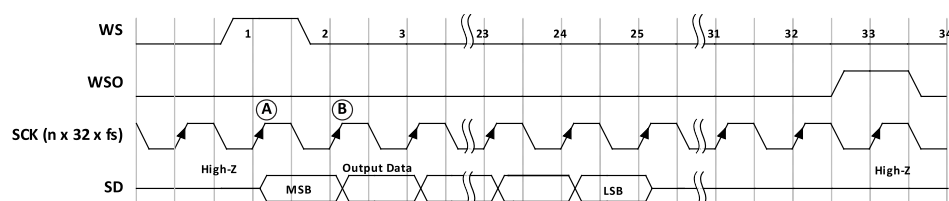


Obrázek 2.4.1: [8] Zapojení mikrofonů na sběrnici TDM

Časování sběrnice TDM může být lépe patrné z časových diagramů 2.4.2 a 2.4.3. Tato sběrnice umožňuje připojení až 16 mikrofonů na 1 lince. To z ní činí vhodnou pro použití v konstruovaném sférickém mikrofonním poli.



Obrázek 2.4.2: [8] Časování sběrnice TDM - celkový přehled



Obrázek 2.4.3: [8] Časování sběrnice TDM - detail 1 časového okna WS



Část II

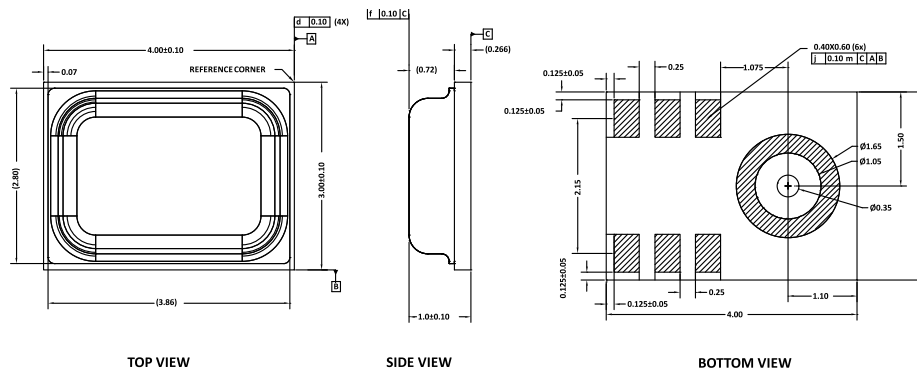
Praktická část

Kapitola 3

Návrh elektrické hardwarové části

3.1 Výběr vhodného typu mikrofону

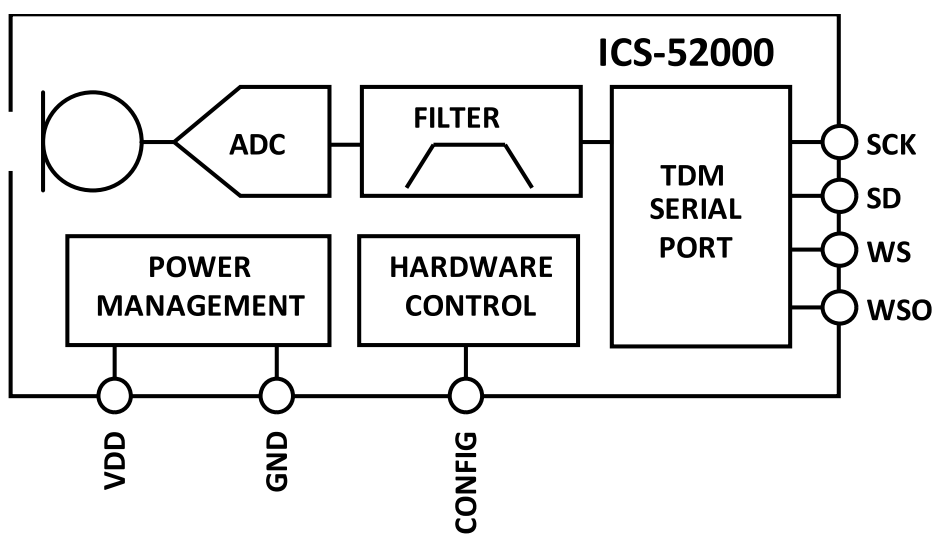
Pro konstrukci prototypu mikrofonního pole byl zvolen MEMS mikrofón ICS-52000 od TKD InvenSense. Tento typ byl zvolen, jelikož je jediným široce dostupným MEMS mikrofónem s rozhraním TDM, podporujícím až 16 mikrofónů na 1 datovém vodiči. Podle [8] je vyráběn v pouzdře o délce 4 mm a šířce 3 mm (viz obr. 3.1.1), tudíž s ním lze pole konstruovat při dodržení „rozumných“ rozměrů - např. 200 mm v průměru. V dolní části mikrofónu je patrný otvor pro zvukové vlny.



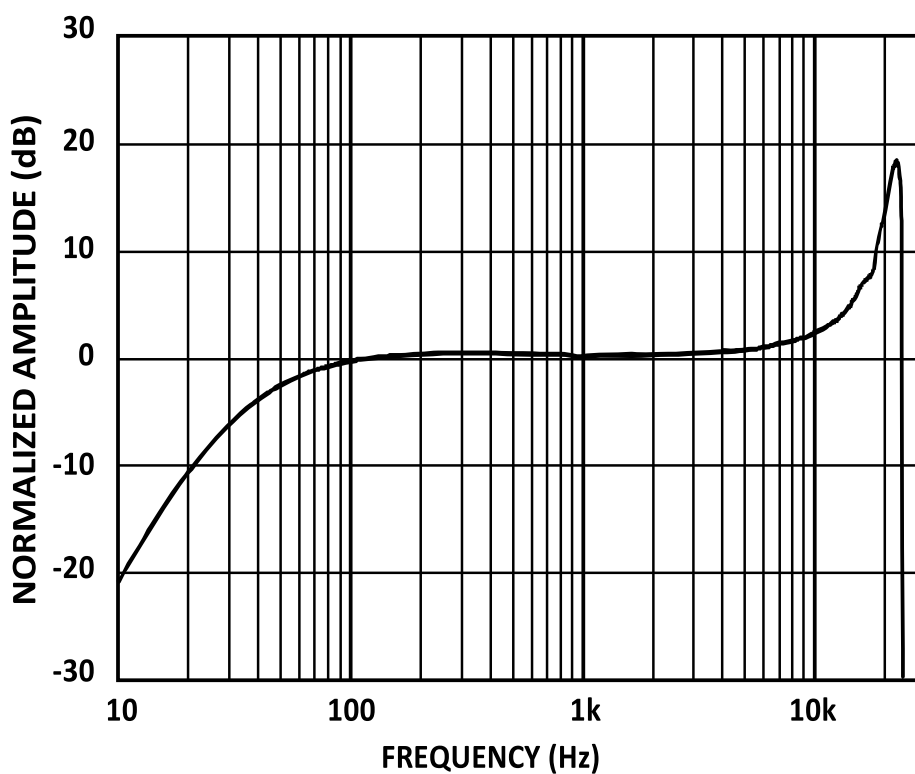
Obrázek 3.1.1: [8] Výkres pouzdra mikrofónu ICS-52000

Na obrázku 3.1.2 je zjednodušené blokové schéma vnitřních částí ICS-52000. Kromě samotného kondenzátorového mikrofónu je zde ADC (analogově-digitální převodník), frekvenční filtr a TDM rozhraní pro odesílání dat.

Podle frekvenční charakteristiky poskytované výrobcem (viz obr. 3.1.3) má mikrofón relativně plochou frekvenční charakteristiku v oblasti od cca 80 Hz do 10 kHz. V úvodní části katalogu [8] dokonce výrobce uvádí frekvenční rozsah mikrofónu 50 Hz až 20 kHz.



Obrázek 3.1.2: [8] Bloková struktura vnitřku mikrofonu ICS-52000



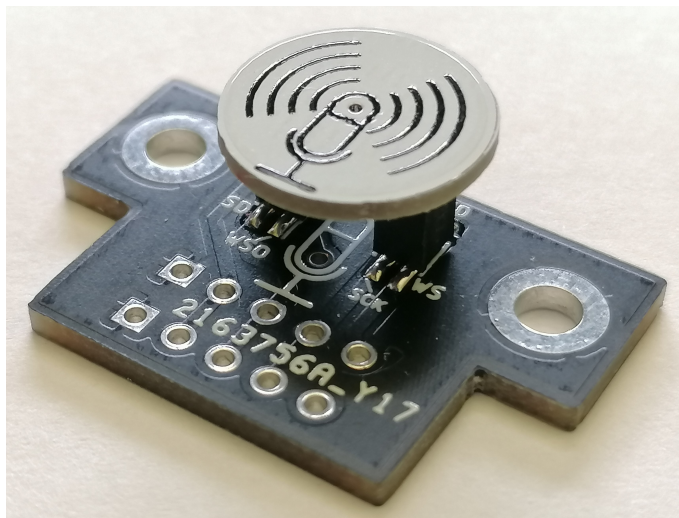
Obrázek 3.1.3: [8] Frekvenční charakteristika mikrofonu ICS-52000

3.2 Návrh plošných spojů

V této kapitole je popsán návrh plošných spojů, kterých bylo zapotřebí pro tuto práci. Plošné spoje pro zabudování do konstrukce pole jsou řešeny níže, plošný spoj pro připojení pole do Raspberry Pi je z důvodu lepšího tematického členění přesunut do kapitoly 3.3.2. Plošné spoje pro zabudování MEMS mikrofonů do konstrukce musí splňovat následující požadavky:

- Tvar kruhu - pro co nejmenší narušení sférického tvaru pole
- Malé rozměry
- Co nejsnazší vyměnitelnost (při poruše mikrofonu)
- Snadné upevnění ve vytištěné konstrukci
- Konektory - pro snadné připojení vodičů

Vzhledem k těmto požadavkům byla vyvinuta dvojice plošných spojů. Pro představu je jejich vyhotovení na obr. 3.2.1. Jejich schémata a návrhy z editoru KiCad jsou v příloze C.



Obrázek 3.2.1: Vyrobena sestava plošných spojů pro instalaci do vytištěné konstrukce

První (bílý) plošný spoj nese samotný MEMS mikrofon a jeho vnější (zadní) stěna lícuje s vnější stěnou mikrofonní konstrukce. Druhý plošný spoj je uchycen šrouby zevnitř a plní funkci adaptéru (viz příloha D). Jedna sada jeho konektorů, směřující směrem ven z konstrukce, má funkci napojení DPS s MEMS mikrofonem, a to jak napojení elektrického, tak i mechanického. Druhá sada jeho konektorů směřuje opačným směrem a slouží k připojení napájení a vyvedení signálu na vodiče, po kterých se signál dostane do zařízení zpracovávajícího signál.

3.2.1 DPS pro MEMS mikrofon

Jak bylo řečeno, vnější strana této DPS v místě instalace zastupuje vnější sférickou plochu mikrofonního pole. Jelikož je pro dobré akustické vlastnosti nutné co nejlépe zachovat kulový tvar, jeví se jako přípustné 2 návrhové varianty - zakřivený plošný spoj (který je možno instalovat i na malé pole - jelikož nedojde ke změně zakřivení), nebo velmi malý konvenční (plochý) plošný spoj instalovaný na takovém mikrofonním poli, jehož velikost bude výrazně větší, než rozměry této DPS (a tak bude změna zakřivení v místě instalace zanedbatelná).

Zakřivený vs. pevný plošný spoj

Zakřivený plošný spoj může být realizován např. vhodně uchyceným pružným plošným spojem. Nesmíme však zapomínat, že návrh by měl být flexibilní a levný (jak je uvedeno v kapitole Úvod), tento typ plošného spoje však levný není a navíc by při jeho uchycení na povrchu koule mohlo docházet k nepřípustným deformacím („krabatění“) a bylo by tak třeba použít neflexibilní metody uchycení, jako je lepený spoj. Návrh druhé jmenované varianty je výrazně levnější a navíc může být uchycen pouze pomocí konektorů, a tak zajistit flexibilitu návrhu a snadnou výměnu v případě poruchy. Proto se návrh dále ubírá touto cestou.

Aby se zjednodušilo polohování mikrofonu na povrchu pole (úhlem elevace a azimutu) a zmírnily se dopady změny zakřivení na akustiku je MEMS mikrofon umístěn svým snímacím otvorem doprostřed této DPS. Dále je potřeba vyvést z DPS napájení (2 vodiče) a signály (4 vodiče).

Výběr konektorů

V rané fázi návrhu bylo počítáno s použitím dvou třípólových konektorů typu JST-SH, do kterých by byly připojeny krátké spojovací kabely. Výhodou by bylo velmi dobré elektrické propojení a pevně určená polarita (DPS by tedy nešlo zapojit špatně). Bylo by ale nutné zajistit nosnou funkci jiným způsobem (např. šroubovým spojem z vnější strany) a navíc jsou tyto konektory vyráběny pouze v provedení Through-Hole Technology (THT) a byly by tak zapájeny na vnější straně DPS, kde by rušily jak vizuálně, tak akusticky. Výměna takové DPS by byla kvůli šroubovému spoji zbytečně náročná.

Také bylo promyšleno použití PCB-to-PCB („DPS-do-DPS“) konektorů používaných např. v mobilních telefonech, ale takové konektory nejsou dobře maloobchodně dostupné, vyžadují malé tolerance při instalaci a nedokáží vyvinout velkou mechanickou sílu.

Třetí, a nakonec zvolenou, alternativou byly běžně používané konektory typu „pin header-pin socket“ s roztečí kontaktů 1,27 mm. Poskytují dobré elektrické propojení a pokud se použijí v páru (2 konektory, každý s uspořádáním 2x2 kontakty) splní i nosnou funkci na výbornou. Jsou vyráběny i v provedení Surface-Mount Device (SMD), a tak nijak neovlivní zadní

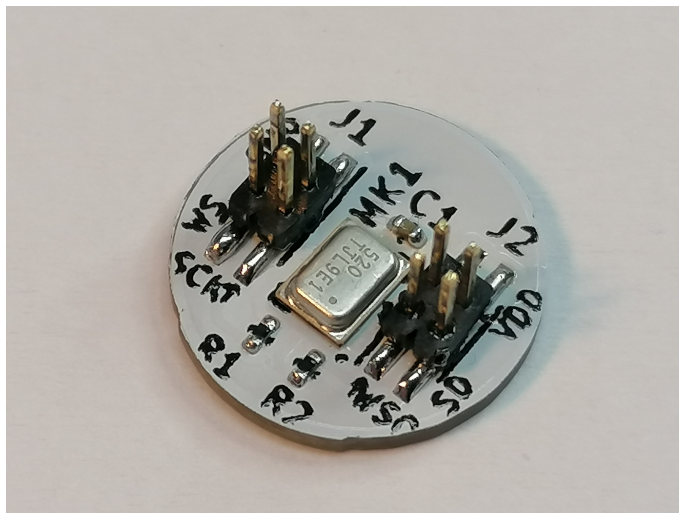
plochu DPS. Spojení je redundantní (8 dostupných pólů vs. 6 potřebných), přebytečné póly byly využity zdvojením napájecí linky (GND a VDD).

■ Polarita zapojení

Jelikož se jedná o vývoj raného prototypu, nemá tento návrh mechanickou pojistku proti zapojení špatnou polaritou (DPS otočená o 180°). Jako znamení pro určení polarity je na DPS ve vrstvě silkscreen vytisknut symbol mikrofonu, který se musí orientací shodovat se symbolem mikrofonu na druhé DPS (adaptéru). Absence mechanické pojistky by neměla představovat větší problém, jelikož výměna mikrofonu z důvodu poruchy bude pravděpodobně málo častá záležitost a znovusestavení zařízení (např. po tisku vylepšené/pozměněné konstrukce) nebude provádět laik, ale poučený pracovník.

■ Výroba

Vyhlazení napájecího napětí je řešeno osazením kondenzátoru o velikosti 0,1 μF , omezení odrazů na TDM sběrnici zase osazením rezistorů na datové vodiče SCK a SD (v současném návrhu o velikosti 100 Ω). Silkscreen (tedy potisk) plošného spoje určuje místa pro osazení (těchto i ostatních) součástek a odkazuje na jejich označení ve schématu. Výsledný návrh byl zadán k zakázkové prototypové výrobě z materiálu FR-4, tloušťce 1,2 mm, bílé barvě pájecí masky a černým potiskem. Vyrobený a osazený kus je na obr. 3.2.2. Testování funkčnosti je popsáno v kapitole 6.1.1.



Obrázek 3.2.2: Vyrobený a osazený plošný spoj pro MEMS mikrofon

■ 3.2.2 DPS - adaptér pro uchycení v konstrukci

Jak bylo řečeno na začátku části 3.2, pro konstrukci bylo zvoleno řešení dvou plošných spojů, spojených konektory „pin header - pin socket“ s roztečí kontaktů 1,27 mm. 2 jsou tedy umístěny na tomto plošném spoji (jde o typ „female“) a jejich vzájemná vzdálenost souhlasí s roztečí protikusů - tedy 7 mm. Signály se z nich dostávají přímo na výstupní konektory, tato DPS tedy nemá kromě jednoduchého propojení žádnou elektrickou funkci. Návrh zde však musel vyřešit, jak tyto signály vyvést na vodiče, které budou spojovat tyto adaptéry dohromady a vyvedou signály a napájení ven z mikrofonního pole.

■ Kabelové vedení

Jediný vodič, který je nutné pro funkci sběrnice TDM fyzicky zřetězit mezi adaptéry (a tím i mikrofony) je vodič Word Select (WS), ostatní vodiče musí být spojeny paralelně, bylo by možné je tedy vést např. od jednoho adaptéru ke všem ostatním. Takové spojení by však bylo nepraktické (u adaptéru s uzly by vznikly široké a těžké svazky vodičů a ke každému adaptéru by vedly odděleně tyto vodiče a zřetěžený signál WS).

Aby bylo propojení snadno realizovatelné a počet výstupních vodičů zůstal na minimu, je vhodné fyzicky vést všechny vodiče společně se signálem WS. Na každém adaptéru je tedy dvojice konektorů „pin header - pin socket“ s roztečí 2,54 mm, jeden typu „male“ pro přívod vodičů z předchozího adaptéru a jeden typu „female“ pro vyvedení vodičů dále. Každý z nich je pětipólový (GND, VDD, SD, SCK, WS nebo WSO). Zvolený typ konektorů sice umožňuje chybu zapojení (zapojení „obráceně“ - s otočením o 180°), ale byl zvolen s ohledem na maximální úsporu prostoru, která umožňuje co nejmenší provedení.

■ Montáž do tištěné konstrukce

Adaptér je třeba do konstrukce vhodně uchytit. Toto řešení musí být průchodné zejména z hlediska možností 3D tisku (nesmí obsahovat složité výčnělky) a je také vhodné velikost adaptéru minimalizovat, aby nevznikly problémy s kolizí s vnitřní zakřivenou stěnou pole. Nabízí se řešení uchycení pomocí „zacvakávacího“ mechanismu, v případě použití 3D tisku je však takové řešení zdlouhavé na doladění vůlí, náchylné na poškození a v neposlední řadě není přenositelné mezi různými typy tiskáren nebo materiálů (je třeba znovu ladit vůle). Prosté nalepení zase neumožňuje snadnou výměnu konstrukce.

Zvoleným řešením je dvojice šroubových spojů po stranách od spojení s mikrofonním plošným spojením. V DPS jsou otvory pro prostrčení šroubů M3 s libovolným stoupáním, či vrutů o podobné velikosti. Jak se tomuto řešení přizpůsobuje tištěná konstrukce je popsáno v kapitole 5.1.

■ Výroba

Plošné spoje byly vyrobeny prototypovou výrobou v externí firmě a elektricky otestovány. Všechny jsou plně funkční (fotografie jednoho kusu je na obr. 3.2.3. Ověření funkčnosti je popsáno v kapitole 6.1.1.



Obrázek 3.2.3: Vyrobenný a osazený plošný spoj pro montáž do tištěné konstrukce

3.3 Vyvedení signálu

Původně uvažovaný návrh počítal s propojením všech 16 mikrofonů do jedné TDM sběrnice. Je ale třeba poznamenat, že mnoho zařízení dostupných na trhu (včetně použitého Raspberry Pi) může mít problémy s dosažením vysokých frekvencí, kterých je třeba pro přenos s vysokým vzorkovacím kmitočtem 48 kHz. Proto bylo později rozhodnuto, že mikrofony budou rozděleny do 2 skupin po 8. Rozmístění mikrofonů na obou polosférách v demonstračním řešení však není stejné (viz [6]), spodní polosféra je osazena 10 mikrofony, zatímco horní jen 6. Mikrofony jsou tedy rozděleny do obou skupin tak, že 1. zahrnuje všechny z horní polosféry a 2 náhodně vybrané, poblíž sebe ležící, ze spodní polosféry. Druhá skupina obsahuje zbývající mikrofony. Obě sběrnice jsou vyvedeny do navrženého TDM adaptéru, který umožňuje jejich případné zkombinování do 1 TDM sběrnice nebo ponechání v odděleném stavu. Adaptér je detailněji popsán v kapitole 3.3.2. Vedení signálu do desky je zajištěno dvěma stíněnými 5žilovými kabely (z důvodu vysokých frekvencí - až 24,576 MHz - viz rovnice 2.4.2). Z mikrofonního pole jsou vyvedeny spodním otvorem (viz 5.4).

3.3.1 Signálové a napájecí vedení

Propojky mezi plošnými spoji jsou z hlediska vyšších provozních frekvencí realizovány (stejně jako vnější vedení) stíněným 5žilovým kabelem. Konkrétně jde o kabel výrobního typu UL2547 s 5 vnitřními vodiči (nezahrnuje stínění) s průřezem vodičů podle měřítka 26AWG, což odpovídá průřezu $0,14 \text{ mm}^2$. Na jejich koncích jsou nakrimpované konektory typu DuPont s roztečí kontaktů 2,54 mm, které jsou kompatibilní s konektory použitými na plošném spoji popsaném výše (v kapitole 3.2.2). Stínění je připojeno k vodiči GND. Propojovací vodič mezi spodní a horní polosférou je výrazně delší, aby umožnil kompletní sféru, k čemuž je vyžadována odolnost vůči několika plným otočením, vzájemně, mezi polosférami.

Kabel je veden do konstrukce, kde je zapojen do prvního vhodného mikrofonu. Odtud putuje signál po propojkách až do 8. mikrofonu, odkud je veden jiný kabel ven z konstrukce. To umožňuje vyvedení signálu Word Select Output (WSO), což je nezbytné pro možné zřetězení obou 8mikrofonových větví. Celkem tedy do konstrukce vedou 4 5žilové kabely.

3.3.2 Adaptér pro zapojení do Raspberry Pi

Jak bylo nastíněno v úvodu této podkapitoly (3.3), zvolené zapojení (2 samostatné větve po 8 mikrofonech) vyžaduje použití speciálního adaptéru schopného přepojovat tyto 2 větve do různých konfigurací, podle aktuálních potřeb. Fotografie hotového adaptéru si lze prohlédnout na obr. 3.3.1. Schéma, návrh plošného spoje a další fotografie adaptéru si lze prohlédnout v příloze C. Adaptér je navržen pro použití primárně s Raspberry Pi, je tedy vybaven 40pólovým konektorem pro přímé spojení. Druhé zařízení pro zpracování

signálu je možno volitelně připojit na univerzální sekundární konektor. Mikrofonní pole je do adaptéru připojeno 4 konektory typu A2506. Tyto konektory byly zvoleny s ohledem na uživatelskou přívětivost a ochranu zařízení, jelikož zde se, narozdíl od vnitřních propojení v mikrofonním poli, počítá i s účastí neodborné, či náležitě nepoučené, obsluhy.

■ Konverze I2S na TDM

Z důvodů, které jsou popsány v kapitole 4.2, je použit v Raspberry Pi prozatímně program pro připojení mikrofonů sběrnici I2S s nastavenou vzorkovací frekvencí v násobcích vzorkovací frekvence pro 1 mikrofon. To umožňuje takto zpracovat data z vícero mikrofonů, jen je nutné frekvenčně vydělit signál Left-Right Clock (LRCLK), aby odpovídal požadovanému signálu WS. Pro toto vydělení byly navrhovány 2 možné přístupy - zapojení několika klopných obvodů typu D nebo přímé využití čítače. Zvolená byla druhá varianta, z důvodu jednoduššího zapojení.

Aby vzestupná hrana vyděleného signálu byla ve stejné časové pozici, jako první vzestupná hrana signálu LRCLK (a tím byla zajištěna synchronizace vysílaných dat s jejich tříděním v přijímači), je nutné použít čítač dolů (tedy odečítací čítač). Signál WS je potom vyveden z vybraného paralelního výstupu čítače. Podle čísla výstupu se určí, kolik sériově spojených mikrofonů bude možno k desce připojit (přímý signál LRCLK \Rightarrow 2 mikrofony, LRCLK/2 \Rightarrow 4 mikrofony, LRCLK/4 \Rightarrow 8 mikrofonů, LRCLK/8 \Rightarrow 16 mikrofonů). Pro realizaci byl zvolen univerzální nahoru/dolů čítač typu 74LS191, který umožňuje (kromě volby směru čítání) i zřetězení s dalším čítačem, či přímé nahrání hodnoty. Z pohledu napájení je kompatibilní s navrženým mikrofonem (tj. toleruje napájení o hodnotě 3,3 V). Přímé nahrání hodnoty je využito pro resetování čítače, které je vhodné provést po zapnutí systému a stejně tak volitelně při běhu (např. při vytvoření časového posunu a tím narušení synchronizace dat). Vstupy přímého nahrání hodnoty (P0 až P3) jsou proto uzemněny a na vstup ovládající nahrání těchto hodnot do čítače je připojen RC článek typu „Dolní propust“, což zajistí krátké trvání nízké hodnoty napětí (což je aktivní úroveň) na tomto vstupu po zapnutí napájení. Paralelně ke kondenzátoru je připojeno tlačítko, které po stisku kondenzátor vybije a tím opět resetuje čítač.

Příliš dlouhému trvání aktivní (3,3 V) úrovně signálu WS brání zpracování výstupu čítače monostabilním klopným obvodem typu 74HC123, jehož čas aktivní úrovně je naladěn rezistorem R6 a „nulovým“ kondenzátorem C2.¹

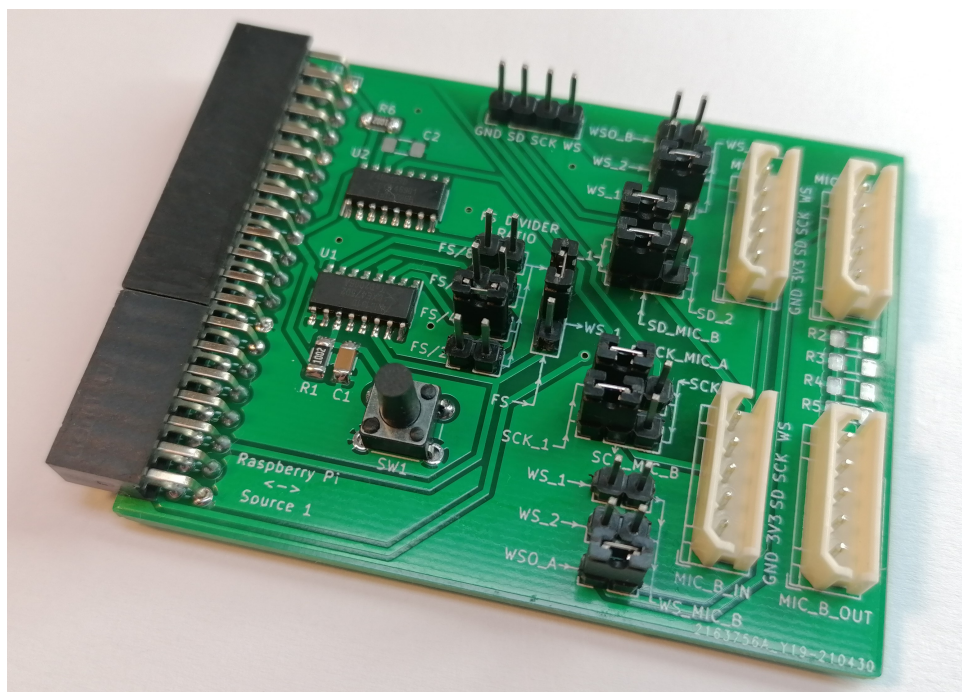
¹Hodnoty rezistoru a kondenzátoru byly vybrány podle katalogu [11], přičemž podle Fig. 7 dojde při použití rezistoru 10 k Ω a uvážení parazitní kapacity přívodů 7 pF (také dle [11]) k nastavení doby sepnutí na cca 108 ns při napájení 5 V a okolní teplotě 25 °C. Námí použité napájení je 3,3 V, a tak lze při uvážení uvedených vzorců a obrázku Fig. 8 předpokládat dobu sepnutí ve vyšších desítkách ns.

■ Konfigurace propojkami

Aby bylo možné libovolné směřování signálu a spojování obou sběrnic do 1, je adaptér vybaven řadou propojek. Ty umožňují prakticky libovolnou kombinaci zapojení:

- Propojení signálu WS, a tím spojení všech mikrofonů, a to dokonce v libovolném pořadí (pořadí osmer mikrofonů)
- Spojení vybrané větve nebo celého spojení do Raspberry Pi a/nebo do druhého zařízení
- Výběr dělicího poměru signálu LRCLK na WS

Adaptér byl vyhotoven zakázkovou prototypovou výrobou a je plně funkční (viz část 6.1.2). Fotografie osazeného adaptéru je na obr. 3.3.1.



Obrázek 3.3.1: Vyrobený a osazený plošný spoj pro připojení pole k mikroočítači a „konverzi“ I2S do TDM

Kapitola 4

Zpracování signálu

Pro zpracování signálu byly vybrány 2 koncepty. V 1. se počítá s využitím signálového procesoru, ve 2. s využitím mikropočítače. Vybraná zařízení musí splňovat podmínku pro připojení zařízení po sběrnici TDM, respektive 8 v případě kooperace dvou zařízení. To v praxi znamená, že musí být schopna zvládat na linkách SCK a SD vysoké frekvence, které jsou způsobeny kombinací vysokého počtu mikrofonů s velkou vzorkovací frekvencí (výpočet frekvence SCK pro 16 mikrofonů a vzorkovací frekvenci 48 kHz je v rovnici 2.4.2). Požadavkem na výběr zařízení je také schopnost předat výstupní data ve zpracovatelné podobě.

4.1 Zpracování signálovým procesorem

Pro zpracování dat z mikrofonů byl vybrán signálový procesor ADAU1452 [2], zejména díky schopnosti zpracovat data ze sběrnice TDM, a to v počtu až 16 zdrojů na vstupu SDATA__IN0, či SDATA__IN1 a až 8 zdrojů na vstupu SDATA__IN2, či SDATA__IN3. Procesor je na pracovišti k dispozici ve formě vývojového kitu EVAL-ADAU1452REVBZ [3], který má sice vstupy SDATA__IN0 a SDATA__IN1 obsazeny externím A/D převodníkem, ale to nepředstavuje problém, díky adaptéru (viz 3.3.2), který umí mikrofonní pole zapojit jako 2 pole o 8 mikrofonech.

Možnost připojení všech 16 mikrofonů po jedné sběrnici např. na vstup SDATA__IN0 je připravena pro budoucí práce, které mohou navrhnout plošný spoj, který bude plně integrovat tento signálový procesor dohromady např. s výstupním rozhraním do PC nebo konektory pro přímé připojení mikrofonního pole. ADAU1452 umožňuje přijatá data zpracovat a odeslat po sériovém TDM rozhraní.

Vývojový kit obsahuje D/A převodník s 8 výstupními kanály, které jdou také použít pro výstup zpracovaných dat (ale pouze pro polovinu konstruovaného pole). Na tomto vývojovém kitu byly mikrofony otestovány, podrobněji je testování popsáno v části 6.1.1. Jelikož forma výstupu neumožňuje snadný výstup dat do PC bez použití dalších externích zařízení, byla tato forma zpracování signálu v této práci opuštěna a může se stát předmětem budoucího vývoje.

4.2 Zpracování mikropočítačem

Pod pojmem mikropočítač je zde míněn „jednodeskový“ počítač se zabudovaným General-purpose input/output (GPIO) rozhraním a zejména rozhraním, které je kompatibilní pro příjem signálu z TDM sběrnice. Nespornou výhodou zpracování dat v mikropočítači je jejich možný přímý výstup do souboru, popř. široké možnosti signálového zpracování, omezené prakticky jen velikostí paměti a rychlostí procesoru. Nevýhodou může být relativně složitější konfigurace a programování (obvykle ve formě „klasického“ textového programování, které vyžaduje oproti „obrázkovému“ programování signálového procesoru větší zkušenosti). Pro účely této práce byl vybrán mikropočítač Raspberry Pi, vzhledem k jeho rozšířenosti a dostupnosti knihoven třetích stran, které usnadňují implementaci audio-rozhraní.

Hardwarové rozhraní

Raspberry Pi umožňuje připojení TDM sběrnice díky integrovanému Pulse-code modulation (PCM) rozhraní pro univerzální vstup dat. Toto rozhraní je přednostně určené právě pro vstup (i výstup) digitálních dat, získaných z analogového signálu. Tvoří ho výstupy PCM_CLK, PCM_DOUT, PCM_FS a vstup PCM_DIN. Výstup PCM_DOUT nás v tuto chvíli nezajímá, jelikož je určen pro výstup (a nikoli vstup) dat. Všechny tyto signály jsou vyvedeny na GPIO konektor, společně s ostatními. PCM_CLK po připojení k TDM zastává funkci SCK, PCM_DIN funkci SD a PCM_FS funkci WS. Aby však bylo možné takto rozhraní použít, je třeba patřičně nakonfigurovat registry, které toto rozhraní ovládají. Na Raspberry Pi je obvykle nainstalován operační systém linux (v distribuci Raspbian), pro který jsou k dispozici celé řady knihoven a ovladačů, z nichž některé jsou schopny zprovoznit I2S rozhraní [1] a případně i TDM rozhraní.

Software

Knihovnou [1] byl proveden test funkčnosti jednotlivých mikrofonů (jelikož TDM rozhraní je při počtu do 2 mikrofonů prakticky shodné s I2S rozhraním. Knihovna zprostředkovává přímý záznam do zvukového souboru s oddělenými kanály, je tedy velmi jednoduchá na použití. Problém však nastává, chceme-li na Raspberry Pi zprovoznit TDM rozhraní. Je sice podporováno pomocí Advanced Linux Sound Architecture (ALSA)¹, avšak funkční implementace tohoto rozhraní vyžaduje pokročilou znalost systému linux i architektury ALSA a je podle mého názoru nad rámec této práce. Proto zpracování signálu proběhne s pomocí I2S rozhraní, které bude TDM adaptérem (viz 3.3.2) převedeno na rozhraní kompatibilní s TDM. Data budou zaznamenána do textového souboru a následně jiným programem roztříděna dle kanálů.

¹Konkrétně lze najít tento dokumentační soubor, který zmiňuje protokol TDM: <https://kernel.readthedocs.io/en/sphinx-samples/alsa-driver-api.html>

Kapitola 5

Návrh konstrukce pro 3D tisk

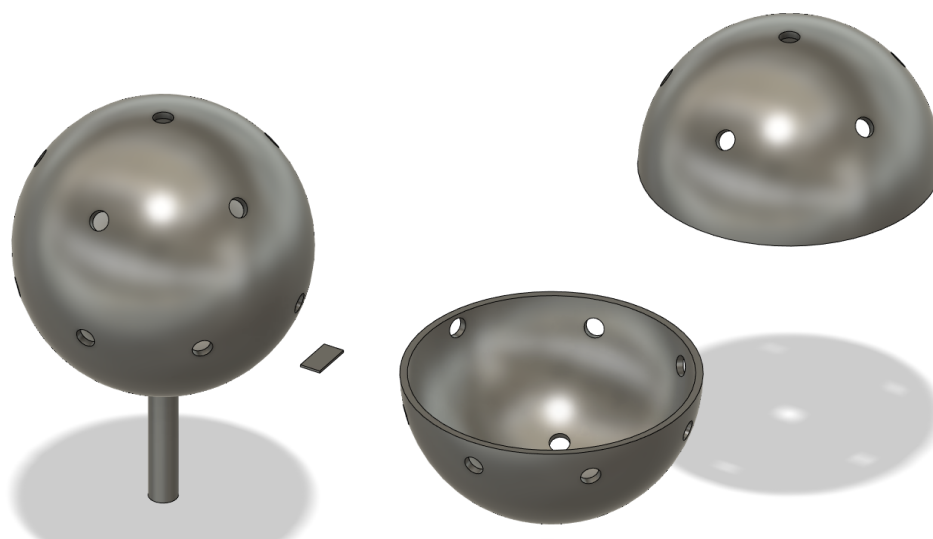
Podle základů položených v teoretické části bylo nutné vytvořit návrh tištěné konstrukce. Návrh byl vytvořen parametricky, v programu Autodesk Fusion 360. Navržená konstrukce musí vyhovět těmto požadavkům:

- Přenositelnost - tj. „rozumná velikost“ do 250 mm v průměru
- Možnost tisku na rozšířených tiskárnách typu Průša i3 - tj. rozměry dílů do 200 mm
- Snadné otevírání a sestavení konstrukce pro servisní zásahy
- Malé množství „výčnělků“ pro snadný tisk
- Minimální tloušťka konstrukce pro úsporu materiálu
- Dostatečné místo uvnitř pro plošné spoje a propojky

5.1 Koncept

V kapitole 1.2.1 byla zvolena konstrukce typu pevné sféry s poloměrem shodným, jako je poloměr umístění mikrofonů. Je tedy třeba vymodelovat sféru (přesněji „kulovou slupku“), na jejímž povrchu budou umístěny mikrofony, a to tak, aby nevyčnívaly ven (aby nedošlo k nechtěným odrazům zvukových vln). Základem je tedy kulová slupka s parametricky umístěnými otvory, které vyhovují velikosti plošných spojů s MEMS mikrofony. Ideový návrh si lze prohlédnout na obr. 5.1.1. Jelikož je na těchto DPS mikrofon umístěn z druhé strany (než je otvor pro zachycování zvuku), je mikrofon při lícování s vnějším povrchem sféry skrytý uvnitř konstrukce a nenarušuje tak zvukové pole (viz příloha D).

Vnější průměr sféry je 170 mm. Zevnitř kulové slupky jsou umístěny distanční válce (tisknuté dohromady s konstrukcí), obsahující otvory pro přichycení plošného spoje - adaptéru šrouby zevnitř. Jejich výška je právě taková, aby při zapojení DPS platila výše určená podmínka lícování. Takový byl prvotní ideový návrh, jehož náhledy si lze, společně s finálními návrhy a fotografiemi vyhotovení, prohlédnout v příloze D a na obr. 6.2.1, 6.2.2 a 5.1.1.



Obrázek 5.1.1: Koncept konstrukce mikrofonního pole

5.2 Rozdělení pro tisk

Aby byla konstrukce tisknutelná, je třeba kromě rozměrů dodržet i požadavek na minimalizaci potřebných podpěr během tisku. Kdyby byla celá sféra tisknuta v jednom díle, nejen, že by do ní neexistoval přístup z vnějšku (pro instalaci mikrofonů), ale zároveň by během tisku byly třeba podpěry i pro vnější plochu sféry, což by její povrch pravděpodobně činilo „rozdrbaným“ - to není přípustné. Pro tisknutelnost je tedy sféra rozdělena na 2 polosféry, které jsou tisknuty vždy směrem od části z největším poloměrem (tato strana je položena na tiskové desce). To zajišťuje, že podpěry podpírají pouze vnitřní plochu, jejíž kvalita povrchu není podstatná.

5.3 Spojení polosfér

Pro spojení polosfér dohromady byl vybrán koncept spojení závitem, pro což byl vymodelován další tisknutý díl. Závít totiž musí z jedné z polosfér vyčnívat, a polosféru s vyčnívajícím prstencem ze spodní strany by bylo obtížné tisknout (opět kvůli množství podpěr). Třetí tisknutý díl se dá nazvat spojkou a je spojen pevně s dolní polosférou pomocí šroubů. Jeho horní část tvoří vnější závít, který se při kompletaci našroubuje do vnitřního závitu v horní polosféře. Tyto závity mají menší poloměr, než je vnější poloměr konstrukce, aby vzniklo místo pro mikrofonní adaptéry, do nichž budou připojené kabelové propojky. Návrh soustavy si lze prohlédnout v příloze D.

■ 5.4 Vývodka kabelů a montážní závit

Pro vyvedení kabelů z mikrofonního pole ven bylo nutné konstrukci vybavit otvorem. Zároveň bylo třeba vyřešit, kterak pole uchytit v prostoru. Došlo ke skloubení obou požadavků a spodní polosféra byla vybavena otvorem s vnitřním závitem M20x2.5, čímž lze konstrukci přimontovat na trubku se shodným vnějším závitem, jejímž středem může procházet signálová kabeláž.

Kapitola 6

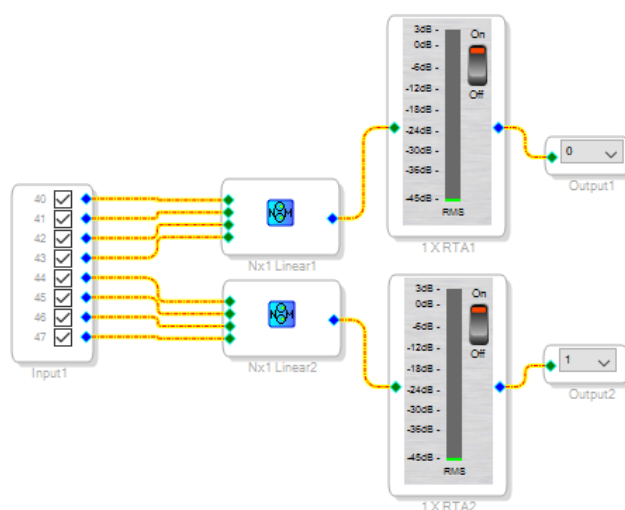
Průběh realizace

6.1 Plošné spoje

6.1.1 Testování s ADAU1452

Příprava na testování

Plošné spoje byly vyrobeny na zakázku ve firmě zabývající se prototypovou výrobou DPS a v téže firmě elektricky otestovány. Následně byly DPS ručně osazeny součástkami a bylo možno přistoupit k otestování. Mikrofony byly spojeny po osmi na sběrnici TDM, prostřednictvím kabelových propojek ze stíněného kabelu (popsaného v sekci 3.3.1), a připojeny k vývojovému kitu EVAL-ADAU1452REVBZ, který byl nakonfigurován prostřednictvím prostředí SigmaStudio®. „Program“, či „diagram zapojení“, který byl do signálového procesoru nahrán je na obr. 6.1.1.



Obrázek 6.1.1: Program, s jehož pomocí bylo otestováno připojení signálového procesoru ADAU1452 k 8 TDM mikrofonům

Program umožňuje obrazovou signalizaci aktuální velikosti signálu a výstup na analogový výstup audio-jack. Mikrofony byly následně (pro zkoušku) buzeny hlasem a signály z reproduktoru, jimi vyslaná data byla v signálovém procesoru zpracována a odeslána na analogový výstup, ke kterému byla připojena sluchátka.

■ Výsledky testu

Při testu se ukázalo, že poslední 2 mikrofony v řetězci generovaly neplatná data, která se zvukově projevovala „praskáním“. Problém nebyl odstraněn ani výměnou mikrofonů za jiné, ani výměnou kabelových propojek, či adaptérů (DPS pro připojení mikrofonu). Po připojení osciloskopické sondy k vývodům SD a SCK u těchto posledních mikrofonů, či přiložení ruky k těmto mikrofonům se však problém přestal projevovat. Stejně tak problém odstranilo připojení terminačních rezistorů (pro zkoušku byly připojeny rezistory o hodnotě $330\ \Omega$ mezi zmíněné vývody a GND. Snímky z osciloskopu před a po připojení terminačních rezistorů jsou v příloze F, je ale nutné myslet na zmíněnou skutečnost, že samotné připojení osciloskopické sondy (v režimu $\times 10$) problém také vyřešilo, a průběh signálu bez jejího přiložení tak bude zřejmě jiný.

■ Vysvětlení

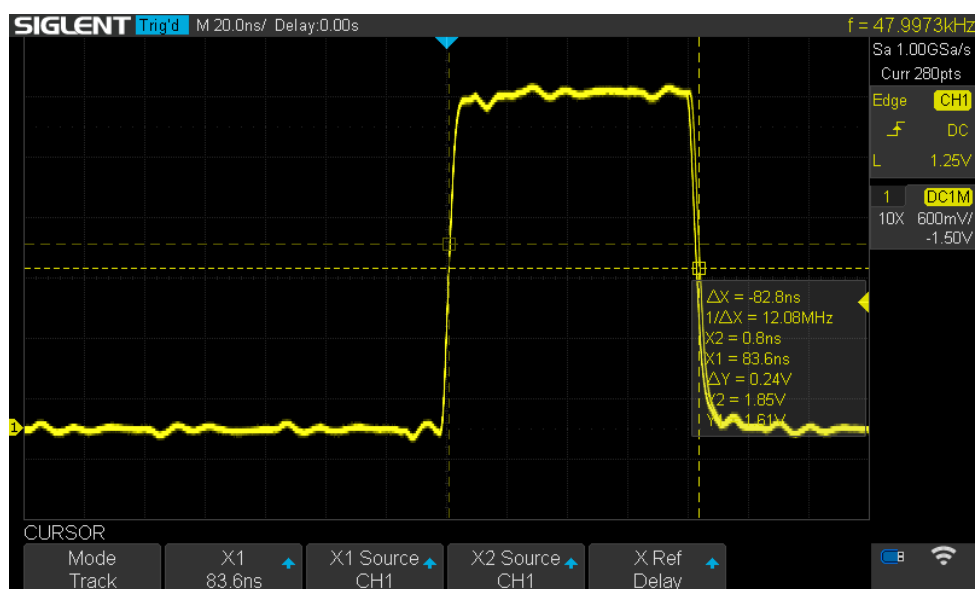
Tento efekt zkreslení signálu v závislosti na poloze v přenosovém řetězci je možné vysvětlit odrazy na vedení. Pro zohlednění míry těchto odrazů je vhodné připomenout frekvenci napětí na vodiči SCK, která v daném řetězci při počtu 8 mikrofonů, vzorkovací frekvenci 48 kHz a 32bitových slovech činí analogicky podle vzorce 2.4.2 12,288 MHz. Autor této práce však nechce zabíhat do složitější problematiky odrazů na vedení, jelikož se výrazně odchyľuje od hlavního tématu práce, a proto zde pouze konstatuje, že terminační rezistory problém vyřešily a zda problémy způsobily skutečně odrazy napěťových vln nechává předmětem dalšího bádání.

■ 6.1.2 Testování na Raspberry Pi

Přenos dat do Raspberry Pi byl otestován pomocí TDM adaptéru z kapitoly 3.3.2. Adaptér byl nastaven do režimu dělení frekvence signálu $LRCLK/4$. Adaptér frekvenci úspěšně vydělil a délku impulsu signálu WS upravil na hodnotu 67 ns, čímž je dle informací z [8] tento signál akceptovatelný vstupním rozhraním mikrofonu ICS-52000. Snímek z osciloskopu, zobrazující výsledný impuls signálu WS je na obr. 6.1.2. Pro porovnání je na obr. 6.1.3 snímek z osciloskopu zobrazující signál WS, vycházející z výstupu WSO mikrofonu ICS-52000. Další snímky z osciloskopu z testování funkčnosti TDM adaptéru jsou v příloze E.



Obrázek 6.1.2: Impuls signálu WS, vystupující z TDM adaptéru při testování jeho funkčnosti



Obrázek 6.1.3: Impuls signálu WS z výstupu WSO mikrofonu ICS-52000 při frekvenci signálu SCK 12,288 MHz.

6.2 Tisk a osazení konstrukce

6.2.1 Tisky

Vyvinutá konstrukce byla vytištěna na 3D tiskárně technologií FDM téměř výhradně z materiálu PLA. Parametry tisku bylo třeba značně přizpůsobit nezvykle velkým dílům, kterými součásti této konstrukce jsou. Zejména se jednalo o použití vhodného množství podpěr a použití adaptivní výšky tiskových vrstev, což byla jedna z mála možností, jak zajistit uspokojivou kvalitu při přijatelné době tisku. Tisk horní polosféry probíhal zhruba 13 hodin, v případě dolní polosféry zhruba 17 hodin (má větší počet otvorů pro mikrofony a navíc závit pro montáž na stojan). Během tisku se objevil problém s přesností vnitřního závitu pro spojení obou polosfér (který obsahuje horní polosféra). Zřejmě účinkem nahřívání tiskové plochy (na teplotu 65°C) a přímým kontaktem závitu s touto plochou se závit „zprohýbal“ (v některých částech místo stoupání dokonce klesá). Po tisku byl ručně opracován, čímž byl uveden do použitelného stavu.

Adaptér pro spojení obou polosfér byl vytištěn na téže tiskárně z materiálu ABS, z důvodu menšího kroucení závitů. Zde nedošlo k žádnému problému, tisk tedy proběhl úspěšně.

Všechny vytištěné díly byly následně opracovány, aby mohly postoupit k osazení mikrofony. Fotografie všech vytisknutých dílů jsou v příloze D.

6.2.2 Osazení

Konstrukce byla osazena adaptéry z kapitoly 3.2.2, které byly přichyceny z vnitřní strany k vytištěné konstrukci „šroubovým“ spojem. Úvozovky jsou použity právem, neboť použité šrouby velikosti M3 nebyly zašroubovány do protilehlé matky, ale použity podobně, jako samozávrtné vruty do vytištěné konstrukce. Spoj je pevný a díky velkému statickému tření a houževnatosti plastové konstrukce i zřejmě trvanlivý.

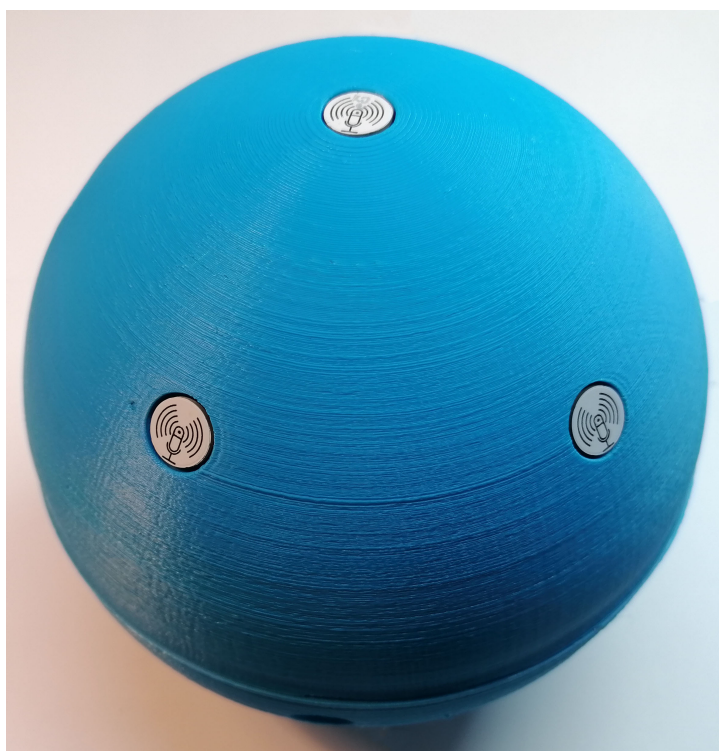
Ze stíněného kabelu byly zhotoveny krátké sekce - propojky, jejichž vodiče byly po odstranění vnější izolace odizolovány (pouze na koncích). Na odizolované konce byly nakrimpovány konektory DuPont (stínění bylo nakrimpováno dohromady s černým vodičem GND). Fotografie osazené horní polosféry je na obr. 6.2.1 a fotografie hotového mikrofonního pole na obr. 6.2.2.

6.2.3 Návrh budoucího pokračování

V budoucnu bude žádoucí provést akustické testy hotového mikrofonního pole (pokud možno směrové i amplitudové charakteristiky, v závislosti na frekvenci). Taktéž bude vhodné napsat definitivní program pro příjem dat ze sběrnice TDM, patrně využívající architekturu ALSA s přímým výstupem dat do zvukového souboru, který bude možno snadno zpracovat v nějakém DAW a s využitím VST pluginu vhodného pro např. ambisonii (např. [10]).



Obrázek 6.2.1: Konstrukce horní polosféry osazená adaptéry pro připojení MEMS mikrofonů - pohled zevnitř



Obrázek 6.2.2: Plně zkompletované mikrofonní pole s osazenými MEMS mikrofony



Závěr

Práce vyvinula funkční sférické mikrofonní pole pro univerzální použití s použitím parametrického návrhu a 3D tisku, což umožňuje snadnou změnu parametrů, jako je velikost, či rozmístění mikrofonů na sféře. V teoretické části byla nastíněna problematika vývoje sférických mikrofonních polí, elektrostatických MEMS měničů a digitálního přenosu zvukového signálu. V souladu s teorií byl zhotoven parametrický návrh konstrukce, pomocí kterého je možno měnit rozvržení mikrofonů podle požadované aplikace, přičemž návrh splňuje nároky na FDM 3D tisk v uspokojivé kvalitě i s 3D tiskárnou nižší třídy. Byly navrženy a vyhotoveny plošné spoje, kompatibilní s navrženou tištěnou konstrukcí, nesoucí MEMS mikrofony a další důležité součástky včetně konektorů pro vyvedení signálu po stíněném kabelu. Pro snadné připojení mikrofonního pole do mikropočítače Raspberry Pi byl navržen a vyroben adaptér, který se přímo spojí se čtyřmi kabely vedoucími z pole a zprostředkuje spojení buďto pomocí TDM sběrnice s 16 mikrofony nebo dvou separovaných TDM sběrnic s 8 mikrofony. Do adaptéru lze zapojit i jiný, libovolný, signálový procesor, což zvyšuje flexibilitu zpracování signálu a rozšiřuje paletu aplikací tohoto pole. Hotový prototyp byl zběžně otestován pomocí signálového procesoru v zapojení po dvou TDM linkách s 8 mikrofony na každé z nich. V budoucnu bude vhodné prototyp podrobit akustickým testům, zejména měření směrové a amplitudové frekvenční charakteristiky.



Literatura

- [1] Adafruit I2S MEMS Microphone Breakout: Raspberry Pi Wiring & Test. ADAFRUIT INDUSTRIES. *Adafruit Learning System* [online]. [cit. 2021-5-14]. Dostupné z: <https://learn.adafruit.com/adafruit-i2s-mems-microphone-breakout/raspberry-pi-wiring-test>
- [2] ANALOG DEVICES, INC. *ADAU1452/ADAU1451/ADAU1450: SigmaDSP Digital Audio Processor* [online]. 2018, 195 s. [cit. 2021-5-9]. Dostupné z: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADAU1452_1451_1450.pdf. Rev. D.
- [3] ANALOG DEVICES, INC. *EVAL-ADAU1452REVBZ User Guide: Evaluating the ADAU1452 SigmaDSP Audio Processor* [online]. 2019, 53 s. [cit. 2021-5-9]. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/user-guides/EVAL-ADAU1452REVBZ-UG-1662.pdf>. Rev. 0.
- [4] BENESTY, Jacob a Jingdong CHEN. *Study and Design of Differential Microphone Arrays*. London: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013. ISBN 978-3-642-33752-9. 1866-2609.
- [5] BRANDSTEIN, Michael a Darren WARD. *Microphone arrays: Signal Processing, Techniques and Applications*. New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2001, 398 s. ISBN 978-3-642-07547-6. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-662-04619-7
- [6] FLIEGE, Jörg. Integration nodes for the sphere. *This is the homepage of Jörg Fliege* [online]. 19.09.2007 [cit. 2021-1-22]. Dostupné z: <http://www.personal.soton.ac.uk/jf1w07/nodes/nodes.html>
- [7] GONZÁLEZ, Raimundo, Joshua PEARCE a Tapio LOKKI. Modular Design for Spherical Microphone Arrays. In: *Audio Engineering Society Conference: 2018 AES International Conference on Audio for Virtual and Augmented Reality*. Redmond, Washington, USA: Audio Engineering Society (AES), 2018, P3-10. ISBN 9781510870390.

- [8] INVENSENSE, INC. *ICS-52000: Low-Noise Microphone with TDM Digital Output* [online]. 2017-4-14. 20 s. [cit. 2021-5-9]. DS-000121. Dostupné z: <https://invensense.tdk.com/download-pdf/ics-52000-data-sheet/>. Rev. 1.3.
- [9] LEWIS, Jerad. ANALOG DEVICES, INC. *Common Inter-IC Digital Interfaces for Audio Data Transfer: MS-2275* [online]. 01/2012. 3 s. [cit. 2021-5-9]. TA10526-0-1/12. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/technical-articles/MS-2275.pdf>
- [10] MCCORMACK, Leo, Symeon DELIKARIS-MANIAS, Archontis POLITIS, Ville PULKKI a Christoph HOLD. SPARTA - Spatial Audio Real-Time Applications. *Department of Signal Processing and Acoustics | Aalto University* [online]. [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: http://research.spa.aalto.fi/projects/sparta_vsts/
- [11] NEXPERIA. *74HC123; 74HCT123: Dual retriggerable monostable multivibrator with reset* [online]. 2020, 21 s. [cit. 2021-5-9]. Dostupné z: https://assets.nexperia.com/documents/data-sheet/74HC_HCT123.pdf. Rev. 11.1.
- [12] *OpenSCAD - Documentation* [online]. [cit. 2021-5-9]. Dostupné z: <https://www.openscad.org/documentation.html>
- [13] PHILIPS SEMICONDUCTORS. *I2S bus specification* [online]. 1986 [cit. 2021-5-9]. Dostupné z: <https://www.sparkfun.com/datasheets/BreakoutBoards/I2SBUS.pdf>
- [14] PLESSAS, Peter. *Rigid Sphere Microphone Arrays for Spatial Recording and Holography*. Graz, Rakousko, 2009, 71 s. Dostupné také z: https://plessas.mur.at/rnd/da/Thesis_Plessas.pdf. Diplomová práce. Graz University of Technology, Austria. Vedoucí práce Franz Zotter. Ve spolupráci s: IEM Institute of Electronic Music and Acoustics; University of Music and Performing Arts Graz, Austria; CNMAT Center for New Music and Audio Technologies, University of California, Berkeley.
- [15] RAFAELY, Boaz. Open-Sphere Designs for Spherical Microphone Arrays. *IEEE Transactions on Audio, Speech and Language Processing*. 2007, **15**(2), 727-732. ISSN 1558-7916. Dostupné z: doi:10.1109/TASL.2006.881671
- [16] STMICROELECTRONICS. *Interfacing PDM digital microphones using STM32 MCUs and MPUs: AN5027* [online]. 2019-7-17. 66 s. [cit. 2021-5-9]. Dostupné z: https://www.st.com/resource/en/application_note/dm00380469-interfacing-pdm-digital-microphones-using-stm32-mcus-and-mpus-stmicroelectronics.pdf. Rev. 2.

- [17] SURANGE, Vinod G. a Punit V. GHARAT. 3D Printing Process Using Fused Deposition Modelling (FDM). *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)* [online]. 2016, **3**(3), 1403 - 1406 [cit. 2021-5-11]. ISSN 2395 - 0056. Dostupné z: <https://www.irjet.net/archives/V3/i3/IRJET-V3I3295.pdf>
- [18] ŠKVOR, Zdeněk. *Elektroakustika a akustika: vysokoškolská učebnice*. Praha: České vysoké učení technické, 2012, 574 s. ISBN 978-80-01-05034-7.
- [19] WANG, Zhe, Quanbo ZOU, Qinglin SONG a Jifang TAO. The era of silicon MEMS microphone and look beyond. In: *2015 Transducers - 2015 18th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (TRANSDUCERS)*. IEEE, 2015, 2015, s.375-378. ISBN 978-1-4799-8955-3. ISSN 2164-1641. 15362431. Dostupné z: doi:10.1109/TRANSDUCERS.2015.7180939
- [20] WELHAM, Chris. How To Build A Better MEMS Microphone. *Coventor: Semiconductor Process Modeling & MEMS Design Automation* [online]. February 20, 2018 [cit. 2021-5-17]. Dostupné z: <https://www.coventor.com/blog/noise-modeling-for-mems-microphones/>
- [21] WINTER, Matthias, Gregor FEIERTAG, Anton LEIDL a Helmut SEIDEL. Influence of a chip scale package on the frequency response of a MEMS microphone. *Microsystem Technologies*. 2010, **16**(5), 809-815. ISSN 0946-7076. Dostupné z: doi:10.1007/s00542-009-0994-z
- [22] ZHIYUN, Li a Ramani DURAISWAMI. Flexible and Optimal Design of Spherical Microphone Arrays for Beamforming. *IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*. 2007, **15**(2), 702 - 714. ISSN 1558-7916. Dostupné z: doi:10.1109/TASL.2006.876764
- [23] ZYLIA SP. Z O.O. ZYLIA ZM-1 microphone - ZYLIA PORTABLE RECORDING STUDIO. MULTI-TRACK MUSIC RECORDING WITH ONE MIC. *ZYLIA PORTABLE RECORDING STUDIO* [online]. [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: <https://www.zylia.co/zylia-zm-1-microphone.html>



Přílohy



Příloha A

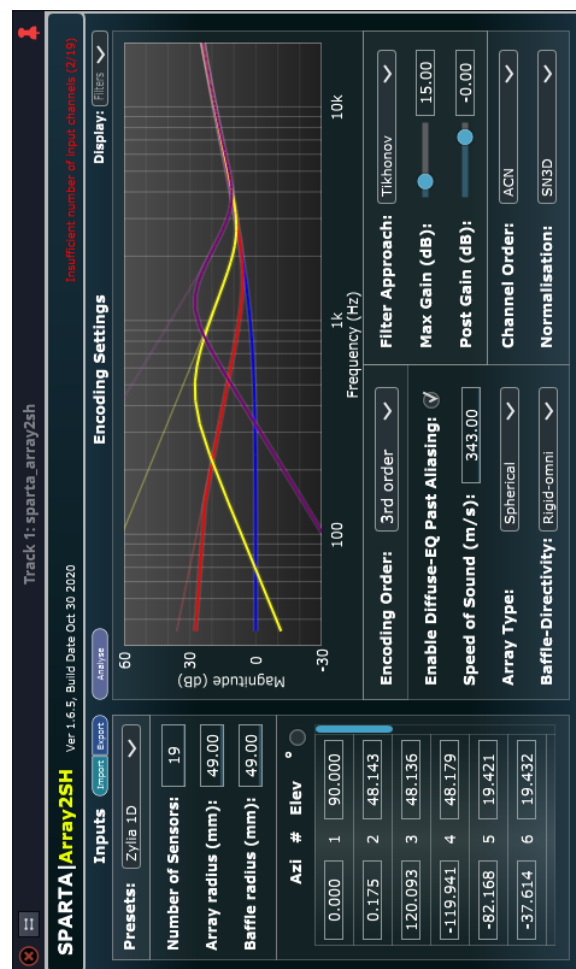
Seznam zkratek

ABS	Acrylonitrile butadiene styrene.
ALSA	Advanced Linux Sound Architecture.
AOP	Acoustic Overload Point.
CAD	Computer-Aided Design.
CLK	Clock.
DATA	Data.
DAW	Digital Audio Workstation.
DIN	Data Input.
DOUT	Data Output.
DPS	Deska plošných spojů.
EIN	Equivalent Input Noise.
FDM	Fused Deposition Modeling.
FS	Frame Synchronization.
GND	Ground.
GPIO	General-purpose input/output.
I2S	Inter-IC Sound.
LR	Left/Right.
LRCLK	Left-Right Clock.
MEMS	Micro-Electro-Mechanical System.
PCM	Pulse-code modulation.
PDM	Pulse-Density Modulation.
PLA	Polylactic acid.
SCK	Serial Data Clock.
SD	Serial Data.

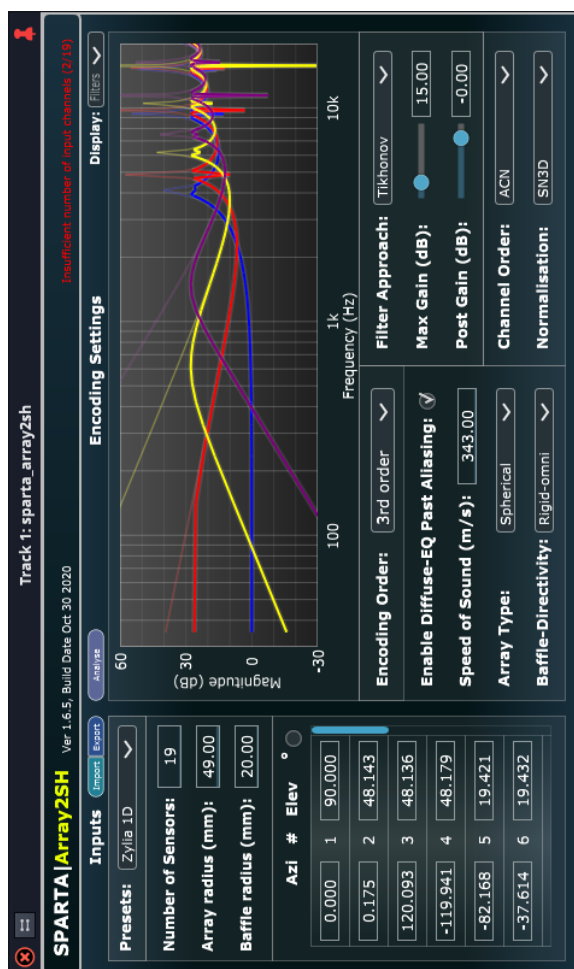
SLA	Stereolithography.
SMD	Surface-Mount Device.
SNR	Signal to Noise Ratio.
TDM	Time Domain Multiplexing.
THD	Total Harmonic Distortion.
THT	Through-Hole Technology.
VST	Virtual Studio Technology.
WS	Word Select.
WSO	Word Select Output.

Příloha B

Ukázky korekčních filtrů v pluginu SPARTA | Array2SH



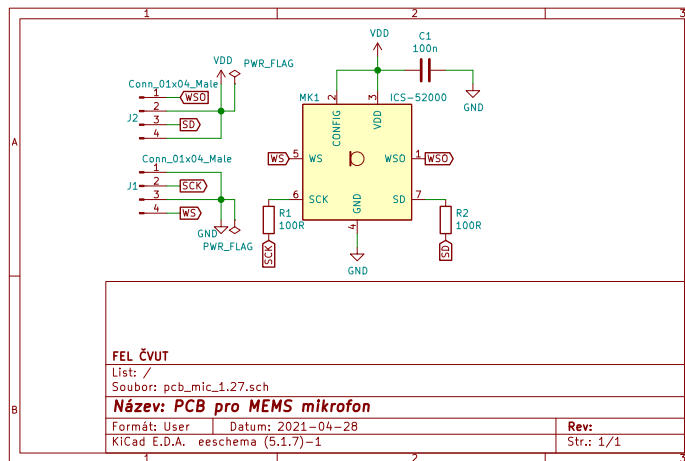
Obrázek B.0.1: Korekční filtr pro mikrofonní pole Zylia ZM-1 [23], který má poloměr pevné sféry shodný s poloměrem umístění senzorů - $r = 49$ mm



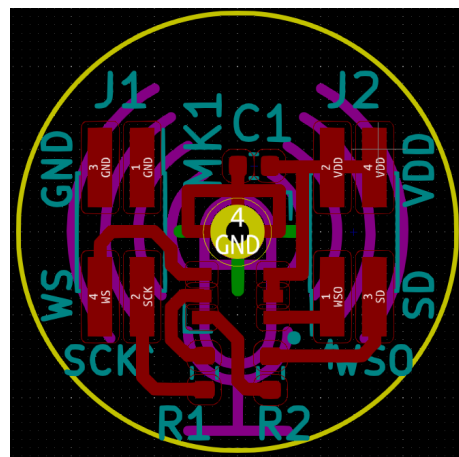
Obrázek B.0.2: Korekční filtr pro mikrofonní pole se shodným rozmištěním, jako Zylia ZM-1 [23], s poloměrem umístění senzorů 49 mm, avšak s poloměrem pevné sféry 20 mm

Příloha C

Plošné spoje



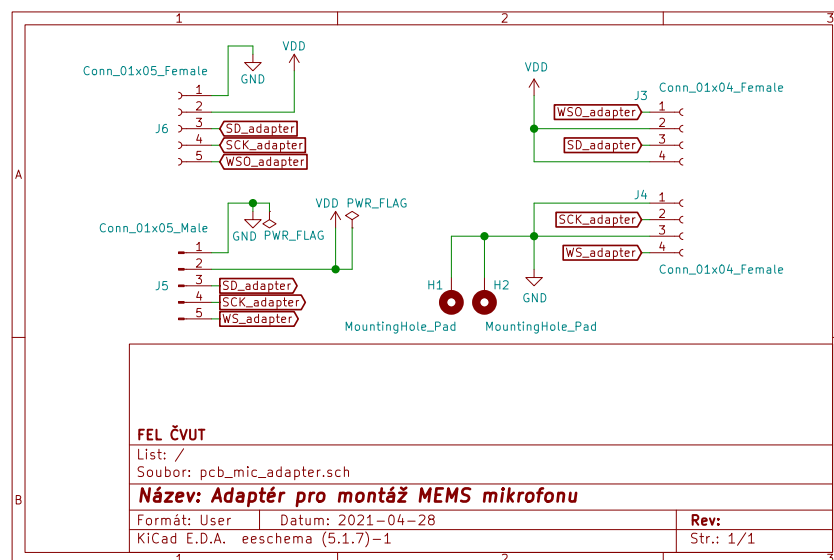
Obrázek C.0.1: Schéma plošného spoje pro MEMS mikrofon v programu KiCad



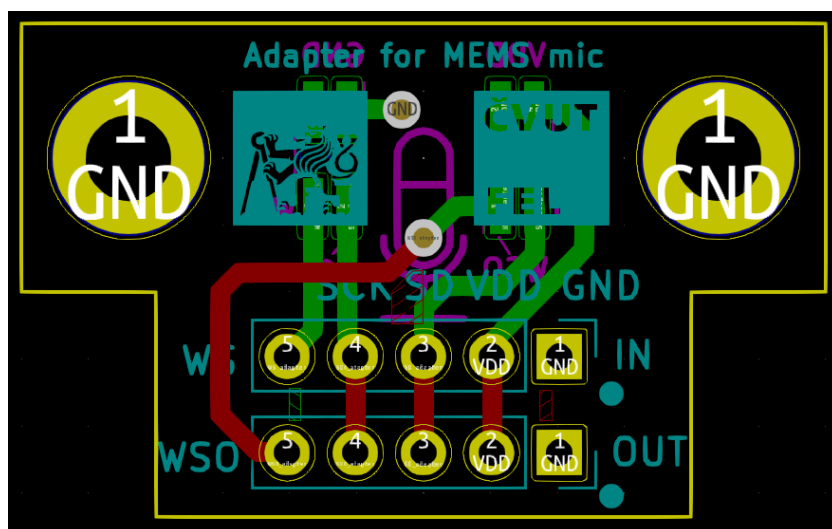
Obrázek C.0.2: Návrh plošného spoje pro MEMS mikrofon v programu KiCad



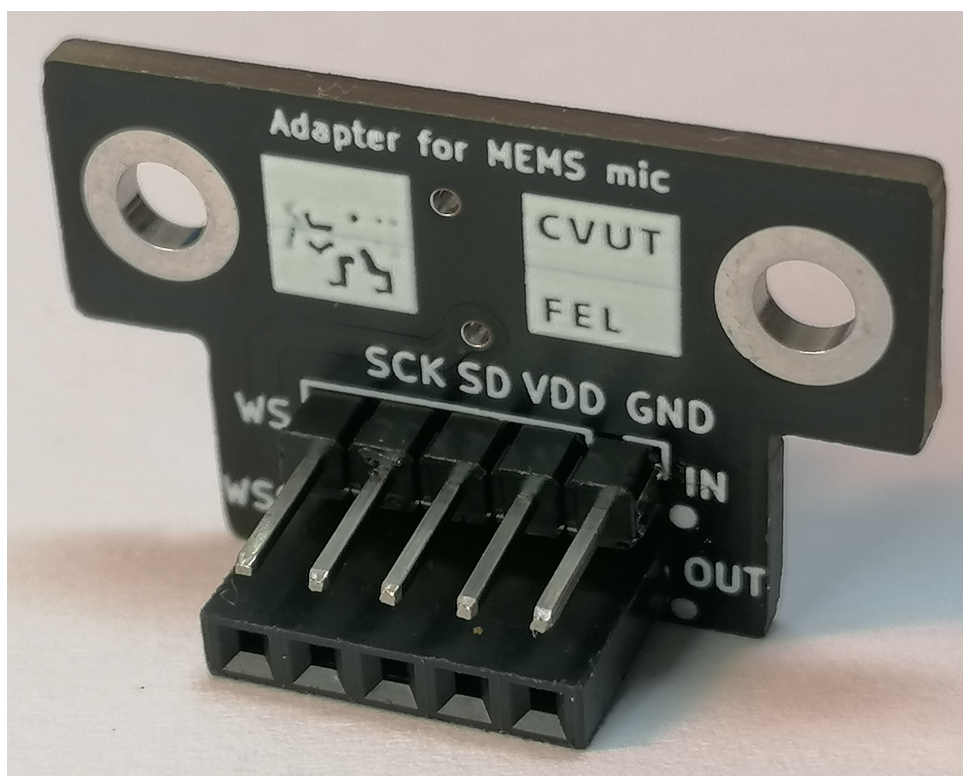
Obrázek C.0.3: Zadní strana DPS pro MEMS mikrofon, která po instalaci lícuje s vnější plochou sférického pole



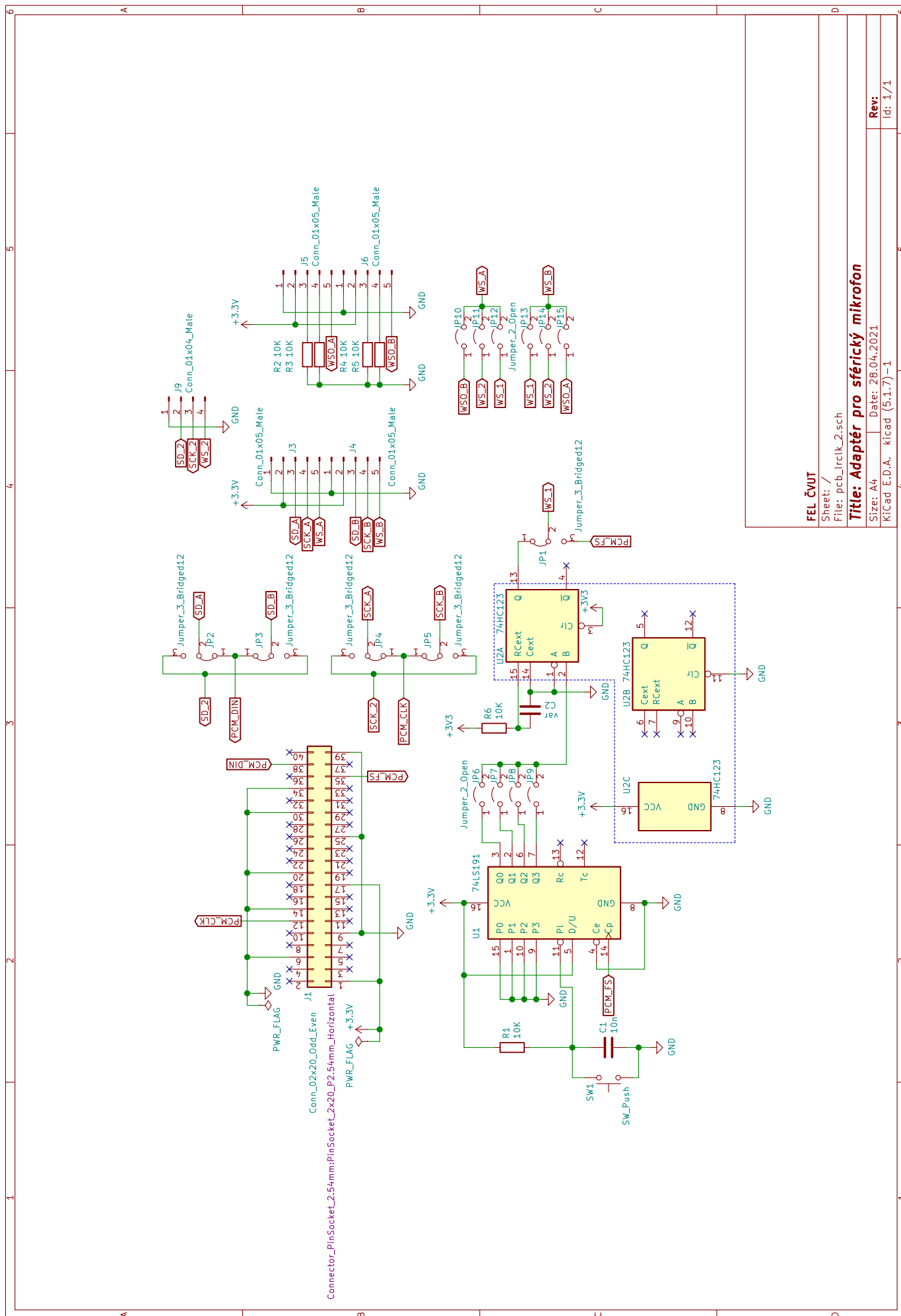
Obrázek C.0.4: Schéma plošného spoje - adaptéru pro přimontování do tištěné konstrukce



Obrázek C.0.5: Návrh plošného spoje - adaptéru pro přimontování do tištěné konstrukce



Obrázek C.0.6: Zadní strana DPS - adaptéru pro přimontování do tištěné konstrukce



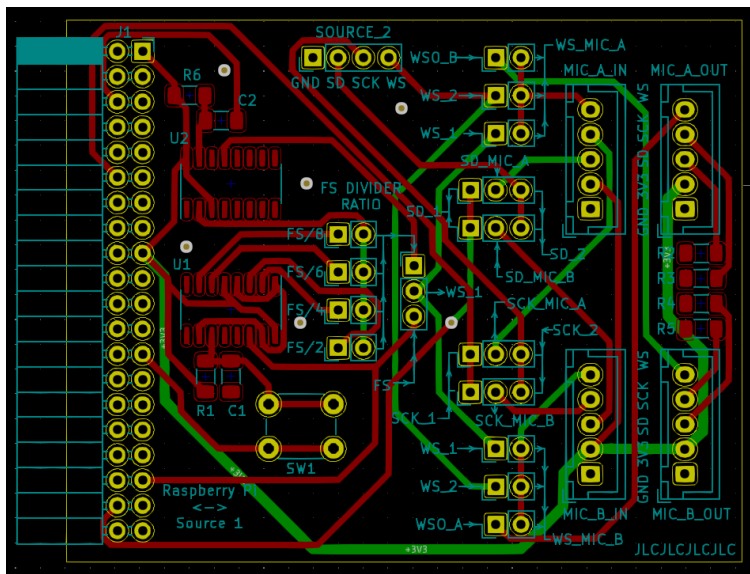
FEL ČVUT

Sheet: /
File: pcb_lrclk_2.sch

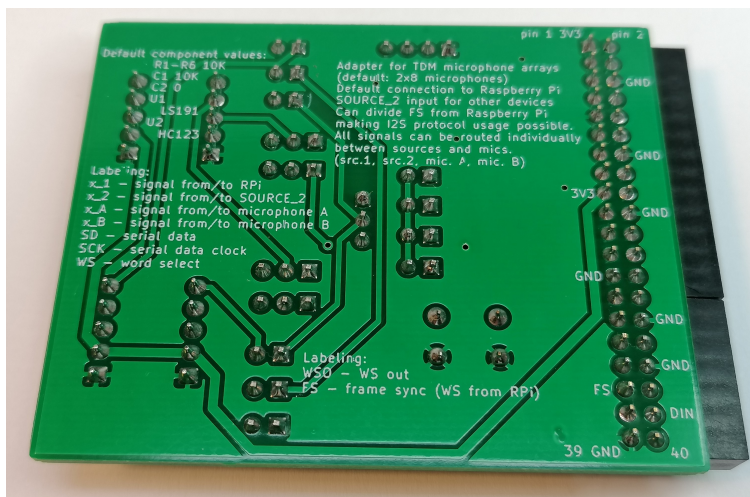
Title: Adaptér pro sférický mikrofón

Size: A4 Date: 28.04.2021
KiCad E.D.A. kicad (5.1.7)–1

Obrázek C.0.7: Schéma plošného spoje - adaptéru pro připojení mikrofonního pole k Raspberry Pi



Obrázek C.0.8: Návrh plošného spoje - adaptéru pro připojení mikrofonního pole k Raspberry Pi v programu KiCad



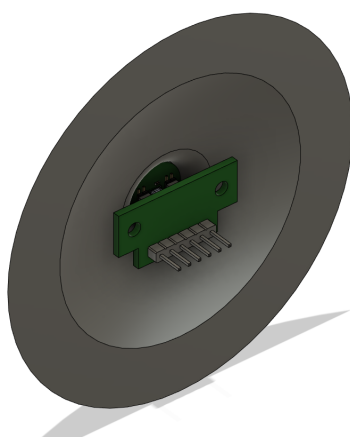
Obrázek C.0.9: Zadní strana plošného spoje - adaptéru pro připojení mikrofonního pole k Raspberry Pi



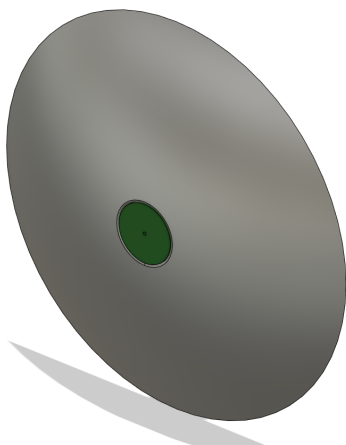
Obrázek C.0.10: Fotografie DPS - TDM adaptéru připojeného do Raspberry Pi

Příloha D

Konstrukce pro 3D tisk



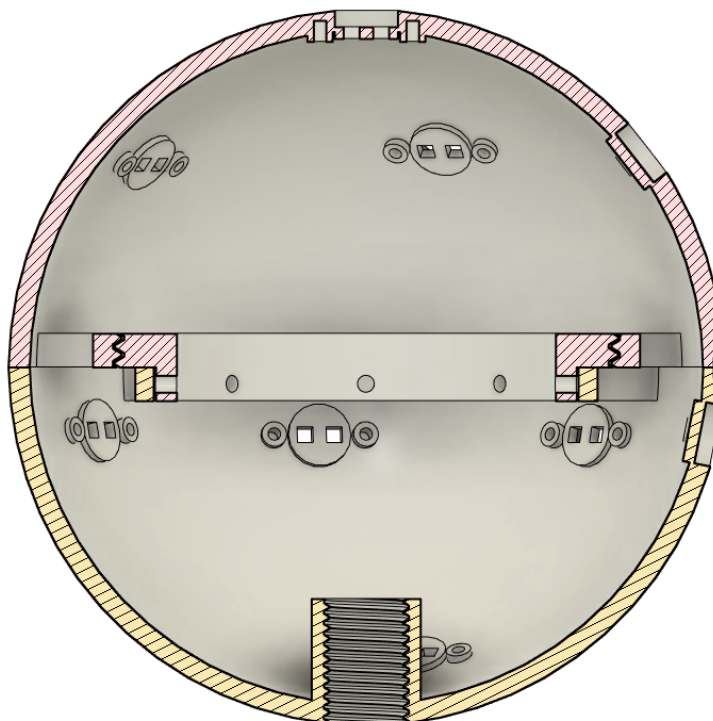
Obrázek D.0.1: Pohled na vložení mikrofonu s adaptérem do výřezu v konstrukci zezadu



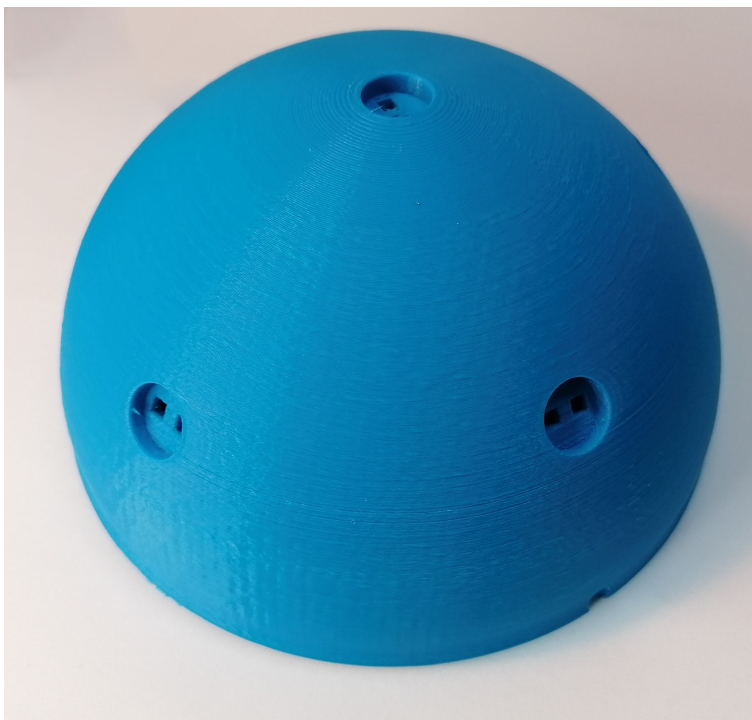
Obrázek D.0.2: Pohled na zadní stěnu plošného spoje s mikrofonem lícující se stěnou vytisknuté konstrukce



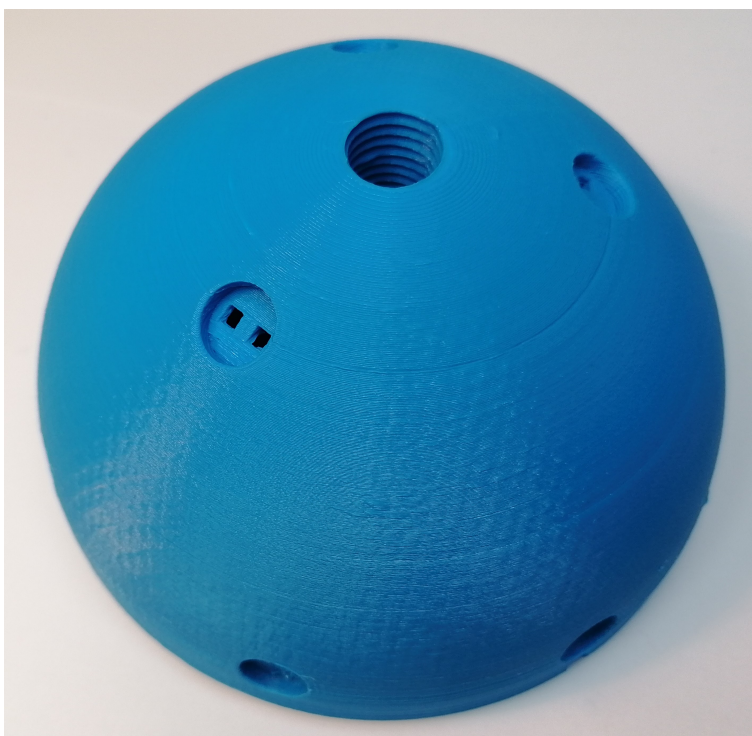
Obrázek D.0.3: Finální návrh konstrukce dolní polosféry v programu Fusion 360 (vizualizace při pohledu shora)



Obrázek D.0.4: Finální návrh celé konstrukce v bočním řezu



Obrázek D.0.5: Hotová horní polosféra sférického pole, zhotovená prostřednictvím 3D tisku z materiálu PLA



Obrázek D.0.6: Hotová spodní polosféra sférického pole, zhotovená prostřednictvím 3D tisku z materiálu PLA



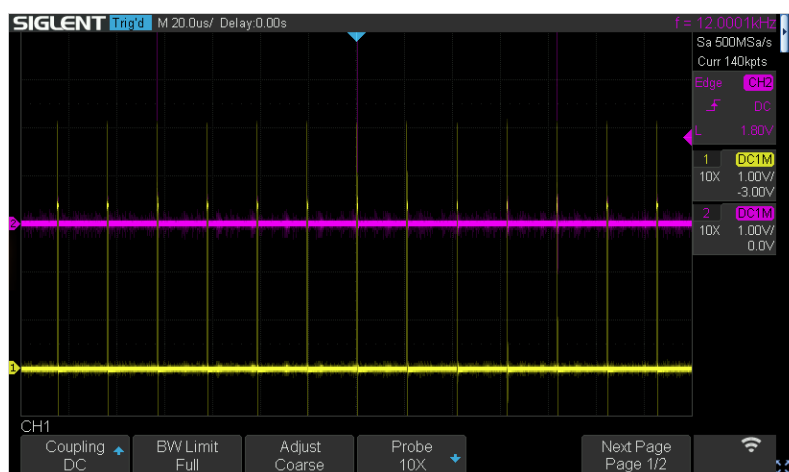
Obrázek D.0.7: Hotová spojka pro konstrukční spojení obou polosfér, zhotovená prostřednictvím 3D tisku z materiálu ABS

Příloha E

Test TDM adaptéru



Obrázek E.0.1: Test přeslechu na TDM adaptéru mezi vstupním LRCLK signálem a výstupním signálem WS, v době, kdy signál LRCLK obsahuje signální impuls a signál WS má zůstat na úrovni nulového napětí



Obrázek E.0.2: Test dělení frekvence na TDM adaptéru, přičemž výstupní signál WS vznikne vydělením vstupního signálu LRCLK čtyřmi

Příloha F

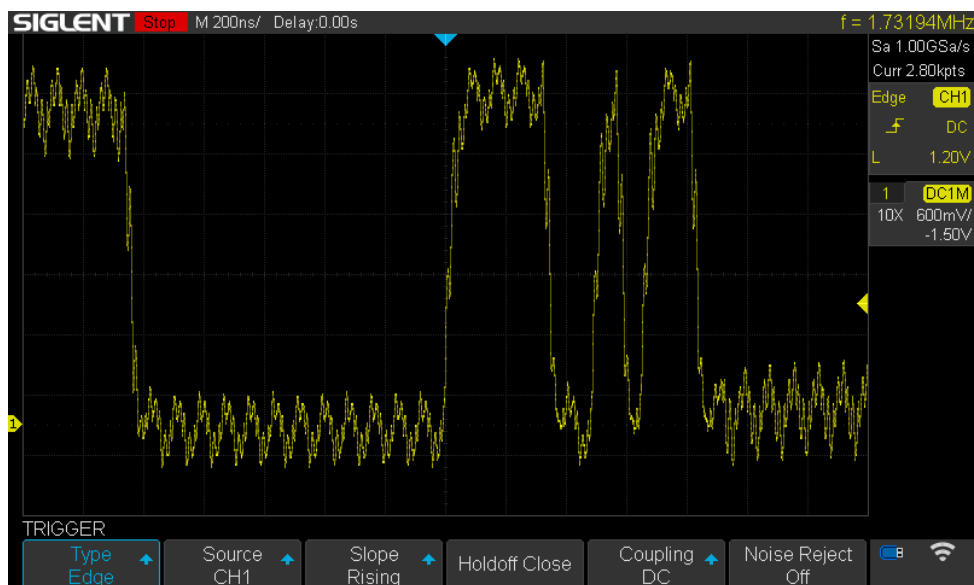
Test spojení TDM k ADAU1452



Obrázek F.0.1: Test připojení 8 mikrofonů k signálovému procesoru ADAU1452 - snímek signálu SCK na konci vedení bez připojeného terminačního rezistoru



Obrázek F.0.2: Test připojení 8 mikrofonů k signálovému procesoru ADAU1452 - snímek signálu SCK na konci vedení s připojeným terminačním rezistorem 330 Ω



Obrázek F.0.3: Test připojení 8 mikrofonů k signálovému procesoru ADAU1452 - snímek signálu DATA na konci vedení bez připojeného terminačního rezistoru



Obrázek F.0.4: Test připojení 8 mikrofonů k signálovému procesoru ADAU1452 - snímek signálu DATA na konci vedení s připojeným terminačním rezistorem 330 Ω

Příloha G

Seznam datových příloh

Z důvodu velkého množství jednotlivých souborů uvádím jen stručný přehled.

- Složka 3D_Fusion_360
 - param_mic_array.f3d
Zdrojový soubor s parametrickým modelem
 - param_mic_array_x.step
Soubory modelu v pevném (avšak neztrátovém) formátu .step
 - param_mic_array_x.stl
Exportované .stl soubory pro 3D tisk
- Složka DPS_KiCad
 - Složka pcb_lrcclk_2
Soubory návrhu plošného spoje - TDM adaptéru pro připojení k Raspberry Pi s podsložkou se soubory Gerber. Dále jsou přiloženy importovatelné soubory pro KiCad s potřebnými pouzdry
 - Složka pcb_mic_1.27
Soubory návrhu plošného spoje pro MEMS mikrofon s podsložkou se soubory Gerber
 - Složka pcb_mic_adapter
Soubory návrhu plošného spoje - adaptéru pro montáž do vytištěné konstrukce s podsložkou se soubory Gerber
 - raz_ram.kicad_wks
Soubor razítka a rámečku do schémat KiCadu v českém jazyce
- Složka SigmaStudio
 - test_TDM.dspproj
Program pro otestování funkčnosti čtení dat z 8 mikrofonů skrze TDM po lince SDATA_IN3 signálového procesoru ADAU1452