



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY

A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

ELEKTRICKÉ HOUSLE S MIDI VÝSTUPEM

ELECTRIC VOLIN WITH MIDI OUTPUT

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Benedikt Spilka

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Schimmel, Ph.D.

BRNO 2018



Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Audio inženýrství**

Ústav telekomunikací

Student: Bc. Benedikt Spilka

ID: 162789

Ročník: 2

Akademický rok: 2017/18

NÁZEV TÉMATU:

Elektrické housle s MIDI výstupem

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte a realizujte snímače pro elektrické housle s připojením k osobnímu počítači, např. pomocí USB kabelu, a převodem signálu na události protokolu MIDI. K přenosu informací ze snímačů využijte některého standardního přenosového protokolu.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] SELF, D. Small Signal Audio Design. Focal Press, 2010. ISBN 978-0-240-52177-0

[2] SLONE, G., R. The Audiophile's Project Sourcebook. McGraw-Hill, 2002. ISBN 0-07-137929-0

Termín zadání: 5.2.2018

Termín odevzdání: 21.5.2018

Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Schimmel, Ph.D.

Konzultant:

prof. Ing. Jiří Mišurec, 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

Hlavním cílem této diplomové práce je návrh a konstrukce elektrických houslí s MIDI výstupem. Práce obsahuje návrh a realizaci snímače, elektroniky houslí a program pro převod zvuku do MIDI zpráv. Na konci práce je také zmíněn návrh těla nástroje. Elektronika houslí obsahuje obvody pro filtraci, zesílení, zpracování a AD/DA převod zvuku. Program pro převod zvuku do MIDI rozpoznává jednotlivé tóny a převádí je do MIDI zpráv.

KLÍČOVÁ SLOVA

elektrické housle, snímač, MIDI, zvuková karta, filtr, PureData, předzesilovač

ABSTRACT

The main aim of this diploma thesis is to design and to construct a electric violin with MIDI output. This thesis include design and construction of violin pickup, violin electronic and software for translation of sound into MIDI messages. design of the instrument´s body is presented at the end of the thesis. Violin electronic include circuits for filtration, amplification, processing and AD/DA conversion of audio siganl. Software for MIDI transfer recognizes notes and translates them to MIDI messages.

KEYWORDS

electric violin, pickup, MIDI, sound card, filter, PureData, preamplifier

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Elektrické housle s MIDI výstupem“ 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/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu doc. Ing. Jiřímu Schimmelovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Brno

.....

podpis autora

Výzkum popsáný v této diplomové práci byl realizovaný v laboratořích podpořených projektem Centrum senzoričských, informačních a komunikačních systémů (SIX); registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace.

OBSAH

Úvod	13
1 Teoretický rozbor	14
1.1 Elektrické housle	14
1.1.1 Tvoření tónu	14
1.2 Houslové snímače	15
1.2.1 Piezoelektrický snímač	15
1.2.2 Elektromagnetický snímač	15
1.3 Operační zesilovač	18
1.3.1 Vlastnosti ideálního a reálného operačního zesilovače	19
1.3.2 Zpětná vazba operačního zesilovače	20
1.3.3 Základní zapojení s operačním zesilovačem	20
1.4 Obvod se spínaným kondenzátorem	21
1.5 Zemnění	22
1.6 Analogově-digitální převod	22
1.6.1 Vzorkování	23
1.6.2 Kvantování	23
1.6.3 Sigma-delta převodník	23
1.6.4 USB audio kodek Texas instruments PCM2900	24
1.6.5 USB audio kodek Cmedia CM6502	25
1.6.6 Porovnání audio USB kodeků	26
1.7 Hudební signál	27
1.7.1 Tón	27
1.7.2 Ladění	30
1.8 MIDI	31
1.8.1 Technická specifikace	31
1.8.2 Kanálová data	32
1.8.3 Notový zápis v MIDI formátu	33
1.9 Převod do MIDI	34
1.9.1 Segmentace	34
1.9.2 Detekce v časové oblasti	35
1.9.3 Detekce ve spektrální oblasti	36
1.9.4 Képstrální metoda detekce	37
1.9.5 Prostředí PureData	37
2 Návrh řešení	39

3	Návrh a výroba snímačů	40
4	Návrh obvodového zapojení	42
4.1	Vedení signálu	42
4.1.1	Nesymetrické vedení signálu	42
4.1.2	Symetrické vedení signálu	42
4.2	Nástrojový zesilovač INA163	42
4.3	USB kodek PCM2900	44
4.3.1	Napěťový regulátor REG103	44
4.3.2	Analogový vstup kodeku PCM2900	46
4.4	Sluchátkový zesilovač TPA152	46
4.5	Napájení	47
5	Návrh a realizace převodu do MIDI	49
6	Návrh těla nástroje	51
7	Měření	52
7.1	Snímače	52
7.2	Předzesilovače	53
7.3	Převod na MIDI zprávu	54
8	Závěr	57
	Literatura	59
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	62
	Seznam příloh	64
A	Schéma	65
A.1	Předzesilovače INA163	65
A.2	Sluchátkový zesilovač TPA152	66
A.3	USB audio kodek PCM2900	67
A.4	Napájení a konektory	68
B	Deska plošného spoje	69
C	Osazovací nákresy	70
D	Soupis součástek	71

E	Zdrojové kódy PureData	72
E.1	Hlavní patch	72
E.2	Efekt Noise gate	73
E.3	Převod zvuku na čísla MIDI not	74
F	Výsledky měření	75
F.1	Snímače	75
F.2	Předzesilovače	78
F.3	Převod na MIDI zprávy	80
G	Fotodokumentace	81
H	Obsah přiloženého CD	83

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Piezoelektrický jev	15
1.2	Elektromagnetické snímače, <i>singlecoil</i> (vlevo) a <i>hambucker</i> (vpravo), při pohledu z boku	16
1.3	Kmitání strun v magnetickém poli snímače umístěném pod strunou pro kytaru (vlevo), pro housle (uprostřed) a při umístění mimo strunu (vpravo)	16
1.4	Elektrické schéma jednocívkového snímače	17
1.5	Elektrické schéma dvoucívkového snímače	18
1.6	Elektrické schéma zdvojeného čtyřcívkového snímače	18
1.7	Invertující zapojení OZ	20
1.8	Neinvertující zapojení OZ	21
1.9	Princip obvodu se spínaným kondenzátorem [8]	21
1.10	Sigma-delta převodník	24
1.11	Vnitřní zapojení USB audio kodeku PCM2900c [12]	25
1.12	Vnitřní zapojení USB audio kodeku CM6502 [13]	26
1.13	Princip stojatého vlnění na struně	28
1.14	Zápis délky not v notovém zápisu [14]	29
1.15	Spektrum noty zahrané na housle (komorní a)	37
2.1	Blokové schéma řetězce pro převod signálu ze snímačů do MIDI zprávy	39
3.1	Řez cívkou snímače	40
3.2	Elektrické schéma zapojení houslových snímačů SN1 a SN2	41
3.3	Umístění snímačů SN1 a SN2 vůči strunám	41
4.1	Vnitřní zapojení obvodu INA163 [19]	43
4.2	Schéma zapojení předzesilovače v simulačním programu TINA-TI	43
4.3	Kmitočtová a fázová charakteristika předzesilovače INA163 pro R_G $= 3 \Omega$	44
4.4	Elektrické schéma napěťového regulátoru REG103A[20]	45
4.5	Schéma napěťového analogového vstupního kanálu kodeku PCM2900 [12]	46
4.6	Elektrické schéma zapojení sluchátkového zesilovače TPA152 [21]	47
4.7	Schéma vnitřního zapojení napěťového invertoru LT1054 [8]	48
5.1	Diagram užití programu pro převod zvuku do MIDI zpráv	49
5.2	Objekt fiddle	50
7.1	Blokové schéma řetězce pro měření impedanční charakteristiky cívek	52
7.2	Blokové schéma řetězce pro měření spektra tónů	53
7.3	Blokové schéma řetězce pro měření charakteristik předzesilovače	54
7.4	Blokové schéma řetězce pro ověření MIDI převodu při rozladování tónů	55

7.5	Blokové schéma řetězce pro ověření MIDI převodu	56
B.1	Deska plošných spojů, horní strana (52,7 x 58 mm)	69
B.2	Deska plošných spojů, spodní strana (52,7 x 58 mm)	69
C.1	Osazovací nákras desky plošných spojů (52,7 x 58 mm)	70
F.1	Impedanční charakteristika jednotlivých cívek	75
F.2	Fázová charakteristika jednotlivých cívek	75
F.3	Výkonová charakteristika jednotlivých cívek	76
F.4	Spektrum noty malé g ($f_g = 196$ Hz) zachycené pomocí snímače . . .	76
F.5	Spektrum noty d1 ($f_{d1} = 293,66$ Hz) zachycené pomocí snímače . . .	77
F.6	Spektrum noty a1 ($f_{a1} = 440$ Hz) zachycené pomocí snímače	77
F.7	Spektrum noty e2 ($f_{e2} = 659,29$ Hz) zachycené pomocí snímače . . .	78
F.8	Přenosová charakteristika předzesilovače (Zesílení $G = 20$)	78
F.9	Fázová charakteristika předzesilovače (Zesílení $G = 20$)	79
F.10	THD předzesilovače (Zesílení $G = 20$)	79
F.11	Porovnání vstupní a výstupní partitury pro ověření MIDI převodu . .	80
F.12	Ověření rozpoznávání MIDI not v závislosti na jejich rozladění	80
G.1	Jedna cívka houslového snímače (průměr 15 mm, výška 20 mm)	81
G.2	Horní pohled na desku plošných spojů (52,7 x 58 mm)	81
G.3	Dolní pohled na desku plošných spojů (52,7 x 58 mm)	82
G.4	Model těla elektrických houslí (1:1)	82

SEZNAM TABULEK

1.1	Porovnání parametrů audio USB kodeků PCM2900C a CM6502 [13] [12]	26
1.2	Stupnice hudební dynamiky [14]	28
1.3	Délka not podle BPM [14]	29
1.4	Přirozené intervaly	30
1.5	Kmitočty not podle rovnoměrného temperovaného ladění [14]	30
1.6	MIDI kanálová data	32
1.7	Obsah zprávy „nota zapnuta“ [10]	32
1.8	Obsah zprávy „nota vypnuta“ [10]	33
1.9	Vyjádření not v MIDI formátu (čísla not) [10]	33
1.10	Dynamika not v MIDI formátu (rychlostní data)	34
1.11	Počet vzorků v segmentu	35
D.1	Soupis součástí	71

ÚVOD

Tématem této práce je návrh a realizace elektrických houslí s MIDI výstupem. Elektrické housle jsou v podstatě housle bez rezonanční skříně, jejichž akustický zvuk je zanedbatelný. Zvuk houslí je snímán ze strun pomocí snímačů. Signál ze snímače je přiveden do elektroniky houslí, která se stará o filtraci, zesílení a analogově-digitální převod zvuku. Takto zpracovaný zvuk v digitální podobě zpracuje program. Tento program rozpozná tóny a převede je do MIDI zpráv. Díky MIDI můžeme docílit reprodukce libovolného zvuku z banky samplovaných zvuků pomocí hry na housle.

V teoretickém úvodu práce je rozebrána funkce elektrických houslí, tvoření tónu na houslích, snímání strun, teorie filtrů, AD a DA převod, MIDI standard, USB převodník a další teorie potřebné pro tuto práci.

Druhá část se věnuje návrhu řešení houslí, výběru technologie snímání strun, způsobu zpracování zvuku a převodu do MIDI.

Třetí část obsahuje návrh snímače a elektrických obvodů pro zpracování signálu ze snímačů.

V další, čtvrté části, je návrh programu pro převod do MIDI v prostředí Pure-Data.

Poslední část popisuje změřené charakteristiky a parametry snímačů, předzesilovače a celého převodu do MIDI zpráv.

1 TEORETICKÝ ROZBOR

Elektrické housle jsou strunný smyčcový hudební nástroj. Akustický zvuk těchto houslí je zanedbatelný - výsledný zvuk je tvořen elektrickou soustavou zakončenou reproduktorem. Jejich výhodou je absolutní svoboda v tvoření zvuku, lze na ně aplikovat plno efektů a filtrů, jaké známe například u elektrické kytary.

Prvním článkem řetězce tvorby tónu u elektrických houslí je snímání kmitů strun. To se provádí pomocí snímačů. Existují snímače, které využívají piezoelektrický jev [1], elektromagnetické snímače [2] nebo experimentální optické snímače [3].

Podle zvoleného způsobu snímání je třeba signál ze snímače zesílit, popřípadě vyfiltrovat. K tomu slouží předzesilovače, které je vhodné umístit co nejbližší ke snímači, to znamená do těla nástroje. Tím se vyvarujeme naindukování šumu, především v kmitočtové oblasti kolem 50 Hz. Signál zpracovaný předzesilovačem lze dále připojit buď přímo do výstupní aparatury, nebo ho dále zpracovávat. Například převést do digitální oblasti a provést MIDI převod.

Převod signálu do MIDI lze provést buď přímo v těle nástroje pomocí signálového procesoru, nebo externě v počítači. Připojení k počítači by potom bylo realizováno pomocí integrace zvukové USB karty do těla nástroje. Samotný převod do MIDI se skládá z několika kroků, které jsou popsány dále v práci.

1.1 Elektrické housle

Elektrické housle jsou hudební nástroj vycházející z klasických houslí. Řadí se mezi strunné smyčcové nástroje. Housle mají typicky čtyři struny laděné v čistých kvintách g, d1, a1, e2. Housle se skládají z excitátoru (smyčec), oscilátoru (struny), rezonátoru (tělo) a radiátoru (f otvory). Elektrické housle na rozdíl od klasických neobsahují rezonátor a radiátor. Signál se u nich snímá přímo z kmitajících strun pomocí snímače.

1.1.1 Tvoření tónu

Budičem, neboli excitátorem na houslích může být buď ruka (tzv. pizzicato), tón vzniká drnkáním na strunu prstem, struna kmitá rovnoměrně doleva i doprava, nebo smyčec (tzv. legato), tón vzniká smýkáním smyčce po struně, struna kmitá nuceně více ve směru tahu smyčcem. Excitátor vybudí oscilátor (strunu) a na struně vznikne stojaté kmitání. Výška znějícího tónu závisí na aktivní délce struny, síle napnutí struny a hustotě materiálu struny podle vzorce (1.1) [4]

$$f = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{F}{p}}, \quad [\text{Hz}] \quad (1.1)$$

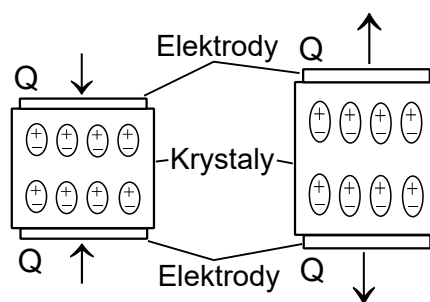
kde n je parametr vyšší harmonické, l je délka struny, F je síla napnutí struny a p je hustota materiálu struny. Síla tónu je závislá na amplitudě kmitání .

1.2 Houslové snímače

Houslovým snímačem se rozumí kontaktní snímač, který snímá kmitání strun nástroje. Mezi tyto snímače používané na housle patří především piezoelektrické a elektromagnetické snímače.

1.2.1 Piezoelektrický snímač

Piezoelektrické snímače využívají ke své funkci piezoelektrického jevu, který spočívá v tom, že uvnitř některých polykryalických látek vzniká vlivem mechanické deformace elektrický náboj viz obr. 1.1. Piezo snímač tvoří piezo krystal, který je umístěn mezi dvě elektrody (nejšťastěji kruhové plíšky) . Z nich je náboj odváděn kabelem.

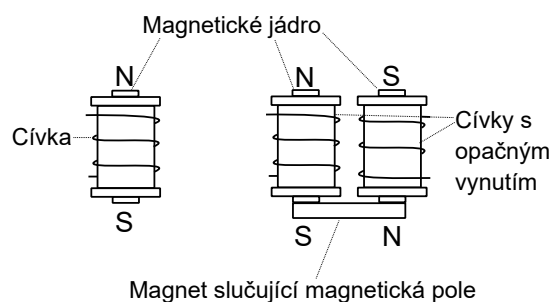


Obr. 1.1: Piezoelektrický jev

Na houslích se piezo snímač umísťuje nejčastěji pod nožičky kobylky, nebo může být integrován přímo v kobylce.

1.2.2 Elektromagnetický snímač

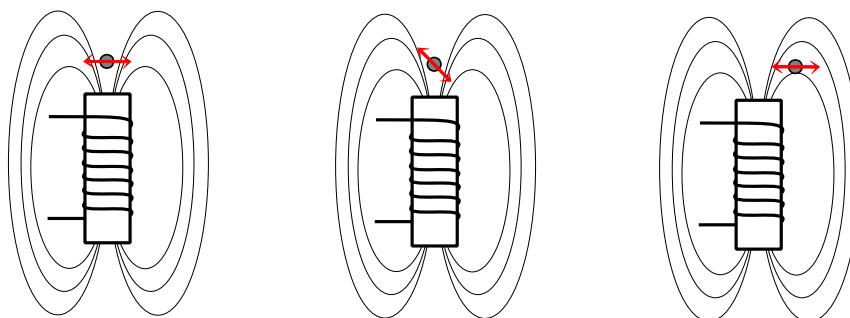
Tento snímač převádí kmity strun na elektrický signál pomocí elektromagnetické indukce. Ocelová struna svým pohybem vytváří změny v magnetickém poli snímače a tyto změny se projeví jako napětí na výstupu snímače. Elektromagnetický snímač se skládá z jedné nebo více cívek s magnetickým jádrem viz obr. 1.2. V magnetickém poli této cívky kmitá struna a tím indukuje v cívce elektrický signál. Snímače jsou náchylné na okolní rušení, které zkresluje snímaný signál a generuje tzv. brum. Zvolením vhodné konstrukce snímače můžeme omezit vliv rušení a tím snížit hladinu brumu a šumu v užitečném signálu. [5]



Obr. 1.2: Elektromagnetické snímače, *singlecoil* (vlevo) a *humbucker* (vpravo), při pohledu z boku

Vlastnosti snímače závisí na konstrukci snímače a použitých materiálech. Cívka se vyrábí z měděného smaltovaného drátu a magnetické jádro hned z několika materiálů. Nejvhodnějším, ale také nejdražším materiálem jsou neodymové tzv. (AlNiCo), nebo (NdFeB) magnety.

Pro dosažení rovnoměrného zvuku například u kytar je pod každou strunu umístěn jeden magnet. Takováto konstrukce je pro ně vhodná, protože struny na kytarě kmitají rovnoměrně doleva i doprava viz obr. 1.3 vlevo. Avšak při hře na smyčcem na housle jsou kmity nuceně vychylovány ve směru tahu smyčcem, tím dochází jen k nepatrnému vzdalování struny od pólu magnetu viz obr. 1.3 uprostřed. Signál takového snímače bude velice slabý a zkreslený. Proto je vhodnější konstruovat houslový snímač tak, aby se struna při hře vzdalovala a přibližovala k pólu magnetu a přitom působila dostatečnou změnu v magnetickém poli snímače. Toho lze docílit například umístěním snímací cívky mezi dvě struny viz obr. 1.3 vpravo. [6]



Obr. 1.3: Kmitání strun v magnetickém poli snímače umístěném pod strunou pro kytaru (vlevo), pro housle (uprostřed) a při umístění mimo strunu (vpravo)

Jak se bude který snímač chovat, to nám mohou napovědět jeho parametry. Pro návrh snímače jsou důležité především tyto parametry [6]:

- **impedance snímače** (Ω) - jde o kmitočtově závislou impedanci. Skládá se z reálné a imaginární složky. Nejčastěji se impedance uvádí pro frekvenci 1 kHz,
- **výstupní napětí** (V) - udává velikost výstupního napětí snímače
- **kmitočtová charakteristika** - tato charakteristika nám ukáže, jak se bude snímač chovat při snímání různých kmitočtů.

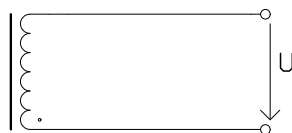
Rozdělení snímačů dle impedance

Snímače lze konstruovat v provedení vysokoimpedančním a nízkoimpedančním. Vysokoimpedanční snímač je v podstatě kytarový elektromagnetický snímač. Cívka takového snímače má navinuto 10 - 12 tisíc závitů. [5] Její impedance se pohybuje mezi 5 a 20 k Ω . Nevýhodou je omezená kmitočtová charakteristika vysokoimpedančního snímače. Snímač vykazuje maximum (rezonanci) kolem 6 kHz a poté následuje propad se strmostí cca 12 dB/oktávu. Kmitočtovou charakteristiku takového snímače lze pomocí vhodných metod korigovat.

Druhým, pro housle vhodnějším provedením, je konstrukce nízkoimpedančního elektromagnetického snímače. Tento snímač má cívku navinutou z cca 2,5 tisíce závitů. [5] Její impedance se pohybuje v řádech stovek ohmů. Její kmitočtová charakteristika nabývá maxima (rezonance) téměř za hranicí slyšitelného pásma. Výstup nízkoimpedančního snímače je podobný výstupu mikrofону. Proto lze pro jeho zesílení použít mikrofonní předzesilovač. Nezatěžuje jeho vstup svou impedancí.

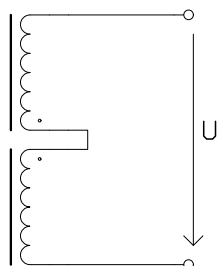
Rozdělení podle počtu cívek

Elektromagnetické snímače lze konstruovat v jedno- a vícecívkovém provedení. Každé provedení má svoje výhody a nevýhody. Jednocívkový snímač, tzv. *singlecoil*, je nejjednodušší typ snímače viz obr. 1.4. Skládá se z jedné cívky a několika pólových nástavců. Jeho výstupní signál je poměrně silný, nicméně tento snímač je náchylný na okolní rušení zvláště na síťové rušení kolem 50 Hz.



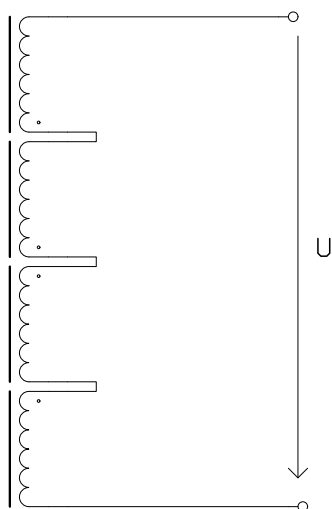
Obr. 1.4: Elektrické schéma jednocívkového snímače

Dvoucívkový snímač tzv. *hambucker* je složen ze dvou jednocívkových snímačů se společným magnetickým polem a opačným vinutím cívek viz obr. 1.5. Toto řešení není díky opačné polarizaci cívek tolik náchylné na rušení. Rušení je na obou cívkách stejné a díky opačné polarizaci se odečítá. Nevýhodou tohoto řešení je útlum na vyšších kmitočtech a slabší výstupní úroveň signálu.



Obr. 1.5: Elektrické schéma dvoucívkového snímače

Dalším možným řešením pro zesílení výstupního signálu je zdvojení cívek dvoucívkového snímače-zapojení dvou a dvou cívek se stejnou polarizací do série viz obr. 1.6.



Obr. 1.6: Elektrické schéma zdvojeného čtyřcívkového snímače

1.3 Operační zesilovač

Operační zesilovač je aktivní polovodičový elektronický obvod s velice širokou škálou využitím od matematických operací po zesilovače napětí a proudu. Operační

zesilovač má diferenční vstup tvořený dvěma vstupy. Neinvertujícím vstupem, který neotáčí polaritu vstupního signálu, a invertujícím vstupem, který polaritu vstupního signálu mění. Na přenosovou charakteristiku OZ má kladný vliv použití zpětné vazby.

1.3.1 Vlastnosti ideálního a reálného operačního zesilovače

Pro návrh obvodů s operačním zesilovačem lze použít zjednodušeného modelu tzv. ideálního operačního zesilovače.

Ideální operační zesilovač:[7]

- nekonečně velké zesílení,
- nekonečně velká vstupní impedance,
- nulová výstupní impedance,
- nulový čas přeběhu OZ,
- lineární přenosová charakteristika,
- nulová napěťová nesymetrie vstupů.

Nicméně je pro návrh důležité znát i některé základní parametry reálného operačního zesilovače, které se k vlastnostem ideálního operačního zesilovače blíží.

Reálný operační zesilovač:

- **napěťové zesílení** (dB): u reálných operačních zesilovačů je velikost zesílení omezena hlavně napájecím napětím,
- **napěťová nesymetrie vstupů** U_{10} (V): napětí, které se musí přivést mezi vstupy, aby výstupní napětí bylo nulové,
- **výstupní impedance** R_{OUT} (Ω): zesílení by mělo být nezávislé na zatížení vstupu OZ. To znamená, že by ho neměla ovlivňovat velikost impedance zátěže. Reálný OZ se splnění této podmínky velice přibližuje. Jeho výstupní impedance je velice nízká,
- **vstupní impedance** R_{IN} (Ω): OZ nesmí zatěžovat vstupní obvody, ke kterým je připojen, proto musí mít velkou vstupní impedanci,
- **rychlost přeběhu** (V/ μ s): rychlost změny výstupního napětí za jednu mikrosekundu,
- **činitel potlačení souhlasného signálu**: reprezentuje míru potlačení souhlasných signálů na vstupu operačního zesilovače. [7]

1.3.2 Zpětná vazba operačního zesilovače

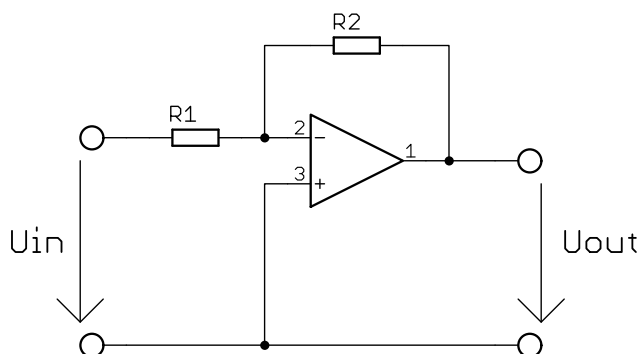
Zpětná vazba znamená přivedení části výstupního signálu zpět na vstup. U operačního zesilovače je možné zavést kladnou a zápornou zpětnou vazbu. Kladná zpětná vazba zvyšuje zesílení operačního zesilovače, ovšem vede k nestabilitě obvodu. Záporná zpětná vazba naopak stabilitu operačního zesilovače zlepšuje, také zvětšuje šířku přenosového pásma, snižuje výstupní impedanci a zvětšuje tu vstupní. Záporná zpětná vazba má také kladné účinky na zkreslení operačního zesilovače. [7]

1.3.3 Základní zapojení s operačním zesilovačem

Existují dvě základní zapojení OZ, která se liší podle toho, na jaký vstup je přiváděn vstupní signál:

- invertující zapojení,
- neinvertující zapojení.

U invertujícího zapojení je signál přiveden na invertující vstup operačního zesilovače přes odpor $R1$. Zpětná vazba je vedena z výstupu přes odpor $R2$ viz obr. 1.7. Nevýhodou je nízký vstupní odpor, závisející na velikosti odporu $R1$.



Obr. 1.7: Invertující zapojení OZ

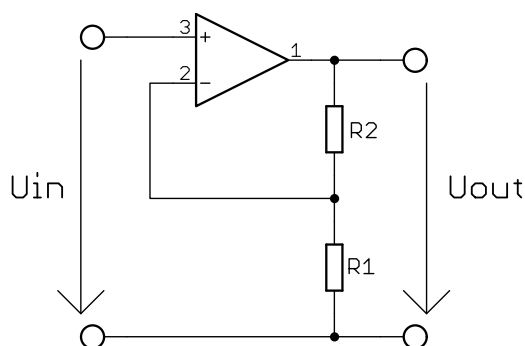
Při použití neinvertujícího zapojení je vstupní signál připojen k neinvertujícímu vstupu. Fáze vstupního a výstupního signálu je stejná viz obr.1.8. Protože napětí na invertujícím a neinvertujícím vstupu se musí rovnat, musí se napětí $U1$ rovnat napětí na odporu $R2$. Z toho plyne, že zesílení neinvertujícího operačního zesilovače lze vypočítat vztahem

$$A_U = \frac{U_{out}}{U_{in}} = \frac{R1 + R2}{R1} = 1 + \frac{R2}{R1}. \quad [-] \quad (1.2)$$

Z předchozího vzorce 1.2 lze jednoduše odvodit vzorec pro výstupní napětí neinvertujícího zapojení operačního zesilovače

$$U_{out} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) * U_{in}. \quad [V] \quad (1.3)$$

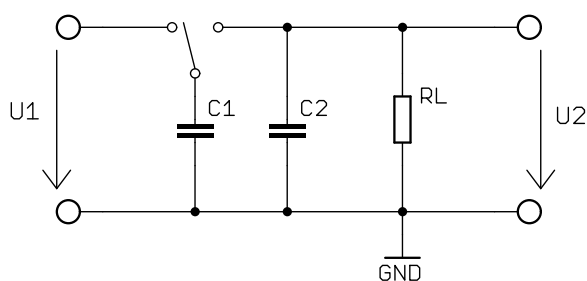
Výhodou tohoto zapojení je to, že impedance vstupu operačního zesilovače je rovná impedanci operačního zesilovače, v ideálním případě tedy nekonečná. Díky tomu teče do vstupů nulový proud a vstupní napěťová nesymetrie nemá vliv.



Obr. 1.8: Neinvertující zapojení OZ

1.4 Obvod se spínaným kondenzátorem

Obvod se spínaným kondenzátorem pracuje na principu spínaného zdroje a lze jej použít pro získání opačného napětí ke kladnému stejnosměrnému napájecímu napětí. Princip jeho funkce lze vysvětlit na schématu (obr. 1.9) získaném z technické dokumentace použitého konvertoru [8].



Obr. 1.9: Princip obvodu se spínaným kondenzátorem [8]

Při připojení kapacitoru $C1$ na napětí $U1$ dojde k jeho nabití. Elektrický náboj $Q1$ je roven napětí $U1$ krát kapacita kondenzátoru $C1$ podle vztahu (1.4)

$$Q1 = U1 \cdot C1. \quad [C] \quad (1.4)$$

Po přepnutí přepínače do druhé polohy dojde k vybití kondenzátoru $C1$ na napětí $U2$. Po vybití je na kondenzátoru $C1$ náboj $Q2$ vypočítaný dle vzorce (1.5)

$$Q2 = U2 \cdot C1. \quad [C] \quad (1.5)$$

Tímto krokem je náboj ze zdroje $U1$ převeden na náboj zdroje $U2$, tuto změnu popisuje vzorec (1.6), který vznikl rozdílem předchozích dvou vzorců

$$\Delta Q = Q1 - Q2 = C1 \cdot (U1 - U2). \quad [C] \quad (1.6)$$

Díky opakování tohoto procesu s kmitočtem f můžeme zjistit proud I protékající tímto obvode podle vzorce (1.7)

$$I = f \cdot \Delta Q = f \cdot [C1 \cdot (U1 - U2)] = \frac{U1 - U2}{1/f \cdot C1}. \quad [A] \quad (1.7)$$

Podle předchozího vzorce (1.7) můžeme kondenzátor nahradit odporem, který je závislý na spínacím kmitočtu f a kapacitě kondenzátoru $C1$

$$R_{EQ} = 1/f \cdot C1. \quad [\Omega]$$

Tímto vznikne druhý nezávislý zdroj napětí.

1.5 Zemnění

Zemnění zařízení je velice důležité především v audio zařízeních. Špatně navržené zemnění může obsahovat zemní smyčky a produkovat brum, ten může v kombinaci se zesilovačem s velkým zesílením způsobovat přehřívání součástek, které může vést až k destrukci výkonových obvodů.

Správného zemnění lze dosáhnout pomocí několika doporučení, zkušeností a laboratorní práce s každým konkrétním zapojením. Hlavní doporučení jsou vyvarování se zemních smyček při návrhu plošného spoje, dostatečné šířky zemnicích cest, pokud je v zapojení více zemí, propojit je pouze v jednom místě atd.

1.6 Analogově-digitální převod

Úkolem analogově-digitálního převodníku je převod analogového signálu na signál číslicový. Tento převod má dvě fáze, vzorkování a kvantování.

1.6.1 Vzorkování

Spojité signál se v čase vzorkuje se vzorkovacím kmitočtem f_{VZ} . Tím vznikne diskrétní signál spojitý v čase. Při vzorkování je třeba dbát na to, aby vzorkovací kmitočet f_{VZ} byla nejméně dvakrát větší než nejvyšší kmitočet f_{MAX} vstupního signálu. Musí tedy platit podmínka: [9]

$$f_{VZ} \geq 2 \cdot f_{MAX}.$$

Pokud bychom tuto podmínku nesplnili došlo by k takzvanému aliasingu a zkreslení vzorkovaného signálu. Aliasingu předcházíme použitím tzv. antialiasingového filtru, typu dolní propopust.

1.6.2 Kvantování

Kvantování je v podstatě proces zaokrouhlování vzorků na jednotlivé kvantovací úrovně. Čím více kvantovacích úrovní máme, tím menší bude zkreslení výsledného signálu. Kvantovací krok je dán dle vzorce: [10]

$$Q = \frac{1}{2^N - 1},$$

kde N je počet bitů převodníku. Pro zpracování zvuku se používá rozlišení 16, 20 a 24 bitů. [10]

Při tomto procesu vzniká tzv. kvantizační chyba, jejíž velikost se pohybuje v intervalu $\pm 1/2$ vzdálenosti mezi jednotlivými kvantizačními hladinami. Podle počtu kvantizačních bitů lze vypočítat SNR (odstup signálu od šumu – signal to noise ratio) [10]

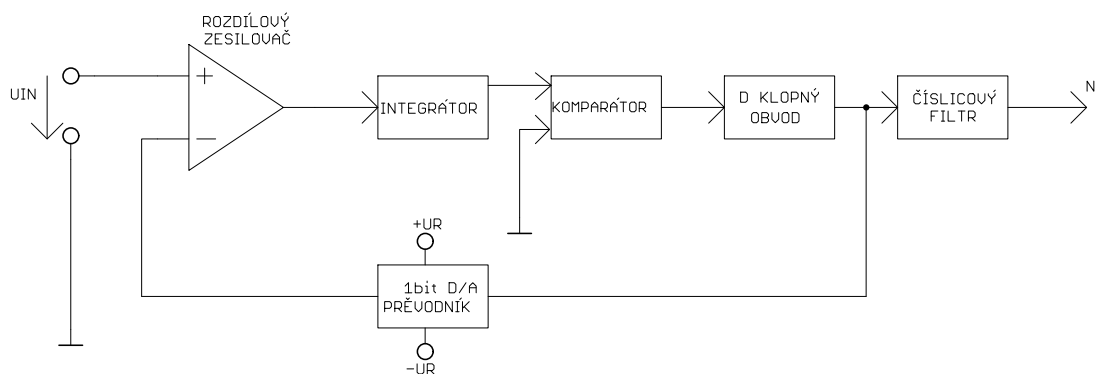
$$SNR = 20 \log \cdot 2^N - 1.$$

1.6.3 Sigma-delta převodník

Sigma-delta převodník se skládá z několika bloků, viz obr. 1.10.

Analogový signál je na zpracován rozdílovým zesilovačem, dále integrátorem, komparátorem, jednobitovým převodníkem D/A (digitálně analogový převod) se zdrojem referenčního napětí $\pm U_{REF}$ (V), klopným obvodem typu D a číslicovým filtrem.

Převáděné napětí se přivede na neinvertující vstup rozdílového zesilovače a na invertující referenční napětí jedné polarity. Výsledné napětí se integruje. Na výstupu integrátoru je komparátor, který porovnává toto napětí s potenciálem země. Podle polarity vstupního napětí je na výstupu komparátoru logická 0 a nebo logická 1. Tato hodnota se zapíše do paměti pomocí D klopného obvodu. Celý postup se potom opakuje znovu s rozdílem opačné polarity referenčního napětí. Výsledný číslicový signál je po převodu ještě filtrován číslicovým filtrem.



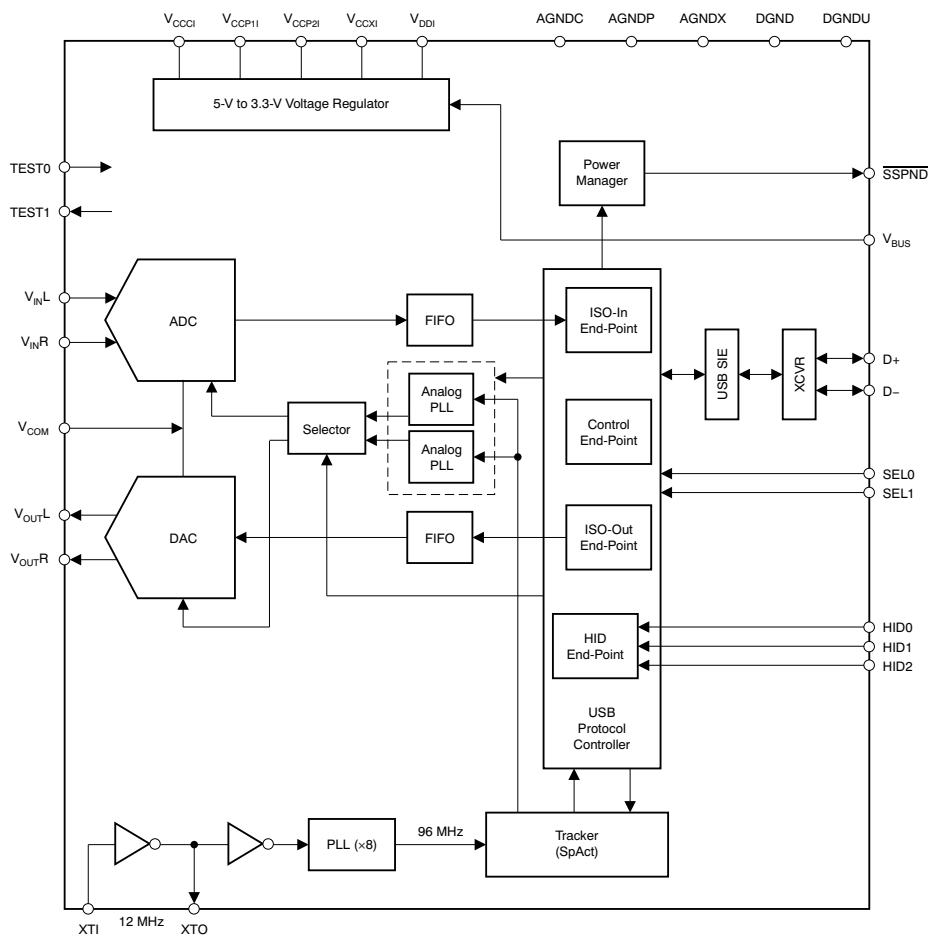
Obr. 1.10: Sigma-delta převodník

1.6.4 USB audio kodek Texas instruments PCM2900

Obvod Texas instruments PCM2900C je stereo USB audio kodek se dvěma analogovými vstupy a dvěma analogovými výstupy (obr. 1.11). Kodek podporuje přenos přes USB sběrnici plnou rychlostí a funguje jako plug and play zařízení, což znamená, že pro svou funkci nepotřebuje zásah uživatele. PCM2900c používá adaptivní mód pro přehrávání a asynchronní mód pro nahrávání. To znamená, že záznam zvuku přes kodek je nezávislý na taktu USB sběrnice a používá vlastní taktování pomocí PLL (fázový závěs – phase locked loop). PLL je řídicí systém, který umožňuje měnit kmitočet výstupního signálu pomocí kmitočtové syntézy. Skládá se z oscilátoru, v případě PCM2900 s kmitočtem 12 MHz, a fázového detektoru. Díky tomu lze přehrávat a nahrávat zvuk s nezávislými vzorkovacími kmitočty. [11]

Převod analogového signálu na digitální zajišťuje sigma-delta modulační převodník. PCM2900 obsahuje antialiasingový filtr na vstupech A/D převodníku. Obvod také obsahuje digitální horní propust na vstupu a analogovou dolní propust na výstupu.

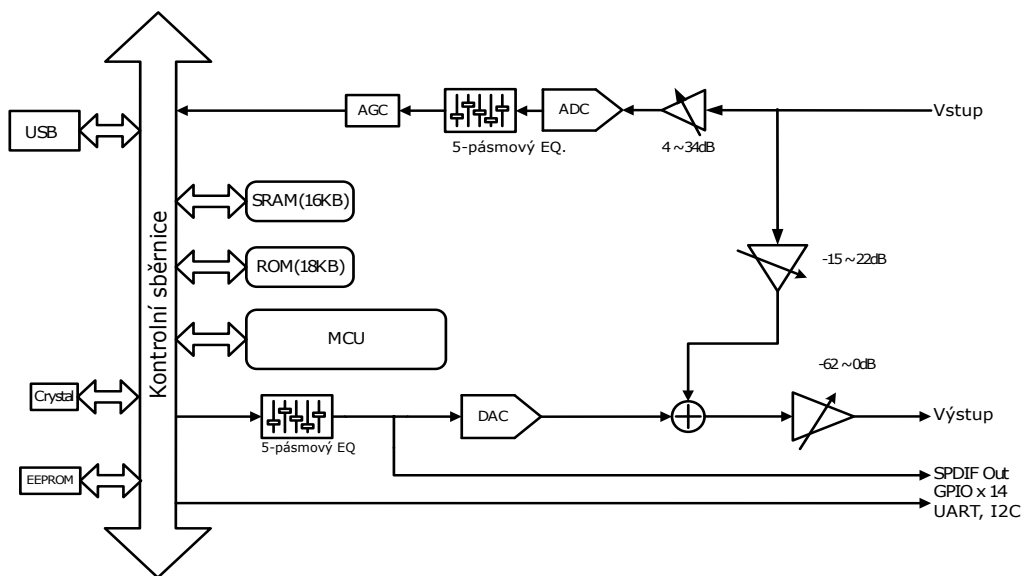
Kodek je napájen skrze sběrnici USB +5 V. Obvod obsahuje svůj interní napěťový regulátor, nicméně výrobce doporučuje použití externího regulátoru pro zvýšení kvality převodu. [12]



Obr. 1.11: Vnitřní zapojení USB audio kodeku PCM2900c [12]

1.6.5 USB audio kodek Cmedia CM6502

CM6502 je audio kodek se širokou škálou využití (obr. 1.12). Obsahuje dva A/D a dva D/A převodníky, předzesilovač pro mikrofon, ekvalizér a sluchátkový zesilovač. Kodek je kompatibilní s USB 1.0 a funguje jako plug and play zařízení, ovladače se nainstalují a zařízení bude fungovat bez zásahu uživatele. Vzorkovací kmitočty kodeku jsou 48 / 44.1 kHz a jeho rozlišení je 16 bitů. Pomocí I²C rozhraní CM6502 lze měnit nastavení A/D a D/A převodníků nebo také integrovaného ekvalizéru. [13]



Obr. 1.12: Vnitřní zapojení USB audio kodeku CM6502 [13]

1.6.6 Porovnání audio USB kodeků

Tab. 1.1: Porovnání parametrů audio USB kodeků PCM2900C a CM6502 [13] [12]

	PCM2900C	CM6502
I ² C ovládání	ne	ano
Mikrofonní předzesilovač	ne	ano
Sluchátkový zesilovač	ne	ano
Ekvalizer	ne	ano
A/D převodník	2-kanálový	2-kanálový
Bitová hloubka [bit]	16	16
Vzorkovací kmitočet [kHz]	8;11.025;16;22.05;32;44.1;48	44.1;48
THD+N [%]	0,01	0,0045
SNR [dB]	89	90
D/A převodník	2-kanálový	2-kanálový
Bitová hloubka [bit]	16	16
Vzorkovací kmitočet [kHz]	32;44.1;48	44.1;48
THD+N [%]	0,005	0,003
SNR [dB]	96	92

1.7 Hudební signál

Tato kapitola je výtahem ze zdrojů [15] a [14]. Signál je proměnná nesoucí nějakou informaci. Pokud je přenášena informace hudebního charakteru, můžeme mluvit o hudebním signálu. Hudební signál může mít několik forem. Například akustickou, která je reprezentována zvukovou vlnou, elektrickou v podobě elektrického proudu/napětí a nebo třeba optickou ve formě světla.

Hudební signály jsou tvořeny různými typy signálů. Pro tuto práci jsou ale důležité především periodické signály, protože tóny zahrané pomocí hudebních nástrojů mají periodický charakter. [15]

1.7.1 Tón

Tón je základní prvek informace hudebního signálu. Každý tón lze fyzikálně charakterizovat pomocí několika jeho vlastností: [15]

- výška - kmitočet tónu,
- síla - velikost amplitudy přenosové fyzikální veličiny,
- délka - doba trvání tónu,
- barva - spektrální složení tónu.

Výška tónu

Na struně vzniká tzv. stojaté vlnění. Pro něj je typické, že některá místa na struně kmitají s nulovou výchylkou, tzv. uzly, naopak místa s největší výchylkou se nazývají kmitny. Vzdálenost sousedních kmiten nebo uzlů je polovina vlnové délky λ . Tuto vzdálenost l lze vyjádřit vztahem

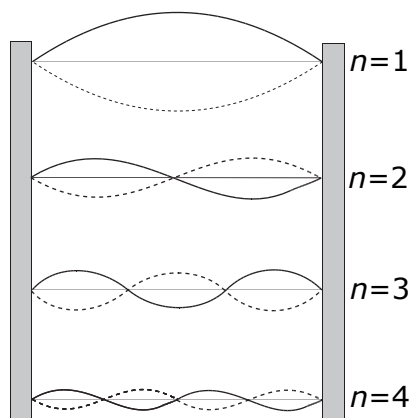
$$l = \frac{\lambda}{2}n, \quad [m] \quad (1.8)$$

kde n je celé číslo vyšší harmonické. [14]

Jak je patrné z obrázku 1.13, struna nekmitá pouze jako celek, ale kmitají také její poloviny a poloviny polovin. To znamená, že výsledné kmitání je složeno z několika složek.

První složka kmitá s kmitočtem základního tónu (fundamentu) a je nejméně tlumená. Ostatní složky se nazývají vyšší harmonické a jsou celočíselnými násobky základního tónu. Tyto vyšší harmonické také z velké části určují barvu tónu.

Samotné přiřazení not ke kmitočtu záleží na příslušném ladění. U nás je nejpožívanější temperované ladění, které je popsáno v další kapitole.



Obr. 1.13: Princip stojatého vlnění na struně

Síla tónu

Sílu tónu lze popsat jako velikost přenosové veličiny. Například v elektrotechnice je nosičem informace elektrické napětí a jako sílu signálu lze uvést amplitudu elektrického napětí. V hudbě se používá subjektivní stupnice dynamiky-viz tabulka 1.2. Ta je závislá především na možnostech jednotlivých nástrojů. [14]

Tab. 1.2: Stupnice hudební dynamiky [14]

Název	Označení v notaci	Význam
Piano pianissimo	ppp	nejslaběji
Pianissimo	pp	velmi slabě
Piano	p	slabě
Mezzopiano	mp	středně slabě
Mezzoforte	mf	středně silně
Forte	f	silně
Fortissimo	ff	velmi silně
Forte fortissimo	fff	nejsilněji

Délka tónu

Délka noty je závislá na tempu skladby, které se udává v BPM (úderů za minutu – beats per minute).

Na obrázku 1.14 je grafické znázornění not z notového zápisu. Význam těchto symbolů je popsán v tabulce 1.3. V prvním sloupci je číslo symbolu noty z obrázku 1.14. V druhém sloupci je název noty a ve třetím je počet dob BMP vyjádřených

k příslušné notě. Délku doby potom udává tempo skladby. To bývá udáváno slovně nebo přesně, jako číslo, které vyjadřuje počet dob za minutu.



Obr. 1.14: Zápis délky not v notovém zápisu [14]

Tab. 1.3: Délka not podle BPM [14]

Grafický zápis noty	Název noty	BPM
1	Celá	4 doby
2	Půlová	2 doby
3	Čtvrtová	1 doba
4	Osminová	1/8 doby
5	Šestnáctinová	1/16 doby
6	Dvaatřicetinová	1/32 doby

Stupnice

Stupnice je řada tónů poskládaná podle určitých pravidel. Stupnice začíná základním tónem, tzv. tónikou. Podle tóniky se odvozuje název celé stupnice. Další stupnice začíná od tóniky, která má dvojnásobný kmitočet předešlé tóniky. Vztahy mezi jednotlivými tóny určují intervaly. Stupnice se ve světě vyvíjely zvlášť, stejně jako řeč. Existují stupnice pětitéonové, šestitéonové, sedmitéonové, dvanáctitéonové, atd. Evropská soudobá hudba využívá především sedmitéonovou diatonickou durovou a mollovou stupnici. V diatonických stupnicích jsou od sebe tóny vzdáleny o celé tóny a nebo půltóny.

Intervaly

Intervaly jsou vztahy udávající vzdálenosti mezi tóny pomocí poměru jejich kmitočtů. Základní interval je oktáva s poměrem kmitočtů (2:1) udávající vzdálenost mezi fundamentem a první harmonickou složkou. Tento interval je vždy čistý a tóny, které ho tvoří nazýváme stejným jménem. Některé intervaly jsou odvozeny přímo z harmonické řady pomocí celočíselných násobků základního kmitočtu. Tyto intervaly jsou uvedeny níže v tabulce 1.4.

Tab. 1.4: Přirozené intervaly

Název	Poměr kmitočtů
Prima	1:1
Tercie (velká a malá)	5:4
Kvarta	4:3
Kvinta	3:2
Oktáva	2:1

1.7.2 Ladění

Ladění je uspořádání tónů podle poměru výšek do stupnic. Ladění lze rozdělit na dvě základní skupiny: na čistá a temperovaná ladění. Čistá ladění jsou taková, která využívají pouze tóny, jejichž kmitočet lze vyjádřit v celočíselných poměrech. Tato ladění mají bohužel velkou nevýhodu. Protože počet tónů v oktávě je omezen, vznikají nelibozvučné intervaly. Také u nich nelze provést enharmonickou záměnu.

Temperované ladění

Temperovaná ladění vznikla, aby alespoň částečně odstranila nevýhody čistých ladění. Tato ladění jsou záměrně mírně rozladěná a lze je rozdělit na rovnoměrná a nerovnoměrná ladění. V současnosti je nejpoužívanější ladění takzvané rovnoměrně temperované. V tomto ladění mají všechny intervaly stejného druhu stejné velikosti a žádný z intervalů kromě oktávy není čistý. Kmitočty jednotlivých tónů jsou v tabulce 1.5.

Tab. 1.5: Kmitočty not podle rovnoměrného temperovaného ladění [14]

	f[Hz]							
	Oktáva							
Tón	C2	C1	C	c	c1	c2	c3	c4
c	16,35	32,7	65,41	130,81	261,63	523,25	1046,5	2093
cis	17,32	34,71	69,3	138,59	277,18	554,37	1108,73	2217,46
d	18,35	36,71	73,42	146,83	293,66	587,33	1174,66	2349,32
dis	19,45	38,89	77,78	155,56	311,13	622,25	1244,51	2489,02
e	20,6	41,2	82,41	164,81	329,63	659,26	1318,51	2637,02
f	21,83	43,65	87,31	174,61	349,23	698,46	1396,91	2793,83

fis	23,12	46,25	92,5	185	369,99	739,99	1479,98	2959,96
g	24,5	49	98	196	392	783,99	1567,98	3135,96
gis	25,96	51,91	103,83	207,65	415,3	830,61	1661,22	3322,44
a	27,5	55	110	220	440	880	1760	3520
ais	29,14	58,27	116,54	233,08	466,16	932,33	1864,66	3759,31
h	30,87	61,74	123,47	246,94	493,88	987,77	1975,53	3951,07

1.8 MIDI

Hudební komunikační rozhraní, které nepřenáší zvukový signál, ale pouze řídicí data. Tato data reagují na události vzniklé během práce na MIDI (hudební digitální sběrnice – musical instrument digital interface) zařízení.

Samotné rozhraní vzniklo mezi lety 1981 - 1985, proto je dnes poměrně zastaralé a zvětšuje se tlak na jeho nahrazení novým globálním hudebním rozhráním. [10]

1.8.1 Technická specifikace

Hardware rozhraní MIDI

Pro MIDI se používá pětipinový konektor DIN. Jeho zapojení má tři varianty:

- IN - pro vstup dat,
- OUT - pro výstup dat,
- THRU - kopie dat ze vstupu (IN).

MIDI sběrnice je proudová smyčka, ve které je logická nula reprezentována protékajícím proudem 5 mA. Komunikace skrze sběrnici je asynchronní s rychlostí cca 31,25 kBaudů. Komunikační rámec trvá 320 μ s se skládá ze startbitu, osmi datových bitů a stopbitu. Propojit lze maximálně 16 zařízení. [10]

Struktura MIDI protokolu

- Identifikační bit (Stavový byte / Datový byte)
- Stavový byte
 - 1 stavový bit
 - 3 bity identifikující typ zprávy
 - 4 bity identifikující MIDI kanál
- Datový byte
 - 1 datový bit
 - 7 bit obsahujících data

MIDI protokol obsahuje kanálová a systémová data. Kanálová data přenáší hlasová data a data režimu. Systémová data přenáší data, která jsou společná pro všechny kanály, zvláštní systémová data, společná systémová data a data reálného času. [10]

1.8.2 Kanálová data

V tabulce 1.6 jsou popsány MIDI kanálová data. Informace pro tuto tabulce jsem čerpal z materiálů [10].

Tab. 1.6: MIDI kanálová data

Adresa	MIDI zpráva	Databyte - 1	Databyte - 2	Popis zprávy
0x8n	NOTE OFF	číslo noty	rychlost	Nota vypnuta
0x9n	NOTE ON	číslo noty	rychlost	Nota zapnuta
0xA _n	POLYPHONIC KEY PRESSURE	číslo noty	hodnota tlaku	individuální tlaková citlivost
0xB _n	CONTROL CHANGE	číslo kontroleru	data	změna kontroleru
0xC _n	PROGRAM CHANGE	číslo programu	-	volba programu
0xD _n	CHANNEL PRESSURE	hodnota tlaku	-	společná tlaková citlivost
0xE _n	PITCH BEND GANGE	data1	data2	ohýbání tónu

Zpráva „nota zapnuta“ a „nota vypnuta“

Tato zpráva obsahuje jeden stavový byte a dva datové byte viz tab. 1.7 pro zprávu „nota zapnuta“ a tab. 1.8 pro zprávu „nota vypnuta“. Ve stavovém bytu je číslo zprávy a číslo požadovaného kanálu. V prvním datovém byte je číslo noty a ve druhém jsou data o rychlosti. Rychlostní data se zjišťují z rychlosti stlačení klávesy a tím vytvářejí dynamiku noty v hodnotách od 0 do 127.

Tab. 1.7: Obsah zprávy „nota zapnuta“ [10]

Stavový byte	1. datový byte	2.datový byte
1001nnnn	0kkkkkkkk	0vvvvvvvv
0x9n	číslo noty	rychlostní data

Tab. 1.8: Obsah zprávy „nota vypnuta“ [10]

Stavový byte	1. datový byte	2.datový byte
1000nnnn	0kkkkkkk	0vvvvvvv
0x8n	číslo noty	rychlostní data

1.8.3 Notový zápis v MIDI formátu

Nota je v MIDI formátu zapsána pomocí čísla v rozmezí 0-127 (7 bitů). Tato čísla určují noty podle tabulky 1.9. Frekvenci noty f lze z daného čísla n zpětně dopočítat pomocí vzorce

$$f = 440 \cdot 2^{\frac{n-69}{12}}. \quad [\text{Hz}] \quad (1.9)$$

Po úpravě předchozího vzorce můžeme vypočítat číslo noty n podle frekvence: f

$$n = (12 \cdot \log_2(\frac{f}{440})) + 69. \quad [\text{Hz}] \quad (1.10)$$

Tab. 1.9: Vyjádření not v MIDI formátu (čísla not) [10]

Okt.	C	C#	D	D#	E	F	F#	G	G#	A	A#	H
-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
1	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35
2	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47
3	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59
4	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
5	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83
6	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95
7	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107
8	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119
9	120	121	122	123	124	125	126	127				

Informace o dynamice jsou získány z rychlosti stisku klávesy. Pokud je hodnota dynamiky 0, tak má zpráva stejný význam jako zpráva „nota vypnuta“. Vyjádření dynamiky pomocí MIDI rychlostních dat najdeme v tabulce 1.10.

Tab. 1.10: Dynamika not v MIDI formátu (rychlostní data)

Označení	Rychlostní data	Dynamika
vypnuto	0	off
piano pianissimo	16	ppp
pianissimo	33	pp
piano	49	p
mezzopiano	64	mp
mezzoforte	80	mf
forte	96	f
fortissimo	112	ff
fortissimo forte	127	fff

1.9 Převod do MIDI

Tato kapitola práce je věnována popisu několika metod detekce výšky tónu pro převod zvukového signálu do MIDI. Vstupní zvukový signál je třeba nejprve omezit odfiltrováním vyšších kmitočtů než 4 kHz. Protože housle mají funkční kmitočtový rozsah základního tónu od $f = 196$ Hz pro tón g až po oktávu c4, která má dosahuje kmitočet $f = 3951,07$ Hz pro tón h4. Dále musí být vstupní signál rozdělen na malé části, tzv. segmenty, po kterých je zpracováván.

1.9.1 Segmentace

Prvním krokem pro všechny metody detekce výšky tónu je rozdělení vstupního signálu na segmenty. Délku segmentu potom odpovídá nejkratší notě. Délka segmentu t_n lze vypočítat ze zvolené nejkratší noty n (1 - celá, 1/2 půlová, ..) a zvoleného tempa skladby v BPM podle vztahu [14]

$$t_n = \frac{4 \cdot n \cdot 60}{tempo}. \quad [s] \quad (1.11)$$

Délku segmentu můžeme přepočítat podle vztahu (1.12) na počet vzorků segmentu N_S , kde f_{vz} je vzorkovací kmitočet vstupního signálu [14]

$$N_S = t_n \cdot f_{vz}. \quad (1.12)$$

Výsledná délka zahrané noty bude odpovídat délce jednoho segmentu vynásobeného počtem segmentů s detekovanou stejnou výškou tónu.

V tabulce 1.11 jsou uvedeny počty segmentů nejkratší noty 1/32 (dvaatřicetinová nota) pro tempo 120 BPM a vzorkovací kmitočty čipu PCM2900. Hodnoty jsou vypočítány podle přechozích vzorců (1.11) a (1.12).

Tab. 1.11: Počet vzorků v segmentu

Vzorkovací kmitočet [Hz]	tempo [bpm]	dálka noty [-]	Počet vzorků v segmentu
8000	120	1/64	250
11025	120	1/64	344,53125
16000	120	1/64	500
22050	120	1/64	689,0625
32000	120	1/64	1000
44100	120	1/64	1378,125
48000	120	1/64	1500

Pomocí počtu vzorků v segmentu N_S a vzorkovacího kmitočtu f_{vz} lze vypočítat kmitočtové rozlišení Δf podle vzorce (1.13) [14]. Tato hodnota zároveň udává nejnižší možný detekovatelný kmitočet podle vztahu

$$\Delta f = \frac{f_{vz}}{N_S}. \quad [\text{Hz}] \quad (1.13)$$

Pro hodnoty z tabulky 1.11 je rozlišení $\Delta f = 16$ Hz. Jako spodní hranice kmitočtu pro detekování výšky noty je tato hodnota dostačující, protože nejnižší tón, který lze zahrát na housle, je malé g a jeho kmitočet je 196 Hz. Nicméně pro kmitočtové rozlišení tato hodnota nestačí, protože rozdíl kmitočtů mezi půltóny na nízkých kmitočtech je menší než 16 Hz, například mezi g a gis je kmitočtový rozdíl 11,65 Hz. Proto je při detekci nutné použít korekční metodu.

1.9.2 Detekce v časové oblasti

Detekce v časové oblasti probíhá pomocí jednostranné autokorelace, která vyjadřuje míru podobnosti posunuté posloupnosti. Hodnotu autokorelační funkce $R(k)$ lze vypočítat podle vztahu [16]

$$R(k) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-K-1} s(i)s(i+k), \quad k = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (1.14)$$

kde $s(i)$ je hodnota signálu a N je délka signálu. Autokorelací zjistíme v každém segmentu špičkové hodnoty. Pomocí polohy těchto maxim můžeme ze vztahu (1.15) [14] zjistit kmitočet základního tónu

$$L = \frac{T_0}{T_{vz}} = \frac{f_{vz}}{f_0}, \quad (1.15)$$

$$f_0 = \frac{f_{vz}}{L}, \quad [\text{Hz}] \quad (1.16)$$

kde L je index špičkové hodnoty (perioda základního tónu ve vzorcích), T_{vz} je vzorkovací perioda, T_0 je perioda základního tónu, f_{vz} je vzorkovací frekvence a f_0 je frekvence základního tónu.

Tato metoda je časově poměrně náročná, nicméně ji lze optimalizovat použitím rychlé Fourierovy transformace, čímž se segment převede do frekvenční oblasti, kde se umocní na druhou a převede zpět do časové oblasti. V této metodě je využit Wienerův-Chinčinův autokorelační teorém [14].

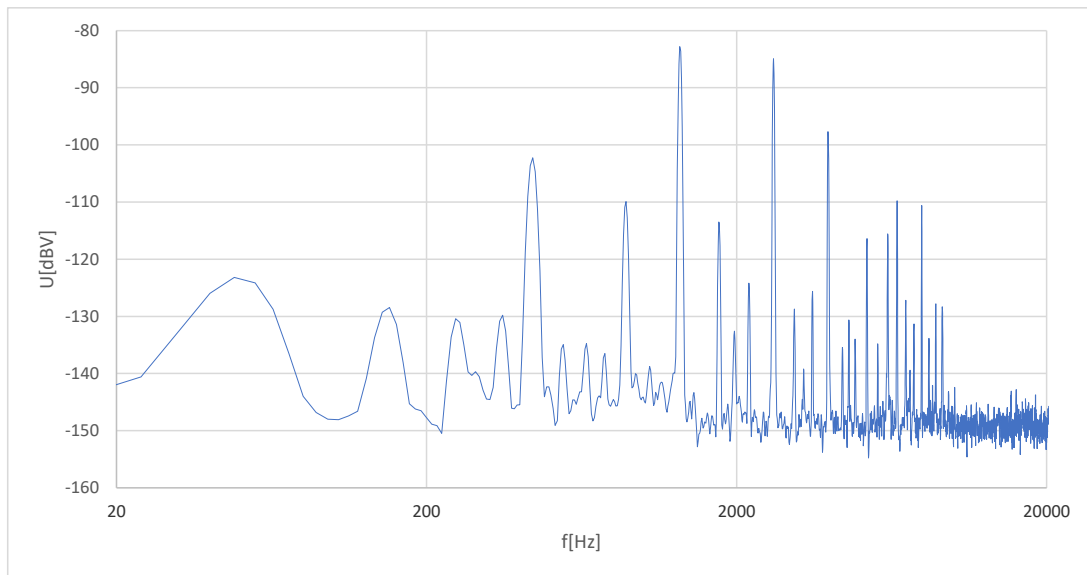
1.9.3 Detekce ve spektrální oblasti

Při použití této metody dochází k převodu segmentu z časové oblasti do kmitočtové oblasti (kmitočtové spektrum signálu). Tohoto převodu dosahujeme pomocí DFT (diskrétní Fourierova Transformace – discrete Fourier transformation) [16]

$$S(k) = \sum_{n=0}^{N-1} s(n) \cdot e^{jk \frac{2\pi}{N} n}, \quad k = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (1.17)$$

kde $S(k)$ je hodnota spektrální složky, $s(n)$ hodnota vstupního signálu a N je počet vzorků. Ve spektru jsou dobře viditelné složky signálu. Problém této metody spočívá v tom, že základní složka není vždy ta s největší hodnotou. Proto je tato metoda vhodná, pouze pokud známe spektrum vstupního signálu. Pro zpřesnění určování základního tónu lze také použít prahování ve spektrální oblasti a ořezání spektra vstupního signálu pomocí filtru dolní propust s mezním kmitočtem větší než je kmitočet nejvyššího základního tónu vstupního signálu [14]. Potom lze provést detekci a prohlásit, že první vrchol ve spektru udává frekvenci základního tónu.

V grafu na obr. 1.15 je zobrazeno spektrum tónu (komorní a) zahraného na housle se základní frekvencí $f = 440$ Hz. Spektrální složka základního tónu nemá nejvyšší hodnotu.



Obr. 1.15: Spektrum noty zahrané na housle (komorní a)

1.9.4 Kepstrální metoda detekce

Kepstrální metoda detekce pracuje v takzvaném kepstru, které je definováno jako inverzní Fourierova transformace logaritmu spektra vstupního signálu. To znamená, že vstupní signál se transformuje pomocí FFT (rychlá Fourierova transformace – fast Fourier transformation) a tím vznikne spektrum vstupního signálu. Modul spektra se zlogaritmuje. Na výsledek logaritmu se aplikuje IFFT (inverzní Rychlá fourierova Transformace – inverse fast Fourier transformation). Reálná část takto zpracovaného signálu je kepstrogram.

Další postup je podobný jako u autokorelace. V segmentu jsou vyhledány špičky a kmitočty základního tónu se vypočítá pomocí vzorce (1.16). Rozdíl v metodě je ten, že první složka u kepstrální metody musí být při detekci vynechána. První složky se využívají především k analýze řeči. Tato metoda není příliš vhodná kvůli své vysoké výpočetní náročnosti [14].

1.9.5 Prostředí PureData

PureData, zkráceně PD, je grafický open source programovací jazyk. PD umí pracovat s daty v reálném čase a často je využíván umělci pro práci se zvuky a obrazy, nicméně zvládne i jiné složité aplikace včetně ovládání hardwaru Arduino. Program

kombinuje grafické programování s textovým. A jeho programovací prostředí je zároveň rozhraním uživatelským. Programy v PD složené z grafických prvků nazýváme "patch".

Objekt „fiddle“

Některé často používané funkce jsou v PD definované, aby se nemusely tvořit stále dokola znovu. Těmito funkcím (částí programu) se říká objekty. Objekt „fiddle“ obsahuje funkci detekce not ze signálu v reálném čase. Pro popis tohoto objektu jsem čerpal ze zdrojů [17] a [18].

Prvním krokem detekce je rozdělení signálu na segmenty po N vzorcích v rozmezí 256 až 2048. Analýze segmentu potom proběhne pro každých $N/2$ vzorků s tím, že N vzorků doplníme o N nulových vzorků a na takto vytvořený segment získaný pomocí obdélníkového okna aplikujeme DFT (diskrétní Fourierova Transformace – discrete Fourier transformation). Pomocí tříbodové konvoluce můžeme ze signálu získat DFT pomocí Hanningova okna.

Hledání základního kmitočtu tónu ze segmentu potom probíhá pomocí pravděpodobnostní funkce [18]

$$\varphi(f) = \sum_{i=0}^k a_i \cdot t_i \cdot n_i, \quad (1.18)$$

kde k je počet detekovaných vrcholů, a_i amplituda i -tého vrcholu, t_i je vzdálenost od násobku kmitočtu f a n_i závisí na tom, jestli je i -tý vrchol blíže k nižšímu nebo vyššímu násobku kmitočtu f .

Když „fiddle“ hledá pouze jeden základní kmitočet v segmentu určí jej jako kmitočet s největší pravděpodobností. V případě, že určuje více základních kmitočtů určí je jako kmitočty s největší pravděpodobností, které nejsou násobky předchozích základních kmitočtů.

Objekt „fiddle“ má jeden vstup pro signály a variabilní počet kontrolních výstupů, záleží na nastavení objektu pomocí argumentů:

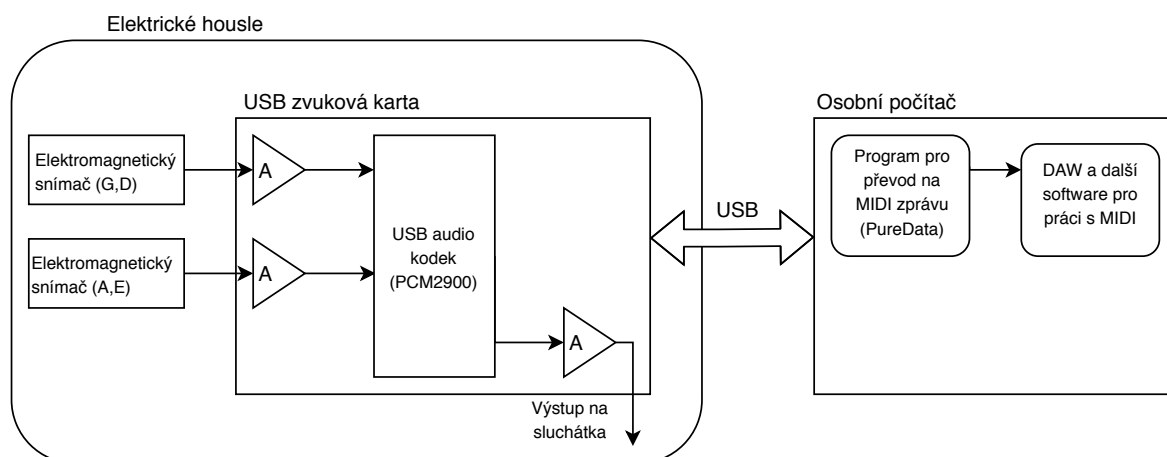
fiddle[*velikost-okna*][*počet-tónů*]

[*analyzované-vrcholy*][*vrcholy-na-výstupu*],

kde první argument *velikost-okna* udává počet vzorků jednoho segmentu (256 - 2048), argument *počet-tónů* udává počet hledaných základních kmitočtů (1 - 3), argument *analyzované-vrcholy* udává počet analyzovaných vrcholů (1 - 100) a argument *vrcholy-na-výstupu* říká, kolik vrcholů v podobě jejich kmitočtu a amplitudy bude posílat na výstup.

2 NÁVRH ŘEŠENÍ

Řešení této práce je založeno na elektromagnetických snímačích, jejichž výstupní signál je pomocí USB sběrnice přiveden do počítače, kde jej zpracovává program pro převod do MIDI zpráv viz obr. 2.1.



Obr. 2.1: Blokové schéma řetězce pro převod signálu ze snímačů do MIDI zprávy

Signál získaný ze snímačů je zpracován USB zvukovou kartou, kterou tvoří vstupní předzesilovače, USB audiokodek a výstupní zesilovač pro sluchátka. Ze zvukové karty je signál v digitální podobě přenesen přes USB sběrnici do počítače, kde jej zpracovává program pro převod na MIDI zprávu vytvořený v prostředí PureData. S výslednou MIDI zprávou můžeme pracovat například v DAW (digitálním prostředí pro zpracování zvuku).

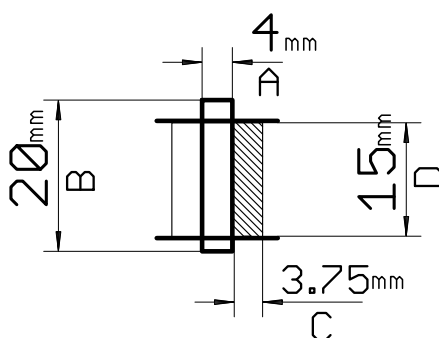
3 NÁVRH A VÝROBA SNÍMAČŮ

V této práci byl pro snímání strun houslí zvolen elektromagnetický snímač. Kvůli složité konstrukci a nevhodné rezonanci ve kmitočtové charakteristice vysokoimpedančního snímače jsem se rozhodl zkonstruovat nízkoimpedanční snímač. To znamená, že jeho impedance se pohybuje v desítkách, maximálně stovkách ohmů. Jeden snímač bude tvořen dvěma cívkami. Cívky snímače jsou navinuty měděným lakovaným drátem v několika vrstvách na magnetickém jádru.

Vlastnosti cívky:

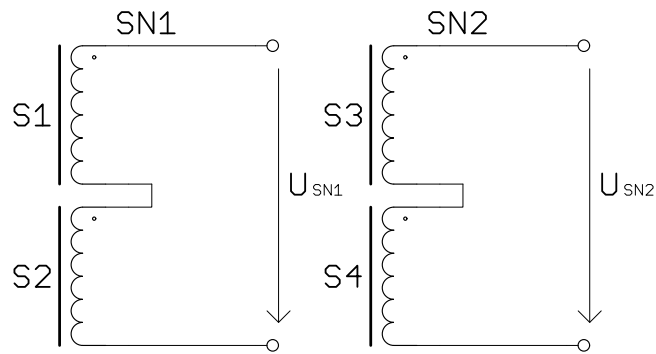
- vinutí-Cu smaltovaný drát $d = 0,15$ mm,
- počet závitů $N = 2500$,
- magnetické jádro (NdFeB),
- maximální výstupní napětí $U = 0.5$ mV,
- činný odpor $R = 57 \Omega$,
- impedance $Z = 100 \Omega$ (pro $f = 1$ kHz).

Jednotlivé cívky byly navinuty pomocí poloautomatické navíječky postavené na platformě arduino a stavebnici merkur. Cívka se skládá z magnetického jádra ve tvaru válce, vymešovacích koleček a vinutí. Rozměry cívky jsou patrné na obr. 3.1, kde A je průměr magnetického jádra, B je jeho výška, C je výška vinutí a D je šířka vinutí. Rozměry vinutí jsou odvozeny od požadovaného počtu závitů. Vinutí má 25 vrstev o 100 závitěch a je zalito voskem, aby nedošlo k povolení závitů nebo poškození vinutí.



Obr. 3.1: Řez cívkou snímače

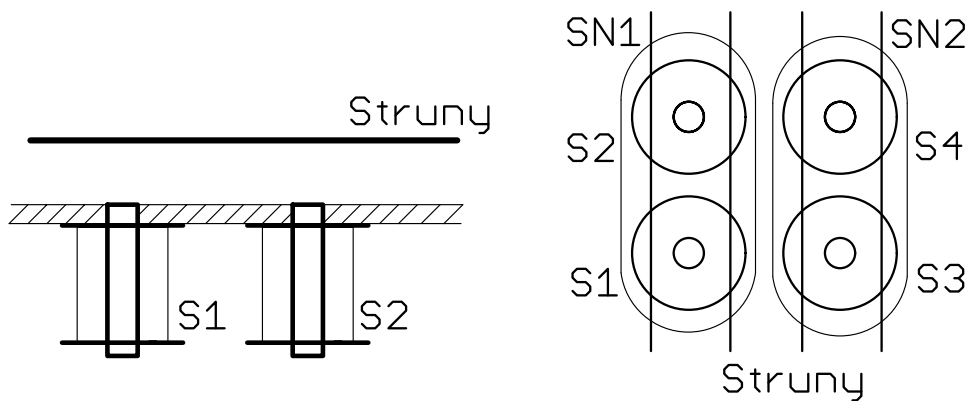
Pro tuto práci byly vyrobeny dva identické snímače SN1 a SN2. Každý ze snímačů je tvořen dvěma cívkami zapojenými v sérii viz obr. 3.2. Snímač SN1 je tvořený cívkami S1 a S2 a snímač SN2 je tvořený cívkami S3 a S4.



Obr. 3.2: Elektrické schéma zapojení houslových snímačů SN1 a SN2

Snímač tvoří dvě cívky. K této variantě jsem se přiklonil ze dvou důvodů. Prvním důvodem je poměrně slabá úroveň výstupního signálu jedné cívky, kolem 0,5 mV. Spojením dvou cívek do série dosáhneme výstupního napětí kolem 1 mV.

Druhým důvodem je fakt, že na struně vznikají tzv. kmitny a uzly, jak již bylo zmíněno výše v práci. Pokud by pod strunami byla pouze jedna cívka, docházelo by ke změnám hlasitosti při hraní různých tónů. Použitím dvou cívek v sérii tento jev z části potlačíme. Umístění cívek pod strunou je patrné na obrázku (3.3) vlevo.



Obr. 3.3: Umístění snímačů SN1 a SN2 vůči strunám

Nevýhodou tohoto řešení je náchylnost na elektromagnetická rušení, při kterých vzniká šum v užitečném signálu. Tuto nevýhodu lze potlačit vhodnou konstrukcí a odstíněním snímačů.

Snímače jsou konstruovány tak, že jeden bude snímat struny g a d1 a druhý struny a1 a e2. Umístění snímačů pod struny je zobrazeno na obrázku 3.3 vpravo.

4 NÁVRH OBVODOVÉHO ZAPOJENÍ

Tato kapitola popisuje návrh obvodových zapojení hardwaru pro zpracování signálu ze snímačů. První část se věnuje způsobu vedení signálu ze snímačů. Druhá část popisuje zapojení předzesilovačů, třetí popisuje zapojení USB kodeku PCM2900. Ve čtvrté části je popsán obvod sluchátkového zesilovače a poslední část se věnuje napájení celého zařízení.

4.1 Vedení signálu

4.1.1 Nesymetrické vedení signálu

V případě použití nesymetrického vedení signálu je signálová cesta tvořena signálním vodičem proti společnému zemnicímu vodiči. Tato konstrukce vedení je velice jednoduchá, je však náchylná na vnější šum a to především síťový šum a šum spínaných zdrojů.

4.1.2 Symetrické vedení signálu

Z výše zmíněných důvodů je pro signály s nižší úrovní užitečného signálu, který by šum mohl velice výrazně ovlivnit a znehodnotit, vhodnější symetrické vedení signálu. To využívá pro přenos signálu dva signálové vodiče symetricky proti společnému zemnicímu vodiči. Šum potom působí na oba signálové vodiče současně a působí jako souhlasné napětí. To potom potlačí symetrický přijímač.

4.2 Nástrojový zesilovač INA163

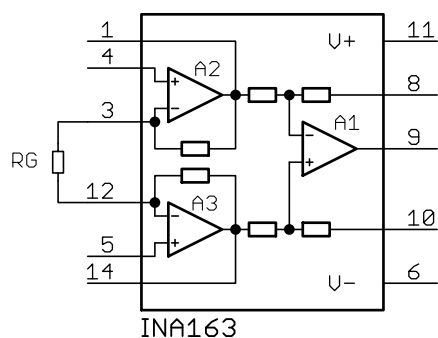
Signál ze snímače je přiveden pomocí symetrického vedení na diferenciální vstup nástrojového zesilovače INA163. Tento zesilovač je tvořen třemi operačními zesilovači ve společném pouzdře. Jeho vnitřní zapojení je na obrázku 4.1. Operační zesilovač A1 je zapojen jako diferenční zesilovač, který zesiluje rozdíl ze zesilovačů A2 a A3.

Zesílení zesilovače lze nastavit pomocí externího odporu R_G . Hodnotu zesílení G lze potom nastavit podle výrobcem uvedeného vzorce [19]

$$G = 1 + \frac{6000}{R_G}. \quad [-] \quad (4.1)$$

V našem případě je odpor R_G nahrazen odporem $R_{G_R} = 3 \Omega$ a lineárním trimrem s maximální hodnotou odporu $R_{G_T} = 1000 \Omega$ zapojenými v sérii. Když je trimr v nejnižší poloze, hodnota $R_G = 3 \Omega$ a zesílení G se rovná

$$G = 1 + \frac{6000}{R_G} = 2000. \quad [-] \quad (4.2)$$



Obr. 4.1: Vnitřní zapojení obvodu INA163 [19]

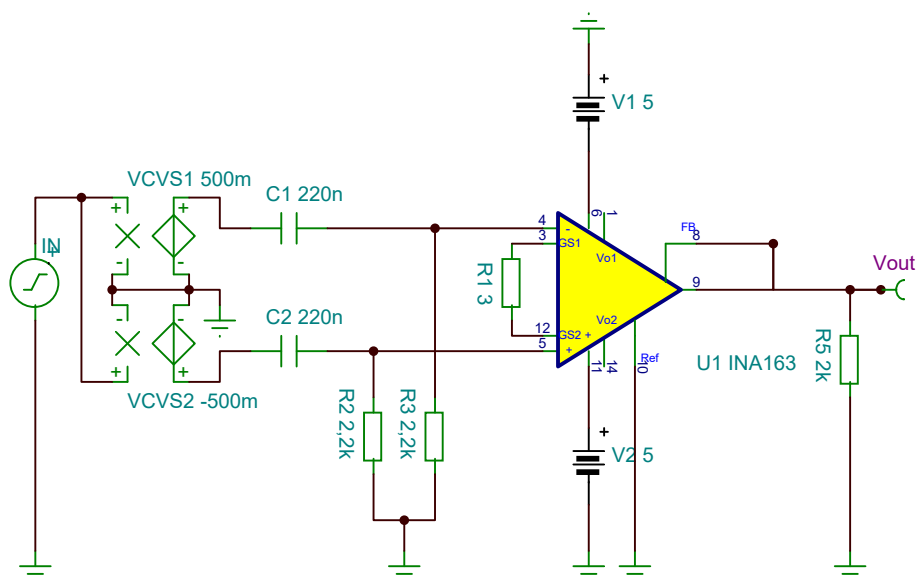
Naopak pokud je trimr v maximální poloze je odpor $R_G = 1003 \Omega$ a zesílení G má hodnotu

$$G = 1 + \frac{6000}{R_G} = 6,98. \quad [-] \quad (4.3)$$

Na vstupu předzesilovačů jsou filtry typu horní propust s mezním kmitočtem pro první kanál $f_{AE} = 328,8 \text{ Hz}$ a pro druhý kanál $f_{DG} = 153,9 \text{ Hz}$ podle vztahu

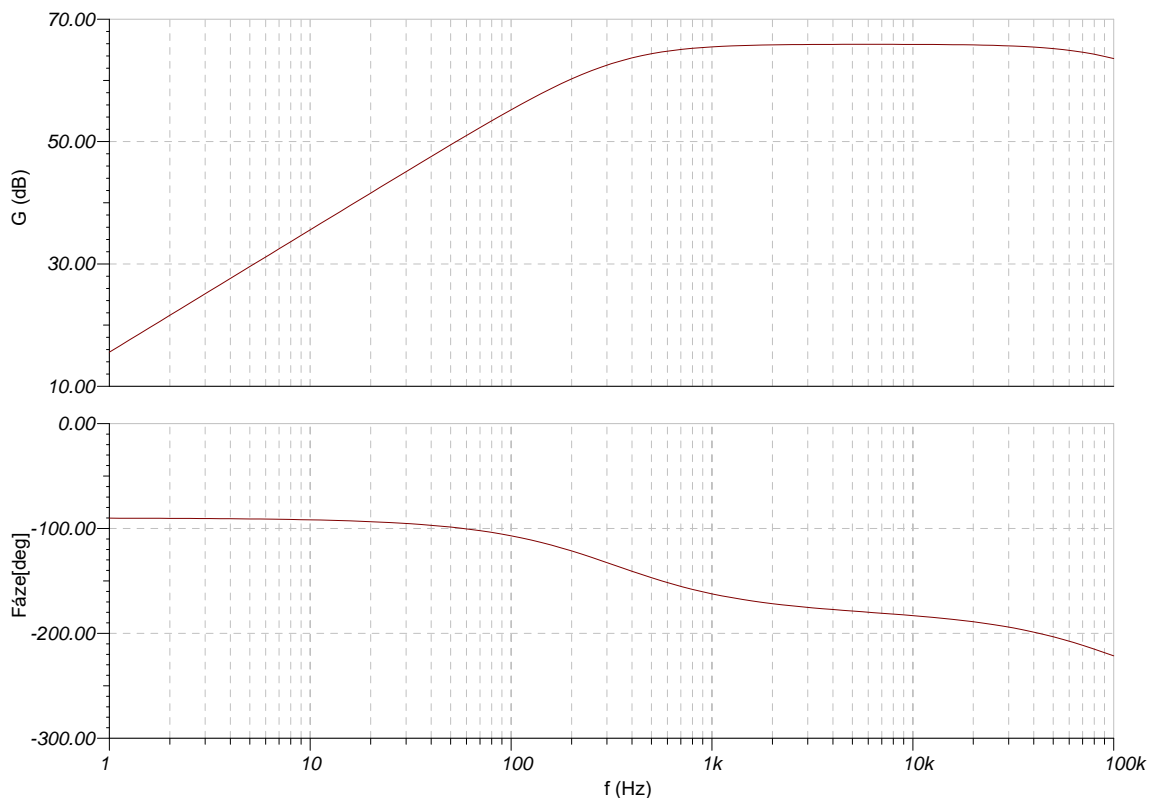
$$f = \frac{1}{2\pi C \cdot R}. \quad [\text{Hz}] \quad (4.4)$$

Pro ověření funkce jsem nasimuloval kmitočtovou a fázovou charakteristiku zapojení předzesilovače podle obrázku (4.2).



Obr. 4.2: Schéma zapojení předzesilovače v simulačním programu TINA-TI

Simulace byla provedena pro maximální nastavené zesílení předzesilovače pomocí odporu $R_G = 3 \Omega$ (viz obr. 4.3). Hodnota zesílení G odpovídá udávané hodnotě od výrobce [19].



Obr. 4.3: Kmitočtová a fázová charakteristika předzesilovače INA163 pro $R_G = 3 \Omega$

4.3 USB kodek PCM2900

Pro převod analogového signálu do digitálního a zároveň transport dat do počítače byl v této práci využit USB audio kodek PCM2900 od výrobce Texas Instruments. Tento kodek je tzv. „plug and play“ zařízení, což znamená, že jej stačí připojit k počítači a ovladač zařízení bude nalezen a nainstalován bez zásahu uživatele. V této kapitole je popsáno zapojení tohoto USB kodeku podle doporučení výrobce [12] a [20].

4.3.1 Napěťový regulátor REG103

Abychom dosáhli lepších parametrů na převodnících kodeku, je velmi důležité navrhnout správně napájecí obvody. Nízké napájecí napětí znamená snížení dynamic-

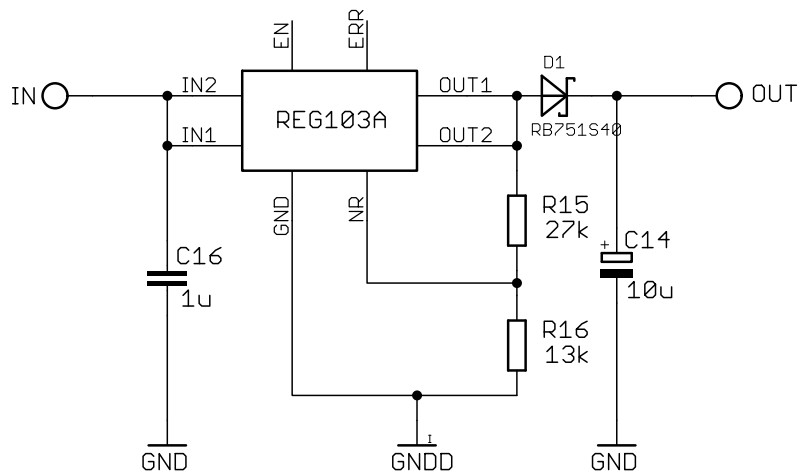
kého rozsahu kodeku a tím i zkreslení signálu. Výrobce obvodu PCM2900 proto doporučuje použít externí napěťový regulátor, viz technická dokumentace obvodu PCM2900C [12].

Výrobce doporučuje obvod s označení REG103A. Jedná se o nízkošumový napěťový regulátor s nastavitelným výstupním napětím. Předností tohoto obvodu je, že i při maximálním zatížení obvodu ($I_{MAX} = 500 \text{ mA}$) dovoluje pokles výstupního napětí maximálně o $\Delta U = 115 \text{ mV}$ [20].

Výstupní napětí regulátoru lze nastavit pomocí odporového děliče R15 a R16 viz obr. 4.4. Výrobce v technické dokumentaci [20] udává vztah pro výstupní napětí

$$U_{OUT} = \left(1 + \frac{R15}{R16}\right) \cdot 1,295. \quad [\text{V}] \quad (4.5)$$

Také udává, že napájecí napětí kodeku na pinu U_{CCCI} se má pohybovat mezi 3,6 - 3,85 V. Napájecí napětí jsem zvolil $U_{OUT} = 4 \text{ V}$ protože v cestě mezi výstupem napěťového regulátoru a pinu U_{CCCI} je ochranná dioda na které vzniká úbytek napětí $U_D = 370 \text{ mV}$. Hodnota odporu $R15 = 27 \text{ k}\Omega$ je určena výrobcem vzhledem k proudové



Obr. 4.4: Elektrické schéma napěťového regulátoru REG103A[20]

zatížitelnosti obvodu. Velikost odporu R16 lze dopočítat po úpravě pomocí vzorce (4.5)

$$R16 = \frac{R15}{\frac{U_{OUT}}{1,295} - 1} = 12,93. \quad [\text{k}\Omega] \quad (4.6)$$

Z tohoto vzorce jsem spočítal velikost odporu $R16 = 12,93 \text{ k}\Omega$. Hodnota $12,93 \text{ k}\Omega$ není standardizována, nejbližší hodnota v řadě E24 je $13 \text{ k}\Omega$.

4.3.2 Analogový vstup kodeku PCM2900

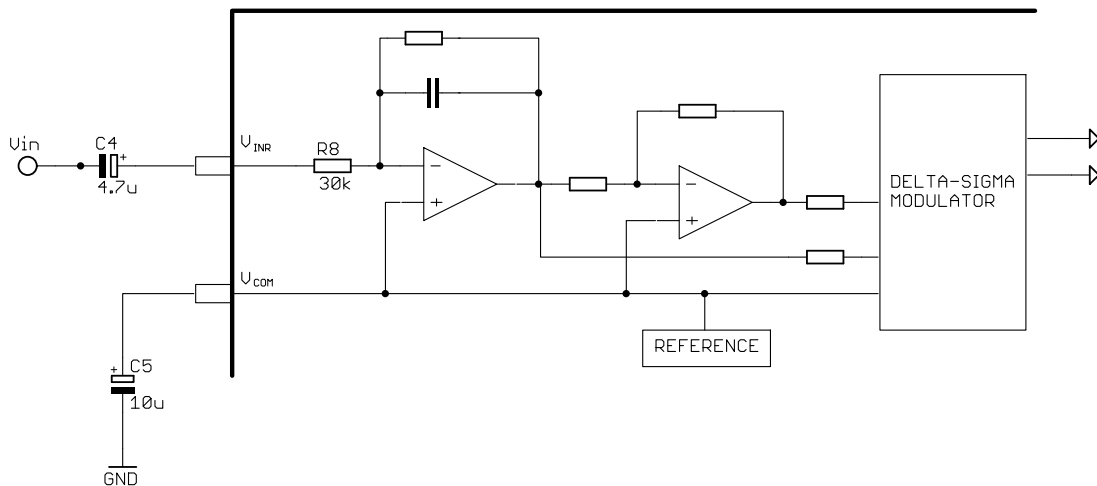
Kodek PCM2900c má dva identické analogové nesymetrické vstupy, schéma vstupní jednotky je na obrázku 4.5. Na analogovém vstupním kanálu dochází k rozdělení vstupního signálu na invertující a neinvertující signál pomocí dvou operačních zesilovačů. Takto rozdělený signál je přiveden na Delta-sigma modulátor, který převede analogový signál na digitální. Převodníky pracují s referenčním napětím

$$U_{REF} = 0,5 \cdot U_{CCCI} = 0,5 \cdot 3,63 = 1,815V.$$

Maximální velikost vstupního napětí na analogovém vstupu kodeku je dána dle výrobce [12]

$$U_{INMAX} = 0,6 \cdot U_{CCCI} = 2,178V_{pp}.$$

Do velikosti vstupního napětí $U_{INMAX} = 2,178 V_{pp}$ tedy nebude docházet k limitaci signálu. Výstupní napětí předzesilovačů INA163 má maximální velikost výstupního napětí $U_{OUT} = 1 V_{pp}$, k limitaci by tedy dojít nemělo.



Obr. 4.5: Schéma napěťového analogového vstupního kanálu kodeku PCM2900 [12]

4.4 Sluchátkový zesilovač TPA152

Digitálně-analogové převodníky na výstupu kodeku PCM2900c pracují se stejným referenčním napětím jako vstupní A/D převodníky, tedy

$$U_{REF} = 0,5 \cdot U_{CCCI} = 0,5 \cdot 3,63 = 1,815V.$$

I velikost výstupního napětí na analogovém výstupu kodeku je dán dle výrobce [21] stejně jako na vstupu

$$U_{\text{OUTMAX}} = 0,6 \cdot U_{\text{CCCI}} = 2,178V_{\text{pp}}.$$

Sluchátkový stereo zesilovač TPA152 je složen ze dvou stejných mono zesilovačů integrovaných ve společném pouzdře. Na vstupu zesilovače je filtr horní propust s mezním kmitočtem uvedeným podle výrobce [21]

$$f_{\text{IN}} = \frac{1}{2\pi C33 \cdot R19} = \frac{1}{2\pi 470e^{-9} \cdot 20e^3} = 16,931. \quad [\text{Hz}] \quad (4.7)$$

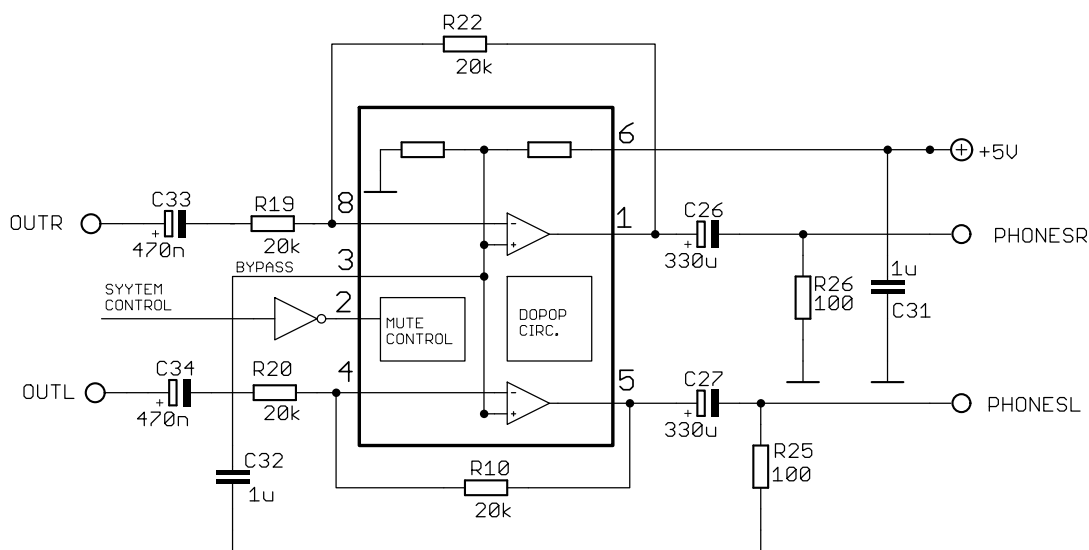
Zesílení lze dle katalogového listu výrobce vypočítat podle vzorce [21]

$$G_{\text{R}} = \frac{R22}{R19} = \frac{20000}{20000} = -1. \quad [-] \quad (4.8)$$

Vzorec pro nastavení zesílení levého kanálu

$$G_{\text{L}} = -\frac{R10}{R20} = -\frac{20000}{20000} = -1. \quad [-] \quad (4.9)$$

Schéma zapojení sluchátkového zesilovače je na obrázku 4.6. Zesilovač má možnost vzdáleného řízení funkce MUTE, kterou jsem pro tuto práci nevyužil.



Obr. 4.6: Elektrické schéma zapojení sluchátkového zesilovače TPA152 [21]

4.5 Napájení

Pro napájení předzesilovačů jsem použil kapacitně spínaný napěťový konvertor LT1054 od firmy Texas Instruments. Konvertor pracuje na již popsaném principu spínaného

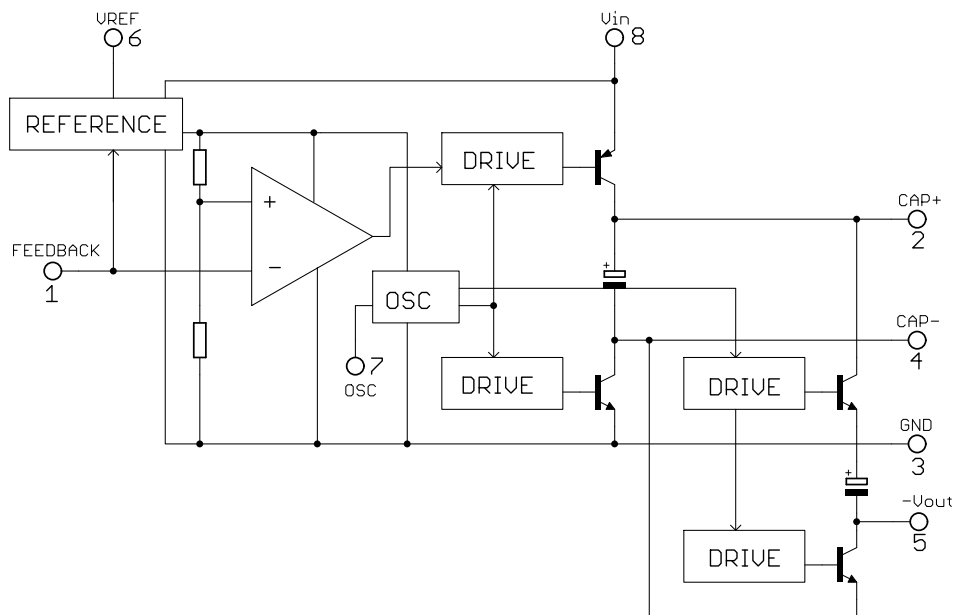
kondenzátoru. Spínání řídí vnitřní oscilátor, který pracuje na kmitočtu 25 kHz. Spínací kondenzátor se připojuje externě k pinům 2 a 4, viz obr. 4.7, výrobcem doporučená hodnota tohoto kondenzátoru je 10 μF .

Maximální proud, který zařízení zvládne dodat do zátěže je $I_{\text{MAX}} = 100 \text{ mA}$ pro verzi LT1054 a 125mA pro variantu LT1054L. To je pro předzesilovače dostačující hodnota.

Konvertor zdvojuje napájecí napětí a jeho výstupní napětí je tedy dvojnásobek vstupního napětí, od kterého je třeba odečíst ztráty v obvodu U_L , které jsou dle katalogového listu výrobce [8] pro maximální proud $I_{\text{MAX}} = 100 \text{ mA}$ $U_L = 1.1 - 1.6 \text{ V}$. Dále ještě musíme odečíst úbytek napětí na oddělovacích diodách. Výstupní napětí konvertoru potom pro obě polarity vypočítáme podle vzorce [8]

$$\pm U_{\text{OUT}} = 2U_{\text{IN}} \pm (U_L \pm 2U_D) = 2 \cdot 5 \pm (1,3 \pm 2 \cdot 0,7) = \pm 7,3. \quad [\text{V}] \quad (4.10)$$

Napájecí napětí předzesilovačů tedy bude $\pm U_{\text{OUT}} = \pm 7,3 \text{ V}$ při maximálním odběru $I_{\text{MAX}} = 100 \text{ mA}$.

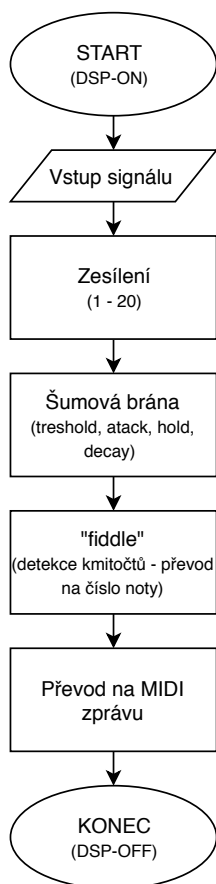


Obr. 4.7: Schéma vnitřního zapojení napěťového invertoru LT1054 [8]

Sluchátkový zesilovač TPA152 je napájen napájecím napětím ze sběrnice USB +5 V přes nízkošumový stabilizátor TLV760 s pevnou hodnotou [22] od firmy Texas Instruments.

5 NÁVRH A REALIZACE PŘEVODU DO MIDI

Programovacím prostředím pro převod zvuku do MIDI je v této práci grafické programovací prostředí PureData. Programovací jazyk PureData kombinuje grafické a textové programování. Jedná se o open source platformu s poměrně širokou komunitou. Program se specializuje na práci s daty v reálném čase, proto je pro tuto aplikaci vhodný. Funkce programu je popsána v diagramu užití viz obr. 5.1.

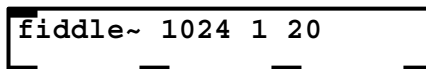


Obr. 5.1: Diagram užití programu pro převod zvuku do MIDI zpráv

Program se spustí zapnutím tlačítka DSP. Vstup signálu je v programu realizován pomocí objektu „adc“, který přijímá signál ze zvoleného kanálu zvukové karty. Na vstupu prochází signál efektem „noise gate“, neboli šumovou bránou, která se stará o odfiltrování rušivých signálů [10]. Efekt šumové brány je krajním případem dynamického efektu extender, u které je signál pod rozhodovacím prahem *threshold* potlačen. V efektu se dají také nastavit parametry *attack* (čas náběhu signálu řídicí větve), *hold* (doba podržení znějícího tónu) a *decay* (doba, za kterou klesne hodnota na ustálenou hodnotu). Nastavení šumové brány se provádí přímo v programu

prostředí PureData. Hodnoty nastavení záleží na mnoha faktorech a přizpůsobují se signálu ze snímaného nástroje.

Pomocí objektu „fiddle“ viz obr. 5.2 jsou v signálu vyhledány základní kmitočty a pak jsou převedeny na čísla not pro MIDI.

A screenshot of a PureData object named 'fiddle~'. The object is represented as a rectangular box with a black border. Inside the box, the text 'fiddle~ 1024 1 20' is displayed in a monospaced font. The object is connected to other objects in a network, indicated by small black squares at the corners and along the bottom edge.

Obr. 5.2: Objekt fiddle

První číslo za názvem objektu udává velikost okna (128 - 2048), druhé číslo udává počet hledaných základních tónů (1 - 3), třetí číslo udává počet vyhledávaných vrcholků (1 - 100) a za třetím číslem ještě může následovat čtvrté nepovinné číslo udávající počet vrcholků, které chceme zpracovat na výstupu. Výstupem objektu jsou kmitočty základního tónu, číslo detekované MIDI noty spolu s amplitudou, indikace „attack“ (výrazný nárůst dynamiky signálu) a volitelně kmitočty a amplitudy detekovaných vrcholků ze spektra. Délka noty potom odpovídá velikosti okna a době, po kterou se nezmění číslo noty, nebo nenastane další událost „attack“.

Detekovaná MIDI nota se poté pomocí objektu „noteout“ převede na MIDI zprávu a odešle na požadovaný MIDI kanál (syntetizér, DAW, ...).

6 NÁVRH TĚLA NÁSTROJE

Návrh těla nástroje není součástí zadání práce, nicméně s celou prací souvisí, a proto byl alespoň stručně do této práce zahrnut. Elektronika zpracování signálu bude umístěna spolu se snímači přímo uvnitř nástroje a propojení nástroje s počítačem bude realizováno pomocí USB kabelu.

U návrhu houslí je důležité dbát na dodržení rozměrů krku, hmatníku a dalších částí, aby se na nástroj dalo jednoduše přecházet z jiných houslí a hra byla pohodlná. Proto bylo při návrhu čerpáno z literatury [23]. Tělo nástroje bude vyrobeno z karbonových vláken o hmotnosti $180 \text{ g} \cdot \text{m}^2$. Proces výroby byl fotodokumentován a je na přiloženém CD.

7 MĚŘENÍ

V této kapitole jsou popsána měření částí řetězce pro převod zvuku do MIDI zpráv a ověření přesnosti převodu. Byla změřena impedanční, fázová a výkonnostní charakteristika snímače. Pomocí snímačů byla provedena spektrální analýza základních tónů houslí. Dále byla změřena přenosová charakteristika, fázová charakteristika a THD předzesilovače. Nakonec byla ověřena funkce převodu zvuku do MIDI zpráv.

Měřicí přístroje:

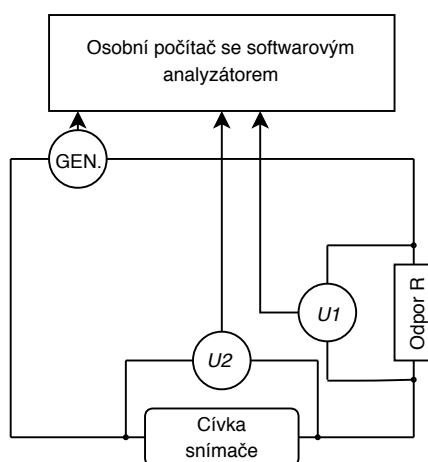
- analyzátor zvukových signálů Audio precision AP x525-25027-080724-1,
- reostat 100 Ω ,
- PC analyzátor pro měření impedanční charakteristiky repro,
- osobní počítač s USB,
- software MuseScore 2.2 + (LoopBe1).

7.1 Snímače

Na snímačích byla změřena impedanční, fázová a výkonnostní charakteristika. Pomocí snímačů byla také provedena spektrální analýza základních tónů na houslích.

Impedanční charakteristika

Impedanční, fázová a výkonnostní charakteristika (20 - 20000 Hz) byla změřena pro každou cívku zvlášť. Měření proběhlo podle zapojení na blokovém schématu viz obr. 7.1 pomocí analyzátoru s generátorem a dvěma měřicími vstupy.



Obr. 7.1: Blokové schéma řetězce pro měření impedanční charakteristiky cívek

Na vstupech analyzátoru bylo měřeno napětí a bylo přepočítáno na impedanci Z podle vztahu

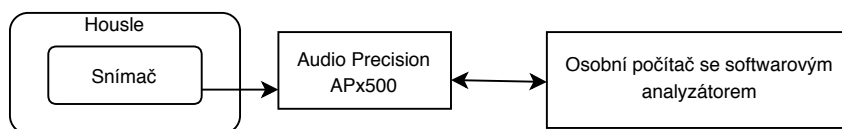
$$Z = R \cdot \frac{U_2}{U_1}, \quad [\Omega] \quad (7.1)$$

kde R je referenční odpor s hodnotou $R = 100 \Omega$, U_1 je napětí změřené na odporu R a U_2 je napětí na cívce.

Impedanční charakteristiky mají rostoucí tendenci se zvyšujícím se kmitočtem. Impedance cívek na referenčním kmitočtu 1 kHz se pohybuje kolem cca 100Ω .

Spektrální analýza

Na snímačích byla také provedena spektrální analýza tónů na tzv. prázdných strunách g ($f_g = 196 \text{ Hz}$), $d1$ ($f_{d1} = 293,66 \text{ Hz}$), $a1$ ($f_{a1} = 440 \text{ Hz}$) a $e2$ ($f_{e2} = 659,29 \text{ Hz}$). Měření proběhlo při hře smyčcem na prázdných strunách snímaných pomocí elektromagnetického snímače. Zapojení měřicího řetězce bylo podle blokového schématu na obrázku 7.2.

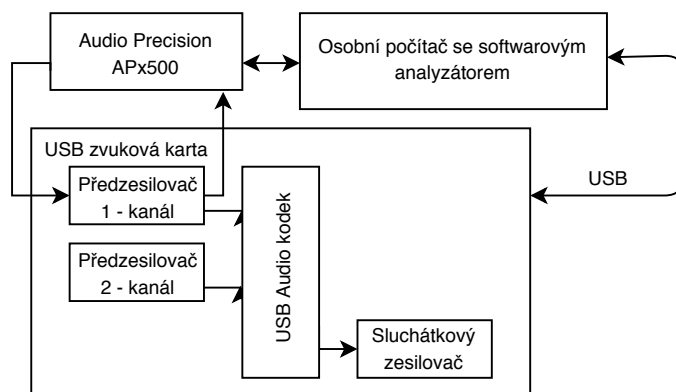


Obr. 7.2: Blokové schéma řetězce pro měření spektra tónů

Ze zobrazených spekter je patrné, že u nižších tónů má vyšší hodnotu některá z vyšších harmonických, než fundament zkoumaného tónu. Ve spektru tónu malé g dosahuje nejvyšší hodnoty až desátá harmonická složka na kmitočtu $f_{g,10H} = 1960 \text{ Hz}$. Pro tón $d1$ má maximální hodnotu ve spektru devátá harmonická složka s kmitočtem $f_{d1,9H} = 2642,94 \text{ Hz}$. Pro tón $a1$ dosahuje nejvyšší hodnoty třetí harmonická složka s kmitočtem $f_{a1,3H} = 1320 \text{ Hz}$ a pro tón $e2$ má nejvyšší hodnotu základní kmitočet $f_{e2} = 659,29 \text{ Hz}$.

7.2 Předzesilovače

U předzesilovačů byly změřeny přenosová charakteristika, fázová charakteristika a THD (činitel harmonického zkreslení – total harmonic distortion) podle blokového schématu na obrázku 7.3.



Obr. 7.3: Blokové schéma řetězce pro měření charakteristik předzesilovače

Přenosová charakteristika

Na vstupu předzesilovače (1. kanál AE) je filtr typu horní propust s mezním kmitočtem $f = 328,8$ Hz. Dle přenosové charakteristiky je mezní kmitočet, na kterém dojde k pokles 3 dB $f = 386,5$ Hz.

THD

Z měření THD vyplývá, že zkreslení je od 20 Hz do 20 kHz menší než 1,4 % při zesílení $G = 20$. Předzesilovač dosahuje tak vysokého zkreslení z několika příčin. První příčina může být způsobena zemními smyčkami v zapojení a druhá příčina je, že se do signálu pravděpodobně promítá rušení spínaného zdroje a šum z USB.

7.3 Převod na MIDI zprávu

Tato část měření se zabývá ověřením přesnosti převodu zvukového signálu na MIDI zprávu.

Zapojení

Zapojení pro obě měření je totožné, liší se pouze využitým programovým vybavením počítače viz obr. 7.4 a obr. 7.5.

Snímače jsou umístěny na houslích a signál z nich je veden do USB zvukové karty, odkud je přes USB přiveden do počítače, kde je signál zpracován. USB zvuková karta se po připojení k počítači přihlásí a nainstaluje jako složené zvukové zařízení „USB audio codec“ a „výstup USB audio“.

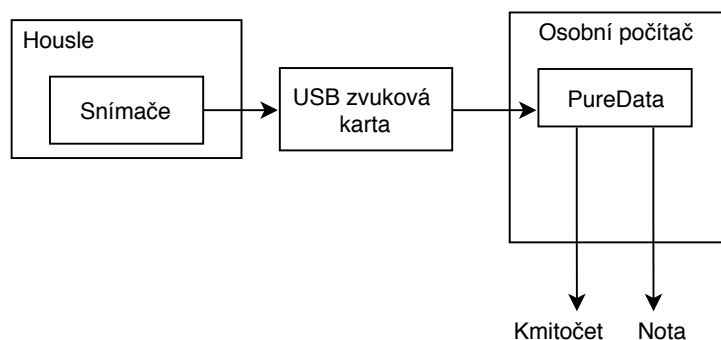
Nastavení

V obslužném programu v prostředí PureData je nutné nastavit zesílení vstupů a šumovou bránu pro daný nástroj. Pro dané měření bylo zesílení nastaveno na $G = 10$ a parametry šumové brány byly nastaveny následovně:

- $threshold = 75$,
- $attack = 45$,
- $hold = 94$,
- $decay = 86$.

Měření rozsahu

Toto měření má za cíl zjistit, do jaké hodnoty rozladění (kmitočtu) je program schopen tón rozpoznat a správně určit.



Obr. 7.4: Blokové schéma řetězce pro ověření MIDI převodu při rozladování tónů

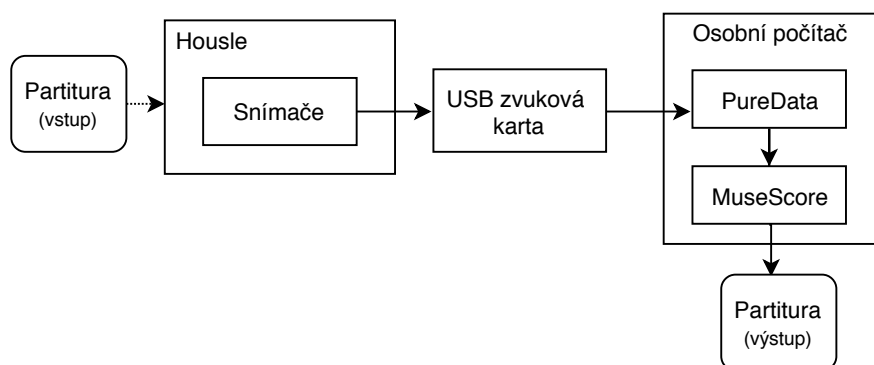
Dle předpokladu se šířka pásma, ve kterém je program schopen rozpoznat a správně určit tón, zvyšuje spolu s výškou tónu. U nejnižšího tónu g ($f = 196$ Hz), který lze na housle zahrát, je tato šířka pásma 11 Hz. Přičemž pásmo začíná od kmitočtu $f_{g,\min} = 190$ Hz a končí na kmitočtu $f_{g,\max} = 201$ Hz. Nejvyšší zkoumaná nota byla h_2 ($f = 987,77$ Hz). Její pásmo bylo široké 54 Hz, začínalo na kmitočtu $f_{h_2,\min} = 964$ Hz a končilo na kmitočtu $f_{g,\max} = 1018$ Hz.

Ověření převodu

Toto měření je demonstrací převodu zvukového signálu na MIDI noty. Na vstupu je hudební partitura, ze které hráč hraje na snímané housle. Snímaný signál projde skrze řetězec viz obr. 7.5 do počítače, kde je vytvořena z převedených MIDI not opět partitura a porovnána s originálem.

Routing MIDI zpráv mezi programy není u systému „Windows“ na rozdíl od systému „MAC“ integrován přímo v systému a je nutné využít program třetí strany

pro vytvoření virtuálního portu (LoopBE1). V programu pro notaci (MuseScore 2.2) je třeba nastavit port, tempo skladby, předznamenání a rytmus.



Obr. 7.5: Blokové schéma řetězce pro ověření MIDI převodu

Pro dosažení dostačujícího výsledku měření bylo třeba zvolit tempo skladby výrazně pomalejší, než by bylo ve skutečnosti. Pro tempa od 90 BPM se notace pomocí MIDI houslí stala velice problematickou. Důvodem je zpoždění v celém řetězci a problémy při rychlých přechodech mezi tóny, při kterých nedojde k dostatečnému poklesu amplitudy a zpráva „NOTE ON“ s parametrem *velocity* = 0 není odeslána. Touto metodou byl nahrán první řádek partitury. Další řádky byly nahrány tak, že v programu MuseScore byla vybrána délka noty a program čekal na příchozí MIDI noty a ty psal za sebe.

8 ZÁVĚR

V rámci této práce byly navrženy a realizovány snímače pro elektrické housle s připojením k osobnímu počítači a převodem na MIDI zprávy. Na základě průzkumu byla pro práci zvolena nízkoimpedanční elektromagnetická konstrukce snímačů. Impedance jednotlivých cívek snímače je na kmitočtu 1 kHz cca 100Ω a jejich maximální výstupní úroveň je 0,5 mV. Každý snímač je vytvořený ze dvou cívek zapojených v sérii. Byly vyrobeny dva totožné snímače první (SN1) pro struny a1 a e2, druhý (SN2) pro struny g a d1. Pomocí snímačů jsem zobrazil spektrum signálu prázdných strun houslí.

Pro zpracování a převod analogových signálů ze snímačů na digitální signál byla navržena a zkonstruována dvoukanálová USB zvuková karta se symetrickými vstupy a nesymetrickým výstupem na sluchátka. Jako základ pro tuto kartu byl využit USB audio kodek PCM2900 od výrobce Texas Instruments, pro svou jednoduchost a dostupnost. Ostatní výrobci USB kodeků nebyly ochotni poskytnout pouze jednu součástku.

Vstupní obvody USB zvukové karty jsou založeny na integrovaném nástrojovém předzesilovači INA163 od výrobce Texas Instruments. Signály přicházející na předzesilovače jsou filtrovány filtry typu horní propust s nastavenými mezními kmitočty podle nejnižších kmitočtů strun, které snímají příslušné snímače. V případě prvního kanálu a snímače SN1 je tento mezní kmitočet $f_{AE} = 328,8$ Hz. Pro druhý kanál a snímač SN2 je mezní kmitočet nastaven na $f_{DG} = 153,9$ Hz.

Parametry vstupních obvodů byly změřeny a otestovány. Přenosová charakteristika předzesilovačů odpovídá simulaci až na posun mezního kmitočtu prvního kanálu na $f_{AE} = 386,5$ Hz. Tuto výchylku má na svědomí pravděpodobně kondenzátor vstupního filtru, jehož tolerance je 20 %. Vstupní obvody mají velice vysoké zkreslení THD dosahující až 1,4 %. Takto vysoké zkreslení může mít více příčin. První příčinou mohou být zemní smyčky na desce plošných spojů, které mohly vzniknout jak při návrhu desky, tak při technologii výroby desky plošných spojů, po které na desce zůstalo mnoho mikropropojů. Druhou příčinou může být rušení ze spínaného zdroje a USB.

Program pro převod zvuku do MIDI zpráv byl realizován v prostředí PureData. Pomocí měření byly zjištěny šířky pásem, ve kterých je program schopen správně rozeznat a určit daný tón. Šířka těchto pásem se rostoucí výškou tónů zvětšovala vzhledem ke zvětšujícím se mezerám mezi kmitočty tónů. Převod byl také prověřen pro využití notace pomocí „MIDI houslí“ a originální a výsledná partitura byly porovnány. Notace v reálném čase pomocí zadaného tempa v BPM byla proveditelná pro tempa pod 90 BPM. Při rychlejším tempu docházelo k poměrně výrazným nepřesnostem, protože při rychlých přechodech mezi tóny, nedošlo k dostatečnému

poklesu amplitudy a zpráva „NOTE ON“ s parametrem *velocity* = 0 nebyla ode-slána. Naopak notace, při které notační program čekal na příchozí MIDI zprávu, byla poměrně úspěšná i pro vyšší rychlosti a plynulejší hru. Nevýhodou této metody však je, že délku noty je třeba volit ručně.

Tělo nástroje bude vyrobeno z karbonu a veškerá elektronika i se snímači bude integrována přímo v těle nástroje. Nástroj bude využit pro testování a další vývoj. Například díky nízké váze nástroje může být do těla nástroje umístěn i samotný počítač, nebo mikroprocesor vykonávající převod do MIDI zpráv.

LITERATURA

- [1] VYJAYA, M. S. *Piezoelectric Materials and Devices, 2013*, ISBN 978-1-4398-8786-8
- [2] LEMME, H. *Electric Guitar, Sounds Secrets and Technology, 2012*, ISBN 978-1-907920-13-4
- [3] LIGHTWAVE SYSTEMS: *Lightwave atlantis, electroacoustic guitar* [online]. 2008, poslední aktualizace 2008 [cit.16.5.2018]. Dostupné z URL: <<https://www.willcoxguitars.com/wp-content/uploads/2017/05/Willcox-Guitars-LightWave-Systems-Atlantis-User-Manual.pdf>>.
- [4] HALLIDAY, D.; WALKER, J.; RESNICK, R. *Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky*, Brno: VUTIUM, 2000, ISBN 80-214-1868-0
- [5] ČERNÝ, P. *Elektromagnetický snímač pro housle* [online]. 2018, poslední aktualizace 2018 [cit.16.2.2018] Dostupné z URL: <http://www.elektroakustika.cz/elmag_pickup.html>.
- [6] ČERNÝ, P. *Tajemství elektromagnetického snímání houslí* [online]. 2018, poslední aktualizace 2018 [cit.16.2.2018] Dostupné z URL: <http://www.elektroakustika.cz/elmag_pickup_violin.html>.
- [7] DOSTÁL, T. *Operační zesilovače*, Praha: BEN - technická literatura, 2005, ISBN 80-7300-049-0
- [8] Linear technology: *LT1054, Switched-Capacitor Voltage Converter with Regulator. Datasheet:* [online]. 2010, poslední aktualizace 2010 [cit.23.3.2018]. Dostupné z URL: <<http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/1054lfh.pdf>>.
- [9] VRBA, K. *Vzájemný převod analogových a číslicových signálů* [online]. 2015, poslední aktualizace 2015 [cit.16.5.2018]. Dostupné z URL: <https://moodle.vutbr.cz/pluginfile.php/300450/mod_resource/content/0/MADP_1_4_skripta.pdf>.
- [10] SCHIMMEL, J. *Studiová a hudební elektronika*, Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2015, ISBN 978-80-214-4452-2
- [11] POOLE, I. *PLL, Phase Locked Loop Tutorial:* [online]. 2016, poslední aktualizace 2016 [cit.4.4.2018]. Dostupné z URL: <<http://www.radio-electronics.com/info/rf-technology-design/pll-synthesizers/phase-locked-loop-tutorial.php>>.

- [12] Texas instruments: *PCM2900C, PCM2902C, Stereo Audio Codec with USB Interface, Single-Ended Analog Input/Output, and S/PDIF* [online]. 2014, poslední aktualizace 2014 [cit. 26. 2. 2018]. Dostupné z URL: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/pcm2900c.pdf>>.
- [13] Cmedia electronic: *CM6502, USB audio sound chip. Datasheet:* [online]. 2008, poslední aktualizace 2008 [cit. 26. 3. 2018]. Dostupné z URL: <<https://www.semiconductorstore.com/pages/asp/DownloadDirect.asp?sid=1522676741219>>.
- [14] KRUPIČKA, J. *Převod not jednohlasé melodie ze zvukového signálu do protokolu MIDI* [online]. 2009, poslední aktualizace 26. 5. 2009 [cit. 16. 2. 2018]. Dostupné z URL: <<https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/10288/Prevod%20melodie%20do%20MIDI.pdf?sequence=-1>>.
- [15] SYROVÝ, V. *Hudební akustika*, 2014, ISBN 978-80-7331-127-8
- [16] SMĚKAL, Z. *Číslíkové zpracování signálů*, Brno: Elektronická skripta MCSI [online]. 2007 [cit. 4. 4. 2018]. Dostupné z URL: <<http://www.feec.vutbr.cz/et>>.
- [17] WHETSELL, N. *How fiddle works* [online]. [cit. 4. 4. 2018]. Dostupné z URL: <http://www.music.mcgill.ca/~ich/classes/mumt621_11/final%20projects/final/Report.pdf>.
- [18] MILLER, S.; THEODORE, A.; DAVID, D.: *Real-time audio analysis tools for Pd and MSP* [online]. [cit. 18. 5. 2018]. Dostupné z URL: <<http://crca.ucsd.edu/~tapel/icmc98.pdf>>.
- [19] Texas instruments: *INA163, Low-Noise, Low-Distortion instrumentation amplifier. Datasheet:* [online]. 2000, poslední aktualizace 2005 [cit. 23. 3. 2018]. Dostupné z URL: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina163.pdf>>.
- [20] Texas instruments: *REG103, DMOS 500mA Low-Dropout Regulator. Datasheet:* [online]. 2000, poslední aktualizace 2005 [cit. 26. 2. 2018]. Dostupné z URL: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/reg103.pdf>>.
- [21] Texas instruments: *TPA152, 75-mW stereo audio power amplifier. Datasheet:* [online]. 1998, poslední aktualizace 2000 [cit. 27. 3. 2018]. Dostupné z URL: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tpa152.pdf>>.
- [22] Texas instruments: *TLV760, 100-mA, 30-V, Fixed-Output, Linear-Voltage Regulator. Datasheet:* [online]. 2017, poslední aktualizace 2017 [cit. 7. 5. 2018]. Dostupné z URL: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tlv760.pdf>>.

[23] BAUMAN, J. *Housle a jejich stavba*, 1899, ISSN 1853-1929.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

AC	střídavé napětí – alternating current
A/D	analogově digitální převod
Au	napěťové zesílení – voltage gain [dB]
BPM	úderů za minutu – beats per minute
C	elektrická kapacita [F]
CMRR	činitel potlačení souhlasného signálu – common mode rejection ratio
D/A	digitálně analogový převod
DAW	digitální prostředí pro zpracování zvuku – digital audio workstation
DC	stejnoseměrné napětí – direct current
DFT	diskrétní Fourierova Transformace – discrete Fourier transformation
DPS	deska plošných spojů – printed circuit board
f	Kmitočet [Hz]
F	Síla [N]
FFT	rychlá Fourierova transformace – fast Fourier transformation
G	zesílení – gain [-]
HID	zařízení komunikující s člověkem – human interface device
I	elektrický proud [A]
IFFT	inverzní Rychlá fourierova Transformace – inverse fast Fourier transformation
I ² C	sériová sběrnice – Inter-Integrated circuit
I ² S	zvuková sériová sběrnice – inter-integrated sound
l	délka [m]
L	indukčnost [H]
LSB	nejméně významný bit – least significant bit

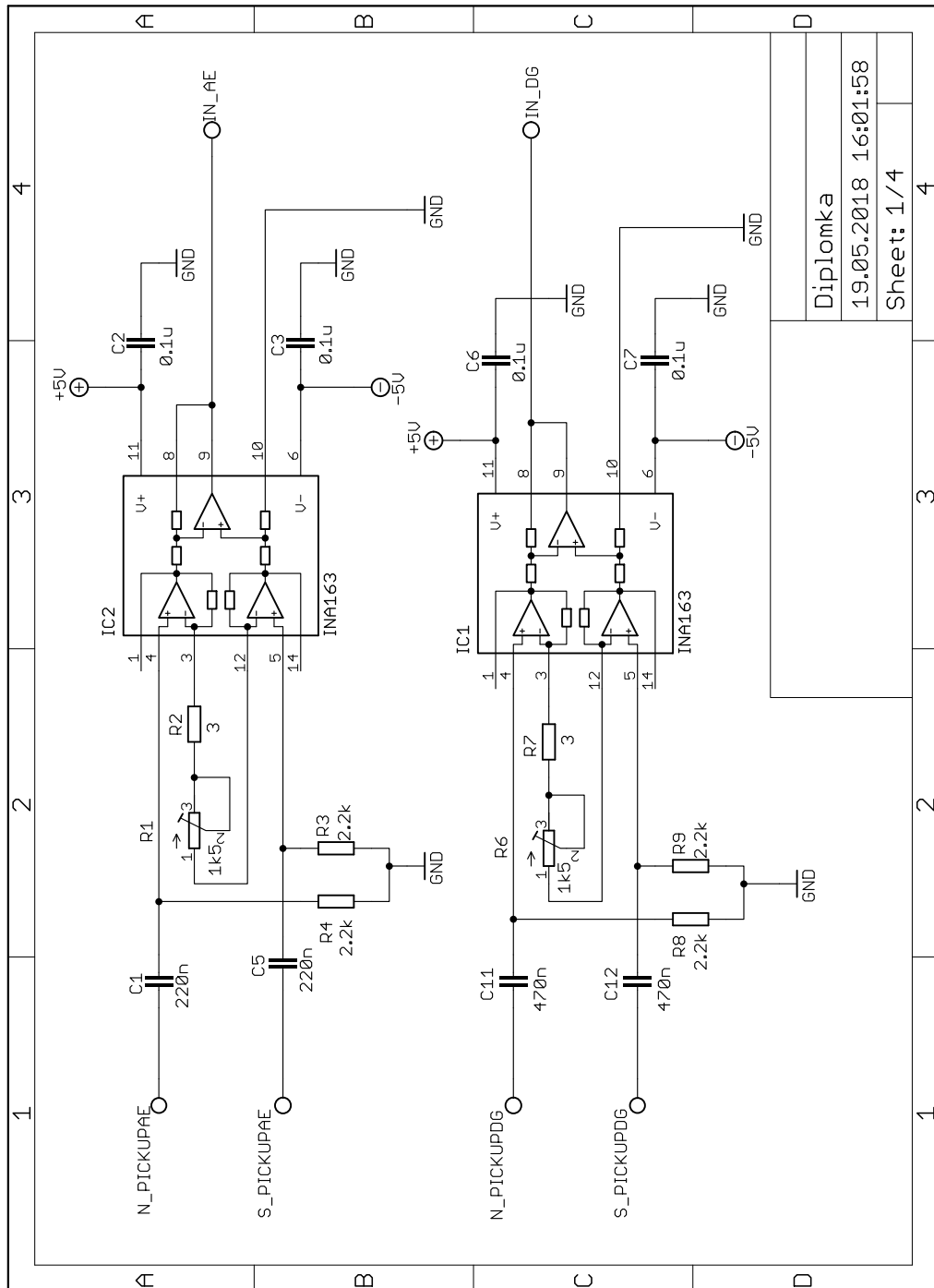
MIDI	hudební digitální sběrnice – musical instrument digital interface
MSB	nejvýznamnější bit – most significant bit
OZ	operační zesilovač – operational amplifier
p	hustota [$\text{kg} \cdot \text{m}^3$]
PC	osobní počítač – personal computer
PLL	fázový závěs – phase locked loop
Q	elektrický náboj [C]
R	elektrický odpor [Ω]
RFI	rádiové (vysokofrekvenční) rušení – radio frequency interference
SNR	odstup signálu od šumu – signal to noise ratio
THD	činitel harmonického zkreslení – total harmonic distortion
USB	univerzální sériová sběrnice – universal serial bus
V	elektrické napětí [V]
Z	elektrická impedance [Ω]

SEZNAM PŘÍLOH

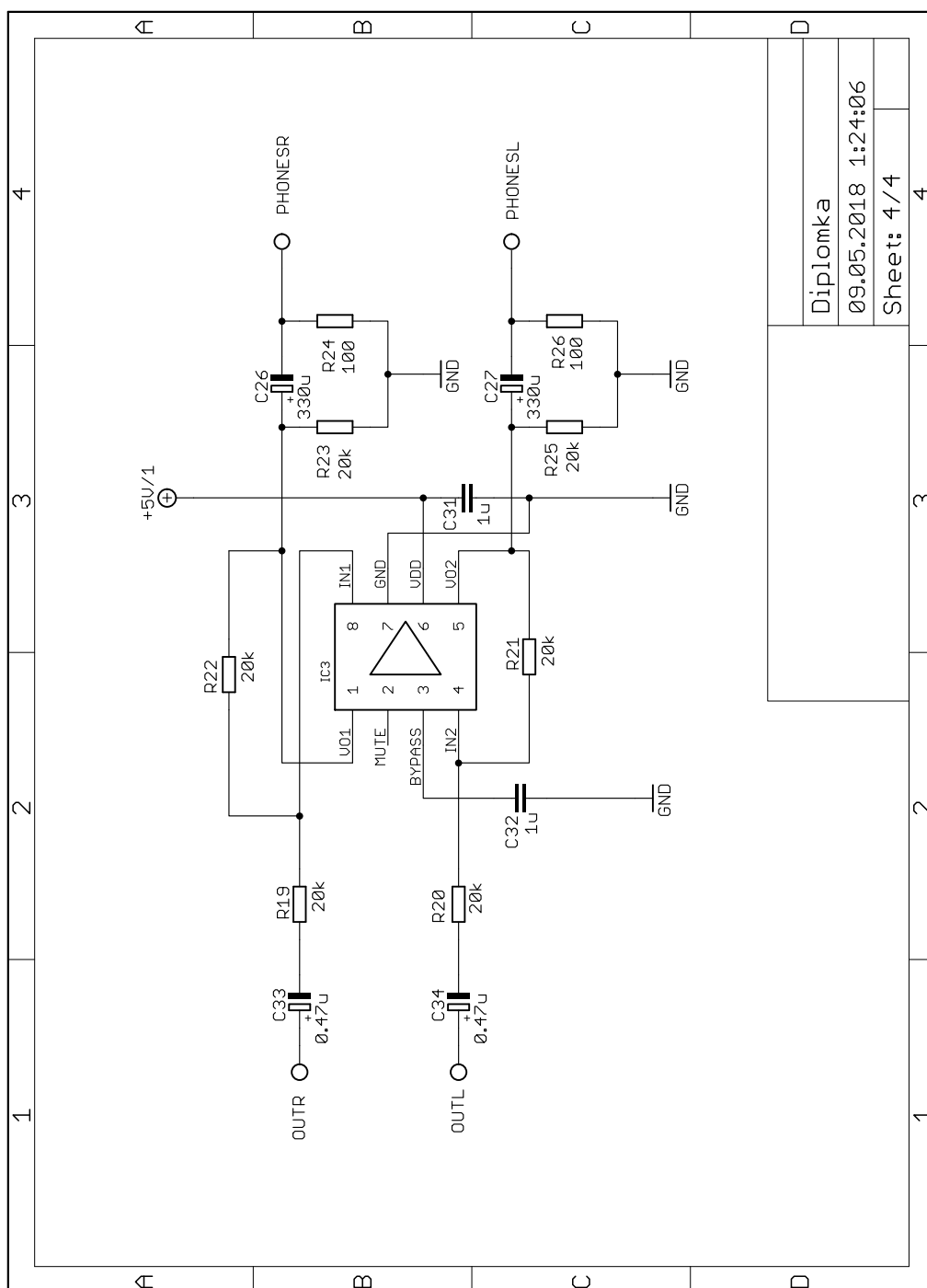
A Schéma	65
A.1 Předzesilovače INA163	65
A.2 Sluchátkový zesilovač TPA152	66
A.3 USB audio kodek PCM2900	67
A.4 Napájení a konektory	68
B Deska plošného spoje	69
C Osazovací nákresy	70
D Soupis součástek	71
E Zdrojové kódy PureData	72
E.1 Hlavní patch	72
E.2 Efekt Noise gate	73
E.3 Převod zvuku na čísla MIDI not	74
F Výsledky měření	75
F.1 Snímače	75
F.2 Předzesilovače	78
F.3 Převod na MIDI zprávy	80
G Fotodokumentace	81
H Obsah příloženého CD	83

A SCHÉMA

A.1 Předzesilovač INA163



A.2 Sluchátkový zesilovač TPA152

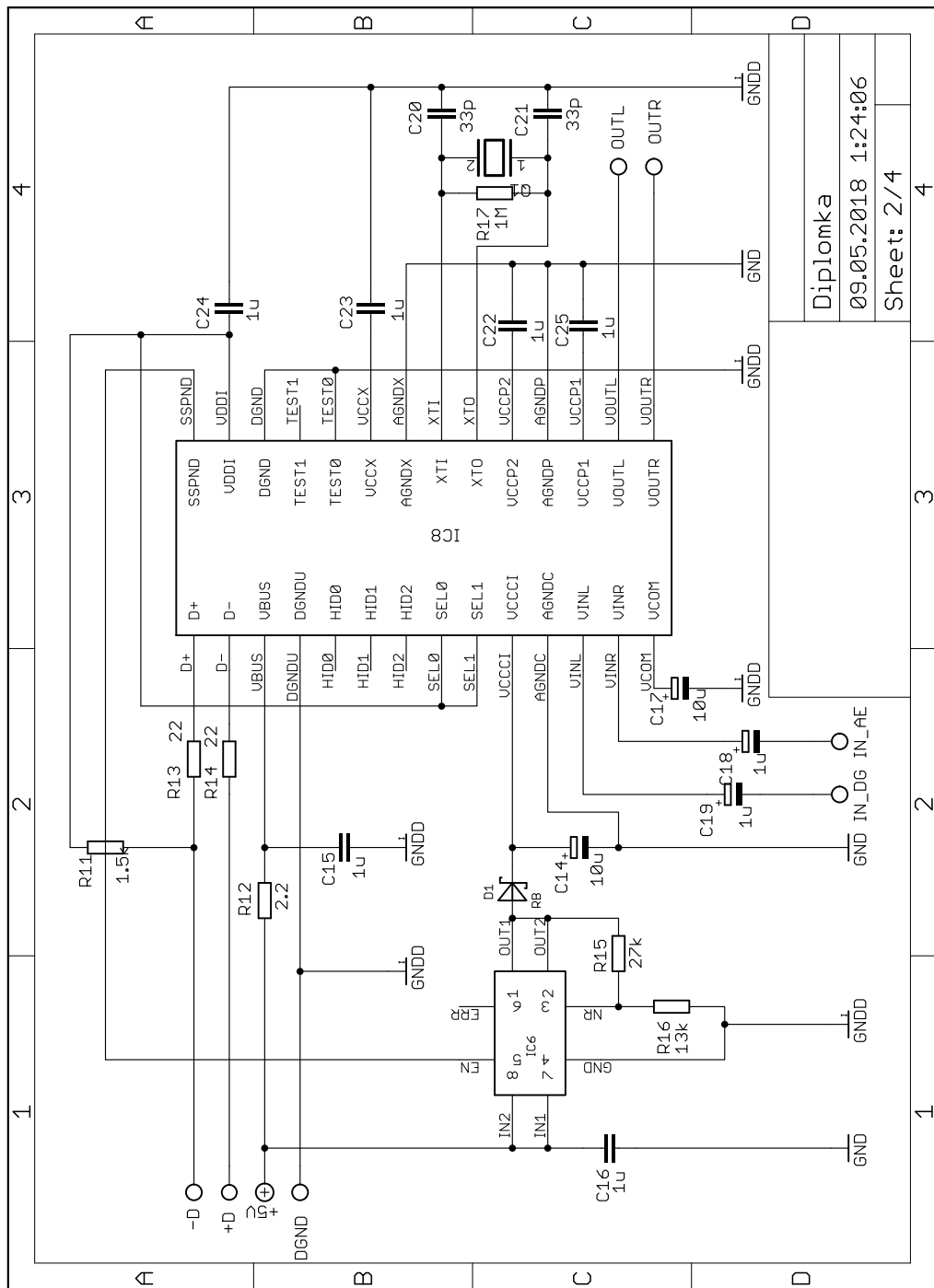


Diplomka

09.05.2018 1:24:06

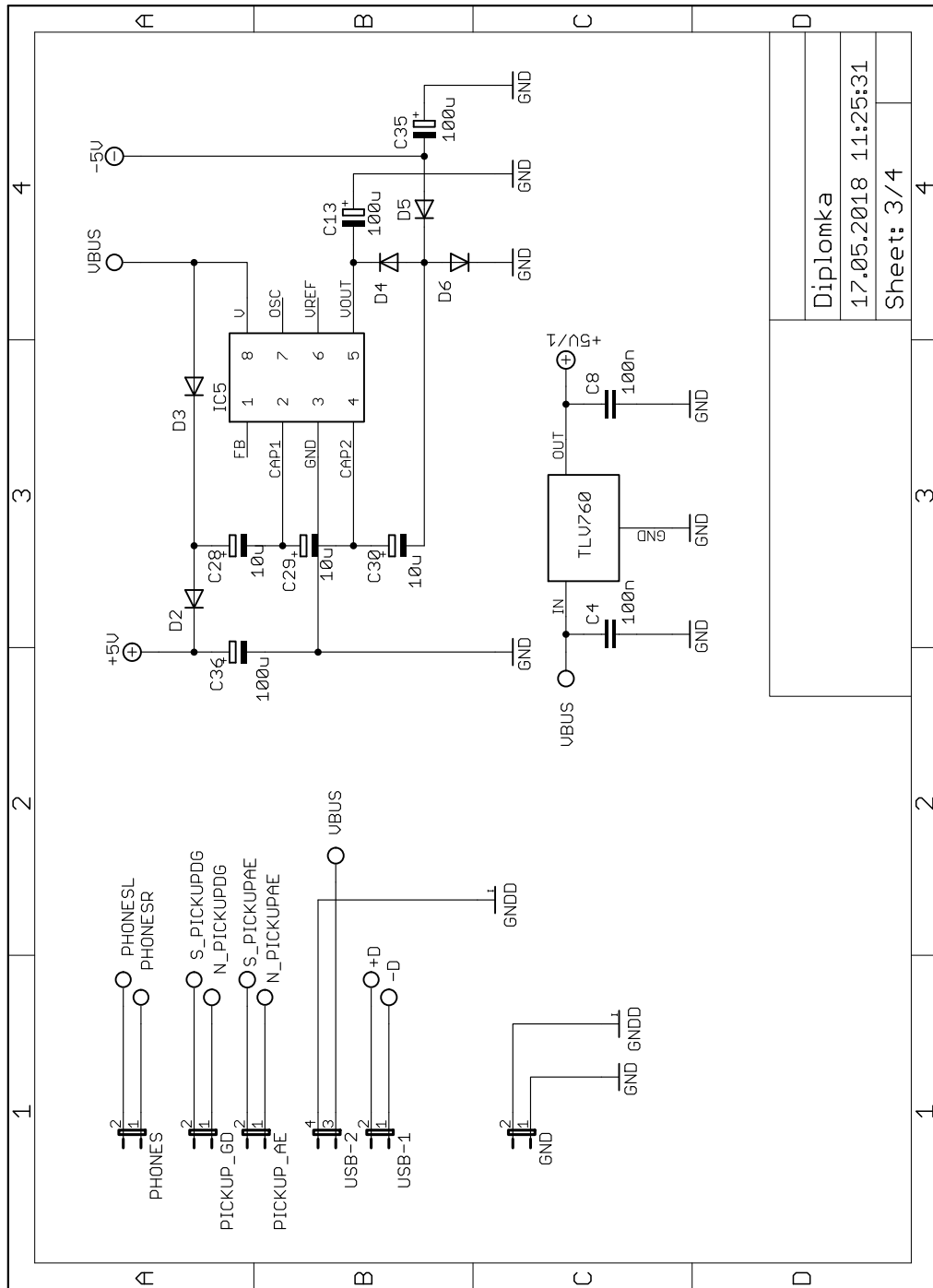
Sheet: 4/4

A.3 USB audio kodek PCM2900



Diplomka
09.05.2018 1:24:06
Sheet: 2/4

A.4 Napájení a konektory

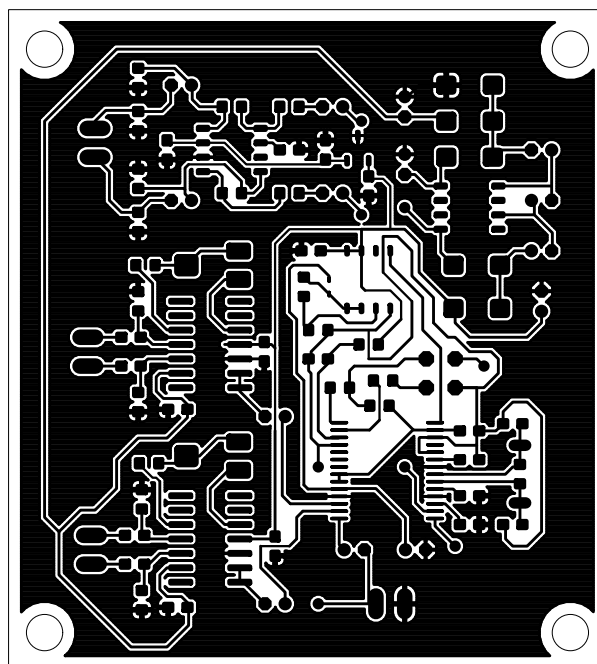


Diplomka

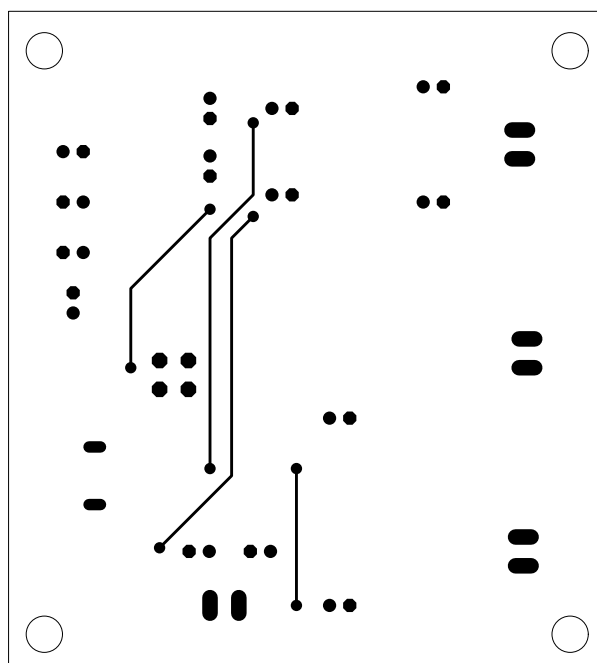
17.05.2018 11:25:31

Sheet: 3/4

B DESKA PLOŠNÉHO SPOJE

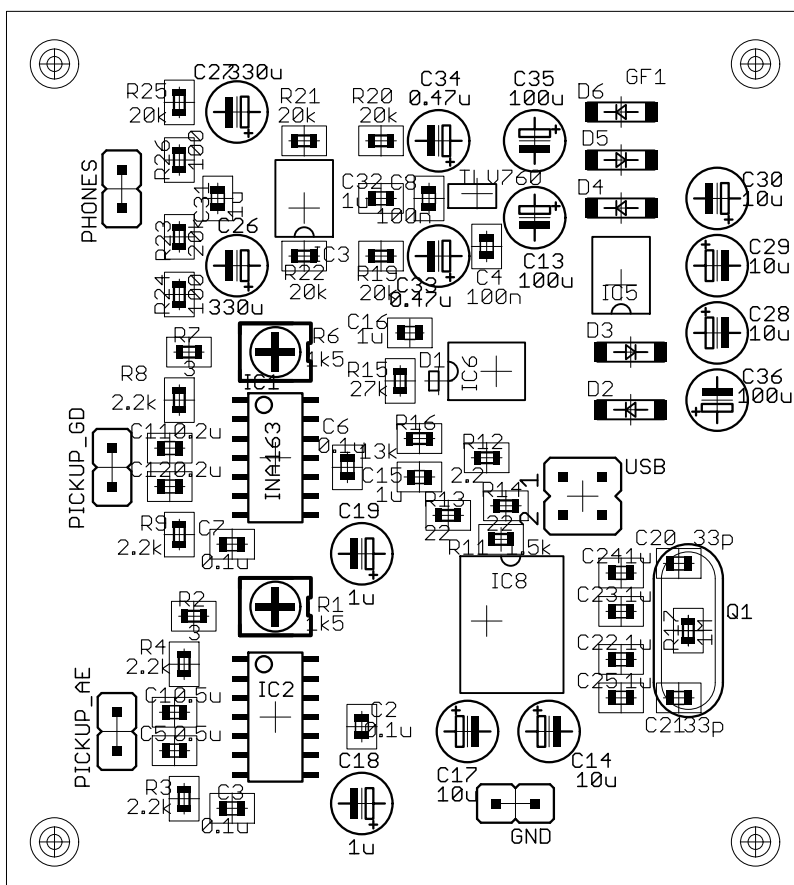


Obr. B.1: Deska plošných spojů, horní strana (52,7 x 58 mm)



Obr. B.2: Deska plošných spojů, spodní strana (52,7 x 58 mm)

C OSAZOVACÍ NÁKRESY



Obr. C.1: Osazovací náčrt desky plošných spojů (52,7 x 58 mm)

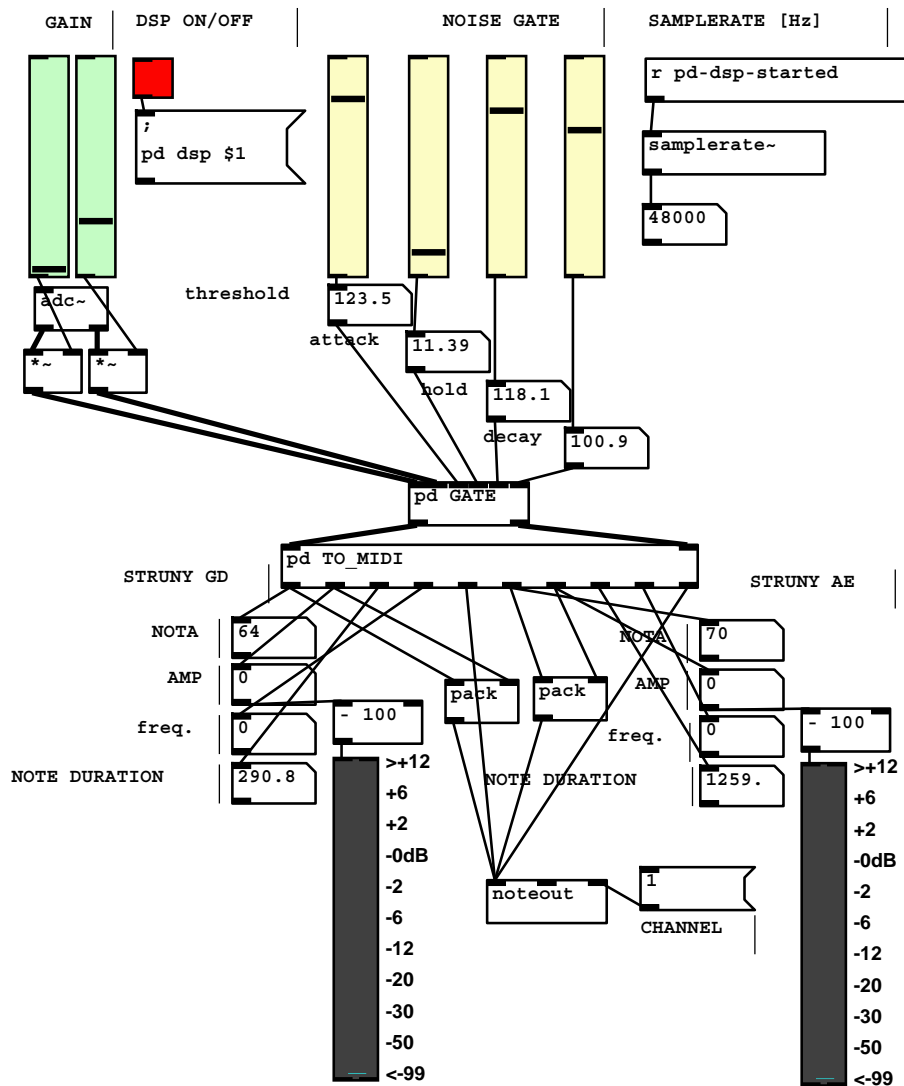
D SOUPIS SOUČÁSTEK

Tab. D.1: Soupis součástek

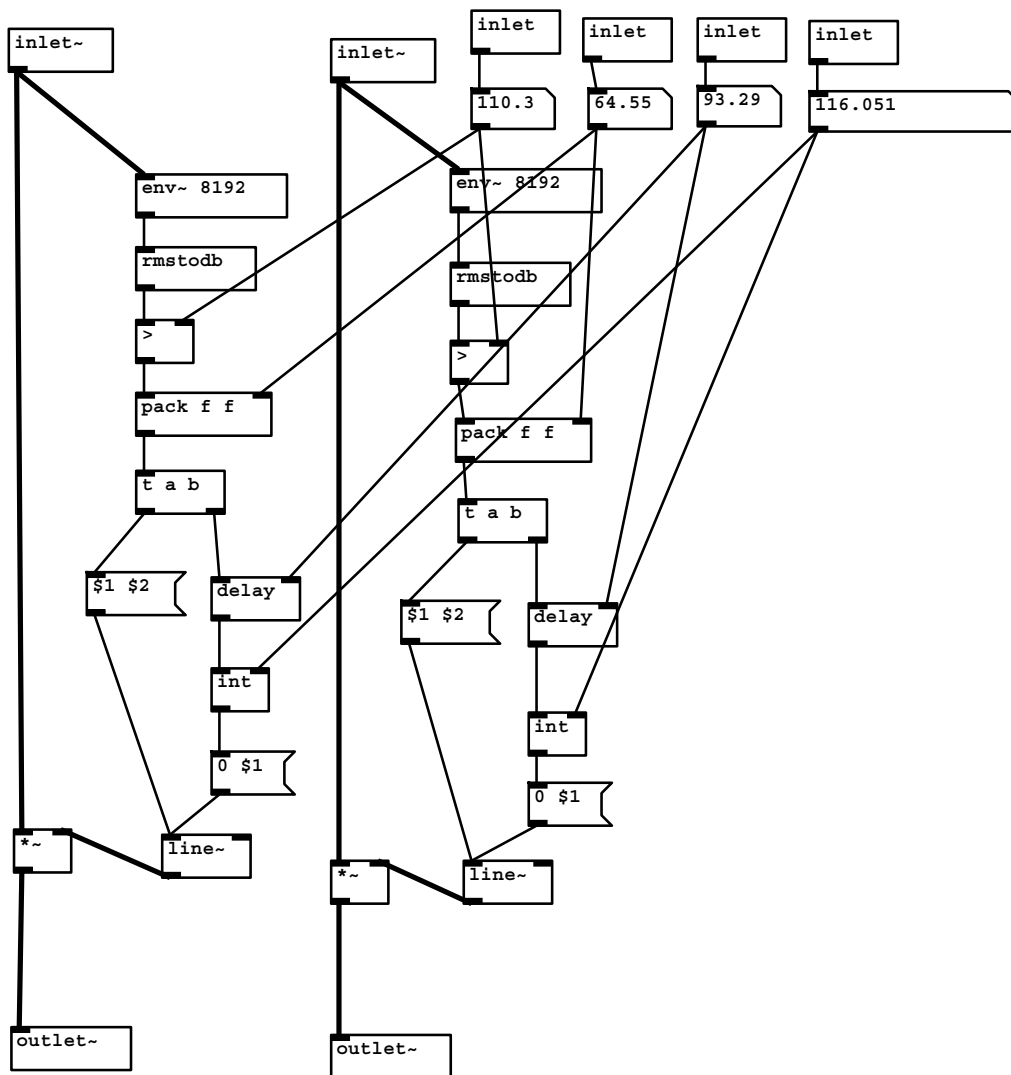
Poč.	Hodnota	Device	Pouzdro	Název součástky
4		JP1E	JP1	
1		JP2QE	JP2Q	
1		XTAL/S	QS	Q1
2	220 nF	C-EUC0603	C0603	C1, C5
2	470 nF	C-EUC0603	C0603	C11, C12
2	470 nF	CPOL-EUE1.8-4	E1,8-4	C33, C34
2	100 Ω	R-EU_R0603	R0603	R24, R26
6	100 nF	C-EUC0603	C0603	C4, C8,C2, C3, C6, C7
3	100 μ F	CPOL-EUE1.8-4	E1,8-4	C13, C35, C36
5	10 μ F	CPOL-EUE1.8-4	E1,8-4	C14, C17, C28, C29, C30
1	13 k Ω	R-EU_R0603	R0603	R16
1	1 M Ω	R-EU_R0603	R0603	R17
3	1.5 k Ω	R-TRIMM3374	RTRIM3374	R1, R6, R11
8	1 μ F	C-EUC0603	C0603	C15, C16, C22, C23, C24, C25, C31, C32
2	1 μ F	CPOL-EUE1.8-4	E1,8-4	C18, C19
5	2.2 k Ω	R-EU_R0603	R0603	R3, R4, R8, R9,R12
6	20 k Ω	R-EU_R0603	R0603	R19, R20, R21, R22, R23, R25
2	22 Ω	R-EU_R0603	R0603	R13, R14
1	27 k Ω	R-EU_R0603	R0603	R15
2	3 Ω	R-EU_R0603	R0603	R2, R7
2	330 μ F	CPOL-EUE1.8-4	E1,8-4	C26, C27
2	33 pF	C-EUC0603	C0603	C20, C21
5		D	SMA-DO214AC	D2, D3, D4, D5, D6
2		INA163	SO14	IC1, IC2
1		LT1054	SOIC8	IC5
1		PCM2900C	SSOP	IC8
1		RB751S40	SOD523	D1
1		REG103	SO8	IC6
1		TLV760	SOT23	TLV760
1		TPA152	SOIC8	IC3

E ZDROJOVÉ KÓDY PUREDATA

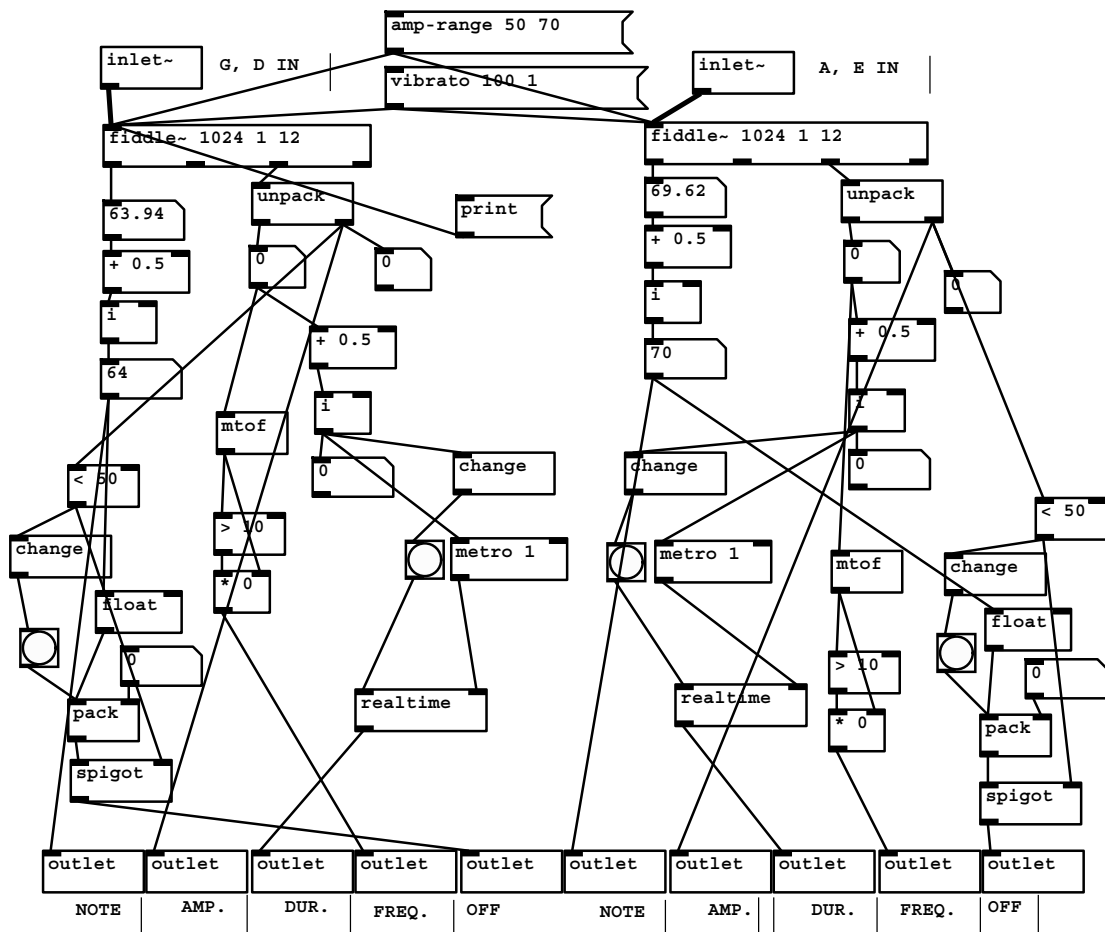
E.1 Hlavní patch



E.2 Efekt Noise gate

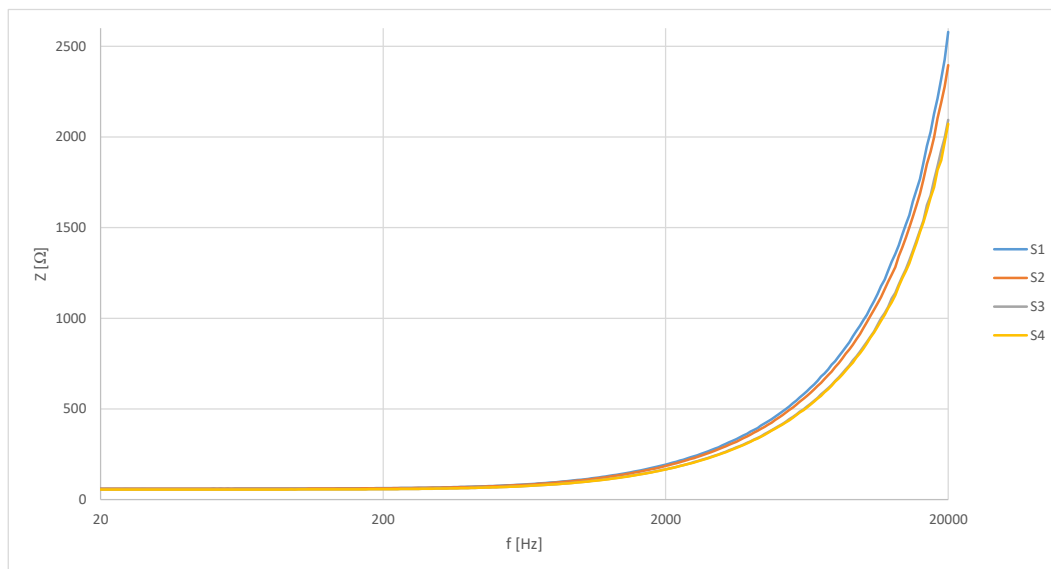


E.3 Převod zvuku na čísla MIDI not

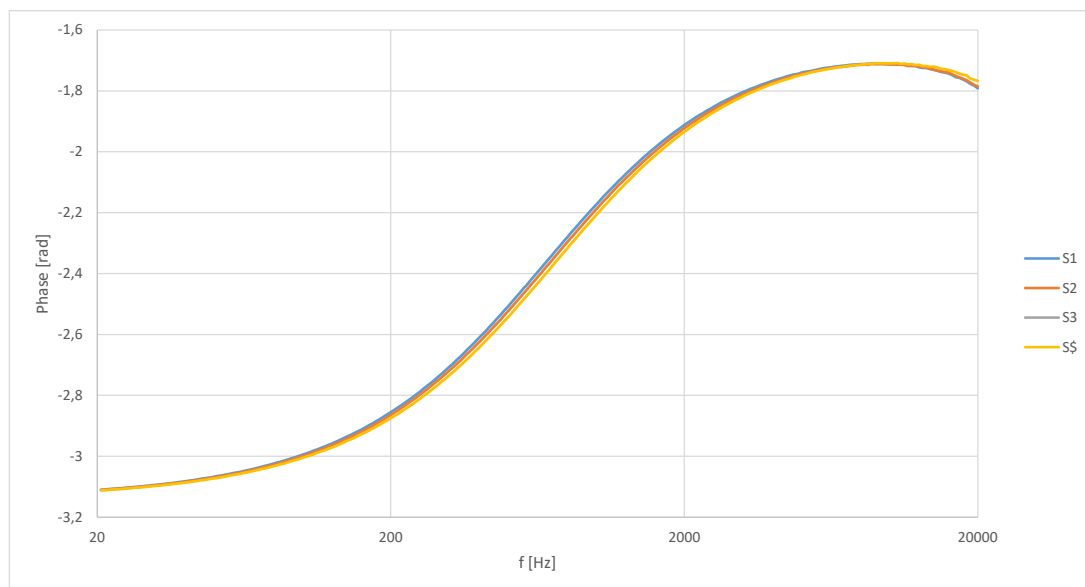


F VÝSLEDKY MĚŘENÍ

F.1 Snímače



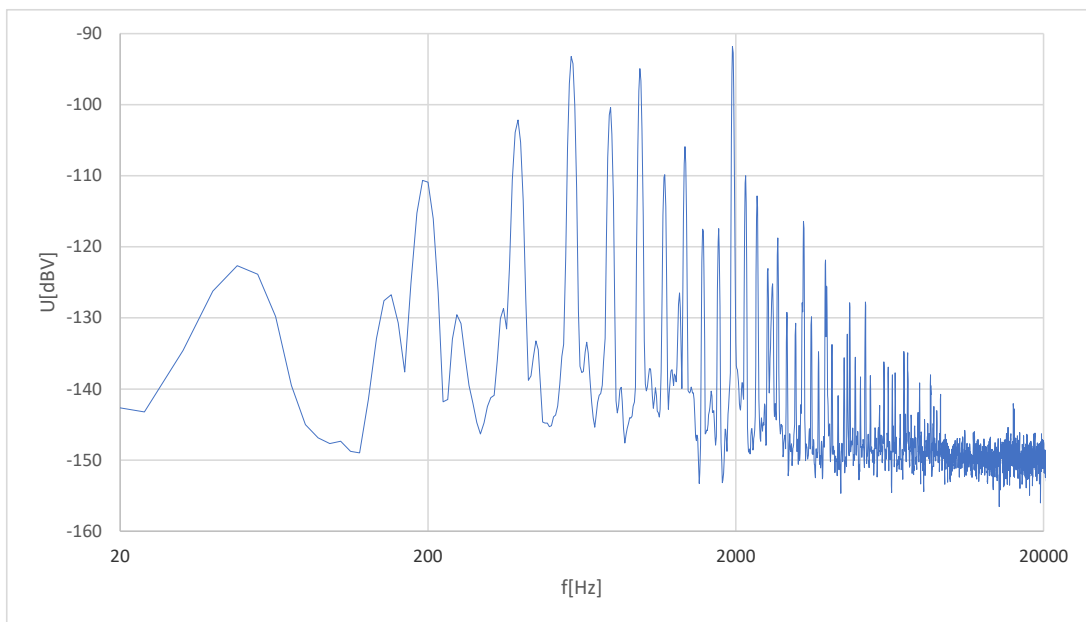
Obr. F.1: Impedanční charakteristika jednotlivých cívek



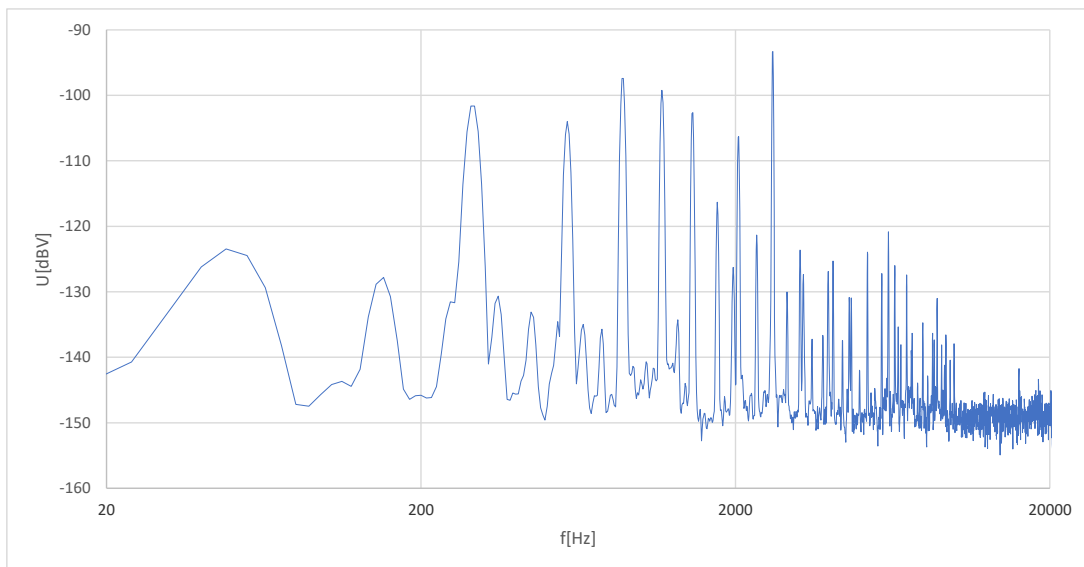
Obr. F.2: Fázová charakteristika jednotlivých cívek



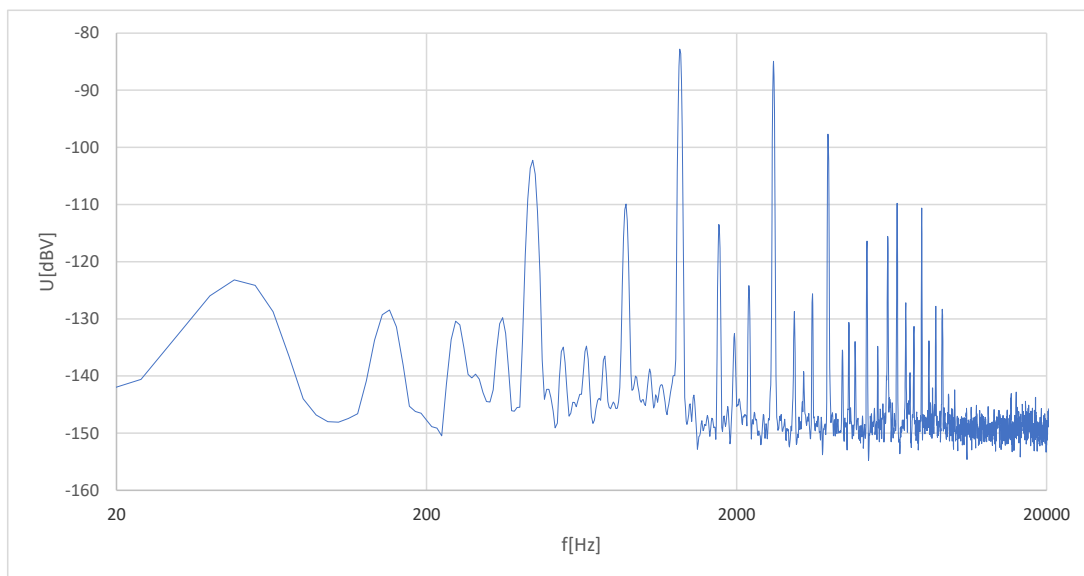
Obr. F.3: Výkonová charakteristika jednotlivých cívek



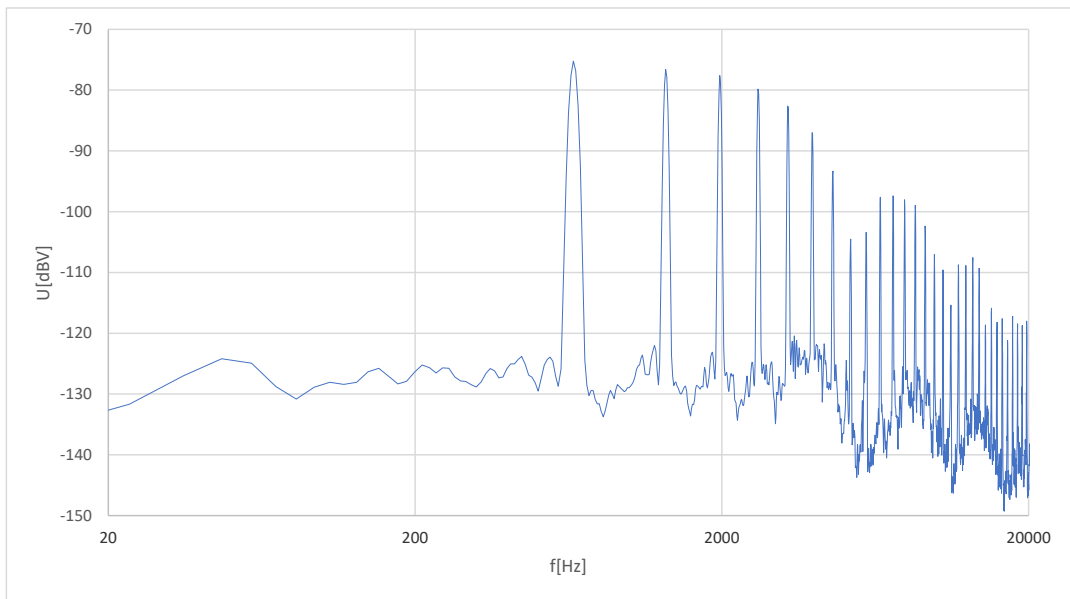
Obr. F.4: Spektrum noty malé g ($f_g = 196$ Hz) zachycené pomocí snímače



Obr. F.5: Spektrum noty d1 ($f_{d1} = 293,66$ Hz) zachycené pomocí snímače

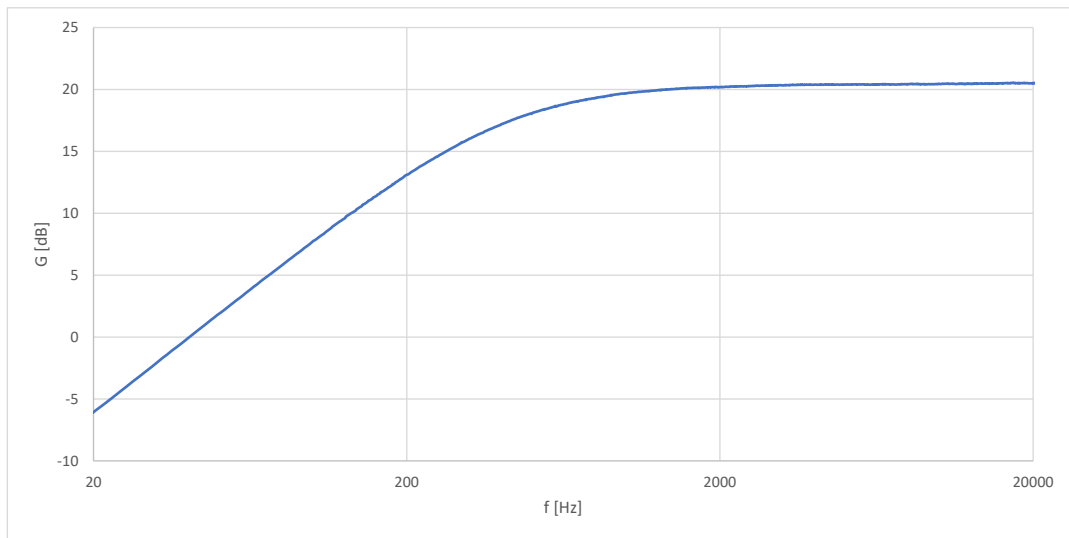


Obr. F.6: Spektrum noty a1 ($f_{a1} = 440$ Hz) zachycené pomocí snímače

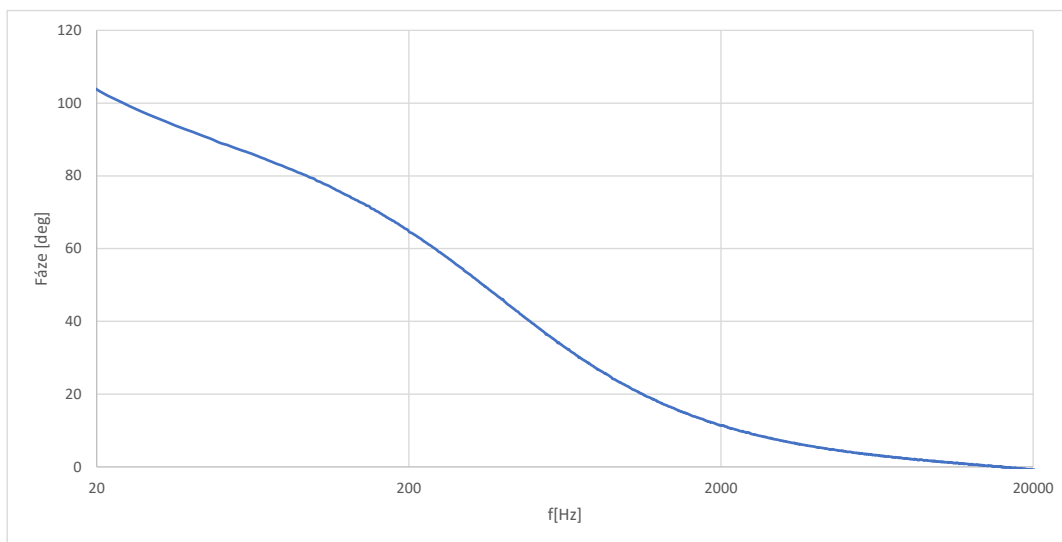


Obr. F.7: Spektrum noty e2 ($f_{e2} = 659,29$ Hz) zachycené pomocí snímače

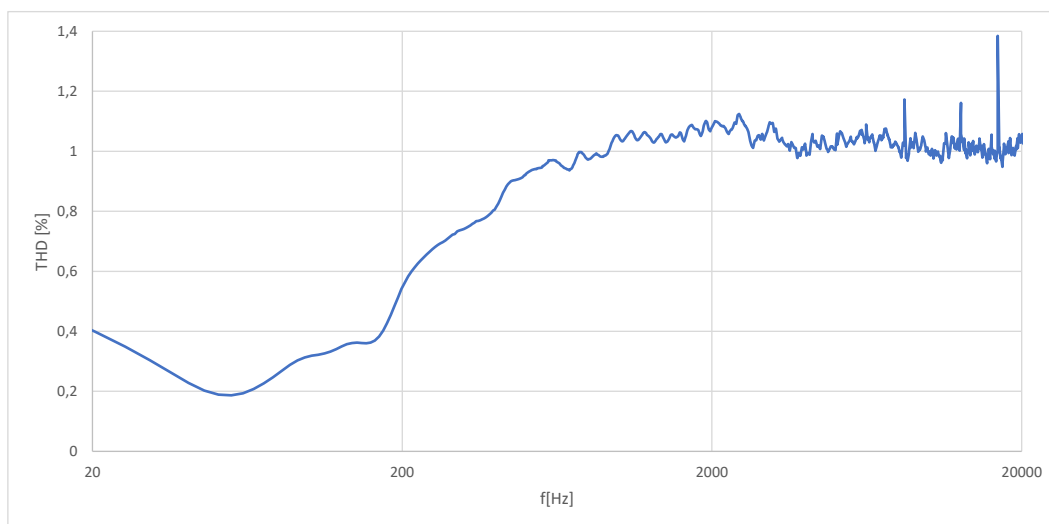
F.2 Předzesilovače



Obr. F.8: Přenosová charakteristika předzesilovače (Zesílení $G = 20$)



Obr. F.9: Fázová charakteristika předzesilovače (Zesílení $G = 20$)



Obr. F.10: THD předzesilovače (Zesílení $G = 20$)

F.3 Převod na MIDI zprávy

Vstup (originál)

Výstup (MIDI zprávy)

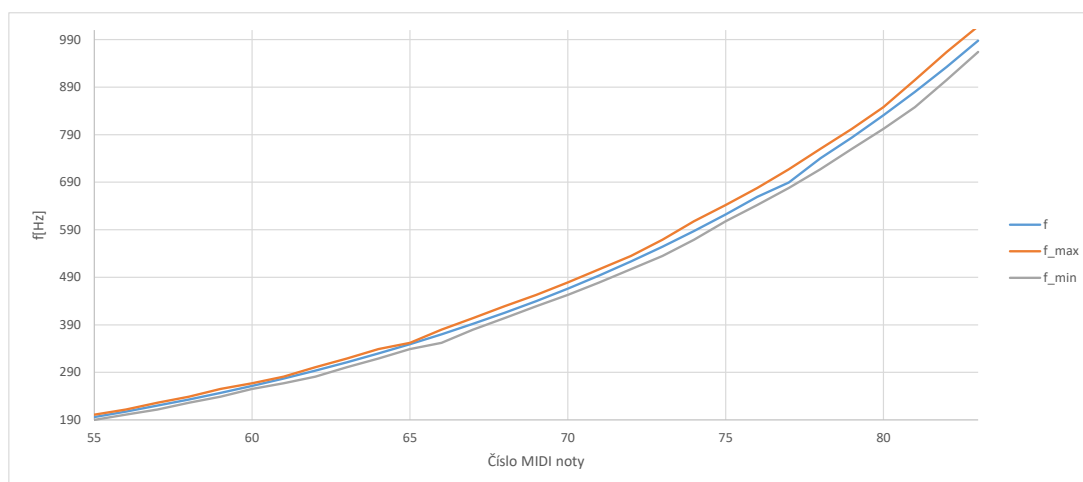
9 Vstup (originál)

Výstup (MIDI zprávy)

13 Vstup (originál)

Výstup (MIDI zprávy)

Obr. F.11: Porovnání vstupní a výstupní partitury pro ověření MIDI převodu

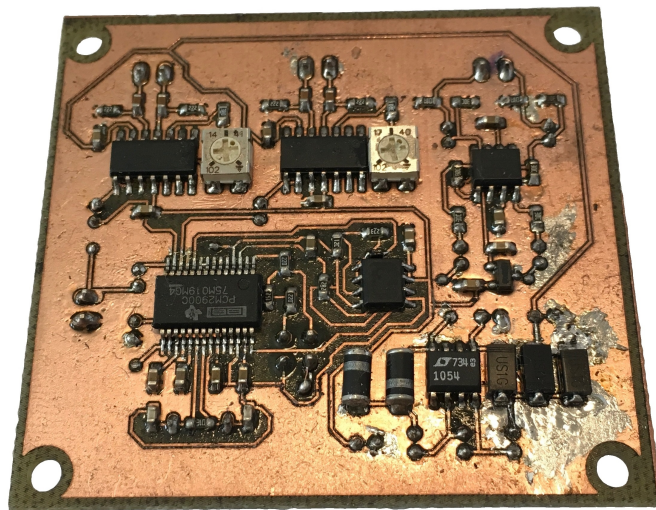


Obr. F.12: Ověření rozpoznávání MIDI not v závislosti na jejich rozladění

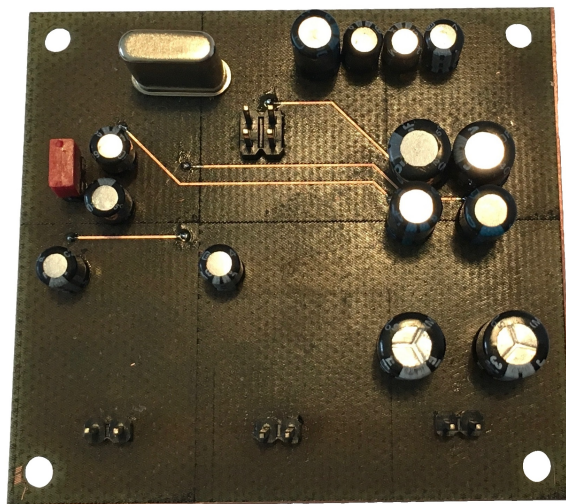
G FOTODOKUMENTACE



Obr. G.1: Jedna cívka houslového snímače (průměr 15 mm, výška 20 mm)



Obr. G.2: Horní pohled na desku plošných spojů (52,7 x 58 mm)



Obr. G.3: Dolní pohled na desku plošných spojů (52,7 x 58 mm)



Obr. G.4: Model těla elektrických houslí (1:1)

H OBSAH PŘILOŽENÉHO CD

Adresáře:

- **Diplomová práce** - obsahuje elektronickou verzi práci ve formátu .pdf,
- **Program** - obsahuje program pro převod zvuku do MIDI .pd,
- **Soubory DPS** - obsahuje soubory pro tvorbu DPS a schémata zapojení ve formátu .brd a .sch,
- **Fotodokumentace** - obsahuje fotografickou dokumentaci výroby nástroje.

Soubory:

- \Diplomová práce\Diplomová práce_xspilk01.pdf - elektronická verze práce,
- \Program\MIDIVIOLIN.pd - program pro převod zvuku do MIDI zpráv (vytvořen v programu PureData 0.48.1),
- \Soubory DSP\MIDIVIOLIN.brd - zdrojový soubor pro tvorbu DPS (vytvořený v programu Eagle 7.2.0),
- \Soubory DSP\MIDIVIOLIN.sch - soubor obsahující schéma zapojení USB zvukové karty (vytvořený v programu Eagle 7.2.0) ,
- \Fotodokumentace\deska_bot.jpg - foto desky plošných spojů ,
- \Fotodokumentace\deska_top.jpg - foto desky plošných spojů ,
- \Fotodokumentace\snimac.jpg - foto cívky snímače ,
- \Fotodokumentace\model_telo.jpg - foto modelu houslí (1:1) ,
- \Fotodokumentace\vyroba_forma.jpg - foto výroby formy ,
- \Fotodokumentace\vyroba_telo.jpg - foto výroby karbonového těla,
- \Fotodokumentace\vyroba_telo_bot.jpg - foto výroby karbonového těla.