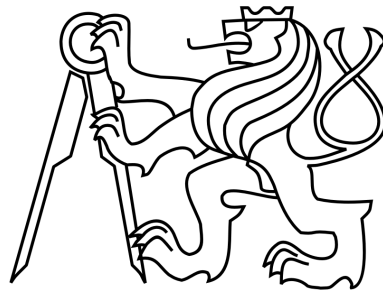


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

Katedra radioelektroniky



Použití digitálních MEMS mikrofonů  
v systémech pro bezdrátové  
monitorování hluku

Using of Digital MEMS Microphones in Systems for Wireless Noise Monitoring

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Magisterský studijní program:

Elektronika a komunikace

Studijní obor:

Audiovizuální technika a zpracování signálů

Vypracoval:

Bc. Petr Fabián

Vedoucí práce:

Ing. Petr HONZÍK, Ph.D.

Praha, leden 2019

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Fabián** Jméno: **Petr** Osobní číslo: **382826**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávající katedra/ústav: **Katedra radioelektroniky**  
Studijní program: **Elektronika a komunikace**  
Studijní obor: **Audiovizuální technika a zpracování signálů**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Použití digitálních MEMS mikrofonů v systémech pro bezdrátové monitorování hluku**

Název diplomové práce anglicky:

**Using of Digital MEMS Microphones in Systems for Wireless Noise Monitoring**

Pokyny pro vypracování:

Seznamte se s funkcí digitálních MEMS mikrofonů a se způsobem přenosu dat po I2S sběrnici. Na dostupném hardware (Arduino MKR Zero) implementujte jednoduchý senzor hluku s digitálním zpracováním dat z mikrofonu obsahující váhování A-filtrem. Analyzujte vliv vlastností MEMS mikrofonu (citlivost, frekvenční charakteristika, dynamický rozsah) na přesnost tohoto senzoru. Hledejte možnosti vlastní hardwarové a softwarové implementace senzoru.

Seznam doporučené literatury:

- [1] O. Jiříček: Úvod do akustiky, ČVUT, 2002
- [2] L. L. Beranek, V. T. Mellow: Acoustics: Sound Fields and Transducers, Elsevier, UK, USA, 2012.
- [3] P. Skalický: Aplikace signálových procesorů, ČVUT, 2003

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**Ing. Petr Honzík, Ph.D., UBI FD ČVUT**

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

Datum zadání diplomové práce: **27.09.2018**

Termín odevzdání diplomové práce: **08.01.2019**

Platnost zadání diplomové práce: **19.02.2020**

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

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

## **ABSTRAKT**

Tato práce se zabývá návrhu a implementace jednoduchého hlukového senzoru s použitím levného digitálního MEMS mikrofону a kontroleru Arduino MKRZero, který je integrovatelný do senzorické plošné sítě pro monitorování míry akustického znečištění aglomerace. V textu je popsán použitý mikrofón a metodika oživení, návrhu a realizace obslužného kódu. Výstupní informací z mikrofónu je hladina akustického tlaku, váhovaná A křivkou, odpovídající frekvenční závislosti lidského sluchu. V závěru jsou shrnuty výsledky měření.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Hlukový senzor, dopravní hluk, A filtr, digitální MEMS mikrofón, Arduino, MLS

## **ABSTRACT**

The goal of the thesis is to design and implement an easy traffic noise sensor using a cheap MEMS microphone to the Arduino MKRZero. The microphone is usable in a city area noise network.

In this document the used microphone, design and implementation of the controlling code is described. The measured digital value of an acoustic pressure is filtered with an A weighting curve which approximates the frequency response of the human hearing system. The output information of the microphone is sound pressure level. There will be a conclusion of measured results.

## **KEYWORDS**

Noise sensor, traffic noise, A weighting, digital MEMS microphone, Arduino, MLS

## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

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

V Praze dne 8. ledna 2019

.....

Petr Fabián

## PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat panu Ing. Petru Honzíkovi Ph.D za konzultace, cenné rady a vedení práce, za zapůjčené měřicí vybavení a za věnovaný čas při vypracování mé diplomové práce. Současně děkuji rodině a přátelům za podporu při studiu.

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Teoretický rozbor</b>	<b>3</b>
2.1	Zvuk . . . . .	3
2.1.1	Sluch . . . . .	3
2.1.2	Hluk . . . . .	4
2.2	Zvukoměr . . . . .	5
2.3	Elektromechanické měniče-mikrofony . . . . .	7
2.3.1	Kapacitní mikrofony . . . . .	8
2.4	Váhovací křivky . . . . .	9
2.5	Signály, soustavy a DSP . . . . .	10
2.5.1	Autokorelace . . . . .	11
2.5.2	Impulzová odezva filtru . . . . .	11
2.5.3	Přenosová funkce . . . . .	11
2.6	A-filtr . . . . .	12
2.6.1	Bikvadratický IIR filtr . . . . .	13
2.6.2	Návrh A filtru . . . . .	14
2.7	Měřicí signály . . . . .	15
2.7.1	Kalibrační signál . . . . .	15
2.7.2	Pseudonáhodný signál maximální délky MLS . . . . .	15
2.8	MEMS technologie . . . . .	16
2.8.1	MEMS mikrofony . . . . .	16
2.8.2	MEMS mikrofon ICS-43432 . . . . .	17
2.9	Sběrnice I <sup>2</sup> S . . . . .	19
2.9.1	Serial Clock - SCL . . . . .	19
2.9.2	Serial Data - SD . . . . .	19
2.9.3	Word Select - WS . . . . .	20
2.10	Mikrokontrolery . . . . .	20
2.10.1	Arduino MKRzero . . . . .	20
2.10.2	Raspberry Pi . . . . .	20
2.11	Výpočty . . . . .	21
2.11.1	RMS . . . . .	21
2.11.2	Sčítání dvou nekoherentních zdrojů akustického tlaku . . . . .	21

<b>3</b>	<b>Měření</b>	<b>23</b>
3.1	Bezpečnostní opatření . . . . .	23
3.1.1	Práce s přístroji pod napětím . . . . .	23
3.1.2	Práce s měřicí komorou . . . . .	23
3.1.3	Manipulace s mikrofony . . . . .	23
3.1.4	Měření při nadměrných hlasitostech . . . . .	24
3.2	Návrh a ověření funkčnosti A filtru . . . . .	24
3.3	Schéma zapojení . . . . .	26
3.3.1	Schéma zapojení přístrojů, varianta 1 . . . . .	26
3.3.2	Schéma zapojení přístrojů, varianta 2 . . . . .	27
3.3.3	Schéma zapojení přístrojů, varianta 3 . . . . .	27
3.4	Měřicí vybavení . . . . .	29
3.4.1	Měřicí software . . . . .	29
3.4.2	Analyzátor B&K Photon+ . . . . .	29
3.4.3	Zvuková karta Steinberg UR22 . . . . .	30
3.4.4	Referenční zdroj zvuku . . . . .	30
3.4.5	Měřicí mikrofon B&K 4944-B . . . . .	30
3.4.6	Měřicí mikrofon B&K 4189 . . . . .	32
3.4.7	Digitální MEMS mikrofon . . . . .	33
3.4.8	Měřicí komora . . . . .	34
3.5	Měření útlumu měřicí komory . . . . .	34
3.6	Měření reálné vzorkovací frekvence . . . . .	35
3.7	Výčet dat z mikrofonu . . . . .	37
3.8	Měření převodní konstanty digitálního mikrofonu . . . . .	38
3.8.1	Kalibrace při dílčích měřeních . . . . .	38
3.9	Měření charakteristik MEMS mikrofonu a hlukového senzoru . . . . .	39
3.9.1	Měření přenosové charakteristiky mikrofonu pomocí MLS . . . . .	39
3.9.2	Hlukový senzor a implementace ovládacího kódu . . . . .	42
3.9.3	Frekvenční závislost přesnosti hlukového senzoru při buzení harmonickým signálem, detail nízké kmitočty . . . . .	43
3.9.4	Převodní charakteristika hlukového senzoru při buzení růžovým šumem . . . . .	44
3.9.5	Frekvenční závislost přesnosti hlukového senzoru při váhování oknem typu 'cos' . . . . .	46
3.9.6	Frekvenční závislost přesnosti hlukového senzoru, okno 'cos', úprava A filtru . . . . .	50

3.9.7	Převodní charakteristika hlukového senzoru, okno, kompenzace A . . . . .	52
3.9.8	Převodní charakteristika hlukového senzoru, okno, kompenzace A, volné pole . . . . .	53
<b>4</b>	<b>Závěr</b>	<b>55</b>
<b>A</b>	<b>Kódy</b>	<b>63</b>
A.1	Koeficienty bikvadratického filtru, návrh Matlab . . . . .	63
A.2	Výčet dat z mikrofonu . . . . .	63
A.3	Bikvadratický filtr, Arduino . . . . .	63
A.4	RMS . . . . .	64
A.5	Okno cosinus, náběžná hrana . . . . .	64
A.6	Okno cosinus, sestupná hrana . . . . .	64
<b>B</b>	<b>Korekce křivkou A</b>	<b>65</b>
<b>C</b>	<b>Koeficienty IIR filtrů</b>	<b>66</b>
<b>D</b>	<b>Naměřené hodnoty</b>	<b>67</b>
D.1	Frekvenční závislost $L_{pM}$ , sinus . . . . .	67
D.2	Frekvenční charakteristika, sinus, nízké kmitočty . . . . .	67
D.3	Převodní charakteristika, buzení růžovým šumem . . . . .	68
<b>E</b>	<b>Blokové schéma kódu senzoru</b>	<b>69</b>
<b>F</b>	<b>Struktura adresáře přiloženého datového nosiče</b>	<b>70</b>



## SEZNAM ZKRATEK

Zkratka	Význam
A/D	Převodník analogové veličiny na digitální
BNC	Symetrický konektor pro propojování měřicích přístrojů
D/A	Převodník digitální veličiny na analogovou
dB	Logaritmická poměrová jednotka dvou veličin
dBFS	dB Full Scale, vztah hodnoty k celému rozsahu
DP	Filtr typu 'dolní propust'
DPS	Deska plošných spojů
DSP	Digital signal processing, číslicové zpracování signálu
EA	Elektroakustický měnič
EMS	Elektromagnetická kompatibilita
ESD	Elektrostatický výboj
FIR	Filtr s konečnou impulzní odezvou
$F_s, f_s$	Vzorkovací frekvence
HDMI	Standard pro přenos digitálního obrazu a zvuku
HP	Filtr typu 'horní propust'
Hz	Hertz, počet událostí za jednotku času
HW	Hardware
Gnd	Uzemnění
GPIO	Vstupně-výstupní piny
GSa/s	Gigasamples per second, $1 \times 10^9$ vzorků za 1 s
I <sup>2</sup> S	Digitální sběrnice pro posílání zvuku
IDE	Vývojové prostředí pro kontrolery Arduino
IIR	Filtr s nekonečnou impulzní odezvou
In.	Inicializace
IoT	Internet of Things, Internet věcí
MIC	Mikrofon
MLS	Pseudonáhodný signál maximální délky s plochým spektrem
MKRzero	32bitový kontroler z rodiny Arduino
$L_n$	Délka náběžné hrany váhovacího okna
$L_p$	Hladina akustického tlaku, SPL
$L_{pR}$	Hladina akustického tlaku, změřená referenčním mikrofonem B&K
$L_{pM}$	Hladina akustického tlaku měřeného mikrofonu/hlukového senzoru
$L_s$	Délka sestupné hrany váhovacího okna
LSB	Least significant bit, nejnižší bit v číselné reprezentaci
LR	Pin MEMS mikrofonu pro volbu levý / pravý kanál
MEMS	Mikro elektro-mechanický systém
mj.	Mimo jiné
MSB	Most significant bit, nejvýznamnější bit v číselné reprezentaci
NV	Nařízení vlády
OLA	OverLap and Add, metoda výběr a zpracování signálu pomocí oken

<b>Zkratka</b>	<b>Význam</b>
PC	Osobní počítač
Ph	Phon, jednotka hlasitosti
Software	Programové vybavení počítače
SOS	Second-order section
R&S	Rohde&Schwarz, výrobce měřicí techniky
RAM	Paměť s náhodným přístupem
RMS	Root mean square, střední hodnota
SCK	Serial clock, hodinový signál u digitální sběrnice
SD	Serial Data, pin pro posílání dat po sériové lince
SEL	Sound Exposure Level, hladina hlukové expozice
SI	Système Internationale, mezinárodní soustava měř a vah
Slen	Délka signálu
SNR	Signal to Noise Ratio, odstup signálu od šumu [dB](A)
SPL	Sound Pressure Level, hladina akustického tlaku, L <sub>p</sub>
THD	Total Harmonic Distortion, míra harmonické zkreslení
Var.	Varianta
WAV	Bezeztrátový formát ukládání hudebních dat
Vcc	Napájecí napětí
Vz., vz.	Vzorek
UART	Universal Asynchronous Receive Tranceive, sériová linka
USB	Universal Serial Bus, počítačová sběrnice pro připojení periferií
WS	Word Select, pin pro komunikaci po sběrnici I <sup>2</sup> S

## SEZNAM SYMBOLŮ

<b>Symbol</b>	<b>Význam</b>	<b>Rozměr</b>
f	Kmitočet	[Hz]
i	Proud	Ampér, [A]
k	Kalibrační konstanta	[Pa <sup>-1</sup> ]
p	Akustický tlak	Pascal, [Pa]
u	Napětí	Volt, [V]
w	Akustická objemová rychlost	[m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]
$\phi_0$	Počáteční fáze	[rad]
$\bar{\phi}$	Průměr hodnot	dle veličiny

# 1 | Úvod

Rozvoj urbanizace a s ní související infrastruktury, technologií a neustálého zrychlování života jsou trendem současnosti.

S tím souvisí i nárůst hlukové zátěže, generované převážně automobilovou dopravou, kterou je potřeba regulovat řadou zákonů a norem. První zmínka o takové regulaci je z doby Římské říše v podobě zákazu jízdy těžkých vozů v noci[1].

V praxi je konvenčními metodami téměř nemožné monitorovat úroveň hluku ve všech částech městské aglomerace kontinuálně při zachování nízkých nákladů.

S rozšířením internetu, pokrytím velkého území mobilním signálem a řadou na trhu dostupných kontrolerů je možným řešením použití platformy INTERNET VĚCÍ, IoT, kdy realizace vhodné senzorické sítě je umožněna zejména s ohledem na jednoduchost a nízké pořizovací náklady při rozumné přesnosti. Konvenční zvukoměry sice splňují požadavky na přesnost, jejich možnosti vzdáleného ovládní a získání dat jsou značně omezené a pořizovací náklady jsou neúměrně vysoké. Vyvíjená senzorická síť obsahuje senzor hluku, prachu a znečišťujících plynů.

Práce je rozdělena do dvou bloků. V teoretické části jsou shrnuty základní vlastnosti zvuku, hluku a jeho měření, zpracování signálu, a použité mikrofony a kontrolery.

Praktická část obsahuje řadu měření, kde cílem této práce je implementace jednoduchého hlukového senzoru s levným digitálním MEMS mikrofonem se zpracováním dat tak, aby na výstupu byla informace o aktuální hladině akustického tlaku váhovaná A křivkou. Na závěr je zhodnocení změřených a očekávaných výsledků.

Návrh ovládacího kódu proběhne na dostupném kontroleru Arduino v jazyce C nebo knihovně wiring a k návrhu filtrů a ke zpracování změřených dat bude použit program MATLAB od společnosti MathWorks.



## 2 | Teoretický rozbor

V této kapitole jsou shrnuty základní vlastnosti zvuku, hluku a jeho měření. Dále návrh váhovacího filtru A a zpracování signálu, vlastnosti MEMS technologie a miniaturních mikrofonů a nakonec vhodné kontrolery, které jsou použity k vývoji obslužného kódu a k měření frekvenčních a převodních charakteristik<sup>1</sup>.

### 2.1 Zvuk

Zvukem se rozumí vibrace částic pevného, kapalného či plynného média o kmitočtech přibližně v rozsahu lidského ucha<sup>2</sup>.

Aby byl zvuk lidským uchem vnímaný, musí být akustický tlak daným zvukem vyvolaný v místě posluchače vyšší než práh slyšení, který navíc závisí na frekvenci, směru a typu signálu<sup>3</sup>. Horní hranice je definována prahem bolesti při  $p_0 = 200$  Pa, který odpovídá hladině akustického tlaku  $L_p = 140$  dB.

Pro hodnoty tlaků zvuků v rozsahu několika řádů bylo zavedeno hladinové vyjádření v podobě logaritmu poměru hodnoty dané veličiny a její referenční hodnoty. Pro hladinu akustického tlaku platí vztah [2]

$$L_p = 10 \log_{10} \frac{p^2}{p_0^2} = 20 \log_{10} \frac{p}{p_0} \text{ [dB]}, \quad (2.1)$$

Vychází z Weber-Fechnerova zákona, kde platí logaritmická závislost mezi fyzikální veličinou a vyvolaným vjemem.

#### 2.1.1 Sluch

Lidský sluch jako spektrální analyzátor vnímá intenzitu zvuků v závislosti na kmitočtu a je navíc s věkem proměnný. Řadou experimentů byly standardizovány křivky stejné hlasitosti, ve kterých byly vjemy jednotlivých kmitočtů srovnávány s vjemem pro 1 kHz tón. Hladinové vyjádření je ve Phonech [Ph], kde hladina hlasitosti pro 1 kHz odpovídá číselně hladině akustické intenzity, resp. tlaku<sup>4</sup>. Z křivek stejné hlasitosti vycházejí váhovací filtry A a C, uvedené na obrázku 2.8, kterými se korigují změřené hodnoty hladin akustického tlaku v jednotlivých frekvenčních pásmech a které jsou definovány v normě ČSN EN IEC 61672-1[8].

<sup>1</sup>Detailněji je problematika zvuku, slyšení a hluku rozebrána například v [2][3][4][5][6][7]

<sup>2</sup>V literatuře se nejčastěji uvádí rozsah 16 Hz - 20 kHz

<sup>3</sup>Prahová hodnota akustického tlaku dle mezinárodních úmluv pro 1 kHz je  $p_0 = 2 \times 10^{-5}$  Pa

<sup>4</sup>Zanedbatelný rozdíl platí pro rovinnou postupnou vlnu ve volném poli, viz [2] strany 55 a 56

---

## 2.1.2 Hluk

Hluk je nežádoucí zvuk, který vyvolává nepříjemný vjem nebo má zejména z dlouhodobého hlediska škodlivé účinky a je individuální. Záleží tedy na daném jedinci, jak jej bude vnímat a určitý zvukový podnět nemusí být pro každého člověka stejně rušivý. V praxi však platí, že "vše, co se hýbe, se musí řešit"<sup>5</sup>.

S neustálým rozvojem dopravy jsou zejména města vystavena zvýšené hladině hluku, která je proměnná v závislosti na denní době.

Legislativa v ČR zabývající se účinky hluku na člověka a je v souladu se směrnicemi a předpisy je například zákon č. 258/2000 Sb. o ochraně veřejného zdraví, nařízení vlády č. 272/2011 Sb. o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací a zákoník práce 262/2006 Sb.

Hlukovou expozicí se rozumí míra dlouhodobého vystavení sluchu hlukům. Pro hodnocení proměnných zvukových polí byla zavedena *ekvivalentní trvalá hladina*, která má stejný energetický účinek jako sledovaný proměnný zvuk, viz rovnice [2]

$$L_{eq} = 10 \log_{10} \left[ \frac{1}{T} \int_0^T \frac{p^2(t)}{p_0^2} dt \right] \quad [dB]. \quad (2.2)$$

Ekvivalentní hladina akustického tlaku pro dopravu se stanoví pro celou denní  $L_{Aeq,16h}$  a celou noční dobu  $L_{Aeq,8h}$ , u letecké dopravy se limit vztahuje na standardní letový den. Základní hladina akustického tlaku je  $L_{Aeq,T} = 50 \text{ dB} +$  příslušná korekce na typ prostoru a denní/noční dobu. Korekce na impulzní hluk je  $-12 \text{ dB}$ . Hodnoty z nařízení vlády jsou uvedeny v tabulce 2.1. Získaná data z měření, hlukových map či intenzity dopravy se používají například pro návrh nepůzvučnosti pláštů budov.

**Tabulka 2.1:** Hodnoty ekvivalentní hladiny akustického tlaku pro různé prostory a denní dobu, převzato z NV 272/2011 Sb.

Pozemní komunikace a dráhy	$L_{Aeq,16h}$ [dB]	$L_{Aeq,8h}$ [dB]
Dálnice, silnice a místní komunikace I. a II. třídy	60	50
Silnice a místní komunikace III. třídy	55	45
Železniční dráhy v ochranném pásmu dráhy	60	55
Železniční dráhy mimo ochranné pásmo dráhy	55	50
Stará hluková zátěž	70	60
Hluk z letecké dopravy	60	50

---

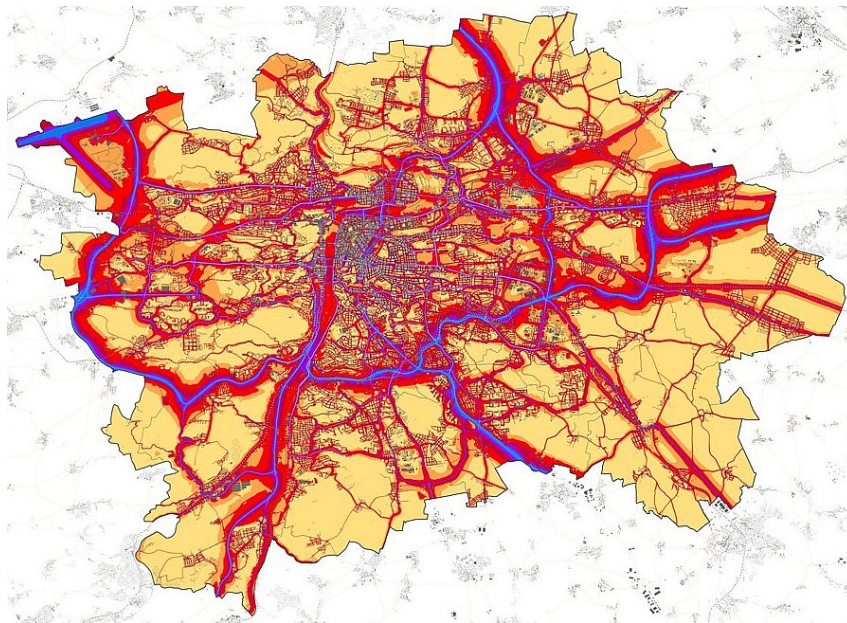
<sup>5</sup>Citace z přednášky p.prof. Ondřeje Jiříčka předmětu Zvuková technika, 31.10.2017

Je-li k dispozici časové rozložení hladin, kdy hladina  $L_i$  trvala  $t_i$ , vypočítá se ekvivalentní hladina podle vztahu [2]

$$L_{eq} = 10 \log_{10} \frac{\sum_{i=1}^N t_i 10^{0,1L_i}}{\sum_{i=1}^N t_i} \quad [dB]. \quad (2.3)$$

Další veličina je *hladina hlukové expozice* SEL, která se v praxi používá pro sledování děje za 1 sekundu.

Na obrázku 2.1 je uvedena hluková mapa hlavního města Prahy, kde žlutá barva označuje "nejtišší" oblasti s hladinou akustického tlaku nižší než 55 dB, červené jsou hladiny 60-65 dB a modře hladiny nad 75 dB. Hodnoty ukazatele jsou pro den, večer a noc. Vyšší úroveň hluku je zejména u dopravních tepen a v okolí letiště. [9]



Obrázek 2.1: Strategická hluková mapa aglomerace Praha 2007 [9]

Opačný problém nastává v případě elektromobilů, kde samotný dopravní prostředek<sup>6</sup> z principu vydává nízkou úroveň hluku v porovnání s vozidly se spalovacím motorem. Zde je naopak žádoucí, aby byl daný dopravní prostředek slyšet s ohledem na bezpečnost chodců.

## 2.2 Zvukoměr

Zvukoměr je základním přístrojem pro měření akustických veličin, viz obrázek 2.2. Sestává z mikrofону, nejčastěji kapacitního pro frekvenční vlastnosti a dobrou časovou stálost, dále

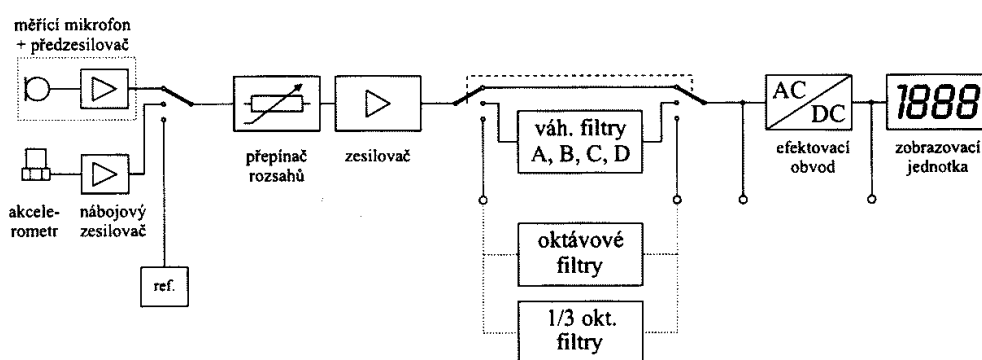
<sup>6</sup>Automobil osobní/nákladní, motocykl, kolo, koloběžka

z obvodů zpracování signálu jako zesilovač, oktávové a váhovací filtry, AC/DC převodníku vhodně zobrazovací jednotky či možnosti ukládání změřených dat.



**Obrázek 2.2:** Ukázka zvukoměru Brüel&Kjaer 2250-S, převzato z [3]

Blokové schéma je uvedeno na obrázku 2.3. Detailněji je přístroj rozebraný v [2].



**Obrázek 2.3:** Blokové schéma zvukoměru, převzato a upraveno z [2]

Váhovací filtry jsou nejčastěji A<sup>7</sup>, C a Z, kde  $Z(f) = 0$ . Z důvodu možného ovlivnění zvukového pole se zvukoměry konstruují s kónickým čelem a vhodné je umístění mikrofonu s předzesilovačem co nejdále od těla zvukoměru. Proto i návrh držáku senzoru by měl být podobné konstrukce a s možností rotace ve dvou osách pro orientaci membrány do volného pole, tedy kolmo ke zdroji zvuku/hluku.

Pro standardizaci změřených veličin se používá česká technická norma pro zvukoměry ČSN EN 61672-1, která definuje řadu požadavků na prostředí, parametry zvukoměru, na výpočty váhovacích křivek a další, například identifikaci nízké úrovně signálu či přebuzení [8] a citace nejdůležitějších parametrů pro zvukoměry je uvedena v [3].

Norma definuje jmenovité exponenciální časové konstanty 0,125 pro časové vážení F a 1 s pro časové vážení S<sup>8</sup>.

Tato práce se bude zabývat návrhem hlukového senzoru, který bude schopen měřit hladinu akustického tlaku pomocí váhovací křivky A s tolerancemi co nejbližší třídě 1 s frekvenčním rozsahem pro tuto třídu s ohledem na vlastnosti mikrofonu co nejvíce pokrývajícím požadované pásmo kmitočtů 63 Hz-16 kHz a s minimálním dynamickým rozsahem 60 dB(A).

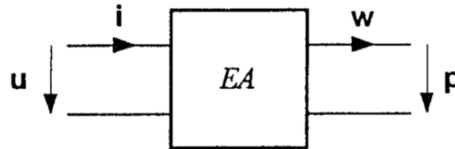
<sup>7</sup>Váhovací filtry/křivky A a C jsou rozebrány v kapitole 2.4

<sup>8</sup>z angličtiny F fast, rychle a S slow, pomalu



## 2.3 Elektromechanické měniče-mikrofony

Elektroakustické měniče slouží k přeměně akustického tlaku a objemové rychlosti na napětí a proud a naopak, viz dvojbranová reprezentace na obrázku 2.4.



Obrázek 2.4: Elektroakustický dvojbran, převzato z [10]

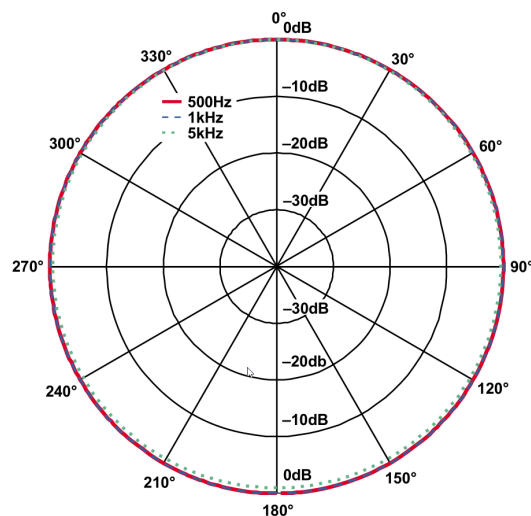
Lze je rozdělit do dvou skupin, měniče s magnetickým polem, kam lze zařadit měniče elektrodynamické, elektromagnetické a magnetostrikční a s elektrickým polem, kam patří měniče

elektrostatické a piezoelektrické. Ve všech případech platí reciprocita, konverze veličin je obousměrná.

Mikrofony jsou přijímače, ve kterých změna akustického tlaku a rychlosti vyvolá změnu elektrického napětí  $u$  na výstupu.

Přijímač bývá rotačně symetrický a akustická osa, která určuje směr nejvyšší citlivosti, bývá totožná s jeho osou symetrie. Dělí se např. dle velikosti vůči vlnové délce na gradientní a vlnové, dle typu měniče nebo směrových vlastností.

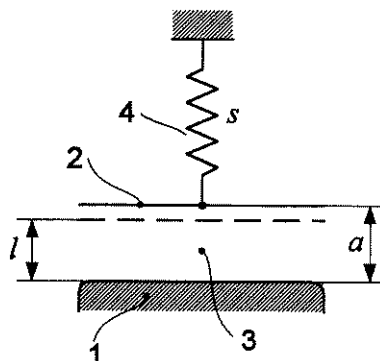
Mikrofony se dle směrové charakteristiky dělí na všesměrové/kulové, s osmičkovou charakteristikou, různé varianty kardioidy dle předozadního poměru, vlnové. Na obrázku 2.5 je uveden příklad směrové charakteristiky všesměrového MEMS mikrofonu InvenSense ICS-43432, průběh je zobrazen v polárních souřadnicích [11][2][10][12].



Obrázek 2.5: Všesměrová charakteristika MEMS mikrofonu, převzato z [11]

### 2.3.1 Kapacitní mikrofony

Na obrázku 2.6 je uveden základní princip elektrostatického měniče.



**Obrázek 2.6:** Princip elektrostatického jednočinného měniče: pevná elektroda **1**, pohyblivá elektroda **2**, vzduchová mezera **3**, elastor **4**. Převzato z [10]

Chová se jako kapacitor, kde se jedna elektroda **2** pohybuje vůči pevné elektrodě **1**. Přivedením polarizačního náboje dojde ke změně vzdáleností obou desek z klidové  $a$  na vzdálenost  $l$ , kde nastane rovnováha mezi přitažlivou silou elektrického pole a reakcí elastoru  $s$ .

Pohybem elektrod vůči sobě dochází ke změně vzdálenosti mezi elektrodami a ke změně objemu vzduchové mezery. Tedy ke změně náboje, která vyvolá měřitelnou změnu napětí. Toto napětí je měřitelné<sup>9</sup>. Pohyblivá elektroda bývá řešena tenkou napnutou membránou, kde míra napnutí membrány určuje například citlivost a kmitočtový rozsah.

Při výpočtech se může využít náhradních schémat, kde se mimo kapacitu měniče vyskytuje i parazitní kapacita  $T_a$  v případě provedení měniče mikromechanickými technologiemi bývá poměr kapacity měniče a parazitní kapacity roven 1 nebo může hodnotou převyšovat kapacitu samotného měniče<sup>10</sup>.

Zvláštním případem je elektretový mikrofon, ve kterém je polarizační napětí tvořeno materiálem s permanentním elektrickým nábojem, elektretem.

Elektrostatický mikrofon se používá jako měřicí pro své vlastnosti, zejména plochou frekvenční charakteristiku a mikrofonní vložky se vyrábí v průměrech 1", 1/2", 1/4" a 1/8" dle kmitočtového pásma a rozsahu akustického tlaku.

Na obrázku 2.7 je uveden zjednodušený průběh frekvenční charakteristiky, kde  $\eta$  je tlaková citlivost. Ta vychází z akustického tlaku  $p$ , který vyvolá sílu  $F'$  a akustickou rychlost  $\nu$ , která je úměrná výstupnímu napětí  $U$  naprázdno, viz rovnice [10]

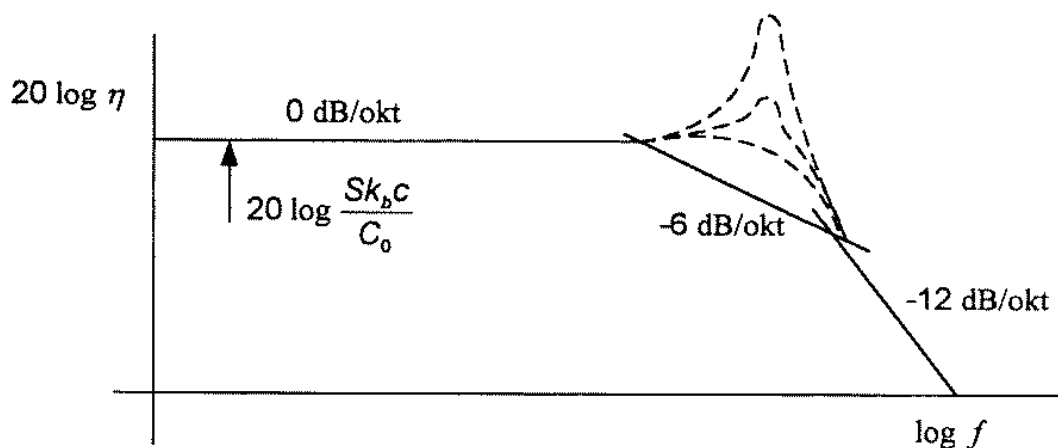
$$\eta = \frac{U}{p} \quad [V \cdot Pa^{-1}; V, Pa]. \quad (2.4)$$

<sup>9</sup>Rovnice a jejich odvození je přehledně uveden například v [4][13]

<sup>10</sup>Více v [10] na stranách 529 a 530

Oblast měřených kmitočtů je do první rezonance mikrofonu, kde převažuje vliv podajnosti membrány a podajnosti vzduchového objemu za membránou. Nad touto čárkovaně vyznačenou oblastí kmitočtů citlivost mikrofonu klesá z důvodu převažujícího vlivu hmotnosti membrány.

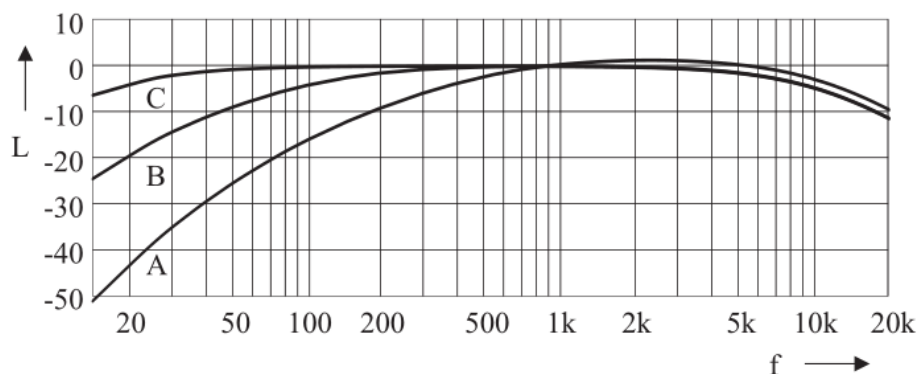
Na nízkých kmitočtech působí například vliv vstupního odporu mikrofonního zesilovače nebo akustický odpor kapiláry, sloužící k vyrovnání změn statického tlaku po obou stranách pohyblivé membrány <sup>11</sup>.



Obrázek 2.7: Frekvenční charakteristika elektrostatického měniče. Převzato z [10]

## 2.4 Váhovací křivky

Na základě křivek stejných hlasitostí byly definovány váhovací filtry. Vychází z frekvenční závislosti lidského sluchu, který je různě citlivý na různé kmitočty. Nejvyšší citlivost ucha je na kmitočty okolo 1-2 kHz. V praxi jsou nejpoužívanější korekce A a C, uvedené na obrázku 2.8



Obrázek 2.8: Průběhy váhovacích křivek A, B a C, převzato z [2]

<sup>11</sup>Více informací o vlastnostech měničů lze dohledat v [10][12][13]

Průběh A aproximuje 40Phonovou Fletcher-Munsonovu křivku stejné hlasitosti a C aproximuje 100 Ph křivku<sup>12</sup>.

Předpis pro výpočet korekcí v měřidlech je ve tvaru [8]

$$A_f = 10 \lg \left[ \frac{f_4^2 f^4}{(f^2 + f_1^2)(f^2 + f_2^2)^{\frac{1}{2}}(f^2 + f_3^2)^{\frac{1}{2}}(f^2 + f_4^2)} \right]^2 \text{ dB} - A_{1000}, \quad (2.5)$$

kde konstanta  $A_{1000}$  reprezentuje elektrické zesílení v [dB] potřebné k zajištění kmitočtového vážení 0 dB při 1 kHz.

Aproximované hodnoty kmitočtů pólů  $f_1 - f_4$ :  $f_1 = 20,60$  Hz;  $f_2 = 107,7$  Hz;  $f_3 = 737,9$  Hz a  $f_4 = 12\,194$  Hz. Výpočty pro získání jednotlivých kmitočtů jsou uvedeny v příloze E normy ČSN EN 61672-1.

Lze se setkat i s předpisem ve tvaru

$$A_f = 20 \log \frac{R_A(f)}{R_A(1000)}, R_A(f) = \frac{12200^2 f^4}{(f^2 + 20,6^2)(f^2 + 12200^2) \sqrt{(f^2 + 107,7^2)(f^2 + 737,9^2)}}, \quad (2.6)$$

který vychází ze starší normy [2]. Korekce váhovací křivkou A pro jednotlivé kmitočty jsou uvedeny v tabulce B.13 na straně 65.

Při použití váhovacího filtru je daná změřená hladina akustického tlaku označena typem váhovacího filtru, například ve tvaru  $L_p = 20 \text{ dB(A)}$ .

## 2.5 Signály, soustavy a DSP

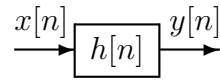
Filtrace je úprava hodnot vzorků signálu pomocí algoritmu tak, aby došlo ke zvýraznění požadovaných složek signálu a naopak k potlačení složek nežádoucích. Se stále se zrychlujícím výpočetním výkonem moderních procesorů je stále více používáno digitálního zpracování signálů pro svoji přesnost a stabilitu. Pod pojmem číslicový filtr se rozumí algoritmus, který lineární kombinací vzorků vstupního a výstupního signálu zvýrazní nebo potlačí požadovanou složku signálu. Typickým příkladem jsou filtry typu dolní a horní propust, pásmová zadrž a další a lze se s nimi setkat například v mobilní telefonii při přenášení pásmového řečového signálu<sup>13</sup> či potlačování echa, v mixážních pultech a dalších zařízeních. Pro splnění vzorkovacího teoremu se používají antialiasingové filtry<sup>14</sup>[14][15][16][17].

<sup>12</sup>Dokumentace MATLAB dsp-ref-fdesign-audioweighting

<sup>13</sup>Telefonní signál bývá v rozsahu 300 Hz-3,4 kHz

<sup>14</sup>Antialiasingový filtr je implementován i v digitálním MEMS mikrofону ICS43432 [18]

Obecnou diskretní soustavu, uvedenou na obrázku 2.9 lze vyjádřit vzorcem



**Obrázek 2.9:** Číslicová soustava, převzato z [14]

$$y[n] = x[n] * h[n], \quad (2.7)$$

kde  $x[n]$  je vstupní posloupnost diskretních vzorků,  $y[n]$  je výstupní posloupnost vzorků,  $h[n]$  je impulzní odezva soustavy a symbol  $*$  označuje konvoluci.

### 2.5.1 Autokorelace

Udává časovou závislost mezi signálem a jeho časově posunutou verzí a používá se například při synchronizaci nebo hledáním periody ve změřených signálech. V MATLABU je implementovaný příkaz `XCORR`. Pro nevychýlený odhad autokorelační funkce  $R_{xx}[m]$  diskretního ergodického signálu konečné délky platí rovnice [19]

$$\hat{R}_{xx}[m] = \frac{1}{N-m} \sum_{n=1}^{N-m} x[n]x[n+m]. \quad (2.8)$$

### 2.5.2 Impulzová odezva filtru

Odezva  $h[n]$  je impulzní odezvou soustavy na jednotkový impuls  $\delta[n]$ , který je diskretní variantou Diracova impulsu  $\delta(t)$  pro spojité signály. Na základě charakteru impulzových odezev byly definovány filtry s konečnou FIR a s nekonečnou impulzovou odezvou IIR.

Filtry typu **FIR** jsou vždy stabilní, mohou být s lineární fázovou charakteristikou, snadno realizovatelné v programu. Pro daný útlum však vyžadují vyššího stupně filtru, tedy větší nároky na HW a s vyšším řádem filtru roste jeho zpoždění.

Filtry **IIR** mohou být nestabilní pro existenci zpětnovazebních struktur a mají nelineární fázovou charakteristiku [20].

### 2.5.3 Přenosová funkce

Důležitou informací o chování systému je jeho přenosová funkce. Určuje se ze znalosti vstupního a výstupního signálu, recipročně výstup ze soustavy lze určit pomocí vstupu a převodní charakteristiky nebo vstup z výstupu. V literatuře se lze setkat i s pojmem **systémová funkce**.

Obecný tvar přenosové funkce lineární diskrétní soustavy s konstantními koeficienty lze vyjádřit ve tvaru racionální lomené funkce

$$H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{\sum_{i=0}^M b_i \cdot z^{-i}}{\sum_{i=0}^L a_i \cdot z^{-i}}. \quad (2.9)$$

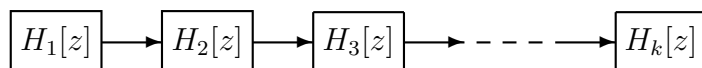
Zpětnou Z-transformací přenosové funkce lze získat diferenční rovnici

$$y_n = \sum_{i=0}^M b_i \cdot x_{n-i} - \sum_{i=1}^L a_i \cdot y_{n-i}. \quad (2.10)$$

Přenosovou funkci systému lze získat podílem spekter výstupního a vstupního signálu, viz rovnice (2.9), při použití vhodného měřicího signálu, například pomocí MLS. Synchronizace A/D převodníků při získávání obou signálů zpravidla nebývá možná a vlivem odchylek v jejich vnitřních oscilátorech dojde k odchylkám mezi vzorkovacími kmitočty.

Řešení se nabízí v podobě výpočtu obou spekter ze stejného časového úseku měřicího signálu, ideálně jedné periody, pro platnost spektrální vzdálenosti mezi jednotlivými vzorky  $1/T$ . Periodu lze vstupního a výstupního signálu získat pomocí autokorelační funkce [21].

Přenosová funkce systému může být složena z dílčích přenosových funkcí jednotlivých částí řetězce, jako například kaskádní struktura IIR filtru na obrázku 2.10.



Obrázek 2.10: Blokové schéma kaskádní struktury IIR filtru

V případě hlukového senzoru se jedná o řetězec mikrofón→A-filtr, který se skládá ze 3 za sebou zapojených bikvadratických filtrů. Celková přenosová funkce hlukového senzoru je tedy součinem všech čtyř přenosových funkcí.

## 2.6 A-filtr

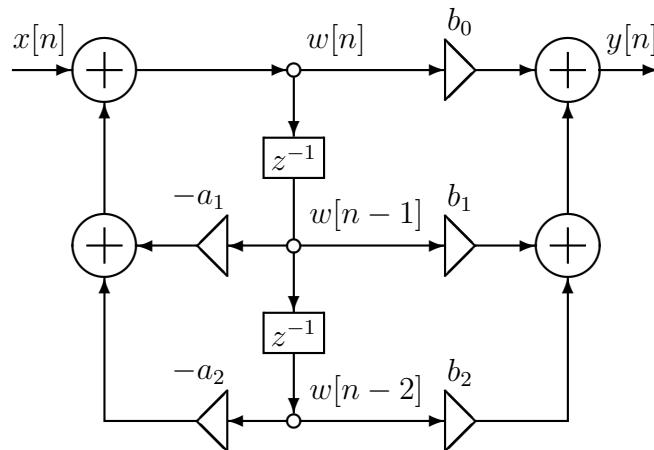
Váhovací filtr typu A u zvukoměrů je založen na psychoakustickém vnímání lidským sluchem. Ucho člověka je různě citlivé na různé kmitočty. Tato citlivost je individuální a navíc se s rostoucím věkem snižuje horní kmitočtové pásmo vlivem opotřebování sluchových buněk.

Norma pro zvukoměry definuje dvě provozní třídy dle mezí tolerance, přísnější je třída 1 [8]. Předpis pro realizaci váhového filtru A je ve tvaru (2.5). V číslicových systémech je jeho realizace pomocí kaskády tří bikvadratických filtrů druhého řádu, dvou filtrů typu horní propust a jeden filtr typu dolní propust, jejichž celková frekvenční charakteristika

aproximuje průběh v normě definovaného A filtru. Kaskádní struktura, viz obrázek 2.10, je oproti jednomu filtru výhodnější z důvodu citlivosti přenosové charakteristiky filtrů vyššího řádu na kvantování koeficientů [22].

### 2.6.1 Bikvadratický IIR filtr

Bikvadratický filtr lze zapsat recipročně pomocí přenosové funkce, blokovým schématem nebo diferenční rovnicí.



**Obrázek 2.11:** Blokové schéma bikvadratického filtru, 2. kanonická forma, převzato z [14]

Přenosová funkce pro obecný bikvadratický filtr lze vyjádřit ve tvaru [22]

$$H(z) = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}}, \quad (2.11)$$

kde člen  $a_1$  je obvykle normován na 1.

Pomocí diferenční rovnice (2.10) lze realizovat 1. kanonickou formu. Ta je náročnější na počet násobení a zpožďovacích členů.

Proto byla zvolena modifikovaná verze, tzv. 2. kanonická forma bikvadratického filtru s diferenčními rovnicemi [22]

$$w_n = x_n - a_1 \cdot w_{n-1} - a_2 \cdot w_{n-2} \quad (2.12)$$

$$y_n = b_0 \cdot w_n + b_1 \cdot w_{n-1} + b_2 \cdot w_{n-2}, \quad (2.13)$$

která má strukturu uvedenu na obrázku 2.11.

Oproti 1. kanonické formě má poloviční počet zpožďovacích členů, je tedy méně náročná na paměť a výpočetní výkon [14]. Obslužný kód pro jednu bikvadratickou strukturu je uveden v příloze A.3.

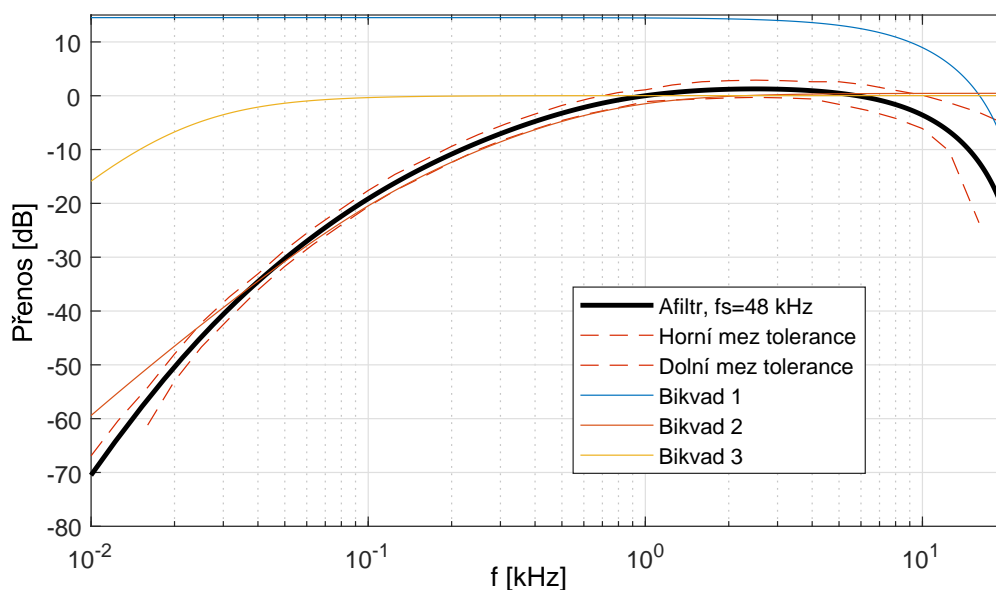
## 2.6.2 Návrh A filtru

K návrhu potřebných koeficientů bylo využito prostředí MATLAB ve verzi R2017a za použití funkce "fdesign", kterému se nastavily jako vstupní parametry reálně změřená vzorkovací frekvence vyčítání dat z mikrofonu a třída přesnosti. Třída přesnosti udává pouze přesnost přejímacích mezí tolerančního intervalu.

Ukázka kódu je v příloze A.1.

Získané koeficienty jsou uloženy ve struktuře **Ha** v matici 3x6, kde řádky odpovídají jednotlivým bikvadratickým filtrům a ve sloupcích jsou uvedeny koeficienty  $b_0$ - $b_2$  a  $a_0$ - $a_2$ . Navržené koeficienty pro všechny změřené vzorkovací kmitočty jsou uvedeny v tabulce ??, kde jsou koeficienty z SOS matice uspořádány do jednoho řádku a transponovány. Zároveň je v navržené struktuře parametr SCALEVALUE, který udává zesílení každého vzorku před vstupem do prvního bikvadu [23].

Přenosové charakteristiky jednotlivých bikvadratických filtrů jsou uvedeny na obrázku 2.12, kde černě je vykreslen průběh navrženého A filtru a dále jsou vykresleny frekvenční průběhy přenosových funkcí pro jednotlivé bikvadratické filtry.



Obrázek 2.12: A filtr a přenosové funkce jednotlivých navržených bikvadů



## 2.7 Měřicí signály

V praktické části byly použity harmonický signál sinus o kmitočtu středních hodnot třetinooktávnových pásem, viz tabulka B.13 v příloze B, dále růžový šum a MLS.

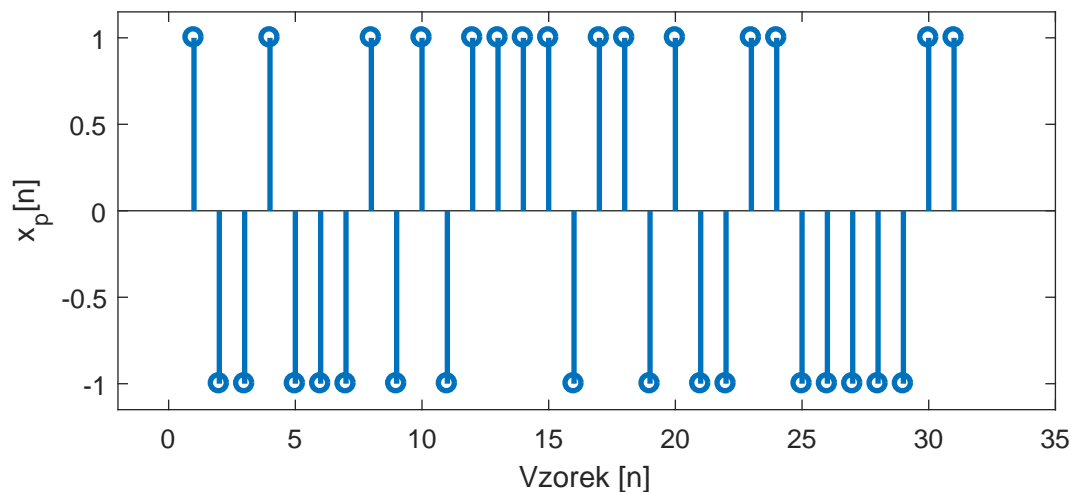
Při měření je důležité nastavit úroveň měřicího signálu tak, aby hladina akustického tlaku byla alespoň o 20 dB nad úrovní okolního šumu. Nahradí-li se okolní šum ideálním zdrojem šumu o hladině akustického tlaku rovné okolnímu šumu, jeho přírůstek k hladině akustického tlaku měřicího signálu je v tomto případě zanedbatelný [2].

### 2.7.1 Kalibrační signál

Harmonický signál o kmitočtu  $f = 1$  kHz a o hladině akustického tlaku  $L_p = 94$  dB[11][2].

### 2.7.2 Pseudonáhodný signál maximální délky MLS

Jedná se o pseudonáhodnou dvoustavovou posloupnost s periodou o délce  $L=2^N-1$ , kde  $N$  je řád posloupnosti, vytvořenou pomocí posuvného registru operací XOR bitů s maskou posuvného registru dle požadovaného řádu. Na obrázku 2.13 je uveden průběh MLS signálu o řádu 5, vygenerovaném v MATLAB.



**Obrázek 2.13:** Ukázka průběhu MSL signálu řádu 5, generováno Matlabem

Řád MLS byl měněn dle vzorkovacího kmitočtu tak, aby doba jedné periody trvala při přehrávání přibližně 1 sekundu a více. Řády a délky pro měřené vzorkovací kmitočty jsou uvedeny v tabulce 3.5 na straně 39. Na obrázku 2.14 je uveden blokově složený MLS signál, u kterého je naznačeno, že výběr nezáleží na přesné lokalizaci původně vyslané periody.

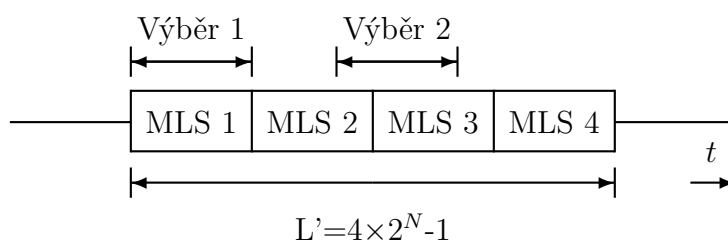
Důležitou vlastností je periodická autokorelační funkce a konstantní výkonové spektrum o hodnotě [19]

$$S[k] = \frac{1}{L}, \quad \text{pro } k = 0, \quad (2.14)$$

$$S[k] = \frac{1}{L}(L + 1), \quad \text{pro } k \neq 0. \quad (2.15)$$

Současně je tento signál velmi odolný proti šumu[19]. Vybráním počtu vzorků, lišícího se od délky vyslané periody, vyjde spektrum MLS velmi nepřesně.

Při měření soustavy se využívá několika period MLS signálu, kde první slouží ke stabilizaci přechodových dějů systému a další periody jsou měřicí. Pro zpřesnění výsledků lze změřené periody průměrovat[24].



Obrázek 2.14: Délka složeného měřicího MLS signálu

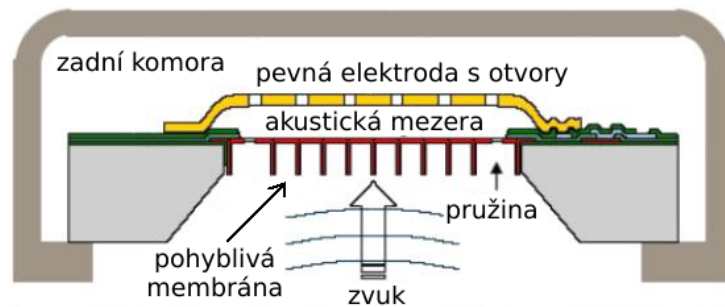
## 2.8 MEMS technologie

Tyto senzory jsou často používány pro snímání tlaku, jako gyroskopy, akcelerometry aktivující airbagy při kolizi automobilu, jako mikrofony, při měření opotřebení různých přístrojů a další. Dosahují díky miniaturizaci mnohdy lepších vlastností oproti vzorům z makrosvěta. Výhodou je nižší spotřeba a náklady na výrobu a dále možnost integrace dalších obvodů na čip. Srovnatelné vlastnosti jednotlivých senzorů jsou z důvodu velké integrace jednotlivých senzorů na jeden wafer. Jejich nástupci jsou NEMS, řádově menší nanostruktury [25][26].

### 2.8.1 MEMS mikrofony

Lze je rozdělit dle několika kategorií. Podle principu na kapacitní, piezoelektrické a piezorezistivní, FET, s optickým vlnovodem a optické. Dle umístění vstupního otvoru shora nebo zespodu spolu s kontakty. Dle výstupního signálu na analogové a digitální. Na obrázku 2.15 je uveden příčný řez stavbou kapacitního mikrofону[26][27].

Pro potřeby hlukového senzoru byl vybrán mikrofon ICS-43432, viz obrázek 2.16a. Důvodem jsou integrované obvody DSP a digitální výstup s informací o akustickém tlaku.

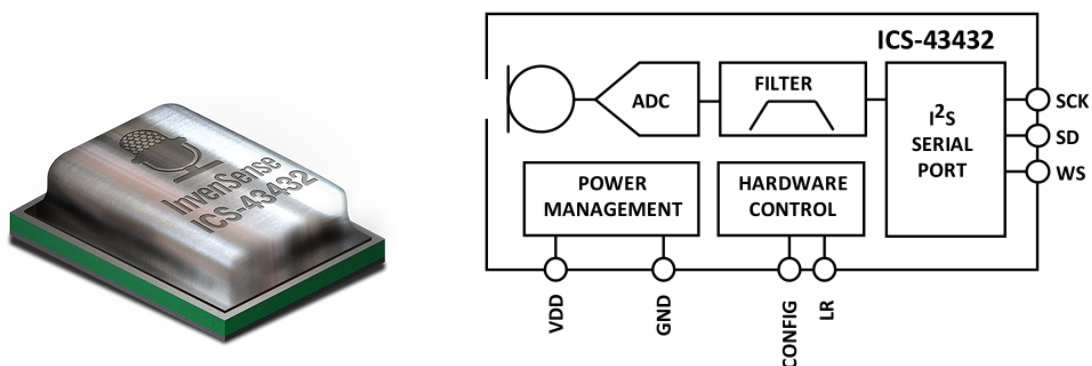


Obrázek 2.15: Struktura kapacitního MEMS mikrofonu, pohled z boku, převzato z [26]

### 2.8.2 MEMS mikrofon ICS-43432

Mikrofon uvedený na obrázku 2.16a využití je například v nositelné elektronice, chytrých televizích, dálkových ovladačích či mikrofonních polích [18].

Na obrázku 2.16b je uvedeno jeho blokové schéma. Signálová cesta obsahuje miniaturní kapacitní mikrofon, 24bitový A/D převodník, antialiasingový filtr a sériový I<sup>2</sup>S port. Dále obsahuje napájecí zdroj a 2 konfigurační piny, z toho jeden na výběr kanálu levý/pravý. Mikrofon má akustický vstup ze strany kontaktů a vyžaduje otvor v DPS. SNR je rozdíl referenčního 1kHz signálu o  $L_{pR} = 94$  dB a úrovně šumu[11].



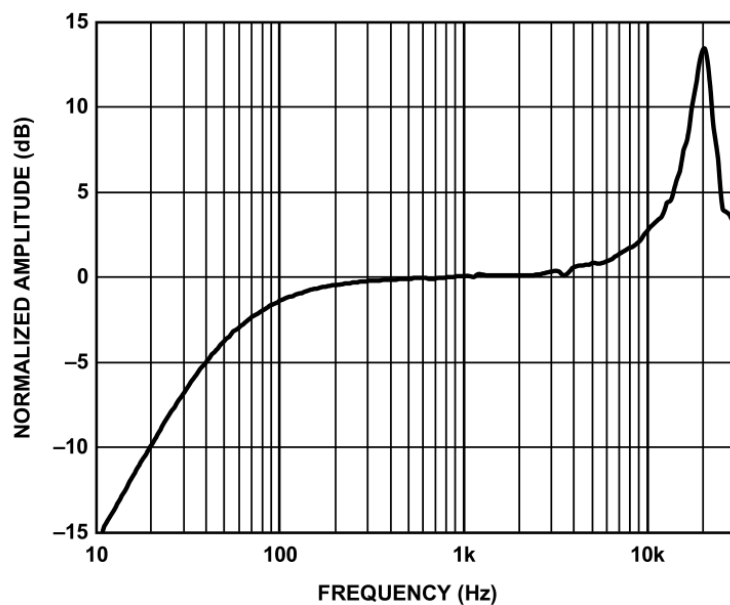
(a) MEMS mikrofon, pohled shora (b) Blokové schéma digitálního I<sup>2</sup>S mikrofonu

Obrázek 2.16: MEMS mikrofon a jeho blokové schéma

Základní informace o mikrofonu jsou uvedeny v tabulce 2.2. Harmonické zkreslení zvoleného mikrofonu při 105 dB SPL se pohybuje od 0,3 do 1 % a při 116 dB je hodnota THD = 10 %. Digitální 0 dB FS je při SPL = 120 dB [18].

Průběh frekvenční charakteristiky mikrofonu je uveden na obrázku 2.17[18]. Spodní hranice frekvenčního pásma je okolo 55 Hz<sup>15</sup>. Pro měření dopravního hluku jsou stěžejní kmitočty právě cca 100 Hz, proto je potřeba tento útlum vhodně kompenzovat. Při softwarové obsluze mikrofonu je třeba počítat s jeho kmitočtově závislou inicializací[18].

<sup>15</sup>Definována jako pokles citlivosti o 3 dB proti hodnotě na kmitočtu 1 kHz.



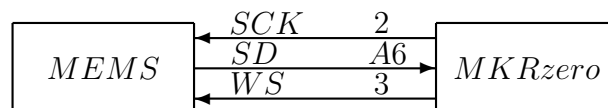
**Obrázek 2.17:** Frekvenční charakteristika digitálního MEMS mikrofonu ICS-43432

**Tabulka 2.2:** Základní vlastnosti MEMS mikrofonu

Parametr	Hodnota	Poznámka
Směrovost	všesměrový	
Rozměry	4x3x1 mm	SMD
Omezení kmitočtového pásma	20 kHz	při $f_s = 48$ kHz
SNR	65 dBA	
Kmitočtový rozsah	50 Hz - 20 kHz	
Napájení	1,62-3,63 V	
Šumový práh	cca 30 dB(A)	

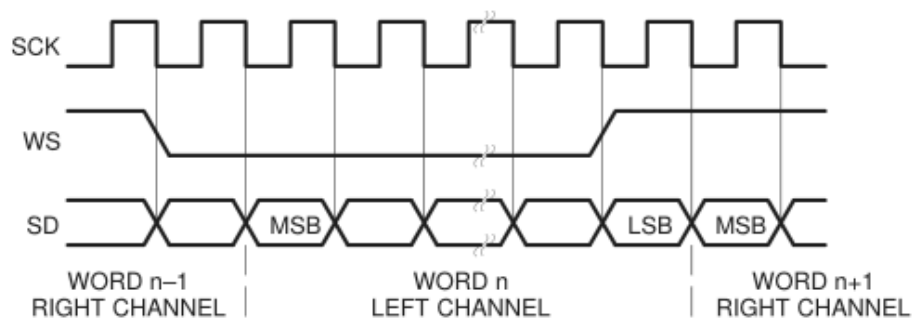
## 2.9 Sběrnice I<sup>2</sup>S

Pro účely standardizace hudebních zařízení jako zvukové procesory, různé A/D převodníky a filtry, byla v polovině 80. let vyvinuta sběrnice I<sup>2</sup>S [28][29]. Ke komunikaci využívá tři vodičů, hodinového signálu SCK, volby slova WS a sériová data SD. Zařízení, které generuje SCK a WS je tzv. master. Blokové schéma spojení vysílače s přijímačem je uvedeno na obrázku 2.18.



Obrázek 2.18: Blokové schéma propojení mikrofonu a kontroleru

Časování sběrnice je uvedeno na obrázku 2.19.



Obrázek 2.19: Základní časování sběrnice I<sup>2</sup>S, převzato z [29]

Podrobnosti o HW konfiguraci, napěťových úrovních jsou v datasheetu od společnosti Philips Semiconductors[29].

### 2.9.1 Serial Clock - SCL

Kmitočet SCL je 64násobkem vzorkovací frekvence. Během jedné vzorkovací periody se přenese 32 bitů pro levý a 32 pro pravý kanál.

### 2.9.2 Serial Data - SD

Po tomto vodiči jsou přenášena data ve dvojkovém doplňku, kde nejvyšší významový bit MSB je přenášen jako první. Slovo delší než vysílač zvládne odeslat je oříznuto a LSB jsou nulovány. Slovo delší, než přijímač zvládne přijmout, je oříznuto a LSB zahozeny. Slovo kratší je doplněno nulami [29].

---

### 2.9.3 Word Select - WS

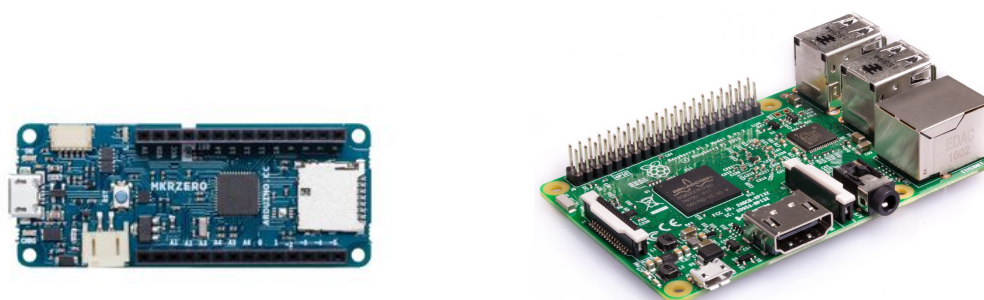
Sběrnice podporuje zapojení mikrofونů ve stereo režimu, kde datový vodič je sdílený pro oba kanály, které se střídají v odesílání vždy po jednom vzorku, viz obrázek 2.19. Změna signálu WS probíhá jeden strojový cyklus před odesláním MSB ze zvoleného kanálu [29].

## 2.10 Mikrokontrolery

Pro oživení testovacího přípravku s mikrofونem a vývoj kódu byly použity dva kontrolery, MKRZero z rodiny Arduino a multifunkční jednodeskový počítač Raspberry Pi 2.

### 2.10.1 Arduino MKRzero

Ilustrační obrázek kontroleru MKRZero je uveden na obrázku 2.20a.



(a) Arduino MKRzero, pohled shora

(b) Raspberry 2, převzato z [3]

**Obrázek 2.20:** Fotografie kontrolerů použitých při měření

Tento kontroler byl zvolen ke sběru dat z mikrofону pro podporu sběrnice I<sup>2</sup>S a 32bitové jádro ARM Cortex-M0 s hodinovým taktom 48 MHz, které dokáže zpracovat posílané 24bitové vzorky. Na DPS je integrovaný slot na microSD kartu. Sérií testování se ukázalo, že ukládání na kartu není v reálném čase možné pro ztracení vzorků a ukládání první hodnoty z bufferu. Hodnoty v dalších měřeních byly ukládány do pole a následně vypisovány po UART. Operační paměť teoreticky stačí na 8 000 32bitových vzorků z mikrofону, kde 8 nejnižších bitů je nulových [30][31].

### 2.10.2 Raspberry Pi

K záznamu zvukových dat ve formátu .wav do interní paměti byl použit Raspberry Pi 2, uvedený na obrázku 2.20b, připojený do školní sítě Ethernet kabelem. Počítač také podporuje I<sup>2</sup>S sběrnici. Ovládání probíhalo v terminálu PC a pro stažení dat byl k počítači připojen monitor a periferie.

## 2.11 Výpočty

### 2.11.1 RMS

Efektivní hodnota výstupního signálu se spočítá podle vzorce

$$RMS' = \sqrt{\frac{1}{T} \sum x[n]^2} \quad [-]. \quad (2.16)$$

Poměr mezi číselnou hodnotou na výstupu digitálního mikrofonu ICS-43432 a hladinou akustického tlaku v [Pa] udává konstanta 'k'. Více o samotném měření této konstanty je uvedeno v sekci 3.8 na straně 38. Při akustickém tlaku 1 Pa je změřena efektivní hodnota výstupního signálu  $RMS_{1Pa}$ , potom lze konstantu k vypočítat z

$$k = \frac{\text{číslo}}{1Pa} \quad \left[ \frac{1}{Pa} \right]. \quad (2.17)$$

Akustický tlak se z efektivní hodnoty výstupního signálu vypočítá pomocí vzorce

$$p_{RMS} = \frac{RMS'}{k} \quad [Pa]. \quad (2.18)$$

Hladina akustického tlaku se z výstupního akustického tlaku vypočítá podle vzorce

$$L_p = 20 \log_{10} \frac{p_{RMS}}{p_0} \quad [dB]. \quad (2.19)$$

kde  $p_0 = 2 \times 10^{-5}$  [Pa] je referenční hodnota akustického tlaku ve vzduchu pro hladinu akustického tlaku 0 dB [2].

### 2.11.2 Sčítání dvou nekoherentních zdrojů akustického tlaku

$$L_p = 10 \log_{10} \sum_{i=1}^n \frac{p_i^2}{p_0^2} \quad [dB] \quad (2.20)$$

V tabulce 2.3 jsou ve sloupci  $L_{p12}$  uvedeny rozdíly hladin akustického tlaku mezi oběma zdroji v dB a ve sloupci  $L_{pdif}$  jsou uvedeny přírůstky k celkové hladině akustického tlaku v dB.

**Tabulka 2.3:** Rozdíl v  $L_p$  dvou zdrojů a přírůstek  $L_{pdif}$  slabšího zdroje

$L_{p12}$ [dB]	$L_{pdif}$ [dB]
0	3,010
10	0,414
20	0,0432





## 3 | Měření

Tato kapitola shrnuje provedená měření na zvoleném digitálním MEMS mikrofону ICS-43432.

V podkapitolách jsou uvedena zapojení měřicího pracoviště, měřicí přístroje a jednotlivá měření frekvenčních a přenosových charakteristik za účelem ověření katalogových průběhů poskytnutých výrobcem a dále funkčnost návrhu filtru s implementací váhovací křivky A.

### 3.1 Bezpečnostní opatření

Vzhledem k práci ve školní laboratoři je nezbytné absolvování úvodního školení ohledně bezpečnosti práce s přístroji, které mohou být při neodborné manipulaci poškozeny či může jinak dojít k újmě na zdraví.

#### 3.1.1 Práce s přístroji pod napětím

Samotné pracoviště je zapojené a do kontaktu lze přijít s bezpečným napětím 5 V. V ostatních částech laboratoře se mohou vyskytovat přístroje pod napětím vyšším než bezpečným. Na nich však měření neprobíhalo a při vyvarování se doteku s těmito přístroji nedojde k úrazu elektrickým proudem.

Laboratoř není upravena proti ESD, při kontaktu s vodivými povrchy může dojít k vybití povrchového náboje těla.

#### 3.1.2 Práce s měřicí komorou

Zvláštní opatrnost je vyžadována při manipulaci s dveřmi měřicí komory. Dveře musí zůstat přivřené z důvodu přítomnosti kabelového svazku, současně však nemá vnější hluk rušit měření uvnitř komory při nízkých SPL a zároveň při měření na vyšších hlasitostech nemá měření příliš rušit okolní pracoviště.

#### 3.1.3 Manipulace s mikrofony

Mikrofon B&K 4189, detailněji rozebraný v kapitole 3.4.6, je celkem veliký a při nárazu může dojít k jeho poškození. Při manipulaci s menším 1/4" B&K 4944, viz kapitola 3.4.5, by též nemělo dojít k upuštění na zem. Současně je konektor typu 10-32 UNF a propojovací kabel velmi tenký a náchylný na mechanické poškození. Při přepojování mikrofonů je též potřeba opatrnosti.

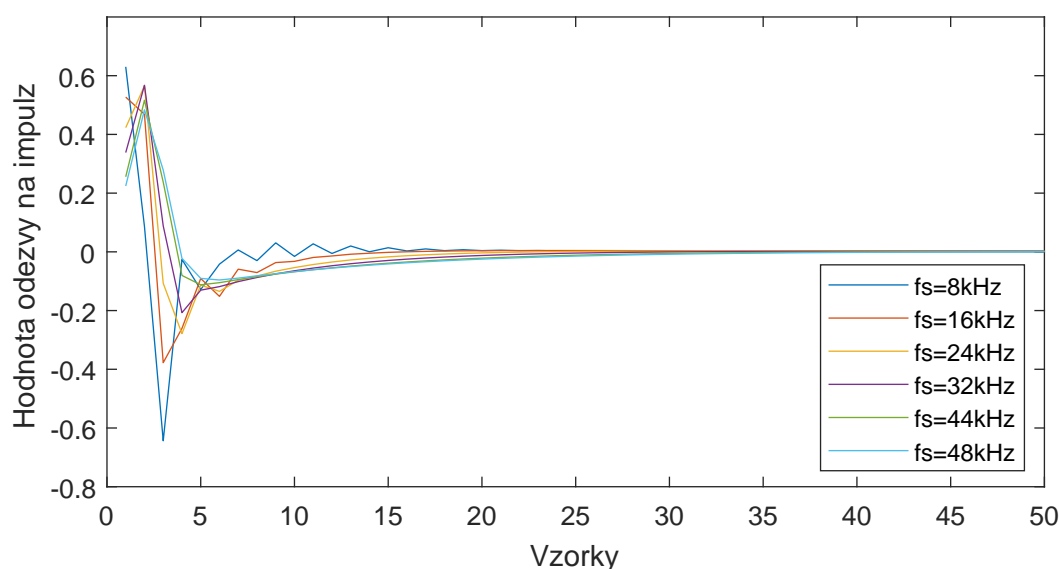
### 3.1.4 Měření při nadměrných hlasitostech

Některá měření jsou náročná na okolní prostředí. Měření probíhá od nejnižší možné úrovně hladiny akustického tlaku okolo 20 dB(A) po přibližně hladinu 110 dB(A) uvnitř komory. Pro omezený prostor okolo komory a délku datových kabelů je pracovní počítač přímo před komorou a výška hlavy obsluhy pracoviště je přibližně v akustické ose reproduktoru ve vzdálenosti přibližně 1 m. Mezi reproduktorem a uchem jsou pouze přivřené dveře měřicí komory.

U nízkých hladin akustického tlaku mikrofon snímá i stisk klávesy na klávesnici obsluhy sedící u počítače či hluk okolních zařízení. U vysokých hladin akustického tlaku s ohledem na sběr určitého počtu vzorků vypočítaných hodnot je obsluha vystavena hlukové zátěži, a je na zvážení, zda daný operátor při měření použije příslušnou ochranu sluchu. Více o problematice hygienických předpisů je uvedeno v [2].

## 3.2 Návrh a ověření funkčnosti A filtru

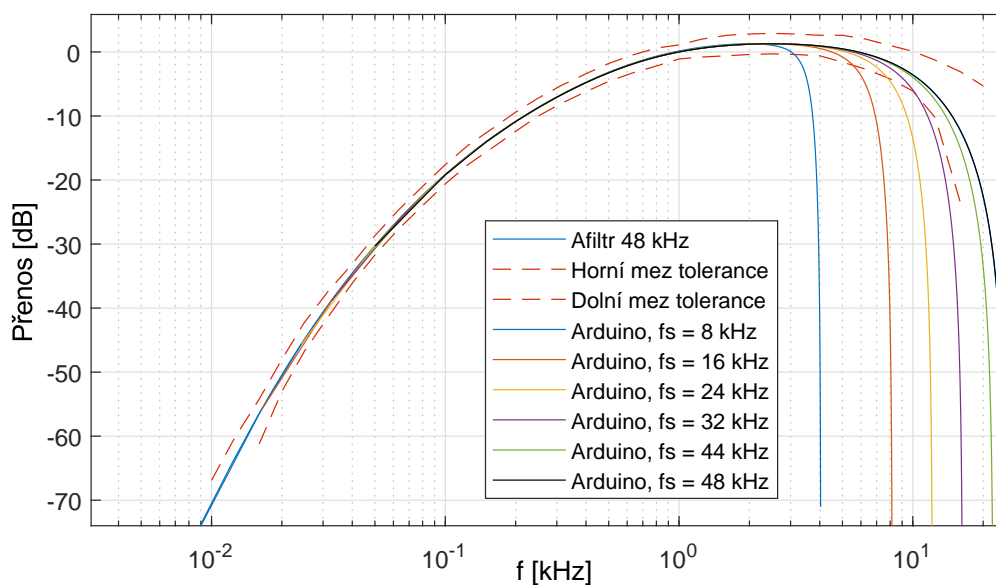
Ověření správnosti návrhu A filtru byl provedeno pomocí kontroleru Arduino. Pro dosažení dostatečné přesnosti byla zvolena délka počítaného signálu 3 000 vzorků a kontroler spočítal odezvu na diskretní jednotkový impuls. Data byla odeslána po UART a zpracována v Matlabu. Průběhy impulzových odezev v jednom grafu jsou uvedeny na obrázku 3.1.



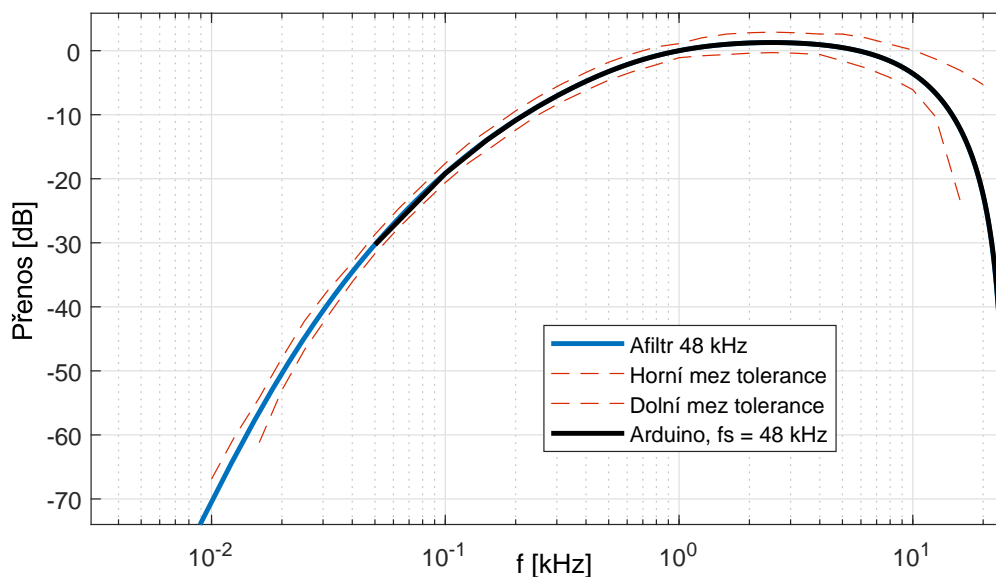
Obrázek 3.1: Impulzové odezvy A filtru pro  $f_s=8,1-50$  kHz, výpočet v Arduino

Přenosová funkce je Fourierovou transformací impulzní odezvy. Průběhy vypočítaných přenosových funkcí byly vyneseny do jednoho grafu na obrázku 3.2, kde červeně čárkované

jsou horní a dolní mez tolerance a detailně rozdíl mezi výpočtem v MATLAB a v Arduino na obrázku 3.3, vliv zaokrouhlovací chyby je patrný na kmitočtech pod 100 Hz.



**Obrázek 3.2:** Přenosové funkce A filtru pro  $f_s=8,1-50$  kHz, srovnání s normou [8]



**Obrázek 3.3:** Přenosové funkce A filtru pro  $f_s=48$  kHz, srovnání výpočtu v Matlabu a v Arduino s normou [8]

Na nízkých kmitočtech návrhu vyhovují všechny vzorkovací kmitočty, celé A křivce vyhovují jen vzorkovací kmitočty 44,1 a 48 kHz, resp. pro danou úlohu skutečné hodnoty

---

44,111 a 50,025 kHz, pro které byly koeficienty navrženy, viz kapitola měření skutečné vzorkovací frekvence 3.6.

### 3.3 Schéma zapojení

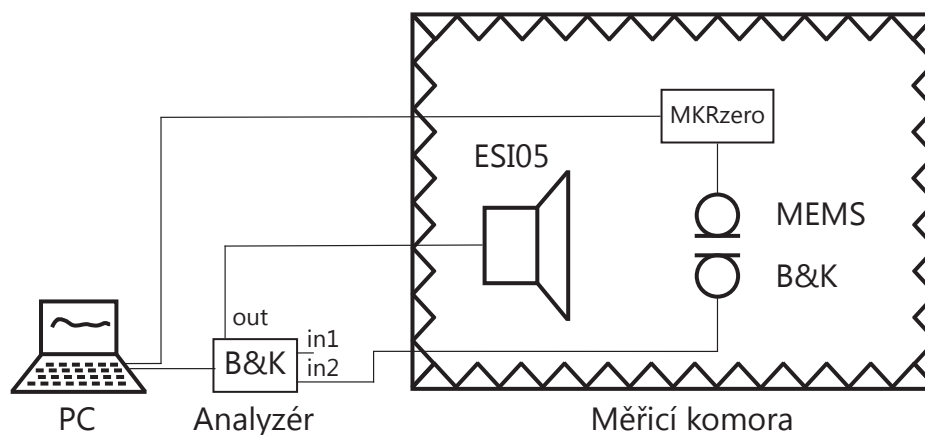
Jednotlivá měření jsou podrobně popsána v následujících podkapitolách a vychází ze zapojení měřicích přístrojů, uvedených na obrázcích 3.4, 3.5 a 3.6.

Jedná se o měřicí řetězec PC → D/A → Reproduktor → Mikrofon/y → A/D → PC.

#### 3.3.1 Schéma zapojení přístrojů, varianta 1

V měřicí komoře je umístěn zdroj zvuku a dva mikrofony, měřicí a měřený. Zdroj zvuku, konkrétně studiový reproduktor, je připojen k výstupu analyzáru, na vstup 2 je připojen referenční mikrofon. Měřený mikrofon posílá data po sběrnici I<sup>2</sup>S do kontroleru MKRZero a dále do PC. Vstup 1 na analyzátoru je nezapojený.

V PC jsou spuštěny 2 programy, měřicí RT Pro Photon+, který generuje měřicí signály a Arduino IDE, který přes okno "Serial Monitor" zobrazuje data, poslaná po UART kontrolerem, viz obrázek 3.4.



**Obrázek 3.4:** Schéma zapojení přístrojů při měření v akustické komoře, Var. 1

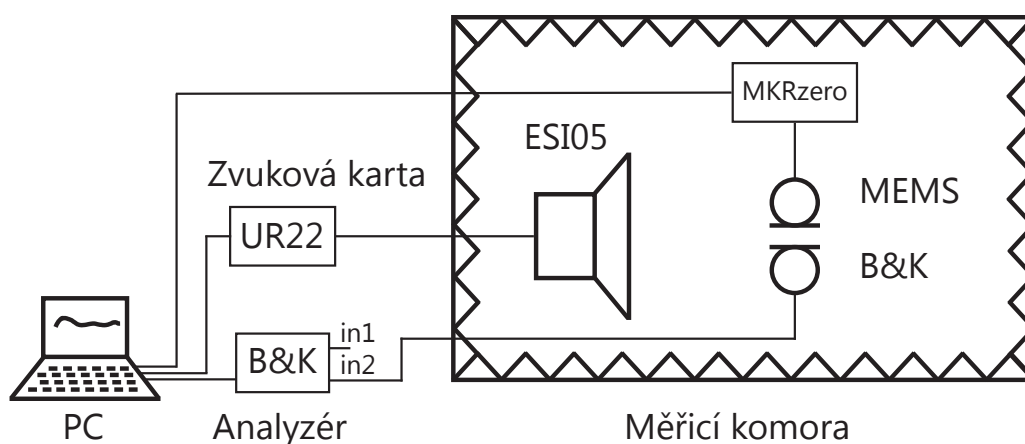
Toto zapojení přístrojů bylo použito k vývoji ovládacího kódu, měření převodní konstanty, kalibraci, měření frekvenční a přenosové charakteristiky hlukového senzoru při buzení sinus a různým šumem a dále k implementaci A filtru.

V měřicí komoře jsou mikrofony umístěny kolmo na akustickou osu ve vzdálenosti přibližně 30 cm od reproduktoru tak, aby mezera mezi hlavou mikrofону a DPS měřeného mikrofónu  $d < \lambda/4$ , která při 24 kHz činí přibližně 3,54 mm. Vhodnou vzdáleností jsou například 2 mm.

Zapojení s tlakovým 1/4"mikrofonem B&K 4944-B takto měřilo hladiny správně, při použití 1/2"mikrofonu B&K 4189 se však ukázal znatelný vliv rozptylu na těle mikrofonu. Mikrofon je v provedení do volného pole a rozmístění mikrofonů v komoře muselo být upraveno tak, aby tento mikrofon byl rovnoběžně s akustickou osou, opět co možná nejbližže měřenému mikrofonu [32].

### 3.3.2 Schéma zapojení přístrojů, varianta 2

Oproti předchozímu zapojení se liší v přidání profesionální zvukové karty Steinberg UR22, viz obrázek 3.5.



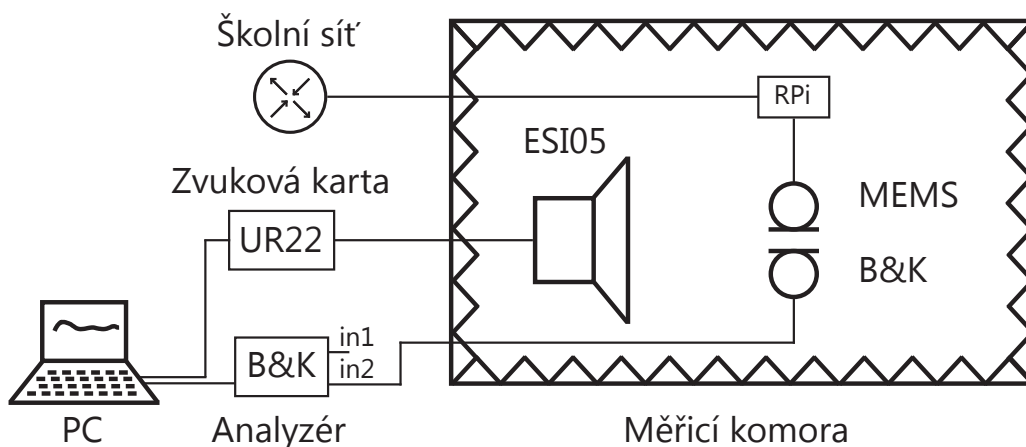
Obrázek 3.5: Schéma zapojení přístrojů při měření v akustické komoře, Var. 2

Toto zapojení bylo použito při měření frekvenční charakteristiky MEMS mikrofonu pomocí MLS signálu, kdy byla data posílána do PC po UART. Řešení nebylo příliš užitečné, data se odesílala velmi pomalu.

### 3.3.3 Schéma zapojení přístrojů, varianta 3

Toto zapojení, viz obrázek 3.6, bylo použito při měření frekvenční charakteristiky MEMS mikrofonu pomocí signálu typu MLS a při použití jednodeskového počítače Raspberry, připojeného do školní sítě a ovládaného vzdáleně pomocí PuTTY konzole.

Problémy s pomalým odesíláním dat řešila výměna kontroleru MKRZero za dospělejší variantu v podobě jednodeskového mikropočítače Raspberry, který je ve velkém používán pro Internet věcí, IoT. Počítač pracuje na zjednodušené variantě operačního systému Linux a byl připojen pomocí Ethernet kabelu do školní sítě, ovládání probíhalo pomocí PuTTY terminálu, který byl spuštěný v ovládacím PC a data byla ukládána přímo do **root** složky Raspberry. Po skončení měření byl k Raspberry připojen HDMI konektorem



**Obrázek 3.6:** Schéma zapojení přístrojů při měření v akustické komoře, Var. 3

monitor a dále myš a klávesnice, změřená data ve formátu .wav byla stažena na přenosné USB úložiště a dále zpracována v Matlabu.

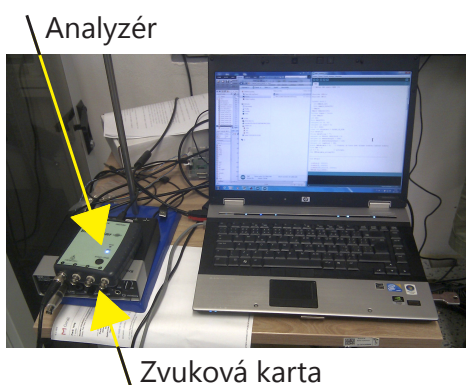
Na webovém portálu Adafruit.com [33] je uveden návod k nastavení Raspberry pro možnost nahrávání zvuku po I<sup>2</sup>S sběrnici.

Výchozí tvar terminálového příkazu, použitý k ovládní nahrávání zvuku digitálním mikrofonom, je uveden o řádek níže.

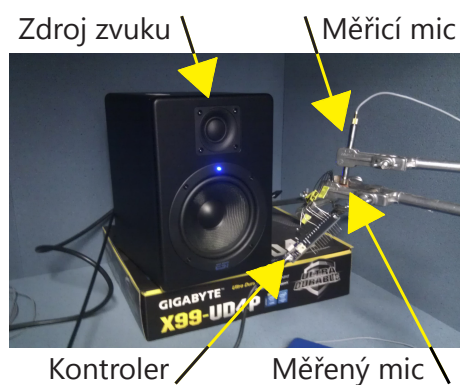
```
arecord -D plughw:1 -c1 -r 48000 -f S32_LE -t wav -V mono -v file.wav
```

Číslo **48000** je vzorkovací frekvence, **S32\_LE** označuje typ číselné reprezentace, tedy 32 bitů Little Endian, **mono** se uvádí pro měření jedním mikrofonom, řetězec **file** se přepíše na název souboru a **.wav** je typ souboru. Zastavení a uložení nahrávaného souboru bylo provedeno klávesovou zkratkou **Ctrl+C**.

Fotky z měřicího pracoviště jsou uvedeny na obrázcích 3.7a a 3.7b.



(a) Uspořádání laboratorního měření, fotografie PC a předzesilovač



(b) Uspořádání laboratorního měření MEMS mikrofonomu v komoře

**Obrázek 3.7:** Fotografie z měřicího pracoviště, FD ČVUT v Praze

## 3.4 Měřicí vybavení

Pracoviště sestává se z následujících prvků:

- Měřicí software Brüel&Kjær RTpro, kapitola 3.4.1
- Mikrofonní analyzátor Brüel&Kjær Photon+, kapitola 3.4.2
- Zvuková karta Steinberg UR22, kapitola 3.4.3
- Studiový reproduktor ESI 05, kapitola 3.4.4
- Měřicí mikrofon Brüel&Kjær typ 4944-B, kapitola 3.4.5
- Měřicí mikrofon Brüel&Kjær typ 4189, kapitola 3.4.6
- Měřený digitální MEMS mikrofon ICS-43432, kapitola 3.4.7
- Stíněná komora ETS Lindgren, kapitola 3.4.8

### 3.4.1 Měřicí software

K měření a záznamu dat byl použit software Brüel&Kjær RT Pro Photon ve verzi 7.1, komunikující s dvoukanálovým analyzátozem, viz podkapitola 3.4.2.

Pro akustickou analýzu a pro daná měření platí následující nastavení: V záložce Measurement se nastaví váhování A, Trace Freq. Weighting. V podokně Channel v příslušném kanále MaxVolts nejnižší možnou citlivost, při které nedochází k přebuzení, hodnota v kolonce mv/EU pro B&K4944-B byla 0.853 mV/Pa a pro B&K4189 56,2 mV/Pa. V kolonce "Coupling" volba CCLD.

Měřicí signály se nastavují v záložce "Waveform Source". Použité byly dva signály, a to Sinus a Pink Noise. Kmitočtový rozsah harmonického signálu byl shora omezen na 23,5 kHz, dostatečný odstup signálu od šumu na velmi nízkých kmitočtech pod cca 40 Hz nebyl pro schopnosti reproduktoru možný vlivem dominantních vyšších lichých harmonických složek, zejména třetí.

### 3.4.2 Analyzátor B&K Photon+

Jedná se o A/D a D/A převodník se dvěma vstupy a jedním výstupem s konektory typu BNC, uvedený na obrázku 3.8a na straně 30, schopný vzorkovat signál až do kmitočtu  $f_s=192$  kHz. Konkrétní použitý přístroj měl sériové číslo 4218418 a kalibrace proběhla dne 31.3.2014.

---

### 3.4.3 Zvuková karta Steinberg UR22

Pro potřebu měření pomocí vlastních referenčních signálů byla jako výstupní zvukové zařízení použita zvuková karta UR22 od společnosti Steinberg, viz obrázek 3.7a na straně 28.

Jedná se o profesionální dvoukanálové měřicí zařízení, zpracovávající signál s vzorkovací frekvencí  $f_s = 192$  kHz ve 24 bitech s možností regulace úrovně vstupních a výstupních signálů.

### 3.4.4 Referenční zdroj zvuku

Jako referenční zdroj zvuku byl použit studiový near-field monitor ESI 05, uvedený na obrázku 3.8b.



(a) Detail měřicího analyzátoru



(b) Referenční reproduktor ESI aktiv 05

**Obrázek 3.8:** Měřicí vybavení, analyzátor a reproduktor [36][34]

Jedná se o aktivní dvoupásmový reproduktor s plochou frekvenční charakteristikou 50 Hz - 20 kHz, na obrázku 3.9 na straně 31 je uvedena frekvenční charakteristika obdobného staršího modelu nEar05, ze kterého použitý referenční reproduktor vychází. Barevné podání je oproti webu upraveno pro tisk. Cross-over kmitočet se nachází na 2,5 kHz. a  $L_p = 88$  dB  $\pm$  3dB.

Orientace reproduktoru během měření musí být dle datasheetu horizontální [34].

### 3.4.5 Měřicí mikrofون B&K 4944-B

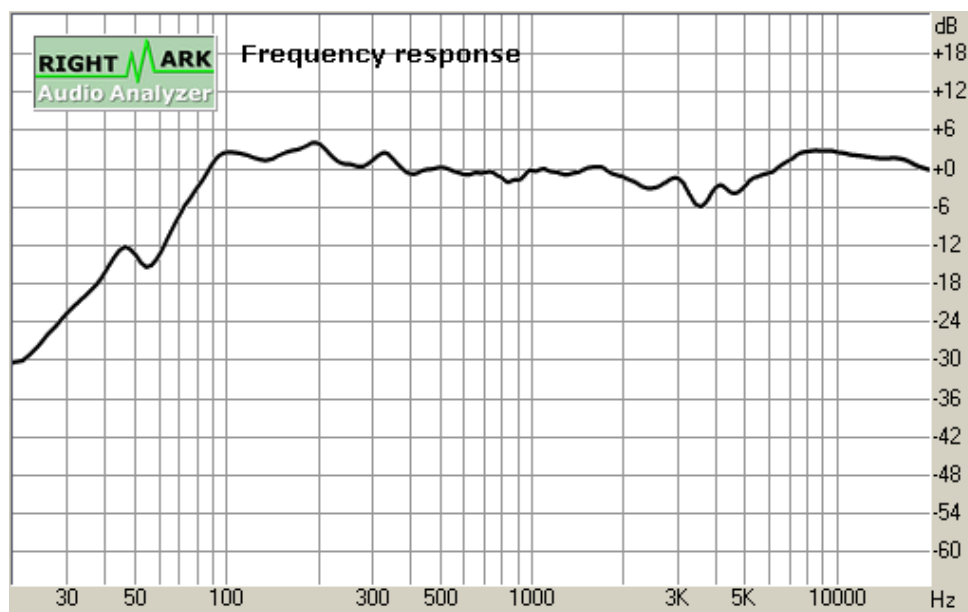
K přesnému měření hladiny akustického tlaku byl použit měřicí mikrofون od společnosti Brüel&Kjaer, typ 4944-B se sériovým číslem 2921808, viz obrázek 3.10a na straně 31 [35].



Jedná se o 1/4", předpolarizovaný, kapacitní, tlakový mikrofon s citlivostí -61,4 dB při 1 V/Pa / 0,853 mV/Pa a frekvenčním rozsahem od 16 Hz do 70 kHz a s dynamickým rozsahem 48 dB(A) - 169 dB. Je vhodný pro měření vysokých hladin akustického tlaku a vysokých frekvencí, průběh frekvenční charakteristiky mikrofonu z kalibračních dat výrobce je uveden na obrázku 3.11 na straně 32 [35].

Spodní limitní kmitočet při poklesu citlivosti o 3 dB se nachází na frekvenci přibližně 8 Hz. Maximální hladina akustického tlaku, kterou je schopen bez poškození změřit, je 182 dB. Horní hranice akustického tlaku, kde je harmonické zkreslení rovné 3 %, je větší než 169 dB. V datasheetu jsou uvedeny informace o napájení, citlivosti na vibrace a magnetické pole, a další informace, například teplotní rozsahy, rozměry a typ připojovacího konektoru [35].

Výrobce dodává mikrofon společně s kalibračními daty a korekcemi do volného pole, kde kalibrace probíhá pomocí pistonfonu typ 4228 při 250 Hz [35].



Obrázek 3.9: Frekvenční odezva reproduktoru nEar05



(a) Měřicí mikrofon B&K 4944-B [35]



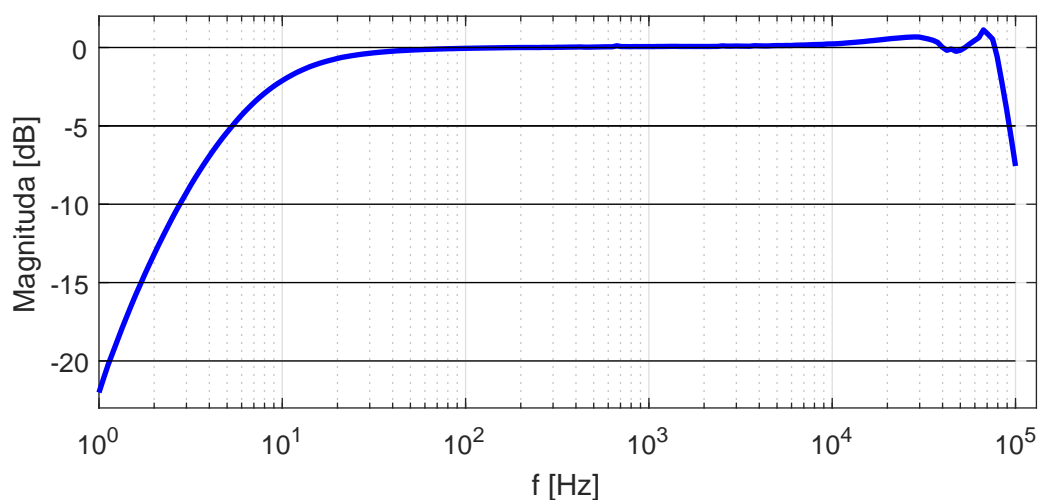
(b) Měřicí mikrofon B&K 4189 [18]

Obrázek 3.10: Měřicí mikrofony B&K 4944-B a B&K 4189 [35][34]

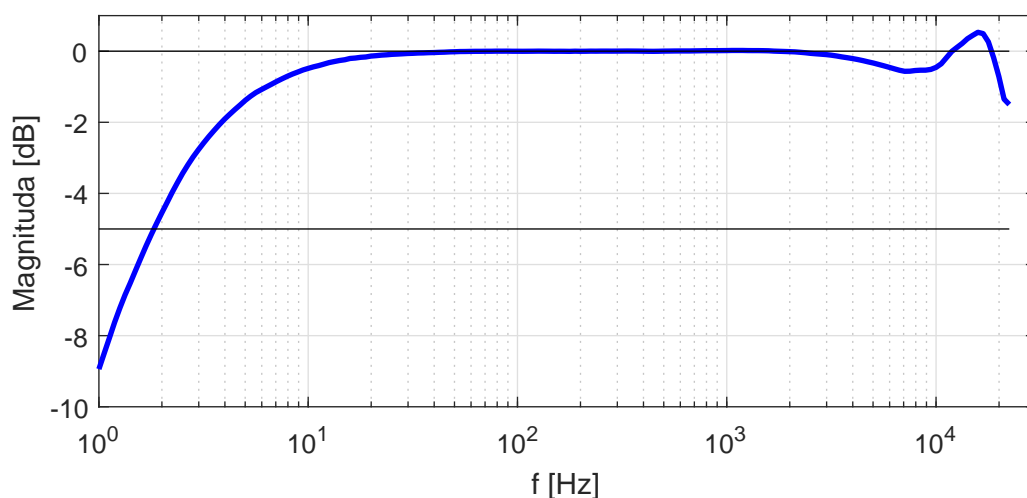
### 3.4.6 Měřicí mikrofon B&K 4189

Pro potřeby měření na nižších hladinách akustických tlaků byl zvolen 1/2" předpolarizovaný mikrofon B&K 4189 do volného pole s citlivostí -25,01 dB/Pa / 56,18 mV/Pa s kmitočtovým rozsahem 6,3 Hz - 20 kHz a s dynamickým rozsahem 14,6 - 146 dB, doplněný předzesilovačem B&K 2671. Mikrofonní hlava je uvedena na obrázku 3.10b [37].

Graf frekvenční charakteristiky mikrofonu se sériovým číslem 2985598 na obrázku 3.12 vychází z kalibračních dat výrobce.



Obrázek 3.11: Kalibrační křivka měřicího mikrofonu B&K 4944-B, s.n.2921808

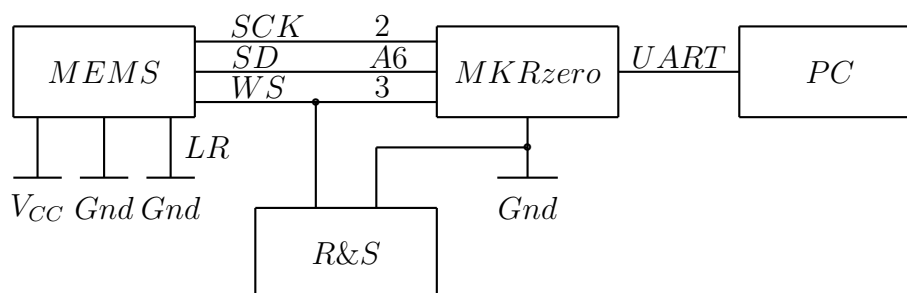


Obrázek 3.12: Kalibrační křivka měřicího mikrofonu B&K 4189, s.n.2985598

### 3.4.7 Digitální MEMS mikrofon

Vlastnosti pro senzorickou síť zvoleného digitálního mikrofonu ICS-43432 jsou rozebrány v kapitole 2.8.2.

Na obrázku 3.13 je uvedeno blokové schéma zapojení digitálního mikrofonu **MEMS**, kde je navíc připojen osciloskop **R&S** pro měření vzorkovací periody.

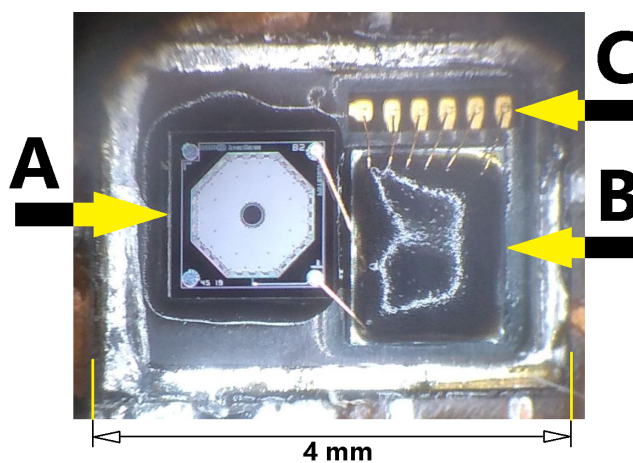


**Obrázek 3.13:** Schéma zapojení pro měření vzorkovací periody MEMS mikrofonu

**LR** slouží k volbě levého nebo pravého kanálu mikrofonu v případě stereofonního snímání kde pomocí **WS** kontroler vybírá mikrofon, ze kterého čte aktuální vzorek, viz průběh signálu na obrázku 3.16. **SCK** je řídicí hodinový signál mikrofonu, po vodiči **SD** jsou odesílána 24bitová data do kontroleru, kde MSB je odeslán jako první.

**UART** označuje sériovou linku, která slouží pro komunikaci s PC, v daném provedení je řešena pomocí sběrnice USB.

Na obrázku 3.14 je k vidění samotný mikrofon ve tvaru osmiúhelníku, označený písmenem A.



**Obrázek 3.14:** Detail vnitřní struktury, zvětšení 10x

**Obrázek 3.15:** Struktura MEMS mikrofonu, reálná velikost a detail, pohled shora

---

Černý obdélník, označený písmenem B, skrývá ASIC, neboli je obvody zpracování signálu. Žlutá šipka C ukazuje na kontaktovací plošky uvnitř mikrofonu.

Fotografie laboratorního přípravku pořízena pomocí mobilního telefonu a laboratorní lupy s vlastním osvětlením při 10x zvětšení.

Měření převodních konstant, frekvenčních a převodních charakteristik hlukového senzoru jsou uvedena v dalších kapitolách níže.

### 3.4.8 Měřicí komora

Měřicí komora je od společnosti ETS-Lindgren. Jedná se o stíněnou komoru, primárně určenou pro pohlcování elektromagnetických vln, která navíc tlumí i mechanické vlnění, pro slyšitelné kmitočtové pásmo vykazuje útlum hladin akustického tlaku  $\Delta L_{pVZ} = 21,5$  dB(A).

Toto měření je rozebráno v kapitole 3.5 "Měření útlumu měřicí komory". Použitá komora byla typu ETS 5230-36 se sériovým číslem 5616, vyrobená v roce 2013, umístěná v laboratoři na Fakultě dopravní ČVUT v Praze v Konviktské ulici 20.

## 3.5 Měření útlumu měřicí komory

Toto měření vychází ze zapojení "Varianta 1", kde pro samotné měření se využije pouze PC, analyzátor, komora a 1/2" mikrofon B&K 4189 z důvodu nízkého vlastního šumu. Tato vlastnost umožňuje měřit výrazně nižší hladiny akustických tlaků než v případě mikrofonu B&K 4944B, který je naopak stavěný na vysoké hladiny akustického tlaku.

Cílem tohoto měření bylo zjištění hladin akustického tlaku  $L_{pO}$ (A) při otevřených a  $L_{pZ}$ (A) při uzavřených dveřích, kdy se v obou případech měřený mikrofon nacházel uvnitř měřicí komory.

Dále proběhlo měření hladiny akustického tlaku v okolí měřicí komory  $L_{pV}$ (A). Naměřené hodnoty a jejich rozdíl jsou uvedeny v tabulce 3.4.

**Tabulka 3.4:** Útlum měřicí komory

Měření	$L_p(A)$ [dB]
$L_{pO}$	35
$L_{pZ}$	21
$L_{pV}$	42,5
$\Delta L_{pOZ}$	14
$\Delta L_{pVZ}$	21,5

Dveře komory vykazují útlum  $\Delta L_{pOZ} = 14 \text{ dB(A)}$  a rozdíl hladin akustického tlaku vně a uvnitř komory je  $\Delta L_{pVZ} = 21,5 \text{ dB(A)}$ . Tato hodnota se může mírně lišit v závislosti na dověření dveří komory, které se nesmí úplně zavřít kvůli potřebným datovým a napájecím kabelům pro měřicí přístroje uvnitř komory, dále na denní době, množství zapnutých přístrojů v blízkosti měřicího pracoviště a počtu pracujících osob v laboratoři.

### 3.6 Měření reálné vzorkovací frekvence

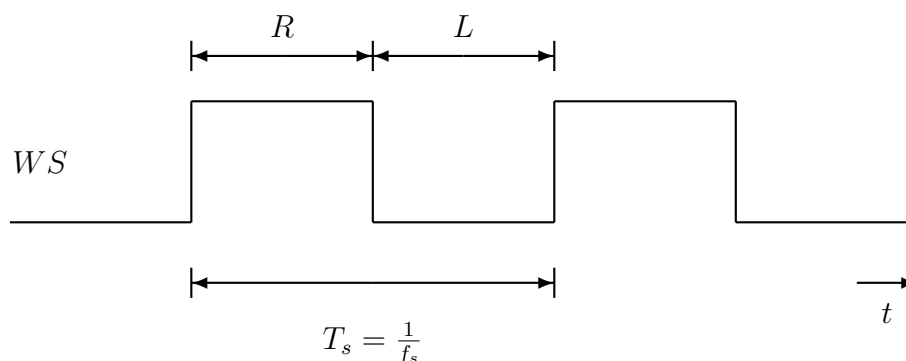
Pro pozdější práci se signály bylo potřeba určit, zda použitý kontroler Arduino MKRzero poskytuje přesný hodinový signál, případně jak se liší od požadovaného.

Použitý kód pro získání dat z mikrofonu je příkladem, implementovaný přímo ve vývojovém prostředí, a to "InputSerialPlotter". Schéma zapojení mikrofonu je uvedeno na obrázku 3.13 a je upraveno a převzato z webu [www.arduino.cc](http://www.arduino.cc) [31].

Pin LR slouží k volbě kanálů při stereofonním snímání dvěma mikrofony. Je-li pin uzemněn, je použit signál pouze z levého kanálu, je-li na tento pin přivedena úroveň log 1, která dle katalogového listu odpovídá hodnotě napětí mezi 1.62 a 3.63 V, výstup mikrofonu je do pravého kanálu [18]. Dané zapojení vychází ze zapojení jednoho mikrofonu, tedy všechna následující měření budou v režimu **mono** a pin je uzemněn, tedy je brán jako **levý**.

Znalost vzorkovací periody, tedy doby, za jakou mikrofon po sběrnici odešle všechny bity snímaného vzorku hladiny akustického tlaku  $L_p$ , je nezbytná pro správný návrh koeficientů A filtru, pro výpočty spekter i maximální teoretickou frekvenci, kterou je mikrofon schopen zpracovat a odeslat v digitální podobě do kontroleru.

Měření probíhalo odečtením reálné délky vzorkovací periody na pinu **WS**, kde teoretický průběh signálu je uveden na obrázku 3.16.



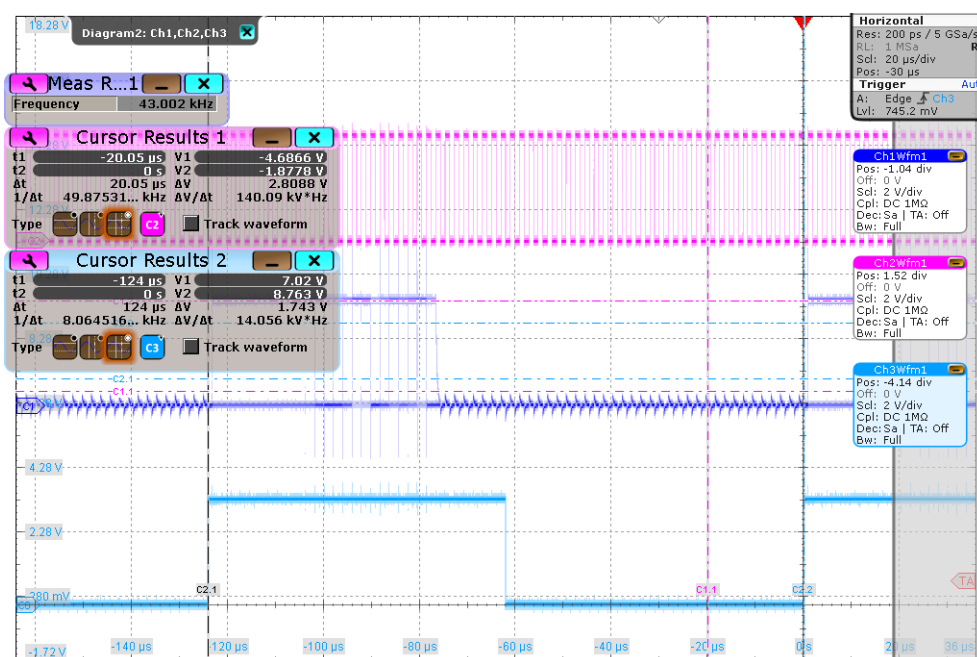
Obrázek 3.16: Vzorkovací perioda v průběhu signálu WS

Signál WS má za úkol střídavě vybírat vzorky z obou kanálů, pomocí vícekanálového osciloskopu R&S RTO 1044. Jedná se o digitální osciloskop se vzorkovacím kmitočtem 20 GSa/s, schopným vzorkovat kmitočty až do hodnoty 4 GHz.

Pro přehlednost jsou propojení jednotlivých kontaktů měřeného mikrofonu a GPIO piny použitého Arduina vyznačeny na obrázku 3.13.

Proměřeny byly vzorkovací kmitočty, viz tabulka 3.5, kde první sloupec uvádí nastavené kmitočty a v posledním sloupci jsou uvedeny reálně změřené kmitočty, generované Arduinem.

Na obrázku 3.17 je snímek z osciloskopu s reálnou vzorkovací frekvencí  $f_s = 8064,5$  Hz pro teoreticky nastavený kmitočtem  $f_s = 8,00$  kHz.

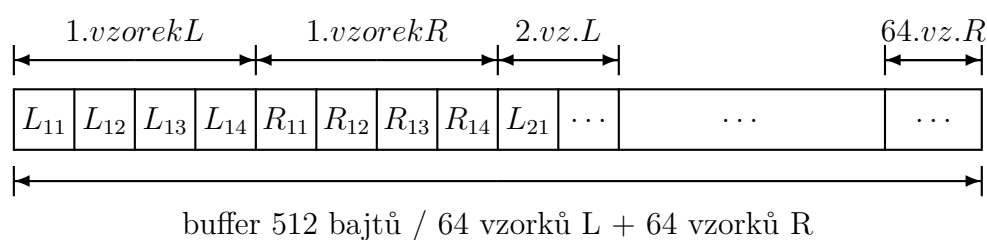


Obrázek 3.17: Snímek osciloskopu s reálně změřenou vzorkovací frekvencí

Barvy jsou pro potřeby tisku záměrně invertované, na přiloženém CD ve složce "Měření/Vzorkovací\_frekvence\_MEMS\_I2S" jsou uvedeny snímky obrazovky osciloskopu změřených kmitočtů v původní podobě.

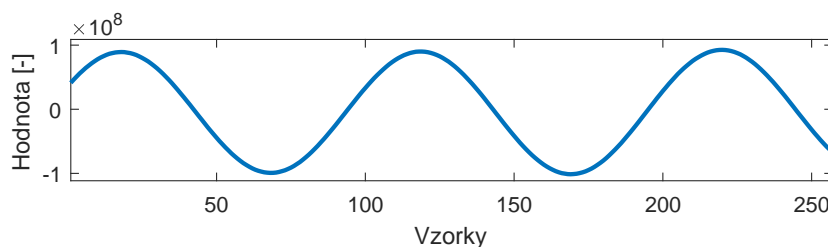
### 3.7 Výčet dat z mikrofону

Zvolený procesor obsahuje buffer o délce 512 B, do kterého lze uložit 64 vzorků z levého a 64 vzorků z pravého kanálu, každý o délce 32 bit. Mikrofon je zapojen jako levý kanál. Princip uspořádání dat v bufferu je vyznačen na obrázku 3.18. Obslužná část kódu je uvedena v příloze A.2, kde 'samples.sample\_bytes' je pole výstupních dat<sup>16</sup>. Ukládání dat na paměťovou kartu bylo nespolehlivé a data byla nakonec vyčítána najednou po UART.



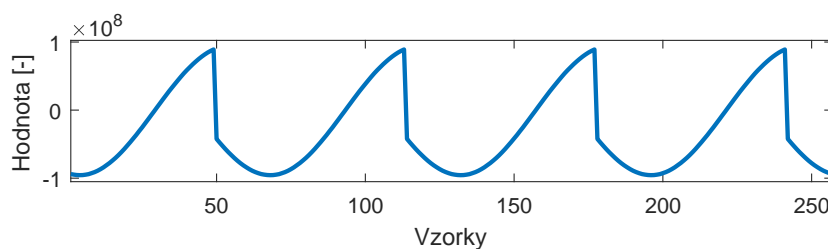
**Obrázek 3.18:** Pořadí vzorků ve vstupním bufferu kontroleru

Data ze správně vyčteného bufferu odpovídají vstupnímu signálu, viz obrázek 3.19.



**Obrázek 3.19:** Ukázka správného výčtu dat z bufferu, kmitočet 80 Hz

Při nesprávném výčtu dat může dojít k nespojitostem, které mají za následek nepřesný výpočet RMS. Příklad je uveden na obrázku 3.20,



**Obrázek 3.20:** Ukázka špatného výčtu dat z bufferu, kmitočet 80 Hz

<sup>16</sup>Příkaz MEMCPY pro kopírování dat z bufferu výrazně rychlejší výčet dat do pole nezajistil.

---

kde v obou případech byl vstupním signálem 80Hz sinus při  $L_p=70$  dB(A). Zapojení úlohy odpovídalo variantě 1 při použití měřicího mikrofону B&K 4944-B, vzorkovací kmitočet  $f_{sM}=8\ 064$  Hz.

Změřená data a obrázky průběhů kmitočtů 50-100 Hz jsou uložena na přiloženém nosiči ve složce "Měření/Průběhy\_špatný\_buffer" a "Měření/Průběhy\_správný\_buffer".

## 3.8 Měření převodní konstanty digitálního mikrofону

U mikrofónů s analogovým výstupem odpovídá úrovni akustického tlaku velikost napětí, digitální mikrofóny poskytují jako odezvu na hladinu akustického tlaku číselnou hodnotu. Ta je v daném případě 4bajtová a její znalost je nezbytná pro správnou činnost hlukového senzoru při výpočtu RMS.

Kalibrace je proces nastavení mikrofónu tak, aby měřené hodnoty akustického tlaku odpovídaly správným hodnotám.

Vzhledem k provedení a velikosti mikrofónu byla kalibrační metodika odlišná od kalibrace standardních mikrofónů a zapojení úlohy odpovídalo variantě 1, kde měřený mikrofón posílal úroveň hladiny akustického tlaku. Předpokládá se časová stálost kalibrované hodnoty referenčního mikrofónu a tedy i odpovídající přesnost dalších měření. Vzorkovací kmitočet pro prvotní kalibraci byl  $f_s = 8$  kHz.

Standardní referencí je kalibrační signál, viz kapitola 2.7.1. Kalibrační konstanta  $k = 90262599$  vychází ze vztahu (2.17).

Prvotní výpočet konstanty proběhl experimentálně, kdy se nastavila hodnota konstanty a změřila SPL. Ze získaných hodnot dle rovnice

$$k_2 = k_1 \times \frac{10^{\frac{L_{p1}}{20}}}{10^{\frac{L_{p2}}{20}}} \quad (3.21)$$

vyšla správná hodnota kalibrační konstanty, která poskytovala přesné výsledky.

### 3.8.1 Kalibrace při dílčích měřeních

Kalibrace je nezbytná při každé modifikaci oblužného kódu, například A filtru nebo okna.

Použije se kalibrační signál, viz kapitola 2.7.1 a konstanta se upravuje experimentálně tak, aby se výsledky mezi měřeným a referenčním mikrofónem shodovaly na 1 desetinné místo, obdobně jako při kalibraci zvukoměrů. Pro exaktní výpočet hodnoty se využije vzorec (3.21).



## 3.9 Měření charakteristik MEMS mikrofonu a hlukového senzoru

Pro měření převodní charakteristiky mikrofonu bylo použito několik měřicích signálů, signál typu sekvence maximální délky MLS, jehož vlastnosti jsou uvedeny v kapitole 2.7.2 na straně 15, dále harmonický signál a růžový šum.

Dílčí podkapitoly níže pojednávají o měření frekvenční charakteristiky MEMS mikrofonu pomocí MLS a vlastností hlukového senzoru pomocí harmonického signálu a růžového šumu, úprav kódu pomocí váhovacího okna a úpravou křivky A tak, aby rozdíl referenční hodnoty  $L_{pR}$  a změřené hodnoty  $L_{pM}$  byl co nejmenší.

### 3.9.1 Měření přenosové charakteristiky mikrofonu pomocí MLS

Schéma zapojení odpovídalo variantě 3, viz podkapitola 3.6. Použit byl pseudonáhodný signál MLS o délce 4 period, kde první je pro ustálení přechodových dějů a další tři pro případ pozdějšího průměrování. V dalším zpracování se pracuje přibližně s druhou periodou měřicího signálu. Doba trvání jedné periody MLS signálu byla větší nebo rovna 1 s. Po zapojení úlohy se měřicí řetězec kalibroval pomocí kalibračního signálu, definovaného v kapitole 2.7.1.

**Tabulka 3.5:** Návrh MLS pro různé vzorkovací kmitočty, vzorkovací frekvence analyzátoru a Arduina

fs [kHz]	Řád MLS	$L_{MLS}$	$f_{sBK}$ [kHz]	$f_{sZero}$
8	13	8191	8,192	8,064516
16	14	16383	16,384	16,30523
24	15	32767	32,768	24,22644
32	15	32767	32,768	32,60302
44,1	16	65535	48	44,11116
48	16	65535	48	50,02501

Měření proběhlo pro jednotlivé vzorkovací kmitočty, viz tabulka 3.5 s nastaveními kmitočtů pro MATLAB, který generuje MLS, Arduino, které generuje hodinový signál pro hlukový senzor a analyzátor, kterým je měřený referenční signál.

Při měření v asynchronním módu, kdy jsou přítomny rozdílné oscilátory, a tudíž i rozdílné vzorkovací kmitočty, se počet vzorků změřeného signálu liší od počtu vzorků v původním měřicím signále. V prvním kroku je nezbytné určit délku jedné periody. Předpokladem je délka měřicího signálu o délce alespoň 3 period, kde první slouží ke

stabilizaci systému a doznění všech přechodových dějů a nepoužije se. Ze zbývajících dvou a více period se délka jedné periody určí autokorelační funkcí.

Délka původního signálu MLS je [21]

$$T = \frac{L}{f_{s1}} \quad (3.22)$$

a délka rekonstruovaného signálu pomocí zařízení s  $f_{s2}$  je [21]

$$T = \frac{L + \Delta L}{f_{s2}}. \quad (3.23)$$

Z toho plynou spektra původního [21]

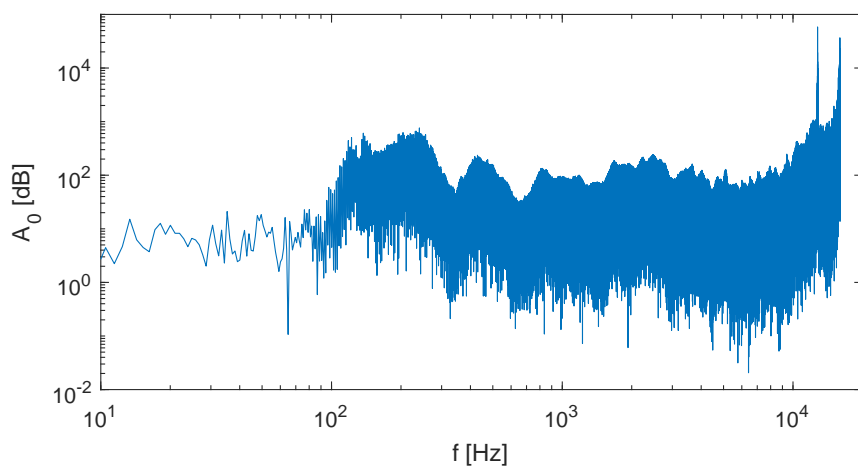
$$X[k] = \sum_{n=0}^{L-1} x[n] \cdot e^{-j \frac{2\pi kn}{L}} \quad (3.24)$$

a rekonstruovaného signálu [21]

$$Y[k] = \sum_{n=0}^{L+\Delta L-1} y[n] \cdot e^{-j \frac{2\pi kn}{L+\Delta L}}. \quad (3.25)$$

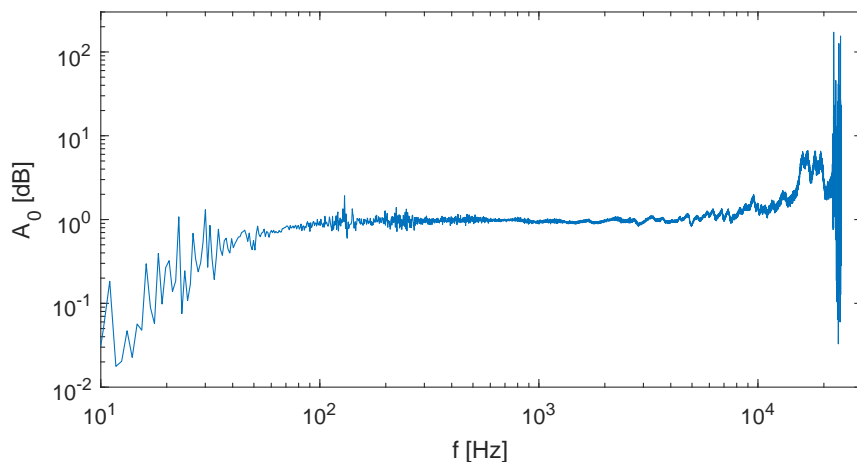
Spektrální vzdálenosti obou signálů odpovídají  $1/T$ . Pro další zpracování signálu jsou 2 možnosti, kratší signál doplnit o  $\Delta L$  nul nebo z delšího signálu odebrat  $\Delta L$  vzorků tak, aby byl výpočet spekter obou signálů ze stejného časového úseku [21].

Výsledné přenosové funkce, získané podílem spekter ze stejných časových úseků signálů MEMS a referenčního, jsou uvedeny na obrázcích 3.21 a 3.22.



**Obrázek 3.21:** Přenosová funkce MEMS mikrofону, MLS,  $f_s=32$  kHz

Měření proběhlo několik a žádné z nich vlivem nepřesností v synchronizaci i přes výše popsané korekce nevedlo k uspokojivým výsledkům.



**Obrázek 3.22:** Přenosová funkce MEMS mikrofonu, MLS,  $f_s=48$  kHz

Grafy jsou z důvodu ukládání do .wav souboru, který škáluje zvukový signál do rozsahu hodnot  $\langle -1;1 \rangle$  a ztrácí se tím informace o úrovni signálu, normalizovány tak, aby na kmitočtu  $f = 1$  kHz byl přenos  $A = 0$  dB.

Průběh křivky pro 48 kHz vyšel přibližně dle očekávání srovnatelně s grafem v katalogovém listu výrobce, pro variantu 32 kHz však odchylky ve vzorkovacích frekvencích jednotlivých zařízení způsobily z důvodu výskytu 3 rozdílných vzorkovacích kmitočtů velké chyby a výsledná přenosová charakteristika je pro další měření nepoužitelná [21].

Test pomocí druhého reproduktoru Yamaha MSP5A vyvrátil možnou teorii o chybě na straně reproduktoru, výsledné průběhy byly prakticky totožně chybné jako při použití zdroje ESI 05 a od měření mikrofonu pomocí MLS bylo upuštěno.

Následný test s řádem MLS 17 a vzorkovacím kmitočtem analyzátoru  $f_s=96$  kHz zlepšení průběhu nepřinesl, pro další měření byly zvoleny měřicí signál s harmonickým průběhem a růžový šum.

---

### 3.9.2 Hlukový senzor a implementace ovládacího kódu

Blokové schéma senzoru je uvedeno na obrázku 3.23.



Obrázek 3.23: Blokové schéma hlukového senzoru

Sestává ze samotného MEMS mikrofону, ze kterého jsou čtena digitální data o akustickém tlaku. Následuje číslicové zpracování získaných dat pomocí váhovacího A filtru, skládajícího se z kaskády bikvadratických filtrů, jejichž koeficienty byly navrženy v MATLAB. Posledním blokem je výpočet RMS hladiny akustického tlaku, kde výstupem je v pravidelných časových intervalech informace o změřené hladině akustického tlaku  $L_p[\text{dB}](A)$ .

V následujících kapitolách, pojednávajících o jednotlivých měřeních, je již měřen hlukový senzor jako celek, tedy vliv jednotlivých bloků na jeho celkové chování.

Části kódu, důležité pro činnost hlukového senzoru, jsou uvedeny v příloze A a blokové schéma implementovaného kódu je uvedeno v příloze E.

Po připojení kontroleru ke zdroji napětí dojde k načtení knihoven, deklaraci všech konstant a proměnných. Následuje část **Setup**, kde se inicializuje mikrofón a sběrnice I<sup>2</sup>S a UART.

V hlavní smyčce **Loop** se načtou data z bufferu do pole o požadované délce  $N = fs/8$  pro změření 1/8 sekundy signálu, viz kód v příloze A.2. Vynulují se proměnné, použité v A filtru.

Následuje cyklus for o délce pole, kde každý z pole vyčtený vzorek je pronásobený oknem, kódy v příloze A.5 a A.6. Ve stejném cyklu vzorek projde strukturou A filtru, viz příloha A.3, a jako kvadrát je přičten do proměnné.

Po výčtu celého pole následuje rozhodovací cyklus, kde v případě součtu kvadrátů vzorků pole rovného nule kontroler odešle chybové hlášení, inicializuje sběrnici znovu, vynuluje proměnné a smyčka se uzavírá.

V případě, že je hodnota nenulová, kontroler spočítá hodnotu RMS, viz kód A.4, odešle ji po sériové lince a vynuluje proměnné. Tím je smyčka uzavřena a probíhá nové naplnění pole hodnotami z bufferu.

### 3.9.3 Frekvenční závislost přesnosti hlukového senzoru při buzení harmonickým signálem, detail nízké kmitočty

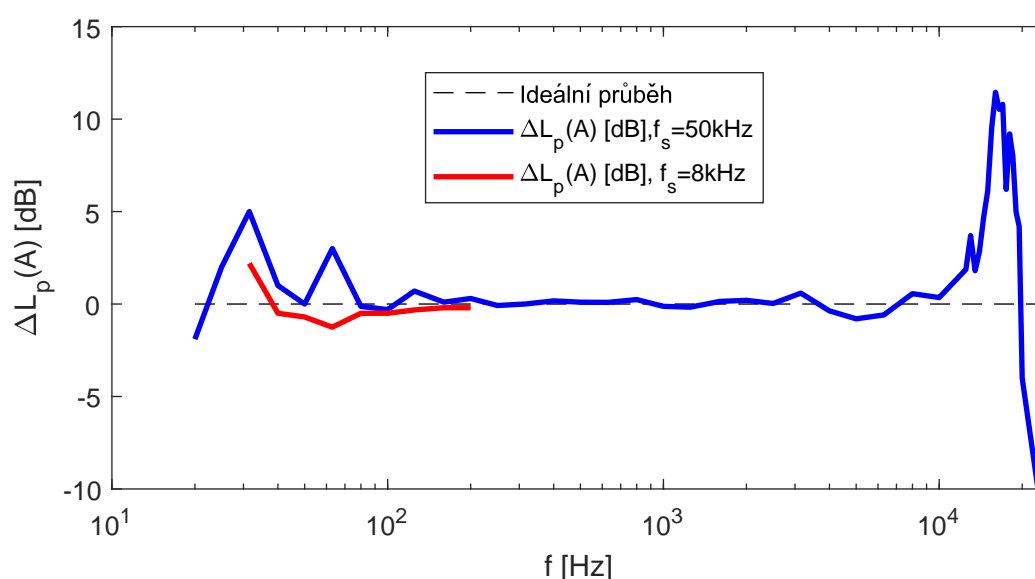
Měření pomocí MLS nepodávalo přesné výsledky o průběhu frekvenční charakteristiky mikrofonu vlivem možných chyb synchronizace vlivem tří různých vzorkovacích frekvencí, a to generování signálu v Matlabu, na výstupu ve zvukové kartě a na vstupu analyzátoru. Výsledné grafy byly zkrácené.

Byl zvolen měřicí signál sinus a zapojení bylo upraveno odebráním externí zvukové karty a připojením reproduktoru do výstupu analyzátoru, viz zapojení dle varianty 1 na obrázku 3.4 v podkapitole 3.3.1 na straně 26. Do kódu byl implementován Matlabem navržený A filtr.

K měření byl jako referenční použit 1/4" mikrofon B&K 4944-B a měřicí harmonický signál sinus, který v měřicím bodě vyvolal  $L_{pR}$  přibližně o 20 dB vyšší, než byl hluk pozadí  $L_{pN} = 50$  dB(A). Měřený rozsah kmitočtů byl od 20 Hz do 23,5 kHz, okolí rezonančního kmitočtu 16 kHz bylo proměřeno s krokem 500 Hz, viz tabulka D.14 v příloze D.1 na straně 67.

Vzorkovací frekvence u Arduina byla nastavena na  $f_s = 48$  kHz, tedy reálná vzorkovací frekvence  $f_s = 50,016$  kHz, konstanta mikrofonu  $k = 81,2 \times 10^6$ , délka zpracovávaného okna 1/8 vzorkovací frekvence, tedy 6 252 vzorků, odpovídající normě pro dobu měření 1/8 s (fast) [8].

Rozdíl mezi úrovní změřenou implementovaným hlukovým senzorem a referenčním mikrofonem ( $L_{pM} - L_{pR}$ ) je vynesena v obrázku 3.24 modře.



**Obrázek 3.24:** Přesnost hlukového senzoru v závislosti na frekvenci,  $f_s = 8064$  Hz a  $f_s = 50,016$  kHz

Na nízkých kmitočtech lze pozorovat nárůst rozdílu změřených hodnot vlivem menšího počtu period signálu, ze kterých se počítá  $L_{pM}$ , navíc poslední perioda signálu nemusí končit v nule.

Dalším měřením, snažícím se potlačit tento rozdíl, bylo prodloužení délky okna. Toto řešení však neumožňovalo pro velikost paměti zachovat stávající vzorkovací kmitočet a byl pro měření použit  $f_s = 8\,064$  Hz. Délka okna se prodloužila na  $3/4$  s, tedy 6 048 vzorků.

Tím se docílilo vyššího počtu průběhů signálu, ze kterého byla počítána  $L_{pM}$ . Zkoumaný rozsah kmitočtů byl 31,5-200 Hz.  $L_{pR}$  byl znovu 70 dB, pro nejnižší kmitočet byla hladina akustického tlaku o 10 dB nižší, viz tabulka D.15 v příloze D.2 na straně 67. Změřený rozdíl  $L_{pM}-L_{pR}$  byl vnesen do stejného obrázku 3.24 na straně 43 červeně, lze pozorovat nižší rozdíl hodnot v porovnání s modrou křivkou. Čárkovaně je uveden ideální rozdíl změřených hodnot. Přehledně je seznam nastavení přístrojů pro měření frekvenční charakteristiky uveden v tabulce 3.6.

Ze změřených dat, vnesených do obrázku 3.24, vyplývají problémy hlukového senzoru na nízkých a na vysokých kmitočtech. U nízkých kmitočtů bude pro výběr vzorků použito váhování oknem typu **cos** v čase a v případě vysokých kmitočtů se sníží vzorkovací frekvence tak, aby vnitřní antialiasingový filtr v mikrofону potlačil rezonanci mikrofónu.

**Tabulka 3.6:** Tabulka nastavení měření frekvenční charakteristiky hlukového senzoru

Parametr	$f_s = 50,016$ kHz	$f_s = 8,064$ kHz
Schéma zapojení	Varianta 1	Varianta 1
Referenční mikrofón	B&K 4944-B	B&K 4944-B
Okno	$1/8 f_s$	$3/4 f_s$
Typ okna	Obdélníkové	Obdélníkové
$L_{pR}$ [dB]	tabulka D.14	tabulka D.15
k	$81,2 \times 10^6$	$81,2 \times 10^6$
Rozsah kmitočtů	20 Hz – 23,5 kHz	31,5 – 200 Hz

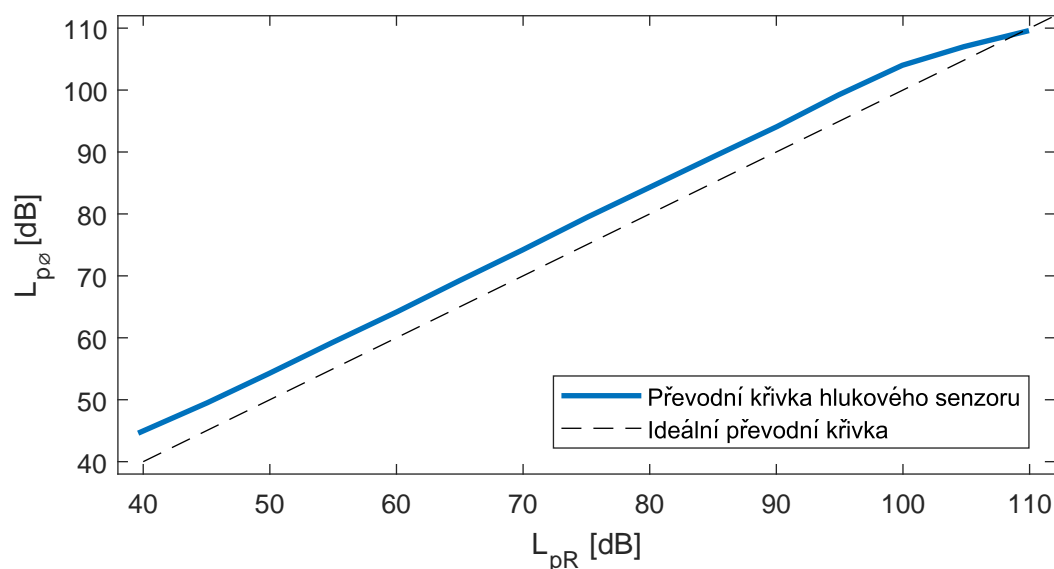
### 3.9.4 Převodní charakteristika hlukového senzoru při buzení různým šumem

Z měření převodní charakteristiky lze určit, zda hlukový senzor snímá a počítá všechny hladiny akustického tlaku správně, tedy že je lineární.

Zapojení úlohy vycházelo z varianty 1 na obrázku 3.4 v podkapitole 3.3.1 na straně 26.

K měření byl jako referenční použit 1/2"mikrofon B&K 4189 [37], který má o cca 30 dB nižší úroveň vlastního šumu a měřicí signál typu růžový šum. Rozsah měřených SPL byl od 40 do 110 dBA, viz tabulka D.16 v příloze D.3 na straně 68.

Závislost  $L_{pM}$  na  $L_{pR}$  je uvedena na obrázku 3.25, čárkovaně je uvedena ideální převodní charakteristika.



**Obrázek 3.25:** Převodní charakteristika hlukového senzoru při buzení růžovým šumem

Lze si povšimnout posunutí změřené charakteristiky o cca 4 dB nahoru, to může být způsobeno chybnou kalibrací, poklesem citlivosti MEMS zejména na nízkých kmitočtech a nebo krátké či nevhodné obdélníkové okno.

**Tabulka 3.7:** Tabulka nastavení měření převodní charakteristiky hlukového senzoru

Parametr	Nastavení
Schéma zapojení	Varianta 1
Referenční mikrofon	B&K 4189
$f_s$ [kHz]	50,016
Okno	1/8 $f_s$
Typ okna	Obdélníkové
$L_{pR}$ [dB]	tabulka D.16
'k' dle kalibrace	$81,2 \times 10^6$
Rozsah $L_{pR}$ [dB](A)	40-110

Soubory a data z měření frekvenční a převodní charakteristiky jsou uvedeny na přiloženém datovém nosiči ve složce "Měření/Lp", viz příloha F.

---

### 3.9.5 Frekvenční závislost přesnosti hlukového senzoru při váhování oknem typu 'cos'

Původní obdélníkové okno vykazovalo oproti očekávanému chování poklesu charakteristiky mikrofону na nízkých kmitočtech z důvodu menšího počtu period měřicího signálu ve zpracovávaném okně o délce  $N = fs/8$  naopak nárůst změřené hladiny akustického tlaku. Tento nárůst lze sledovat na obrázku 3.24 na straně 43, kde čárkovane je ideální stav a očekávaný průběh rozdílů  $L_p$  má mít klesající tendenci. Porovnat lze naměřenou křivku s grafem frekvenční charakteristiky hlukového senzoru na obrázku 2.17 v podkapitole 2.8 na straně 18.

Pro potlačení vlivu neceločíselných násobků harmonických průběhů nízkých kmitočtů v poli zpracovávaných vzorků bylo zvoleno pro malou výpočetní náročnost okno s průběhem **cos**, kde je zámerem omezit vliv počátku a konce signálu. Pro potlačení vlivu rezonančního peaku byla zvolena nižší vzorkovací frekvence, a to  $f_s=32,6$  kHz.

Z důvodu malé paměti použitého kontroleru a poměrně vysoké vzorkovací frekvence není možné vzorky ukládat pro pozdější výpočty, jako například při zpracování kvazistacionárních řečových segmentů Hammingovým oknem s překryvem nebo pomocí metody OLA, kdy se výběry signálu pomocí dvou oken překrývají a překrývající data jsou sečtena<sup>17</sup>. Současne pro výpočet jedné hodnoty RMS je zapotřebí přibližně 4 000 vzorků a výpis hodnoty v monitorovacím okně se objeví za více než 1 s, kontroler "zahodí" data z několika následujících naplněných bufferů, než dojde k dalšímu výčtu dat do pole.

Pro potlačení jistého počtu vzorků dojde ke snížení energie signálu a každá změna délky hran  $L$  okna o délce  $N$  vyžaduje recalibraci senzoru změnou převodní konstanty  $k$ .

Matematický předpis pro spojitou funkci "cos" byl upraven pro použití v daném diskretním systému, viz rovnice

$$w[n] = -\frac{\cos(\frac{n\pi}{L}) + 1}{2}, \quad \text{pro } n \in (0, L), \quad (3.26)$$

$$w[n] = 1, \quad \text{pro } n \in (L + 1, N - L - 1), \quad (3.27)$$

$$w[n] = \frac{\cos(\frac{n\pi}{L})}{2}, \quad \text{pro } n \in (N - L, N), \quad (3.28)$$

kde  $n$  je pořadí příchozího vzorku.

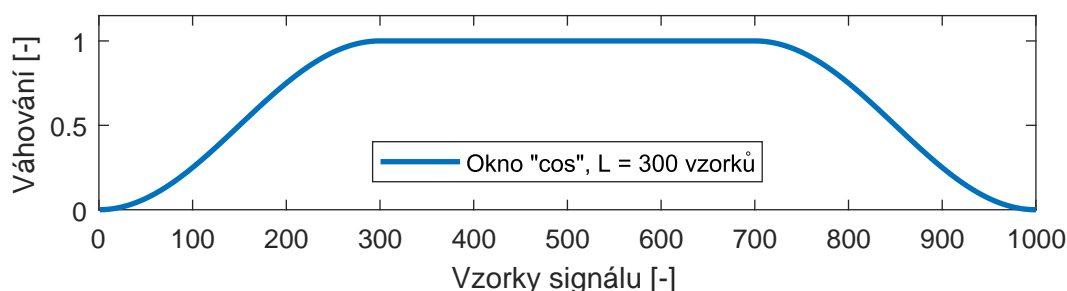
Dílní kódy pro realizaci náběžné a sestupné hrany okna kontroleru jsou uvedeny v příloze A v podkapitolách A.5 a A.6. Návrh experimentálního okna o délce 1 000 vzorků,

---

<sup>17</sup>Přednášky a cvičení předmětu Zpracování řeči.



kde délka náběžné a délka sestupné hrany je rovna 300 vzorkům, je uveden na obrázku 3.26.



**Obrázek 3.26:** Váhovací okno pro délku signálu 1000 vzorků, hrany  $L=300$  vzorků

Skutečná délka okna je rovna délce pole zpracovávaných vzorků, tedy  $N = 4\,075$  vzorků pro vzorkovací kmitočet  $f_s = 32,6$  kHz, a pro dílčí měření s oknem se liší délky náběžných a sestupných hran  $L$ .

Schéma zapojení měřicích přístrojů odpovídalo variantě 1, viz podkapitola 3.4 na straně 26, referenční mikrofon byl 1/4" B&K 4944-B.

Experimentálně byly zvoleny délky náběžných a sestupných hran 20, 50 a 100 vzorků při délce pole 4 075 vzorků při  $f_s = 32,6$  kHz a byly proměřeny kmitočty v rozsahu 31,5 - 125 Hz.

Změřené hodnoty hladin akustických tlaků byly průměrem přibližně 20 hodnot, které kontroler poslal po sériové lince a jsou uvedené v tabulce 3.8.

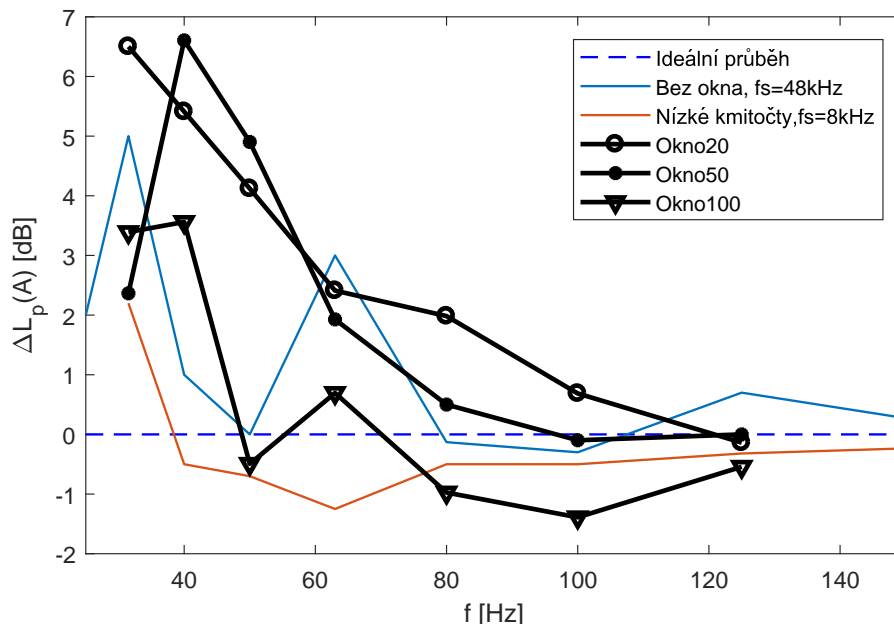
**Tabulka 3.8:** Tabulka naměřených  $L_p$  pro okna délek 20-100 vzorků,  $f_s=32,6$  kHz

$f$ [Hz]	$L_{pR20}$ [dB]	$L_{p\emptyset 20}$ [dB]	$L_{pR50}$ [dB]	$L_{p\emptyset 50}$ [dB]	$L_{pR100}$ [dB]	$L_{p\emptyset 100}$ [dB]
31,5	54	60,5	55	57,4	55	58,4
40	65	70,4	65	71,6	70	73,6
50	65	69,1	70	74,9	70	69,5
63	75	77,4	75	76,9	75	75,7
80	80	82,0	75	75,5	75	74,0
100	75	75,7	75	74,9	75	73,6
125	70	69,9	70	70,0	70	69,5

Ve sloupci  $L_{pRx}$  jsou uvedeny referenční hladiny akustických tlaků sejmuté měřicím mikrofonem a ve sloupci  $L_{p\emptyset x}$  jsou zprůměrované hodnoty změřené MEMS mikrofonem na 1 desetinné místo. Parametr "x" odpovídá délce okna od 20 do 100.

Rozdíly mezi  $L_{p\emptyset x}$  a  $L_{pRx}$  byly vyneseny do jednoho grafu společně s naměřenými daty z měření frekvenční charakteristiky pro  $f_s = 8,06$  a  $50,016$  kHz, viz obrázek 3.27, kde je modře čárkovaně vynesena průběh ideálního rozdílu mezi oběma hladinami.

Z grafů vyplývá, že délka okna průběhy zlepšuje mírně. Pro další měření byla zvolena délka okna  $L = 300$  vzorků a měření bylo opakováno pro třetinooktávové kmitočty s jemnějším krokem v okolí rezonanční frekvence.



**Obrázek 3.27:** Frekvenční charakteristika hlukového senzoru, detail nízké kmitočty, různé délky oken 20-100 vzorků,  $k = 84,85 \times 10^6$ ,  $84,0 \times 10^6$  a  $84,5 \times 10^6$

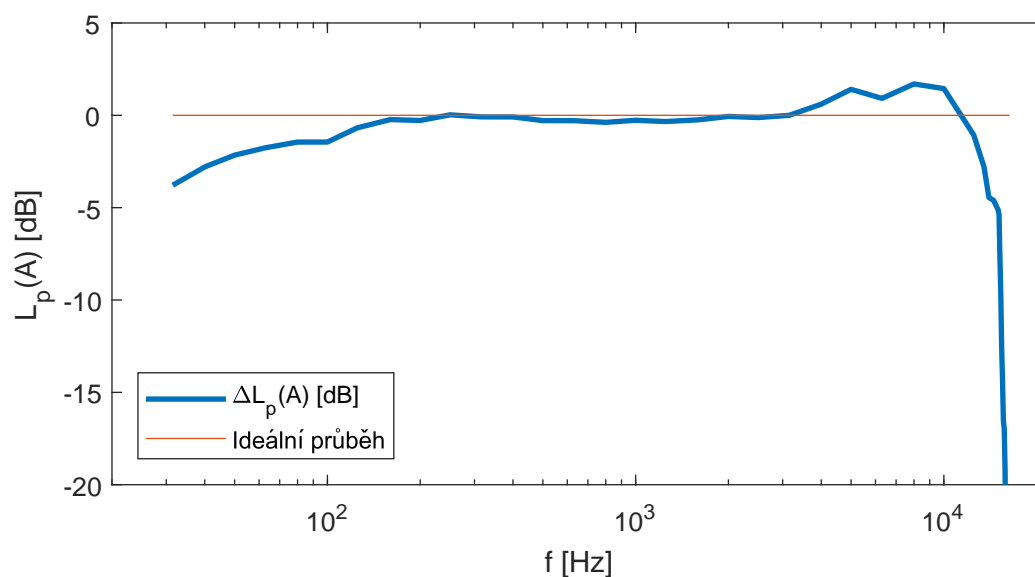
Změřené hladiny akustických tlaků jsou uvedené v tabulce 3.9, kde jsou tučně vyznačeny střední frekvence třetinooktávového pásma, ve sloupci  $L_{pR}$  jsou uvedeny referenční hladiny akustických tlaků sejmuté měřicím mikrofonom a ve sloupci  $L_{p\emptyset}$  jsou zprůměrované hodnoty změřené MEMS mikrofonom na 1 desetinné místo.

Výsledky jsou vyneseny do grafu na obrázku 3.28, kde modře je uveden rozdíl mezi  $L_{pM}(A)[dB]$  a  $L_{pR}(A)[dB]$  a červeně ideální rozdíl hladin akustického tlaku mezi referenčním a měřeným mikrofonom na všech kmitočtech. Pokles na kmitočtech pod 200 Hz značí nižší citlivost hlukového senzoru na toto pásmo, to je způsobeno vlivem nižší citlivosti MEMS mikrofonomu na nízkých frekvencích, viz graf frekvenční charakteristiky 2.17. Vzorkovací kmitočet byl zvolen tak, aby potlačil rezonanci MEMS mikrofonomu na kmitočtu okolo 16 kHz, viz měření frekvenční charakteristiky v celém kmitočtovém rozsahu 20 Hz - 23,5 kHz v podkapitole 3.9.3.

Útlum na nízkých kmitočtech je potřeba kompenzovat tak, aby rozdíly mezi změřenými hladinami byly minimální. Toho se docílí modifikací A filtru tak, aby jedna z horních propustí tlumila méně, to je předmětem posledního měření frekvenční charakteristiky v následující kapitole.

**Tabulka 3.9:** Tabulka naměřených  $L_p$  pro různé kmitočty při  $f_s=32,6$  kHz, okno 300 vzorků,  $k = 81M03$

f[Hz]	$L_{pR}$ [dB]	$L_{p\emptyset}$ [dB]	f[Hz]	$L_{pR}$ [dB]	$L_{p\emptyset}$ [dB]	f[Hz]	$L_{pR}$ [dB]	$L_{p\emptyset}$ [dB]
<b>31,5</b>	60	56,2	<b>1000</b>	84	83,7	15000	70	64,9
<b>40</b>	65	62,2	<b>1250</b>	90	89,7	15100	70	64,6
<b>50</b>	70	67,8	<b>1600</b>	84	83,8	15200	70	62,3
<b>63</b>	80	78,2	<b>2000</b>	80	79,9	15300	71	61,3
<b>80</b>	85	83,6	<b>2500</b>	70	69,9	15400	73	60,4
<b>100</b>	85	83,6	<b>3150</b>	75	75,0	15500	74	59,6
<b>125</b>	75	74,3	<b>4000</b>	70	70,6	15600	75	58,5
<b>160</b>	85	84,8	<b>5000</b>	71	72,4	15700	74	57,0
<b>200</b>	75	74,7	<b>6300</b>	72	72,9	15800	73	53,7
<b>250</b>	75	75,0	<b>8'000</b>	70	71,7	15900	74	50,0
<b>315</b>	81	80,9	<b>10000</b>	70	71,4	<b>16000</b>	74	47,3
<b>400</b>	82	81,9	<b>12500</b>	70	68,9	16100	76	43,7
<b>500</b>	84	83,7	13500	70	67,2	16200	76	42,0
<b>630</b>	90	89,7	14000	70	65,6	16300	76	39,4
<b>800</b>	85	84,6	14500	70	65,4			



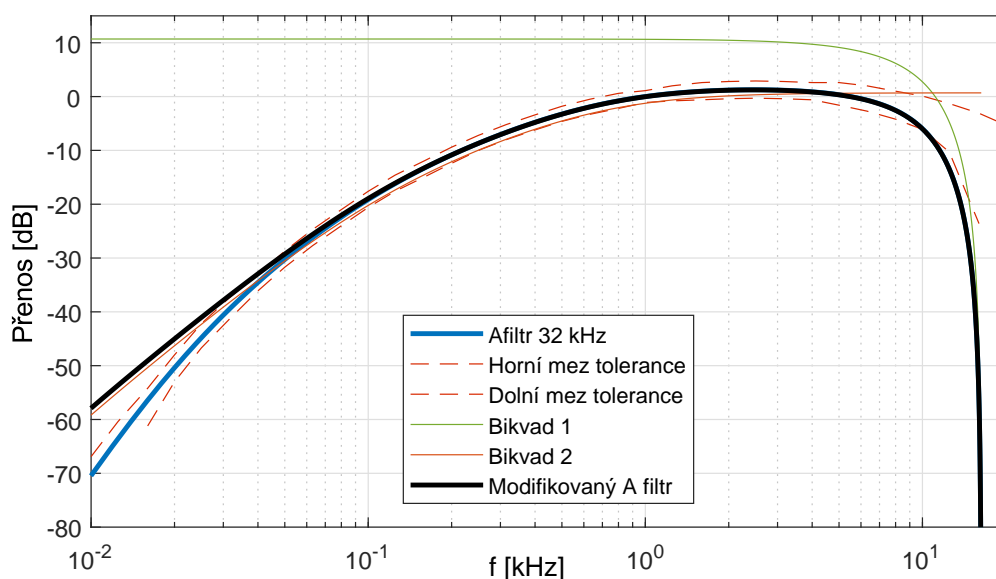
**Obrázek 3.28:** Frekvenční charakteristika hlukového senzoru, okno 300 vzorků

Soubory s daty a kódy pro Arduino a Matlab jsou uvedeny na příloženém nosiči ve složce "Měření/LpOkno".

### 3.9.6 Frekvenční závislost přesnosti hlukového senzoru, okno 'cos', úprava A filtru

Použitím okna o délce 300 vzorků se výsledky přiblížily ideálnímu průběhu, viz obrázek 3.28. Dalším krokem k získání přesnějších výsledků vzhledem k poklesu citlivosti na nízkých kmitočtech bylo upravit A filtr tak, aby tyto nízké kmitočty tolik netlumil. Filtr je rozebrán v teoretické části v kapitole 2.6.

Z frekvenčních charakteristik jednotlivých bikvadratických filtrů A filtru plyne, že nejvíce spodní kmitočty ovlivní poslední filtr. Jeho vyjmutím z výpočtů navíc dojde ke snížení výpočetní náročnosti a použitý kontroler tedy zvládne odesílat data rychleji. Průběh frekvenčních charakteristik v jednom grafu bez přenosové funkce třetího bikvadratického filtru je uveden na obrázku 3.29, kde modře je uveden průběh A filtru a černě průběh upravené křivky.



**Obrázek 3.29:** Přenosové funkce jednotlivých navržených bikvadů, modře A křivka a černě kompenzovaná A křivka

Návrh překročí horní toleranční mez na kmitočtu přibližně 10,2 kHz a spodní mez tolerance při kmitočtu 42 Hz.

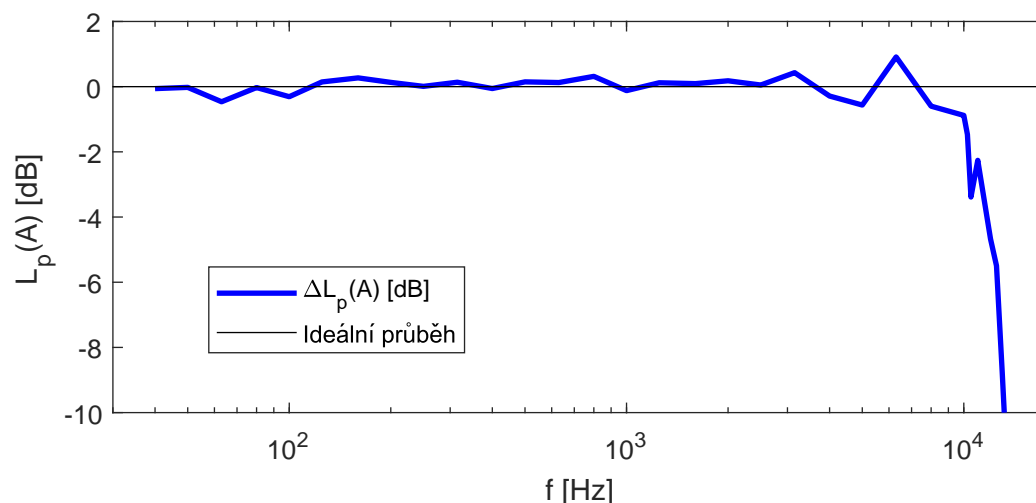
V tomto měření byl tento filtr IIR3 odebrán. Postup měření zůstává shodný s předchozím měřením, zapojení pracoviště podle variantě 1, viz kapitola 3.4. Délky náběžné a sestupné hrany okna jsou 300 vzorků, pro měření frekvenční charakteristiky byl použit 1/4" mikrofon

B&K 4944-B, kalibrační konstanta  $k = 77 \times 10^6$ . Změřené hodnoty hladin akustických tlaků jsou uvedeny v tabulce 3.10, kde rozsah měřených kmitočtů byl 31,5 Hz - 16,5 kHz.

**Tabulka 3.10:** Tabulka naměřených  $L_p(A)$ [dB] frekvenční charakteristiky pro různé kmitočty při  $f_s=32,6$  kHz, okno 300 vzorků, bez IIR3

f	$L_{pR}$ [dB]	$L_{p\emptyset}$ [dB]	f	$L_{pR}$ [dB]	$L_{p\emptyset}$ [dB]	f	$L_{pR}$ [dB]	$L_{p\emptyset}$ [dB]
31,5	58,6	57,3	630	86	86,1	10250	80	78,5
40	67	66,9	800	80	80,3	10500	80	76,6
50	68,9	68,9	1000	81	80,9	11000	80	77,7
63	75	74,5	1250	80	80,1	12000	80	75,3
80	74,9	74,9	1600	80	80,1	12500	80	74,5
100	75	74,7	2000	80	80,2	13000	80	71,2
125	70	70,1	2500	80	80,1	13500	80	67,9
160	75	75,3	3150	79	79,4	14000	80	65,8
200	75	75,1	4000	80	79,7	14500	80	59,5
250	75	75,0	5000	82	81,4	15000	80	59,5
315	75	77,7	6300	82	82,9	15500	80	56,1
400	80	79,9	8000	82	81,4	16000	80	44,4
500	80	80,1	10000	80	79,1	16500	80	39,0

Graf rozdílu  $L_{p\emptyset}-L_{pR}$  na jednotlivých kmitočtech je uveden na obrázku 3.30.



**Obrázek 3.30:** Přesnost hlukového senzoru v závislosti na frekvenci, kompenzace A filtru odstraněním IIR3, okno 300 vzorků,  $f_s=32,6$  kHz

Odstraněním posledního bikvadratického filtru došlo ke kompenzaci frekvenční charakteristiky tak, aby rozdíly hladin akustického tlaku na jednotlivých kmitočtech nebyly větší, než 1 dB. Toto je inženýrská aproximace, podávající správný výsledek přibližně se blížící očekávanému chování senzoru. Pro exaktní vyjádření je potřeba vyjít z jednotlivých

frekvenčních odezev filtrů, namodelovat chování mikrofonu a chování filtru vypočítat, viz například [20].

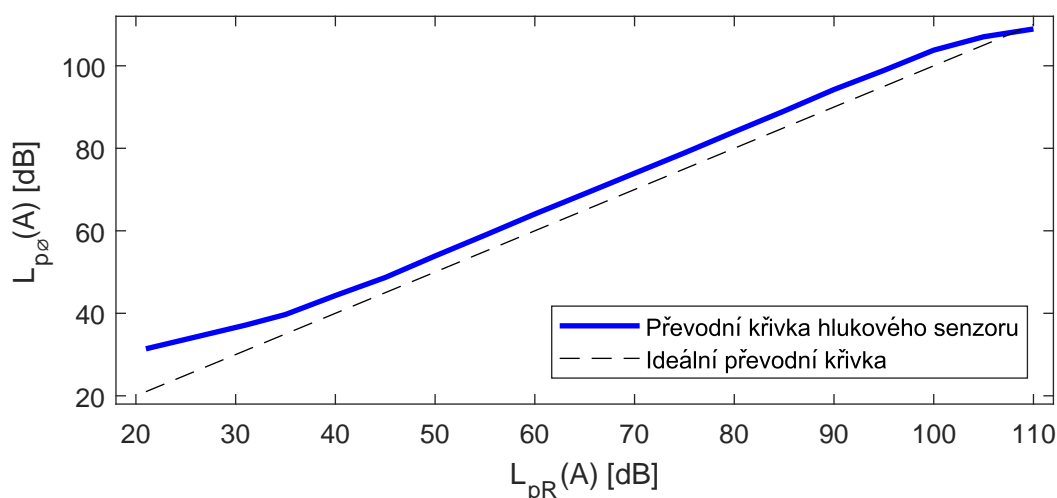
### 3.9.7 Převodní charakteristika hlukového senzoru, okno, kompenzace A

Při změně chování filtru došlo ke změně vnímání nízkých kmitočtů senzorem, bylo potřeba změřit převodní charakteristiku pomocí růžového šumu, kde bylo očekávané, že se změřené hodnoty hladin akustických tlaků referenčním a měřeným mikrofonem budou rovnat.

Z obrázku 3.31 a z tabulky 3.11 vychází tento rozdíl přibližně 4 dB.

**Tabulka 3.11:** Tabulka naměřených  $L_P(A)$ [dB] převodní charakteristiky pro různé úrovně růžového šumu,  $f_s=32.6$  kHz, okno 300 vzorků, bez IIR3

$L_{pR}$ [dB]	$L_{p\emptyset}$ [dB]	$L_{pR}$ [dB]	$L_{p\emptyset}$ [dB]
21	31,4	70	73,9
31	37,1	75	78,9
35	39,7	80	84,0
40	44,3	85	89,0
45	48,7	90	94,2
50	53,9	95	98,9
55	58,9	100	103,8
60	64,1	105	107,0
65	69,0	110	108,9



**Obrázek 3.31:** Převodní charakteristika hlukového senzoru, kompenzace A filtru, okno 300 vzorků,  $f_s=32,6$  kHz

Nejnižší změřené hladiny akustických tlaků se v reálném prostředí vyskytují zřídka, u hlukového senzoru  $L_{p0}=31,4$  dB(A) je úroveň vlastního šumu mikrofonu,  $L_{pR}=21$  dB(A) je skutečná hladina akustického tlaku v měřicí komoře při maximálním možném tichu.

Data a kódy z měření jsou uvedena na příloženém nosiči ve složce "Mereni/LpOknoBezIIR3".

### 3.9.8 Převodní charakteristika hlukového senzoru, okno, kompenzace A, volné pole

Vycházelo se z předchozího měření, tedy měření frekvenční charakteristiky hlukového senzoru pomocí harmonického měřicího signálu sinus s frekvenčním krokem, daným středy třetinooktávových pásem, viz tabulka v příloze B, s použitím váhovacího okna a s kompenzací frekvenční charakteristiky hlukového senzoru úpravou váhovací křivky A.

Senzor vykazoval lineární průběh, viz graf převodní charakteristiky 3.31, avšak posunutý o přibližně 4 dB v celém měřeném rozsahu  $L_p$ (A).

Test 'křížovou kalibrací', kdy byl použit měřicí signál sinus o  $f = 1$  kHz a  $L_p = 94$  dB a proběhlo měření frekvenční a přenosové charakteristiky a následná recalibrace konstanty pomocí růžového šumu o  $L_p = 94$  dB a opět zrychlené měření několika bodů při měření frekvenční a přenosové charakteristiky potvrdil 4dB rozdíl mezi oběma charakteristikami a tedy pravděpodobnou chybu v zapojení úlohy.

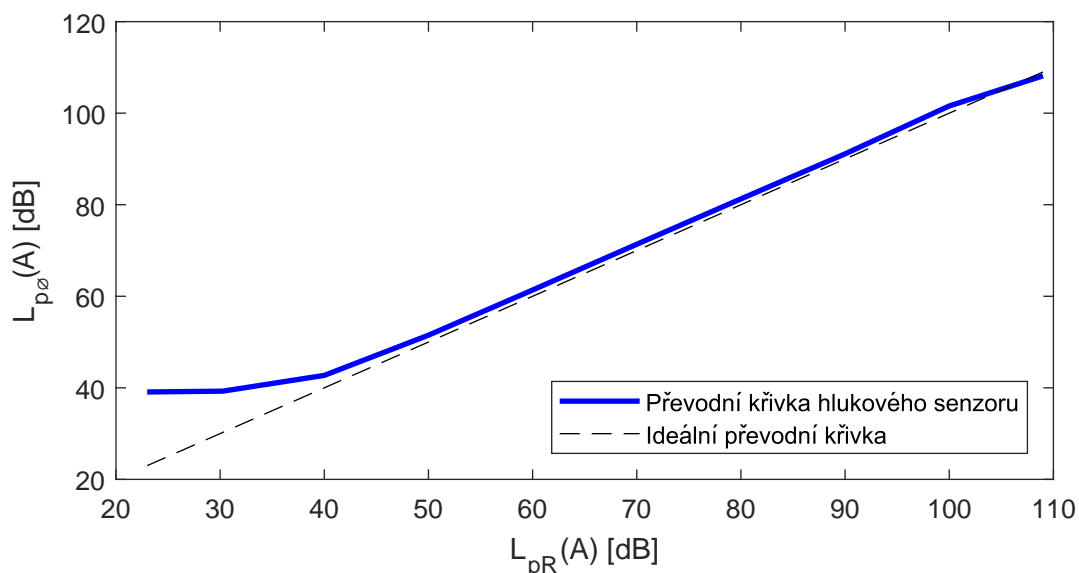
Protože použitý měřicí 1/2"mikrofon je určený pro měření volného pole, řešením rozdílných výsledků se ukázala změna jeho orientace rovnoběžně s akustickou osou reproduktoru oproti stávající orientaci kolmo na akustickou osu, viz zapojení dle varianty 1 v kapitole 3.3.1 [32].

Výsledkem této modifikace měřicího pracoviště a následným měřením je graf převodní charakteristiky, uvedený na obrázku 3.32, kde lze opět pozorovat linearitu a rozdíl hladin akustického tlaku mezi měřeným a referenčním mikrofonem přibližně 1,4 dB(A) při rozsahu 50-100 dB(A).

Data a kódy jsou na příloženém nosiči ve složce "Měření/LpOknoBezIIR3otocenyBK".

**Tabulka 3.12:** Tabulka naměřených  $L_P(A)$ [dB] převodní charakteristiky pro různé úrovně růžového šumu,  $f_s=32.6$  kHz, okno 300 vzorků, bez IIR3, mikrofon do volného pole

$L_{pR}$ [dB]	$L_{p\emptyset}$ [dB]	$\Delta L_p$ [dB]
23	39,1	16,1
30,25	39,3	9,0
40	42,7	2,7
50	51,5	1,5
60	61,4	1,4
70	71,4	1,4
80	81,3	1,3
90	91,1	1,1
100	101,6	1,6
109	108,2	-0,8



**Obrázek 3.32:** Převodní charakteristika MEMS, kompenzace A, okno 300 vzorků,  $f_s=32,603$  kHz, měření ve volném poli



## 4 | Závěr

Cílem práce byl návrh a implementace jednoduchého senzoru hluku s digitálním mikrofonem, obsahujícím váhování A filtrem a změření jeho skutečných vlastností.

Mikrofon na laboratorním přípravku se podařilo oživit pomocí kontroleru Arduino MKRZero a provést na něm sérii měření, která vedla k požadovanému výsledku.

Senzor s poslední verzí kódu, která je uvedena na přiloženém nosiči ve složce "Měření/LpFinálníVerze", je schopen měřit hladinu akustického tlaku na vzorkovacím kmitočtu 32 kHz v rozsahu kmitočtů 40 Hz-5 kHz s přesností na 0,5 dB, v rozsahu kmitočtů 5-10 kHz s odchylkou menší než 1 dB, viz obrázek 3.30 a tabulka změřených hodnot 3.10. S rostoucím kmitočtem nad 10 kHz citlivost hlukového senzoru klesá. Pro potřeby měření dopravního hluku, který se vyskytuje zejména na nízkých frekvencích, je dané navržené řešení dostačující.

Dále při měření mikrofonu širokopásmovým růžovým šumem při různých hladinách akustického tlaku mikrofon měřil hluk s odchylkou oproti referenčnímu mikrofonu menší než 1,5 dB. Tento rozdíl může být dán vzdáleností středů měřicích membrán nebo drobnými nepřesnostmi v implementaci filtru.

Stávající řešení hlukoměru nesplňuje normu [8] pro mód S, nebo-li "Slow", kdy je žádané ze senzoru mít data každou 1 s kvůli malé paměti pro ukládání vzorků ani mód "Fast", kdy měla být data dostupná každou 1/8 s kvůli pomalému výčtu dat, výpočtu A filtru a odeslání dat po UART do PC.

Dalšími kroky ve vývoji hlukového senzoru je přepsání kódu pro výkonnější kontroler Cortex M4, například od společnosti STMicroelectronics nebo Silicon Labs, návrh DPS včetně elektrických a EMC ochran, osazení a oživení DPS. Dále ověření funkčnosti navrženého hlukového senzoru v komoře a implementace do stávajícího řešení včetně testu v reálném prostředí.

Problematikou se dále zabývá například [38][39][40][41][42][43].

# Seznam použité literatury

- [1] PUCHRÍK Jaroslav Doc. Ing., CSc. *Konstrukce a dopravní stavby*. Brno: akademické nakladatelství CERM, 2004. 195s. ISBN 80-214-2814-7.
- [2] JIŘÍČEK Ondřej Prof. Ing., CSc. *Úvod do akustiky*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002. 146s. ISBN 80-01-02460-1.
- [3] TOMAN Jan Bc. *Bezdrátový systém na monitorování hluku a predikci ekvivalentní hladiny akustického tlaku*. Praha, 2010. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Ing. Stanislav Vítek, Ph.D.
- [4] ABRAMOVA Karina Bc. *Akustické senzory pro monitorování hluku*. Praha, 2016. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, fakulta dopravní. Vedoucí práce Ing. Petr Honzík, Ph.D.
- [5] KABAROVÁ Anisa. *HLUKOVÁ ANALÝZA ZVUKOVÝCH SIGNÁLŮ*. Brno, 2015. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Ing. JIŘÍ SCHIMMEL, Ph.D.
- [6] ČEPÁK Jiří. *Měření hluku emitovaného trakčními kolejovými vozidly*. Plzeň, 2012. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni, fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Ing. Oldřich Tureček, Ph.D.
- [7] HLOUŠEK Pavel. *MĚŘENÍ INDEXU HLASITOSTI*. Plzeň, 2012. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni, fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Ing. DAVID KURC
- [8] ČSN EN 61672-1. *Elektroakustika - Zvukoměry - Část 1: Technické požadavky*. 2. vyd. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.
- [9] ERHLICH Pavel. *Zdravotní rizika způsobená hlukem z dopravy* [online]. Poslední změna 2013, [cit. 18.11.2018].  
Dostupné z: [http://www.vitejtenazemi.cz/cenia/index.php?p=zdravotni\\_rizika\\_zpusobena\\_hlukem\\_z\\_dopravy&site=doprava](http://www.vitejtenazemi.cz/cenia/index.php?p=zdravotni_rizika_zpusobena_hlukem_z_dopravy&site=doprava)
- [10] ŠKVOR Zdeněk Prof. Ing., DrSc. *Elektroakustika a akustika*. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2012. 574s. ISBN 978-80-01-025034-7.
- [11] InvenSense. *Application Note AN-1112, MICROPHONE SPECIFICATIONS EXPLAINED* [online]. Poslední změna 15.6.2016, [cit. 25.8.2018].  
Dostupné z: <https://www.invensense.com/products/digital/ics-43432/>

- [12] KOLÁŘ Jakub. *Měření nelineárního zkreslení mikrofonů*. Praha, 2016. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Ing. Petr Honzík, Ph.D.
- [13] KOLÁŘ Jakub Bc. *Identifikace parametrů nelineárního modelu elektretového mikrofonu*. Praha, 2018. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, fakulta dopravní. Vedoucí práce Ing. Petr Honzík, Ph.D.
- [14] SKALICKÝ Petr Doc. Ing., CSc. *Aplikace signálových procesorů*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003. 136s. ISBN 80-01-02647-7.
- [15] SOVKA Pavel Prof., CSc., ČMEJLA Roman Prof. Ing., CSc., ŠMEJKAL Ladislav Ing., CSc. *Číslíkové filtry*. *Automatizace*, Vol. 48, No. 7-8, 2005 červenec-srpen. Strany 495-497.
- [16] SOVKA Pavel Prof., CSc., ČMEJLA Roman Prof. Ing., CSc., ŠMEJKAL Ladislav Ing., CSc. *Číslíkové filtry II*. *Automatizace*, Vol. 48, No. 9, 2005 září. Strany 560-562.
- [17] SOVKA Pavel Prof., CSc., ČMEJLA Roman Prof. Ing., CSc., ŠMEJKAL Ladislav Ing., CSc. *Číslíkové filtry III*. *Automatizace*, Vol. 48, No. 10, 2005 říjen. Strany 660-662.
- [18] InvenSense. *ICS-43432 Datasheet, Low-Noise Microphone with IIS Digital Output* [online]. Poslední změna 27.4.2016, [cit. 25.8.2018]. Dostupné z: <https://www.invensense.com/products/digital/ics-43432/>
- [19] KADLEC František Doc. Ing., CSc. *Zpracování akustických signálů*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1998. 194s. ISBN 80-01-01525-4.
- [20] SKALICKÝ Petr Doc. Ing., CSc. *Digitální filtrace a signálové procesory*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1995. 214s. ISBN 80-01-01244-1.
- [21] NOVAK Antonin, RUND František, HONZIK Petr. *Impulse Response Measurements Using MLS Technique on Nonsynchronous Devices*. *J. Audio Eng. Soc.*, Vol. 64, No. 12, 2016 December. Pages 978-987.
- [22] SKALICKÝ Petr Doc. Ing., CSc. *Aplikace signálových procesorů, Cvičení*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003. 116s. ISBN 80-01-02646-9.
- [23] The MathWorks, Inc. *Documentation "fdesign.audioweighting"* [online]. Poslední změna 2018, [cit. 5.10.2018]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/dsp/ref/fdesign.audioweighting.html>

- [24] MACH Václav. *AKUSTICKÁ MĚŘENÍ V REÁLNÉM PROSTŘEDÍ*. Brno, 2009. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Ing. IVAN MÍČA.
- [25] FABIÁN Petr Bc., FEJTEK Michael Bc. *MEMS mikrofony - konstrukce, limity, vlastnosti*. Praha: semestrální práce předmětu Mikrosystémy v multimédiích, ČVUT. Poslední změna 16.5.2014. 14s.
- [26] JIROVEC Jakub. *Možnosti a parametry MEMS mikrofonů*. Plzeň, 2015. Západočeská univerzita v Plzni, fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Ing. Oldřich Tureček, Ph.D.
- [27] HONZÍK Petr Ing. *Miniaturní křemíkové mikrofony*. Praha, 2007. Dizertační práce. České vysoké učení technické v Praze, fakulta elektrotechnická. Školitel Prof. Ing. Zdeněk Škvor, DrSc, co-directeur de thèse Dr. Stéphane Durand MCF.
- [28] LEWIS Jerad, InvenSense. *Inter-IC Digital Audio Interfaces* [online]. Poslední změna 31.12.2013, [cit. 25.8.2018]. Dostupné z: <https://www.invensense.com/products/digital/ics-43432/>
- [29] Philips Semiconductors. *I2S bus specification* [online]. Poslední změna 2.1986, revize 5.6.1996, [cit. 3.9.2018]. Dostupné z: <https://www.sparkfun.com/datasheets/BreakoutBoards/I2SBUS.pdf>
- [30] Arduino.cc. *ARDUINO MKR ZERO* [online]. Poslední změna 2018, [cit. 3.9.2018]. Dostupné z: <https://store.arduino.cc/arduino-mkrzero>
- [31] SM, Arduino.cc. *Getting Started with the Arduino MKRZero* [online]. Poslední změna 11.1.2017, [cit. 3.9.2018]. Dostupné z: <https://www.arduino.cc/en/Guide/ArduinoMKRZero>
- [32] Ekosoftware. *Volba mikrofonu s ohledem na typ pole* [online]. Poslední změna 9.2017, [cit. 21.12.2018]. Dostupné z: <https://www.ekosoftware.cz/component/content/article?id=165:volba-mikrofonu-s-ohledem-na-typ-pole>
- [33] NOSONOWITZ Danny, Lady ADA. *Adafruit I2S MEMS Microphone Breakout* [online]. Poslední změna 11.9.2018, [cit. 19.11.2018]. Dostupné z: <https://learn.adafruit.com/adafruit-i2s-mems-microphone-breakout/raspberry-pi-wiring-and-test>
- [34] ESI. *Aktiv 05, Top Quality 5"Studio Reference Monitor* [online]. Poslední změna 2018, [cit. 29.9.2018]. Dostupné z: <https://www.esi-audio.com/products/aktiv05/>

- [35] Brüel&Kjær. *1/4"DeltaTron Pressure-field Microphones - Types 4944-A and 4944-B* [online]. Poslední změna 9.2009, [cit. 6.9.2018].  
Dostupné z: <https://www.bksv.com/en/products/transducers/acoustic/microphones/microphone-preamplifier-combinations/4944-B>
- [36] Brüel & Kjær. *Photon+ Dynamic Signal Analyzer* [online]. Poslední změna 7.2016, [cit. 28.11.2018]. Dostupné z: <https://www.bksv.com/en/products/data-acquisition-systems-and-hardware/general-purpose-analyzer-system/photon>
- [37] Brüel&Kjær. *1/2-ING FREE-FIELD MICROPHONE, 6.3 Hz TO 20 KHZ, PREPOLARIZED* [online]. Poslední změna 6.2008, [cit. 17.12.2018].  
Dostupné z: <https://www.bksv.com/en/products/transducers/acoustic/microphones/microphone-cartridges/4189>
- [38] Advanced Solutions Nederland. *Designing and implementing biquad IIR filters with the ASN Filter Designer: a tutorial review* [online]. Poslední změna 2.2016, [cit. 6.9.2018]. Dostupné z: <http://www.advsolned.com/wp-content/uploads/2018/05/Designing-and-implementing-biquad-filters-with-the-ASN-Filter-Designer-a-tutorial-review.pdf>
- [39] VEJRAŽKA František Doc. Ing., CSc. *Signály a soustavy*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1995. 243s. ISBN 80-01-00450-3.
- [40] RIMELL Andrew N., MANSFIELD Neil J., PADDAN Gurmail S. *Design of digital filters for frequency weightings (A and C) required for risk assessments of workers exposed to noise* [online]. Poslední změna 13.9.2014, [cit. 5.10.2018].  
Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4331191/>
- [41] The MathWorks, Inc. *Biquad Filter* [online]. Poslední změna 2018, [cit. 5.10.2018].  
Dostupné z:  
[https://www.mathworks.com/help/dsp/ref/biquadfilter.html?s\\_tid=srchtitle](https://www.mathworks.com/help/dsp/ref/biquadfilter.html?s_tid=srchtitle)
- [42] REICHL Jaroslav. *Mikrofony* [online]. Poslední změna 2018, [cit. 31.12.2018].  
Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/377-mikrofony>
- [43] Portál životního prostředí hlavního města Prahy. *Strategické hlukové mapy a akční plány snižování hluku* [online]. Poslední změna 8.7.2008, [cit. 31.12.2018].  
Dostupné z: [http://portalzp.praha.eu/jnp/cz/hluk/hlukove\\_mapovani/strategie\\_hlukove\\_mapy\\_a\\_akcni\\_plany.html](http://portalzp.praha.eu/jnp/cz/hluk/hlukove_mapovani/strategie_hlukove_mapy_a_akcni_plany.html)

## Seznam obrázků

2.1	Strategická hluková mapa aglomerace Praha 2007 [9] . . . . .	5
2.2	Ukázka zvukoměru Brüel&Kjaer 2250-S, převzato z [3] . . . . .	6
2.3	Blokové schéma zvukoměru, převzato a upraveno z [2] . . . . .	6
2.4	Elektroakustický dvojbran, převzato z [10] . . . . .	7
2.5	Všesměrová charakteristika MEMS mikrofonu, převzato z [11] . . . . .	7
2.6	Princip elektrostatického jednočinného měniče: pevná elektroda <b>1</b> , pohyblivá elektroda <b>2</b> , vzduchová mezera <b>3</b> , elastor <b>4</b> . Převzato z [10] . . . . .	8
2.7	Frekvenční charakteristika elektrostatického měniče. Převzato z [10] . . . . .	9
2.8	Průběhy váhovacích křivek A, B a C, převzato z [2] . . . . .	9
2.9	Číslicová soustava, převzato z [14] . . . . .	11
2.10	Blokové schéma kaskádní struktury IIR filtru . . . . .	12
2.11	Blokové schéma bikvadratického filtru, 2. kanonická forma, převzato z [14] . . . . .	13
2.12	A filtr a přenosové funkce jednotlivých navržených bikvadů . . . . .	14
2.13	Ukázka průběhu MSL signálu řádu 5, generováno Matlabem . . . . .	15
2.14	Délka složeného měřicího MLS signálu . . . . .	16
2.15	Struktura kapacitního MEMS mikrofonu, pohled z boku, převzato z [26] . . . . .	17
2.16	MEMS mikrofon a jeho blokové schéma . . . . .	17
2.17	Frekvenční charakteristika digitálního MEMS mikrofonu ICS-43432 . . . . .	18
2.18	Blokové schéma propojení mikrofonu a kontroleru . . . . .	19
2.19	Základní časování sběrnice $I^2S$ , převzato z [29] . . . . .	19
2.20	Fotografie kontrolerů použitých při měření . . . . .	20
3.1	Impulzové odezvy A filtru pro $f_s=8,1-50$ kHz, výpočet v Arduinu . . . . .	24
3.2	Přenosové funkce A filtru pro $f_s=8,1-50$ kHz, srovnání s normou [8] . . . . .	25
3.3	Přenosové funkce A filtru pro $f_s=48$ kHz, srovnání výpočtu v Matlabu a v Arduinu s normou [8] . . . . .	25
3.4	Schéma zapojení přístrojů při měření v akustické komoře, Var. 1 . . . . .	26
3.5	Schéma zapojení přístrojů při měření v akustické komoře, Var. 2 . . . . .	27
3.6	Schéma zapojení přístrojů při měření v akustické komoře, Var. 3 . . . . .	28
3.7	Fotografie z měřicího pracoviště, FD ČVUT v Praze . . . . .	28
3.8	Měřicí vybavení, analyzátor a reproduktor [36][34] . . . . .	30
3.9	Frekvenční odezva reproduktoru nEar05 . . . . .	31
3.10	Měřicí mikrofony B&K 4944-B a B&K 4189 [35][34] . . . . .	31
3.11	Kalibrační křivka měřicího mikrofonu B&K 4944-B, s.n.2921808 . . . . .	32
3.12	Kalibrační křivka měřicího mikrofonu B&K 4189, s.n.2985598 . . . . .	32
3.13	Schéma zapojení pro měření vzorkovací periody MEMS mikrofonu . . . . .	33

3.14	Detail vnitřní struktury, zvětšení 10x . . . . .	33
3.15	Struktura MEMS mikrofону, reálná velikost a detail, pohled shora . . . . .	33
3.16	Vzorkovací perioda v průběhu signálu <b>WS</b> . . . . .	35
3.17	Snímek osciloskopu s reálně změřenou vzorkovací frekvencí . . . . .	36
3.18	Pořadí vzorků ve vstupním bufferu kontroleru . . . . .	37
3.19	Ukázka správného výčtu dat z bufferu, kmitočet 80 Hz . . . . .	37
3.20	Ukázka špatného výčtu dat z bufferu, kmitočet 80 Hz . . . . .	37
3.21	Přenosová funkce MEMS mikrofону, MLS, $f_s=32$ kHz . . . . .	40
3.22	Přenosová funkce MEMS mikrofону, MLS, $f_s=48$ kHz . . . . .	41
3.23	Blokové schéma hlukového senzoru . . . . .	42
3.24	Přesnost hlukového senzoru v závislosti na frekvenci, $f_s=8064$ Hz a $f_s=50,016$ kHz . . . . .	43
3.25	Převodní charakteristika hlukového senzoru při buzení různým šumem . . . . .	45
3.26	Váhovací okno pro délku signálu 1000 vzorků, hrany $L=300$ vzorků . . . . .	47
3.27	Frekvenční charakteristika hlukového senzoru, detail nízké kmitočty, různé délky oken 20-100 vzorků, $k = 84,85 \times 10^6$ , $84,0 \times 10^6$ a $84,5 \times 10^6$ . . . . .	48
3.28	Frekvenční charakteristika hlukového senzoru, okno 300 vzorků . . . . .	49
3.29	Přenosové funkce jednotlivých navržených bikvadů, modře A křivka a černě kompenzovaná A křivka . . . . .	50
3.30	Přesnost hlukového senzoru v závislosti na frekvenci, kompenzace A filtru odstraněním IIR3, okno 300 vzorků, $f_s=32,6$ kHz . . . . .	51
3.31	Převodní charakteristika hlukového senzoru, kompenzace A filtru, okno 300 vzorků, $f_s=32,6$ kHz . . . . .	52
3.32	Převodní charakteristika MEMS, kompenzace A, okno 300 vzorků, $f_s=32,603$ kHz, měření ve volném poli . . . . .	54
E.1	Struktura obslužného Arduino kódu . . . . .	69

## Seznam tabulek

2.1	Hodnoty ekvivalentní hladiny akustického tlaku pro různé prostory a denní dobu, převzato z NV 272/2011 Sb. . . . .	4
2.2	Základní vlastnosti MEMS mikrofону . . . . .	18
2.3	Rozdíl v $L_p$ dvou zdrojů a přírůstek $L_{p,dif}$ slabšího zdroje . . . . .	21
3.4	Útlum měřicí komory . . . . .	34
3.5	Návrh MLS pro různé vzorkovací kmitočty, vzorkovací frekvence analyzátoru a Arduina . . . . .	39
3.6	Tabulka nastavení měření frekvenční charakteristiky hlukového senzoru . . . . .	44

---

3.7	Tabulka nastavení měření převodní charakteristiky hlukového senzoru . . .	45
3.8	Tabulka naměřených $L_p$ pro okna délek 20-100 vzorků, $f_s=32,6$ kHz . . . .	47
3.9	Tabulka naměřených $L_p$ pro různé kmitočty při $f_s=32,6$ kHz, okno 300 vzorků, $k = 81M03$ . . . . .	49
3.10	Tabulka naměřených $L_p(A)$ [dB] frekvenční charakteristiky pro různé kmitočty při $f_s=32,6$ kHz, okno 300 vzorků, bez IIR3 . . . . .	51
3.11	Tabulka naměřených $L_P(A)$ [dB] převodní charakteristiky pro různé úrovně růžového šumu, $f_s=32.6$ kHz, okno 300 vzorků, bez IIR3 . . . . .	52
3.12	Tabulka naměřených $L_P(A)$ [dB] převodní charakteristiky pro různé úrovně růžového šumu, $f_s=32.6$ kHz, okno 300 vzorků, bez IIR3, mikrofon do volného pole . . . . .	54
B.13	Vážená křivka A, hodnoty převzaty z [2][8] . . . . .	65
D.14	Frekvenční charakteristika hlukového senzoru, $f_s = 50,025$ kHz . . . . .	67
D.15	Naměřené hodnoty frekvenční charakteristiky hlukového senzoru, buzení sinus, $f_s = 8,064$ kHz, nízké kmitočty . . . . .	67
D.16	Naměřené hodnoty převodní charakteristiky hlukového senzoru, buzení růžovým šumem, $f_s = 50,025$ kHz . . . . .	68



# A | Kódy

## A.1 Koeficienty bikvadratického filtru, návrh Matlab

```
%% Návrh A filtru Matlab
fs = 8064;      % skutečná vzorkovací frekvence
class = 1;     % třída přesnosti 1 nebo 2
h = fdesign.audioweighting('WT,Class','A',class,fs);
Ha = design(h,'ansis142','SystemObject',true);
hfvt = fvtool(Ha)
legend(hfvt, 'A-weighting')
```

## A.2 Výčet dat z mikrofonu

```
count=0;
while(count < sampleCount){      // sampleCount = 1000
    if(len=I2S.available()){
        I2S.read(data,len);      // jednotlivé bajty
        for(int i=0; i<len; i += 4){ // len = 512, délka bufferu
            if((data[i]+data[i+1]+data[i+2]+data[i+3])){
                for(int j=0; j<4; j++){
                    samples[count].sample_bytes[j] = data[i+j];
                }
                count++;
            }
        }
    }
}
```

## A.3 Bikvadratický filtr, Arduino

```
A = Input[n];      // Do proměnné uložený n-tý vzorek
A = A * gain;      // Násobení ziskem
A -= a1 * s1;      // Odečtení jednou zpožděného zpětného součtu s0
A -= a2 * s2;      // Odečtení dvakrát zpožděného zpětného součtu s0
s0 = A;
A = s0 * b0;
A += b1 * s1;      // Přičtení jednou zpožděného dopředného součtu s0
A += b2 * s2;      // Přičtení dvakrát zpožděného dopředného součtu s0
s2 = s1;           // Nová hodnota zpoždění s2
s1 = s0;           // Nová hodnota zpoždění s1
```

## A.4 RMS

```

RMSvariable += sq(1.0*samples[count].sample_int);
sprintf(RMSvariable_string, "%.2f", RMSvariable);
RMS = RMSvariable / (1.0*k);
sprintf(RMSvariable_RMS, "%.2f", RMS);
RMS = sqrt(RMS);
RMS = RMS / RMS_konstanta;           // dělení citlivostí při 94 dB
RMS = RMS / RMS_reference;          // tlak / 2E-5, reference
RMS = log10(RMS);
SPL = 20*RMS;

```

## A.5 Okno cosinus, náběžná hrana

```

if (n<L){ // n-pořadí vzorku, L-délka náběžné hrany
    okno = (cos((n * PI / L) + PI) + 1) / 2;
    Avar1 = Avar1 * okno; // Avar1 - aktuální vzorek
}

```

## A.6 Okno cosinus, sestupná hrana

```

if (n>=sampleCount-L){ // sampleCount-délka okna
    i++; // počátek okna, i=<0,L>
    okno = (cos((i*PI/L))+1)/2;
    Avar1 = Avar1*okno;
}

```

kde **n** je pořadí aktuálního vzorku v okně, **L** je délka náběžné / sestupné hrany, **Avar1** je aktuální vzorek signálu, **sampleCount** je délka zpracovávaného okna a **i** je proměnná, modelující sestupnou hranu

# B | Korekce křivkou A

**Tabulka B.13:** Vážená křivka A, hodnoty převzaty z [2][8]

Nominální frekvence [Hz]	Vážení [dB]	Tolerance, třída 1 [dB]
10	-70,4	+3,0 ; $-\infty$
12,5	-63,4	+2,5 ; $-\infty$
16	-56,7	+2,0 -4,0
20	-50,5	$\pm 2,0$
25	-44,7	+2,0 ; -1,5
31,5	-39,4	$\pm 1,5$
40	-34,6	$\pm 1,0$
50	-30,2	$\pm 1,0$
63	-26,2	$\pm 1,0$
80	-22,5	$\pm 1,0$
100	-19,1	$\pm 1,0$
125	-16,1	$\pm 1,0$
160	-13,4	$\pm 1,0$
200	-10,9	$\pm 1,0$
250	-8,6	$\pm 1,0$
315	-6,6	$\pm 1,0$
400	-4,8	$\pm 1,0$
500	-3,2	$\pm 1,0$
630	-1,9	$\pm 1,0$
800	-0,8	$\pm 1,0$
1000	0	$\pm 0,7$
1250	0,6	$\pm 1,0$
1600	1	$\pm 1,0$
2000	1,2	$\pm 1,0$
2500	1,3	$\pm 1,0$
3150	1,2	$\pm 1,0$
4000	1	$\pm 1,0$
5000	1,0	$\pm 1,5$
6300		+1,5
8000	-1,1	+1,5
10000	-2,5	+2,0
12500	-4,3	+2,0
16000	-6,6	+2,5
20000	-9,3	+3,0 ; $-\infty$

## C | Koeficienty IIR filtrů

Biquad	Parametr	fs = 8,064 kHz	fs = 16,305 kHz	fs = 24,226 kHz
	Gain	0,630285287512819	0,527097317946231	0,422973957447622
IIR1	b0	1	1	1
	b1	0	2	2
	b2	-1	1	1
	a0	1	1	1
	a1	0,098725519210199	0,805794635039844	0,450393038558679
	a2	-0,360970716510878	0,162326248464749	0,05071347229553
IIR2	b0	1	1	1
	b1	0	2	-2
	b2	-1	1	1
	a0	1	1	1
	a1	-0,267306316870773	-1,71041695629674	-1,79780961068567
	a2	-0,599695058863803	0,72053415831411	0,8026188316661
IIR3	b0	1	1	1
	b1	-2	-2	-2
	b2	1	1	1
	a0	1	1	1
	a1	-1,96815748220093	-1,98418720088477	-1,98934366666012
	a2	0,968410968685874	0,98424971203873	0,989372056020185
Biquad	Parametr	fs = 32,603 kHz	fs = 44,111 kHz	fs = 50,025 kHz
	Gain	0,338154814678827	0,255675785643258	0,224188304821303
IIR1	b0	1	1	1
	b1	2	2	2
	b2	1	1	1
	a0	1	1	1
	a1	0,1609380586496	-0,140787860034557	-0,265259386174342
	a2	0,006475264680476	0,004955305383278	0,017590635488397
IIR2	b0	1	1	1
	b1	-2	-2	-2
	b2	1	1	1
	a0	1	1	1
	a1	-1,84670634613139	-1,88492904621009	-1,89799763593479
	a2	0,849432386944173	0,886448553578308	0,89918719803724
IIR3	b0	1	1	1
	b1	-2	-2	-2
	b2	1	1	1
	a0	1	1	1
	a1	-1,99207613747256	-1,99414036194072	-1,99483218090091
	a2	0,992091834371903	0,994148945780271	0,994838857489472

## D | Naměřené hodnoty

### D.1 Frekvenční závislost $L_{pM}$ , sinus

**Tabulka D.14:** Frekvenční charakteristika hlukového senzoru,  $f_s = 50,025$  kHz

f[Hz]	$L_{pR}$ [dB]	$L_{pM}$ [dB]	f[Hz]	$L_{pR}$ [dB]	$L_{pM}$ [dB]	f[Hz]	$L_{pR}$ [dB]	$L_{pM}$ [dB]
20	70	68,1	630	70	70,09	13500	70	71,8
25	70	72	800	70	70,24	14000	70,05	72,9
31,5	70	75	1000	70	69,875	14500	70	74,7
40	70	71	1250	70	69,83	15000	70	76,12
50	70	70	1600	70	70,14	15500	70	79,5
63	70	73	2000	70	70,2	16000	70	81,45
80	70	69,87	2500	70	70,03	16500	70	80,53
100	70	69,7	3150	70	70,59	17000	70	80,8
125	70	70,7	4000	70	69,63	17500	70	76,2
160	70	70,1	5000	70	69,2	18000	70	79,2
200	70	70,3	6300	70	69,41	18500	70	78
250	70	69,92	8000	70	70,56	19000	70	75
315	70	70	10000	70	70,35	19500	70	74,2
400	70	70,17	12500	70	71,87	20000	70	66
500	70	70,1	13000	69,9	73,6	23500	70	58,65

### D.2 Frekvenční charakteristika, sinus, nízké kmitočty

**Tabulka D.15:** Naměřené hodnoty frekvenční charakteristiky hlukového senzoru, buzení sinus,  $f_s = 8,064$  kHz, nízké kmitočty

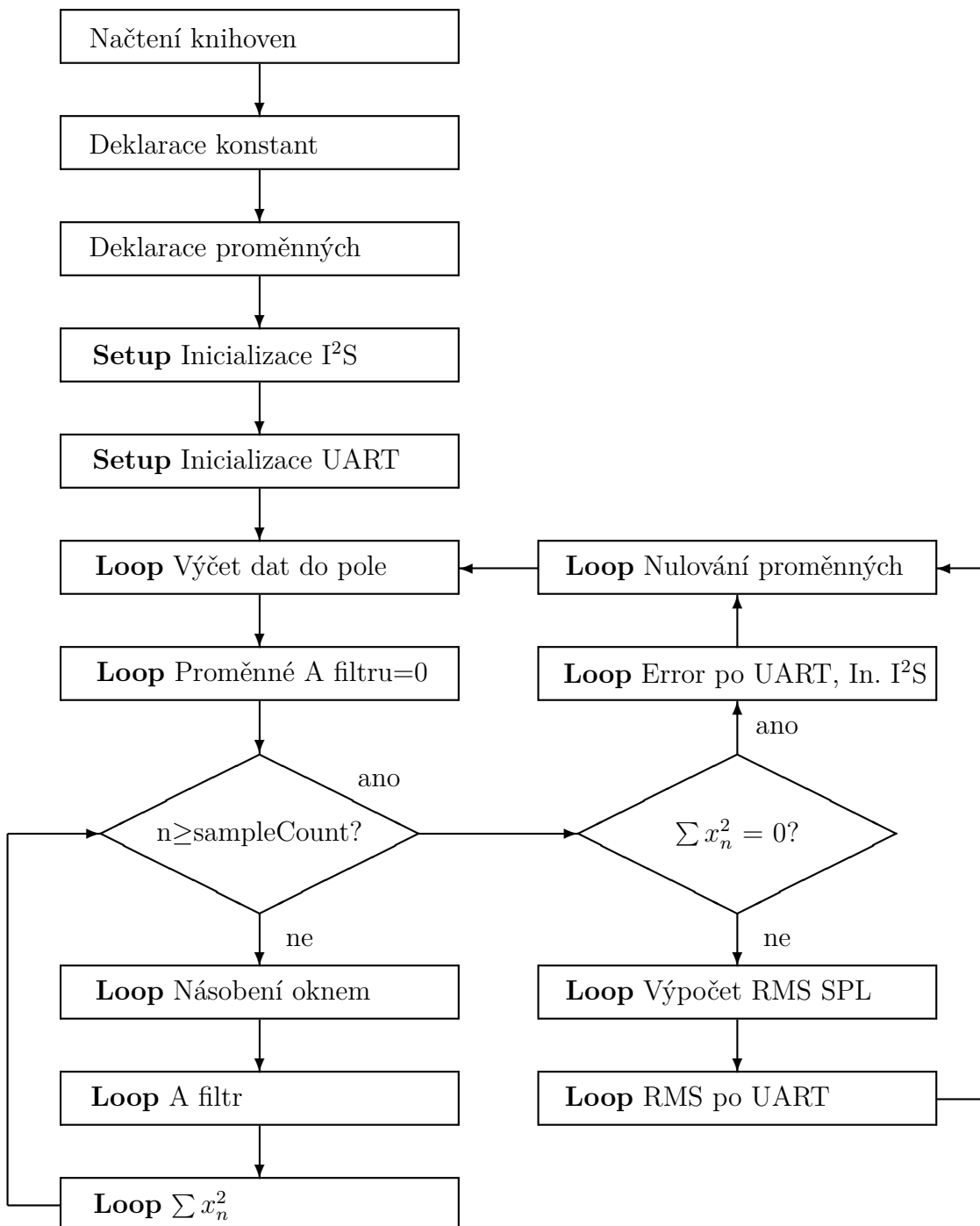
f [Hz]	$L_{pR}$ [dB]	$L_{p\emptyset}$ [dB]
31,5	60	62,2
40	70	69,5
50	70	69,3
63	70,05	68,8
80	70	69,5
100	70	69,5
125	70,02	69,7
160	70	69,8
200	70	69,8

## D.3 Převodní charakteristika, buzení růžovým šumem

**Tabulka D.16:** Naměřené hodnoty převodní charakteristiky hlukového senzoru, buzení růžovým šumem,  $f_s = 50,025$  kHz

$L_{pR}$ [dB]	$L_{p\emptyset}$ [dB]
39,6	44,6
45,05	49,5
49,9	54,2
54,9	59,2
60,05	64,2
64,95	69,2
69,97	74,2
75,1	79,5
79,9	84,2
85,2	89,4
90,05	94,1
94,9	99,2
99,95	104
104,8	107
109,95	109,6

# E | Blokové schéma kódu senzoru



Obrázek E.1: Struktura obslužného Arduino kódu

# F | Struktura adresáře přiloženého datového nosiče

```
/
├── Měření
│   ├── A_křivka_bikvady
│   │   ├── A_křivka_ImpulzniOdezvaArduino
│   │   └── A_křivka_Přenosové_funkceArduino
│   ├── Charakteristiky
│   │   ├── Lp
│   │   ├── Lp0kno
│   │   ├── Lp0knoBezIIR3
│   │   ├── Lp0knoBezIIR3otocenyBK
│   │   └── PřenosováCharakteristikaMEMS
│   ├── img
│   ├── kalibrační_data_B&K
│   ├── Měření_útlum_komory
│   ├── Měření_útlum_komory
│   ├── MLS_spektrum
│   ├── Průběhy_buffer
│   │   ├── Průběhy_správný_buffer
│   │   └── Průběhy_špatný_buffer
├── TeX
│   ├── img
│   └── tex
```