



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

SYSTÉM PRO MĚŘENÍ SMĚROVÝCH CHARAKTERISTIK ZDROJŮ ZVUKU

SYSTEM FOR MEASURING DIRECTIONAL RESPONSES OF SOUND SOURCES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Benjamin Nimmerichter

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Schimmel, Ph.D.

BRNO 2025

Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Audio inženýrství**
specializace Akustika a audiovizuální technika
Ústav telekomunikací

Student: Bc. Benjamin Nimmerrichter

ID: 233023

Ročník: 2

Akademický rok: 2024/25

NÁZEV TÉMATU:

Systém pro měření směrových charakteristik zdrojů zvuku

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte a realizujte systém pro měření 2D a 3D charakteristik zdrojů zvuku nebo více mikrofony umístěnými staticky nebo využívajícími otočný systém. Realizujte mechanickou, elektrickou i softwarovou část zařízení a ověřte jej praktickým měřením. Pro implementaci použijte prostředí Matlab, Audio Toolbox a App Designer Matlabu. Aplikace bude umožňovat jednorázové a postupné měření v jednotlivých bodech, kalibraci měřicího řetězce, kontrolu odstupu signálu od šumu, výpočet a zobrazení směrových charakteristik, export signálů jednotlivých mikrofonů s kompenzací citlivosti kanálu a zobrazení jejich spekter.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] COLLOMS, Martin a DARLINGTON, Paul. High performance loudspeakers. 6th ed. Chichester: Wiley, c2005. ISBN 0-470-09430-3.

[2] BKS Type 3922 Turntable with Trinamic drive and control. Online. GitHub. 2024. Dostupné z: <https://github.com/cmlpreston/BKSV3922>. [cit. 2024-09-04].

Termín zadání: 10.2.2025

Termín odevzdání: 27.5.2025

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

doc. Ing. Jiří Schimmel, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá vývojem systému pro automatické měření a vizualizaci směrových vyzařovacích charakteristik zvukových zdrojů. Je zde zpracována problematika měření hladiny akustického tlaku pomocí mikrofону a zvukového rozhraní a následné zpracování naměřených signálů. Poté je v této diplomové práci zpracována problematika spektrální analýzy, realizace měření akustických zdrojů s využitím přeladovaného harmonického signálu, korelací, autokorelací, měřením poměru signálu a šumu, detekcí limitace signálu a detekcí frekvence. V další kapitole je podrobně rozebrán dopad převodu z analogového signálu na číslicové, a rozdíl reálného měření oproti ideálnímu teoretickému modelu a důvody proč tyto potíže vznikají. V další části jsou v této práci provedena měření hladiny akustického tlaku pomocí mikrofónů a zvukových rozhraní podporující technologii *ASIO*. Zpracování signálů probíhá v aplikaci s názvem *SMDRSS*, která byla v rámci praktické části této práce vyvinuta v prostředí *Matlab App Designer*. Tato aplikace byla využita pro měření impulzní a kmitočtové odezvy, směrové vyzařovací charakteristiky a zlomko-oktávové analýzy měřených zvukových zdrojů. Díky těmto měřením lze například určit ideální pozice a rozložení zdrojů zvuku v prostoru. Je také možné dle směrové vyzařovací charakteristiky simulovat a modelovat interakci několika zdrojů zvuku. Výsledkem práce je měřicí program *SMDRSS* a změřené širokopásmové vlastnosti reproduktorů ve vzdáleném poli.

KLÍČOVÁ SLOVA

Směrová vyzařovací charakteristika, efektivní hodnota, poměr signálu a šumu, spektrální analýza, spektrum, diskrétní spektrum, korelace, autokorelace, vzájemná korelace, diskrétní korelace, detekce kmitočtu, detekce limitace, číslicové signály, diskrétní signály, měření hladiny akustického tlaku, hladiny signálů v číslicových systémech, zlomko-oktávová analýza, třetino-oktávová analýza, reproduktory, zvukové zdroje, sférický systém souřadnic, sférický graf, polární graf, výpočet hladiny akustického tlaku, kalibrace a justování mikrofonní soustavy, zpracování číslicových signálů, akustika, *ASIO*, *Matlab*, *App Designer*, přenosová funkce, impulzní odezva, Fourierova transformace, rychlá Fourierova transformace, diskrétní Fourierova transformace, měřicí aplikace, akustický měřicí systém, měření akustického tlaku pomocí mikrofónů, zvukové vlny, *Matlab audioPlayerRecorder*, akustická měření pomocí přeladovaného harmonického signálu, vzdálené pole.

ABSTRACT

This thesis covers the development of a system for automatic measurement and visualisation of directional characteristics of sound sources. The topics, which are covered in this thesis are sound pressure level measurement using microphones and an audio interface and the processing of the measured signals. Other topics include spectral analysis, performing the measurement of sound sources using exponential harmonic sweep, correlation, cross correlation, the measurement of signal to noise ratio, signal clip detection and frequency detection. There's a thorough exploration of the impact of the conversion from an analog signal to a digital one and the difference of performing real measurements instead of ideal ones and the reasons why problems arise. Measurements of sound pressure level have been performed using microphones and sound interfaces that support ASIO technology. Signal processing is performed inside the app called SMDRSS, which was developed during the practical part of this thesis in the Matlab App designer environment. This app was used for measurement of impulse and frequency responses, directional characteristics and fractional octave analysis of the measured sound sources. From these measurements you can determine the ideal placement and distribution of sound sources. Using the directional characteristics you can model interactions of sound sources. The result of this thesis is the SMDRSS measurement app and the measured far field wideband properties of the speakers.

KEYWORDS

Directional characteristics, effective value, RMS value, signal to noise ratio, spectral analysis, spectrum, discrete spectrum, correlation, cross correlation, discrete correlation, frequency detection, signal clip detection, digital signals, discrete signals, measurement of sound pressure level, signal levels in digital systems, fractional octave analysis, third octave analysis, speakers, sound sources, spherical system of coordinates, spherical plot, polar plot, computation of sound pressure level, calibration of a microphone array, adjustment of a microphone array, digital signal processing, acoustics, ASIO, Matlab, App Designer, transfer function, impulse response, Fourier transform, Fast Fourier transform, discrete Fourier transform, measurement application, acoustic measurement system, measurement of sound pressure with microphones, acoustic waves, Matlab playerRecorder, acoustic measurements using exponential harmonic sweep, far field.

NIMMERRICHTER, Benjamin. *Systém pro měření směrových charakteristik zdrojů zvuku*. Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2025. Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Schimmel, Ph. D.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení autora: Bc. Benjamin Nimmerrichter
VUT ID autora: 233023
Typ práce: Diplomová práce
Akademický rok: 2024/25
Téma závěrečné práce: Systém pro měření směrových charakteristik zdrojů zvuku

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno
.....
podpis autora*

* Autor podepisuje pouze v tištěné verzi.

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu doc. Ing. Jiřímu Schimmelovi, Ph.D. za průběžné konzultace a vhodné návrhy pro vylepšení aplikace a za přípravu zařízení bezodrazové komory pro průběžná kontrolní měření.

Obsah

Úvod	14
1 Problematika vyzářovacích charakteristik v akustice	15
1.1 Akustika	15
1.1.1 Blízké a vzdálené pole	15
1.1.2 Souřadnicový systém	16
1.1.3 Akustické veličiny	16
1.1.4 Vyjádření hodnot akustických veličin	16
1.1.5 Akustická bezodrazová komora	17
1.1.6 Směrová funkce	18
1.1.7 Směrová vyzářovací charakteristika	18
1.1.8 Činitel směrovosti	18
1.1.9 Modelování vyzářovací charakteristiky reproduktoru	19
1.1.10 Využití směrové vyzářovací charakteristiky	20
1.1.11 Reálná měření v akustice	21
1.2 Měření, zpracování a analýza akustických veličin	21
1.2.1 Efektivní hodnota signálu	21
1.2.2 Frekvenční analýza	22
1.2.3 Přenosová funkce zvukového zdroje	23
1.2.4 Impulzní odezva zvukového zdroje	23
1.2.5 Zlomkooktávová analýza	24
1.2.6 Mikrofony a kalibrace	24
2 Realizace softwarového řešení	25
2.0.1 Výhody a nevýhody číslicového zpracování signálů	25
2.0.2 Korelace a autokorelace	26
2.0.3 Diskrétní a rychlá Fourierova transformace	26
2.1 Aplikace pro měření	28
2.2 Podpůrné funkce	28
2.2.1 Výpočet efektivní hodnoty	29
2.2.2 Výpočet hladin signálů	29
2.2.3 Detekce limitace signálu	29
2.2.4 Detekce podporovaných nastavení ASIO rozhraní	29
2.3 Podrobný náhled na implementaci softwarových částí	30
2.3.1 Automatická kalibrace pomocí autokorelace	30
2.3.2 Nahrávání při měření synchronního zdroje	32
2.3.3 Nahrávání při měření asynchronního zdroje	33

2.3.4	Vyhodnocení dat při měření synchronního zdroje	34
2.3.5	Vyhodnocení dat při měření asynchronního zdroje	34
2.3.6	Ukládání a načítání hlavní části dat	34
2.3.7	Ošetření chyb a vstupů	35
2.4	Grafické uživatelské rozhraní	35
2.4.1	Záložka pro mapování mikrofونů	35
2.4.2	Záložka pro nastavení	37
2.4.3	Záložka pro kalibraci mikrofونů	38
2.4.4	Záložka pro měření	41
2.4.5	Záložka pro vykreslení výsledků	41
3	Měření	43
3.1	Měření pomocí jednoho mikrofونu na otočném rameni	43
3.1.1	Použité přístroje	43
3.1.2	Postup měření	44
3.1.3	Výsledky	44
3.2	Měření pomocí více mikrofونů na stojanu	45
3.2.1	Použité přístroje	45
3.2.2	Postup měření	46
3.2.3	Výsledky	46
3.3	Měření pomocí jednoho mikrofونu na otočném rameni	46
3.3.1	Použité přístroje	47
3.3.2	Postup měření	47
3.3.3	Výsledky	49
3.4	Měření pomocí více mikrofونů ve více polohách	49
3.4.1	Použité přístroje	49
3.4.2	Postup měření	50
3.4.3	Výsledky	51
	Závěr	52
	Literatura	53
	Seznam symbolů a zkratk	55
	Seznam příloh	58
	A Obsah elektronické přílohy	59

B	Výsledky měření graficky	60
B.1	První měření	60
B.2	Druhé měření	62
B.3	Třetí měření	68
B.4	Čtvrté měření	80

Seznam obrázků

1.1	Příklad směrové charakteristiky pro pístově kmitající kruhovou membránu	20
2.1	Spektrum zaznamenaného testovacího signálu	31
2.2	Oříznutá a normalizovaná autokorelační funkce, kde $N_P = 5$	32
2.3	Záložka mapování mikrofonů	37
2.4	Dialogové okno pro nastavení vlastních úhlů krokování	38
2.5	Záložka pro nastavení zařízení podporující technologii ASIO	39
2.6	Záložka pro kalibraci mikrofonů	40
2.7	Záložka pro měření	41
2.8	Záložka pro vykreslení výsledků	42
3.1	Přenos reproduktoru v závislosti na úhlu odklonu od akustické osy.	44
3.2	Měřený reproduktor od firmy Meyer Sound.	45
3.3	Zapojení a nastavení mikrofonů v mikrofonním zesilovači.	46
3.4	Mikrofonní soustava využitá pro druhé měření.	47
3.5	Měřený reproduktor od firmy EVENT.	48
3.6	Mikrofonní soustava využitá pro třetí měření.	48
3.7	Mikrofonní soustava využitá pro čtvrté měření.	49
3.8	Mikrofonní soustava využitá pro čtvrté měření detail.	50
B.1	Směrová vyzařovací charakteristika pro třetinooktávová pásma 10-15.	60
B.2	Směrová vyzařovací charakteristika pro třetinooktávová pásma 25-30.	60
B.3	Třetinooktávová analýza v akustické ose reproduktoru.	61
B.4	3D směrová vyzařovací charakteristika pro třetinooktávové pásmo č. 10.	62
B.5	3D směrová vyzařovací charakteristika pro třetinooktávové pásmo č. 10.	62
B.6	3D směrová vyzařovací charakteristika pro třetinooktávové pásmo č. 10.	63
B.7	3D směrová vyzařovací charakteristika pro třetinooktávové pásmo č. 25.	63
B.8	3D směrová vyzařovací charakteristika pro třetinooktávové pásmo č. 30.	64
B.9	3D směrová vyzařovací charakteristika pro třetinooktávové pásmo č. 30.	64
B.10	3D směrová vyzařovací charakteristika pro třetinooktávové pásmo č. 25.	65
B.11	3D směrová vyzařovací charakteristika pro třetinooktávové pásmo č. 30.	65

B.12 3D směrová vyzařovací charakteristika pro třetinooktávové pásmo č. 30.	66
B.13 3D směrová vyzařovací charakteristika pro třetinooktávové pásmo č. 25.	66
B.14 3D směrová vyzařovací charakteristika pro třetinooktávové pásmo č. 30.	67
B.15 3D směrová vyzařovací charakteristika pro třetinooktávové pásmo č. 30.	67
B.16 Kmitočtová odezva reproduktoru v elevaci 0° a různých azimutech. . .	68
B.17 Kmitočtová odezva reproduktoru v elevaci 5° a různých azimutech. . .	69
B.18 Kmitočtová odezva reproduktoru v elevaci 10° a různých azimutech. . .	69
B.19 Kmitočtová odezva reproduktoru v elevaci 20° a různých azimutech. . .	70
B.20 Kmitočtová odezva reproduktoru v elevaci 30° a různých azimutech. . .	70
B.21 Kmitočtová odezva reproduktoru v elevaci 40° a různých azimutech. . .	71
B.22 Směrová vyzařovací charakteristika pro měřený reproduktor pro nízké kmitočty v akustické ose.	71
B.23 Směrová vyzařovací charakteristika pro měřený reproduktor pro nízké kmitočty v elevaci 40°.	72
B.24 Směrová vyzařovací charakteristika pro měřený reproduktor pro vy- soké kmitočty v akustické ose.	72
B.25 Směrová vyzařovací charakteristika pro měřený reproduktor pro vy- soké kmitočty v elevaci 40°.	73
B.26 Trojrozměrná směrová vyzařovací charakteristika pro kmitočet 200 Hz, pohled zepředu.	73
B.27 Trojrozměrná směrová vyzařovací charakteristika pro kmitočet 200 Hz, pohled shora.	74
B.28 Trojrozměrná směrová vyzařovací charakteristika pro kmitočet 800 Hz, pohled zepředu.	74
B.29 Trojrozměrná směrová vyzařovací charakteristika pro kmitočet 800 Hz, pohled shora.	75
B.30 Trojrozměrná směrová vyzařovací charakteristika pro kmitočet 3150 Hz, pohled zepředu.	75
B.31 Trojrozměrná směrová vyzařovací charakteristika pro kmitočet 3150 Hz, pohled shora.	76
B.32 Trojrozměrná směrová vyzařovací charakteristika pro kmitočet 10 kHz, pohled zepředu.	76
B.33 Trojrozměrná směrová vyzařovací charakteristika pro kmitočet 10 kHz, pohled shora.	77

B.34 Trojrozměrná směrová vyzařovací charakteristika pro kmitočet 15,9 kHz, pohled zepředu.	77
B.35 Trojrozměrná směrová vyzařovací charakteristika pro kmitočet 15,9 kHz, pohled shora.	78
B.36 Třetinooktávová analýza měřeného reproduktoru v akustické ose. . . .	78
B.37 Třetinooktávová analýza ze zadní strany měřeného reproduktoru. . .	79
B.38 Třetinooktávová analýza měřeného reproduktoru v akustické ose. . . .	79
B.39 Měření energie signálu.	80
B.40 Měření energie signálu, výstup z aplikace.	81

Úvod

Tato diplomová práce navazuje na bakalářskou práci „Automatizace měření směrových vyzařovacích charakteristik zvukových zdrojů“ [1] a dále rozvíjí metody měření směrových charakteristik zvukových zdrojů s využitím grafického uživatelského rozhraní.

Práce se zabývá problematikou akustických měření, zejména určením směrových charakteristik zvukových zdrojů ve 2D a 3D prostoru. Součástí je zpracování témat jako je měření akustických veličin, přenosová funkce, spektrum signálu, impulzní odezva, efektivní hodnota signálu, hladina akustického tlaku a další základní akustické parametry. Důležitým prvkem je také automatická kalibrace mikrofonní soustavy pomocí autokorelačního algoritmu.

V softwarové části je navržena aplikace v prostředí Matlab s využitím nástrojů Audio Toolbox a App Designer, která umožňuje zlomkooktávovou a spektrální analýzu, měření a vykreslení směrových charakteristik do polárních a sférických grafů, kontrolu odstupů signálu od šumu (SNR), detekci limitace signálu, export měřených dat. Zvláštní pozornost je věnována správnému nastavení měřicího řetězce, zejména zesílení mikrofonních předzesilovačů tak, aby bylo dosaženo vysokého SNR bez přebuzení.

Řešen je i rozdíl mezi synchronními a asynchronními zdroji zvuku, včetně metod kontinuálního měření a zpracování dat po blocích. Měření synchronních zdrojů je prováděno pomocí plynule logaritmicky přeladovaného harmonického signálu (harmonic sweep). Pro širokopásmové měření je možné využít i šum dle normy ČSN EN 60268-5 [2].

Cílem této práce je navrhnout a realizovat komplexní systém pro měření směrových charakteristik zvukových zdrojů s možností statického i rotačního uspořádání mikrofónů. Návrh zahrnuje mechanickou, elektrickou a softwarovou část systému. Výsledná aplikace umožní efektivní měření, analýzu a vizualizaci získaných dat. Funkčnost systému bude ověřena praktickým měřením s využitím otočného systému Brüel & Kjaer typ 9640 a vybavení bezdrazové komory Ústavu telekomunikací FEKT VUT v Brně.

1 Problematika vyzařovacích charakteristik v akustice

Tato kapitola se zabývá problematikou, která je nutná pro řešení problematiky práce. Jsou zde uvedeny související teoretické základy akustiky, měření akustických veličin, zpracování a analýza signálů, specifika reálných měření oproti teoretickým předpokladům.

1.1 Akustika

Akustika je vědní obor zabývající se vznikem, šířením a vnímáním zvukových vln. Zvukové vlny jsou mechanický pohyb částic hmotného prostředí zvukového pole. Šíří se postupným vlněním pružného prostředí. Při zvukovém vlnění dochází k přenosu energie a hybnosti a nedochází k přenosu částic. Částicí rozumíme takové makroskopické, makroskopicky prostorově ohraničené množství tekutiny, u kterého je možné zanedbat vlivy vzájemného silového působení mezi molekulami a k jejich vzájemnému tepelnému (chaotickému) pohybu [3]. Toto zjednodušení dovolí vnímat a modelovat tekutiny jako matici hmotných bodů (částice) propojenými pružinami (pružné prostředí). Zvuk se v plynech šíří postupným podélným (longitudinálním) vlněním kdy je směr šíření rovnoběžný se směrem výchylky částic např. zhušťování a zředování částic ve vzduchu. V pevných látkách se zvukové vlnění šíří jak postupným podélným tak postupným příčným (transverzálním) vlněním, kdy je směr šíření kolmý k výchylce částic např. kmitání kytarové struny. Podmínkou pro vznik zvukového vlnění je pružné prostředí [3], [4], [5].

1.1.1 Blízké a vzdálené pole

V akustice se prostor kolem zdroje zvuku dělí na blízké pole (near field) a vzdálené pole (far field). Blízké pole je oblast nacházející se v těsné blízkosti zdroje zvuku, kde má zvuk složitou a nestabilní strukturu vlnění. V této zóně dochází k silné interakci mezi tlakem a rychlostí částic. Vzdálené pole začíná ve větší vzdálenosti od zdroje, kde se akustické vlny šíří stabilněji a lze je považovat za kulové nebo rovinné. V této oblasti se intenzita zvuku snižuje úměrně druhé mocnině vzdálenosti a fázový vztah mezi tlakem a rychlostí částic je ustálený. Hranice mezi blízkým a vzdáleným polem závisí na frekvenci zvuku a rozměrech zdroje.

Hranice mezi blízkým a vzdáleným polem závisí na rozměrech akustického zdroje, nejčastěji jeho průměru (např. membrány reproduktoru), a na vlnové délce zvuku. Často se využívá odhad pomocí vzorce (1.1)

$$r \approx \frac{2d^2}{\lambda}, \quad (1.1)$$

kde r je přibližná vzdálenost, za kterou začíná vzdálené pole, d je průměr zdroje (např. membrány reproduktoru), λ je vlnová délka zvuku.

1.1.2 Souřadnicový systém

Měření probíhá tak, že je zdroj zvuku na počátku souřadnicového systému a zvuk se z něj šíří od počátku všemi směry s různou intenzitou. Proto pro analýzu měření ve zvukovém poli je vhodné využít ve 2D polární a ve 3D sférické (kulové) souřadnice, popř. realizovat výpočty v polárních nebo sférických souřadnicích a výsledné hodnoty převést do kartézského systému souřadnic. Body v tomto souřadnicovém systému jsou definovány pomocí tří souřadnic, a to azimutu, elevace a vzdálenosti od počátku. Určení počátku azimutu a elevace (referenční osu) pro měření vyzařovacích charakteristik je nejvhodnější v akustické ose zvukového zdroje, pokud ji lze definovat. Například u vícepásmového reproduktoru je to směr vyzařování výškového měniče. [6]

1.1.3 Akustické veličiny

Mezi základní akustické veličiny patří akustická rychlost, tlak a výchylka, dále akustický výkon a intenzita. Akustický tlak p je v akustice nejčastěji využívaná veličina, protože je ji možné nejlépe a s nejmenší chybou měřit. Představuje v místě určeném polohovým vektorem \mathbf{r} časově proměnnou složku celkového tlaku p_c [3], [5]. Akustický tlak je popsán vztahem (1.2)

$$p(t, \mathbf{r}) = p_c(t, \mathbf{r}) - p_{00}(\mathbf{r}), \quad (1.2)$$

kde $p(t, \mathbf{r})$ je časově proměnná složka celkového tlaku (akustický tlak) a $p_{00}(\mathbf{r})$ je statický (barometrický) tlak.

1.1.4 Vyjádření hodnot akustických veličin

Pro vyjádření hodnot veličin je možné vypočítat hladiny. Pro výpočet hladiny výkonu je použit vztah (1.3)

$$L_P = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P}{P_{ref}} \right), \quad (1.3)$$

kde L_P je výsledná hladina výkonové veličiny, P je měřený výkon a P_{ref} je referenční výkon.

Nyní je důležité si uvědomit, že u L_P je napsáno, že je to hladina **výkonové** veličiny. To znamená, že je třeba při výpočtu umocnit výchylkovou veličinu na druhou. Zde je využito věty o logaritmech v logaritmu a exponent je přesunut před logaritmus. Dostaneme vztah (1.4)

$$L_u = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{u}{u_{ref}} \right), \quad (1.4)$$

kde L_u je výsledná hladina výchylkové veličiny, u je měřená veličina a u_{ref} je referenční veličina.

Příklady akustických výkonových veličin jsou akustický výkon a intenzita. Pro tyto veličiny je využíván vztah (1.3). Příklady akustických výchylkových veličin jsou akustická rychlost, výchylka a tlak. Pro tyto veličiny je využíván vztah (1.4). Pro dosažení platného výsledku je nutné využít správný vztah pro daný typ veličiny.

Jsou dva způsoby jak využít hladiny veličin a to relativně ke hladině vstupní veličiny, nebo pomocí referenční hodnoty. Hladiny počítané relativně ke hladině vstupní veličiny se značí dB a je tím myšleno relativní zesílení nebo relativní útlum veličiny, znamená to, že vyšší hladina značí vyšší relativní hodnotu veličiny. Hladiny počítané s referenční hodnotou mají speciální značení. Jsou díky dané referenční hodnotě ukotveny k určité konvenčně známé hodnotě veličiny, znamená to že vyšší hladina znamená vyšší absolutní hodnotu veličiny. [6]

V této práci je zobrazena hladina akustického tlaku měřena v **dB(SPL)**, která je určena relativně k akustickému tlaku minimálního prahu slyšení v okolí kmitočtu 1 kHz a to $2 \cdot 10^{-5}$ Pa. Další hladina, která je vyjádřena v **dBFS**, kde FS je zkratka “full scale”. Nula dBFS je maximální dosažitelná hladina v digitálních systémech s pevnou řádovou čárkou a záporné hodnoty značí nižší hladiny. Toto dovoluje využívat různé datové typy s různým dynamickým rozsahem a jediné co se změnilo je nejnižší dosažitelná hladina. Pro 16 bitový systém je to přibližně -96 dBFS a pro 24 bitový systém je to přibližně -144 dBFS. Toto vychází z principu, že zvýšení bitové hloubky sníží míru relativní chyby, kvůli přesnější kvantizaci.

1.1.5 Akustická bezodrazová komora

Existuje více typů bezodrazových komor, které jsou určeny pro různé oblasti měření – například elektromagnetické bezodrazové komory pro testování rádiových vln a elektromagnetické kompatibility (EMC), nebo optické bezodrazové prostory používané v oblasti fotoniky. Proto je důležité specifikovat, že se zde jedná o akustickou bezodrazovou komoru.

Akustická bezodrazová komora je speciálně navržený prostor určený k eliminaci odrazů zvukových vln od stěn, stropu a podlahy. Vnitřní povrchy komory jsou pokryty vysoce pohlcujícími materiály, často ve tvaru klínů z akustické pěny, které efektivně pohlcují dopadající zvuk a zabraňují jeho odrazu zpět do prostoru.

Bezodrazová komora simuluje nekonečně velký prostor, ve kterém je umístěn měřený zvukový zdroj. Je často izolována i proti vnějšímu hluku, čímž vytváří prostředí s minimálním akustickým rušením. Akustické bezodrazové komory se používají především pro přesná měření akustických vlastností materiálů, reproduktorů nebo mikrofónů, protože v takto „neodrazivém“ prostředí lze spolehlivě měřit pouze přímý zvuk bez vlivu odrazů, dozvuku nebo vnějšího šumu. To umožňuje provádět vysoce přesné a opakovatelné akustické testy. [7]

1.1.6 Směrová funkce

Směrová funkce je matematický popis závislosti hladiny akustického tlaku měniče (tzn. mikrofónu nebo reproduktoru) v závislosti na úhlu odklonu od referenční osy (většinou shodná s akustickou osou). Směrová funkce je funkcí úhlů azimutu ϕ a elevace θ . Je značena jako $D(\theta, \phi)$, kde ϕ je úhel azimutu měřený od akustické osy (referenčního směru) v horizontální rovině (0° až 360°) a θ je vertikální úhel měřený od horizontální roviny (-90° až $+90^\circ$).

1.1.7 Směrová vyzařovací charakteristika

Směrová vyzařovací charakteristika zvukového zdroje je závislá na azimutu ϕ a elevaci θ ve sférických souřadnicích. Směrová charakteristika popisuje rozložení hladiny akustického tlaku v prostoru vzhledem k těmto úhlům. Tuto charakteristiku lze popsat jako grafické znázornění směrové funkce v závislosti na úhlu odklonu od referenční osy pro měniče, u kterých je směrová funkce známá. Vyzařovací charakteristika je běžně znázorňována polárními nebo sférickými grafy. [4]

1.1.8 Činitel směrovosti

Činitel směrovosti Q v akustice charakterizuje směrové vlastnosti zvukového zdroje tzn. vyjadřuje poměr intenzity zvuku v daném směru k intenzitě zvuku, který by zdroj vyzařoval rovnoměrně ve všech směrech (tzn. jako ideální bodový zdroj o stejném výkonu). Činitel směrovosti se určuje ve směru akustické osy. Lze jej vypočítat pomocí (1.5)

$$Q = \frac{I(\theta, \phi)}{I_{\text{BZ}}} = \frac{p_{\text{ef}}^2(\theta, \phi)}{p_{\text{efBZ}}^2}, \quad (1.5)$$

kde $I(\theta, \phi)$ je intenzita zvuku v určitém směru, která je určena směrovou charakteristikou zdroje, I_{BZ} je průměrná intenzita zvuku vyzařovaná do celého prostoru ekvivalentní k intenzitě vyzařování ideálního bodového zdroje (BZ) o stejném výkonu, $p_{\text{ef}}(\theta, \phi)$ je efektivní hodnota akustického tlaku v určitém směru a p_{efBZ} je průměrná intenzita vyzařovaná do prostoru.

Výsledná hodnota činitele směrovosti závisí na frekvenci zvuku a tvaru vyzařovací plochy. Vyšší hodnoty Q znamenají užší vyzařovací laloky, jejich vyšší počet a silnější směrovost zvuku. Činitel směrovosti souvisí také s indexem směrovosti DI , který je vyjádřen v decibelech a lze jej vypočítat pomocí vztahu (1.6)

$$DI(\theta, \phi) = 10 \log_{10} Q(\theta, \phi), \quad (1.6)$$

Činitel směrovosti je klíčový parametr při návrhu reproduktorů, mikrofonů nebo akustických odrazových ploch, kde hraje zásadní roli kontrola nad směrem vyzařování zvuku. [4]

1.1.9 Modelování vyzařovací charakteristiky reproduktoru

Vyzařování reproduktoru je možné modelovat pomocí řešení vlnové rovnice pro pístově kmitající kruhovou membránu. Tato membrána je umístěna do nekonečně tuhé rovinné stěny, která zabraňuje šíření vln z jedné strany pístu ke druhé (zabraňuje tzv. akustickému zkratu) [3], [4]. Směrová funkce pístově kmitající membrány je definována pomocí vztahu (1.7)

$$D(\theta) = 2 \cdot \frac{J_1(kR \sin \theta)}{kR \sin \theta}, \quad (1.7)$$

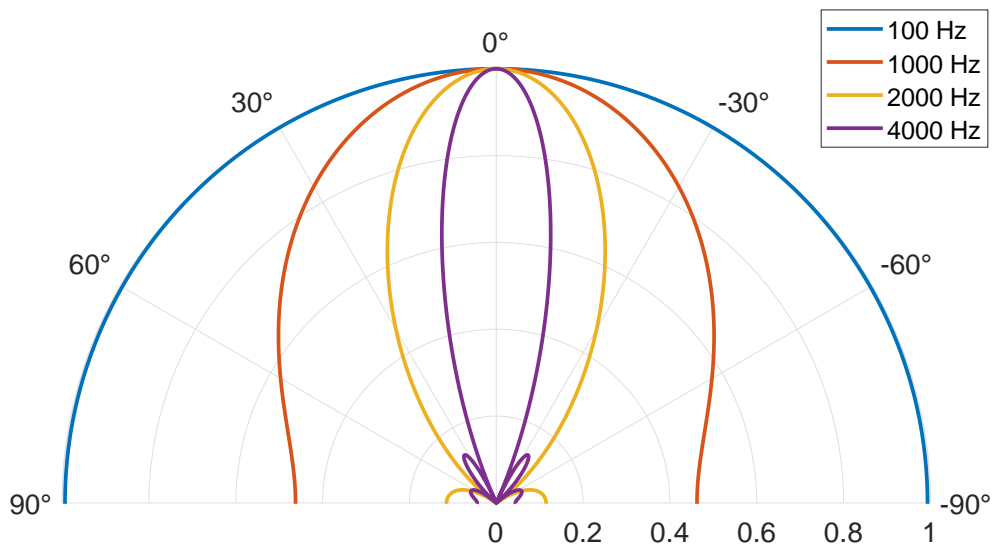
kde θ je úhel od osy pístu, J_1 je Besselova funkce 1. druhu a 1. řádu, R je poloměr membrány a k je vlnové číslo.

Vlnové číslo k určuje prostorovou periodicitu zvukového vlnění a je definováno vztahem (1.8)

$$k = \frac{2\pi f}{c_0}, \quad (1.8)$$

kde f je frekvence a c_0 je rychlost šíření zvuku v daném prostředí.

Příklad směrové charakteristiky pro různé kmitočty pístově kmitající kruhové membrány viz Obr. 1.1



Obr. 1.1: Příklad směrové charakteristiky pro pístově kmitající kruhovou membránu o poloměru $R = 12,7$ cm, což je ekvivalent reproduktoru o průměru 10 palců pro různé kmitočty

1.1.10 Využití směrové vyzařovací charakteristiky

Jak již bylo řečeno v podkapitole 1.1.7, směrová vyzařovací charakteristika popisuje rozložení hladiny akustického tlaku v okolí zvukového zdroje. Tato informace je klíčová v mnoha oblastech akustiky a elektroakustiky.

Při návrhu reproduktorů a reproduktorových systémů se využívá k optimalizaci směrovosti zvuku, aby bylo dosaženo rovnoměrného pokrytí prostoru a minimalizace odrazů od stěn.

V telefonii a návrhu mikrofonních či sluchátkových systémů slouží měření vyzařování k přesnému zhodnocení kvality přenosu hlasu do ucha a potlačení nežádoucího šumu. V simulacích akustického prostředí (např. v automobilovém průmyslu, při návrhu koncertních sálů nebo při vývoji počítačových her) se směrové charakteristiky používají k modelování šíření zvuku a jeho interakce s prostředím.

Kromě toho jsou důležité také pro měření a testování akustických zařízení, kde umožňují objektivní srovnání vlastností různých zdrojů zvuku. Pokud je směrová vyzařovací charakteristika zaznamenána pro stejný kmitočet pro různé zdroje, je možné simulovat jejich interakci ve vzdáleném poli a navrhovat lepší akustická řešení.

[7]

1.1.11 Reálná měření v akustice

Reálná měření jsou v akustice zatížena chybami, které nelze odstranit. Největší chyby měření při dodržení správného postupu jsou způsobeny odrazy od překážek jako např. mikrofonní rameno, zařízení v bezodrazové komoře a stojany na mikrofony. Žádná bezodrazová komora není ideální, není plně zamezeno všem odrazům v celém akustickém pásmu.

Dále je měření zatíženo na vstupní straně nelinearitami a chybami mikrofonů, zesilovačů a A/D převodu. Na výstupní straně je měření zatíženo nelinearitami a chybami reproduktoru, zesilovače reproduktoru a D/A převodu. U reproduktoru se zvyšuje nelinearita v závislosti na velikosti výchylky membrány. Akustické prostředí také není lineární, pro malé výchylky ale můžeme zjednodušit prostředí na lineární. Všechny tyto aspekty limitují přesnost měření v akustickém poli. Většina matematických vztahů uvedených v této práci platí pouze s předpokladem lineárního prostředí např. předpoklad toho, že platí princip superpozice.

Dále je měření zatíženo na vstupní straně nelinearitami a chybami mikrofonů, zesilovačů a A/D převodu. Na výstupní straně je měření zatíženo nelinearitami a chybami reproduktoru, zesilovače reproduktoru a D/A převodu. U reproduktoru se zvyšuje nelinearita v závislosti na velikosti výchylky membrány. Akustické prostředí také není lineární, pro malé výchylky ale můžeme zjednodušit prostředí na lineární. Zároveň se předpokládá, že akustické děje ve vzduchu jsou adiabatické, což znamená, že během šíření zvuku nedochází k výměně tepla mezi částicemi vzduchu. Všechny tyto aspekty limitují přesnost měření v akustickém poli. Většina matematických vztahů uvedených v této práci platí pouze s předpokladem lineárního prostředí, např. předpokladem toho, že platí princip superpozice. [6]

1.2 Měření, zpracování a analýza akustických veličin

Pro získání dat je třeba převést okamžitou hodnotu akustického tlaku nebo jeho derivace (dle řádu přijímače) na okamžitou hodnotu napětí. Toto napětí se poté diskretizuje v čase (vzorkování) a také v jeho hodnotách (kvantizace). Tento výsledný signál se dále zpracovává způsoby, které jsou popsány v této části práce. Pro zpracování diskretních signálů se často využívají numerické metody výpočtů a diskretní transformace.

1.2.1 Efektivní hodnota signálu

Efektivní hodnota signálu, je veličina používaná k popisu střídavého signálu. Udává ekvivalentní stejnosměrnou hodnotu, která by měla stejný výkonový účinek, jako

daný střídavý signál [6]. Efektivní hodnotu periodického signálu lze vypočítat pomocí (1.9)

$$U_{\text{ef}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt}, \quad (1.9)$$

kde $u(t)$ je okamžitá hodnota signálu v daném časovém okamžiku a T je jedna perioda signálu. Při výpočtu efektivní hodnoty pro signály, které jsou stochastické nebo jsou deterministické, ale neharmonické je T definováno jako interval výpočtu, protože nelze určit periodu. Při prodlužování intervalu dochází k průměrování vlastností signálu. Výsledek U_{ef} v tomto případě je efektivní hodnota v intervalu T

Pro výpočet efektivní hodnoty číslicového signálu musíme upravit výpočet vztahu (1.9). Vypadá potom takto (1.10)

$$U_{\text{ef}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N u^2[n]}, \quad (1.10)$$

kde U_{ef} je efektivní hodnota číslicového signálu, $u[n]$ je vzorek signálu s indexem n a N je celkový počet vzorků v jednom okně.

Pro výpočet efektivní hodnoty ze spektrálních koeficientů je využit vztah (1.16).

1.2.2 Frekvenční analýza

Pro frekvenční analýzu se využívá Fourierova transformace, převede signál z časové domény do kmitočtové. Tato transformace se využívá pro analýzu jednotlivých harmonických složek signálu a jejich amplitud a fáze [8], [9]. Fourierova transformace je definována pomocí (1.11).

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} dt, \quad (1.11)$$

kde $X(f)$ je Fourierova transformace signálu $x(t)$, f je frekvence, t je čas a j je imaginární jednotka.

Inverzní Fourierova transformace je definována vztahem (1.12)

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f) e^{j2\pi ft} df, \quad (1.12)$$

kde $x(t)$ je původní signál, rekonstruovaný pomocí inverzní Fourierovy transformace.

1.2.3 Přenosová funkce zvukového zdroje

Přenosová funkce popisuje chování lineárního časově invariantního (LTI) systému ve frekvenční oblasti. Udává, jaký vliv má systém na různé frekvence vstupního signálu, a je definována jako podíl výstupního a vstupního signálu v komplexní frekvenční doméně (např. pomocí Fourierovy nebo Laplaceovy transformace). V akustice přenosová funkce popisuje například to, jak místnost, mikrofon nebo reproduktor ovlivňuje spektrum akustického signálu, který je do daného systému přiveden – tedy jaké frekvence zesiluje, potlačuje nebo fázově posouvá. Absolutní hodnota $|H(s)|$ přenosové funkce určuje zesílení (útlum) modulu jednotlivých frekvencí, zatímco její argument (fáze) $\arg(H(s))$ popisuje fázový posun. Znalost přenosové funkce umožňuje předvídat odezvu systému na libovolný vstupní signál pomocí spektrální analýzy [8], [9].

Pro určení přenosové funkce systému je využit vztah (1.13)

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)}, \quad (1.13)$$

kde $H(s)$ je přenosová funkce systému, $X(s)$ je Laplaceova transformace vstupního signálu a $Y(s)$ je Laplaceova transformace výstupního signálu. Proměnná s označuje komplexní frekvenční proměnnou $s = \sigma + j\omega$.

Frekvenční odezva systému (pro kmitočtovou analýzu) se z přenosové funkce určuje pomocí vztahu (1.14)

$$H(j\omega) = H(s)|_{s=j\omega}, \quad (1.14)$$

kde $s = \sigma + j\omega$ a pro frekvenční odezvu je $\sigma = 0$.

Zde je důležité dodat, že tento vztah platí pouze pro lineární časově invariantní systémy, což znamená, že zde dochází ke zjednodušení a k nepřesnostem. Přenosová funkce určena mezi vstupním a výstupním signálem, takže zahrnuje i přenos A/D, D/A převodníků, zesilovačů a měřících mikrofonů, které do výsledného měření vnášejí nepřesnosti.

1.2.4 Impulzní odezva zvukového zdroje

Impulzní odezva $h(t)$ zcela popisuje chování lineárního časově invariantního systému v časové doméně. Umožňuje určit výstupní signál pro libovolný vstup pomocí konvoluce. V praxi představuje časovou reakci systému na jednotkový impulz, což je velmi užitečné například při akustické analýze prostorů nebo při kalibraci zvukových zařízení [7]. Z frekvenční odezvy $H(j\omega)$ lze impulzní odezvu získat pomocí inverzní Fourierovy transformace (1.12) [8], [9]. Impulzní odezva je vyjádřena pomocí (1.15)

$$h(t) = \mathcal{F}^{-1}[H(\omega)], \quad (1.15)$$

kde $h(t)$ je impulzní odezva systému a $H(\omega)$ je přenosová funkce systému.

1.2.5 Zlomkooktávová analýza

Zlomkooktávová analýza dělí kmitočtové spektrum na pásma o šířce zlomků oktáv. Pásmo se typicky dělí na celé oktávy, třetiny oktávy, šestiny oktávy a dvanáctiny oktávy (jedno pásmo na půltón). V této práci je získána určením efektivní hodnoty všech koeficientů spektra pro dané kmitočtové pásmo. Použijeme vztah (1.16)

$$X_{ef} = \sqrt{\frac{4}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_k^2}, \quad (1.16)$$

kde X_{ef} je efektivní hodnota signálu, X_k je spektrální koeficient, N značí počet koeficientů pro dané zlomkooktávové pásmo.

Číslo 4 je zde doplněno, protože se pro výpočet využívá pouze kladná část spektra. Při Fourierově transformaci se rozloží spektrum na stejnosměrnou složku a kladné a záporné spektrální koeficienty, kde velikost koeficientu značí jednu polovinu amplitudy spektrální složky rozkládaného signálu. Z tohoto důvodu je nutné vynásobit vypočítanou efektivní hodnotu dvěma. [4]

1.2.6 Mikrofony a kalibrace

Při měření akustických veličin pomocí mikrofونů je nutno určit převodní konstantu mezi akustickým tlakem a napětím na výstupu mikrofону. Tento úkon se nazývá justování. Justování je při měřeních v této práci realizováno pomocí akustického kalibrátoru, který při nasunutí na mikrofon přehrává tón o frekvenci 1 kHz s přesnou hladinou akustického tlaku. Efektivní hodnota napětí signálu, který je měřen při nasazení spuštěného kalibrátoru na mikrofon, se využívá jako referenční hodnota ve vztahu (1.4). K výsledné změřené hladině napětí je třeba přičíst hodnotu 94, protože referenční hodnota je získána z efektivní hodnoty napětí signálu, který má hladinu akustického právě 94 dB(SPL). [6]

2 Realizace softwarového řešení

Tato kapitola je věnována realizaci praktické části diplomové práce a měřením, která následovala. Je zde zpracována problematika vývoje aplikace pro měření akustického tlaku, zpracování signálů v praxi, vývoj grafické aplikace, vykreslování směrových vyzařovacích charakteristik, výpočtu efektivní hodnoty signálu a výpočtu hladiny akustického tlaku.

Pro komunikaci s hardwarovými komponenty a zpracování získaných dat bylo třeba vytvořit softwarové řešení. V rámci semestrální práce je nejdůležitější komunikace se zvukovými rozhraními podporující technologii ASIO. Pro vývoj softwarového řešení byl využit software MATLAB a jeho součást pro vytváření grafických aplikací App Designer.

Vyvinutá aplikace bude dále upravována a rozšiřována podle požadavků Ústavu telekomunikací VUT v Brně, a to pro účely výuky, experimentálních měření a výzkumných aktivit.

Softwarové řešení této diplomové práce je dostupné ve veřejném repozitáři na GitHubu: <https://github.com/benjamin-nimmerrichter/SMDRSS>

Matematické vztahy uvedené v teoretické části práce je nutné přizpůsobit pro praktické využití a algoritmizaci. Veškeré výpočty v aplikaci totiž pracují s číslicovými signály, což vyžaduje úpravu používaného matematického aparátu.

2.0.1 Výhody a nevýhody číslicového zpracování signálů

Číslicové zpracování signálu (Digital Signal Processing, DSP) má řadu výhod i nevýhod. Mezi výhody patří především nedestruktivní zpracování, to znamená, že digitální signál lze upravovat, analyzovat a přenášet bez degradace kvality způsobené zpracováním, šumem nebo ztrátami, které se běžně vyskytují u analogových systémů.

Dále je možné dosáhnout vysoké přesnosti a flexibility – algoritmy lze snadno upravovat a implementovat pomocí softwaru, a díky tomu se snadno přizpůsobují specifickým požadavkům. Digitální systémy navíc umožňují složité a opakovatelné operace, jako je filtrování, komprese nebo spektrální analýza. Jako příklad, kde je číslicové řešení více vhodné než analogové lze uvést filtry s řádem vyšším než šest až osm [10]. U analogových filtrů vyššího řádu se projevují problémy jako citlivost na přesnost součástek (výrobní tolerance), nestabilita nebo fázové zkreslení. S rostoucím řádem je obtížné udržet přesné frekvenční vlastnosti, zvláště při snaze o strmý přechod mezi propustným pásmem a zádržným pásmem. Tyto komplikace dělají analogovou realizaci náročnou. [8], [9]

Mezi hlavní nevýhody patří skutečnost, že signál musí být diskretizován, tedy převeden z analogové do číslicové podoby. Toto může vést ke ztrátě informace, pokud není zvolen dostatečný vzorkovací kmitočet a bitová hloubka kvantizace pro danou aplikaci. Tento převod zároveň vyžaduje A/D a D/A převodníky, které musí být dostatečně přesné, aby nahrály vstupní a poté reprodukovaly zpracovaný výstupní signál s dostatečnou přesností.

Další nevýhodou je vyšší energetická náročnost a (nevyhnutelné) zpoždění při zpracování signálů, zvláště u složitějších algoritmů nebo pro zpracování v reálném čase [8], [9].

2.0.2 Korelace a autokorelace

Vztah pro korelaci dvou spojitých signálů je definována rovnicí (2.1) [8]

$$R_{XY} = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) \cdot y(t + \tau) d\tau = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau - t) \cdot y(\tau) d\tau, \quad (2.1)$$

kde R_{XY} je výsledná funkce korelace, x a y jsou vstupní signály, které jsou mezi sebou korelovány, τ je vzájemný posuv signálů a t je čas.

Zde vidíme, že nezáleží na tom, který signál je závislý na čase a který se posouvá pomocí posuvu τ . Zjednodušeně stačí dodržet relativní směr vzájemného posuvu jednotlivých vzorků signálů. Autokorelace je korelace jednoho signálu se sebou samým, je značena pomocí R_{XX} . Protože pracujeme s diskrétními hodnotami a s konečným počtem diskrétních hodnot je třeba minulý vztah (2.1) upravit na (2.2) [8]

$$R_{XX} = \sum_{m=0}^{N-1} x[m] \cdot x[(m+n)_{\text{mod}(N)}] = \sum_{m=0}^{N-1} x[(m-n)_{\text{mod}(N)}] \cdot x[m], \quad (2.2)$$

kde R_{XX} je výsledná funkce autokorelace, x je vstupní signál, m je vzájemný posuv signálů, n je index vzorku a N je délka autokorelace.

Tady je důležité upozornit, že se v tomto případě jedná o kruhovou korelaci, takže délka korelační funkce je stejná jako délka kratšího signálu. Pokud chceme stejným vztahem vypočítat vzájemnou korelaci je třeba prodloužit kratší signály na stejnou délku jako je délka druhého signálu. Tento krok zajistí takovou délku korelační funkce, že nebude aplikován operátor $\text{mod}(N)$, což je v případě autokorelace intrinzičky zajištěno [8], [9].

2.0.3 Diskrétní a rychlá Fourierova transformace

Zaznamenané signály jsou v číslicové podobě, to znamená, že pro výpočet frekvenční spektra signálu je nutné použít diskrétní Fourierovu transformaci. Vstupem

pro diskretní Fourierovu transformaci je konečný signál, který nemusí mít diskretní hodnoty, ale musí být diskretní v čase. Výstupem transformace je periodicky se opakující frekvenční spektrum. Vztah pro Fourierovu transformaci pro spojitě reálné signály, získán úpravou vztahu (1.11), je definován jako (2.3) [9]

$$X(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} u(t) \cdot e^{j\omega t} dt, \quad (2.3)$$

kde $X(\omega)$ je frekvenční spektrum, $u(t)$ je časový průběh signálu.

Zlomek $1/2\pi$ se používá k normování; při zpracování signálu Fourierovou transformací je třeba normovat výsledek transformace na jednu periodu, aby se neakumulovaly opakované periody do spektra a bylo možné správně odečíst jejich modul. Normalizaci lze provést buď u Fourierovy transformace nebo u zpětné Fourierovy transformace. To, kdy je třeba provést normalizaci se určuje dle toho, zda je potřeba při spektrální analýze odečítat modul jednotlivých harmonických složek nebo zda je potřeba rekonstruovat signál v časové doméně se správným modulem. Při dodržení tohoto postupu je možné signál transformovat z časové do frekvenční domény a zpátky bez jakékoli změny. Stejně jako u korelace je třeba využít numerické metody pro úpravu vztahu pro diskretní signály s omezenou délkou. Po této úpravě získáváme algoritmus diskretní Fourierovy transformace (DFT) (2.4) [9]

$$X_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \cdot e^{j2\pi \frac{k}{N} n}, \quad (2.4)$$

kde X_k je k -tý koeficient diskretní Fourierovy transformace, N je délka transformace, $x[n]$ je vzorek časového průběhu signálu.

Zde je normalizace upravena na $1/N$ a platí zde stejné principy jako u normalizace spojitě Fourierovy transformace. Výsledkem je diskretní série komplexních koeficientů, které mají velikost $|X_k|$ odpovídající polovině amplitudy harmonických složek a obsahují informaci o fázi harmonických složek $\arg(X_k)$. U Fourierovy transformace platí princip neurčitosti. Pro nekonečně přesné určení frekvence jednotlivých složek je třeba nekonečně dlouhý signál. Neurčitost vzniká, protože jsou vlastnosti signálu zprůměrovány pro interval, ve kterém se počítá spektrum. Princip neurčitosti říká, že čím kratší je funkce, kterou transformujeme v časové doméně, tím širší je její spektrum ve frekvenční doméně, a naopak.

Frekvenční nejistota DFT časově omezeného signálu má velikost $\pm f_s/2N$. Vidíme, že čím menší je poměr vzorkovací frekvence f_s ku délce transformace N , tím menší je šířka pásma spektrálního koeficientu. Tento děj vychází ze zmiňovaného principu neurčitosti. Prodloužením vzorkovací periody se zároveň prodlužuje časový interval, ve kterém se mohly vlastnosti signálu změnit. To znamená, že je možné

se stejným počtem vzorků určit přesněji frekvenci, než u signálů s kratší vzorkovací periodou. Zde asi má i smysl dodat, že je potřeba dodržet Shannon-Kotělnik-Nyquistův vzorkovací teorém při volbě f_s , aby při spektrální analýze nedocházelo k aliasingu, je třeba zvolit i správný antialiasingový filtr.

Rychlá Fourierova transformace, zkráceně FFT, je algoritmus, který je vysoce optimalizovaný a slouží k výpočtu diskrétní Fourierovy transformace. Výpočet vyžaduje malý výpočetní výkon a lze jej využívat i na zařízeních s nízkým výpočetním výkonem popř. na zařízeních, která kladou vysoký nárok na rychlost výpočtu. [8], [9].

Nakonec je ještě vhodné vysvětlit, že v prostředí MATLAB se pro výpočet DFT využívá funkce `fft()`, která pro signály o délce $N = 2^k$ (kde k je celé číslo větší než nula) pro výpočet používá algoritmus FFT a pro jiné délky signálů používá obecnou diskrétní Fourierovu transformaci bez upozornění uživatele. Tato znalost je užitečná při revizi a úpravách programu.

2.1 Aplikace pro měření

Je hlavním výstupem diplomové práce pro automatizované měření směrových vyzařovacích charakteristik zvukových zdrojů. Aplikace, která byla vyvinuta se nazývá SMDRSS (čteno jako jméno Smithers) je to akronym prvních písmen názvu této práce v angličtině. Součástí aplikace je vhodně rozložené uživatelské rozhraní. Zde byl kladen důraz na to, aby uživatel nebyl přehlcen prvky rozhraní. Je zde omezen počet tlačítek. Nejsou zde k dispozici ovládací prvky, u kterých by při použití nastala chyba, protože neprovedl potřebné kroky pro ovládání rozhraní. Rozložení záložek je postupné podle pořadí, ve kterém se používají. Je také nutné splnit požadavky aktuální záložky, než je možné pokračovat na záložku další. Pokud uživatel resetuje nastavení v záložce kalibrace, automaticky se vypnou ovládací prvky záložky měření. V návrhu uživatelského rozhraní je brán ohled na intuitivní a jednoduché ovládání. Uživateli není dovoleno nastavovat parametry, které lze nastavit nebo získat automaticky. Díky tomuto přístupu je ovládání zjednodušeno.

2.2 Podpůrné funkce

Součástí návrhu softwarového řešení je sada podpůrných funkcí, které zajišťují konzistentní chování systému, usnadňují ladění a údržbu kódu, zvyšují čitelnost hlavní logiky programu a abstrahují opakující se nebo technicky specifické operace.

2.2.1 Výpočet efektivní hodnoty

Funkce `rms_calc_2()` se využívá pro výpočet efektivní hodnoty signálu dle vztahu (1.10) pro signály v časové doméně nebo dle vztahu (1.16) pro spektrální koeficienty signálu (ve frekvenční doméně). Lze ji použít na výpočet jak vektorů tak 2D matic. Lze ji také využít pro matice vzorků jak z jednokanálového tak z vícekanálového měření.

2.2.2 Výpočet hladin signálů

Funkce `calc_db()` slouží k výpočtu hladin signálů. Má k dispozici dva režimy. První režim slouží k výpočtu poměru dvou veličin v dB. Druhý je nastaven na výpočet hladiny akustického tlaku v dB(SPL) v závislosti na referenční hodnotě získané při kalibraci. Pro oba výpočty je využít vztah (1.4).

2.2.3 Detekce limitace signálu

Funkce `clip_detect()` detekuje překročení maximální dovolené hodnoty signálu, neboli limitaci signálu. Limitace signálu způsobuje zkreslení. Kdyby pro měření nebyla využita tato funkce, mohla by nastat situace, kdy je signál omezen, a měření by bylo chybné a nepoužitelné. Tato detekce počítá množství vzorků, které překročily práh dynamické rezervy. Pokud překročí maximální hladinu jeden vzorek, je zkreslení malé nebo žádné v závislosti na nastavení dynamické rezervy. Proto má tento skript dovoleno několik překročení maximální hodnoty signálu. Testování tohoto skriptu ukázalo, že na zvukovém rozhraní se rozsvítí kontrolka “clip” při velmi podobném zesílení signálu, jako když tento skript detekuje limitaci signálu při nastavení dynamické rezervy na -3 dBFS.

2.2.4 Detekce podporovaných nastavení ASIO rozhraní

Funkce `devices_and_support()` slouží k získání všech dostupných ASIO rozhraní a ověření jejich parametrů. Jelikož tento proces trvá delší dobu, využívá se mezipaměť, která provádí nové ověření pouze v případě detekované změny hardwaru. Funkce zjišťuje podporované velikosti vyrovnávací paměti a vzorkovací frekvence, čímž zajišťuje, že uživatel nemůže zvolit nastavení, které dané rozhraní nepodporuje. Ověření probíhá při prvním spuštění aplikace nebo při změně připojených ASIO zařízení.

2.3 Podrobný náhled na implementaci softwarových částí

Tato podkapitola se věnuje podrobnému popisu funkcionality a implementačních detailů jednotlivých částí. Následující části aplikace si vyžádaly rozsáhlý vývoj, aby splňovaly požadavky kladené na měřicí software.

2.3.1 Automatická kalibrace pomocí autokorelace

Automatická kalibrace je klíčovou funkcí aplikace, která výrazně zkracuje dobu potřebnou pro kalibraci celého systému. Spuštění detekce frekvence je realizováno pomocí detekce špičkové hodnoty každého kanálu měřeného signálu. Pokud tato úroveň překročí -40 dBFS, je pomocí autokorelačního algoritmu detekována frekvence signálu. Pokud úroveň nepřekročí tuto mez, je signál ignorován. Tím se snižuje riziko detekce frekvence, která by mohla chybně dokončit kalibraci daného kanálu.

Kalibrační tón z jakéhokoliv akustického kalibrátoru bude vždy dominantním tónem, což zvyšuje přesnost algoritmu pro detekci frekvence. Ověření funkčnosti tohoto postupu bylo provedeno analýzou zkušební nahrávkou se spektrem (viz obr. 2.1).

Detekce frekvence je provedena pomocí autokorelačního algoritmu. V prvním kroku je použit vztah (2.2).

Výsledná autokorelační funkce obsahuje vysoké množství vzorků, ale pro detekci frekvence je zapotřebí jen několik lokálních maxim. Za účelem snížení výpočetní náročnosti je tedy počet vzorků ořezán tak, aby zahrnoval pouze dominantní špičky autokorelační funkce. Počet vzorků potřebných k zachování určitého počtu maxim je dán vztahem

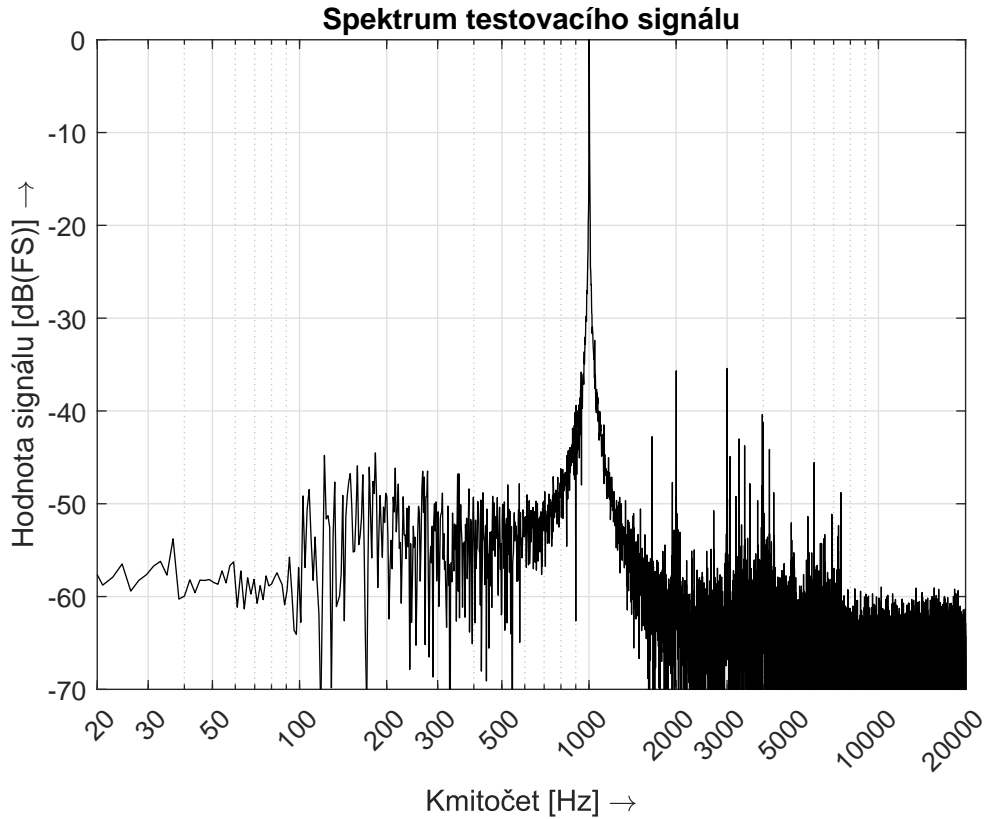
$$N_S = N_P \cdot \frac{f_S}{f_E}, \quad (2.5)$$

kde N_P je požadovaný počet špiček, f_S je vzorkovací frekvence a f_E je očekávaná frekvence kalibračního tónu.

V posledním kroku jsou identifikována lokální maxima a jejich pozice, následně je vypočítána průměrná vzdálenost mezi špičkami a výsledná frekvence se určí dle vztahu

$$f = \frac{f_S}{\Delta N_{\text{avg}}}, \quad (2.6)$$

kde f_S je vzorkovací frekvence a ΔN_{avg} je střední hodnota vzdálenosti mezi sousedními maximy, udaná v počtu vzorků.



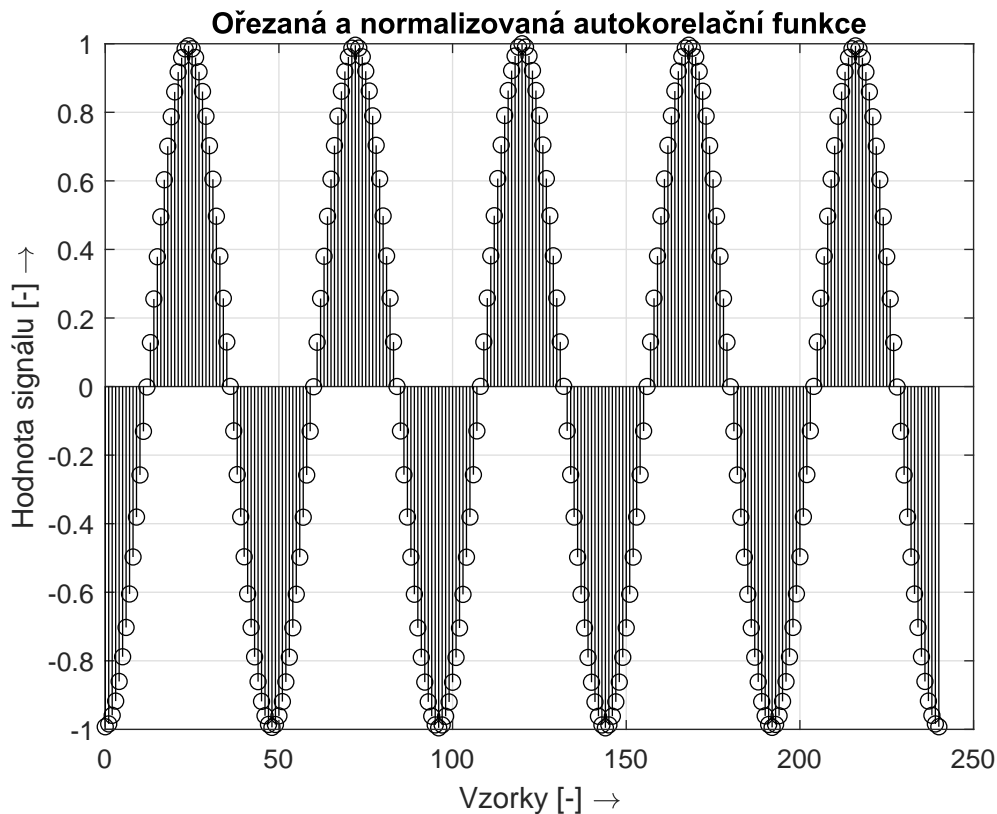
Obr. 2.1: Spektrum zaznamenaného testovacího signálu

Aplikace v daném testovacím (viz obr. 2.1) případě detekovala $\Delta N_{\text{avg}} = 48$ vzorků. Při vzorkovací frekvenci $f_S = 48$ kHz (použité pro záznam testovacího signálu) odpovídá výsledná frekvence $f = 1000$ Hz, jak vyplývá ze vzorce (2.6).

Signál je zaznamenáván do kruhového vyrovnávací paměti, dokud není kalibrace dokončena pro všechny kanály. Pokud se detekovaná frekvence f shoduje s kalibrační frekvencí v dostatečném počtu bloků (cca 1-2 sekundy), použije se efektivní hodnota signálu jako kalibrační konstanta. Délka záznamu 1-2 sekundy zajišťuje dostatečnou přesnost výpočtu kalibrační konstanty.

Stojí za zmínku, že by mohlo dojít ke zlepšení algoritmu pomocí pásmové filtrace nebo využití velikosti určitých koeficientů spektra, musí zde ale být dodrženy podmínky pro zpracování signálu v reálném čase. Dále je důležité, že filtrovaný signál je využit k výpočtu kmitočtu, ale je také zachován nefiltrovaný signál, který je poté využit pro výpočet kalibrační konstanty, aby se nezměnila jeho efektivní hodnota v důsledku filtrace. Je potřeba pro každý kanál mít zpracovanou větev pro detekci kmitočtu a další větev pro přenos nezpracovaných vzorků, aby pro měření zůstala zachovaná energie signálu.

Vhodné je dodat, že neexistuje jedna správná metoda řešení a je důležité určit



Obr. 2.2: Oříznutá a normalizovaná autokorelační funkce, kde $N_P = 5$

metodu pro každou aplikaci empiricky a pomocí zkoumání vlastností daných řešení.

Při konvenčním přístupu ke kalibraci by po nasazení kalibrátoru na mikrofon musel uživatel opustit bezodrazovou komoru a interagovat s uživatelským rozhraním aplikace.

Přístup využitý v této práci umožňuje uživateli zůstat v bezodrazové komoře a kalibrovat jednotlivé mikrofony v soustavě po jednom, nebo více mikrofonů současně, za použití více akustických kalibrátorů bez potřeby interakce s uživatelským rozhraním.

2.3.2 Nahrávání při měření synchronního zdroje

Za synchronní zdroj zvuku považujeme takové zařízení, které lze přímo propojit se zvukovým rozhraním a prostřednictvím tohoto propojení přehrávat testovací signály. Typickým příkladem synchronního zdroje jsou aktivní nebo pasivní reproduktory, studiové monitory nebo sluchátka připojená k výstupu zvukové karty.

Při obou metodách nahrávání se využívá objektu "audioPlayerRecorder" z Audio Toolboxu programu MATLAB. Tento objekt slouží k současnému přehrávání a nahrávání zvuku přes rozhraní technologie ASIO. Funguje tak, že se do objektu vloží

jedna matice plná výstupních vzorků a zároveň je výstupem z objektu jedna matice plná vstupních vzorků. Stačí tedy poskytovat potřebné výstupní (do zdroje) vzorky a načítat vstupní vzorky (z mikrofonu).

Pro synchronní zvukové zdroje je na jejich vstup přiveden referenční signál, typicky to je plynule logaritmicky přeladovaný harmonický signál (harmonic sweep). Zároveň je pomocí měřících mikrofonů snímán signál vytvořený zvukovým zdrojem. Tento nahraný signál je po doznění referenčního signálu uložen pro další zpracování.

2.3.3 Nahrávání při měření asynchronního zdroje

Asynchronní zdroj zvuku je naopak takový, který nelze propojit se zvukovým rozhraním za účelem přímého přehrávání testovacích signálů. Jedná se například o akustické hudební nástroje (např. housle, klavír, trubka), dále o elektronické zvukové zdroje bez audio vstupu (např. analogové syntezátory bez MIDI/audio konektivity), nebo o zařízení, u nichž není možné provádět řízené přehrávání přes zvukové rozhraní (např. běžná spotřební elektronika jako rádio, telefon nebo MP3 přehrávač).

Pro asynchronní zvukové zdroje není využit žádný výstup zvukového rozhraní, protože jak již bylo řečeno, asynchronní zdroje nemají standardní zvukový vstup. Při spuštění měření je pomocí mikrofonů snímán signál vytvořený zvukovým zdrojem do kruhové vyrovnávací paměti o nastavitelné délce v sekundách. Po uplynutí daného času v sekundách se postupně nejstarší vzorky přepisují novými. Systém je ve stavu "*Standby*", kdy čeká na zvuk o hladině, která je o 20 dB vyšší než je maximální naměřená efektivní hodnota signálu při měření hladiny šumového pozadí. To umožňuje osobě provádějící měření nejprve vytvořit zvuk pomocí zvoleného zdroje, přičemž samotný záznam začne až po vzniku tohoto zvuku a pokračuje po dobu odpovídající délce celé kruhové vyrovnávací paměti. Toto kontinuální nahrávání má ještě dvě speciální vlastnosti a to prerecording a postrecording.

Prerecording je realizován tak, že při detekci počátku signálu je ukazatel na začátek kruhové vyrovnávací paměti, který se po skončení nahrávky linearizuje, posunut o několik vyrovnávacích pamětí zvukového rozhraní do minulosti, aby bylo možné sledovat rozeznění tónu předtím, než překročil hranici pro spuštění nahrávání.

Postrecording je realizován pomocí nastavení délky vyrovnávací paměti, nahraje se vždy celá délka kruhové vyrovnávací paměti za účelem aby nebyl signál limitován. Pokud je velikost vyrovnávací paměti dost velká, je možné nahrát celý signál od šumu systému, přes jeho rozeznění a znělou část až po doznění a následný šum systému. Toto poté při více nahrávkách dovoluje volnější kritéria synchronizace. Použitá metoda synchronizace má maximální časový rozdíl

$$\Delta t_{\max} = \frac{2 \cdot N_{\text{buff}} - 1}{f_S}, \quad (2.7)$$

kde N_{buff} je počet vzorků v jedné vyrovnávací paměti zvukového rozhraní a f_s je vzorkovací kmitočet.

Pokud je N_{buff} rovno 1024 vzorků a f_s rovno 48 kHz je výsledný maximální rozdíl $\Delta t_{\text{max}} = 42,64$ ms.

2.3.4 Vyhodnocení dat při měření synchronního zdroje

Pro vypočítání frekvenční odezvy měřeného synchronního zdroje v daném bodě v prostoru je využit vztah (1.14). Zde pomocí Fourierovy transformace určíme ze vstupního signálu $x[m]$ frekvenční transformaci $X(\omega)$ a z výstupního signálu $y[m]$ frekvenční transformaci $Y(\omega)$. Podílem těchto transformací je poté vypočítán frekvenční přenos systému $H(\omega)$. Získaná data slouží dále pro výpočet efektivních hodnot ve třetinooktákové analýze nebo pro určení směrových vyzařovacích charakteristik v jednotlivých třetinooktákových pásmech.

2.3.5 Vyhodnocení dat při měření asynchronního zdroje

Pro výpočet frekvenční odezvy měřeného asynchronního zdroje v daném bodě prostoru nelze použít vztah (1.14), neboť nemáme k dispozici vstupní signál, a tudíž nemůžeme určit frekvenční transformaci $Y(\omega)$. Místo toho je využita diskrétní Fourierova transformace (2.4).

Je třeba klást důraz na správné váhování spektra. Koeficienty odpovídající kladné polovině spektra (s výjimkou stejnosměrné složky) se násobí dvěma, aby bylo možné určit správné amplitudy jednotlivých frekvenčních složek. Tyto složky totiž vznikají jako součet spektrálních koeficientů záporných a kladných frekvencí, které jsou velikostně stejné. Výsledná velikost se dále dělí počtem vzorků, aby odpovídala skutečné amplitudě ve spektru. Získané spektrum slouží k výpočtu efektivních hodnot ve třetinooktákové analýze nebo pro určení směrových vyzařovacích charakteristik systému v jednotlivých třetinooktákových pásmech.

2.3.6 Ukládání a načítání hlavní části dat

Všechna data jsou ukládána do dvou struktur s názvy `meas` a `config`. Tyto struktury jsou ukládány do souboru XML a poté z něj mohou být znovu načteny.

V programu MATLAB lze ukládat struktury do XML souboru pomocí funkce `writestruct()`, která automaticky převede datovou strukturu do odpovídající XML formy. Stačí zavolat `writestruct(S, 'soubor.xml')`, kde `S` je struktura, která má být uložena. Funkce podporuje vnořené struktury i pole.

Struktury se v programu MATLAB načítají z XML souboru pomocí funkce `readstruct()`, která automaticky převede XML obsah do struktury. Funkce se používá takto `S = readstruct('soubor.xml')`, kde `S` je struktura, která má být načtena. Textové uzly a hodnoty elementů se načítají jako řetězce (typ `string`), takže i číselné hodnoty zapsané v XML jsou ve výsledné struktuře reprezentovány jako text, dokud nejsou explicitně převedeny.

2.3.7 Ošetření chyb a vstupů

Aplikace SMDRSS zahrnuje ošetření chybových stavů, což zajišťuje jeho robustnost, stabilitu a předchází nečekanému chování při nevhodných nebo neočekávaných vstupech. V aplikaci jsou zašednutá tlačítka (nelze na ně kliknout) pokud by jejich použití způsobilo přepnutí konfigurace v neočekávané situaci. Na tuto část byl také kladen důraz, je díky tomu zároveň zlepšena i uživatelská přívětivost grafického uživatelského rozhraní.

2.4 Grafické uživatelské rozhraní

Tato podkapitola se zabývá návrhem grafického uživatelského rozhraní a popisem jednotlivých ovládacích prvků. Grafické uživatelské rozhraní (GUI) je způsob komunikace mezi uživatelem a počítačem, který využívá grafické prvky, jako jsou okna, ikony, nabídky a tlačítka. Uživatel tak může ovládat programy pomocí myši nebo dotykového displeje namísto příkazového řádku. GUI zjednodušuje práci s počítačem a zpřístupňuje jej i uživatelům bez technických znalostí. Aplikace SMDRSS je dělena na záložky, které jsou zde detailněji popsány. Ovládací prvky byly voleny na základě uživatelské přívětivosti, jako je podobnost k reálným analogovým ovládacím prvkům, jednoduchost a přesnost ovládání.

2.4.1 Záložka pro mapování mikrofونů

Tato záložka slouží k nastavení běhů měření, počtu měření, mapování kanálů mikrofونů, nastavení jejich azimutu a elevace vzhledem k akustické ose zvukového zdroje. Vzhled uživatelského rozhraní této záložky, viz obr. 2.3.

První ovládací prvek je textové pole “**Microphones**”, do kterého se zadá počet mikrofونů.

Po zadání počtu mikrofونů se automaticky aktualizuje tabulka měřících běhů, mapování kanálů azimutu a elevace. Tato tabulka má sloupce s názvy “**Pass number**”, “**Microphone number**”, “**Azimuth**”, “**Elevation**” a “**Channel mapping**”. Je zde možné nastavit počáteční pozice jednotlivých mikrofونů po každý

běh měření. V této tabulce lze upravovat všechny sloupce až první a druhý. V prvním sloupci je jednoznačný identifikátor měřícího běhu. Ve druhém sloupci je jednoznačný identifikátor mikrofonu.

Dále je v této záložce k dispozici možnost nastavení směru rozložení mikrofonní soustavy “**Array rot**”. První nastavení je “**Horizontal**”, kde jsou mikrofony v soustavě rozloženy ve stejné elevaci a různých azimutech a krokování při měřeních probíhá v úhlech elevace. Dále je zde nastavení “**Vertical**”, kde jsou mikrofony rozloženy ve stejném azimutu a v různých elevacích a krokování při měřeních probíhá po azimutu. Poslední možností je “**Static 2D**”, kdy jsou mikrofony rozloženy v 2D poli, probíhá jen jedno měření pro každý běh a pozice se neinkrementuje.

Jako další ovládací prvek je zde textové pole “**Passes**”, který nastavuje počet běhů (opakování) měření.

Nastavení “**Measurements**” určuje počet měření, která budou probíhat v nastavené úhlové výseči.

Možnost “**Speaker Channels**” určuje mapování kanálů připojeného synchronního zdroje.

Nastavení “**Angle sector**” a “**Center angle**” slouží k nastavení velikosti úhlové výseče, ve které bude měření probíhat, a středový úhel výseče.

Zaškrtávací políčko “**Synchronous**” slouží k nastavení, zda je měřený zdroj synchronní (viz kapitola 2.3.2) nebo asynchronní (viz kapitola 2.3.3).

Textové pole “**Mic. chan. from**” slouží k nastavení, od kterého kanálu začíná mapování mikrofonů. Některá zařízení, která byla použita pro měření, využívala kanály s čísly od 64 a výše. Toto nastavení uživateli zjednodušuje mapování mikrofonů v této situaci.

Ovládací prvek “**Calib. freq.**” slouží k nastavení frekvence akustického kalibrátoru, který bude využit v dalších krocích měření.

Dále je zde mapování kanálů výstupu, zde lze nastavit jaké kanály jsou použity jako levý nebo pravý. Další je tlačítko “**EDIT ANGLES**” slouží ke změně rozložení úhlů při měření, v základním nastavení jsou úhly měření rozloženy rovnoměrně přes zadanou výseč. Po stisknutí tlačítka “**EDIT ANGLES**” se objeví dialogové okno, ve kterém je možné nastavit vlastní úhly krokování. Vstupní parametry, které jsou využity v dialogovém okně, jsou předtím nastavený počet měření, nastavení soustavy a úhel měření. Vlastní rozložení úhlů má smysl využít, například pokud je třeba vyšší rozlišení v úhlech v blízkosti akustické osy zvukového zdroje a v úhlech dále od akustické osy dostačuje menší počet měřených bodů. Tímto způsobem lze ušetřit čas měření na pozicích, které jsou pro aktuální měření irelevantní. Vzhled rozhraní tohoto okna viz obr. 2.4.

Celou konfiguraci, kterou lze nastavit v této záložce, je možné uložit a načíst pomocí tlačítek “**Save**” resp. “**Load**”, tzn. je možné pro jednu danou měřící sou-

stavu uložit konfiguraci a při následném měření stačí konfiguraci znovu načíst. Pro pokračování do další záložky aplikace je třeba stisknout tlačítko “**APPLY**”.

Pass number	Microphone number	Azimuth	Elevation	Channel mapping
1	1	1	5	0
1	2	10	0	2
1	3	15	0	3
2	1	20	0	1
2	2	25	0	2
2	3	30	0	3
3	1	35	0	1
3	2	40	0	2
3	3	45	0	3

Obr. 2.3: Záložka pro mapování mikrofónů

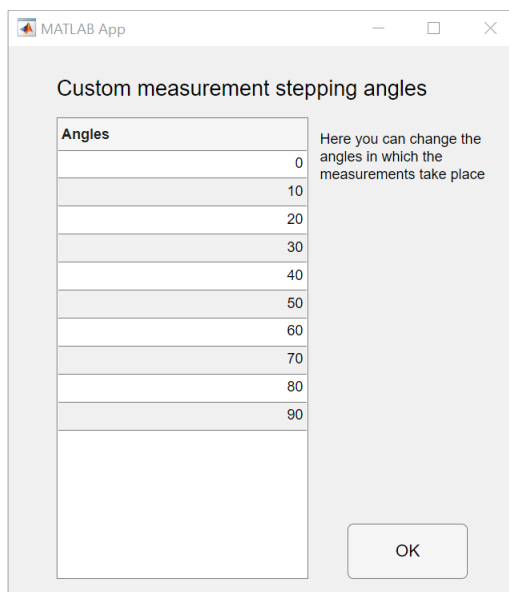
2.4.2 Záložka pro nastavení

Tato záložka slouží k nastavení rozhraní technologie ASIO. Při spuštění aplikace probíhá kontrola připojených zařízení. Pokud je konfigurace zařízení jiná než při prvním spuštění, je otestováno zda připojená zvuková zařízení podporují vzorkovací kmitočty a velikosti vyrovnávací paměti, které podporuje aplikace. Pokud je konfigurace zařízení stejná jako při minulém spuštění, využijí se data testu zařízení z minulého spuštění. Vzhled grafického rozhraní této záložky, viz obr. 2.5.

Nastavení “**ASIO Device**” slouží k výběru rozhraní, které bude využito k měření.

Možnost “**Samplerate**” nastavuje vzorkovací kmitočet nahrávání.

Ovládací prvek “**Buffer Size**” slouží k nastavení velikosti vyrovnávací paměti zvukového rozhraní. Po výběru zařízení lze nastavit pouze zařízením podporované vzorkovací kmitočty a velikosti vyrovnávací paměti.



Obr. 2.4: Dialogové okno pro nastavení vlastních úhlů krokování

Textové pole “**Measurement Time**” nastavuje velikost kruhové vyrovnávací paměti pro kontinuální měření při záznamu asynchronního zdroje. Velikost je jedna až dvacet sekund.

Tlačítko “**ASIO SETTINGS**” otevře dialogové okno řadiče rozhraní ASIO, ve kterém je možné nastavit možnosti tohoto zvukového rozhraní.

Pro pokračování do další záložky je třeba stisknout tlačítko “**SAVE AND CONTINUE**”.

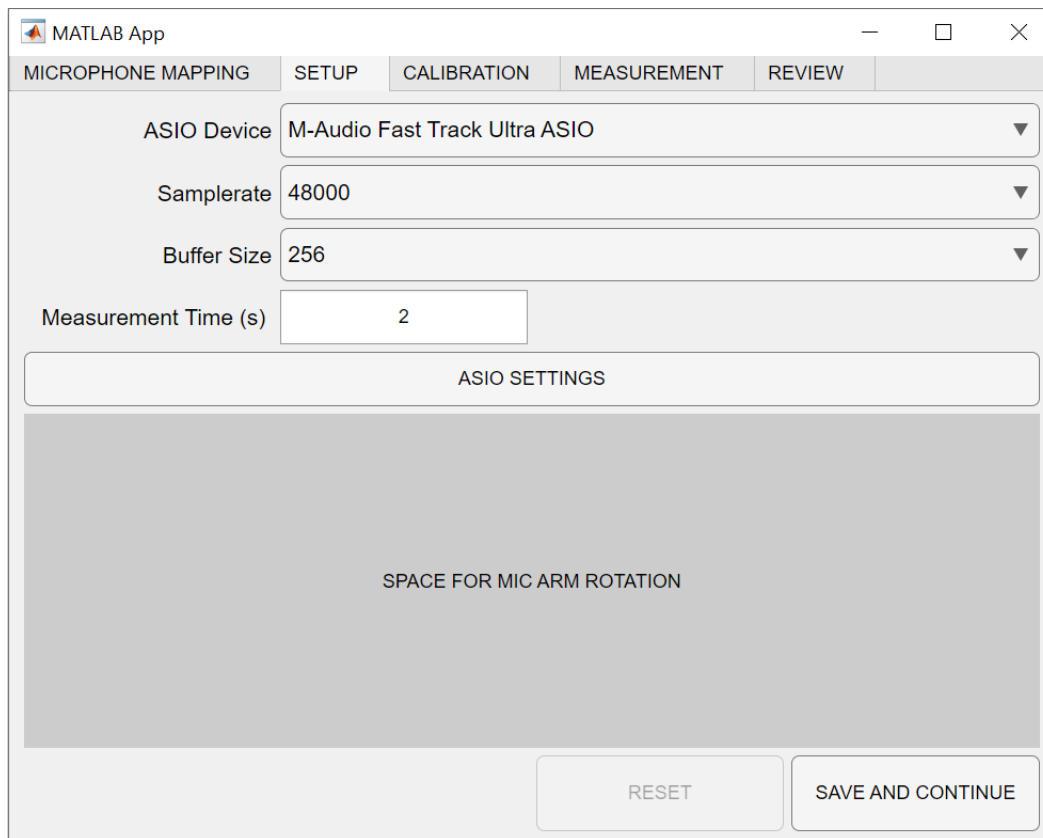
2.4.3 Záložka pro kalibraci mikrofonů

Záložka slouží ke kalibraci měřícího řetězce, nastavení měřícího tónu, nastavení specifikací pro měření, nastavení útlumu měřícího signálu a měření poměru signálu a šumu. Vzhled rozhraní této záložky viz obr. 2.6.

Nabídka „**MEAS TONE**“ slouží k výběru měřícího tónu. Délky měřících tónů určují délku měření jednoho datového bodu při měření synchronizovaného zdroje. Měřící tóny může uživatel přidávat do adresáře „**measurement tones**“.

Textové pole “**Minimum SNR dB**” slouží k zadání minimálního požadovaného poměru signálu ku šumu. Toto nastavení slouží hlavně k vypsání chybové hlášky, uživatel může v měření pokračovat i pokud nebylo dosaženo dostatečného odstupu signálu a šumu.

Textové pole “**Headroom dBFS**” slouží k nastavení maximální hodnoty signálu, vyšší hodnoty spustí počítadlo detekce limitace signálu. Číslo bude vždy zá-



Obr. 2.5: Zálóčka pro nastavení zařízení podporující technologii ASIO

porné kvůli hodnotám vyjádřeným v dBFS (viz kapitola 1.1.4).

Otočný ovládací prvek „**Gain**“ a přidružené textové pole slouží k nastavení útlumu výstupního signálu z měřicí aplikace – vzorky signálu jsou násobeny konstantou. Označení „gain“ je použito pouze pro snazší pochopení funkce ovládacího prvku. Nastavitelné hodnoty jsou rozloženy logaritmicky v decibelech, jak je u tohoto typu ovládání obvyklé.

Tlačítko “**Calibrate**” spustí automatickou kalibraci. Skript kalibrace automaticky detekuje tón o frekvenci 1 kHz, který má vyšší hlasitost než -40 dBFS a signál z mikrofону, na kterém je tón detekován, je využit pro výpočet referenční hodnoty p_{ref} , která se dále využívá pro výpočet akustického tlaku dle vztahu (1.4). Tento kalibrační skript mimo jiné umožňuje kalibrovat libovolný počet mikrofónů najednou. Výstupy ze skriptu jsou pomocí získání odkazu na objekt aplikace přenášeny do funkce v aplikaci, která aktualizuje tabulku vpravo tím, že ve sloupci s názvem “**Calibrated**” ukáže symbol zatržení u mikrofónu, u kterého byl již kalibrační krok proveden.

Tlačítko “**Measure noise floor**” slouží ke změření efektivní hodnoty šumu v místnosti a šumu měřicího řetězce. Podle těchto hodnot se poté počítá poměr

signálu a šumu.

Tlačítko “**Test sound SNR**” slouží k výpočtu poměru signálu a šumu, toto tlačítko lze použít až po změření šumu místnosti a měřícího řetězce. Tlačítko pustí do zvukového zdroje stejný tón, kterým se bude měřit. Poté je spočítán poměr signálu a šumu a v tabulce je nahrazen sloupec “Calibrated” sloupcem “SNR” a je zde zobrazeno SNR každého mikrofonu. Skript, který měří poměr signálu a šumu, také detekuje limitaci signálu a detekuje, zda bylo dosaženo minimální požadované hodnoty SNR. Uživatel může začít měřit i pokud není dosaženo minimální potřebné hodnoty. V některých situacích totiž není možné dosáhnout potřebného poměru signálu a šumu a zkušený uživatel, který ví co dělá, není tímto blokován od dalšího postupu v měření.

Tlačítko “**Finish and continue**” uloží všechna nastavení a kalibrační proměnné a poměry signálu a šumu na každém z mikrofonů a přepne na další záložku.

The screenshot shows the MATLAB App interface for microphone calibration. The interface is divided into several sections:

- Tabs:** MICROPHONE MAPPING, SETUP, CALIBRATION, MEASUREMENT (active), REVIEW.
- MEAS TONE:** IEC 268 5 noise 4800 (dropdown menu).
- CLIP:** A circular indicator showing the clipping status.
- Control Panel:**
 - MINIMUM SNR dB: 20
 - HEADROOM dBFS: -3
 - CLIP SAMPLES: 20
 - Gain (dB): -6 (rotary knob)
 - LOG: Signal is in spec, min SNR is, 37.2611
- Table:** A table with columns: Mic, Noise (dBFS), SNR (dB), and Calibrated. It lists three microphones with their respective noise and SNR values.
- Buttons:** CALIBRATE, MEASURE NOISE FLOOR, TEST SOUND SNR (highlighted), FINISH AND CONTINUE.

Mic	Noise (dBFS)	SNR (dB)	Calibrated
#1, Angle: 0 el. 0 az.	-65.9699	37.2611	<input checked="" type="checkbox"/>
#2, Angle: 0 el. 0 az.	-68.7394	39.6599	<input checked="" type="checkbox"/>
#3, Angle: 0 el. 0 az.	-66.5408	40.3724	<input checked="" type="checkbox"/>

Obr. 2.6: Záložka pro kalibraci mikrofonů

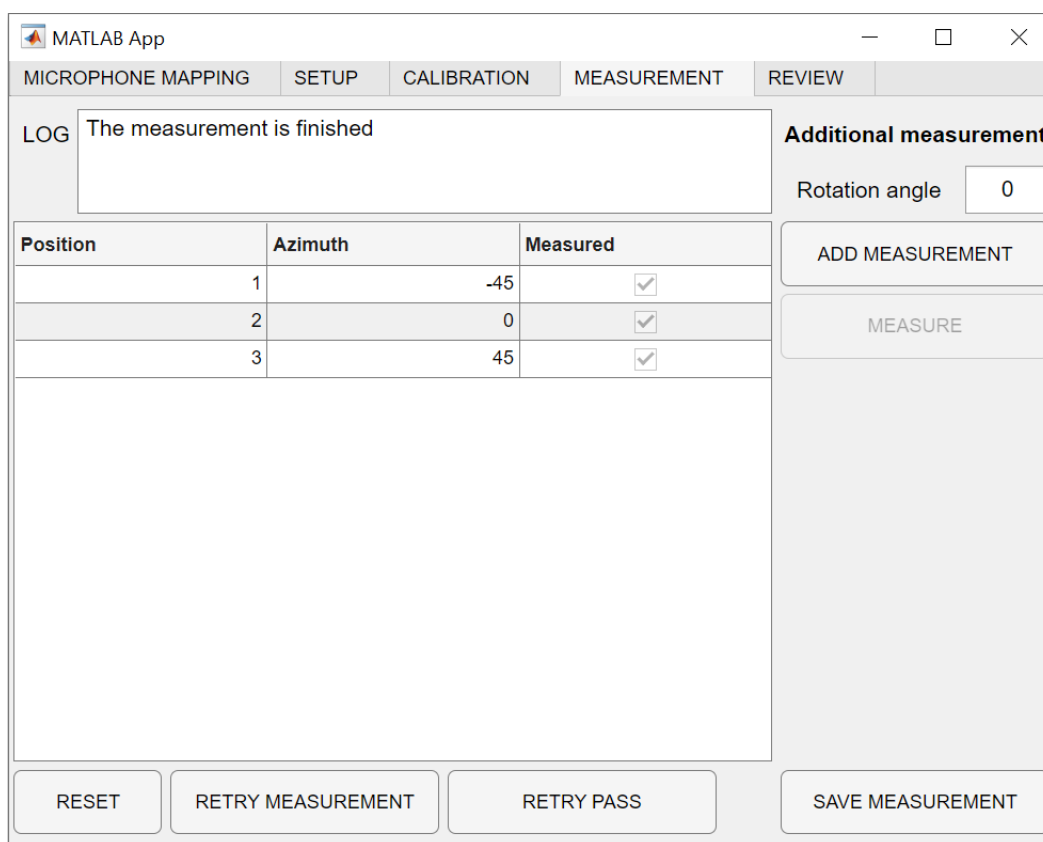
2.4.4 Zložka pro měření

Tato zložka slouží k měření směrové vyzařovací charakteristiky, v tabulce jsou zobrazeny jednotlivé body měření. Po každém měření se zaškrtně políčko “Measured”, aby bylo možné vidět další měření. Grafické rozhraní této zložky viz obr. 2.7.

Tlačítko “**M**easure” přehraje měřicí tón nastavený v předchozí zložce, a zároveň zaznamená hodnoty na všech připojených mikrofonech.

Tlačítko “**R**etry last measurement” dovolí uživateli zopakovat poslední měření, pokud si myslí, že něco pokazil, aby při měření několika desítek bodů měření nemusel začínat od začátku. Měřené hodnoty se zaznamenávají a ukládají.

Tlačítko “**R**eset” resetuje celé měření a je možné měření zopakovat.



Obr. 2.7: Zložka pro měření

2.4.5 Zložka pro vykreslení výsledků

Kvůli složitosti možných permutací vykreslení v závislosti na nastavených parametrech měření je tato zložka sice funkční, ale vyžaduje ještě další vývoj. Slouží ke grafickému zobrazení výsledků z naměřených dat.

Pomocí tlačítka “LOAD MEASUREMENT” lze načíst soubor získaný z měření.

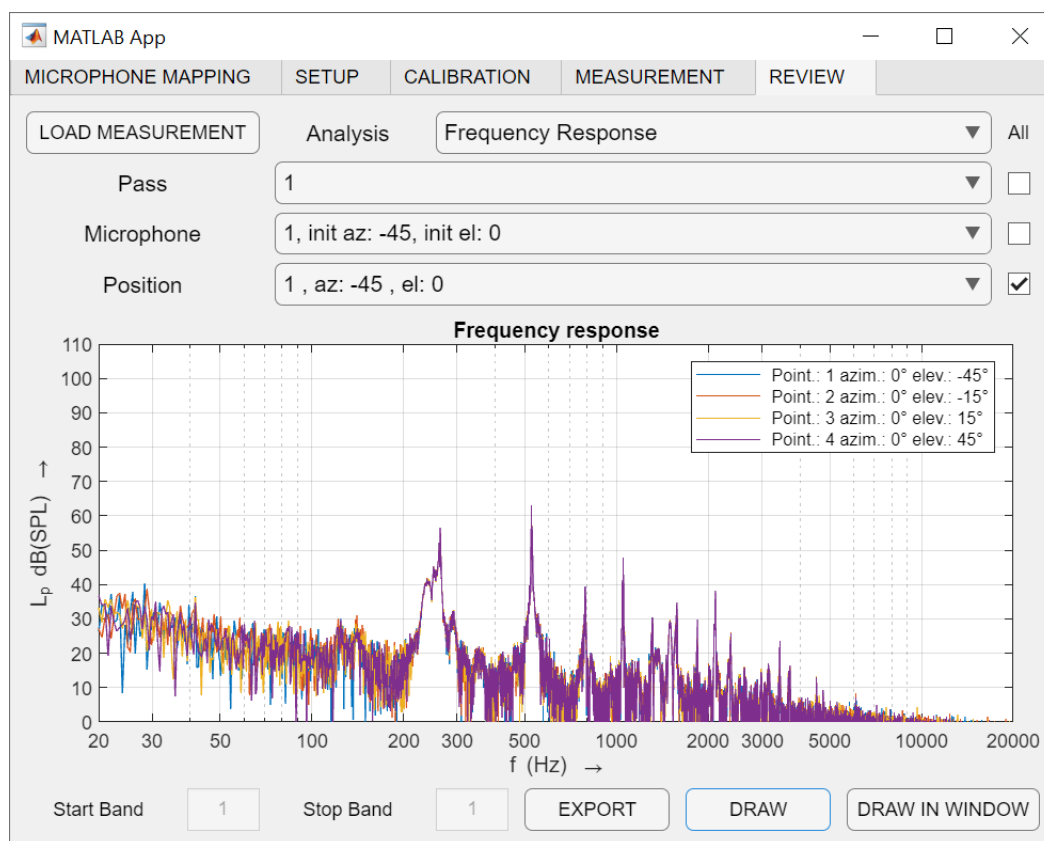
Pomocí výběru v “Analysis” je možné nastavit typ zobrazení, toto zároveň povolí nebo zakáže výběr určitých možností. Dostupné zobrazení jsou sférický graf, polární graf, frekvenční analýza, zlomkooktávová analýza a impulzní odezva.

Možnosti “Pass” “Microphone” a “Position” jsou určeny k výběru běhu měření, běhu mikrofону respektive pozice ve které měření proběhlo.

Zaškrtnutá políčka s nadpisem “All” jsou určena pro analýzu všech bodů v dané části, podle toho je rovnou i určena orientace měření.

Tlačítka “DRAW” a “DRAW IN WINDOW” slouží k vykreslení vybraného bodu nebo bodů v požadované analýze.

Tlačítko “export” vyexportuje zvolená měření do složky s názvem export.



Obr. 2.8: Záložka pro vykreslení výsledků

3 Měření

V rámci diplomové práce byla realizována čtyři měření. Tato měření sloužila k ověření funkcionality software a k nasměrování jeho dalšího vývoje.

První měření proběhlo pomocí jednoho mikrofonu, v nulové elevaci a postupnou rotací po azimutu od akustické osy reproduktoru.

Druhé měření bylo realizováno pomocí sedmi mikrofonů ve vertikální konfiguraci. Mikrofony měly stejný azimut, ale různé elevace. V tomto měření se nerotovalo mikrofony okolo reproduktoru, ale rotovalo se reproduktorem a mikrofony zůstaly staticky umístěné.

Třetí měření bylo realizováno pomocí jednoho mikrofonu, který rotoval kolem reproduktoru 360 stupňů v různých elevacích pro změření 3D směrové vyzářovací charakteristiky a její následné vykreslení do sférického grafu.

V posledním měření bylo využito kontinuálního nahrávání asynchronního zdroje zvuku. Měření proběhlo pomocí čtyř mikrofonů na mikrofonních stojanech ve dvou pozicích. Sloužilo jako test synchronizace signálů při více měřeních pomocí tohoto typu měření.

Asynchronní zdroj byl simulován reproduktorem, který přehrával zvuk z jiného rozhraní (nebylo možné zvuk interně synchronizovat). Byla zde změřena minimální potřebná hladina akustického tlaku v místě mikrofonu pro spuštění nahrávání.

3.1 Měření pomocí jednoho mikrofonu na otočném rameni

V tomto měření bylo využito jednoho mikrofonu na otočném rameni. Byla zde měřena 2D směrová vyzářovací charakteristika v elevaci 0 stupňů.

3.1.1 Použité přístroje

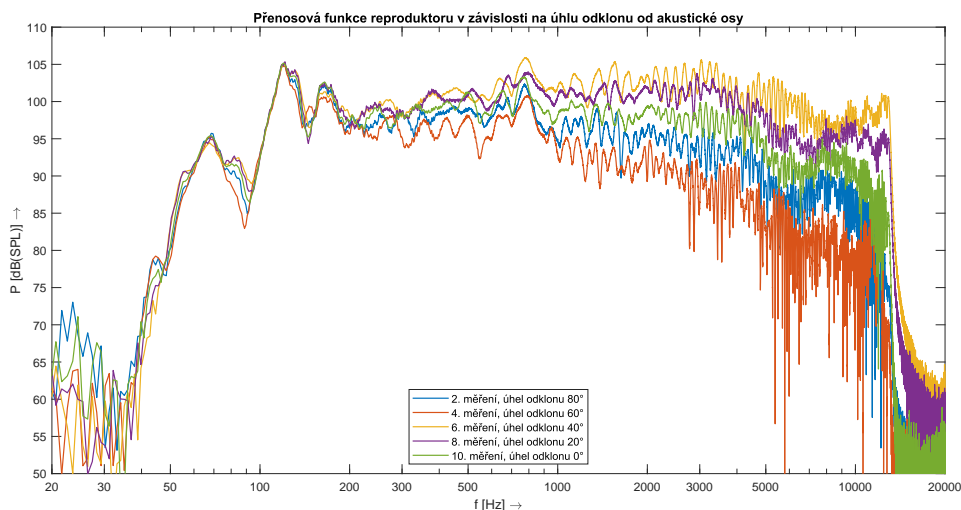
- BNC měřící mikrofon Brüel & Kjær 4190
- otočný systém Brüel & Kjær typ 9640
- PC s aplikací MATLAB, s ovladačem ASIO a aplikací SMDRSS
- RME Digiface Dante, RME Micstasy
- Reproduktor Meyer Sound 4XP [12]

3.1.2 Postup měření

Měření bylo realizováno azimuty od 90° do 0° s krokem po 10° , pro elevaci 0° . Při měření bylo otočné rameno natočeno na každý azimut a na každé pozici byl přehráván plynule logaritmicky přeladovaný harmonický signál s dobou trvání 1 s. Tento signál byl zaznamenán měřicím mikrofonom. Dále je v programu pro každou pozici vypočítána přenosová funkce systému. Z této funkce je spočítána třetinooktávová analýza, dále je zde spočítána impulzní charakteristika a nakonec je z určitého třetinooktávového pásma vypočítána směrová vyzařovací charakteristika pro daný interval frekvencí. Bylo realizováno celkem 10 měření. Kvůli symetrii měřeného reproduktoru a lepší interpretaci dat bylo toto měření zrcadleno na druhou stranu.

3.1.3 Výsledky

Výsledné grafy jsou v části B.1 přílohy. Jako první byl změřen frekvenční přenos reproduktoru, viz obr. 3.1. První důležité pozorování je zkresení na nízkých frekvencích (pod 50 Hz) a na vysokých frekvencích (nad 12 kHz). Na nízkých frekvencích byla hladina akustického tlaku tvořená reproduktorem velmi nízká. Toto způsobilo, že je signál v tomto místě ovlivněný šumem. Na vysokých frekvencích je signál již velmi slabý. Mechanická konstrukce reproduktoru, volba měničů, typ ozvučnice, počet pásem reprodukce (jedno/dvou/tří-pásmová) určuje schopnost reprodukce daných frekvencí a celkovou šířku pásma reprodukováných frekvencí. Data v této směrové vyzařovací charakteristice jsou interpolována.



Obr. 3.1: Přenos reproduktoru v závislosti na úhlu odklonu od akustické osy.

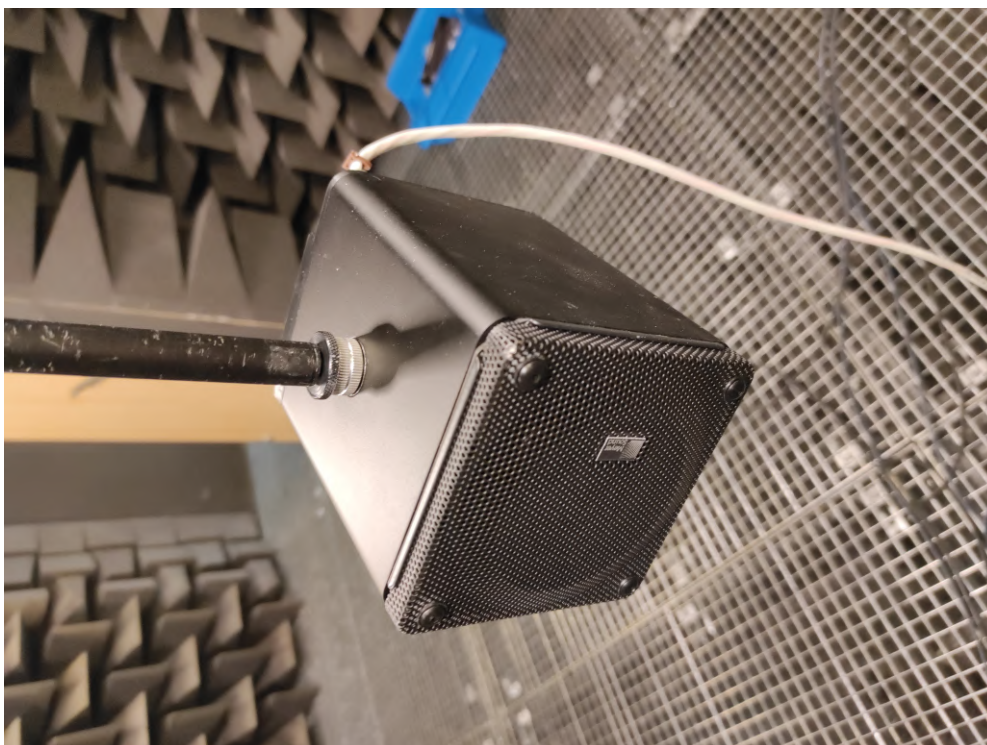
Další částí měření je směrová vyzařovací charakteristika. Ta je rozdělena na dva obrázky. Jeden obsahuje třetinooktávová pásma 10 až 15, což koresponduje s frekvencemi 126-398 Hz, viz obr. B.1. Druhý obsahuje třetinooktávová pásma 25 až 30, což koresponduje s frekvencemi 3981-12589 Hz, viz obr. B.2. Dále je zde zpracovaná zlomkooktávová analýza v akustické ose reproduktoru, viz obr. B.3.

3.2 Měření pomocí více mikrofonů na stojanu

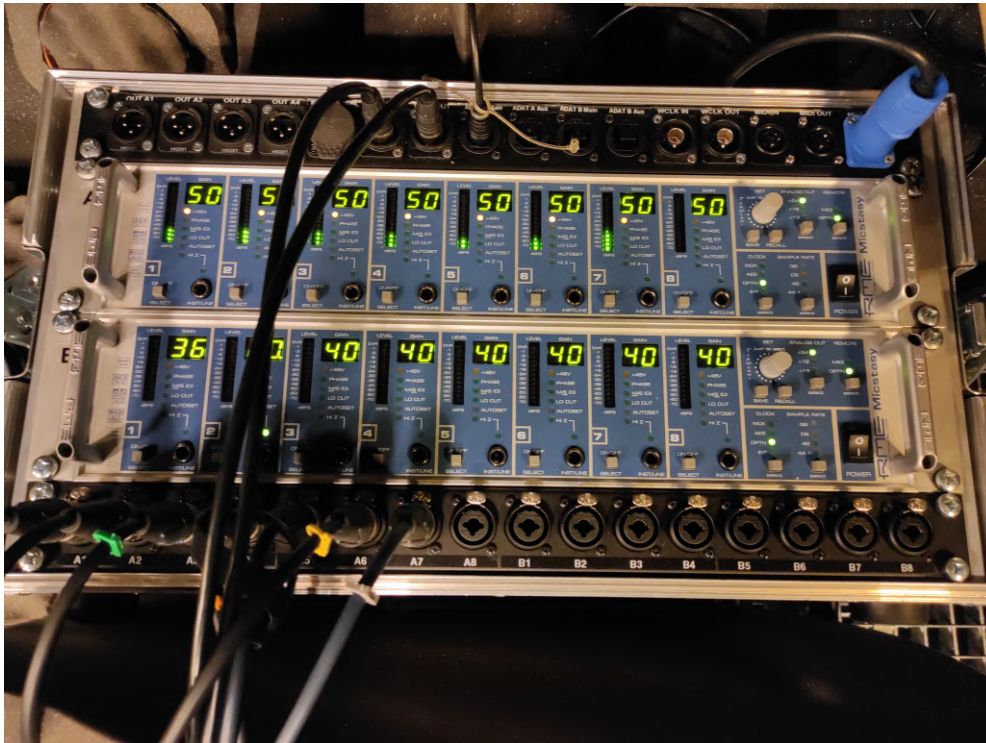
Toto měření bylo realizováno za účelem měření 3D směrové vyzařovací charakteristiky. Bylo zde použito sedmi mikrofonů.

3.2.1 Použité přístroje

- 7x měřící mikrofon audix TM1 [11]
- otočný systém Brüel & Kjær typ 9640
- PC s aplikací MATLAB, s ovladačem ASIO a aplikací SMDRSS
- testovaný reproduktor, viz obr. 3.2
- zvuková rozhraní, RME Digiface Dante a RME Micstasy, viz obr. 3.3



Obr. 3.2: Měřený reproduktor od firmy Meyer Sound.



Obr. 3.3: Zapojení a nastavení mikrofonů v mikrofonním zesilovači.

3.2.2 Postup měření

Měření bylo realizováno postupným otáčením reproduktoru na otočném rameni po 5° a změřením hodnot na každém mikrofonu. Mikrofony byly zapojeny do rozhraní postupně. Horní mikrofon byl zapojen do prvního kanálu (vstup A1) a spodní mikrofon byl zapojen do posledního kanálu (vstup A7). Toto zapojení bylo zvoleno, aby na sebe data z daných mikrofonů navazovala v matici změřených vzorků.

3.2.3 Výsledky

Výsledné grafy jsou v části B.2 přílohy. V tomto měření bylo ověřeno zobrazení jak vertikální, tak horizontální směrové charakteristiky. Dále zde byla ověřena funkčnost vykreslení 3D směrové charakteristiky.

3.3 Měření pomocí jednoho mikrofonu na otočném rameni

Toto měření bylo realizováno pomocí jednoho mikrofonu na otočném rameni. Sloužilo k ověření měření 3D směrové charakteristiky. Referenční osa byla umístěna v



Obr. 3.4: Mikrofonní soustava využitá pro druhé měření.

akustické ose výškového reproduktoru.

3.3.1 Použité přístroje

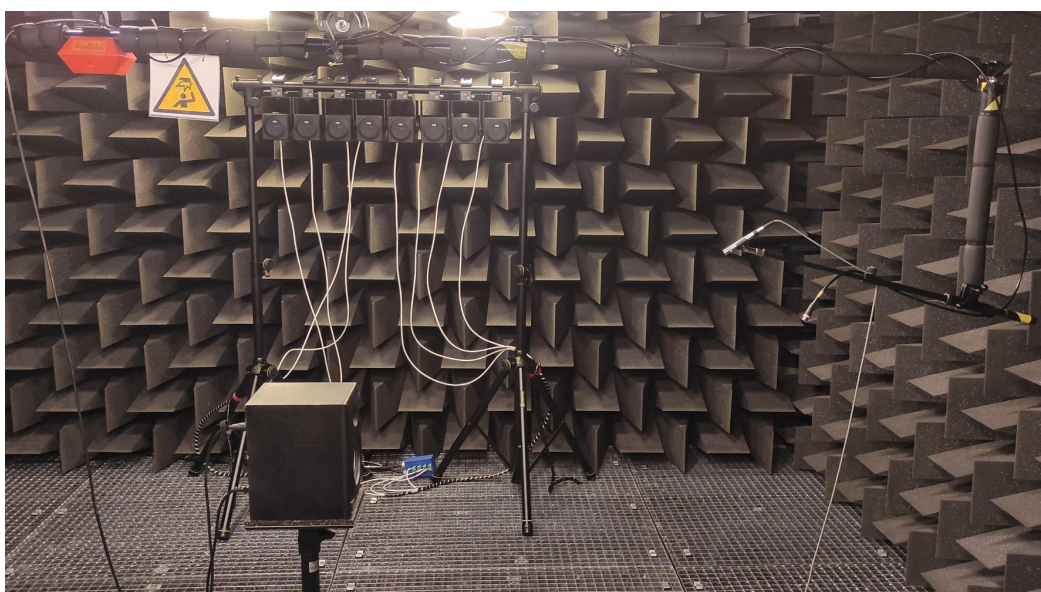
- Koaxiální měřicí mikrofon
- Mikrofonní předzesilovač Brüel & Kjær
- Otočný systém Brüel & Kjær typ 9640
- PC s aplikací MATLAB, s ovladačem ASIO a aplikací SMDRSS
- testovaný reproduktor, EVENT Electronics ALP5, viz obr. 3.5[13]
- zvuková rozhraní, RME Digiface Dante a RME Micstasy, viz obr. 3.3

3.3.2 Postup měření

Měření bylo provedeno v šesti průchodech pomocí jediného mikrofonu, který byl otáčen po azimutu v krocích po pěti stupních, což vedlo ke 73 měřením na jeden průchod. Sedmdesáté třetí měření bylo zahrnuto za účelem spojení prvního a posledního bodu v polárním grafu. Alternativně je možné první měření zopakovat jako 73. bod, aby byl graf uzavřen – volba mezi těmito přístupy závisí na preferenci uživatele.



Obr. 3.5: Měřený reproduktor od firmy EVENT.



Obr. 3.6: Mikrofonní soustava využitá pro třetí měření.

Jednotlivé rúchody měření byly provedeny při elevacích 0° , 5° , 10° , 20° , 30° a 40° , přičemž mikrofon byl umístěn 1 metr od akustického středu reproduktoru. Toto měření vedlo k celkovému počtu 438 měřicích bodů, což zajišťuje dostatečné prostorové

pokrytí pro přesnou analýzu směrové vyzařovací charakteristiky.

3.3.3 Výsledky

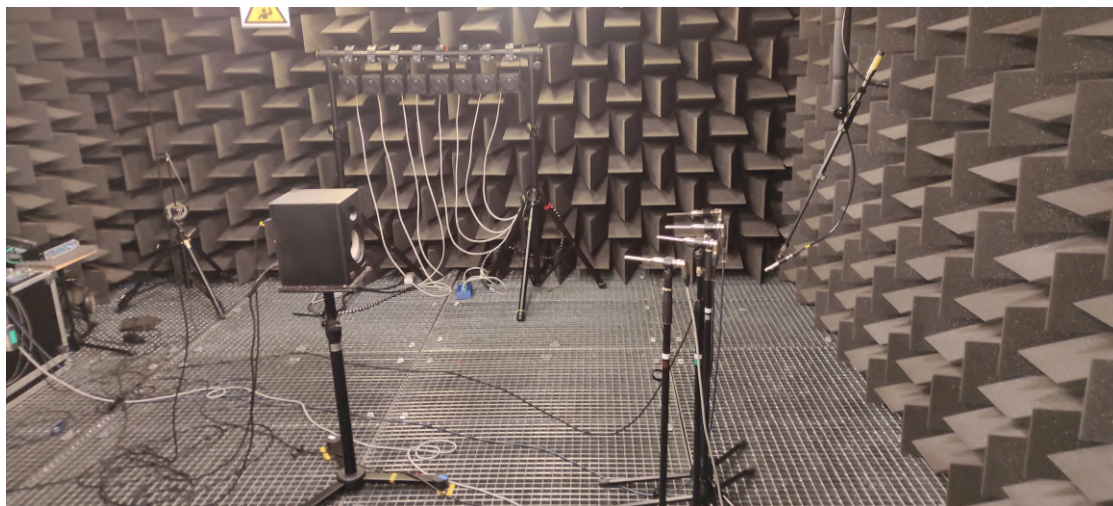
Výsledné grafy jsou v části B.3 přílohy. V tomto měření bylo ověřeno měření pomocí jednoho mikrofону s vysokým úhlovým rozlišením. V obrázcích jsou zobrazeny všechny dostupné analýzy.

3.4 Měření pomocí více mikrofónů ve více polohách

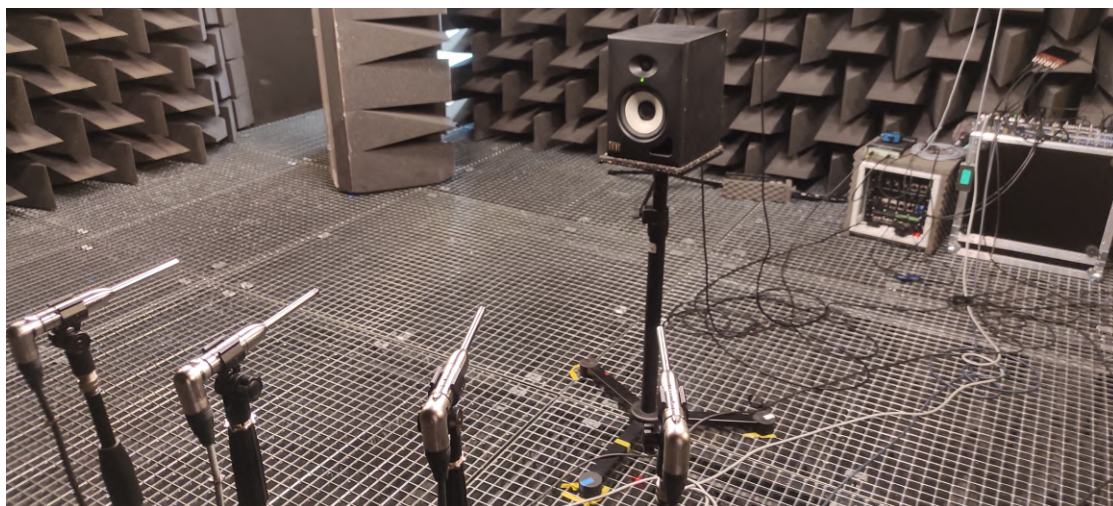
Měření bylo provedeno pomocí čtyř mikrofónů na mikrofonních stojanech. Sloužilo jako kontrola pro kontinuální měření, jeho práh spuštění a synchronizaci více měření.

3.4.1 Použité přístroje

- 4x měřící mikrofón audix TM1 [11]
- otočný systém Brüel & Kjær typ 9640
- PC s aplikací MATLAB, s ovladačem ASIO a aplikací SMDRSS
- testovaný reproduktor, EVENT Electronics ALP5, viz obr. 3.5 [13]
- zvuková rozhraní, RME Digiface Dante a RME Micstasy, viz obr. 3.3



Obr. 3.7: Mikrofonní soustava využitá pro čtvrté měření.



Obr. 3.8: Mikrofonní soustava využitá pro čtvrté měření detail.

3.4.2 Postup měření

Měření bylo provedeno ve dvou pozicích a to azimut -45° až 0° a azimut 0° až 45° . Mikrofony byly umístěny v mikrofonních stojanech kolem reproduktoru. Po změření prvního datového bodu byly mikrofony přesunuty do druhé pozice.

3.4.3 Výsledky

Výsledné grafy jsou v části B.4 přílohy. V tomto měření bylo ověřeno kontinuální nahrávání, minimální hladina akustického tlaku potřebná pro jeho spuštění. Dále zde byly provedeny všechny dostupné analýzy mimo 3D směrovou vyzařovací charakteristiku, kterou z těchto bodů nelze sestrojít. Analýzy byly provedeny rovnou v grafickém uživatelském rozhraní pro demonstraci funkčnosti. Změřené hladiny pro spuštění kontinuálního měření jsou $L_{CPK_{max}} = 77,2$ dB a $L_{AF_{max}} = 61,2$ dB.

Závěr

Tato diplomová práce navazuje na předchozí výzkum v oblasti měření směrových vyzařovacích charakteristik zvukových zdrojů a dále rozvíjí tuto problematiku s využitím grafického uživatelského rozhraní. V teoretické části byly popsány základní akustické veličiny, principy měření ve 2D a 3D prostoru, metody spektrální analýzy, přenosové funkce, impulzní odezvy a zlomkooktávové analýzy. Zvláštní důraz byl kladen na správné nastavení měřicího řetězce a automatickou kalibraci mikrofonní soustavy.

V praktické části byla navržena a implementována aplikace v prostředí Matlab, využívající nástroje Audio Toolbox a App Designer. Aplikace umožňuje komplexní měření směrových charakteristik, jejich vizualizaci v polárních a sférických grafech, kontrolu SNR, detekci limitace signálu a export výsledků. Součástí vývoje byly i podpůrné funkce zajišťující spolehlivý chod systému a přesné zpracování dat.

Funkčnost aplikace byla ověřena čtyřmi praktickými měřeními v bezodrazové komoře za použití otočného systému Brüel & Kjær typ 9640. Měření prokázala přesnost, opakovatelnost a uživatelskou přívětivost navrženého řešení.

Cílem práce bylo vytvořit ucelený systém pro měření směrových charakteristik zvukových zdrojů – a tohoto cíle bylo úspěšně dosaženo. Aplikace nabízí spolehlivý a efektivní nástroj pro akustická měření s možností dalšího rozšíření a praktického nasazení.

Literatura

- [1] NIMMERRICHTER, Benjamin. *Automatizace měření směrových charakteristik zdrojů zvuku*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2022, 53 s. Bakalářská práce. Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Schimmel, Ph.D.
- [2] ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI, METROLOGII A STÁTNÍ ZKUŠEBNICTVÍ. ČSN EN 60268-5 (368305), *Elektroakustická zařízení - Část 5: Reproduktory* Změny a opravy A1 3.10t. Praha, 2004.
- [3] ŠKVOR, Zdeněk. *Akustika a elektroakustika*. Praha: Academia, 2001. ISBN 80-200-0461-0. Dostupné také z: <http://www.digitalniknihovna.cz/mzk/uuid/uuid:e914b770-24d1-11e2-8579-005056827e52>.
- [4] KINSLER, Lawrence E., Austin R. FREY, Alan B. COPPENS, and James V. SANDERS. *Fundamentals of Acoustics*, 4th ed. New York: Wiley, 2000. ISBN 978-0-471-84789-2.
- [5] MERHAUT, Josef. *Příručka elektroakustiky.*, Praha. Státní nakladatelství technické literatury, 1964.
- [6] BRIXEN, Eddy Bøgh. *Audio metering: measurements, standards and practice*. Second edition. Audio engineering society presents. New York: Focal Press, Taylor & Francis Group, 2014. ISBN 978-0-240-81467-4.
- [7] McCARTHY, Bob. *Sound Systems: Design and Optimization*, 2nd Edition. Focal Press; 2009, ISBN: 978-0240521565
- [8] Smékal, Zdeněk, Sysel, Petr. *Signálové procesory*, Praha: Sdělovací technika, 2006, ISBN: 80-86645-08-8
- [9] MITRA, Sanjit Kumar and KAISER, James F. *Handbook for digital signal processing*. New York: John Wiley, 1993. ISBN 0-471-61995-7.
- [10] PACTITIS, S. A. *Active Filters: Theory and Design*. Boca Raton: Taylor & Francis, 2019. ISBN 978-0-367-38838-6.
- [11] AUDIX AX TM1 SpecSheet. Online. Verze 5.1. Audix Corporation. Dostupné z: <https://cdn.audixusa.com/media/downloadable/manual/AUDIX-AX-TM1-SpecSheet.pdf>. [cit. 2024-12-11].
- [12] MEYER SOUND. *MM-4XP miniature self-powered loudspeaker: datasheet* [online]. Berkeley, CA: Meyer Sound Laboratories, 2019 [cit. 2025-05-27]. Dostupné z: <https://meyersound.com/download/mm-datasheet/>

- [13] EVENT ELECTRONICS. *ALP5 Active Linear Phase Bi-Amplified Studio Monitor: technické specifikace* [online]. [cit. 2025-05-27]. Dostupné z: <https://www.zzounds.com/item--EVEALP5>

Seznam symbolů a zkratek

ASIO	Vstup/výstup zvukového toku – Audio Stream Input/Output
SNR	Poměr signálu a šumu – Signal to Noise Ratio
SPL	Hladina akustického tlaku – Sound Pressure Level
RMS	Efektivní hodnota signálu – Root Mean Square
DFT	Diskrétní Fourierova transformace – Discrete Fourier transform
FFT	Rychlá Fourierova transformace – Fast Fourier Transform
ČSN EN	Převzaté Evropské normy – Harmonized European norm
EMC	Elektromagnetická kompatibilita – Electromagnetic compatibility
R_{XY}	výsledek korelace
R_{XX}	výsledek autokorelace
X_k	spektrální koeficient
X	signál x transformovaný do kmitočtové domény
Y	signál y transformovaný do kmitočtové domény
H	Přenosová funkce systému
h	Impulzní odezva systému
s	Komplexní frekvenční proměnná
σ	Část komplexní frekvenční proměnné
J_1	Besselova funkce 1. druhu a 1. řádu,
p	akustický tlak
p_{ef}	efektivní hodnota akustického tlaku
p_0	referenční hodnota akustického tlaku
p_{00}	statický (barometrický) tlak
p_c	celkový atmosferický tlak
\mathbf{r}	polohový vektor

d	průměr zdroje
r	vzdálenost, za kterou začíná volné pole
R	poloměr pístově kmitající membrány
λ	vlnová délka
k	vlnové číslo
f	frekvence
f_S	vzorkovací frekvence
f_E	očekávaná frekvence
ω	úhlová frekvence
T	perioda
t	čas
Δt_{\max}	maximální časový rozdíl mezi detekcemi počátku
τ	vzájemný posuv dvou signálů (spojitý)
c_0	rychlost šíření zvuku v daném prostředí
D	Směrová funkce
Q	Činitel směrovosti
DI	Index směrovosti
u	hodnota signálu (výhylkové veličiny)
U_{ef}	efektivní hodnota signálu
X_{ef}	efektivní hodnota signálu vypočítaná ze spektrálních koeficientů
u_{ref}	referenční hodnota signálu
N	počet vzorků
NS	počet vzorků k zachování určitého počtu maxim
NP	požadovaný počet špiček
N_{buff}	počet vzorků v jednom zásobníku

ΔN_{avg}	střední hodnota vzdálenosti mezi sousedními maximy, udána v počtu vzorků
m	je vzájemný posuv signálů (diskrétní)
n	index vzorku
P	měřený výkon
P_{ref}	referenční výkon
L_p	hladina akustického tlaku
L_P	hladina výkonové veličiny
L_u	hladina signálu (výchylkové veličiny)
L_{CPKmax}	Špičková hladina akustického tlaku měřená s C-frekvenčním vážením
L_{AFmax}	Maximální hladina akustického tlaku měřená s A-frekvenčním vážením a rychlou časovou konstantou

Seznam příloh

A	Obsah elektronické přílohy	59
B	Výsledky měření graficky	60
B.1	První měření	60
B.2	Druhé měření	62
B.3	Třetí měření	68
B.4	Čtvrté měření	80

A Obsah elektronické přílohy

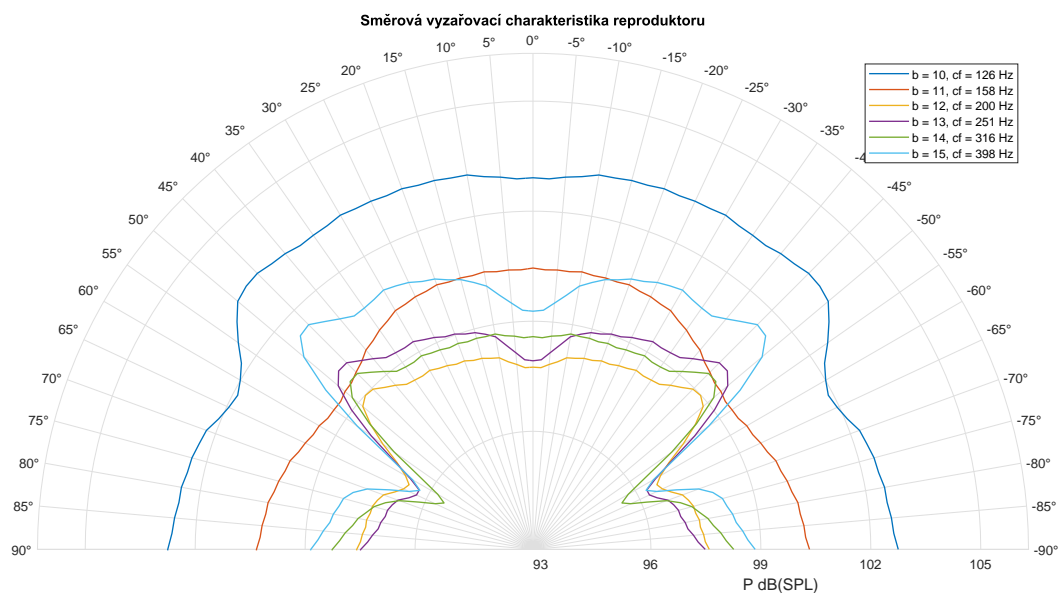
Elektronická příloha obsahuje aplikaci SMDRSS a všechny potřebné skripty a soubory k jejímu spuštění. Navíc jsou zde zahrnuty testovací soubory, které nejsou využité v běhu aplikace, ale dovolují jinými způsoby pracovat s měřenými daty a některá měření jsou pouze kompatibilní s těmito soubory.

Adresářová struktura

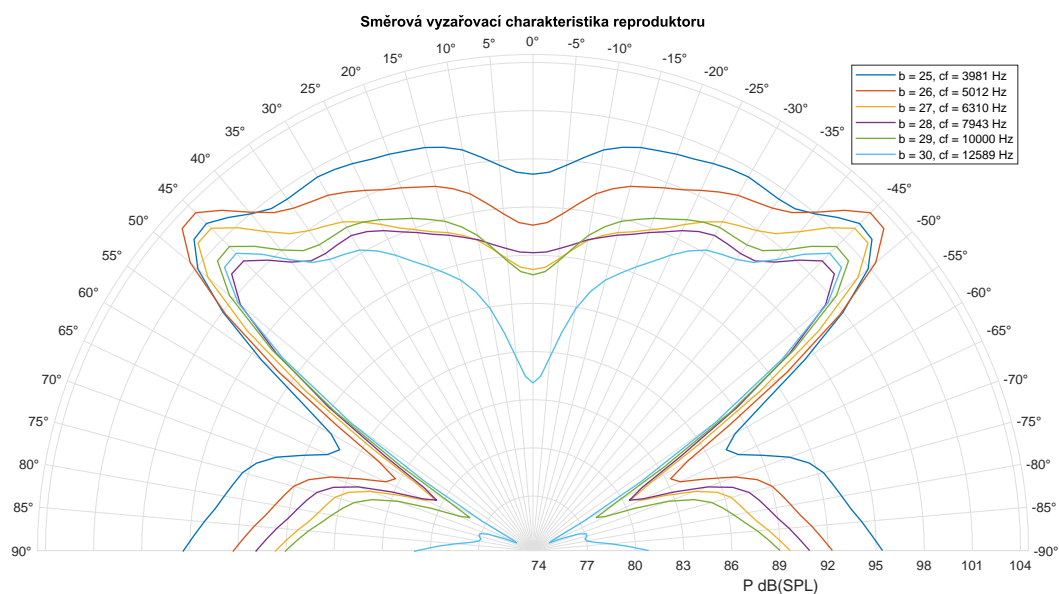
```
electronic attachment/ - Kořenový adresář obsahující přílohu
├── config_files/ - Konfigurační soubory
├── export/ - Exportované nahrávky z měření
├── measurement_files/ - Měřené soubory
├── measurement_tones/ - Měřicí tóny pro synchronní měření
├── legacy_measurements/ - Ostatní měření vytvořená v rámci diplomové
  práce
├── scripts/ - Všechny skripty
├── test_files/ - Testovací skripty
├── README.MD - Informace o projektu
└── SMDRSS - Zástupce pro otevření aplikace
```

B Výsledky měření graficky

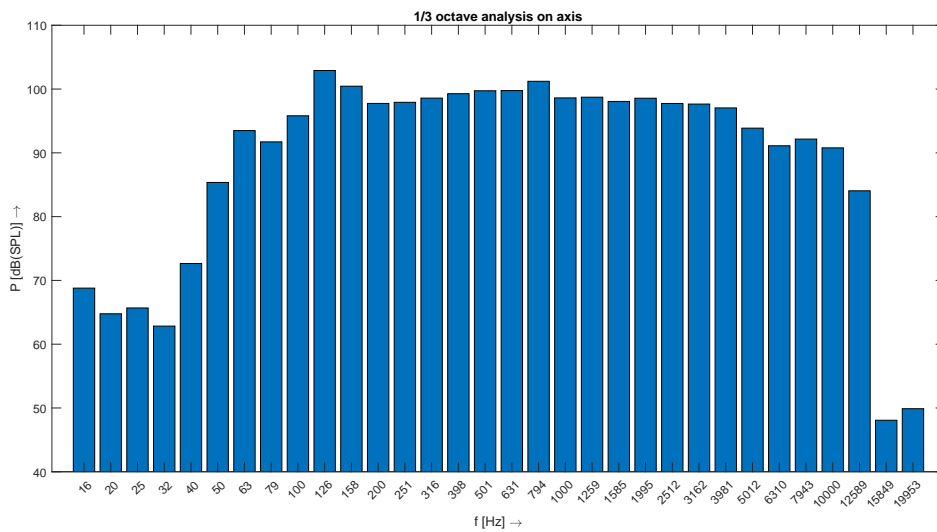
B.1 První měření



Obr. B.1: Směrová vyzařovací charakteristika pro třetinooktávová pásma 10-15.



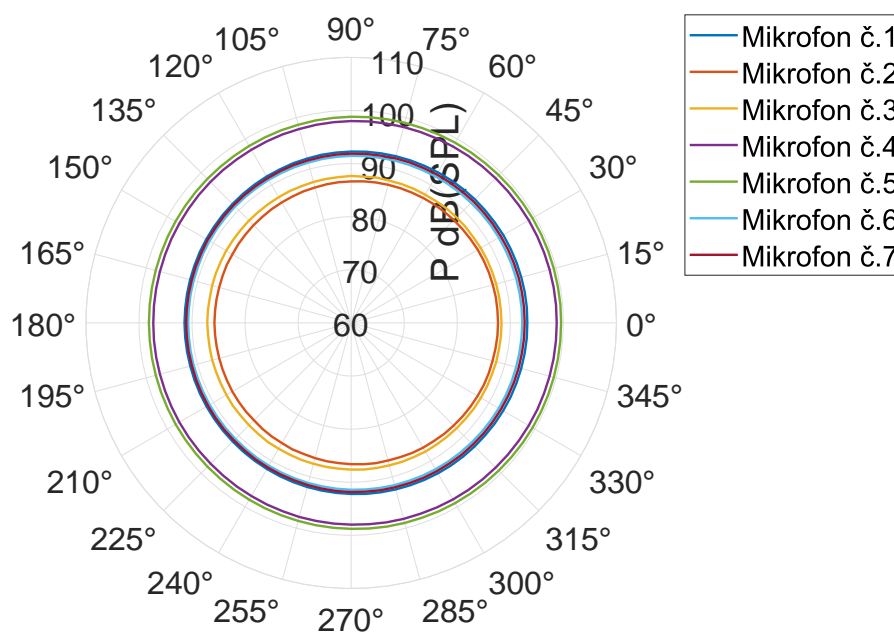
Obr. B.2: Směrová vyzařovací charakteristika pro třetinooktávová pásma 25-30.



Obr. B.3: Třetinooktávová analýza v akustické ose reproduktoru.

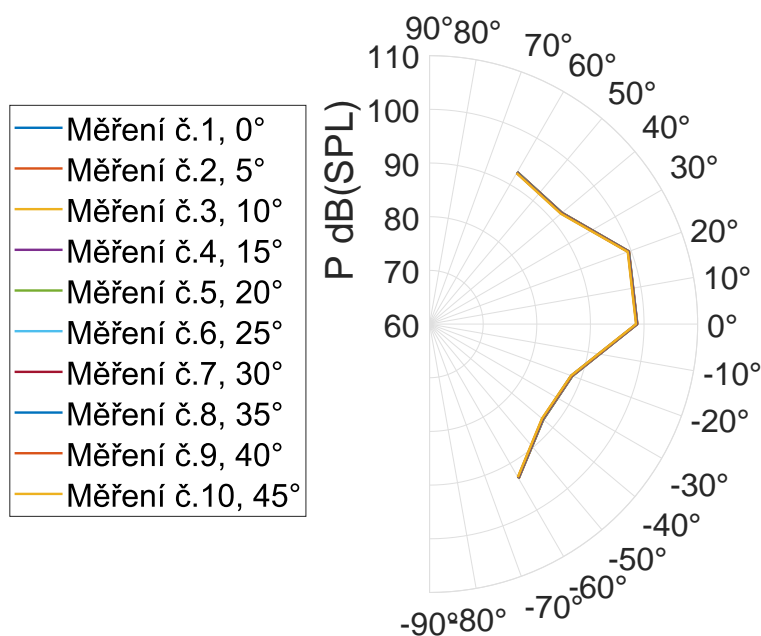
B.2 Druhé měření

Horizontální 2D směrová char. v pásmu č. 10, $f_c = 126$ Hz



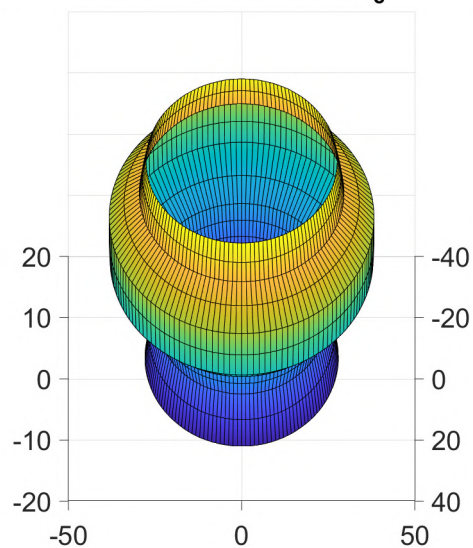
Obr. B.4: 3D směrová vyzařovací charakteristika pro třetinooktávové pásmo č. 10.

Vertikální 2D směrová char. v pásmu č. 10, $f_c = 126$ Hz



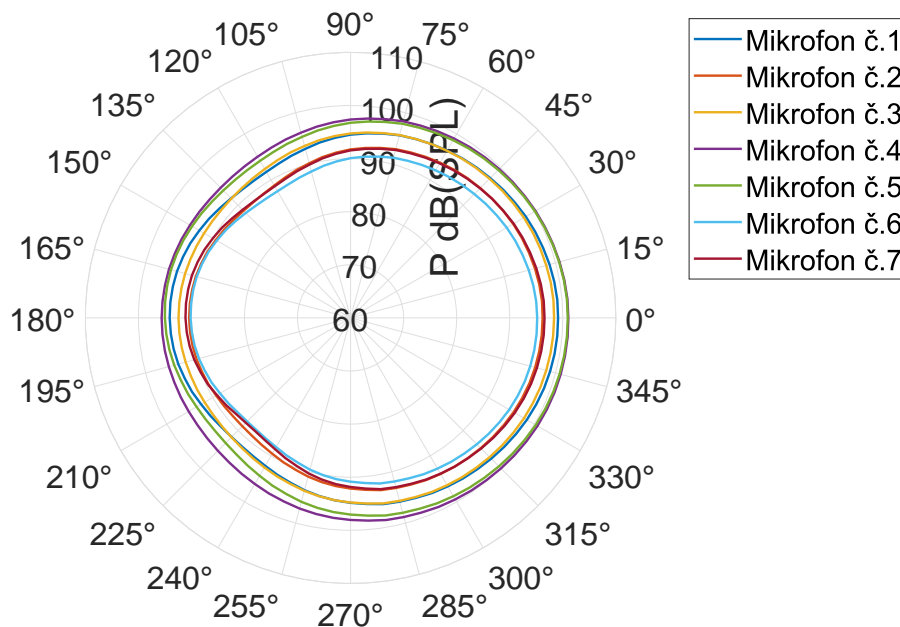
Obr. B.5: 3D směrová vyzařovací charakteristika pro třetinooktávové pásmo č. 10.

Směrová char. v pásmu č. 10, $f_c = 126 \text{ Hz}$



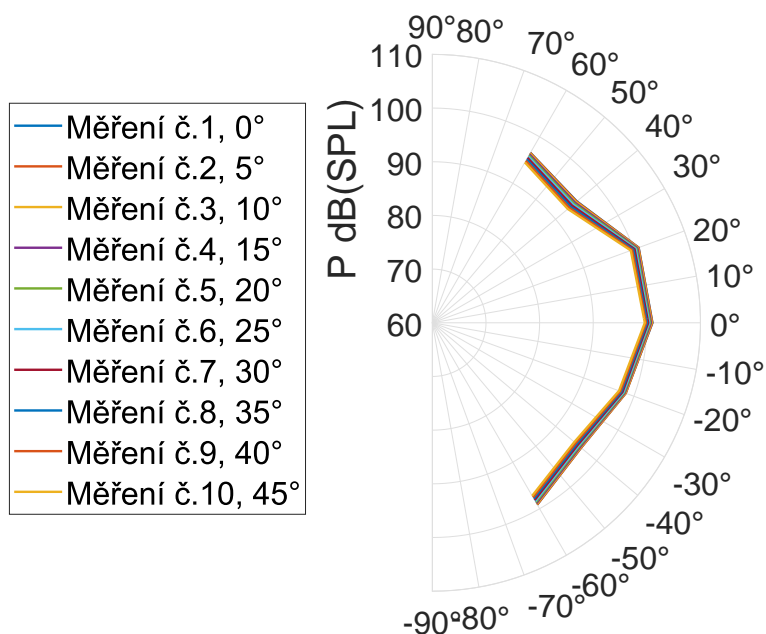
Obr. B.6: 3D směrová vyzařovací charakteristika pro třetinooktávové pásmo č. 10.

Horizontální 2D směrová char. v pásmu č. 20, $f_c = 1259 \text{ Hz}$



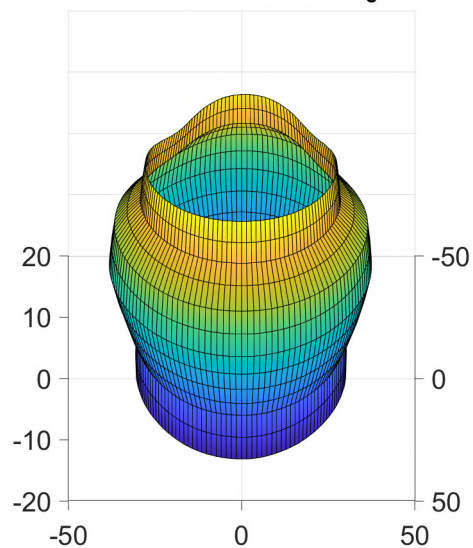
Obr. B.7: 3D směrová vyzařovací charakteristika pro třetinooktávové pásmo č. 25.

Vertikální 2D směrová char. v pásmu č. 20, $f_c = 1259$ Hz



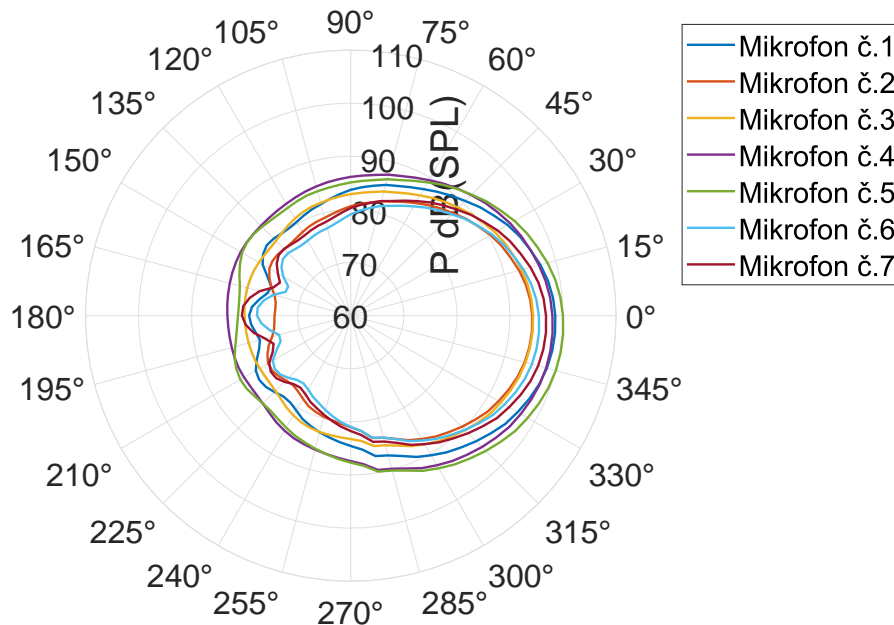
Obr. B.8: 3D směrová vyzařovací charakteristika pro třetinooktávové pásmo č. 30.

Směrová char. v pásmu č. 20, $f_c = 1259$ Hz



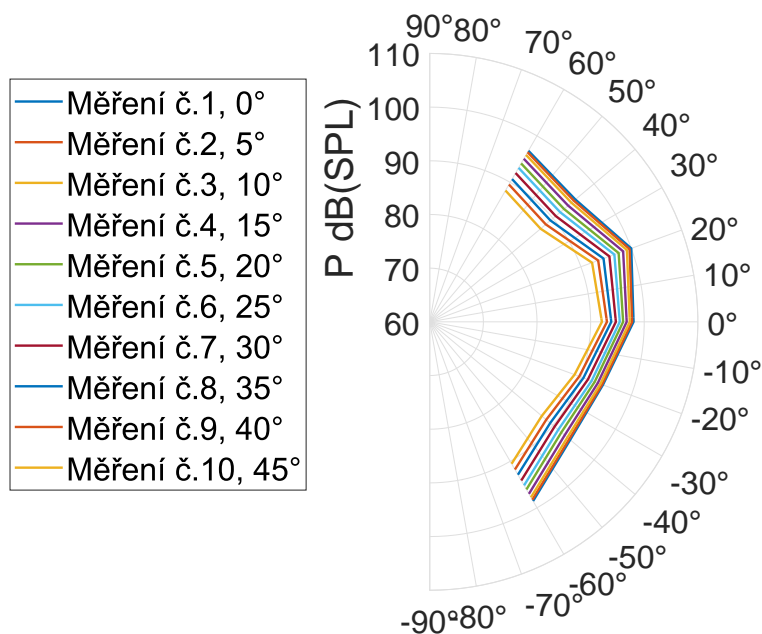
Obr. B.9: 3D směrová vyzařovací charakteristika pro třetinooktávové pásmo č. 30.

Horizontální 2D směrová char. v pásmu č. 25, $f_c = 3981$ Hz



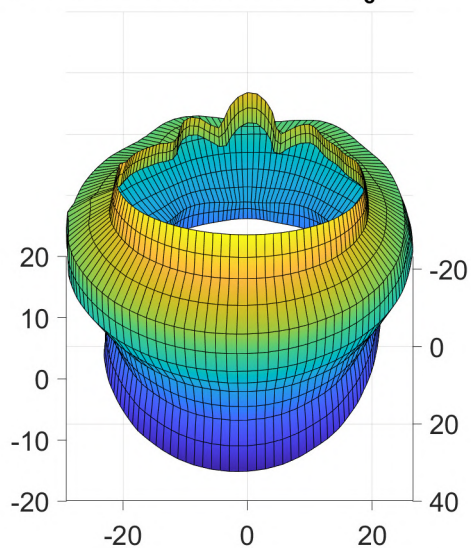
Obr. B.10: 3D směrová vyzařovací charakteristika pro třetinoctávové pásmo č. 25.

Vertikální 2D směrová char. v pásmu č. 25, $f_c = 3981$ Hz



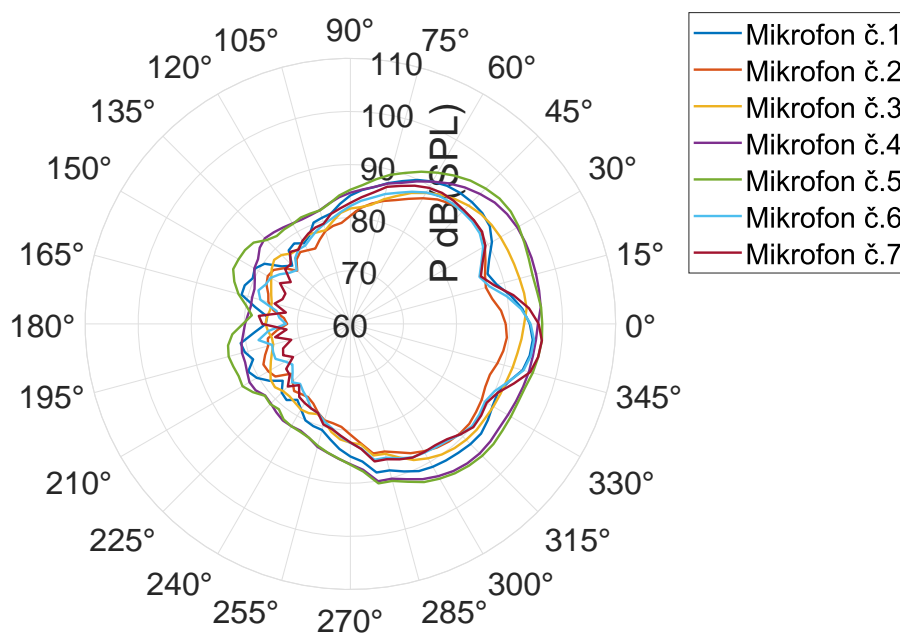
Obr. B.11: 3D směrová vyzařovací charakteristika pro třetinoctávové pásmo č. 30.

Směrová char. v pásmu č. 25, $f_c = 3981$ Hz



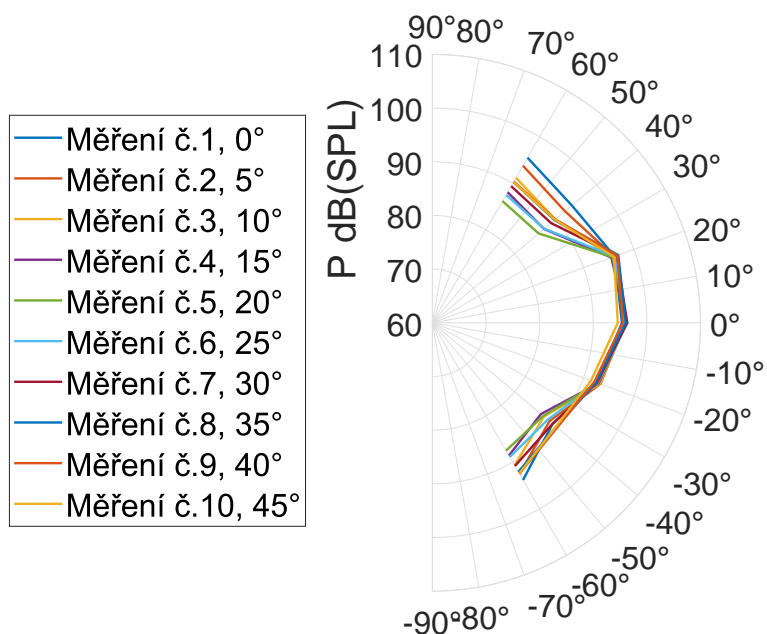
Obr. B.12: 3D směrová vyzařovací charakteristika pro třetinooktávové pásmo č. 30.

Horizontální 2D směrová char. v pásmu č. 30, $f_c = 12589$ Hz



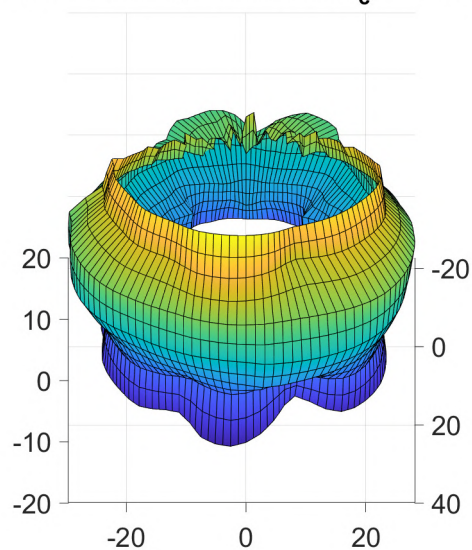
Obr. B.13: 3D směrová vyzařovací charakteristika pro třetinooktávové pásmo č. 25.

Vertikální 2D směrová char. v pásmu č. 30, $f_c = 12589$ Hz



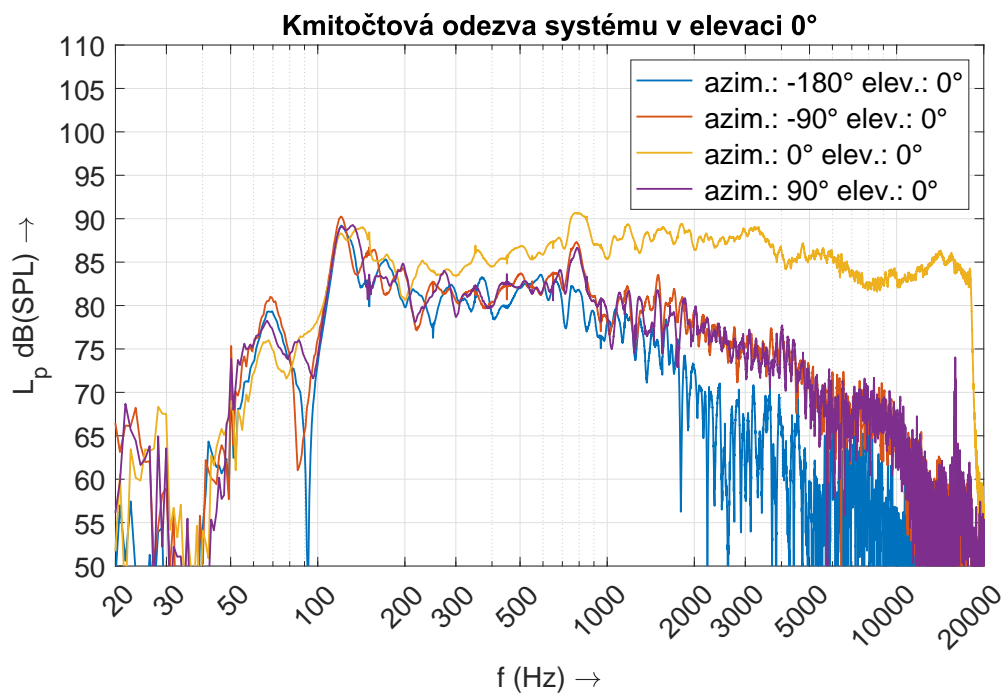
Obr. B.14: 3D směrová vyzařovací charakteristika pro třetinooktávové pásmo č. 30.

Směrová char. v pásmu č. 30, $f_c = 12589$ Hz

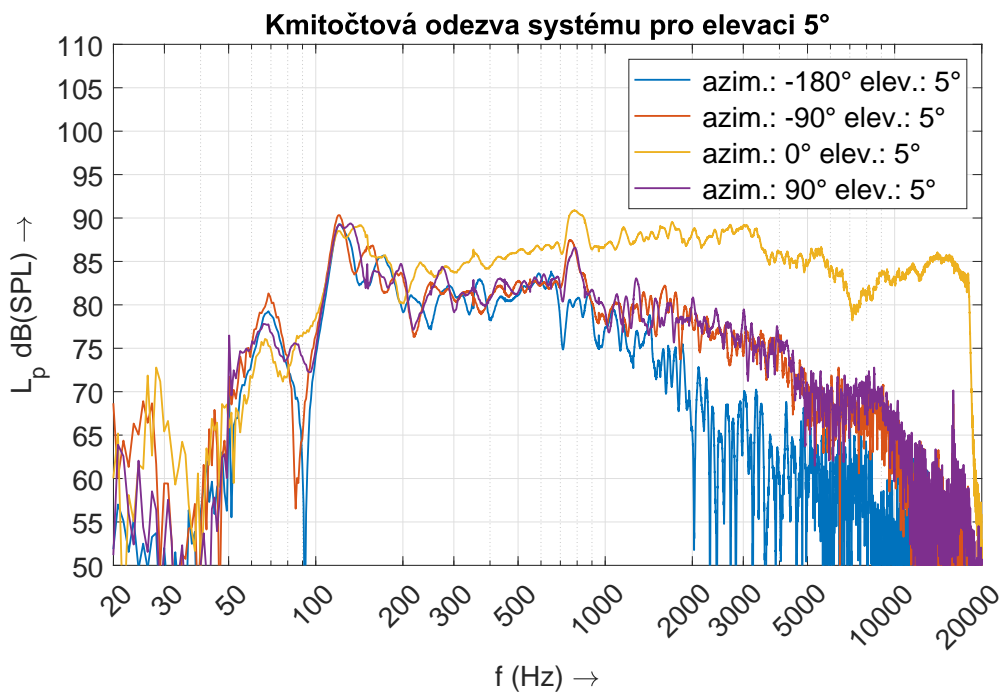


Obr. B.15: 3D směrová vyzařovací charakteristika pro třetinooktávové pásmo č. 30.

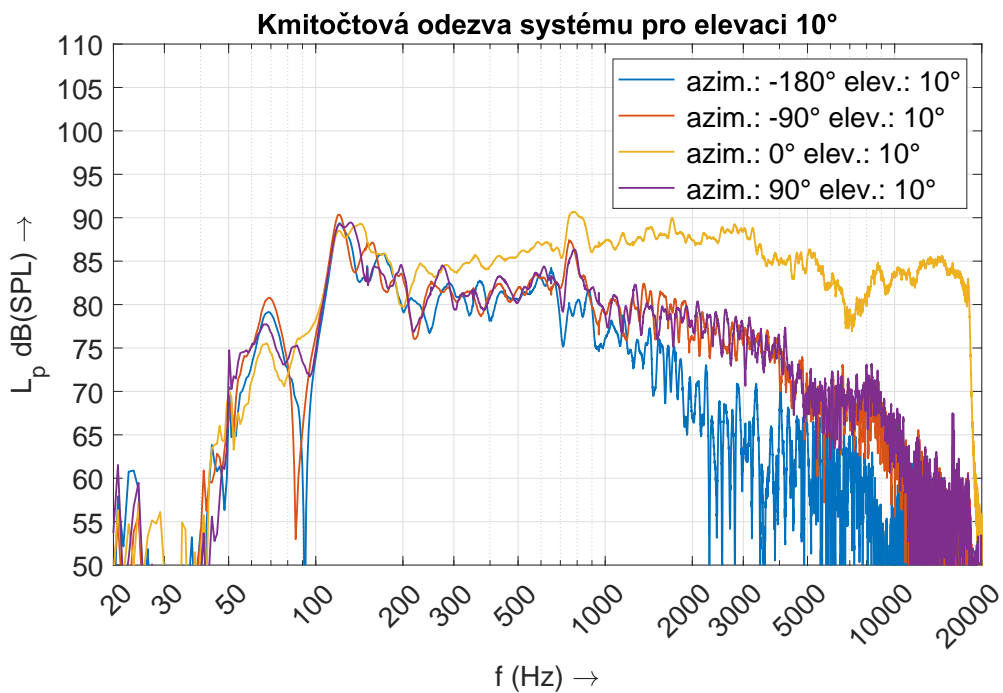
B.3 Třetí měření



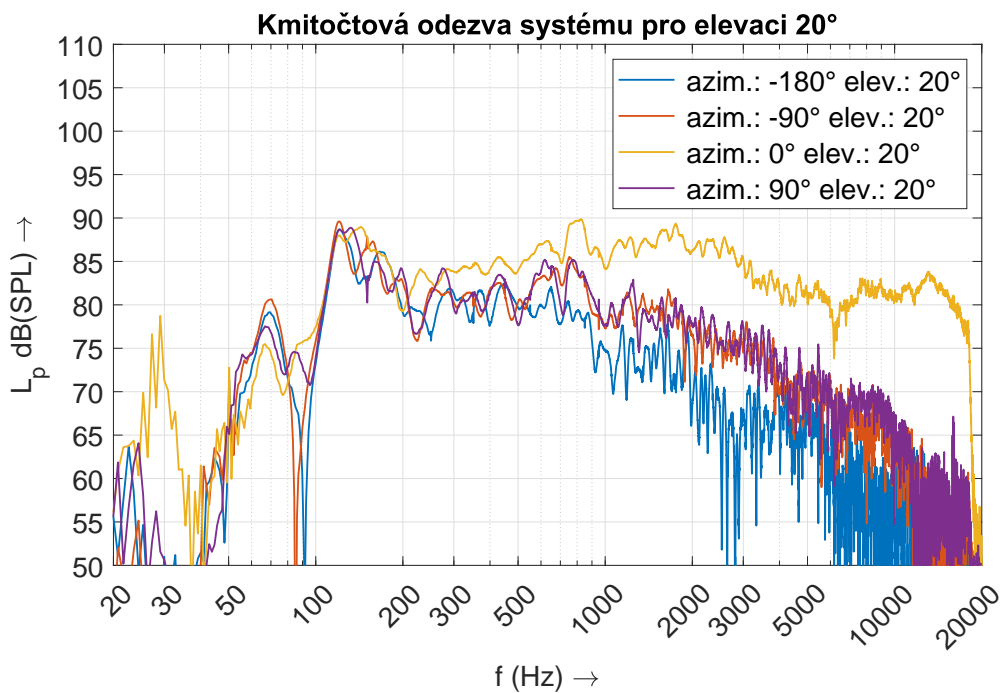
Obr. B.16: Kmitočtová odezva reproduktoru v elevaci 0° a různých azimutech.



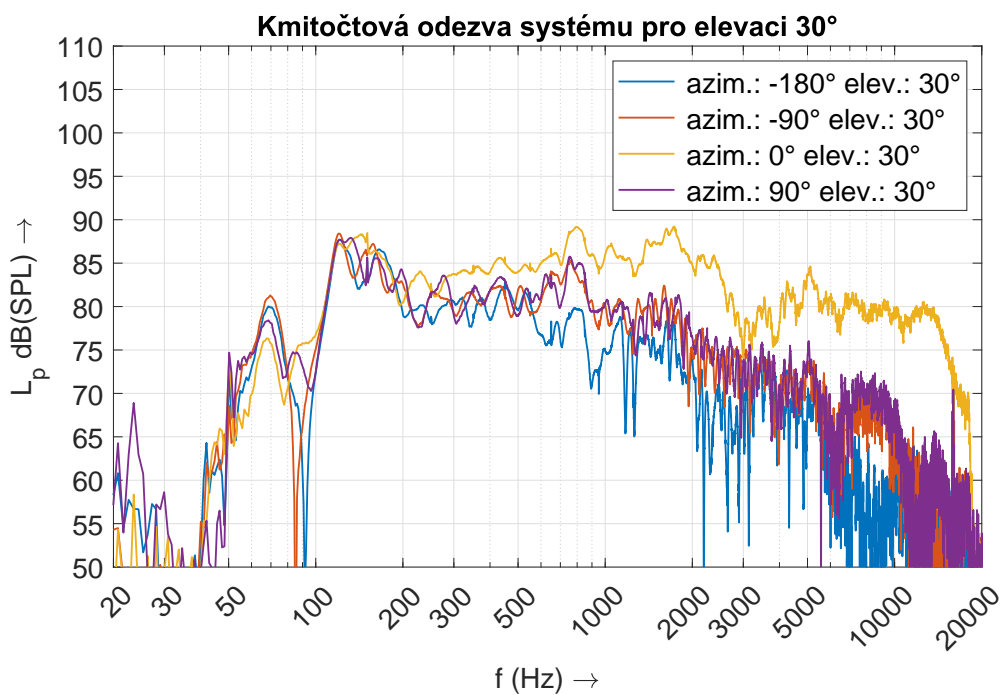
Obr. B.17: Kmitočtová odezva reproduktoru v elevaci 5° a různých azimutech.



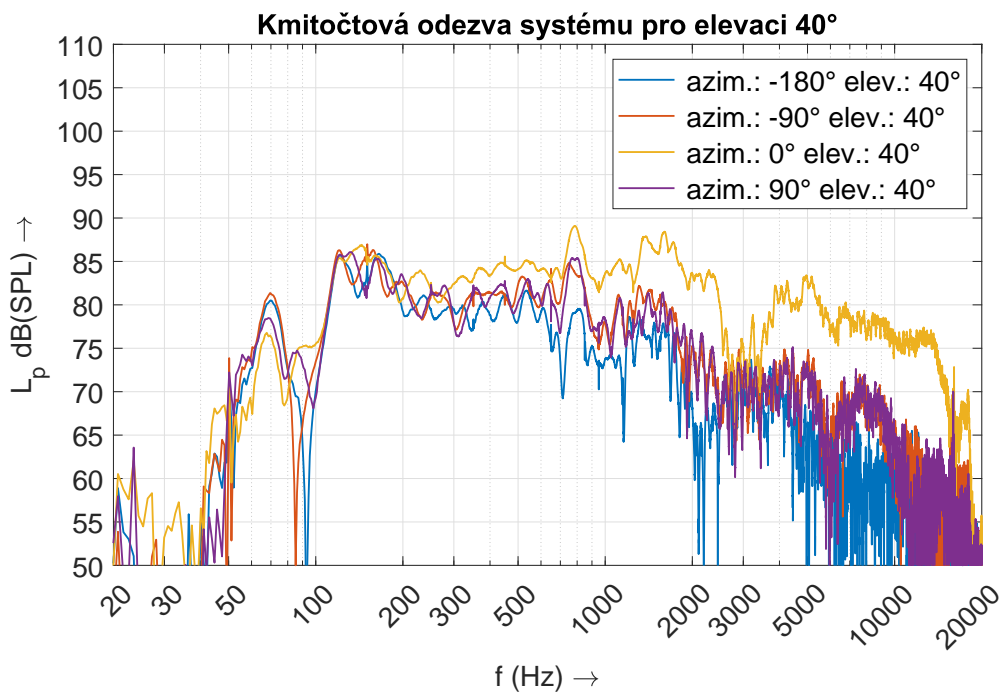
Obr. B.18: Kmitočtová odezva reproduktoru v elevaci 10° a různých azimutech.



Obr. B.19: Kmitočtová odezva reproduktoru v elevaci 20° a různých azimutech.

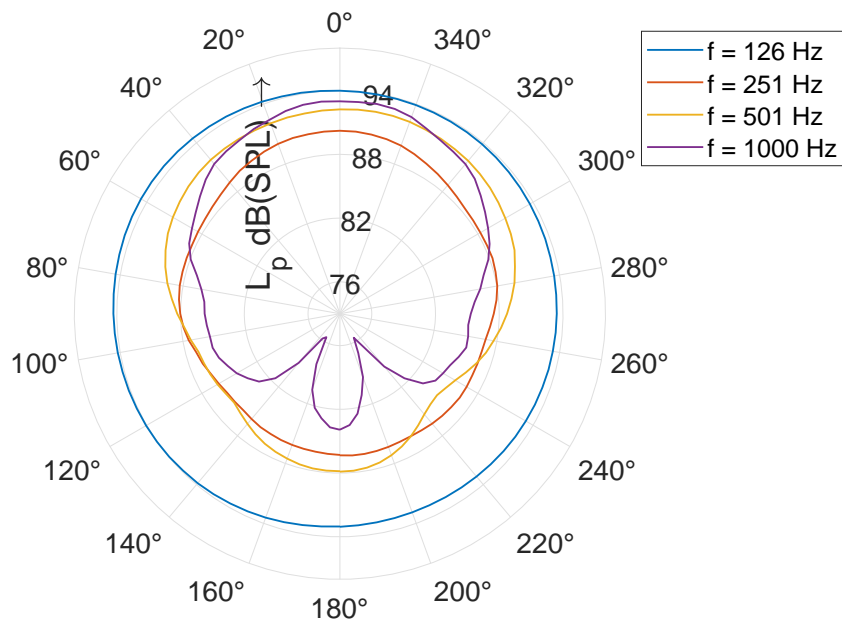


Obr. B.20: Kmitočtová odezva reproduktoru v elevaci 30° a různých azimutech.



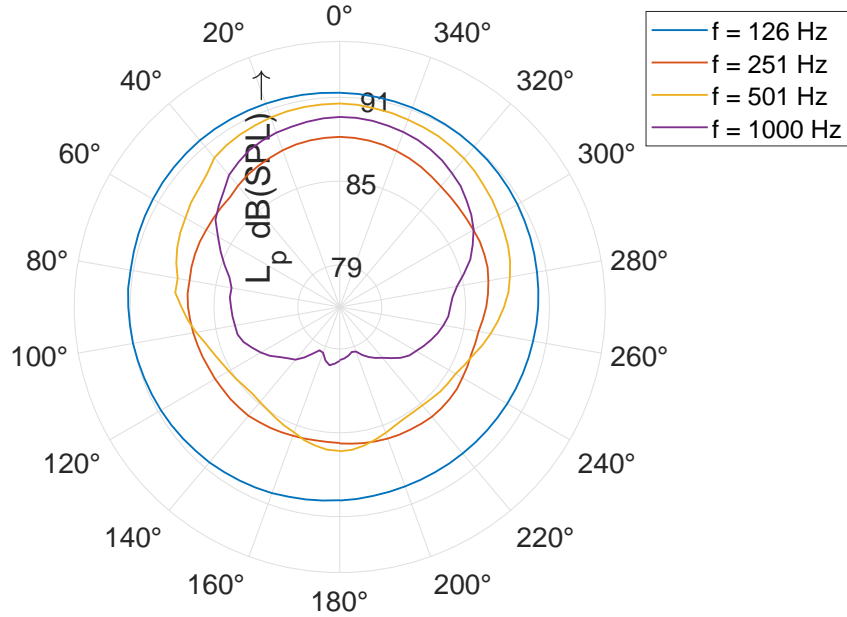
Obr. B.21: Kmitočtová odezva reproduktoru v elevaci 40° a různých azimutech.

Směrová charakteristika reproduktoru v elevaci 0°



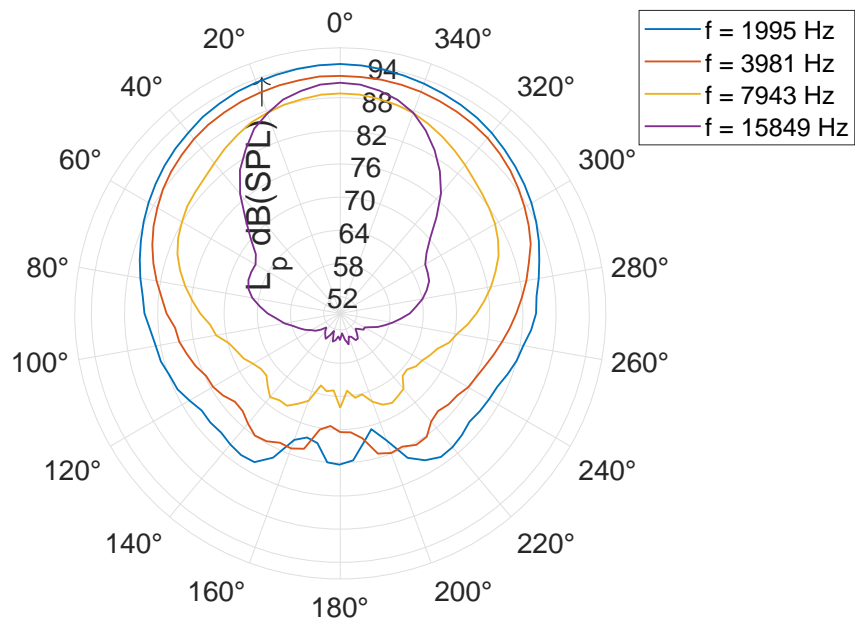
Obr. B.22: Směrová vyzářovací charakteristika pro měřený reproduktor pro nízké kmitočty v akustické ose.

Směrová charakteristika reproduktoru v elevaci 40°



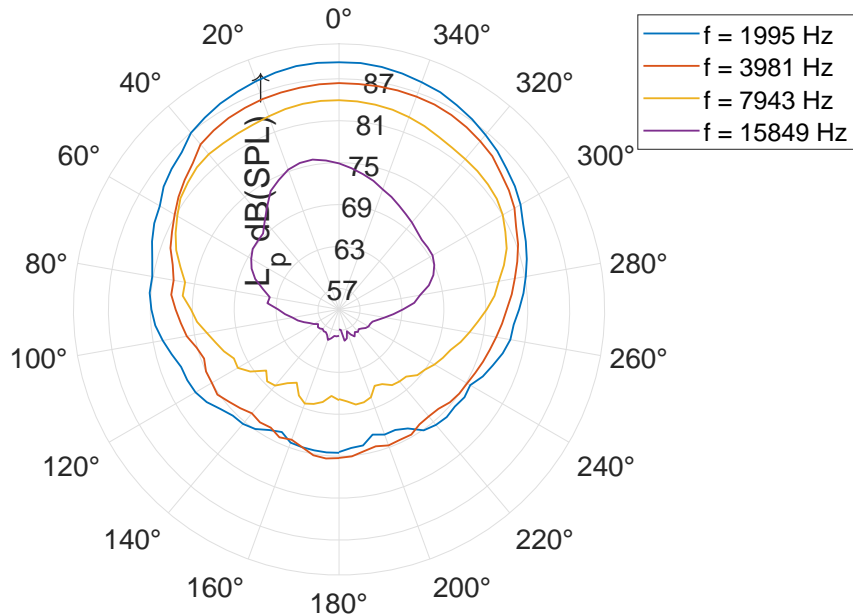
Obr. B.23: Směrová vyzářovací charakteristika pro měřený reproduktor pro nízké kmitočty v elevaci 40°.

Směrová charakteristika reproduktoru v elevaci 0°



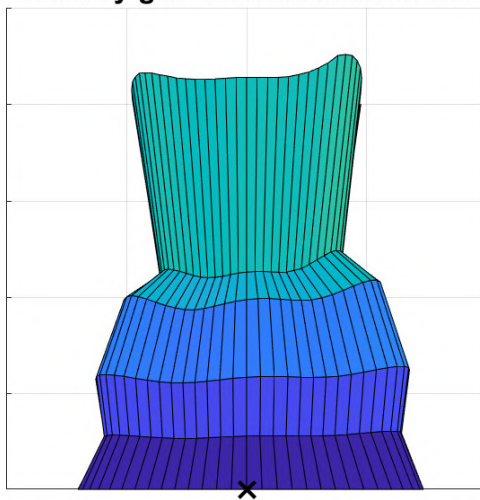
Obr. B.24: Směrová vyzářovací charakteristika pro měřený reproduktor pro vysoké kmitočty v akustické ose.

Směrová charakteristika reproduktoru v elevaci 40°



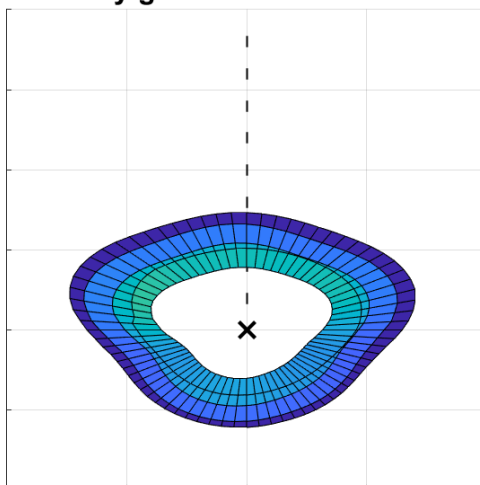
Obr. B.25: Směrová vyzářovací charakteristika pro měřený reproduktor pro vysoké kmitočty v elevaci 40°.

Sférický graf na frekvenci 200 Hz



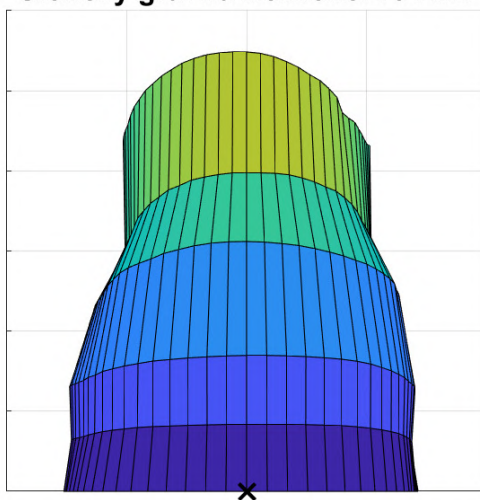
Obr. B.26: Trojrozměrná směrová vyzářovací charakteristika pro kmitočet 200 Hz, pohled zepředu.

Sférický graf na frekvenci 200 Hz



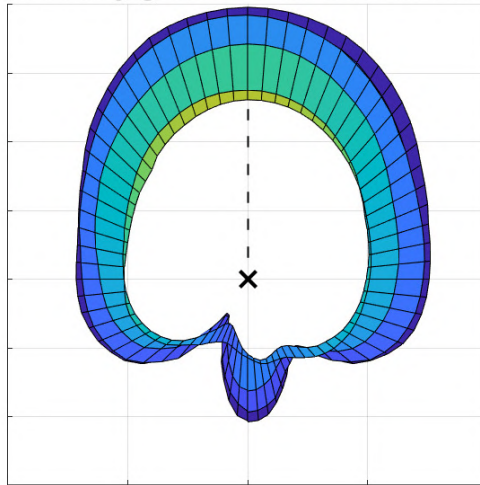
Obr. B.27: Trojrozměrná směrová vyzařovací charakteristika pro kmitočet 200 Hz, pohled shora.

Sférický graf na frekvenci 794 Hz



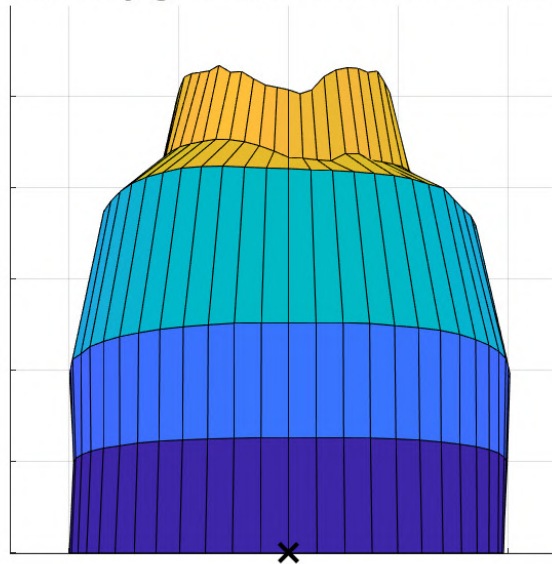
Obr. B.28: Trojrozměrná směrová vyzařovací charakteristika pro kmitočet 800 Hz, pohled zepředu.

Sférický graf na frekvenci 794 Hz



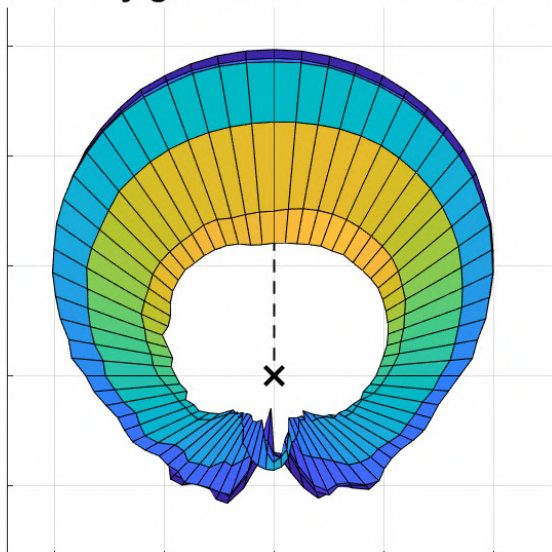
Obr. B.29: Trojrozměrná směrová vyzařovací charakteristika pro kmitočet 800 Hz, pohled shora.

Sférický graf na frekvenci 3162 Hz



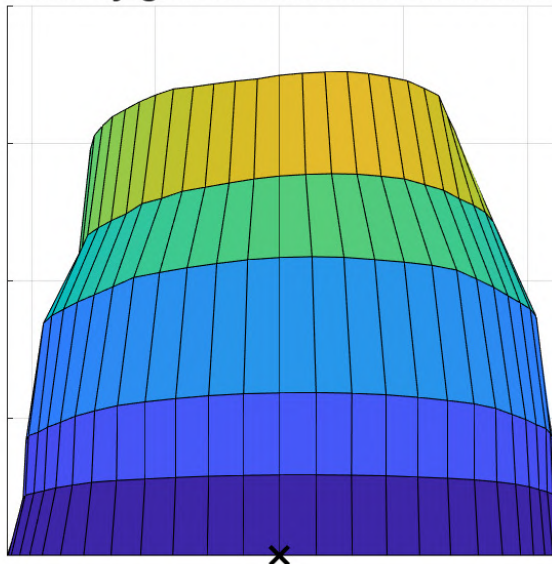
Obr. B.30: Trojrozměrná směrová vyzařovací charakteristika pro kmitočet 3150 Hz, pohled zepředu.

Sférický graf na frekvenci 3162 Hz



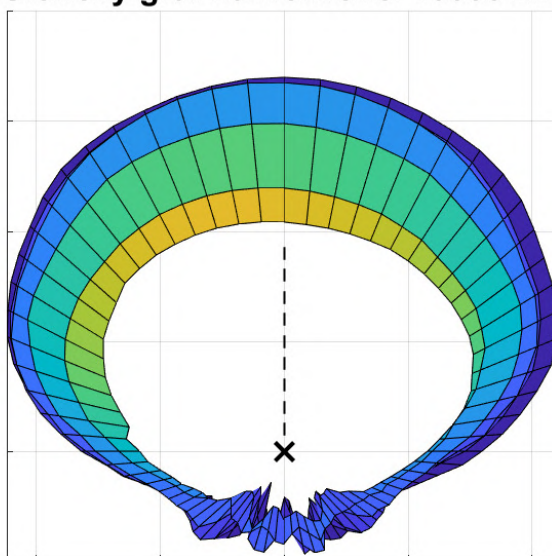
Obr. B.31: Trojrozměrná směrová vyzářovací charakteristika pro kmitočet 3150 Hz, pohled shora.

Sférický graf na frekvenci 10000 Hz



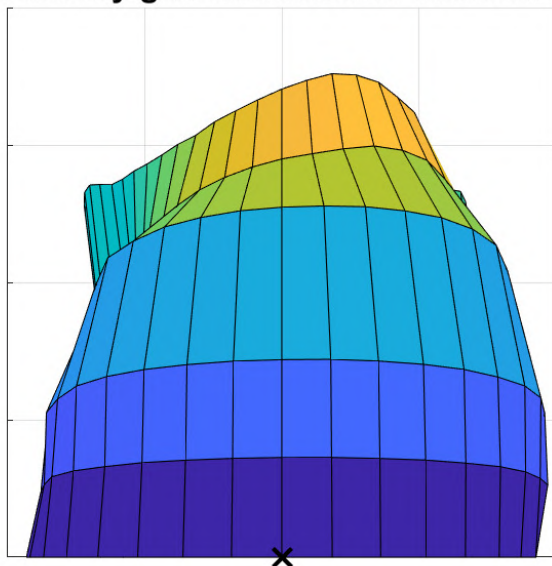
Obr. B.32: Trojrozměrná směrová vyzářovací charakteristika pro kmitočet 10 kHz, pohled zepředu.

Sférický graf na frekvenci 10000 Hz



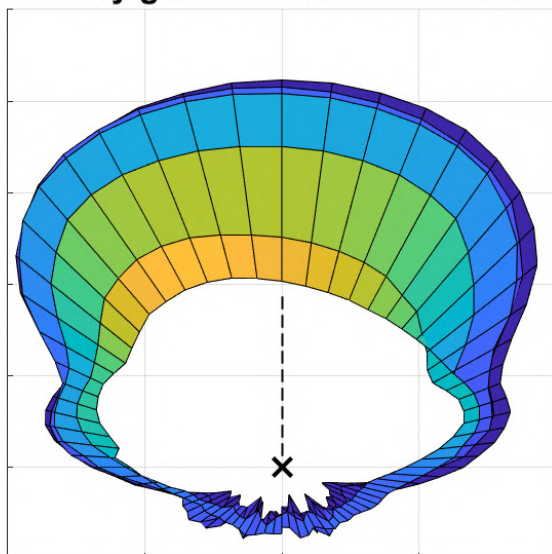
Obr. B.33: Trojrozměrná směrová vyzařovací charakteristika pro kmitočet 10 kHz, pohled shora.

Sférický graf na frekvenci 15849 Hz

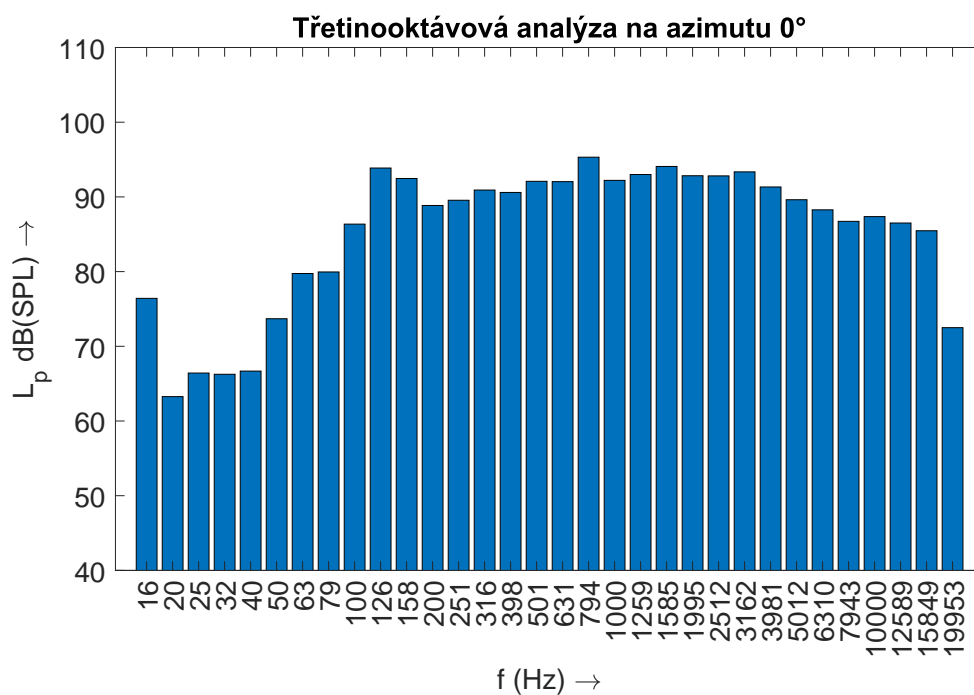


Obr. B.34: Trojrozměrná směrová vyzařovací charakteristika pro kmitočet 15,9 kHz, pohled zepředu.

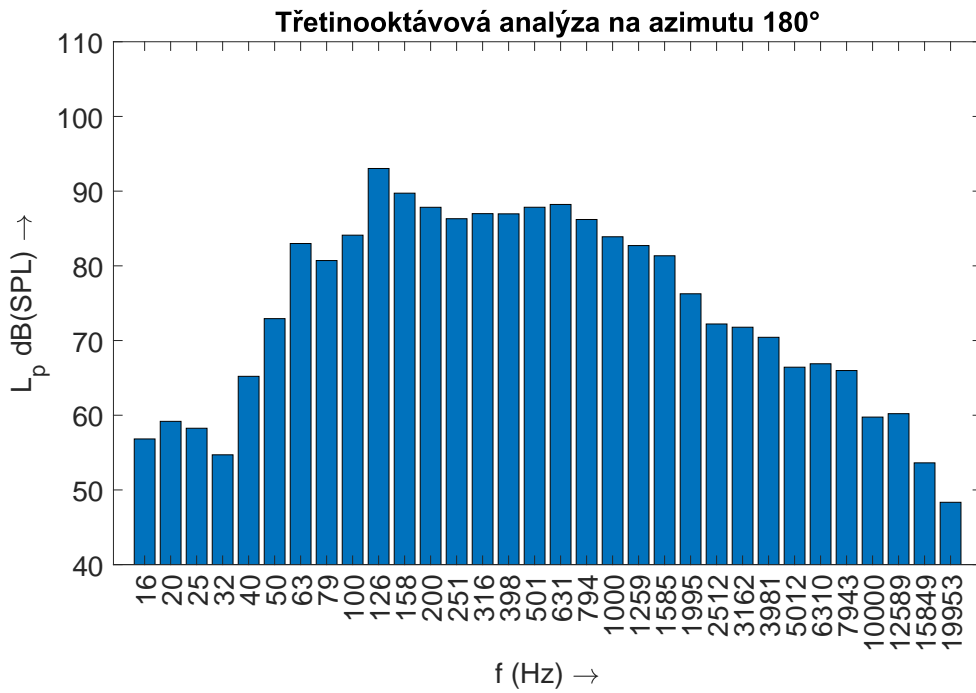
Sférický graf na frekvenci 15849 Hz



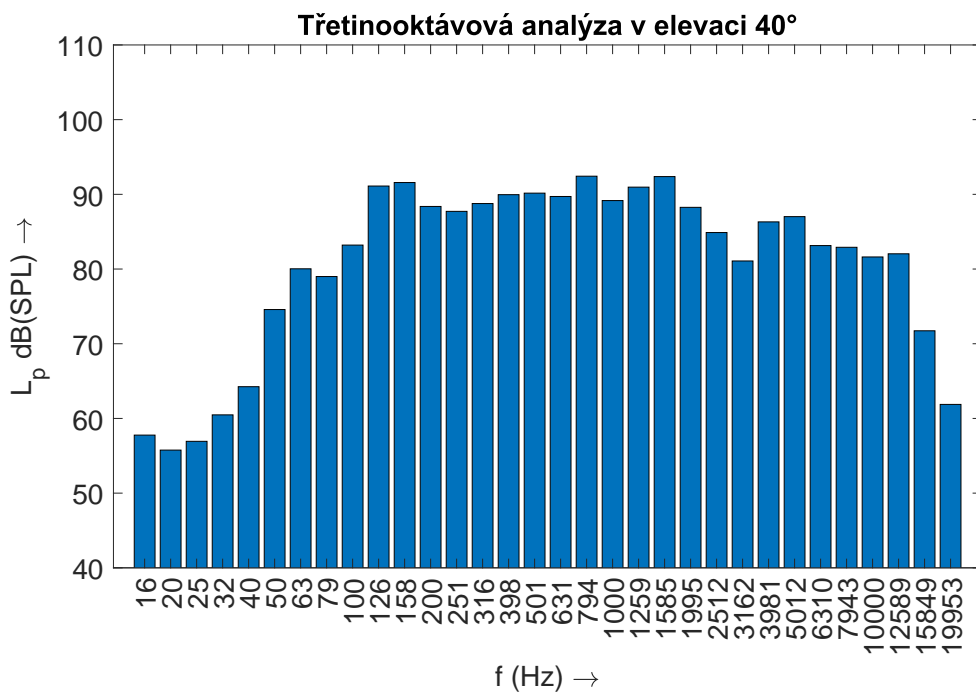
Obr. B.35: Trojrozměrná směrová vyzářovací charakteristika pro kmitočet 15,9 kHz, pohled shora.



Obr. B.36: Třetinooktávová analýza měřeného reproduktoru v akustické ose.

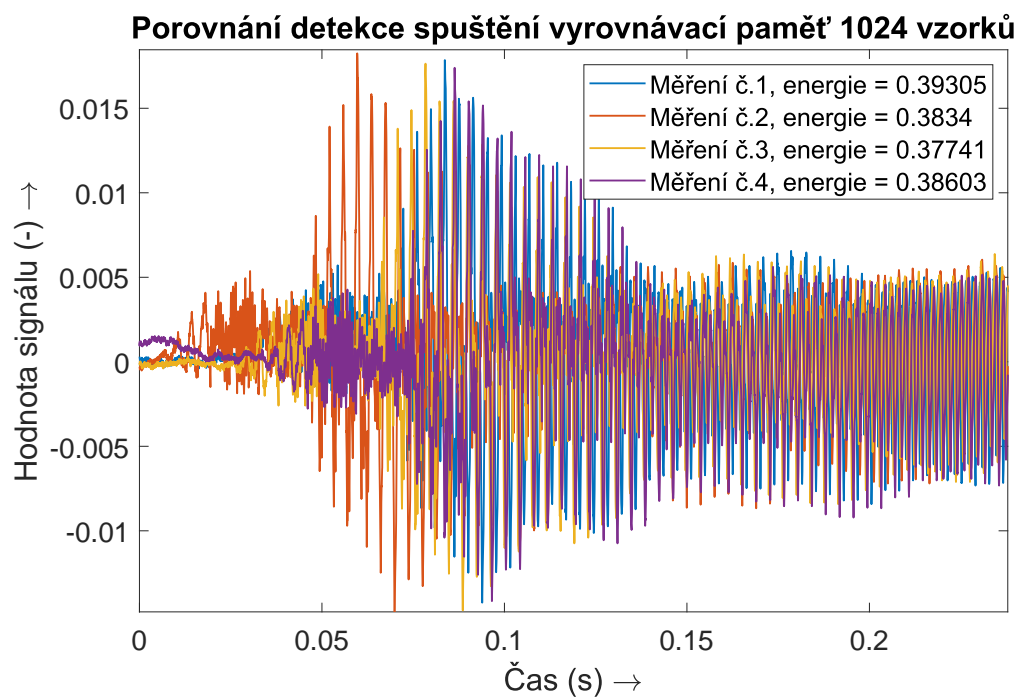


Obr. B.37: Třetinooktávová analýza ze zadní strany měřeného reproduktoru.

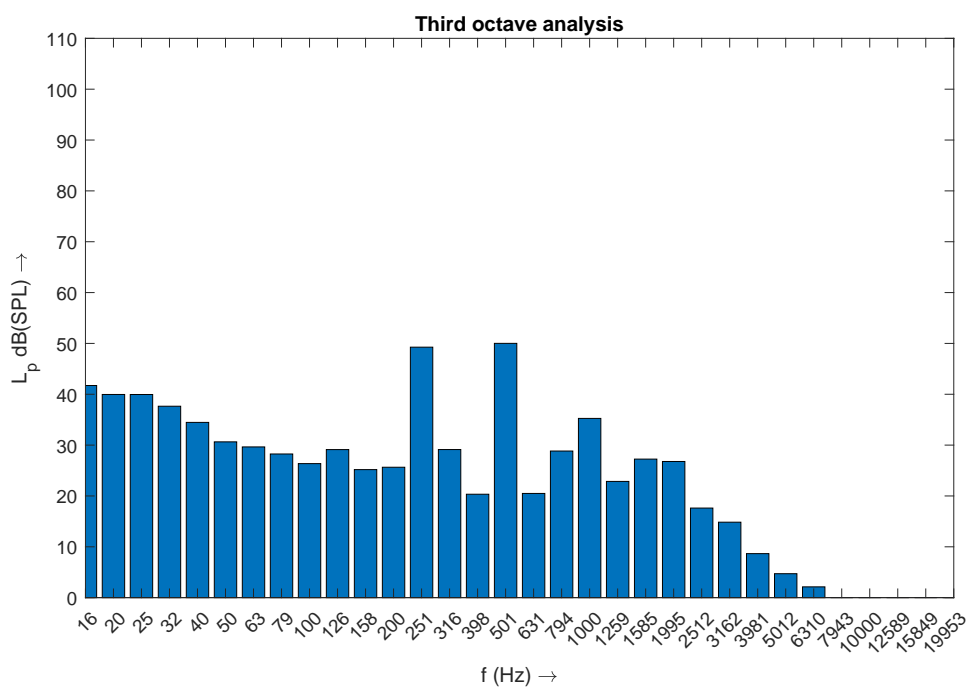


Obr. B.38: Třetinooktávová analýza měřeného reproduktoru v akustické ose.

B.4 Čtvrté měření



Obr. B.39: Měření energie signálu.



Obr. B.40: Měření energie signálu, výstup z aplikace.