



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

**IMPEDANČNÍ TRUBICE PRO MĚŘENÍ
ČINITELE ZVUKOVÉ POHLTIVOSTI**

IMPEDANCE TUBE FOR MEASURING SOUND ABSORPTION COEFFICIENT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Adam Raška

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Schimmel, Ph.D.

BRNO 2022

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Audio inženýrství**
specializace Zvuková produkce a nahrávání
Ústav telekomunikací

Student: Adam Raška

ID: 212575

Ročník: 3

Akademický rok: 2021/22

NÁZEV TÉMATU:

Impedanční trubice pro měření činitele zvukové pohltivosti

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte konstrukci impedanční trubice pro měření pohltivosti akustických materiálů a princip měření metodou přenosové funkce a metodou poměru stojaté vlny. Navrhněte a pomocí dostupných materiálů realizujte impedanční trubici pro zvolenou metodu měření, která bude využívat 1/2" nebo 1/4" měřicí kondenzátorové mikrofony. Realizujte také pracoviště pro měření vybranou metodou. Následně proveďte měření činitele pohltivosti různých materiálů a porovnejte je s výrobcem udávanými parametry. Navrhněte laboratorní úlohu zabývající se měřením pohltivosti akustických materiálů vybranou metodou a vytvořte k ní návod.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Kolmer, F., Kyncl, J. Prostorová akustika. 2. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1982, 242 s., ISBN 0451480

[2] Cox, T., J., D'Antonio, P., Acoustics Absorbers and Diffusers, Theory, design and application, 2nd ed. Taylor & Francis, 2009. ISBN 978-0-415-47174-5

Termín zadání: 7.2.2022

Termín odevzdání: 31.5.2022

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

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

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské 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 činitelem pohltivosti a jeho měřením. Pro vybranou měřicí metodu byla vytvořena impedanční trubice, na které je možné pomocí této metody měřit činitele pohltivosti různých materiálů. K těmto měřením byla navržena laboratorní úloha, ve které se využívá k měření právě vytvořená trubice.

Klíčová slova

Impedanční trubice, činitel pohltivosti, akustické materiály, přenosová funkce, konstrukce, laboratorní úloha, měření

Abstract

This thesis, consists of summarizing basic knowledge about absorption factor, methods for its measuring and construction of impedance tube for measuring with chosen method. Besides that, this thesis is also about measuring absorption factor of available materials in this tube, and proposing laboratory task about absorption factor measurement, which should use crafted measuring equipment.

Key Words

Impedance tube, absorption factor, acoustics materials, transfer function, construction, laboratory task, measurement

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu mé práce doc. Ing. Jiřímu Schimmlovi PhD, za jeho ochotu a čas při řešení této bakalářské práce. Také bych chtěl poděkovat za jeho cenné metodické rady, které mi pomohly ke zdárnému dokončení práce.

V Brně dne:

Podpis:

Bibliografická citace

RAŠKA, Adam. Impedanční trubice pro měření činitele zvukové pohltivosti [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-05-29]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/141291>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce Jiří Schimmel.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta:	Adam Raška
VUT ID studenta:	212575
Typ práce:	Bakalářská práce
Akademický rok:	2021/2022
Téma závěrečné práce:	Impedanční trubice pro měření zvukové pohltivosti

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 jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 30.5.2022



podpis autora

Obsah

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
SEZNAM OBRÁZKŮ	11
ÚVOD	12
1. POHLCOVÁNÍ ZVUKU	13
1.1 MECHANICKÉ POHLCOVÁNÍ ZVUKU.....	13
1.1.1 Přeměny vznikající třením.....	13
1.1.2 Přeměny vznikající poklesem akustického tlaku (relaxační).....	13
1.1.3 Přeměny vznikající nepružnou deformací.....	13
1.2 ČINITEL ZVUKOVÉ POHLTIVOSTI	14
1.3 PORÉZNÍ MATERIÁLY.....	16
2. MĚŘENÍ Činitele POHLTIVOSTI	17
2.1 MĚŘENÍ POMOCÍ IMPEDANČNÍ TRUBICE.....	17
2.1.1 Metoda stojatých vlnění	18
2.1.2 Metoda přenosové funkce.....	19
2.2 METODA DVOU MIKROFONŮ VE VOLNÉM POLI	20
2.2.1 Metoda s více mikrofony pro neizotropní, nerovinné povrchy.....	21
2.3 METODA MĚŘENÍ V DOZVUKOVÉ MÍSTNOSTI.....	21
3. MĚŘENÍ TS PARAMETRŮ REPRODUKTORU	23
3.1 VLIV OZVUČNICE NA CHARAKTERISTIKU REPRODUKTORU	23
3.1.1 Uzavřená ozvučnice	23
3.2 VÝPOČET TS PARAMETRŮ	24
4. NÁVRH KONSTRUKCE IMPEDANČNÍ TRUBICE.....	26
4.1 KONSTRUKČNÍ ZÁSADY	26
4.1.1 Pozice mikrofonů	26
4.1.2 Měřitelný frekvenční rozsah trubice.....	26
4.2 VOLBA METODY MĚŘENÍ	26
4.3 VOLBA MATERIÁLŮ A SOUČÁSTÍ	27
4.3.1 Trubice	27
4.3.2 Reproduktor	27
4.3.3 Mikrofony.....	27
4.4 PARAMETRY NAVRŽENÉHO ZAŘÍZENÍ	27
4.5 SOUČÁSTI ZAŘÍZENÍ	28
4.5.1 Tělo trubice.....	28
4.5.2 Ozvučnice.....	28
4.5.3 Držák vzorku	29
4.5.4 Pojící zárubně.....	30
4.5.5 Podstavce.....	30
5. MĚŘENÍ TS PARAMETRŮ REPRODUKTORU A SIMULACE V LSPCAD.....	31
5.1 MĚŘENÍ TS PARAMETRŮ REPRODUKTORU VISATON SL 70 NDV	31
5.2 SIMULACE V LSPCAD.....	32
5.2.1 Simulace uzavřené ozvučnice reproduktoru.....	32

5.2.2	<i>Simulace ozvučnice i s tělem trubice</i>	32
6.	KONSTRUKCE IMPEDANČNÍ TRUBICE	33
6.1	POŘÍZENÍ MATERIÁLŮ A SOUČÁSTÍ PRO KONSTRUKCI.....	33
6.1.1	<i>Upravení návrhu podle dostupnosti a zpracování materiálů</i>	33
6.2	MODELOVÁNÍ A TISK 3D SOUČÁSTÍ.....	34
6.2.1	<i>Vytvoření 3D modelů</i>	34
6.2.2	<i>Vytvoření G-codu a tisk součástí</i>	34
6.2.3	<i>Zárubně typu A a B</i>	34
6.2.4	<i>Podstavce</i>	35
6.3	ZHOTOVENÍ UZÁVĚRU TRUBICE.....	36
6.4	VYTVOŘENÍ DRŽÁKŮ MIKROFONŮ	36
6.5	KONSTRUKCE TĚLA TRUBICE.....	37
6.6	VYTVOŘENÍ OZVUČNICE.....	37
6.7	KOMPLETACE ZAŘÍZENÍ.....	38
7.	VÝROBA VZORKŮ PRO MĚŘENÍ	40
7.1	MELAMIN	40
7.2	CELLO F800 FR	41
7.3	OSTATNÍ MATERIÁLY	41
8.	REALIZACE PRACOVIŠTĚ PRO MĚŘENÍ IMPEDANČNÍ TRUBICÍ	42
8.1	NÁVRH A VYTVOŘENÍ ZESILOVAČE PRO GENEROVANÝ SIGNÁL	42
8.1.1	<i>Výběr vhodných součástí pro zesilovač</i>	42
8.1.2	<i>Realizace zařízení</i>	42
8.2	VYTVOŘENÍ PROGRAMU PRO MĚŘENÍ	43
9.	VÝSLEDKY MĚŘENÍ NA IMPEDANČNÍ TRUBICI	44
9.1	MĚŘENÍ POMOCÍ PROGRAMU ALAB.....	44
9.2	MĚŘENÍ POMOCÍ VYTVOŘENÉHO PROGRAMU	45
9.3	MĚŘENÍ POMOCÍ MĚŘÍCÍHO SYSTÉMU APX.....	46
9.4	ZHODNOCENÍ MĚŘENÍ NA VYTVOŘENÉM ZAŘÍZENÍ.....	48
10.	NÁVRH LABORATORNÍ ÚLOHY	50
10.1	CÍLE LABORATORNÍ ÚLOHY	50
10.2	STRUČNÝ POSTUP LABORATORNÍ ÚLOHY	51
11.	ZÁVĚR	52
	LITERATURA	53
	SEZNAM PŘÍLOH	55

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

FEKT	Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
VUT	Vysoké učení technické v Brně
FFT	Fast Fourier transform (rychlá Fourierova transformace)
MLS	Maximum-Length Sequence
THD	Total Harmonic Distortion (celkové harmonické zkreslení)

Symboly:

A	komplexní konstanta	[-]
c_0	rychlost šíření zvuku ve vzduchu	[m/s]
f_{\max}	maximální měřitelná frekvence	[Hz]
f_d	dolní limit měřitelné frekvence	[Hz]
f_h	horní limit měřitelné frekvence	[Hz]
f_c	rezonanční kmitočet uzavřené ozvučnice	[Hz]
f_r	rezonanční kmitočet reproduktoru	[Hz]
H	přenosová funkce	[-]
I	proud	[A]
j	imaginární jednotka	[-]
k	vlnové číslo	[m ⁻¹]
p	tlak	[Pa]
p_{do}	komplexní amplituda akustického tlaku dopadajícího vlnění	[Pa]
p_{od}	komplexní amplituda akustického tlaku odraženého vlnění	[Pa]
Q_{Es}	elektrický činitel jakosti reproduktoru	[-]
Q_{Ms}	mechanický činitel jakosti reproduktoru	[-]
Q_s	celkový činitel jakosti reproduktoru	[-]
Q_c	činitel jakosti reproduktoru v uzavřené ozvučnici	[-]
r	měrná akustická rezistence, poloměr	[Ω]
R_e	stejnoseměrný odpor vnutí cívky	[Ω]
R_1	pokles elektrické impedance	[Ω]
R_0	specifická hodnota odporu	[Ω]
U	napětí	[V]
V_{as}	ekvivalentní objem reproduktoru	[m ³]
V_b	objem ozvučnice	[m ³]
W_{do}	energie dopadajícího vlnění	[J]

W_{po}	energie pohlcovaná plochou	[J]
W_{od}	energie odraženého vlnění	[J]
x	měrná akustická reaktance	[Pa*s/m]
x	kartézská souřadnice	[m]
z	komplexní akustická impedance	[Ω]
z	kartézská souřadnice	[m]
Z_{max}	maximální impedanci reproduktoru za rezonance	[Ω]
α	činitel zvukové pohltivosti	[-]
α_0	činitel zvukové pohltivosti při kolmém dopadu	[-]
β	komplexní činitel zvukové odrazivosti	[-]
ρ	hustota vzduchu	[kg/m ³]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1 Odras zvuku na rozhraní dvou prostředí.....	14
Obr. 2.1 Principiální schéma pro měření impedanční trubici, nahoře pro stojatá vlnění, dole pro přenosovou funkci.	17
Obr. 3.1 Impedanční charakteristika s vyznačenými body [15].....	24
Obr. 4.1 Modulová kmitočtová charakteristika získaná ze simulace v Lsp CAD.....	29
Obr. 5.1 Impedanční charakteristika reproduktoru změřená na systému NTi RT-2B.....	31
Obr. 6.1 Model zárubně typu A (vlevo) a B (vpravo).....	35
Obr. 6.2 Model podstavy	35
Obr. 6.3 Uzávěr trubice.....	36
Obr. 6.4 Kompletní impedanční trubice.....	38
Obr. 7.1 Vytvořené vzorky	40
Obr. 9.1 Činitel pohltivosti materiálu CELLO 800 naměřený pomocí programu ALab.....	44
Obr. 9.2 Činitel pohltivosti samotné trubice naměřený pomocí ALab.....	45
Obr. 9.3 Přenosové funkce na jednotlivých mikrofonech při měření vzorku Melamin 4 cm pomocí vytvořeného programu	46
Obr. 9.4 Přenosové funkce na jednotlivých mikrofonech při měření vzorku Melamin 4 cm pomocí měřicího systému APx	47
Obr. 9.5 Přenosová funkce mezi mikrofony změřená pomocí vytvořeného programu (modrá) a pomocí měřicího systému APx (oranžová)	48
Obr. 10.1 Zapojení laboratorní úlohy.....	50

ÚVOD

Tento dokument pojednává o problematice měření činitele pohltivosti akustických materiálů, především pak o měření pomocí impedanční trubice. Hlavním cílem práce bylo sestavení impedanční trubice z dostupných materiálů, na které by bylo možné měřit činitele pohltivosti.

Teoretická část seznamuje čtenáře s problematikou pohlcování zvuku. Jsou zde rozebrány základní metody pro měření činitele pohltivosti akustických materiálů tak, aby bylo možné jednoduše pochopit jejich princip. Na konci této části je kapitola, která zevrubně probírá problematiku měření TS parametrů reproduktorů, jelikož znalost této problematiky byla důležitá pro postup v praktické části.

Praktická část nejprve popisuje návrh impedanční trubice, který byl následně zrealizován. Samotná konstrukce celého zařízení je popsána v další kapitole této části. Kromě návrhu a vytvoření impedanční trubice je součástí praktické části také realizace měřicího pracoviště, která obsahuje návrh a realizaci zesilovače určeného pro zesílení generovaného signálu na reproduktor, a vytvoření programu, který umožňuje generování požadovaného signálu a také analýzu dat získaných z měřících mikrofónů. V neposlední řadě je také v této části navržena laboratorní úloha zabývající se měřením činitele pohltivosti akustických materiálů na vytvořeném zařízení.

1. POHLCOVÁNÍ ZVUKU

1.1 Mechanické pohlcování zvuku

Mechanické pohlcování zvuku je proces nevratné přeměny zvukové energie na energii jinou, obvykle tepelnou. Při šíření zvukové energie pevnými látkami se dále přeměny dělí podle jejich vzniku na proměny vznikající třením, relaxační přeměny a přeměny vznikající nepružnou deformací. [1]

1.1.1 Přeměny vznikající třením

Při působení zvukového vlnění na materiál, začnou jeho částice a vlákna vibrovat (uvažujeme-li porézní materiál). Při těchto vibracích dochází ke tření mezi vrstvou vzduchu na povrchu a sousední vrstvou, tím vzniká tepelná energie, která je přeměněnou energií akustickou.

Pro přeměnu požadovaného množství energie je potřeba dostatečně velká plocha, proto jsou pro tento typ pohlcování vhodné porézní materiály, u kterých dochází k šíření zvuku v malých pórech. Plocha těchto pórů z pravidla bývá velká v poměru k objemu materiálu, což se při aplikaci hodí. Využívají se například při odhlučňování budov, místností nebo při vytváření akustických obkladů.

Pro akustické obklady ve formě desek a stěn, které se rozkmitají po dopadu zvukových vln, platí že část mechanické energie kmitajícího obkladu se promění zpět na energii akustickou, jež je vyzařována za obklad. Zbylá mechanická energie se přemění vlivem tření na teplo. [1]

1.1.2 Přeměny vznikající poklesem akustického tlaku (relaxační)

Tyto přeměny, jak už z názvu vyplývá, jsou způsobeny zmenšením akustického tlaku zvukového vlnění. Při šíření zvuku látkou může nastat situace, že zvuk narazí na místa, ve kterých jsou částice zhuštěny, v těchto místech dochází k nárůstu celkového tlaku (akustický tlak může nabývat kladných hodnot). Jestliže dojde ke zmenšení akustického tlaku, zmenší se také potenciální energie a tím i celková energie zvukového vlnění.

Další typ relaxace tlaku nastává například při šíření zvuku pevnou látkou nebo pevnou kostrou porézní látky. Pokud dochází u vláknité (porézní) látky ke změně průřezu kostry, potom v místech s menším průřezem bude jasnější nárůst teploty a jestliže se jedná o materiál s dobrou tepelnou vodivostí, potom dojde k vyrovnání teploty s okolím a tím k relaxaci tlaku. K relaxaci tlaku dochází často u šíření příčného vlnění kovovými deskami, jež jsou dobrými tepelnými vodiči. [1]

1.1.3 Přeměny vznikající nepružnou deformací

K tomuto typu přeměn dochází pouze u látek s pružnou hysterezí. U těchto látek, pokud jsou pod vlivem nějaké vnější například tlakové síly, dochází k deformaci, která je

nevratná, tedy ani pokud síla přestane působit, látka se nevrátí do původní podoby. Deformační práce je tedy větší než práce vykonaná pružností tělesa při návratu do původního tvaru a rozdíl těchto prací je úbytkem zvukové energie vlivem nedokonalé pružnosti. [1]

1.2 Činitel zvukové pohltivosti

Činitel zvukové pohltivosti α charakterizuje schopnost nějakého tělesa pohlcovat zvuk. Tento činitel je definován vztahem

$$\alpha = \frac{W_{po}}{W_{do}}, \quad (1.1)$$

kde W_{po} je zvuková energie pohlcovaná určitou plochou a W_{do} je energie na tuto plochu dopadající. Činitel zvukové pohltivosti má bezrozměrnou jednotku a pohybuje se v intervalu od 0 do 1. Když je materiál, nebo stěna plně odrazivá, tedy odrazí veškerou energii dopadající, potom je činitel zvukové pohltivosti roven 0. Naopak u materiálů, nebo stěn, které dopadající energii úplně pohltí, tedy žádná energie není odražena zpět, je činitel zvukové pohltivosti roven 1. [1]

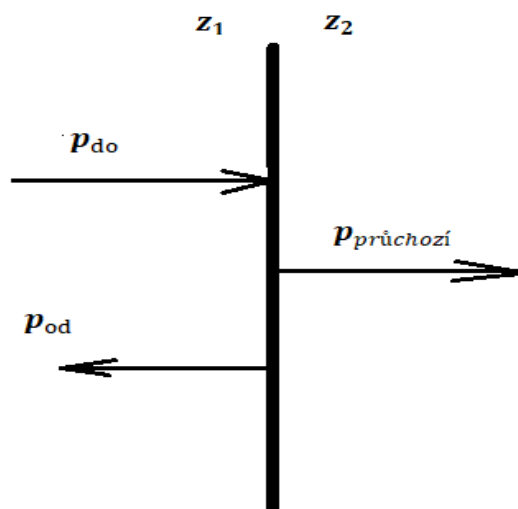
Pohlčená energie je

$$W_{po} = W_{do} - W_{od}, \quad (1.2)$$

kde W_{od} je energie od materiálu, nebo stěny, odražená. Činitele zvukové pohltivosti lze tedy dále rozepsat jako [1]

$$\alpha = \frac{W_{po}}{W_{do}} = \frac{W_{do} - W_{od}}{W_{do}} = 1 - \frac{W_{od}}{W_{do}} = 1 - \left| \frac{p_{od}}{p_{do}} \right|^2 = 1 - |\beta|^2, \quad (1.3)$$

kde β je činitel zvukové odrazivosti v komplexním tvaru, p_{od} je komplexní amplituda odraženého akustického tlaku od překážky a p_{do} je komplexní amplituda akustického



Obr. 1.1 Odraz zvuku na rozhraní dvou prostředí

tlaku na překážku dopadajícího. U těchto veličin, jelikož jsou v komplexním tvaru, záleží jak na amplitudě, tak i na fázi. Z rovnice (1.2) je vidět, že činitel zvukové pohltivosti α záleží pouze na amplitudovém skoku $|\beta|$. Pokud se činitel zvukové odrazivosti blíží 0, činitel zvukové pohltivosti se bude blížit 1. Čím větší je rozdíl měrné akustické impedance z obou prostředí, tím větší bude činitel zvukové odrazivosti. Pro přímé dopadání zvuku na překážku platí [1]

$$\beta = \frac{z_2 - z_1}{z_1 + z_2}, \quad (1.4)$$

kde z_1 je měrná akustická impedance prvního prostředí a z_2 je měrná akustická impedance prostředí druhého.

Při přechodu zvuku ze vzduchu do materiálu překážky se za z_1 uvažuje akustický vlnový odpor vzduchu, tedy $z_1 = z_0 = \rho c$. Z rovnice (1.4) jde vidět, že pokud má být činitel zvukové pohltivosti co nevyšší, je třeba aby se z_2 blížilo z_1 (v případě přechodu ze vzduchu tedy, aby se z_2 blížilo akustickému vlnovému odporu vzduchu). V případě že se odpor obou látek rovná, říkáme tomu „přizpůsobení“. [1]

Při použití měrné akustické impedance v komplexním tvaru

$$z = r + jx, \quad (1.5)$$

kde r je měrná akustická rezistence, j imaginární jednotka a x je souřadnice, lze v případě $z_1 = z_0$ psát rovnici takto [1]

$$\beta = \frac{z_2 - z_0}{z_2 + z_0} = \frac{(r - z_0) + jx}{(r + z_0) + jx}. \quad (1.6)$$

Díky této znalosti můžeme vyjádřit z rovnice (1.6) a (1.3) výraz pro činitele akustické pohltivosti při kolmém dopadu zvukového vlnění [1]

$$\alpha_0 = 1 - |\beta|^2 = \frac{\frac{4r}{z_0}}{\left(1 + \frac{r}{z_0}\right)^2 + \left(\frac{x}{z_0}\right)^2}. \quad (1.7)$$

pokud bude x rovno 0 bude mít α_0 maximální hodnotu. Jestliže bude $r = z_0$, dojde k „přizpůsobení“ a tedy α_0 bude rovna 1.

Podmínka optimálního přizpůsobení je velmi významná při návrhu akustických obkladů a při hodnocení porézních materiálů. [1]

Na velikost činitele zvukové pohltivosti má kromě materiálu vliv také frekvence dopadajícího zvukového vlnění, teplota prostředí, šířka materiálu a úhel pod kterým vlnění dopadá.

Pokud vlnění dopadá kolmo, jedná se činitel o α_0 který se nejčastěji měří v impedančních trubicích, například pomocí metody stojatého vlnění, nebo metody přenosové funkce. U těchto metod je ovšem nevýhodou, že lze měřit činitele útlumu pouze na určitém kmitočtovém intervalu, který je dán konstrukcí trubice a také, že měřený vzorek je obvykle malých rozměrů, tedy nám neposkytne přesnou představu o chování

materiálu při větších rozměrech. Pro komplexnější měření materiálu se tedy často používá několik trubic.

Pokud ovšem chceme měřit činitele α pro všesměrový dopad zvuku, je třeba využít metody měření činitele útlumu v dozvukové komoře. Pro tuto metodu je nutné použít velké vzorky (podle ČSN ISO 354 velké až 12 m²), je tedy tato metoda nákladnější, ovšem může nám přinést reálnější výsledky než měření v impedanční trubici. [2] [3]

1.3 Porézní materiály

V akustice, při řeči o porézních materiálech, je většinou myšlen pevný materiál, který má ve svém objemu mnoho dutinek vyplněných vzduchem. Tyto dutinky jsou většinou částí objemu těchto látek. Pokud má takovýto porézní materiál dobře pohlcovat zvuk, musí být jeho póry propojené, aby zvuk mohl materiálem procházet dále. U materiálů, které mají poddajnou, elastickou kostru, dutinky propojeny být nemusí, protože v takovýchto případech nečiní přechod přes kostru do další dutinky pro zvuk přílišnou překážku.

Samotné pohlcování zvuku se děje v mezní vzduchové vrstvě u povrchu vláken nebo kostry vlivem viskózních sil. V mezní vrstvě dochází ke tření mezi vrstvami vzduchu, přičemž vrstva vzduchových částic na povrchu vláken nebo kostry je v klidu, a vrstva vzduchových částic na druhém konci mezní vrstvy koná pohyb rovný akustické rychlosti ve středu sledovaného průřezu.

Porézní materiály se rozdělují podle materiálů, z kterých jsou zhotoveny v zásadě na organické, minerální, skleněné a plastické. Také se dají rozdělit podle struktury pórů a celkově materiálu na kanálkovité, vláknité, anebo třeba pěněné.

Základní charakteristickou vlastností materiálů je jejich měrná akustická impedance z , která je nezbytná pro určení činitele α_0 z rovnice (1.4). [1]

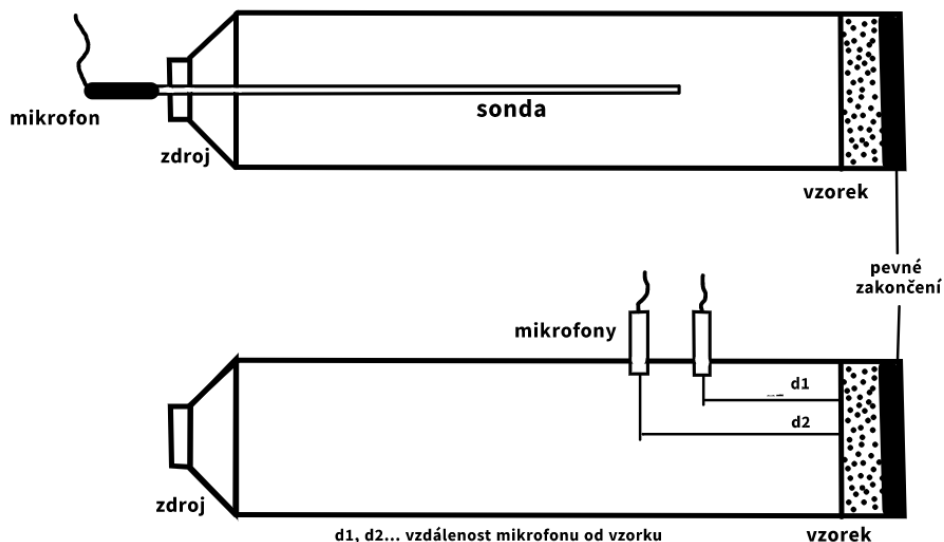
2. MĚŘENÍ ČINITELE POHLTIVOSTI

Činitel pohltivosti akustických materiálů se dá měřit pomocí impedanční trubice, využívající metodu stojatých vlnění, nebo přenosové funkce, ale také pomocí měření v dozvukové místnosti, nebo měřením více mikrofony ve volném poli.

2.1 Měření pomocí impedanční trubice

Impedanční trubice je zařízení, ve kterém lze měřit činitel pohltivosti akustických materiálů, ale také jejich povrchovou impedanci. Velkou výhodou je, že pro měření je zapotřebí pouze malých vzorků, tudíž jsou takováto měření výhodná pro vývojáře pohlcujících materiálů, jelikož nepotřebují vyrobit velký vzorek pro měření v dozvukové místnosti, které je mnohem náročnější a nákladnější. Problém s měřením pomocí impedanční trubice ovšem nastává v případě, že vlastnosti malého vzorku nejsou dostatečně reprezentativní pro chování vzorků o větší ploše, což je často případem rezonančních absorbérů.

V impedanční trubici je na jedné straně reproduktor, jež vytváří vlnění v trubici, které lze v určité vzdálenosti považovat za rovinné, a také zapříčiní výskyt stojatých vln. Na druhé straně trubice je měřený vzorek, jehož impedance nám ovlivní odražené vlnění. Z měření výsledné stojaté vlny je možné vypočítat činitele útlumu nebo impedanci měřeného vzorku. Toto je v dnešní době tak běžná technika měření v akustice, že je dokonce ukotvena v mezinárodních standardech [4][5].



Obr. 2.1 Principiální schéma pro měření impedanční trubicí, nahoře pro stojatá vlnění, dole pro přenosovou funkci.

Velmi důležité, pro přesná měření v impedanční trubici, je mít dobře vytvarovaný a ukotvený vzorek, který hladce sedí v trubici. Jakékoliv mezery u okraje vzorku musí být zatěsněné (často se používá vazelína). Vzorek nesmí být nijak stlačen při ukotvení, jinak nastane chyba při změření pohltivosti materiálu. Také musí být vzorek řádně ukončen, aby mezi ním a koncem trubice nevznikaly vzduchové mezery, jinak naměřený činitel útlumu bude větší než reálný, pokud ovšem nechceme měřit se vzduchovou mezerou za vzorkem, v takovém případě, by měření bylo správné. [3]

2.1.1 Metoda stojatých vlnění

Tato metoda využívá konstrukce trubice s pohyblivým měřicím mikrofonem, který ovšem měří vždy jen jednu frekvenci. U tohoto typu měření je vždy nezbytné nalézt minima ve stojaté vlně pro získání informace o fázi, což bývá zdlouhavé, jelikož je vždy potřeba změřit velké množství frekvencí. Výsledky měření touto metodou jsou ovšem spolehlivé a dosti korektní oproti následující metodě měření přenosové funkce, proto bývá tato metoda často použita jako dobrá kontrola pro výsledky z metod přenosové funkce. [3]

Pro zjištění ustáleného tlaku v trubici lze použít rovnici

$$p = A[e^{jkz} + \beta e^{-jkz}], \quad (2.1)$$

kde A je komplexní konstanta, k je vlnové číslo, β je činitel odrazu a z je kartézská souřadnice popisující pozici vzorku, u které předpokládáme, že je rovna 0.

První výraz reprezentuje primární vlnu a druhý vlnu odraženou. Pro měření stojatých vln je nezbytné zjistit minima a maxima úrovně tlaku napříč trubicí. Maximální tlak se nachází v místě, kde první a druhý výraz jsou ve fázi, a minimum tam, kde jsou tyto výrazy v protifázi. [3]

Z rovnice (2.1) lze potom určit poměr stojaté vlny, jež je určen poměrem minimální a maximální úrovně tlaku. Poměr stojaté vlny nám pomůže vypočítat činitel odrazu, z kterého jednoduše pomocí rovnice (1.3) vypočítáme hledaný činitel útlumu.

Pro vyhledání tlakových minim a maxim je zapotřebí pohyblivého mikrofonu v trubici na kolejnici. Výhodou této metody je, že není potřeba žádná tlaková kalibrace zařízení, jelikož vybavení zůstává časově invariantní, protože všechny faktory vztahující akustický tlak k monitorovanému napětí měřicího zařízení, jako je efekt sondy v trubici, se vyruší. [3]

Vždy by mělo být nejdříve měřeno první minimum u vzorku a následně první maximum hned za tímto minimem, abychom eliminovali útlum trubice, pokud není zanedbatelný. Pro vzorky s malým činitelem pohltivosti bývá tato měřicí metoda nepřesná, jelikož poměr stojatých vln má velkou chybovost, protože tlaková minima jsou až příliš malá nato aby byla přesně změřena. [3]

2.1.2 Metoda přenosové funkce

Rovnice (2.1) má dvě neznámé, fázi a velikost činitele odrazu. Díky měření tlaku na dvou místech v trubici, je možné vytvořit a vyřešit najednou rovnice pro činitel odrazu a z toho zjistit impedanci a činitel útlumu. Toto je ve zkratce princip metody přenosové funkce, často zvané metoda dvou mikrofonů (ovšem toto pojmenování není zcela správné, jelikož není výjimkou, že se u této metody používá i jeden, anebo naopak více mikrofonů).

Signifikantní výhodou této metody je, že lze impedanci a činitele útlumu změřit pro všechny frekvence (na operačním intervalu zařízení) pomocí pár rychlých měření. [3]

Přenosová funkce mezi dvěma mikrofony se měří, jak je znázorněno na Obr. 2.1. Přenosová funkce je jednoduše poměr mezi tlaky. Při aplikaci rovnice (2.1) je potom přenosová funkce mezi mikrofony 1 a 2 dána rovnicí

$$H = \frac{e^{jkd_2} + \beta e^{-jkd_2}}{e^{jkd_1} + \beta e^{-jkd_1}}, \quad (2.2)$$

kde d_1 a d_2 jsou vzdálenosti mikrofonů od vzorku. Z této rovnice se dá vyjádřit přímo komplexní činitel odrazu

$$\beta = \frac{He^{jkd_1} - e^{jkd_2}}{e^{-jkd_2} - He^{-jkd_1}}, \quad (2.3)$$

z něhož následně vypočítáme činitel útlumu a impedanci povrchovou vzorku.

U této metody je důležité dbát na vzdálenost mikrofonů od sebe. Při příliš malé vzdálenosti nebude změřená přenosová funkce přesná, protože rozdíl v tlaku bude až moc malý na to, aby byl přesně změřen. Kvůli tomu je dán dolní limit kmitočtu pro rozdíl vzdáleností mikrofonů $|d_1 - d_2|$ [14]

$$f_d > \frac{c_0}{20|d_1 - d_2|}. \quad (2.4)$$

V případě, že vzdálenost mikrofonů je příliš velká a přibližuje se vlnové délce zvukového vlnění, jež trubicí prochází, přestane být možné dosáhnout správného výsledku, jelikož tlaky změřené na mikrofonech budou téměř totožné. Proto existuje horní limit frekvence, která může být měřena [14][3]

$$f_h < \frac{0,45c_0}{|d_1 - d_2|}. \quad (2.5)$$

Kvůli těmto omezením na interval možných měřených frekvencí, se často využívá konstrukce ne se dvěma pozicemi mikrofonů, ale se třemi, jelikož díky tomu můžeme dosáhnout, alespoň částečně širšího spektra frekvencí, které mohou být měřeny. [3]

Existuje několik metod, jak změřit přenosovou funkci (2.2). Například dvoukanálová FFT analýza může být použita se sladěným párem mikrofonů za využití zdroje bílého šumu. Pro tuto metodu je ovšem nezbytné nějak kompenzovat rozdíl v odezvě mikrofonů, třeba vyměněním mikrofonů po dokončení měření a následným opětovným změřením (díky následnému zprůměrování měření se vyruší rozdíl v odezvě mikrofonů). Více efektivní metody jde dosáhnout použitím nějakého deterministického signálu, třeba plynule přeladovaného harmonického signálu. V tomto případě je možné měřit pouze jedním mikrofonem, kterému je měněna pozice při jednotlivých měření. Díky tomu není potřeba mít párované mikrofony (dvojice mikrofonů stejného typu, která je vybrána podle podobnosti charakteristik). Použitím deterministického signálu oproti bílému šumu také mizí potřeba časově náročných průměrování měření.[3][14][13]

U této metody je velmi důležité, aby mikrofony byly ukotveny do přesné úrovně vnitřního povrchu trubice a lícovali s ní. Celková vysoká přesnost a dokonalost konstrukce impedančních trubic pro měření pomocí přenosové funkce, zaručuje přesné výsledky. I dobré konstrukční nedokonalosti mohou mít velký vliv na výsledky měření. Proto jsou často tato zařízení velmi drahá. [3]

2.2 Metoda dvou mikrofonů ve volném poli

Nevýhodou měření pomocí impedančních trubic je, že v nich můžeme měřit vlastnosti materiálu pouze pro kolmě dopadající vlnění. Metoda dvou mikrofonů ve volném poli nám však dovoluje měřit činitele útlumu i pro zvuk dopadající v různých úhlech na materiál a také zjistit závislost pohlcování materiálu na úhlu dopadu zvukového vlnění. K měření pomocí této metody je zapotřebí velký vzorek, který je ovšem většinou dosti obtížné vyrobit, a také je potřeba provádět měření v bezodrazové místnosti, nebo alespoň částečně bezodrazové (místnost, která je bezodrazová pouze pro část spektra, většinou vyšší frekvence). Měření může být provedeno i v dostatečně velké místnosti, kde se budou jednoduše dát eliminovat odrazy od stěn použitím časového okna při měření impulzní odezvy. [3]

Tato metoda může být brána, jako rozšíření metody přenosové funkce pro impedanční trubici, (2.1.2) je nejlepší pro měření homogenních, izotropních materiálů. Velký vzorek materiálu je vystaven akustickému vlnění vytvořenému reproduktorem z velké vzdálenosti od povrchu. Je předpokládáno, že na povrchu vzorku se vyskytují rovinné vlny, a navíc u velkých, homogenních, izotropních vzorků lze předpokládat, že i odražené vlnění je rovinné. Díky čemuž můžeme použít rovnice z podkapitoly 2.1.2 přímo i pro tuto metodu, a to nejen rovnice přenosové funkce, ale i rovnice pro výpočet horní a dolní hranice měřitelných frekvencí pomocí vzájemné vzdálenosti mikrofonů. Mikrofony by v tomto případě měly být dostatečně malé, aby nenarušovaly akustické zvukové pole. Často se využívá pouze jeden mikrofon s měnitelnou polohou (netřeba kalibrace, méně ruší prostředí). V těchto případech musí být vždy použit deterministický testovací signál jako třeba plynule přeladovaný harmonický signál, nebo MLS (pseudonáhodný signál

maximální délky, binární signál, který je obvykle posloupnost nul a jedniček generovaný pomocí posuvného registru se zpětnou vazbou). [3]

V teorii se uvažuje nekonečný vzorek, v praxi ovšem vzorek konce má, a proto je důležité brát v potaz difrakci, která vzniká na okrajích vzorku. Tato difrakce způsobí, že u nižších frekvencí oražená vlna již nebude rovinná, a tudíž přestávají platit jednoduché teorie. Hrubý dolní frekvenční limit je pro kmitočet jehož půlka vlnové délky je rovna nejmenšímu rozměru vzorku. Z tohoto důvodu jsou vzorky obvykle velké několik čtverečních metrů. Při menších vzorcích se dá umístit zdroj do menší vzdálenosti od vzorku, aby okrajové vlny nebyli tolik signifikantní. [3]

2.2.1 Metoda s více mikrofony pro neizotropní, nerovinné povrchy

Pro vzorky, které jsou neizotropní a jejich povrch není homogenní, je měření značně náročnější ve volném poli, ovšem používá se i tak. Měřicí systém pro takováto měření bývá mnohem propracovanější a tím i náchylnější na chyby měření. U těchto vzorků je mnohem větší výskyt nerovinných odražených vln, vznikají mřížkové nebo difrakční laloky v nepravidelných směrech. Pro změření pohltivosti těchto materiálů, je potřeba použít více než jen dvě mikrofonní pozice, jelikož je nezbytné zjistit i fázi a velikost všech odražených lalokových vln. Čím více takovýchto vln vzniká, které jsou měřeny, tím je potřeba více mikrofonů na jejich analýzu a tím se systém stává náchylnější na změření hluků a chyby. U těchto měření je velmi obtížné získat vliv úhlu dopadu na pohltivost. [3]

2.3 Metoda měření v dozvukové místnosti

Měření v dozvukové místnosti je rychlejší možnost pro měření velkých vzorků materiálů, nebo celých pohltivých stěn. U této metody nejsou sice měřeny činitele útlumu pro jednotlivé úhly dopadu vln, jak tomu může být u měření ve volném poli, ovšem není příliš efektivní měřit takovéto činitele útlumu, jelikož v reálném použití na materiál většinou dopadají vlny v nespočetném množství úhlů. U této metody jde v principu o porovnání doby dozvuku prázdné místnosti a místnosti v které je vložený i měřený vzorek. Touto metodou se nedá zjistit impedance materiálu a slouží čistě k zjištění činitele útlumu. V realitě bývá vyvíjený materiál většinou nejdříve zkoumán pomocí impedanční trubice, aby mohl být zdokonalen, a dalo se lépe porozumět jeho vlastnostem předtím, než se přistoupí k mnohem nákladnějším testům v dozvukové místnosti.

Dozvuková místnost je prostor, v němž je doba dozvuku 3–10 sekund. Stěny jsou vytvořeny z materiálů, které mají nízký koeficient útlumu a jsou doplněny o odrazivé plochy. V takovýchto prostorech bývá maximální hustota energie sekundárních vln.

Pro tyto měření je potřebné, aby místnost i vzorek splňovali určité parametry, aby měření mohlo být co nejpřesnější. Na vzorek by měli dopadat vlny ze všech směrů a úhlů rovnoměrně, proto by například plocha zavěšených prvků pro rozptýlení zvuku měla být přibližně rovna ploše podlahy. Dozvuková místnost nesmí mít tvar krychle, a její objem

by měl být větší než 150 m³. Žádná část vzorku nesmí být blíže než 1 m od hrany místnosti. Ukotvení vzorku musí odpovídat praktickému využití, a rám, do nějž jsou uloženy pohltivé materiály, musí být z materiálu, jehož činitel útlumu není větší než 0,1. Při měření nesmí nastat žádná klimatická změna, kvůli zanedbávání ztrát při šíření vzuchem.

[3][6]

3. MĚŘENÍ TS PARAMETRŮ REPRODUKTORU

TS parametry reproduktorů jsou elektromechanické parametry určující chování reproduktorů na nízkých frekvencích a v okolí rezonančního kmitočtu. Pomocí těchto parametrů je možné simulovat chování reproduktorů v ozvučnicích. Tyto parametry se nazývají TS kvůli dvěma matematikům, jež je objevily a nadefinovali. Tito matematici byli Albert N. Thiele a Richard H. Small.

3.1 Vliv ozvučnice na charakteristiku reproduktoru

Reproduktory jsou zvukové zdroje vyzařující na obě strany, před i za membránou, ovšem na opačných stranách membrány jsou zvukové vlny vyzařovány s opačnou fází. V případě reproduktoru umístěného ve volném poli by tedy mohlo docházet k rušení signálů na určitých frekvencích, na kterých by se opačné fáze setkali u posluchače (akustický zkrat). Reproduktory jsou tedy umísťovány do ozvučnic, které plní roli bariéry mezi přední a zadní polorovinou reproduktoru. [15]

Při umístění reproduktoru do ozvučnice se mění akustická zátěž, do které reproduktor ze zadní poloviny vyzařuje. Při akusticko-mechanické analogii se tato změna zátěže projevuje jako změna poddajnosti kmitajícího systému. Změna poddajnosti je podmíněna především typem a objemem ozvučnice do níž je reproduktor umístěn. Reproduktor umístěný v ozvučnici bude mít tedy rozdílnou poddajnost oproti stejnému reproduktoru bez ozvučnice, to má vliv na celkovou kmitočtovou charakteristiku daného reproduktoru, na jeho rezonanční kmitočet, činitel kvality a charakteristickou citlivost.[15]

Tlumení v ozvučnici, pomocí nějakého tlumícího materiálu např vaty, má vliv především na tvorbu stojatých vlnění uvnitř ozvučnice, čímž ovlivňuje zkreslení výsledné modulové charakteristiky.

3.1.1 Uzavřená ozvučnice

Uzavřená ozvučnice je skříň o určitém objemu, která by měla být hermeticky uzavřena. Při ukotvení reproduktoru do takovéto ozvučnice dochází k přeměně energie vlny vyzářené membránou dozadu na teplo, tím je snížena účinnost reproduktoru. Takovýto typ ozvučnice zaručuje eliminaci akustického zkratu, což je její hlavní výhodou. Kvůli snížení poddajnosti reproduktoru, usazeného do takovéto ozvučnice, dojde k zvýšení rezonančního kmitočtu f_c , pro nějž platí následující vztah

$$f_c = \sqrt{\frac{V_{as}}{V_b} + 1} \times f_r \text{ [Hz]}, \quad (3.1)$$

u kterého je f_r rezonanční kmitočet reproduktoru, V_{as} ekvivalentní objem reproduktoru a V_b objem uzavřené ozvučnice. Z této rovnice jde jasně vidět, že čím menší bude objem

uzavřené ozvučnice, tím více se posune rezonanční kmitočet f_c nahoru.[15]

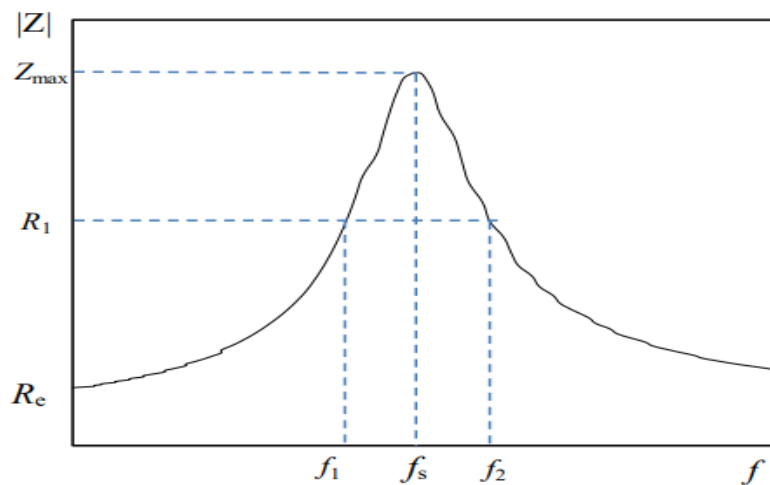
Kromě zvyšujícího se rezonanční kmitočtu roste i celkový činitel jakosti reproduktoru Q_s podle vztahu

$$\frac{Q_c}{Q_s} = \sqrt{\frac{V_{as}}{V_b} + 1} \quad [-], \quad (3.2)$$

kde je Q_c celkový činitel jakosti reproduktoru v uzavřené ozvučnici. Z tohoto vztahu plyne, že celkový činitel jakosti reproduktoru Q_s vždy přejde ve zvětšený činitel jakosti soustavy reproduktoru uloženého do uzavřené ozvučnice Q_c . Reprodukter vestavěný do uzavřené ozvučnice bude mít zvýšenou amplitudu reprodukováných zvukových signálů v okolí dolního mezního kmitočtu a také bude mít jeho impedanční charakteristika v okolí rezonančního kmitočtu nabude na strmosti. [15]

3.2 Výpočet TS parametrů

Základní TS parametry jsou vypočítávány díky znalosti typických bodů na impedanční charakteristice, která je zjištěna pomocí elektrického měřiče. Tyto body jsou zobrazeny na Obr. 3.1.



Obr. 3.1 Impedanční charakteristika s vyznačenými body [15]

První z těchto bodů je rezonanční kmitočet f_r , který zároveň značí i maximální impedanci reproduktoru za rezonance Z_{max} . Druhý bod je stejnosměrný odpor R_e , neboli odpor vnutití cívky. Poslední z těchto bodů je hodnota impedance reproduktoru na kmitočtech f_1 a f_2 , které jsou na poklesu elektrické impedance o hodnotu

$$R_1 = R_e \sqrt{R_0} \quad [\Omega], \quad (3.3)$$

u které je $R_0 = Z_{max}/R_e$. Z těchto hodnot se následně dají vypočítat parametry Q_{Ms} , Q_{Es} a Q_s . [15]

První z těchto parametrů je mechanický činitel jakosti reproduktoru Q_{Ms} , který značí mechanické ztráty pohyblivých částí kmitajícího systému. Tyto ztráty jsou způsobené hlavně působením materiálu nosiče cívky v magnetické mezeře a také stlačováním vzduchu pod vrchlíkem. Tento parametr je bezrozměrný a pohybuje se na rozmezí hodnot mezi 0,4 a 25. Čím vyšší je tato hodnota, tím lépe. Q_{Ms} se dá vypočítat pomocí rovnice

$$Q_{Ms} = f_r \frac{\sqrt{R_0}}{f_2 - f_1} [-], \quad (3.4)$$

u níž je f_r rezonanční kmitočet reproduktoru. [15]

Druhý parametr je elektrický činitel jakosti Q_{Es} . Při pohybu cívky v magnetickém poli je generován vlastní proud působící proti pohybu cívky. Díky tomu se snižuje celkový proud tekoucí cívku, což způsobí i snížení výchylky v okolí rezonančního kmitočtu. Parametr Q_{Es} je bezrozměrný, a pohybuje se v rozmezí 0,08 až 0,6. Čím je vyšší vlastní proud generovaný cívku, tím je nižší parametr Q_{Es} , který se dá vypočítat z rovnice [15]

$$Q_{Es} = \frac{Q_{Ms}}{R_0 - 1} [-]. \quad (3.5)$$

Poslední z těchto parametrů je Q_s , celkový činitel jakosti reproduktoru. Jak již jeho název napovídá, zahrnuje oba předchozí parametry a dá se vypočítat pomocí rovnice

$$Q_s = \frac{Q_{Ms}Q_{Es}}{Q_{Ms} + Q_{Es}} [-]. \quad (3.6)$$

Z impedanční charakteristiky reproduktoru lze také parametry, díky kterým je možné určit indukčnost kmitající cívky L_e [15]

$$L_e = \frac{\sqrt{Z_0^2 - R_e^2}}{2\pi f_0} [H], \quad (3.7)$$

V této rovnici je Z_0 hodnota minimální impedance nacházející se za rezonančním kmitočtem na impedanční charakteristice reproduktoru. Tato hodnota se nachází na kmitočtu f_0 , jelikož se ale hodnota impedance v okolí minima moc nemění, často se kmitočet f_0 volí v okolí 1kHz a Z_0 je potom hodnota na tomto kmitočtu. [15]

4. NÁVRH KONSTRUKCE IMPEDANČNÍ TRUBICE

4.1 Konstrukční zásady

Při návrhu konstrukce impedanční trubice je třeba brát v potaz několik základních zásad, aby bylo možné nadefinovat si parametry konstrukce pro požadovaná měření.

4.1.1 Pozice mikrofonů

Měřicí mikrofony musí být umístěny minimálně v trojnásobku šířky trubice od reproduktoru, aby kterékoliv křížové módy generované reproduktorem odezněly. Akustické módy souvisejí s rozměry akustického prostoru a frekvencemi, které se v tomto prostoru odráží. Při sčítání fází různých frekvencí v těchto prostorech dochází ke vzniku tzv. módů. Tyto módy jsou očíslovány podle jejich výskytu v prostoru, první frekvence, u které se vyskytne mód je první mód, každý další n násobek této frekvence vytvoří také mód. Křížové jsou potom módy s číslem 4, 6, 8 a 9.

Pozice mikrofonů by neměla být příliš blízko měřenému vzorku, aby stihly zcela odeznít parazitní odrazy vytvořené na přechodu povrchu mikrofonu a trubice. Pro homogenní, izotropní vzorky minimálně polovina průměru trubice. Pro strukturované, anizotropní vzorky minimálně dvojnásobek průměru trubice.[3]

4.1.2 Měřitelný frekvenční rozsah trubice

Nejvyšší měřitelná frekvence je předurčena šířkou trubice

$$f_{\max} = \frac{c}{2d} \text{ [Hz]}, \quad (4.1)$$

kde d je šířka trubice a c rychlost zvuku. Tato rovnice by nám měla zaručit horní frekvenční hranici, při které by neměli v trubici být žádné křížové módy. Také z této rovnice plyne, že pro pokrytí širšího frekvenčního spektra je zapotřebí použít více měřících trubic. [3]

Horní a dolní mez měřitelného kmitočtu je již definována v kapitole 2.1.2 v rovnicích (2.4) a (2.5), které specifikují tyto meze přes vzájemnou vzdálenost mikrofonů. Pokud máme více hodnot horních mezí, vždy volíme menší číslo.

4.2 Volba metody měření

Kvůli dostupným konstrukčním zkušenostem a možnostem byla zvolena metoda měření pomocí přenosové funkce. Ačkoliv část zpracování dat je pro tuto metodu náročnější, samotná konstrukce nevyžaduje žádné pohyblivé součásti. I z hlediska budoucího návrhu laboratorní úlohy, ve které budou měřeny vlastnosti vzorků pomocí této trubice, je rozumnější metoda přenosové funkce, jelikož z pravidla není tak časově náročná jak měření pomocí trubice pro stojatá vlnění. Jednou z dalších výhod této metody je, že je možné změřit činitele pohltivosti i za použití pouze jediného mikrofonu, kterému se mění

pozice. Tato metoda je výhodná také pro případné rozšíření zařízení impedanční trubice na zařízení, na kterém bude možné měřit i průzvučnost materiálů.

4.3 Volba materiálů a součástí

Nebylo účelem práce udělat zařízení, pro velmi přesná měření, ale spíše zkonstruovat zařízení, na kterém bude fungovat princip zvolené metody, a zároveň jeho konstrukce nebude extrémně náročná, tudíž byla při volbě materiálů brána v potaz dostupnost, cena, náročnost na zpracování a možnost manipulace při konstrukci.

4.3.1 Trubice

Pro co nejlepší výsledky je třeba, aby trubice byla pevná s šířkou stěny alespoň 5 % průměru (u kovových materiálů, u materiálu měkčích ideálně stěna silnější) a co nejhladším vnitřním povrchem. Proto je zvolen materiál PVC, který je dostupný a dá se s ním dobře manipulovat a modifikovat ho.

Byla zvolena konstrukce složená z vnitřní a vnější trubice, s vyplněným meziprostorem pevným materiálem (montážní pěna), tvořící tělo. Vnější trubice byla opět zvolena z materiálu PVC. Výhodou je širší stěna, do níž se budou jednodušeji usazovat mikrofony a ukotvovat reproduktor. Širší stěny také zaručí, že samotná trubice nebude vibrovat pod vlivem reproduktoru a tím bude možno získat přesnější výsledky s menší chybou.

4.3.2 Reproduktor

Za reproduktor pro tuto konstrukci byl zvolen Visaton SL 70 NDV s průměrem 2,5 palce (6,5 cm). Frekvenční charakteristika tohoto reproduktoru je poměrně vyvážená od 300 Hz až do 10 kHz, což je pro zvolenou konstrukci vyhovující. Malé rozměry tohoto reproduktoru jsou výhodou pro konstrukci, jelikož nebude potřeba vytvářet ozvučnici se speciálními rozměry, která by se mnohem hůře připojovala na tělo sestavy, a reproduktor bude možno namontovat přímo na konec těla.

4.3.3 Mikrofony

Pro měření budou použity univerzitní měřicí mikrofony Audix TM1, které jsou dostupné pro potřeby této bakalářské práce. Díky malému průměru membrány by nemělo docházet k velké difrakci při přechodu zvuku přes jejich polohy, a také bude jednodušší jejich ukotvení do těla trubice.

4.4 Parametry navrženého zařízení

Trubice byla navržena tak, že v ní bude možno měřit na rozmezí mezi 340 Hz a 3000 Hz. Tento rozsah byl stanoven průměrem navržené trubice a pozicováním mikrofonů. Pro posunutí horního hraničního kmitočtu nahoru, by bylo zapotřebí použít trubici s menším

průměrem. Celkové rozšíření tohoto intervalu by pak bylo možné pomocí použití například tří mikrofonů, které by umožnili větší množství vzájemných pozic mikrofonů, které ovlivňují hraniční kmitočty. Není to sice velmi široký frekvenční rozsah, ovšem je to část frekvenčního spektra, kde by u porézních materiálů mělo docházet k nárůstu činitele pohltivosti. Na nízkých frekvencích je činitel útlumu vždy nižší a dá se zvýšit pouze šířkou vrstvy měřeného materiálu.

Celková délka trubice i s ozvučnicí a držákem vzorku bude 62 cm pro kratší držák vzorku a 67 cm pro držák vzorku delší. Tato délka zařízení je požadavkem zadání, kvůli prostorovým omezením v laboratoři. Vnější průměr trubice bude 11 cm a celková výška i s podstavci bude 16,5 cm.

4.5 Součásti zařízení

Všechny navržené součásti v této kapitole mají v přílohách příslušný výkres s rozměry.

Navržená impedanční trubice se skládá z několika součástí, které budou samostatně vytvořeny a spojeny dohromady, pro utvoření celkového zařízení. Všechny součásti, kromě podstavce a pojících zárubní, mají plášť z trubice KGEM šířky DN 110, aby se jednotlivé součásti trubice daly spojit co nejpřesněji.

4.5.1 Tělo trubice

Tělo trubice je navrženo tak, že je složeno ze dvou trubic, z nichž jedna je vložena v druhé a zbylý volný prostor je vyplněn montážní pěnou, pro pevné a vyrovnané spojení trubic do jednoho celku. Konec vnější trubice je oproti vnitřní zkrácen na obou koncích o 5 mm, aby bylo možné vložit zátku KGM DN110 na trubici a těsnicí materiál, pro dosažení co nejhladšího a dobře těsnícího spojení součástí.

V této součásti jsou ukotveny měřicí mikrofony pomocí gumových těsnění upravených na míru podle rozměrů mikrofonu tak, aby bylo možné mikrofony vsunout bez potřeby odměřovat pozici mikrofonu, tedy aby byl mikrofon vždy vsunut na konstantní vyladěnou pozici.

Na jednom konci trubice je ve středu připevněn reproduktor pomocí šroubů, které jsou díky rozměrům reproduktoru ukotveny do předem připevněných matic na vnitřní straně zátky. Na opačném konci je potom pomocí pojících zárubní připevněn držák vzorku tak, aby spojení těsnilo a dohromady tvořilo uvnitř trubice hladký prostor s co nejmenším přechodem.

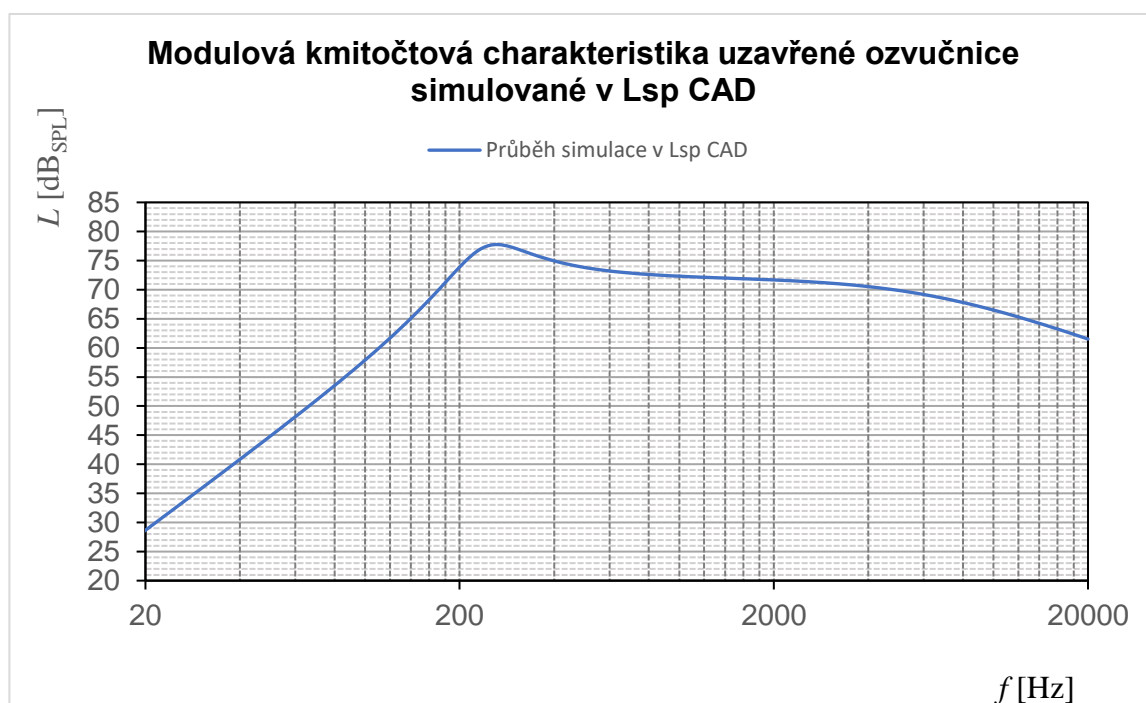
V příloze A jde vidět rozměr a základní návrh konstrukce těla trubice.

4.5.2 Ozvučnice

Ozvučnice reproduktoru je vytvořena z trubice o stejném průměru jako trubice těla a je k němu připevněna pojíci zárubněmi. Ozvučnici uzavírá opět stejná zátko jako tělo. V zátku je pouze malý otvor pro vyvedení kabelu reproduktoru, který je připojen do generátoru.

Rozměry ozvučnice jsou zvoleny tak, aby příliš neposunula rezonanční kmitočet reproduktoru, tedy nám neovlivnila rozsah možných měřených frekvencí. Ideální rozměr byl získán díky simulacím v programu LspCAD, kde bylo zkoumáno, jak objem ozvučnice ovlivňuje frekvenční charakteristiku reproduktoru. Při vypsání parametrů reproduktoru do simulačního programu a následným, postupným měněním objemu ozvučnice, bylo pozorováno, jak se mění frekvenční odezva reproduktoru. Z těchto pozorování byl odvozen ideální objem ozvučnice činící 1,18 l. Pro tento objem je hloubka ozvučnice 15 cm. To i z konstrukčního hlediska dává smysl, vzhledem k uvažované velikosti těla trubice. Samotné zapojení simulace bylo provedeno pomocí ukázkových zapojení simulací pro různé typy ozvučnic v LspCAD.

Na následujícím obrázku jde vidět graf frekvenční modulové charakteristiky reproduktoru Visaton v uvažované uzavřené ozvučnici, data z LspCAD.



Obr. 4.1 Modulová kmitočtová charakteristika získaná ze simulace v Lsp CAD

4.5.3 Držák vzorku

Držák vzorku je navržen ve dvou délkách, pro umožnění zvětšení vzdálenosti vzorku od mikrofonu při měření asymetrických vzorků. Na úplném konci držáku je široká kovová stěna, která zaručuje vysoký činitel odrazivosti, a pomáhá získat přesnější výsledky. Vzorek se do držáku umísťuje pomocí pinzety a pístku, kterým jej dosuneme těsně k zadní stěně.

V příloze A je vidět sestava se základní verzí držáků vzorku. Druhý držák vzorku má totožnou konstrukci pouze jeho celková délka je o 5 cm delší.

4.5.4 Pojící zárubně

Tyto prvky jsou navrženy na spojení všechny součásti soustavy. Jsou navrženy tak, aby se daly jednoduše nalepit epoxidovým lepidlem k vnější trubici. Zárubně jsou připevněny vždy na samém okraji součásti. Dvě zárubně se spolu navzájem spojí pomocí šroubů a matic, utažením se potom spojí těsnění tak, že vnitřní povrch trubice je co nejjednodušší. Tyto prvky jsou vytvořeny pomocí 3D tisku, a ručně dobroušeny pro hladší a přesnější nasazení (nalepení) na trubici. V Příloha B - je základní návrh rozměrů a tvaru zárubní, který ještě bude obohacen o žebrování stěn pro ušetření materiálu 3D tisku.

4.5.5 Podstavce

Podstavce jsou v této konstrukci zahrnuty, aby nám zaručovaly stejnou výšku jednotlivých součástí i na mírně nerovném povrchu. Celkem jsou čtyři, dva na držení těla, jeden na podporu držáku vzorku a jeden pro podržení ozvučnice. K vnější trubici doléhají a kopírují její tvar na menší ploše, tato plocha na podstavci je vyložena kobercem, aby nedošlo k nechtěným chvěním v nedokonale přiléhajících místech plochy. V Příloha B - je zobrazen základní návrh podstavců. Při vytváření 3D modelu pro tisk bude finální design upraven pro efektivnější využití materiálu.

5. MĚŘENÍ TS PARAMETRŮ REPRODUKTORU A SIMULACE V LSPCAD

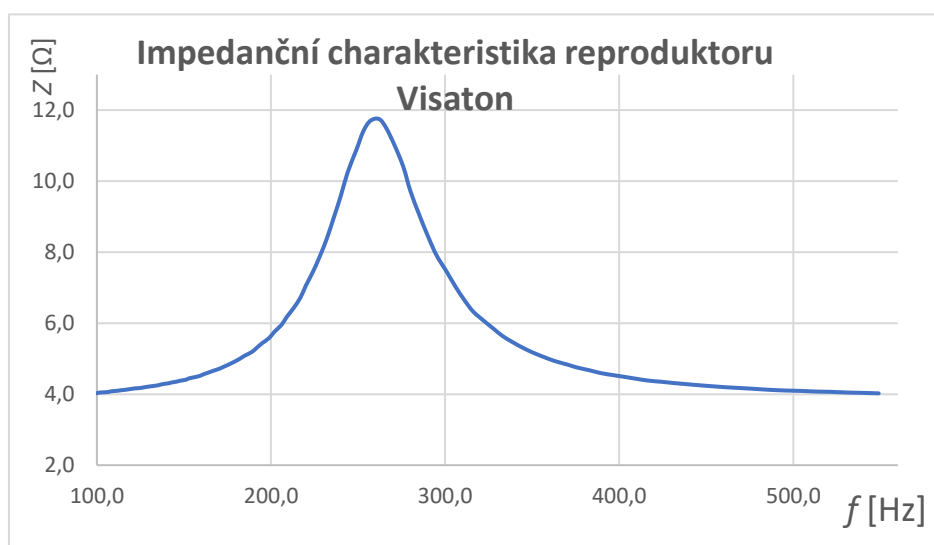
Po přistoupení ke konstrukci celého zařízení byl, dříve než vše ostatní, pořízen reproduktor. Takto bylo zvoleno, aby bylo možné změřit reálné parametry reproduktoru, pomocí nich následně udělat přesnější simulace a eventuálně upravit návrh zařízení tak, aby obsah ozvučnice a těla trubice byl pro charakteristiku reproduktoru co nejvíce vyhovující.

5.1 Měření TS parametrů reproduktoru Visaton SL 70 NDV

Pro lepší konstrukci impedanční trubice bylo záhodno ověřit, zda parametry reproduktoru udávané výrobcem jsou korektní, aby bylo jisté, že navržené zařízení nebude příliš omezovat charakteristiku reproduktoru.

Nejdříve byl změřen stejnosměrný odpor reproduktoru pomocí multimetru. Impedanční frekvenční charakteristika reproduktoru byla změřena metodou napětí na svorkách reproduktoru a proudu protékajícího reproduktorem. Hodnota proudu byla při tomto měření měřena jako napětí na známém normálovém odporu o nízké hodnotě, který byl zapojený do série s reproduktorem Visaton. Pro toto měření byl využit elektroakustický analyzátor s generátorem NTi Audio RT-2B, který měl na jednom vstupu připojený reproduktor a na druhém normálový odpor.

Pomocí aplikace RTeval byly zobrazeny průběhy a z nich odečteny signifikantní body nezbytné pro výpočet TS parametrů reproduktoru. Reproduktor byl měřen s napětím, které odpovídalo příkonu 0,5 W, což činilo 1,41 V. Podle vzorců z kapitoly 3.2 byli poté vypočteny reálné TS parametry reproduktoru Visaton. Na obr. 5.1. je graf impedanční charakteristiky samotného reproduktoru změřeného na NTi systému.



Obr. 5.1 Impedanční charakteristika reproduktoru změřená na systému NTi RT-2B

Vypočtené a změřené parametry se příliš nelišily od těch udávaných výrobcem. V Příloha C - je k dispozici tabulka hodnot porovnávající parametry udávané výrobcem, oproti reálně změřeným a vypočteným.

5.2 Simulace v LspCAD

Po zjištění reálných TS parametrů reproduktor byly opět provedeny simulace v programu LspCAD. Díky těmto simulacím bylo zkontrolováno, zda vytvořený návrh vyhovuje parametrům reproduktoru, a také je-li možná nějaká úprava dimenzí návrhu, která by mohla vylepšit celkové vlastnosti finálního zařízení.

5.2.1 Simulace uzavřené ozvučnice reproduktoru

Simulační obvod byl opět vytvořen pomocí ukázkového příkladu uzavřené ozvučnice, u kterého byly změněny pouze parametry reproduktoru na vypočtené hodnoty a objem ozvučnice odpovídající návrhu.

Výstupní modulová kmitočtová charakteristika ukázala, že nebude třeba žádných změn objemu ozvučnice, jelikož samotný rezonanční kmitočet se neposunul nahoru natolik, aby zasahoval nebo se příliš přiblížil navrhovanému měřitelnému rozsahu celého zařízení. Pro ještě menší posunutí rezonančního kmitočtu by bylo zapotřebí ozvučnice s mnohonásobně větším objemem, což by bylo nepraktické, a nemělo by to vliv na celkový chod trubice. Graf modulové charakteristiky z této simulace k vidění v Příloha D -

5.2.2 Simulace ozvučnice i s tělem trubice

Konstelace těla trubice a ozvučnice reproduktoru, byla simulována pomocí ukázkové simulace uzavřené ozvučnice, tentokrát byl však objem ozvučnice změněn na objem odpovídající součtu objemu těla i ozvučnice samotné, změněny byly také parametry reproduktoru na reálné. Díky tomu že membrána reproduktoru pracuje do zátěže z obou stran je možné analogicky převést tyto objem zatěžující reproduktor do společného objemu umístěného před, nebo za reproduktorem, a celková zátěž na reproduktor by měla být totožná. V Příloha D - je k nahlédnutí graf modulové charakteristiky z této simulace.

6. KONSTRUKCE IMPEDANČNÍ TRUBICE

6.1 Pořízení materiálů a součástí pro konstrukci

Při pořizování konkrétních materiálů na konstrukci bylo zjištěno několik nepředpokládaných problémů, které byly vyřešeny úpravou celkového návrhu. Také některé konkrétní materiály byly zvoleny přímo na místě podle jejich vlastností a hodnoty.

Pro vnitřní část těla zařízení byla zvolena trubice již v návrhu podle jejich rozměrů (vnitřní průměr, tloušťka stěny) a předpokládaných parametrů, jež nebyly definovány výrobcem. Po obdržení trubice byla ovšem zjištěna velká drsnost a nepravidelnost vnitřního povrchu trubice, což by způsobilo mnoho difrakcí akustického vlnění a tím by se významně zvedla celková chyba měření. Kvůli tomu byla zvolena odpadní trubice Marley s vnějším průměrem 50 mm a vnitřním 47 mm, která je dostupná a povrch její vnitřní stěny je velmi hladký a rovnoměrný.

Při nákupu odpadních trubíc na vnější stěnu zařízení bylo zjištěno, že neexistují zátky na konec trubice, který má menší průměr, ale pouze víčka, která přesahují přes vnější stěnu. V návrhu bylo počítáno s využitím těchto zátek, jelikož s víčky by vznikl problém s velikostí a připevněním zárubní.

6.1.1 Upravení návrhu podle dostupnosti a zpracování materiálů

Kvůli již zmíněné změně průměru vnitřní části trubice, byla zvolena konfigurace s delším držákem vzorku, jelikož potom je celkový objem těla trubice dostatečný, tedy náležitý do rozmezí objemů, pro které byly vytvořeny simulace.

Výše uvedená neexistence zátek byla vyřešena vytvořením druhého typu zárubní, které budou plnit roli jak spojení jednotlivých částí zařízení, tak pevného zakončení a zapečetění prostoru vyplněného montážní pěnou mezi oběma trubicemi těla zařízení. Více o těchto zárubních v kapitole 6.2.3.

Jelikož na místě, kde byla trubice zhotovena, nebyl k dispozici nástroj nebo zařízení, které by dokázalo jedním plynulým řezem rozdělit objekt o průměru 11 cm, byl návrh upraven způsobem, jež nevyžadoval rozdělení jednolitého těla trubice. Odstranění části držáku vzorku zaručuje homogenitu vnitřního povrchu celého těla trubice, tedy nebude v těle žádný řez, kde by mohly být povrchové nedokonalosti vedoucí k difrakcím. Namísto držáku vzorku byla pouze vyhotovena odmontovatelná západka. Vzorky měřených materiálů se budou vkládat přímo na konec těla trubice po oddělení západky, ta se následně uzavře a vzorek bude připraven na měření. Toto řešení má výhodu jednodušší manipulace při vkládání a vytahování vzorků a také by mělo být efektivnější z hlediska chybovosti měření. Celková délka trubice bude sice neměnná, ale jak již bylo zmíněno, tato délka je ve vyhovujícím rozmezí.

6.2 Modelování a tisk 3D součástí

6.2.1 Vytvoření 3D modelů

Pro vytvoření modelů byl použit program Solid Edge 2020. V tomto programu byl vždy vytvořen nárys součásti, který byl následným vytahováním (extrudací) převeden na 3D objekt. Tento objekt byl potom pomocí vytváření děr a úpravy povrchů dotvořen do finální podoby. Všechny 3D modely byly exportovány ve formátu „.stl“.

6.2.2 Vytvoření G-codu a tisk součástí

Všechny součásti byly vytištěny pomocí 3D tiskárny Original Prusa i3 MK3S od firmy Prusa Research.

Pro vytištění 3D součástí vymodelovaných v jakémkoliv programu je nezbytné vytvoření G-codu. Pomocí tohoto kódu uživatel nadefinuje předpokládanou finální podobu součásti, kterou chce vytisknout. Tento kód byl vytvořen pomocí programu PrusaSlicer, který je oficiální open-sourcový software firmy Prusa Research pro tvoření tiskových souborů.

Součásti byli vytištěny z materiálu PLA, který byl jediným dostupným materiálem k tisku. Jeho vlastnosti sice nejsou zcela ideální pro mechanicky namáhané součásti, avšak i tak je dostatečně odolný pro využití, ke kterému jsou dané součásti navrženy. Na rozdíl od materiálů vhodnějších k technicky využitým součástem umožňuje PLA tisk velkých součástí i na malé tiskárně, a proces tištění z tohoto materiálu většinou neobnáší žádné obtíže spojené s použitím pokročilejších materiálů, které vyžadují detailněji zpracovaný kód a speciální technické parametry tiskárny. [9]

Pevnost výsledných součástí je také dosti ovlivnitelná parametry, jež jsou definovány právě při tvorbě G-codu. Parametry jako například výška tisknuté vrstvy, minimální tloušťka skořepiny, tvar výplně nebo hustota výplně, mají velký vliv na celkovou pevnost a náchylnost součástí na porušení. [7][8]

6.2.3 Zárubně typu A a B

Oproti návrhu, ve kterém bylo počítáno pouze s jedním typem zárubní, bylo při konstrukci potřeba vytvořit zárubně i druhého typu kvůli nedostupnosti prefabrikovaných součástí, jak již bylo uvedeno v kapitole 6.1.1.

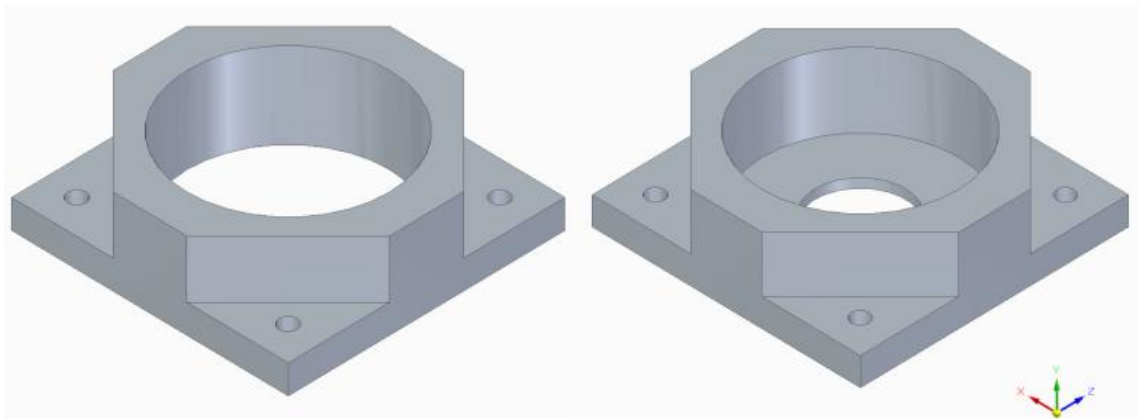
Zárubně typu A

Zárubně typu A, jsou okruží sloužící k pevnému spojení dvou částí trubice. Jejich finální podoba se rozměrově nezměnila od navržených parametrů. V návrhu bylo uvažováno vylepšení základního designu o žebrování, které by ušetřilo materiál potřebný pro vytištění těchto součástí, ovšem při tvorbě G-codu byla vybrána možnost takového typu a hustoty výplně, která efektivně spojuje, jak nemrhání materiálem, tak pevnost a odolnost celé součásti. Vizualizaci této zárubně lze vidět na Obr. 6.1. Hotový 3D model

a G-code se nachází v elektronických přílohách.

Zárubně typu B

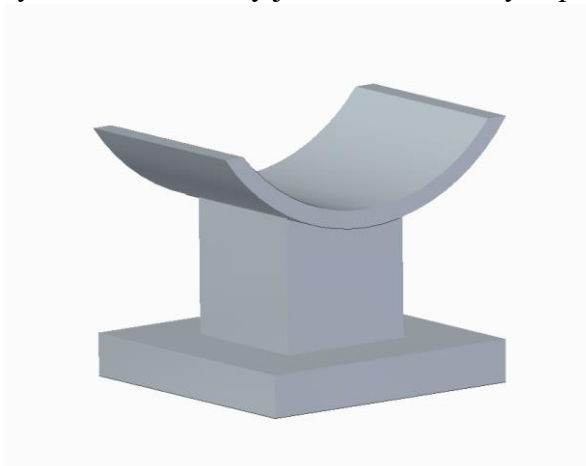
Na rozdíl od zárubně typu A tyto zárubně neslouží pouze ke spojení částí zařízení, ale také k uzavření a zarovnání konců jednotlivých součástí trubice. Návrh zárubně typu B je oproti typu A obohacen o plochu překrývající výplň mezi vnitřní a vnější trubicí, v této ploše se nachází otvor, do kterého přesně zapadá vnitřní trubice. Zárubně typu B jde vidět na Obr. 6.2. Obr. 6.1. Finální podoba 3D modelu a G-codu se nachází v elektronických přílohách.



Obr. 6.1 Model zárubně typu A (vlevo) a B (vpravo)

6.2.4 Podstavce

Při modelování podstavců nedošlo k žádným zásadním změnám oproti návrhu. Velikostní parametry zůstaly totožné. Noha podstavce byla odlehčena dírou o takovém průměru, při kterém se příliš nesnížila pevnost součásti a zároveň umožnila efektivní využití materiálu při tisku. Původní návrh počítal se čtyřmi těmito podstavci, avšak aktualizovaný návrh nevyužívající samostatný držák vzorku umožnil snížení celkového počtu podstav na dvě a to také díky nižší váze ozvučnice, než byla předpokládána. Vyobrazení této součásti je na Obr. 6.2. 3D modely a tiskové soubory jsou v elektronických přílohách práce

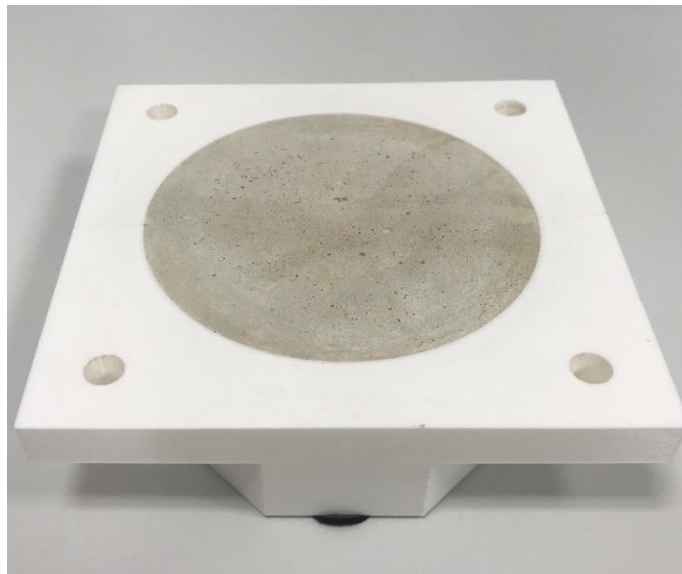


.Obr. 6.2 Model podstavcy

6.3 Zhotovení uzávěru trubice

K vytvoření pevného zakončení trubice zaručující co nejdokonalejší odraz zvukové vlny byl v návrhu uvažován kus železného válce o dané mocnosti. Při konstrukci impedanční trubice ovšem nebyli k dispozici nástroje, pomocí nichž by se dal kus surového železného válce opracovat na požadované rozměry. Nakonec však ani železné zakončení trubice v držáku vzorku nebylo potřeba, jelikož byl návrh pozměněn a na místo držáku vzorku bude vzorek přímo zasazen na konec trubice díky odnímatelnému uzávěru, který bude zároveň plnit roli pevného zakončení trubice.

Uzávěr byl zhotoven ze zárubně typu A, do jejíž vnitřní stěny byly vyvrtány otvory pro armovací tyčinky vytvořené ze závitových tyčí. Součást zárubně byla následně připevněna na rovnou desku s plastovým povrchem a následně byla celá vylitá jemnozrnným betonem. Jelikož je beton porézní materiál, bylo nezbytné nějakým způsobem uzavřít jeho póry, aby v nich nedocházelo k parazitnímu pohlcování zvukového vlnění, které by mělo za následek chybu měření pohltnutí určitého materiálu. Toto bylo vyřešeno pomocí penetrace vpracované do betonového povrchu. Samotný uzávěr trubice je vyfocen na Obr. 6.3.



Obr. 6.3 Uzávěr trubice

6.4 Vytvoření držáků mikrofonů

V procesu navrhování bylo uvažováno uchycení mikrofonů pouze pomocí upraveného gumového těsnění, které mělo být připevněno přímo do otvorů pro mikrofony v tělu trubice. Při samotné konstrukci se potom tato vize zdála jako dosti nedokonalé řešení, které by vedlo k více problémům než užitku, a také by bylo velmi obtížné vytvoření takového těsnění, které by zaručovalo dobrou stabilitu a těsné upevnění mikrofonů na fixní pozici. Kvůli tomu bylo vytvořeno řešení využívající upravenou kabelovou

průchodku. Průchodka s průměrem pro kabel v rozmezí 5–10 mm by měla poskytnou ukotvení mikrofonu o průměru 8 mm na horizontální ose, ovšem bylo nezbytné tuto průchodku upravit tak, aby byl mikrofon veden kolmo dolů na vnitřní stěnu impedanční trubice. Toho bylo dosaženo pomocí vsunutí nerezové trubičky o vnitřním průměru 9 mm, která byla vtěsněna do průchodky pomocí gumových těsnění. Tato trubička má takovou délku, při které končí milimetr od vnitřní stěny trubice. Mikrofon upevněný v takto upravené kabelové průchodce je pevně ukotven na horizontální i vertikální ose, detailní pozice mikrofonu je potom nadefinována dírou ve vnitřní stěně trubice, do které těsně pasuje hlava mikrofonu. Matice sloužící k uchycení kabelových průchodek byly zbroušeny smirkovým papírem připevněným k profilu trubice, která slouží dále jako vnější trubice těla, na požadovaný profil, díky němuž bylo možné uchytit kabelové průchodky do trubice velmi pevně a přesně.

6.5 Konstrukce těla trubice

Tělo impedanční trubice bylo navrženo tak, že bude sestávat z dvou trubic o různém průměru, které budou osově soustředné, a prostor mezi nimi bude vyplněn montážní pěnou. Při konstrukci byly nejdříve pomocí pokosové pily nařezány části trubice do požadovaných délek. Dalším krokem bylo vyměření pozice mikrofonů, do těchto pozic byly následně vyvrtány díry, do kterých byly upevněny kabelové průchodky upravené na držáky mikrofonů. Následně byly vyvrtány na oba konce trubice vždy tři díry přesně rozmístěné po obvodu, tak aby mezi nimi byl stejný úhel. Tyto díry byly následně upraveny závitníkem tak, aby se to do nich daly všroubovat šrouby o průměru 6 mm. Pomocí přitahování a povolování těchto šroubů bylo dosaženo soustřednosti obou trubic. Pro pevnější ukotvení vnitřní trubice ve vnější, před vyplněním montážní pěnou, byla vnitřní trubice také přichycena pomocí vrutů přivrtných skrz držáky mikrofonů. Malé díry ve vnitřní trubici od těchto šroubů dále posloužily jako výchozí bod pro vyvrtání přesné díry na mikrofon. Trubice potom byla vyplněna nízkoexpanzní montážní pěnou ve vodorovné pozici, aby došlo k co nejrovnoměrnějšímu rozprostření pěny po celém objemu mezikruží obou trubic. Po zatuhnutí byly přebytečné části pěny, jež vyexpandovali ven z trubice, odříznuty nožem a zarovnány s hranou vnější trubice tak, aby vnitřní trubice vždy 5 mm přesahovala ven.

6.6 Vytvoření ozvučnice

Ideální objem ozvučnice byl vybrán pomocí simulací v Lsp CAD jak již bylo zmíněno v 5.2. Tento objem činí 1,18 l, což je právě tolik, aby nebyl posunut rezonanční kmitočet do navrženého měřitelného frekvenčního rozsahu.

Ze stejné trubice, jako je vnější stěna impedanční trubice, byla vytvořena i ozvučnice. Pomocí pokosové pily byla uřezána trubice na požadovanou délku, následně byly smirkovým papírem vyhlazeny hrany pro přesnější spojení komponentů. Reprodukční byl

osazen na vnější stranu jedné ze zárubní typu B tak, aby byl přímo ve středu osy vnitřní trubice. Do části uřezané trubice určené na ozvučnici byly vyvrtány díry, do kterých byly následně namontovány konektory na takzvané banánky, přes které bude přiveden požadovaný signál na reproduktor. Ozvučnice je uzavřena pomocí víčka určeného na tyto trubice. Konektory jsou na reproduktor přivedeny kabelem o dostatečné délce, která však není příliš velká, aby nedocházelo k nechtěnému chvění kabelu, jež by mohl klepat o ozvučnici, díky čemuž je možná údržba nebo případná potřeba výměny reproduktoru nebo konektorů. Vnitřní objem ozvučnice byl nakonec částečně vyplněn tlumícím materiálem.

6.7 Kompletace zařízení

Po dokončení všech dílčích částí bylo potřeba vše spojit do komplexního zařízení. První ze všeho byly přilepeny zárubně typu B na tělo trubice, a to sice tak, že zárubě s již namontovaným reproduktorem byla přilepena na stranu, kde je větší vzdálenost od mikrofonů, aby vše odpovídalo návrhu, a aby stihly vymizet všechny eventuelně vybuzené křížové módy. Při lepení těchto zárubní byl brán zřetel na to, aby byly zárubně přilepeny svými hranami rovnoběžně s otvory pro mikrofony a díky tomu aby celé zařízení mělo čistší estetický dojem a také aby byly mikrofony vždy přímo kolmo na podložku, na kterou je zařízení postaveno. Všechny části vytištěné na 3D tiskárně byly přilepeny pomocí rychleschnoucího lepidla určeného na spojení polystyrenů. Před samotným nalepením byli na vzorcích materiálu PLA vyzkoušena různá lepidla, která byla k dispozici, a bylo zkoumáno, které poskytne nejlepší přilnutí a spojení materiálu PLA s povrchem trubice KGEM. Základní informace o lepení součástí z PLA byly získány z článku [10]. Po vytvrdnutí přilepených zárubní bylo obdobným postupem



Obr. 6.4 Kompletní impedanční trubice

přilepeno tělo trubice na podstavy, které zaručují správnou pozici trubice a také umožňují jednodušší manipulaci při montáži uzávěru trubice.

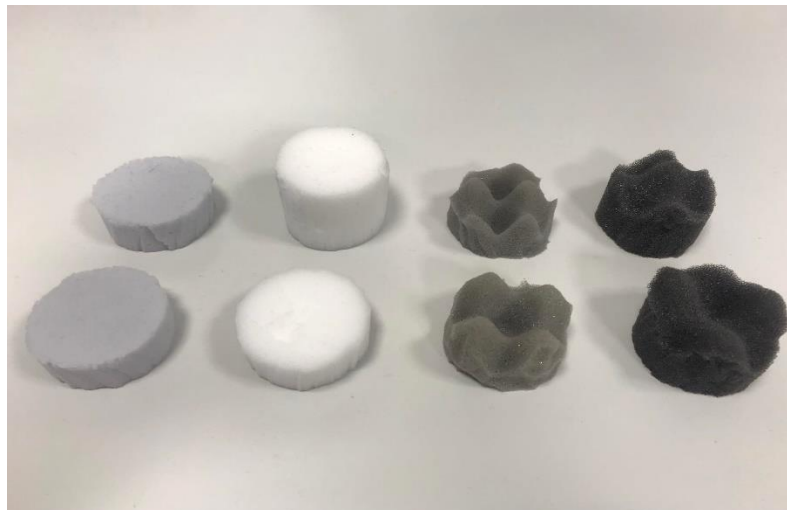
Když bylo tělo trubice již pevně spojeno se všemi vytištěnými součástmi, dalším krokem bylo vyvrtání přesných děr pro mikrofony ve vnitřní stěně trubice. Toho bylo dosaženo pomocí stolní vrtačky, která vrtákem o průměru 8 mm vyvrtala skrz držáky mikrofonů díry do vnitřní trubice na požadovaných pozicích a o požadovaném průměru. Jelikož byl vrták dostatečně ostrý, nebylo potřeba již dalšího vyhlazování vnitřní hrany otvorů, které by mohly způsobovat difrakce, kdyby nebyly dostatečně hladké. Následně byly do zárubní typu B na obou koncích těla trubice vlepeny pomocí epoxidového lepidla vratové šrouby o průměru 8 mm, které díky čtyřhranu pod hlavou jsou pevně vlepeny do otvorů v zárubních. Tyto šrouby byly na místo vlepeny kvůli rychlejší manipulaci při nasazování a sundávání uzávěru trubice. Ozvučnice byla připevněna zárubní typu A k tělu trubice na zárubeň typu B s reproduktorem a utažena pomocí křídlových matek. Uzávěr trubice je připevňován pomocí kulových plastových matic pro lepší manipulaci. Celé zařízení je vidět na Obr. 6.4.

7. VÝROBA VZORKŮ PRO MĚŘENÍ

Při výběru materiálů, které by mohly být v impedanční trubici měřeny, byl brán ohled především na dostupnost informací o činiteli útlumu těchto materiálů, který by měl nejlépe být měřen také v impedanční trubici, aby bylo možné naměřené výsledky porovnat s výsledky udávanými výrobcem, a tím získat náhled na přesnost vytvořeného zařízení. Na výrobu vzorků pro měření byly získány dva materiály, u kterých byly k dispozici údaje o jejich charakteristikách činitele pohltivosti.

Z těchto materiálů byly vyřezány vzorky pro měření v impedanční trubici pomocí skalpelu přidržovanému kouskem trubice použité pro vnitřní stěnu měřicího zařízení. Tato možnost zaručila nejlepší okopírování průměru trubice s dostatečně malými mezerami od stěn, které se dají bez problému vyplnit vazelínou v případě potřeby. Byla vyzkoušena i metoda vyříznutí pomocí nažhaveného válce o stejném průměru jako je vnitřní stěna trubice, ovšem materiály změnilly svoje povrchové vlastnosti a jakoby se „zatáhly“ což by mělo za následek nepřesnosti ve výsledcích měření.

Všechny vzorky jsou vyfoceny na Obr. 7.1.



Obr. 7.1 Vytvořené vzorky

7.1 Melamin

Melamin je velmi lehký, světlý, porézní a nehořlavý materiál, který má obecně velice vysoké zvukově absorpční účinky, dokonce jedny z nejvyšších mezi běžně užívanými porézními materiály k akustickým účelům. Tento materiál má také velmi dobrou tepelnou a požární odolnost.

Vzorky tohoto materiálu byly vytvořeny v mocnosti 4 cm, některé z nich byly následným rozříznutím rozděleny na vzorky o šířce 2 cm. Charakteristika pohltivosti pro různé šířky udávaná výrobcem je v Příloha E -. [12]

7.2 CELLO F800 FR

Materiál Cello F800 FR je polyesterová netkaná textilie, která velmi dobře izoluje teplo a zvuk. Tento materiál má vysokou tvarovou stálost a odolnost vůči teplu a požáru. Je často využíván jako tepelně izolující materiál například ve vzduchotechnice, užitkových vozidlech nebo strojírenství, ale díky jeho vlastnostem může být využíván i v prostorové akustice, jako absorpční materiál.

Z tohoto materiálu jsou vyřezány vzorky o průměru 2 cm, jelikož nebyl k dispozici širší kus materiálu. Charakteristiky činitele pohltivosti pro různé mocnosti materiálu jsou zobrazeny v Příloha F - [11]

7.3 Ostatní materiály

Jelikož bylo získáno pouze málo druhů materiálů s odpovídajícími informacemi o činiteli útlumu od výrobců, bylo rozhodnuto o rozšíření vzorkovníku materiálů pro měření na impedanční trubici o několik dalších materiálů, které se často používá v prostorové akustice za účelem snížení odrazivosti místností (pěny s reliéfem např.: vlnkovým, sinusovým, nebo jehlanovým).

Vzorky tohoto druhu byly vytvořeny ze samozhášivé polyuretanové pěny s vlnkovitým reliéfem. K dispozici byly dva typy odlišné především objemovou hustotou a hloubkou reliéfu. Celková mocnost těchto vzorků byla téměř totožná. Pro další účely budou tyto vzorky nazývány jako vlnky A, vlnky B. Vlnky A jsou z materiálu o větší objemové hustotě, s menší hloubkou reliéfu. Tento materiál se dá nejjednodušeji odlišit od vlnky druhého druhu barvou, která je značně tmavší než u druhého vzorku. Vlnky B mají menší objemovou hustotu než vlnky A, na rozdíl od nich mají ovšem hlubší profil reliéfu. Barva tohoto vzorku je značně světlejší než u vzorku vlnky A, tedy by nemělo docházet k případnému zaměnění těchto dvou vzorků. Oba tyto vzorky jsou hořlavé ovšem samozhášivé. Vzorky z těchto materiálů byly vytvořeny stejnou metodou, jak tomu bylo u předchozích příkladů.

Tyto vzorky byly vytvořeny především kvůli poskytnutí možnosti měřit více materiálů, a zjistit, alespoň přibližně, jejich činitele pohltivosti. Vzorkovník může být dále rozšiřován o libovolné vzorky, jen je třeba dbát na vytvoření vzorků ve správné velikosti, aby je bylo možné měřit ve vytvořené impedanční trubici.

8. REALIZACE PRACOVIŠTĚ PRO MĚŘENÍ IMPEDANČNÍ TRUBICÍ

Pracoviště pro měření na impedanční trubici sestává ze zesilovače budícího generovaný signál na požadovanou úroveň, samotného zařízení trubice a počítače se zvukovou kartou Steinberg UR44. Na tomto počítači je spuštěn program, který generuje signál vysílaný zvukovou kartou do zesilovače a následně do reproduktoru trubice. Tento program také analyzuje a vyhodnocuje informace nasbírané mikrofony umístěnými v impedanční trubici.

8.1 Návrh a vytvoření zesilovače pro generovaný signál

Aby reproduktor mohl pracovat v ideálním výkonovém intervalu bylo nezbytné, aby signál generovaný generátorem byl zesílen na ideální úroveň, kvůli čemuž byl zhotoven zesilovač pro plnění této úlohy.

8.1.1 Výběr vhodných součástí pro zesilovač

Základní komponent celého zesilovače je miniaturní výkonový zesilovač ve třídě D s maximálním výstupním výkonem při nízkém napětí. Klíčovou součástí tohoto zesilovače je mikročip PAM8403, jehož výstupní výkon při zátěži 4Ω činí 3 W na 10% THD. Účinnost tohoto zesilovače je až 90%, což by u zesilovačů třídy A nebo B nebylo možné. Díky architektuře tohoto zesilovače je možné přímo za něj zapojit reproduktor bez potřeby připojit před něj filtry typu dolní propust. Tento zesilovač také disponuje vestavěným elektronickým spínačem a ochranou před zkratem.

Aby mohl tento zesilovač pracovat s konstantním výkonem, je potřeba ho napájet napětím v rozmezí na které je přizpůsoben, jinak by mohlo dojít ke zničení zesilovače, nebo k nedokonalému chodu, toto rozmezí je od 3,6 do 5,5 V. Pro zaručení takového napájení byl vybrán spínací zdroj do DSP HAHN s výstupním napětím 5 V, výstupním proudem 0,6 A a reálným výkonem 3 W. Tyto parametry jsou vyhovující účelu napájení zmíněného zesilovače.

Vstupní napětí vybraného zesilovače je do 0,3 V, kvůli čemuž byl před vstup připojen napěťový dělič, který umožní přizpůsobení vstupního napětí na takovou úroveň, při které bude mít zesilovač požadovaný výstupní výkon. Na tento napěťový dělič byl vybrán trimr s hodnotou 5 k Ω .

8.1.2 Realizace zařízení

Zesilovač byl nejprve zkonstruován pouze na kontaktním nepájivém poli, díky čemuž bylo možné otestovat zařízení před konstrukcí do plošného spoje. Při zkoušení zesilovače na kontaktním poli nebyly nalezeny žádné potíže ani nedostatky, které by bránily v přistoupení k navržení a realizaci plošného spoje pro celé zařízení. Plošný spoj, na který

byly napájeny všechny komponenty, byl navržen na papír. Tento navržený plošný spoj byl následně vyleptán pomocí oxidu železitého z kupřexitu, na který byl požadovaný spoj nakreslen lihovou fixou. Byla vybrána krabička, do které se celé zařízení pohodlně vlezlo a bylo ji možné jednoduše upravit pro potřebu vložení konektorů. Na výstupu zesilovače jsou připojeny samice konektoru banánky, aby se výstup zesilovače shodoval se vstupem reproduktoru.

8.2 Vytvoření programu pro měření

Pro vytvoření programu bylo vybráno prostředí a skriptovací programovací jazyk Matlab. Bylo nezbytné, aby tento program dokázal pomocí komunikace se zvukovou kartou generovat takový signál, jaký si uživatel přeje, a také aby dokázal zpracovávat informace z měřících mikrofónů, z nichž následně vykreslí požadovanou charakteristiku materiálu, díky přepočtu přenosových funkcí signálu.

V prostředí Matlab se dá využít systémový objekt `audioPlayerRecorder`, který umožňuje synchronně zaznamenat a vysílat audio signály z externí zvukové karty. Tento objekt je srdcem celého programu pro měření, jelikož díky němu je možné vysílat požadovaný signál a zároveň zpracovávat data, která jsou následně vykreslena do požadovaného grafu. Pro navržené měření bylo potřeba generovat lineárně přeladovaný harmonický signál na určitém kmitočtovém rozsahu, čehož bylo dosaženo pomocí využití funkce `chirp`, která umožňuje generování takového signálu na určitém časovém intervalu.

Vstupní signál z měřících mikrofónů byl pomocí rovnic z kapitoly 2.1.2 převeden na charakteristiku činitele zvukové pohltivosti daného materiálu vztaženého na frekvenci. Tato charakteristika je nakonec zobrazena v samostatném okně a je možné vyexportovat si její data pro možnost dalšího využití.

Původně bylo v plánu i naprogramování uživatelského prostředí, které by usnadnilo práci s tímto programem, to ovšem bohužel nakonec nebylo z časových důvodů dokončeno.

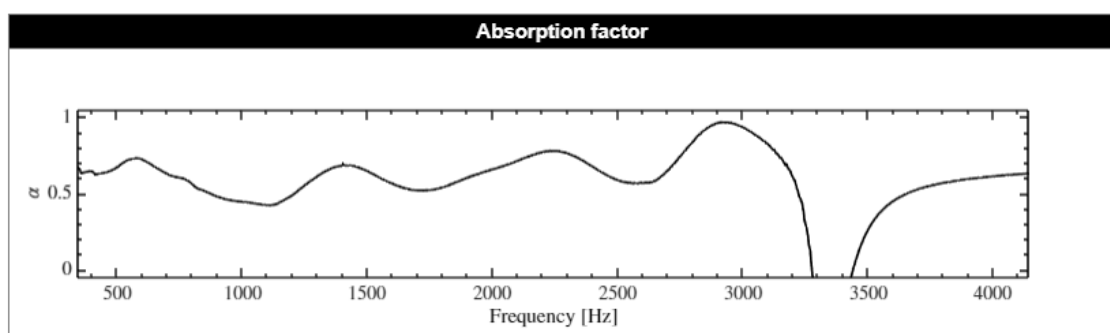
Celý vytvořený kód je v elektronické příloze ve složce Matlab.

9. VÝSLEDKY MĚŘENÍ NA IMPEDANČNÍ TRUBICI

První test impedanční trubice proběhl společně s otestováním obvodu zesilovače. U této zkoušky byl do trubice vyslán logaritmicky přeladovaný harmonický signál v intervalu měřitelných frekvencí zařízení. Při tomto testu bylo zjištěno, že trubice nemá žádné části, které by mohli rušit měření (například vibracemi některých částí, nebo jiným nechtěným hlukem) na navrženém měřicím intervalu.

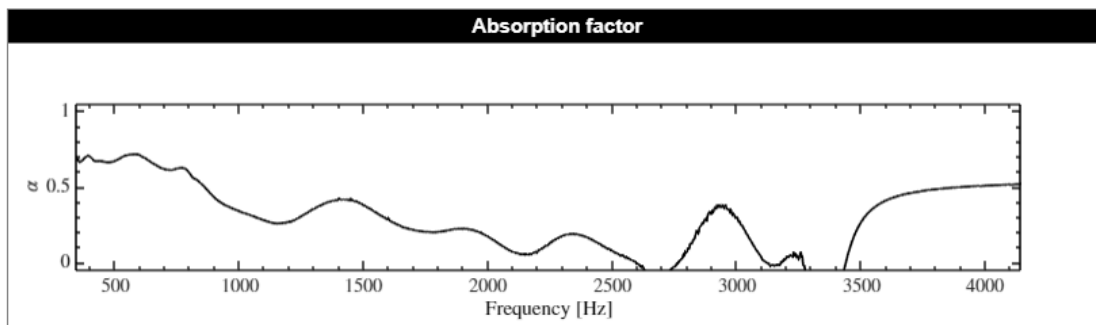
9.1 Měření pomocí programu ALab

Při vytváření kódu pro měření byl objeven open-sourc program ALab naprogramovaný v Matlabu, který byl vytvořen pro měření činitele pohltivosti v různých typech impedančních trubic podle normy ISO 10534-2. Stěžejní část tohoto programu také stojí na systémovém objektu audioPlayerRecorder, podobně jak je tomu u vytvořeného programu. Pomocí tohoto programu bylo provedeno testovací měření vzorku materiálu CELLO F800 FR s udávanými hodnotami činitele pohltivosti od výrobce, a také měření uzavřené trubice bez vzorku. Výsledné charakteristiky ovšem zdaleka neodpovídaly předpokladu, a naopak se zdály dosti chaotické a nepřesné. Nepřesnost tohoto měření mohla být způsobena mnoha faktory. Například při kalibraci systému bylo velmi obtížné s použitou metodou ukotvení mikrofonů dosáhnout dokonalého pozicování mikrofonů při prohození jejich poloh. Další faktor, který mohl silně ovlivnit výsledné průběhy, je nedokonalost uzavření celkového vnitřního prostoru trubice díky čemuž mohlo docházet k parazitním únikům signálu, což mohlo zkreslit celkovou charakteristiku činitele pohltivosti. Také nedokonalost vytvořených vzorků (nedokonalá homogenita výřezu) mohla mít vliv na výsledné charakteristiky. Výsledné grafy z tohoto měření jsou k dispozici pro náhled na Obr. 9.1 a Obr. 9.2.



Obr. 9.1 Činitel pohltivosti materiálu CELLO 800 naměřený pomocí programu ALab

Je také možné, že kdyby bylo stráveno více času prací s tímto programem, bylo by zjištěno jak efektivně nakalibrovat celý systém a získat tak přesnější výsledky. V takovémto případě by byl tento program zcela ideální pro práci s vyhotoveným zařízením, jelikož jeho prostředí je dosti uživatelsky přívětivé a také je v tomto programu možné měřit pro různé konfigurace impedanční trubice (s jedním mikrofonem, více mikrofony).



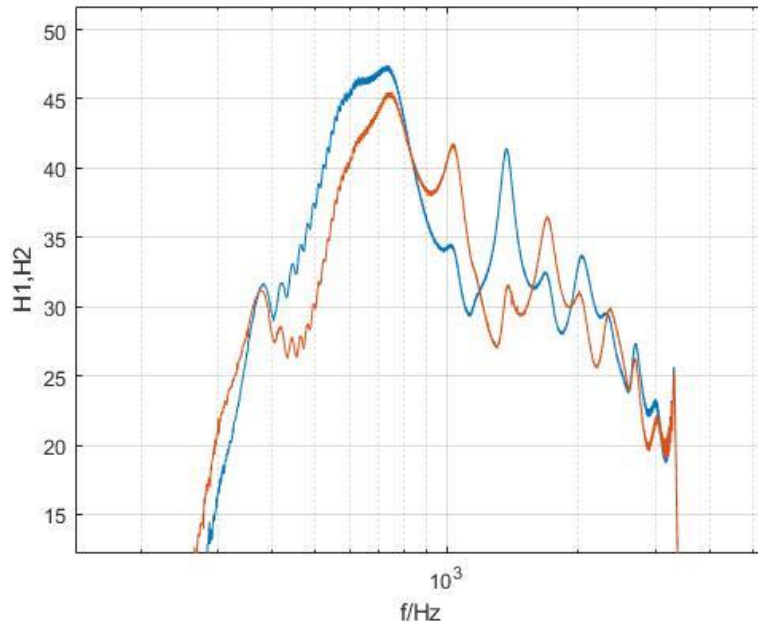
Obr. 9.2 Činitel pohlivosti samotné trubice naměřený pomocí ALab

9.2 Měření pomocí vytvořeného programu

Při měření pomocí vytvořeného programu docházelo k mnoha nesrovnalostem. Výsledné charakteristiky činitele pohltivosti zdaleka neodpovídaly předpokládanému vzhledu, a to už jen z důvodu, že hodnoty tohoto činitele přesahovaly hodnotu 1, někdy dokonce mnohonásobně. Při zkoumání, proč jsou výsledky takhle špatné, bylo zjištěno několik možných důvodů. Zaprvé byl možný problém u použité zvukové karty, jelikož u ní není možné nastavit fixní citlivosti mikrofonů. U měření pomocí vytvořeného programu bylo také podezření na chybu synchronizací měření pro jednotlivé kanály, jelikož využitá funkce audiPlayerRecorder neumožňuje simultánně zaznamenávat signál pro více kanálů, kvůli čemuž bylo nezbytné vždy vygenerovat signál poslaný do trubice dvakrát, a to sice pro zpracování na každém kanálu zvlášť.

Při snaze o odstranění problému při měření pomocí tohoto programu nebyla nalezena žádná chyba syntaxe ani logická chyba v rozložení a zápisu rovnic, které odpovídají standardu ISO 10534–2. Na obr. 9.3. lze vidět průběhy přenosových funkcí pro jednotlivé mikrofony při měření materiálu Melamin v mocnosti 4 cm, modrý průběh odpovídá mikrofonu číslo 1 (vzdálenější od vzorku) a oranžový průběh mikrofonu číslo 2 (blíže

vzorku). U těchto průběhů není zřetelný žádný důvod proč by výsledná charakteristika činitele pohltivosti měla mít tak vysokou chybovost.



Obr. 9.3 Přenosové funkce na jednotlivých mikrofonech při měření vzorku Melamin 4 cm pomocí vytvořeného programu

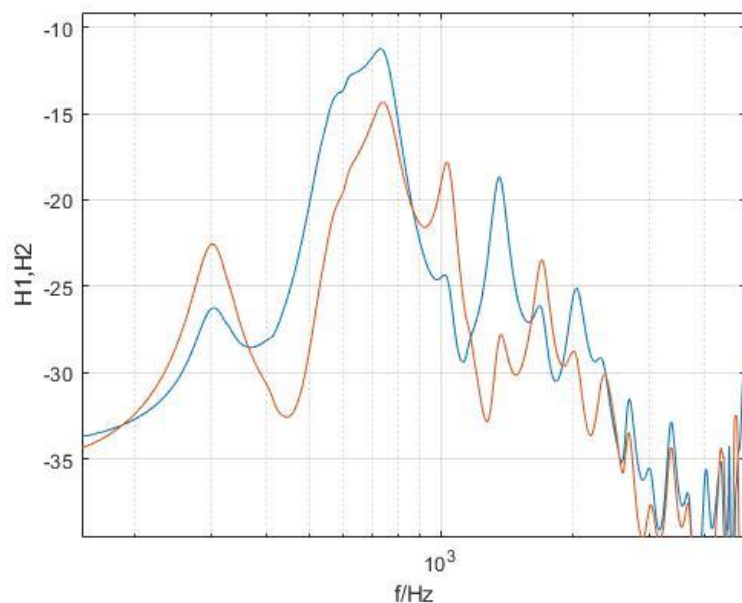
Kvůli podezření na chybu synchronizace u tohoto měření bylo přistoupeno k testovacímu měření na měřicím systému APx, u kterého je možné synchronně zaznamenávat signál z více kanálů, které by mohlo odhalit, jestli je problém opravdu v synchronizaci anebo někde jinde.

9.3 Měření pomocí měřicího systému APx

Měřicí systém APx se skládá z analyzátoru APx525, převodníku APx1701 a programu APx500, který komunikuje s analyzátozem a převodníkem tohoto systému. Analyzátor APx525 umožňuje získat vysoký počet bodů spektra měřené charakteristiky a poskytuje velmi nízké systémové zkreslení, zaručující přesnější výsledky. Převodník APx1701 zaručuje vyrovnané zesílení signálu, nízkou odchylku při měření frekvenční charakteristiky a velmi nízké hodnoty celkového harmonického zkreslení signálu. Toto dohromady zaručuje velmi vysokou přesnost měření. Na tomto systému bylo měřeno pomocí generovaného lineárně přeladovaného harmonického signálu podobně jak tomu bylo i u měření ve vytvořeném programu.

Na tomto systému byla měřena impulzní odezva, fázová charakteristika a modulová charakteristika. Naměřené hodnoty byly vyexportovány ve formátu dat pro Matlab, kde byly přepočítány naměřené hodnoty na požadované charakteristiky. Na Obr. 9.4 lze vidět

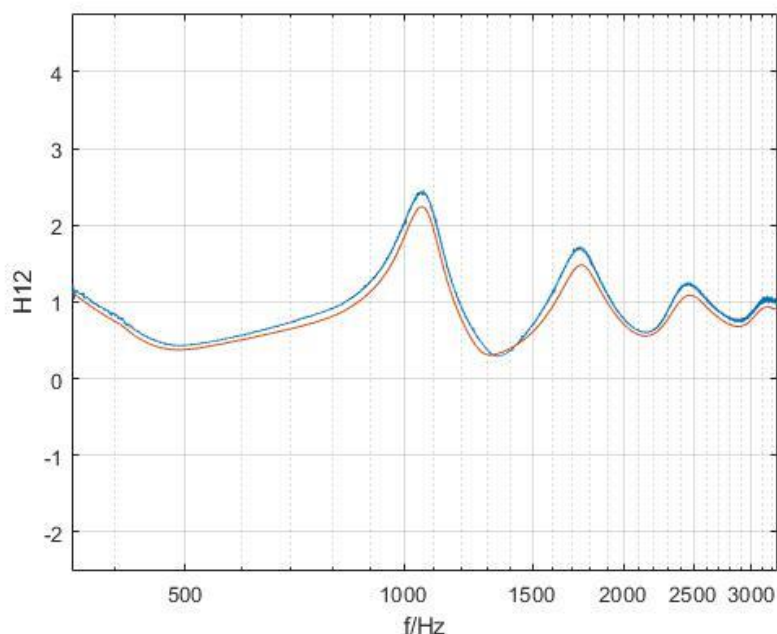
charakteristiku přenosových funkcí na obou mikrofonech změřená simultánně. Modrá charakteristika odpovídá přenosové funkci na prvním mikrofону a oranžová na mikrofónu druhém.



Obr. 9.4 Přenosové funkce na jednotlivých mikrofonech při měření vzorku Melamin 4 cm pomocí měřicího systému APx

Při podělení těchto dvou přenosových funkcí získáme přenosovou funkci mezi oběma mikrofony, která je nezbytná pro výpočet činitele pohltivosti. Tato přenosová funkce mezi mikrofony změřená pomocí vytvořeného programu i pomocí měřicího systému APx je vyobrazena na Obr. 9.5. Z porovnání těchto charakteristik jde jasně vidět, že rozdíly mezi nimi jsou velmi malé, tudíž předpokládaný problém se špatnou synchronizací pro měření jednotlivých kanálů pomocí vytvořeného programu nemohl představovat zásadní problém pro přesnost výsledků. Nemožnost fixních citlivostí mikrofónů při měření pomocí vytvořeného programu také nemohl být zásadní problém, jelikož při měření na systému APx tyto citlivosti fixní jsou, a i tak je výsledná charakteristika přenosové funkce mezi mikrofony téměř totožná.

Po získání potřebných dat ze systému APx byla tato data pomocí rovnic v Matlabu přepočítána na činitele pohltivosti, ovšem finální charakteristika, byla stejně nepřesvědčivá jako tomu bylo u měření pomocí samotného vytvořeného programu.



Obr. 9.5 Přenosová funkce mezi mikrofony změřená pomocí vytvořeného programu (modrá) a pomocí měřicího systému APx (oranžová)

Pro získání alespoň nějaké představy o vlastnostech materiálů, ze kterých byly vytvořeny vzorky, byly vytvořeny grafy přenosových funkcí mezi mikrofony pro tyto materiály, změřené pomocí systému APx. Tyto charakteristiky jsou k vidění v příloze G a příloze H.

9.4 Zhodnocení měření na vytvořeném zařízení

Na vytvořeném zařízení bohužel nebyl změřen činitel pohltivosti s relevantními hodnotami i navzdory správně napsaným rovnicím postupu ve vytvořeném programu. Možných důvodů, proč nebyl činitel pohltivosti změřen a vypočten správně, je hned několik. První kategorie těchto problémů jsou konstrukční nedostatky, které nepochybně ovlivňují kvalitu získaných výsledků. Například nedokonalost odrazivosti uzávěru trubice, nebo nedokonalost lícování vzorků vložených do konce trubice mají vliv na finální hodnoty činitele pohltivosti, ovšem spíše by tyto hodnoty byly pouze zkresleny v rámci pár procent, tudíž by takovéto konstrukční nedokonalosti neměli vést k nesmyslným výsledkům činitele pohltivosti pohybující se mimo rozsah od 0 do 1.

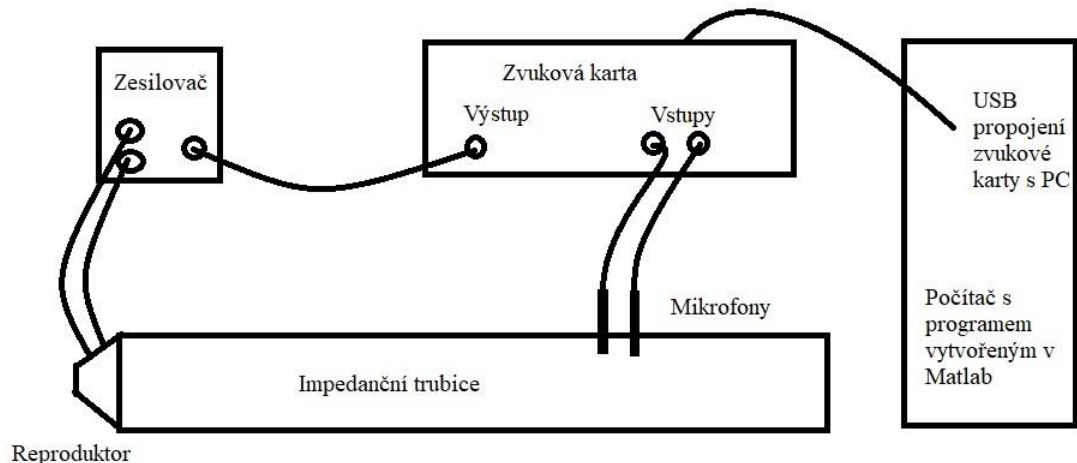
Zásadním problémem jsou nejspíše nedokonale vyřešené držáky vzorku, které neumožňují vložení mikrofonu vždy na tutéž pozici, i při označení části, po kterou má být mikrofon zasunut do držáku, dojde při následném utažení a ukotvení mikrofonu k jeho posunutí sice v rámci milimetrů, ale i to je značný rozdíl pro potřeby kompenzace chyb způsobené netotožným párem použitých mikrofonů. Při používání takového páru mikrofonů je ideální použít metodu na kompenzování chyb pomocí měření, jak se základní pozicí mikrofonů, tak s jejich prohozenými pozicemi, což následným zprůměrováním efektivně eliminuje chyby způsobené nekorelujícími citlivostmi mikrofonů. Při možnosti vložit mikrofon vždy na stejnou pozici je také možné měřit pouze za pomoci jednoho mikrofonu, který se vystřídá v obou polohách, tato metoda také eliminuje chyby způsobené nespárovanými mikrofony.

Komerční impedanční trubice jsou velmi drahá zařízení, a to především kvůli jejich precizní konstrukci, která zaručuje dokonale uzavření vnitřního prostoru trubice, kde probíhá měření. I malé konstrukční nedokonalosti mohou vést k velkým odchylkám měření. Jak popisuje [17], vytvoření nízko nákladové impedanční trubice s relevantními výsledky je velmi náročné, a často vede k nedokonalým měřením s velkou chybou. Navzdory velké pečlivosti při konstrukci, a snahy o dosažení co nejlépe uzavřeného vnitřního prostoru trubice, není konstrukce zcela dokonalá, což se u prototypu dá očekávat.

10. NÁVRH LABORATORNÍ ÚLOHY

Zařízení akustické trubice, jehož sestavení bylo úkolem této práce, by mělo v ideálním případě sloužit studentům pro účely laboratorních měření činitele zvukové pohltivosti na impedanční trubici. Jedním z hlavních výstupů, kromě samotného zařízení, je tedy i návrh laboratorní úlohy pro měření na tomto zařízení.

Zapojení měřicího pracoviště pro tuto laboratorní úlohu je znázorněno na Obr. 10.1.



Obr. 10.1 Zapojení laboratorní úlohy

10.1 Cíle laboratorní úlohy

Hlavním cílem navržené laboratorní úlohy je seznámení studentů s činitelem pohltivosti a jeho měřením na impedanční trubici, pomocí metody přenosové funkce. Pomocí úlohy, ve které je hlavním úkolem změřit a porovnat několik materiálů s různými vlastnostmi, by měli studenti získat alespoň základní přehled o tom jaký činitel pohltivosti mají různé materiály a jaký má na jeho hodnotu vliv například tloušťky materiálu.

Kromě materiálů, u kterých je znám činitel pohltivosti udávaný výrobcem, bude součástí laboratorní úlohy i měření materiálů bez těchto údajů, a to sice takových, které se často využívají právě za účelem snížení odrazivosti místností jako je například pěna vyřezaná do jehlanových reliéfů nebo vlnkovitých „sinusových“ reliéfů, jejich činitel pohltivosti bude následně porovnáván s materiály, které tyto vlastnosti udávané mají, aby si studenti vytvořili reálný pohled na pohltivost těchto materiálů.

Laboratorní úloha bude řízena pomocí vytvořeného programu na ovládání měřicího řetězce, z kterého si studenti budou moci vzít charakteristiky průběhu činitele pohltivosti pro případné následné vložení do protokolu, nebo analýzu a porovnání s charakteristikami uváděnými výrobcem.

10.2 Stručný postup laboratorní úlohy

V této laboratorní úloze by nejprve mělo být zapojeno měřící pracoviště podle schématu zobrazeného na Obr. 10.1. Poté by studenti měli přichystat impedanční trubici pro měření, ujistit se o správném pozicování mikrofonů v jejich držácích, nastavit na zvukové kartě předepsané hodnoty pro zesílení mikrofonů a hodnotu výstupu zvukové karty. Následně by měli být zvoleny tři vzorky, které budou měřeny. Poté již studenti mohou přistoupit k samotnému měření, které bude řízeno vytvořeným programem. Naměřené charakteristiky budou následně uloženy pro jejich další použití v protokolu, kde budou tyto charakteristiky zhodnoceny studenty.

11. ZÁVĚR

V této práci byla navržena a zkonstruována impedanční trubice pro měření činitele akustické pohltivosti pomocí metody přenosové funkce. Při konstrukci této trubice byl částečně upraven návrh tak, aby finální zařízení bylo jednodušší a efektivnější. Proces konstrukce proběhl bez větších problémů, a také bez povšimnutí možných nedokonalostí, které by mohli ovlivňovat kvalitu měření.

Po dokončení konstrukce bylo přistoupeno k realizaci měřicího pracoviště, což obnášelo návrh a realizaci zesilovačem, který zesiluje generovaný signál na ideální úroveň pro reprodukci v trubici. Kromě vytvoření zesilovače byl v této části také vytvořen program, který umožňuje generovat požadovaný signál a také analyzuje data z mikrofónů, která by měla být následně přepočtena na činitele pohltivosti daného materiálu.

Při měření nebyly získány charakteristiky činitele pohltivosti akustických materiálů s relevantními hodnotami, kvůli možným příčinám zmíněným v kapitole 9.4. Problém s držáky mikrofónů, zmíněný v této kapitole, by se teoreticky dal vyřešit pomocí nalepení gumových těsnění na konkrétní pozici těla mikrofónu, ovšem takovéto řešení by znemožnilo použití mikrofónů na jiné účely. Další možností by bylo přilepení takového těsnění pouze na jeden mikrofón, který by sloužil výhradně k měření na této trubici, a vytvoření zátky, která by se jednoduše dala upevnit do držáku mikrofónů pro dokonalé zatěsnění jednoho z otvorů pro mikrofóny, díky čemuž by bylo následně možné měřit činitele pohltivosti pomocí přenosové funkce, avšak za použití pouze jednoho mikrofónu. Při zkoumání možných řešení chyb vzniklých u měření činitele pohltivosti na domácíky vyrobených trubicích, byl objeven článek popisující možné korekční mechanismy, které využívají matematické modelování a chytrý software využívající neuronové sítě pro potlačení náhodných a systematických chyb vzniklých při měření na takovýchto trubicích. [16]

Součástí této práce je také návrh laboratorní úlohy zabývající se měřením činitele pohltivosti na vytvořeném zařízení. Tato úloha by mohla následně být rozvinuta o měření také průzvučnosti materiálů, kdyby byla zkonstruována další část trubice, což design vytvořeného zařízení jednoduše umožňuje. To by ovšem dávalo smysl pouze v případě, kdy je již vytvořené zařízení plně funkční a je na něm možné měřit činitele pohltivosti s relevantními výsledky.

Nabízí se další rozvoj práce, který by se zabýval především doladěním programu anebo vylepšením mechanických vlastností držáků mikrofónů, díky čemuž by bylo následně možné relevantně měřit na vytvořeném zařízení.

LITERATURA

- [1] KOLMER, Felix a Jaroslav KYNCL. Prostorová akustika: vysokošk. příručka pro vys. školy techn. směru. 2., nezm. vyd. Praha: SNTL, 1982.
- [2] NOVÝ, Richard. Hluk a chvění. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1995. ISBN 80-01-01306-5.
- [3] COX, Trevor J. a Peter D'ANTONIO. Acoustic absorbers and diffusers: theory, design and application /: theory, design and application. 2nd ed. London: Taylor & Francis, 2009. ISBN 978-0-415-47174-9.
- [4] ISO 10534–2. Acoustics – determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes. Part 1: Method using standing wave ratio. 1998.
- [5] ISO 10534–2. Acoustics – determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes. Part 2: Transfer-function method. 1998.
- [6] ČSN ISO 354. Akustika. Měření zvukové pohltivosti v dozvukové místnosti. 1993.
- [7] Výplň. Prusa Knowledge Base [online]. [cit. 2022-04-28]. Dostupné z: https://help.prusa3d.com/cs/article/vypln-infill_42
- [8] Vrstvy a perimetry. Prusa Knowledge Base [online]. [cit. 2022-04-28]. Dostupné z: https://help.prusa3d.com/cs/article/vrstvy-a-perimetry_1748
- [9] Průvodce materiály. Prusa Knowledge Base [online]. [cit. 2022-04-28]. Dostupné z: https://help.prusa3d.com/cs/category/pruvodce-materialy_220
- [10] Velký článek o lepení a kompletaci 3D výtisků. Prusa3d [online]. [cit. 2022-04-28]. Dostupné z: https://blog.prusa3d.com/cs/velky-clanek-o-lepeni-a-kompletaci-3d-vytisku_44908/
- [11] Cello F800 FR. In: Cellofoam [online]. [cit. 2022-05-12]. Dostupné z: https://www.cellofoam.cz/fileadmin/user_upload/Data_sheets_Czech/F800_FR_A_LG_CZ.pdf
- [12] Technický list Melamin. In: Akustická-pena.cz [online]. 2021 [cit. 2022-05-12]. Dostupné z: <https://www.akusticka-pena.cz/zbozi-ceny/melaminovy-panel/>
- [13] J. Y. Chung and D. A. Blaser. Transfer function method of measuring in-duct acoustic properties. i. theory. The Journal of the Acoustical Society of America, 68(3):907–913, 1980.
- [14] WOLKESSON, Martin. Evaluation of impedance tube methods - A two microphone in-situ method for road surfaces and the three microphone transfer function method for porous materials [online]. Goteborg, Sweden, 2013 [cit. 2022-05-21]. Dostupné z: <https://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/178260/178260.pdf>
- [15] SCHIMMEL, J. Elektroakustika. Elektroakustika. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2013. p. 1-167. ISBN: 978-80-214-4716- 5.
- [16] Investigation and correction of error in impedance tube using intelligent techniques [online]. 2016 [cit. 2022-05-25]. Dostupné z:

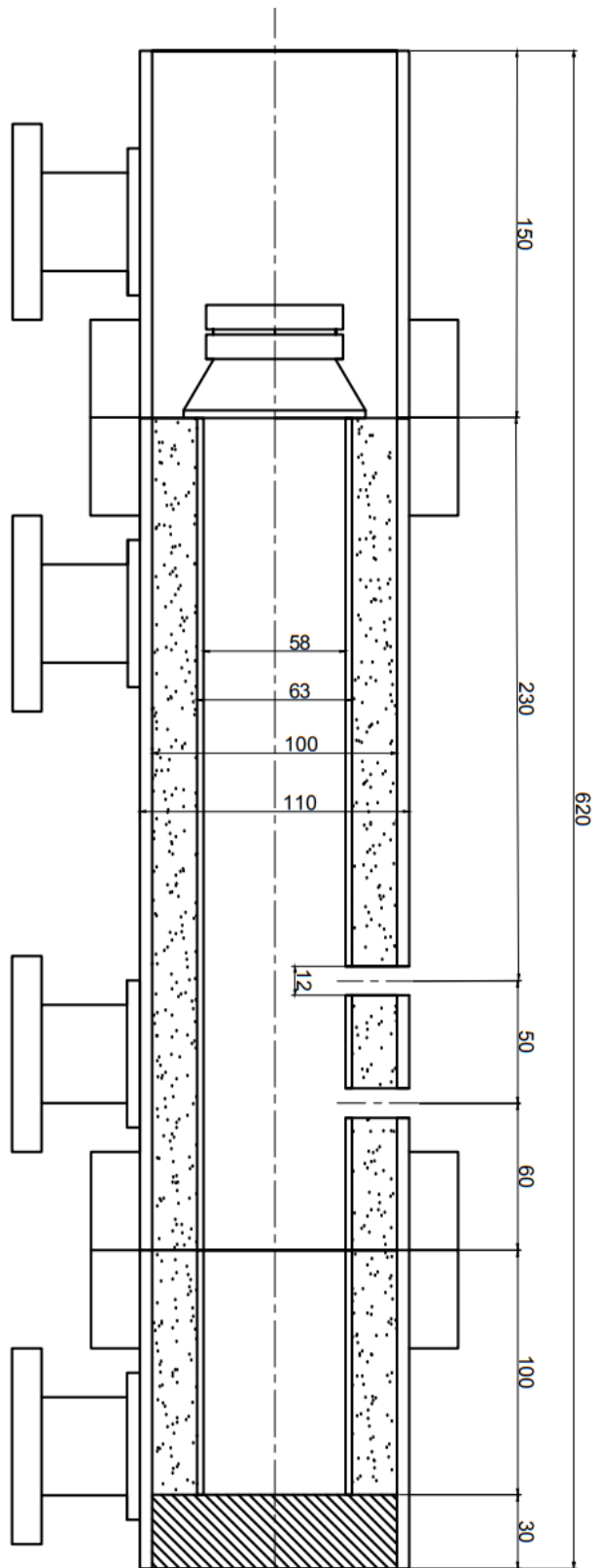
<https://www.elsevier.es/index.php?p=revista&pRevista=pdf-simple&pii=S1665642316300918&r=81>

- [17] Impedance Tube Alternative via the Transfer Function Method [online]. 2018 [cit. 2022-05-25]. Dostupné z: https://ideaexchange.uakron.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1707&context=honors_research_projects

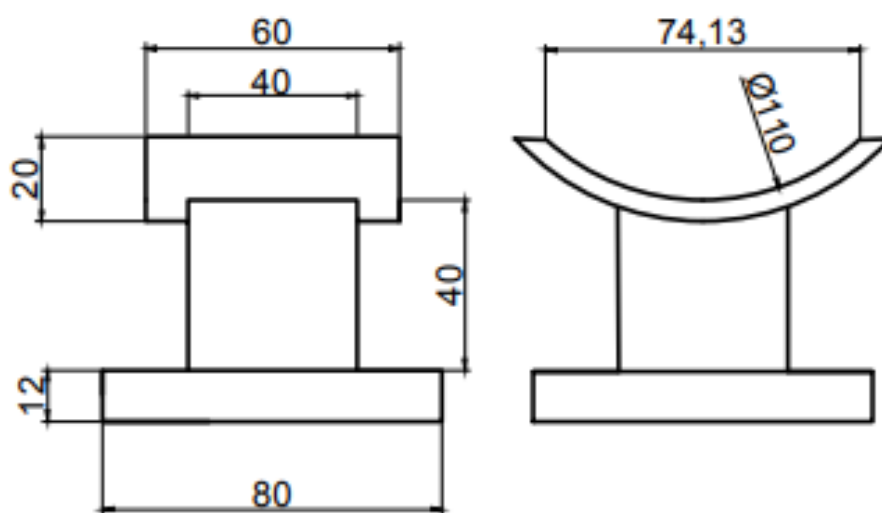
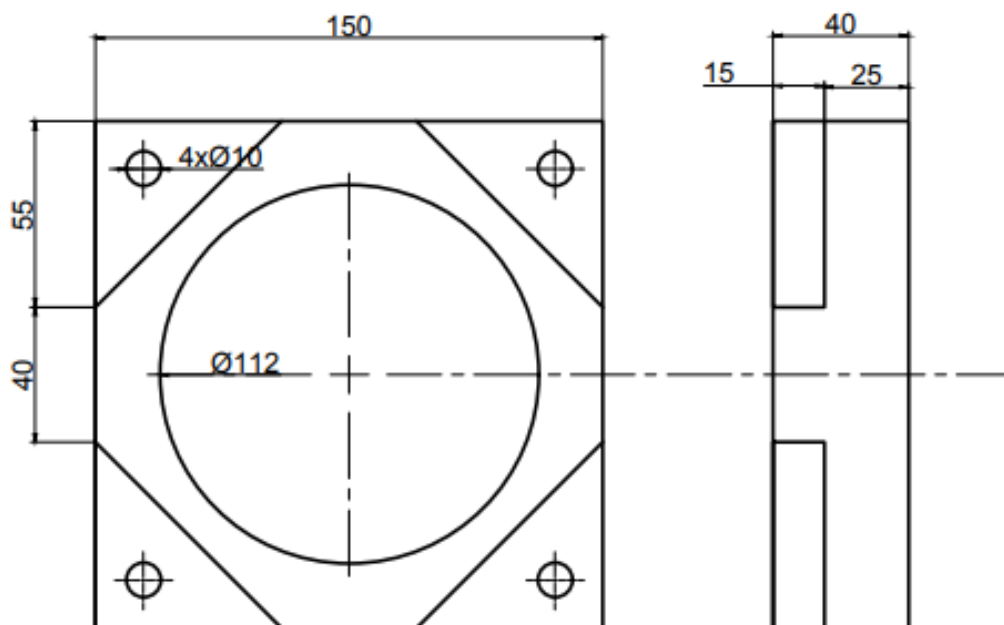
SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA A - ŘEZ NAVRŽENOU SOUSTAVOU	56
PŘÍLOHA B - NÁVRH ZÁRUBNÍ A PODSTAVCŮ	57
PŘÍLOHA C - NAMĚŘENÉ A VYPOČTENÉ PARAMETRY REPRODUKTORU.....	58
PŘÍLOHA D - CHARAKTERISTIKY SIMULACÍ V LSPCAD.....	59
PŘÍLOHA E - ČINITEL POHLTIVOSTI MELAMINU UDÁVANÝ VÝROBCEM.....	60
PŘÍLOHA F - ČINITEL POHLTIVOSTI MATERIÁLU CELLO F800 FR.....	61
PŘÍLOHA G - PŘENOSOVÁ FUNKCE MEZI MIKROFONY PRO VZOREK CELLO F800 2 CM.....	62
PŘÍLOHA H - PŘENOSOVÁ FUNKCE MEZI MIKROFONY PRO VZOREK MELAMIN 2 CM	63

Příloha A - Řez navrženou soustavou



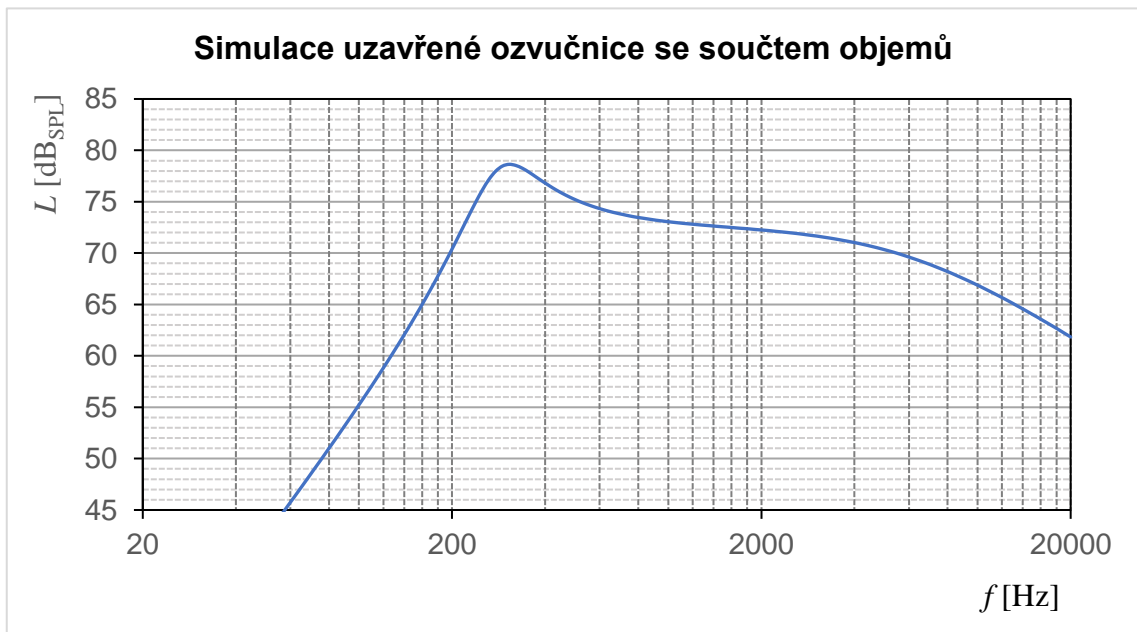
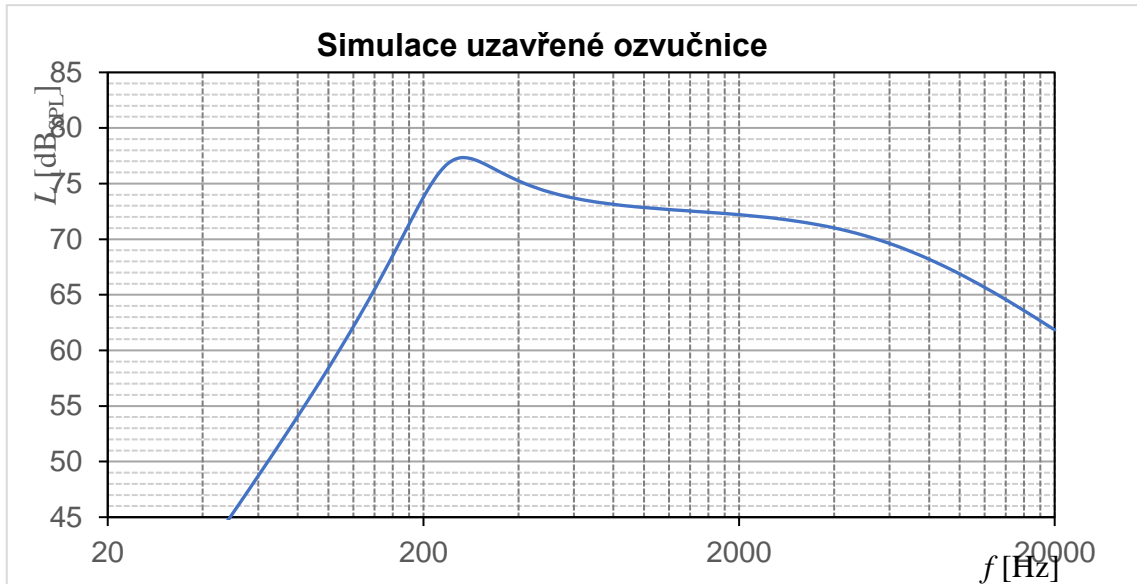
Příloha B - Návrh zárubní a podstavců



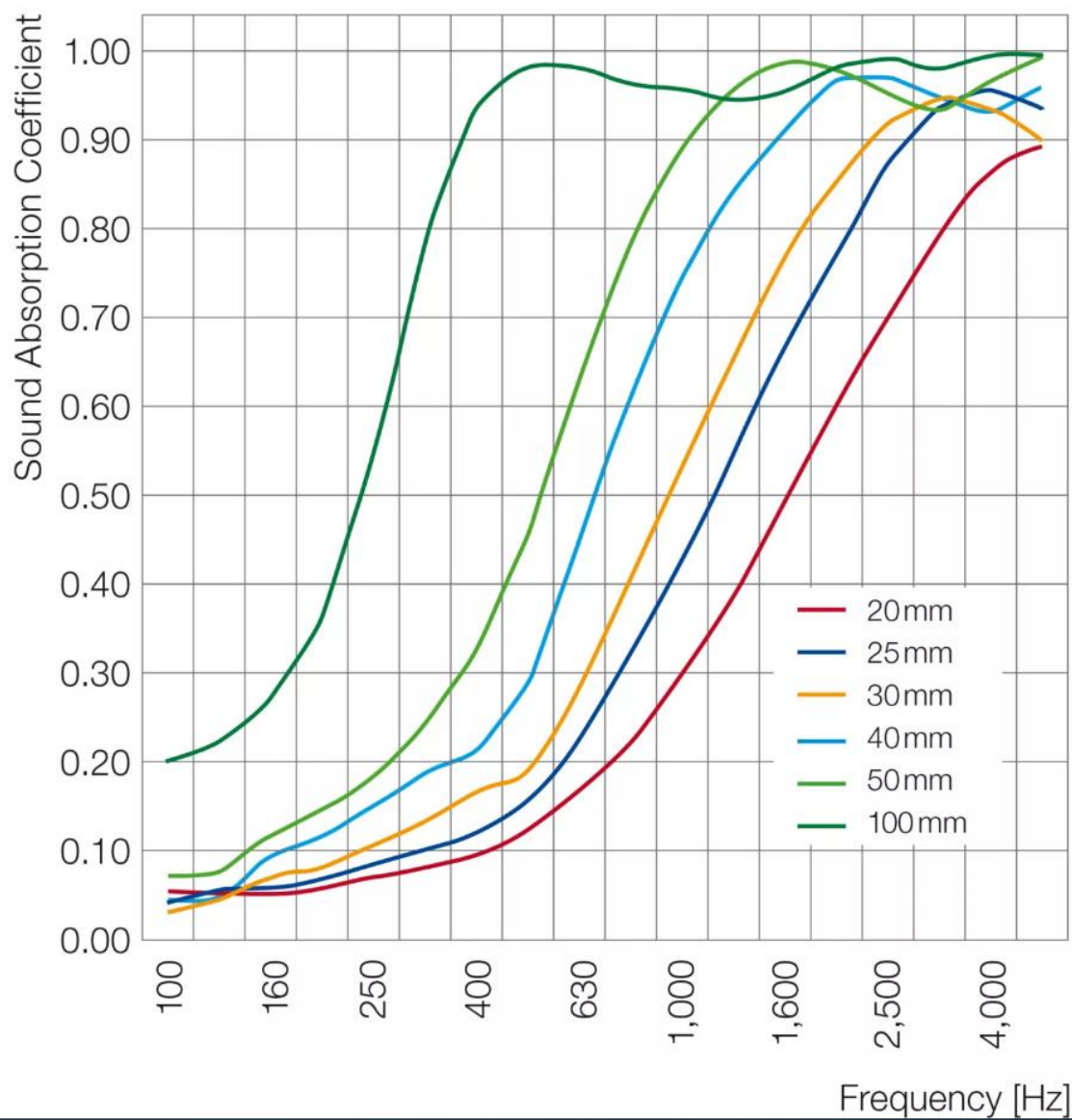
Příloha C - Naměřené a vypočtené parametry reproduktoru

	udávané hodnoty	naměřené a vypočtené
Rate Pow	8 W	
Max Pow	15 W	
Re	4 Ω	3,89 Ω
F R	150-20000	
SPL	86 dB (1W/1m)	
Excursion limit	3 mm	
Resonance f	220 Hz	260 Hz
Mag indukce	1.26 T	
Mag tok	148 μ Wb	
průměr cívky	15 mm	
výška vnutí	3 mm	
Rdc	3,8 Ω	3,84 Ω
Qms	4,9	4,87
Qes	2,23	2,39
Qts	1,53	1,602
Vas	0,43 l	
Mms	0,8 g	
Bxl force factor	1,39 Tm	
indukčnost cívky	0,1 mH	12,18 mH

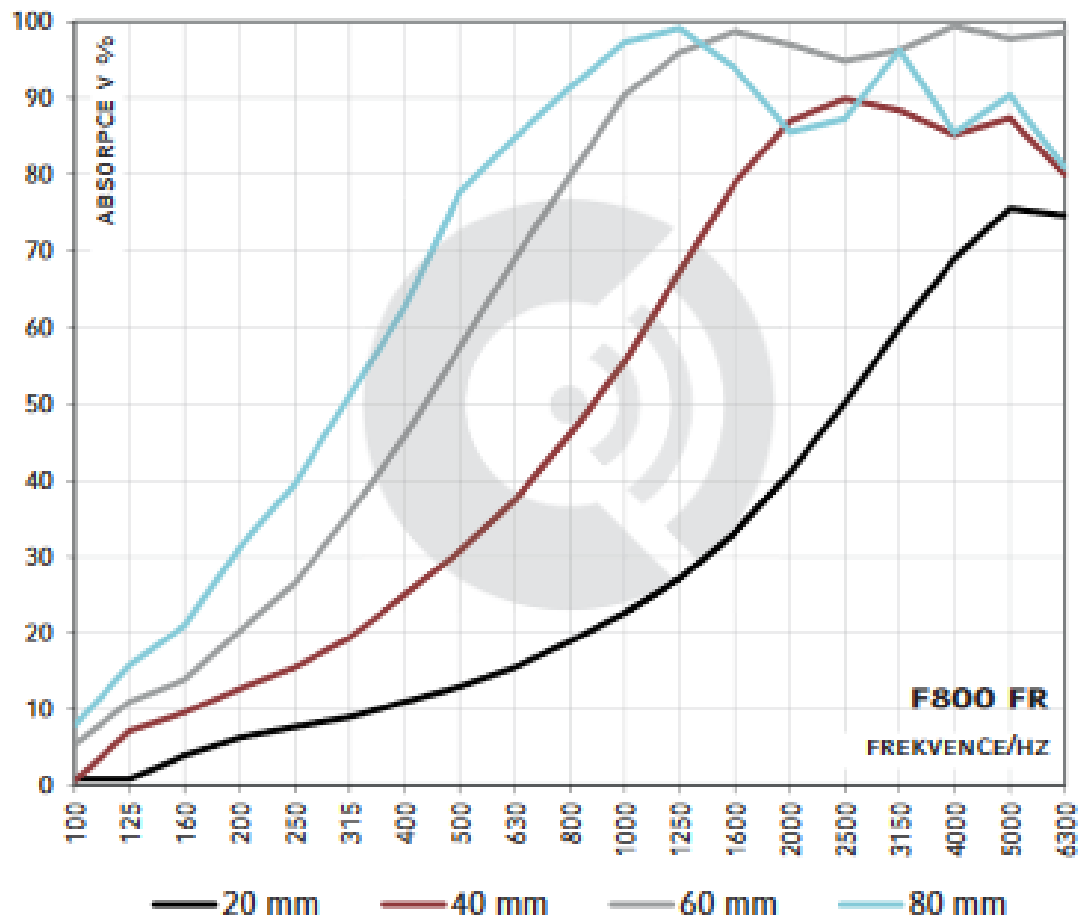
Příloha D - Charakteristiky simulací v LSPCad



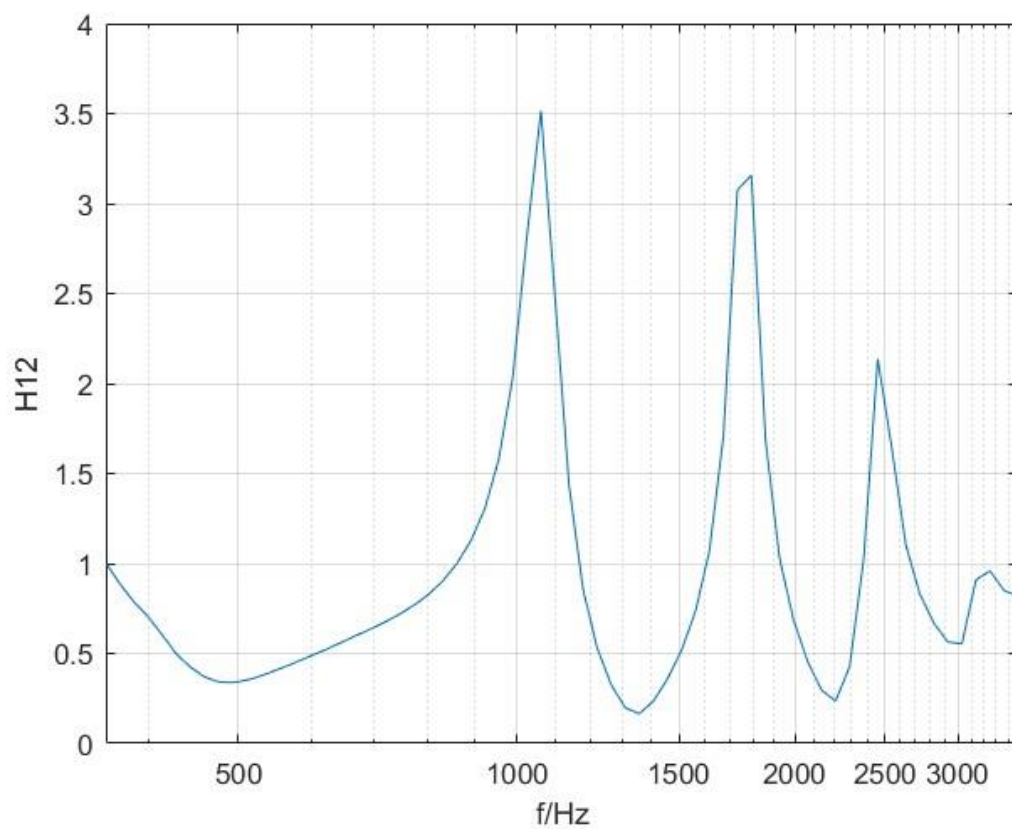
Příloha E - Činitel pohltivosti Melaminu udávaný výrobcem



Příloha F - Činitel pohltivosti materiálu CELLO F800 FR



Příloha G - Přenosová funkce mezi mikrofony pro vzorek CELLO F800 2 cm



Příloha H - Přenosová funkce mezi mikrofony pro vzorek Melamin 2 cm

