

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

STANOVENÍ AKUSTICKÉ POHLTIVOSTI MATERIÁLU

DETERMINATION OF THE MATERIAL ACOUSTIC IMPEDANCE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Juliana Vozárová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Aleš Prokop, Ph.D.

BRNO 2020

Zadaní diplomové práce

Ústav:	Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Studentka:	Bc. Juliana Vozárová
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Automobilní a dopravní inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Aleš Prokop, Ph.D.
Akademický rok:	2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Stanovení akustické pohltivosti materiálu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce je zaměřena na stanovení akustické pohltivosti vzorků materiálu, přičemž celý technický experiment je nutno navrhnout, a to včetně měřicí impedanční trubice.

Cíle diplomové práce:

Rešerše dané problematiky.

Návrh technického experimentu.

Návrh měřicího zařízení pro stanovení akustické pohltivosti materiálu a realizace technického experimentu.

Vyhodnocení výsledků.

Seznam doporučené literatury:

SMETANA, Ctirad. Hluk a vibrace. Praha: Sdělovací technika, 1998, 250 s. ISBN 8090193625.

BIES, David A. a Colin H. HANSEN. Engineering noise control: Theory and Practice. 3rd edition. New York: Spon Press, 2003, 748 s. ISBN 0-415-26714-5.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Táto diplomová práca sa zaoberá stanovením akustickej pohltivosti materiálu v impedančnej trubici. Cieľom práce je návrh meracieho experimentu a meracieho zariadenia so zámerom zníženia nákladov. Ďalším cieľom je realizácia meracieho experimentu na vyrobenom meracom zariadení. Výsledky experimentu sú vyhodnocované z hľadiska splnenia požiadaviek na meracie zariadenie. Výsledky testovaných materiálov sú porovnávané s hodnotami od dodávateľa.

Abstract

This diploma thesis deals with the determination of the material acoustic absorption in an impedance tube. The aim of the work is to propose a measuring experiment and to design measuring device with the intention of reducing costs. The aim is to carry out a measuring experiment on a manufactured measuring device. The results of the experiment are evaluated in terms of meeting the requirements for measuring device. The results of the tested materials are compared with the values from the supplier.

Kľúčové slová

Zvuk, akustika, akustická pohltivosť, impedančná trubica, stojaté vlnenie

Keywords

Sound, acoustics, acoustic absorption, impedance tube, standing waves

VOZÁROVÁ, Juliana. *Stanovení akustické pohltivosti materiálu*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/129736>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. 62 s. Vedoucí práce Aleš Prokop.

Prehlasujem, že diplomovú prácu *Stanovení akustické pohltivosti materiálu* som vypracovala samostatne pod vedením Ing. Aleša Prokopa, Ph.D. s použitím materiálov uvedených v zozname použitých informačných zdrojov.

Juliana Vozárová

Ďakujem svojmu vedúcemu diplomovej práce Ing. Alešovi Prokopovi, Ph.D. za jeho ústretový prístup, rady a ochotu pri vedení tejto diplomovej práce.

Ďalej by som sa chcela poďakovať pánovi Milanovi Perončíkovi za obrobenie kovových častí potrebných pre konštrukciu meracieho zariadenia.

Ďakujem taktiež Ing. Martinovi Hameršmídovi za vyhotovenie častí na 3D tlačiarňi.

Juliana Vozárová

Obsah

Úvod	13
1 Základy akustiky	14
1.1 Akustické vlnenie	14
1.1.1 Vlnová dĺžka	15
1.1.2 Rýchlosť zvuku	15
1.1.3 Kmitanie častíc	17
1.1.4 Energia kmitajúcich častíc	18
1.2 Akustické veličiny	19
1.2.1 Akustický tlak	19
1.2.2 Akustický výkon	20
1.2.3 Akustická intenzita	20
1.2.4 Akustická impedancia	21
2 Šírenie zvuku	22
2.1 Odraz zvuku	22
2.2 Ohyb zvuku	23
2.3 Lom zvuku	23
2.4 Pohlcovanie zvuku	24
2.4.1 Činiteľ zvukovej pohltivosti	24
3 Frekvenčné pásma	26
3.1 Oktávové frekvenčné pásmo	26
3.2 Tretinooktávové frekvenčné pásmo	27
4 Meranie akustickej pohltivosti materiálu	29
4.1 Impedančná trubica	29
4.1.1 Metóda prenosovej funkcie	30
4.1.2 Metóda pomeru stojatej vlny	30
4.1.3 Stojaté vlnenie	30
5 Meracie zariadenie podľa ČSN ISO 10534-1	31
5.1 Impedančná trubica	31
5.2 Držiak vzorky	32
5.3 Mikrofón	33
5.4 Pohyb a umiestňovanie mikrofónu	33
5.5 Spracovanie signálu	34
5.6 Reproduktor	34
5.7 Generátor signálu	35
5.8 Teplomer	35
6 Návrh a konštrukcia meracieho zariadenia	36
6.1 Model meracieho zariadenia	36
6.2 Telo impedančnej trubice	37
6.2.1 Pracovný frekvenčný rozsah	37
6.3 Držiak skúšobnej vzorky	38
6.4 Mikrofón	39

6.5	Spracovanie signálu	40
6.6	Reproduktor	40
6.7	Generátor signálu	41
7	Overovanie zariadenia a predbežné merania	42
7.1	Overovanie pomeru stojatej vlny	42
7.2	Dynamický rozsah mikrofónnej sondy	44
7.3	Určenie vlnovej dĺžky a rýchlosti šírenia zvuku	45
8	Meranie	48
8.1	Akustická pena - ihlan	48
8.2	Absorpčný panel - 35 mm	51
8.3	Absorpčný panel - 80 mm	52
	Záver	55
	Použité informačné zdroje	57
	Zoznam použitých skratiek a symbolov	60
	Zoznam príloh	62

Úvod

V súčasnej dobe sa v automobilovom priemysle kladie čoraz väčší dôraz na komfort. Keďže hluky môžu mať nežiaduci vplyv na ľudský organizmus, inžinieri sa snažia o zlepšenie aj akustického komfortu. Jednou z možností na zlepšenie akustického komfortu je zbaviť sa zdroja hluku alebo ho minimalizovať. To však niekedy nie je úplne možné. Druhou možnosťou je zamedziť prenosu nežiaduceho hluku do kabíny použitím vhodných materiálov, ktoré pohlcujú zvuk.

Pohltivosť materiálov sa vyjadruje pomocou činiteľa akustickej pohltivosti, ktorý je možné merať viacerými spôsobmi. Je možné ho merať v dozvukovej komore alebo v impedančnej trubici. Pre meranie v dozvukovej komore je potrebná dostatočne veľká vzorka materiálu, no výhodou je činiteľ akustickej pohltivosti pre všesmerový dopad akustického vlnenia. Pre menšie vzorky je vhodné využiť meranie v impedančnej trubici, čoho výsledok je činiteľ akustickej pohltivosti len pre kolmý dopad.

Súčasnú profesionálnu meraciu zariadenia pre určovanie akustickej pohltivosti materiálov môžu byť veľmi drahé, preto cieľom tejto práce je výroba meracieho zariadenia vyhovujúceho norme s nižšou cenou, ako sú profesionálne trubice. Výhodou je využitie meracej techniky dostupnej na ústave automobilového a dopravného inžinierstva, čo prináša ďalšiu úsporu pri výrobe impedančnej trubice.

Ďalším cieľom je stanovenie činiteľa akustickej pohltivosti materiálov, čo je vykonané overením a porovnaním s hodnotami od dodávateľa pre tri rôzne vzorky materiálov.

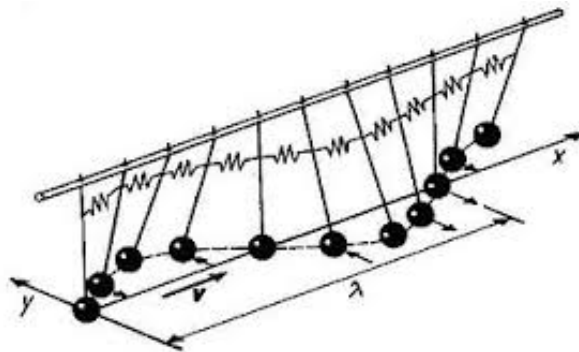
1 Základy akustiky

Akustika je náuka o zvuku. Je to časť fyziky, zaoberajúca sa mechanickými kmitmi a vlnami v plynných, kvapalných i tuhých prostrediach. Ďalej sa zaoberá ich vznikom, prenosom priestorom a detekciou. [12, 29]

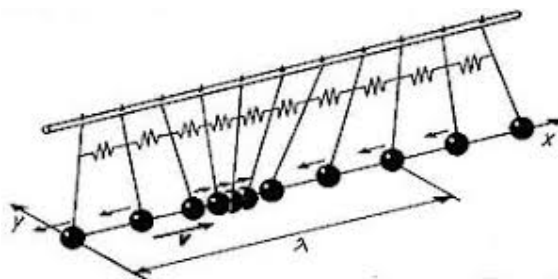
Zvuk vzniká vlnením pružného hmotného prostredia, ktoré je možné v určitom frekvenčnom rozsahu vnímať ľudskými zmyslami. Tento frekvenčný rozsah počuteľný ľudským uchom je približne od 16 Hz do 20 kHz . Zvuk pod hranicou počuteľnosti s frekvenciou nižšou ako 16 Hz nazývame infrazvuk. Pomocou infrazvuku sa niektoré zvieratá dokážu dorozumieť. Naopak zvuk s frekvenciou vyššou ako 20 kHz nazývame ultrazvuk. Ten je využívaný napríklad v zdravotníctve. [12, 29]

1.1 Akustické vlnenie

Zvuk sa môže šíriť v plynch, kvapalinách aj pevných látkach formou akustického vlnenia. V homogénnom izotropnom prostredí sa vlnenie šíri priamočiarno. Vlnenie delíme na pozdĺžne (transverzálne) a priečne (longitudinálne). U pozdĺžneho vlnenia kmitajú častice v smere šírenia vlny, u priečného vlnenia častice kmitajú kolmo k smeru šírenia. Častice sa nepohybujú spolu so šíriacim sa vlnením, ale kmitajú okolo svojich rovnovážnych polôh. Pozdĺžne vlnenie sa vyskytuje jedine u plynov a kvapalín, pretože sú pružné len v zmysle objemovej stlačiteľnosti. V pružných prostrediach sa môže vyskytovať vlnenie pozdĺžne aj priečne, keďže môžu byť namáhané nielen na ťah a tlak, ale aj šmyk. [2]



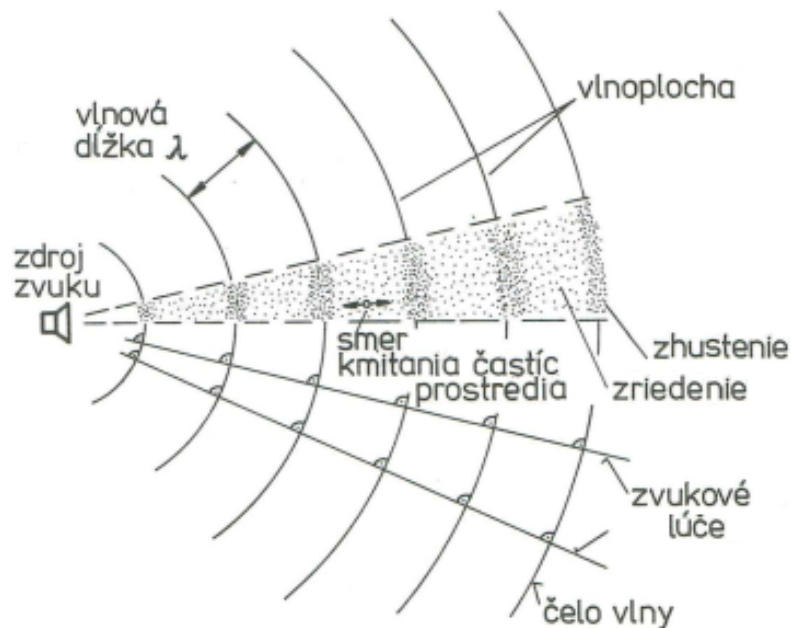
Obr. 1: Priečne vlnenie (prevzaté z [19])



Obr. 2: Pozdĺžne vlnenie (prevzaté z [19])

„Akustické vlnenie je spojené s prenosom energie. „Akustické vlnenie postupuje prostredím od zdroja zvuku vo vlnoplochách. Vo všetkých bodoch vlnoplochy je v danom

časovom okamihu rovnaký akustický stav. Kolmice na vlnoplochu sa nazývajú akustické lúče”. [15, s. 22] Vzdialenosť medzi jednotlivými vlnoplochami sa nazýva vlnová dĺžka, ktorú označujeme λ [m]. [15]



Obr. 3: Šírenie zvuku (prekresené z [25])

1.1.1 Vlnová dĺžka

Vlnová dĺžka λ [m] je vzdialenosť medzi opakujúcimi sa periódami vlnenia. Vlnová dĺžka závisí na frekvencii vlnenia f [Hz] a na rýchlosti zvuku c [$\frac{m}{s}$] [2]:

$$\lambda = \frac{c}{f}.$$

1.1.2 Rýchlosť zvuku

Táto kapitola vychádza zo zdrojov [2, 15, 24]. Podľa nich rýchlosťou zvuku rozumieme rýchlosť šírenia akustických vln v prostredí. Rýchlosť zvuku závisí od aktuálnych podmienok, kde najväčší vplyv má teplota daného prostredia. Všeobecne pre šírenie zvukových vln v tekutinách platí

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho}},$$

kde ρ [kg/m^3] je hustota prostredia závislá na teplote a K [Pa^{-1}] je modul objemovej pružnosti.

Pre rýchlosť zvuku vo vzduchu platí

$$c = \sqrt{\kappa RT},$$

kde κ [-] je Poissonova konštanta, R [$JkgK^{-1}$] je plynová konštanta a T [K] je teplota, alebo

$$c = \sqrt{\kappa \frac{p_0}{\rho_0}} \left(1 + \frac{1}{2} \gamma \cdot t \right),$$

kde p_0 je tlak plynu pri teplote 0 °C, ρ_0 je príslušná hustota, γ je súčiniteľ teplotnej rozťažnosti plynu a t je jeho aktuálna teplota.

Rýchlosť šírenia zvuku teda závisí najmä na teplote prostredia. V tabuľke 1 je uvedená rýchlosť šírenia zvuku vo vzduchu pri rôznych teplotách.

Tabuľka 1: Rýchlosť šírenia zvuku vo vzduchu (prevzatá z [24])

Prostredie		Rýchlosť zvuku	
Látka	Teplota [°C]	[$m \cdot s^{-1}$]	[$km \cdot h^{-1}$]
Suchý vzduch	35	352	1267
	30	349	1256
	25	346	1246
	20	343	1236
	15	340	1225
	10	337	1214
	5	334	1204
	0	331	1193
	-5	328	1182
	-10	325	1171
	-15	322	1159
	-20	319	1148
-25	316	1137	

Pri riešení šírenia akustického vlnenia v pevných látkach je nutné zahrnúť vplyv kontrakcie materiálu. Pre šírenie pozdĺžnych vln v tenkej tyči platí

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}},$$

pre šírenie pozdĺžnych vln v doske

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{1 - \mu^2}},$$

a pre rýchlosť priečných vln platí

$$c = \sqrt{\frac{G}{\rho}}.$$

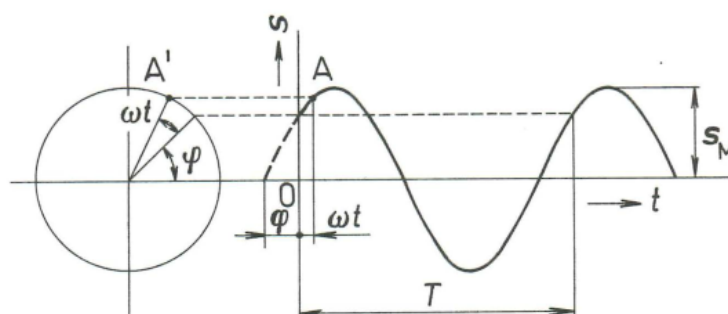
E [Pa] je modul pružnosti, G [Pa] je modul pružnosti v šmyku a μ [-] je Poissonovo číslo.

Rýchlosť šírenia zvuku v rôznych prostrediach je popísaná v tabuľke 2. Pre niektoré látky sú uvedené dve hodnoty, keďže v pevných látkach môže dôjsť ako k pozdĺžnemu tak aj priečnemu vlneniu. U kvapalných a plyných látok je možné iba pozdĺžne vlnenie. Pozdĺžne vlnenie je rýchlejšie ako priečne.

Tabuľka 2: Rýchlosť šírenia zvuku v rôznych prostrediach prevzatá z [24]

Prostredie		Rýchlosť zvuku	
Látka	Teplota [°C]	[m · s ⁻¹]	[km · h ⁻¹]
Oxid uhličitý	25	259	932
Kyslík	25	316	1138
Hélium	0	970	3492
Vodík	0	1270	4572
Ortuť	20	1400	5040
Destilovaná voda	25	1497	5389
Morská voda	13	1500	5400
Ľad	-4	3200	11520
Striebro	20	2700 a 3700	9720 a 13320
Meď	20	3500 a 4720	12600 a 16992
Sklo	20	5200	18720
Oceľ	20	5000 a 6000	18000 a 21600
Hliník	20	5200 a 6400	18720 a 23040

1.1.3 Kmitanie častíc



Obr. 4: Harmonické kmitanie častice (prevzaté z [25])

Pravidelným periodickým vychýlením častice z rovnovážnej polohy je vyvolané tzv. harmonické kmitanie. Výchylka je veličina vektorová, pretože je daná nielen veľkosťou, ale aj smerom. Platí pre ňu vzťah:

$$s = s_M \sin(\omega t + \varphi),$$

s_M je amplitúda, teda maximálna výchylka kmitajúcej častice, výraz $(\omega t + \varphi)$ nazývame fázou harmonicky premennej veličiny, ω je uhlová rýchlosť v [s⁻¹] a φ je fázový uhol v [rad] .

Medzi uhlovým kmitočtom a frekvenciou platí

$$\omega = 2\pi f,$$

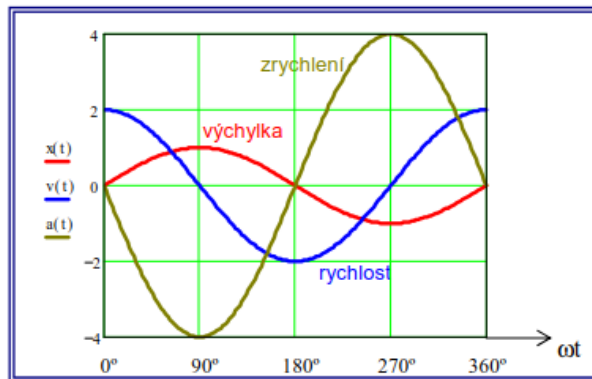
$$\omega = \frac{2\pi}{T},$$

pričom T [s] je perióda (doba kmitu).

Pohyb častice môžeme okrem výchylky, tj. dráhy z rovnovážnej polohy, popísať aj rýchlosťou častice alebo jej zrýchlením. 1. a 2. deriváciou výchylky podľa času dostaneme

$$v = \frac{ds}{dt} = \omega s_M \cos(\omega t + \varphi), \quad (1.1)$$

$$a = \frac{d^2s}{dt^2} = \omega^2 s_M \sin(\omega t + \varphi).$$



Obr. 5: Vzťah medzi výchylkou, rýchlosťou a zrýchlením (prevzaté z [5])

1.1.4 Energia kmitajúcich častíc

Podľa [2] a [15] sa energia kmitajúcej častice skladá z dvoch zložiek, a to z potenciálnej energie E_p a energie kinetickej E_k . Zo zákona zachovania energie platí, že ich súčet musí byť konštantný

$$E = E_p + E_k = \text{const.}$$

Kinetickú energiu vyjadríme podľa známeho vzorca

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2,$$

pričom v [ms^{-1}] je rýchlosť častice. Po dosadení 1.1 do rovnice získame kinetickú energiu pre kmitajúcu časticu

$$E_k = \frac{1}{2}m\omega^2 s_M^2 \cos^2(\omega t + \varphi).$$

Pre potenciálnu energiu platí

$$E_p = \int_0^s F ds = \int_0^s m\omega s ds = \frac{1}{2} m\omega^2 s_M^2 \sin^2(\omega t + \varphi).$$

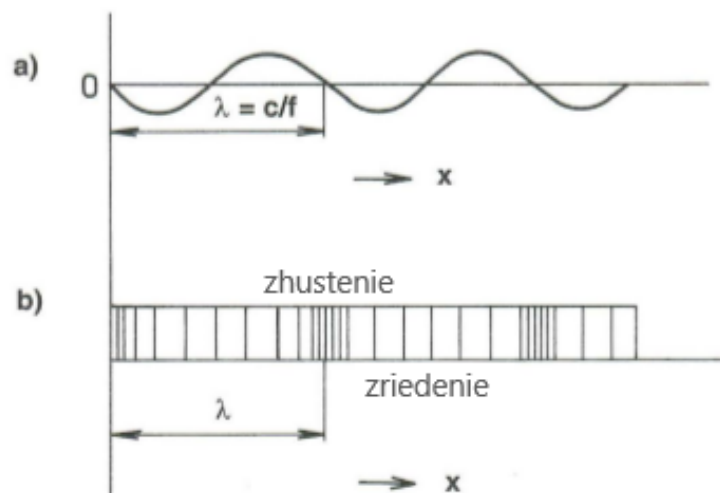
Celková energia kmitajúcej častice je potom daná vzťahom

$$E = \frac{1}{2} m\omega^2 s_M^2.$$

1.2 Akustické veličiny

1.2.1 Akustický tlak

Šíriacim sa rozruchom sa častice zo svojej rovnovážnej polohy vychýľujú a okolo nej oscilujú. Ako bolo spomenuté v predošlej kapitole 1.1, častice sa môžu vychýľovať buď priečne k smeru šírenia alebo pozdĺžne v smere šírenia. Tým sa v určitých častiach homogénneho pružného prostredia zväčšuje hustota častíc alebo v iných sa naopak znižuje. To má za následok, že v miestach s väčšou hustotou častíc je tlak vyšší, a naopak v miestach s nižšou hustotou častíc je tlak nižší. Akustickým tlakom rozumieme práve tieto zmeny tlaku. Jedná sa o skalárnu veličinu a uvádza sa v [Pa]. [25]



Obr. 6: Zmena hustoty častíc (prekresené z [25])

Zmena tlaku oproti svojej statickej hodnote (napr. vo vzduchu oproti atmosférickému tlaku 101 325 Pa) je veľmi malá. Ľudské ucho je schopné zaznamenať zmenu tlaku už od $2 \cdot 10^{-5}$ Pa. Navyše ľudské ucho nereaguje na zvukové podnety lineárne, ale vnímanie je úmerné logaritmu tohto podnetu. Preto je najpoužívanejším údajom o veľkosti akustického tlaku takzvaná hladina akustického tlaku. Označujeme L_p a udáva sa v decibelloch [dB]. Pre hladinu akustického tlaku platí vzťah

$$L_p = 20 \log \frac{p}{p_0} = 20 \log p + 94,$$

kde p [Pa] je akustický tlak a p_0 [Pa] je referenčný akustický tlak (obvykle je to hranica počuteľnosti $2 \cdot 10^{-5}$ Pa, ak nie je uvedené inak). [10, 13, 25]

1.2.2 Akustický výkon

Akustický výkon P [W] predstavuje energiu zvukových vln vyžiarenú zdrojom za jednotku času. Pre malé časové úseky je okamžitý výkon daný súčinom pôsobiacej sily a rýchlosti.

$$P = \vec{F} \cdot \vec{v} = \iint_S \vec{I} \cdot \vec{n} dS, \quad (1.2)$$

\vec{F} je pôsobiaca sila v [N],

\vec{v} je rýchlosť kmitajúcich častíc v [ms^{-1}],

\vec{I} je akustická intenzita v [Wm^{-2}],

S je plocha v [m^2]

a \vec{n} je vektor udávajúci smer šírenia akustickej vlny.

Pre rovinnú akustickú vlnu, kde sú vo fáze akustický tlak a akustická rýchlosť platí

$$P = p \cdot v \cdot S = I \cdot S.$$

Ako v prípade akustického tlaku, tak aj u akustického výkonu bola zavedená hladina akustického výkonu v [dB], pričom platí pre ňu vzťah

$$L_W = 10 \log \frac{P}{P_0} = 10 \log P + 120.$$

P [W] je akustický výkon zdroja a P_0 je referenčná hodnota o veľkosti 10^{-12} [W]. [10, 13, 25]

1.2.3 Akustická intenzita

Akustická intenzita \vec{I} [Wm^{-2}] je vektorová veličina a predstavuje množstvo a smer toku akustickej energie v danom prostredí. Z predošlého vzorca 1.2 je daný vzťah medzi akustickou intenzitou a akustickým výkonom. Pre veľkosť akustickej intenzity v smere šírenia rovinných akustických vln teda platí nasledovný vzťah:

$$I = p \cdot v,$$

Naopak veľkosť akustickej intenzity kolmo na smer šírenia vlny je nulová. [25]

Aj akustickú intenzitu vyjadrujeme v logaritmickom merítku, a to ako hladinu akustickej intenzity, pričom referenčná hodnota I_0 je 10^{-12} [Wm^{-2}] a platí

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0} = 10 \log I + 120.$$

Zo vzťahov pre hladiny akustických veličín vyplýva, že dvojnásobné zvýšenie akustického tlaku zvýši hladinu akustického tlaku o 6 dB a dvojnásobné zvýšenie akustického výkonu alebo akustickej intenzity znamená zvýšenie odpovedajúcej hladiny o 3 dB. [10, 12, 13, 25]

1.2.4 Akustická impedancia

Podľa [33] sa v akustike impedanciou označujú tri pojmy:

- akustická impedancia,
- merná akustická impedancia,
- mechanická akustická impedancia.

Akustická impedancia Z je pomer medzi akustickým tlakom a objemovou rýchlosťou, ktorú môžeme vyjadriť ako súčin rýchlosti kmitajúcich častíc a plochy. Platí pre ňu vzťah

$$Z = \frac{p}{vS}.$$

Merná akustická impedancia prostredia z je určená pomerom efektívnej hodnoty akustického tlaku p_e a efektívnej hodnoty akustickej rýchlosti v_e (keďže v technickej akustike sa zvyčajne pracuje s efektívnymi hodnotami, je zvykom index e vynechávať). Je to teda akustická impedancia vzťahovaná k jednotkovej ploche. Mernú akustickú impedanciu určitého prostredia môžeme vypočítať ako súčin hustoty prostredia ρ a rýchlosti šírenia zvuku c . Jej jednotkou je $[Pa \cdot s \cdot m^{-1}]$ a platí pre ňu

$$z = \frac{p}{v} = \rho c.$$

Merná akustická impedancia vyjadruje odpor prostredia proti šíreniu akustických vln. Obecné sa jedná o veličinu komplexnú. Merná akustická impedancia vzduchu je $0,44 \text{ kPa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$, vody $1,48 \text{ MPa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$.

Mechanická akustická impedancia vyjadruje pomer sily pôsobiacej na akustickú sústavu a rýchlosti kmitajúcich častíc. Po dosadení akustických veličín dostaneme závislosť medzi mechanickou a akustickou impedanciou:

$$Z_m = \frac{F}{v} = \frac{pS}{v} = ZS^2.$$

2 Šírenie zvuku

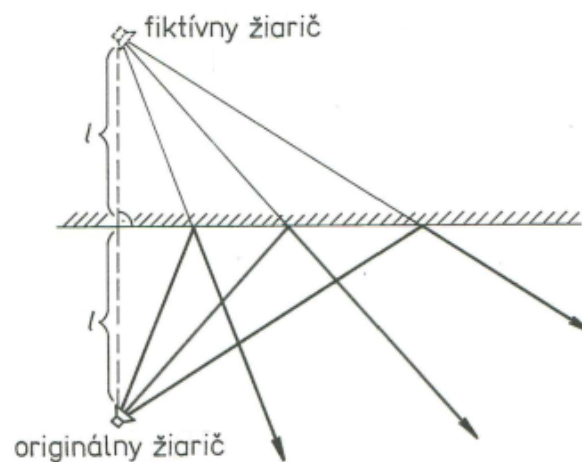
Akustické vlnenie vzniká v prostredí, ktoré je zložené z hmotnostných častíc. Vyznačuje sa stlačiteľnosťou alebo pružnosťou. Šírenie zvuku vznikne silovým pôsobením budiaceho kmitania, pričom rozruch sa prenáša od budenej častice (zdroja zvuku) na ďalšie častice rýchlosťou c . Vlnenie v plynnom a kvapalnom prostredí v určitom rozsahu frekvencií (tzn. v rozsahu počuteľnosti) označujeme ako zvuk. Vlnenie v tuhých látkach v ľubovoľnom frekvenčnom rozsahu označujeme ako vibrácie. [16, 25]

Priamočiare šírenie zvuku je ovplyvnené prekážkami, od ktorých sa môže odrážať, môže sa za nimi ohýbať alebo pri prechode z jedného prostredia do druhého sa môže lámať. O miere odrazu, ohybu a lomu rozhoduje najmä impedancia jednotlivých prostredí. [25]

2.1 Odraz zvuku

K odrazu zvuku dochádza pri šírení zvukových vln proti prekážke. Intenzita odrazenej vlny závisí na pohltivosti plochy, od ktorej sa vlna odráža a od vlnovej dĺžky. Ak sa jedná o rovinnú plochu s rozmermi omnoho väčšími, než je dĺžka dopadajúcej vlny, využívame zákon odrazu $\alpha = \alpha'$. [16, 25]

Geometrická konštrukcia je zobrazená na obr. 6, kde sa využíva tzv. fiktívny zdroj a metóda zrkadlového odrazu.



Obr. 7: Odraz zvuku (prekresené z [25])

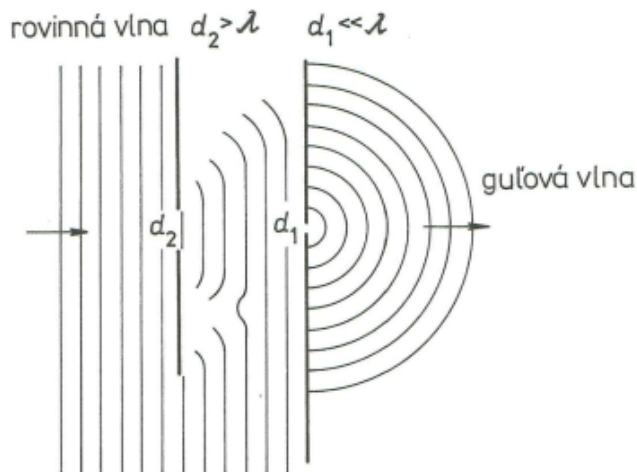
Odraz zvuku nastáva, ak platí

$$\lambda \leq l \quad \text{alebo} \quad f \geq \frac{c}{l}.$$

U zakrivených plôch je odraz zvuku zložitejší, je závislý na pomere vlnovej dĺžky, polomere zakrivenia plochy a celkových rozmeroch odrazovej plochy. Využíva sa konštrukcia podľa Huygensovho princípu, ktorý každý bod vlnoplochy považuje za zdroj nového vlnenia šíriaceho sa v guľových vlnoplochách. Tieto guľové vlny sa následne skladajú a vytvorí v priestore novú hľadanú vlnoplochu. U konkávných plôch dochádza ku koncentrácii energie, naopak u konvexných plôch dochádza k jej rozptylu. [16, 25]

2.2 Ohyb zvuku

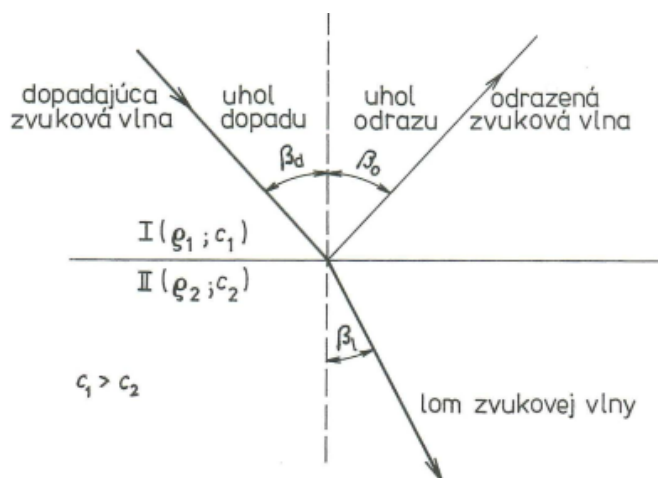
Ohyb lúču šíriaceho sa zvuku je vlastne dôsledkom Huygensovho princípu, kedy každý bod na hrane prekážky je zdrojom nových guľových vln. Zložením všetkých účinkov dostaneme zmenu smeru šírenia zvuku, teda ohyb zvuku. Veľkosť ohybu je závislá na vlnovej dĺžke signálu a veľkosti prekážky. Ohyb zvuku je znázornený na obr. 7, kde sa zvuk šíri otvormi v prekážkach. [16, 25, 29]



Obr. 8: Šírenie zvuku cez otvory v prekážke (prekresené z [25])

2.3 Lom zvuku

K lomu zvukovej vlny dochádza pri prechode vlny z jedného prostredia do iného. V inom prostredí sa zvuk šíri inou rýchlosťou. Ak je v novom prostredí rýchlosť šírenia vlny vyššia ako v pôvodnom, lomí sa smer šírenia lúču od kolmice k styčnej ploche prostredí. Ak uhol dopadajúcej vlny presiahne tzv. medzný uhol, dochádza k úplnému odrazu vlny. Lom a odraz zvukovej vlny dopadajúcej na rozhranie prostredí je znázornený na obr. 8. [4, 25]



Obr. 9: Odraz a lom zvukovej vlny (prekresené z [25])

Lom cez rozhranie z jedného prostredia do druhého popisuje Snellov zákon

$$\frac{\sin \beta_d}{\sin \beta_l} = \frac{c_1}{c_2} = \frac{n_2}{n_1},$$

pričom c_1 a c_2 sú rýchlosti šírenia zvukovej vlny v jednotlivých prostrediach a n_1 a n_2 sú indexy lomu jednotlivých prostredí. [25]

K lomu zvuku môže dôjsť aj pri prechode zvuku rôzne zohriatymi vzduchovými vrstvami, keďže v teplejšom vzduchu sa zvuk šíri rýchlejšie ako v chladnom. Takýto jav môže nastať tak ako vo voľnom priestore, tak aj v uzavretých miestnostiach. [25]

2.4 Pohlcovanie zvuku

„Pohlcovanie zvuku je nevratná premena energie zvukovej vlny na iné druhy energie, spravidla na teplo, tj. na energiu chaotického pohybu molekúl prostredia.” [1] Spôsob premeny zvukovej energie pri šírení v pevných látkach môžeme rozdeliť na:

- premeny trením,
- premeny poklesom akustického tlaku,
- premeny nepružnou deformáciou telies.

Premeny zvukovej energie na tepelnú energiu trením nastáva, ak sa častice pohybujú pozdĺž nejakej plochy. Aby sa takýmto spôsobom premenilo väčšie množstvo energie, je potrebné, aby plocha bola dostatočne veľká. Preto sa na takýto spôsob premeny energie najviac hodia materiály s pórovitou štruktúrou, ktorých celková plocha je veľká vzhľadom k ich objemu. [13, 17, 30, 32]

Ak je akustickým obkladom stena alebo doska, ktorá môže kmitať v oblasti zvukového spektra, môže sa rozkmitať pri dopade akustických vln a tak sa časť mechanickej energie kmitajúcej steny alebo dosky premení späť na akustickú energiu. Zvyšok mechanickej energie sa mení na tepelnú energiu vplyvom vnútorného trenia v kmitajúcej steny alebo dosky. Pri niektorých konštrukciách sa pre pohlcovanie zvuku môžu objaviť oba tieto spôsoby premeny akustickej energie na energiu tepelnú. [13, 17, 30, 32]

Premeny vzniknuté poklesom akustického tlaku nazývame aj relaxačnou a vzniká v dôsledku zníženia akustického tlaku. V miestach, kde dochádza k zhusteniu častíc, stúpa aj celkový tlak. Ak dôjde ku zriadeniu častíc (tzv. relaxácii akustického tlaku), zmenší sa nahromadená potenciálna energia a tým sa zmenší aj energia akustickej vlny. [13, 17, 30, 32]

K premenám akustickej energie vplyvom nepružnej deformácie telies dochádza u látok, ktoré vykazujú pružnú hysterziu. Ak je takáto látka stlačená určitou silou, po skončení pôsobenia sily sa takáto látka nevráti späť do pôvodného stavu. To znamená, že práca vynaložená na deformáciu tejto látky je väčšia, než práca získaná pružnosťou telesa pri návrate do pôvodného tvaru. Rozdiel týchto prác predstavuje úbytok akustickej energie. [13, 17, 30, 32]

2.4.1 Činiteľ zvukovej pohltivosti

Činiteľ zvukovej pohltivosti (absorbcie) α [–] je schopnosť telesa pohlcovať zvuk. Je definovaný pomerom pohltenej energie určitou plochou k energii dopadajúcej na túto plochu. Jedná sa o bezrozmerné číslo, pričom $\alpha \in \langle 0, 1 \rangle$. [18, 22, 26]

Podobne ako je definovaný činiteľ pohltivosti, je definovaný aj činiteľ zvukovej odrazivosti (reflexie) materiálu β [–]. Je to schopnosť materiálu odrážať zvuk, definovaný pomerom energie vlny odrazenej od určitého povrchu ku energii vlny dopadajúcej na daný povrch materiálu. Opäť je to bezrozmerné číslo nadobúdajúce hodnoty $\beta \in \langle 0, 1 \rangle$, pričom platí [18, 22]:

$$\alpha + \beta = 1.$$

Materiály dokonale pohlcujúce zvuk majú $\alpha = 1$ a zároveň $\beta = 0$. Naopak materiály, ktoré dokonale odrážajú zvuk majú $\alpha = 0$ a $\beta = 1$. [18]

Činiteľ zvukovej pohltivosti okrem typu materiálu závisí aj na iných faktoroch, hlavne na frekvencii dopadajúceho akustického vlnenia. Taktiež závisí na hrúbke materiálu, teplote, rozložení a veľkosti pórov v materiáli, či uhle dopadajúceho vlnenia. [16, 18]

3 Frekvenčné pásma

Akustické veličiny sú obecné závislé na frekvencii. Frekvenčné zloženie zvuku sa získava pomocou akustických filtrov, ktoré prepustí do mikrofónu len signály požadovaného frekvenčného rozsahu. Používajú sa dva typy frekvenčnej analýzy. Prvý typ využíva percentuálne konštantnú šírku pásma, ktorá prepúšťa signál percentuálne vzhľadom k strednej frekvencii pásma. To znamená, že s rastúcou strednou frekvenciou sa takisto absolútna hodnota šírky pásma zväčšuje. Medzi takéto pásma radíme napríklad oktávové alebo tretinooktávové pásma. Druhý typ využíva konštantnú šírku pásma (napríklad 100 Hz) bez ohľadu na strednú frekvenciu. [10, 15, 34]

3.1 Oktávové frekvenčné pásmo

Podľa [10, 15] je šírka jednej oktávy charakterizovaná pomerom jej krajných frekvencií

$$\frac{f_2}{f_1} = 2,$$

pričom f_1 je dolná medza oktávy a f_2 je horná medza oktávy.

Každú oktávu značíme pomocou strednej frekvencie f_m , ktorú určíme pomocou vzťahu

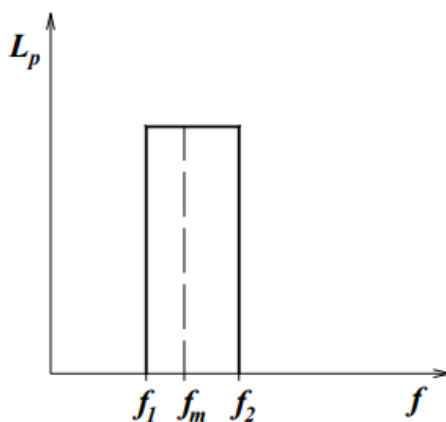
$$f_m = \sqrt{f_1 f_2}.$$

Stredné frekvencie pásma sú normované, preto zvyčajne určujeme krajné frekvencie úpravou predošlých vzorcov. Pre krajné frekvencie platí

$$f_1 = \frac{f_m}{\sqrt{2}},$$
$$f_2 = f_m \sqrt{2}.$$

Potom šírka jednej oktávy je teda daná stredou frekvenciou, keďže

$$f_2 - f_1 = f_m \left(\sqrt{2} - \frac{1}{\sqrt{2}} \right) = \frac{f_m}{\sqrt{2}}.$$



Obr. 10: Oktávové pásmo (prevzaté z [10])

3.2 Tretinooktávové frekvenčné pásmo

Rozdelením oktávového pásma na tri tretiny (v logaritmických súradniciach) získame tretinooktávové pásmo. Ak frekvencie f_1, f_4 ohraničujú pásmo jednej oktávy a frekvencie f_2, f_3 sú krajnými frekvenciami strednej tretiny oktávy, potom platí

$$\log \frac{f_2}{f_1} + \log \frac{f_3}{f_2} + \log \frac{f_4}{f_3} = \log \frac{f_4}{f_1} = \log 2,$$

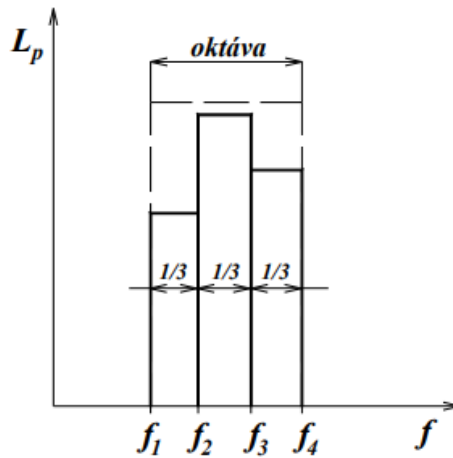
kde platí rovnosť

$$\frac{f_2}{f_1} = \frac{f_3}{f_2} = \frac{f_4}{f_3} = \sqrt[3]{2} \cong 1,26.$$

Z toho vyplýva, že pomer krajných frekvencií ľubovoľnej tretiny oktávy je konštantný. [10, 15]

Pre krajné frekvencie tretinooktávového pásma platia závislosti na strednej frekvencii f_m tohto pásma:

$$f_1 = \frac{f_m}{\sqrt[6]{2}},$$
$$f_2 = f_m \sqrt[6]{2}.$$



Obr. 11: Tretinooktávové pásmo (prevzaté z [10])

Na frekvenčnom rozsahu 25 Hz až 20 kHz je celkom 10 oktávových a 30 tretinooktávových pásiem. Stredné frekvencie f_m týchto pásiem sú normované, z čoho vychádza nasledovná tabuľka 3.

Tabuľka 3: Prehľad oktávových a tretinooktávových pásiem [34]

Stredná frekvencia pásma f_m [Hz]		Krajné frekvencie	
oktávové	tretinooktávové	dolná f_1 [Hz]	horná f_2 [Hz]
31,5	25	22	28
	31,5	28	35
	40	35	44
63	50	44	57
	63	57	71
	80	71	88
125	100	88	113
	125	113	141
	160	141	176
250	200	176	225
	250	225	283
	315	283	353
500	400	353	440
	500	440	565
	630	565	707
1000	800	707	880
	1000	880	1130
	1250	1130	1414
2000	1600	1414	1760
	2000	1730	2500
	2500	2250	2825
4000	3150	2825	3530
	4000	3530	4400
	5000	4400	5650
8000	6300	5650	7070
	8000	7070	8800
	10000	8800	11300
16000	12500	11300	14140
	16000	14140	17600
	20000	17600	22500

4 Meranie akustickej pohltivosti materiálu

Akustická pohltivosť materiálu môže byť meraná pre kolmý alebo všesmerový dopad akustickej energie. Metódy na kolmý dopad akustického vlnenia poskytujú výsledky minimálnej zaručenej akustickej pohltivosti materiálu. To znamená, že skúmaný materiál bude mať v skutočnosti minimálne nameranú akustickú pohltivosť, alebo vyššiu. [14]

Akustickú pohltivosť môžeme merať pomocou týchto metód:

- v difúznom poli (dozvuková miestnosť),
- v impedančnej trubici,
- pomocou intenzity zvuku,
- pomocou odrazu akustickej vlny.

Meranie v difúznom poli reprezentujú metódy, ktoré využívajú dobu dozvuku. Tá opisuje zmeny akustickej pohltivosti v meranom priestore (dozvukovej miestnosti). Meranie prebieha v dvoch krokoch. V prvom kroku sa zmeria doba dozvuku pre prázdnu miestnosť. V druhom kroku sa do dozvukovej miestnosti umiestni dané množstvo skúmaného materiálu a opäť sa zmeria doba dozvuku. Výpočtom zmeny doby dozvuku sa následne určuje akustická pohltivosť skúmaného materiálu. Merania sa vykonávajú v pomerne veľkých skúšobniach a takisto vzorka musí mať dostatočne veľké rozmery. Výhodou však je, že výsledkom týchto meraní je akustická pohltivosť pre všesmerový dopad akustického vlnenia. [7, 14]

Druhou používanou metódou merania akustickej pohltivosti je využitie impedančnej trubice. Impedančná trubica je uzavretá trubica s reproduktorom na jednom konci a so vzorkou materiálu na druhom konci. Poznáme dve metodiky popísané normami (podrobnejší popis v nasledujúcej kapitole). Meranie akustickej pohltivosti možno vykonávať širokopásmovo pri použití bieleho šumu ako zdroja signálu pre zabudovaný reproduktor. Výsledkom merania je akustická pohltivosť pre kolmý dopad akustického vlnenia. [14]

Posledné dve uvedené metódy sú skôr zaujímavou alternatívou pre zjednodušené meranie akustickej pohltivosti. Prvá z nich ukazuje ďalšie možné využitie intenzitnej sondy. Metóda odrazu akustickej vlny je veľmi jednoduchou metódou, ktorou je možné určiť, ktorý materiál má vyššiu akustickú pohltivosť. Preto je táto metóda vhodná skôr pre porovnávacie merania než pre priamy výpočet akustickej pohltivosti. [14]

4.1 Impedančná trubica

Impedančná trubica nazývaná aj interferometer alebo Kundtova trubica je zariadenie, ktoré je používané pre určenie činiteľa zvukovej pohltivosti materiálu, činiteľa odrazu, povrchovej impedancie alebo admitancie materiálu. Je to uzavretá trubica s tuhými hladkými stenami, ktorá na jednom konci má umiestnený reproduktor a na druhom konci sa nachádza vzorka skúmaného materiálu. Metódu je možné využiť iba pre kolmý dopad akustickej energie, preto sa využíva najmä pri vývoji akustických materiálov alebo pre porovnanie rôznych materiálov z hľadiska ich zvukovej pohltivosti. [14]

Meranie činiteľa zvukovej pohltivosti v impedančných trubicach je možné realizovať dvomi spôsobmi. Prvá metóda využíva vznik stojateho vlnenia vnútri impedančnej trubice. Druhá metóda využíva prenosovú funkciu dvoch mikrofónových signálov. [8, 9]

4.1.1 Metóda prenosovej funkcie

Táto metóda je podrobne popísaná v druhej časti normy ČSN ISO 10534-2.

Pri tejto metóde vzniká v impedančnej trubici rovinné vlnenie, ktoré je budené zdrojom zvuku. Akustický tlak sa meria v dvoch miestach blízko vzorky pomocou mikrofónov umiestnených v hornej časti impedančnej trubice. Určuje sa komplexná akustická prenosová funkcia dvoch mikrofónových signálov, pomocou ktorej sa vypočíta komplexný činiteľ odrazu, činiteľ zvukovej pohltivosti a akustická impedancia. Táto metóda je alternatívou k metóde pomeru stojatej vlny, pričom je omnoho rýchlejšia. [9, 22]

Meranie pomocou metódy prenosovej funkcie je možné realizovať dvomi postupmi. Prvým je použitie dvoch mikrofónov v pevných miestach, druhým je použitie jedného mikrofónu, ktorý sa postupne premiestni z jedného miesta do druhého. [9, 22]

Činiteľ zvukovej pohltivosti sa vypočíta nasledovne:

$$\alpha = 1 - |r|^2 = 1 - r_r^2 - r_i^2,$$

pričom r je činiteľ odrazu, r_r je jeho reálna zložka a r_i jeho imaginárna zložka. [9]

4.1.2 Metóda pomeru stojatej vlny

Táto metóda je podrobne popísaná v prvej časti normy ČSN ISO 10534-1.

Meranie pomocou metódy pomeru stojatej vlny sa vykonáva tak, že do jedného konca rovnej, tuhej a hladkej trubice upevníme skúšobnú vzorku. Na druhom konci trubice je reproduktor, ktorý vybudí rovinnú sínusovú zvukovú vlnu, ktorá dopadá na skúšobnú vzorku. Superpozíciou dopadajúcej a odrazenej vlny vzniká stojatá vlna. Pomocou mikrofónovej sondy určíme maximá a minimá akustického tlaku stojatej vlny (v lineárnom alebo logaritmickom merítku). Tieto hodnoty postačujú na určenie činiteľa zvukovej pohltivosti. Pre určenie činiteľa odrazu, zvukovej impedancie a admitancie sa ešte zisťuje vlnová dĺžka zvuku a vzdialenosť prvého tlakového minima od referenčnej roviny (obyčajne je to rovina, v ktorej sa nachádza povrch skúšanej vzorky). [4, 8]

Ak meriame akustický tlak v impedančnej trubici v logaritmickom merítku (v decibelloch) a rozdiel hladín medzi tlakovým minimom a tlakovým maximom je ΔL [dB], potom činiteľ zvukovej pohltivosti určíme pomocou vzorca

$$\alpha = \frac{4 \cdot 10^{\Delta L/20}}{(10^{\Delta L/20} + 1)^2}$$

4.1.3 Stojaté vlnenie

Stojaté vlnenie vzniká, ak proti sebe postupujú dve vlny s rovnakou frekvenciou (napríklad vlna dopadajúca a vlna odrazená) a majú proti sebe stály fázový posun. U stojatej vlny zostávajú minimá a maximá akustického tlaku v určitom mieste. Tieto body teda kmitajú s maximálnou výchylkou a nazývame ich kmitňami. Medzi nimi sa nachádzajú body, ktoré naopak kmitajú s nulovou výchylkou. Tie nazývame uzlami stojatej vlny. [34]

Pokiaľ má dopadajúca aj odrazená vlna rovnakú amplitúdu, hovoríme o úplnom stojatom vlnení. Čiastočné stojaté vlnenie vzniká, ak dopadajúca aj odrazená vlna majú rovnakú frekvenciu, ale rozdielnu amplitúdu. To môže nastať, ak je odrazená vlna utlmená pohltivosťou odrážajúcej steny. [28, 34]

5 Meracie zariadenie podľa ČSN ISO 10534-1

Pre túto prácu bola pre meranie akustickej pohltivosti materiálov zvolená metóda pomeru stojatej vlny. Hoci metóda prenosovej funkcie je rýchlejšia, rozsah merateľných frekvencií pre rovnaké rozmery trubice je výhodnejší pre metódu pomeru stojatej vlny. Pre metódu prenosovej funkcie sa dá frekvenčný rozsah prispôbiť aj vzájomnou vzdialenosťou mikrofónov, no pre rovnaký frekvenčný rozsah ako dosiahneme pri metóde pomeru stojatej vlny by sme potrebovali buď využitie viacerých mikrofónov s rôznou vzájomnou vzdialenosťou alebo využiť redukciiu impedančnej trubice na iný rozmer.

Druhým dôvodom výberu metódy pomeru stojatej vlny bola možnosť rekonštrukcie meracieho zariadenia na metódu prenosovej funkcie. Spätné prerobenie zariadenia by nebolo možné kvôli umiestneniu mikrofónov na vrchu trubice. Pri metóde pomeru stojatej vlny musí byť povrch trubice tesný a hladký.

Profesionálna impedančná trubica od firmy Brüel & Kjær meria vo frekvenčnom rozsahu 50 Hz až 6,3 kHz. Ale aj tieto trubice sa skladajú z dvoch častí, širšia na nižšie frekvencie, užšia na vyššie frekvencie. Pokiaľ by sme chceli zmeniť frekvenčný rozsah navrhnutého zariadenia, je možnosť trubicu upraviť pomocou redukcie na menší priemer, a teda pre toto zariadenie máme stále možnosti úprav a vylepšení.



Obr. 12: Profesionálna trubica od firmy Brüel & Kjær (prevzaté z [20])

5.1 Impedančná trubica

Impedančná trubica musí byť rovná s konštantným prierezom (s odchýlkou do 0,2 %), s tuhými, hladkými, neporéznymi stenami bez dier a štrbín v celom skúšobnom úseku. Je dôležité, aby steny boli dostatočne ťažké a silné, aby nedochádzalo k ich rezonancii a rozkmitaniu zvukovým signálom. Ak je impedančná trubica z kovového materiálu, odporúča sa, aby hrúbka steny bola približne 5 % priemeru trubice pre trubice kruhového prierezu, a okolo 10 % pre trubice pravouhlého prierezu. Pokiaľ je impedančná trubica zhotovená z betónu, jej steny by mali byť povrchovo upravované. Ak je impedančná trubica z dreva, steny musia byť taktiež povrchovo upravené a mali by byť zosilnené plášťom z oceľových alebo olovených plechov na vonkajšej stene trubice. [8]

Pracovný frekvenčný rozsah impedančnej trubice je rozsah, v ktorom je možné uskutočniť meranie:

$$f_d < f < f_h,$$

Frekvenčný rozsah je daný dĺžkou a priečnym prierezom impedančnej trubice. Keďže pre meranie potrebujeme minimálne dve tlakové minimá, musí byť dĺžka pracovného úseku trubice dostatočná. Na dolnej medzi frekvencie musí platiť, že

$$\lambda_0 \geq \frac{4}{3}l,$$

kde l je dĺžka pracovného úseku impedančnej trubice v metroch. Reprodukotor budí okrem rovinnnej vlny aj vlny vyšších módov. Podľa ČSN ISO 10534-1 vlny pod nižšou medznou frekvenciou prvého vyššieho módu zmiznú do vzdialenosti približne troch priemerov kruhovej trubice d . Skúšobný úsek nesmie zahŕňať vlny vyšších módov, a preto pre dĺžku trubice vo vzťahu k dolnej medznej frekvencii f_d platí

$$l \geq \frac{250}{f} + 3d, \quad (5.1)$$

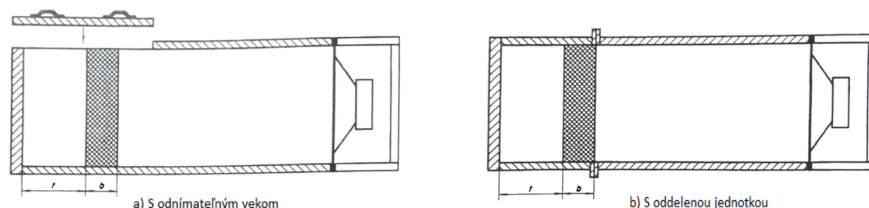
Pre hornú medzu frekvencie pre impedančné trubice s kruhovým prierezom platí

$$\lambda_0 \leq \frac{d}{0,58} \quad a \quad f_h d \leq 200 \quad (5.2)$$

kde d je vnútorný priemer trubice v metroch. [8]

5.2 Držiak vzorky

Držiak vzorky slúži k upevneniu vzorky k impedančnej trubici. Môže byť vyrobený dvoma spôsobmi, a to ako držiak s odnímateľným vekom alebo s oddelenou jednotkou. Dĺžka držiaku musí byť dostatočne veľká, aby po zasadení vzorky do držiaku zostala za vzorkou vzduchová medzera. [8]



Obr. 13: Typy držiakov vzorky (prevzaté z [8])

Ak je držiak oddelenou jednotkou, jeho tvar a rozmery sa môžu líšiť maximálne do 0,2 % od impedančnej trubice. Pripevnenie držiaku k trubici musí byť pevné a dobre utesnené (odporúča sa vazelína). [8]

Keďže držiak slúži aj ako tuhé ukončenie, jeho zadná strana musí byť tuhá. Ideálna je kovová doska hrubá minimálne 2 cm. [8]

Pre niektoré skúšky sa vzduchová medzera hrúbky $\lambda_0/4$ správa ako tlakovo priepustný uzáver. Niekedy sa ako tuhé zakončenie držiaku používa pohyblivá zátka, ktorou môžeme nastavovať rôznu hĺbku vzduchovej medzery. [8]

5.3 Mikrofón

Pohyblivý mikrofón slúži k snímaniu stojatej vlny v impedančnej trubici a na zistenie polôh minim akustického tlaku v maximách a minimách stojatej vlny. [8]

Mikrofón sa môže pohybovať buď vo vnútri impedančnej trubice alebo von. K mikrofónu je pripevnená sondážna trubka s otvorom na snímanie zvuku. Mikrofón spolu s podperami a inými zariadeniami nesmie zmenšiť prierez impedančnej trubice o viac než 5 % prierezu kdekoľvek v pracovnom úseku. [8]

Trubka sondy musí byť z kovového materiálu s dostatočnou hrúbkou stien, aby nedochádzalo k prenikaniu zvuku do trubky. Vo vodorovnej impedančnej trubici musí byť trubka podoprená, aby nedochádzalo k jej prehýbaniu, ktoré môže mať za následok vznik vyšších vlnových módov. Podpery by nemali byť blízko otvoru pre snímanie zvuku. U zvislých trubíc so vzorkou v dolnom konci impedančnej trubice môže mikrofónna sonda v impedančnej trubici voľne visieť. [8]

Pre pravouhlé trubice sa odporúča umiestnenie mikrofónu do dolného rohu trubice. Výhodou je, že nie sú potrebné podpery a vibrácie trubice sú v rohoch najmenšie. Je však dôležité zabrániť styku trubice a trubky sondy, ktoré môžu prenášať vibrácie. Odporúča sa preto trubku podložiť mäkkým penovým materiálom hlavne v mieste otvoru pre snímanie zvuku. [8]

5.4 Pohyb a umiestňovanie mikrofónu

Poloha akustického stredu snímania tlaku mikrofónom alebo trubkovou mikrofónnou sondou sa môže líšiť od polohy geometrických stredov. Pri meraní minim akustického tlaku je nutné, aby bol tento rozdiel určený. [8]

Určuje sa v celom pracovnom frekvenčnom rozsahu na frekvenciách, ktoré sú od seba vzdialené maximálne jednu tretinu oktávy. Vykonáva sa s tuhým uzáverom, teda bez vzorky. Tlakové minimum sa od tuhej zadnej dosky (nachádzajúcej sa vo vzdialenosti $x = 0$) nachádzajú vo vzdialenostiach

$$x_{min,n} = \frac{(2n-1)}{4} \lambda_0 \quad \text{pre } n = 1, 2, \dots$$

Ak y je poloha geometrického stredu mikrofónnej sondy, $y = 0$ odpovedá polohe tuhého uzáveru a $y_{min,1}$, $y_{min,2}$ sú polohy mikrofónnej sondy po umiestnení do príslušných tlakových minim, potom korekcia δ je

$$\delta = \frac{1}{2}(3y_{min,1} - y_{min,2}).$$

Korekcia δ je teda hodnota, o ktorú sa líši akustický stred sondy od geometrického stredu. Túto korekciu ďalej využívame pre všetky $y_{min,n}$ pomocou

$$x_{min,n} = y_{min,n} - \delta.$$

Zariadenie pre pohyb mikrofónu a pre určovanie polohy akustického stredu by malo mať presnosť $\pm 0,5$ mm. Táto presnosť môže lineárne rásť pre klesajúce frekvencie od 300 Hz do 50 Hz až na maximálnu toleranciu ± 2 mm. Vhodné je použitie posuvného merítka, kde môžeme nastaviť hodnotu nula, aj sa akustický stred mikrofónu nachádza v referenčnej rovine. [8]

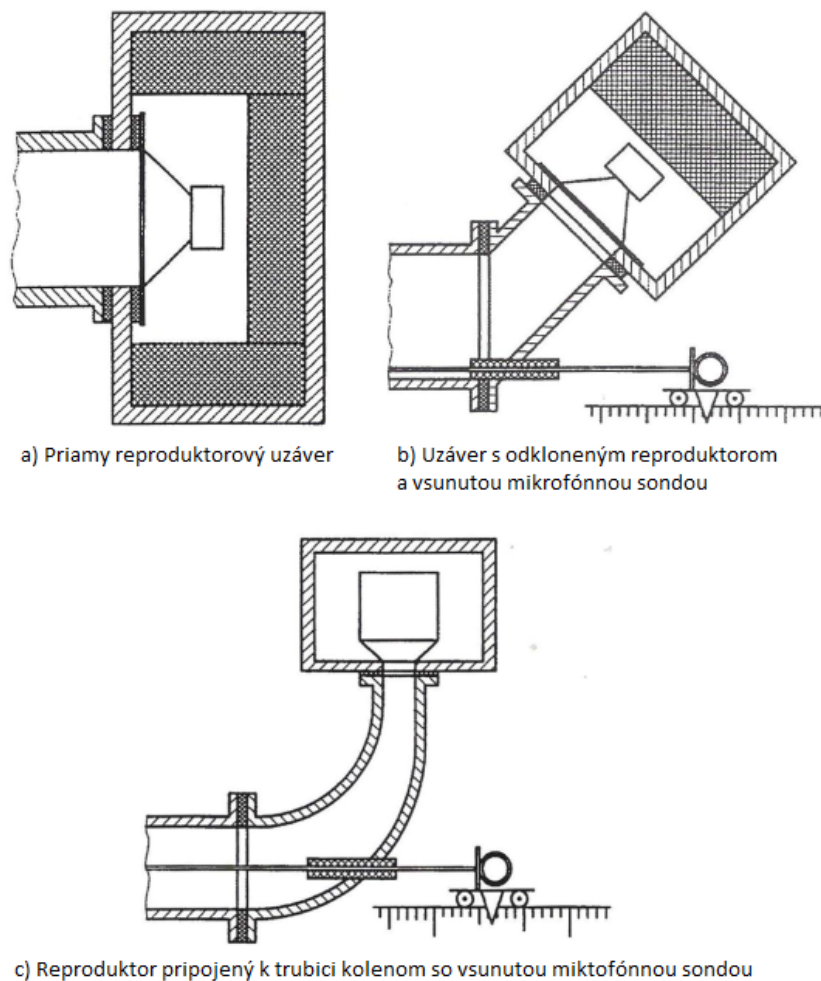
5.5 Spracovanie signálu

Zariadenie na spracovanie signálu sa skladá zo zosilovača, filtra, meradla akustického tlaku alebo hladiny akustického tlaku a zapisovača obrazca stojatej vlny. Dynamický rozsah by mal byť viac než 60 dB. Nelinearity, chyby čítania, nestabilita a teplotná citlivosť musia byť menšie než 0,2 dB alebo menšie než 2 % pri lineárnom čítaní akustického tlaku. Filter musí zabezpečiť, aby po umiestnení mikrofónu do tlakového maxima bol šum aspoň 50 dB pod jeho základnou frekvenciou. [8]

5.6 Reproduktor

Membránový reproduktor (alebo tlakový reproduktor s vlnovodom) je uzáverom impedančnej trubice na opačnom konci než je držiak vzorky. Plocha membrány reproduktora musí prekryvať aspoň dve tretiny prierezu impedančnej trubice. [8]

Os reproduktora môže byť s osou trubice zhodná (vid' obr. 14a)), alebo môže byť od nej odklonená (vid' obr. 14b)), alebo môže do trubice prechádzať cez koleno (vid' obr. 14c)). Výhodou varianty *b*) a *c*) je jednoduchšie zavádzanie trubkovej mikrofónnej sondy do impedančnej trubice. [8]



Obr. 14: Typy reproduktorových uzáverov (prevzaté z [8])

Aby nedochádzalo k priamemu prenosu zvukového signálu do mikrofónu, je nutné reproduktor zabudovať do zvukovo izolovanej skrine. Reprodukčnú skriň ďalej musí byť pomocou pružného tesnenia odizolovaná od impedančnej trubice a koša reproduktora, aby sa zabránilo budeniu impedančnej trubice zvukom šíreným konštrukciou. [8]

Ak je mechanická impedancia reprodukčnej membrány vysoká, môže dôjsť k rezonancii vzduchového stĺpca v impedančnej trubici. K zabráneniu vzniku tohto negatívneho javu je možné použiť porézny absorpčný obklad v oblasti pred reproduktorom. [8]

5.7 Generátor signálu

Generátor signálu je zložený z generátora sínusových kmitov, výkonového zosilovača, a ak je to možné, aj z čítačky kmitov. Presnosť naladenia a čítania musí byť minimálne 2 %. Budenie vyšších harmonických zložiek generátorom signálu, výkonovým zosilovačom a reproduktorom musí byť také, aby ho bolo možné odfiltrovať. [8]

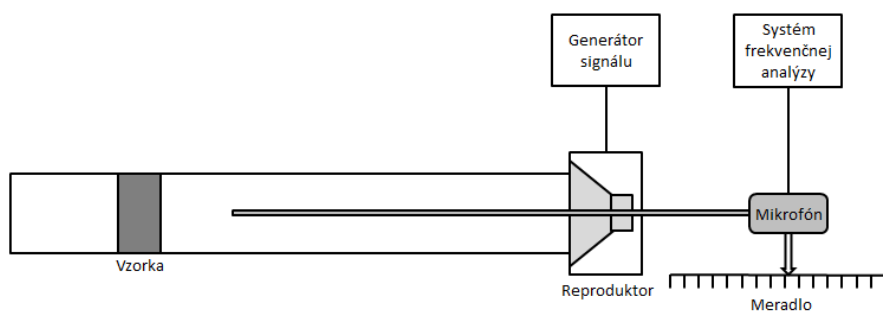
5.8 Teplomer

Keďže rýchlosť šírenia zvuku c_0 a vlnová dĺžka λ_0 závisia na teplote, je potrebné ju merať a udržiavať počas celého merania rovnakú s toleranciou ± 1 K. [8]

6 Návrh a konštrukcia meracieho zariadenia

Meracie zariadenie bolo navrhnuté podľa normy ČSN ISO 10534-1 (Akustika - Určovanie činiteľa zvukovej pohltivosti a akustickej impedancie v impedančných trubiciach - Časť 1: Metóda pomeru stojatej vlny).

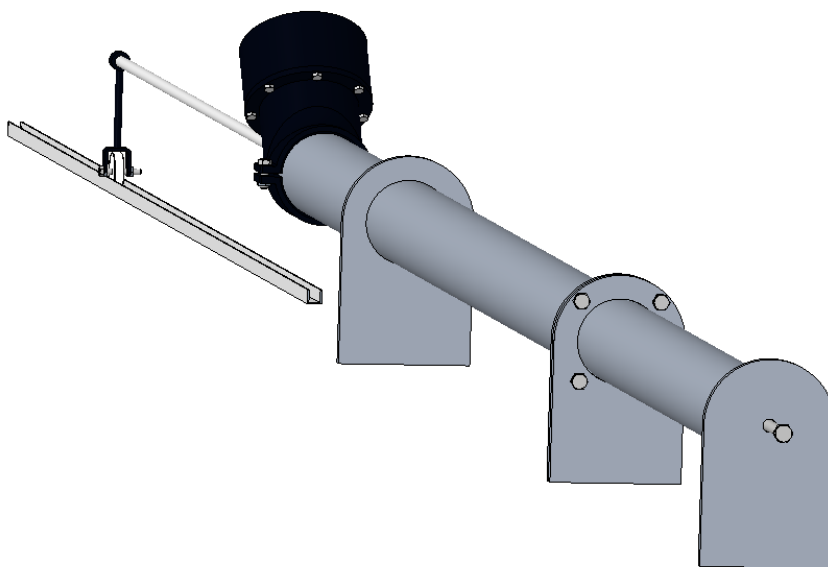
Merací reťazec pozostáva z tela impedančnej trubice s reproduktorom na jednom konci a vzorkou skúšaného materiálu na konci druhom. Vzorka skúšobného materiálu je upevnená v držiaku, ktorý je spojený s telom impedančnej trubice. Stredom trubice je vedená mikrofónna sonda, ktorá je pripojená k zariadeniu pre spracovanie signálu. Reproduktor je napojený na zosilovač a generátor signálu. Schéma meracieho reťazca je nakreslená na obr. 15.



Obr. 15: Schéma meracieho zariadenia

6.1 Model meracieho zariadenia

Meracie zariadenie bolo navrhnuté v prostredí PTC Creo. Na základe navrhnutého modelu boli nakupované a vyrábané potrebné diely. Pre vyrábané diely bola vyhotovená výkresová dokumentácia. Model celej sústavy môžeme vidieť na obr. 16.



Obr. 16: Model meracieho zariadenia

Na modeli bola ďalej vykonaná štrukturálna modálna analýza. Prvá analýza prebiehala na pracovnom úseku impedančnej trubice bez ostatných dielov. Druhá analýza prebehla na pevne spojených dieloch meracieho zariadenia (telo impedančnej trubice, držiak skúšobnej vzorky a kovové príruby). Pre obe analýzy boli použité parabolické pyramídové prvky (parabolic tetrahedral) o veľkosti 8 mm.

Modálna analýza ukázala, že vo frekvenčnom rozsahu sa nachádza niekoľko potenciálne nepriaznivých frekvencií. Vlastné frekvencie pre obidve analýzy sú uvedené v tab. 4.

Tabuľka 4: Vlastné frekvencie pre analýzu 1 a analýzu 2

Analýza 1		Analýza 2	
n	f [Hz]	n	f [Hz]
3	338	5	269
5	643	8	411
8	1024	10	530
10	1215	13	624
15	1954	16	824
34	2501	19	1002
		27	1585
		32	2027
		55	2489

Frekvencie z tab. 4 by mohli spôsobovať nežiadúce rozkmitanie meracieho zariadenia a mohli by do výsledkov zaniest chyby merania. Analýza však nebola vykonaná na celú zostavu meracieho zariadenia, pričom chyby taktiež môže spôsobovať rozkmitanie mikrofónnej sondy.

Podľa normy ČSN ISO 10534-1 [8] je možná kontrola na vibrácie trubice výpočtom pomeru stojatej vlny zisťovaným zo záznamu stojatého vlnenia. Preto v tejto práci bola vykonaná kontrola vibrácií trubice aj pomocou tohto výpočtu. Pokiaľ dochádza k budeniu vibrácií impedančnej trubice, mala by sa zlepšiť izolácia medzi reproduktorom a impedančnou trubicou. [8]

6.2 Telo impedančnej trubice

Ako telo impedančnej trubice bola zvolená oceľová hrubostenná rúra bezšvová o akosti S235JRH valcovaná za tepla. Rozmery rúry sú $88,9 \times 6,3$. To znamená, že vonkajší priemer rúry je 88,9 mm, hrúbka steny je 6,3 mm, a teda vnútorný priemer impedančnej trubice je 76,3 mm. Dĺžka pracovného úseku je 2 m.

Rúra bola zakúpená v Železiarniach Podbrezová a.s. Podľa [23] je hmotnosť pracovného úseku impedančnej trubice 15,14 kg. Cena rúry bola 47,69 € za 3 m.

6.2.1 Pracovný frekvenčný rozsah

Ako bolo spomenuté v kapitole 5.1, pracovný frekvenčný rozsah impedančnej trubice je daný dĺžkou a rozmerom pričného prierezu trubice.

Dolnú hranicu kmitočtu vypočítame úpravou 5.1 a dosadením dĺžky pracovného úseku za $l = 2$ m, a za vnútorný priemer impedančnej trubice dosadíme $d = 0,0763$ m.

$$f_d \geq \frac{250}{l - 3d}$$

$$f_d \geq \frac{250}{2 - 3 \cdot 0,0763}$$

$$f_d \geq 141,155 [Hz]$$

Pre hornú medzu kmitočtu využijeme vzorec 5.2

$$f_h \leq \frac{200}{d}$$

$$f_h \leq \frac{200}{0,0763}$$

$$f_d \leq 2621,232 [Hz]$$

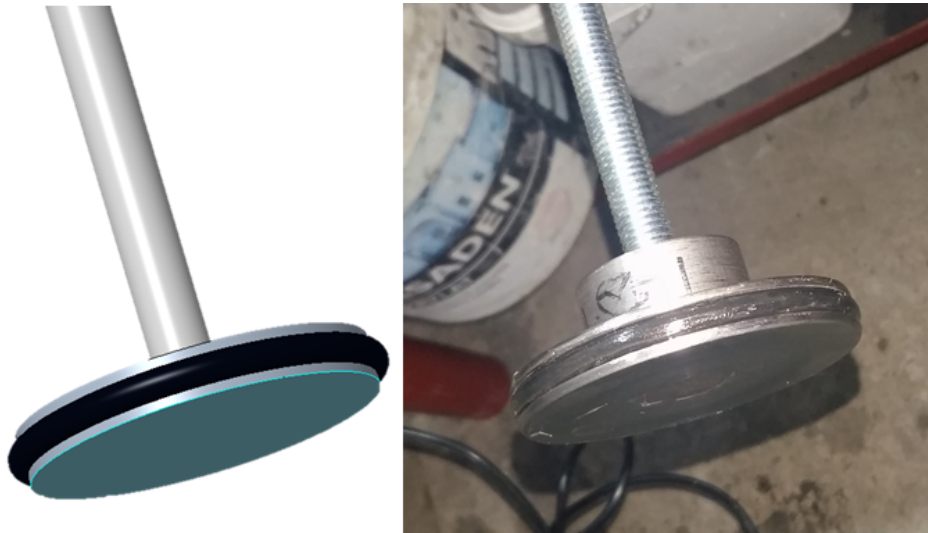
Pracovný frekvenčný rozsah impedančnej trubice je teda 141 Hz až 2621 Hz. V tomto frekvenčnom rozsahu sa nachádzajú tretinooktávové pásma 160 Hz až 2500 Hz, ktoré budú využívané pre meranie.

6.3 Držiak skúšobnej vzorky

Držiak skúšobnej vzorky je z rovnakého materiálu ako telo impedančnej trubice, a teda ide taktiež o ocelovú hrubostennú rúru bezšvovú o akosti S235JRH. Takisto je valcovaná za tepla a má rovnaké rozmery ako telo trubice, teda $88,9 \times 6,3$. Dĺžka držiaku skúšobnej vzorky je 1 m.

Držiak skúšobnej vzorky je k telu impedančnej trubice pripevnený pomocou kovových prírub s hrúbkou 10 mm pomocou štyroch skrutiek M10. Na konci držiaku skúšobnej vzorky je tuhá kovová stena taktiež o hrúbke 10 mm, cez ktorú vedie piestik slúžiaci ako zátka pre vytvorenie vzduchovej medzery, ktorá sa chová ako tlakovo priepustný uzáver. Piestik má po svojom obvode drážku na o-krúžok (pre lepšie tesnenie) namazaný vazelínou. Kovová stena na konci držiaku má z vnútornej strany k sebe navarenú matku. K pohybu piestiku slúži 1 m dlhá skrutka vedúca cez matku. Aby bolo zabránené rotácii piestika a aby teda konal iba translačný pohyb, spojenie skrutky a piestika je riešené cez radiálne ložisko.

Model pohyblivej zátky a konštrukčné riešenie tohto prvku je na obr. 17.

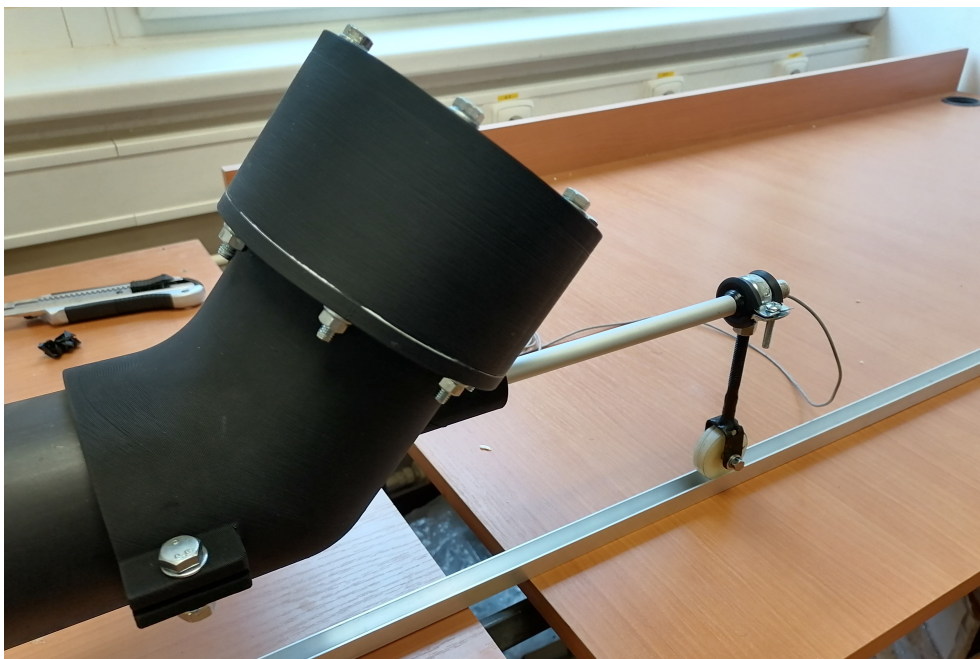


Obr. 17: Model piestika a vyrobený piestik

6.4 Mikrofón

Mikrofón bol použitý EMM-7101-CHTB od firmy iSEMcon. Jeho frekvenčný rozsah je od 10 Hz do 20 kHz a dynamický rozsah je 30 dB až 125 dB. Priemer mikrofónu je 7 mm a jeho dĺžka 101 mm. Všetky parametre sú dostupné v produktových dátach pre tento mikrofón [21].

Mikrofón je umiestnený na konci mikrofónnej sondy, ku ktorej je pripevnený. Samotná sonda je 2 m dlhá hliníková rúrka s priemerom 12 mm a hrúbkou materiálu 1 mm. Tá sa pohybuje vo vnútri impedančnej trubice cez držiak reproduktora pomocou silónového kolieska po koľajničke tvaru U. Zostavu mikrofónnej sondy s koľajničkou môžeme vidieť spolu s reproduktorovým uzáverom na obr. 18.



Obr. 18: Mikrofónna sonda

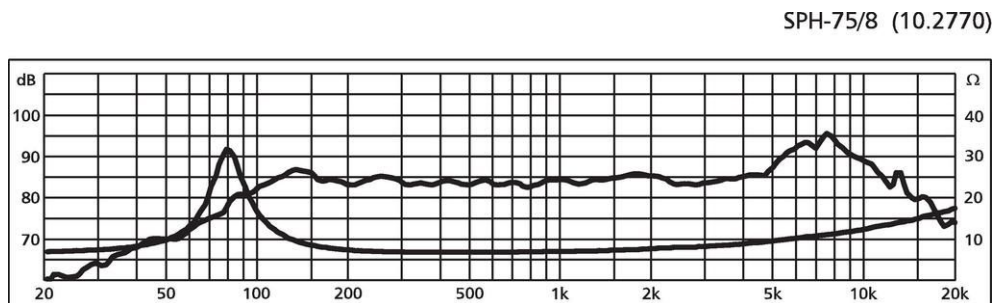
6.5 Spracovanie signálu

Spracovanie signálu bolo vykonané pomocou softwaru m+p Analyzer od m+p international. Ide o software pre dynamické meranie signálu, analýzu vibroakustických veličín a pokročilé podávanie správ o všetkých hlukoch a vibráciách, akustike a všeobecných dynamických signálových aplikáciách. K dispozícii je komplexná analýza času a frekvencie pri spracovaní údajov online aj offline.

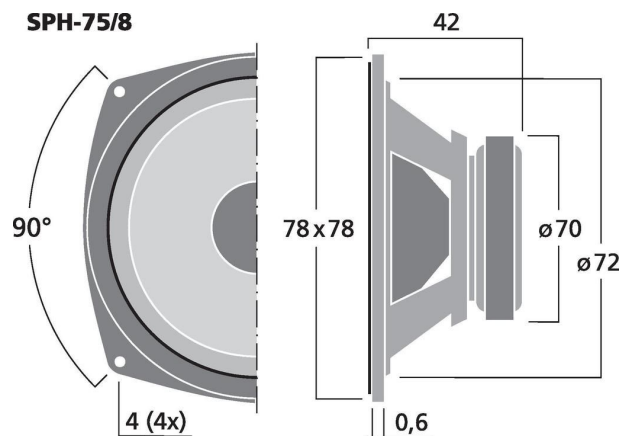
6.6 Reproduktor

Na konci impedančnej trubici je umiestnený reproduktor podľa obr. 14c), teda cez koleno. Bol zvolený miniatúrny stredo-basový reproduktor MonacorSPH-75/8 s výkonom 15 W a impedanciou 8 Ω . Maximálna frekvencia reproduktora je 16 000 Hz a rezonančná frekvencia je 85 Hz (viď obr. 19). [27]

Rozmery reproduktora sú na obr. 20.

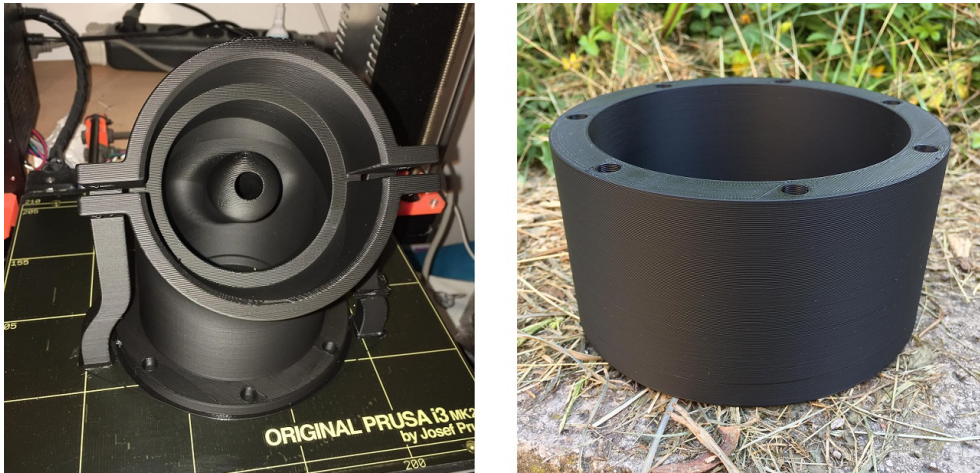


Obr. 19: Citlivostná charakteristika reproduktora (prevzaté z [27])



Obr. 20: Rozmery reproduktora Monacor SPH-75/8 (prevzaté z [27])

Skriňa reproduktora pozostáva z dvoch častí. Prvou je držiak, ktorý je pripevnený k impedančnej trubici utiahnutím dvoch skrutiek na svojom boku. Ide o koleno s uhlom 30° navrhnuté v prostredí Creo Parametric. Keďže cez koleno prechádza mikrofónna sonda, bol tu navrhnutý aj prvok pre vedenie mikrofónnej sondy. Druhou časťou je kryt, ktorý je k držiaku pripevnený pomocou 7 skrutiek. Obe časti boli vyrobené 3D tlačiarňou Prusa i3 MK2S čiernym filamentom PLA.



Obr. 21: Držiak reproduktora a kryt držiaku reproduktora

6.7 Generátor signálu

Harmonický signál bol generovaný zariadením Phon-X. Signál bol nastavovaný po tretnooktávových pásmach. Kmitočet bol nastavený pomocou softwaru m+p analyser spolu s dĺžkou nahrávania a ostatnými parametrami.

Celú zostavu meracieho zariadenia môžeme vidieť na obr. 22. Celková suma potrebná na výrobu meracieho zariadenia je 270 €, čo je približne 7000 Kč. V porovnaní s profesionálnou impedančnou trubicou od firmy Brüel & Kjær, ktorej cena pre najlacnejšiu variantu z bazáru sa môže pohybovať až okolo 1100 € (30000 Kč) [31] je to značná úspora.



Obr. 22: Zostavené meracie zariadenie

7 Overovanie zariadenia a predbežné merania

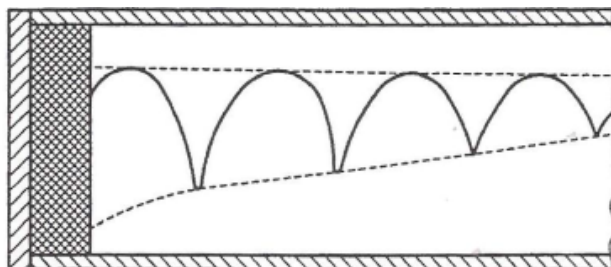
Pred samotným meraním je nutné vykonať niekoľko skúšok potrebných pre overenie meracieho zariadenia. Kontroly sa musia opakovať po akejkoľvek úprave meracieho zariadenia. Tieto skúšky prebiehajú v prázdnej impedančnej trubici ukončenej tuhým uzáverom bez vzorky materiálu a pomáhajú predísť chybám a zaistiť splnenie požiadaviek normy. Medzi takéto skúšky patrí napríklad overenie pomeru stojatej vlny, dynamický rozsah mikrofónu, či kontrola vibrácií trubice. [8]

Po kontrolách sa ďalej vykonávajú tzv. predbežné merania, pri ktorých je určená vlnová dĺžka, rýchlosť šírenia zvuku a korekcia na útlm v trubici. Tieto skúšky sa taktiež vykonávajú s trubicou ukončenou tuhým uzáverom a pri každej zmene na impedančnej trubici alebo na mikrofónnej sonde sa musia opakovať. [8]

7.1 Overovanie pomeru stojatej vlny

Obrazce stojateho vlnenia sa zaznamenávajú plynulým pomalým pohybom mikrofónnej sondy v celom pracovnom úseku impedančnej trubice. Meranie sa vykonáva s tuhým uzáverom. Zaznamenáva sa vzdialenosť mikrofónnej sondy od referenčnej roviny a hladina akustického tlaku. Ak na susedných kmitočtoch tretinooktávového pásma dochádza k veľkým zmenám, dopĺňa sa meranie o ďalšie kmitočty. [8]

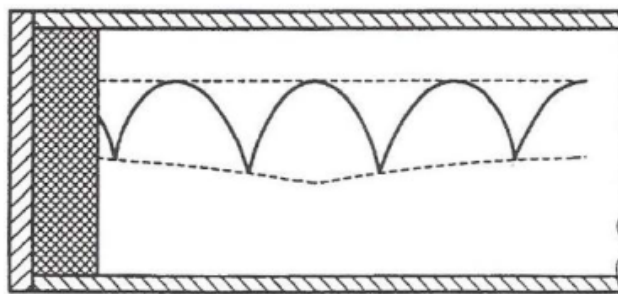
Pomer stojateho vlnenia nesmie byť menší než 45 dB, aby bolo možné merať malé hodnoty činiteľa akustickej pohltivosti. Obálka tlakových miním musí byť buď vodorovná alebo musí monotónne narastať smerom k reproduktoru. Na obr. 23 je obvyklý obrazec stojateho vlnenia s útlmom v trubici. [8]



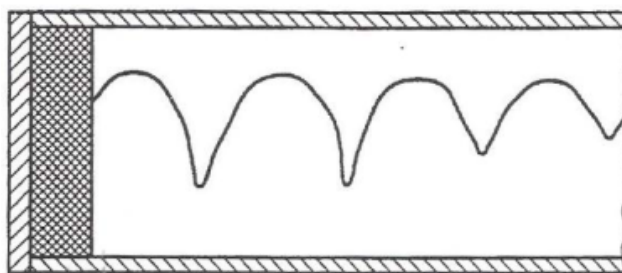
Obr. 23: Obrazec stojateho vlnenia (prevzaté z [8])

Možné príčiny, ktoré môžu spôsobovať, že nie sú splnené požiadavky na obrazce stojateho vlnenia [8]:

- **Príliš prudký nárast dolnej obálky**
Príčina - príliš veľký útlm v trubici
- **Príliš malé hodnoty pomeru stojatej vlny**
Príčiny: - malý dynamický rozsah zariadenia pre spracovanie signálu
- šírenie zvuku vzduchom alebo konštrukciou (zlá izolácia)
- **Nemonotónny nárast dolnej obálky** (viď obr. 24)
Príčiny: - vyššie módy v skúšobnom úseku
- šírenie zvuku konštrukciou
- **Zvlnené obrazce stojatých vln** (viď obr. 25)
Príčina - vyššie harmonické v signáli
- **Zaoblené minimá**
Príčina - signál v minimách je pod úrovňou šumu lebo hluku



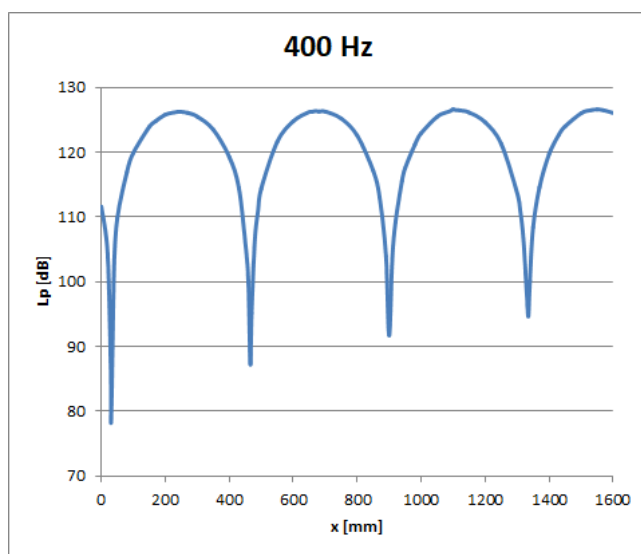
Obr. 24: Zvlnenie na obrazci stojateho vlnenia (prevzaté z [8])



Obr. 25: Zvlnenie na obrazci stojateho vlnenia (prevzaté z [8])

Zmerané hodnoty hladiny akustického tlaku boli zaznamenané do tabuliek a následne boli vykreslené grafy stojateho vlnenia pre všetky merané frekvencie. Pre nižšie frekvencie sú obrazce stojateho vlnenia obvyklé a dolná obálka monotónne rastie smerom k reproduktoru. Pre vyššie frekvencie však dolná obálka nerastie monotónne. Podľa normy je tolerovaný nárast tlakových miním ± 1 dB, čo však nie je splnené pre nižšie frekvencie.

Na obr. 26 môžeme vidieť obrazec stojateho vlnenia pre kmitočet 400 Hz. Tu si môžeme všimnúť, že dolná obálka rastie monotónne, ale nárast je väčší než ± 1 dB. V tab. 5 je pomer stojateho vlnenia pre kmitočet 400 Hz vypočítaný z rozdielu tlakových miním a nasledujúcich tlakových maxím.



Obr. 26: Obrazec stojateho vlnenia pre kmitočet 400 Hz

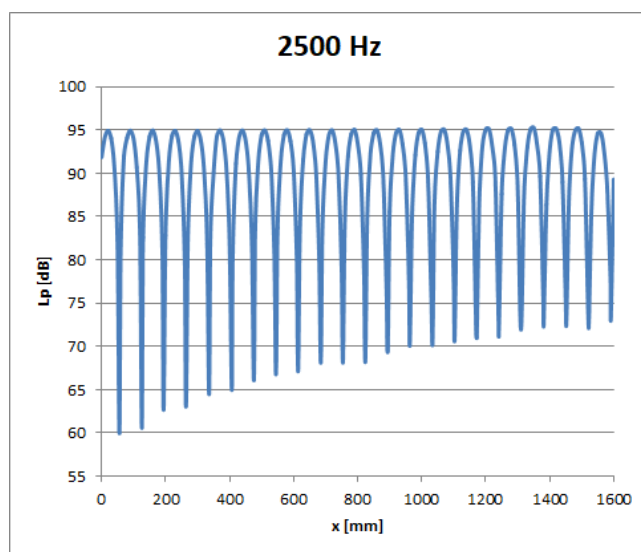
$$\Delta Lp = Lp(x_{max,1}) - Lp(x_{min,1}) = 126,27 - 78,7 = 47,57 [dB]$$

Tabuľka 5: Pomer stojateho vlnenia pre kmitočet 400 Hz

n	$Lp(x_{min})$ [dB]	$Lp(x_{max})$ [dB]	ΔLp [dB]
1	78,7	126,3	47,6
2	87,3	126,3	39,0
3	91,7	126,6	34,9

Z tab. 5 vidíme, že pomer stojateho vlnenia je väčší ako 45 dB. Pre vyššie frekvencie je však rozdiel menší, čo podľa normy ČSN ISO 10534-1 [8] môže byť spôsobené budením trubice jej frekvenciami.

Na obr. 27 je vykreslený obrazec stojateho vlnenia pre kmitočet 2500 Hz. Tu si môžeme všimnúť, že hoci nárast dojnej obálky je menší ako ± 1 dB, dolná obálka nerastie monotónne. Takéto obrazce vykazujú najmä vyššie frekvencie. Môže to byť spôsobené buď výskytom vyšších módov v skúšobnom úseku alebo šírením zvuku konštrukciou (stenami impedančnej trubice alebo trubkovou mikrofónnou sondou).



Obr. 27: Obrazec stojateho vlnenia pre kmitočet 2500 Hz

7.2 Dynamický rozsah mikrofónnej sondy

Táto kontrola sa vykonáva na rovnakých kmitočtoch ako pri overovaní pomeru stojatej vlny, ale s vypnutým generátorom signálu. Kontrola prebehla tak, že sa so zapnutým zdrojom zvuku postupným pohybom mikrofónu našlo tlakové minimum, ktoré sa zapísalo do tabuľky. Následne sa zdroj zvuku vypol a odmerala sa hodnota hladiny akustického tlaku, ktorá sa následne odčítala od predošlej hodnoty nameranej pri zapnutom zdroji. Tento rozdiel by mal byť minimálne 10 dB a predstavuje odstup hlukového pozadia. [8]

Tabuľka 6: Odstup hlukového pozadia

f	Lp(x_{min}) so zdrojom [dB]	Lp(x_{min}) bez zdroja [dB]	Odstup hluk. pozadia [dB]
160	76,1	30,4	45,7
200	71,5	31,4	40,2
250	75,4	32,7	42,7
315	71,3	28,6	42,7
400	78,7	30,2	48,5
500	66,1	31,1	35,0
630	72,2	33,5	38,7
800	69,3	34,0	35,3
1000	54,6	35,9	18,7
1250	57,8	35,3	22,5
1600	51,6	38,7	13,0
2000	48,3	29,5	18,7
2500	59,9	31,8	28,2

V tab. 6 sa nachádza vypočítaný odstup hlukového pozadia pre všetky merané frekvencie. Vo všetkých prípadoch je rozdiel väčší než 10 dB, takže podmienky normy sú splnené. V prípade, že by bol rozdiel menší ako 10 dB, musí sa overovať, či nedochádza k vzniku nežiaducich vibrácií mikrofónnej sondy alebo impedančnej trubice, alebo či je reproduktor dostatočne dobre odizolovaný.

7.3 Určenie vlnovej dĺžky a rýchlosti šírenia zvuku

Vlnová dĺžka λ_0 o frekvencii f sa určuje buď z rovnice

$$\lambda_0 = \frac{c_0}{f},$$

kde c_0 je rýchlosť šírenia zvuku, alebo sa určí na základe vzdialeností dvoch tlakových miním stojatej vlny s poradovými číslami n a m , zmeraných v impedančnej trubici s tuhým uzáverom. Potom vlnová dĺžka plynie zo vzorca

$$\lambda_0 = \frac{2}{n - m}(x_{min,n} - x_{min,m}). \quad (7.1)$$

Rýchlosť šírenia zvuku $c_0 [m \cdot s^{-1}]$ závisí na teplote v impedančnej trubici podľa vzorca

$$c_0(T) = 343,3 \sqrt{\frac{T}{293}}.$$

Pri meraní nebola teplota zisťovaná, pretože umiestnenie teplomera do vnútra impedančnej trubice by zmenšilo jej prierez. Zmenšenie prierezu by ovplyvnilo výsledky, preto sa vlnová dĺžka určila pomocou vzorca 7.1. Po dosadení pre frekvenciu 400 Hz je vlnová dĺžka vypočítaná

$$\lambda_0 = \frac{2}{1 - 2}(0,031 - 0,466) = 0,87 [m].$$

V tab. 7 sú uvedené vypočítané vlnové dĺžky pre jednotlivé frekvencie na základe vzdialenosti prvého a druhého tlakového minima.

Tabuľka 7: Vlnová dĺžka pre jednotlivé kmitočty

f [Hz]	$x_{min,1}$ [m]	$x_{min,2}$ [m]	λ_0 [m]
160	0,357	1,446	2,178
200	0,243	1,110	1,734
250	0,159	0,854	1,390
315	0,087	0,640	1,106
400	0,031	0,466	0,870
500	0,334	0,681	0,694
630	0,228	0,503	0,550
800	0,139	0,357	0,436
1000	0,073	0,248	0,350
1250	0,022	0,161	0,278
1600	0,085	0,194	0,218
2000	0,030	0,118	0,176
2500	0,056	0,126	0,140

Na základe znalosti vlnovej dĺžky pre jednotlivé frekvencie, pomocou vzorca

$$c_0(f) = \lambda_0(f) \cdot f \quad (7.2)$$

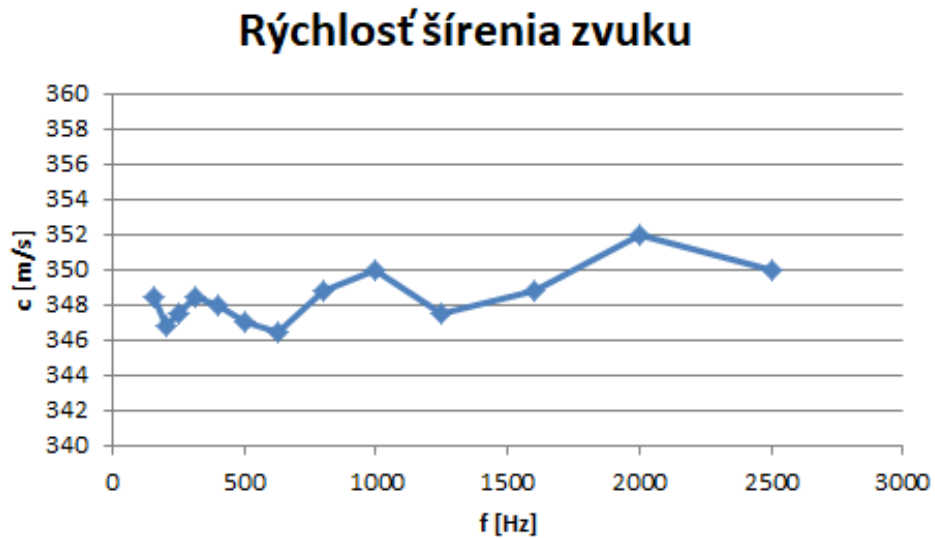
vypočítame rýchlosť šírenia zvuku v impedančnej trubici závislej na kmitočte. Rýchlosť šírenia zvuku v impedančnej trubici je pre jednotlivé frekvencie uvedená v tab. 8. Napríklad pre frekvenciu 400 Hz je rýchlosť šírenia zvuku po dosadení do vzorca 7.2

$$c_0(f) = 0,87 \cdot 400 = 348 [m \cdot s^{-1}].$$

Tabuľka 8: Rýchlosť šírenia zvuku v impedančnej trubici

f [Hz]	λ_0 [m]	c [$m \cdot s^{-1}$]
160	2,178	348,5
200	1,734	346,8
250	1,390	347,5
315	1,106	348,4
400	0,870	348,0
500	0,694	347,0
630	0,550	346,5
800	0,436	348,8
1000	0,350	350,0
1250	0,278	347,5
1600	0,218	348,8
2000	0,176	352,0
2500	0,140	350,0

Na obr. 28 je vynesená závislosť rýchlosti šírenia zvuku c_0 na frekvencii f . Rozdielne hodnoty (sklony a špičky v grafe) rýchlosti šírenia zvuku môžu byť spôsobené štrbinami v impedančnej trubici, vyššími módmami, nesprávnou frekvenciou alebo taktiež nesprávnym odčítaním polôh tlakových miním. Taktiež mohlo dochádzať k veľkým rozdielom teplôt pri zaznamenávaní obrazcov stojateho vlnenia medzi meraniami jednotlivých frekvencií.



Obr. 28: Rýchlosť šírenia zvuku v impedančnej trubici

8 Meranie

Meranie prebiehalo na kmitočtoch tretinooktávového pásma so vzorkami materiálov s vyhovujúcimi rozmermi. Pre meranie boli zvolené tri skúšobné vzorky. Prvým skúšaným materiálom bola akustická polyuretánová pena ihlanová s výškou 50 mm. Druhý testovaný materiál bol absorpčný panel s výškou 35 mm. Tretia vzorka bola opäť absorpčný panel z rovnakého materiálu, avšak s výškou 80 mm. Vzorky boli narezané pomocou odporovej drôtovej rezačky. Skúšobné vzorky materiálov sú na obr. 29 (vľavo absorpčný panel - 80 mm, uprostred absorpčný panel - 35 mm a vpravo akustická pena - ihlan).



Obr. 29: Vzorky materiálov

Vzorky boli umiestnené do držiaku skúšobnej vzorky a následne boli merané hodnoty hladín akustického tlaku v prvom tlakovom minime a nasledujúcom maxime. Pre každú vzorku skúšobného materiálu boli vytvorené tabuľky s vypočítaným činiteľom akustickej pohltivosti materiálu a boli porovnané s hodnotami od dodávateľa uvedenými na stránke dodávateľa [11].

Keďže akustický tlak bol v impedančnej trubici meraný v logaritmickom merítku, rozdiel medzi tlakovým minimom a tlakovým maximom je ΔL . Potom činiteľ zvukovej pohltivosti sa určí zo vzorca

$$\alpha = \frac{4 \cdot 10^{\Delta L/20}}{(10^{\Delta L/20} + 1)^2} \quad (8.1)$$

8.1 Akustická pena - ihlan

Prvá skúšobná vzorka je akustická profilovaná polyuretánová pena. Jej povrch je tvorený ihlanmi. V tab. 9 sú namerané hodnoty v prvom tlakovom minime a nasledovnom maxime, rozdiel ΔL [dB] a dopočítaná hodnota súčiniteľa akustickej pohltivosti α [-].

Po dosadení do rovnice 8.1 pre frekvenciu 400 Hz dostávame

$$\alpha = \frac{4 \cdot 10^{27,31/20}}{(10^{27,31/20} + 1)^2} = \frac{4 \cdot 23,2}{(23,2 + 1)^2} = 0,16 [-].$$

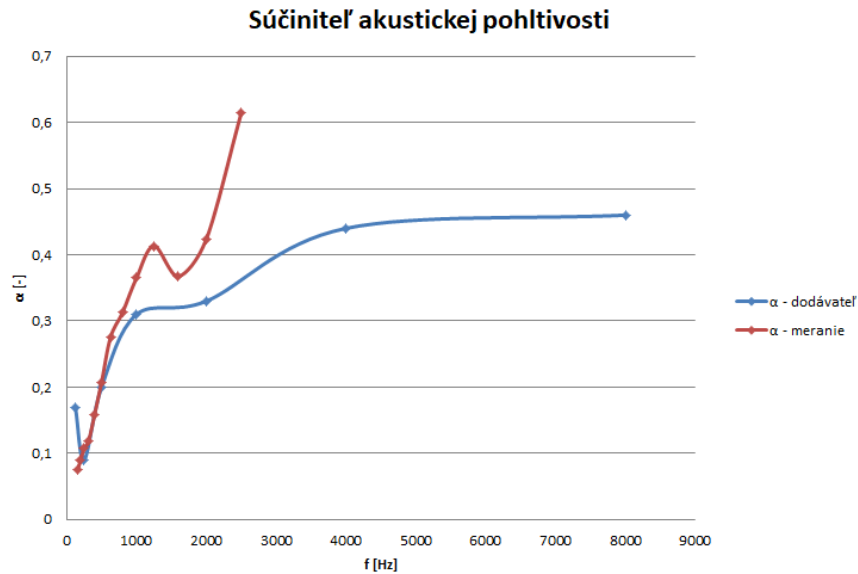
Tabuľka 9: Nameraný súčiniteľ akustickej pohltivosti pre vzorku č. 1

f [Hz]	$Lp_{x_{min}}$ [dB]	$Lp_{x_{max}}$ [dB]	ΔL [dB]	α [-]
160	87,8	121,9	34,1	0,08
200	83,4	116,0	32,6	0,09
250	93,2	124,1	30,9	0,11
315	83,1	113,1	30,0	0,12
400	85,6	112,9	27,3	0,16
500	84,2	108,9	24,7	0,21
630	84,2	106,1	21,9	0,28
800	92,6	113,2	20,6	0,31
1000	77,5	96,4	18,9	0,36
1250	77,2	94,7	17,6	0,41
1600	71,9	90,8	18,9	0,37
2000	67,3	84,6	17,3	0,42
2500	86,1	98,8	12,6	0,61

Porovnanie činiteľa akustickej pohltivosti získaného z nameraných hodnôt s hodnotami od dodávateľa si môžeme všimnúť v nasledovnej tab. 10 a v grafe na obr. 30.

Tabuľka 10: Porovnanie činiteľa akustickej pohltivosti - vzorka č. 1

f [Hz]	α - dodávateľ [-]	α - meranie [-]
125	0,17	-
160	-	0,08
200	-	0,09
250	0,09	0,11
315	-	0,12
400	-	0,16
500	0,20	0,21
630	-	0,28
800	-	0,31
1000	0,31	0,36
1250	-	0,41
1600	-	0,37
2000	0,33	0,42
2500	-	0,61
4000	0,44	-
8000	0,46	-



Obr. 30: Porovnanie činiteľa akustickej pohltivosti - vzorka č. 1

Z grafu na obr. 30 a tabuliek sa dá usúdiť, že pre nižšie frekvencie je určený činiteľ akustickej pohltivosti určený relatívne presne podľa hodnôt dodávateľa. Naopak vyššie frekvencie vykazujú väčšie odchýlky.

Pre frekvencie 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz a 2000 Hz bola vykonaná citlivostná analýza. Menený vstupný parameter bola hladina akustického tlaku v tlakovom minime, pretože táto hodnota bola vystavená viacerým možným chybám odčítania než hodnota akustického tlaku v tlakovom maxime. V tab. 11 si môžeme všimnúť ako zmena vstupnej hodnoty tlakového minima ovplyvní činiteľ akustickej pohltivosti. Najproblematickejšími frekvenciami sú vyššie. Pri frekvencii 2000 Hz môžeme vidieť, že nesprávne odčítanie tlakového minima o necelé 3 dB môže viesť k zmene výsledného činiteľa akustickej pohltivosti až o 0,09.

Tabuľka 11: Citlivostná analýza vstupných dát pre vzorku č. 1

f [Hz]	$Lp_{x_{min}} - M$ [dB]	$\alpha - M$ [-]	$Lp_{x_{min}} - C$ [dB]	$\alpha - C$ [-]	ΔL [dB]	$\Delta\alpha$ [-]
250	93,2	0,11	91,6	0,09	1,6	0,02
500	84,2	0,21	83,8	0,20	0,4	0,01
1000	77,5	0,36	75,7	0,31	1,8	0,05
2000	67,3	0,42	64,6	0,33	2,7	0,09

8.2 Absorpčný panel - 35 mm

Druhou vzorkou bol absorpčný panel s hrúbkou 35 mm. V tab. 12 sa nachádzajú namerané hodnoty v prvom tlakovom minime a nasledovnom maxime, rozdiel ΔL [dB] a dopočítaná hodnota súčiniteľa akustickej pohltivosti α [-]. Hodnoty α [-] opäť dostávame dosadením do rovnice 8.1.

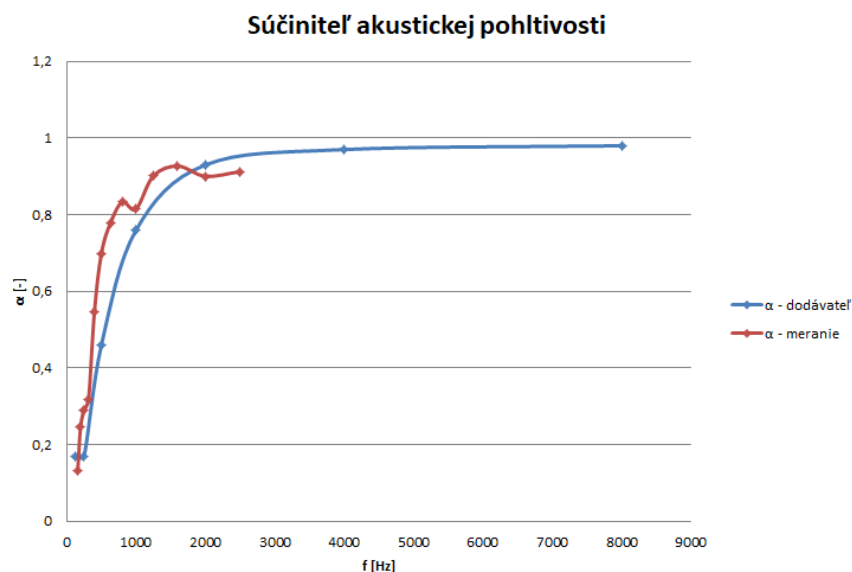
Tabuľka 12: Nameraný súčiniteľ akustickej pohltivosti pre vzorku č. 2

f [Hz]	$Lp_{x_{min}}$ [dB]	$Lp_{x_{max}}$ [dB]	ΔL [dB]	α [-]
160	92,1	121,1	29,0	0,13
200	92,4	115,4	23,0	0,25
250	99,9	121,2	21,4	0,29
315	96,1	116,5	20,4	0,32
400	102,1	116,2	14,2	0,55
500	94,1	104,8	10,7	0,70
630	98,5	107,4	8,9	0,78
800	101,8	109,3	7,5	0,83
1000	88,4	96,4	8,0	0,82
1250	91,0	96,7	5,7	0,90
1600	83,8	88,6	4,8	0,93
2000	78,4	84,0	5,7	0,90
2500	90,0	95,3	5,3	0,91

Porovnanie činiteľa akustickej pohltivosti získaného z nameraných hodnôt s hodnotami od dodávateľa si môžeme všimnúť v nasledovnej tab. 13 a v grafe na obr. 31.

Tabuľka 13: Porovnanie činiteľa akustickej pohltivosti - vzorka č. 2

f [Hz]	α - dodávateľ [-]	α - meranie [-]
125	0,17	-
160	-	0,13
200	-	0,25
250	0,17	0,29
315	-	0,32
400	-	0,55
500	0,46	0,70
630	-	0,78
800	-	0,83
1000	0,76	0,82
1250	-	0,90
1600	-	0,93
2000	0,93	0,90
2500	-	0,91
4000	0,97	-
8000	0,98	-



Obr. 31: Porovnanie činiteľa akustickej pohltivosti - vzorka č. 2

Z grafu na obr. 31 vidíme, že krivka meraných hodnôt pomerne dobre kopíruje tvar krivky hodnôt od dodávateľa. V tab. 14 je uvedená citlivostná analýza. Aby pri frekvenciách 250 Hz a 500 Hz vychádzali hodnoty činiteľa akustickej pohltivosti rovnaké, ako uvádza dodávateľ, hladina akustického tlaku v tlakovom minime by musela byť približne o 5 dB nižšia. Pre frekvencie 1000 Hz a 2000 Hz zmenou vstupného parametru (hladinou akustického tlaku v tlakovom minime) o 1 dB dostaneme rovnaké hodnoty, ako udáva dodávateľ.

Tabuľka 14: Citlivostná analýza vstupných dát pre vzorku č. 2

f [Hz]	$Lp_{x_{min}} - M$ [dB]	$\alpha - M$ [-]	$Lp_{x_{min}} - C$ [dB]	$\alpha - C$ [-]	ΔL [dB]	$\Delta\alpha$ [-]
250	99,9	0,29	94,6	0,17	5,3	0,12
500	94,1	0,70	88,5	0,46	5,6	0,24
1000	88,4	0,82	87,0	0,76	1,4	0,06
2000	78,4	0,90	79,3	0,93	0,9	0,03

8.3 Absorpčný panel - 80 mm

Poslednou treťou vzorkou bol takisto absorpčný panel, ale s hrúbkou 80 mm. V tab. 15 nájdeme namerané a vypočítané hodnoty pre túto skúšobnú vzorku. Hodnoty súčiniteľa akustickej pohltivosti α [-] vypočítame dosadením do rovnice 8.1.

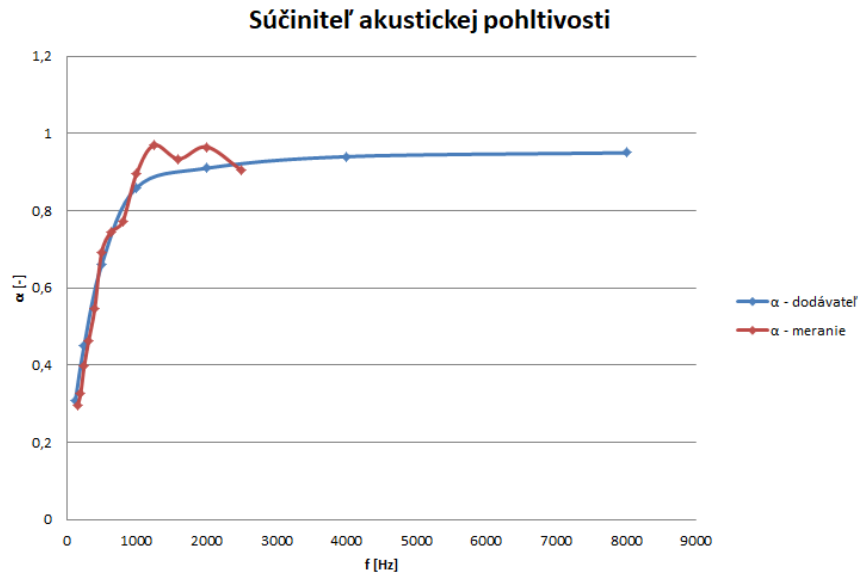
Porovnanie činiteľa akustickej pohltivosti získaného z nameraných hodnôt s hodnotami od dodávateľa sa nachádzajú v tab. 16 a v grafe na obr. 32.

Tabuľka 15: Nameraný súčiniteľ akustickej pohltivosti pre vzorku č. 3

f [Hz]	$Lp_{x_{min}}$ [dB]	$Lp_{x_{max}}$ [dB]	ΔL [dB]	α [-]
160	98,9	120,1	21,2	0,30
200	95,2	115,3	20,1	0,33
250	102,2	120,2	18,0	0,40
315	100,8	117,0	16,2	0,46
400	102,4	116,6	14,2	0,55
500	93,9	104,8	10,9	0,69
630	97,5	107,2	9,7	0,74
800	95,0	104,1	9,0	0,77
1000	93,0	98,8	5,8	0,90
1250	96,0	99,1	3,1	0,97
1600	83,9	88,5	4,6	0,93
2000	83,1	86,4	3,3	0,97
2500	88,7	94,2	5,5	0,90

Tabuľka 16: Porovnanie činiteľa akustickej pohltivosti - vzorka č. 3

f [Hz]	α - dodávateľ [-]	α - meranie [-]
125	0,31	-
160	-	0,30
200	-	0,33
250	0,45	0,40
315	-	0,46
400	-	0,55
500	0,66	0,69
630	-	0,74
800	-	0,77
1000	0,86	0,90
1250	-	0,97
1600	-	0,93
2000	0,91	0,97
2500	-	0,90
4000	0,94	-
8000	0,95	-



Obr. 32: Porovnanie činiteľa akustickej pohltivosti - vzorka č. 3

V grafe na obr. 32 môžeme vidieť najväčšiu zhodu nameraných výsledkov s hodnotami od dodávateľa. Ako u predošlých vzorkách, aj táto vzorka bola podrobená citlivostnej analýze (uvedenej v tab. 17).

Tabuľka 17: Citlivostná analýza vstupných dát pre vzorku č. 3

f [Hz]	$Lp_{x_{min}} - M$ [dB]	$\alpha - M$ [-]	$Lp_{x_{min}} - C$ [dB]	$\alpha - C$ [-]	ΔL [dB]	$\Delta\alpha$ [-]
250	102,2	0,40	103,6	0,45	1,4	0,05
500	93,9	0,69	93,2	0,66	0,7	0,03
1000	93,0	0,90	92,0	0,86	1,0	0,04
2000	83,1	0,97	81,0	0,91	2,1	0,06

Zo štúdií v [6, 26] vyplýva, že hrúbka materiálu zlepšuje akustickú pohltivosť materiálov. Pri porovnaní grafov na obr. 31 a obr. 32 zistíme, že pre hrubšiu vzorku materiálu je činiteľ akustickej pohltivosti vyšší pre všetky merané frekvencie.

Na grafoch pre všetky tri vzorky materiálu (viď obr. 30, 31, 32) si môžeme všimnúť, že pre nižšie frekvencie krivka nameraných hodnôt kopíruje krivku hodnôt uvádzaných od dodávateľa. Najväčšiu odchýlku si môžeme všimnúť pri prvej vzorke akustickej profilovanej peny.

Pre vyššie frekvencie sú rozdiely medzi meranými hodnotami a hodnotami od dodávateľa väčšie. To môže byť spôsobené tým, že pre vyššie frekvencie dolná obálka pre obrazce stojateho vlnenia nerastie monotónne.

Záver

Táto diplomová práca pojednávajúca o akustickej pohltivosti materiálov sa dá rozdeliť na dve časti. Prvá časť je teoretická, do ktorej patria úvodné kapitoly tejto práce. Prvé dve kapitoly sú rešeršnou časťou o základoch akustiky, potrebnej pre zvládnutie a lepšie porozumenie problematiky. Tretia kapitola popisuje frekvenčné pásma, ktoré boli využité v meraniach.

V ďalšej kapitole sú rozobrané možnosti merania akustickej pohltivosti materiálov. Do úvahy prichádzala možnosť merania akustickej pohltivosti materiálov v impedančných trubicách, pre ktorú existujú dve metodiky stručne popísané v tejto kapitole. Na základe vypočítaného frekvenčného rozsahu sa ako vhodnejšia metóda ukázala metóda pomeru stojatej vlny. Ďalšou výhodou výberu tejto metódy je možnosť prestavby meracieho zariadenia na metódu prenosovej funkcie.

Kapitola 5 je venovaná popisu meracieho zariadenia využívajúceho metódu pomeru stojatej vlny pre určenie činiteľa akustickej pohltivosti materiálov vyhovujúcej norme ČSN ISO 10534-1. Sú popísané požiadavky na všetky časti meracieho zariadenia, aby výsledky merania boli s čo najvyššou presnosťou. Norma popisuje konštrukciu meracieho zariadenia aj samotný postup merania a výpočet činiteľa akustickej pohltivosti materiálu.

Nasledujúce kapitoly sú venované už praktickej časti tejto práce. Kapitola 6 pojednáva o vlastnom konštrukčnom riešení meracieho zariadenia podľa ČSN ISO 10534-1. Výroba celého meracieho zariadenia stála 270 €, čo činí približne 7 000 Kč. V porovnaní s profesionálnymi impedančnými trubicami je úspora značná. Pre vyhotovenú impedančnú trubicu sú ďalšie možnosti zlepšovania. Prvou možnosťou je zväčšenie pracovného frekvenčného rozsahu napojením širších alebo užších rúr cez redukciu. Druhou možnosťou je prerobenie tohto zariadenia, aby vyhovovalo metóde prenosovej funkcie popísanej v norme ČSN ISO 10534-2. Ďalšou možnosťou vylepšenia je spresnenie odčítania hodnôt vzdialeností mikrofónnej sondy, čím by sa mohla zvýšiť aj presnosť výsledkov.

Kapitola 7 sa zaoberá predbežnými skúškami, ktoré pomáhajú overiť meracie zariadenie. Skúšky sa vykonávajú s tuhým uzáverom bez vzorky materiálu. Prvou takouto skúškou je overenie pomeru stojatej vlny. Norma ČSN ISO 10534-1 popisuje správne vyzerajúci tvar vzniknutej stojatej vlny, nevyhovujúce tvary stojatej vlny a taktiež možné príčiny spôsobujúce nesprávny tvar vzniknutej stojatej vlny. V prílohách sa nachádzajú všetky obrazce stojatej vlny a vypočítaný pomer stojatej vlny. Na nich si môžeme všimnúť, že nižšie kmitočty majú vyhovujúce obrazce, no pre vyššie frekvencie je pomer stojatej vlny aj jeho obrazec nevyhovujúci, keďže jeho dolná obálka nerastie monotónne. Dôvodom môže byť nesprávne a nepresné odčítanie hodnôt. Podľa normy môže byť dôvodom aj výskyt vyšších módov v skúšobnom úseku alebo šírením zvuku konštrukciou (stenami impedančnej trubice alebo mikrofónnou sondou). Ďalšou predbežnou skúškou je dynamický rozsah mikrofónnej sondy, pri ktorej sa určuje odstup hlučného pozadia. Výpočet ukázal, že podmienky normy boli splnené, takže nedochádzalo k nežiaducim vibráciám mikrofónnej sondy alebo impedančnej trubice a reproduktor bol dobre odizolovaný. Ako posledné sa určovala vlnová dĺžka. Vlnová dĺžka bola určovaná pre každý kmitočet z rozdielu prvých dvoch tlakových miním. Bola potrebná pre čo najpresnejšie určenie a nastavenie vzduchovej medzery pri samotnom meraní. Z vlnovej dĺžky sa následne určila rýchlosť šírenia zvuku v impedančnej trubici, keďže výpočet na základe znalosti teploty nebol uskutočnený z dôvodu absencie teplomeru v meracom reťazci. Keďže merania neprebehli naraz v jeden a ten istý deň, mohlo dochádzať k zmene teploty a tým pádom aj ovplyvneniu rýchlosti šírenia zvuku.

Posledná kapitola je venovaná samotnému experimentu, kde boli testované tri vzorky materiálov. Vzorky sa umiestnili do držiaku skúšobnej vzorky a merali sa hodnoty hladín akustických tlakov v prvom tlakovom minime a nasledujúcom tlakovom maxime. Z týchto hodnôt sa vypočítal činiteľ akustickej pohltivosti materiálu pre konkrétnu frekvenciu. Vypočítané hodnoty sa porovnávali s hodnotami udávanými od dodávateľa.

Pre prvý testovaný materiál, ktorým bola akustická profilovaná pena je pre nižšie frekvencie vypočítaná hodnota činiteľa akustickej pohltivosti materiálu podobná ako hodnota uvádzaná dodávateľom. Pre frekvencie vyššie ako 1000 Hz sa hodnoty odchyľujú. To môže byť spôsobené tým, že obrazce stojateho vlnenia nevyhovujú norme, keďže dolná obálka nerastie monotónne. Taktiež mohla byť nesprávne nastavená vzduchová medzera, ktorá pri vyšších frekvenciách musela byť nastavovaná s vysokou presnosťou, keďže tlakové minimá sa nachádzali veľmi blízko pri sebe.

Druhým testovaným materiálom bol absorpčný panel s hrúbkou 35 mm. Krivka nameraných hodnôt relatívne presne kopíruje tvar krivky danej hodnotami činiteľa akustickej pohltivosti od dodávateľa. Hodnoty od dodávateľa sú však pre menej frekvencií, ako bolo vykonávané vo vlastnom experimente. Dodávateľ totiž necertifikuje pohltivosť materiálu normou ČSN ISO 10534-1, preto by bolo vhodné otestovať materiál, ktorý garantuje činiteľ akustickej pohltivosti certifikátom. Zo štúdie teórie o pohltivosti materiálov bolo zistené, že činiteľ akustickej pohltivosti materiálov meraných metódou pomeru stojatej vlny vykazovali podobný charakter kriviek (napríklad v [3, 30]), ako bol nameraný v experimente.

Poslednou vzorkou materiálu bol opäť absorpčný panel, avšak s hrúbkou 80 mm. Pre tento materiál sú výsledky uspokojivé, keďže hodnoty merané v experimente sú veľmi podobné s hodnotami udávanými dodávateľom. Opäť však môžeme vidieť špičky a sklony. Avšak tieto špičky sú práve v kmitočtoch, pre ktoré nie je hodnota činiteľa akustickej pohltivosti dodávateľom udaná. Pre túto vzorku materiálu bola ďalej potvrdená teória, že hrúbka materiálu ovplyvňuje jeho pohltivosť a zvyšuje činiteľ akustickej pohltivosti.

Z vykonanej citlivostnej analýzy vyplýva, že nesprávne odčítanie hodnôt hladiny akustického tlaku v tlakových minimách už o 1 dB môže mať vplyv na výslednú hodnotu činiteľa akustickej pohltivosti. Z toho dôvodu je potrebné tieto hodnoty určovať čo najpresnejšie.

Použité informačné zdroje

- [1] *Absorpcia zvuku*. [online]. 1999 [cit. 2020-07-09]. Dostupné z: <https://beliana.sav.sk/heslo/absorpcia-zvuku>.
- [2] *Akustika, základní pojmy a veličiny v akustice*. [online]. [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: http://ufmi.ft.utb.cz/texty/env_fyzika/EF_02.pdf.
- [3] *Assessment of normal incidence absorption performance of sound absorbing materials*. [online]. 16.6. 2016 [cit. 2020-09-5]. Dostupné z: <http://www.ijehe.org/article.asp?issn=2277-9183;year=2016;volume=5;issue=1;spage=10;epage=10;aulast=Forouharmajd>.
- [4] BIES, David A. a Colin HANSEN. *Engineering noise control: theory and practice*. 2nd ed. London: E & FN Spon, 1996. ISBN 0-419-20430-X.
- [5] BILOŠ, Jan a Alena BILOŠOVÁ. *Aplikovaný mechanik jako součást týmů konstruktérů a vývojářů: studijní opora*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, 2012. ISBN 978-80-248-2755-1.
- [6] *Choosing & Using Porous Absorbers*. [online]. July 2015 [cit. 2020-08-27]. Dostupné z: <https://www.soundonsound.com/reviews/choosing-using-porous-absorbers>.
- [7] ČSN EN ISO 354. *Akustika - Měření akustické pohltivosti v dozvukové místnosti*. Praha: Český normalizační institut, 2003.
- [8] ČSN ISO 10534-1. *Akustika - Určování činitele zvukové pohltivosti a akustické impedance v impedančních trubicích - Část 1: Metoda poměru stojaté vlny*. Změna Z1. Praha: Český normalizační institut, 2001.
- [9] ČSN ISO 10534-2. *Akustika - Určování činitele zvukové pohltivosti a akustické impedance v impedančních trubicích - Část 2: Metoda přenosové funkce*. Změna Z1. Praha: Český normalizační institut, 2001.
- [10] *Decibelové veličiny v akustice, kmitočtová pásma*. [online]. [cit. 2020-04-08]. Dostupné z: http://ufmi.ft.utb.cz/texty/env_fyzika/EF_03.pdf.
- [11] *Zvuková izolace*. [online]. [cit. 2020-06-12]. Dostupné z: <https://www.relaxin.cz/zvukova-izolace>.
- [12] JULINA, Jiří. *Akustické vlastnosti vybraných stavebních materiálů* [online]. Zlín, 2008 [cit. 2020-09-07]. Dostupné z: <https://theses.cz/id/9ibqep/>. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická. Vedoucí práce Ing. Dušan Fojtů, Ph.D.
- [13] KOLMER, Felix a Jaroslav KYNCL. *Prostorová akustika: vysokoškolská příručka pro vysoké školy technického směru*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1980.
- [14] *Měření akustické pohltivosti*. [online]. říjen 2018 [cit. 2020-04-14]. Dostupné z: <https://www.ekosoftware.cz/mereni-akusticke-pohltivosti>.

- [15] NOVÝ, Richard. *Hluk a chvění*. 4. přepracované vydání. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2019. ISBN 978-80-01-06554-9.
- [16] *Odraz zvuku, pohlcování zvuku*. [online]. [cit. 2020-04-03]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/197-odraz-zvuku-pohlcovani-zvuku>.
- [17] *Pohlcování akustické energie*. [online]. duben 2018 [cit. 2020-04-03]. Dostupné z: <https://www.ekosoftware.cz/pohlcovani-akusticke-energie>.
- [18] *Pohlcování zvuku, šíření hluku ve volném a uzavřeném prostoru*. [online]. [cit. 2020-04-03]. Dostupné z: http://ufmi.ft.utb.cz/texty/env_fyzika/EF_04.pdf.
- [19] *Postupné mechanické vlnění*. [online]. [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: <https://oskole.detiamy.sk/clanok/postupne-mechanicke-vlnenie/2>.
- [20] *Product data*. [online]. [cit. 2020-06-14]. Dostupné z: <https://www.bksv.com/media/doc/BP1039.pdf>.
- [21] *Product data*. [online]. [cit. 2020-08-17]. Dostupné z: http://www.isemcon.com/datasheets/iSEMcon_ACOUSTIC_data_ECM_7101_CHTB_US.pdf.
- [22] PROCHÁZKA, Lukáš. *Zvuková pohltivost materiálů* [online]. Zlín, 2012 [cit. 2020-09-07]. Dostupné také z: <http://hdl.handle.net/10563/21704>. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta technologická, Ústav výrobního inženýrství. Vedoucí práce doc. Ing. Martin Vašina Ph.D.
- [23] *Rozměry a hmotnosti bezšvíkových rúr podľa noriem EN, DIN, BS, UNI, NFA, STN, ČSN, PN-H*. [online]. [cit. 2020-04-18]. Dostupné z: <https://www.oceloverury.sk/zelpo/vyrobky.nsf/Tab1?OpenPage>.
- [24] *Rýchlosť zvuku*. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2020-03-25]. Dostupné z: https://sk.wikipedia.org/wiki/R%C3%BDchlos%C5%A5_zvuku.
- [25] SMETANA, Ctirad. *Hluk a vibrace: měření a hodnocení*. Praha: Sdělovací technika, 1998. ISBN 80-901936-2-5.
- [26] *Sound absorption*. [online]. 29 Aug 2019 [cit. 2020-08-27]. Dostupné z: <https://community.sw.siemens.com/s/article/sound-absorption>.
- [27] *SPH-75/8*. [online]. [cit. 2020-08-17]. Dostupné z: <https://monacor.sk/product/sph-75-8>.
- [28] ŠANDA, Filip. *Ověření parametrů impedanční trubice* [online]. Plzeň, 2017 [cit. 2020-06-12]. Dostupné z: https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/27817/1/BP_SANDA_FILIP_OVERENI_PARAMETRU_IMPEDANCI_TRUBICE.pdf. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Ing. Martin Schlosser.
- [29] *Šíření akustického vlnění*. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2020-02-19]. Dostupné z: https://www.wikiskripta.eu/w/%C5%A0%C3%AD%C5%99en%C3%AD_akustick%C3%A9ho_vln%C4%9Bn%C3%AD.

- [30] TOMEŠEK, David. *Analýza akustických vlastností zvukově izolační pěny* [online]. Ostrava, 2013 [cit. 2020-09-07]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10084/98988>. Bakalářská práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava. Vedoucí práce Ing. Petr Kačor, Ph.D.
- [31] *Two-Microphone Impedance Measurement Tube Type 4206 Bruel Kjaer*. [online]. 13 Apr 2020 [cit. 2020-08-22]. Dostupné z: <https://www.ebay.com/itm/Two-Microphone-Impedance-Measurement-Tube-Type-4206-Bruel-Kjaer-FREE-SHIPPING/273878537926?hash=item3fc46ed6c6:g:7gAAASwGVRc-T1P>.
- [32] VAŠINA, Martin. *Studium materiálů z hlediska tlumení zvuku a vibrací: Study of materials in terms of sound and vibration damping: teze habilitační práce*. Brno: VUTIUUM, 2010. ISBN 978-80-214-4218-4.
- [33] *Základní akustické veličiny*. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2020-03-30]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Z%C3%A1kladn%C3%AD_akustick%C3%A9_veli%C4%8Diny.
- [34] ŽIARAN, Stanislav. *Nízkofrekvenčný hluk a kmitanie*. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2016. Edícia monografií. ISBN 978-80-227-4536-9.

Zoznam použitých skratiek a symbolov

a	$[m/s^2]$	zrýchlenie kmitajúcej častice
c, c_0	$[m/s]$	rýchlosť šírenia zvuku
d	$[m]$	veľkosť otvoru v prekážke
d	$[m]$	vnútorný priemer impedančnej trubice
E	$[Pa]$	modul pružnosti
E	$[J]$	celková energia
E_k	$[J]$	kinetická energia
E_p	$[J]$	potenciálna energia
f	$[Hz]$	frekvencia
f_d	$[Hz]$	dolná hranica frekvenčného rozsahu
f_h	$[Hz]$	horná hranica frekvenčného rozsahu
f_m	$[Hz]$	stredná frekvencia pásma
\vec{F}	$[N]$	sila
G	$[Pa]$	modul pružnosti v šmyku
\vec{I}	$[Wm^{-2}]$	akustická intenzita
K	$[Pa^{-1}]$	modul objemovej pružnosti
l	$[m]$	vzdialenosť (mikrofónu od referenčnej roviny)
l	$[m]$	vzdialenosť zdroja zvuku od prekážky
l	$[m]$	dĺžka meracieho úseku impedančnej trubice
L_p	$[dB]$	hladina akustického tlaku
L_I	$[dB]$	hladina akustickej intenzity
L_W	$[dB]$	hladina akustického výkonu
$L_p(x_{min}), L_{p_{x_{min}}}$	$[dB]$	hladina akustického tlakového minima
$L_p(x_{max}), L_{p_{x_{max}}}$	$[dB]$	hladina akustického tlakového maxima
m	$[kg]$	hmotnosť
\vec{n}	$[-]$	vektor udávajúci smer
p	$[Pa]$	akustický tlak
p_0	$[Pa]$	tlak plynu
p_0	$[Pa]$	referenčný akustický tlak
P	$[W]$	akustický výkon
r	$[-]$	činiteľ odrazu
r_i	$[-]$	imaginárna zložka činiteľa odrazu
r_r	$[-]$	reálna zložka činiteľa odrazu
R	$[JkgK^{-1}]$	plynová konštanta
s	$[m]$	výchylka kmitajúcej častice
s_M	$[m]$	amplitúda kmitajúcej častice
S	$[m^2]$	plocha
t	$[s]$	čas
t, T	$[K]$	teplota
T	$[s]$	perióda
v	$[m/s]$	rýchlosť kmitajúcej častice
\vec{v}	$[m/s]$	rýchlosť kmitajúcich častíc
x_{min}	$[m]$	vzdialenosť tlakového minima od referenčnej roviny
y_{min}	$[m]$	vzdialenosť geometrického stredu mikrofónnej sondy

z	$[Pasm^{-1}]$	merná akustická impedancia
Z	$[Pasm^{-3}]$	akustická impedancia
Z_M	$[Pasm]$	mechanická akustická impedancia
α	$[-]$	činiteľ zvukovej pohltivosti (absorbcie)
α	$[^\circ]$	uhol dopadajúcej zvukovej vlny
α'	$[^\circ]$	uhol dopadajúcej zvukovej vlny
β	$[-]$	činiteľ zvukovej odrazivosti (reflexie)
β_d	$[^\circ]$	uhol dopadajúcej zvukovej vlny
β_l	$[^\circ]$	uhol lomu zvukovej vlny
β_o	$[^\circ]$	uhol odrazenej zvukovej vlny
γ	$[K^{-1}]$	súčiniteľ teplotnej rozťažnosti
δ	$[m]$	korekcia vzdialenosti tlakových miním
$\Delta L, \Delta L_p$	$[dB]$	rozdiel hladín akustických tlakov
κ	$[-]$	Poissonova konštanta
λ, λ_0	$[m]$	vlnová dĺžka
μ	$[-]$	Poissonovo číslo
ρ	$[kg/m^3]$	hustota prostredia
ρ_0	$[kg/m^3]$	hustota prostredia
φ	$[rad]$	fázový uhol
ω	$[s^{-1}]$	uhlová rýchlosť

Zoznam príloh

I	Obrazce stojatého vlnenia	a
I.i	Stojaté vlnenie pri frekvencii 160 Hz	a
I.ii	Stojaté vlnenie pri frekvencii 200 Hz	b
I.iii	Stojaté vlnenie pri frekvencii 250 Hz	c
I.iv	Stojaté vlnenie pri frekvencii 315 Hz	d
I.v	Stojaté vlnenie pri frekvencii 400 Hz	e
I.vi	Stojaté vlnenie pri frekvencii 500 Hz	f
I.vii	Stojaté vlnenie pri frekvencii 630 Hz	g
I.viii	Stojaté vlnenie pri frekvencii 800 Hz	h
I.ix	Stojaté vlnenie pri frekvencii 1000 Hz	i
I.x	Stojaté vlnenie pri frekvencii 1250 Hz	j
I.xi	Stojaté vlnenie pri frekvencii 1600 Hz	k
I.xii	Stojaté vlnenie pri frekvencii 2000 Hz	l
I.xiii	Stojaté vlnenie pri frekvencii 2500 Hz	n
II	Pomer stojatého vlnenia	p
II.i	Pomer stojatého vlnenia pri frekvencii 200 Hz	p
II.ii	Pomer stojatého vlnenia pri frekvencii 250 Hz	p
II.iii	Pomer stojatého vlnenia pri frekvencii 315 Hz	p
II.iv	Pomer stojatého vlnenia pri frekvencii 400 Hz	p
II.v	Pomer stojatého vlnenia pri frekvencii 500 Hz	q
II.vi	Pomer stojatého vlnenia pri frekvencii 630 Hz	q
II.vii	Pomer stojatého vlnenia pri frekvencii 800 Hz	q
II.viii	Pomer stojatého vlnenia pri frekvencii 1000 Hz	r
II.ix	Pomer stojatého vlnenia pri frekvencii 1250 Hz	r
II.x	Pomer stojatého vlnenia pri frekvencii 1600 Hz	s
II.xi	Pomer stojatého vlnenia pri frekvencii 2000 Hz	s
II.xii	Pomer stojatého vlnenia pri frekvencii 2500 Hz	t