



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 AKUSTICKÝCH VLASTNOSTÍ ZVUK POHLTIVÝCH MATERIÁLŮ

DETERMINATION OF ACOUSTIC PROPERTIES OF SOUND-ABSORBING MATERIALS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Matej Ďurica

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Aleš Prokop, Ph.D.

BRNO 2022

Zadání diplomové práce

| | |
|-------------------|--|
| Ústav: | Ústav automobilního a dopravního inženýrství |
| Student: | Bc. Matej Ďurica |
| Studijní program: | Automobilní a dopravní inženýrství |
| Studijní obor: | bez specializace |
| Vedoucí práce: | Ing. Aleš Prokop, Ph.D. |
| Akademický rok: | 2021/22 |

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 akustických vlastností zvuk pohltivých materiálů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce je zaměřena na experimentální stanovení akustické pohltivosti vzorků materiálu. Student si osvojí metody pro stanovení akustických vlastností a provede sérii technických experimentů s následným vyhodnocením výsledků.

Cíle diplomové práce:

Rešerše dané problematiky.

Stanovení postupu pro výkon technického experimentu.

Modifikace měřicího zařízení pro stanovení akustické pohltivosti materiálu dle zadání a následná realizace technického experimentu.

Zhodnocení dosažených výsledků.

Seznam doporučené literatury:

SMETANA, Ctírad. 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 2021/22

V Brně, dne

L. S.

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

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

ABSTRAKT

Závěrečná práce je zaměřená na experimentální stanovení akustické pohltivosti čtyřech různých vzorků materiálu. K cílům práce patří: řešení dané problematiky, stanovení postupu pro výkon technického experimentu a modifikace měřicího zařízení pro stanovení akustické pohltivosti. Realizované experimenty byly vyhodnoceny a výsledky koeficienta zvukové pohltivosti porovnány s hodnotami danými výrobcem. Byly provedeny citlivostní analýzy experimentů.

KLÍČOVÁ SLOVA

zvuk, impedanční trubice, zvuková pohltivost' alfa, impedancia, stojaté vlnění, ČSN ISO 15034-1

ABSTRACT

This diploma thesis is focused on experimental determination of acoustic absorption of four different material samples. The aims of the work include: research on the given issue, determination of the procedure for the performance of a technical experiment and modification of the measuring device for the determination of acoustic absorption. The performed experiments were evaluated and the results of the sound absorption coefficient were compared with the values given by the manufacturer. Sensitivity analyzes of the experiments were performed.

KEYWORDS

sound, impedance tube, sound absorption alpha, impedance, standing waves, ISO 10534-1 :1996

ŘURICA, Matej. *Stanovení akustických vlastností zvuk pohltivých materiálů*. Brno, 2022. Závěrečná práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vedoucí závěrečné práce Aleš Prokop. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/136941>

ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že táto práca je mojím pôvodným dielom, ktoré som spracoval samostatne pod vedením Ing. Aleša Prokopa, Ph.D a s použitím informačných zdrojov uvedených v zozname.

V Brně, dne 13. května 2022

Matej Ďurica

POĎAKOVANIE

Rád by som sa poďakoval môjmu vedúcemu Ing. Alešovi Prokopovi, Ph.D. za jeho cenné rady, ochotu nájsť si čas a skonzultovať priebeh meraní a ochotu poradiť keď to nevychádzalo ako sa predpokladalo.

Ďalej by som rád poďakoval pánovi Ing. Václavovi Otipkovi, za jeho ochotu pomôcť pri montáži a úpravách meracieho zariadenia, a taktiež za vytlačenie navrhnutých dielov na 3D tlači. Tak ako aj pánovi Ing. Jiřím Hejčíkom Ph.D. za pomoc pri výrobe teplomeru a zapožičaní potrebného vybavenia.

V neposlednom rade mojej mamine Ing. Anne Ďuricovej, Ph.D. za jazykovú korektúru a nepretržitú podporu a motiváciu počas celého štúdia.

Matej Ďurica

OBSAH

| | |
|--|-----------|
| Úvod | 7 |
| 1 Základy akustiky | 8 |
| 1.1 Vlnová dĺžka | 8 |
| 1.2 Rýchlosť šírenia zvuku | 8 |
| 1.3 Kmitanie častíc | 9 |
| 1.4 Energia kmitajúcich častíc | 11 |
| 2 Akustické veličiny | 12 |
| 2.1 Akustický tlak | 12 |
| 2.2 Akustický výkon | 13 |
| 2.3 Akustická intenzita | 15 |
| 2.4 Akustická impedancia | 15 |
| 3 Šírenie zvuku | 17 |
| 3.1 Ohyb zvuku | 18 |
| 3.2 Odraz zvuku | 18 |
| 3.3 Lom zvuku | 20 |
| 3.4 Mechanizmus pohlcovania zvuku | 21 |
| 3.4.1 Činiteľ zvukovej pohltivosti | 22 |
| 3.4.2 NRC koeficient pohltivosti materiálu | 22 |
| 4 Frekvenčné pásma | 23 |
| 4.1 Oktávové frekvenčné pásmo | 23 |
| 4.2 Tretinooktávové pásmo | 24 |
| 5 Metódy merania koeficientu zvukovej pohltivosti | 26 |
| 5.1 Dozvuková komora | 26 |
| 5.2 Impedančná trubica | 27 |
| 5.2.1 Metóda pomeru stojatej vlny | 27 |
| 5.2.2 Metóda prenosovej funkcie | 28 |
| 5.3 Mechanizmy absorpcie zvuku poréznych materiálov | 29 |
| Prietokový odpor (flow resistivity) | 30 |
| Pórovitosť | 30 |
| Tortuozita T_s | 30 |
| 6 Meracie zariadenie podľa normy ČSN ISO 10534-1 | 31 |
| 6.1 Impedančná trubica | 31 |
| 6.2 Držiak skúmanej vzorky | 32 |
| 6.3 Mikrofón | 33 |
| 6.4 Generátor signálu | 33 |
| 6.5 Zariadenie pre spracovanie signálu | 33 |
| 6.6 Teplomer | 33 |
| 6.7 Reproduktor | 34 |
| 7 Návrh a schéma meracieho reťazca | 35 |
| 7.1 Návrh meracieho zariadenia | 35 |
| 7.1.1 Telo impedančnej trubice | 36 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 7.1.2 | Držiak skúšobnej vzorky | 37 |
| 7.2 | Mikrofón a jeho uloženie | 37 |
| 7.3 | Reproduktor | 39 |
| 7.4 | Teplomer | 39 |
| 7.5 | Spracovanie signálu | 40 |
| 7.6 | Generátor a zosilňovač | 40 |
| 8 | Analýza a simulácie v prostredí AnsysWorkbench | 42 |
| 8.1 | Modálna analýza | 42 |
| 8.2 | Harmonická - akustická analýza | 48 |
| 8.3 | Matlab skript | 49 |
| 9 | Predbežné merania a overenie správnej funkcie zariadenia | 51 |
| 9.1.1 | Overenie pomeru stojatého vlnenia | 51 |
| 9.1.2 | Určenie vlnovej dĺžky a rýchlosti zvuku | 54 |
| 9.1.3 | Dynamický rozsah mikrofónu | 57 |
| 9.1.4 | Výpočet povrchovej akustickej impedancie | 57 |
| 10 | Experimentálne stanovenie koeficientu zvukovej pohltivosti | 59 |
| 10.1 | Tvarový profil V 70mm. | 60 |
| 10.2 | Tvarový profil vlnky 45 mm | 64 |
| 10.3 | Tvarový profil sínus 30 mm | 67 |
| 10.4 | Tvarový profil block 80 mm | 69 |
| 10.5 | Vyhodnocovanie pohltivosti na vzorkách od firmy Zetor | 71 |
| | Záver | 75 |
| | Použité informačné zdroje | 77 |
| | Zoznam použitých skratiek a symbolov | 80 |
| | Zoznam príloh | 83 |

ÚVOD

Schopnosť potláčania nechceného zvuku a s ním spojeného hluku, je v dnešných dňoch stále viac dôležitá. Vnútorň komfort v automobile je jeden z hlavných dôvodov ktorý rozhodne o tom, či si zákazník auto kúpi. No nie je to dôležité len z hľadiska pohodlia, ale predovšetkým z dôvodu dlhodobého vplyvu na ľudský organizmus. Hluk sa čoraz častejšie stáva stresujúcim faktorom, pričom stres je dôvodom vzniku viacerých psychických ochorení. Zdravé tiché pracovné prostredie sa stalo v dnešnej dobe prioritou a nie je to už len otázkou luxusu. Pri riešení otázky odhlučnenia, môžeme siahnuť po jednej z dvoch možností. Po prvé môžeme eliminovať zdroj hluku, alebo po druhé ho môžeme potlačiť alebo aspoň minimalizovať. K pohlteniu v dnešnej dobe využívame materiály, ktorých hlavnou vlastnosťou je dobré vedenie zvuku vo svojej štruktúre, a tým schopnosť premieňať túto energiu na teplo. Najpoužívanejšie zvukové pohlcovače sú také, ktoré disponujú poréznoťou blízkou jednej alebo majú zložitú vrstvenú vlákňitú štruktúru. Patria medzi ne hlavne polyuretánové peny, ktoré sa vyznačujú vysokou hodnotou koeficientu zvukovej pohltivosti, čo je faktor, ktorý sa získava experimentálne pomocou dozvukovej komory alebo pomocou impedančnej trubice. Na Ústave automobilového a dopravného inžinierstva sú k dispozícii obidve možnosti. Témou diplomovej práce je impedančnú trubicu v mnohých oblastiach vylepšiť a zjednodušiť manipuláciu aj pre neodbornú obsluhu. Taktiež bola snaha posunúť toto zariadenie, svojimi kvalitami na úroveň profesionálnej trubice a pomocou neho porovnať aj vyhodnotiť rôzne typy materiálov.

Táto diplomová práca priamo nadväzuje na diplomovú prácu s názvom Stanovenie akustickej pohltivosti materiálov od Juliany Vozárovej, ktorá mala ako tému zostrojiť funkčné meracie zariadenie, ktoré bolo v rámci tejto práce upravené.

1 ZÁKLADY AKUSTIKY

Podstatou počuteľného zvuku je mechanické kmitanie pružného prostredia vo frekvenčnom rozsahu 20 až 20 000 kmitov za sekundu, ktoré sa šíri konečnou rýchlosťou určitým prostredím. Akustická vlna sa vo vzduchu pohybuje rýchlosťou približne $340 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Jej rýchlosť je výrazne ovplyvnená prostredím. Napríklad, vo vode môže dosahovať rýchlosť až $144 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Frekvenčný rozsah akustického vlnenia, ktorým sa zaoberá technická akustika, zodpovedá kmitočtovému rozsahu ľudského ucha. Inak sa akustika zaoberá mechanickými kmitmi v širšom frekvenčnom pásme. Hovoríme teda o troch pásmach: o infrazvukovom pásme, počuteľnom pásme a ultrazvukovom pásme. Pomocou infrazvuku sa napríklad dokážu dorozumievať zvieratá ako veľryby či netopiere. Ultrazvukové pásmo má významné miesto v medicíne, a to konkrétne v zariadeniach ako echolokátor či sonograf [1].

1.1 VLNOVÁ DĹŽKA

Vlnová dĺžka λ [m] označuje vzdialenosť dvoch najbližších bodov postupného periodického vlnenia, ktoré kmitá vo fáze. Vlnová dĺžka závisí na rýchlosti zvuku $c \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a frekvencii vlnenia f [Hz] [1]

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1)$$

1.2 RÝCHLOSŤ ŠÍRENIA ZVUKU

Hlavný spôsob šírenia zvuku v plynch a kvapalinách je prostredníctvom pozdĺžneho vlnenia, v pevných látkach je možné šírenie aj pomocou priečného vlnenia. Je dokázané radou experimentov, že zvuk sa šíri najrýchlejšie v pevných látkach a najpomalšie v plynch. Pre porovnanie sú v tab. 1 uvedené rýchlosti pozdĺžneho šírenia v niektorých prostrediach.

Pre rýchlosť šírenia zvuku v kvapalinách platí, že rýchlosť šírenia pozdĺžneho vlnenia v kvapalinách je daná vzťahom

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \quad (2)$$

kde ρ [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$] je hustota prostredia a K [Pa^{-1}] je modul objemovej pružnosti.

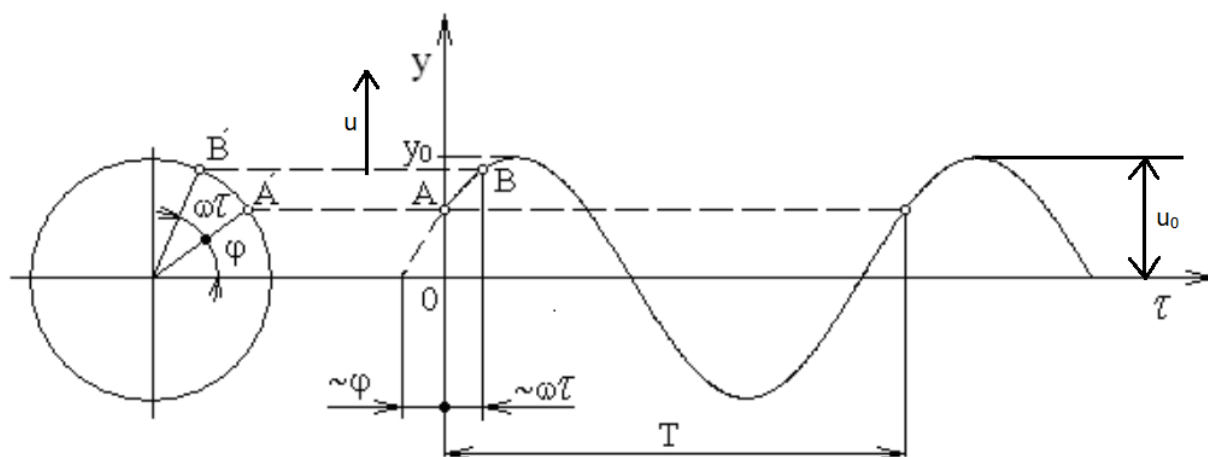
Rýchlosť šírenia zvuku je do veľkej miery ovplyvnená práve prostredím, ktorým daná vlna postupuje. Pri pevných látkach môže dôjsť k dvom typom šírenia akustickej vlny, k pozdĺžnemu a k priečnemu vlneniu. Z tohto dôvodu sú v tabuľke pre vybrané pevné látky uvedené dve hodnoty. V prípade kvapalných a plynných látok, dochádza iba k pozdĺžnemu vlneniu. Pozdĺžne vlnenie je rýchlejšie ako priečne. [1]

Tab. 1 Rýchlosť šírenia zvuku v rôznych prostrediach [3]

| Prostredie | | Rýchlosť | | Prostredie | | Rýchlosť | |
|--------------|--------------|----------------------|-----------------------|------------------|--------------|----------------------|-----------------------|
| Látka | Teplota (°C) | (m.s ⁻¹) | (km.h ⁻¹) | Látka | Teplota (°C) | (m.s ⁻¹) | (km.h ⁻¹) |
| Suchý vzduch | 35 | 351,88 | 1 266,77 | Oxid uhličitý | 25 | 259 | 932 |
| | 30 | 349,02 | 1 256,47 | Kyslík | 25 | 316 | 1 138 |
| | 25 | 346,13 | 1 246,07 | Hélium | 0 | 970 | 3 492 |
| | 20 | 343,21 | 1 235,56 | Vodík | 0 | 1 270 | 4 572 |
| | 15 | 340,27 | 1 224,97 | Ortuť | 20 | 1 400 | 5 040 |
| | 10 | 337,31 | 1 214,32 | Destilovaná voda | 25 | 1 497 | 5 389 |
| | 5 | 334,32 | 1 203,55 | Morská voda | 13 | 1 500 | 5400 |
| | 0 | 331,30 | 1 192,68 | Lad | -4 | 3 200 | 11 520 |
| | -5 | 328,25 | 1 181,70 | Striebro | 20 | 2 700 / 3 700 | 9 720 / 13 320 |
| | -10 | 325,18 | 1 170,65 | Med' | 20 | 3 500 / 4 720 | 12 600 / 16 992 |
| | -15 | 322,07 | 1 159,45 | Sklo | 20 | 5 200 | 18 720 |
| | -20 | 318,94 | 1 148,18 | Oceľ | 20 | 5 000 / 6 000 | 18 000 / 21 600 |
| | -25 | 315,77 | 1 136,77 | Hliník | 20 | 5 200 / 6 400 | 18 720 / 23 040 |

1.3 KMITANIE ČASTÍC

Časový priebeh harmonického netlmeného kmitania je zobrazený na obr.3. Z tohto obrázka je zrejmé, že kmitajúci bod kmitá s amplitúdou kmitania y_0 a s periódou T . Perióda kmitania je taká doba, za ktorú sa bod dostane z rovnovážnej polohy, cez obe krajné polohy, do rovnovážneho stavu.



Obr. 1 Časový priebeh harmonického netlmeného kmitania [4]

V technickej akustike sa výchylka kmitajúceho bodu, ktorý je nosičom akustického signálu značí písmenom u , matematicky ju popisuje rovnica 3.

$$u = u_0 \cdot \sin(\omega \cdot \tau + \varphi_0), \quad (3)$$

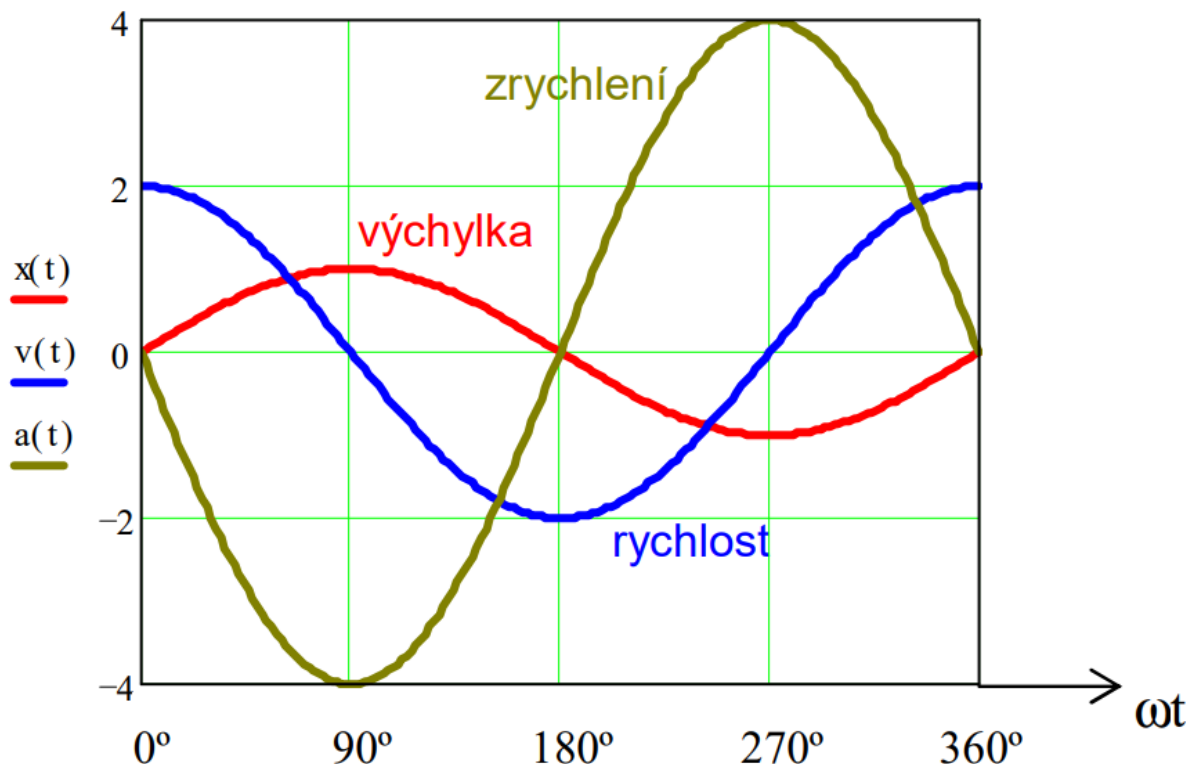
kde u [m] je akustická výchylka, u_0 [m] je amplitúda akustickej výchylky, ω [rad·s⁻¹] je uhlová rýchlosť a φ_0 [rad] je fázový uhol.

Akustická výchylka je všeobecne vektorovou veličinou, charakterizujúcou okamžitú vzdialenosť častice od jej rovnovážnej polohy. Podobným spôsobom je možné popísať aj priečne vlnenie v bodovej rade. Pre rýchlosť kmitajúceho bodu, ktorá sa získa deriváciou vzťahu 3 podľa času, je vzťah:

$$v = \frac{\partial u}{\partial \tau} = u_0 \cdot \omega \cdot \cos(\omega \cdot \tau + \varphi_0) \quad (4)$$

Pre zrýchlenie kmitajúcej častice je potrebná derivácia rovnice pre rýchlosť (4), ktorá je popísaná v rovnici (5).

$$a = \frac{\partial^2 u}{\partial^2 \tau} = u_0 \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega \cdot \tau + \varphi_0) \quad (5)$$



Obr.2 Vzťah medzi výchylkou, rýchlosťou a zrýchlením [2]

Ako je teda z predchádzajúceho vzťahu zrejmé, je teoreticky nevyhnutné poznať minimálne jednu veličinu k tomu, aby sme sa vedeli dopočítať ku ďalším dvom. Rýchlosť sa vždy o 90° omeškáva za výchylkou a zrýchlenie o ďalších 90° za rýchlosťou.

Na rozdiel od výpočtu je však pri meraní nutné vziať do úvahy aj nepriaznivé vplyvy pôsobiace na presnosť merania, a preto je vhodné voliť meranú veličinu tak, aby dávala dostatočný odstup signálu od šumu. Šum je v meraní prítomný vždy a pri slabých signáloch to znamená o to väčšie nepresnosti (chyby) v meraní. [2, 4]

1.4 ENERGIA KMITAJÚCICH ČASTÍC

Energia kmitajúceho bodu sa skladá z dvoch zložiek: energie potenciálnej E_p a energie pohybovej (kinetickej) E_k . Podľa zákona zachovania energie musí platiť, že ich súčet je konštantný, teda nemenný.

$$E_k + E_p = E = \text{konš.} \quad (6)$$

Kinetickú energiu hmotného bodu možno určiť zo známeho vzorca:

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad (7)$$

kde v [ms^{-1}] je rýchlosť kmitajúceho bodu, ktorú získame deriváciu vzťahu pre výchylku kmitajúceho bodu (3), vyjadrenú v rovnici (4). Po jej dosadení do rovnice pre výpočet kinetickej energie sa získa vzťah:

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot u_0^2 \cdot \omega^2 \cdot \cos^2(\omega \cdot \tau \cdot \varphi_0) \quad (8)$$

Potenciálnu energiu je možné vyjadriť podobným spôsobom, ktorý vyplýva z platnosti vzťahu (6)

$$E_p = \int_0^u F \cdot du = \int_0^u m \cdot \omega^2 \cdot u \cdot du = \frac{1}{2} m \cdot u_0^2 \cdot \omega^2 \cdot \sin^2(\omega \cdot \tau \cdot \varphi_0), \quad (9)$$

kde F [N] je sila v pružine.

Celková energia kmitajúcej častice je potom daná vzťahom:

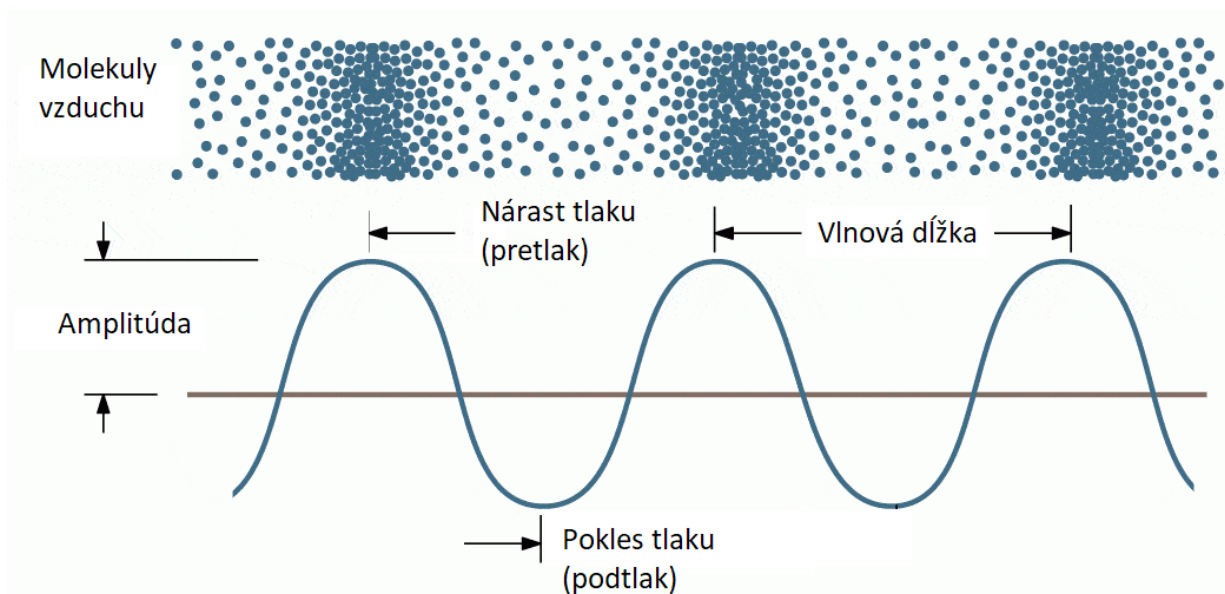
$$E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot u_0^2 \cdot \omega^2 \quad (10)$$

Táto rovnica dokazuje, že celková energia kmitajúceho bodu m je počas jedného kmitu konštantná, a že závisí na kvadráte súčinu uhlovej rýchlosti, frekvencie a amplitúdy výchylky. [1, 4]

2 AKUSTICKÉ VELIČINY

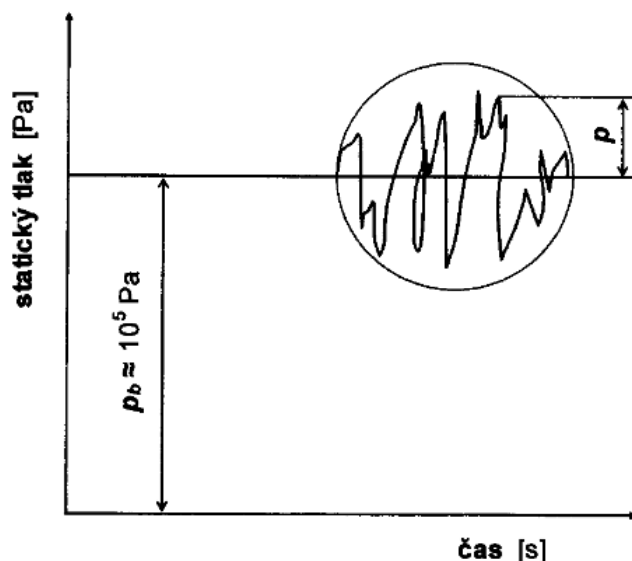
2.1 AKUSTICKÝ TLAK

Pri šírení rozruchu sa častice vychýľujú a oscilujú okolo svojej základnej polohy. Dôsledkom tohto pohybu je jav, kedy sa častice vychýľujú zo svojho pôvodného miesta, buď v priečnom alebo v pozdĺžnom smere v závislosti od typu rozruchovej vlny. Tým sa v určitých bodoch homogénneho pružného prostredia vytvárajú miesta, v ktorých dochádza k zhuklu väčšieho množstva kmitajúcich bodov alebo naopak k zmenšeniu ich pôvodnej molekulovej hustoty. Tomu zodpovedajú v plynoch a kvapalinách miesta pretlaku a miesta podtlaku. Pod pojmom akustický tlak, rozumieme práve takéto lokálne tlakové miesto. Akustický tlak L_p je skalárna veličina a jej jednotkou je [Pa].



Obr. 3 Zmena hustoty molekúl v dôsledku zmeny tlaku [27]

Zmeny celkového statického tlaku vzduchu súvisia práve s týmto zhustením a zriedením častíc. Na obr. 4 je vyznačený celkový statický tlak, ako súčet stredného barometrického tlaku p_b a tlaku akustického p . Tento diagram je možné interpretovať aj tak, že barometrickom tlaku je namodulovaný tlak akustický. Barometrický tlak dosahuje hodnotu približne 100 000 [Pa], pričom akustický tlak je veličina o mnoho rádov nižšia. Zdravé ľudské ucho začína vnímať zmenu v akustickom tlaku až od hodnoty $2 \cdot 10^{-5}$ [Pa], čo je v porovnaní s hodnotou barometrického tlaku takmer zanedbateľné. Pretože atmosferický tlak je závislý od nadmorskej výšky, používa sa redukovaná hodnota na hladinu mora, ktorá predstavuje 101 325 [Pa]. [5, 9]



Obr.4 Časový priebeh celkového statického tlaku vo vzduchu [4]

Ludské ucho navyše zaznamenáva zvukové podnety nie lineárne, ale skôr ako logaritmus daného podnetu. Preto sa ako najpoužívanejší údaj o akustickom tlaku využíva takzvaná hladina akustického tlaku. Označuje sa L_p a jej jednotkou sú decibely [dB]. Danú hladinu akustického tlaku možno popísať nasledujúcim vzťahom:

$$L_p = 20 \log \frac{p}{p_0} = 20 \log p + 94 \quad (11)$$

kde p [Pa] je akustický tlak, p_0 [Pa] je referenčný akustický tlak (obvykle je to hranica počuteľnosti teda $2 \cdot 10^{-5}$ Pa) . [4, 5]

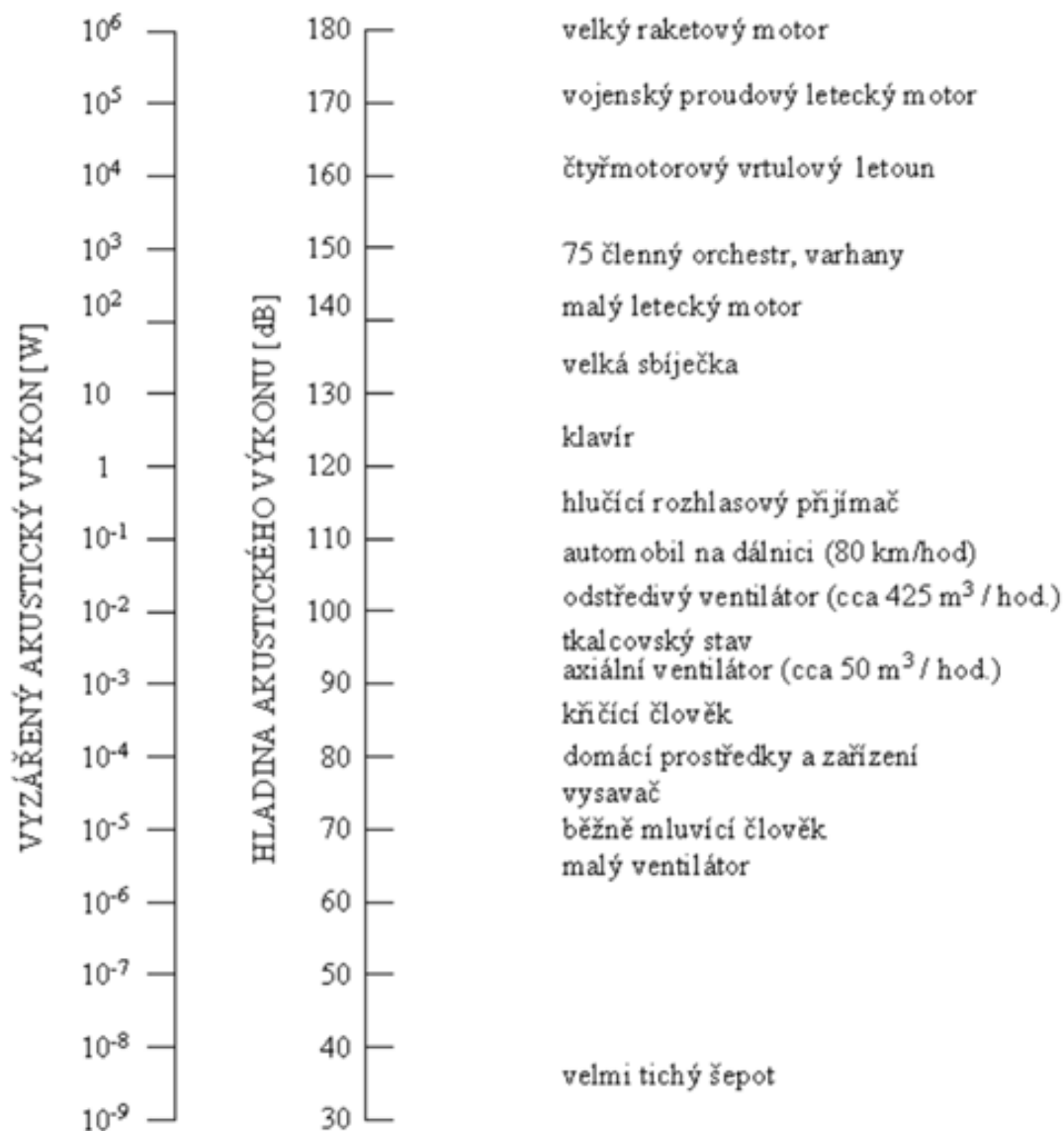
2.2 AKUSTICKÝ VÝKON

Akustický výkon P [W] je kritériom celkovej akustickej energie, ktorá je vyžiarená zo zdroja alebo tá, ktorá prechádza danou plochou. Je základnou a najdôležitejšou veličinou popisujúcou akustické vlastnosti zdroja zvuku. Okamžitý výkon možno pre malé časové úseky určiť ako súčin rýchlosti a pôsobiacej sily.

$$P = \vec{F} \cdot \vec{v} = \iint \vec{I} \cdot \vec{n} dS \quad (12)$$

kde \vec{F} je vektor pôsobiacej sily [N], \vec{v} je vektor rýchlosti kmitajúcej častice [ms^{-1}], \vec{I} je vektor akustickej intenzity [Wm^{-2}], \vec{n} je vektor udávajúci smer šírenia vlny a S je daná plocha [m^2].

V technickej akustike bol zavedený pojem „hladina“ jednotlivých akustických veličín, ktorých jednotkou je „decibel“ [dB]. Pri používaní decibelových stupníc, je nutné stanoviť referenčnú hodnotu. Napríklad medzi referenčnými hodnotami 1 W a 10^{-12} W je v decibelových stupniciach konštantný rozdiel 120 dB.



Obr.5 Akustický výkon a jeho prepočítaná hladina [10]

Hladinu akustického výkonu L_w [dB] definuje vzťah:

$$L_w = 10 \log \frac{P}{P_0} = 10 \log P + 120 \quad (13)$$

kde P je akustický výkon [W] a P_0 je referenčná hodnota zodpovedajúca 10^{-12} W.

Každému zvýšeniu akustického výkonu o jeden rád zodpovedá zvýšenie hladiny akustického výkonu o 10 dB. [1, 4, 10]

2.3 AKUSTICKÁ INTENZITA

Mierou účinku mechanického vlnenia vzduchu a ním prenášaného zvuku je plošná hustota akustického výkonu nazvaná akustická intenzita I [Wm^{-2}]. V smere šírenia rovinných akustických vln pre akustickú intenzitu platí vzťah:

$$\vec{I} = p \cdot \vec{v} \quad (14)$$

Intenzita zvuku je vektorová veličina, je priestorovo orientovaná. Preto tento vzťah platí iba vtedy, ak plocha na ktorej zisťujeme intenzitu, je kolmá na smer šírenia zvuku. [7, 8]

Citlivosť ľudského sluchu pri vnímaní akustickej intenzity nie je vždy rovnaká, ale s rastúcou intenzitou sa znižuje. Pri zvyšovaní akustickej intenzity sluchový orgán zrejme stráca schopnosť rozpoznávať jej prírastky. Je to spôsobené v dôsledku logaritmického závislosti medzi veľkosťou zvukového podnetu a veľkosťou sluchového vnemu, ktorý popisuje Weber-Fechnerov zákon v znení: Intenzita počiatku je úmerná logaritmu podnetu. Podľa tohto zákona možno preukázať logaritmickú závislosť medzi objektívnymi akustickými veličinami a subjektívnym vnemom človeka:

$$S = k \cdot \ln \frac{I}{I_0} \quad (15)$$

kde k je bezrozmerná konštanta [-], S je intenzita subjektívneho vnemu [-], I je intenzita podnetu pôsobiaca na receptor a jej jednotkou je [Wm^{-2}], I_0 je prahová intenzita - najmenšia možná hodnota, ktorú je ešte jedinec schopný vnímať, často uvádzaná hodnota je 10^{-12}Wm^{-2} .

Uvedená vlastnosť sluchu nie je samoúčelná. Umožňuje totiž človeku vnímať aj veľmi slabé zvukové signály s vysokou citlivosťou a zároveň ho chráni pred zvukom vysokej intenzity. Táto vlastnosť sluchu bola dôvodom k zavedeniu logaritmického miery (decibelovej stupnice) pri kvantifikácii akustických veličín. Akustická intenzita I [W.m^{-2}] vyjadrená v decibeloch sa nazýva hladina akustickej intenzity L_I [dB]. [12]

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0} = 10 \log I + 120, \quad (16)$$

kde I_0 je referenčná hodnota o veľkosti 10^{-12}Wm^{-2} .

2.4 AKUSTICKÁ IMPEDANCIA

Akustická impedancia Z (17) predstavuje dôležitú veličinu pre popísanie vzájomnej interakcie medzi vlnením a daným prostredím, v ktorom sa vlnenie pohybuje. Jednotkou je [Pa.s.m^{-1}].

Mernú akustickú impedanciou z (18) možno definovať ako veličinu vyjadrujúcu prepojenie medzi akustickým tlakom p pri priechode stojatej vlny s akustickou rýchlosťou v , čo je zároveň rýchlosť kmitania častíc vlnenia. Pri harmonickom kmitaní môže nastať situácia pri ktorej dôjde medzi akustickým tlakom a akustickou rýchlosťou k fázovému posunu, z toho dôvodu má akustická impedancia v symbolickom vyjadrení komplexný charakter. [7]

$$Z = \frac{p}{v} = r + jx \quad (17)$$

Merný akustický odpor r môžeme v prípade akustickej impedancie považovať za reálnu časť. Imaginárna časť bude pomenovaná písmenom x ako merná akustická reaktancia. V prípade šírenia častíc formou rovinnnej stojatej vlny alebo formou guľovej vlny v nekonečnom prostredí, má impedancia iba reálnu časť r , a v literatúre sa tento jav pomenúva ako merný akustický vlnový odpor. Tento odpor má výrazný vplyv na odraz a prestup ultrazvukových vln na rozhraní dvoch prostredí

$$z = \rho \cdot c, \quad (18)$$

kde ρ [kgm^{-3}] charakterizuje hustotu prostredia a c [ms^{-1}] je rýchlosť šírenia pozdĺžnych vln. Merná akustická impedancia vzduchu je $0,44 \text{ kPa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$ a vody $1,48 \text{ MPa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$. [7,8,]

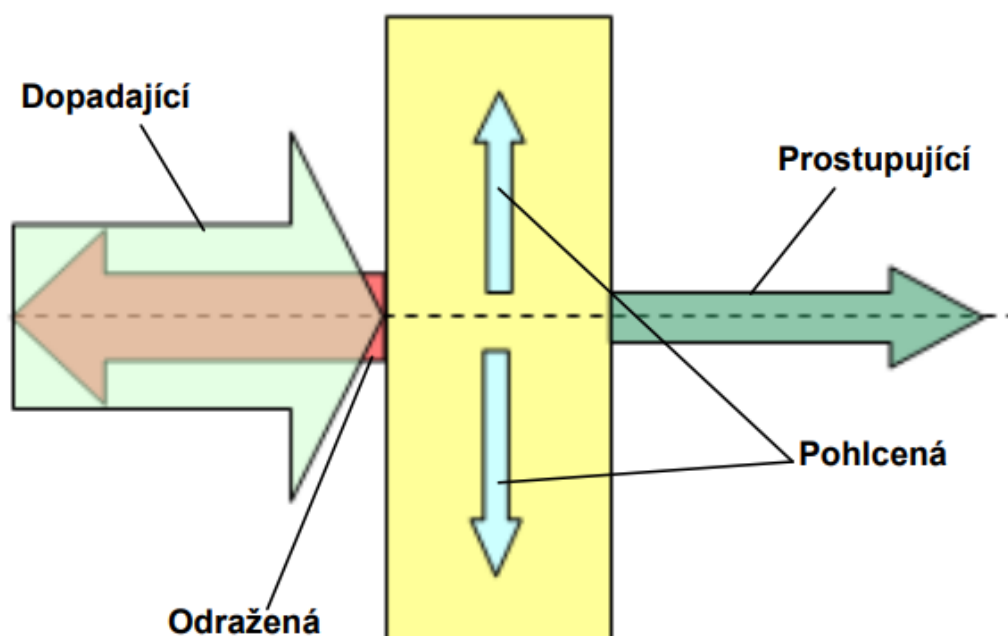
Mechanická akustická impedancia Z_m (19), vyjadruje pomer síl pôsobiacich na akustickú sústavu a rýchlosť kmitajúcich častíc. Po dosadení akustických veličín dostávame vzťah medzi mechanickou a akustickou impedanciou:

$$Z_m = \frac{F}{v} = \frac{pS}{v} = ZS^2 \quad (19)$$

3 ŠÍRENIE ZVUKU

Pod zvukom môžeme chápať každé mechanické vlnenie v látkovom prostredí, ktoré je schopné vyvolať v ľudskom uchu sluchový vnem. Vlnenie sa môže šíriť ako v tekutinách (kvapalinách a plynoch) kde sa označuje ako zvuk, tak aj v pevných látkach, kde nezáleží na frekvenčnom rozsahu a označujeme ho ako vibrácie. Najbežnejším prostriedkom prenosu zvuku je vzduch, ale ako médium na šírenie zvuku môže slúžiť každá látka, ktorú možno stlačiť. Základnou charakteristikou vlny je, že prenáša energiu a hybnosť od zdroja bez toho, aby zo zdroja ubúdala akýkoľvek hmotu. Šírenie zvukových vln je v rôznych médiách rozdielne. Ľudské ucho vníma zmeny atmosférického tlaku bubienkom, ktorý svoje chvenie prenáša cez kvapalinu na nervové bunky do vnútra stredného ucha. Zvuk je tvorený kmitajúcimi časticami pružného prostredia v rozsahu počuteľného kmitočtu od 20Hz do 20kHz. Jeho šírenie možno popísať formou vlnoplôch, ktoré majú vo voľnom prostredí guľový alebo rovinný tvar. Tento tvar sa však môže zmeniť v prípade, kedy daná vlna narazí na prekážku a kde sa môže jeho časť pohltiť prípadne odraziť. Za rovinnou vlnoplochou možno taktiež považovať aj guľovú, a to v prípade keď bola vlna vytvorená vo veľkej vzdialenosti, a teda jej zakrivenie nehrá podstatnú rolu.

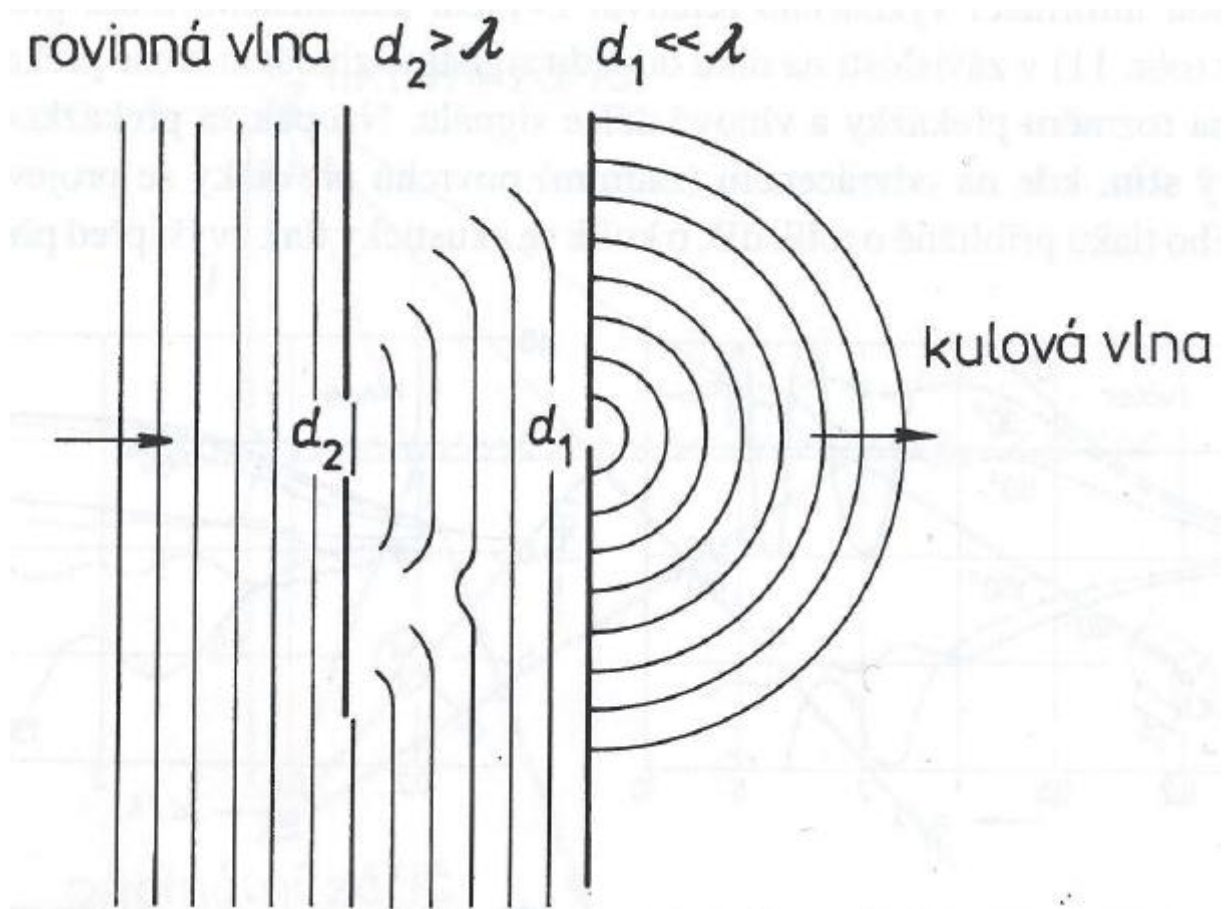
Pre akustické šírenie v reálnom prostredí teda aj s prekážkami, dochádza pri dopade zvukovej vlny na niektorú z prekážok k mnohým javom, pri ktorých sa navyše časť zvuku transformuje na inú formu energie (teplo). Všeobecne sa časť zvuku odrazí, časť akustickej energie sa premení na teplo, časť sa šíri prekážkou samotnou. Ďalej je možné, že ak je vlna dostatočne veľká, časť sa za prekážkou ohne. Ak je vlnenie dostatočne silné môže dôjsť k rozkmitaniu prekážky, čo v konečnom dôsledku generuje opačné vlny, ktoré sa navzájom odčítajú. Všetko teda nezáleží len od rozmeru, zloženia a tvaru prekážky, ale tiež od sily a vlnovej dĺžky pôsobiacej vlny [11,14].



Obr.6 Rôzne typy interakcií akustickej vlny s prekážkou [6]

3.1 OHYB ZVUKU

Princíp ohybu lúča, šíriaceho sa rozruchu, je vlastne dôsledkom Huygensovho princípu, kde každé miesto na hrane prekážky je zdrojom guľových vlnoplôch. Zložením všetkých jednotlivých účinkov, dostávame akoby zmenu v šírení – ohyb lúča. Veľkosť odchýlenia daného lúča od pôvodného smeru závisí od vlnovej dĺžky postupujúceho signálu a na veľkosti prekážky. Jav je znázornený na obr. 7, kde je zobrazený prechod zvukovej vlny stenou s otvorom rôznych veľkostí. V prípade, že priemer kruhového otvoru je $d \approx \lambda$, prejaví sa ohyb. Ak je však otvor príliš malý oproti veľkosti vlnovej dĺžky $d \ll \lambda$, vzniká podľa Huygensovho princípu (nová) guľová vlna. Pri $d \gg \lambda$ vlna prechádza bez zmeny.



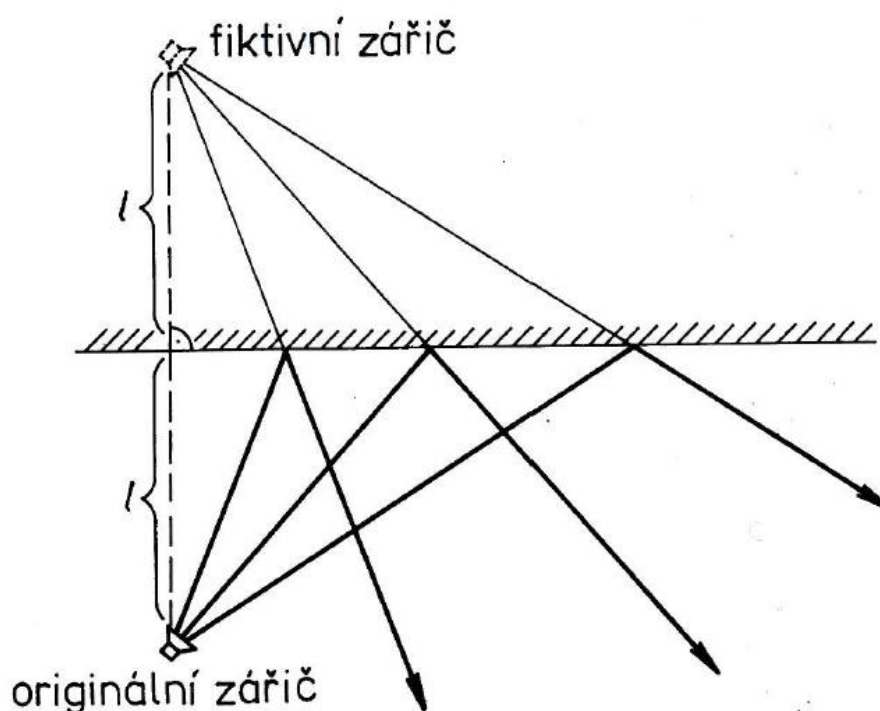
Obr.7 Prechod zvuku otvorom v prekážke [13]

3.2 ODRAZ ZVUKU

K tomuto javu dochádza pri šírení vln rozruchu cez prekážku. Intenzita odrazenej vlny závisí na pohlcovacích vlastnostiach odrazovej plochy a na vlnovej dĺžke signálu. Ak sa jedná o rovinnú plochu, ktorej rozmery sú podstatne väčšie ako dĺžka dopadajúcej vlny, je možné použiť zákon odrazu, podľa ktorého sa uhol odrazu rovná uhlu dopadu. Geometrickou konštrukciou šíriacej sa vlny uľahčuje tzv. fiktívny zdroj, pri ktorom sa využíva metóda zrkadlového obrazu. K odrazu dochádza vtedy, ak platí, že vlnová dĺžka vlny je porovnateľne veľká alebo menšia ako rozmery plochy (vo všetkých smeroch), od ktorej k odrazu dochádza. Pri zloženom signále, obsahujúceho radu kmitočtov, nastane odraz iba pre tie kmitočty, pre ktoré platí že:

$$\lambda \leq l \text{ alebo } f \geq \frac{c}{l} \quad (20)$$

kde l [m] je najmenší rozmer plošnej prekážky. Odrazený signál bude teda mať zmenené spektrálne zloženie, prejavujúce sa úbytkom zložiek s nižším kmitočtom. Pri vibráciách prenášaných konštrukciou nastáva odraz pri kontakte dvoch materiálov, s rozdielnymi vlastnosťami (predovšetkým modul pružnosti v ťahu). Preto sa pre útlm vibrácií vkladajú do prenosových ciest tzv. „sendvičové“ (vrstvené) konštrukcie. Pri zakrivených plochách je odraz podstatne zložitejší.

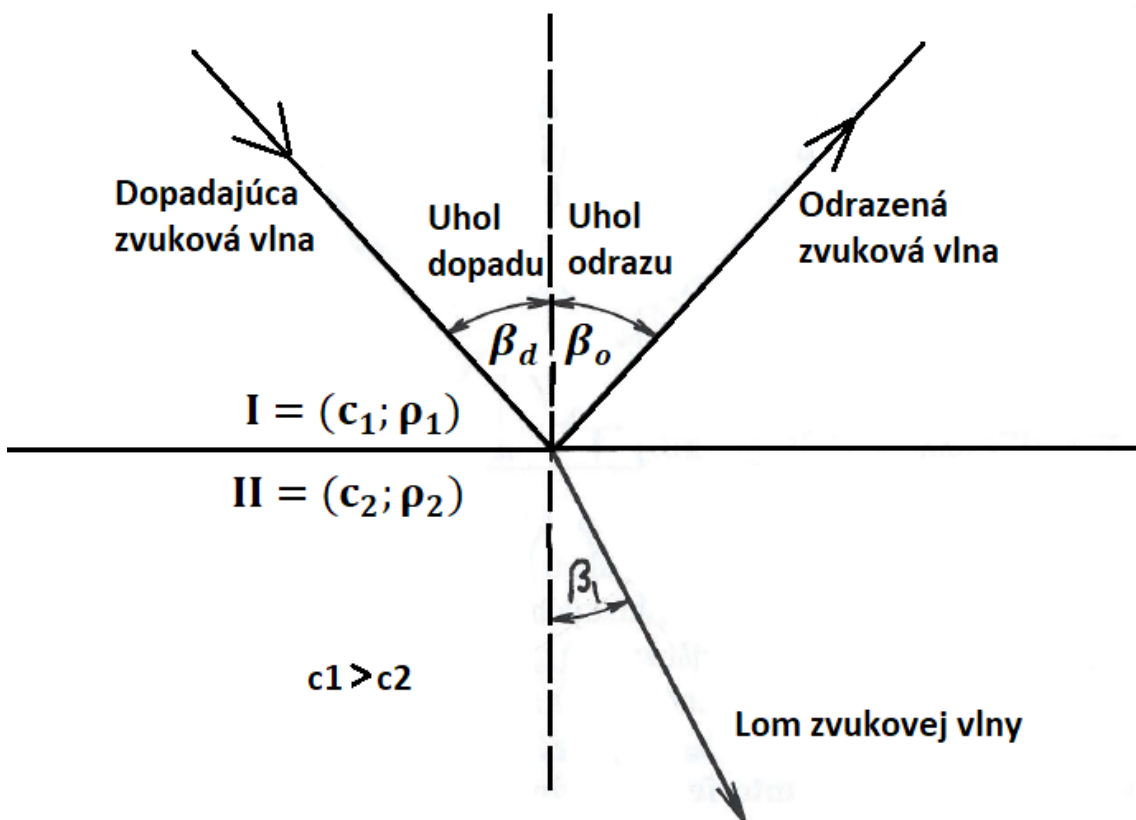


Obr. 8 Konštrukcia odrazených lúčov pomocou zrkadlového obrazu zdroja [13]

Veľkosť odrazu je závislá na vzájomnom pomere vlnovej dĺžky, polomeru zakrivenia a celkových rozmeroch odrážajúcej plochy. Pri popise vzniknutého poľa a pri vykreslení lúčov šíriaceho sa rozruchu je vhodné využiť konštrukciu podľa Huygensovho princípu, podľa ktorého je možné považovať každý bod vlnoplochy za zdroj nového vlnenia šíriaceho sa v guľových vlnoplochách. Guľové vlnoplochy sa skladajú a ich obalová vlnoplocha vytvára v priestore hľadajú novú vlnoplochu. Pri zložitých geometrických tvaroch dochádza k odrazu pri vydutých plochách (konkávnych) ku koncentrácií energie a pri plochách vypuklých (konvexných) naopak k rozptylu energie. Odraz zvuku vyvolá pred prekážkou koncentráciu zvukovej energie, ktorá sa prejaví hlavne poklesom akustického tlaku. Pre jednoduché geometrické tvary prekážok je pre rýchlu informáciu vyznačené relatívne zvýšenie akustického tlaku pred čelom prekážky (obr. 7) v závislosti na uhle dopadu signálu vzhľadom k osi prekážajúceho telesa a na rozmeroch prekážky a vlnovej dĺžky signálu. Naopak za prekážkou vzniká akustický tieň, kde sa na odvrátenom (zadnom) povrchu prekážky prejavuje pokles akustického tlaku približne o toľko dB, o koľko sa akustický tlak zvýšil pred prekážkou. [13]

3.3 LOM ZVUKU

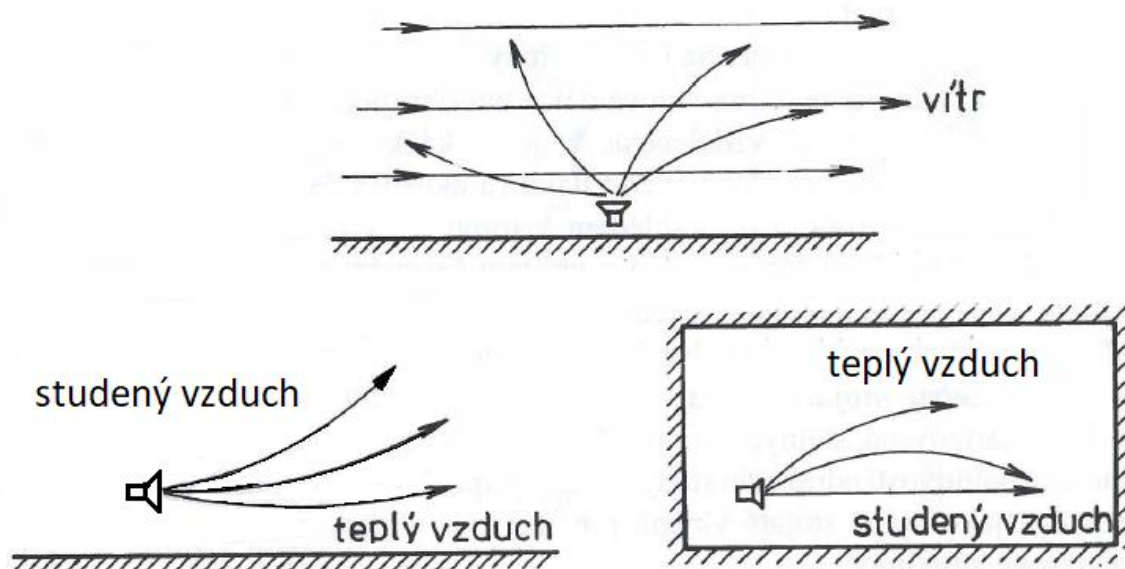
K tomuto javu dochádza v situácii, keď prestupuje lúč zvuku do iného prostredia. Potom platí, že ak je v novom prostredí rýchlosť šírenia väčšia ako v pôvodnom prostredí, lúč zvuku sa lomí v smere od kolmice ku styčnej ploche prostredia (obr. 9). V prípade, že uhol dopadu presiahne určitú hodnotu (tzv. medzný uhol) dochádza k úplnému odrazu, napr. pri prechode zvuku zo vzduchu do látky charakteristickej niekoľkonásobne väčšou rýchlosťou zvuku (napr. voda). K lomu dochádza iba vtedy, ak je dopadajúca vlna takmer úplne kolmá k povrchu nového prostredia. Naopak, ak zvuk vystupuje z takéhoto prostredia do vzduchu, potom aj pri rôznych uhloch dopadu vystupuje zvukový lúč iba s malými odchýlkami od smeru kolmého k rozhraniu.



Obr. 9 Lom a odraz zvukového lúča na rozhraní prostredia [13]

V prostredí s definovaným šmykovým napätím (tuhé látky) sú konštrukcie obrazu podľa po odraze, ohybe alebo lome šíriaceho sa rozruchu a zaistenie smerov šírenia lúčov podstatne komplikovanejšie.

Ako odlišné prostredie sa prejavuje aj rôzne prehriate vrstvy vzduchu a lom zvukového lúča nastáva v smere od chladnejšej vrstvy vzduchu. To sa prejavuje ako vo voľnom prostredí, tak aj v uzavretých sálach. [13]



Obr. 10 Zmena smeru šírenia zvukového lúča lomom za rôznych podmienok [13]

3.4 MECHANIZMUS POHLCOVANIA ZVUKU

Pohlcovanie zvuku znamená nevratnú premenu zvukovej energie na iný druh energie, najčastejšie na teplo. Preto sa spôsoby šírenia a premeny zvukovej energie v pevných látkach delia na premeny vznikajúce poklesom akustického tlaku, premeny vznikajúce za prítomnosti trenia alebo premeny vznikajúce za prítomnosti nepružnej deformácie. [15, 16]

Premeny vznikajúce z dôvodu poklesu akustického tlaku sú založené na prudkom znížení „relaxácií“ okolitého tlaku. V miestach, v ktorých dochádza k zhutneniu častíc, celkový tlak stúpa. Pokiaľ dôjde k zmenšeniu hodnoty akustického tlaku, zmenší sa zároveň aj nazhromaždená potenciálna energia a tým poklesne aj energia zvukovej vlny.

K premene akustickej energie na tepelnú prostredníctvom trenia, dochádza v prípade, keď vlákna a iné častice začnú pôsobením akustickej energie kmitať. Vibrácie následne spôsobujú trenie, pri ktorom dochádza k uvoľneniu tepelnej energie. Často k danému javu dochádza pri pohybe zvukovej energie pozdĺž plochy s podmienkou, aby bola veľkosť danej plochy značne väčšia od vlnovej dĺžky daného lúča. Preto k takejto premene najlepšie poslúži porézny tuhý materiál, ktorého pórovitosť značne zvýši celkový povrch. Ak berieme ako akustický obklad rovné teleso, ako stenu alebo dosku, ktorá je schopná mechanického kmitania v oblasti zvukového spektra, rozkmitá sa pri dopade zvukových vln a časť z dopadajúcich vln sa odrazí späť vo forme akustickej energie. Zbytok mechanickej energie sa vplyvom vnútorného trenia v poréznej štruktúre materiálu mení na tepelnú energiu.

K premene akustickej energie na základe nepružnej deformácie dochádza pri materiáloch, ktoré vykazujú pružnú hysteréziu. Takáto látka sa po deformácii za hranicu jej medzi klzu nevráti do pôvodného stavu, ani po skončení silového pôsobenia. Znamená to, že rozdiel, medzi prácou vynaloženou na deformáciu pružného telesa a prácou potrebnou na vrátenie do pôvodného stavu, možno považovať za úbytok celkovej akustickej energie vplyvom nedokonalnej pružnosti. [15, 16, 19]

3.4.1 ČINITEĽ ZVUKOVEJ POHLTIVOSTI

Schopnosť každého telesa pohlcovať zvukovú energiu sa charakterizuje pomocou činiteľa zvukovej pohltivosti α [-], ktorý je definovaný ako pomer energie I_2 pohltenej určitou plochou a energiou I_0 , ktorá na danú plochu dopadá, čo vyjadruje vzťah:

$$\alpha = \frac{I_2}{I_0} \quad (21)$$

Z daného vzťahu je zrejmé, že činiteľ pohltivosti je bezrozmerná veličina, ktorého veľkosť sa môže pohybovať v intervale 0 až 1. Stena ktorá pohltí všetku dopadajúcu energiu a žiadnu nepremení ani neodrazí, má $\alpha = 1$, zatiaľ čo stena, ktorá odrazí skoro všetko, má tento činiteľ blízky nule.

V podobnom duchu môžeme definovať činiteľ zvukovej odrazivosti β [-], ktorý je definovaný naopak, ako to bolo pri činiteli alfa, ako pomer energie I_1 , čiže odrazenou energiou od určitej plochy a energiou I_0 , čo je celková dopadajúca energia:

$$\beta = \frac{I_1}{I_0} \quad (22)$$

Rovnako ide o bezrozmernú veličinu, ktorá nadobúda hodnoty od 0 do 1, kde 1 je úplné odrazenie všetkej dopadajúcej energie, teda dokonale odrazajúci materiál. Potom je možné na základe platnosti zákona o zachovaní energie povedať, že

$$\alpha + \beta = 1 \quad (23)$$

Činiteľ zvukovej pohltivosti závisí od mnohých faktorov. Hlavným je samozrejme typ materiálu, kde - ako bolo spomenuté v predchádzajúcej kapitole - majú pórovité materiály výhodu, na základe čoho sa ako najčastejší materiál k výrobe pohltivých materiálov využívajú polyuretánové peny, vďaka ich dobrým fyzikálnym a mechanickým vlastnostiam. Dôležitú úlohu však tiež zohráva veľkosť frekvencie dopadajúceho akustického vlnenia ako aj celková hrúbka materiálu. Menší vplyv, ako skôr zmienené faktory, majú teplota, uhol dopadu vlnenia či rozloženie pórov v materiále. [6,1]

3.4.2 NRC KOEFICIENT POHLTIVOSTI MATERIÁLU

NRC (Noise Reduction Coefficient), alebo koeficient zvukovej pohltivosti, je materiálový parameter, ktorý pomocou jednej číslíce charakterizuje daný materiál. Je to bezrozmerná veličina označujúca sa $\overline{\alpha}_n$ [-], ktorý nadobúda hodnoty od 0 do 1, kde 1 je úplne zvukové pohltenie. Táto hodnota sa líši pre každý typ a hrúbku materiálu a najčastejšie je dodávaná výrobcom. Môžeme ju charakterizovať ako priemerné hodnoty koeficientov zvukovej pohltivosti získaných pre dané porovnávané frekvencie 250, 500, 1000, 2000 Hz. Pre presnú charakterizáciu je zrozumiteľnejšie grafické prevedenie, zobrazujúce závislosť jednotlivých frekvencií na koeficiente zvukovej pohltivosti.

$$\overline{\alpha}_n = \frac{\alpha(250) + \alpha(500) + \alpha(1000) + \alpha(2000)}{4} \quad (24)$$

kde: $\alpha(250 - 2000)$ sú hodnoty koeficientov zvukovej pohltivosti pre jednotlivé frekvencie. [17]

4 FREKVENČNÉ PÁSMA

Akustické veličiny sú závislé na frekvencii, no v praxi by nebolo praktické využívať škálovaciu frekvenciu so šírkou 1 Hz. Používajú sa preto frekvenčné pásma, ktoré majú percentuálne konštantnú šírku pásma, ktoré prepúšťa signál vzhľadom ku strednej frekvencii, alebo s konštantnou šírkou pásma, napríklad 100 Hz. V praxi najčastejšie využívané pásma sú jednooktávové a tretinooktávové pásma, pričom oba patria pod kategóriu pásiem s percentuálne konštantnou šírkou pásma. Vďaka týmto metódam získavame jednoduchšie kmitočtové spektrum, bez toho, aby bola celková presnosť spektra príliš zmenená a teda k určeniu celkovej hlučnosti je adekvátna. [15, 16]

4.1 OKTÁVOVÉ FREKVENČNÉ PÁSMO

Pri danom pásme je šírka jednej oktávy charakterizovaná pomocou jej okrajových frekvencií.

$$\frac{f_2}{f_1} = 2 \quad (25)$$

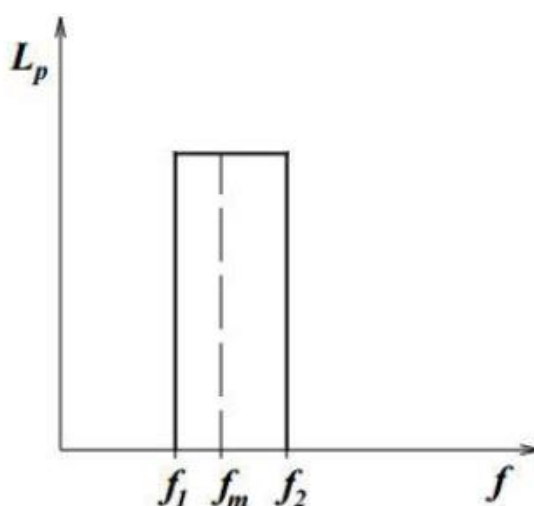
Každú oktávu možno označiť pomocou jej strednej frekvencie f_m , ktorú získame zo vzťahu:

$$f_m = \sqrt{f_1 \cdot f_2} \quad (26)$$

Pretože sú stredné frekvenčné pásma normované, obvykle dochádza k opačnému problému a to k potrebe určiť okrajové frekvencie v danom oktávovom pásme. K určeniu dolnej frekvencie f_1 a hornej f_2 možno využiť nasledujúce vzťahy:

$$f_1 = \frac{f_m}{\sqrt{2}} \quad (27)$$

$$f_2 = f_m \cdot \sqrt{2} \quad (28)$$



Obr.11 Oktávové pásmo [15]

Tab. 2 Stredné akustické oktávové a tretinooktávové frekvencie [1]

| Střední frekvence pásma [Hz] | 1/1 oktávy | 1/3 oktávy | Střední frekvence pásma [Hz] | 1/1 oktávy | 1/3 Oktávy | Střední frekvence pásma [Hz] | 1/1 oktávy | 1/3 oktávy |
|---------------------------------------|---------------|---------------|---------------------------------------|---------------|---------------|---------------------------------------|---------------|---------------|
| 25 | | x | 250 | x | x | 2500 | | x |
| 31,5 | x | x | 315 | | x | 3150 | | x |
| 40 | | x | 400 | | x | 4000 | x | x |
| 50 | | x | 500 | x | x | 5000 | | x |
| 63 | x | x | 630 | | x | 6300 | | x |
| 80 | | x | 800 | | x | 8000 | x | x |
| 100 | | x | 1000 | x | x | 10000 | | x |
| 125 | x | x | 1250 | | x | 12500 | | x |
| 160 | | x | 1600 | | x | 16000 | x | x |
| 200 | | x | 2000 | x | x | 20000 | | x |

V počuteľnom frekvenčnom rozsahu ľudského ucha od 20 Hz do 20 kHz sa nachádza dokopy až 10 oktávových a 30 tretinooktávových pásiem. Ich stredné pásma podliehajú norme, a bližšie vypísané sú v tabuľke 2.

4.2 TRETINOOKTÁVOVÉ PÁSMO

Toto frekvenčné pásmo je podmienené pravidlom, kde musí platiť, že dané jedno frekvenčné pásmo je pravidelne rozdelené na tretiny (v logaritmickej súradniciach). Ak dané frekvencie f_1 a f_4 ohraničujúce zovňajšok jednej oktávy a frekvencie f_2 a f_3 sú krajnými frekvenciami stredu, potom platí nasledujúci vzťah [19]:

$$\log \frac{f_2}{f_1} + \log \frac{f_3}{f_2} + \log \frac{f_4}{f_3} = \log \frac{f_4}{f_1} = \log 2 \quad (29)$$

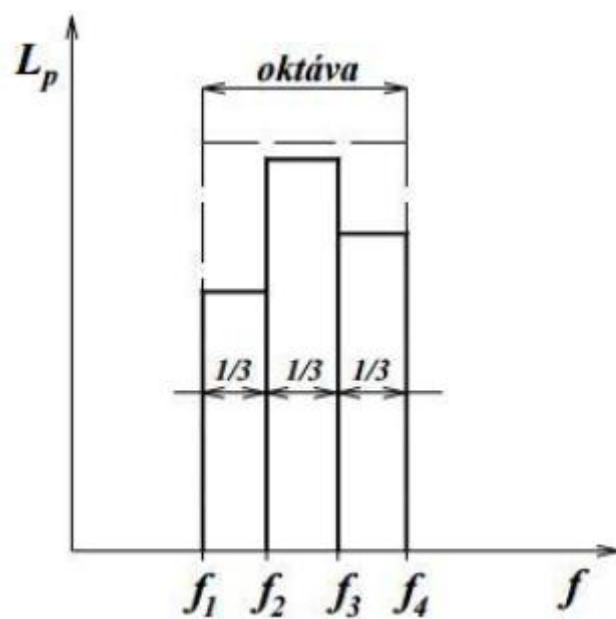
kde platí rovnosť:

$$\frac{f_2}{f_1} = \frac{f_3}{f_2} = \frac{f_4}{f_3} = \sqrt[3]{2} \cong 1,26 \quad (30)$$

Z daného vzťahu teda plynie, že pomer medzi krajnými frekvenciami náhodnej tretinovej oktávy ostáva rovnaký. Pre dané krajné frekvencie daného pásma teda platí rovnaká závislosť na strede, ako tomu bolo pri predchádzajúcom oktávovom pásme, a dostávame ho pomocou vzťahu: [20]

$$f_1 = \frac{f_m}{\sqrt[6]{2}} \quad (31)$$

$$f_2 = f_m * \sqrt[6]{2} \quad (32)$$



Obr. 12 Tretinooktávové pásmo obsiahnuté v jednej oktáve [16]

5 METÓDY MERANIA KOEFICIENTU ZVUKOVEJ POHLTIVOSTI

5.1 DOZVUKOVÁ KOMORA

Vzorka je umiestnená v dozvukovej komore, čo je špeciálna akustická testovacia miestnosť. Vlny s rôznou frekvenciou vstupujú na povrch materiálu z rôznych smerov s rovnakou pravdepodobnosťou a pohltivosť zvuku je určená zmenou doby dozvuku. Získaný koeficient absorpcie zvuku sa nazýva ako dozvukový koeficient absorpcie alebo koeficient absorpcie zvuku náhodného dopadu a vyjadruje sa ako:

$$\bar{\alpha} = \frac{\Delta A}{S_0}, \quad (33)$$

kde $\Delta A = A_2 - A_1$, A_1 je priemerný objem zvukovej pohltivosti pôvodnej dozvukovej komory (objem zvukovej pohltivosti je súčinom koeficientu pohltivosti zvuku a plochou povrchu materiálu), A_2 je priemerný objem pohltivosti zvuku v dozvukovej komore s materiálmi vo vnútri a S_0 je plocha povrchu vzorky. Podľa Sabinovej rovnice má čas dozvuku t v komore nasledujúci vzťah s koeficientom absorpcie zvuku systému :

$$t = \frac{0,161 * V}{A} = \frac{0,161 * V}{\bar{\alpha} * S}, \quad (34)$$

kde t je čas, V je objem priestoru komory, α je systémový koeficient absorpcie zvuku, S je plocha povrchu systému, A je objem absorpcie zvuku systému. Doba dozvuku t_1 (bez vzorky v komore) a t_2 (so vzorkou v komore) je:

$$t_1 = \frac{0,161 * V_1}{\bar{\alpha}_1 * S_1}, \quad (35)$$

$$t_2 = \frac{0,161 * V_2}{\bar{\alpha}_2 * S_2}, \quad (36)$$

kde $\bar{\alpha}_1$ a $\bar{\alpha}_2$ sú koeficienty zvukovej pohltivosti pred a po uložení vzorky do komory. [23]

Doba dozvuku (čas na utlmenie akustickej energie o veľkosti 60 dB) prázdnej komory musí byť urobená pred meraním vzorky, ako aj potom čo sa vzorka umiestni do stredu komory na nasledujúce merania: vzorka má plochu 10^{-12} m^2 , vzdialenosť hranice vzorky od steny komory je aspoň 1 m a zdrojom zvuku je biely šum (tj. energia hluku je rovnaká v rovnakom širokopásmovom pásme v širokom rozsahu frekvencií). Vysielenie a príjem zvuku prechádza cez 1/3 oktávový filter alebo oktávový filter. Treba poznamenať, že je zvolených päť meracích polôh a pre každú polohu sú potrebné tri krivky tlmenia s rovným rozsahom aspoň 35 dB. Okrem toho musí dozvuková komora spĺňať nasledujúce požiadavky: všetky bočné steny komory efektívne odrážajú zvukové vlny a zvukové vlny z rôznych smerov sú takmer rovnaké, aby sa zabezpečilo, že v komore nedochádza k žiadnym veľkým zmenám akustického tlaku okrem oblasti v blízkosti zdroja zvuku. Objem komory V musí byť väčší ako 100 m^3 , maximálna vzdialenosť vedenia musí byť menšia ako $1,9 V^{-3}$ a najnižšia hodnota frekvencie merania je $1000 V^{-3}$. Objem dozvukovej komory na meranie akustického výkonu zo zdroja hluku musí byť viac ako 200-krát väčší ako objem zdroja hluku. Používajú sa jedinečné nepravidelné steny a steny sú glazované (leštený betón, glazované dlaždice, maľované), aby čo najviac odrážali zvukové vlny. V dozvukovej komore sa môže vytvoriť difúzne zvukové pole, ktoré poskytne náhodný dopad vzorky. Dozvuková komora je použiteľná na meranie koeficientu absorpcie

zvuku s náhodnými dopadmi. Náhodné výskyty zvukových vln sú blízke praktickým podmienkam a preto je táto metóda lepšia ako ostatné metódy. Pracovný priestor je však oveľa väčší ako zariadenie so stojatou vlnou, ktorý je vhodnejší na laboratórne meranie. [23]



Obr.13 Dozvuková komora [24]

5.2 IMPEDANČNÁ TRUBICA

Zariadenie, ktoré je priamo navrhnuté k výpočtu akustických vlastností vzorky sa tiež môže nazývať ako Kundtova trubica alebo interferometer. Impedančná trubica je v porovnaní s vlnovou dĺžkou malá a očakáva sa od nej šírenie zvuku rovinatej vlny v smere osi.

Pre skúmanie vlastností danej frekvencie je nevyhnutné, aby mala trubica dostatočnú dĺžku, ktorá musí byť minimálne rovnaká ako veľkosť rovinatej vlny danej frekvencie, medzi zdrojom umiestenom na jednom konci a skúmanou vzorkou na opačnom konci. Pre samotné zariadenie je nevyhnutné, aby spĺňalo predpoklad hladkého, hrubostenného povrchu. Táto metóda sa využíva predovšetkým na skúmanie dopadu rovinatej vlny na skúmaný materiál, kde sa predovšetkým vyšetruje jeho pohltivosť, ale je možné zistiť aj činiteľ odrazu, povrchovej impedancie či admitancie materiálu.

Absorpčný koeficient alebo činiteľ pohltivosti, jeho určenie a definíciu meracieho zariadenia presne popisuje norma ČSN ISO 10534-2 a to metódu určenia pomocou prenosovej funkcie a norma ČSN ISO 10534-1, ktorá popisuje možnosť zistenia činiteľa pohltivosti pomocou metódy stojatej vlny. [18, 19, 21]

5.2.1 METÓDA POMERU STOJATEJ VLNY

Táto metóda je podrobne popísaná v norme ČSN ISO 10534-1, v základe sa opiera o skutočnosť, že v skúšobnom úseku trubice existuje iba rovinná dopadajúca vlna a vlna

odrazená, čiže dochádza k vzniku stojatého vlnenia spojením daných dvoch vln s rovnakou frekvenciou. Šírenie sa predpokladá rovnomerne s osou trubice. Vzniku iných tvarov vlny (vyšších módov) je nutné sa vyvarovať. Ďalej sa predpokladá, že dané vlnenie sa v trubici šíri bez útlmu. Na poslednom tlmení, spôsobenom viskóznymi a tepelnými stratami na stenách trubice, je možné použiť korekciu. Metódy pre dané korekcie sú uvedené v prílohe. Pokiaľ dôjde k situácii, keď majú odrazené a dopadajúce vlnenie rovnakú amplitúdu, hovoríme o tzv. úplnom stojatom vlnení. Hlavná oblasť záujmu pri skúmaní daného vlnenia sú jeho tlakové minimá a tlakové maximá, ktoré sa periodicky opakujú a teda sa z nich dá určiť napríklad vlnová dĺžka, potrebná k výpočtu činiteľa povrchovej zvukovej impedancie a admitancie. Ak sa odrazená vlna od dopadajúcej líši vo svojej amplitúde, no frekvencia je rovnaká, hovoríme o tzv. utlmenom stojatom vlnení. [18, 23]

Výpočet koeficientu pohltivosti popisuje nasledujúca rovnica:

$$\alpha = \frac{4 \cdot 10^{\frac{\Delta L}{20}}}{(10^{\frac{\Delta L}{20}} + 1)^2}, \quad (37)$$

kde ΔL [dB] je rozdiel medzi prvým tlakovým maximom a prvým tlakovým minimom. [18]

5.2.2 METÓDA PRENOSOVEJ FUNKCIE

Túto metódu podrobne popisuje norma ČSN ISO 10534-2. Daná metóda sa často označuje aj ako dvojmikrofónová, kde sú mikrofóny za sebou vstavané v pevných polohách na vrchu trubice. Podobne ako pri metóde pomeru stojatej vlny, sa nachádza reproduktor budiaci signál alebo šum o danej frekvencii na jednom konci trubice a skúmaný materiál, dotlačený pevnou zadnou stenou bez vzduchovej medzery, na druhom konci. Pomocou dvoch mikrofónov sa určuje hodnota akustického tlaku v blízkosti vzorky. Určujeme komplexnú akustickú prenosovú funkciu dvoch mikrofónových signálov, pomocou ktorej dostávame komplexný činiteľ zvukovej pohltivosti, odrazu r a akustickej impedancie. Táto metóda je oproti predchádzajúcej metóde rýchlejšia, ale náročnejšia na software a nasledovné spracovanie. Taktiež požaduje zasiahnutie do celistvosti trubice, ktoré má vplyv na potenciálny návrat k metóde stojatého vlnenia. Meranie pomocou prenosovej funkcie sa štandardne prevádza s dvoma mikrofónmi, ale je možné využiť aj štvormikrofónovú metódu, kde sú ďalšie dva mikrofóny uložené za skúmanou vzorkou, k presnejšiemu určeniu komplexnej prenosovej funkcie. [21, 23]

Činiteľ zvukovej pohltivosti sa zistí z nasledujúceho vzťahu:

$$\alpha = 1 - |r|^2 = 1 - r_r^2 - r_i^2 \quad (38)$$

kde r je činiteľ odrazu, r_r je jeho reálna zložka a r_i je imaginárna zložka [23].



Obr.14 Viac mikrofónová, profesionálna impedančná trubica od firmy Brüel & Kjær, určená pre široko pásmové frekvenčné merania [22]

5.3 MECHANIZMY ABSORPCIE ZVUKU PORÉZNYCH MATERIÁLOV

Jednou z dominantných tried materiálov, ktorých hlavná vlastnosť je pohlcovanie zvuku sú porézne materiály. Zahŕňa všetky materiály, v ktorých sa zvuk šíri sieťou prepojených pórov takým spôsobom, že sa akustická energia premieňa na teplo najmä v dôsledku účinkov viskózneho hraničnej vrstvy. Aby bola absorpcia účinná, vzduch by mal byť schopný prechádzať materiálom. Vzduch je viskózna tekutina, a preto sa zvuková energia rozptýli trením o steny pórov. Navyše nízke zmeny počas šírenia zvuku cez nepravidelné póry vedú k strate hybnosti. Okrem viskózných účinkov dochádza k stratám v dôsledku vedenia tepla zo vzduchu do materiálu absorbéra. Porézne absorbéry sú účinné len pri stredných až vysokých frekvenciách. Ucho je však pri týchto frekvenciách najcitlivejšie, a preto je ich efekt zníženia hluku citelný. Zníženie hluku sa maximalizuje, ak sa dosiahne maximálna rýchlosť častíc v poréznom materiáli, z čoho vyplýva, že na rozšírenie schopnosti poréznych materiálov na zníženie hluku na nižšie frekvencie je potrebné zvýšiť ich hrúbku. Ďalšou technikou na rozšírenie na nižšie frekvencie s danou hrúbkou absorbentu je umiestniť porézny materiál vo vzdialenosti štvrtiny vlnovej dĺžky od pevného konca, napr. od pevnej steny.

Interakcia zvuku a porézneho materiálu sa riadi štruktúrnym (geometrickým) rozložením materiálu. Niektoré z materiálových vlastností, známych ako mikroštruktúrne vlastnosti, ktoré sú úzko prepojené s objemovými vlastnosťami porézneho materiálu. Mikroštruktúrne vlastnosti sa používajú ako konštrukčné parametre pri navrhovaní porézneho absorbéra so špecifickými objemovými vlastnosťami. Kľúčovými parametrami pre vývoj alebo modelovanie sú nízky odpor a pórovitosť. [25]

PRIETOKOVÝ ODPOR (FLOW RESISTIVITY)

$$\sigma = \Delta p \cdot v_{fl} \cdot d, \quad (39)$$

kde v_{fl} je stredná stabilná nízka rýchlosť, Δp je výsledný pokles tlaku a d je hrúbka absorbentu, $\sigma = 1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \text{ s} = 1 \text{ ray} \cdot \text{m}^{-1}$, udáva mieru nízkeho odporu vzduchu, aký má porézny absorbér. Poskytuje určitú predstavu o tom, koľko zvukovej energie sa môže stratiť v dôsledku účinkov hraničnej vrstvy v materiále. Porézny materiál by mal mať dostatočne nízky odpor, aby zvuk prenikol do absorbentu, ale nie príliš nízky, inak nedochádza k rozptylu. [25]

PÓROVITOSŤ ε udáva mieru množstva voľného objemu vzduchu v absorbéri, ktorý je k dispozícii na šírenie zvukových vln. Je to pomer celkového objemu pórov k celkovému objemu absorbentu. Do celkového objemu pórov by však mali byť zahrnuté iba otvorené spojené póry, ktoré umožňujú prítomnosť malého množstva vzduchu. Pre mnohé dobré porézne absorbenty je možné predpokladať pórovitosť $\varepsilon \approx 1$ (bežné sú hodnoty blízke 0,98). Je potrebné vedieť, že nízky odpor súvisí s empirickými vzťahmi, buď s objemovou hustotou, ρ_m , alebo s pórovitosťou vláknitého porézneho materiálu,

$$\varepsilon = \rho_m / \rho_f, \quad (40)$$

kde ρ_f je hustota vlákien. Hoci pórovitosť a nízky merný odpor sú najdôležitejšie parametre pri určovaní absorpcie zvuku, dôležité môžu byť ďalšie sekundárne parametre, ako je tvarový faktor a tortuozita. [25]

TORTUOZITA T_s je definovaná ako pomer medzi cestou zvuku cez póry a hrúbkou porézneho materiálu. Je to parameter predstavujúci, ako orientácia pórov vzhľadom k dopadajúcej vlne ovplyvňuje šírenie zvuku. Vzduch, ktorý je nútený sledovať kľukatú dráhu, trpí zrýchleniami, ktoré spôsobujú prenos hybnosti zo vzduchu na materiál. Čiastočne udáva stupeň zložitosti cesty zvuku cez materiál; čím zložitejšia je cesta šírenia, tým vyššia je absorpcia. [25]

Charakteristické dĺžky sú parametre, ktoré sa vzťahujú na geometrické charakteristiky pórov. Póry majú zvyčajne komplikované tvary a preto sú potrebné aspoň dva geometrické parametre (dĺžky) na vyjadrenie tvarového vplyvu na šírenie zvuku a následne pohltivosť. Rôzne tvary pórov majú rôzne povrchové plochy, a preto majú rôzne tepelné a viskózne účinky. Efektívna hustota skutočných poréznych absorbérov je určená najmä časťami pórov s menšími prierezmi, zatiaľ čo objemový modul je skôr určený väčšími plochami prierezu.

Keď sú známe mikroštruktúralne vlastnosti, je možné pomocou vhodných modelov vypočítať charakteristickú akustickú impedanciu Z_c a charakteristický vlnový počet šírenia K_c . Fenomenologické teoretické modely potrebujú poznať viac mikroštruktúrálnych vlastností ako makroskopické empirické modely, ktoré berú do úvahy makroskopický pohľad na šírenie, ignorujúc detaily šírenia cez každý pór. To je dôvod, prečo sú tie druhé, podobne ako model Delany a Bazley, obľúbenejšie. [25]

6 MERACIE ZARIADENIE PODĽA NORMY ČSN ISO 10534-1

Meracie zariadenie sa skladá z impedančnej trubice, držiaka skúmanej vzorky, mikrofónovej sondy, zariadením pre uloženie a pohyb mikrofónovej sondy, zariadenie pre zaznamenávanie a spracovanie signálu, reproduktor, generátor signálu, teplomera a pokiaľ je to možné, pohyblivým uzáverom impedančnej trubice.

Meracie zariadenie je pred používaním potrebné skontrolovať radou skúšok, ktoré pomáhajú vylúčiť zdroje chýb a splniť minimálne požiadavky pre správnu funkciu. Postupy týchto skúšok sú podrobne popísané v norme ISO 10534-1 v prílohe B. [18]

6.1 IMPEDANČNÁ TRUBICA

Impedančná trubica musí byť rovná, s konštantným prierezom, s tuhými, hladkými, neporéznymi stenami bez dier alebo štrbín na skúšobnom úseku. Steny by mali byť hrubostenné a dostatočne pevné aby nedochádzalo k rozkmitaniu zvukovým signálom a nevznikali nechcené rezonančné frekvencie, ktoré by mohli negatívne ovplyvniť meranie. Pre kovové trubice s kruhovým prierezom sa odporúča hrúbka stien približne 5 % z pričného rozmeru, pre trubice pravouhlého prierezu by mala byť splnená požiadavka na 10 % z daného prierezu. Steny trubice z betónu musia byť povrchovo upravené hladkou, pevnou a vysoko príľnavou vrstvou. To isté platí aj pre trubice z dreva, tie by ešte dodatočne mali byť spevnené a utlmené vonkajším plášťom z oceľového alebo oloveného plechu.

Pracovný kmitočtový rozsah ($f_d < f < f_h$) impedančnej trubice je určený jej dĺžkou a pričným prierezom. Aby bolo možné zaoberať sa dvomi tlakovými minimami aj pri nepriaznivých fázach odrazu, musí byť dĺžka skúšobného úseku trubice na dolnom medznom kmitočte f_d .

$$l \geq \frac{3\lambda_0}{4}, \quad (41)$$

kde l je dĺžka pracovného úseku impedančnej trubice [m] a λ_0 [m] je vlnová dĺžka danej frekvencie. Reproduktor budí okrem rovinatej vlny aj vlny vyšších módov. Vlny pod nižším medzným kmitočtom vymiznú podľa normy 10534-1 do vzdialenosti približne troch priemerov kruhovej trubice alebo trojnásobku maximálneho pričného rozmeru pravouhlej trubice. Skúšobné vzorky s laterálne premennými akustickými vlastnosťami (napr. rezonátory) prispievajú vlnami vyšších módov k odrazenej vlne.

Skúšobný úsek impedančnej trubice nesmie zahŕňať žiadnu z oboch oblastí možného výskytu vln vyšších módov, preto je dĺžka trubice l stanovená vzťahom k dolnému medznému kmitočtu f_d pracovného kmitočtového rozsahu podľa podmienky:

$$l \geq \frac{250}{f} + 3d, \quad (42)$$

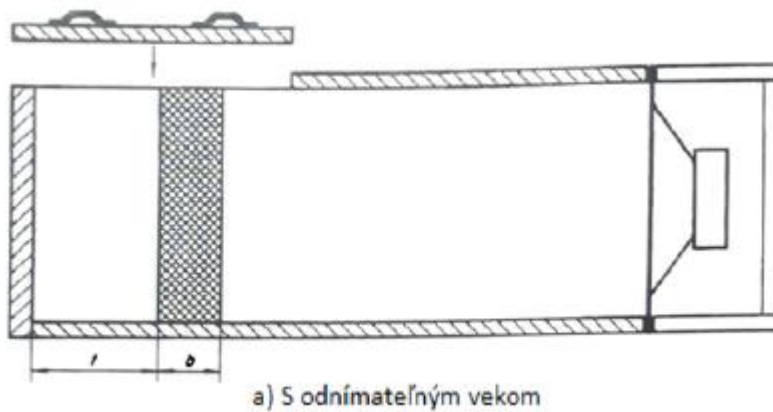
kde l je dĺžka trubice [m], f je buďený kmitočet [Hz] a d je maximálny vnútorný priemer [m].

Pre hornú medzu f_h kmitočtového rozsahu pre trubicu s kruhovým prierezom je daná podmienka [18]:

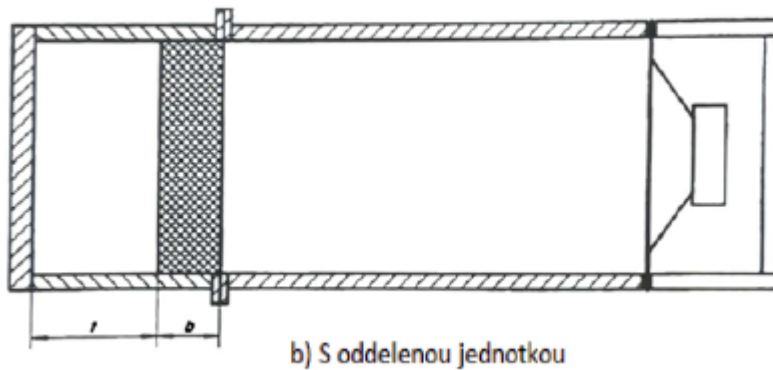
$$d \leq 0.58 * \lambda_0 \quad \text{a} \quad f_h d \leq 200 \quad (43)$$

6.2 DRŽIAK SKÚMANEJ VZORKY

Držiak vzorky slúži k upevneniu vzorky v impedančnej trubici. Jeho dĺžka musí byť dostatočne veľká, aby bola splnená podmienka pre dosiahnutie dostatočne veľkej vzduchovej medzery medzi piestom a skúmaným materiálom a to minimálne o veľkosti $s \geq \frac{\lambda}{4}$. Sú známe dva možné riešenia upevnenia vzorky v impedančnej trubici. A to držiak s otvorom pre umiestnenie vzorky alebo s celou odnímateľnou jednotkou, oba typy bližšie popisuje norma 10534-1.



Obr.15 Držiak vzorky s odnímateľným vekom [18]



Obr.16 Držiak vzorky typu s oddelenou jednotkou [18]

Keďže držiak slúži taktiež ako zariadenie s tuhým uzáverom, ktoré je nevyhnutné pre radu skúšok overujúcich správnu funkciu, respektíve určenie vlnovej dĺžky pre rôzne frekvencie, je nevyhnutné, aby bola jeho zadná strana hrubá aspoň 2 cm. Ďalšia požiadavka je kladená na ideálne utesnenie daného úseku, odporúča sa vazelína. Rozdiel medzi rozmermi prierezu držiaka a tela trubice by nemal prevyšovať 0,2 %. [18]

6.3 MIKROFÓN

Pohyblivý mikrofón slúži k snímaniu obrazu stojatej vlny v impedančnej trubici, k zisteniu polôh tlakových miním a amplitúd (alebo hladín daných hodnôt v logaritmickom merítke) akustického tlaku v maximách a minimách stojatej vlny. Mikrofón sa pohybuje buď vo vnútri impedančnej trubice, v takom prípade je uložený v sondážnej trubici s otvorom pre snímanie zvuku, alebo sa pohybuje vo vnútri samotný mikrofón bez uloženia. Zmenšenie prierezu impedančnej trubice v dôsledku sondy alebo iných podpôr nesmie prekročiť 5 % celkového prierezu. Trubka sondy musí byť z kovového materiálu a jej steny musia byť dostatočne hrubé aby nedochádzalo k preniknutiu zvuku do trubice. Vo vodorovnej trubici musí byť zabezpečená podpora, aby nedochádzalo k jej prehýbaniu. Podpora by sa nemala nachádzať v blízkosti otvoru pre snímanie zvuku. V prípade zvislej trubice, kde je vzorka umiestnená na dne, môže mikrofón voľne visieť. Zariadenie snímajúce polohu mikrofónovej sondy by malo merať s presnosťou ± 5 mm. Pre nízke kmitočty od 300 Hz po 50 Hz, môže presnosť lineárne klesať a to až po maximálnu dovolenú toleranciu ± 2 mm. [18]

6.4 GENERÁTOR SIGNÁLU

Generátor signálu je zložený z generátora sínusových kmitov, výkonového zosilňovača a ak je to možné, aj z čítačky kmitov. Presnosť naladenia a čítania musí byť minimálne 2 %. Budenie vyšších harmonických zložiek generátorom signálu, výkonovým zosilňovačom a reproduktorom musí byť také, aby ho bolo možné odfiltrovať. [18]

6.5 ZARIADENIE PRE SPRACOVANIE SIGNÁLU

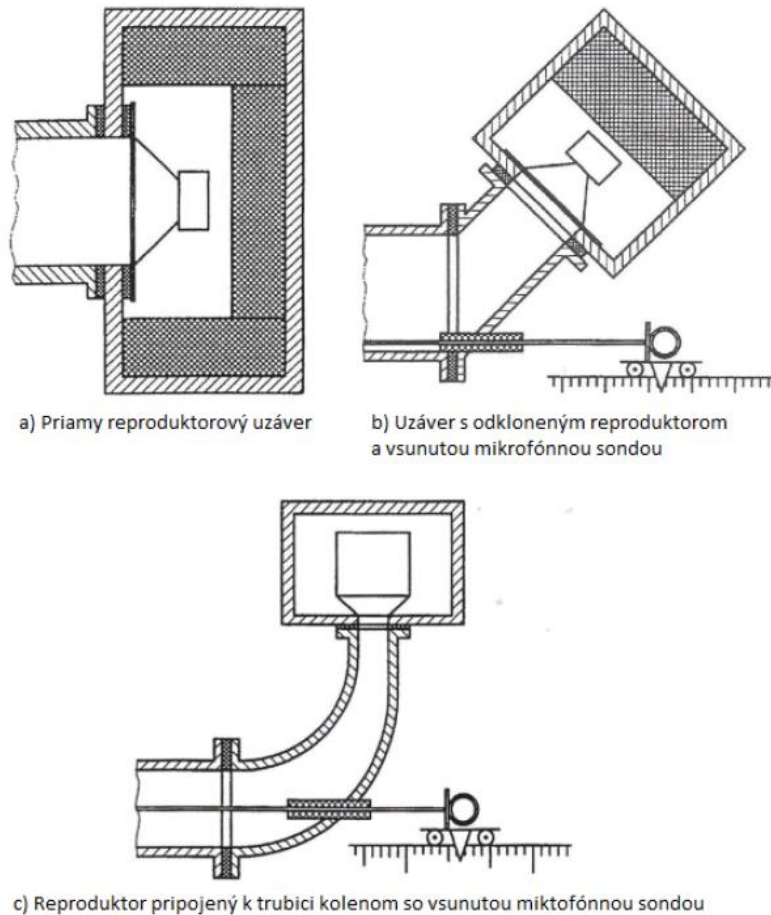
Zariadenie pre spracovanie signálu je zložené zo zosilňovača, filtra, meradla akustického tlaku alebo hladiny akustického tlaku a plynulého zapisovača obrazca stojatej vlny. Dynamický rozsah by mal predstavovať minimálne 60 dB. Nelinearity, nestability, chyby odčítania a teplotná citlivosť by mali byť menšie ako 0,2 dB. Ďalej je dôležité, aby po umiestnení mikrofónu do tlakového maxima, bol pomocou filtra potlačený šum a obsah harmonických signálov, ale aspoň 50 dB pod jeho základný kmitočet. [18]

6.6 TEPLOMER

Keďže rýchlosť šírenia zvuku c_0 a vlnová dĺžka λ_0 sú veličiny závislé od teploty, je potrebné ju monitorovať a udržiavať počas celého merania rovnakú, s toleranciou ± 1 K. [18]

6.7 REPRODUKTOR

Membránový reproduktor (alebo tlakový pre vysoké frekvencie s vlnovodom) predstavuje uzáver impedančnej trubice na opačnom konci trubice ako je umiestnená skúmaná vzorka. Plocha membránového mikrofónu (alebo ústie vlnovodu) musí prekryvať aspoň minimálne dve tretiny prierezu impedančnej trubice. Os reproduktora môže byť s osou trubice buď zhodná (*obr. 17a*) alebo od nej odklonená (*obr. 17b*), alebo môže prechádzať do trubice cez koleno (*obr. 17c*) a uľahčiť tak zavedenie trubkovej sondy. [18]

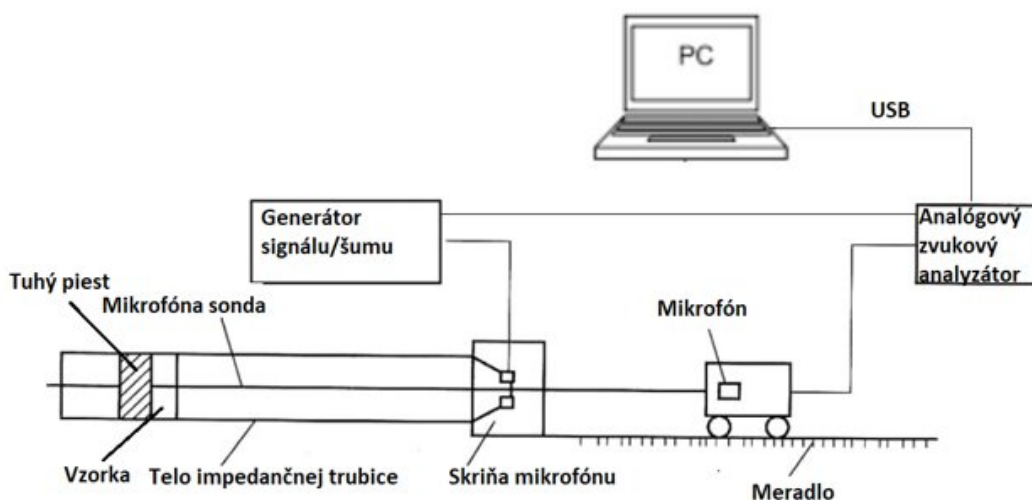


Obr.17 a,b,c Rôzne možnosti umiestnenia reproduktora a vedenia mikrofónovej sondy [18]

Aby sa zabránilo priamemu prenosu zvuku do mikrofónu, musí byť reproduktor umiestnený do zvukovo odizolovanej skrine. Ďalej je dôležité, aby impedančná skriňa bola pomocou pružného tesnenia odizolovaná od reproduktorovej trubice a koša reproduktora, aby sa zabránilo budeniu impedančnej trubice zvukom šíreným konštrukciou. Z dôvodu zabráneniu vzniku a šírenia rezonancie valca vplyvom vysokej mechanickej impedancie mikrofónovej membrány, je možné vo vnútri trubice pred reproduktorom použiť porézny absorpčný obklad. [18]

7 NÁVRH A SCHÉMA MERACIEHO REŤAZCU

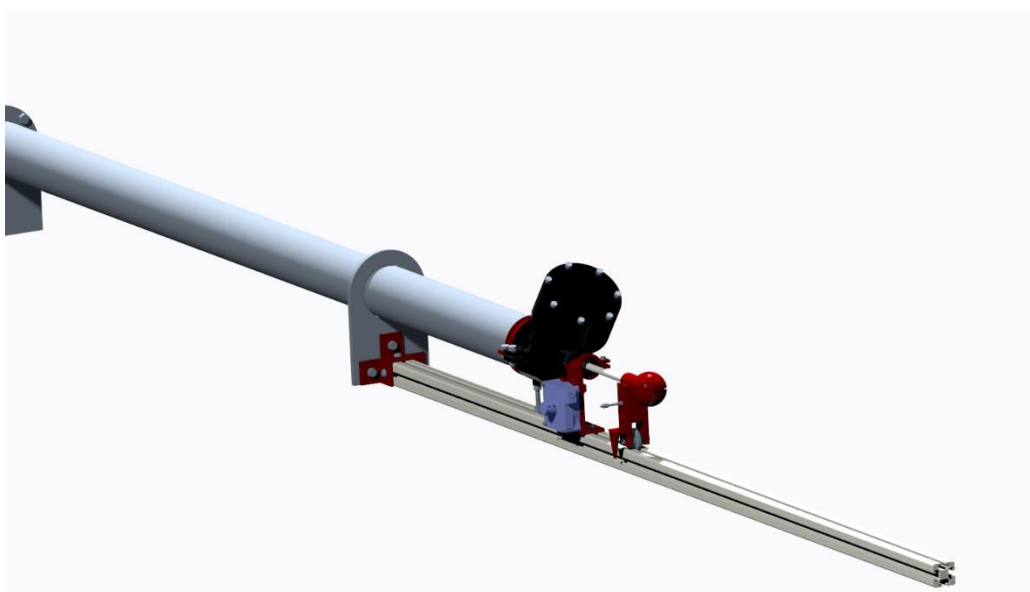
Meracie zariadenie popísané v tejto kapitole, bolo vytvorené ako predmet záverečnej diplomovej práce Ing. Julianou Vozárovou. Meracie zariadenie bolo prevzaté a následne upravené radou vylepšení, ktorých zámerom bolo presnejšie, jednoduchšie a sofistikovanejšie meranie na prevzatej impedančnej trubici.



Obr.18 Schéma meracieho reťazca, prekreslené z [19]

7.1 NÁVRH MERACIEHO ZARIADENIA

Celé zariadenie bolo najprv navrhnuté a vymodelované v 3D modelovacom prostredí programu PTC creo, kde sa po sérii konzultácií a úprav dosiahla finálna forma, ktorá bola následne zrealizovaná. Model upravenej sústavy možno vidieť na obr. 26.



Obr.26 Model meracieho zariadenia v prostredí PTC creo

Meracie zariadenie bolo podrobené rade skúšok, ako pomer stojatej vlny, citlivostná analýza mikrofónu či odstup hlukového pozadia, aby bolo zaručené jeho správne fungovanie. Následne bola vykonaná štruktúrna modálna analýza a harmonicko-akustická analýza v programe Ansys workbench. Cieľom týchto analýz bolo určenie potenciálne nebezpečných frekvencií, ktoré by mohli nepriaznivo ovplyvniť merania. Účelom harmonickej analýza bola simulácia merania absorpčného koeficientu a touto formou nezávisle overiť správnu funkciu zariadenia.

7.1.1 TELO IMPEDANČNEJ TRUBICE

Prevzatá impedančná trubica upravovaná v rámci tejto diplomovej práce, bola vyhotovená ako téma záverečnej práce pani Ing. Juliany Vozárovej.

Pre telo trubice bola zvolená oceľová rúra valcovaná za tepla bezšvového zvaru o triede S235JRH. Rozmery udávané dodávateľom Železiarne Podbrezová a.s sú 88,9 x 6,3, čo znamená že vnútorný priemer je 76,3 mm a dĺžka pracovného úseku je 2000 mm. Pôvodná cena za 3000 mm takejto rúry bola 47,69 €. [22]

Pracovný frekvenčný rozsah

Ako bolo uvedené v kapitole 3.1, o bližšej špecifikácii impedančnej trubice danej normou ČSN 10534-1, je pracovný frekvenčný rozsah limitovaný rozmermi prierezu a dĺžky pracovného úseku trubice. Dolnú hranicu pracovného kmitočtu f_d , vypočítame podľa vzťahov zadaných normou, pričom za d doplníme vnútorný priemer trubice čiže 76,3 mm a za pracovný úsek l doplníme 2000 mm. Hodnota spodného pracovného kmitočtu potom bude nasledovná:

$$f_d \geq \frac{250}{l - 3d} \quad (44)$$

$$f_d \geq \frac{250}{2000 - 3 * 76,3} * 1000$$

$$f_d \geq 141,16 \text{ [Hz]}$$

Horný pracovný kmitočet f_h sa určí dosadením do vzťahu 41:

$$f_h \leq \frac{200}{d} \quad (45)$$

$$f_h \leq \frac{200}{76,3} * 1000$$

$$f_h \leq 2621,23 \text{ [Hz]}$$

Vypočítaný frekvenčný rozsah, pre ktorý je naša impedančná trubica schopná vytvoriť rovinnú vlnu s minimálne dvoma minimami platí pre frekvencie 141 Hz až 26 621 Hz. Keďže naše výpočty prebiehali na kmitočtoch tretinooktávového pásma, pracovali sme s frekvenciami od 160 Hz do 2 500 Hz. [22]

7.1.2 DRŽIAK SKÚŠOBNEJ VZORKY

Pre držiak skúšobnej vzorky bola zvolená rovnaká trubica, ktorá bola použitá ako telo impedančnej trubice, teda oceľ S235JRH, ktorá má rovnaké vlastnosti a jej dĺžka predstavuje 1 m.

Držiak bol k telu trubice pripevnený pomocou prírub o hrúbke 1 cm, ktoré boli k sebe stiahnuté pomocou štyroch skrutiek M10. Na konci držiaka sa nachádza pevná stena, taktiež o hrúbke 1 cm, cez ktorú je vedená závitová tyč o dĺžke 1 m, slúžiaca k manipulácii vymedzovacieho piestu.

Piest je vybavený o-krúžkom k dosiahnutiu čo najlepšieho tesnenia, keďže tento piest má v rade skúšok funkciu pevného uzáveru a je od neho vyžadovaná úplná tlaková izolácia. Pre hladký posun piesta bol o-krúžok namazaný vazelínou a k vymedzeniu jeho pohybu iba na axiálny, bola skrutka a piestik uložené v radiálnom guľčikovom ložisku. [22]



Obr.19 Model a skutočný vyrobený piest [25]

7.2 MIKROFÓN A JEHO ULOŽENIE

Pre účely zaznamenávania akustického tlaku vo vnútri trubice, bolo potrebné zvoliť vhodný mikrofón, ktorý by svojimi rozmermi a vlastnosťami spĺňal požiadavky kladené normou 10534-1. Pre tento účel bol zvolený mikrofón od firmy iSEMcon model EMM-7101-CHTB, ktorého rozmery sú: priemer 7 mm a dĺžka 101 mm. Jeho citlivosť je 6 mV/Pa a jeho dynamický rozsah sa pohybuje v intervale od 30 dB do 125 dB. Všetky ďalšie informácie ktoré pre nás už neboli tak dôležité ako vyššie zmienené, sú voľne dostupné online.

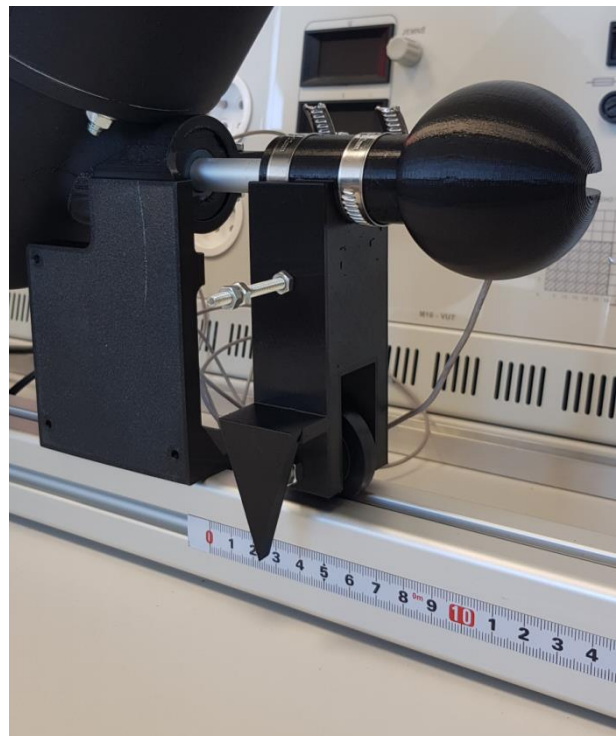
Mikrofón je uložený na konci mikrofónovej sondy, pre ktorú bola zvolená dutá hliníková tyč o priemere 12 mm a dĺžke 2 m, a ktorej úlohou je pohyb mikrofónu vo vnútri trubice. Kvôli svojim rozmerom však dochádzalo k javu, kedy si mikrofón neudržiaval svoju polohu, ktorá bola presne stanovená a to v akustickom strede trubice. Preto bolo nevyhnutné túto sondu

podoprieť, aby bol jej pohyb vo vnútri trubice vždy v rovnakej polohe. K tomuto účelu bol vymodelovaný trojramenný unášač s ramenami posunutými o 120° , ktorý možno vidieť na *obr. 20*.



Obr. 20 Trojramenný unášač mikrofónovej sondy

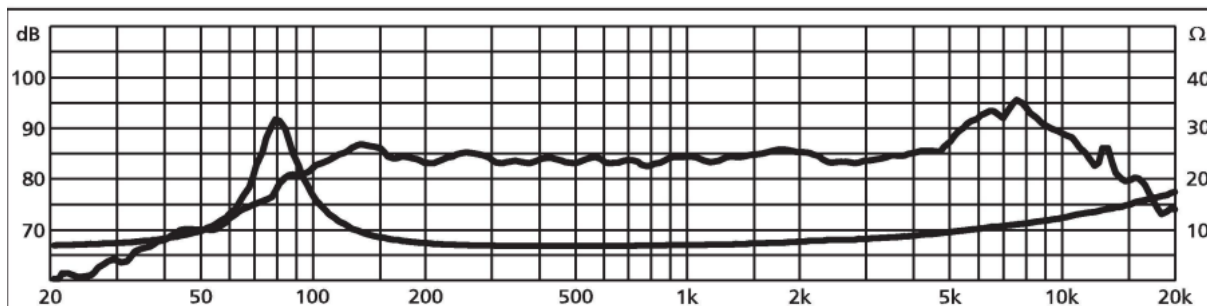
Na druhej strane, bolo naopak potrebné sledovať aktuálnu polohu mikrofónovej sondy, aby bolo možné presne určiť jej polohu, a na jej základe určiť polohu tlakového minima prípadne maxima. Účelom tohto merania je taktiež kontrola a nezávislé určenie polohy od nášho odporového snímača. K uloženiu mikrofónovej sondy na druhom konci trubice poslužil novo vymodelovaný držiak, ku ktorému bola pripojená cez skrutku M6x30 silikónová kladka s radiálnym ložiskom, aby bola umožnená plynulá manipulácia a pohyb v drážke hliníkového profilu o rozmere 40x40 mm. Hodnotu aktuálnej polohy je možné odčítať z nalepeného metra o veľkosti 2 m. Zostavu uloženie mikrofónovej sondy na hliníkovom profile možno vidieť na *obr. 21*. Ďalšou funkciou držiaka zobrazeného na *obr. 21* je vedenie mikrofónového kábla a možnosť uchytenia lanka z nášho snímaču polohy. Výkresová dokumentácia ku všetkým komponentom vytvoreným a pridaným na našu trubicu, je dostupná v prílohe.



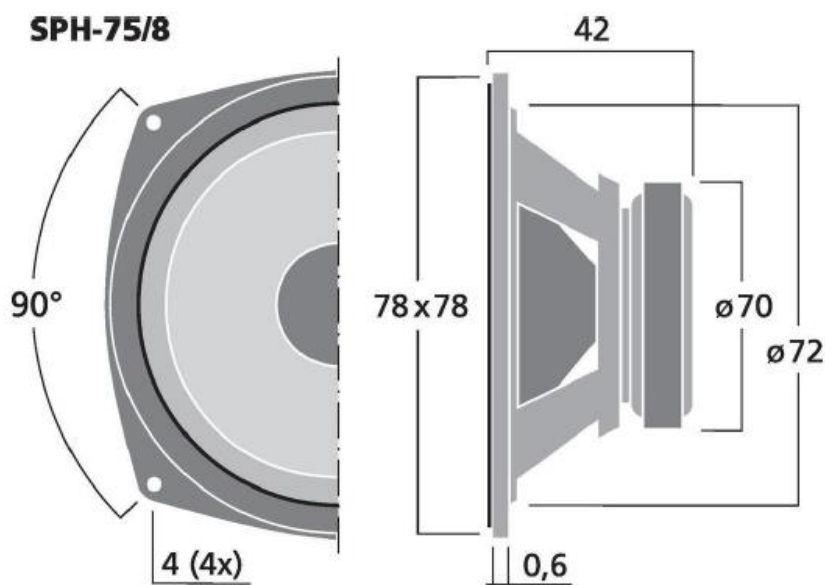
Obr.21 Uloženie a vedenie mikrofónovej sondy na druhom konci trubice

7.3 REPRODUKTOR

Uloženie reproduktora, ako zdroja kmitov pre našu trubicu, bolo zvolené pomocou kolena ako je schematicky ukázané na *obr. 15c*. Pre náš účel bol zvolený stredno-basový reproduktor ManacorSPH-75/8 o výkone 15 W a impedancii 8 Ω . Jeho rezonančná frekvencia je 85 Hz a maximálna frekvencia podľa výrobcu dosahuje 16 kHz [22,30].



Obr.22 Závislosť hladiny akustického tlaku na frekvencii pre reproduktor SPH-75/8 [27]



Obr. 23 Rozmery reproduktora Monacor SPH-75/8 [27]

7.4 TEPLOMER

Ako bolo spomenuté v kapitole 5.6 teplota má schopnosť výrazne ovplyvniť a vnieť do výsledkov určitú nepresnosť, je potrebné tento potenciálne dôležitý faktor sledovať a patrične zaznamenať. K tomuto účelu bol v spolupráci s Ing. Jiřím Hejčíkom Ph.D. skonštruovaný odporový termočlánok typu T, ktorý s presnosťou na ± 1 K dovolil neinvazívne sledovať teplotu vo vnútri našej trubice. Je to zároveň dôležitý faktor, umožňujúci znovu opakovať merania a dosiahnuť veľmi blízke výsledky. Teplomer bol po výrobe skalibrovaný s odporovým teplomerom PT100, pre zaistenie správneho fungovania. Veľkou výhodou, ktorou

termočlánok disponuje, je jeho neinvazívna schopnosť merania teploty bez toho, aby bol nutný technologický zárok k umožneniu merania teploty. Malé rozmery termočlánku umožňujú jeho umiestnenie pred meranou vzorkou, bez toho, aby vznikala výrazná odchýlka vo výpočtoch.



Obr. 24 Použitý termočlánok typu T s digitálnym displejom.

7.5 SPRACOVANIE SIGNÁLU

Spracovanie prebiehalo pomocou softwaru M+P analyzer od M+P international. Software je vhodný pre dynamické merania signálu a jeho ďalšiu analýzu. Rovnako je skvelým nástrojom pre spracovanie vibroakustických veličín a pre pokročilé spracovanie výsledkov. Ponúka tiež možnosť komplexnej analýzy frekvencií na čas, ako aj pohyb a presné zameranie pomocou rady monitorov, kde je možné dohľadať rôzne informácie online či offline. [22]

7.6 GENERÁTOR A ZOSILŇOVAČ

Harmonické rovinné vlny pre naše meranie boli sprostredkované pomocou generátora N-Tec AMG mini. Toto zariadenie dokáže okrem rovinných vln generovať tiež biely a ružový šum. V priebehu meraní došlo k rušeniu, ktoré spôsoboval málo citlivý zosilňovač, ktorý bol súčasťou nášho zariadenia. Dôsledkom tohto šumu bola nemožnosť odčítania hladín akustického tlaku pre vyššie frekvencie od 1600 Hz a teda presné určenie hodnoty tlaku v prvom akustickom minime. Na základe tohto nedostatku bol zakúpený nový zosilňovač XH-A232, ktorého celkové skreslenie 0,1 % pomohlo napraviť nerovnosti v ďalších meraniach.

Cena celkovej zostavy, ktorá bola prevzaná po inžinierke Juliane Vozárovej, bola ňou stanovená na 270 €, po úpravách a pridaní nového snímača polohy sa celková cena zostavy bez generátora a ostatnej nevyhnutnej výpočtovej techniky vyšplhala až na 690 €. Voči profesionálnej trubici, ktorá je komerčne dostupná od známej dánskej spoločnosti Brüel & Kjær je nový model stále ekonomicky výhodnejší, no už nie o toľko, ako pri predošlej variante. [22]



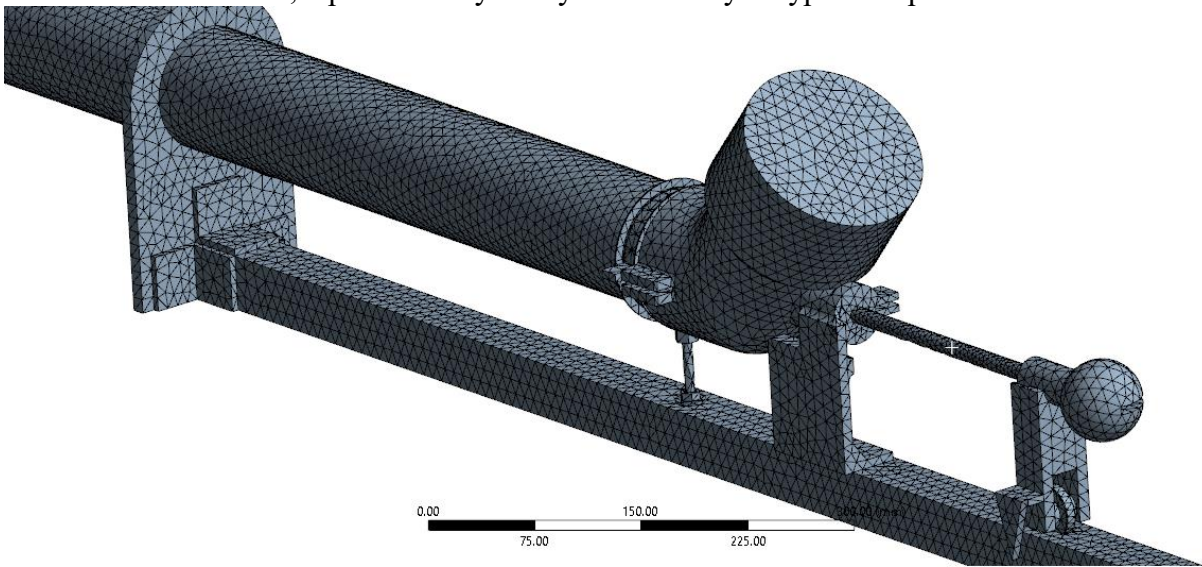
Obr.25 Generátor a zosilňovač AMG mini od spoločnosti N-Tec [28]

8 ANALÝZA A SIMULÁCIE V PROSTREDÍ ANSYSWORKBENCH

8.1 MODÁLNA ANALÝZA

Účelom vyhotovenia modálnej akustickej simulácie v prostredí Ansys workbench, je zistenie potenciálne nebezpečných vlastných frekvencií, ktoré sa môžu nachádzať v meranom frekvenčnom úseku, taktiež ako vyhodnotenie im príslušným modelovým tvarom, a taktiež zvážiť ich prítomnosť a vplyv na výsledky.

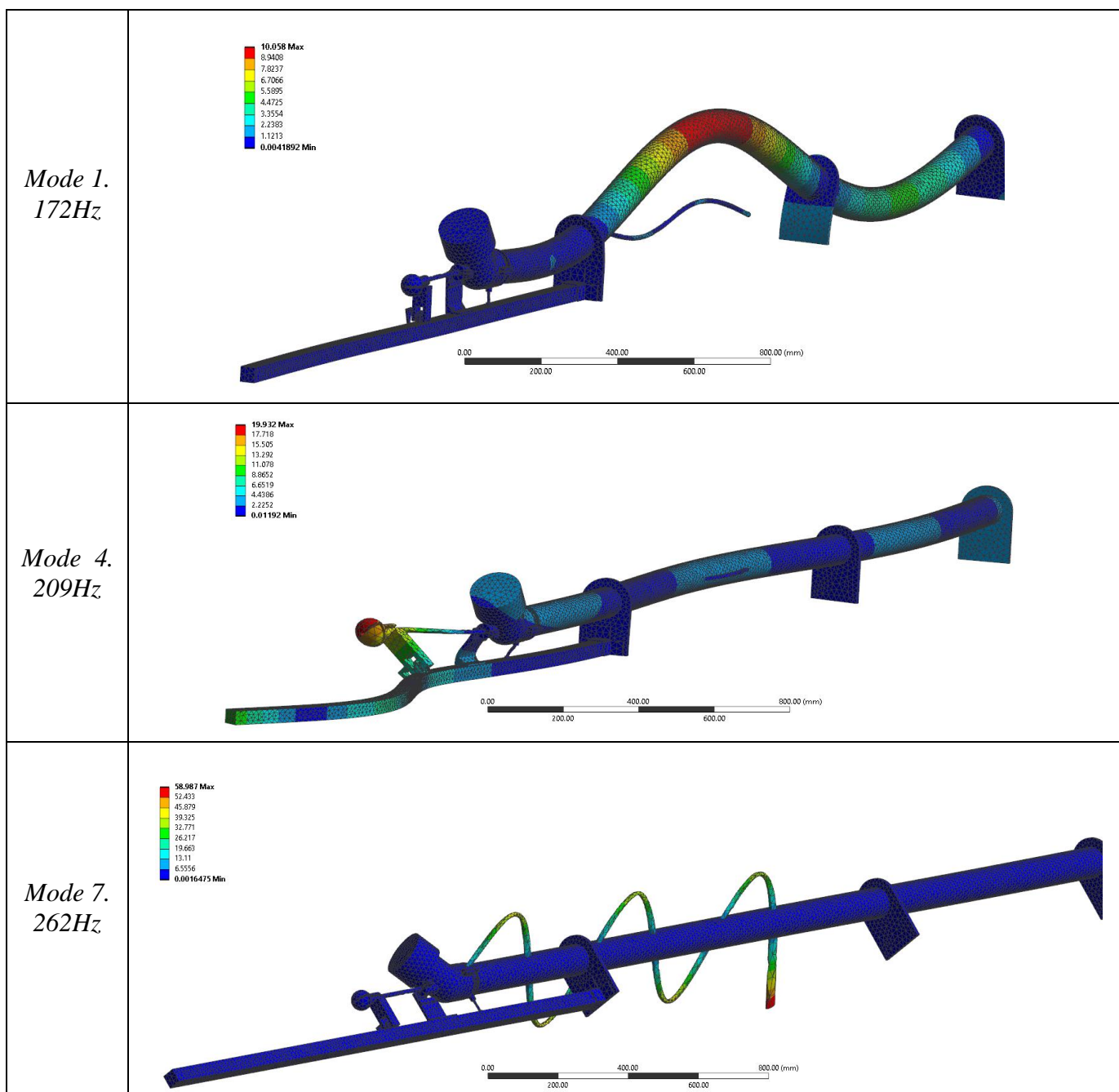
Modálna analýza bola rozdelená do dvoch častí, pričom v prvej iterácii bolo vyhodnotená pomocou modálno štruktúrálnej analýzy celá zostava so všetkými komponentmi, pri druhej sa jednalo o akusticko-modálnu analýzu, kde sme vyhodnotili správanie sa vzduchu obsiahnutého v trubici, a porovnali výsledky s numerickým výpočtom pre vlastné frekvencie



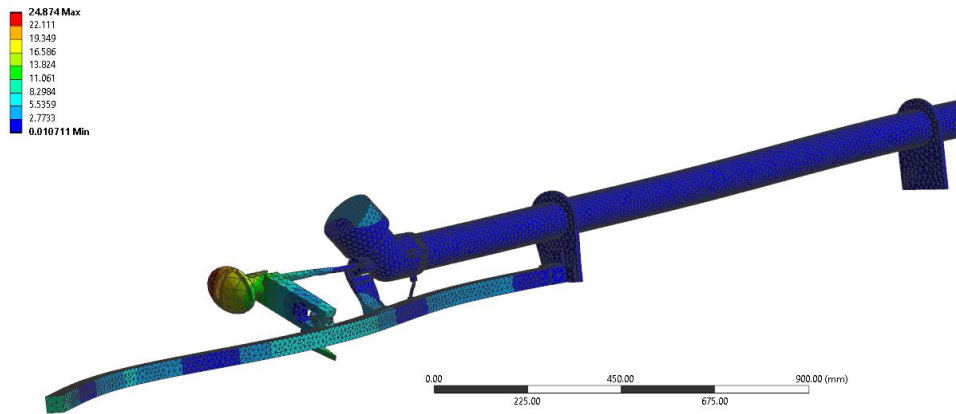
Obr. 26 Vysieťovaná zostava pre účel štruktúrálnej modálnej analýzy

Tento model vyhodnocovaný pomocou modálnej štruktúrálnej analýzy bol v mnohých častiach upravený. Úpravy spočívali v odobraní spojovacieho materiálu a teda aj pre ne potrebné diery, ktoré boli častým zdrojom nekvalitných elementov pri generácii siete. Ďalším dôvodom pre úpravy bol pre nás stanovený limit prvkov akademickej licencie, ktoré pre nás znamená strop. V tom duchu bolo odobraté množstvo zbytočných plôch a hrán, aby sa čo najbližšie priblížilo k licenciou dovolenej hodnote - 240 000 elementov. Model mal vo finálnej podobe 205 901 uzlov a 110 485 elementov. Veľkosť elementu bola stanovená na 10 mm, no v mnohých miestach bola lokálne zjemnená sieť, aby sa dosiahla lepšia kvalita údajov. Ako prvky boli zvolené výlučne „quadratické“ a pomocná funkciu „adaptive sizeing“ bola deaktivovaná. Na rovinné a valcové prvky bola použitá metóda „sweep“. Celková priemerná kvalita elementu dosahuje hodnotu 0,8017 a „Jacobian ratio“ (MAPDL) hodnotu 1,2 čo svedčí o naozaj kvalitnej sieti. Výsledky prvej modálnej analýzy sú uvedené v tab. 3 a druhej v tab. 4.

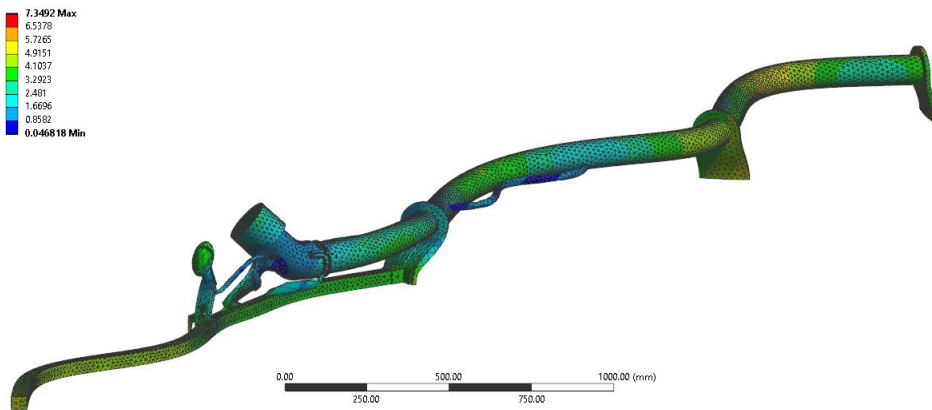
Tab.3 Výsledky modálno-štruktúrálnej analýzy



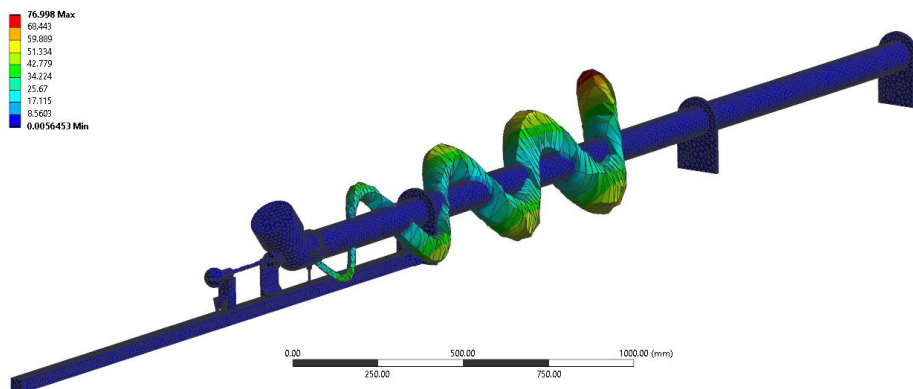
Mode
10.
305Hz



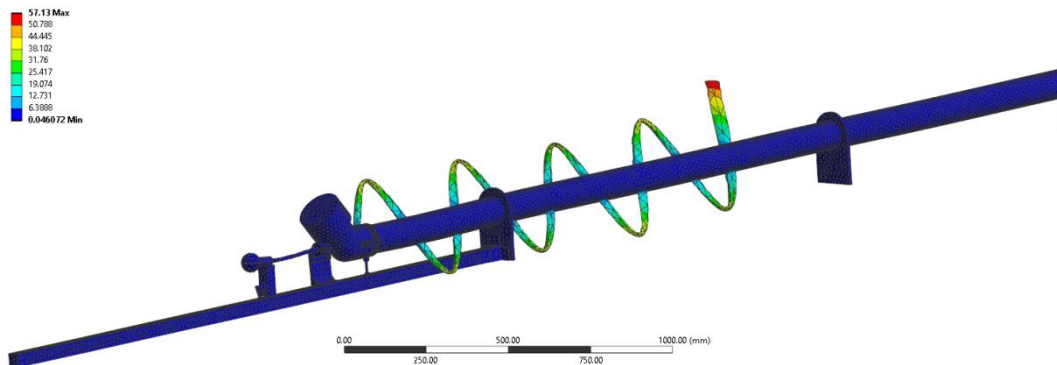
Mode
14.
401Hz

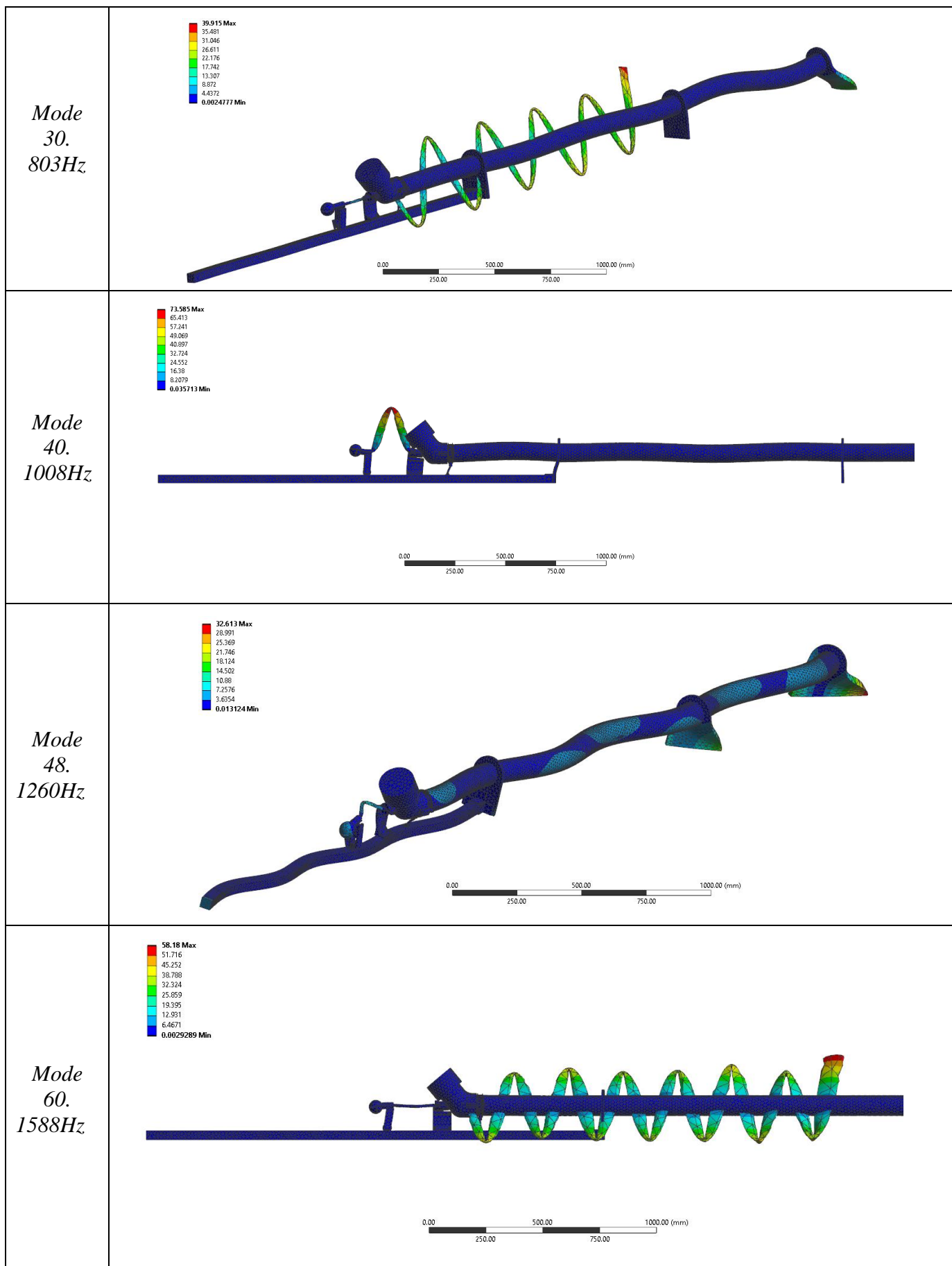


Mode
17.
495Hz

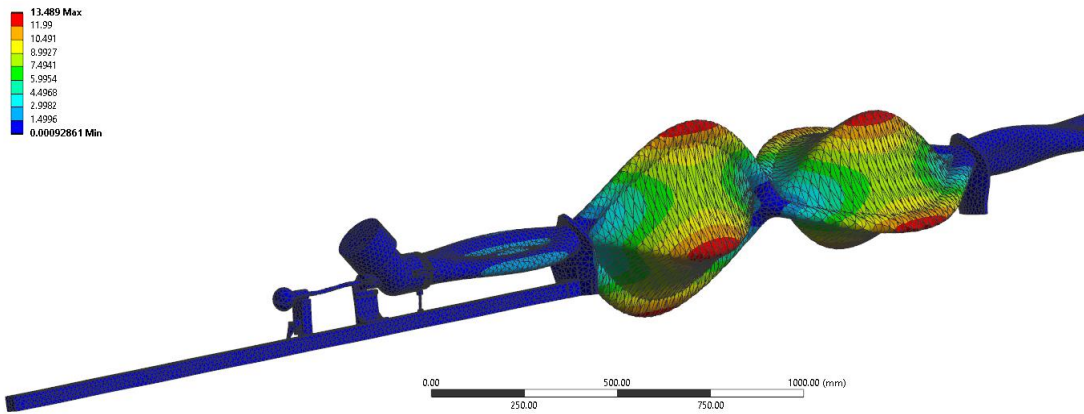


Mode
24.
636Hz

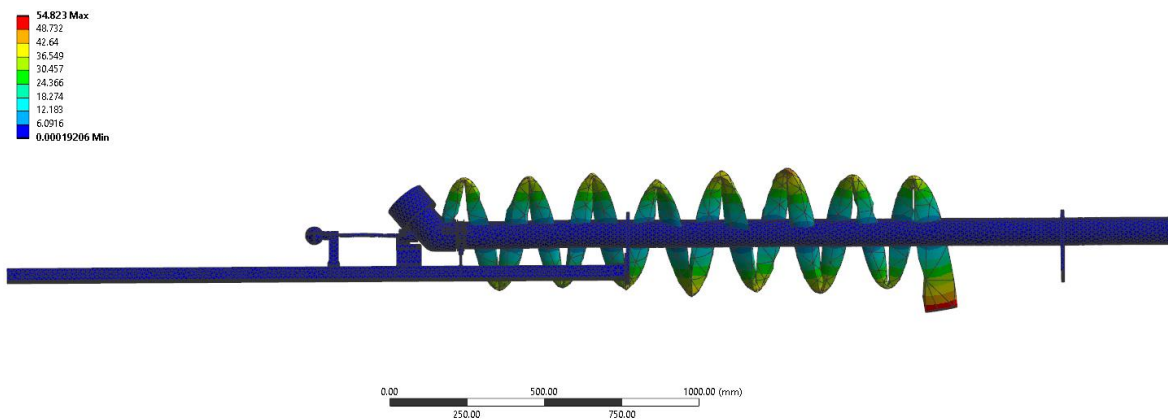




Mode
70.
2060Hz



Mode
85.
2439Hz



Ako druhá analýza, bola vykonaná akusticko modálna, ktorá na rozdiel od tej štruktúrálnej, vyhodnocuje správanie sa akustickej domény, čo je v našom prípade vzduch obsiahnutý v trubici. Vzduchu bola pripísaná hustota $1,225 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, a rýchlosť $346,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, čo odpovedá teplote 25°C . Akustická doména bola najprv vymešovaná quadratickými prvkami o veľkosti 10mm a následne boli zistené hodnoty tlaku a frekvencie jednotlivých modov, tie boli následne porovnané s vypočítanými hodnotami vlastných frekvencií odpovedajúcim dĺžke trubice 2m,

$$f = \frac{k \cdot c}{2 \cdot l}, \quad (46)$$

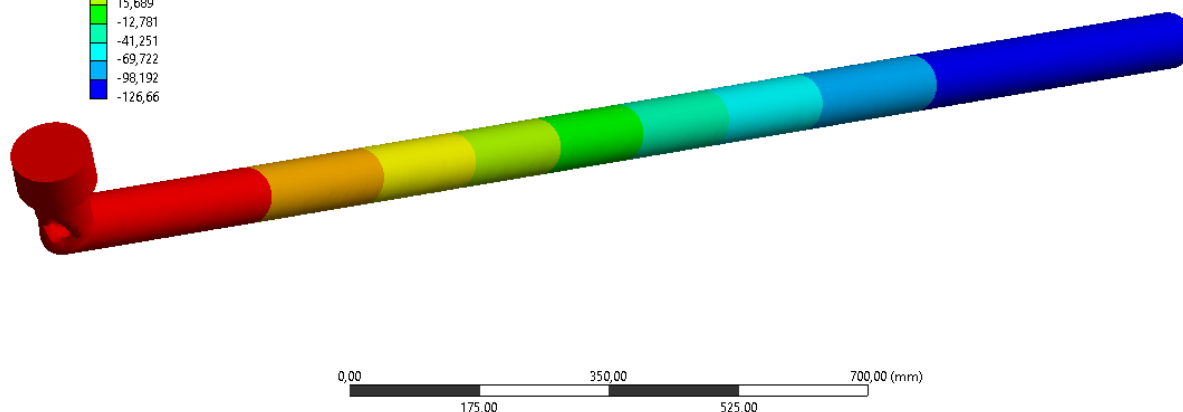
$$f = \frac{1 \cdot 346,3}{2 \cdot 2} = 86,6 \text{ Hz}$$

Kde k odpovedá poradiu vlastných frekvencií, c je rýchlosť zvuku pri 25°C v $[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$, a l je dĺžka úseku trubice v smere šírenia vlny [m].

Tab.4 Porovnanie výsledkov akustickej modálnej analýzy s výpočtami vlastných frekvencií

| n. | f ansys [Hz] | n. | f výpočet [Hz] |
|----|--------------|----|----------------|
| 3 | 160,65 | 2 | 173,15 |
| 4 | 214,57 | 3 | 259,7 |
| 5 | 267,66 | 4 | 346,3 |
| 6 | 321,44 | 5 | 432,9 |
| 8 | 428,61 | 6 | 519,5 |
| 9 | 482,8 | 7 | 606,3 |
| 12 | 645,93 | 9 | 779,2 |
| 15 | 811,54 | 12 | 1038,9 |
| 19 | 1033,2 | 14 | 1212,1 |
| 23 | 1255,1 | 18 | 1558,4 |
| 29 | 1583,4 | 23 | 1991,2 |
| 39 | 2003 | 29 | 2510,7 |
| 49 | 2497,4 | | |

B: Modal Acoustics
 Acoustic Pressure
 Type: Acoustic Pressure
 Frequency: 53,572 Hz
 Unit: MPa
 Max: 129,57
 Min: -126,66



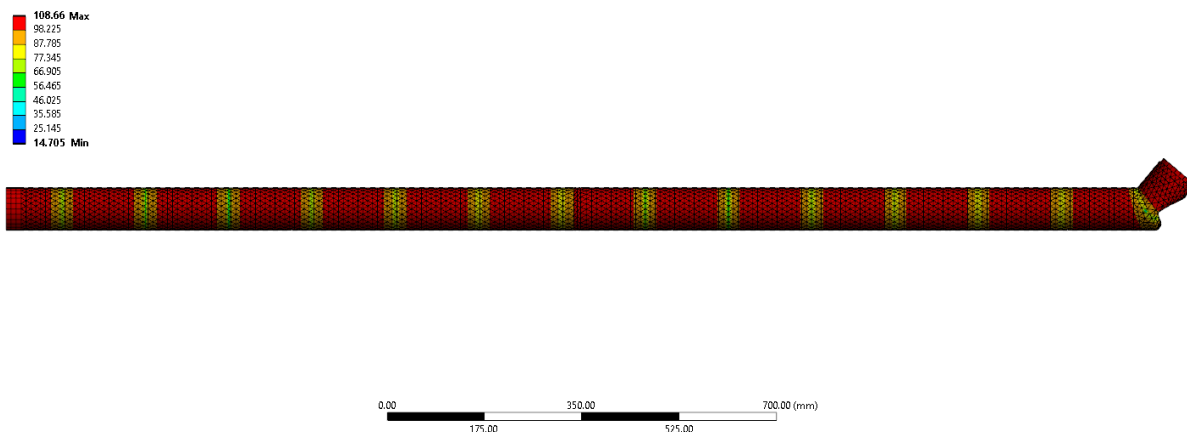
Obr.27 Výsledný priebeh tlaku v akustickej doméne akusticko modálnej analýzy v Ansys Workbench

Výsledky uvedené v tabuľke 4. jasne ukazujú potenciálne nebezpečné frekvencie ktoré sa nachádzajú v našom meracom úseku, ktoré môžu v konečnom dôsledku byť zdrojom nežiaducich chýb a nepresností. Čo by mohlo mať vplyv na hodnoty uvedené v tabuľke, je voľba správneho typu materiálu pre jednotlivé komponenty vrátane špecifických materiálových vlastností. Pri akustickej to zasa mohli byť presnejšie a lepšie zadefinované okrajové podmienky, kde by sa presnejšie zadefinovalo rozhranie Fluid solid interface, ako aj vplyv akustického tlmenia. Ďalšie možné nepresnosti a skreslenia skutočných výsledkov mohli byť

spôsobené nedostatočnou izoláciou medzi reproduktorom a konštrukciou ako aj kontakt medzi konštrukciou a reproduktorovou sondou.

8.2 HARMONICKÁ - AKUSTICKÁ ANALÝZA

Ďalšou analýzou bola harmonicko-akustická analýza, kde bol najprv v programe „space claim“ vymodelovaný vnútorný obsah skrine reproduktora, ktorý bol následne rozšírený o dvojmetrovú trubicu, ktorá predstavovala vnútorný objem vzduchu v trubici. Následne bola určená minimálna veľkosť prvku podľa vzťahu rovnice 14 a vysieťovaná pomocou kvadratických prvkov mikrofónová časť modelu. Dvojmetrové valcové teleso predstavujúce objem vzduchu v trubici bolo vysieťované pomocou metódy „sweep“, veľkosť prvku bola ponechaná rovnaká. Ďalej boli použité body „sizing“ k dosiahnutiu čo najlepšej kvality siete, ktorá bola overená prostredníctvom kritéria element quality a v priemere dosahovala hodnotu 0,86, dôležité bolo tiež správne zdefinovať a zaväzbiť jednotlivé regióny, v ktorých prebiehala analýza. Pre „acoustic-domain“, čiže doménu, kde boli vyhodnocované akustické vlastnosti, bol zvolený vnútorný objem vzduchu, ako „physical region“ bola zvolená kruhová výseč, predstavujúca pevný oceľový piest, ktorý tesne doliehal k povrchu skúmanej penovej vzorky. Dve odlišné domény boli prepojené pomocou prvku „fluid solid interface“. „Ansys“ ako zdroj vibrácií ponúka rozličné prvky, ako „diffuse sound field“, „incident wave source“ či „mass source“, ale žiadna z týchto možností neumožnila presne zdefinovať daný reproduktor. Ďalej bolo potrebné určiť zdroj signálu rovinných vln. Je potrebné uviesť, že z „data-sheetu“ dostupného od dodávateľa nebolo možné zdefinovať náš reproduktor. Postup bol teda nasledovný: pomocou mikrofónu boli nájdené tlakové maximá pre jednotlivé frekvencie a z nameranej reálnej hodnoty akustického tlaku RMS, bola vypočítaná rýchlosť povrchu, ktorá bola následne zdefinovaná v „ansys modeli“ pomocou prvku „surface velocity“. Tento prístup nám pomohol najlepšie zdefinovať zdroj hluku.



Obr. 28 Výsledné hladiny akustického tlaku v harmonicko-akustickej analýze pre 500Hz

Ďalším problémom, ktorý počas tejto simulácie vznikol, bolo správne zdefinovanie vzorky - poréznej peny. „Ansys“ ponúkol pre jednotlivé porézne materiály tri rôzne modely. Sú to modely „Delany-Bazley“, „Johnson-Champoux Allard“ a „Miky“. Modely „Delany-Bazley“ a „Miky“ sú vo svojej podstate veľmi podobné, kde pre ich definíciu stačí poznať hodnotu odporu prúdenia tekutého média v $[\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-3}]$. Zdefinovanie modelu podľa „Johnson-Champoux Allard“ je o niečo zložitejšie. K tomu je potrebné poznať hodnotu poréznosti a

tortuozity média a navyše aj jeho tepelnú charakteristickú dĺžku a viskóznou charakteristickú dĺžku. Tieto informácie je prakticky zistiť veľmi náročné a zvyčajne sú udávané výrobcom. Keďže tieto informácie neboli známe, boli zistené online - z rôznych poréznych štúdií doma aj v zahraničí, ktoré sa zoberali určením tejto materiálovej vlastnosti. Pre našu hustotu, hrúbku peny a hodnotu NRC pohltivostného koeficientu, bola porovnaná a odhadnutá hodnota odporu tekutého média $30\,000\text{ [kg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-3}]$.

Výsledky hodnoty absorpcie vypočítané simuláciou sa však veľmi líšili voči experimentálne zisteným, čo bolo spôsobené pravdepodobne nepresným zadefinovaním zdroja hluku a neúplnou charakteristikou porézneho materiálu. Hodnoty tlakových minim a maxim však dosť presne zodpovedali realite. Preto bolo rozhodnuté z týchto hodnôt určiť hodnotu ΔL , ktorá bola dosadená do vzťahu pre výpočet absorpcie a výsledky medzi týmito dvomi prístupmi možno vidieť v tabuľke 5.

Tab. 5 Porovnanie výsledkov pohltivosti alfa zistenými experimentálne a pomocou simulácie

| f [Hz] | Lp min [dB] | Lp max[dB] | ΔL [dB] | alfa_ansys [-] | alfa_experiment [-] | Δ alfa [-] |
|--------|-------------|------------|-----------------|----------------|---------------------|-------------------|
| 160 | 81,38 | 131,24 | 49,86 | 0,013 | 0,209 | 0,196 |
| 200 | 85,366 | 127,99 | 42,62 | 0,029 | 0,2 | 0,171 |
| 250 | 82,467 | 125,53 | 43,06 | 0,028 | 0,193 | 0,165 |
| 315 | 80 | 125,61 | 45,61 | 0,021 | 0,18 | 0,159 |
| 400 | 85,612 | 124,16 | 38,55 | 0,046 | 0,176 | 0,130 |
| 500 | 88,69 | 123,32 | 34,63 | 0,072 | 0,166 | 0,094 |
| 630 | 79,5 | 121,39 | 41,89 | 0,032 | 0,175 | 0,143 |
| 800 | 79,67 | 117,1 | 37,43 | 0,052 | 0,184 | 0,132 |
| 1000 | 72,23 | 107,3 | 35,07 | 0,068 | 0,223 | 0,155 |
| 1250 | 78,3 | 104,97 | 26,67 | 0,169 | 0,291 | 0,122 |
| 1600 | 78,44 | 107,51 | 29,07 | 0,131 | 0,346 | 0,215 |
| 2000 | 72,39 | 96,86 | 24,47 | 0,213 | 0,509 | 0,296 |
| 2500 | 60,5 | 84,75 | 24,25 | 0,218 | 0,568 | 0,350 |

8.3 MATLAB SKRIPT

K vyhodnoteniu nameraných dát bol ďalej vytvorený skript v programe Matlab, ktorého úlohou bolo načítanie a vyhodnotenie nameraných dát. Medzi vstupné dáta, ktoré bolo potrebné zadať patrili: namerané hodnoty tlaku a polohy mikrofónu pre dané meranie, aktuálna teplota a hodnota akustického tlaku pozadia. Pripravený skript následne určil pre merania s tuhým pozadím pomer prvého a druhého stojatého vlnenia, po dosadení do vzťahov, dostupných v norme 10534-1 vypočítal a vypísal do konzoly odstup hlukového pozadia, vlnovú dĺžku podľa polôh tlakových minim a rýchlosť zvuku závislú na danej frekvencii, ako aj rýchlosť zvuku závislú na aktuálnej teplote. Ďalej vyznačil hodnoty tlakových minim a označil ich vo vykreslenom grafe. Nakoniec tieto hodnoty spojil a vyhodnotil správanie sa dolnej obálky vykresleného vlnenia, aby bolo možné s určitou istotou povedať, či spodná obálka narastá monotónne, nenarastá alebo naopak klesá. Pretože je podľa normy nutné, aby nárast

jednotlivých miním bol blízky ± 1 dB a pretože pre správnu funkciu našej trubice je nevyhnutné, aby táto obálka narastala monotónne, vypísané smernice jednotlivý priamok, dávajú na to jednoznačnú odpoveď.

```
Dolná obálka má pri 315 Hz smernice k = 0.0030909    0.0023593[-]
Pomer 1. stojateho vlnenia pre 315 Hz je delta 27.7013[dB]
Pomer 2. stojateho vlnenia pre 315 Hz je delta 22.7772[dB]
Odstup hlukového pozadia pre 315 Hz je 41.7[dB]
Vlnová dĺžka pre 315 Hz je 1.102[m]
Rýchlosť zvuku závislá od vlnovej dĺžky pri 315 Hz je 347.13[m.s-1]
Rýchlosť zvuku závislá od teploty pri 315 Hz je 347.0731[m.s-1]
```

Obr.29 Výsledky z matlab scriptu vypísané v konzol

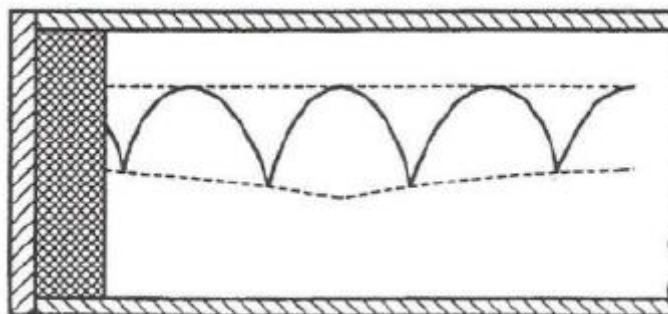
9 PREDBEŽNÉ MERANIA A OVERENIE SPRÁVNEJ FUNKCIE ZARIADENIA

Skôr, ako možno začať vyhodnocovať koeficient zvukovej pohltivosti alfa, je nevyhnutné podrobiť vopred upravenú verziu zariadenia rade skúšok. Tieto skúšky prebiehali iba so samostatnou trubicou, teda ukončenú len pevným uzáverom. To pomohlo vyvarovať sa potenciálnym chybám už na začiatku a taktiež pomohlo s elimináciou zdrojov týchto chýb. Dôvodom a cieľom je zaručiť splnenie minimálnych požiadaviek predpísaných normou. Kontroly pre správnu funkciu, je nutné zopakovať po akýchkoľvek úpravách. Sú to merania k overeniu pomeru stojatej vlny, k overeniu dynamického rozsahu mikrofónovej sondy, či kontrola na výskyt vibrácií v meracom úseku trubice [18].

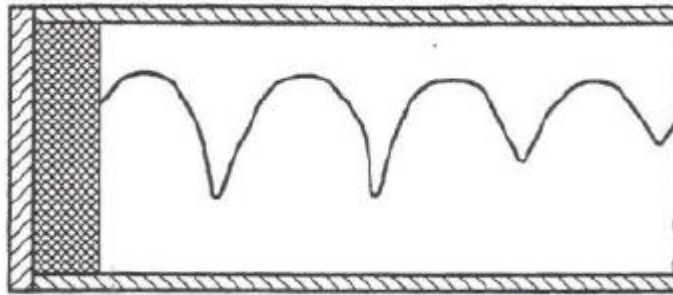
Po spomenutých kontrolách ďalej prebiehali takzvané predbežné merania. V týchto meraniach sa určili: vlnová dĺžka, rýchlosť zvuku v závislosti od vlnovej dĺžky a od teploty a odstup hlukového pozadia. Tieto merania sa vykonávajú s prázdnu trubicou s piestom nastaveným do vzdialenosti 0 referenčnej roviny [18].

9.1.1 OVERENIE POMERU STOJATÉHO VLNENIA

Obrazec stojatého vlnenia v impedančnej trubici sa získal pomalým pohybom mikrofónovej sondy. Tento postup je predpísaný v norme. V prípade merania má trubica mikrofónovej sondy dva metre, čo spôsobovalo prehýbanie v dôsledku vlastnej hmotnosti, po prekročení približne polovičnej vzdialenosti meracieho úseku. K tomu, aby bolo zabezpečené, že mikrofón sa po celú dobu bude nachádzať vo svojom akustickom strede, teda v geometrickom strede meracej trubice, je nevyhnutné, aby bola hliníková sonda podopretá počas celého úseku. K tomu účelu bol vyhotovený trojramenný unášač spomenutý v predchádzajúcej kapitole. Malo to však aj svoju nevýhodu, a síce, že možnosť plynulého pohybu nie je v dôsledku tejto podpory umožnený, z dôvodu výskytu nechceného hluku spôsobeného kontaktom unášača o železnú stenu. Merania teda prebiehajú kombináciou pomalého pohybu mikrofónu a krátkych meracích intervaloch od sedem do dvanásť sekúnd. Táto metóda je ešte pomalšia, ako už celkom dosť pomalá pôvodná s plynulým pohybom mikrofónovej sondy, no pre dosiahnutie relatívne reálnych hodnôt nevyhnutná. Spodná obálka tlakových miním musí byť buď vodorovná alebo musí mať monotónny rastový charakter s tolerovaným nárastom o ± 1 dB pre každé nasledujúce minimum [10].



Obr.30 Obrazec stojatého vlnenia narušený superpozíciou vyššieho módu [18]



Obr.31 Zvlnenie na obrazci stojateho vlnenia [18]

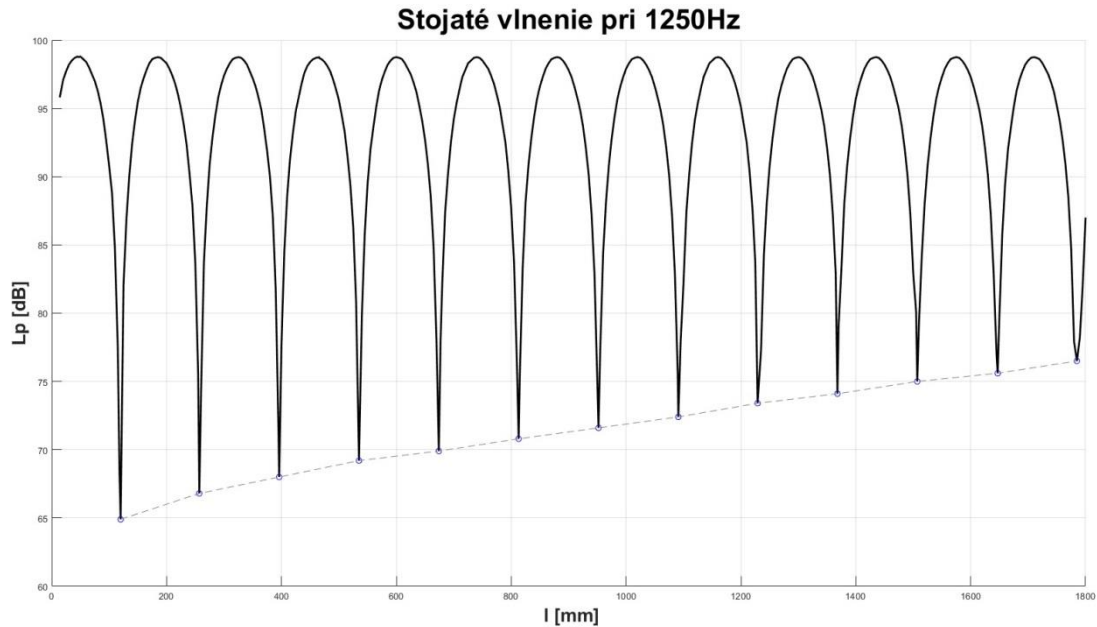
Zvlnenie zobrazené na obr. 30 nesmie nastať, značí to nesprávnu funkciu zariadenia. Ďalšie možné dôvody prečo môže k deformáciám na vlnení môže dochádzať sú:

1. Príliš prudký nárast dolnej obálky pri príliš malých hodnotách pomeru stojatej vlny.
 - príliš veľký útlm v impedančnej trubici (hrubé, porézne vibrujúce steny, štrbiny v rohoch, káble a lanká v meracom úseku)
2. Hodnoty pomeru stojatej vlny sú príliš malé:
 - zariadenie pre spracovanie signálu má príliš malý dynamický rozsah (šum alebo hluk, príliš veľký útlm v trubici sondy)
 - šírenie zvuku vzduchom alebo konštrukciou (nedostatočná izolácia reproduktoru, vibrácie trubky sondy)
3. Spodná obálka vykazuje nemonotónny nárast: (obr.30)
 - vyššie módy v skúšobnom úseku (príliš veľké budenie vyšších módov reproduktorom, vyššie módy vyvolané trubkovou sondou alebo mikrofónom alebo podporami či inými predmetmi v skúšobnom úseku, vibrujúce steny trubice, štrbiny v stenách trubice)
4. Obrázec stojateho vlnenia je zvlnený: (obr.31)
 - Harmonická výška v signále (nedostatočná filtrácia, nelineárne budenie generátorom signálu, škrenie predmetu v meracom úseku ako trubka sondy alebo podpera)
5. Minimá sú zaoblené :
 - Signál v minimách je pod hladinou šumu alebo hluku (príliš veľký útlm v trubici sondy, príliš malá amplitúda signálu, atď)

Niektoré javy a príčiny sa môžu medzi sebou kombinovať. Rezonančné budenie vibráciami trubky sondy, nezávisí zvyčajne čisto od kmitočtu ale taktiež od umiestnenia sondy

Pomer stojateho vlnenia by nemal byť menší ako 45 dB, čo je hodnota predpísaná normou, aby bolo možné merať také malé hodnoty zvukovej pohltivosti ako 0,1 dB. V meracej trubici tento predpoklad nie je splnený pre nižšie frekvencie, konkrétne od 160 do 400 Hz. Z toho dôvodu sú nepresnosti v meraní koeficientu zvukovej pohltivosti očakávané.

Hodnoty hladín akustického tlaku boli zaznamenávané s krokom 10 mm pre frekvencie od 160-500 Hz, od 500 do 1600 Hz s krokom 5 mm a pre frekvencie 2000 a 2500 Hz s krokom 3 mm. Jednotlivé údaje boli zaznamenávané a následne boli vykreslené grafy pomocou programu matlab. Vo všeobecnosti neboli spozorované iné nedostatky spojené s overením správnej funkčnosti, okrem už zmienenej nízkej hodnoty pomeru stojatej vlny, a aj to len pre frekvencie 160 až 315Hz.



Obr.32 Obrázok stojatej vlny pre kmitočty 1250 Hz

Spodná obálka pri vlnení 1250 Hz narastá monotónne s nárastom v minime o približne 1 dB, smernica spodnej obálky pre jednotlivé úseky je nasledovná:

$$k = 0.014 \quad 0.0086 \quad 0.0086 \quad 0.005036 \quad 0.0065 \quad 0.0057 \quad 0.0057 \quad 0.00725 \quad 0.005 \quad 0.0065 \quad 0.0043 \quad [-]$$

Z výsledkov vyplýva, že spodná obálka nikde nenadobúda záporné hodnoty, takže rastie na celom obore. Všetky ostatné obrázky stojatej vlny merané pri tretinooktávových frekvenciách od 160 do 2500 Hz sú uvedené v prílohe.

Pomer stojatej vlny pre logaritmické hodnoty hladín akustických tlakov sa vypočíta nasledovne.

$$\Delta Lp = Lp_{\max_1} - Lp_{\min_1} \quad (47)$$

Daná hodnota rozdielu hladín akustických tlakov v dB sa dosadí do vzťahu pre určenie stojatej vlny v logaritmickom merítke:

$$s = 10^{\frac{\Delta L}{20}} \quad (48)$$

Jednotlivé pomery stojatých vln pre všetky zmerané frekvencie možno vidieť v nasledujúcej tab. 6.

Tab.6 Pomery jednotlivých stojatých vlnení pre zmerané frekvencie

| f [Hz] | L _{pmin1} [dB] | L _{pmax1} [dB] | Δ L _p [dB] | s [-] |
|--------|-------------------------|-------------------------|-----------------------|-------|
| 160 | 106 | 126,1 | 20,1 | 10,1 |
| 200 | 97,4 | 122,11 | 24,71 | 17,2 |
| 250 | 102,3 | 128,41 | 26,11 | 20,2 |
| 315 | 89,7 | 118,55 | 28,85 | 27,7 |
| 400 | 87,3 | 118,25 | 30,95 | 35,3 |
| 500 | 85,6 | 118,6 | 33 | 44,7 |
| 630 | 74,9 | 109,6 | 34,7 | 54,3 |
| 800 | 75,6 | 112,91 | 37,31 | 73,4 |
| 1000 | 68,4 | 103,1 | 34,7 | 54,3 |
| 1250 | 64,9 | 98,75 | 33,85 | 49,3 |
| 1600 | 63,8 | 99,15 | 35,35 | 58,5 |
| 2000 | 58,7 | 93,91 | 35,21 | 57,6 |
| 2500 | 65,9 | 106,1 | 40,2 | 102,3 |

Ako už bolo zmienené, je nevyhnutné aby pomer s bol väčší ako 35 dB pre zmeranie koeficientu pohltivosti alfa na presnosť 0,04. Hodnoty 160 až 315 tento predpoklad nespĺňajú a predpokladá sa, že tu môže dochádzať k nepresnostiam. Môže to byť spôsobené veľkým tlmením v rámci meracieho úseku, nedostatočnou izoláciou mikrofónovej skrine či prestupom vibrácií medzi stenami trubice a mikrofónovou sondou.

9.1.2 URČENIE VLNOVEJ DĹŽKY A RÝCHLOSTI ZVUKU

Vlnovú dĺžku λ možno určiť buď podľa vzťahu závislom na teplote, kde je rýchlosť prepočítaná na konkrétnu teplotu pri meraní:

$$c_0(T) = 343 \sqrt{\frac{T}{293}} \quad (49)$$

Teplota v impedančnej trubici bola zisťovaná pomocou drôtového odporového termočlánku typu T, bližšie popísanom v kapitole 7.4. Toto riešenie bolo výhodné, pretože nebolo potrebné zasiahnuť do materiálu trubice a ani sa neznížil vnútorný priemer trubice. Vlnová dĺžka sa zistí napríklad ako pomer rýchlosti zvuku a danej frekvencie (1), alebo pomocou vzdialeností dvoch po sebe nasledujúcich nameraných tlakových miním, pri danej frekvencii:

$$\lambda_0 = \frac{2}{n - m} (x_{\min_n} - x_{\min_m}) \quad (50)$$

Konkrétne pre zmerané hodnoty minimálnych frekvencií 1250 Hz, vlnová dĺžka vychádza nasledovne:

$$\lambda_0 = \frac{2}{1-2} (0,119 - 0,257) = 0,276 \text{ m}$$

V tabuľke 7 možno vidieť zmerané hodnoty minimálnych a z nich určené vlnové dĺžky pre merané 1/3 oktávové frekvencie.

Tab.7 Zmerané hodnoty vlnovej dĺžky

| f [Hz] | x _{min1} [m] | x _{min2} [m] | λ [m] |
|--------|-----------------------|-----------------------|-------|
| 160 | 0,470 | 1,558 | 2,176 |
| 200 | 0,365 | 1,232 | 1,734 |
| 250 | 0,273 | 0,9675 | 1,389 |
| 315 | 0,197 | 0,747 | 1,100 |
| 400 | 0,135 | 0,568 | 0,866 |
| 500 | 0,088 | 0,435 | 0,694 |
| 630 | 0,051 | 0,327 | 0,552 |
| 800 | 0,022 | 0,238 | 0,432 |
| 1000 | 0,173 | 0,346 | 0,346 |
| 1250 | 0,119 | 0,257 | 0,274 |
| 1600 | 0,074 | 0,182 | 0,216 |
| 2000 | 0,041 | 0,127 | 0,172 |
| 2500 | 0,015 | 0,084 | 0,138 |

Na základe zmeraných hodnôt vlnovej dĺžky bolo možné pomocou predchádzajúceho vzťahu vypočítať pre jednotlivé hodnoty, rýchlosť šírenia zvuku a tú nezávisle porovnať s hodnotou vypočítanou z aktuálne nameranej teploty.

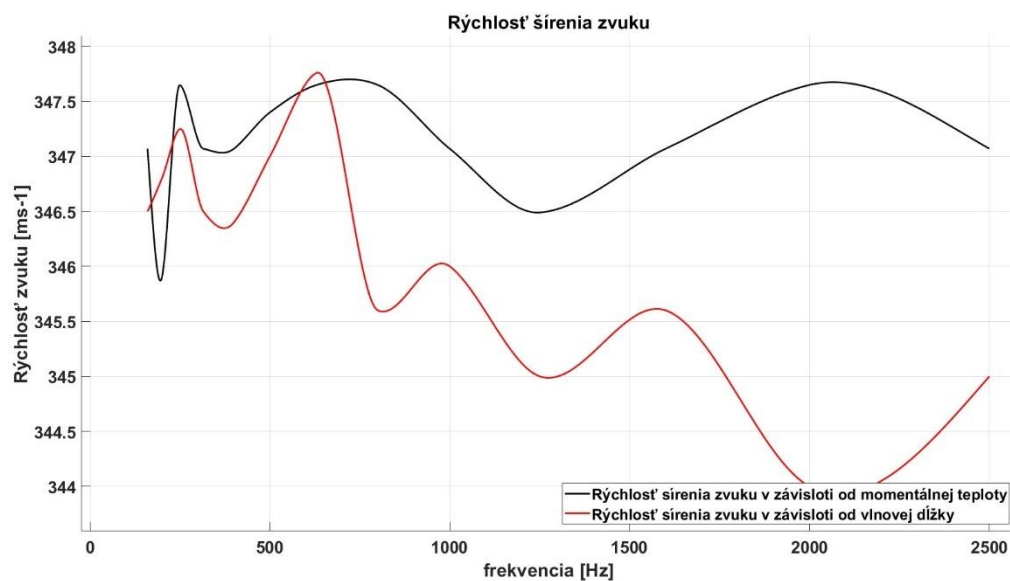
$$c_0(f) = 0,694 \cdot 500 = 347 \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}\text{]}$$

Hodnota rýchlosti šírenia zvuku pre frekvenciu 500 Hz a momentálnu teplotu 27,4°C je :

$$c_0(T) = 343 \sqrt{\frac{300,55}{293}} = 347,4 \text{ [ms}^{-1}\text{]}$$

Tab.8 Porovnanie nezávisle zmeraných hodnôt rýchlosti šírenia zvuku

| f [Hz] | c _λ [ms ⁻¹] | c _t [ms ⁻¹] |
|--------|------------------------------------|------------------------------------|
| 160 | 348,16 | 346 |
| 200 | 346,8 | 345,9 |
| 250 | 347,25 | 347,65 |
| 315 | 346,5 | 347,07 |
| 400 | 346,4 | 347,07 |
| 500 | 347 | 347,40 |
| 630 | 347,76 | 347,65 |
| 800 | 345,6 | 347,65 |
| 1000 | 346 | 347,07 |
| 1250 | 345 | 346,49 |
| 1600 | 345,6 | 347,07 |
| 2000 | 344 | 347,65 |
| 2500 | 345 | 347,07 |



Obr.33 Porovnanie medzi rýchlosťami zvuku v závislosti od teploty a od vlnovej dĺžky

Ako je zrejmé, rýchlosť zvuku je parameter veľmi citlivý od momentálnej teploty. Aj preto možno zhodnotiť, že merania trvajúce dlhší čas, v sebe nesú nepresnosť od teploty, keďže tá vzniká ako nechcený produkt pohltenia energie poréznym absorbentom.

9.1.3 DYNAMICKÝ ROZSAH MIKROFÓNU

Táto skúška sa vykonáva na rovnakých tretinooktávových frekvenciách, na ktorých prebiehali predchádzajúce merania. Merania bez zdroja hluku sú také hodnoty, pri ktorých sa buď eliminoval zdroj manuálne, alebo sa v nastavení softwaru M+P bol zadaný parameter „inactive“. Výsledok bol v oboch prípadoch rovnaký, a síce, že mikrofón určenú dobu zaznamenával iba okolie a na konci bola odčítaná daná hodnota. Norma predpisuje, že odstup medzi najmenším tlakovým minimom a hodnotou prázdneho tichého pozadia, musí byť minimálne 10 dB. Hodnota bola získaná tak, že sa najprv našlo tlakové minimum, a následne sa v rovnakej polohe zmerala hladina akustického tlaku bez zapnutého zdroja. Meranie sa opakovalo pre každú frekvenciu. Jednotlivé odstupy pre dané frekvencie sú zaznamenané v tabuľke 9. Pre všetky hodnoty bol odstup od pozadia dostatočný.

Tab. 9 Odstupy hlukového pozadia pri vypnutom zdroji zvuku

| f [Hz] | L _{pmin1} [dB] | L _{pmin} bez zdroju [dB] | Odstup hlukového pozadia [dB] |
|--------|-------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
| 160 | 106 | 47,5 | 58,5 |
| 200 | 97,4 | 47,1 | 50,3 |
| 250 | 102,3 | 47,1 | 55,2 |
| 315 | 89,7 | 48,3 | 41,4 |
| 400 | 87,3 | 50 | 37,3 |
| 500 | 85,6 | 49,6 | 36 |
| 630 | 74,9 | 47,3 | 27,6 |
| 800 | 75,6 | 48,4 | 27,2 |
| 1000 | 68,4 | 47,2 | 21,2 |
| 1250 | 64,9 | 47,2 | 17,7 |
| 1600 | 63,8 | 46,7 | 17,1 |
| 2000 | 58,7 | 47,9 | 10,8 |
| 2500 | 65,9 | 47,4 | 18,5 |

Ako už bolo spomenuté, všetky hodnoty sú väčšie ako 10 dB, takže podmienky predpísané normou boli splnené v rámci celého meracieho spektra.

9.1.4 VÝPOČET POVRCHOVEJ AKUSTICKEJ IMPEDANCIE

Na začiatku bolo meranie rovnaké, ako pri pomere stojateho vlnenia s , a to tak, že sa našla poloha tlakového minima a maxima pre skúmaný materiál pri danej frekvencii. Z hodnoty pomeru stojateho vlnenia s , bola následne vypočítaná absolútna hodnota činiteľa odrazu $|r|$.

$$s = 10^{\frac{\Delta L}{20}} \quad (51)$$

$$|r| = \frac{s+1}{s-1} \quad (52)$$

Ďalej bol z absolútnej hodnoty činiteľa odrazu $|r|$ vypočítaný komplexný činiteľ odrazu Φ [rad].

$$\Phi = \pi \cdot \left(\frac{4 \cdot x_{min} - 1}{\lambda_0} - 1 \right)$$

kde λ_0 je vlnová dĺžka získaná ako pomer rýchlosti zvuku pri danej frekvencii, x_{min} je poloha prvého tlakového minima.

Následne možno vypočítať imaginárnu a reálnu zložky komplexného činiteľa odrazu r .

$$r' = |r| \cdot \cos \Phi \quad (53)$$

$$r'' = |r| \cdot \sin \Phi \quad (54)$$

$$r = r' + jr'' \quad (55)$$

Ďalej sa dopočíta normovaná impedancia z ako:

$$z' = \frac{1 - r'^2 - r''^2}{(1 - r')^2 + r''^2} \quad (56)$$

$$z'' = \frac{2 \cdot r''}{(1 - r')^2 + r''^2} \quad (57)$$

$$z = z' + jz'' \quad (58)$$

Pre získanie impedancie Z sa vynásobí výsledok vlnovým odporom Z_0 , hodnota Z_0 v [Pa.s.m] sa získa z rovnice

$$Z_0 = \rho_0 \cdot c_0 = \frac{7064}{\sqrt{T}} \quad (59)$$

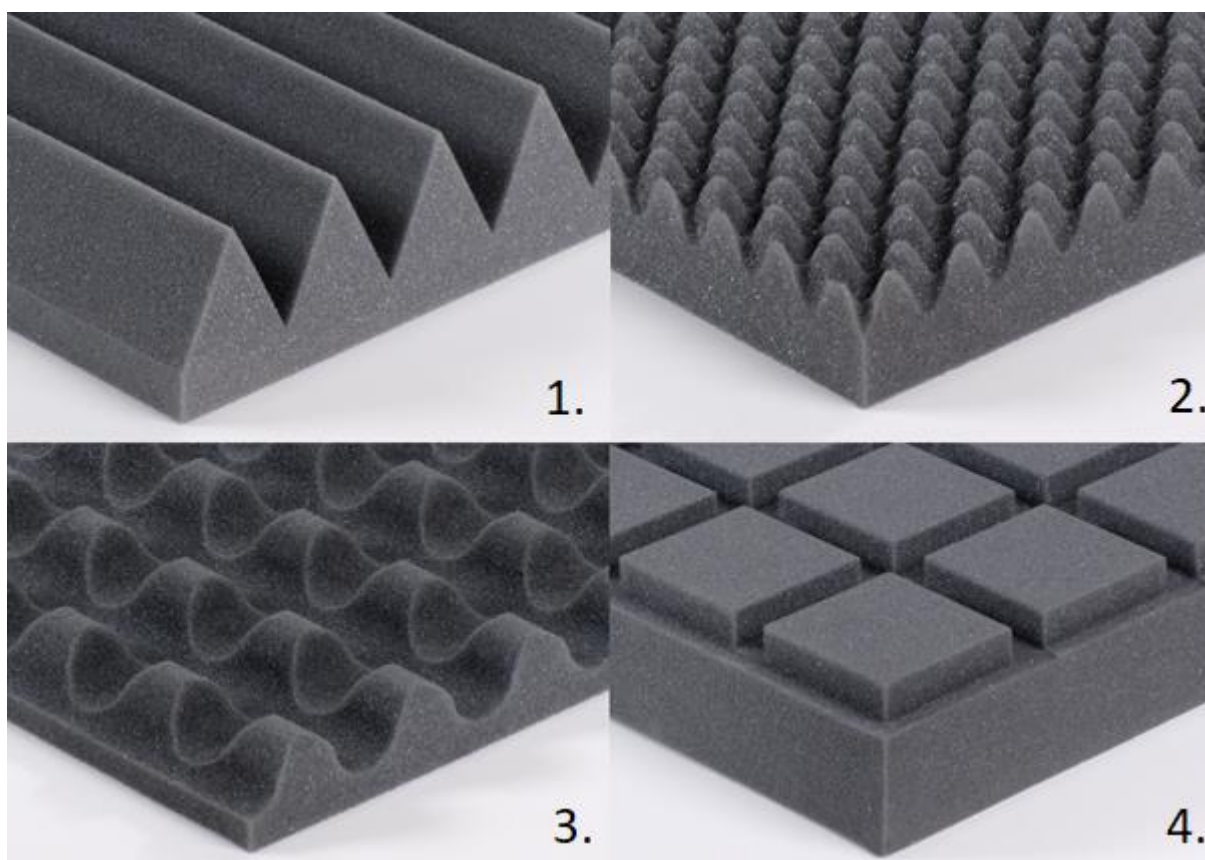
$$Z = z \cdot Z_0 \quad (60)$$

a nakoniec sa dopočíta admitancia, ako obrátený pomer povrchovej impedancie Z

$$G = G' + jG'' = \frac{Z' - jZ''}{Z'^2 + Z''^2} \quad (61)$$

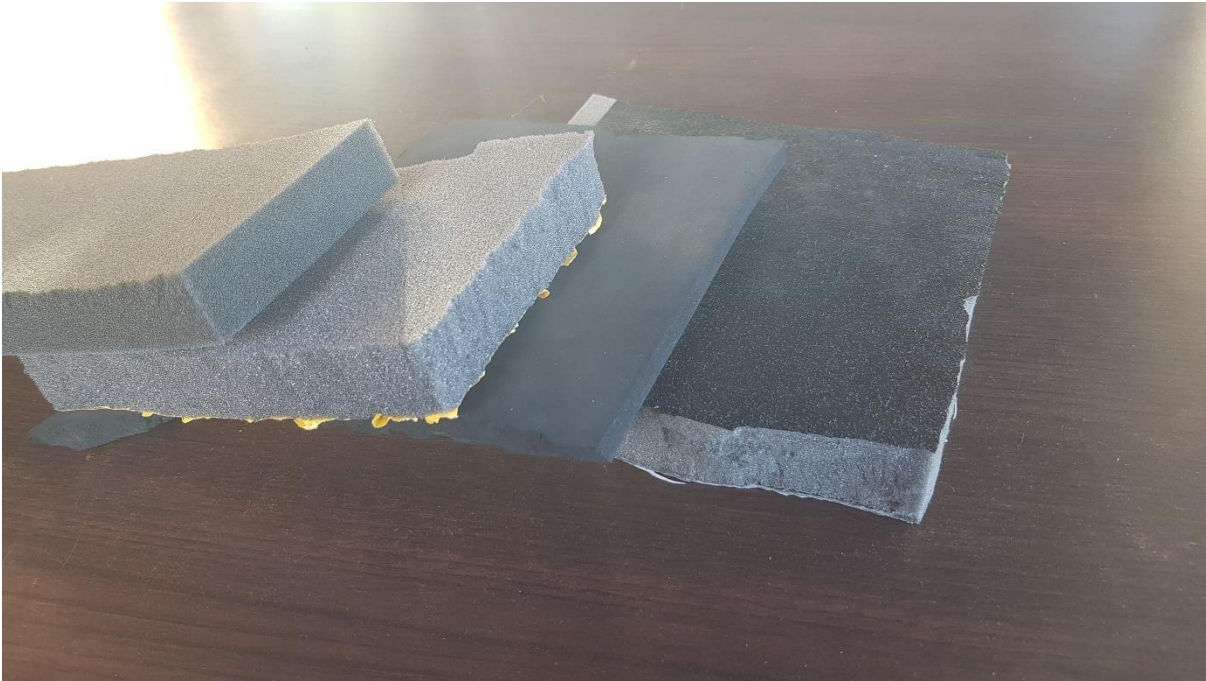
10 EXPERIMENTÁLNE STANOVENIE KOEFICIENTU ZVUKOVEJ POHLTIVOSTI POMOCOU IMPEDANČNEJ TRUBICIE

Po ukončení všetkých overovacích skúšok upravenej meracej trubice, sa prešlo na časť, kde sa zisťoval absorpčný koeficient alfa, hodnota zvukovej povrchovej impedancie a admitancie. Vzorky polyuretánových pien boli poskytnuté v spolupráci s obchodom akustické materiály, kde boli získané 4 rôzne tvarové profily. Prvým bol tvarový profil V s hrúbkou 70 mm, druhý bol tvarový profil vlnky s hrúbkou 45 mm, tretí bol tvarový profil sínus o hrúbke 30 mm a posledný bol tvarový profil block s hrúbkou 80 mm. Je nutné povedať že tvarový profil block ako jediný disponoval informáciami o pohltivosti ktoré neodpovedajú realite, keďže koeficient pohltivosti alfa tu na oktánových frekvenciách presahoval hodnotu 1, čo z hľadiska pohltivosti znamená úplnú absorpciu. Jednotlivé profily môžeme vidieť na obrázku 34.



Obr.34 Tvarové profily od predajcu akustické materiály

Ďalšou časťou bolo meranie a vyhodnocovanie akustickej pohltivosti alfa na 4 rôznych materiáloch, ktoré boli poskytnuté v spolupráci s firmou Zetor. Jednalo sa o tri polyuretánové peny, každá s inou hustotou a vlastnou špecifickou funkciou a jednou gumou o hrúbke 10mm. Tieto materiály sa využívajú ako protihlučné a protirezonančné výplne v oblasti kabíny traktora. K týmto materiálom neboli dostupné žiadne doprevádzajúce listy o ich vlastnostiach a využití. Jednotlivé materiály sú na obr. 35



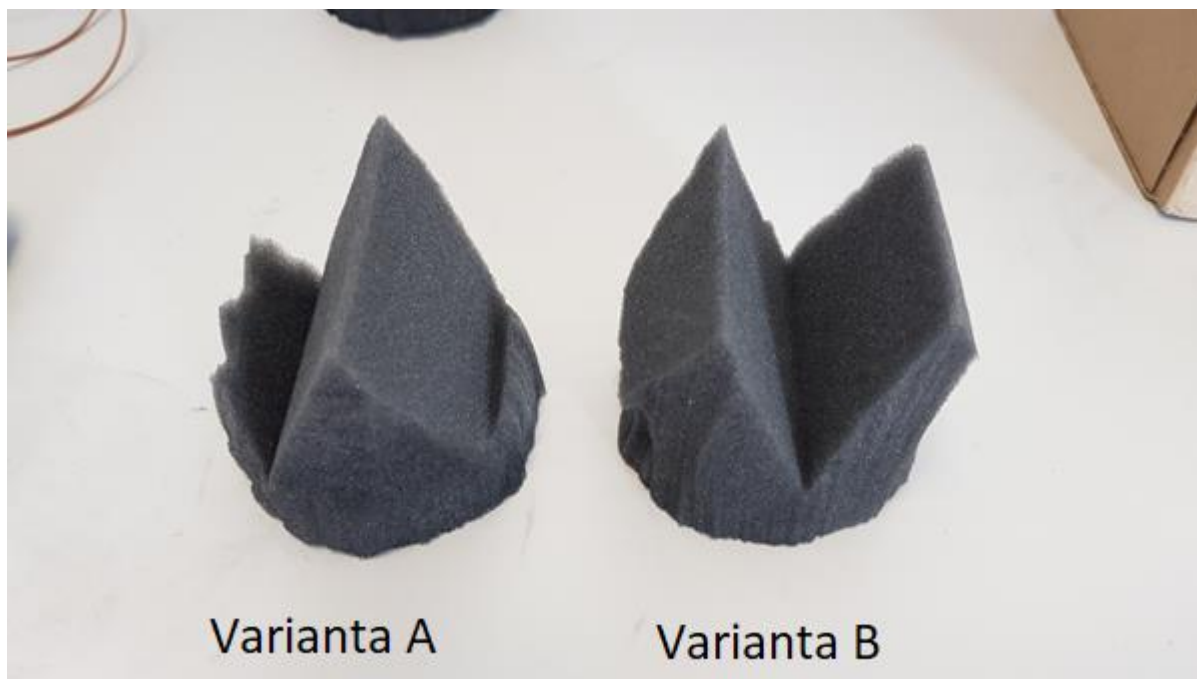
Obr.35 Poskytnuté vzorky výplne z traktorovej kabíny Zetor

Pre všetky vzorky z oboch skupín boli zmerané hladiny akustického tlaku v minime a maxime pri tretinooktávových frekvenciách. Pre profil V, sínus a vlnky (v obrázku 34. 1 až 3) bola vyhotovená citlivostná analýza pri rôzne silnom pôsobení zdroja hluku, a taktiež spočítaná impedancia a admitancia.

Keďže hladina akustického tlaku bola v impedančnej trubici meraná v logaritmickej merítke, boli získané hodnoty v dB, ktoré sa následne dosadili do vzťahu pre akustickú pohltivosť alfa, popísanú normou 10534-1.

10.1 TVAROVÝ PROFIL V 70MM.

Prvou skúmanou vzorkou bol tvarový profil V, zobrazený na obr. 35. 1. Daný profil mal hrúbku 70 mm a hustotu 35 kg.m^{-3} , merania prebiehali na Fakulte strojného inžinierstva v Brne, dňa 26.4. a 10.5. a teplota sa pohybovala v rozmedzí od 25-26 °C. Keďže rozmer, ktorým by sa dala vyrezať kruhová vzorka o priemere 76 mm, čo je priemer našej trubice bol variabilný, boli pripravené dve rôzne varianty tohto profilu. Varianta A kde bol len jeden tvarový element v približne 80 % zastúpení a po bokoch sa nachádzali odrezky z ďalších prvkov, a varianta B, s dvomi tvarovými prvkami typu V, každý v približne 50 % zastúpení. Dôvodom k tomu bola skúška vplyvu tvarového elementu na koeficient pohltivosti alfa. Jednotlivé varianty možno vidieť na



Obr.36 Dve porovnané variácie profilu V, s rovnakým priemerom

Získané hodnoty akustickej pohltivosti sa následne dosadili do vzťahu pre zistenie koeficientu zvukovej pohltivosti alfa pre logaritmické merítko

$$\alpha = \frac{4 \cdot 10^{\frac{\Delta L}{20}}}{(10^{\frac{\Delta L}{20}} + 1)^2} = \frac{4 \cdot 3,16}{(3,16 + 1)^2} = 0,73 [-]$$

Tab.10 Zmerané hodnoty v 1. tlakovom minime a maxime pre varianty A,B profilu V

| f [Hz] | L _{pmin} A [dB] | L _{pmax} A [dB] | Δ L A | L _{pmin} B [dB] | L _{pmax} B [dB] | Δ L B |
|--------|--------------------------|--------------------------|-------|--------------------------|--------------------------|-------|
| 160 | 107,3 | 125,8 | 18,5 | 107,7 | 126,1 | 18,4 |
| 200 | 102 | 121,3 | 19,3 | 101,7 | 121,6 | 19,9 |
| 250 | 107,4 | 126,8 | 19,4 | 107 | 127,66 | 20,66 |
| 315 | 103,9 | 122,9 | 19 | 101,1 | 122,9 | 21,8 |
| 400 | 106,7 | 124,5 | 17,8 | 105,3 | 126,6 | 21,3 |
| 500 | 94,9 | 110,8 | 15,9 | 90,6 | 111,6 | 21 |
| 630 | 104,2 | 117,1 | 12,9 | 100,3 | 119,9 | 19,6 |
| 800 | 98,3 | 108,3 | 10 | 94 | 111 | 17 |
| 1000 | 97,4 | 105,5 | 8,1 | 89 | 105,1 | 16,1 |
| 1250 | 97 | 102,4 | 5,4 | 94,2 | 108,4 | 14,2 |
| 1600 | 88,6 | 93,9 | 5,3 | 84,2 | 94,4 | 10,2 |
| 2000 | 83,7 | 89,5 | 5,8 | 80,4 | 89,5 | 9,1 |
| 2500 | 92,6 | 98,8 | 6,2 | 89 | 98,8 | 9,8 |

Tab.11 Porovnanie koeficientu pohltivosti alfa pre varianty A,B profilu V s alfou od dodávateľa

| f [Hz] | α výpočet A | α výpočet B | α dodávateľ | $\Delta \alpha 1$ | $\Delta \alpha 2$ |
|--------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------|-------------------|
| 160 | 0,38 | 0,38 | 0,12 | 0,26 | 0,26 |
| 200 | 0,33 | 0,35 | 0,12 | 0,21 | 0,23 |
| 250 | 0,31 | 0,35 | 0,14 | 0,17 | 0,21 |
| 315 | 0,28 | 0,36 | 0,17 | 0,11 | 0,19 |
| 400 | 0,29 | 0,40 | 0,21 | 0,08 | 0,19 |
| 500 | 0,30 | 0,48 | 0,25 | 0,05 | 0,23 |
| 630 | 0,34 | 0,60 | 0,33 | 0,01 | 0,27 |
| 800 | 0,43 | 0,73 | 0,42 | 0,01 | 0,31 |
| 1000 | 0,47 | 0,81 | 0,64 | 0,17 | 0,17 |
| 1250 | 0,55 | 0,91 | 0,67 | 0,12 | 0,24 |
| 1600 | 0,72 | 0,91 | 0,89 | 0,17 | 0,02 |
| 2000 | 0,77 | 0,90 | 0,87 | 0,10 | 0,03 |
| 2500 | 0,74 | 0,88 | 0,87 | 0,13 | 0,01 |

Výpočet koeficientu NRC pre všetky 3 varianty:

$$\overline{\alpha}_n = \frac{\alpha(250) + \alpha(500) + \alpha(1000) + \alpha(2000)}{4} \quad (62)$$

$$\overline{\alpha}_{dodávateľ} = \frac{\alpha(0,14) + \alpha(0,25) + \alpha(0,64) + \alpha(0,87)}{4} = 0,47$$

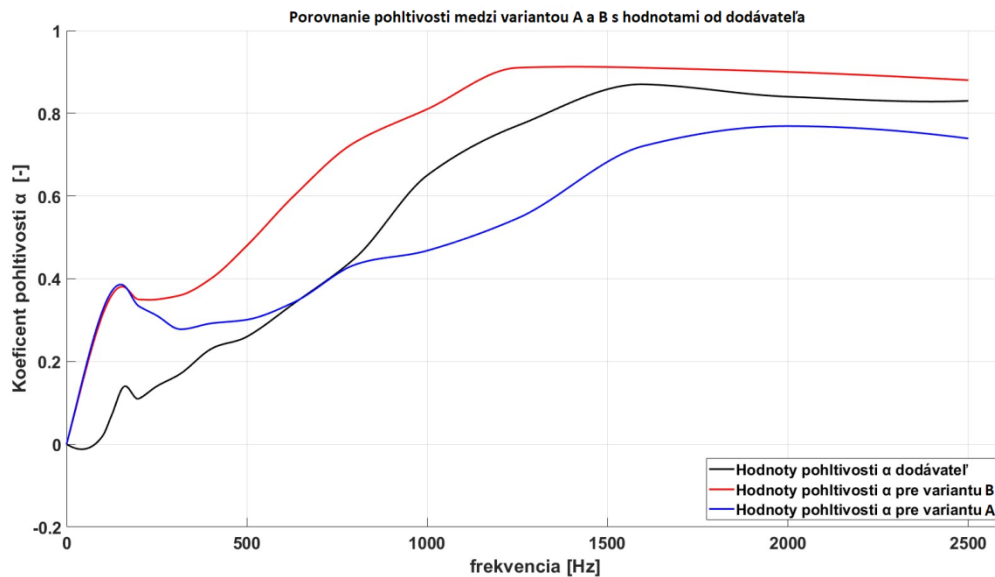
Tab.12 Porovnanie koeficientu zvukovej pohltivosti NRC profilu V

| | Varianta A | Varianta B | Dodávateľ |
|---------|------------|------------|-----------|
| NRC [-] | 0,46 | 0,63 | 0,475 |

Tab. 13 a 14 Citlivostná analýza pre zosilnenie zdroja hluku od 10 % do 300 % profilu V

| f [Hz] | Lp min 3x [dB] | Lp max 3x [dB] | α 3x [-] | Lp min 2x [dB] | Lp max 2x [dB] | α 2x [-] |
|--------|----------------|----------------|-----------------|----------------|----------------|-----------------|
| 160 | 118,3 | 135,9 | 0,412 | 113,9 | 132 | 0,394 |
| 200 | 112,6 | 131,7 | 0,359 | 108,2 | 127,7 | 0,346 |
| 250 | 117,4 | 137,6 | 0,324 | 113,2 | 133,7 | 0,315 |
| 315 | 111,3 | 132,8 | 0,286 | 107,2 | 128,9 | 0,281 |
| 400 | 115,5 | 136,5 | 0,301 | 111,4 | 132,6 | 0,295 |
| 500 | 100,7 | 121,4 | 0,309 | 96,6 | 117,5 | 0,303 |
| 630 | 110,3 | 129,8 | 0,346 | 106,3 | 125,8 | 0,346 |
| 800 | 103,8 | 120,9 | 0,430 | 100 | 117 | 0,434 |
| 1000 | 98,9 | 114,9 | 0,472 | 95 | 111,1 | 0,468 |
| 1250 | 104,1 | 118,2 | 0,550 | 100,2 | 114,3 | 0,550 |
| 1600 | 94,1 | 104,2 | 0,726 | 90,2 | 100,4 | 0,721 |
| 2000 | 90,3 | 99,3 | 0,773 | 86,3 | 95,4 | 0,769 |
| 2500 | 98,7 | 108,5 | 0,739 | 94,9 | 104,8 | 0,734 |

| f [Hz] | Lp min 0.5x [dB] | Lp max 0.5x [dB] | α 0.5x [-] | Lp min 0.1x [dB] | Lp max 0.1x [dB] | α 0.1x [-] |
|--------|------------------|------------------|-------------------|------------------|------------------|-------------------|
| 160 | 101,5 | 120,1 | 0,376 | 86,9 | 105,4 | 0,380 |
| 200 | 95,8 | 115,8 | 0,331 | 81,3 | 101,2 | 0,334 |
| 250 | 101,1 | 121,8 | 0,309 | 86,5 | 107,2 | 0,309 |
| 315 | 94,9 | 116,8 | 0,275 | 80,2 | 102,1 | 0,275 |
| 400 | 99,2 | 120,6 | 0,289 | 84,5 | 105,9 | 0,289 |
| 500 | 84,5 | 105,5 | 0,301 | 69,8 | 90,8 | 0,301 |
| 630 | 94,2 | 113,8 | 0,343 | 79,5 | 99,1 | 0,343 |
| 800 | 88 | 105 | 0,434 | 73,2 | 90,3 | 0,430 |
| 1000 | 83 | 99,1 | 0,468 | 68,3 | 84,3 | 0,472 |
| 1250 | 88,2 | 102,4 | 0,546 | 73,5 | 87,7 | 0,546 |
| 1600 | 78,2 | 88,4 | 0,721 | 63,7 | 73,8 | 0,726 |
| 2000 | 74,4 | 83,5 | 0,769 | 60,2 | 68,9 | 0,786 |
| 2500 | 83 | 92,9 | 0,734 | 68,5 | 78,3 | 0,739 |



Obr.37 Porovnanie závislosti koeficientu alfa na frekvencii dvoch rôznych variant s hodnotami od dodávateľa

Z grafu na obr.36 je zrejmé, že hodnoty ani jednej zo skúmaných variant sa presne nezhodujú s hodnotami od dodávateľa, a je teda možné konštatovať, že skôr ako vplyv elementu na celkovú veľkosť pohltenej energie, má väčší vplyv na pohltenie celkové vyplnenie trubice, ktoré bolo pre variantu s 2x 50 % elementu výrazne väčšie. Reálne sa však skutočná pohltivosť pre daný typ materiálu nachádza uprostred, takže komplexné skúmanie pohltivosti, kde sa zohľadňuje väčšia skúmaná plocha, dáva v tomto prípade presnejšie výsledky. Z citlivostnej analýzy vyplýva, že najbližšie k hodnotám od dodávateľa sa merané údaje približujú pri 50 % zosilnení. Pri 10 % sa zasahuje do oblasti odzvuku okolia a dáta môžu byť jemne skreslené, pri 300 % zosilnení sa dosahuje horná hranica schopnosti mikrofónu zaznamenávať takú vysokú hladinu akustického tlaku. Pre 100 % a 200 % sú výsledky skoro na vlas rovnaké a sú o niečo horšie ako výsledky 50 % zosilnenia.

10.2 TVAROVÝ PROFIL VLNKY 45 MM

Druhou skúmanou vzorkou boli tvarový profil vlnky s priemerom 45 mm, kde bol podobne ako pri predchádzajúcom profile vyhodnocovaný koeficient pohltivosti alfa a následne bol porovnaný s hodnotami od dodávateľa. Merania prebiehali na Fakulte strojného inžinierstva v Brne, dňa 10.5. a teploty sa pohybovali v rozmedzí 26,6 až 27,4 °C. Následné bola podobne ako pri predchádzajúcom meraní vyhodnotená citlivostná analýza pre zosilnenie 10 až 300 %.

Tab.15 Porovnanie koeficientu pohltivosti alfa profilu vlnky s hodnotami od dodávateľa

| f [Hz] | L _{pmin} [dB] | L _{pmax} [dB] | Δ L [dB] | α výpočet1[-] | α dodávateľ [-] | Δ α [-] |
|--------|------------------------|------------------------|----------|---------------|-----------------|---------|
| 160 | 106,4 | 126,5 | 20,1 | 0,33 | 0,09 | 0,24 |
| 200 | 99,9 | 121,8 | 21,9 | 0,28 | 0,08 | 0,20 |
| 250 | 106 | 128,8 | 22,8 | 0,25 | 0,11 | 0,14 |
| 315 | 96 | 120,2 | 24,2 | 0,22 | 0,15 | 0,07 |
| 400 | 97,6 | 122,2 | 24,6 | 0,21 | 0,18 | 0,03 |
| 500 | 90,1 | 114,5 | 24,4 | 0,21 | 0,19 | 0,02 |
| 630 | 87,7 | 112,8 | 25,1 | 0,20 | 0,28 | 0,08 |
| 800 | 98 | 121,4 | 23,4 | 0,24 | 0,35 | 0,11 |
| 1000 | 80,6 | 102,5 | 21,9 | 0,28 | 0,51 | 0,23 |
| 1250 | 80,3 | 100,4 | 20,1 | 0,33 | 0,58 | 0,25 |
| 1600 | 88,2 | 104,8 | 16,6 | 0,45 | 0,63 | 0,18 |
| 2000 | 85,2 | 100,9 | 15,7 | 0,48 | 0,69 | 0,21 |
| 2500 | 92,2 | 104,8 | 12,6 | 0,62 | 0,76 | 0,14 |

$$\overline{\alpha_{\text{výpočet}}} = \frac{\alpha(0,25) + \alpha(0,21) + \alpha(0,28) + \alpha(0,48)}{4} = 0,31$$

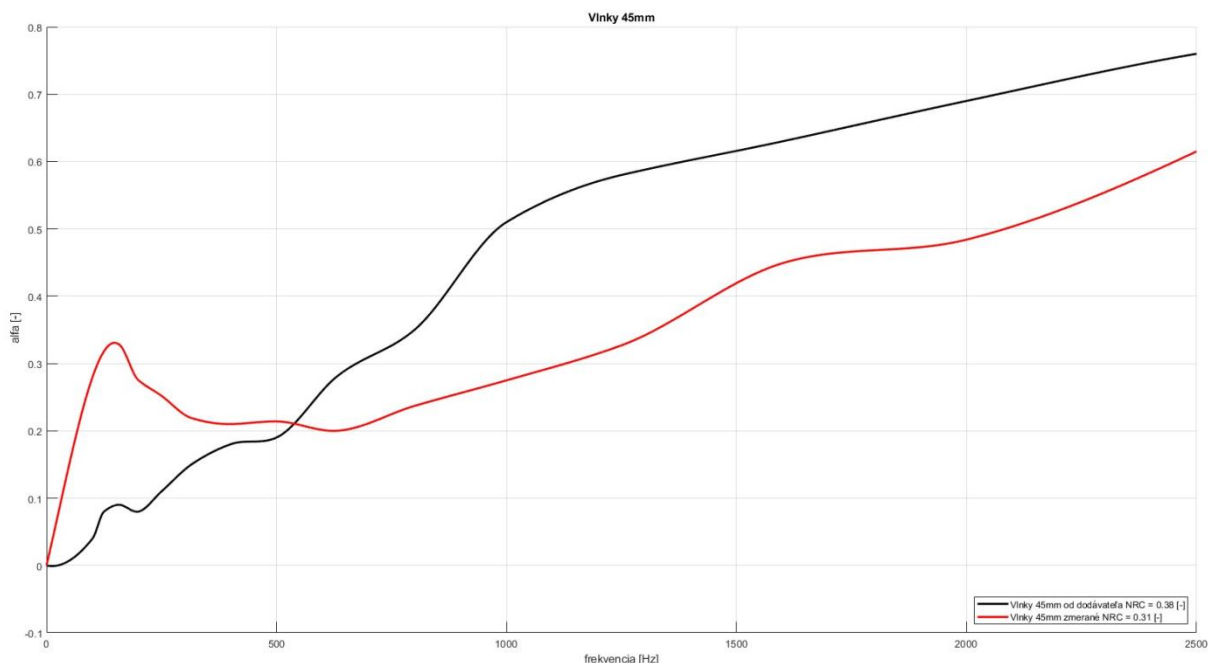
Tab.16 Porovnanie koeficientu zvukovej pohltivosti NRC profilu vlnky

| | Výpočet | Dodávateľ |
|---------|---------|-----------|
| NRC [-] | 0,31 | 0,38 |

Tab. 17 a 18 Citlivostná analýza pre zosilnenie zdroja hluku od 10 % do 300 % profilu vlnky

| f [Hz] | L _{p min 3x} [dB] | L _{p max 3x} [dB] | alfa 3x [-] | L _{p min 2x} [dB] | L _{p max 2x} [dB] | alfa 2x [-] |
|--------|----------------------------|----------------------------|-------------|----------------------------|----------------------------|-------------|
| 160 | 117 | 136,4 | 0,350 | 112,6 | 132,5 | 0,334 |
| 200 | 111 | 132 | 0,301 | 106,3 | 127,9 | 0,284 |
| 250 | 116,4 | 138,7 | 0,265 | 112,3 | 134,8 | 0,260 |
| 315 | 106,2 | 130,1 | 0,226 | 102,1 | 126,1 | 0,223 |
| 400 | 108,2 | 132,1 | 0,226 | 103,8 | 128,2 | 0,214 |
| 500 | 100,2 | 124,3 | 0,221 | 96,1 | 120,4 | 0,217 |
| 630 | 97,9 | 122,7 | 0,206 | 93,7 | 118,8 | 0,200 |
| 800 | 108,4 | 131,3 | 0,249 | 104,1 | 127,4 | 0,240 |
| 1000 | 91,2 | 112,3 | 0,298 | 86,6 | 108,4 | 0,278 |
| 1250 | 91,6 | 110,3 | 0,373 | 86,2 | 106,4 | 0,324 |
| 1600 | 98,1 | 114,6 | 0,453 | 94,2 | 110,8 | 0,449 |
| 2000 | 95 | 110,7 | 0,484 | 91,1 | 106,9 | 0,480 |
| 2500 | 101,9 | 114,6 | 0,611 | 98,1 | 110,8 | 0,611 |

| f [Hz] | Lp min 0.5x [dB] | Lp max 0.5x [dB] | alfa 0.5x [-] | Lp min 0.1x [dB] | Lp max 0.1x [dB] | alfa 0.1x [-] |
|--------|------------------|------------------|---------------|------------------|------------------|---------------|
| 160 | 100,2 | 120,5 | 0,321 | 85,4 | 105,9 | 0,315 |
| 200 | 94 | 116 | 0,273 | 79,5 | 101,4 | 0,275 |
| 250 | 100 | 122,8 | 0,252 | 85,3 | 108,2 | 0,249 |
| 315 | 90 | 114,1 | 0,221 | 75,2 | 99,4 | 0,219 |
| 400 | 91,4 | 116,1 | 0,208 | 76,7 | 101,4 | 0,208 |
| 500 | 84,1 | 108,4 | 0,217 | 69,4 | 93,7 | 0,217 |
| 630 | 81,7 | 106,8 | 0,200 | 67 | 92 | 0,202 |
| 800 | 91,9 | 115,4 | 0,235 | 77,2 | 100,7 | 0,235 |
| 1000 | 74,6 | 96,4 | 0,278 | 61,1 | 81,7 | 0,312 |
| 1250 | 74,3 | 94,4 | 0,327 | 60 | 79,7 | 0,340 |
| 1600 | 82,3 | 98,8 | 0,453 | 67,7 | 84,1 | 0,457 |
| 2000 | 79,2 | 94,9 | 0,484 | 64,7 | 80,3 | 0,488 |
| 2500 | 86,2 | 98,9 | 0,611 | 71,6 | 84,3 | 0,611 |



Obr.38 Porovnanie závislosti koeficientu alfa na frekvencií s hodnotami od dodávateľa profilu vlnky

Z grafickej závislosti na obr.38 možno pozorovať, že hodnoty pohltivosti alfa profilu vlnky od dodávateľa sa s nameranými zhodujú vo svojom správaní, ale nezahodujú sa presne medzi jednotlivými číselnými hodnotami. Môže to byť spôsobené tým, že meranie nemuselo prebehnúť na infrometri, ale mohlo prebiehať v dozvukovej miestnosti. Rozdiel medzi týmito metódami je popísaný v kapitole 5, kde merania v dozvukovej miestnosti berú v úvahu väčšiu

skúmanú plochu, v zábere žiarenia je viacero tvarových elementov a taktiež je rozdiel medzi uhlom dopadu, kde pri našej trubici je dopad vlnenia striktné priamy. V konečnom dôsledku sú pozorované nerovnosti v nábehových frekvenciách od 160 do 315 Hz, ktoré ako už bolo povedané, vyplývajú z nedostatočného pomeru stojatého vlnenia. Z citlivostnej analýzy vyplýva najlepšia zhoda s hodnotami 50 % zosilnenia, pričom 10 % a 300 % zosilnenia vykazujú najväčšie rozdiely.

10.3 TVAROVÝ PROFIL SÍNUS 30 MM

Ďalším skúmaným tvarovým profilom bol 30 mm sínus, kde sa podobne ako pri profile vlnky vyhodnotili a porovnali koeficienty pohltivosti alfa s hodnotami od dodávateľa. Taktiež bola vykonaná citlivostná analýza s 10 % až 300 % silou zdroja. Nakoniec boli porovnané získané koeficienty NRC.

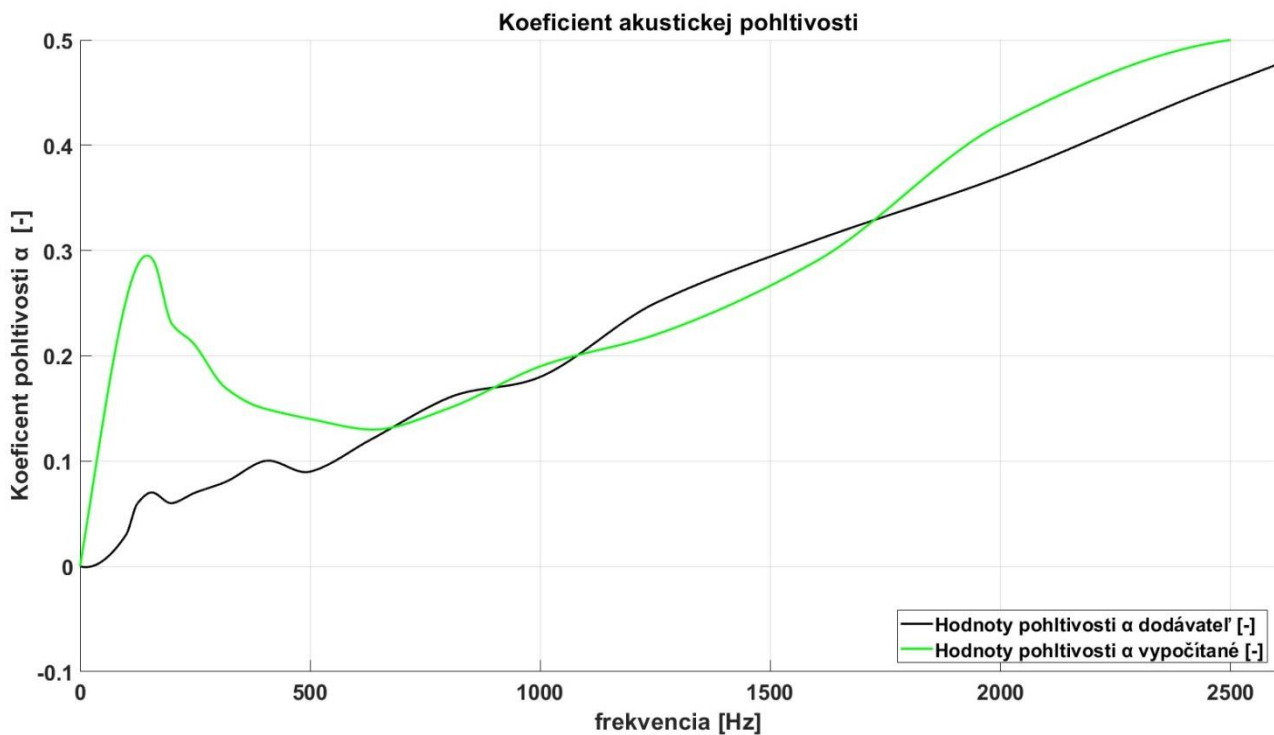
$$\overline{\alpha}_n = \overline{\alpha}_{\text{výpočet}} = \frac{\alpha(0,21) + \alpha(0,14) + \alpha(0,19) + \alpha(0,42)}{4} = 0,24$$

Tab.19 Porovnanie koeficientu zvukovej pohltivosti NRC profilu sínus

| | výpočet | Dodávateľ |
|---------|---------|-----------|
| NRC [-] | 0,24 | 0,15 |

Tab.20 Porovnanie koeficientu pohltivosti alfa profilu sínus s hodnotami od dodávateľa

| f [Hz] | L _{pmin} [dB] | L _{pmax} [dB] | Δ L [dB] | α výpočet1[-] | α dodávateľ [-] | Δ α [-] |
|--------|------------------------|------------------------|----------|---------------|-----------------|---------|
| 160 | 105,2 | 126,7 | 21,5 | 0,29 | 0,05 | 0,24 |
| 200 | 98,4 | 122 | 23,6 | 0,23 | 0,07 | 0,16 |
| 250 | 104 | 128,6 | 24,6 | 0,21 | 0,05 | 0,16 |
| 315 | 92,1 | 118,8 | 26,7 | 0,17 | 0,06 | 0,11 |
| 400 | 91,3 | 118,9 | 27,6 | 0,15 | 0,08 | 0,07 |
| 500 | 89,1 | 117,3 | 28,2 | 0,14 | 0,07 | 0,07 |
| 630 | 81,1 | 110,1 | 29 | 0,13 | 0,10 | 0,03 |
| 800 | 86,9 | 114,6 | 27,7 | 0,15 | 0,13 | 0,02 |
| 1000 | 76,9 | 102,5 | 25,6 | 0,19 | 0,17 | 0,02 |
| 1250 | 74,5 | 98,7 | 24,2 | 0,22 | 0,23 | 0,01 |
| 1600 | 79,9 | 101,4 | 21,5 | 0,29 | 0,30 | 0,01 |
| 2000 | 75,8 | 93,1 | 17,3 | 0,42 | 0,31 | 0,11 |
| 2500 | 85,1 | 100,3 | 15,2 | 0,50 | 0,41 | 0,09 |



Obr.39 Porovnanie závislosti koeficientu alfa profilu sínus na frekvencií s hodnotami od dodávateľa

Tab. 21 a 22 Citlivostná analýza pre zosilnenie zdroja hluku od 10 % do 300 % profilu sínus

| f [Hz] | Lp min 3x [dB] | Lp max 3x [dB] | alfa 3x [-] | Lp min 2x [dB] | Lp max 2x [dB] | alfa 2x [-] |
|--------|----------------|----------------|-------------|----------------|----------------|-------------|
| 160 | 115,8 | 136,6 | 0,306 | 111,4 | 132,7 | 0,292 |
| 200 | 109,2 | 132,2 | 0,247 | 104,8 | 128,2 | 0,237 |
| 250 | 114,6 | 138,6 | 0,223 | 110,3 | 134,7 | 0,214 |
| 315 | 102,4 | 128,6 | 0,178 | 98,2 | 124,8 | 0,171 |
| 400 | 101,3 | 129,1 | 0,150 | 97,3 | 125 | 0,152 |
| 500 | 99,1 | 127,2 | 0,146 | 95,2 | 123,2 | 0,147 |
| 630 | 91,1 | 119,9 | 0,135 | 87,1 | 116,1 | 0,132 |
| 800 | 96,8 | 124,5 | 0,152 | 92,9 | 120,7 | 0,150 |
| 1000 | 86,7 | 112,4 | 0,188 | 82,8 | 108,6 | 0,186 |
| 1250 | 86,6 | 108,6 | 0,273 | 81,2 | 104,7 | 0,235 |
| 1600 | 89,9 | 111,2 | 0,292 | 85,9 | 107,3 | 0,289 |
| 2000 | 85,8 | 102,8 | 0,434 | 81,7 | 99 | 0,423 |
| 2500 | 94,9 | 110 | 0,509 | 91,1 | 106,3 | 0,505 |

| f [Hz] | Lp min 0.5x [dB] | Lp max 0.5x [dB] | alfa 0.5x [-] | Lp min 0.1x [dB] | Lp max 0.1x [dB] | alfa 0.1x [-] |
|--------|------------------|------------------|---------------|------------------|------------------|---------------|
| 160 | 99 | 120,7 | 0,281 | 84,3 | 106,1 | 0,278 |
| 200 | 92,5 | 116,2 | 0,230 | 78 | 101,6 | 0,233 |
| 250 | 97,8 | 122,6 | 0,206 | 83 | 108 | 0,202 |
| 315 | 86 | 112,7 | 0,169 | 71,4 | 98 | 0,171 |
| 400 | 85,3 | 112,9 | 0,154 | 70,5 | 98,2 | 0,152 |
| 500 | 83,2 | 111,3 | 0,146 | 68,4 | 96 | 0,154 |
| 630 | 74,9 | 104 | 0,131 | 60,1 | 89,3 | 0,130 |
| 800 | 80,9 | 108,7 | 0,150 | 66,1 | 93,9 | 0,150 |
| 1000 | 70,9 | 96,6 | 0,188 | 57,2 | 81,8 | 0,210 |
| 1250 | 69,3 | 92,7 | 0,237 | 55,7 | 78 | 0,265 |
| 1600 | 74 | 95,4 | 0,289 | 59,7 | 80,7 | 0,301 |
| 2000 | 69,7 | 87,1 | 0,419 | 56,2 | 72,5 | 0,461 |
| 2500 | 79,3 | 94,4 | 0,509 | 64,8 | 79,8 | 0,513 |

Z výsledkov vidieť, že namerané hodnoty pre profil sínus sa s hodnotami od dodávateľa zhodujú dosť presne, jedná sa o najtenší profil, takže hodnota akustickej pohltivosti, taktiež ako koeficient NRC, ktorý jednočíselne popisuje akustickú pohltivosť, sú číselne najmenšie. Je stále badateľný útlm v nízkych frekvenciách, čo spôsobuje najväčšie rozdiely v porovnaní daných hodnôt. Citlivostná analýza vyšla pre všetky zosilnenia veľmi podobne, najhoršie je na tom 10 %, kde sa pre nízke hodnoty tlakových mínim narážalo na hodnoty odzvuku pozadia, ktoré dané merania znehodnocovali.

10.4 TVAROVÝ PROFIL BLOCK 80 MM

Posledným zo skúmaných profilov bol najhrubší profil, kde sa pre jeho hrúbku očakávali vysoké hodnoty akustickej pohltivosti. Pri skúmaní pohltivosti udávané dodávateľom pre tento profil, sa však narazilo na paradox, kde dodávateľ uvádza hodnoty pohltivosti alfa väčšie ako 1, pričom 1 znamená úplnú absorpciu zvuku. Z tohto dôvodu nebola na profile vyhodnotená citlivostná analýza a hodnoty boli porovnané len so 100 % silou zdroja.

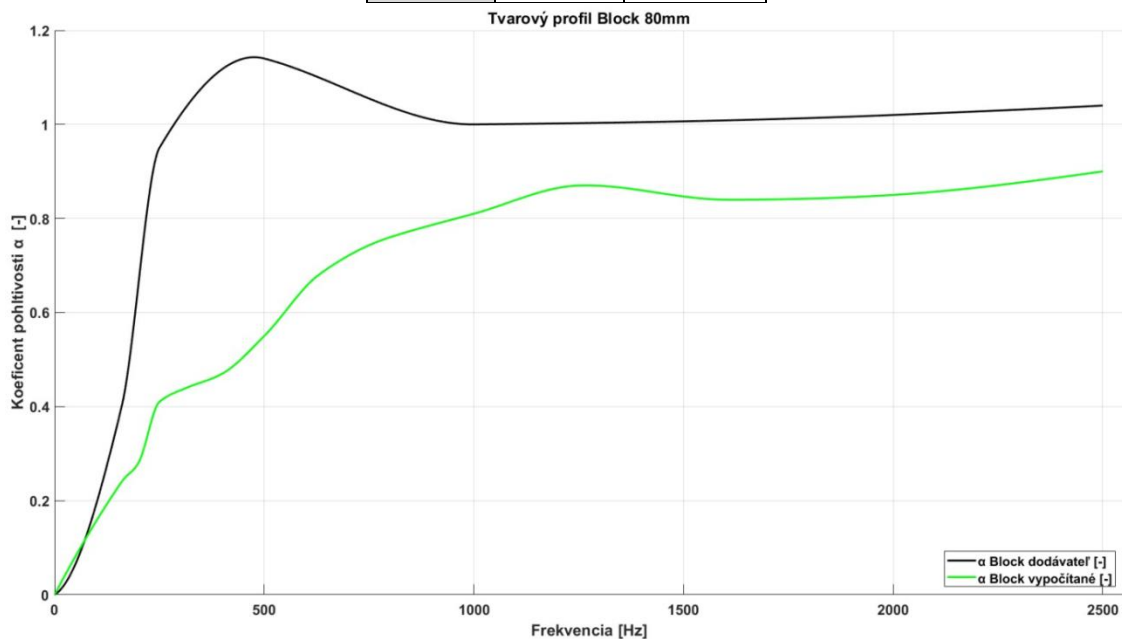
Tab.23 Porovnanie koeficientu pohltivosti alfa s hodnotami od dodávateľa profil block

| f [Hz] | Lp _{min} [dB] | Lp _{max} [dB] | Δ L [dB] | α výpočet1[-] | α dodávateľ [-] | Δ α [-] |
|--------|------------------------|------------------------|----------|---------------|-----------------|---------|
| 160 | 102,1 | 125,5 | 23,4 | 0,24 | - | - |
| 200 | 103,6 | 125,5 | 21,9 | 0,28 | - | - |
| 250 | 108,4 | 126 | 17,6 | 0,41 | 0,95 | 0,54 |
| 315 | 106,6 | 123,5 | 16,9 | 0,44 | - | - |
| 400 | 106,7 | 122,8 | 16,1 | 0,47 | - | - |
| 500 | 95,9 | 110 | 14,1 | 0,55 | 1,14 | 0,59 |
| 630 | 104,2 | 115,3 | 11,1 | 0,68 | - | - |
| 800 | 97,5 | 106,7 | 9,2 | 0,76 | - | - |
| 1000 | 99,1 | 107,3 | 8,2 | 0,81 | 1,00 | 0,19 |
| 1250 | 95,3 | 101,8 | 6,5 | 0,87 | - | - |
| 1600 | 86,9 | 94,2 | 7,3 | 0,84 | - | - |
| 2000 | 83 | 90 | 7 | 0,85 | 1,02 | 0,17 |
| 2500 | 94 | 99,7 | 5,7 | 0,90 | - | - |

$$\overline{\alpha_{\text{výpočet}}} = \frac{\alpha(0,41) + \alpha(0,55) + \alpha(0,81) + \alpha(0,85)}{4} = 0,66$$

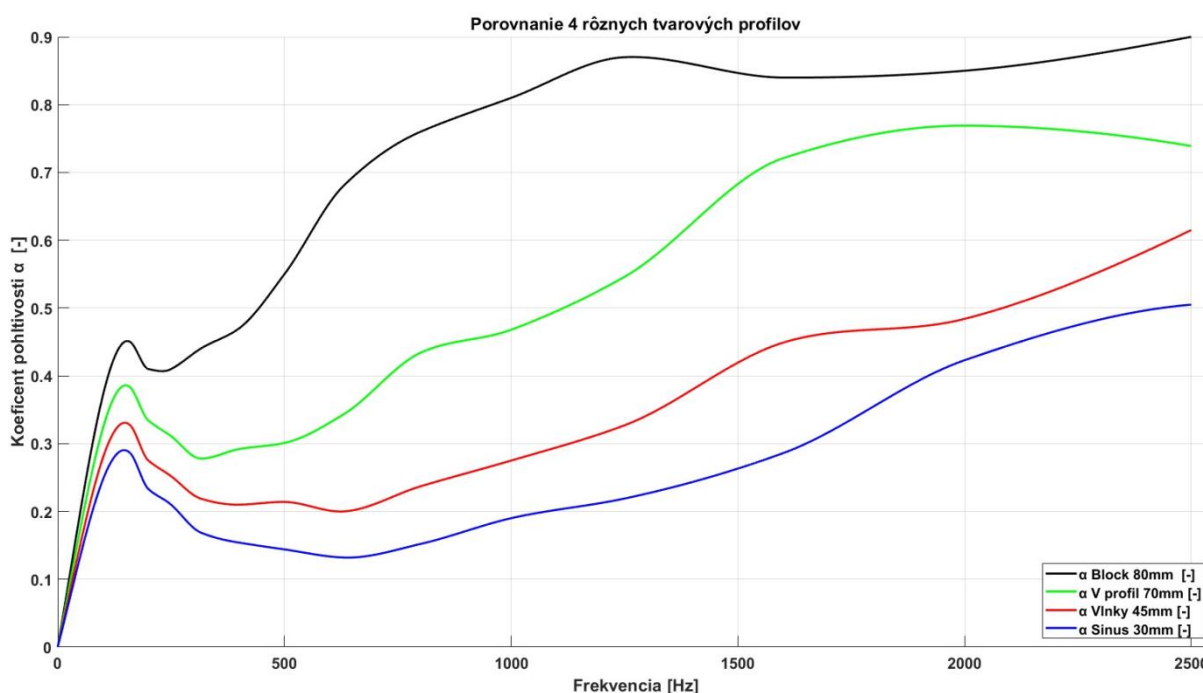
Tab. 24 Porovnanie koeficientu zvukovej pohltivosti NRC profil block

| | Výpočet | Dodávateľ |
|---------|---------|-----------|
| NRC [-] | 0,66 | 1,03 |



Obr.40 Porovnanie závislosti koeficientu alfa na frekvencii s hodnotami od dodávateľa

Z daných výsledkov jednoznačne vyplýva, že hrúbka materiálu má najvýraznejší vplyv na celkovú pohltivosť. Pri porovnaní grafických vyhodnotení, vidieť istú zhodu v správaní sa medzi jednotlivými frekvenčnými nárastmi, no jednoznačne nie je možné, získať rovnaké výsledky. Je vysoko pravdepodobné, že namerané výsledky sú realite bližšie, ako hodnoty ponúkané dodávateľom.



Obr.41 Výsledné porovnanie pohltivosti α všetkých tvarových profilov

10.5 VYHODNOCOVANIE POHLTIVOSTI NA VZORKÁCH OD FIRMY ZETOR

V tejto časti bolo meranie zamerané na výpočet koeficientu pohltivosti alfa na vzorkách poskytnutých v spolupráci s miestnym výrobcom traktorov Zetor. Jednotlivé vzorky sa od seba líšia ako hustotou, tak aj celkovou hrúbkou a aj svojím umiestnením v kabíne vodiča. Niektoré zo vzoriek boli doplnené montážnym materiálom, ako napr. lepiaci papier, či plastová podpora, prípadne povrchovým náterom pre zvýšenie pohltivosti. Všetky tieto externé faktory vplývajú na výslednú hodnotu alfa. Ako už bolo spomenuté, vlny v našej trubici dopadajú na povrch vzorky kolmo, no keďže je vo vzorkách prítomný doprevádzajúci materiál - plasty či papier, na ktorom sú jednotlivé peny uložené, nemusia sa odrážať pod rovnakým uhlom ako dopadli. Efekt tohto nesymetrického odrazu možno sledovať počas časového záznamu akustického tlaku pri jednotlivých meraniach.

Tab.25 Výpočet koeficientu alfa pre klasickú polyuretánovú penu s hrúbkou 30 mm

| f [Hz] | L _{pmin} [dB] | L _{pmax} [dB] | Δ L [dB] | α [-] |
|--------|------------------------|------------------------|----------|-------|
| 160 | 102,45 | 127,1 | 24,65 | 0,209 |
| 200 | 96,6 | 121,7 | 25,10 | 0,200 |
| 250 | 103,9 | 129,3 | 25,40 | 0,193 |
| 315 | 93,76 | 119,9 | 26,14 | 0,179 |
| 400 | 94,77 | 120,9 | 26,13 | 0,179 |
| 500 | 88,8 | 115,7 | 26,9 | 0,165 |
| 630 | 84,77 | 110,12 | 25,35 | 0,194 |
| 800 | 91,4 | 117,4 | 26,0 | 0,182 |
| 1000 | 78,3 | 102,2 | 23,9 | 0,226 |
| 1250 | 77,7 | 99 | 21,3 | 0,292 |
| 1600 | 85,3 | 104,8 | 19,5 | 0,346 |
| 2000 | 80,2 | 95,3 | 15,1 | 0,509 |
| 2500 | 87,8 | 101,5 | 13,7 | 0,568 |

Tab.26 Výpočet koeficientu alfa pre polyuretánovú penu uloženú na lepiacom papieri s celkovou hrúbkou 27 mm

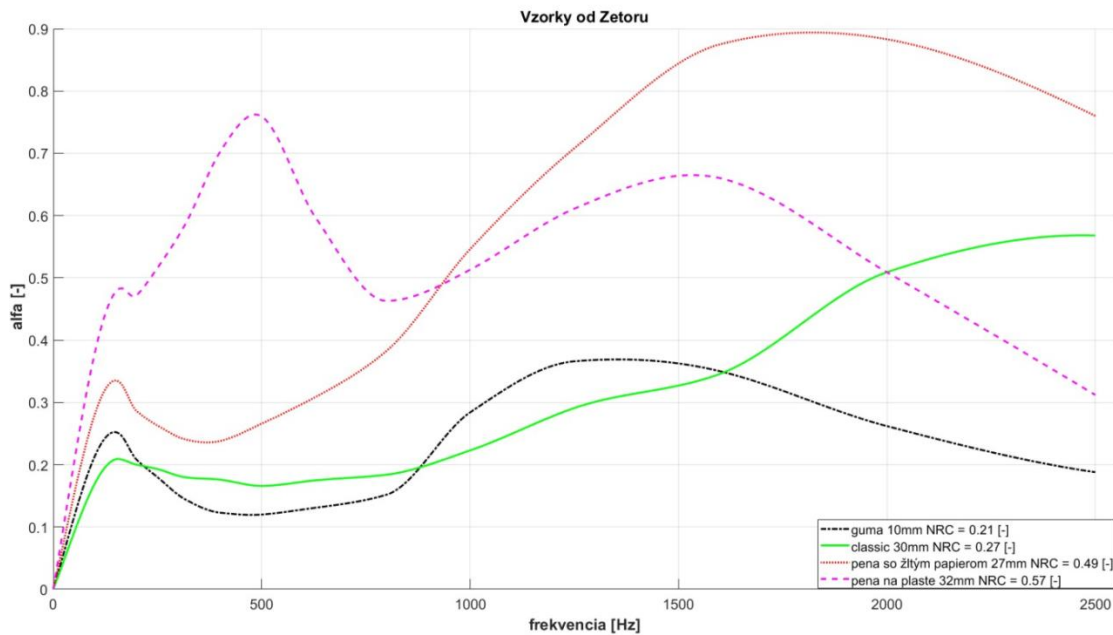
| f [Hz] | L _{pmin} [dB] | L _{pmax} [dB] | Δ L [dB] | α [-] |
|--------|------------------------|------------------------|----------|-------|
| 160 | 106,46 | 126,4 | 19,9 | 0,332 |
| 200 | 100,3 | 121,8 | 21,5 | 0,286 |
| 250 | 105,85 | 128,2 | 22,4 | 0,263 |
| 315 | 95,76 | 119 | 23,2 | 0,241 |
| 400 | 96,42 | 119,8 | 23,4 | 0,238 |
| 500 | 93,551 | 115,8 | 22,2 | 0,266 |
| 630 | 89,9 | 110,6 | 20,7 | 0,309 |
| 800 | 98,4 | 116,8 | 18,4 | 0,383 |
| 1000 | 88 | 102,2 | 14,2 | 0,546 |
| 1250 | 89 | 99,5 | 10,5 | 0,708 |
| 1600 | 92,18 | 98,6 | 6,4 | 0,875 |
| 2000 | 86,4 | 92,6 | 6,2 | 0,883 |
| 2500 | 92,5 | 101,8 | 9,3 | 0,760 |

Tab.27 Výpočet koeficientu alfa pre lisovanú gumu s hrúbkou 10 mm

| f [Hz] | L _{pmin} [dB] | L _{pmax} [dB] | Δ L [dB] | α [-] |
|--------|------------------------|------------------------|----------|-------|
| 160 | 104 | 126,9 | 22,9 | 0,249 |
| 200 | 97,4 | 122,1 | 24,7 | 0,208 |
| 250 | 101,5 | 127,6 | 28,1 | 0,145 |
| 315 | 89,36 | 117,5 | 28,1 | 0,145 |
| 400 | 86,8 | 116,5 | 29,7 | 0,123 |
| 500 | 93,3 | 123,2 | 29,9 | 0,120 |
| 630 | 79,1 | 108,2 | 29,1 | 0,131 |
| 800 | 81,6 | 109,3 | 27,7 | 0,152 |
| 1000 | 82,8 | 104,4 | 21,6 | 0,284 |
| 1250 | 81,6 | 99,5 | 17,9 | 0,401 |
| 1600 | 75,1 | 94,5 | 19,4 | 0,350 |
| 2000 | 67,2 | 89,6 | 22,4 | 0,262 |
| 2500 | 76,4 | 102,1 | 25,7 | 0,188 |

Tab.28 Výpočet koeficientu alfa pre polyuretánovú penu nalepenú na 2 mm plaste s povrchovým náterom, o celkovej hrúbke 32 mm

| f [Hz] | L _{pmin} [dB] | L _{pmax} [dB] | Δ L [dB] | α [-] |
|--------|------------------------|------------------------|----------|-------|
| 160 | 109,67 | 125,4 | 15,7 | 0,483 |
| 200 | 105,78 | 121,8 | 16,0 | 0,472 |
| 250 | 110,47 | 125,4 | 13,4 | 0,580 |
| 315 | 104,28 | 117,7 | 13,4 | 0,580 |
| 400 | 105,64 | 115,9 | 10,3 | 0,719 |
| 500 | 107,17 | 116,5 | 9,3 | 0,759 |
| 630 | 94,65 | 107,7 | 13,1 | 0,596 |
| 800 | 92,17 | 108,4 | 16,2 | 0,463 |
| 1000 | 89,3 | 104,3 | 15,0 | 0,513 |
| 1250 | 86,5 | 99,2 | 12,7 | 0,611 |
| 1600 | 83,6 | 94,2 | 10,6 | 0,704 |
| 2000 | 74,4 | 89,5 | 15,1 | 0,509 |
| 2500 | 80,7 | 101,3 | 20,6 | 0,312 |



Obr.42 Porovnanie závislost' koeficientu alfa všetkých skúmaných vzoriek od firmy Zetor

Ako z jednotlivých meraní vyplýva, najväčšia pohltivosť na skúmanom tretinooktávovom spektre dosahuje pena uložená na plaste, ktorá je navyše ošetrená povrchovým náterom, čo vo svojej podstate zvyšuje celkovú pohltivosť materiálu. Zaujímavosťou je, že má maximálnu pohltivosť pri frekvencii 500 Hz, čo má určite význam pri svojom konštrukčnom uložení. Pena uložená na lepiacom papieri sa svojím priebehom najviac podobá správaniu klasickej polyuretánovej pene a jej uloženie bude preto situované ako stredná medzná vrstva. Najhoršie pohltivé vlastnosti dosahuje lisovaná guma, ktorej funkcia nie je v prvom rade tlmiť hluk, ale kvôli svojej vyššej hustote a pevnosti bude slúžiť ako spodná vrstva na rozhraní kovu kabíny a ďalšou nadväzujúcou vrstvou.

ZÁVER

Diplomová práca sa zaoberá experimentálnym určením koeficientu zvukovej pohltivosti alfa, pre rôzne materiály. Prvá časť tejto práce je teoretická, podrobne opisuje teóriu akustických veličín a základných princípov šírenia zvukových vln. Charakterizuje funkcie akustických mechanizmov, frekvenčných pásiem, oboznamuje s problematikou metód merania parametrov zvukovej pohltivosti.

Hlavným cieľom tejto diplomovej práce, popísanej bližšie v druhej časti, bolo experimentálne určenie koeficientu zvukovej pohltivosti na vzorkách, ktorých výsledky bolo možné porovnať s hodnotami výrobcu, ako aj na vzorkách, kde táto možnosť nebola. Najprv bolo potrebné upraviť a vylepšiť experimentálnu trubicu, ktorú zhotovila ako tému svojej diplomovej práce a úspešne obhájila pani Ing. Juliana Vozárová. Zmeny a realizáciu úprav sa po množstve konzultácií podarilo dotiahnuť do finálnej podoby, ktorá ako prvá vznikla v 3D modelovacom prostredí PTC creo. Následne sa prešlo k nákupu komponentov a revitalizácii existujúcej zostavy. Pozornosť bola zameraná hlavne na komponenty, ktoré potrebovali lepšie prevedenie, ako napríklad držiak mikrofónovej sondy, plniaci naraz viacero funkcií. Okrem jeho hlavnej úlohy, ktorou je uchytenie a pohyb mikrofónu, sa navyše pridala funkcia uloženia a pohyb lanka polohového snímača, vedenie mikrofónového kábla a možnosť lepšieho manuálneho odčítavania z pevnej stupnice. Ďalej bol navrhnutý a vytlačený trojramenný unášač, ktorý slúži k presnému uloženiu mikrofónovej sondy v strede trubice a bezproblémovú manipuláciu. Úpravou si prešla aj vodiaca lišta, ktorá pozostáva z hliníkového stavebnicového profilu a možno z nej navyše manuálne odčítať momentálnu polohu mikrofónu. Nakoniec bol zakúpený lankový snímač polohy, ktorý spresnil celkové meranie a odstránil možnosť nepresného odčítania momentálnej polohy. Všetky komponenty zakúpené do zostavy meracieho zariadenia je možné rozobrať a uložiť, prípadne použiť na iné projekty, bez toho aby bol nutný výraznejší zásah.

Po zakúpení a vytlačení navrhnutých komponentov, bolo možné meracie zariadenie zostaviť a začať s predbežnými meraniami. Až vtedy sa zistilo, že do merania vnikajú parazitné frekvencie 50 a 80 Hz, ktorých príčinou bolo, že vysielaná frekvencia, často nebola dominantná. Tento nechcený šum sa podarilo odfiltrovať tak, že bol zakúpený nový zosilňovač s oveľa menším celkovým skreslením oproti pôvodnému. Ďalšou úpravou si prešiel zdroj energie, kde bolo rušenie od elektrickej siete odfiltrované pomocou laboratórneho stabilného zdroju, cez ktorý bol pripojený ako analógový prevodník, tak aj novo zapojený zosilňovač. Týmito úpravami sa podarilo dostať šum z pozadia z pôvodných 80 dB na reálnejších 47 dB.

Ďalšou dôležitou časťou bola simulácia experimentu do prostredia Ansys Workbench. Bola prevedená úspešná akustická modálna analýza a štruktúrna modálna analýza. Akustickou modálnou analýzou si prešiel vnútorný obsah vzduchu v trubici, štruktúrna modálna zasa na zostave so všetkými komponentami. Výsledkom bolo zistenie potencionálne nebezpečných vlastných frekvencií a s nimi spojených špecifických módov. Druhou analýzou bola harmonicko-akustická analýza, kde bol najprv vymodelovaný vnútorný obsah vzduchu v trubici, na ktorom sa následne prevádzala simulácia. Prvým problémom bolo správne zadefinovanie okrajových podmienok pre použitú aplikáciu. Z informácií od výrobcu nebolo možné presne zadefinovať zdroj hluku, a preto ďalšia cesta viedla k praktickému experimentu. Najprv boli pomocou mikrofónovej sondy zistené hodnoty akustického tlaku, tie boli prevedené na rýchlosť, ktorá bola dosadená do prvku „surface velocity“ a tak sa podarilo zadefinovať zdroj hluku. Dôvody, prečo sa výsledky zo simulácie nezhodujú s experimentálnymi môžu byť nasledovné: nedostatočná definícia porézneho absorbentu, kde je potrebné poznať materiálové

údaje o jeho odpore voči prúdeniu, jeho poréznošť a tortuozitu, čo sú konkrétne konštanty zadávané výrobcom. Týmito informáciami nanešťastie žiaden z tuzemských predajcov zvukových absorbentov nedisponuje, preto bolo nutné spoľahnúť sa na prevedené výskumy v danej problematike a pokúsiť sa spojiť ich výsledky s našou aplikáciou.

Praktickou časťou práce bolo zisťovanie pohltivosti rôznych materiálov, štyroch typov polyuretánových pien, komerčne dostupných a ďalších štyroch materiálov, ktoré boli poskytnuté v spolupráci s firmou Zetor, nachádzajúcich sa v kabíne bežne dostupného traktora. Pre jednotlivé materiály boli zmerané koeficienty zvukovej pohltivosti, ktoré sa líšili tak od materiálu ako aj od jeho uloženia, či to už bolo na lepiacom papieri, alebo na plastovom podklade. V rámci záverečnej práce bola prevedená sada experimentov na novoupravenej impedačnej trubici, na rôznych tvarových profiloch, kde sa výsledky porovnali s hodnotami od výrobcu. Výsledky sa priemerne líšili o 15 %, za čo môže hlavne útlm pri nižších frekvenciách od 160 do 315 Hz. Dôvodom tohto útlmu môže byť buď nedostatočná izolácia reproduktoru od konštrukcie a s tým možnosť prenosu vibrácií cez konštrukciu do mikrofónovej sondy alebo to mohol spôsobiť malý dynamický rozsah zariadenia pre spracovanie signálu.

Pre tvarové polyuretánové profily bola následne vykonaná citlivostná analýza, kde sa zisťovalo, či má zdroj o rôznom zosilnení vplyv na výsledný koeficient alfa. Dospelo sa k záveru, že tento vplyv je minimálny s tým, že najlepšie na tom bolo 50 % zosilnenie, a ako najhoršie sa javilo 10 % a 300 % zosilnenie signálu.

POUŽITÉ INFORMAČNÉ ZDROJE

- [1] NOVÝ, Richard. Hluk a chvění. 4. přepracované vydání. Praha: Česká technika - Nakladatelství ČVUT, 2019. ISBN 978-80-01-06554-9.
- [2] BILOŠ, Jan. BILOŠOVÁ, Alena. Aplikovaný mechanik jako součást týmu konstruktérů a vývojářů: Část vibrační diagnostika: Studijní opora, Technická univerzita Ostrava 2012, ISBN 978-80-248-2755-1. Dostupné <http://projekty.fs.vsb.cz/147/ucebniopory/978-80-248-2755-1.pdf>
- [3] Rychlost' zvuku. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2022-02-02]. Dostupné z: https://sk.wikipedia.org/wiki/R%C3%BDchlos%C5%A5_zvuku
- [4] Celková energie kmitajícího bodu [online]. [cit. 2022-02-02]. Dostupné z http://ufmi.ft.utb.cz/texty/env_fyzika/EF_02.pdf
- [5] FEHLMANN, R.F. A Mathematical Approach to Swiss Natural Yodels II [online]. 2014, 1-2 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/301215155_A_mathematical_approach_to_Swiss_natural_yodels_2_FEHLMANN_2014
- [6] MEDVECOVÁ, Ivana. Základy akustiky, PŘÍRUČKA PRO ZAČÁTEČNÍKY [online]. Praha, 2009 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: https://stavarna.com/download2/4160_4247_cs_its075-zaklady-akustiky-prirucka-pro-zacatecniky.pdf. Česká nezávislá společnost snižující hluk.
- [7] Akustické vlnění [online]. Technická univerzita Ostrava, 238-250 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: https://www.studopory.vsb.cz/studijnimaterialy/Fyzikaprobakalare/PDF/1_8_3_akustika.pdf
- [8] KAŇKA, Jan. Intenzita zvuku – decibel [online]. Stavební fakulta ČVUT Praha [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/akustika-staveb/216-intenzita-zvuku-decibel>
- [9] Ing. Jaroslav Obraz, CSc. - Ultrazvuk v měřicí technice. Vydalo SNTL 1976, 480 stran, 416 obrázků, 13 tabulek.
- [10] Decibelové veličiny v akustice, kmitočtová pásma. [online]. [cit. 2022-02-02]. Dostupné z: http://ufmi.ft.utb.cz/texty/env_fyzika/EF_03.pdf
- [11] Acoustics Transmission Of Sound [online]. [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://science.jrank.org/pages/52/Acoustics-Transmission-sound.html>
- [12] Weber-Fechnerův zákon. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: https://www.wikiskripta.eu/w/Weber-Fechner%C5%AFv_z%C3%A1kon
- [13] SMETANA, Ctirad. Hluk a vibrace: měření a hodnocení. Praha: Sdělovací technika, 1998, 188 s. : il., čb. fot., tabulky, grafy. ISBN 80-901936-2-5.

- [14] KOLMER, Felix a Jaroslav KYNCL. Prostorová akustika: vysokošk. příručka pro vys. školy techn. směru. 2., nezm. vyd. Praha: SNTL, 1982.
- [15] VAŠINA, Martin. Studium materiálů z hlediska tlumení zvuku a vibrací: Study of materials in terms of sound and vibration damping : teze habilitační práce. Brno: VUTIUM, 2010. ISBN 978-80-214-4218-4.
- [16] VAŠINA, Martin. Decibelové veličiny v akustice, kmitočtové pásma: Váhové filtre [online]. 1 - 15 [cit. 2022-02-21]. Dostupné z: http://ufmi.ft.utb.cz/texty/env_fyzika/EF_03.pdf
- [17] A. BIES, David, Colin H. HANSEN a Tim KELSALL. Engineering Noise Control, Fourth Edition. Noise Control Engineering Journal. Institute of Noise Control Engineering, 2010, 4(Volume 58), 318-319. Dostupné z: doi:10.3397/1.3455051
- [18] ČSN ISO 10534-1. Akustika – Určování činitele zvukové pohltivosti a akustické impedance v impedančních trubicích – Část 1: Metóda pomerěru stojaté vlny.Změna Z1.Praha: Český normalizační institut, 2001.
- [19] BOROŠOVÁ, Lenka, Miroslav BADIDA a Ladislav BARTKO. IMPEDANČNÁ TRUBICA, AKO NÁSTROJ PRE MERANIE A HODNOTENIE AKUSTICKÝCH DESKRIPTOROV HLUKU. Transfěr inovácií. Technická univerzita v Košiciach, 2014, 236 - 241.
- [20] ŠANDA, Filip. Ověření parametrů impedanční trubice. Plzeň, 2017. Bakalářska práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Ing. Martin Schlosser.
- [21] ČSN ISO 10534-2. Akustika – Určování činitele zvukové pohltivosti a akustické impedance v impedančních trubicích – Část 2: Metóda přenosové funkce.Změna Z1.Praha: Český normalizační institut, 2001.
- [22] JULIANA, Vozárová. Stanovení akustické pohltivosti materiálu. Brno, 2020. Diplomová práce. Fakulta Stojního Inženýrství, Ústav automobilového a dopravního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Aleš Prokop, Ph.D.
- [23] LIU, P.S a G.F CHEN. Porous Materials: Processing and Applications: Chapter Ten - Characterization Methods: Physical Properties, [online]. Butterworth-Heinemann: Elsevier, 2012 [cit. 2022-03-16]. ISBN 978-0-12-407788-1. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/book/9780124077881/porous-materials?via=ihub=>
- [24] Reverberation chamber [online]. [cit. 2022-05-17] https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Reverberation_chamber.jpg
- [25] PREKAS, Kleanthis a Maria RANGOUSI, VASSILIADIS, Savvas, ed. Electronics and Computing in Textiles [online]. 1. Bookboon, February 2012, 74 -85 [cit. 2022-05-13]. ISBN 978-87-403-0282-0. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/263125758_Electronics_and_Computing_in_Textiles

- [26] Reproduktor Monacor SPH-75/8-8 Datasheet [online]. [cit. 2022-05-17] dostupný z :
<https://en.toutlehautparleur.com/speaker-monacor-sph-75-8-8-ohm-3-07-x-3-07-inch.html>
- [27] What is sound ? [online]. [cit. 2022-05-17]
https://www.soundproofingcompany.com/soundproofing_101/what-is-sound
- [28] Datasheet Ntec-AMG mini [online]. [cit. 2022-05-17]
http://www.ntek.it/en/prodotto_ntek/amg-mini/

ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK A SYMBOLOV

| | | |
|------------------------------|------------------------------------|---|
| a | $[m \cdot s^{-2}]$ | zrýchlenie kmitajúcej častice |
| c, c_0 | $[m \cdot s]$ | rýchlosť šírenia zvuku |
| d | $[m]$ | veľkosť otvoru v prekážke |
| d | $[m]$ | vnútorný priemer impedančnej trubice |
| K | $[Pa^{-1}]$ | index objemovej pružnosti |
| l | $[m]$ | vzdialenosť (mikrofónu od referenčnej roviny) |
| l | $[m]$ | vzdialenosť zdroja zvuku od prekážky |
| l | $[m]$ | dĺžka meracieho úseku v impedančnej trubici |
| L_p | $[dB]$ | hladina akustického tlaku |
| L_I | $[dB]$ | hladina akustickej intenzity |
| L_w | $[dB]$ | hladina akustického výkonu |
| $L_p(x_{min}), L_{p_{xmin}}$ | $[dB]$ | hladina akustického tlakového minima |
| $L_p(x_{max}), L_{p_{xmax}}$ | $[dB]$ | hladina akustického tlakového maxima |
| E | $[Pa]$ | modul pružnosti |
| 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 |
| \rightarrow F | $[N]$ | сила |
| \rightarrow I | $[Wm^{-2}]$ | akustická intenzita |
| G | $[Pa]$ | modul pružnosti v šmyku |
| G | $[Pa^{-1} \cdot s^{-1} \cdot m^3]$ | akustická admitancia |

| | | |
|-----------|-----------------------|---|
| m | [kg] | hmotnosť |
| \vec{n} | [-] | vektor udávajúci smer |
| p | [Pa] | akustická 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] | plocha |
| t | [s] | čas |
| t, T | [K] | teplota |
| T | [s] | perióda |
| v | [m/s] | rýchlosť kmitajúcej častice |
| x_{min} | [m] | vzdialenosť tlakového minima od referenčnej roviny |
| y_{min} | [m] | vzdialenosť geometrického stredu tlakového minima od referenčnej roviny |
| z | [Pasm ⁻¹] | merná akustická impedancia |
| Z | [Pasm ⁻³] | akustická impedancia |
| Z_M | [Pasm] | mechanická akustická impedancia |
| v | [m/s] | rýchlosť kmitajúcej častice |
| \vec{v} | [m/s] | rýchlosť kmitajúcej častice |
| α | [-] | činiteľ zvukovej pohltivosti (absorbcie) |

| | | |
|------------------------|--------------------|---|
| α' | [°] | uhol dopadajúcej zvukovej vlny |
| α | [°] | uhol dopadajúcej zvukovej vlny |
| β | [-] | činiteľ zvukovej odrazivosti (reflexie) |
| β_d | [°] | uhol dopadajúcej zvukovej vlny |
| β_l | [°] | uhol lomu zvukovej vlny |
| β_o | [°] | uhol odrazenej zvukovej vlny |
| φ | [rad] | fázový uhol |
| $\Delta L, \Delta L_p$ | [dB] | rozdiel hladín akustických tlakov |
| ω | [s ⁻¹] | uhlová rýchlosť |
| γ | [K ⁻¹] | súčiniteľ teplotnej rozťažnosti |
| δ | [m] | korekcia vzdialeností tlakových miním |
| θ | [rad] | komplexný uhol odrazu |
| μ | [-] | poissonovo číslo |
| κ | [-] | poissonová konštanta |
| λ, λ_0 | [m] | vlnová dĺžka |

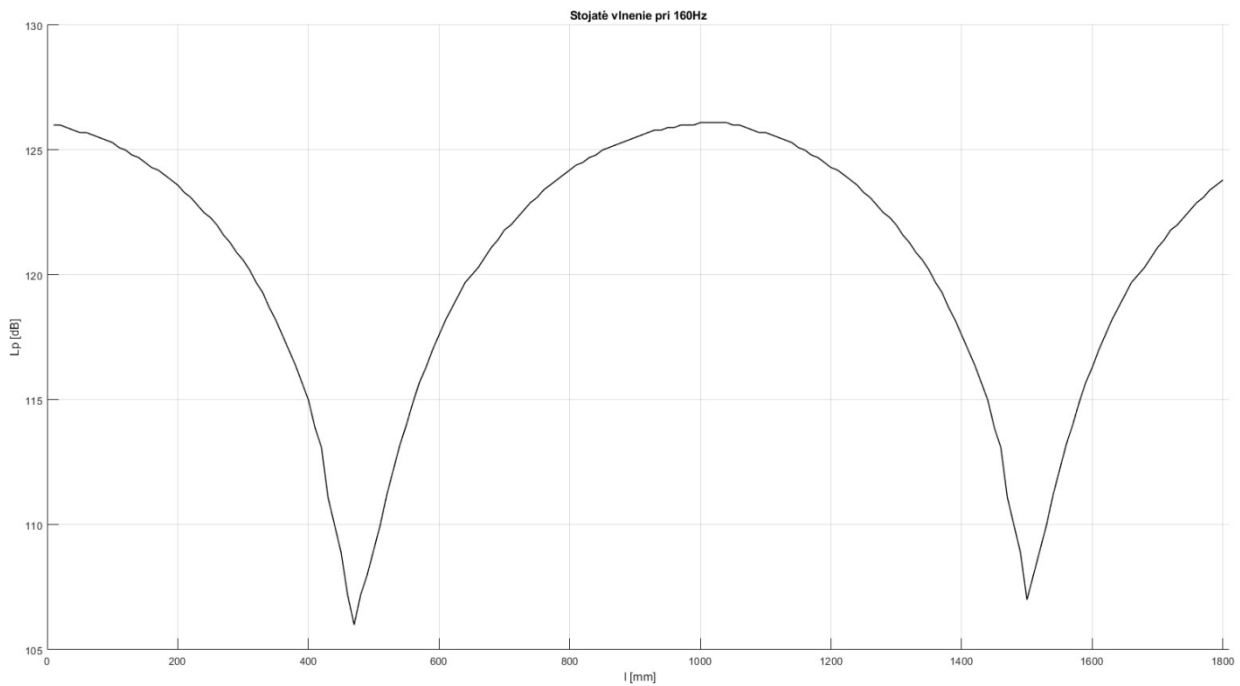
ZOZNAM PRÍLOH

I OBRAZCE STOJATÉHO VLNENIA

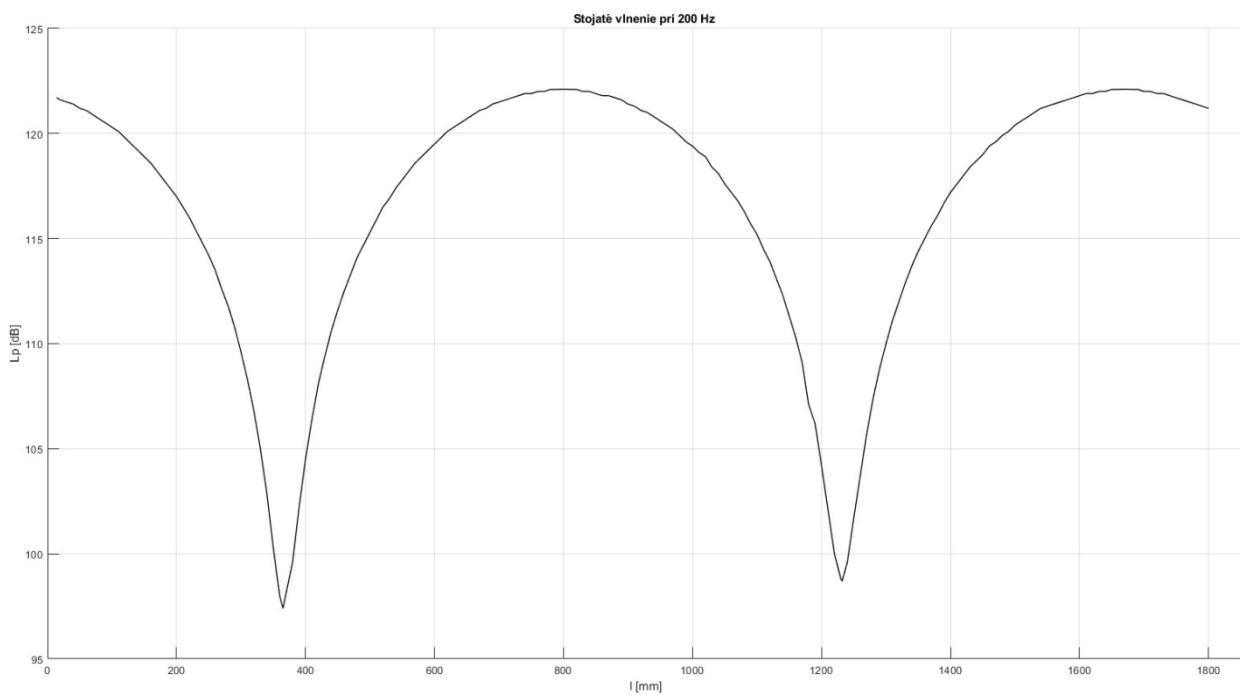
| | |
|--|---|
| I.i Stojaté vlnenie pri frekvenciách 160 Hz..... | a |
| I.ii Stojaté vlnenie pri frekvenciách 200 Hz..... | b |
| I.iii Stojaté vlnenie pri frekvenciách 250 Hz..... | c |
| I.iv Stojaté vlnenie pri frekvenciách 315 Hz..... | d |
| I.v Stojaté vlnenie pri frekvenciách 400 Hz..... | e |
| I.vi Stojaté vlnenie pri frekvenciách 500 Hz..... | f |
| I.vii Stojaté vlnenie pri frekvenciách 630 Hz..... | g |
| I.viii Stojaté vlnenie pri frekvenciách 800 Hz..... | h |
| I.ix Stojaté vlnenie pri frekvenciách 1000 Hz..... | i |
| I.x Stojaté vlnenie pri frekvenciách 1250 Hz..... | j |
| I.xi Stojaté vlnenie pri frekvenciách 1600 Hz..... | k |
| I.xii Stojaté vlnenie pri frekvenciách 2000 Hz..... | l |
| I.xiii Stojaté vlnenie pri frekvenciách 2500 Hz..... | n |

I. OBRAZCE STOJATÉHO VLNENIA

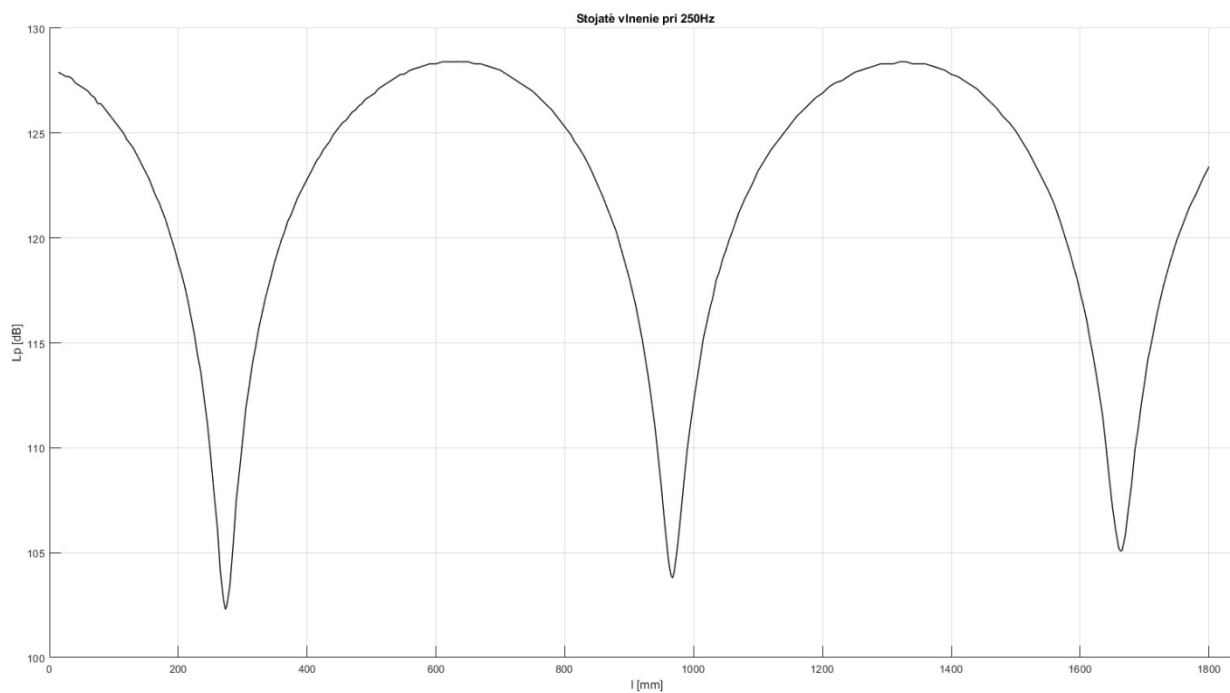
I.i Stojaté vlnenie pri frekvencií 160 Hz



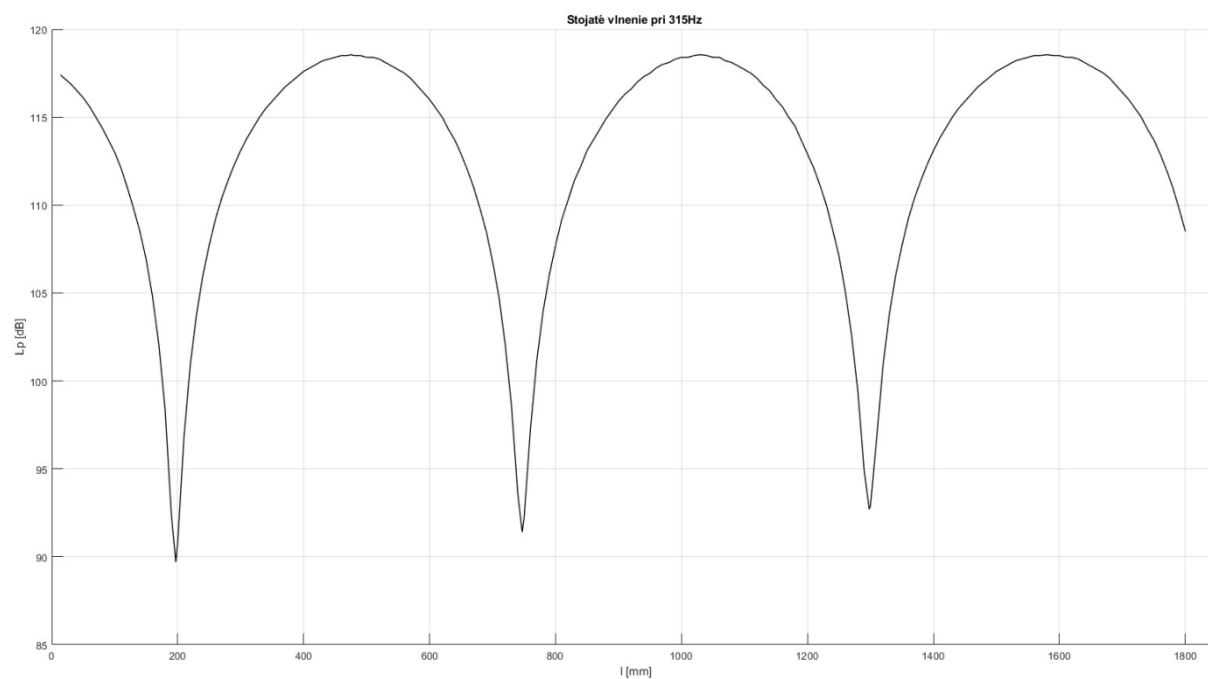
I.ii Stojaté vlnenie pri frekvencií 200 Hz



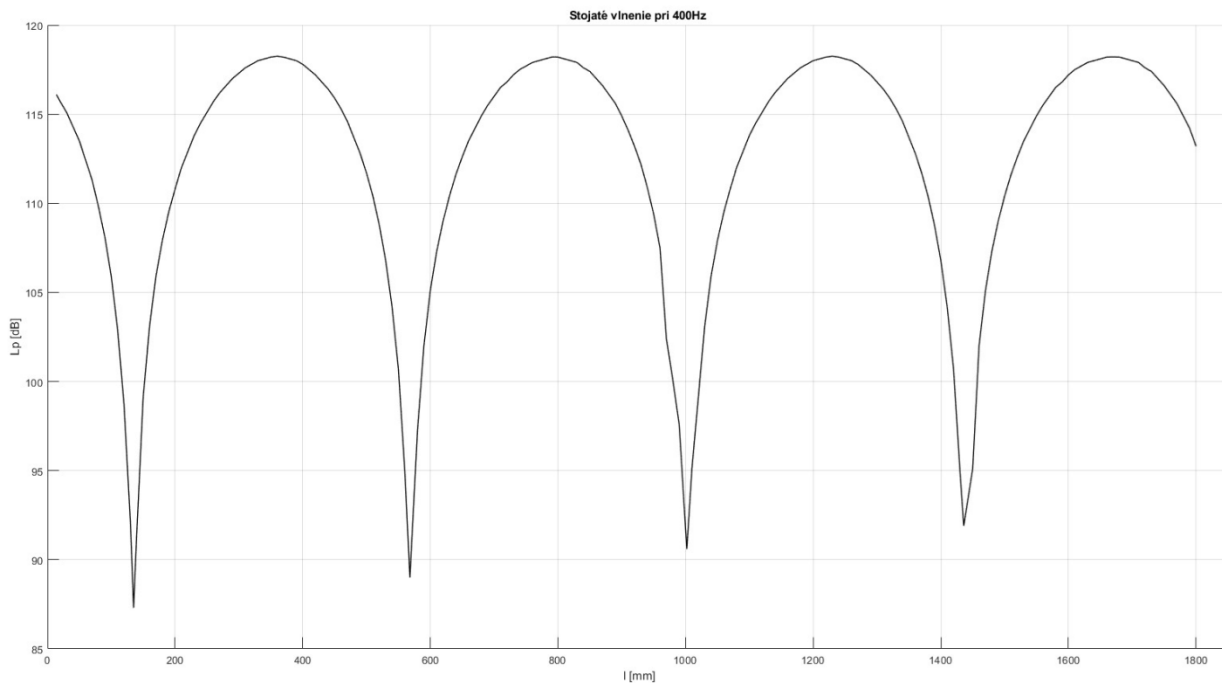
I.iii Stojaté vlnenie pri frekvencií 250 Hz



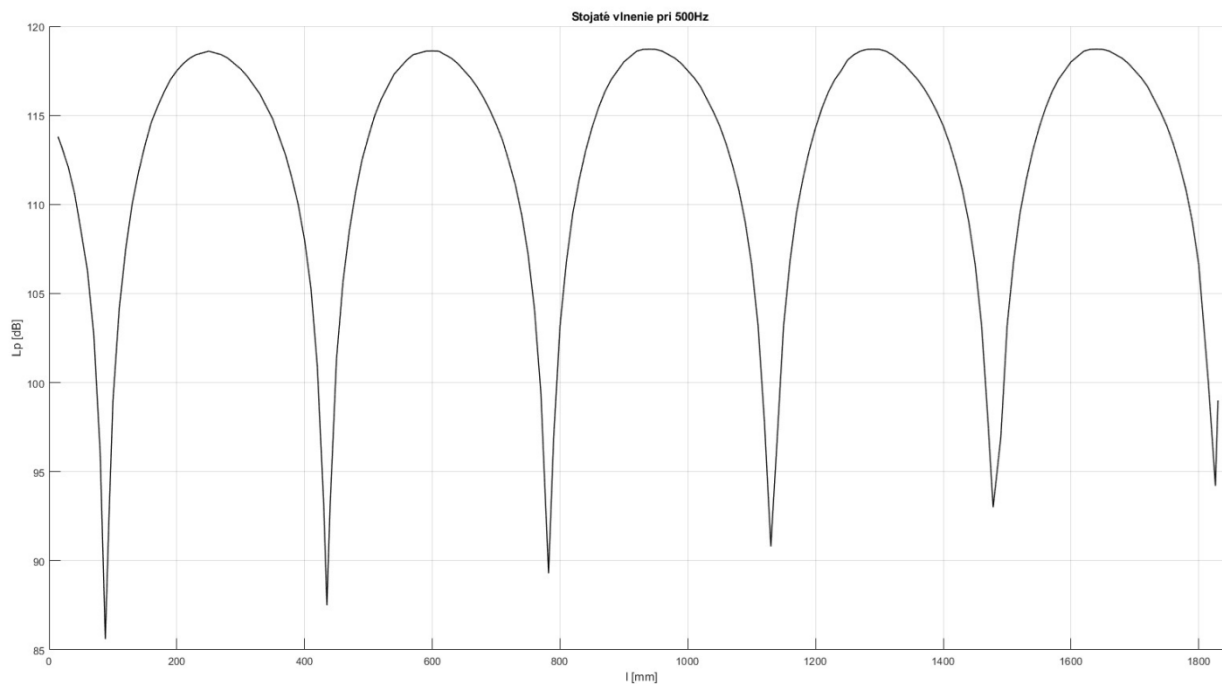
I.iv Stojaté vlnenie pri frekvencií 315 Hz



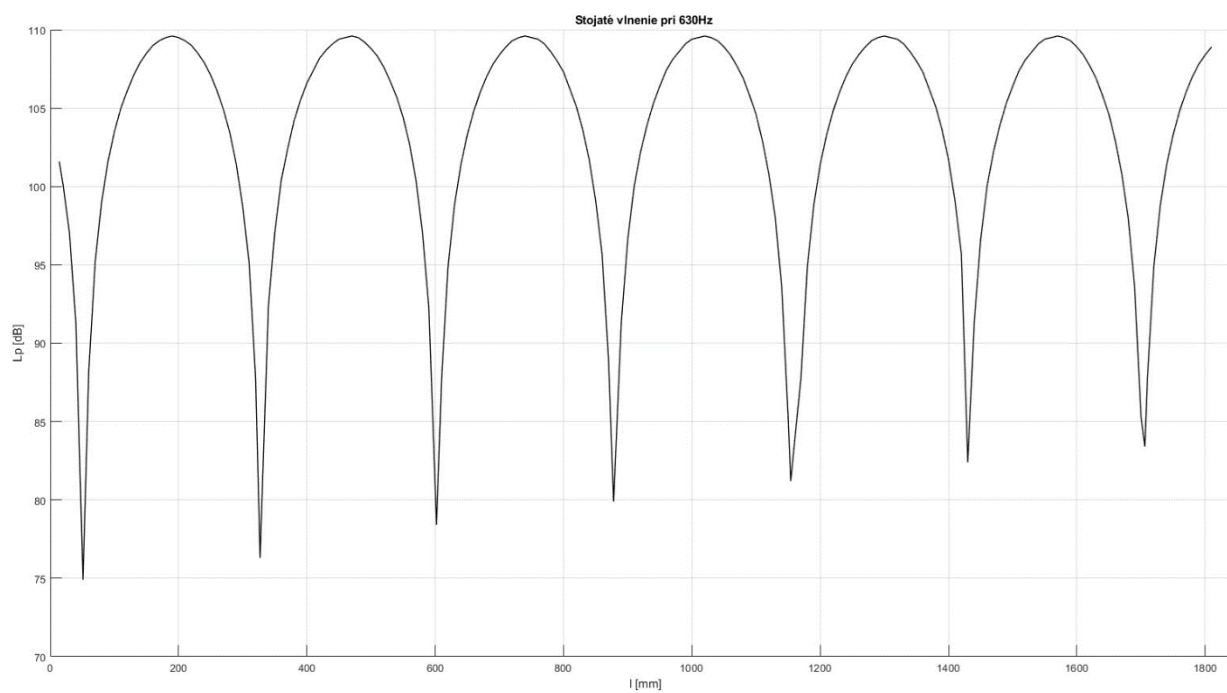
I.v Stojaté vlnenie pri frekvencií 400 Hz



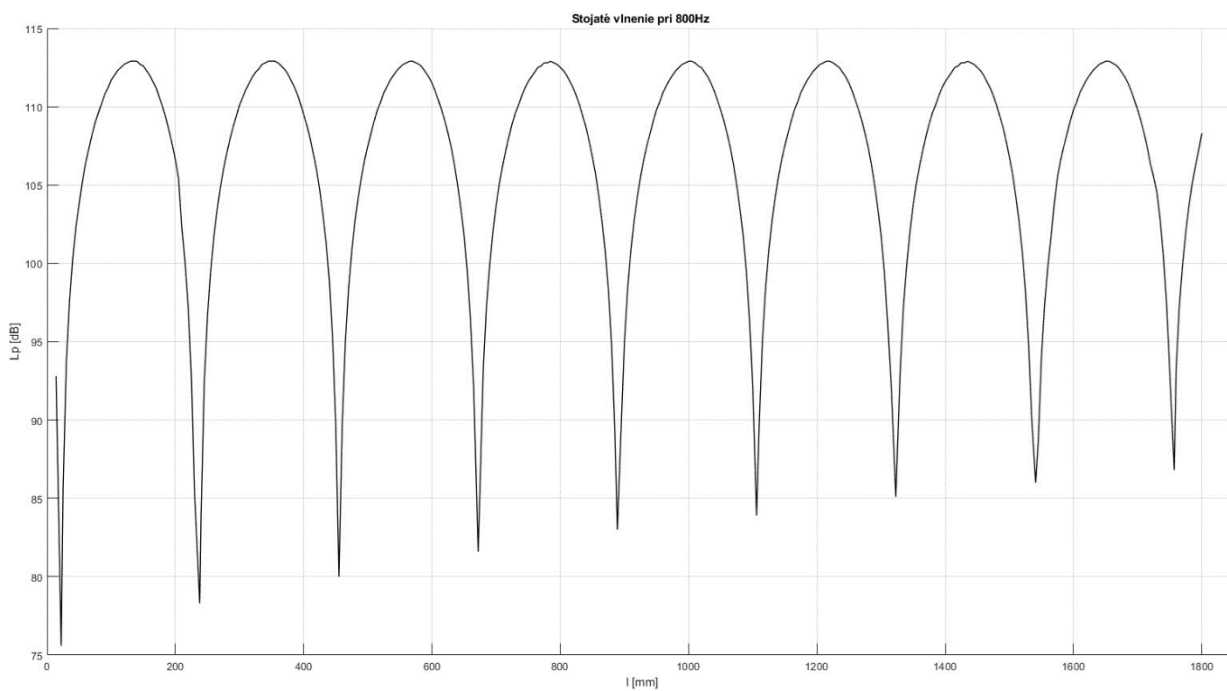
I.vi Stojaté vlnenie pri frekvencií 500 Hz



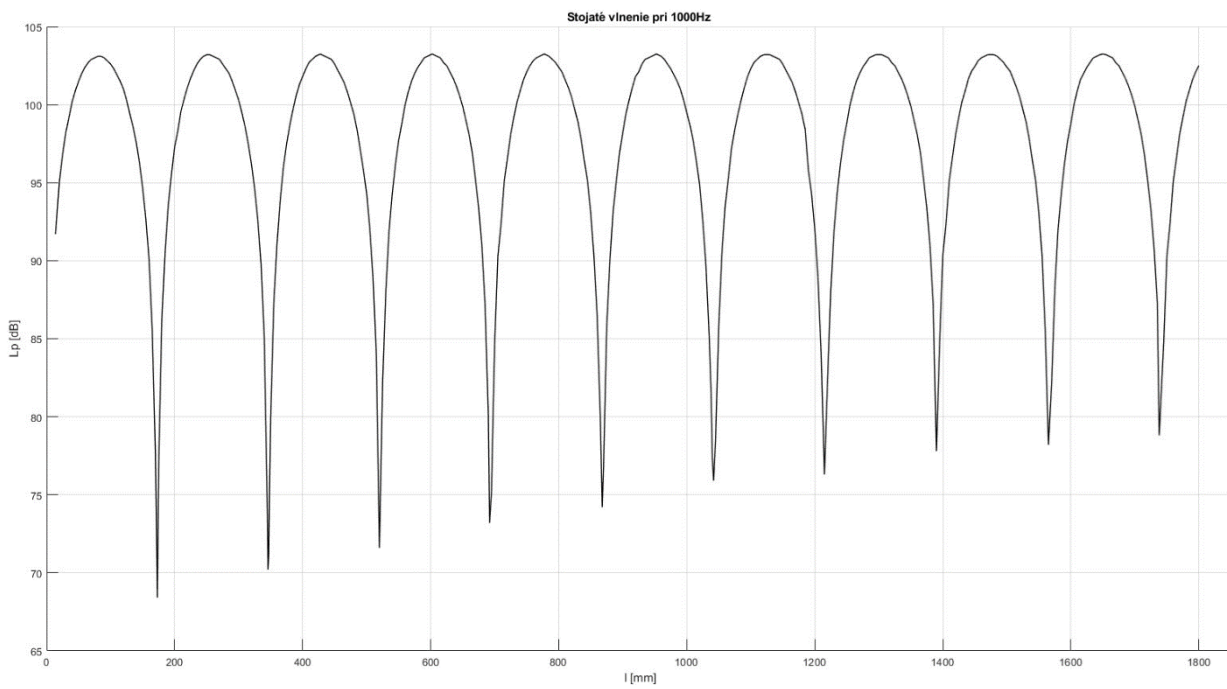
I.vii Stojaté vlnenie pri frekvencií 630 Hz



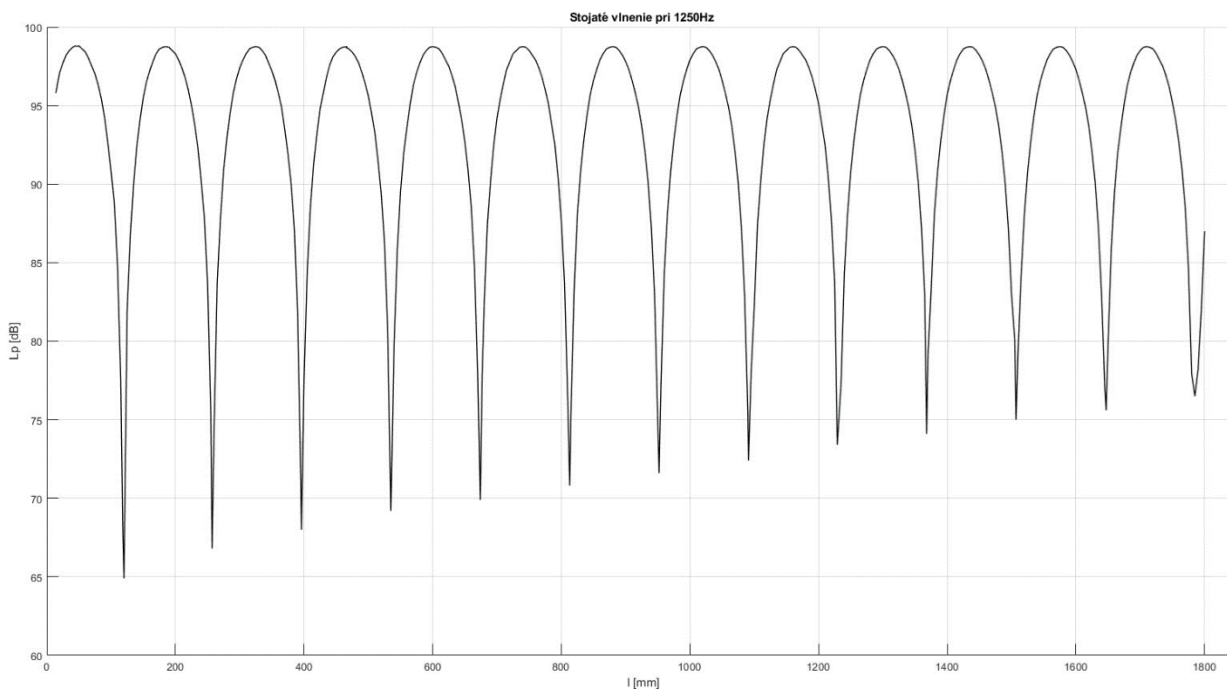
I.viii Stojaté vlnenie pri frekvencií 800 Hz



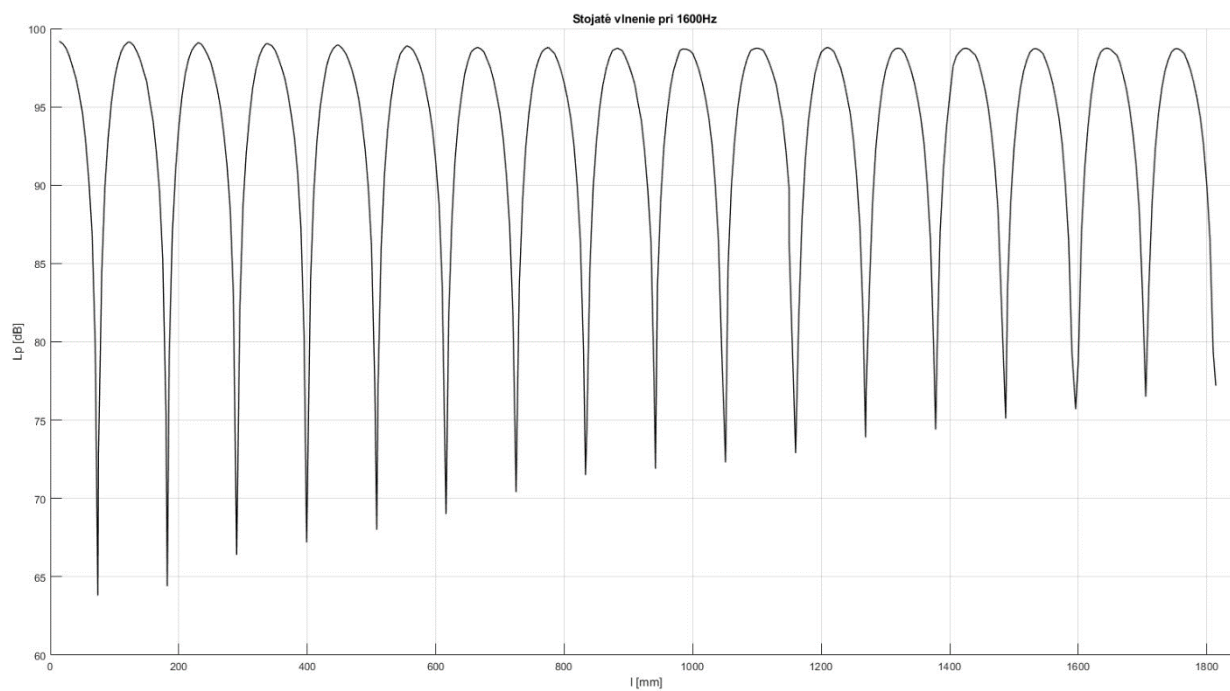
I.ix Stojaté vlnenie pri frekvencií 1000 Hz



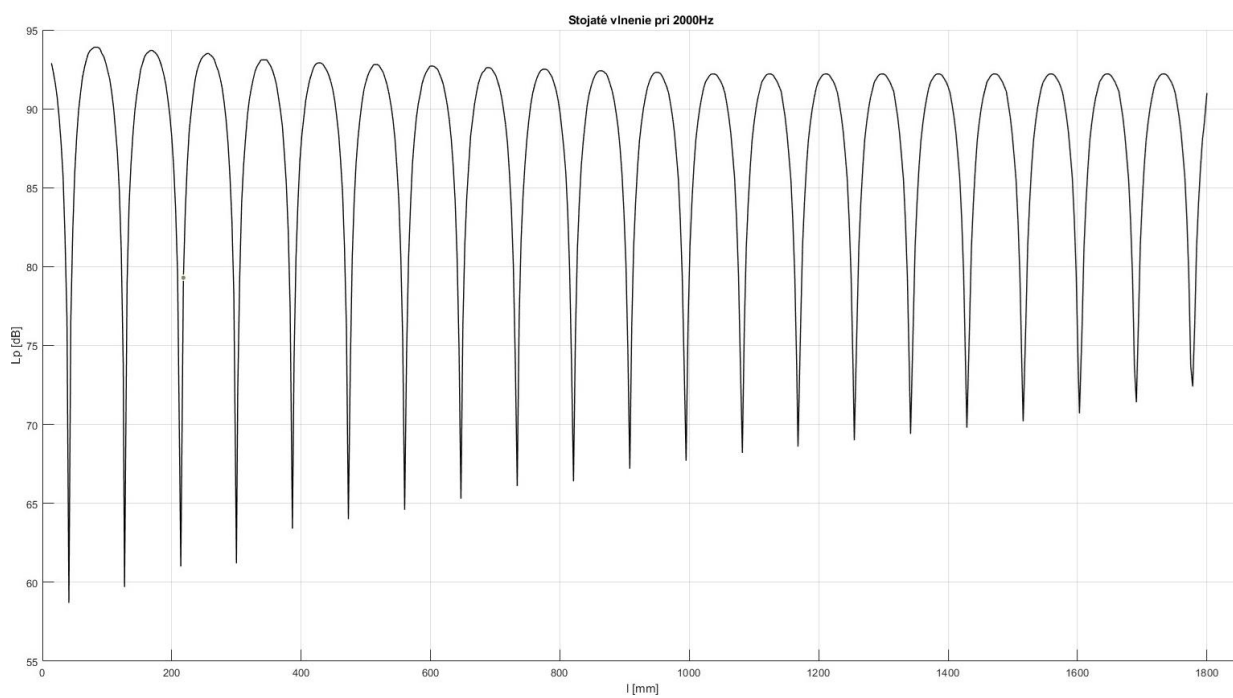
I.x Stojaté vlnenie pri frekvencií 1250 Hz



I.xi Stojaté vlnenie pri frekvencií 1600 Hz



I.xii Stojaté vlnenie pri frekvencií 2000 Hz



I.xiii Stojaté vlnenie pri frekvencii 2500 Hz

