



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

## LABORATORNÍ ÚLOHA PRO MĚŘENÍ ZVUKOVÉ POHLTIVOSTI A VZDUCHOVÉ PRŮZVUČNOSTI

LABORATORY EXERCISE FOR MEASURING SOUND ABSORPTION COEFFICIENT AND TRANSMISSION  
LOSS COEFFICIENT

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jindřich Kovanda

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Šimon Skvaril

BRNO 2024

# Diplomová práce

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

**Student:** Bc. Jindřich Kovanda

**ID:** 209408

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2023/24

## NÁZEV TÉMATU:

### Laboratorní úloha pro měření zvukové pohltivosti a vzduchové průzvučnosti

#### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s principem měření činitele zvukové pohltivosti a vzduchové průzvučnosti akustických materiálů a principem měření metodou přenosové funkce podle ČSN ISO 10534-2. K impedanční trubici dostupné v Laboratoři elektroakustiky UTKO FEKT realizujte aplikaci pro tato měření využívající zvukové karty a Audio toolbox Matlabu. Následně proveďte měření činitele zvukové odrazivosti a stupně vzduchové průzvučnosti různých materiálů a porovnejte je s měřením na profesionální impedanční trubici a s parametry udávanými výrobcem. Analyzujte možné problémy způsobující rozdílnost výsledků, např. vibrace konstrukce, buzení apod. a navrhnete úpravy impedanční trubice a její rozšíření pro měření průzvučnosti realizovatelné pomocí dostupných materiálů. Navrhnete laboratorní úlohu zabývající se měřením činitele zvukové odrazivosti a stupně vzduchové průzvučnosti a vytvoříte k ní návod. V rámci semestrální práce proveďte otestování impedanční trubice, realizujte základní verzi aplikace pro měření činitele pohltivosti a proveďte srovnávací měření. Navrhnete také úpravy a změny konstrukce trubice.

#### DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce

**Termín zadání:** 5.2.2024

**Termín odevzdání:** 21.5.2024

**Vedoucí práce:** Ing. Šimon Skvaril

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

#### UPOZORNĚNÍ:

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

## **ABSTRAKT**

Tato práce pojednává o měření koeficientu pohltivosti různých materiálů pomocí impedanční trubice metodou přenosové funkce. Zabývá se také zkoumáním použité impedanční trubice a návrhem úprav pro eliminaci jejích nedostatků. Dále také návrhem impedanční trubice pro měření koeficientu pohltivosti, průzvučnosti a vzduchové neprůzvučnosti, měřením neprůzvučnosti, návrhem měřicího a výpočetního programu pro toto měření a návrhem laboratorní úlohy zabývající se tímto měřením.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Impedanční trubice, přenosová funkce, rezonance, kmitočet, budicí signál, vibrace, pohltivost, neprůzvučnost

## **ABSTRACT**

This thesis refers about measuring absorbtion coefficient of various materials using impedance tube by transfer function method. This thesis also deals with examining used impedance tube, designing the adjustments for eliminating its flaws. Also the thesis deals with designing impedance tube for measurements of absorbtion coefficient, transmittion coefficient and transmittion loss, measuring transmittion loss, creating measuring and computing program for this measurement and designing laboratory exercise dealing with this measurement.

## **KEYWORDS**

Impedance tube, transfer function, resonance, frequency, excitation signal, vibration, absorbtion, transmittion loss

KOVANDA, Jindřich. *Laboratorní úloha pro měření zvukové pohltivosti a vzduchové průzvučnosti*. Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2023. Vedoucí práce: Ing. Šimon Skvaril

## Prohlášení autora o původnosti díla

|                                 |   |
|---------------------------------|---|
| <b>Jméno a příjmení autora:</b> | Bc. Jindřich Kovanda  |
| <b>VUT ID autora:</b>           | 209408  |
| <b>Typ práce:</b>               | Diplomová práce   |
| <b>Akademický rok:</b>          | 2023/24   |
| <b>Téma závěrečné práce:</b>    | Laboratorní úloha pro měření zvukové pohltivosti a vzduchové průzvučnosti |

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

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

Brno .....

.....

podpis autora\*

---

\*Autor podepisuje pouze v tištěné verzi.

## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Šimonu Skvarilovi, za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

# Obsah

|   |           |
|---|-----------|
| Úvod  | 11        |
| <b>1 Teoretický základ měření impedanční trubici</b>                    | <b>12</b> |
| 1.1 Akustická vlna na rozhraní dvou prostředí                           | 12        |
| 1.2 Činitel zvukové pohltivosti   | 13        |
| 1.2.1 Zvuková pohltivost  | 13        |
| 1.3 Činitel zvukové průzvučnosti  | 13        |
| 1.3.1 Zvuková průzvučnost   | 14        |
| 1.4 Činitel zvukové odrazivosti   | 14        |
| 1.4.1 Zvuková odrazivost  | 14        |
| 1.5 Impedanční trubice  | 14        |
| 1.6 Metoda poměru stojaté vlny  | 15        |
| 1.7 Metoda přenosové funkce   | 16        |
| 1.8 Metoda přenosové matice   | 18        |
| <b>2 Měření impedanční trubice dostupné na ÚTKO</b>                     | <b>21</b> |
| 2.1 Impedanční trubice dostupná na ÚTKO                                 | 21        |
| 2.2 Justování mikrofونů   | 21        |
| 2.3 Měření impedanční trubice v prostředí Matlab                        | 21        |
| 2.4 Zpracování naměřených výsledků                                      | 22        |
| 2.5 Ověření měřicí metody   | 24        |
| 2.6 Koeficienty pohltivosti měřených vzorků                             | 25        |
| <b>3 Měření vibrací impedanční trubice ÚTKO</b>                         | <b>28</b> |
| 3.1 Měření vibrací vně impedanční trubice                               | 28        |
| 3.2 Měření vibrací uvnitř impedanční trubice                            | 29        |
| 3.3 Zhodnocení funkčnosti impedanční trubice na ÚTKO                    | 31        |
| 3.4 Návrh úprav impedanční trubice ÚTKO                                 | 32        |
| <b>4 Návrh impedanční trubice pro měření pohltivosti a průzvučnosti</b> | <b>33</b> |
| 4.1 Rozměry   | 33        |
| 4.2 Měřicí rozsah   | 33        |
| 4.3 Alternativní vzdálenost mezi mikrofony                              | 34        |
| <b>5 Impedanční trubice pro laboratorní úlohu</b>                       | <b>35</b> |
| <b>6 Měření koeficientu pohltivosti</b>                                 | <b>36</b> |
| <b>7 Měření vzduchové neprůzvučnosti</b>                                | <b>41</b> |

|           |  |           |
|-----------|--|-----------|
| <b>8</b>  | <b>Porovnání naměřených výsledků koeficientu pohltivosti</b>   | <b>48</b> |
| <b>9</b>  | <b>Porovnání naměřených výsledků vzduchové neprůzvučnosti</b>  | <b>51</b> |
| <b>10</b> | <b>Laboratorní úloha</b>   | <b>54</b> |
| 10.1      | Aplikace na měření koeficientu pohltivosti . . . . .   | 54        |
| 10.2      | Aplikace na měření vzduchové neprůzvučnosti . . . . .  | 56        |
|           | <b>Závěr</b>   | <b>59</b> |
|           | <b>Literatura</b>  | <b>61</b> |
|           | <b>Seznam symbolů a zkratk</b>   | <b>62</b> |
| <b>A</b>  | <b>Laboratorní úloha - Měření činitele zvukové pohltivosti a vzduchové neprůzvučnosti v impedanční trubici</b> | <b>64</b> |
| A.1       | Cíl úlohy . . . . .  | 64        |
| A.2       | Zadání . . . . .   | 64        |
| A.3       | Metoda přenosové funkce . . . . .  | 64        |
| A.4       | Metoda přenosové matice . . . . .  | 66        |
| A.5       | Průběh měření . . . . .  | 68        |
| A.5.1     | Měření pohltivosti . . . . .   | 68        |
| A.5.2     | Měření neprůzvučnosti . . . . .  | 69        |



# Seznam obrázků

|      |   |    |
|------|---|----|
| 1.1  | Impedanční trubice pro měření koeficientu pohltivosti a průzvučnosti          | 15 |
| 1.2  | Impedanční trubice pro měření pomocí metody přenosové funkce . . .            | 17 |
| 1.3  | Schéma impedanční trubice pro měření pomocí metody přenosové matice . . . . . | 19 |
| 2.1  | Přenosová funkce mezi mikrofony . . . . .                                     | 22 |
| 2.2  | Koeficient pohltivosti v prázdné impedanční trubici . . . . .                 | 23 |
| 2.3  | Simulovaný koeficient pohltivosti . . . . .                                   | 24 |
| 2.4  | Naměřený koeficient pohltivosti cello F800 . . . . .                          | 25 |
| 2.5  | Koeficient pohltivosti cello F800 udávaný výrobcem . . . . .                  | 26 |
| 2.6  | Naměřený koeficient pohltivosti melaminu . . . . .                            | 27 |
| 2.7  | Koeficient pohltivosti melaminu udávaný výrobcem . . . . .                    | 27 |
| 3.1  | Vibrace vně impedanční trubice . . . . .                                      | 28 |
| 3.2  | Vibrace uvnitř impedanční trubice, akcelerometry 4507 . . . . .               | 29 |
| 3.3  | Vibrace uvnitř impedanční trubice, akcelerometry 4534 . . . . .               | 30 |
| 3.4  | Vibrace vně impedanční trubice s koeficientem pohltivosti . . . . .           | 31 |
| 4.1  | Návrh impedanční trubice . . . . .  | 33 |
| 5.1  | Impedanční trubice určená pro laboratorní úlohu . . . . .                     | 35 |
| 6.1  | Koeficient pohltivosti prázdné trubice . . . . .                              | 37 |
| 6.2  | Časový průběh naměřených signálů . . . . .                                    | 37 |
| 6.3  | Koeficient pohltivosti PES 20 kg/m . . . . .                                  | 38 |
| 6.4  | Koeficient pohltivosti PUR pěny . . . . .                                     | 38 |
| 6.5  | Koeficient pohltivosti hudební plsti . . . . .                                | 39 |
| 6.6  | Koeficient pohltivosti pájené PUR pěny . . . . .                              | 39 |
| 6.7  | Koeficient pohltivosti akustické plsti . . . . .                              | 40 |
| 7.1  | Koeficient pohltivosti anechoického zakončení . . . . .                       | 41 |
| 7.2  | Vzduchová neprůzvučnost cihly . . . . .                                       | 42 |
| 7.3  | Vzduchová neprůzvučnost betonu . . . . .                                      | 43 |
| 7.4  | Vzduchová neprůzvučnost gumy . . . . .  | 43 |
| 7.5  | Vzduchová neprůzvučnost dřevotřísky . . . . .                                 | 44 |
| 7.6  | Vzduchová neprůzvučnost sádrokartonu . . . . .                                | 44 |
| 7.7  | Vzduchová neprůzvučnost překližky, 8 mm . . . . .                             | 45 |
| 7.8  | Vzduchová neprůzvučnost překližky, 9 mm . . . . .                             | 45 |
| 7.9  | Vzduchová neprůzvučnost PES, 20 mm . . . . .                                  | 46 |
| 7.10 | Vzduchová neprůzvučnost PES 30 mm . . . . .                                   | 46 |
| 7.11 | Vzduchová neprůzvučnost akustické plsti . . . . .                             | 47 |
| 8.1  | Koeficient pohltivosti hudební plsti, Brüel & Kjær 4206 . . . . .             | 49 |
| 8.2  | Koeficient pohltivosti hudební plsti . . . . .                                | 49 |

|      |  |    |
|------|--|----|
| 8.3  | Koeficient pohltivosti PUR pěny, Brüel & Kjær 4206 . . . . .                     | 50 |
| 8.4  | Koeficient pohltivosti PUR pěny . . . . .  | 50 |
| 9.1  | Vzduchová neprůzvučnost cihly, Brüel & Kjær 4206 . . . . .                       | 52 |
| 9.2  | Vzduchová neprůzvučnost cihly . . . . .  | 52 |
| 9.3  | Vzduchová neprůzvučnost sádrokartonu, Brüel & Kjær 4206 . . . . .                | 53 |
| 9.4  | Vzduchová neprůzvučnost sádrokartonu . . . . .                                   | 53 |
| 10.1 | Záložka měření aplikace ImpTube Pohltivost 1m . . . . .                          | 55 |
| 10.2 | Záložka pohltivost aplikace ImpTube Pohltivost 1m . . . . .                      | 56 |
| 10.3 | Záložka měření aplikace ImpTube Pruzvucnost 1m . . . . .                         | 57 |
| 10.4 | Záložka neprůzvučnost aplikace ImpTube Pruzvucnost 1m . . . . .                  | 58 |
| A.1  | Impedanční trubice pro měření pomocí metody přenosové funkce . . .               | 65 |
| A.2  | Schéma impedanční trubice pro měření pomocí metody přenosové<br>matice . . . . . | 66 |
| A.3  | Impedanční trubice sestavená na měření pohltivosti . . . . .                     | 68 |
| A.4  | Záložka Měření aplikace ImpTube Pohltivost 1m . . . . .                          | 69 |
| A.5  | Impedanční trubice sestavená na měření neprůzvučnosti . . . . .                  | 69 |
| A.6  | Záložka měření aplikace ImpTube Pruzvucnost 1m . . . . .                         | 70 |

# Úvod

Tato práce se věnuje měření koeficientu pohltivosti, průzvučnosti a vzduchové neprůzvučnosti, návrhu impedanční trubice pro měření koeficientu pohltivosti pro různé materiály pomocí metody přenosové funkce a vzduchové neprůzvučnosti pomocí metody přenosové matice.

V práci je zaznamenán postup měření akustického tlaku v impedanční trubici dostupné na ústavu telekomunikací VUT pomocí funkce v prostředí Matlab a pomocí měřicí stanice APx525 a jeho následném zpracování podle metody přenosové funkce v prostředí Matlab za účelem výpočtu koeficientu akustické pohltivosti.

Správnost této metody je zde ověřena pomocí simulace signálů, které by se teoreticky měly v impedanční trubici vyskytovat a jejich zpracování.

Dále byly za pomoci akcelerometrů zjištěny vibrace uvnitř a vně impedanční trubice, za účelem odhalení nežádoucích rezonancí při buzení impedanční trubice.

Na základě teoretického základu této práce a nabytých poznatků z měření byl vytvořen návrh na úpravu impedanční trubice na ÚTKO a na její rozšíření o měření činitele průzvučnosti a vzduchové neprůzvučnosti.

Bylo provedeno měření činitele pohltivosti a vzduchové neprůzvučnosti na impedanční trubici určené pro laboratorní úlohu na ÚTKO. Dále byla vytvořena laboratorní úloha zabývající se právě tímto měřením a pro její potřeby byly vyvinuty aplikace v prostředí MATLAB App Designer.

Pro laboratorní úlohu na měření činitele pohltivosti, průzvučnosti a vzduchovou neprůzvučnost byl také vytvořen návod.

Měření činitele pohltivosti a vzduchové neprůzvučnosti bylo také provedeno pomocí impedanční trubice Brüel & Kjær 4206 v laboratoři CEITEC VUT a výsledky byly vzájemně porovnány.

# 1 Teoretický základ měření impedanční trubcí

## 1.1 Akustická vlna na rozhraní dvou prostředí

Akustická vlna se na rozhraní dvou prostředí částečně odrazí a částečně projde do prostředí druhého. Při uvažování kolmého dopadu rovinné vlny se vlna šíří prvním prostředím ve směru osy  $x$  rychlostí  $c_1$  a dopadá na rozhraní s prostředím s rychlostí šíření  $c_2$ . Výsledná vlna v prvním prostředí je dána superpozicí vlny přímé a odražené. [5]

$$v_1(x, t) = v(t - \frac{x}{c_1}) + v_R(t + \frac{x}{c_1}) \quad (1.1)$$

Ve druhém prostředí je pouze vlna, která prošla rozhraním.

$$v_2(x, t) = v_T(t - \frac{x}{c_2}) \quad (1.2)$$

Za podmínek, že  $v_1 = v_2$ , plyne pro  $x = 0$ :

$$v(0, t) + v_R(0, t) = v_T(0, t) \quad (1.3)$$

Měrná akustická impedance,  $Z_1$  a  $Z_2$ , je u postupné rovinné vlny reálná a je rovna měrnému vlnovému odporu prostředí. [5]

$$Z_1 = \rho c_1 \quad (1.4)$$

$$Z_2 = \rho c_2 \quad (1.5)$$

lze tedy psát:

$$Z_1 v(0, t) + Z_1 v_R(0, t) = Z_2 v_T(0, t). \quad (1.6)$$

Řešením soustavy rovnic můžeme získat koeficient odrazivosti a koeficient propustnosti: [5]

$$r = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (1.7)$$

$$t = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad (1.8)$$

Odrazivost rozhraní je potom dána poměrem intenzit odražené a dopadající vlny [5]

$$R = \frac{I_R}{I} = \frac{Z_1 v_{Ref}^2}{Z_1 v_{ef}^2} = r^2 \quad (1.9)$$

Propustnost rozhraní je dána poměrem intenzit prošlé a dopadající vlny [5]

$$T = \frac{I_T}{I} = \frac{Z_2 v_{Tef}^2}{Z_1 v_{ef}^2} = \frac{Z_2}{Z_1} t^2 \quad (1.10)$$

kde  $v_{Tef}$  a  $v_{Tef}$  a  $v_{ef}$  jsou efektivní hodnoty příslušných akustických rychlostí.

## 1.2 Činitel zvukové pohltivosti

Činitel zvukové pohltivosti definujeme jako poměr pohlceného akustického výkonu,  $P_a$  a akustického výkonu dopadajícího,  $P$ .

$$\alpha = \frac{P_a}{P} \quad (1.11)$$

Za pohlcený zvuk považujeme veškerý zvuk, který se nevrátil do prostoru. Teno činitel nabývá hodnot od 0 do 1, kdy hodnota 0 představuje dokonalý odraz akustické vlny a 1 by představovala totální pohlcení akustické vlny. Jedná se o vlastnost přiřaditelnou konkrétnímu materiálu, nevztahuje se na velikost tělesa, na které akustická vlna dopadá.[5]

### 1.2.1 Zvuková pohltivost

Zvuková pohltivost,  $A$ , je schopnost povrchu o ploše  $S$  pohltit zvuk. Zvuková pohltivost je definována jako:

$$A = \alpha S \quad (1.12)$$

## 1.3 Činitel zvukové průzvučnosti

Obdobně jako činitel pohltivosti definujeme činitel průzvučnosti.

$$\tau = \frac{P_t}{P}, \quad (1.13)$$

kde  $P_t$  je akustický výkon, který nebyl na rozhraní ani odražen nebo přeměněn na teplo, nýbrž který prošel za materiál, právě s tímto činitelem.[5]

### 1.3.1 Zvuková průzvučnost

Zvuková průzvučnost je definována obdobně jako zvuková pohltivost.

$$T = \tau S \quad (1.14)$$

Jedná se o schopnost povrchu o ploše  $S$  propustit zvuk.

## 1.4 Činitel zvukové odrazivosti

Činitel zvukové odrazivosti je opět vyjádřen poměrem akustických výkonů, a to poměrem akustickému výkonu odraženého zvuku  $P_r$  a výkonu zvuku dopadajícího  $P$ . [5]

$$\rho = \frac{P_r}{P} \quad (1.15)$$

### 1.4.1 Zvuková odrazivost

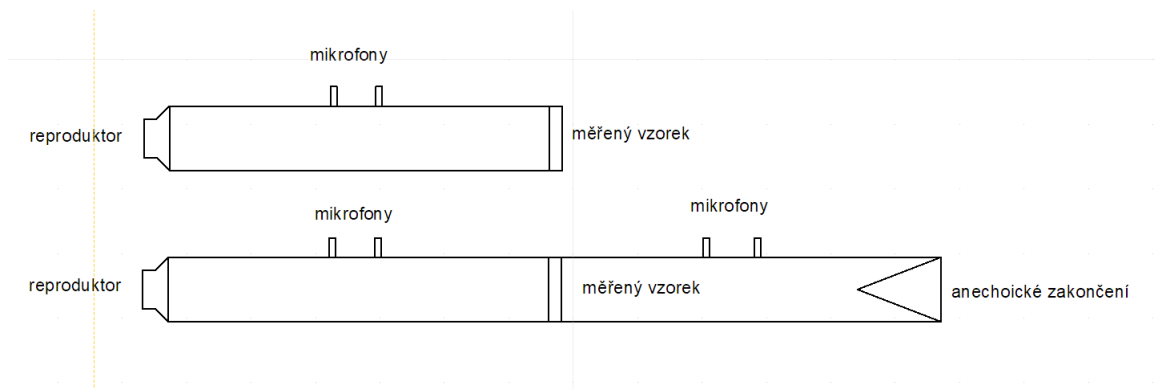
Zvuková odrazivost je definována jako schopnost plochy s činitelem odrazivosti  $\rho$  o ploše  $S$  odrazit zvuk.

$$R = \rho S \quad (1.16)$$

## 1.5 Impedanční trubice

Impedanční trubice je zařízení, které je schopno měřit koeficienty pohltivosti a průzvučnosti různých materiálů. Trubice je konstruována tak, že z jedné strany je trubice zakončena reproduktorem, pomocí kterého se do trubice pouští zvuk. V trubici se potom nachází vzorek měřeného materiálu. Ten, v případě měření činitele zvukové pohltivosti, doléhá na pevný uzávěr, který těsní druhou stranu trubice. V případě měření průzvučnosti trubice za vzorkem pokračuje, aby bylo možné měřit zvuk, který vzorkem prošel. Postupným šířením přímé a odražené vlny a jejich vzájemnou interferencí vzniká stojaté vlnění.

Trubice musí být rovná, o konstantním průřezu s tuhými, hladkými, neporézními stěnami. Stěny musí být dostatečně těžké, aby nebyly rozkmitávány zvukovým signálem nebo aby nevykazovaly rezonance v pracovním kmitočtovém rozsahu trubice [2].



Obr. 1.1: Impedanční trubice pro měření koeficientu pohltivosti a průzvučnosti

Pracovní kmitočtový rozsah impedanční trubice je určen jako:

$$f_d < f < f_h \quad (1.17)$$

kde  $f_d$  je dolní pracovní kmitočet a  $f_h$  horní pracovní kmitočet. Podmínkou pro  $f_h$  je:

$$f_h \cdot d < 0,58c, \quad (1.18)$$

$d$  je vnitřní průměr trubice a  $c$  je rychlost šíření zvuku v trubici. Vzdálenost měřících mikrofonů mezi sebou,  $s$ , musí být zvolena za splnění podmínky:

$$f_h \cdot s < 0,45c. \quad (1.19)$$

Vzdálenost mikrofonů od sebe by také měla přesáhnout 5% vlnové délky dolní kmitočtové meze.

## 1.6 Metoda poměru stojaté vlny

Stojaté vlnění v impedanční trubici lze rozložit na vlnu dopadající a vlnu odraženou, obě se pohybující rovnoběžně s osou trubice. Předpokládá se, že dopadající vlna je rovinná, časově harmonická a vyjádří se jako: [1]

$$p_i(x) = p_0 e^{jkx} \quad (1.20)$$

kde  $k$  je vlnové číslo a  $x$  vzdálenost na ose impedanční trubice.

Vlna odrážející se od měřeného vzorku se vyjádří jako:

$$p_r(x) = r * p_0 e^{-jkx} \quad (1.21)$$

Tlakové maximum ve stojaté vlně vzniká, kde  $p_i$  a  $p_r$  jsou ve fázi:

$$|p_{max}| = |p_0|(1 + |r|) \quad (1.22)$$

Tlakové minimum vzniká tam, kde jsou naopak v protifázi.

$$|p_{min}| = |p_0|(1 - |r|) \quad (1.23)$$

Poměr stojaté vlny je určen jako:

$$s = \frac{|p_{max}|}{|p_{min}|} \quad (1.24)$$

Z předchozích vztahů můžeme vyjádřit  $s$  jako:

$$s = \frac{1 + |r|}{1 - |r|} \quad (1.25)$$

a tedy:

$$|r| = \frac{s - 1}{s + 1} \quad (1.26)$$

Koeficient pohltivosti je potom:

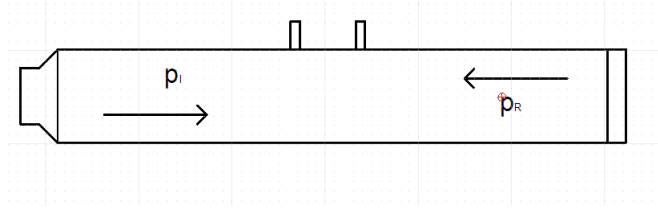
$$\alpha = 1 - |r|^2 \quad (1.27)$$

V praxi je do impedanční trubice zavedena mikrofonní sonda, kterou je změřen akustický tlak v celém rozsahu trubice. Tímto měřením jsou nalezeny maxima a minima stojatého vlnění. [1]

## 1.7 Metoda přenosové funkce

Měření činitele pohltivosti metodou přenosové funkce spočívá v měření akustického tlaku na dvou místech v trubici pomocí dvou mikrofonů. Ze dvou mikrofonních signálů se určí komplexní akustická přenosová funkce, která se použije pro výpočet činitele zvukové pohltivosti daného materiálu při kolmém dopadu. Nejprve je ze zaznamenaného časového průběhu akustického tlaku vypočítán pomocí Fourierovy transformace komplexní akustický tlak  $p$ , který vypočítáme pro oba mikrofony. Podílem těchto komplexních akustických tlaků získáme přenosovou funkci z místa mikrofonu 1 na místo 2,  $H_{12}$ . [2] [3]





Obr. 1.2: Impedanční trubice pro měření pomocí metody přenosové funkce

Tato metoda využívá toho, že v každém místě impedanční trubice lze akustický tlak definovat jako součet akustického tlaku vlny dopadající,  $p_I$  a vlny odražené  $p_R$ . Tyto akustické tlaky jsou definovány jako:

$$p_I = \hat{p}_I e^{jk_0 x} \quad (1.28)$$

$$p_R = \hat{p}_R e^{jk_0 x} \quad (1.29)$$

kde  $\hat{p}_I$  a  $\hat{p}_R$  jsou amplitudy akustických tlaků,  $k_0$  je komplexní vlnové číslo a  $x$  je vzdálenost měřeného místa od měřeného vzorku.

V místech mikrofonů se tedy jedná o tlaky  $p_1$  a  $p_2$ , [2]

$$p_1 = \hat{p}_I e^{jk_0 x_1} + \hat{p}_R e^{jk_0 x_1} \quad (1.30)$$

$$p_2 = \hat{p}_I e^{jk_0 x_2} + \hat{p}_R e^{jk_0 x_2} \quad (1.31)$$

Přenosová funkce pro samotnou dopadající vlnu je

$$H_I = \frac{p_{2I}}{p_{1I}} = e^{-jk_0 s} \quad (1.32)$$

a přenosová funkce pro samotnou odraženou vlnu je

$$H_R = \frac{p_{2R}}{p_{1R}} = e^{jk_0 s} \quad (1.33)$$

kde  $s$  je vzdálenost mikrofonů od sebe.

Za předpokladu, že  $p_R = p_I \cdot r$  můžeme vyjádřit:

$$H_{12} = \frac{p_2}{p_1} = \frac{e^{jk_0 x_2} + r e^{jk_0 x_2}}{e^{jk_0 x_1} + r e^{jk_0 x_1}} \quad (1.34)$$

Vyjádřením  $r$  získáme:

$$r = \frac{H_{12} - H_I}{H_R - H_{12}} e^{2jk_0 x_1}. \quad (1.35)$$

Činitel zvukové pohltivosti se potom vypočítá jako: [2]

$$\alpha = 1 - |r|^2. \quad (1.36)$$

Normovaná akustická impedance se vypočítá následovně:

$$Z/\rho c = (1 + r)/(1 - r) \quad (1.37)$$

Koeficient zvukové pohltivosti  $\alpha_{st}$  pro všesměrový dopad pro pohlcující obklady, ve kterých se zvuk nešíří rovnoběžně s jeho povrchem lze vypočítat z normované impedance  $z$  :

$$\alpha_{st} = 8 * \frac{z'}{z'^2 + z''^2} \left[ 1 - \frac{z'}{z'^2 + z''^2} * \ln(1 + 2z' + z'^2 + z''^2) + \frac{z'^2 - z''^2}{z''(z'^2 + z''^2)} * \operatorname{arctg} \frac{z''}{1 + z'} \right] \quad (1.38)$$

kde  $z'$  je reálná složka normované akustické impedance a  $z''$  je složka imaginární.

Pro přenosovou funkci  $H_{12}$  je třeba provést opakované měření se zaměněnými pozicemi mikrofonů a obdobně pro tuto konfiguraci zjistit přenosovou funkci mezi mikrofony  $H_{12s}$ .

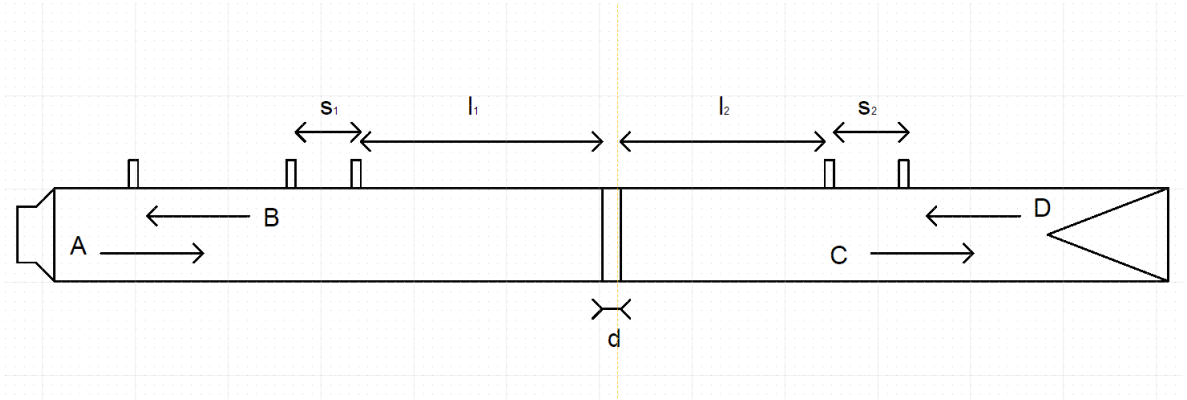
Výsledná korigovaná přenosová funkce je potom získána součinem přenosových funkcí obou konfigurací a druhou odmocninou tohoto součinu. [2]

$$H_{12c} = (H_{12} \cdot H_{12s})^{\frac{1}{2}} \quad (1.39)$$

Tato korekce se provádí za účelem neutralizace amplitudové a fázové neshody mezi mikrofony.

## 1.8 Metoda přenosové matice

Tato metoda spočívá v tom, že v impedanční trubici jsou naměřeny průběhy akustického tlaku na čtyřech místech, dvě před měřeným vzorkem a dvě za měřeným vzorkem. Z těch jsou pomocí Fourierovy transformace získány komplexní akustické tlaky. Dále jsou vypočítány přenosové funkce mezi těmito tlaky a referenčním signálem, (může to být vstupní signál, signál z prvního mikrofonu nebo ze zvláštního referenčního mikrofonu). [3]



Obr. 1.3: Schéma impedanční trubice pro měření pomocí metody přenosové matice

A, B, C a D jsou přímé a odražené části stojatého vlnění v trubici. Lze je vyjádřit jako:

$$A = j * \frac{H_{1,ref} e^{-jk_0 l_1} - H_{2,ref} e^{-jk_0(l_1+s_1)}}{2 \sin k_0 s_1} \quad (1.40)$$

$$B = j * \frac{H_{2,ref} e^{jk_0(l_1+s_1)} - H_{1,ref} e^{-jk_0(l_1)}}{2 \sin k_0 s_1} \quad (1.41)$$

$$C = j * \frac{H_{3,ref} e^{jk_0(l_2+s_2)} - H_{4,ref} e^{jk_0(l_2)}}{2 \sin k_0 s_2} \quad (1.42)$$

$$D = j * \frac{H_{4,ref} e^{-jk_0 l_2} - H_{3,ref} e^{-jk_0(l_2+s_2)}}{2 \sin k_0 s_2} \quad (1.43)$$

Pomocí těchto částí stojatého vlnění jsou vyjádřeny akustický tlak a akustická rychlost na přední ploše měřeného vzorku,  $p_0$ ,  $u_0$  a na zadní ploše vzorku,  $p_d$  a  $u_d$ . [3]

$$p_0 = A + B \quad (1.44)$$

$$u_0 = A - B/\rho c \quad (1.45)$$

$$p_d = C e^{-jk_0 d} + D e^{+jk_0 d} \quad (1.46)$$

$$u_d = (C e^{-jk_0 d} - D e^{+jk_0 d})/\rho c \quad (1.47)$$

Pro geometricky symetrické měřené vzorky a pro anechoické zakončení impedanční trubice je dána přenosová matice  $T$ , kdy jsou její prvky definovány jako:

$$T_{11} = \frac{p_d u_d + p_0 u_0}{p_0 u_d + p_d u_0} \quad (1.48)$$

$$T_{12} = \frac{p_0^2 - p_d^2}{p_0 u_d + p_d u_0} \quad (1.49)$$

$$T_{21} = \frac{u_0^2 - u_d^2}{p_0 u_d + p_d u_0} \quad (1.50)$$

$$T_{22} = \frac{p_d u_d + p_0 u_0}{p_0 u_d + p_d u_0} \quad (1.51)$$

Z prvků této matice lze získat činitel průzvučnosti,  $t$ , vzduchovou neprůzvučnost při kolmém dopadu,  $TL_n$  a charakteristickou impedanci materiálu  $z$ . [3]

$$t = \frac{2e^{jk_0 d}}{T_{11} + (T_{12}/\rho c) + \rho c T_{21} + T_{22}} \quad (1.52)$$

$$TL_n = 20 \log_{10} \left| \frac{1}{t} \right| \quad (1.53)$$

$$z = \sqrt{T_{12}/T_{21}} \quad (1.54)$$

## 2 Měření impedanční trubice dostupné na ÚTKO

Impedanční trubice na ústavu telekomunikací je konstruována na měření koeficientu pohltivosti metodou přenosové funkce. Měření bylo provedeno pomocí dvou mikrofonů Audix TM1 snímající zvuk v impedanční trubici, který byl generován reproduktorem. Následně byly naměřené signály přepočítány podle metody přenosové funkce na koeficient odrazivosti a následně na koeficient pohltivosti materiálů měřených vzorků.

### 2.1 Impedanční trubice dostupná na ÚTKO

Měřená impedanční trubice dostupná na ÚTKO je postavena ze dvou PVC trubic o vnitřních průměrech 100 mm a 58 mm. Vnější trubice má šířku stěny 5 mm a vnitřní trubice 2,5 mm. Tyto trubice jsou vsunuty do sebe a prostor mezi nimi je vyplněn montážní pěnou. Trubice je dlouhá 440 mm, z jedné strany je zakončena reproduktorem s ozvučnicí kruhového průřezu o stejném průměru jako tělo impedanční trubice. Ozvučnice je i ze stejného materiálu a je na délku dlouhá 150 mm. Z druhé strany je impedanční trubice utěsněna betonovým odlitkem o šířce 30 mm [4].

### 2.2 Justování mikrofonů

Mikrofony použité pro měření byly justovány pomocí tónového generátoru a zvukoměru. Naměřená citlivost obou mikrofonů byla použita pro přepočet signálu, který byl ukládán v milivoltech na akustický tlak.

### 2.3 Měření impedanční trubice v prostředí Matlab

Mikrofony i reproduktor byly připojeny ke zvukové kartě, která byla připojena k počítači. Jako budící signál byl použit lineárně přeladovaný signál trvající 1,4 sekundy. Ten byl vytvořen pomocí funkce "chirp" v prostředí Matlab.

Pomocí funkce v prostředí Matlab, využívající systémový objekt "audioPlayerRecorder" byla realizována komunikace mezi skriptem v prostředí Matlab a použitou zvukovou kartou. Za pomoci této funkce byl do reproduktoru přiveden vstupní signál a zároveň nahrány signály zaznamenané měřicími mikrofony do počítače. Po změření mikrofonů na jejich původních pozicích byly tyto pozice zaměněny a měření bylo zopakováno za účelem korekce amplitudové a fázové neshody mezi mikrofony.

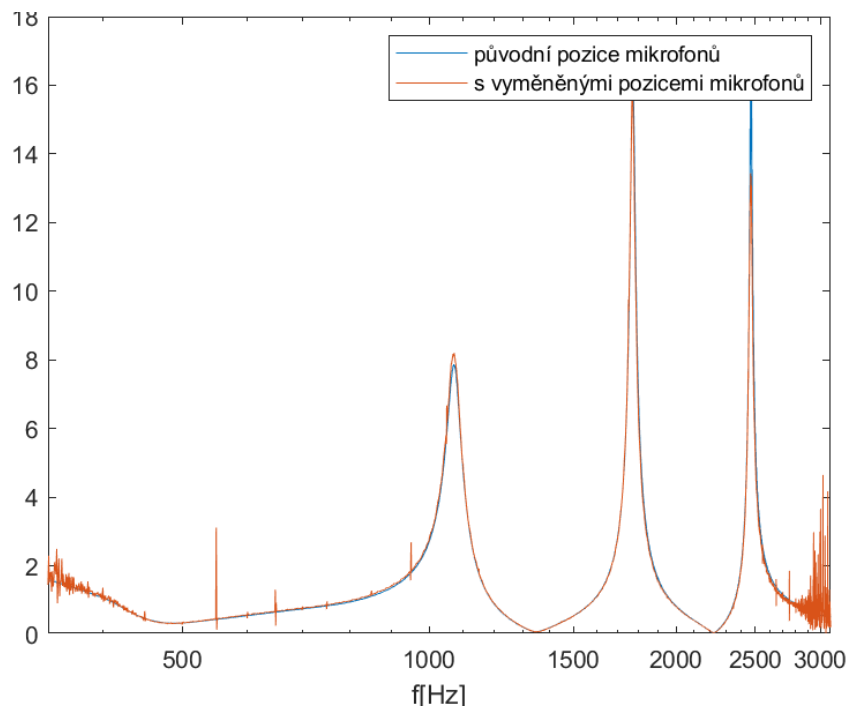
Toto měření bylo také provedeno pomocí měřicí stanice APx525 v laboratoři na ústavu telekomunikací. Postup byl proveden podle kapitol 1.5 1.7.

Toto měření bylo provedeno nejprve bez měřeného vzorku, pro zjištění koeficientu útlumu samotné impedanční trubice. Poté bylo měření zopakováno pro dva vzorky dostupné na ÚTKO. Jednalo se o vzorky široké 2 centimetry z materiálu melamin a cello F800.

## 2.4 Zpracování naměřených výsledků

Signály zaznamenané měřicími mikrofony pomocí funkce v Matlab byly nejprve vyděleny citlivostí příslušných mikrofonů. Tím byly získány časové průběhy akustického tlaku v místech mikrofonů. Následně byla provedena rychlá Fourierova transformace pomocí funkce `fft`.1.7

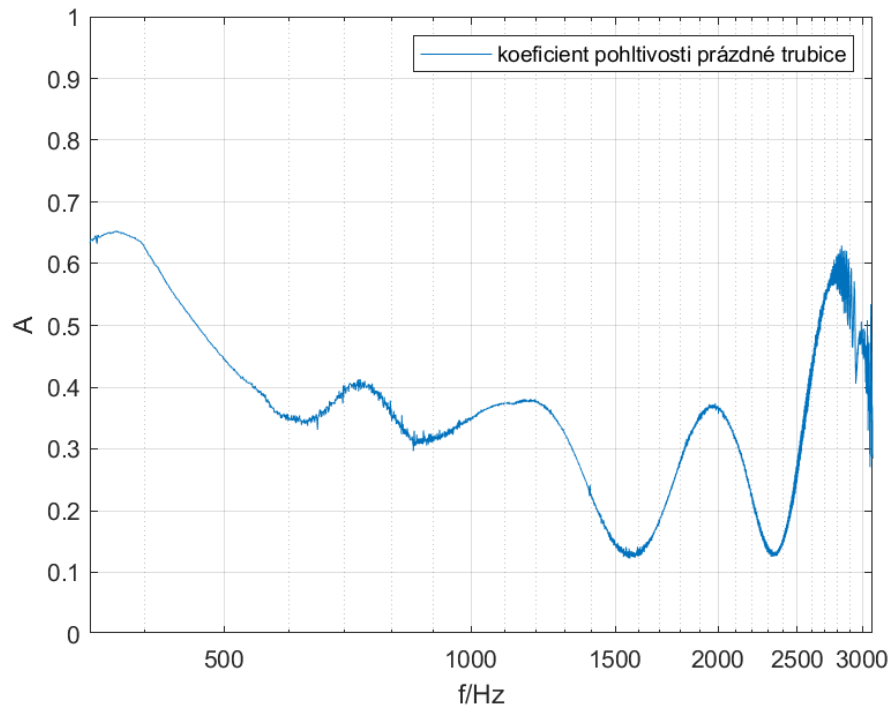
Podílem komplexních tlaků obou kanálů byla nalezena přenosová funkce mezi mikrofony. Signály naměřené mikrofony se zaměněnými pozicemi byly rovněž vyděleny citlivostí příslušných mikrofonů a byla na nich provedena rychlá Fourierova transformace. Podílem získaných komplexních tlaků byla vypočítána přenosová funkce mezi zaměněnými mikrofony. Z této a z původní přenosové funkce byla vynesena korigovaná přenosová funkce. 2.1



Obr. 2.1: Přenosová funkce mezi mikrofony

Na průběhu přenosové funkce pozorujeme lokální maxima na kmitočtech kolem 1100, 1800 a 2500 Hz. Také pozorujeme, že modul v původní i zaměněné konfiguraci mikrofonů je téměř shodný.

Dále byla vynesena kmitočtová závislost koeficientu pohltivosti  $\alpha$ . 1.7

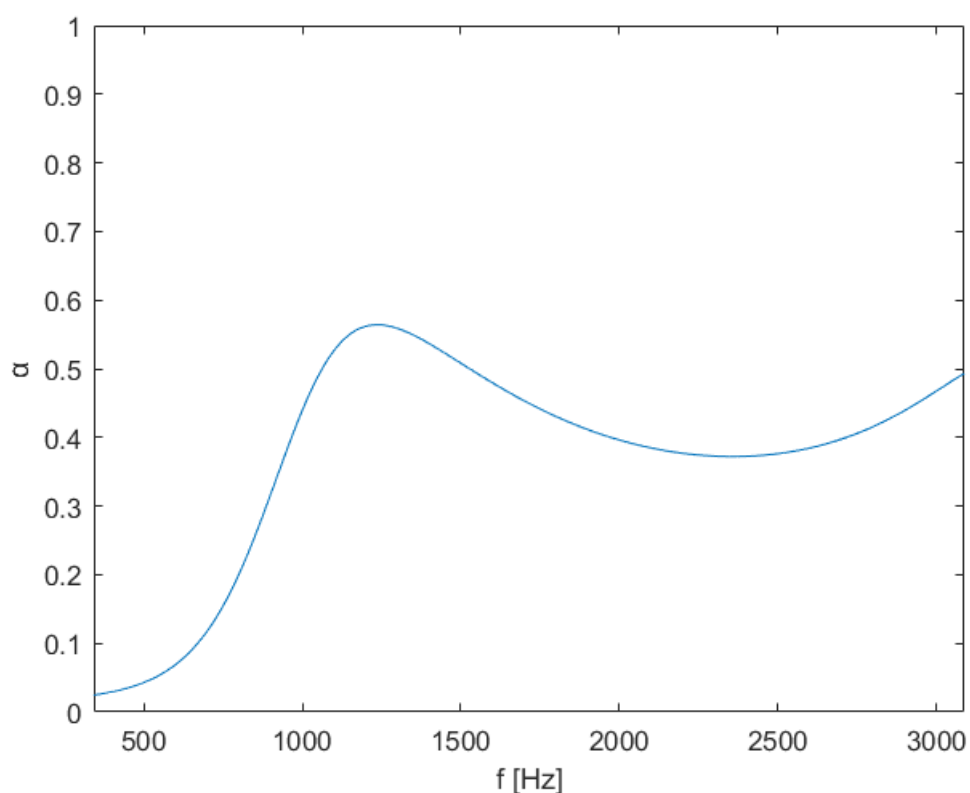


Obr. 2.2: Koeficient pohltivosti v prázdné impedanční trubici

Na základě vneseného grafu bylo naznáno, že impedanční trubice zakončená pouze betonovou deskou, neobsahující žádný měřený vzorek, pohlcuje zvuk poměrně ve velké míře a kmitočtově velmi nevyrovnaně. 7.2

## 2.5 Ověření měřící metody

Za účelem ověření měřící a výpočetní metody byl napsán skript v prostředí Matlab, ve kterém je simulován průchod přímé a odražené vlny v impedanční trubici buzené přeladovaným harmonickým signálem. V něm je využito známé zpoždění dopadající a odražené vlny na pozicích jednotlivých mikrofonů. Jsou zde tedy simulovány signály naměřené mikrofony pomocí součtu generovaného signálu a jeho verze ekvalizované highshelf filtrem s útlumem 6 dB a s mezním kmitočtem 700 Hz, za účelem simulace ovlivnění kmitočtového spektra odražené vlny. Oba signály jsou sečteny s příslušným zpožděním.



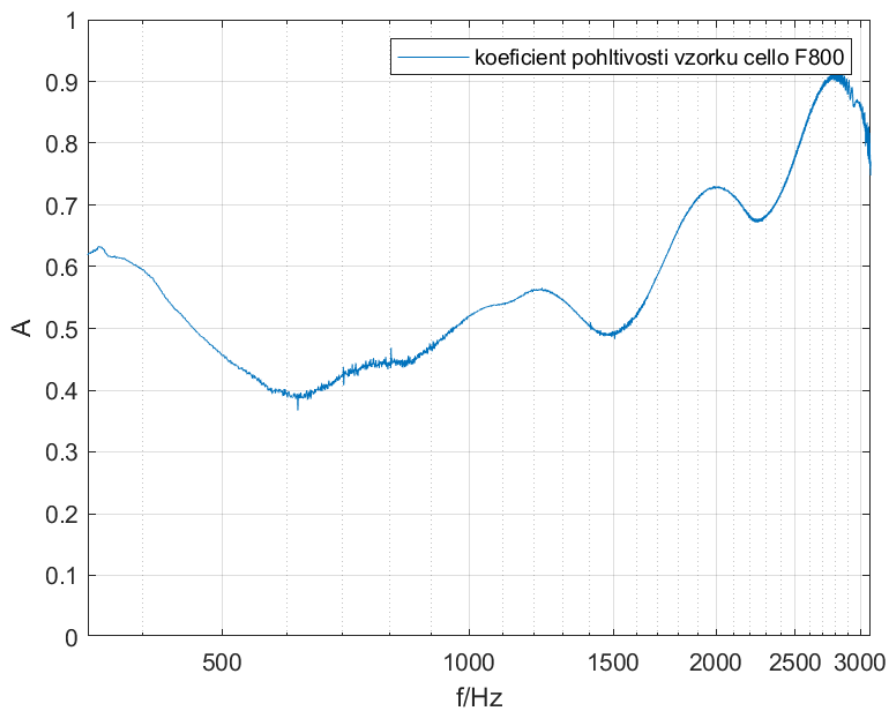
Obr. 2.3: Simulovaný koeficient pohltivosti

Z vynesení simulovaného koeficientu pohltivosti lze vyzorovat lokální maximum za mezním kmitočtem. Na základě očekávaného průběhu můžeme konstatovat správnost měřící a výpočetní metody.



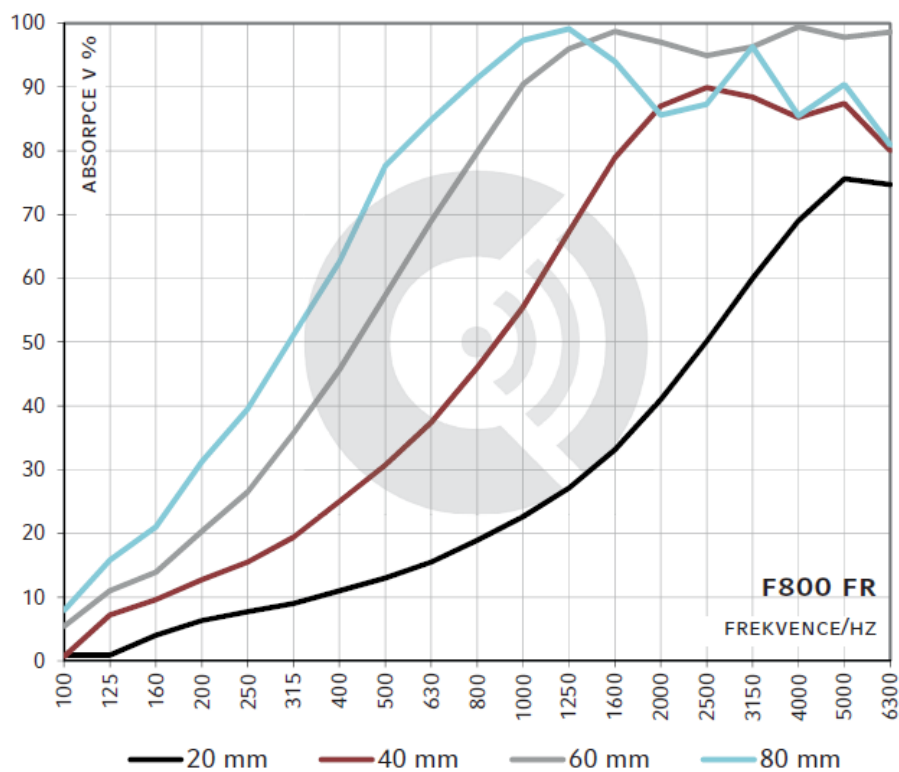
## 2.6 Koeficienty pohltivosti měřených vzorků

Pomocí funkce v prostředí Matlab byly stejně jako pro prázdnou impedanční trubici naměřeny koeficienty pohltivosti také pro vzorky měřených materiálů. 1.7



Obr. 2.4: Koeficient pohltivosti cello F800

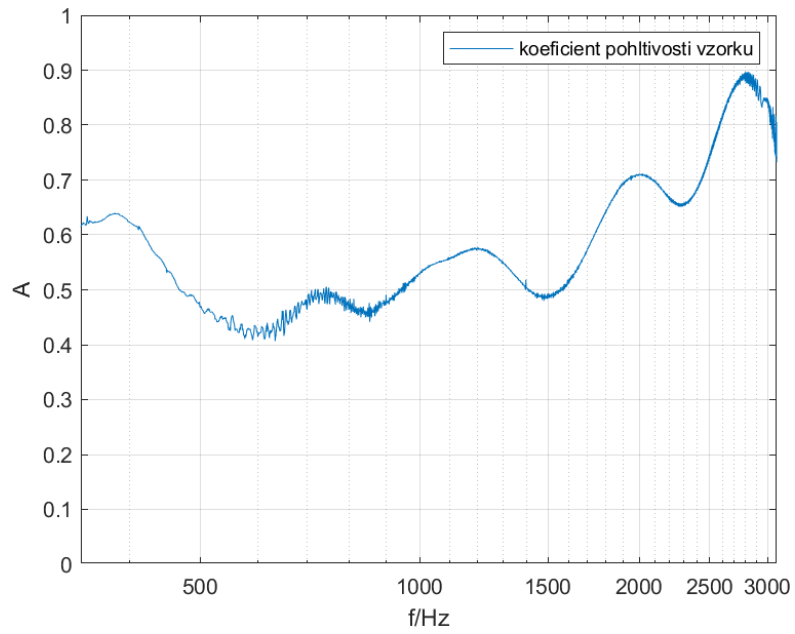
Koeficient pohltivosti 2 cm širokého vzorku materiálu cello F800 vyšel v nižší kmitočtové oblasti výrazně vyšší, než bylo očekáváno. Ve vyšších kmitočtech je navíc patrné zvlnění na určitých kmitočtech. Při porovnání průběhu s průběhem koeficientu pohltivosti prázdné impedanční trubice, dá se předpokládat, že výsledek je nevyrovnanou charakteristikou impedanční trubice zatížen.



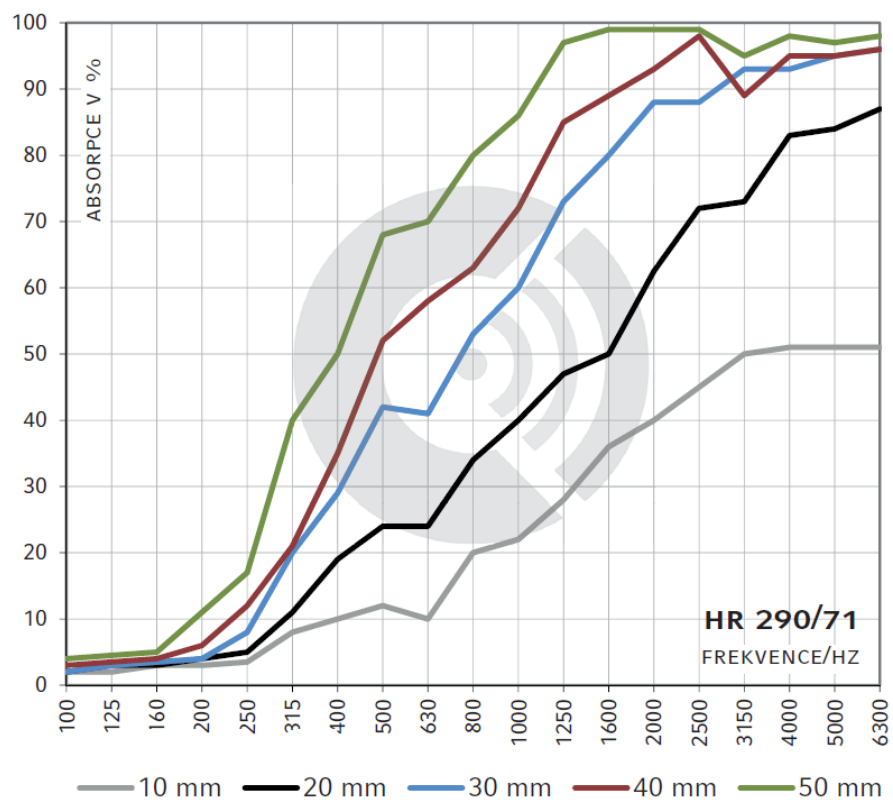
Obr. 2.5: Koeficient pohltivosti cello F800 udávaný výrobcem

Po porovnaní naměřených výsledků s koeficientem pohltivosti materiálu cello F800 udávaným výrobcem je patrný značný rozdíl na nižších kmitočtech, kde výrobcem udávaný průběh od nízkých kmitočtů kontinuálně stoupá. Zároveň i na vyšších kmitočtech je naměřený koeficient pohltivosti o něco vyšší. [7]

Obdobně byl vynesena koeficient pohltivosti pro materiál melamin. I v případě koeficientu pohltivosti melaminu vidíme podobný průběh pravděpodobně zatížený nedokonalostmi samotné impedanční trubice. Na nízkých kmitočtech průběh neodpovídá očekávaným hodnotám.[6]



Obr. 2.6: Koeficient pohltivosti melaminu



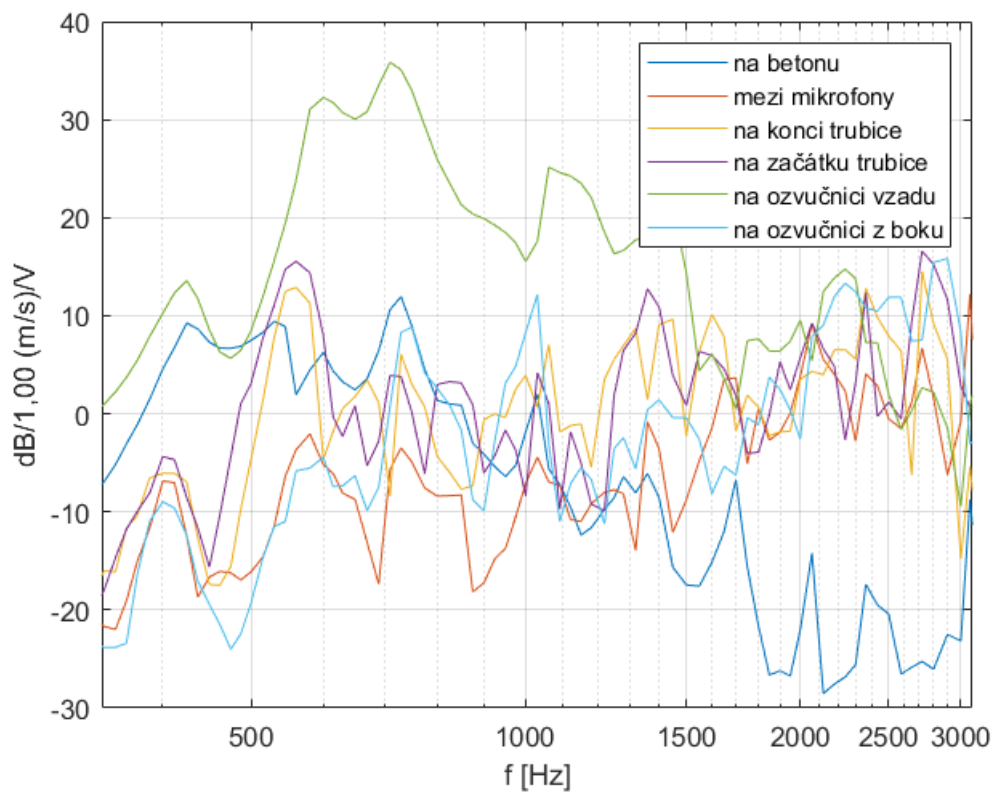
Obr. 2.7: Koeficient pohltivosti melaminu udávaný výrobcem

### 3 Měření vibrací impedanční trubice ÚTKO

Za účelem zjištění chování impedanční trubice a odhalení jejích případných nežádoucích rezonancí v reakci na buzení zvukovým signálem byly pomocí akcelerometrů změřeny vibrace v impedanční trubici v závislosti na kmitočtu budícího signálu. Tyto vibrace byly změřeny na různých místech uvnitř a vně impedanční trubice.

#### 3.1 Měření vibrací vně impedanční trubice

Na šesti místech vně impedanční trubice byla pomocí akcelerometrů změřena úroveň vibrací při buzení skokově přeladovaným harmonickým signálem od 200 Hz do 10000 Hz.



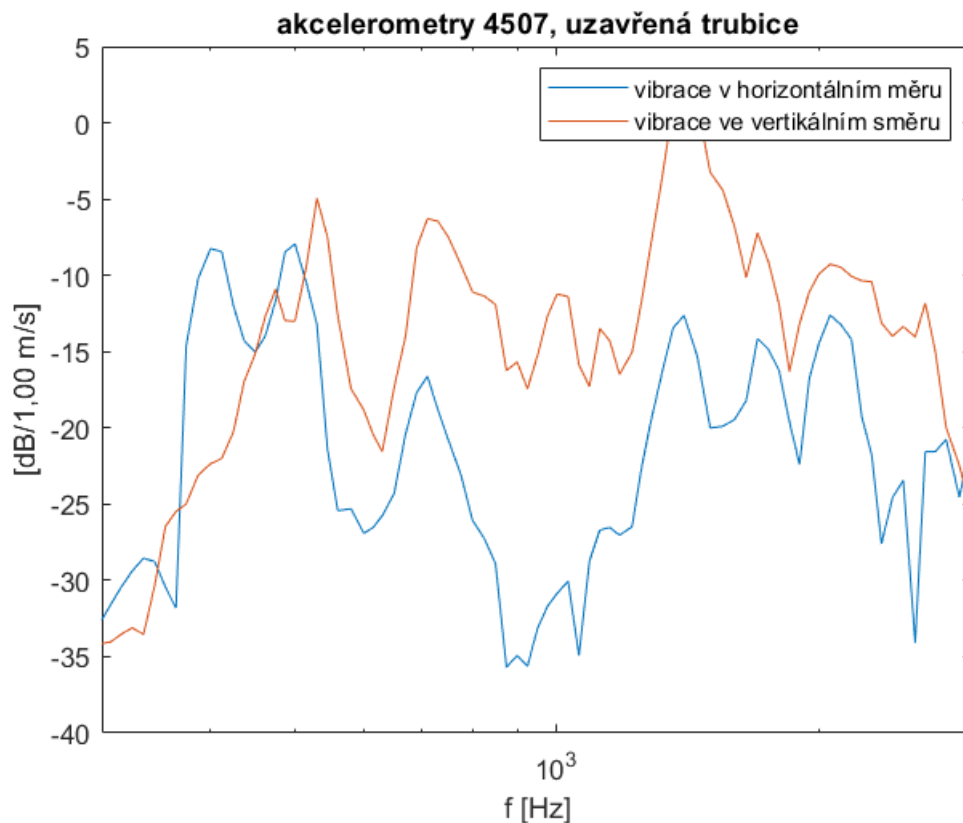
Obr. 3.1: Vibrace vně impedanční trubice

Z průběhů vynesných závislostí je patrné, že v kmitočtovém pásmu od 500 do 1500 Hz nejvýrazněji vibrovala zadní deska ozvučnice reproduktoru. Od kmitočtu 4000 Hz nejvíce vibrovala boční strana ozvučnice reproduktoru. To lze očekávat z důvodu toho, že ozvučnice je na samotnou impedanční trubici pouze nasunuta a

není k ní jinak připevněna. Naopak v kmitočtovém pásmu 1400 až 5300 Hz nejméně vibrovala betonová deska uzavírající impedanční trubici. I toto zjištění dopadlo podle očekávání vzhledem k rozdílu materiálů zadní desky a zbytku impedanční trubice.

### 3.2 Měření vibrací uvnitř impedanční trubice

Vzhledem ke konstrukci impedanční trubice, která je zhotovena pomocí dvou PVC trubek vyplněné montážní pěnou, lze očekávat, že většina vibrací, vyskytující se uvnitř trubice se po průchodu materiálem rozptýlí a na povrchu vnější trubky se neprojeví. Proto bylo provedeno měření vibrací také uvnitř impedanční trubice na místě těsně za betonovou deskou, zakončující impedanční trubici. V místě, kde se při obvyklém měření nachází měřený vzorek. Pro toto měření byly použity akcelerometry Brüel & Kjær 4507 a 4534 pro měření v horizontálním a vertikálním směru příčného řezu trubice. Jako budící signál byl použit skokově přeladovaný harmonický signál od 200 do 12800 Hz.

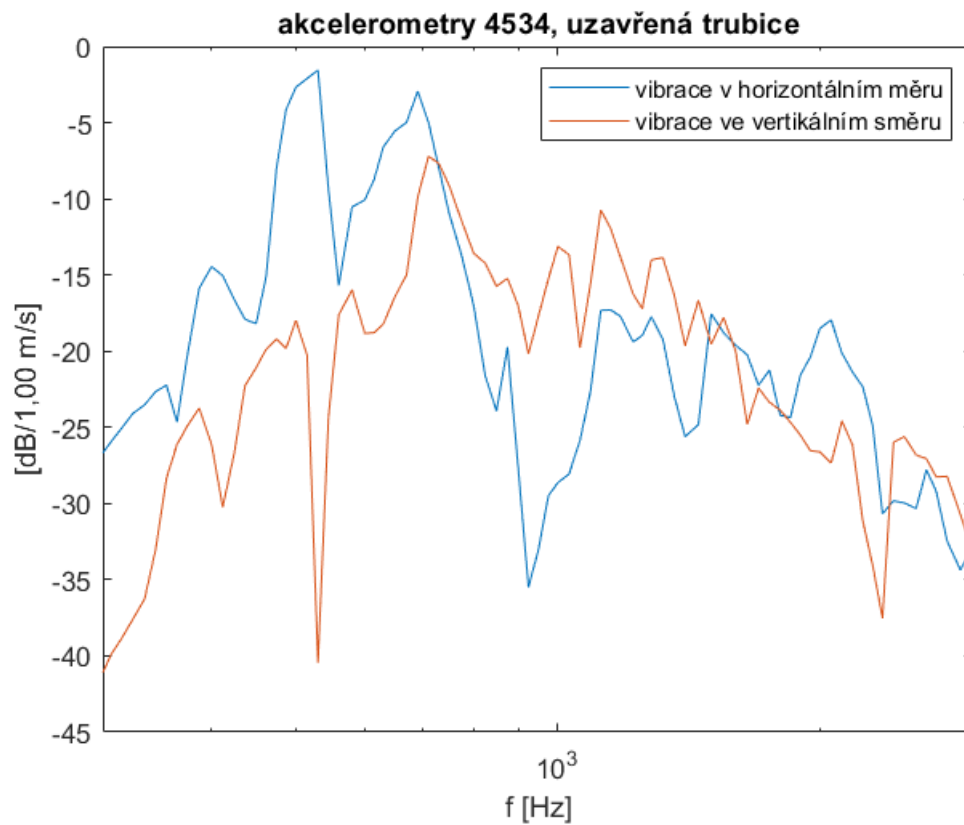


Obr. 3.2: Vibrace uvnitř impedanční trubice, akcelerometry 4507

V horizontálním směru jsou patrná lokální maxima v oblastech kolem 400, 500

a 700 Hz. Dále pak kolem 1400, 1700 a 2000 Hz. Ve vertikální rovině je patrný ještě větší nárůst na místech kolem 500, 700 a 1400 Hz.

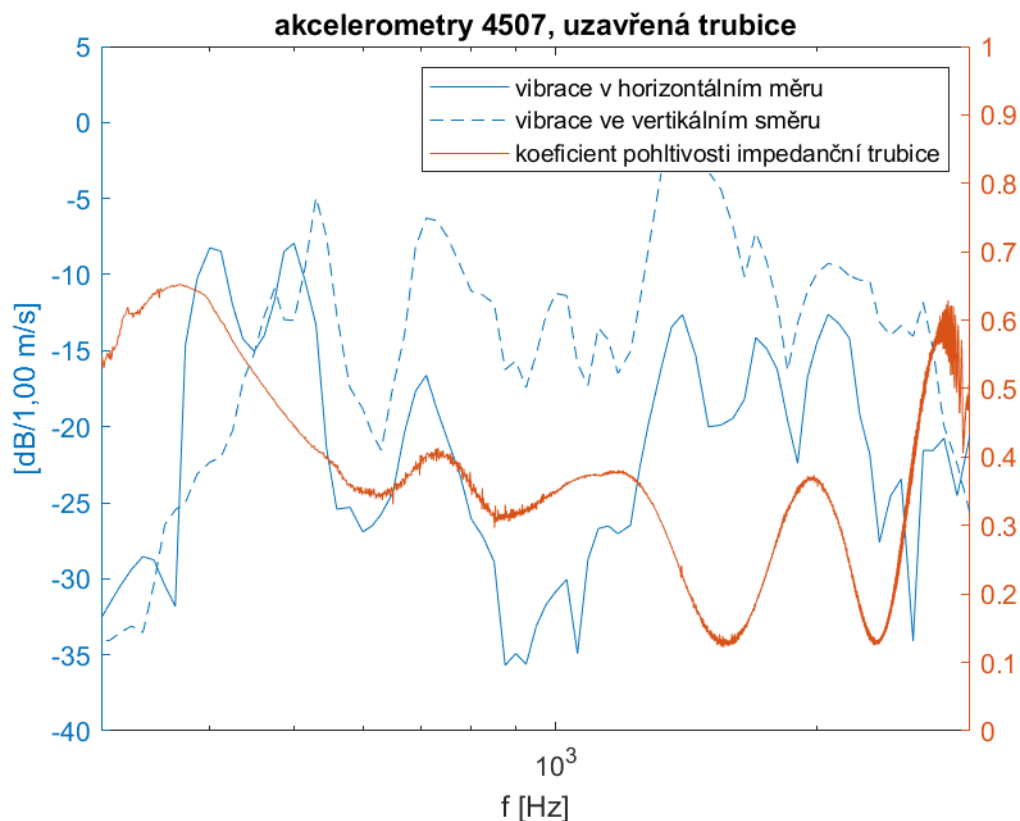
Použití akcelerometrů Brüel & Kjær 4534 by oproti modelu 4507, které byly použity pro předchozí měření, měly zajistit vyšší citlivost.



Obr. 3.3: Vibrace uvnitř impedanční trubice, akcelerometry 4534

Z těchto průběhů jsou opět patrná lokální maxima na kmitočtech 400, 500 a 700 Hz. Tyto maxima jsou výraznější v horizontálním směru měření. Dále jsou viditelná lokální maxima na kmitočtech 1000 a 1100 Hz, tentokrát výrazněji ve vertikálním směru. Následně je ještě patrné lokální maximum na kmitočtu kolem 2000 Hz v horizontálním směru měření.

Do grafu s vibracemi naměřenými akcelerometry 4507 byl vložen průběh koeficientu pohltivosti samotné impedanční trubice.



Obr. 3.4: Vibrace vně impedanční trubice s koeficientem pohltivosti

Z porovnání těchto grafů může být uvažována souvislost mezi vyšší mírou vibrací a vyšším koeficientem pohltivosti na nízkých kmitočtech. Jiná souvislost z uvedených průběhů není patrná.

### 3.3 Zhodnocení funkčnosti impedanční trubice na ÚTKO

Po přezkoumání různých faktorů, které mohou mít vliv na správnost měření impedanční trubicí byly vysoké rezonance a vibrace na určitých kmitočtech určeny jako důvod nepřesných výsledků. Jako hlavní příčina byl určen materiál, ze kterého je impedanční trubice vytvořena. Nemá požadovanou tuhost a tím pádem dostatečně

nezamezuje vzniku rezonancí a úniku zvuku z trubice. Ostatní parametry impedanční trubice odpovídají normě [2].

### **3.4 Návrh úprav impedanční trubice ÚTKO**

Z frekvenční charakteristiky impedanční trubice ÚTKO je patrné, že je vysoce nevyrovnaná. Jedna z příčin je materiál použitý na tělo trubice. PVC použité na stavbu těla trubice není dostatečně těžké, a proto se při měření koeficientu pohltivosti projevují rezonance trubice. Použitý materiál by měl být ideálně tlustostěnný kov. Dále ozvučnice budícího reproduktoru by měla být k trubici pevně přichycena a ne pouze nasunuta na impedanční trubici.



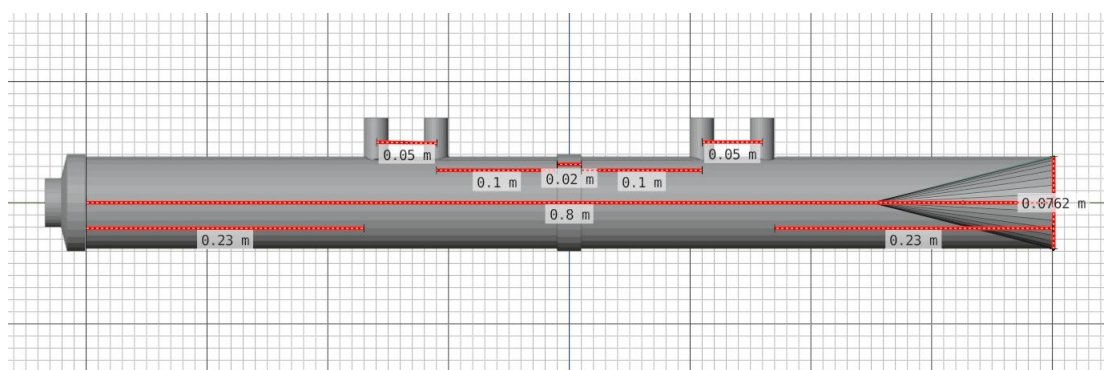
## 4 Návrh impedanční trubice pro měření pohltivosti a průzvučnosti

### 4.1 Rozměry

Materiál impedanční trubice pro měření pohltivosti a průzvučnosti by měl být tuhý, hladký a dostatečně těžký. Proto byla pro tělo trubice zvolena 8 milimetrů tlustá kovová trubice o vnitřním průměru 0,0762 metrů, respektive 3 palce. Vzdálenost prvního mikrofonu od budícího reproduktoru byla zvolena 0,25 metrů, pro splnění podmínky, kdy má být vzdálenost alespoň třikrát větší než průměr trubice. Vzdálenost mikrofonu bližšího k měřeného vzorku byla zvolena 10 centimetrů, pro splnění podmínky, že by tato vzdálenost měla být větší než polovina průměru trubice pro nestrukturované měřené vzorky a než celý průměr trubice pro napůl příčně strukturované vzorky. Se silně asymetrickými vzorky návrh trubice nepočítá. Při měření koeficientu pohltivosti by měla být za měřeným vzorkem trubice uzavřena hladkým a těžkým materiálem. Při měření koeficientu průzvučnosti by za měřeným vzorkem měla mít trubice oddělitelnou část symetrickou vůči části první. Ta by měla být zakončena bezodrazovým závěrem v podobě absorpčního kuželu 1.5. [2]

### 4.2 Měřicí rozsah

Vzdálenost mikrofونů od sebe byla zvolena 0,05 metrů. Na základě vzdálenosti mikrofونů od sebe a vnitřního průměru trubice byly stanoveny hranice měřicího kmitočtového rozsahu. Horní kmitočet byl stanoven na 2600 Hz a dolní mezní kmitočet na 343 Hz.



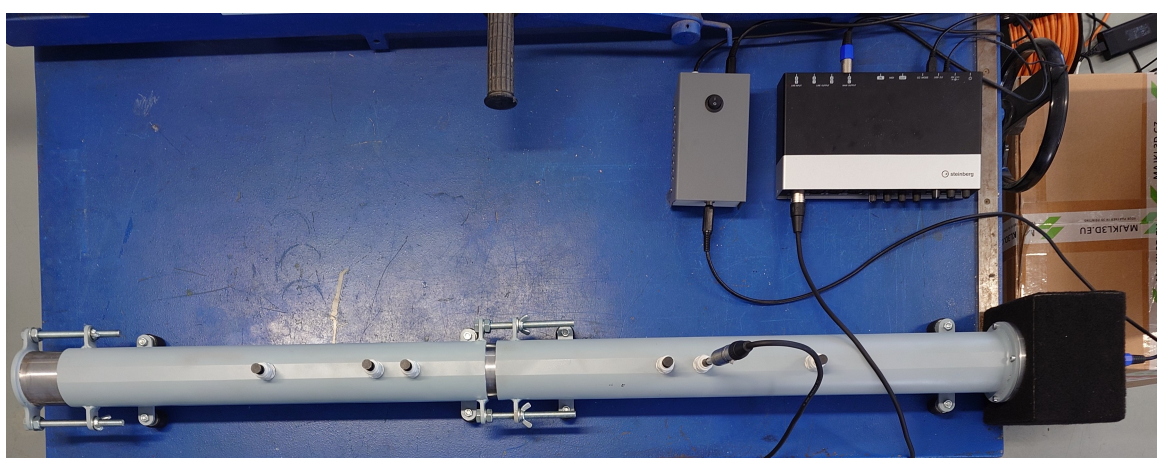
Obr. 4.1: Návrh impedanční trubice

### 4.3 Alternativní vzdálenost mezi mikrofony

Pro posunutí měřicího kmitočtového rozsahu směrem k nižším kmitočtům byla navržena alternativní vzdálenost mezi mikrofony, 0,1715 metru, která by posunula dolní mezní kmitočet na 100 Hz a horní mezní kmitočet na 900 Hz. Tato alternativní vzdálenost mezi mikrofony by byla realizována přidáním otvorem právě v této vzdálenosti směrem od mikrofону blíže k budícímu reproduktoru k měřenému vzorku. Tento otvor by byl v při měření na původní vzdálenosti utěsněn těsněním ze stejného materiálu a šířce jako trubice samotná.

## 5 Impedanční trubice pro laboratorní úlohu

Impedanční trubice pro měření koeficientu pohltivosti a zvukové neprůzvučnosti určená pro laboratorní úlohu je vyrobena z kovu, s tloušťkou stěny 8 mm a vnitřním průměrem 73 mm. Celková délka trubice činí 1030 mm, s tím, že v polovině lze trubici rozdělit na dvě trubice stejného objemu. Pro měření koeficientu zvukové pohltivosti se používá pouze první polovina trubice na jejíž konec je umístěn měřený vzorek a trubice je uzavřena tvrdým zakončením zhotoveným ze stejného materiálu jako trubice samotná. V případě měření vzduchové neprůzvučnosti je mezi dvě poloviny trubice umístěn měřený vzorek a konec druhé poloviny trubice je uzavřen anechoickým zakončením realizovaným akustickou pěnou jehlanového tvaru.



Obr. 5.1: Impedanční trubice určená pro laboratorní úlohu

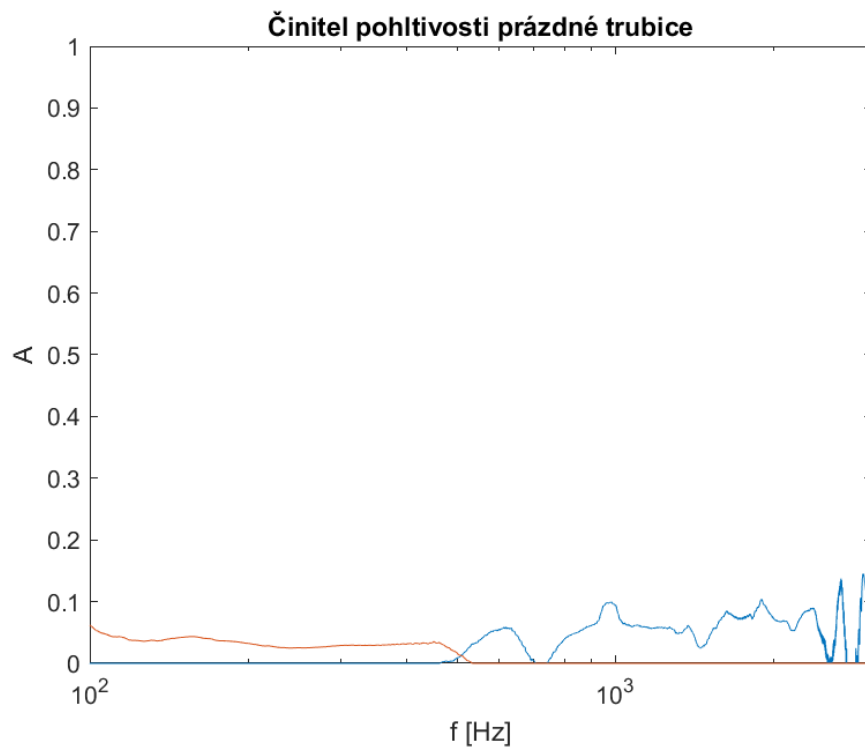
Trubice obsahuje 6 otvorů pro mikrofony, vždy 3, symetricky z obou stran měřeného vzorku. Mikrofony nejbližší ke vzorku jsou od něj vzdáleny 153 mm. Od nich jsou mikrofony pro měření v rozsahu na vyšších kmitočtech vzdáleny 45 mm. Pro měření na nižších kmitočtech jsou mikrofony vzdáleny 255 mm. Tyto dvě vzdálenosti mikrofonů pokryjí měřící kmitočtový rozsah od 100 do 3000 Hz.

## 6 Měření koeficientu pohltivosti

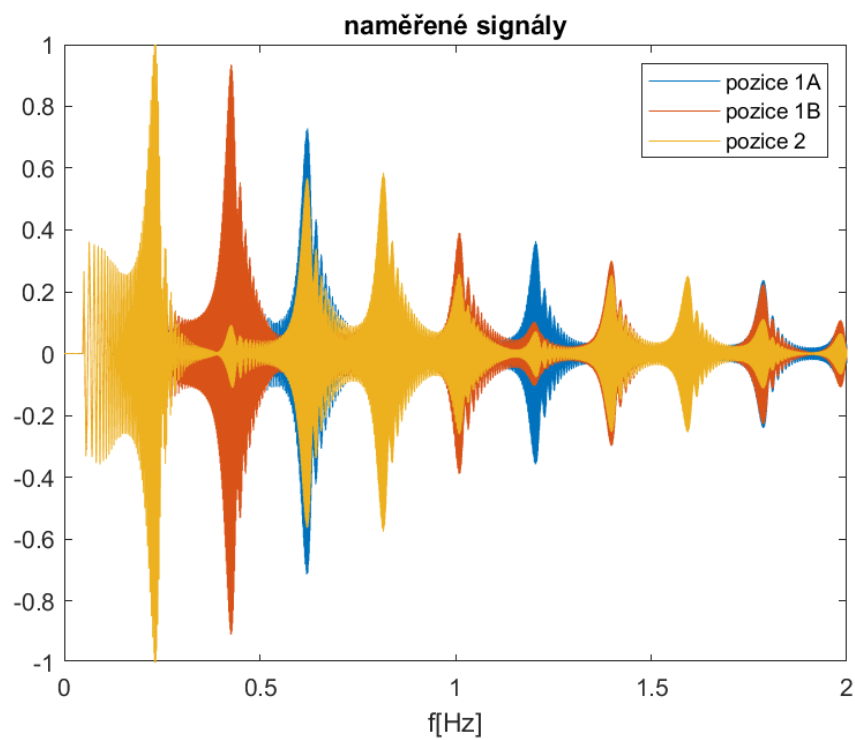
Měření koeficientu pohltivosti na této impedanční trubici bylo provedeno podle metody přenosové funkce. 1.7 Měřicí mikrofon Audix TM1 a reproduktor impedanční trubice byly připojeny ke zvukové kartě, která byla připojena k počítači. Pro zjednodušení měřicího procesu bylo toto měření provedeno pouze s jedním mikrofonem, kterým bylo měřeno postupně na všech měřících místech. Pomocí funkce v prostředí Matlab využívající systémový objekt "audioPlayerRecorder" byl lineárně přeladovaným harmonickým signálem vybudzen reproduktor a zaznamenán se signál z mikrofonu. Následně byl z takto postupně naměřených průběhů vypočítán koeficient odrazivosti, z něj potom koeficient pohltivosti. Toto měření bylo provedeno pro dvě rozdílné vzájemné vzdálenosti mikrofonů, tedy pro dva různé kmitočtové rozsahy. koeficient pohltivosti byl naměřen pro několik vzorků různých materiálů zhotovených na ÚTKO k tomuto účelu.

Činitel pohltivosti samotné impedanční trubice se pohybuje v rozmezí do 0,1. Ve vyšších kmitočtech se objevuje nepravidelný průběh a nad 2000 Hz vidíme průběh připomínající hřebenový filtr. 6.1 Ten je pravděpodobně dán rozměry trubice. Na tento jev také odkazují časové průběhy signálu naměřeného na jednotlivých místech. 6.2

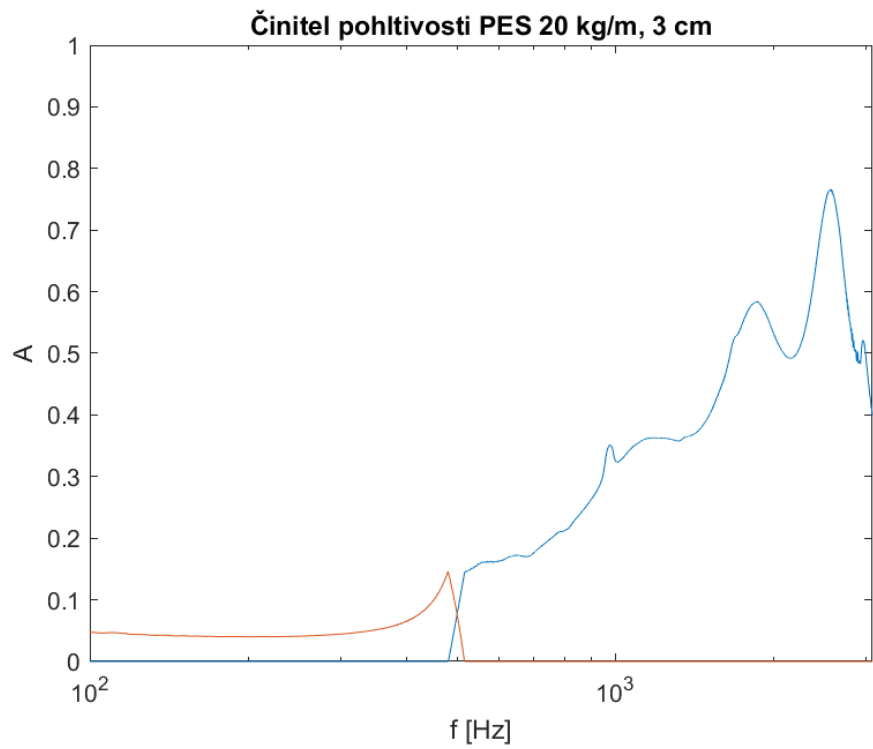
Koeficienty pohltivosti měřených materiálů vykazovaly očekávaný průběh, tedy relativně málo pohltivé na nízkých kmitočtech do přibližně 300 Hz. S rostoucím kmitočtem koeficient pohltivosti roste. Opět je přítomno zvlnění na vyšších kmitočtech. 6.3 - 6.7



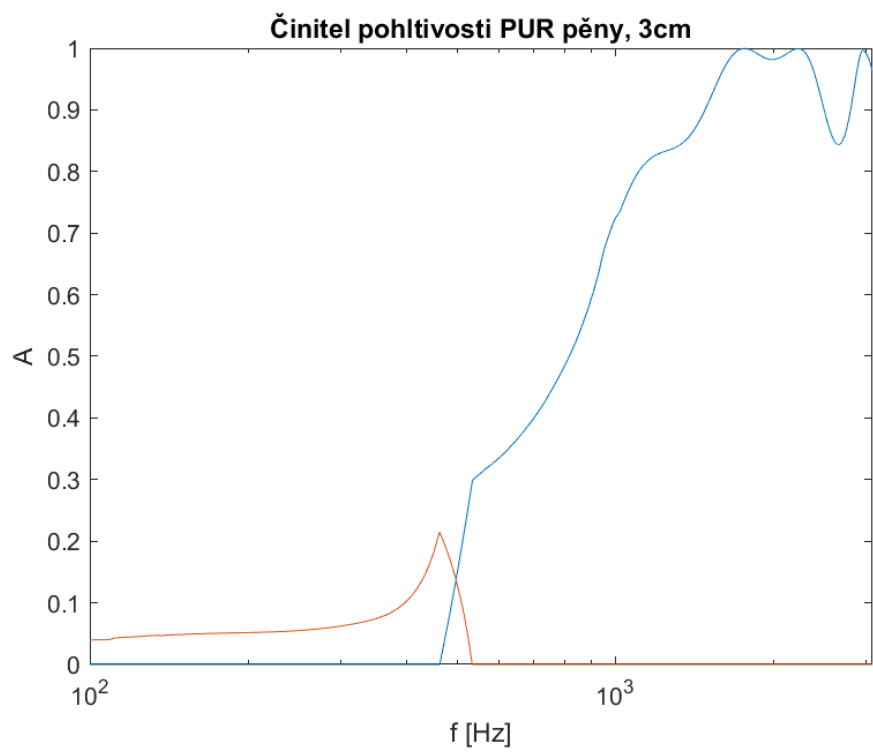
Obr. 6.1: Koeficient pohltivosti prázdné trubice



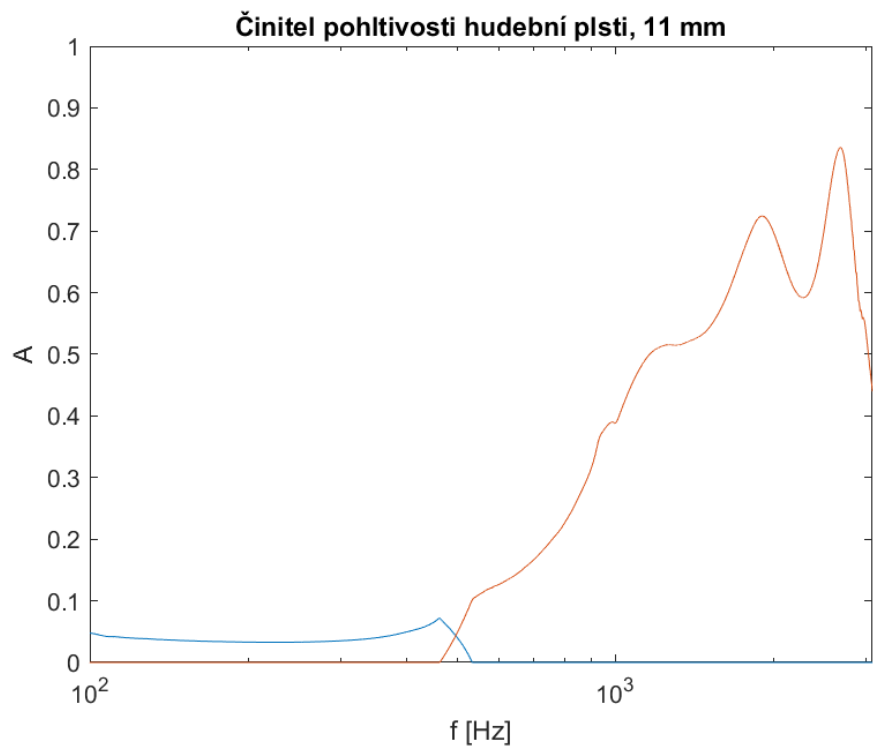
Obr. 6.2: Časový průběh naměřených signálů



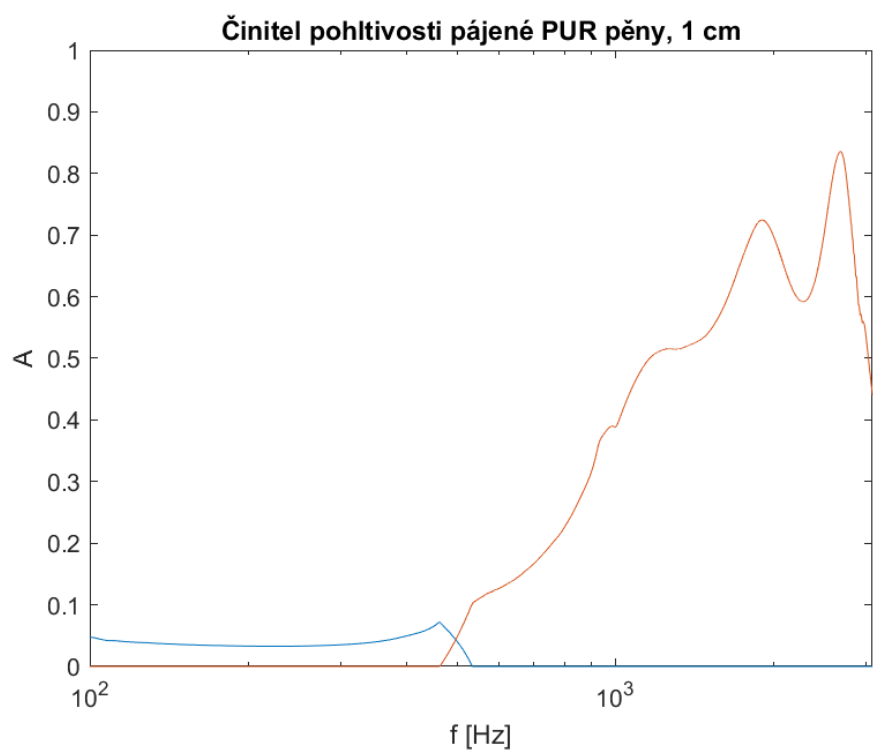
Obr. 6.3: Koeficient pohltivosti PES 20 kg/m



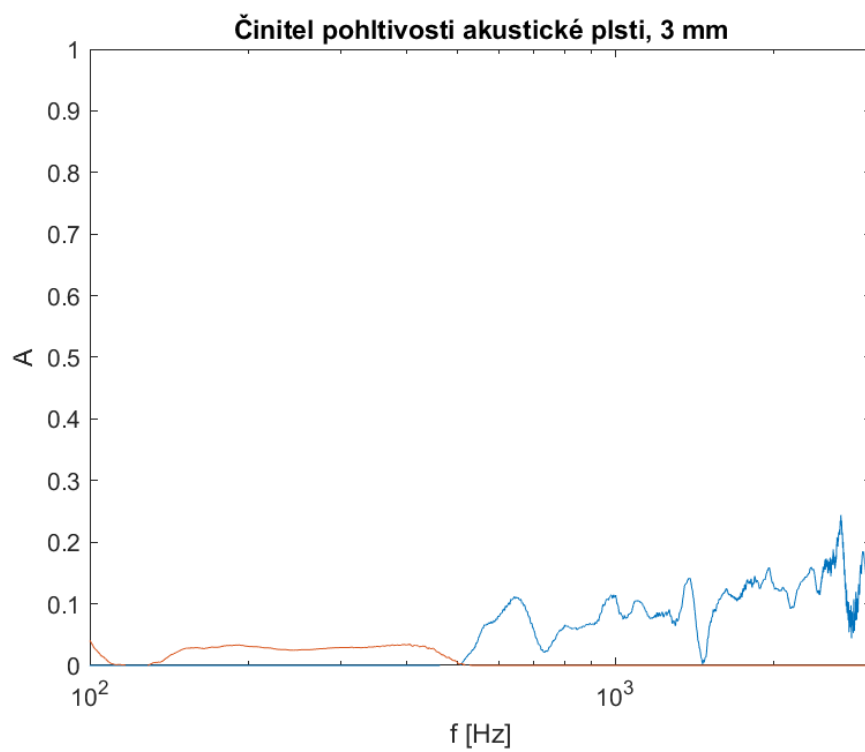
Obr. 6.4: Koeficient pohltivosti PUR pěny



Obr. 6.5: Koeficient pohltivosti hudební plsti



Obr. 6.6: Koeficient pohltivosti pájené PUR pěny

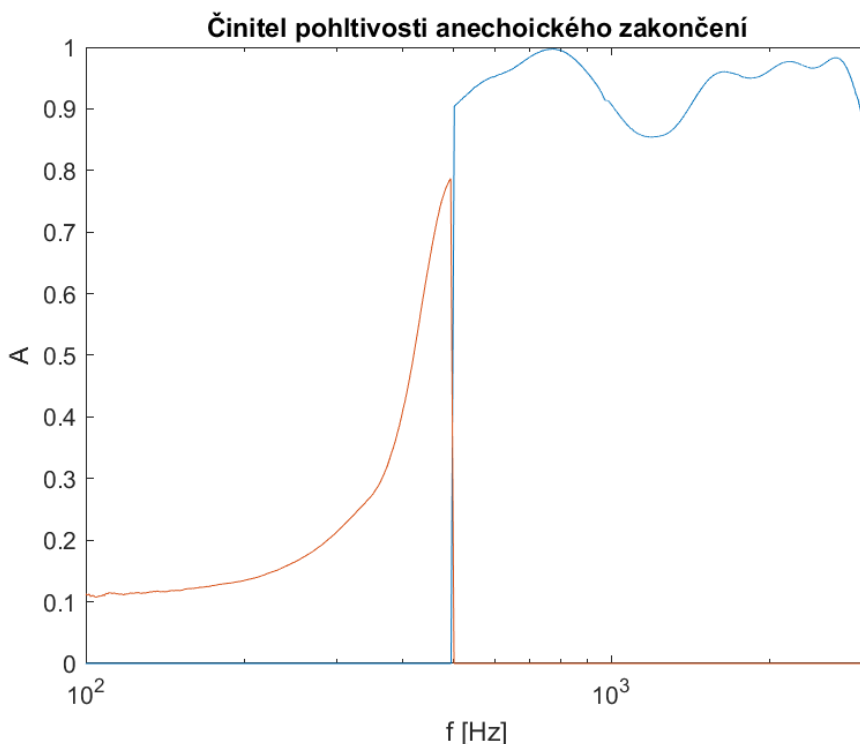


Obr. 6.7: Koeficient pohltivosti akustické plsti



## 7 Měření vzduchové neprůzvučnosti

Měření vzduchové neprůzvučnosti bylo provedeno podle metody přenosové matice. A.4 Pomocí měřicího mikrofónu připojeného ke zvukové kartě byly zaznamenány signály postupně ze všech měřících míst. Trubice byla opět buzena lineárně přeladovaným harmonickým signálem. Z těchto průběhů byl vypočítán koeficient průzvučnosti materiálu daného vzorku. Ten byl následně přepočítán na vzduchovou neprůzvučnost. Toto měření bylo provedeno pro dvě rozdílné vzájemné vzdálenosti mikrofónních dvojic, tedy pro dva různé kmitočtové rozsahy. Byl také naměřen koeficient pohltivosti anechoického zakončení, kterým byla impedanční trubice zakončena.



Obr. 7.1: Koeficient pohltivosti anechoického zakončení

Koeficient průzvučnosti a vzduchová neprůzvučnost byla naměřena pro různé vzorky materiálů na ÚTKO.

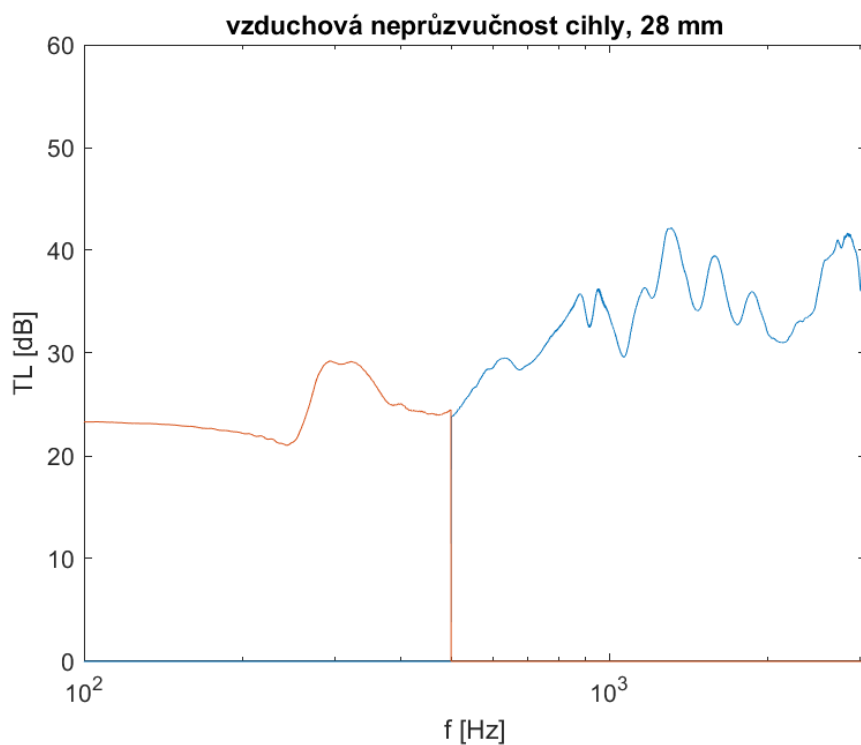
Ze zobrazených průběhů vzorků cihly a betonu je vidět stoupající neprůzvučnost od nízkých kmitočtů, což bylo očekáváno. Od 1000 Hz je průběh stále rostoucí, ale velmi kolísavý. 7.3, 7.2

V případě měření gumového těsnění je průběh vzduchové neprůzvučnosti do 400 Hz klesající, na tomto kmitočtu se nachází výrazné lokální minimum, od tohoto kmitočtu je průběh rostoucí. Od 1000 Hz je průběh kolísavý. 7.4

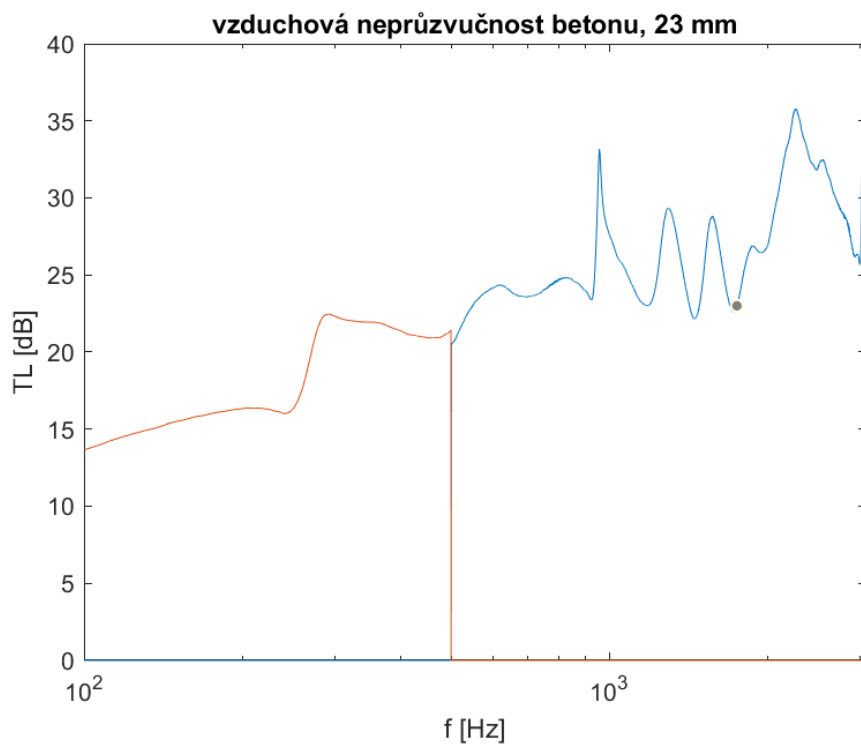
V případech měření dalších tuhých vzorků pozorujeme rostoucí průběh na nízkých kmitočtech. Od určitého lokálního maxima však vzduchová neprůzvučnost klesá. Vyskytuje se zde také výrazné lokální minimum kolem kmitočtu 1000 Hz. 7 - 7.8

V případě naměřené vzduchové neprůzvučnosti poréznějších materiálů vyšla oproti předchozím materiálům podle očekávání řádově nižší. Její průběh je v celé kmitočtové oblasti rostoucí. Průběhy těchto materiálů jsou také velmi nevyrovnané. 7.9 - 7.11

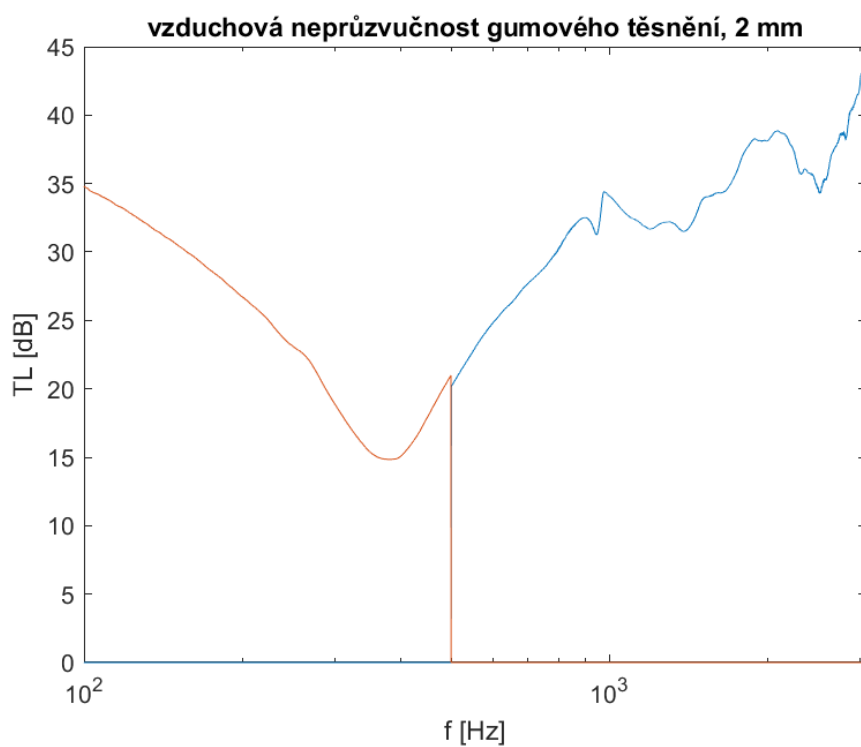
U většiny změřených materiálů vyšlo oproti očekávání vyšší neprůzvučnost na nízkých kmitočtech. Je jedna z příčin by mohla být nedostatečná pohltivost anechoického zakončení impedanční trubice právě na těchto kmitočtech.



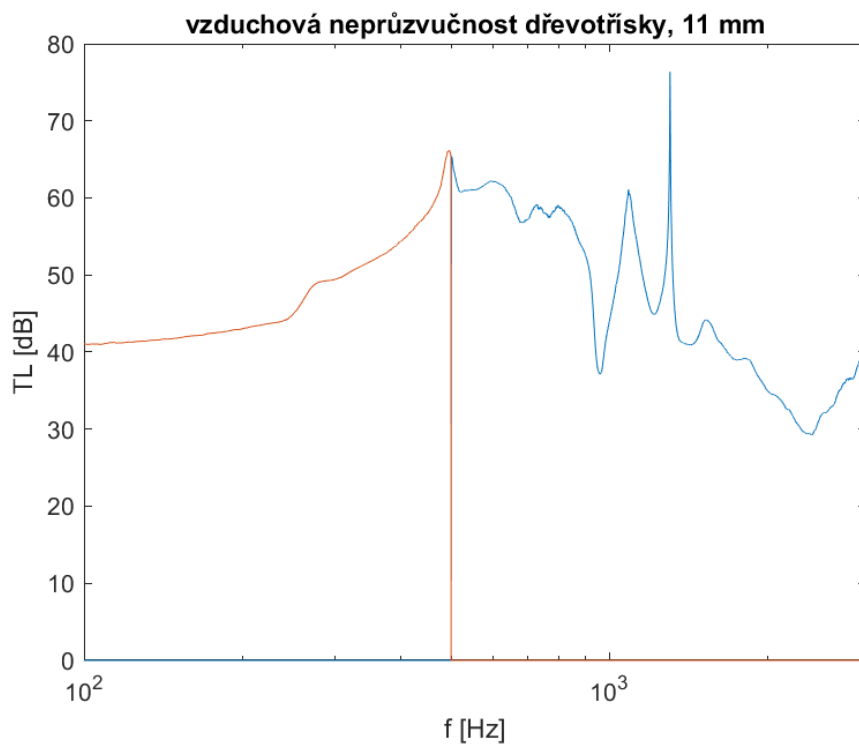
Obr. 7.2: Vzduchová neprůzvučnost cihly



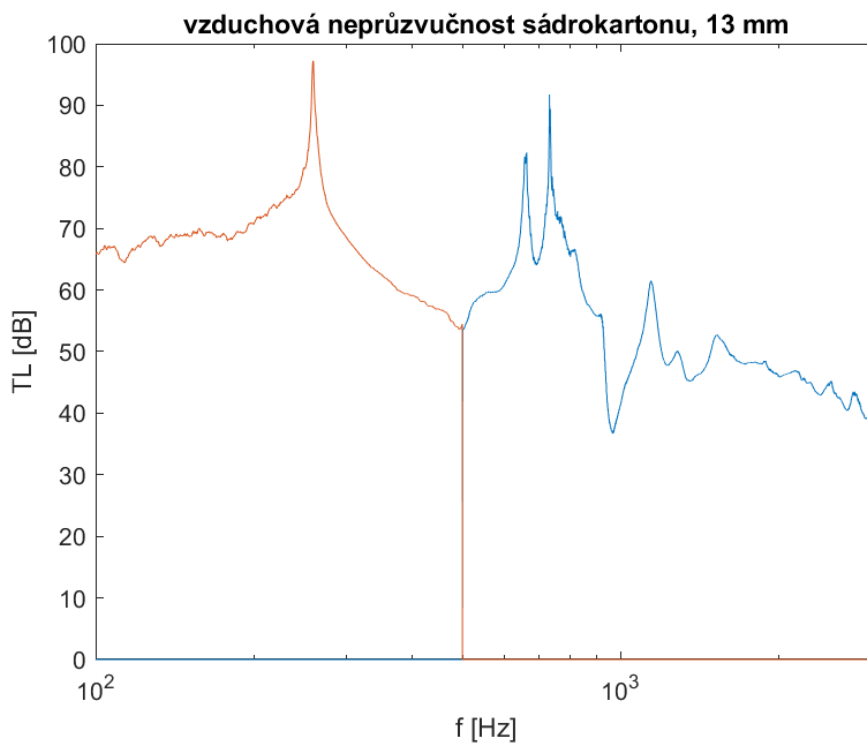
Obr. 7.3: Vzduchová neprůzvučnost betonu



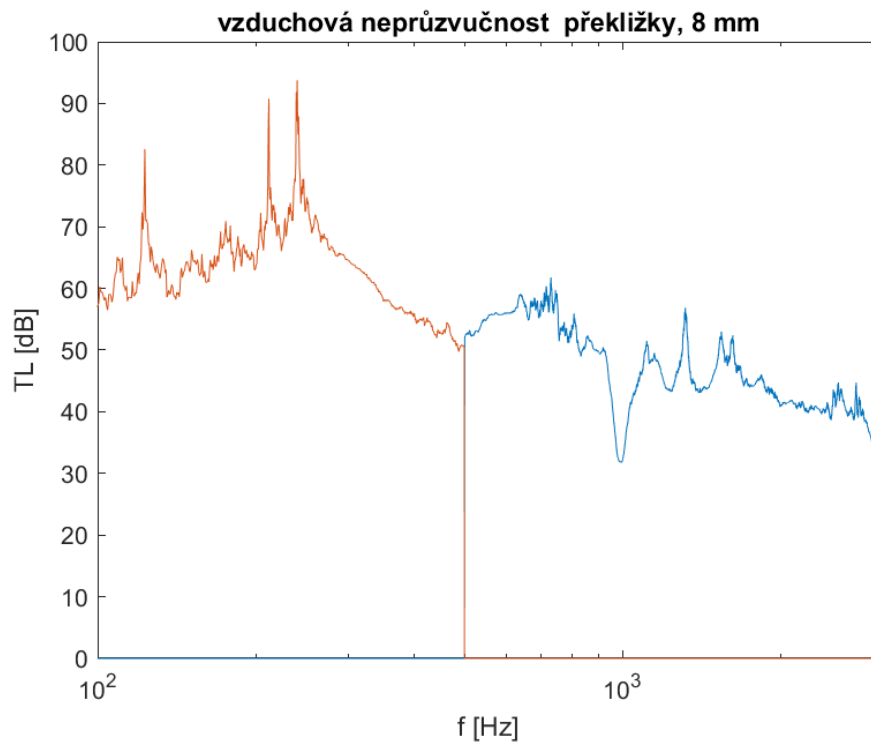
Obr. 7.4: Vzduchová neprůzvučnost gumy



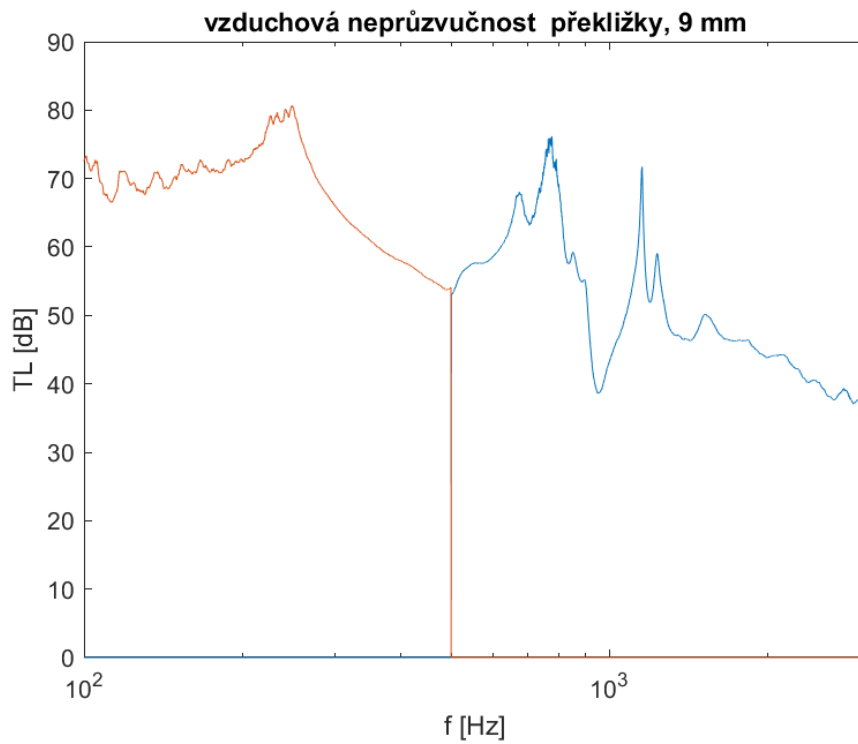
Obr. 7.5: Vzduchová neprůzvučnost dřevotřísky



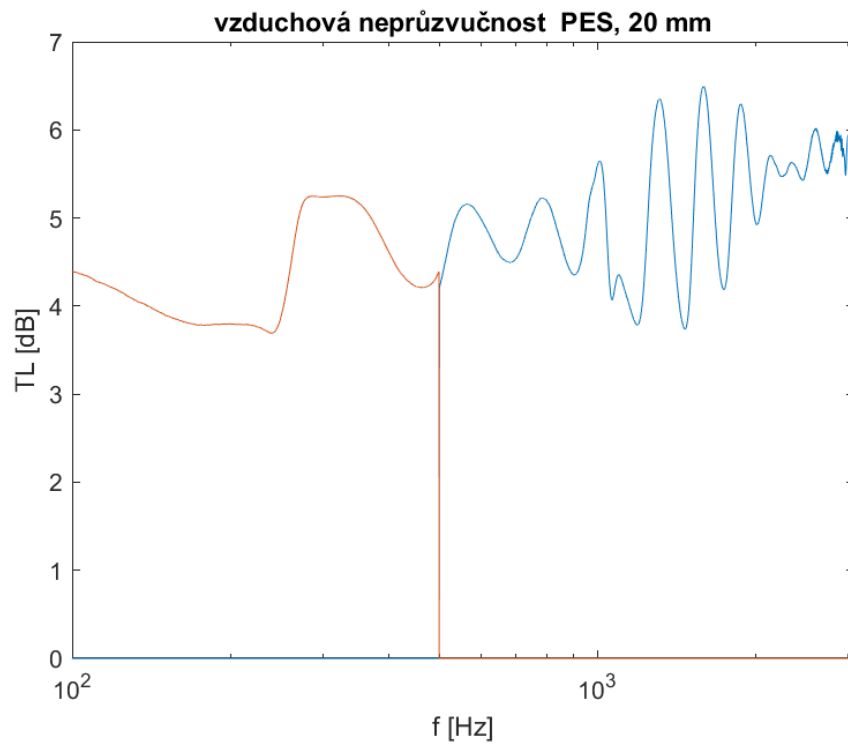
Obr. 7.6: Vzduchová neprůzvučnost sádrokartonu



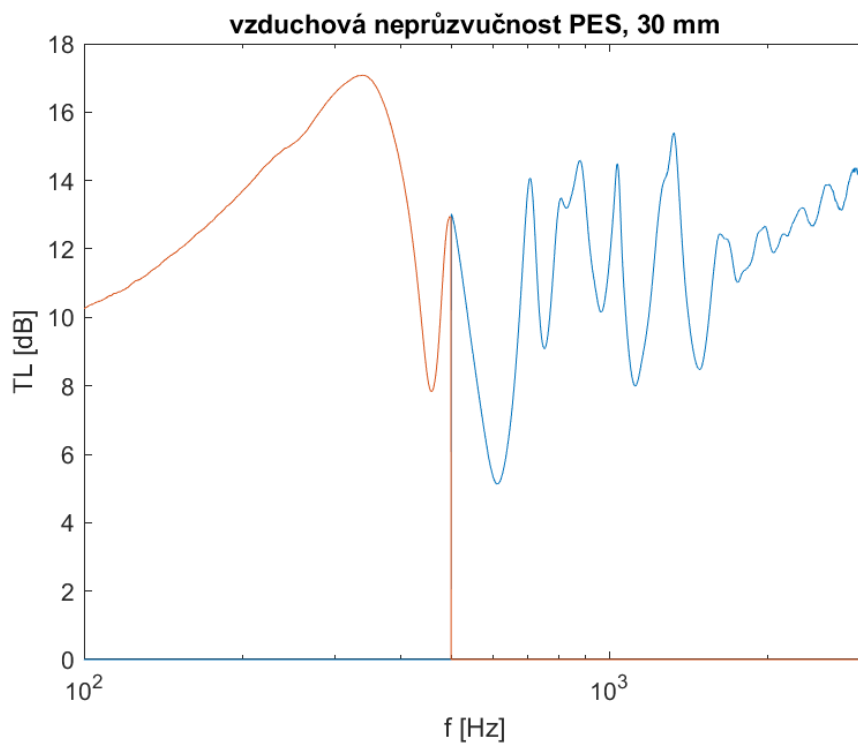
Obr. 7.7: Vzduchová neprůzvučnost překližky, 8 mm



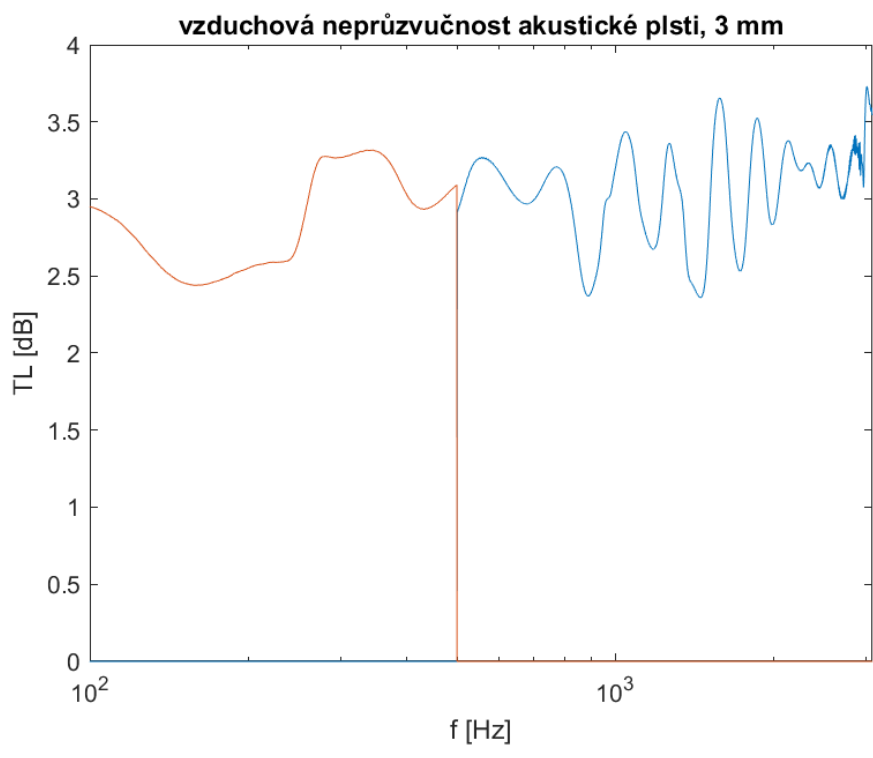
Obr. 7.8: Vzduchová neprůzvučnost překližky, 9 mm



Obr. 7.9: Vzduchová neprůzvučnost PES, 20 mm



Obr. 7.10: Vzduchová neprůzvučnost PES, 30 mm



Obr. 7.11: Vzduchová neprůzvučnost akustické plsti

## 8 Porovnání naměřených výsledků koeficientu pohltivosti

Pro ověření naměřených výsledků bylo také provedeno měření koeficientu pohltivosti a vzduchové neprůzvučnosti pomocí profesionální impedanční trubice Brüel & Kjær 4206 v laboratoři CEITEC VUT.

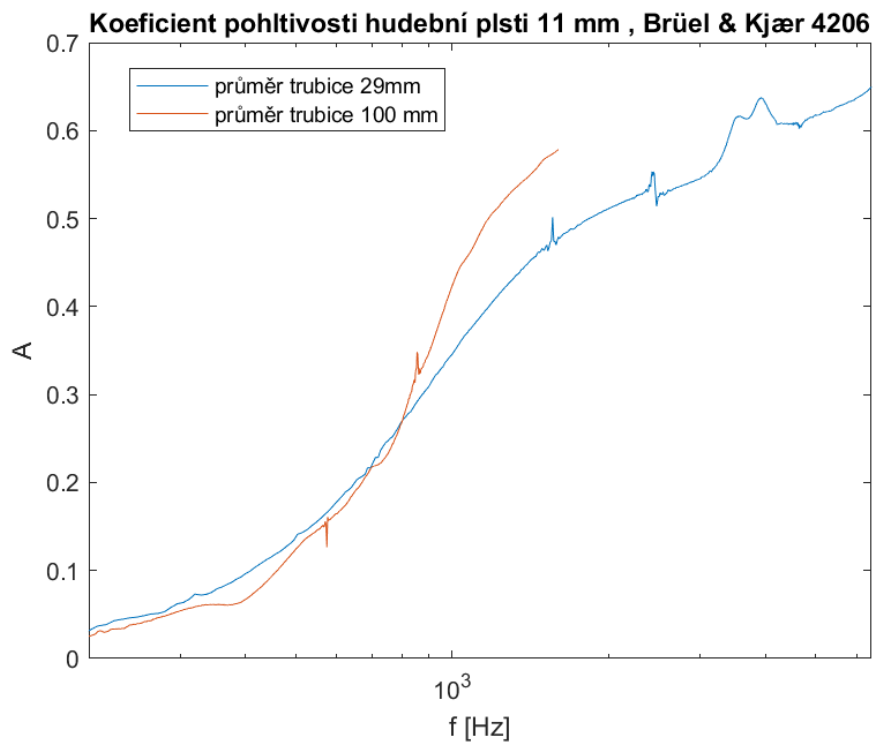
Koeficient zvukové pohltivosti byl změřen ve dvou různých vnitřních průměrech trubice, 29 mm a 100 mm.

Naměřený koeficient pohltivosti hudební plsti v této impedanční trubici do 1600 Hz odpovídá měření v impedanční trubici na pro laboratorní úlohu na ÚTKO. Na vyšších kmitočtech je vidět záskmit v oblasti nad 3000 Hz. Na těchto kmitočtech impedanční trubice na ÚTKO neměří. V průběhu naměřeném na impedanční trubici ÚTKO se také objevuje zvlnění mezi 2000 a 3000 Hz. 8.1, 8.2

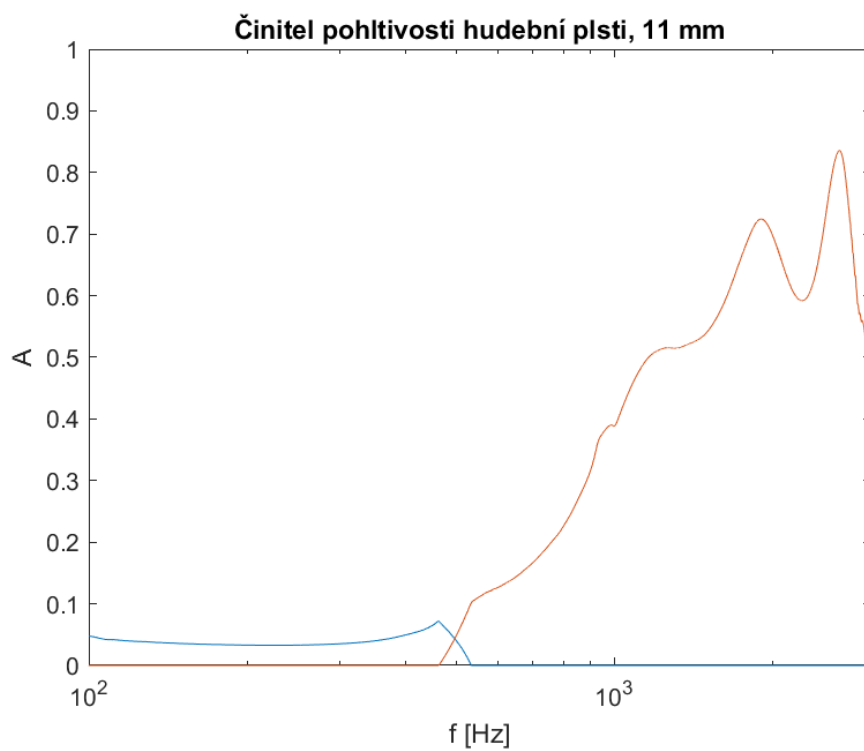
Při porovnání výsledků PUR pěny si opět průběhy do 1600 Hz zhruba odpovídají. Od tohoto kmitočtu však průběh koeficientu pohltivosti naměřený v impedanční trubici Brüel & Kjær 4206 začne klesat. Koeficient pohltivosti začne opět růst od 3000 Hz. Naproti tomu v impedanční trubici na ÚTKO po mírném zvlnění průběhu roste koeficient pohltivosti od 1600 Hz dále až k hodnotám kolem 1. Pokles a zvlnění průběhu pozorujeme od 2500 Hz. 8.3, 8.4

Rozdílné průběhy koeficientů pohltivosti naměřené v těchto dvou impedančních trubicích mohou být způsobené rozdílnými rozměry trubic. Sice se jejich měřicí rozsah překrývá, bylo k němu ale dospěno různými vnějšími průměry trubice v prvním případě, a různými vzájemnými vzdálenostmi mikrofonů v případě druhém.

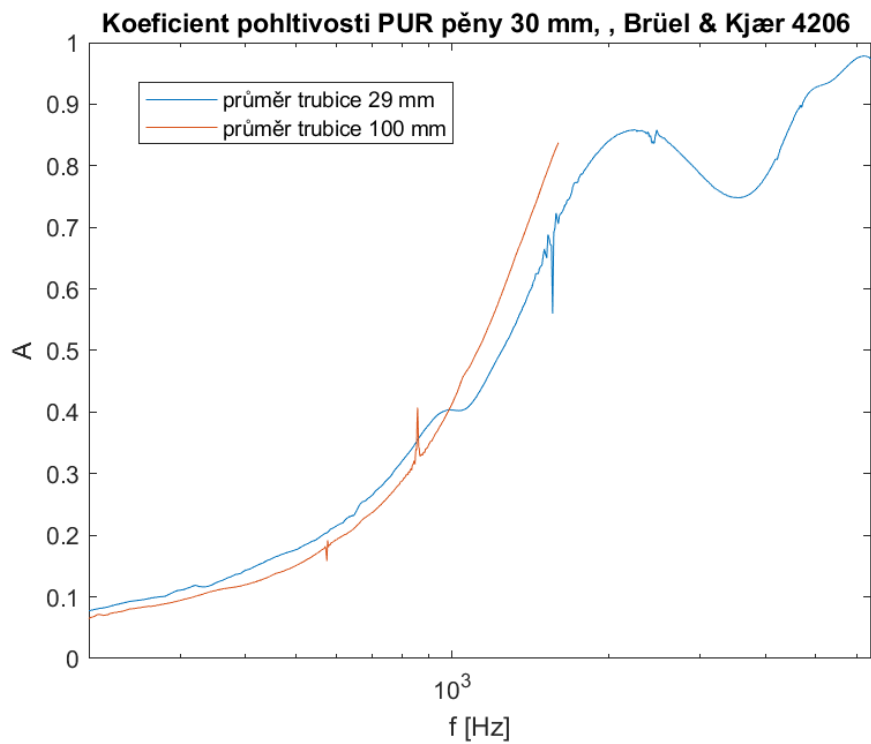




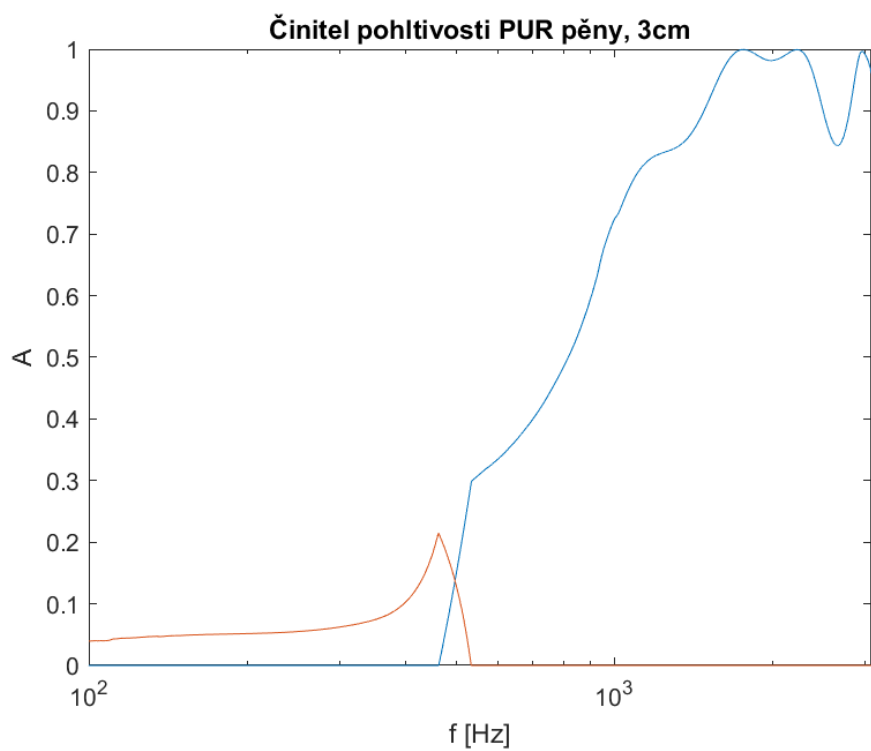
Obr. 8.1: Koeficient pohltivosti hudební plsti, Brüel & Kjær 4206



Obr. 8.2: Koeficient pohltivosti hudební plsti



Obr. 8.3: Koeficient pohltivosti PUR pěny, Brüel & Kjær 4206



Obr. 8.4: Koeficient pohltivosti PUR pěny

## 9 Porovnání naměřených výsledků vzduchové neprůzvučnosti

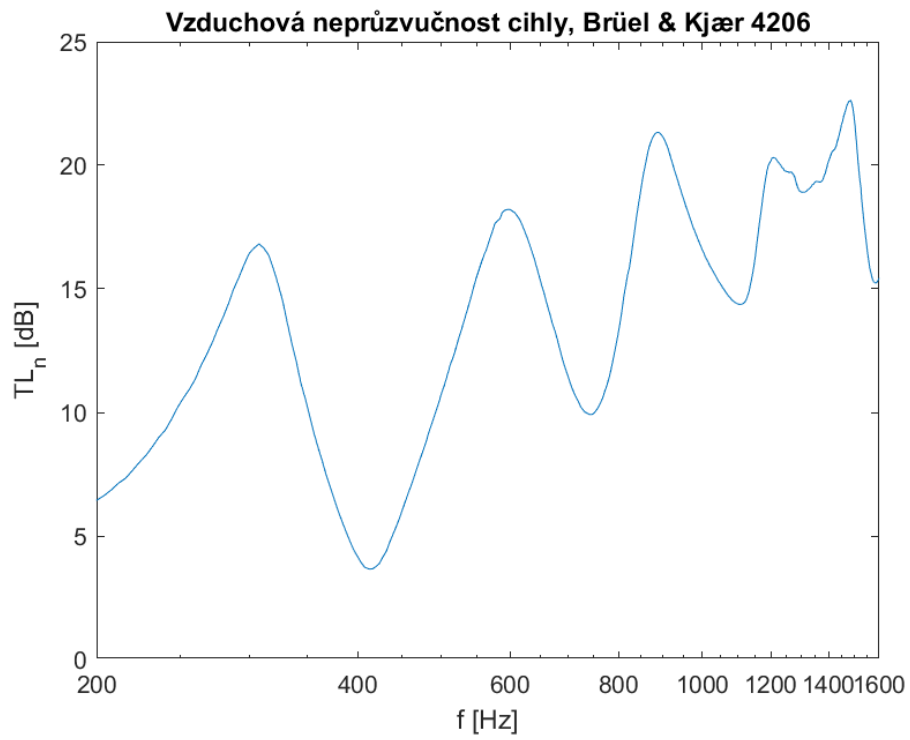
Vzduchová neprůzvučnost byla změřena v laboratoři CEITEC VUT na trubici s vnitřním průměrem 100 mm.

Průběh vzduchové neprůzvučnosti cihly naměřený v této impedanční trubici se pohybuje v rozmezí do 23 dB. Vykazuje rostoucí tendence, nicméně je velmi nevyrovnaný. Příčina tohoto kolísavého průběhu a zároveň celkově nízké vzduchové neprůzvučnosti je pravděpodobně nedostatečně těsnící měřený vzorek. Vzduch tedy kromě průchodu měřeným materiálem procházel v mezerách po obvodu vzorku. 9.1

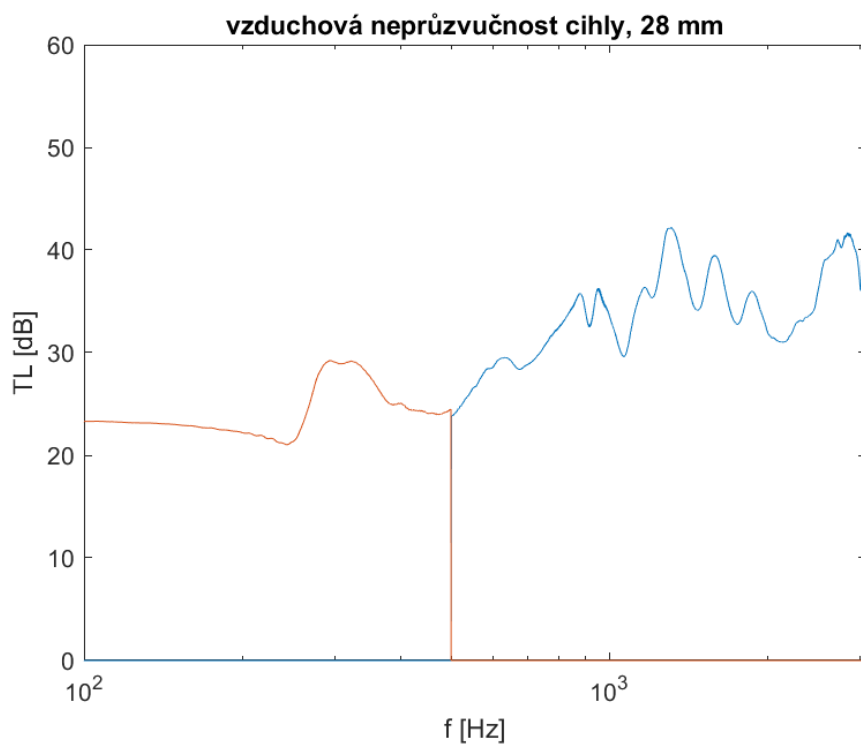
Naproti tomu vzduchová neprůzvučnost cihly naměřená v impedanční trubici pro laboratorní úlohu na ÚTKO mírně roste od 22 dB po 30 dB do 1000 Hz s dvěma strmějšími nárůsty na 200 a 500 Hz. Dále je průběh rostoucí, ale velmi kolísavý. 9.2

Průběh vzduchové neprůzvučnosti sádrokartonu naměřený v impedanční trubici Brüel & Kjær 4206 je rostoucí, v rozmezí od 12 do 25 dB v měřené kmitočtové oblasti. Pozorujeme zvlnění na 300 Hz. Od 1000 Hz je průběh velmi kolísavý. Příčina byla opět přisouzena nedokonalé těsnicímu měřenému vzorku s impedanční trubicí. 9.3

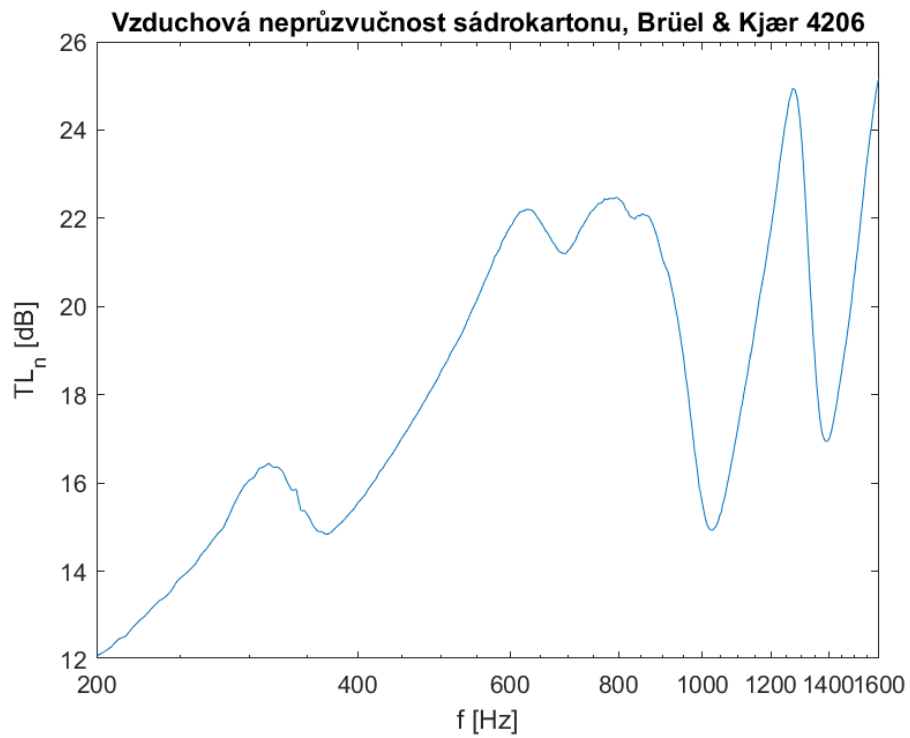
V případě měření v impedanční trubici pro laboratorní úlohu na ÚTKO je průběh vzduchové neprůzvučnosti rostoucí do 300 Hz kde se nachází výrazné lokální maximum. Od této oblasti je průběh klesající do kmitočtu 500 Hz. Dále pozorujeme dvě lokální maxima kolem 700 Hz. V oblasti 1000 Hz pozorujeme lokální minimum, dále pak vzduchová neprůzvučnost klesá. 9.4



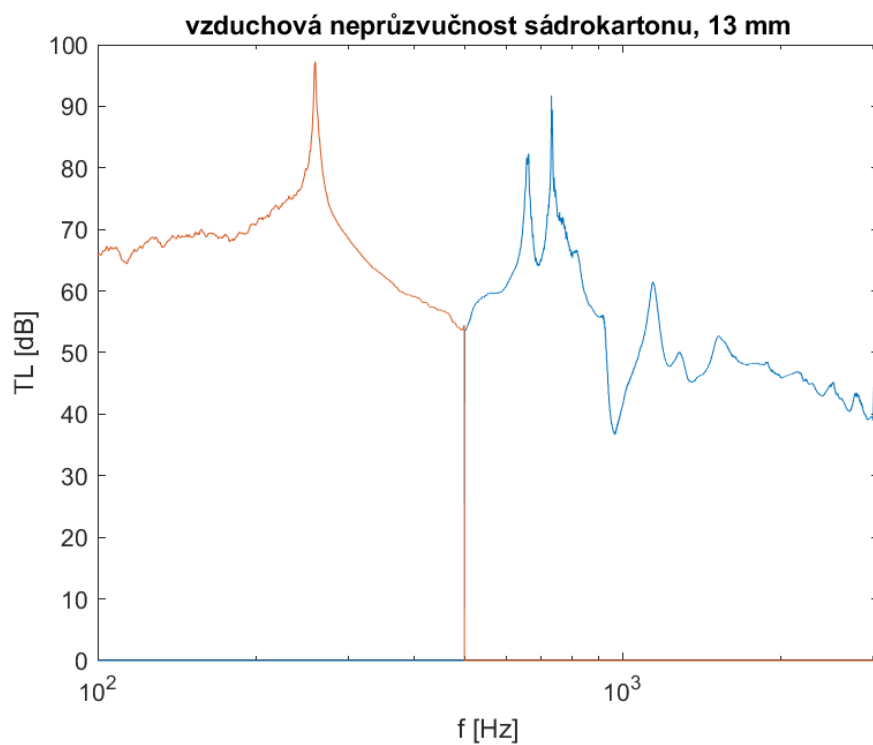
Obr. 9.1: Vzduchová neprůzvučnost cihly, Brüel & Kjær 4206



Obr. 9.2: Vzduchová neprůzvučnost cihly



Obr. 9.3: Vzduchová neprůzvučnost sádrokartonu, Brüel & Kjær 4206



Obr. 9.4: Vzduchová neprůzvučnost sádrokartonu

## 10 Laboratorní úloha

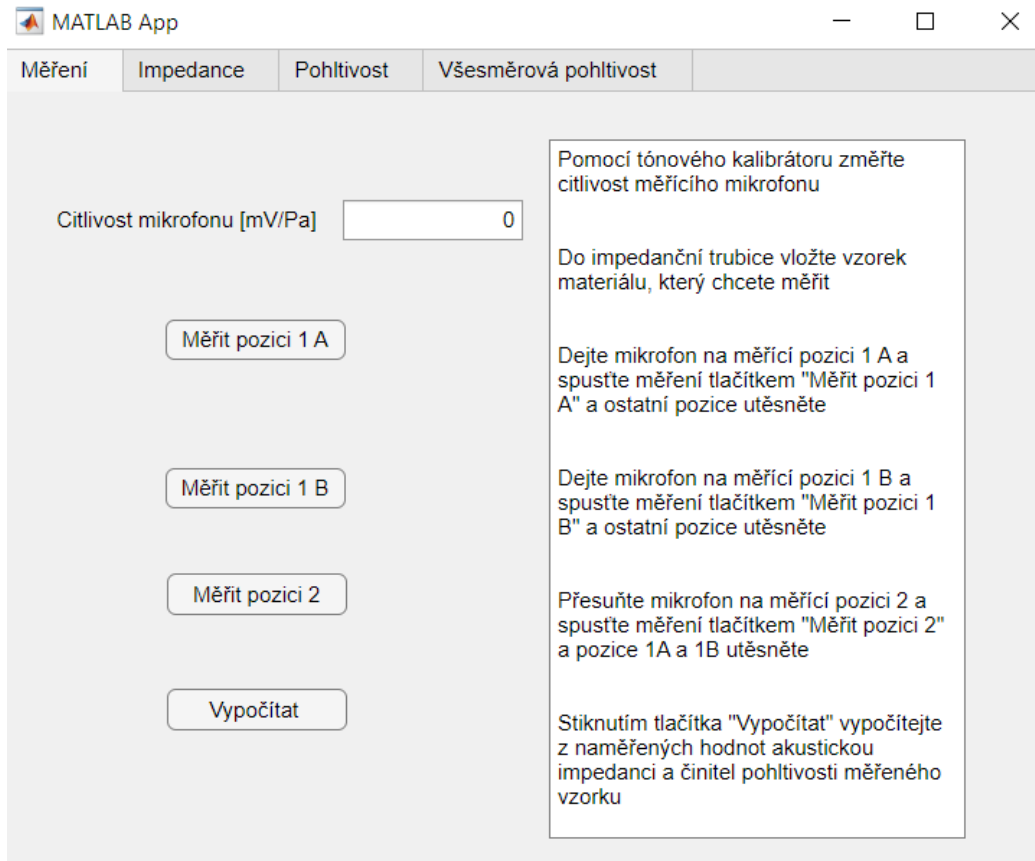
Na základě poznatků předchozích výpočetních postupů měření byly vyvinuty aplikace v prostředí Matlab App Designer pro snadnější měření, výpočet a zobrazení výsledků v rámci laboratorní úlohy zabývající se právě tímto měřením. Před samotným měřením vzorků v impedanční trubici studenti pomocí tónového generátoru a zvukoměru zjistí citlivost měřícího mikrofону. Zbytek parametrů měření je nastaven v aplikaci konkrétně pro impedanční trubici pro laboratorní úlohu.

Studenti se v rámci laboratorní úlohy nejprve seznámí s teorií týkající se impedanční trubice a metodami pro měření koeficientu pohltivosti, průzvučnosti a neprůzvučnosti. Potom sestaví impedanční trubici pro požadované měření.

### 10.1 Aplikace na měření koeficientu pohltivosti

Studenti sestaví impedanční trubici pro měření koeficientu pohltivosti a zapojí měřící zařízení podle návodu. Pro samotné měření budou studenti používat aplikaci "ImpTube Pohltivost 1m.mlapp".

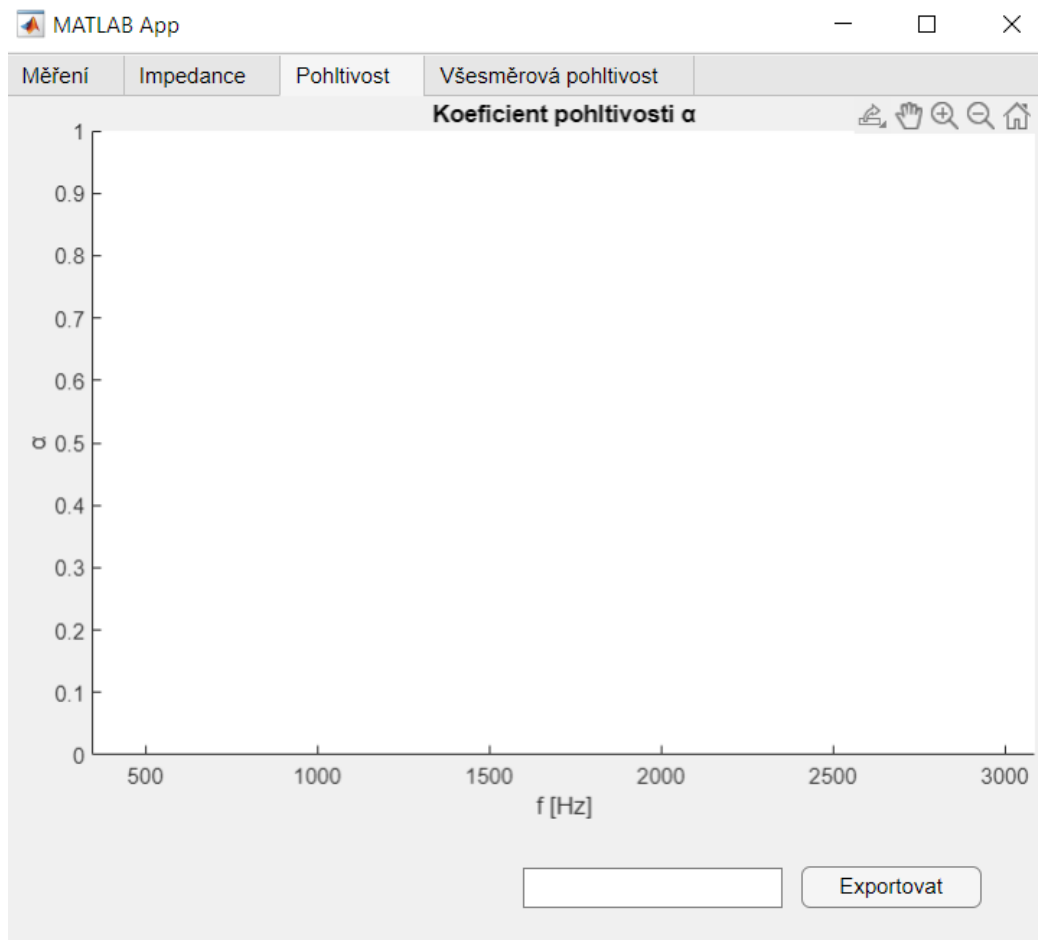
Po otevření souboru "ImpTube Pohltivost 1m.mlapp" se studentům zobrazí aplikace s otevřeným prvním listem s názvem Měření. Zde studenti postupují podle návodu v textovém poli na pravé straně aplikace.



Obr. 10.1: Záložka měření aplikace ImpTube Pohltivost 1m

Po zadání citlivosti měřícího mikrofonu, nastavení měřeného vzorku a jeho postupném změření se stisknutím tlačítka "vypočítat" zobrazí v dalších listech aplikace průběhy normované akustické impedance, koeficientu pohltivosti a koeficient pohltivosti přepočítaný pro všesměrový dopad.

Tyto průběhy si mohou studenti pojmenovat a tlačítkem exportovat si je uložit jako soubor PNG a MATLAB figure.

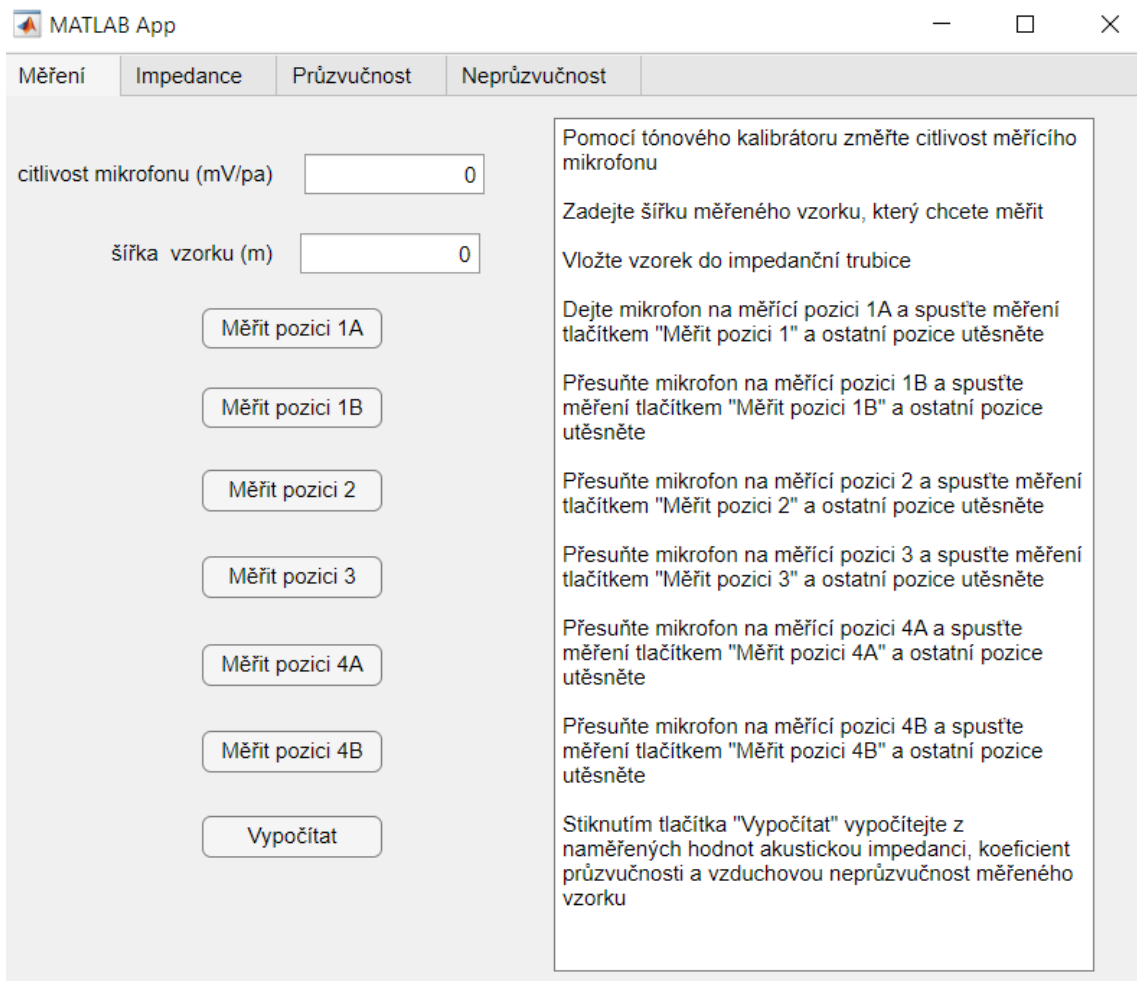


Obr. 10.2: Záložka pohltivost aplikace ImpTube Pohltivost 1m

## 10.2 Aplikace na měření vzduchové neprůzvučnosti

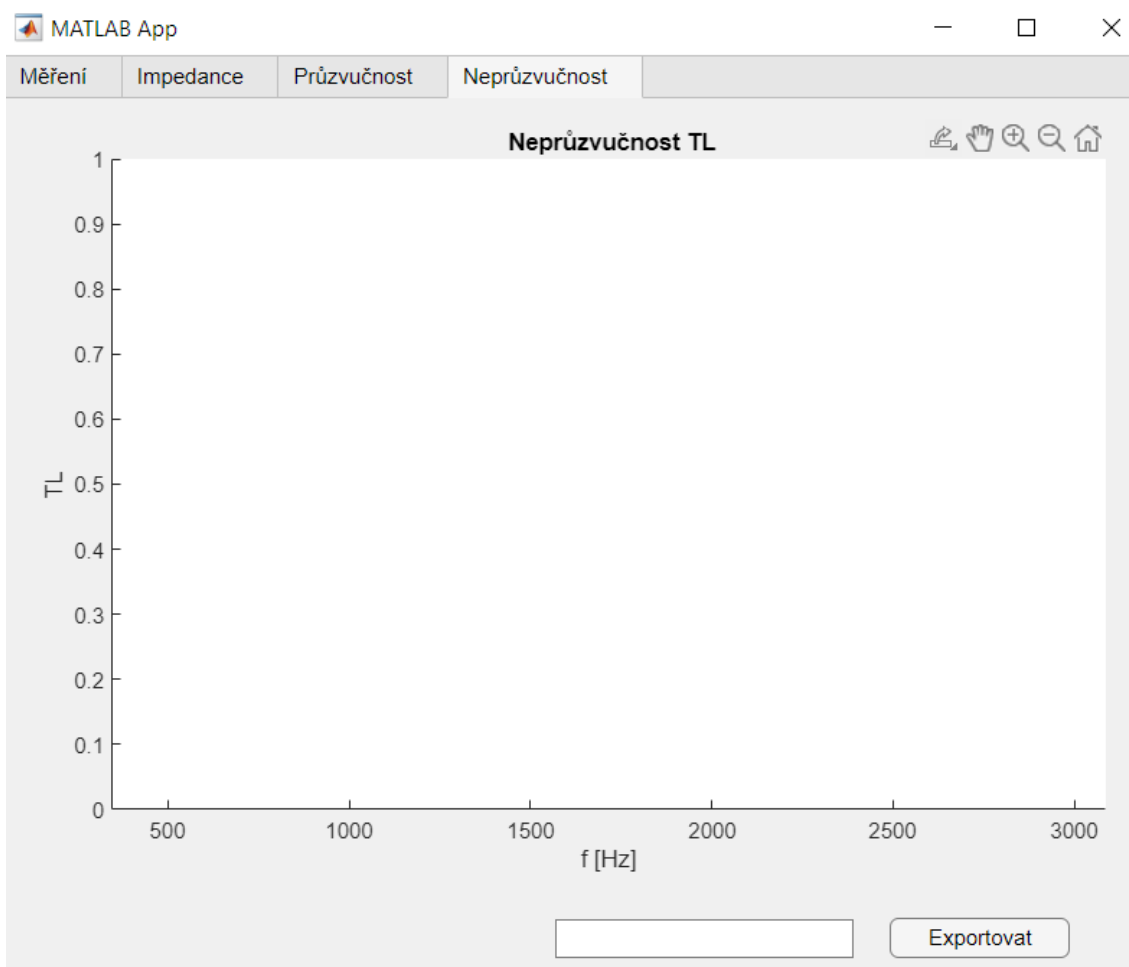
Studenti sestaví impedanční trubici pro měření neprůzvučnosti. Měření vzduchové neprůzvučnosti je realizováno aplikací ImpTube pruzvucnost 1m. Rozložení této aplikace je obdobné jako u té pro měření koeficientu pohltivosti. V levém horním rohu však musí studenti zadat kromě citlivosti mikrofону také šířku měřeného vzorku, narozdíl od měření pohltivosti výpočet vzduchové průzvučnosti počítá s šířkou měřených vzorků.





Obr. 10.3: Záložka měření aplikace ImpTube Pruzvucnost 1m

Výsledky lze obdobně i zde exportovat jako soubory PNG a MATLAB figure.



Obr. 10.4: Záložka neprůzvučnost aplikace ImpTube Průzvučnost 1m

# Závěr

V této práci byla nastudována metoda přenosové funkce pro měření koeficientu pohltivosti různých materiálů pomocí impedanční trubice.

Toto měření bylo realizováno na impedanční trubici dostupné na ústavu telekomunikací VUT pro vzorky materiálů melamin a cello F800. Měření bylo provedeno pomocí funkce v prostředí Matlab a měřicí stanicí APx525. Výsledky tohoto měření však byly zatíženy pohltivostí samotné impedanční trubice, jejíž kmitočtová charakteristika byla značně nevyrovnaná. Příčina této nevyrovnanosti jsou pravděpodobně nežádoucí rezonance vzniklé v impedanční trubici a únik zvuku z trubice. Důvodem je pravděpodobně nedostatečná tuhost a hmotnost použitého materiálu těla impedanční trubice.

Dále byly pomocí akcelerometrů změřeny vibrace uvnitř a vně impedanční trubice za účelem ověření rezonancí v impedanční trubici. Naměřené výsledky ukázaly nevyrovnanou kmitočtovou charakteristiku. Zejména měření vibrací uvnitř impedanční trubice ukázalo výrazná lokální maxima na určitých kmitočtech.

Za účelem eliminace výše uvedených nedostatků použité impedanční trubice byly navrženy její úpravy, týkající se hlavně použitého materiálu, jehož tuhost nebyla dostatečná.

Dále byl vytvořen návrh impedanční trubice nejen pro měření koeficientu pohltivosti, ale také koeficientu pruživosti, přidáním další části trubice s dvojicí měřících mikrofonů za měřený vzorek.

Byly změřeny koeficienty pohltivosti vzorků různých materiálů na impedanční trubici určené pro laboratorní úlohu dostupné na ÚTKO FEKT a byly porovnány s hodnotami naměřenými na profesionální impedanční trubici Brüel & Kjær 4206 dostupné v laboratoři CEITEC VUT. Výsledky nebyly totožné, ale principiálně odpovídaly očekávaným hodnotám. Měření koeficientu pohltivosti impedanční trubici lze tedy považovat za úspěšné a průkazné.

Na impedanční trubici pro laboratorní úlohu bylo rovněž provedeno měření vzduchové neprůzvučnosti. Výsledky se výrazně liší podle typu vzorku. Výsledky u vzorků cihly a betonu měly rostoucí průběh. U ostatních tuhých vzorků byla neprůzvučnost oproti očekáváním velmi vysoká s propady na určitých kmitočtech, zejména v oblasti kolem 1000 Hz nebo výše. Obecně tyto výkyvy byly výraznější než samotná neprůzvučnost měřených prvků, a tedy velmi zkreslovaly měření. U měření gumového těsnění neprůzvučnost naopak klesala na pouze do určitého lokálního minima, opět proti očekávání. Neprůzvučnost naměřená u porézních materiálů měla rostoucí průběh, byla ale výrazně zatížena hřebenovým filtrem.

Porovnání průběhů s naměřenými hodnotami na impedanční trubici Brüel & Kjær 4206 ukázalo mnohem nižší neprůzvučnost u tohoto měření. To mohlo být

zapříčiněno špatným těsněním měřených vzorku a vnitřku impedanční trubice. Toto porovnání není tedy natolik relevantní jako u měření koeficientu pohltivosti.

Tyto nekonzistentní výsledky mohou být způsobeny tím, že měřící metoda přenosové matice je primárně určena pro porézní materiály. V případech, kdy jsou první a druhá část impedanční trubice dokonale vzduchově izolované, není měření optimální a vykazuje nerealisticky vysokou neprůzvučnost. Dále může výsledky naměřené neprůzvučnosti zkreslovat kmitočtově nevyrovnané anechoické zakončení impedanční trubice, které nedostatečně pohlcuje na nízkých kmitočtech. Ve výsledcích je také patrný hřebenový filtr daný rozměry trubice.

Pro účely laboratorní úlohy zabývající se měřením koeficientu zvukové pohltivosti a vzduchové neprůzvučnosti byly v prostředí MATLAB App Designer vytvořeny dvě aplikace pro usnadnění měření, výpočet a zobrazení výsledků. Aplikace využívají výpočty použité pro předchozí měření. Prostředí aplikace umožňuje výsledné průběhy uložit a prohlédnout jako PNG nebo je zobrazit v prostředí MATLAB. K laboratorní úloze byl vytvořen návod obsahující potřebný teoretický základ měření, postup úkonů a názorné fotografie impedanční trubice.

# Literatura

- [1] ČNS ISO 10534-1, Akustika – Určování činitele zvukové pohltivosti a akustické impedance v impedančních trubicích – Část 1: Metoda poměru stojaté vlny. 1999.
- [2] ČNS ISO 10534-2, Akustika – Určování činitele zvukové pohltivosti a akustické impedance v impedančních trubicích – Část 2: Metoda přenosové funkce. 2000.
- [3] ASTM INTERNATIONAL. E2611 – 19, Standard Test Method for Normal Incidence Determination of Porous Material Acoustical Properties Based on the Transfer Matrix Method 1. 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States, 2019.
- [4] RAŠKA, Adam. IMPEDANČNÍ TRUBICE PRO MĚŘENÍ ČINITELE ZVUKOVÉ POHLTIVOSTI. Bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2022.
- [5] 07 FYA zvuk. Online. Dostupné z: [https://moodle.vut.cz/pluginfile.php/560454/mod\\_resource/content/3/07 FYA zvuk.pdf](https://moodle.vut.cz/pluginfile.php/560454/mod_resource/content/3/07_FYA_zvuk.pdf). [cit. 2023-05-03].
- [6] PĚNA Z MELAMINOVÉ PRYSKYŘICE: Technický list. ABIZOL CORPORATION, s.r.o. Rybná 716/24, Staré Město, 110 00 Praha 1 IČ: 28660871 DIČ: CZ28660871, 2021.
- [7] CELLO® F800 FR: Datový list. CELLOFOAM CZ.

## Seznam symbolů a zkratek

|          |   |
|----------|---|
| VUT      | Vysoké učení technické                                  |
| ÚTKO     | ústav telekomunikací                                    |
| PVC      | polyvinylchlorid  |
| fft      | rychlá fourierova transformace - fast fourier transform |
| $c$      | rychlost šíření zvuku                                   |
| $v$      | přímá vlna  |
| $t$      | čas   |
| $x$      | vzdálenost na ose x                                     |
| $Z$      | měrná akustická impedance                               |
| $v_R$    | odražená vlna   |
| $v_T$    | vlna prošlá prostředím                                  |
| $r$      | koeficient odrazivosti                                  |
| $t$      | koeficient propustnosti                                 |
| $R$      | odrazivost  |
| $T$      | propustnost   |
| $I$      | intenzita   |
| $\alpha$ | koeficient pohltivosti                                  |
| $A$      | pohltivost  |
| $P$      | akustický výkon   |
| $S$      | plocha  |
| $\tau$   | koeficient pruživosti                                   |
| $\rho$   | koeficient odrazivosti                                  |
| $f$      | frekvence   |
| $f_d$    | dolní mezní kmitočet                                    |

|          |   |
|----------|---|
| $f_h$    | horní mezní kmitočet  |
| $d$      | průměr impedanční trubice                                       |
| $s$      | vzdálenost mezi mikrofony                                       |
| $H$      | přenosová funkce  |
| $k_0$    | vlnové číslo  |
| $j$      | imaginární jednotka   |
| $a_{st}$ | činitel pohltivosti pro všesměrový dopad                        |
| $A$      | přímá část stojatého vlnění v první části impedanční trubice    |
| $B$      | odrazená část stojatého vlnění v první části impedanční trubice |
| $C$      | přímá část stojatého vlnění v druhé části impedanční trubice    |
| $D$      | odrazená část stojatého vlnění v druhé části impedanční trubice |
| $p_0$    | akustický tlak na přední ploše vzorku                           |
| $p_d$    | akustický tlak na zadní ploše vzorku                            |
| $u_0$    | akustická rychlost na přední ploše vzorku                       |
| $u_d$    | akustická rychlost na zadní ploše vzorku                        |
| $T$      | přenosová matice  |
| $t$      | činitel průzvučnosti  |
| $TL_n$   | vzduchová neprůzvučnost při kolmém dopadu                       |
| $z$      | normovaná impedance   |

# A Laboratorní úloha - Měření činitele zvukové pohltivosti a vzduchové neprůzvučnosti v impedanční trubici

## A.1 Cíl úlohy

Cílem úlohy je naměřit činitel zvukové pohltivosti a vzduchovou průzvučnost vzorků různých materiálů podle metody přenosové funkce a metody přenosové matice pomocí impedanční trubice.

## A.2 Zadání

1. Seznamte se s měřením činitele zvukové pohltivosti pomocí impedanční trubice metodou přenosové funkce a měřením vzduchové neprůzvučnosti metodou přenosové matice.

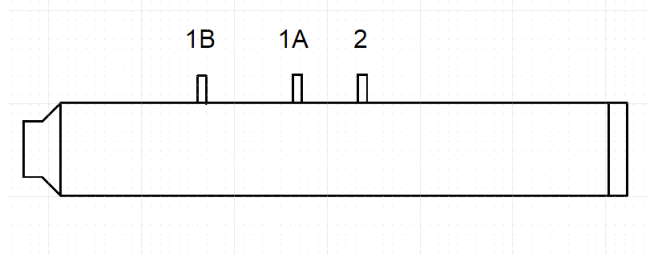
2. Změřte činitel odrazivosti, činitel pohltivosti, činitel pohltivosti pro všesměrový dopad a normovanou akustickou impedanci vzorků různých materiálů, zobrazte je a porovnejte.

3. Změřte akustickou impedanci, činitel průzvučnosti a vzduchovou neprůzvučnost vzorků různých materiálů, zobrazte je a porovnejte.

## A.3 Metoda přenosové funkce

Měření činitele pohltivosti metodou přenosové funkce spočívá v měření akustického tlaku na dvou místech v trubici pomocí dvou mikrofonů. Ze dvou mikrofonních signálů se určí komplexní akustická přenosová funkce, která se použije pro výpočet činitele zvukové pohltivosti daného materiálu při kolmém dopadu. Nejprve je ze zaznamenaného časového průběhu akustického tlaku vypočítán pomocí Fourierovy transformace komplexní akustický tlak  $p$ , který vypočítáme pro oba mikrofony. Podílem těchto komplexních akustických tlaků získáme přenosovou funkci z místa mikrofonu 1 na místo 2,  $H_{12}$ .





Obr. A.1: Impedanční trubice pro měření pomocí metody přenosové funkce

Tato metoda využívá toho, že v každém místě impedanční trubice lze akustický tlak definovat jako součet akustického tlaku vlny dopadající,  $p_I$  a vlny odražené  $p_R$ . Tyto akustické tlaky jsou definovány jako:

$$p_I = \hat{p}_I e^{jk_0 x} \quad (\text{A.1})$$

$$p_R = \hat{p}_R e^{jk_0 x} \quad (\text{A.2})$$

kde  $\hat{p}_I$  a  $\hat{p}_R$  jsou amplitudy akustických tlaků,  $k_0$  je komplexní vlnové číslo a  $x$  je vzdálenost měřeného místa od měřeného vzorku.

V místech mikrofonů se tedy jedná o tlaky  $p_1$  a  $p_2$ , [2]

$$p_1 = \hat{p}_I e^{jk_0 x_1} + \hat{p}_R e^{jk_0 x_1} \quad (\text{A.3})$$

$$p_2 = \hat{p}_I e^{jk_0 x_2} + \hat{p}_R e^{jk_0 x_2} \quad (\text{A.4})$$

Přenosová funkce pro samotnou dopadající vlnu je

$$H_I = \frac{p_{2I}}{p_{1I}} = e^{-jk_0 s} \quad (\text{A.5})$$

a přenosová funkce pro samotnou odraženou vlnu je

$$H_R = \frac{p_{2R}}{p_{1R}} = e^{jk_0 s} \quad (\text{A.6})$$

kde  $s$  je vzdálenost mikrofonů od sebe.

Za předpokladu, že  $p_R = p_I \cdot r$  můžeme vyjádřit:

$$H_{12} = \frac{p_2}{p_1} = \frac{e^{jk_0 x_2} + r e^{jk_0 x_2}}{e^{jk_0 x_1} + r e^{jk_0 x_1}} \quad (\text{A.7})$$

Vyjádřením  $r$  získáme:

$$r = \frac{H_{12} - H_I}{H_R - H_{12}} e^{2jk_0 x_1}. \quad (\text{A.8})$$

Činitel zvukové pohltivosti se potom vypočítá jako:

$$\alpha = 1 - |r|^2. \quad (\text{A.9})$$

Normovaná akustická impedance se vypočítá následovně:

$$Z/\rho c = (1 + r)/(1 - r) \quad (\text{A.10})$$

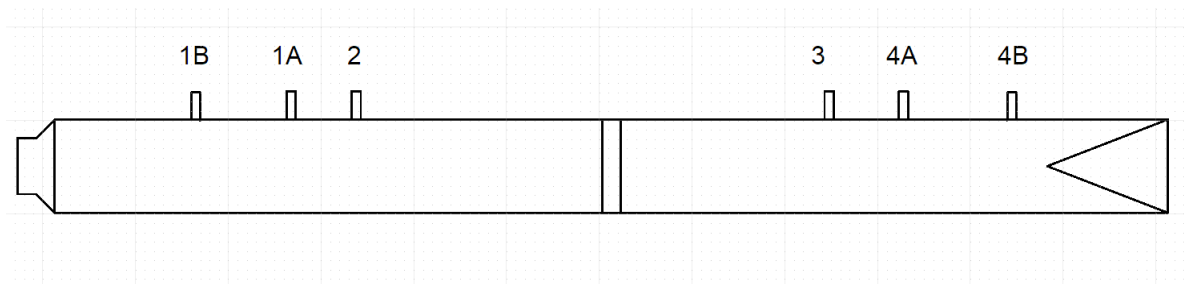
Koeficient zvukové pohltivosti  $\alpha_{st}$  pro všesměrový dopad pro pohlcující obklady, ve kterých se zvuk nešíří rovnoběžně s jeho povrchem lze vypočítat z normované impedance  $z$  :

$$\alpha_{st} = 8 * \frac{z'}{z'^2 + z''^2} \left[ 1 - \frac{z'}{z'^2 + z''^2} * \ln(1 + 2z' + z'^2 + z''^2) + \frac{z'^2 - z''^2}{z''(z'^2 + z''^2)} * \arctg \frac{z''}{1 + z'} \right] \quad (\text{A.11})$$

kde  $z'$  je reálná složka normované akustické impedance a  $z''$  je složka imaginární.

## A.4 Metoda přenosové matice

Tato metoda spočívá v tom, že v impedanční trubici jsou naměřeny průběhy akustického tlaku na čtyřech místech, dvě před měřeným vzorkem a dvě za měřeným vzorkem. Z těch jsou pomocí Fourierovy transformace získány komplexní akustické tlaky. Dále jsou vypočítány přenosové funkce mezi těmito tlaky a referenčním signálem, (může to být vstupní signál, signál z prvního mikrofону nebo zvláštní měřící mikrofón, jehož signál bude použit jako referenční).



Obr. A.2: Schéma impedanční trubice pro měření pomocí metody přenosové matice

A, B, C a D jsou přímé a odrazené části stojatého vlnění v trubici. Lze je vyjádřit jako:

$$A = j * \frac{H_{1,ref}e^{-jk_0l_1} - H_{2,ref}e^{-jk_0(l_1+s_1)}}{2\text{sink}_0s_1} \quad (\text{A.12})$$

$$B = j * \frac{H_{2,ref}e^{jk_0(l_1+s_1)} - H_{1,ref}e^{-jk_0(l_1)}}{2\text{sink}_0s_1} \quad (\text{A.13})$$

$$C = j * \frac{H_{3,ref}e^{jk_0(l_2+s_2)} - H_{4,ref}e^{jk_0(l_2)}}{2\text{sink}_0s_2} \quad (\text{A.14})$$

$$D = j * \frac{H_{4,ref}e^{-jk_0l_2} - H_{3,ref}e^{-jk_0(l_2+s_2)}}{2\text{sink}_0s_2} \quad (\text{A.15})$$

Pomocí těchto částí vlnění jsou vyjádřeny akustický tlak a akustická rychlost na přední ploše měřeného vzorku,  $p_0$ ,  $u_0$  a na zadní ploše vzorku,  $p_d$  a  $u_d$ .

$$p_0 = A + B \quad (\text{A.16})$$

$$u_0 = A - B/\rho c \quad (\text{A.17})$$

$$p_d = Ce^{-jk_0d} + De^{+jk_0d} \quad (\text{A.18})$$

$$u_d = (Ce^{-jk_0d} - De^{+jk_0d})/\rho c \quad (\text{A.19})$$

Pro geometricky symetrické měřené vzorky a pro anechoické zakončení impedanční trubice je dána přenosová matice  $T$ , pro její vzorky platí:

$$T_{11} = \frac{p_d u_d + p_0 u_0}{p_0 u_d + p_d u_0} \quad (\text{A.20})$$

$$T_{12} = \frac{p_0^2 - p_d^2}{p_0 u_d + p_d u_0} \quad (\text{A.21})$$

$$T_{21} = \frac{u_0^2 - u_d^2}{p_0 u_d + p_d u_0} \quad (\text{A.22})$$

$$T_{22} = \frac{p_d u_d + p_0 u_0}{p_0 u_d + p_d u_0} \quad (\text{A.23})$$

Z prvků této matice lze získat činitel průzvučnosti,  $t$ , vzduchovou neprůzvučnost při kolmém dopadu,  $TL_n$  a charakteristickou impedanci materiálu  $z$ .

$$t = \frac{2e^{jk_0d}}{T_{11} + (T_{12}/\rho c) + \rho c T_{21} + T_{22}} \quad (\text{A.24})$$

$$TL_n = 20 \log_{10} \left| \frac{1}{t} \right| \quad (\text{A.25})$$

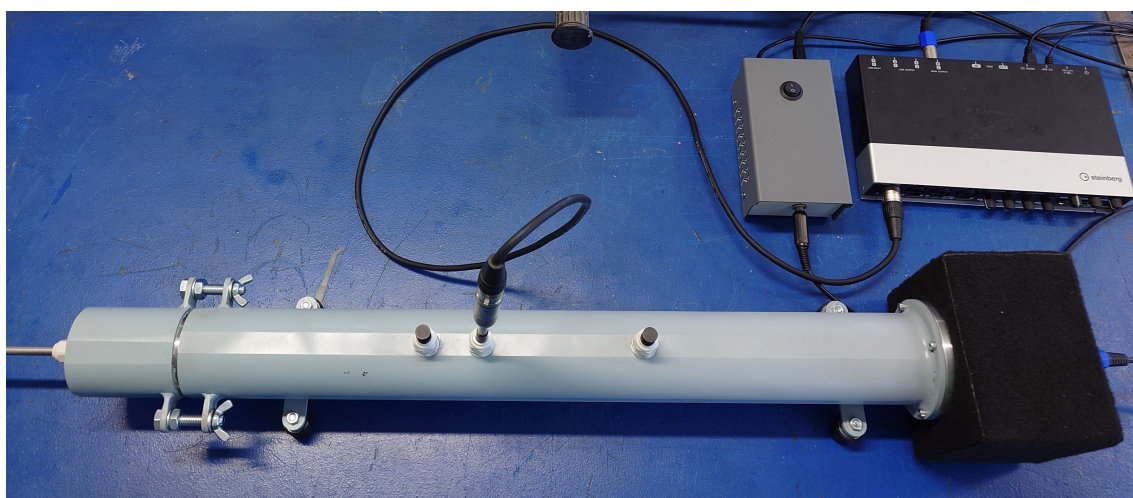
$$z = \sqrt{T_{12}/T_{21}} \quad (\text{A.26})$$

## A.5 Průběh měření

### A.5.1 Měření pohltivosti

Nejprve je potřeba zjistit citlivost měřícího mikrofону. Pomocí tónového generátoru a zvukoměru naměřte citlivost mikrofónu.

Sestavte impedanční trubici pro měření činitele pohltivosti, zapojte reproduktor impedanční trubice do zesilovače, ten připojte k levému výstupu zvukové karty. Měřící mikrofón připojte do prvního vstupu zvukové karty, zapněte zvukovou kartu a fantomové napájení.

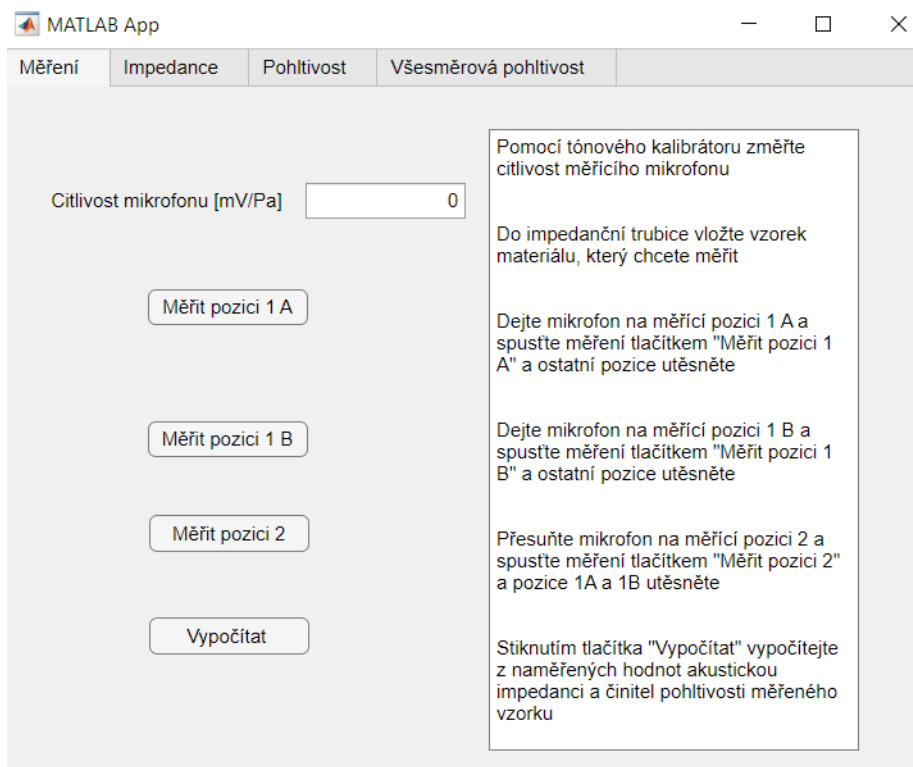


Obr. A.3: Impedanční trubice sestavená na měření pohltivosti

Otevřete aplikaci ImpTube Pohltivost 1m, a postupujte podle návodu v pravé straně aplikace.

Po stisknutí tlačítka vypočítat přepněte do karet impedance, pohltivost a všesměrová pohltivost na horní straně aplikace, prohlédněte si naměřené průběhy, pojmenujte je a uložte stisknutím tlačítka exportovat. Průběhy se uloží do stejné složky, kde je uložena aplikace jako PNG a MATLAB figure.

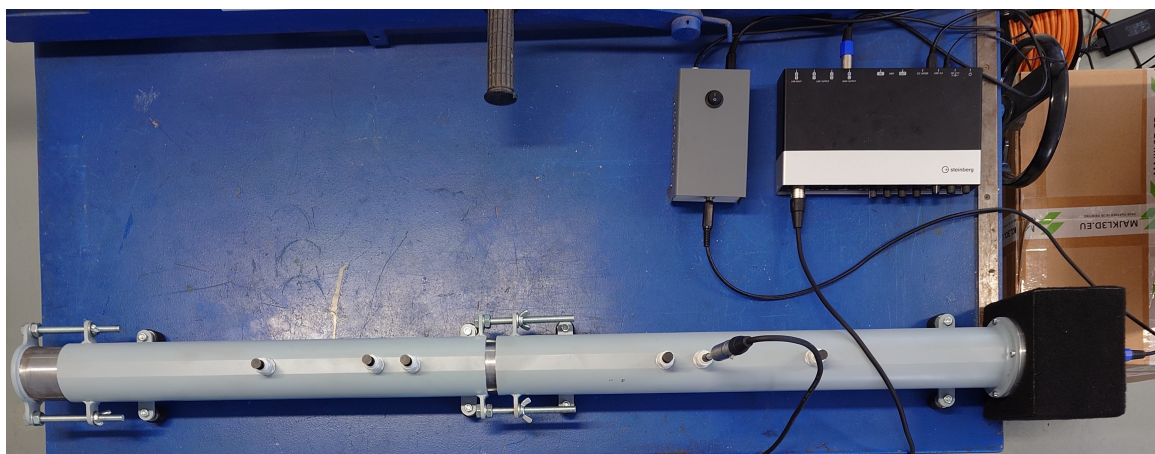
V prostředí MATLAB uložené průběhy zobrazte a porovnejte.



Obr. A.4: Záložka měření aplikace ImpTube Pohltivost 1m

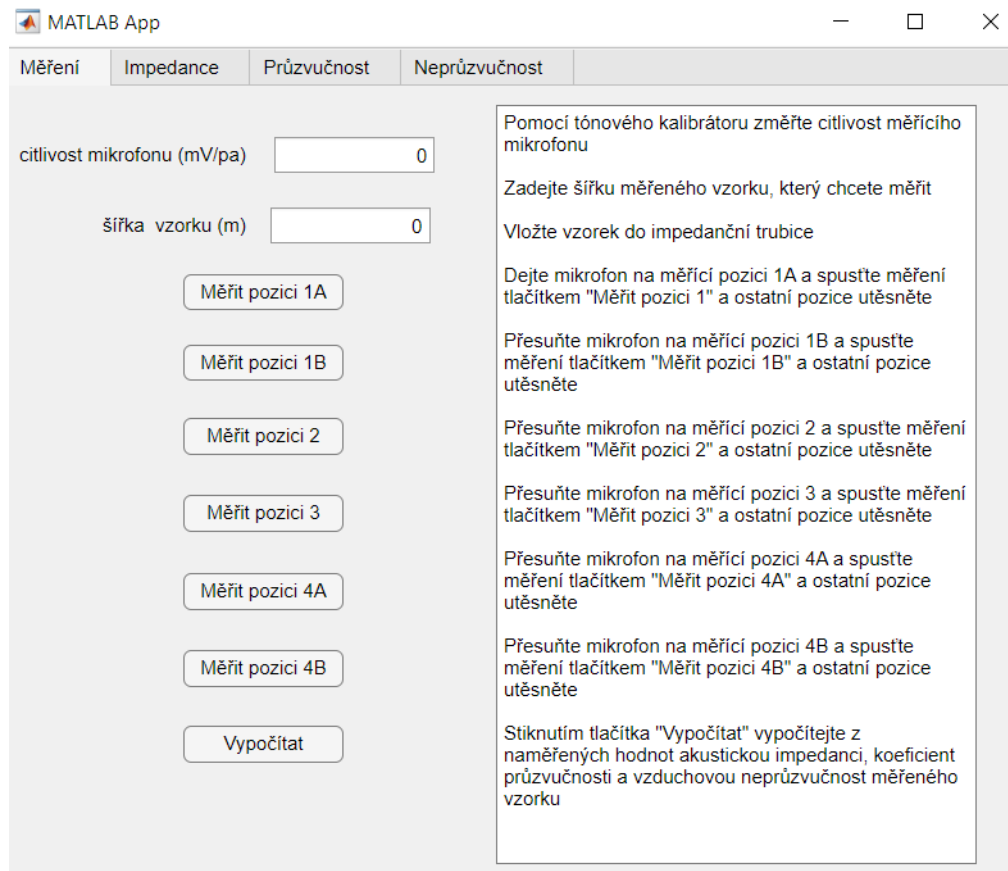
## A.5.2 Měření neprůzvučnosti

Sestavte impedanční trubici na měření vzduchové neprůzvučnosti. Měřící zařízení nechte zapojené stejně.



Obr. A.5: Impedanční trubice sestavená na měření neprůzvučnosti

Otevřete aplikaci ImpTube pruzvucnost 1m a postupujte podle návodu na pravé straně aplikace.



Obr. A.6: Záložka měření aplikace ImpTube Pruzvucnost 1m

Po stisknutí tlačítka vypočítat přepněte do karet impedance, průzvučnost a neprůzvučnost, prohlédněte si naměřené průběhy, pojmenujte je a uložte. Soubory se opět uloží do stejné složky jako aplikace jako PNG a MATLAB figure.

V prostředí MATLAB uložené průběhy zobrazte a porovnejte.