

**Technická univerzita v Liberci**

Fakulta textilní



# **DISERTAČNÍ PRÁCE**

**ZVUKOVÁ POHLTIVOST VLÁKENNÝCH MATERIÁLŮ  
S OHLEDEM NA CHARAKTERISTIKY STRUKTURY**

2005

Klára Kalinová

**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

**FAKULTA TEXTILNÍ**



**ZVUKOVÁ POHLTIVOST VLÁKENNÝCH MATERIÁLŮ  
S OHLEDEM NA CHARAKTERISTIKY STRUKTURY**

**SOUND ABSORPTION OF FIBROUS MATERIALS WITH  
RESPECT TO STRUCTURAL CHARACTERISTICS**

**KLÁRA KALINOVÁ**

**DISERTAČNÍ PRÁCE  
2005**

UNIVERZITNÍ KNIHOVNA  
TECHNICKÉ UNIVERZITY V LIBERCI



3146115288

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI  
Univerzitní knihovna  
Voroněžská 1329, Liberec 1  
PSČ 481 17

U 601 T

KNT  
832, 9 s. prac.  
8h, knihy 92.



#### ANOTACE

Tato disertační práce se zabývá vývojem a teoretickým popisem zvukově pohltivého materiálu. Práce obsahuje odvození činitele struktury porózního vláknenného materiálu, matematický model rezonanční frekvence zvukově pohltivého systému a porovnání těchto teoretických hodnot s experimentálními daty.

Konstrukce zvukově pohltivého materiálu je založena na rezonančním principu nanovláknenné membrány tlumené vláknennou vrstvou. Práce obsahuje výzkum všech parametrů obou složek, které jsou podstatné z hlediska zvukové pohltivosti.

Hlavním přínosem je získání materiálu, který oproti stávajícím akustickým systémům pohltí zvukovou energii při nízkých frekvencích a současně neztrácí schopnost pohltivosti pro vyšší zvukové frekvence.

#### ANNOTATION

This thesis deals with the development and theoretical describing of sound absorption material. It includes derivation of structure constant, mathematical model of resonant frequency and comparison these theoretical values with experimental results.

The construction of sound absorption material is based on resonant principle of nanofibrous membrane that is damped by fibrous layer. The work contains the investigation of all parameters that are important to sound absorption.

The main result is a material that absorbs the sound on the broad frequency spectrum.

## MÍSTOPŘÍSEŽNÉ PROHLÁŠENÍ

„Místopřísežně prohlašuji, že jsem disertační práci vypracovala samostatně s použitím uvedené literatury.“

V Liberci, únor 2005

Klára Kalinová



## PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych chtěla poděkovat Prof.RNDr. Oldřichu Jirsákovi, Csc. za odborné vedení a cenné připomínky, Prof.Ing. Karlu Vokurkovi, DrSc. za odbornou přípravu a všem mým kolegům, kteří mi pomáhali. Dále bych chtěla poděkovat svým rodičům a manželovi za jejich podporu.

## OBSAH

|                                                                         |                                                                                          |           |
|-------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1.</b>                                                               | <b>PŘEDMĚT A CÍL PRÁCE</b>                                                               | <b>2</b>  |
| <b>2.</b>                                                               | <b>PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU PROBLEMATIKY</b>                                             | <b>3</b>  |
| 2.1.                                                                    | AKUSTICKÉ CHARAKTERISTIKY                                                                | 3         |
| 2.2.                                                                    | MECHANIKA POHLCOVÁNÍ                                                                     | 6         |
| 2.2.1.                                                                  | Porózní materiály                                                                        | 6         |
| 2.2.2.                                                                  | Akustické prvky                                                                          | 7         |
| 2.3.                                                                    | METODY STANOVENÍ ČINITELE ZVUKOVÉ POHLTIVOSTI                                            | 10        |
| 2.3.1.                                                                  | Rovnice šíření zvuku porózním materiálem                                                 | 10        |
| 2.3.2.                                                                  | Princip jednoduchého rezonančního obvodu                                                 | 14        |
| 2.4.                                                                    | METODY MĚŘENÍ ČINITELE ZVUKOVÉ POHLTIVOSTI                                               | 16        |
| 2.4.1.                                                                  | Dvou mikrofónová impedanční trubice                                                      | 16        |
| 2.4.2.                                                                  | Dozvuková místnost                                                                       | 17        |
| 2.4.3.                                                                  | Metoda odražené vlny                                                                     | 17        |
| 2.4.4.                                                                  | Metoda měření intenzity zvuku                                                            | 18        |
| 2.5.                                                                    | CHARAKTERISTIKY ZVUKOVĚ POHLTIVÉHO VLÁKENNÉHO MATERIÁLU                                  | 20        |
| 2.5.1.                                                                  | Tloušťka                                                                                 | 20        |
| 2.5.2.                                                                  | Zaplnění                                                                                 | 20        |
| 2.5.3.                                                                  | Hustota polymeru                                                                         | 21        |
| 2.5.4.                                                                  | Průměr vláken                                                                            | 21        |
| 2.5.5.                                                                  | Anizotropie                                                                              | 22        |
| 2.6.                                                                    | AKUSTICKÝ REZONANČNÍ PRVEK                                                               | 23        |
| 2.6.1.                                                                  | Membrána                                                                                 | 23        |
| 2.6.2.                                                                  | Deska                                                                                    | 25        |
| 2.6.3.                                                                  | Perforovaný panel                                                                        | 26        |
| 2.6.4.                                                                  | Akustická tělesa                                                                         | 30        |
| 2.7.                                                                    | NANOVLÁKENNÁ STRUKTURA                                                                   | 32        |
| <b>3.</b>                                                               | <b>POUŽITÉ METODY</b>                                                                    | <b>34</b> |
| 3.1.                                                                    | DVOU-MIKROFONOVÁ IMPEDANČNÍ TRUBICE 4206                                                 | 34        |
| <b>4.</b>                                                               | <b>PŘEHLED DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ</b>                                                       | <b>35</b> |
| 4.1.                                                                    | TEORETICKÉ STANOVENÍ ČINITELE STRUKTURY VLÁKENNÉHO MATERIÁLU                             | 35        |
| 4.2.                                                                    | TEORETICKÉ STANOVENÍ VLASTNÍ FREKVENCE ZVUKOVĚ POHLTIVÉHO SYSTÉMU S REZONANČNÍ MEMBRÁNOU | 38        |
| 4.3.                                                                    | VÝVOJ ZVUKOVĚ POHLTIVÉHO MATERIÁLU                                                       | 43        |
| 4.3.1.                                                                  | Porózní materiál                                                                         | 43        |
| 4.3.2.                                                                  | Rezonanční prvek                                                                         | 50        |
| 4.3.3.                                                                  | Konstrukce zvukově pohltivého materiálu                                                  | 52        |
| 4.3.4.                                                                  | Plošné hmotnosti rezonančního prvku                                                      | 55        |
| 4.3.5.                                                                  | Rezonanční efekt nanovláknenné vrstvy                                                    | 61        |
| 4.3.6.                                                                  | Sled rezonančních prvků                                                                  | 64        |
| 4.4.                                                                    | SHRNUTÍ EXPERIMENTÁLNÍCH VÝSLEDKŮ                                                        | 66        |
| 4.5.                                                                    | STATISTICKÉ VYHODNOCENÍ                                                                  | 70        |
| <b>5.</b>                                                               | <b>ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ A NOVÝCH POZNATKŮ</b>                                             | <b>75</b> |
| <b>LITERATURA</b>                                                       |                                                                                          | <b>77</b> |
| <b>PRÁCE AUTORA SE VZTAHEM KE STUDOVANÉ PROBLEMATICE</b>                |                                                                                          | <b>81</b> |
| <b>SUMMARY</b>                                                          |                                                                                          | <b>82</b> |
| <b>PŘÍLOHY</b>                                                          |                                                                                          | <b>84</b> |
| PŘÍLOHA 1: TEORETICKÉ STANOVENÍ ČINITELE STRUKTURY VLÁKENNÉHO MATERIÁLU |                                                                                          | 84        |
| PŘÍLOHA 2: VÝVOJ ZVUKOVĚ POHLTIVÉHO MATERIÁLU                           |                                                                                          | 86        |
| PŘÍLOHA 3: STATISTICKÉ VYHODNOCENÍ                                      |                                                                                          | 91        |



# 1. PŘEDMĚT A CÍL PRÁCE

Porózní materiál pohlcuje zvuk především v oblasti vyšších frekvencí. S tloušťkou porózního materiálu se maxima činitele zvukové pohltivosti posouvají směrem k nižším frekvencím. V případě nutnosti tlumení zvuku o nižších frekvencích jsou tyto porózní obklady neúčinné a používají se akustické prvky založené na principu rezonance. Rezonátor pohlcuje akustickou energii úzkého pásu nižších frekvencí, to znamená, že od rezonančního kmitočtu směrem k nízkým i vysokým kmitočtům hodnoty činitele zvukové pohltivosti rychle klesají. Obklad v tomto případě nemá širokopásmový účinek. Problematika pohlcování zvuku o nižších frekvencích se stává hlavním směrem výzkumu v této oblasti akustiky. Proto se tato práce zabývá vývojem a teoretickým popisem materiálu založeném na rezonančním principu nanovlákněné vrstvy tlumené pohltivou vlákněnou vrstvou tak, aby co největší množství zvukové energie v širokém frekvenčním pásmu bylo pohlceno.

Vývoj zvukově pohltivého materiálu s použitým rezonančním prvkem je založen na výzkumu jednotlivých komponent materiálu (vlákněná netkaná textilie a nanovlákněná rezonanční membrána), tedy výzkumu parametrů zásadních pro velikost činitele zvukové pohltivosti.

Jedním z cílů práce je experimentálně zjistit vliv průměru a uspořádání vláken v netkané textilií na úbytek akustické energie při průchodu tímto porózním útvarem a doplnit o tyto poznatky teoretické stanovení činitele pohltivosti zvuku. Zejména činitel struktury je dosud v teoretických výpočtech předpokládán jednotkový, přestože jeho hodnota se s uspořádáním vláken mění. Tyto parametry struktury vlákněného materiálu jsou zásadní vzhledem k jeho schopnosti tlumit kmitání rezonátoru.

Další část práce je zaměřena na výzkum parametrů jednak nanovlákněné membrány a jednak celého systému, které zásadně ovlivňují nejen činitel zvukové pohltivosti, ale i rezonanční frekvenci systému. Jedná se o plošnou hmotnost nanovlákněné vrstvy, tloušťku a objemovou hmotnost celého akustického systému.

Výsledkem práce by měl být nově vyvinutý materiál, který oproti stávajícím akustickým systémům pohltí zvukovou energii při nízkých frekvencích a současně neztrácí schopnost pohltivosti pro vyšší zvukové frekvence. Nedílnou součástí je teoretické stanovení rezonanční frekvence akustického prvku.



## 2. PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU PROBLEMATIKY

V této kapitole bude prostudován jednak teoretický základ pro stanovení akustických veličin a jednak zkoumané strukturní charakteristiky vláknenných materiálů ovlivňující zvukovou pohltivost.

### 2.1. AKUSTICKÉ CHARAKTERISTIKY

Stanovení činitele zvukové pohltivosti vláknenného materiálu je velmi složité. Je třeba se jednak zvlášť zabývat šířením zvuku ve hmotě (vlákno) a v okolním prostředí (mezivláknenný vzduch) a pak také interakcí obou fází. Vztahy, které jsou potřebné pro stanovení činitele zvukové pohltivosti, jsou uvažovány v obecném tvaru za předpokladu homogenního prostředí.

Poměr akustického tlaku  $p(x,t)$  a akustické rychlosti  $v(x,t)$  nazýváme vlnovým odporem prostředí a je reálnou konstantou. Akustický tlak v rovinné vlně je tedy ve fázi s akustickou rychlostí. Pro rovinnou akustickou vlnu šířící se vzduchem se počítá se standardizovanou hodnotou vlnového odporu  $415 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$  [1 - 3].

$$\frac{p(x,t)}{v(x,t)} = \rho_0 c_0 = W_0. \quad (2.1.1)$$

Vzhledem k tomu, že hustota  $\rho_0$  a fázová rychlost  $c_0$  závisí na statickém tlaku, teplotě, vlhkosti apod., není tento poměr neměnný, je tedy možné jej stanovit pro daný případ z hustoty a fázové rychlosti.

Pro popis rovinné zvukové vlny v homogenním prostředí se používají dvě základní rovnice: pohybová a kontinuity. Zrychlení hmotného elementu proudící tekutiny je přímo úměrné tlakovému spádu. Tedy při podélném vlnění šířícím se ve směru osy X v místě souřadnice x platí [1, 4 - 6]

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x}. \quad (2.1.2)$$

Rovnice kontinuity vyjadřuje zákon zachování hmoty

$$\frac{\partial v}{\partial x} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial t}. \quad (2.1.3)$$

Změny v plynu jsou při podélném vlnění adiabatické, takže lze položit  $p\rho^{-\kappa} = \text{konst}$ , odkud plyne pro rovnici kontinuity tvar

$$\frac{\partial v}{\partial x} = -\frac{1}{\rho c^2} \frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{K} \frac{\partial p}{\partial t}, \quad (2.1.4)$$



kde  $K$  je modul objemové pružnosti a  $\kappa$  Poissonova konstanta.

Podílu tlaku a rychlosti je rovna specifická akustická impedance [1 - 3, 5, 7, 8]

$$z_o = \frac{p}{v}. \quad (2.1.5)$$

Schopnost nějakého tělesa pohlcovat zvuk charakterizuje hodnota činitele zvukové pohltivosti. Tento činitel je definován poměrem zvukové energie pohlcované určitou plochou a energie na tuto plochu dopadající. Lze jej vyjádřit také pomocí specifické impedance a vlnového odporu.

$$\alpha = 1 - \left| \frac{z_o - W_o}{z_o + W_o} \right|^2. \quad (2.1.6)$$

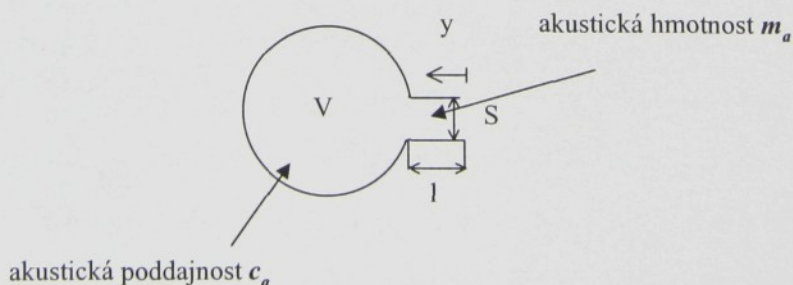
V případě přechodu zvuku ze vzduchu do zvukově pohltivého materiálu bude činitel zvukové pohltivosti maximální, tedy roven jedné, bude-li reálná část specifické impedance rovna vlnovém odporu. Naopak bude klesat, tedy blížit se nule, čím více se specifická impedance obou prostředí liší.

Podle Poiseuilleova zákona [1, 4 - 6] může být měrný odpor porózního materiálu psán následovně [9]

$$\sigma = \frac{m}{h} \frac{8\eta}{r^2}, \quad (2.1.7)$$

kde  $m$  je činitel struktury,  $h$  je poróznost,  $\eta$  značí viskozitu zvuku a  $r$  je průměrný poloměr pórů.

Prvky lineárních akustických soustav jsou odvozeny z Helmholtzova rezonátoru, který je tvořen dutinou o určitém objemu, opatřenou hrdlem, v níž je určitá hmotnost, kterou si lze představit jako píst. Vlastností objemu je poddajnost, píst představuje akustickou hmotnost. Pohybu pístu, a tedy i akustické hmotnosti je kladen určitý odpor. (obr.1) [1, 5, 7].



Obraz 1: Schematické znázornění Helmholtzova rezonátoru

Akustickou hmotnost  $m_a$  si lze představit jako tu část prostředí o hustotě  $\rho$  uvnitř trubice o průřezu  $S$ , která při šíření zvuku touto trubicí kmitá jako jeden celek, tedy jako pevné těleso o hmotnosti  $m$ .

$$m_a = \frac{m}{S^2} = \rho l S. \quad (2.1.8)$$

Akustický odpor souvisí s mechanismy ztrát, s viskozitou, s tepelnou vodivostí a molekulárními relaxačními procesy. Odpor lze zvyšovat výplní z jemných vláken. Lze jej pomocí mechanického odporu  $R_m$  vyjádřit následovně

$$R_a = \frac{R_m}{S^2}. \quad (2.1.9)$$

K překonání odporu je zapotřebí akustického tlaku, který je úměrný průtokové zvukové rychlosti. Akustický odpor je úměrný dynamické viskozitě  $\eta$ , výšce dutiny  $l$  a nepřímo úměrný čtvrté mocnině poloměru  $r$ .

$$R_a = \frac{8\eta l}{\pi r^4} = \sigma l. \quad (2.1.10)$$

Akustická poddajnost je v plynném prostředí přímo úměrná objemu  $V$  a nepřímo úměrná statickému tlaku plynu  $P_o$

$$c_a = \frac{V}{\kappa P_o} = S^2 c_m, \quad (2.1.11)$$

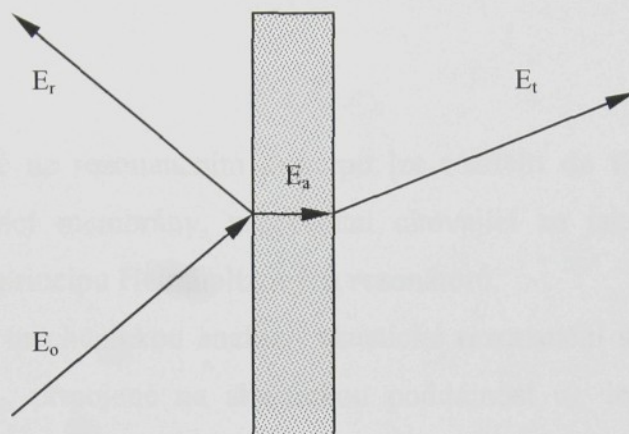
vykonává-li píst v hrdle dutiny kmitavý pohyb, mění se uvnitř dutiny tlak i teplota. Při dostatečně rychlých střídavých změnách se teplota nestačí s okolními stěnami vyrovnávat. Změny tlaku, objemu a teploty jsou tedy adiabatické.



## 2.2. MECHANIKA POHLCOVÁNÍ

### 2.2.1. Porózní materiály

Materiály a akustické prvky konstruované pro pohlcování zvuku mají nízký činitel zvukové neprůzvučnosti, nezlepšují tak zvukoizolační vlastnosti konstrukcí, ale vysokým činitelem zvukové pohltivosti přispívají ke snížení hlukové hladiny v interiéru. Energie, která dopadá na materiál je částečně odražena, částečně absorbována a zčásti projde (obr.2).



Obraz 2: Energie dopadající na materiál  $E_o$  je částečně odražena  $E_r$ , částečně absorbována  $E_a$  a zčásti projde  $E_t$

Porózní materiály jsou používány ke zmenšování amplitudy odražené zvukové vlny. Pod pojmem pohlcování zvuku rozumíme nevratnou přeměnu zvukové energie v energii jinou. Z tohoto hlediska můžeme způsob přeměny zvukové energie při šíření v pevných látkách rozdělit na tři druhy; tj. přeměny vznikající třením; přeměny vznikající poklesem akustického tlaku, tj. změnami relaxačními; přeměny vznikající nepružnou deformací těles [7].

Největší množství energie je spotřebováno třením kmitajících částíček vzduchu o stěny pórů, kde v mezivrstvě dochází ke snížení rychlostního gradientu a nevratné přeměně kinetické energie částic v tepelnou. U neadiabatických jevů, které probíhají v systémech při nízkých frekvencích, může docházet v průběhu zředování a zhušťování částic v blízkosti stěny póru k nevratnému odvedení tepelné energie. Přeměna zvukové energie, označené jako relaxační, vzniká následkem akustického tlaku. Látkou se šíří zvukové vlnění, v místech, ve kterých nastává zhuštění částic, stoupá současně celkový tlak, tj. akustický tlak nabývá kladných hodnot. Jestliže dojde ke zmenšení neboli relaxaci akustického tlaku, zmenší se nashromážděná potenciální energie a tím se zmenší i energie zvukové vlny. K přeměnám



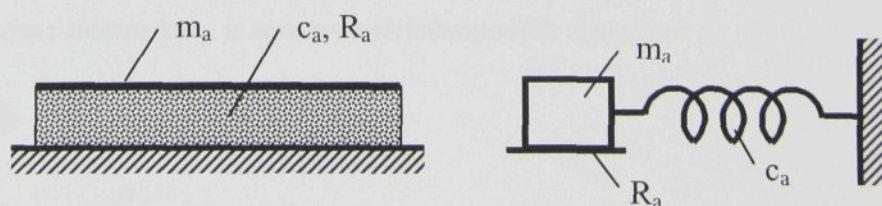
zvukové energie vlivem nepružné deformace těles dochází u látek, které vykazují tzv. pružnou hysterezi. Stlačíme-li takovou látku určitou silou, nevrátí se tato látka do původního stavu ani když síla přestane působit. Práce vynaložená na deformaci je tedy větší než práce získaná pružností tělesa zpět při návratu do původního stavu a jejich rozdíl představuje úbytek zvukové energie vlivem nedokonalé pružnosti [7].

Studie [10] uvádí, že efekt tření je mnohem větší než mechanismus odvádění tepla, který tedy může být zanedbán. V pracích [10 - 12] je uvažován efekt pohybu vláken, kde kinetická energie pohybujícího se úseku vlákna je přeměněna v tepelnou.

### 2.2.2. Akustické prvky

Materiály založené na rezonančním principu lze rozdělit do tří skupin; uspořádání chovající se jako kmitající membrány, uspořádání chovající se jako kmitající desky a uspořádání spočívající na principu Helmholtzových rezonátorů.

Práce [7] používá mechanickou analogii akustické rezonanční soustavy skládající se z akustické hmotnosti  $m_a$ , připojené na akustickou poddajnost  $c_a$ , jejíž pohyb je tlumen akustickým odporem  $R_a$ . Chování membrány (desky) lze přirovnat k chování tělesa určité hmotnosti pružně zachyceného na pružině (reprezentované vzduchovým polštářem, případně vzduchem v pórech materiálu) (obr.3). Dopadne-li na akustickou rezonanční soustavu zvukové vlnění, uvede ji do vynucených kmitů, jejichž amplituda je maximální v případě rezonance. To ovšem neznamená, že by se rezonátor stával zdrojem nové energie, neboť každý rezonátor přeměňuje jistou část energie v energii jinou. Má-li tedy rezonanční soustava sloužit k účinnému pohlcování zvuku, musí být dostatečně tlumena tak, aby co největší množství zvukové energie, nashromážděné v rezonátoru, bylo přeměněno v teplo.



Obraz 3: Mechanická analogie akustické rezonanční soustavy o akustické hmotnosti  $m_a$ , akustické poddajnosti  $c_a$  a akustickém odporu  $R_a$ .

Za předpokladu, že elementy představující hmotnost jsou dokonale tuhé a elementy představující pružnost nemají hmotnost, lze přirovnat tuto problematiku k teorii lineárních obvodů v elektrotechnice, kde cívky jsou uvažovány bez kapacity, kondenzátory bez



indukčnosti a odpory čistě ohmické [13]. Podobně jako je v elektrotechnice zaveden pojem elektrické impedance definovaný poměrem napětí a proudu, lze zavést i pro akustické soustavy obdobnou veličinu, akustickou impedanci  $Z_a$ . Je definována poměrem tlaku působícího na soustavu a objemové rychlosti, kterou soustava vlivem působení uvedené síly kmitá. Pro jednotlivé prvky platí

$$Z_a = j\omega m_a, \quad Z_a = R_a, \quad Z_a = \frac{1}{j\omega c_a}. \quad (2.2.1)$$

Za předpokladu, že soustava není tlumena ( $R_a=0$ ), je splněna rovnice [7]

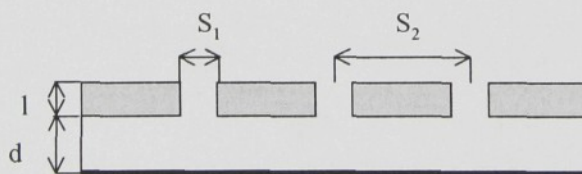
$$j\omega m_a + \frac{1}{j\omega c_a} = 0, \quad (2.2.2)$$

k rezonanci soustavy pak dochází na frekvenci

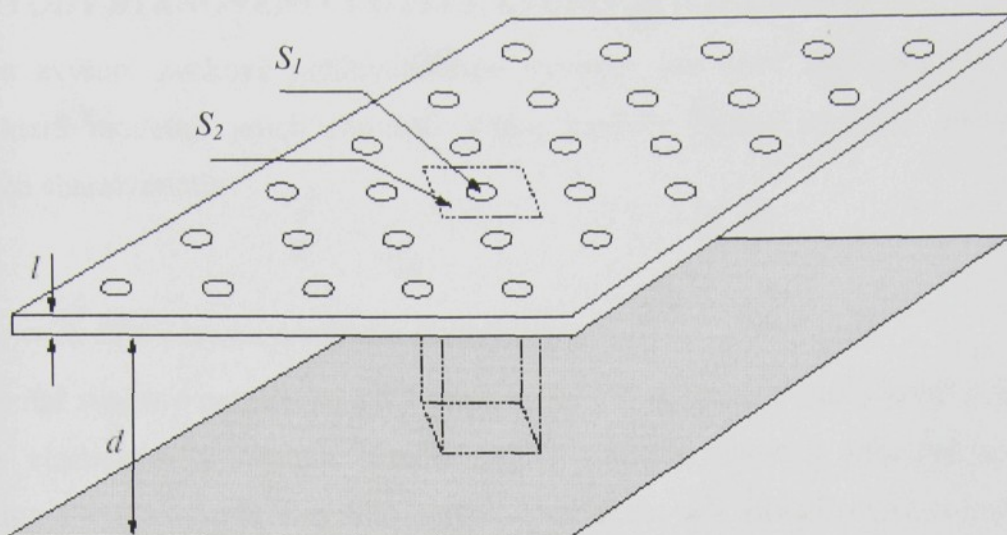
$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{m_a c_a}} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho}{m_{sq} d}}, \quad (2.2.3)$$

kde  $c$  je rychlost šíření zvuku prostředím,  $\rho$  je hustota vzduchu (porózního materiálu),  $m_{sq}$  je plošná hmotnost membrány (desky),  $d$  je tloušťka vzduchového polštáře (porózního materiálu).

Druhý typ rezonančních soustav, používaných pro pohlcování zvuku, jsou rezonátory Helholtzova typu, uspořádané buď jednotlivě, nebo sdruženě do tzv. děrovaných panelů (obr.4) [7], které jsou montovány v určité vzdálenosti od odrazivé překážky (obr.5) [14].



Obraz 4: Řez děrovaným panelem, který je sestaven z Helmholtzových rezonátorů



Obraz 5: Děrovaný panel umístěn ve vzdálenosti  $d$  od odrazivé překážky.

Frekvence děrovaného panelu je dána výrazem

$$f_r = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S_1}{S_2 l d}}, \quad (2.2.4)$$

kde  $S_1$  je plocha průřezu dutiny,  $S_2$  je plocha rezonátoru,  $l$  je tloušťka panelu a  $d$  je vzdálenost od stěny.



### 2.3. METODY STANOVENÍ Činitele zvukové pohltivosti

Pro zvýšení zvukové pohltivosti jsou vyvíjeny jak nové materiály tak analytické metody, které modelují jejich chování. V této kapitole budou zmíněny postupy určení akustických charakteristik.

#### 2.3.1. Rovnice šíření zvuku porózním materiálem

Činitel zvukové pohltivosti byl v pracích [9 - 12] odvozen z teorie šíření zvukové vlny porózním elastickým systémem. Studie [15 - 17] se zabývají teoretickým popisem mechanismu šíření zvukové vlny vlákněným materiálem, kde činitel zvukové pohltivosti je funkcí frekvence zvukové vlny, tloušťky a porózy vlákněného materiálu stejně jako fázového parametru, který představuje tření mezi vlákněnou fází a fází vzduchu.

Výpočet činitele zvukové pohltivosti vychází z rovnic popisujících šíření zvukové vlny porózním materiálem, ve kterém obě fáze reagují rozdílně na zvukovou vlnu [9, 15 - 17]. První je pohybová rovnice pro element vlákna (2.3.1a) a element vzduchu (2.3.1b)

$$-\frac{\partial p_f}{\partial x} = \rho_f \frac{\partial v_f}{\partial t} + s(v_f - v_a), \quad (2.3.1a)$$

$$-\frac{\partial p_a}{\partial x} = \rho_a \frac{\partial v_a}{\partial t} + s(v_a - v_f), \quad (2.3.1b)$$

kde všechny veličiny týkající se vláken jsou psány s indexem  $f$ , týkající se vzduchu s indexem  $a$  a  $s$  je fázový parametr, který je dán vztahem

$$s = j\omega\rho_a(m-1) + h^2\sigma, \quad (2.3.2)$$

kde  $\omega = 2\pi f$  je úhlová frekvence,  $m$  je činitel struktury,  $h$  je poróza a  $\sigma$  je měrný odpor podle vztahu (2.1.7).

Druhá je rovnice kontinuity pro vlákněnou fázi (2.3.3a) a pro fázi vzduchu (2.3.3b)

$$-\frac{\partial p_f}{\partial t} = K_f \frac{\partial v_f}{\partial x} - \frac{1-h}{h} \frac{\partial p_a}{\partial t}, \quad (2.3.3a)$$

$$-\frac{\partial p_a}{\partial t} = hK_a \frac{\partial v_a}{\partial x} + (1-h)(K_a - P_0) \frac{\partial v_f}{\partial x}, \quad (2.3.3b)$$

kde  $K_f = \rho_f \frac{\partial p_f}{\partial \rho_f}$  je modul objemové pružnosti vláknenné fáze,  $P_o$  je aerostatický tlak a

$K_a = \kappa P_o$  je modul objemové pružnosti vzduchu; pokud je děj probíhající v porózním materiálu adiabatický. Veličiny tlaku a rychlosti jsou popsány rovnicemi, kde počáteční fáze je položena rovna nule a velká písmena označují amplitudu dané veličiny. Rovnice jsou vyjádřeny pomocí vlnového čísla  $k$ , které lze napsat jako podíl  $\omega/c$ .

$$\begin{aligned} p_a(x, t) &= P_a e^{j(\omega t - kx)}, \\ p_f(x, t) &= P_f e^{j(\omega t - kx)}, \\ v_a(x, t) &= V_a e^{j(\omega t - kx)}, \\ v_f(x, t) &= V_f e^{j(\omega t - kx)}, \end{aligned} \quad (2.3.4)$$

jejich derivace jsou dosazeny do základních rovnic (2.3.1a), (2.3.1b), (2.3.3a), (2.3.3b) a je tak nalezena soustava rovnic

$$\begin{aligned} jkP_f + sV_a - (j\omega\rho_f + s)V_f &= 0, \\ jkP_a - (j\omega\rho_a + s)V_a + sV_f &= 0, \\ j\omega \frac{(1-h)}{h} P_a - j\omega P_f + jkK_f V_f &= 0, \\ -j\omega P_a + jkK_a h V_a + jk(K_a - P_o)(1-h)V_f &= 0. \end{aligned} \quad (2.3.5)$$

Pro netriviální řešení rovnice (2.3.5) musí být determinant rovnice roven nule.

$$D = \begin{vmatrix} 0 & jk & s & -(j\omega\rho_f + s) \\ jk & 0 & -(j\omega\rho_a + s) & s \\ j\omega \frac{1-h}{h} & -j\omega & 0 & jkK_f \\ -j\omega & 0 & jkK_a h & jk(K_a - P_o)(1-h) \end{vmatrix} = 0, \quad (2.3.6)$$

kořeny  $k_i$  rovnice (2.3.6) jsou dosazeny zpět do rovnic (2.3.5) a určeny potřebné akustické tlaky a akustické rychlosti. Integrační konstanty jsou nalezeny z okrajových podmínek.

Specifická akustická impedance materiálu pro kolmý dopad je podle vztahu (2.1.5) dána

$$z_o = \frac{\Sigma p_f + \Sigma p_a}{\Sigma(1-h)v_f + \Sigma h v_a}. \quad (2.3.7)$$

Pokud je označeno  $z_o(R)$  a  $z_o(I)$  jako reálná a imaginární částka  $z_o$ , pak je činitel zvukové pohltivosti podle vztahu (2.1.6) vypočítán následovně

$$\alpha = 1 - \frac{4z_o(R) W_0}{[z_o(R) + W_0]^2 + z_o^2(I)}. \quad (2.3.8)$$



### *Zhodnocení metody:*

Konečný vztah činitele zvukové pohltivosti je pouze funkcí proměnných: frekvence vlnění, tloušťky vláknenného materiálu, objemového podílu vláken ve VV, hustoty polymeru, měrné tuhosti konstrukce a parametru dotyku vláknenné fáze s fází vzduchu. Fázový parametr obsahuje činitel struktury  $m$ , který však není matematicky vyjádřen stejně tak i modul objemové pružnosti vláknenné fáze je obtížně stanovitelný.

Podobně byl v práci [7] navržen jednodušší postup stanovení činitele zvukové pohltivosti. Autoři vycházejí pouze z jedné pohybové rovnice a jedné rovnice kontinuity. Činitel struktury není ve výpočtu vyjádřen.

### *Metoda konečných prvků*

Stanovení konečných prvků je také odvozeno z parciálních diferenciálních rovnic. Neznámými veličinami pro porózní systémy jsou akustický tlak a rychlostní potenciál částic vzduchu. Metodu konečných prvků je vhodné použít za předpokladu, že nestejnoměrnosti v uspořádání vláknenného systému jsou menší než vlnová délka zvukové vlny uvnitř materiálu.

V tomto matematickém modelu [18, 19] je zapotřebí stanovit specifické parametry, které popisují makroskopické vlastnosti zvukově pohltivého systému. Tento model, použitý pro šíření zvukové vlny porózním materiálem, je založen na specifickém objemovém posunutí. Jelikož je poróznost menší než jedna, pak celkové objemové posunutí je menší než posunutí částic vzduchu v pórech. To můžeme pozorovat jako nárůst hustoty vzduchu v materiálu.

Efekt viskozity zahrnuje strukturní faktor. Představa strukturního faktoru je založena na jevu viskózního toku, který počítá při nižších frekvencích s nárůstem hustoty vzduchu v pórech a s nepřístupnými póry. Nehledě na tyto dva efekty je extrémně obtížné odhadnout tuto hodnotu z materiálových charakteristik nebo z měření vzorků. Pro vyšší frekvence a materiály o vyšší poróznosti je strukturní faktor brán raději jako 1.

Vzduch šířící se porózním materiálem je ovlivněn pevnými částmi materiálu v důsledku viskózního tření na rozhraní pevné látky a plynu. Tento efekt, který je základním mechanismem absorpce zvukové energie v materiálu, je označen jako specifický odpor proti viskóznímu toku, udává sílu závislou na relativní rychlosti objemového posunutí vzduchu v pórech. Díky tření uvnitř flexibilního materiálu bude docházet k jeho pohybu. Amplituda tohoto pohybu bude záviset na třecí síle a dynamických vlastnostech materiálu. To znamená, že část energie obsažená v akustické vlně bude třením přeměněna v teplo a část bude



akumulována jako deformační energie v porózním materiálu, která může být také přeměněna v teplo, pokud má materiál vnitřní strukturní tlumení.

Pro tento model je nutné sestavit rovnice kontinuity a rovnice síly popisující šíření zvuku porózním materiálem. Vliv porózního materiálu na pohyb vzduchu mezi póry se jeví jako zvláštní síla, která je resistantní pohybu vyvolaném gradientem tlaku – je to veličina komplexní a frekvenčně závislá. Vzhledem k tomuto faktu je jasné, že pohyb částic vzduchu mezi póry se bude měnit s vlastnostmi porózního materiálu. Je tedy jasné, že pro daný gradient tlaku a konstantní odpor proti proudění bude posunutí částic větší pro lehčí materiál než pro ten těžší. Stejně jako materiál s větším odporem proti proudění bude mít menší posunutí částic vzduchu mezi póry než ten s menším odporem.

První krok vedoucí k řešení problému šíření vlny v porózním materiálu je popsán hlavními rovnicemi v redukované formě. Jsou různé cesty jak toho dosáhnout, ale zde bude zmíněna speciální forma, která je jednoznačně výhodná v symetricky rovnovážném systému. Tuto formulaci popsali Sandberg a Goransson [20] pro netlumený systém, tj. v případě tuhého porózního materiálu.

V prvním kroku je zaveden rychlostní potenciál pro vektor posunutí částic vzduchu. Použitím rovnic síly a kontinuity lze nalézt slabou formulaci. K řešení akustického problému s příslušnými okrajovými podmínkami je nezbytné použít rychlostní potenciál a posunutí v příslušném uzlu struktury. V metodě konečných prvků je neznámá funkce hledána pomocí řady známých, většinou celkem jednoduchých funkcí, tj. polynomy různých stupňů.

Řešení rovnic ve slabé nebo integrální formě získáme výběrem testovacích funkcí. Vhodný je výběr testovacích funkcí ze stejné řady funkcí jako je vlastní řešení. Neznámé akustické a strukturní veličiny jsou komplexní, protože s porózním absorbentem souvisí vlastnosti tlumení. Submatice, které dostaneme z integrálů slabého řešení, spolu se strukturními rovnicemi, obsahujícími matici strukturních tuhostí, matici strukturních hmotností a vektor zatížení působící na strukturu, vedou ke konečnému systému tlumené soustavy rovnic systému.

#### *Zhodnocení metody:*

Vzhledem k předpokladům ohledně pohybu pevné části materiálu, který je vyvolaný pohybem vzduchu v pórech, nepočítá model použitý v této práci se studiem efektů mechanického buzení působícího na vlákna. Vliv strukturních posunutí je pouze nepřímý; tj. vibrující konstrukce způsobí tlakové výkyvy a odpovídající posunutí částic. Faktor úměrnosti je frekvenčně závislý. Je nutno poznamenat, že výsledná rovnice je popsána pro



speciální případ flexibilního porózního materiálu. Algoritmizace Metody konečných prvků je velmi složitá. Je nutné realizovat funkce pro sestavení lokálních matic prvků a zápis lokálních matic do globální matice. Nutností je také generátor sítě konečných prvků. Metoda konečných prvků však dobře postihuje materiálové vlastnosti. Pro řešení a vizualizaci výsledků je nutné použít software (např. GMSH, ANSYS, atd).

Popisem šíření zvuku porózním materiálem se také zabývají studie [21 - 24], samotná metoda konečných prvků je popsána např. v pracích [25 - 28].

### 2.3.2. Princip jednoduchého rezonančního obvodu

Pro návrh akustických obkladů k pohlcování zvuku, založených na principu jednoduchého rezonančního obvodu, lze vyjít z předpokladu kolmého dopadu zvuku, z malých rozměrů vzhledem k polovině délky vlny u rezonanční frekvence a ze zanedbání posunu rezonančního kmitočtu vlivem tlumení rezonátoru. Činitel zvukové pohltivosti je dán vztahem [7]

$$\alpha = \frac{\frac{4r}{W_0}}{\left(\frac{r + W_0}{W_0}\right)^2 + \left(\frac{x}{W_0}\right)^2} \quad (2.3.19)$$

kde  $r$  a  $x$  představují reálnou a imaginární část měrné akustické impedance, které jsou s akustickými veličinami (viz. kap. 2.1) vázány vztahy

$$r = R_a S, \quad x = X_a S, \quad \text{podobně } M = m_a S, \quad C = \frac{c_a}{S}. \quad (2.3.20)$$

Reálná složka specifické akustické impedance [3] je dána odporem vznikajícím v porózním materiálu, kdežto imaginární složka je způsobena vzájemným působením hmotové reaktance (rezonančního prvku) a poddajnostní reaktancí (poddajností vzduchu ve vzduchovém polštáři mezi rezonančním prvkem a stěnou místnosti). Obě reaktance jsou závislé na frekvenci dopadajících zvukových vln. Zvláštní případ nastane, když se hmotová a poddajnostní reaktance sobě rovnají. Frekvence, při které tento případ nastane, se nazývá rezonanční frekvencí. Ve vztahu (2.3.19) se to projeví tím, že vymizí imaginární složka  $x$ , což vede k poznatku, že jedině v tomto případě může činitel zvukové pohltivosti dosáhnout svého maxima. O velikosti maxima rozhoduje velikost reálné složky  $r$ .

Z rovnice

$$jx = j\omega M + \frac{1}{j\omega C} \quad (2.3.21)$$

lze vyjádřit  $x$  a po dosazení vztahu (2.2.3.) a (2.3.20) lze získat výraz

$$x = \sqrt{\frac{M}{C}} \left( \frac{f}{f_r} - \frac{f_r}{f} \right). \quad (2.3.22)$$

Výsledný činitel pohltivosti je tedy možné upravit do tvaru

$$\alpha = \frac{4A}{(1+A)^2 + B^2 G^2}, \quad (2.3.23)$$

kde  $A = \frac{r}{W_0}$  je činitel tlumení rezonančního obvodu vzhledem k vlnovému odporu vzduchu,

$B = \frac{1}{W_0} \sqrt{\frac{M}{C}}$  je činitel jakosti rezonančního obvodu a

$G = \left( \frac{f}{f_r} \right) - \left( \frac{f_r}{f} \right)$  je činitel závislý na kmitočtu.

*Zhodnocení metody:*

Ve výpočtu činitele zvukové pohltivosti je zanedbán vliv tlumení rezonátoru na jeho rezonanční frekvenci, která je ve výpočtu významnou veličinou. Akustickou poddajnost systému je složité stanovit.

Činitel zvukové pohltivosti je výše uvedenými metodami stanoven za předpokladu působení podélné rovinné vlny, která dopadá kolmo na čelo vzorku. Činitel zvukové pohltivosti je závislý nejen na frekvenci ale i úhlu dopadající vlny. Zvukové pole si lze představit jako soubor rovinných zvukových vln, šířících se v různých směrech. Dopadá-li na pohltivý materiál zvukové vlnění ze všech směrů rovnoměrně, pak je činitel zvukové pohltivosti definován jako všesměrový. Známe-li závislost činitele zvukové pohltivosti na úhlu dopadu  $\varphi$  zvukové vlny, je všesměrový činitel zvukové pohltivosti dán vztahem [7]

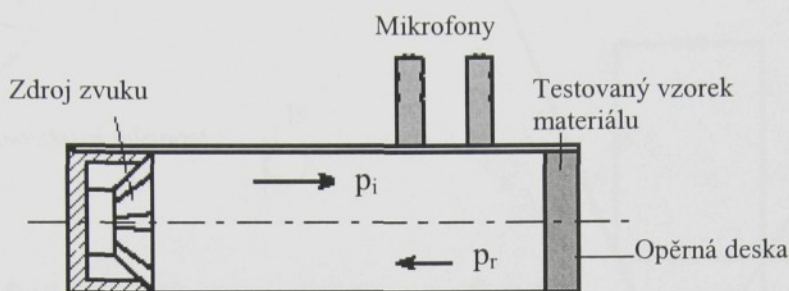
$$\alpha = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \alpha(\varphi) \sin 2\varphi d\varphi. \quad (2.3.24)$$



## 2.4. METODY MĚŘENÍ Činitele zvukové pohltivosti

### 2.4.1. Dvou mikrofonová impedanční trubice

Dvou mikrofonová impedanční trubice se používá pro měření akustických charakteristik malých testovacích vzorků. Tato metoda měření činitele zvukové pohltivosti [29 - 33] obsahuje rozklad širokopásmového stacionárního náhodného signálu do jeho dopadající a odražené složky (obr. 6).



Obraz 6: Průřez Dvoumikrofonové impedanční trubice, kde  $p_i$  je dopadající složka akustického tlaku a  $p_r$  odražená složka akustického tlaku.

Signál vytvářený zvukovým zdrojem dopadá na vzorek materiálu, který je umístěný na opačném konci trubice. Mikrofony na stěně trubice snímají složky dopadajícího  $P_i$  a odraženého  $P_r$  akustického tlaku, pomocí nichž jsou vypočítány tři frekvenční přenosové funkce:  $H_l$  - frekvenční přenosová funkce,  $H_i$  - frekvenční přenosová funkce související s dopadající složkou,  $H_r$  - frekvenční přenosová funkce související s odraženou složkou. Z těchto získaných hodnot lze určit celkový činitel zvukové odrazivosti  $R$  pomocí vztahu

$$R = \left( \frac{H_l - H_i}{H_r - H_l} \right) e^{j2k(l+s)}, \quad (2.4.1)$$

kde vlnové číslo  $k = \frac{\omega}{c}$ ,  $l$  značí vzdálenost mezi prvním mikrofonem a zkoušeným vzorkem a  $s$  je vzdálenost mezi dvěma mikrofony. Výsledný činitel zvukové pohltivosti lze zjistit následovně

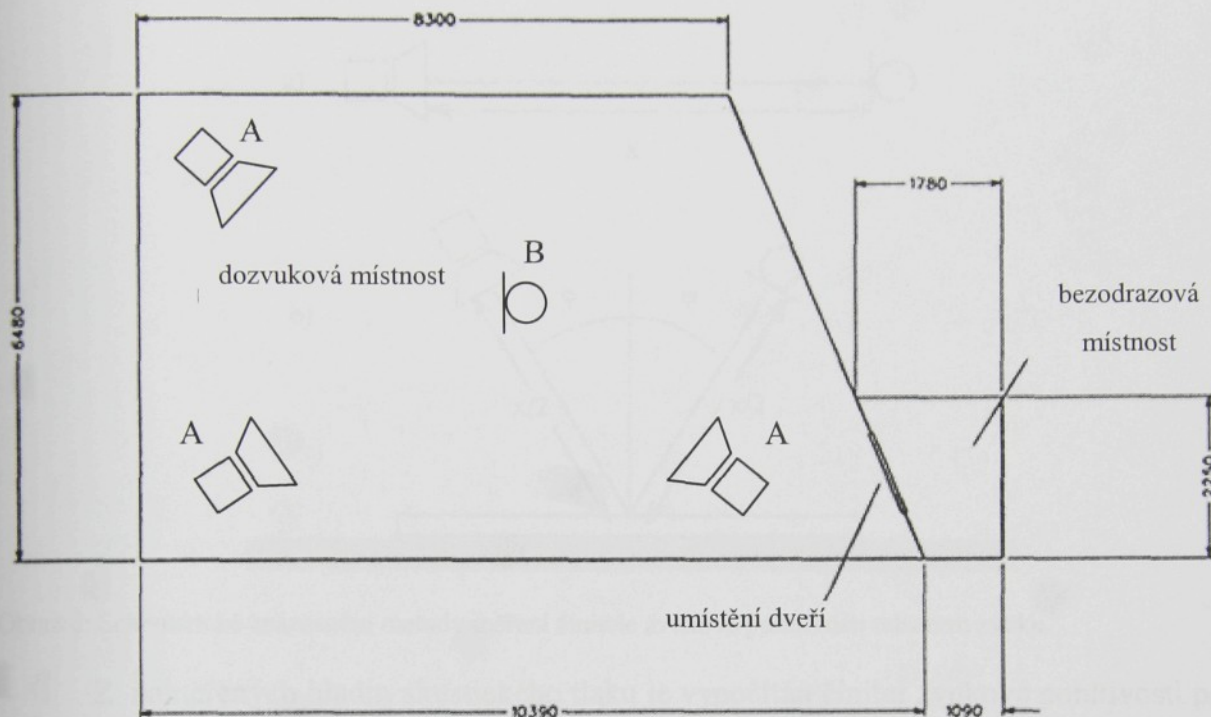
$$\alpha = 1 - |R|^2. \quad (2.4.2)$$

Tato metoda je v souladu s normami [34, 35] a je použita v experimentální části práce pro měření činitele zvukové pohltivosti vlákenných materiálů (kap.3.1).

Výhodou metody je užití vzorků malých rozměrů. Nevýhodou je měření zvukové pohltivosti pouze pro kolmý dopad zvuku.

### 2.4.2. Dozvuková místnost

Metoda měření činitele zvukové pohltivosti v dozvukové místnosti zajišťuje všesměrový dopad zvukového vlnění. (obr.7) [3, 36 - 40].



Obraz 7: Schematický náčrt dozvukové místnosti s reproduktory A a mikrofonem B.

Měření spočívá v měření doby dozvuku prázdné dozvukové místnosti  $T_1$  o objemu  $V$  a v měření doby dozvuku s vloženým měřeným vzorkem  $T_2$  o ploše  $S$ . Z naměřených dob dozvuku je vypočítán činitel zvukové pohltivosti podle následujícího vztahu [41]

$$\alpha = \frac{0,16V}{S} \left( \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \quad (2.4.3)$$

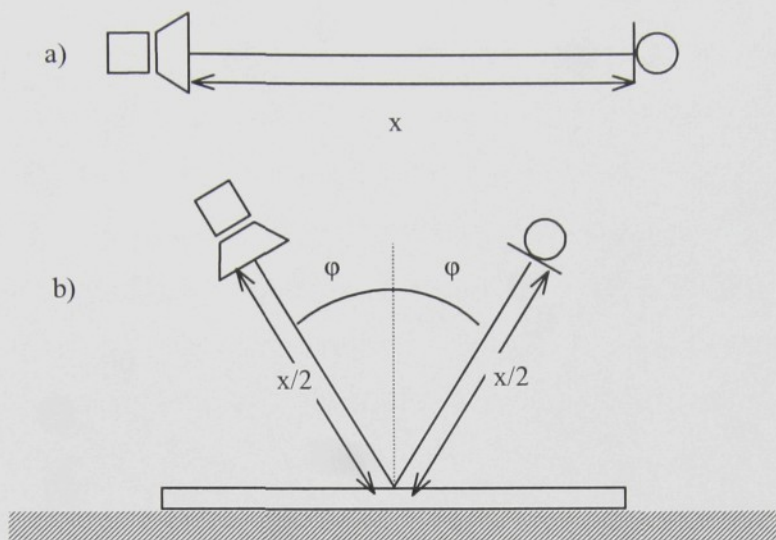
Výhodou této metody je všesměrový dopad zvuku, který odpovídá skutečným podmínkám. Nevýhodou je nezbytnost velké místnosti s nerovnoběžnými stěnami, které by měli být absolutně odrazivé s nulovou pohltivostí. Další nevýhodou je nutnost vzorků velkých rozměrů.

### 2.4.3. Metoda odražené vlny

Metoda odražené zvukové vlny umožňuje určení činitele zvukové pohltivosti pro různé úhly dopadu zvukové energie  $\varphi$  [41]. Krátký signál je nejdříve z reproduktoru vyslán přímo do mikrofonu vzdáleného  $x$  a je změřena hladina akustického tlaku  $L_{p,d}$  (obr. 8a), poté



jsou mikrofon a reproduktor nastaveny tak, aby směřovaly na zkušební vzorek pod stejným požadovaným úhlem, a délka dopadající a odražené složky zvuku byla shodná se vzdáleností mikrofonu a reproduktoru v případě a). Opět je změřena hladina akustického tlaku  $L_{p,r}$  (obr. 8b).



Obraz 8: Schematické znázornění metody měření činitele zvukové pohltivosti odrazem zvuku.

Z naměřených hladin akustického tlaku je vypočítán činitel zvukové pohltivosti podle vztahu

$$\alpha_{\varphi,f} = 1 - 10^{-\frac{(L_{p,d} - L_{p,r})}{10}} \quad (2.4.4)$$

Výhodou této metody je všesměrový dopad zvuku, který odpovídá skutečným podmínkám a potřeba vzorků malých rozměrů. Nevýhodou je nutnost použití směrového reproduktoru a mikrofonu pro zamezení snímání přímého neodraženého zvuku. Další nevýhodou je potřeba dokonale odrazivé podložky s nulovou zvukovou pohltivostí. S tloušťkou zkušebního materiálu se mění geometrie sestavy.

#### 2.4.4. Metoda měření intenzity zvuku

Při stanovení činitele zvukové pohltivosti pro všesměrový dopad zvukových vln lze použít metodu měření intenzity zvuku [42]. Vzorek materiálu je umístěn v dozvukové komoře spolu se širokopásmovým zdrojem hluku. Vzorek se nachází v poli odražených vln a činitel zvukové pohltivosti je dán vztahem

$$\alpha = \frac{4}{1 + 10^{0,1(L_p - L_I)}} \quad (2.4.5)$$

kde  $L_p$  je průměrná hladina akustického tlaku,

$L_i$  je průměrná hladina intenzity zvuku.

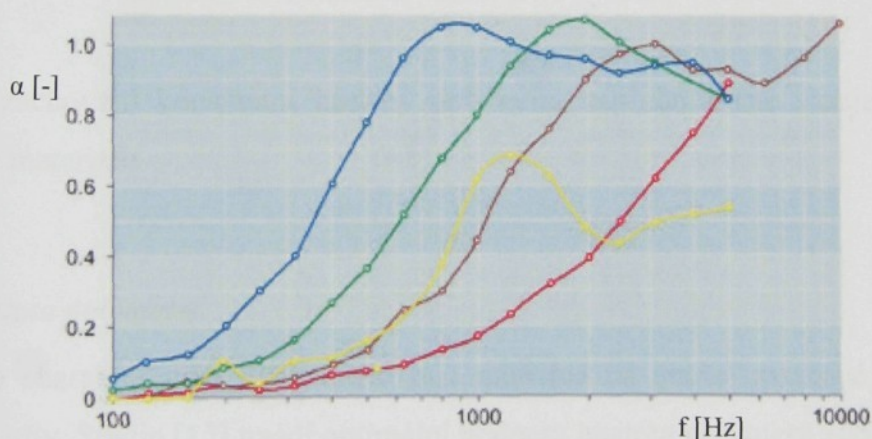
Výhodou této metody je všesměrový dopad zvuku, který odpovídá skutečným podmínkám. Nevýhodou je nepřesné měření intenzity zvuku.



## 2.5. CHARAKTERISTIKY ZVUKOVĚ POHLTIVÉHO VLÁKENNÉHO MATERIÁLU

### 2.5.1. Tloušťka

Typický kmitočtový průběh činitele zvukové pohltivosti pro různé tloušťky materiálu umístěného na pevné stěně je uveden v studiích [43 - 45]. Platí, že čím má materiál větší tloušťku, tím je činitel zvukové pohltivosti vyšší v oblasti nižších frekvencí. Akustická rychlost je u zadní stěny, kde vzniká při odrazu zvuku její uzel, rovna nule. S rostoucí vzdáleností od stěny akustická rychlost stoupá a v kmitně vzdálené o čtvrtinu vlnové délky od pevné stěny dosáhne maximální hodnoty. Z tloušťkou porózního materiálu se zvýší jeho poddajnost. Obdobného účinku lze dosáhnout, vytvoří-li se mezi porózní vrstvou a pevnou stěnou vzduchová mezera. Popsaný účinek vzduchového polštáře se projevuje tehdy, je-li porózní vrstva upevněna v určité vzdálenosti od stěny tak, aby sama nemohla kmitat. Na obraze 9 [převzato z 45] jsou porovnávány materiály o tloušťce 6, 10, 15 a 25mm. Absorpční maxima se s rostoucí tloušťkou posunují směrem k nižším frekvencím.



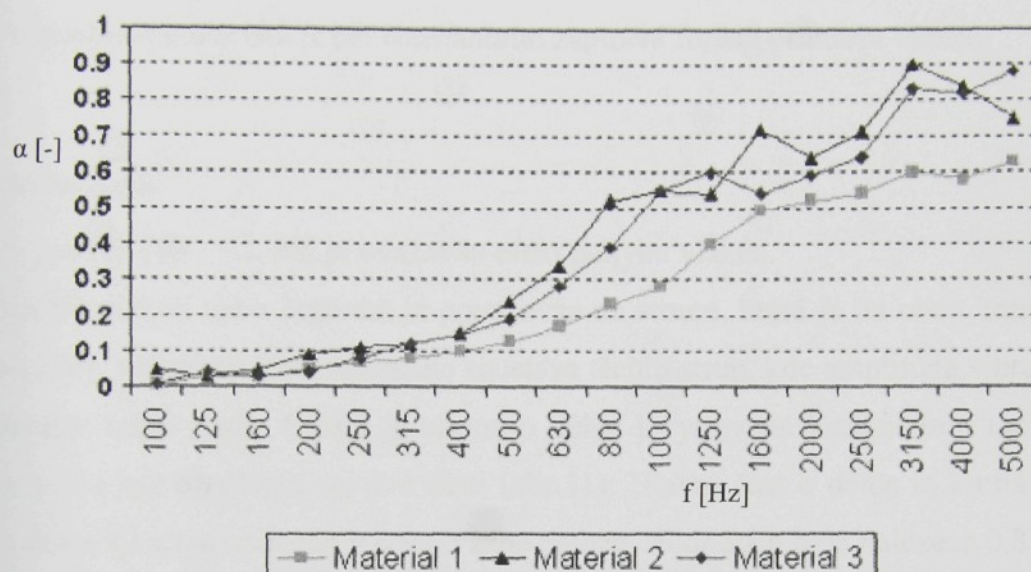
Obraz 9: Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci zvuku a tloušťce materiálu: 6mm (červená křivka), 10mm (hnědá křivka), 15mm (zelená křivka) a 25mm (modrá křivka).

### 2.5.2. Zaplnění

Tlak v porózním materiálu roste s jeho zaplněním až do mezního stavu, kdy je zaplnění tak velké, že zvuk se nešíří póry, ale je odražen. Akustická rychlost v pórech materiálu je 1/h krát větší než akustická rychlost vně porózního materiálu. Na obraze 10 [převzato z 40] jsou



porovnávají materiály o různém zaplnění. Lze tedy pozorovat růst činitele zvukové pohltivosti se zaplněním.



Obraz 10: Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci zvuku a zaplnění materiálu, které roste s materiálem v pořadí 1, 2 a 3.

Při zachování konstantní hustoty polymeru, zaplnění roste s objemovou hmotností vláknenného materiálu.

### 2.5.3. Hustota polymeru

Tato charakteristika vláknenného materiálu má na činitel zvukové pohltivosti pouze velmi malý vliv. Studie [15] uvádí optimální hodnotu hustoty polymeru  $1650 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ .

### 2.5.4. Průměr vláken

Rozhodující vlastností pro zvukovou pohltivost je velikost akustické impedance, zvláště pak její reálné složky [3]. Ta bývá v určitých mezích srovnatelná s měrným odporem porózního materiálu, který pak závisí na velikosti povrchu vláken. Experimentální výsledky ukazují, že měrný akustický odpor je nepřímo úměrný čtvrté mocnině průměru vláken. Zvětší-li se tedy průměr vláken dvakrát, zmenší se měrný akustický odpor šestnáctkrát.



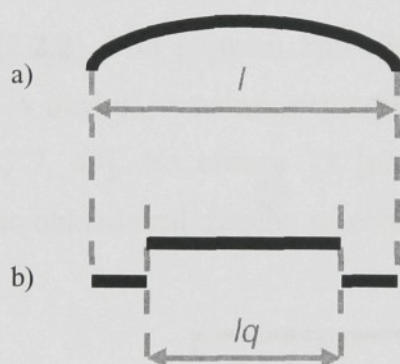
Studie [46] uvádí, že průměr vláken je jedním z faktorů, které mají vliv na šíření akustické vlny. Potřebné konstanty byly odvozeny z idealizovaného modelu vrstvených válců.

V experimentální studii [47] byly odvozeny parametry šíření akustické vlny. Na základě měření propustnosti objemných vlákenných materiálů byl stanoven statický měrný odpor. Propustnost materiálů je při konstantním zaplnění funkcí průměru vláken.

### 2.5.5. Anizotropie

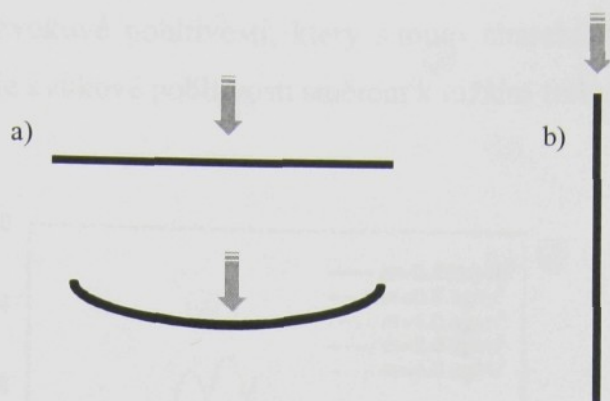
V pracích [10 – 12, 48] je uvažován efekt pohybu vláken.

Každé vlákno nebo segment je považován za strunu, která je na obou koncích pevně uchycena [10]. Vlákenný blok nahrazuje soustava těchto strun, kde amplituda vibrující struny je uvažována velmi malá. Pokud je struna o délce  $l$  vystavena kmitajícímu toku viskózní tekutiny, může být rozdělena na dvě části (obr.11). Hlavní část o délce  $lq$  kmitá lineárně a zbytek o délce  $l(1-q)$  je upevněn v rovnovážné poloze. Hodnota  $q$  byla nalezena 0,811.



Obraz 11: Model pohybu struny a) skutečná vibrace, b) přibližná odpovídající vibrace

V příspěvku [11] byly hodnoceny akustické charakteristiky s ohledem na anizotropii vlákenného materiálu. Pokud byl směr šíření zvukové vlny kolmý na směr uspořádání vláken ve vlákenném systému (obr.12a), měření činitele zvukové pohltivosti indikovalo rezonanční efekt. Pokud se zvuková vlna šíří paralelně s vlákenným uspořádáním, rezonance nevznikly (obr. 12b).

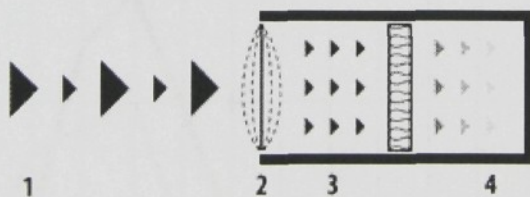


Obraz 12: Působení podélné zvukové vlny na vlákno a) kolmo na směr uspořádání vláken v materiálu, b) paralelně se směrem uspořádání vláken v materiálu

## 2.6. AKUSTICKÝ REZONANČNÍ PRVEK

### 2.6.1. Membrána

Mechanismus pohlcování akustické energie konstrukcí založené na rezonančním principu je popsán v kapitole (2.2.2). Pod pojmem kmitající membrány rozumíme tenkou desku nebo fólii, jejíž tuhost v ohybu je velmi nepatrná a která je umístěna v určité vzdálenosti od pevné stěny [3, 7, 49]. Na obraze 13 [převzato z 50] je popsáno jedno z možných uspořádání pohltivého obkladu založeného na rezonančním efektu membrány.



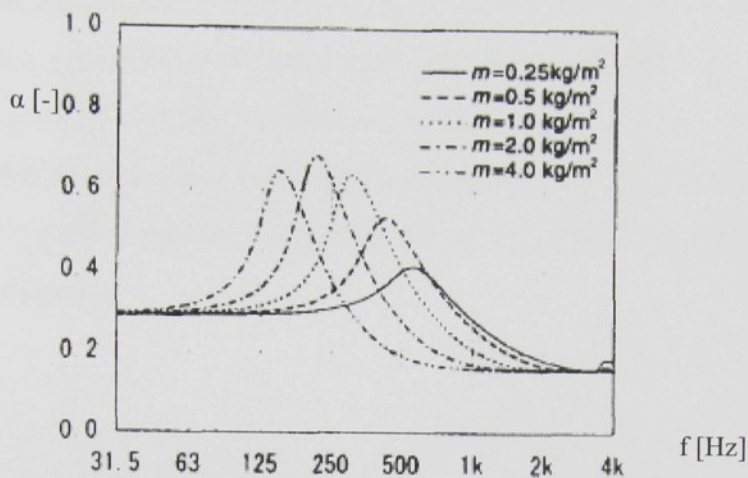
Obraz 13: Membránová rezonanční konstrukce

Zvuk (1) dopadá na membránu (2), která se rozvibruje. Změnou tlaku je vzduch (3) uveden do pohybu. Průnikem vzduchu pohltivým porózním materiálem dojde ke změně rychlosti (4).

Rezonanční frekvence dle vztahu (2.2.3) závisí na hmotnosti membrány a poddajnosti vzduchového polštáře, resp. na plošné hmotnosti membrány a její vzdálenosti od pevné stěny. Na obraze 14 [51] je možné vidět vliv plošné hmotnosti membrány na rezonanční frekvenci

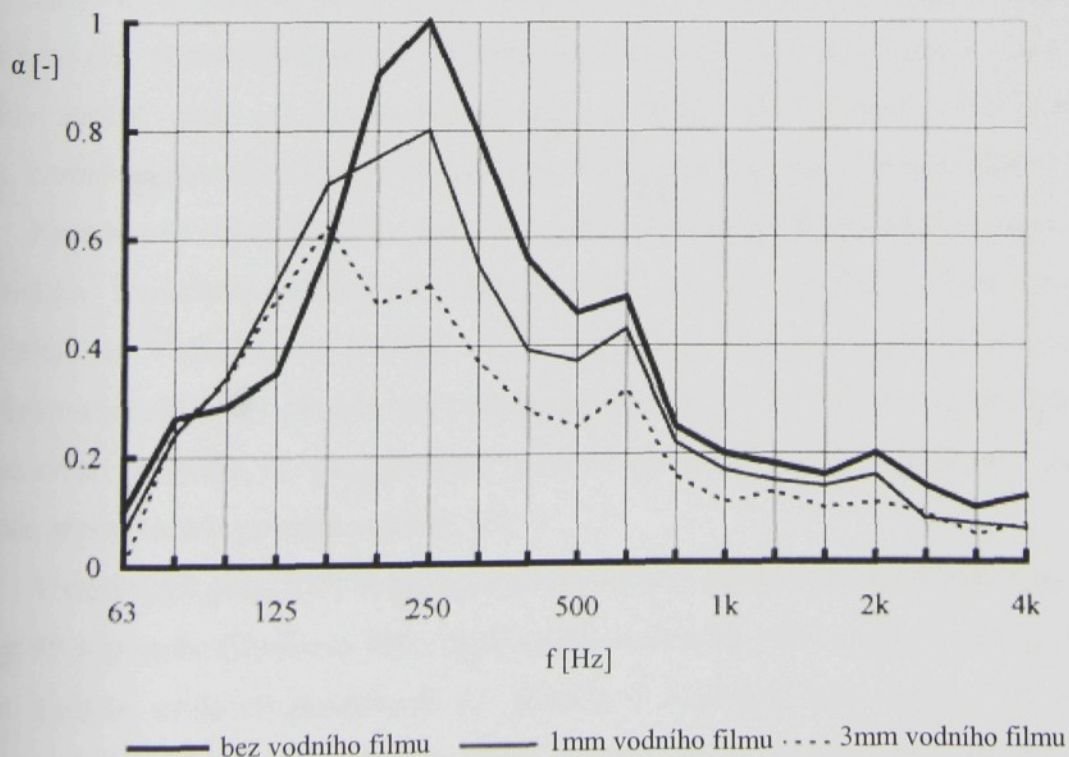


systému, resp. na činitel zvukové pohltivosti, který s touto charakteristikou roste. Dále je patrný posun maxim činitele zvukové pohltivosti směrem k nižším frekvencím.



Obraz 14: Vliv plošné hmotnosti membrány na činitel zvukové pohltivosti

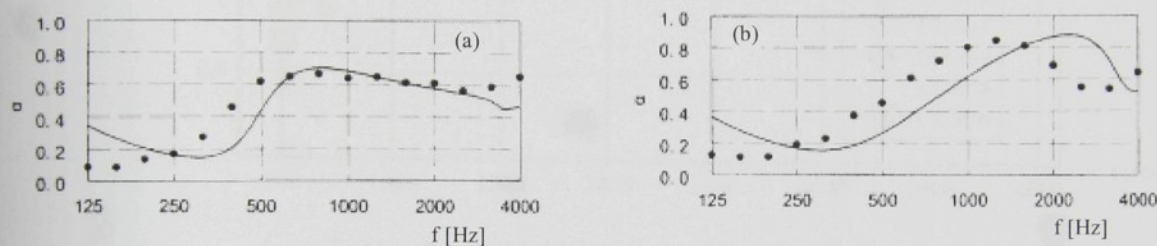
V příspěvku [52] byly studovány dva typy membránových absorbérů, jeden o tloušťce 0,2 mm, druhý 0,8 mm. K ověření funkce pórů na zvukovou pohltivost byl povrch membrány pokryt tenkou vrstvičkou vody. Výsledky experimentu ukázaly, že činitel zvukové pohltivosti membrány s vrstvičkou vody klesá (obr.15).



Obraz 15: Činitel zvukové pohltivosti v závislosti na výskytu pórů



Dvojitý rezonanční prvek byl zkoumán ve studiích [53, 54]. První, propustná membrána, měla ve směru přicházející zvukové vlny řádově desetkrát menší plošnou hmotnost než druhá nepropustná deska. Pro velikost činitele zvukové pohltivosti dvou měřených dvojitých rezonančních systémů měl největší vliv parametr měrného odporu, který měl pro první systém (obr.16a) desetkrát větší hodnotu než pro druhý (obr.16b). Jak je z obrazu 16 zřejmé, dvojitý rezonanční systém s vyšší hodnotou měrného odporu (obr.16a) pohlcuje lépe zvuk o nižší frekvenci ( $\sim 500\text{Hz}$ ), na druhou stranu maximum činitele zvukové pohltivosti systému s nižší hodnotou měrného odporu (obr.16b) je větší téměř o dvacet procent než prvního systému.



Obraz 16: Činitel zvukové pohltivosti dvojitého rezonančního systému v závislosti na frekvenci zvuku

### 2.6.2. Deska

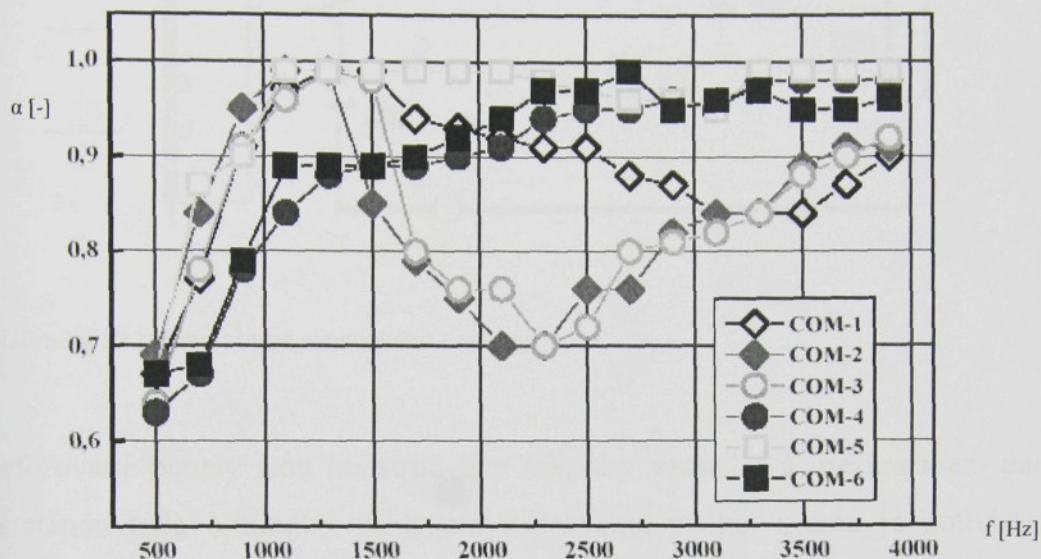
Místo membrány se někdy používá tuhá deska, velmi měkce upevněná na okraji, takže kmitá jako píst. Kmitající desky se od membrán liší především svou tuhostí v ohybu, která je obvykle značně větší než tuhost vzduchového polštáře. Ve srovnání s membránami se u desek, kromě základních pístových kmitů uplatňují i ohybové kmity vyšších řádů [7].

Kmitočtové charakteristiky jsou vzhledem k velké plošné hmotnosti desky velmi úzké. Akustickou impedanci kmitajících desek není možno výrazně ovlivňovat porózním materiálem ve vzduchovém polštáři. Je to způsobeno tím, že mechanické ztráty třením v pružném uložení desky představují obvykle větší hodnotu než vložený porózní materiál. Do vzduchového polštáře se pro omezení vzniku vlastních kmitů v prostoru vzduchového polštáře přesto vkládá porózní materiál [3].

V teoretické práci [55] bylo zkoumáno zvukově pohltivé chování šesti typů materiálů. Tenký PP film nebo hliníková fólie zajišťovaly rezonanční efekt systému. Obraz 17 ukazuje nárůst činitele zvukové pohltivosti při nižších a středních frekvencích, ale při vyšších frekvencích způsobuje koincidenční efekt rapidní pokles v pohltivosti (vzorky označené COM-2, COM-3). Vliv koincidenčního efektu je velký na materiály s větší tloušťkou,



pevností a menší objemovou hmotností. V případě systému s výplňkovým materiálem je vidět, že činitel zvukové pohltivosti roste při nižších frekvencích a neklesá při vyšších (vzorky označené COM-1, COM-4, COM-5, COM-6.).

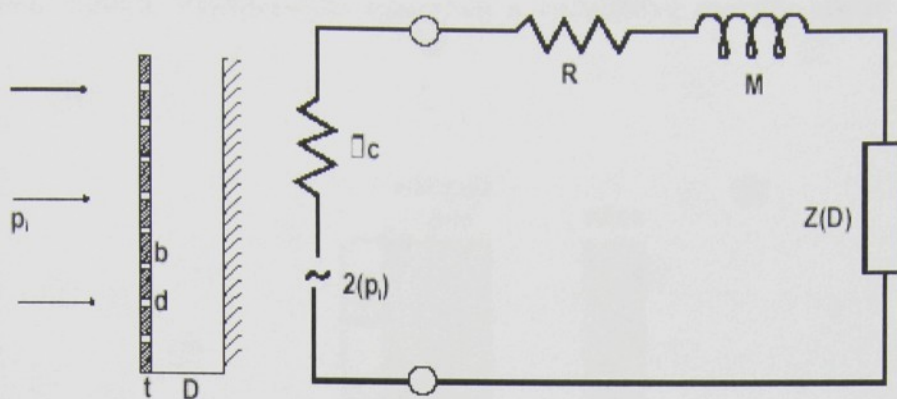


Obraz 17: Vliv vibrující desky na činitele zvukové pohltivosti. Materiály se liší použitou rezonanční fólií a vlákněným složením případně použitého výplňkového materiálu.

### 2.6.3. Perforovaný panel

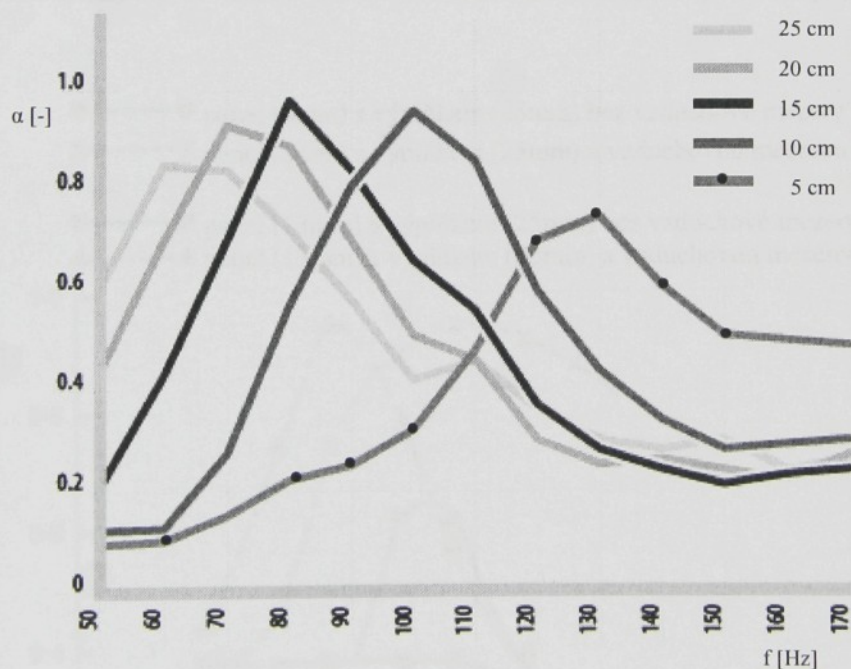
Dalším typem rezonančních soustav, používaných k pohlcování zvuku, jsou rezonátory Helmholtzova typu (viz. kapitola 2.2.2), uspořádané buď jednotlivě, nebo sdružené do perforovaných panelů. Výhodami těchto systémů je možnost nastavení změnou geometrie otvorů frekvenci maximálního pohlcování v širokém frekvenčním pásmu a dostatečná mechanická pevnost [3].

Pro výpočet vlastní frekvence systému lze rezonanční soustavu nahradit elektrickým obvodem, jak je popsáno v příspěvku, kde  $R$  a  $M$  jsou reálná a imaginární část akustické impedance panelu a  $Z(D)$  je reaktance vzduchové mezery [56] (obr.18).



Obraz 18: Náhradní elektrický obvod akustického systému.

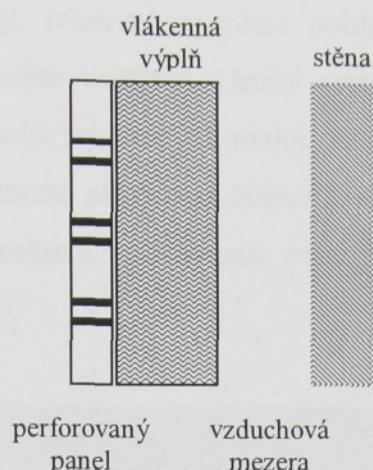
Perforované panely jsou konstruovány tak, aby vzduchová mezera mezi panelem a odrazivou stěnou byla optimální vzhledem k frekvenci zvuku, kterou je potřeba utlumit. Obraz 19 (převzato z 57) ukazuje frekvenční závislost činitele zvukové pohltivosti na vzdálenosti mezi panelem a stěnou.



Obraz 19: Činitel zvukové pohltivosti v závislosti na velikosti vzduchové mezery (5 – 25 cm) mezi panelem a stěnou.

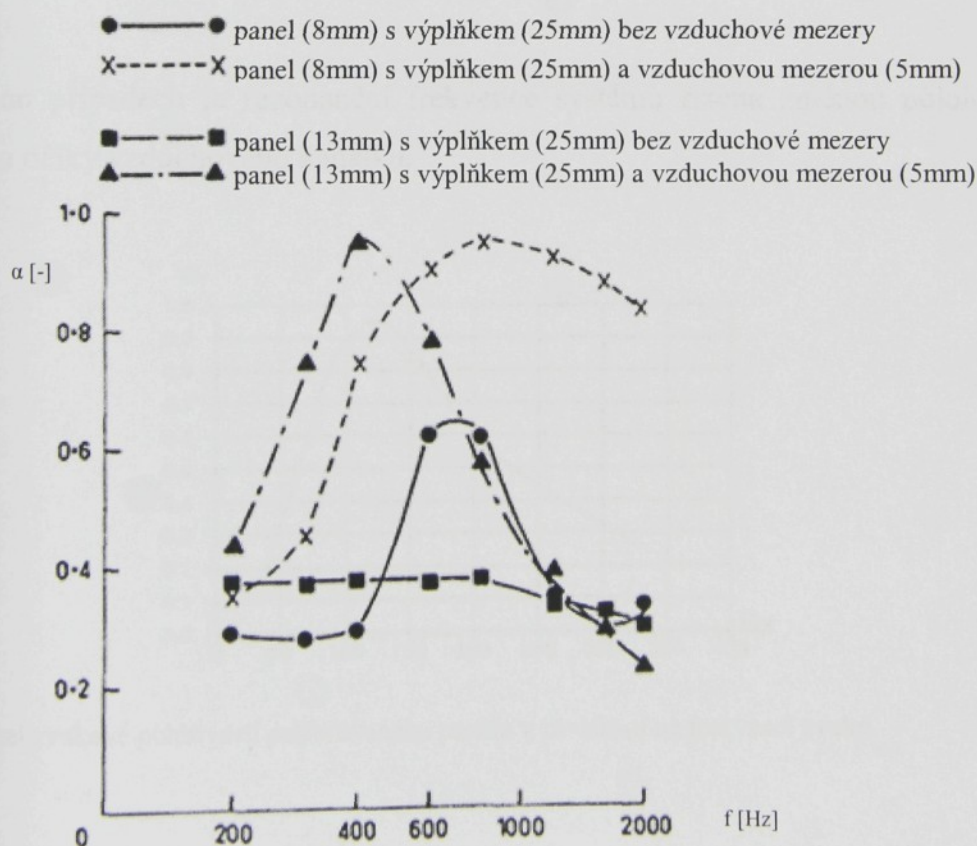


Příspěvek [58] se zabývá zvukovou pohltivostí rezonančních systémů sestávajících z perforovaného panelu, výplňkového materiálu a vzduchové mezery jak je znázorněno na obraze 20.



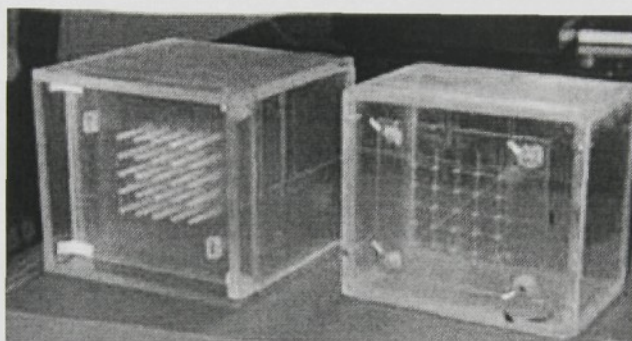
Obraz 20: Konstrukce rezonanční soustavy

Činitel zvukové pohltivosti na obraze 21 roste se vzdáleností rezonančního prvku od stěny a absorpční maxima se s tloušťkou perforovaného panelu posouvají směrem k nižším frekvencím.



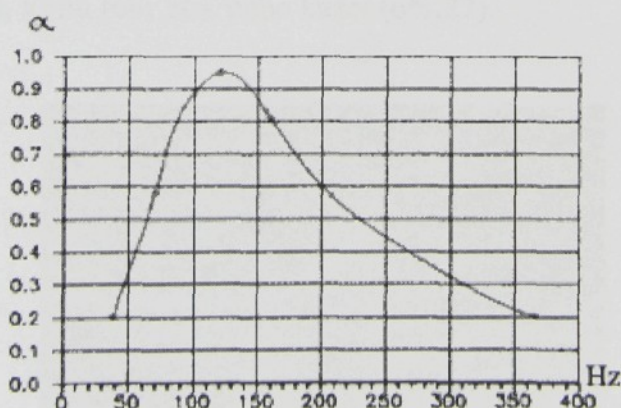
Obraz 21: činitel zvukové pohltivosti perforovaného panelu.

Příspěvek [59] pojednává o návrhu dvou perforovaných panelů (obr.22) , kde úbytek akustické energie je zvýšen netradičně navrženou perforací. První systém je navržen tak, že kuželovité otvory mají rozměry odpovídající mikroperforovanému panelu. Účelem návrhu je nárůst plochy dopadu zvukové vlny a nárůst rychlosti toku uvnitř kuželovitého otvoru. Výsledky podle obr. 23 ukazují relativně vysokou pohltivost, která je dosažena velkým vnějším průměrem otvoru a malým vnitřním. Druhý systém je dvojitě perforovaný panel, složený ze dvou paralelních panelů, oddělených malou vzduchovou mezerou, která zajišťuje největší část úbytku energie. V tomto případě je činitel zvukové pohltivosti roven pohltivosti mikroperforovaného panelu. Změnou vzdálenosti mezi oběma panely dochází k posuvu rezonanční frekvence systému.



Obraz 22: Návrhy perforovaných panelů

V obou případech je rezonanční frekvence systému řízena změnou polohy panelu, nebo změnou délky vzduchového kanálku.



Obraz 23: Činitel zvukové pohltivosti perforovaného panelu v závislosti na frekvenci zvuku



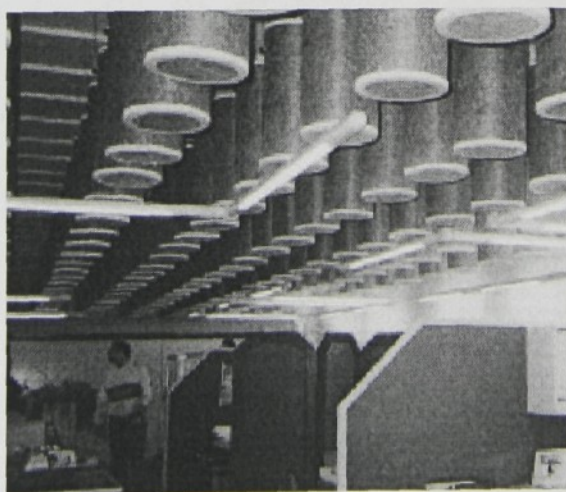
#### 2.6.4. Akustická tělesa

Při řešení akustických úprav směřujících ke snížení hladiny hluku zvýšením pohltivosti může nastat situace, kdy není možno umístit akustický obklad na stěny nebo strop. Pro tyto případy byla navržena akustická tělesa, která vykazují vysokou pohltivost zvuku [3, 7]. Tato tělesa, vyrobená z porózního materiálu, jsou sestavena tak, že dopadající zvuková vlna se mezi tělesy odráží a je pohlcována postupně. Činitel zvukové pohltivosti může být naměřen větší než 1, ale pouze v případě, kdy se chybně počítá s plochou pokryté stěny a ne s plochou akustického útvaru.

Většinou mají akustická tělesa jeden rozměr výrazně větší než ostatní, jedná se např. kužely nebo hranoly, jejichž špička směřuje do prostoru [3]. Jiným způsobem provedení akustického obkladu stropu je zavěšení desek z porózního materiálu tak, že se zvukové vlny vlivem vysoké pohltivosti těles ohýbají a činitel zvukové pohltivosti tak mírně vzroste.

Studie [60] se zabývá konstrukcí akustických těles. Návrh geometrického tvaru je vytvořen tak, aby docházelo k velkému množství odrazů zvukové vlny na povrchu i uvnitř akustického tělesa. K tomuto účelu slouží konstrukce vyrobená z komolých šestibokých hranolů. Dopadající zvuková vlna je několikrát odražena nakloněnými stranami hranolů a při každém odrazu vydá část energie, která je pohlcena vlákennou stěnou hranolu. Byla zkoumána jednak optimální tloušťka a plošná hmotnost stěny hranolu a jednak optimální úhel sklonu hrany vůči základně hranolu. Dále se studie zabývala možností použití výplně hranolu vlákněným materiálem, který činitel zvukové pohltivosti ještě zvýšil.

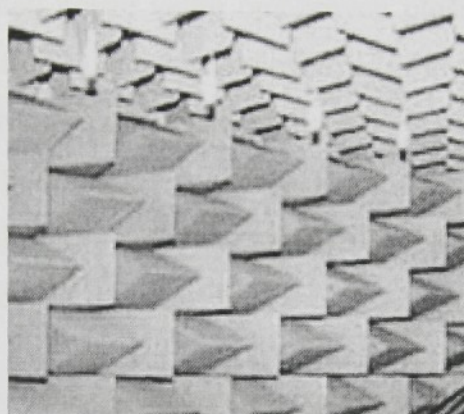
Příspěvky [61, 62] se zabývají vývojem stropních akustických těles z minerálních vláken s pohltivostí u středních a vyšších frekvencí. Navržená tělesa mohou být ve tvaru ve tvaru válce (obr.24, 25), klínů (obr.26), nebo kazet (obr.27).



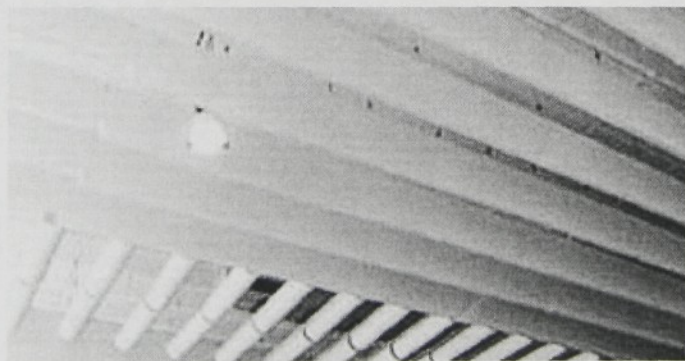
Obraz 24: Akustické těleso ve tvaru válce.



Obraz 25: Akustické těleso ve tvaru válce.



Obraz 26: Akustické těleso ve tvaru klínu



Obraz 27: Akustické těleso ve tvaru kazety



## 2.7. NANOVLÁKENNÁ STRUKTURA

Nově vyvinutý zvukově pohltivý materiál popsáný níže v kapitole (4.3) je složen z nanovlákených vrstev vyrobených elektrostatickým zvlákňováním vodného roztoku polymeru, které plní funkci rezonující membrány, a porózního vlákeného materiálu, který plní funkci tlumiče rezonátoru. Výrobu nanovlákených vrstev elektrostatickým zvlákňováním, které jsou v novém materiálu použity, popisují patenty [63, 64].

O další možnosti přípravy nanovlákených vrstev pomocí zvlákňovacích kapilár, umístěných v řadě, pojednává patent [65]. Stejně jako kapilára i zvlákňovací tryska umožňuje přípravu nanovlákených vrstev pouze velmi omezených plošných rozměrů. Zařízení podle patentů [66 - 70] umožňuje elektrostatické zvlákňování z tavenin i roztoku polymeru.

Struktura tohoto materiálu se od netkaných textilií vyráběných běžnými technologiemi liší průměrem vláken submikronových rozměrů a tomu odpovídajícími rozměry mezivlákených prostorů (obr.28). Tyto charakteristiky zajišťují nové zvukově pohltivé chování nanovlákených vrstev.



Obraz 28: snímek nanovlákené struktury s vyznačeným měřítkem

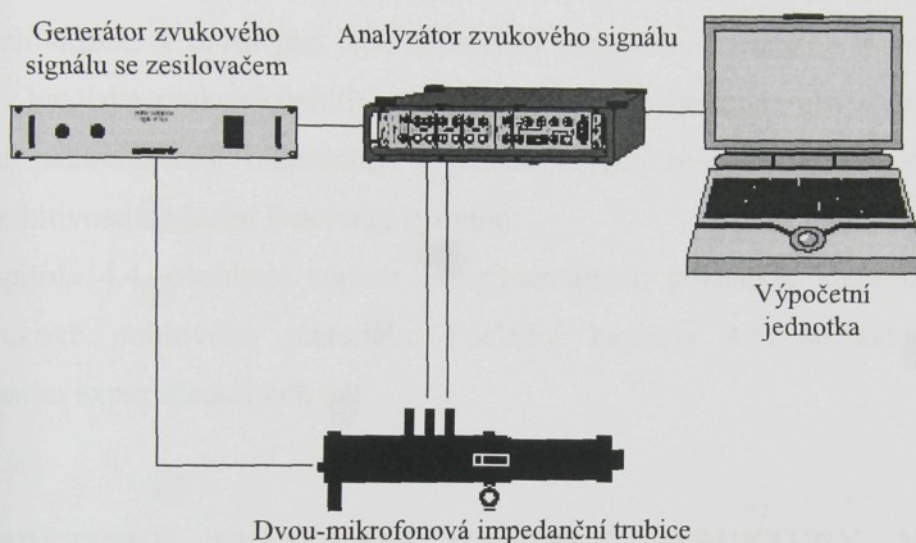
Obraz 28 znázorňuje nanovláknennou strukturu rezonujícího prvku použitého pro vývoj nového zvukově pohltivého materiálu. Obraz byl nasnímán pomocí rastrovacího elektronového mikroskopu, jehož princip je možné najít např. v příspěvku [71].



### 3. POUŽITÉ METODY

#### 3.1. DVOU-MIKROFONOVÁ IMPEDANČNÍ TRUBICE 4206

K měření akustických charakteristik zahrnujících činitel zvukové absorpce, činitel zvukové odrazivosti a specifickou akustickou impedanci byla použita měřicí soustava (obr.29) [převzato z 41]) sestávající z Dvou-mikrofonové impedanční trubice 4206, generátoru náhodného zvukového signálu se zesilovačem, analyzátoru signálů a výpočetní jednotky.



Obraz 29: Zařízení k měření činitele zvukové pohltivosti materiálů v závislosti na frekvenci zvuku

Dvoumikrofonové měřicí zařízení je vybaveno dvěma trubicemi. Trubice s vnitřním průměrem 100 mm měří na nižších frekvencích (50 Hz - 1,6 kHz) a trubice s vnitřním průměrem 29 mm měří vyšší frekvence (500 Hz – 6,4 kHz).

Tato metoda je podrobně popsána v kapitole (2.4.1).



## 4. PŘEHLED DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ

První dvě kapitoly 4.1. a 4.2. se zabývají teoretickým popisem obou složek vyvíjeného zvukově pohltivého materiálu (porózní vláknenný materiál a nanovláknenná rezonanční membrána). Výsledky jsou porovnány s experimentálními daty. Jelikož je ve výpočtech činitele zvukové pohltivosti (kap. 2.3.1) činitel struktury pokládán za jednotkový, je v následující kapitole 4.1. odvozen. Kapitola 4.2. se zabývá teoretickým stanovením vlastní frekvence víceprvkového rezonančního systému.

Vývoj zvukově pohltivého materiálu v kapitole 4.3. je založen na výzkumu jeho jednotlivých složek. V první fázi jsou zkoumány parametry porózního materiálu, které jsou podstatné z hlediska zvukové pohltivosti. Ve druhé fázi je zkoumán vliv charakteristik jednak rezonanční nanovláknenné membrány a jednak celého rezonančního systému na činitel zvukové pohltivosti a vlastní frekvenci systému.

Kapitola 4.4. obsahuje souhrn experimentálních poznatků, které jsou stěžejní pro vývoj zvukově pohltivého materiálu. Poslední kapitola 4.5. se zabývá statistickým vyhodnocením experimentálních dat.

### 4.1. TEORETICKÉ STANOVENÍ Činitele STRUKTURY VLÁKENNÉHO MATERIÁLU

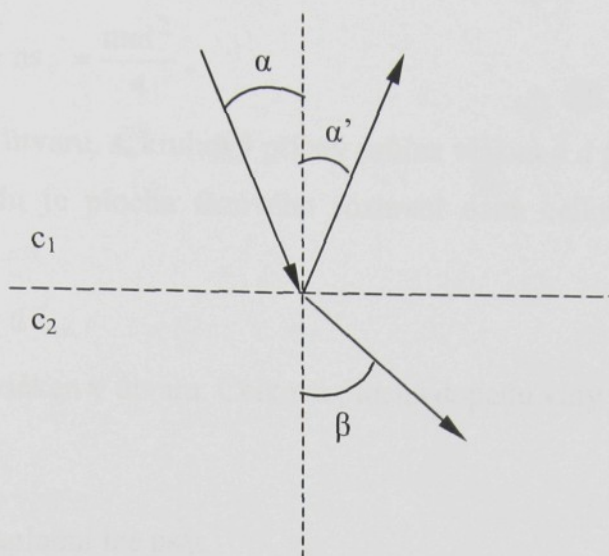
Činitel zvukové pohltivosti (kapitola 2.3.) byl odvozen z teorie šíření zvukové vlny porózním elastickým systémem. Činitel struktury je v těchto teoretických výpočtech předpokládán buď jednotkový, nebo není stanoven, přestože jeho hodnota se s uspořádáním a průměrem vláken mění.

Tato kapitola se bude zabývat jeho teoretickým stanovením, které je založeno na úbytku akustické energie vlivem fázových přechodů mezi vlákny a vzduchem v porózním materiálu. Tímto činitelem struktury bude opraven fázový parametr  $s$  (vztah 2.3.2). Činitel zvukové pohltivosti bude po dosažení činitele struktury stanoven postupem popsáním v kapitole 2.3.1 a porovnán s experimentálními daty.

Při dopadu rovinné vlny na rozhraní dvou izotropních prostředí s rozdílnou hustotou, dojde k odrazu a lomu vlny (případně ohybu). Odražená vlna se šíří poloprostorem, ze kterého vlna pochází a lomená vlna prostupuje do sousedního poloprostoru pod jiným úhlem. význačnou vlastností vln šířících se podél rozhraní dvou elastických prostředí je to, že jejich amplituda od rozhraní ubývá [1]. Pokud uvažujeme podélnou rovinnou vlnu, pak úhel dopadu



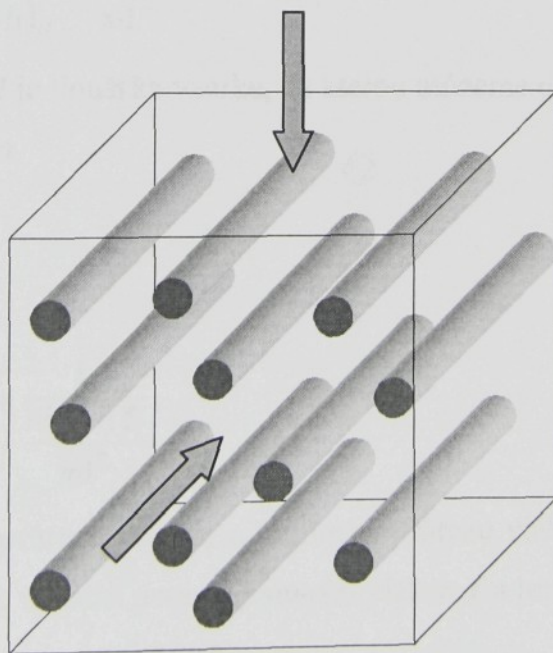
je roven úhlu odrazu, poměr sinu úhlu dopadu k sinu úhlu lomu je roven poměru fázových rychlostí v obou prostředích (viz obr.30).



Obraz 30: Odraz a lom vlny na rozhraní dvou elastických prostředí.

Obecně lze říci, že s rostoucím úhlem dopadu roste energie odražené vlny a klesá energie lomené vlny. Také s rostoucím úhlem ohybu intenzita klesá [5].

Z těchto poznatků vychází odvození činitele struktury pro dvě základní uspořádání vláken v útvaru: vlákna jsou uspořádána paralelně se směrem šíření zvuku, nebo kolmo na tento směr (obr.31).



Obraz 31: řez útvarem s paralelně uspořádanými vlákny, zvuková vlna se šíří paralelně s vlákny nebo kolmo na vlákna. Strana krychle je označena písmenem  $l$ .

Za předpokladu nulového úhlu dopadu je pro paralelní směr dopadu podélné vlny plocha fázového rozhraní dána celkovou plochou příčných průřezů vláken

$$S_{v//} = ns_v = \frac{n\pi d^2}{4}, \quad (4.1.1)$$

kde  $n$  je počet vláken v útvaru,  $s_v$  kruhový příčný průřez vlákna a  $d$  poloměr vlákna. Podobně pro kolmý směr dopadu je plocha fázového rozhraní dána celkovou plochou podélných průřezů vláken

$$S_{v\perp} = d L, \quad (4.1.2)$$

kde  $L$  je celková délka vláken v útvaru. Celková plocha dopadu vlny je dána

$$S = l^2, \quad (4.1.3)$$

kde  $l = \frac{L}{n}$ . Z definice zaplnění lze psát

$$(1-h)_{//} = \frac{S_{v//}}{S} = \frac{n\pi d^2}{4l^2} \quad (4.1.4)$$

a

$$(1-h)_{\perp} = \frac{S_{v\perp}}{S} = \frac{d n}{l} \quad (4.1.5)$$

Činitel struktury je pak dán poměrem těchto plošných zaplnění.

$$\mathfrak{S} = \frac{(1-h)_{\perp}}{(1-h)_{//}} = \frac{4l}{\pi d} \quad (4.1.6)$$

kde  $d$  je průměr vláken a  $l$  je tloušťka vzorku, za kterou můžeme dosadit do (4.1.6) vyjádření, které lze odvodit ze vztahu

$$l = \frac{L}{n}, \quad (4.1.7)$$

tedy

$$l = \frac{L}{S_v} = \frac{L}{4(1-h)\mathfrak{S}}, \quad (4.2.8)$$

kde  $S_v$  je celková plocha průřezů vláken,  $s_v$  je plocha průřezu vlákna a  $S$  plocha řezu útvaru.

Celkovou délku vláken lze vyjádřit pomocí jemnosti vláken  $T$  a hmotnosti vláken  $m$

$$l = \frac{10^6 \pi d^2 m}{4(1-h)ST} = \frac{10^6 \pi d^2 m_{pl} S}{4(1-h)ST}, \quad (4.1.9)$$

za  $T$  lze dosadit výraz



$$T = 10^6 \frac{\pi d^2}{4} \rho, \quad (4.1.10)$$

kde  $\rho$  označuje hustotu vlákna. Pak výraz

$$l = \frac{m_{pl}}{(1-h)\rho} \quad (4.1.11)$$

dosadíme do vztahu (4.1.6) a dostaneme činitel struktury ve tvaru

$$g = \frac{4 m_{pl}}{(1-h)\pi d \rho}. \quad (4.1.12)$$

Fázový parametr (viz vztah 2.3.2) je tímto činitelem struktury (4.1.6) opraven následovně

$$s = \left( h^2 \sigma + \frac{4l}{\pi d} \right) + \omega \rho_a (m-1)j \quad (4.1.13)$$

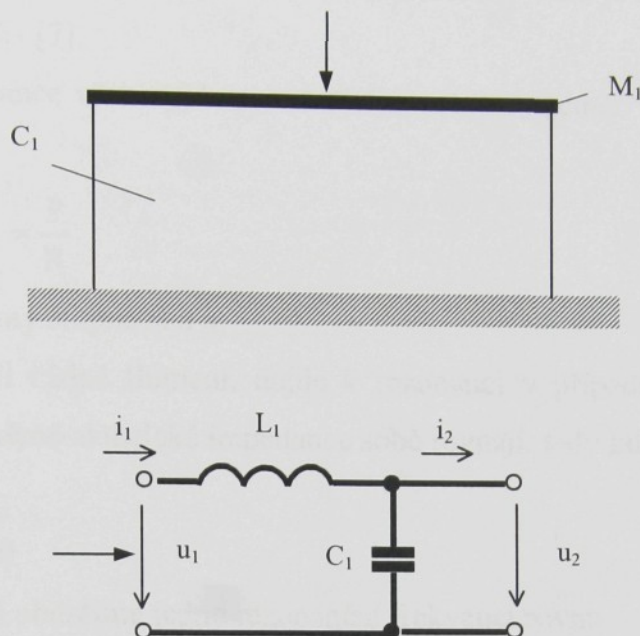
Činitel zvukové pohltivosti je po dosazení činitele struktury stanoven postupem popsaným v kapitole 2.3.1 a porovnán s experimentálními daty. Teoreticky stanovené hodnoty činitele zvukové pohltivosti jsou v dobré shodě s experimentálními daty (obrazy 70 - 73 v příloze 1). Na obrazech 70 a 71 byla porovnávána pohltivost materiálu v závislosti na jeho objemové hmotnosti a na obrazech 72 a 73 v závislosti na průměru vláken. Rozdíly mezi zvukovou pohltivostí kolmo a podélně uspořádaným vlákenným materiálem činitel struktury dobře vystihuje a tím je výpočet činitele zvukové pohltivosti zpřesněn.

## 4.2. TEORETICKÉ STANOVENÍ VLASTNÍ FREKVENCE ZVUKOVĚ POHLTIVÉHO SYSTÉMU S REZONANČNÍ MEMBRÁNOU

Rezonanční soustava může být nahrazena elektrickým obvodem (kapitoly 2.2.2 a 2.3.2), kde indukčnost nahrazuje měrnou akustickou hmotnost  $M$  a kapacita měrnou akustickou poddajnost  $C$ . V pracích [3, 7] je dvouprvková a tříprvková rezonanční soustava nahrazena sériovým elektrickým obvodem.

V této kapitole bude stanovena rezonanční frekvence akustického rezonančního systému, který sestává z 1 – 7 rezonančních membrán. Výsledky budou porovnány s experimentálními daty (kapitoly 4.3.2 a 4.3.3), kde plošná hmotnost nanovlákněné rezonanční membrány je  $11,14 \text{ g.m}^{-2}$  a vzdálenost jednotlivých membrán od sebe je 5 mm, přičemž je první membrána vždy ve vzdálenosti 35 mm od zvuk odrazivé stěny a ostatní membrány jsou postupně přidávány směrem od první membrány k odrazivé stěně. Tento postup lze použít pro stanovení vlastní frekvence rezonančního systému z nekonečně mnoho prvků.

Rezonanční soustava sestává z 1 - 7 rezonančních prvků, které jsou nahrazeny 1- 7 sériovými elektrickými obvody (obrazy 32 a 33).



Obraz 32: Schéma a náhradní elektrické schéma jednoduché rezonanční soustavy. Měrná akustická hmotnost  $M_1$  je nahrazena indukčností  $L_1$  a měrná akustická poddajnost  $C_1$  kapacitou  $C_1$ ,  $i_1$  a  $i_2$  jsou vstupní a výstupní proud,  $u_1$  a  $u_2$  jsou vstupní a výstupní napětí.

Charakteristickou matici dvojbranu (obraz 32) lze podle [72] nalézt v následujícím tvaru, kde jednotlivé prvky matice jsou

$$Z_{11} = \frac{u_1}{i_1} \bigg|_{i_2=0} = j\omega M_1 + \frac{1}{j\omega C_1}, \quad (4.2.1)$$

$$Z_{12} = \frac{u_1}{i_2} \bigg|_{i_1=0} = -\frac{1}{j\omega C_1}, \quad (4.2.2)$$

$$Z_{21} = \frac{u_2}{i_1} \bigg|_{i_2=0} = \frac{1}{j\omega C_1}, \quad (4.2.3)$$

$$Z_{22} = \frac{u_2}{i_2} \bigg|_{i_1=0} = -\frac{1}{j\omega C_1}, \quad (4.2.4)$$

pak má matice měrné akustické impedance tvar



$$Z_1 = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix}. \quad (4.2.5)$$

Měrná akustická impedance jednoduchého rezonančního systému je rovna vstupní impedanci elektrického obvodu  $Z_{11}$  [7].

Vstupní impedance však vyjde pro složitější soustavy téměř vždy ve tvaru racionální lomené funkce

$$Z_{c11} = \frac{P}{R} \quad (4.2.6)$$

kde  $P$  a  $R$  jsou polynomy stupně  $m$  a  $n$ .

Neuvažujeme-li žádné tlumení, dojde k rezonanci v případě, kdy se hmotnostní a poddajnostní složka měrné akustické impedance sobě rovnají, tedy když polynom  $P$  ve vztahu (4.2.6) se rovná nule.

$$P = 0 \quad (4.2.7)$$

Z řešení (4.2.7) obdržíme jednu rezonanční frekvenci rovnu

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{MC}} \quad (4.2.8)$$

Musíme si však uvědomit, že se nejedná přímo o rezonanční frekvenci fyzikální soustavy, ale jeho náhradního rezonančního elektrického modelu. Chceme-li získat i rezonanční frekvenci skutečné soustavy, musíme vypočtenou frekvenci korigovat vztahem, který lze odvodit ze vztahu (2.2.3). Výsledný vztah pro přepočítání ekvivalentní rezonanční frekvence náhradního elektrického obvodu na rezonanční frekvenci fyzikálního systému je popsán následující rovnicí.

$$f_{rm} = f_{re} c \sqrt{\rho} \quad (4.2.9)$$

Pro výpočet víceprvkové rezonanční soustavy (obraz 33), je postup složitější. Jelikož se jedná o kaskádní spojení dvojbranů, je nutné dvojbrany též popsat pomocí rovnic, kde vstupní veličiny jsou závislé na veličinách výstupních. Popis dvojbranu při uvedené závislosti se nazývá také kaskádním. Kaskádní matici dvojbranu, určíme dle vztahu

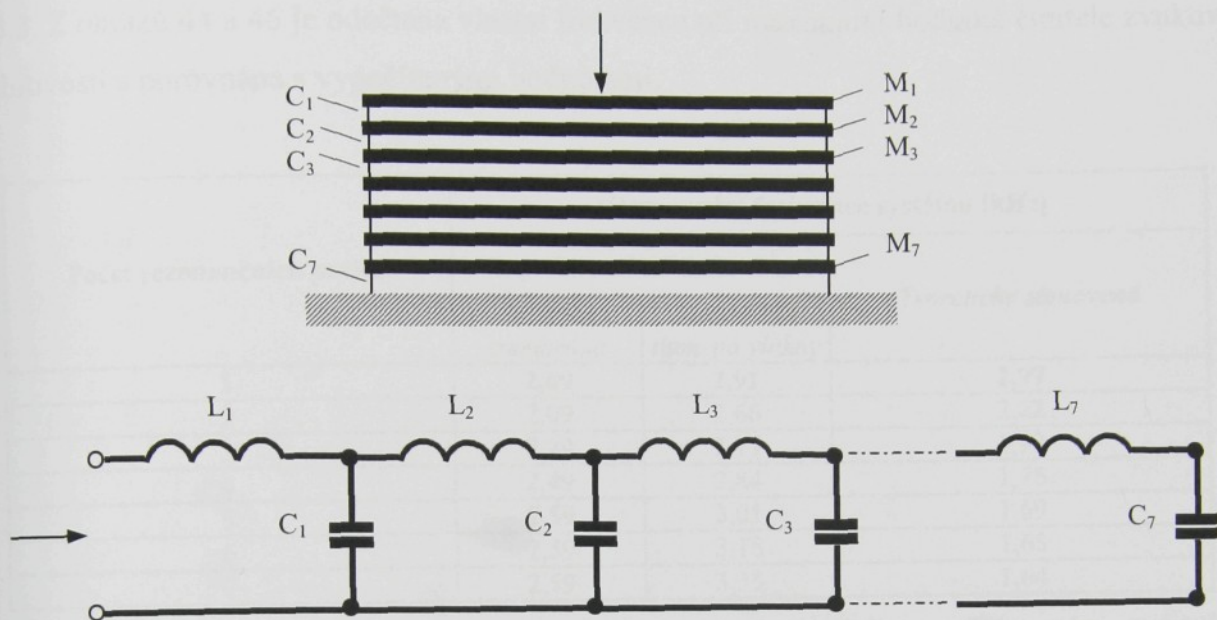
$$A_1 = \begin{bmatrix} 1 + \frac{Z_{L_1}}{Z_{C_1}} & Z_{L_1} \\ \frac{1}{Z_{C_1}} & 1 \end{bmatrix}, \quad (4.2.10)$$

kde  $Z_{L_1} = j\omega M_1$  a  $Z_{C_1} = \frac{1}{j\omega C_1}$ . Tato matice je stanovena podobně pro každý rezonanční

prvek. Součinem těchto matic získáme výslednou matici  $A_c$  tak, že dílčí matice jsou násobeny

zprava v pořadí, které odpovídá pořadí rezonančních prvků sestavených ve směru šíření zvuku k odrazivé stěně podle obrazu 33.

$$A_c = A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot \dots \cdot A_7 \quad (4.2.11)$$



Obraz 33: Schéma a náhradní elektrické schéma sedmiprvkové rezonanční soustavy. Měrná akustická hmotnost  $M_i$  je nahrazena indukčností  $L_i$  a měrná akustická poddajnost  $C_i$  kapacitou  $C_i$ .

Výslednou kaskádní matici opět transformujeme na impedanční matici, která je ve tvaru

$$Z_c = \frac{1}{A_{c21}} \begin{bmatrix} A_{c11} & -|A_c| \\ 1 & -A_{c22} \end{bmatrix}, \quad (4.2.12)$$

stejně jako v jednoduchém rezonančním systému je měrná akustická impedance rovna vstupní impedanci rezonančního systému. Pro výpočet rezonanční frekvence tedy stačí znát první člen výsledné impedanční matice

$$Z_{c11} = \frac{A_{c11}}{A_{c21}}. \quad (4.2.13)$$

Další postup výpočtu je již stejný jako v případě jednoprvkového systému, čili dalším krokem by bylo z impedanční matice vyjádřit vstupní impedanci a pokračovat vztahem (4.2.6) dále. Rezonanční frekvence víceprvkového systému je vypočítána implicitně. Zcela stejným postupem byl realizován i skript pro MATLAB, který počítá rezonanční frekvence teoreticky nekonečně-prvkového systému.



Do vztahu 4.2.10 je za měrnou akustickou pohltivost  $M$  pro každý rezonanční prvek dosazena plošná hmotnost rezonanční membrány a za měrnou akustickou poddajnost  $C$  je dosazena vzdálenost mezi jednotlivými prvky. Tímto postupem stanovená vlastní frekvence rezonančního systému je porovnávána z experimentálními daty uvedenými v kapitole 4.3.2 a 4.3.3. Z obrazů 44 a 46 je odečtena vlastní frekvence při maximální hodnotě činitele zvukové pohltivosti a porovnána s vypočítanými hodnotami.

| Počet rezonančních prvků | Rezonanční frekvence systému [kHz] |                         |                      |
|--------------------------|------------------------------------|-------------------------|----------------------|
|                          | Experimentálně stanovená           |                         | Teoreticky stanovená |
|                          | Samotná membrána                   | Membrána tlumená vlákny |                      |
| 1                        | 2,09                               | 2,91                    | 2,97                 |
| 2                        | 2,09                               | 2,66                    | 2,22                 |
| 3                        | 2,29                               | 2,77                    | 1,92                 |
| 4                        | 2,49                               | 2,84                    | 1,76                 |
| 5                        | 2,59                               | 3,01                    | 1,69                 |
| 6                        | 2,59                               | 3,18                    | 1,65                 |
| 7                        | 2,59                               | 3,35                    | 1,64                 |

Tabulka 1: Experimentálně a teoreticky stanovené hodnoty vlastní frekvence jedno-sedmi prvkového rezonančního systému.

Teoreticky stanovená hodnota vlastní frekvence jednoduchého rezonančního systému se blíží experimentálně stanovené (tabulka 1). Experimentálně stanovená rezonanční frekvence systému s počtem rezonančních membrán stoupá vlivem útlumu akustické energie při průchodu zvuk pohltivým systémem. Teoreticky stanovená vlastní frekvence systému klesá, jelikož ve výpočtech je zanedbán akustický odpor, tedy útlum akustické energie. V systému sestaveném pouze z membrán dochází k útlumu vlivem tření mezi vzduchem a stěnami měřicí aparatury. V systému, kde prostor mezi jednotlivými rezonančními membránami je vyplněn vlákny, dochází k útlumu vlivem tření mezi vzduchem a povrchem vláken. v druhém případě je tlumení významnější. Nedostatečná shoda výsledků v jednoduchém rezonančním systému, kde k útlumu energie před první membránou nedochází žádném z obou systémů, je způsobena nestejnou měrností nanovláknenné membrány a způsobem jejího uchycení v měřícím zařízení (více viz. kap.4.3.2).



### 4.3. VÝVOJ ZVUKOVĚ POHLTIVÉHO MATERIÁLU

Akustické obklady pro pohlcování zvuku jsou využívány v automobilovém, leteckém, stavebním i strojním průmyslu. Návrh akustického materiálu vychází z oblasti frekvencí nežádoucího zvuku v daném prostředí. Porózní materiály (viz kap.2.2.1) jsou využívány především k pohlcování zvuku o vyšších frekvencích. Toto řešení je pro pohlcování zvuku o nižší frekvenci náročné z hlediska potřeby vysoké tloušťky materiálu.

Konstrukce založené na rezonančním principu (viz.kap.2.2.2) kmitají při nízkých frekvencích a přeměňují akustickou energii v teplo. Konstrukce tedy pohltí zvuk při určité nízké frekvenci, ale pro další frekvence je pohltivost velmi nízká.

Předmětem návrhu je materiál, který pohltí zvuk při nízkých frekvencích a současně neztrácí schopnost pohltivosti pro vyšší zvukové frekvence. Touto vlastností, která je založena na rezonančním efektu nanovláknenné vrstvy pružně tlumené vláknennou netkanou textilií, převyšuje dosud známé materiály.

Nanovláknenná vrstva plní funkci membrány, rezonující na nízké frekvenci. Tento charakter je dán nanorozměry mezivláknenných prostorů. Dopadne-li na akustickou rezonanční membránu zvukové vlnění, uvede ji do vynucených kmitů, jejichž amplituda je maximální v případě rezonance. Vláknenný materiál zajišťuje dostatečný útlum rezonující membrány tak, aby co největší množství zvukové energie, nashromážděné v rezonátoru, bylo přeměněno v teplo.

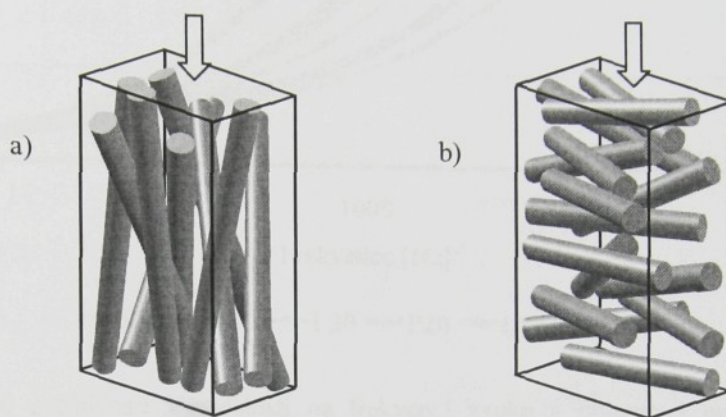
#### 4.3.1. Porózní materiál

Vývoj nového pohltivého materiálu je založen na výzkumu jeho jednotlivých komponent. Tato kapitola se zabývá vlivem strukturních charakteristik porózního materiálu na velikost činitele zvukové pohltivosti. Jedná se zejména o vláknenné uspořádání v netkané textilií, zaplnění vyjádřené objemovou hmotností vzorku z polyesterových vláken a průměr vláken.



## Anizotropie

I. V této části práce je porovnáván činitel zvukové pohltivosti kolmo kladené a podélně kladené netkané textilie. Kolmo kladený materiál zajistil paralelní uspořádání vláken se směrem šíření podélné zvukové vlny a podélně kladený materiál umožnil kolmé uspořádání vláken na směr šíření zvuku (obr.34).



Obrázek 34: Vláknenný materiál s vyznačením směru šíření podélné zvukové vlny a) kolmo kladená netkaná textilie b) podélně kladená netkaná textilie

### Parametry výroby vzorků

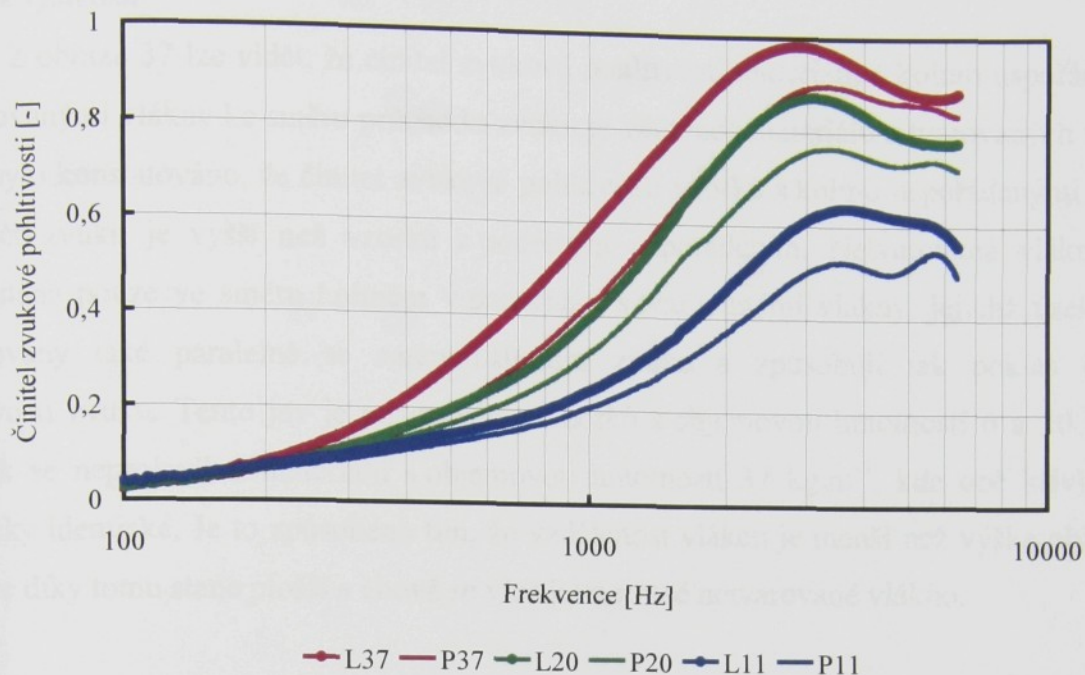
Z důvodu přesnějšího hodnocení anizotropie vláknenného materiálu byla použita pro výrobu měřeného vzorku netvarovaná vlákna. Vláknenná směs sestávala z 80% polyesterových vláken a 20% bikomponentních polyester/kopolyester vláken typu jádro-plášť. Jemnost vláken byla 4 dtex.

1. vzorek (označen L): mykaná vláknenná vrstva byla podélně kladena a zpevněna v teplovzdušné komoře při 150°C.
2. vzorek (označen P): mykaná vláknenná vrstva byla kolmo kladena a zpevněna v teplovzdušné komoře při 150°C.

Objemová hmotnost měřených vzorků byla 11 nebo 20 nebo 37 kg.m<sup>-3</sup> a tloušťka 30 mm.

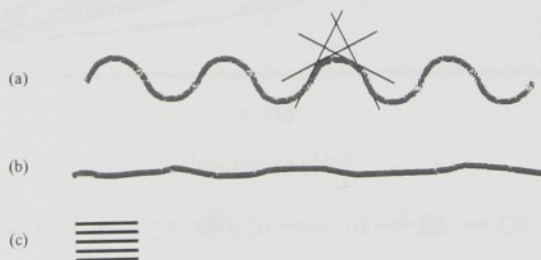
### Diskuse výsledků

Z obrázků 35 lze konstatovat, že činitel zvukové pohltivosti vláknenných materiálů s uspořádáním vláken kolmo na směr zvuku (L) je vyšší než u paralelně uspořádaných vláknenných materiálů (P). Tento jev je jednak způsoben možností pohybu jednotlivých vláken, pokud jsou uspořádána kolmo na směr šíření podélné zvukové vlny a také úbytkem akustické energie vlivem fázových přechodů mezi vlákny a vzduchem v porózním materiálu.



Obraz 35: Činitel zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci zvuku a objemové hmotnosti vlákenného materiálu (11, 20, 37  $\text{kg.m}^{-3}$ ) pro podélně kladenou netkanou textilií (L) a kolmo kladenou netkanou textilií (P).

II. Činitel zvukové pohltivosti tvarovaných a netvarovaných vláken byl porovnáván z důvodu hodnocení vlivu úseků obloučku na vlákenné uspořádání. Úseky obloučků přispívají k celkovému směru uspořádání vláken v materiálu a akustické charakteristiky se stávají spíše izotropní (obr.36).



Obraz 36: Vliv úseků obloučku na celkový směr uspořádání vláken v materiálu a) tvarované vlákno s vyznačením směrů jednotlivých úseků vlákna b) netvarované vlákno c) směr uspořádání vláken v materiálu.

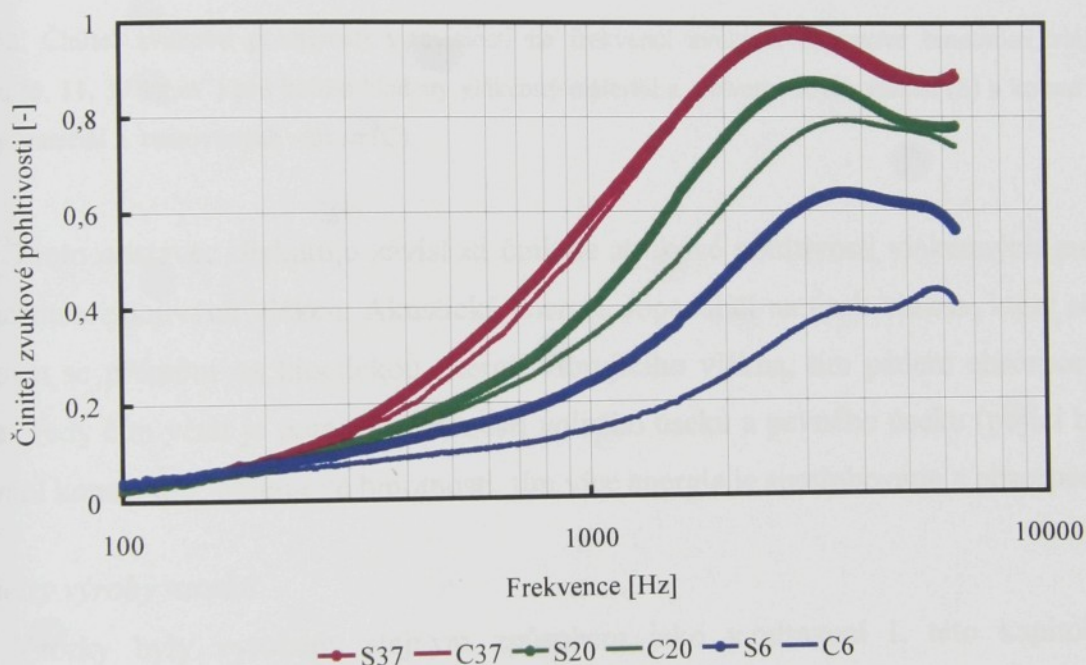
### Parametry výroby vzorků

Vzorky byly vyrobeny stejným způsobem jako v odsazení I. této kapitoly. Pro hodnocení vlivu směrů elementu vlákna na anizotropii vlákenného útvaru, byly porovnávány materiály z tvarovaných vláken (označeny C) a netvarovaných vláken (označeny S).



## Diskuse výsledků

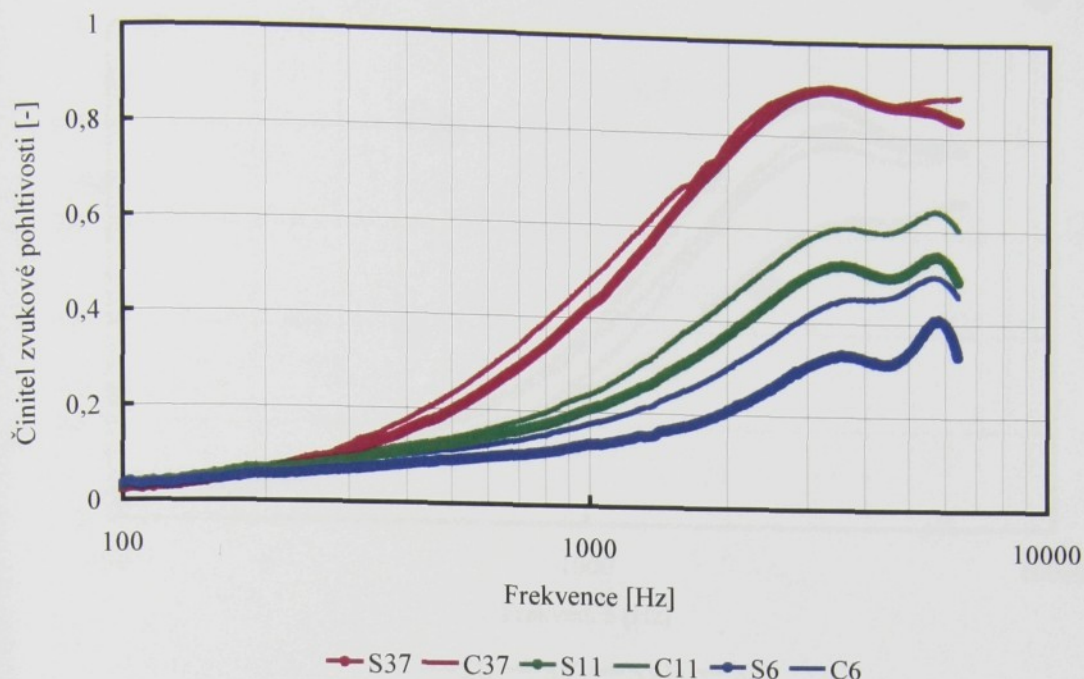
Z obrazu 37 lze vidět, že činitel zvukové pohltivosti materiálu z kolmo uspořádanými netvarovanými vlákny ke směru průchodu zvuku je větší než materiálu z tvarovaných vláken. Výše bylo konstatováno, že činitel zvukové pohltivosti vzorků s kolmo uspořádanými vlákny na směr zvuku je vyšší než vzorků z podélným uspořádáním. Netvarovaná vlákna jsou uspořádána pouze ve směru kolmém v porovnání s tvarovanými vlákny, jejichž úseky jsou orientovány také paralelně se směrem šířením zvuku a způsobují tak pokles činitele pohltivosti zvuku. Tento jev je pozorován u vzorků s objemovou hmotností 6 a 20  $\text{kg.m}^{-3}$ . Naopak se neprojevil u materiálu s objemovou hmotností 37  $\text{kg.m}^{-3}$ , kde obě křivky jsou prakticky identické. Je to způsobeno tím, že vzdálenost vláken je menší než výška obloučku, který se díky tomu stane plošší a chová se více jako rovné netvarované vlákno.



Obraz 37: Činitel zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci zvuku a objemové hmotnosti vlákenného materiálu (6, 20, 37  $\text{kg.m}^{-3}$ ) pro podélně kladený vlákenný materiál z netvarovaných vláken (S) a podélně kladený vlákenný materiál z tvarovaných vláken (C).

Stejný jev lze vypořadovat z obrazu 38, kde vlákna jsou uspořádána paralelně se směrem šíření zvuku. Tvarovaná vlákna přispívají ke kolmému směru, který je vzhledem k zvukové absorpci efektivnější než paralelní směr. Pak činitel zvukové pohltivosti poroste.





Obraz 38: Činitel zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci zvuku a objemové hmotnosti vlákenného materiálu (6, 11, 37 kg.m<sup>-3</sup>) pro kolmo kladený vlákenný materiál z netvarovaných vláken (S) a kolmo kladený vlákenný materiál z tvarovaných vláken (C).

III. Tento odstavec diskutuje závislost činitele zvukové pohltivosti vlákenných materiálů na koncentraci pojivých vláken. Akustická energie dopadající na úsek vlákna, který se může pohybovat se přemění na kinetickou energii vibrujícího vlákna, tím pádem absorpce zvuku naroste. Tedy čím větší je poměr vzdáleností volného úseku a pevného úseku (pojící bod) při zachování konstantní objemové hmotnosti, tím více energie je spotřebováno a absorpce roste.

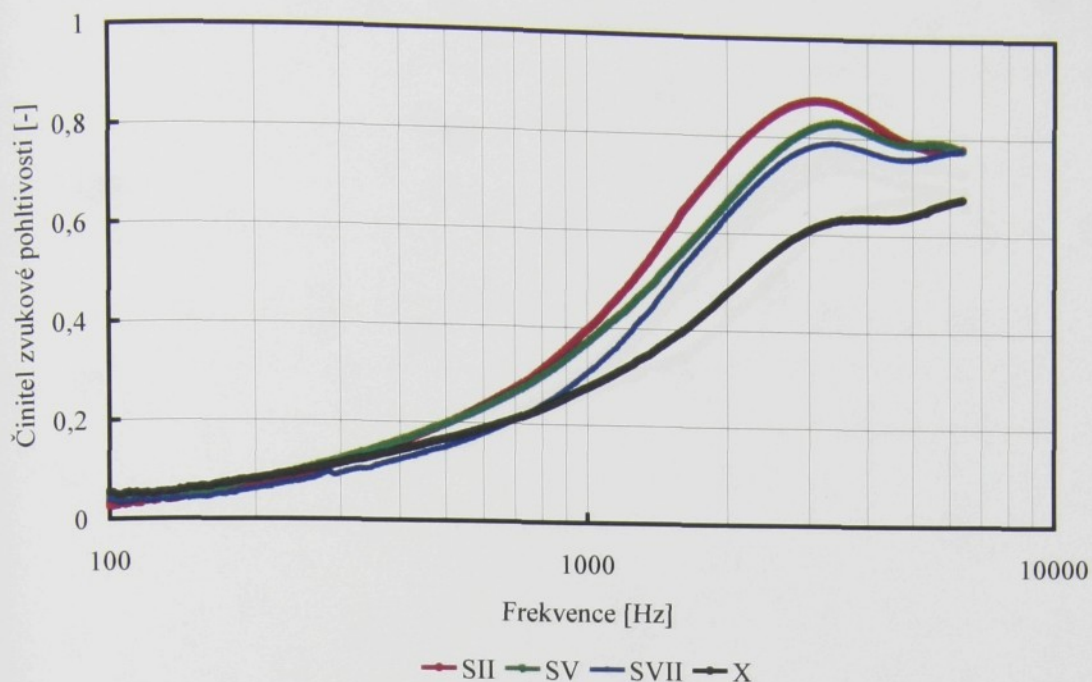
#### Parametry výroby vzorků

Vzorky byly vyrobeny stejným způsobem jako v odsazení I. této kapitoly. Pro hodnocení vlivu „pohyblivosti“ vláken na činitel zvukové pohltivosti, byly porovnávány materiály o různé koncentraci bikomponentních pojivých vláken: 20% (označeno II), 50% (označeno V), 75% (označeno VII) a 100% (označeno X). Objemová hmotnost měřených vzorků byla 20 kg.m<sup>-3</sup> a tloušťka 30 mm.

#### Diskuse výsledků

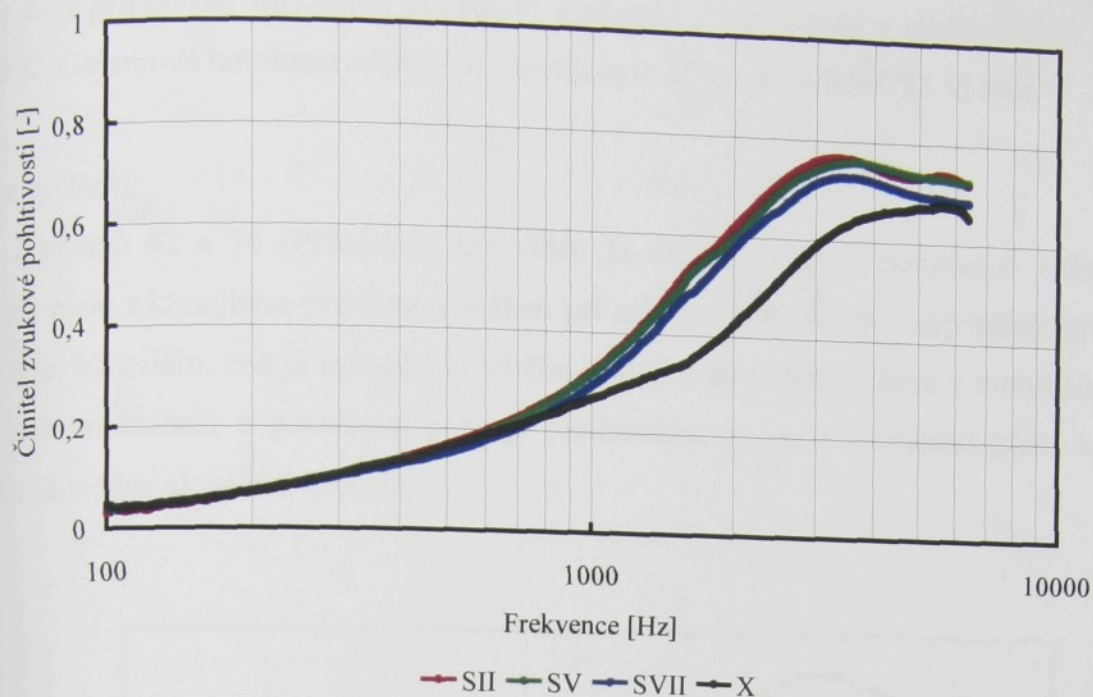
U podélně kladených vzorků (obr.39) závisí velikost činitele zvukové pohltivosti nejen na možnosti úseků vláken pohybovat se ale i na délce těchto úseků - křivky koncentrací jsou významně odlišné, činitel zvukové pohltivosti stoupá s klesající koncentrací tedy s větší délkou úseků.





Obraz 39: Činitel zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci zvuku a koncentraci bikomponentních vláken (20, 50, 75 a 100%) pro podélně kladený vlákenný materiál z netvarovaných vláken (S).

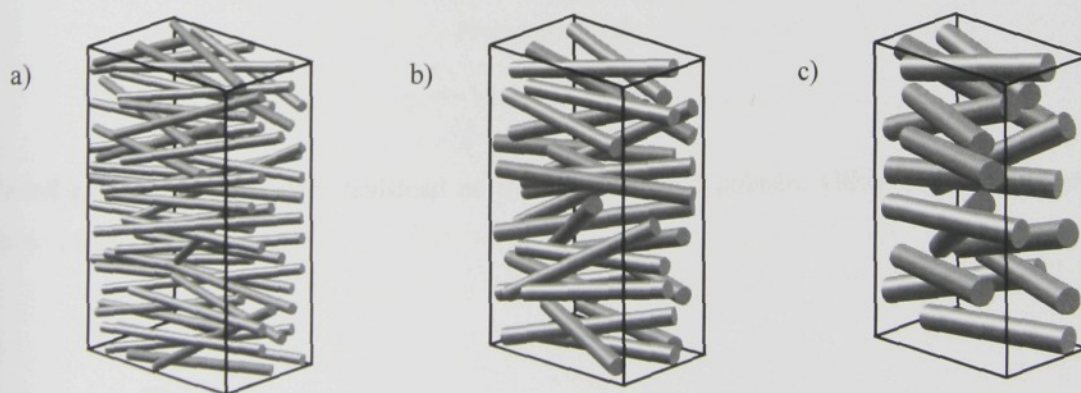
U kolmo kladených vzorků (obr.40) nezáleží na délce volných úseků, ale kupodivu záleží na možnosti pohybu - vzorky s odlišnou koncentrací základních vláken jsou téměř totožné, ale téměř nepohyblivé úseky vláken materiálu ze stoprocentně pojivých vláken způsobují významný pokles v absorpci zvuku.



Obraz 40: Činitel zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci zvuku a koncentraci bikomponentních vláken (20, 50, 75 a 100%) pro kolmo kladený vlákenný materiál z netvarovaných vláken (S).

### Průměr vláken

V této partii byl porovnáván činitel zvukové pohltivosti netkané textilie z vláken o různých jemnostech (obr.41).



Obraz 41: Vlákenný materiál s vlákny o jemnostech a) 3,6 dtex b) 6,7 dtex c) 17 dtex

### Parametry výroby vzorků

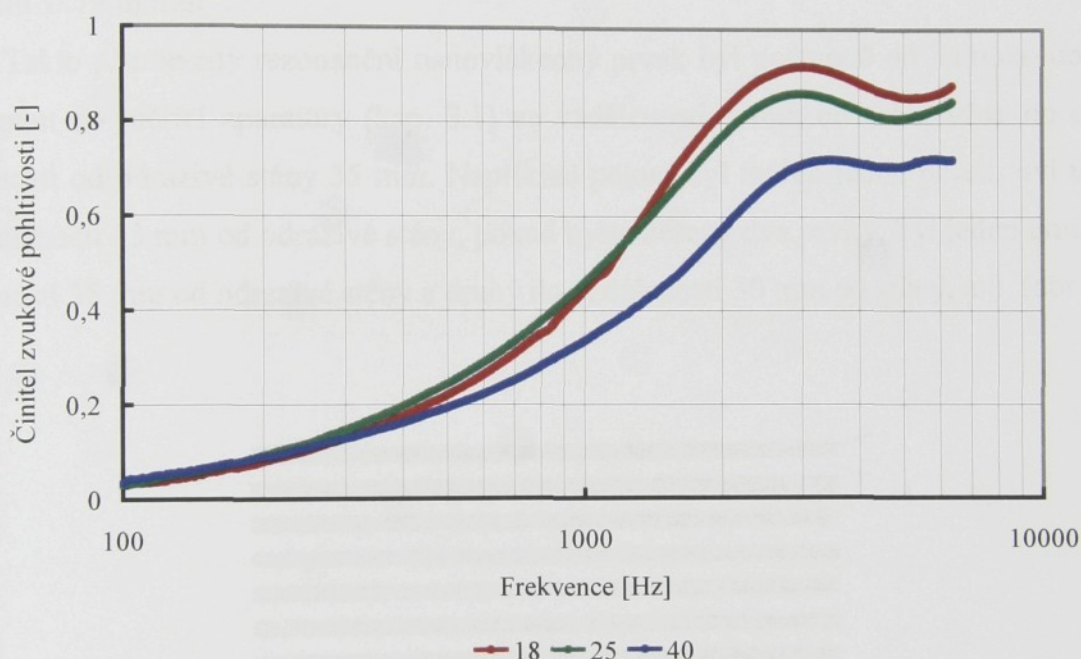
Vlákenná směs sestávala z 80% polyesterových vláken a 20% bikomponentních polyester/kopolyester vláken typu jádro-plášť. Jemnost vláken byla 3,6 dtex (18  $\mu\text{m}$ ) nebo 6,7 (25  $\mu\text{m}$ ) nebo 17 dtex (40  $\mu\text{m}$ ).



Vzorky byly připraveny mykáním, podélným kladením a zpevněním v teplovzdušné komoře při 150°C. Objemová hmotnost měřených vzorků byla  $26 \text{ kg.m}^{-3}$  a tloušťka 35 mm.

#### *Diskuse výsledků*

Z obrazů 42 a 74 (Příloha 2) lze vidět, že činitel zvukové pohltivosti vláknenných materiálů roste s klesajícím průměrem vláken při zachování konstantní objemové hmotnosti vláknenného materiálu, což je způsobeno větším měrným povrchem vláken o menší jemnosti. Tření mezi vzduchem a povrchem póru je realizováno na větší interakční ploše a je tak spotřebováno více akustické energie.



Obraz 42: Činitel zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci zvuku a průměru vláken (18, 20 a 40  $\mu\text{m}$ ) v podélně kladené netkané textilií.

#### **4.3.2. Rezonanční prvek**

Dalším stupněm v návrhu nového zvukově pohltivého materiálu je vývoj rezonanční membrány.

#### *Parametry výroby vzorků*

Vláknenná pavučina o plošné hmotnosti  $11 \text{ g.m}^{-2}$  byla připravena na mykacím stroji z 73% bikomponentních vláken typu jádro plášť složených z polyesterového jádra a

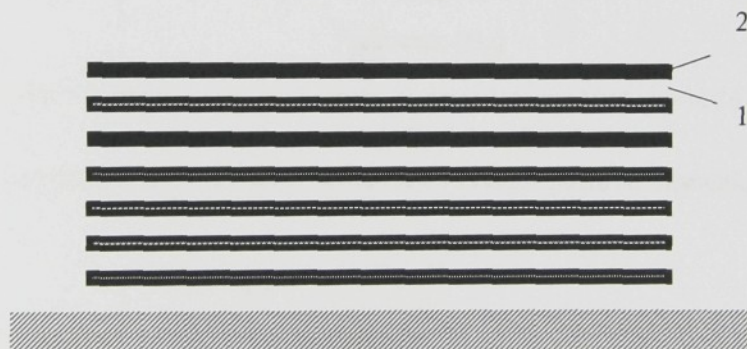


kopolyesterového pláště o jemnosti 2.2 dtex a 27% polyesterových vláken o jemnosti 6.7dtex. Na vláknou pavučinu byla nanесena elektrostatickým zvlákňováním vodného roztoku polyvinylalkoholu vrstva nanovláken o plošné hmotnosti  $0,14 \text{ g.m}^{-2}$ . Tento vlákný útvar o plošné hmotnosti  $11,14 \text{ g.m}^{-2}$  bude dále nazýván rezonanční membránou, nebo rezonančním prvkem.

Vodný roztok, připraven dle receptury [73], sestával z polyvinylalkoholu, glyoxalu a kyseliny fosforečné. Nanovlákná vrstva byla zesíťována v teplovzdušné komoře při teplotě cirkulujícího vzduchu  $140^{\circ}\text{C}$ .

Pro zvlákňování nanovláken bylo použito zařízení s těmito parametry: průměr vynášecího válečku 20 mm, vzdálenost válečku od protielektrody 102 mm, rychlost posuvu materiálu  $0.79 \text{ m.min}^{-1}$ .

Takto připravený rezonanční nanovlákný prvek byl postupně od jednoho do sedmi kusů upnut do měřicí aparatury (kap. 3.1) ve vzdálenosti 5 mm od sebe, vždy do celkové vzdálenosti od odrazivé stěny 35 mm. Například pokud byl měřen jeden prvek, byl umístěn do vzdálenosti 35 mm od odrazivé stěny, pokud byly měřeny dva prvky, byl jeden umístěn do vzdálenosti 35 mm od odrazivé stěny a druhý do vzdálenosti 30 mm od stěny, atd. (obr.43).



Obraz 43: Schematické znázornění sestavy sedmi rezonančních prvků, kde 1) označuje vzduchovou mezeru vždy 5mm a 2) označuje nanovláknou membránu, kde čelní membrána je ve vzdálenosti 35mm od odrazivé stěny.

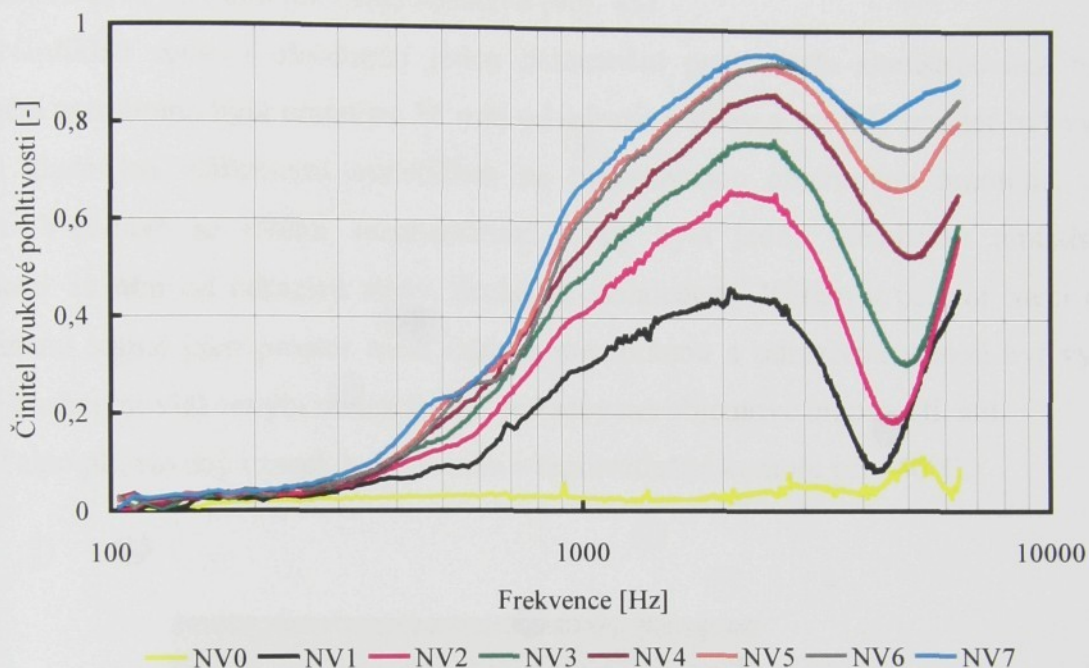
### *Diskuse výsledků*

Obraz 44 vypovídá o rezonančním efektu nanovlákné membrány. Křivky udávají činitele zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci zvuku jednoho až sedmi rezonančních prvků (NV1 – NV7). Resonanční efekt nastává ve všech případech kolem frekvence 2500 Hz, protože plošná hmotnost a s tím i související tuhost membrány zůstává konstantní, prvky mají tedy amplitudu pro určitý mód při stejné frekvenci.



Membrána vykazuje nejen rezonanci, ale také antirezonanci, která je příčinou poklesu pohltivosti. S počtem rezonančních prvků roste činitel zvukové pohltivosti.

Pro úplnost byla změřena frekvenční závislost činitele zvukové pohltivosti prázdné měřicí aparatury. Vidíme, že v oblasti 5 kHz dochází ke zvýšení činitele zvukové pohltivosti prázdného přístroje, která je zřejmě daná jeho geometrií. Tato chyba se nenachází v rezonanční oblasti membrán, proto není třeba tuto pohltivost odečítat.



Obraz 44: Činitel zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci zvuku a počtu rezonančních prvků (0 – 7).

#### 4.3.3. Konstrukce zvukově pohltivého materiálu

I. V kapitole 4.3.2 byl navržen prvek, který vykazuje nejen rezonanci, ale i antirezonanci, kterou je třeba utlumit porózním materiálem.

Vývoj nového zvukově pohltivého materiálu je založen na spojení obou výše zkoumaných prvků (kap. 4.2.1 a 4.2.2) v systém, který je založen na rezonančním efektu nanovlákněné membrány pružně tlumené vlákenným porózním materiálem.

##### Parametry výroby vzorků

Nanovlákněná rezonanční vrstva je vyrobena stejným postupem, který je popsán v kapitole 4.3.2.

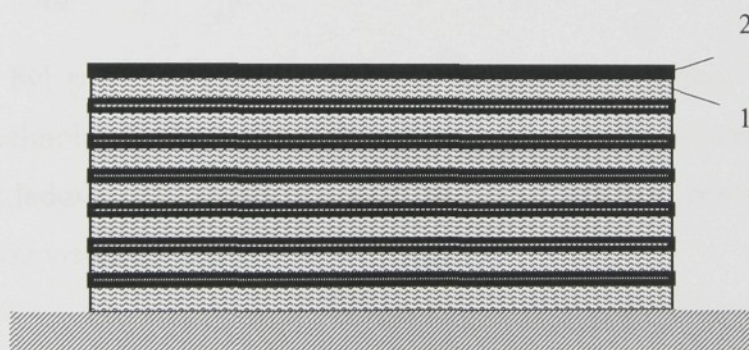


Vláknenný porózní materiál byl připraven na mykacím stroji z 73% bikomponentních vláken typu jádro plášť složených z polyesterového jádra a kopolyesterového pláště o jemnosti 2,2 dtex a 27% polyesterových vláken o jemnosti 6,7 dtex. Vláknenná pavučina byla podélně kladena.

Finální materiál byl sestaven z požadovaného množství rezonančních prvků (1-7 kusů) a vždy doplněn na požadovanou tloušťku 35 mm a objemovou hmotnost  $18 \text{ kg.m}^{-3}$  vláknenným porózním materiálem. Porózní materiál vyplňuje vzduchovou mezeru mezi jednotlivými rezonančními prvky a tlumí tak celou soustavu (obr. 45).

Například sestava obsahující jeden rezonanční prvek byla zkonstruována tak, že rezonanční membrána byla umístěna 35 mm od odrazivé stěny a vzniklý prostor byl vyplněn podélně kladeným vláknenným materiálem na požadovanou objemovou hmotnost celého systému. V sestavě se dvěma rezonančními prvky byla jedna membrána umístěna ve vzdálenosti 35 mm od odrazivé stěny, druhá ve vzdálenosti 30 mm a prostor mezi oběma membránami stejně jako prostor mezi druhou membránou a odrazivou stěnou byl vyplněn podélně kladeným vláknenným materiálem o požadované objemové hmotnosti, atd.

Takto připravený vzorek byl zpevněn v teplovzdušné komoře při  $140^\circ\text{C}$ .



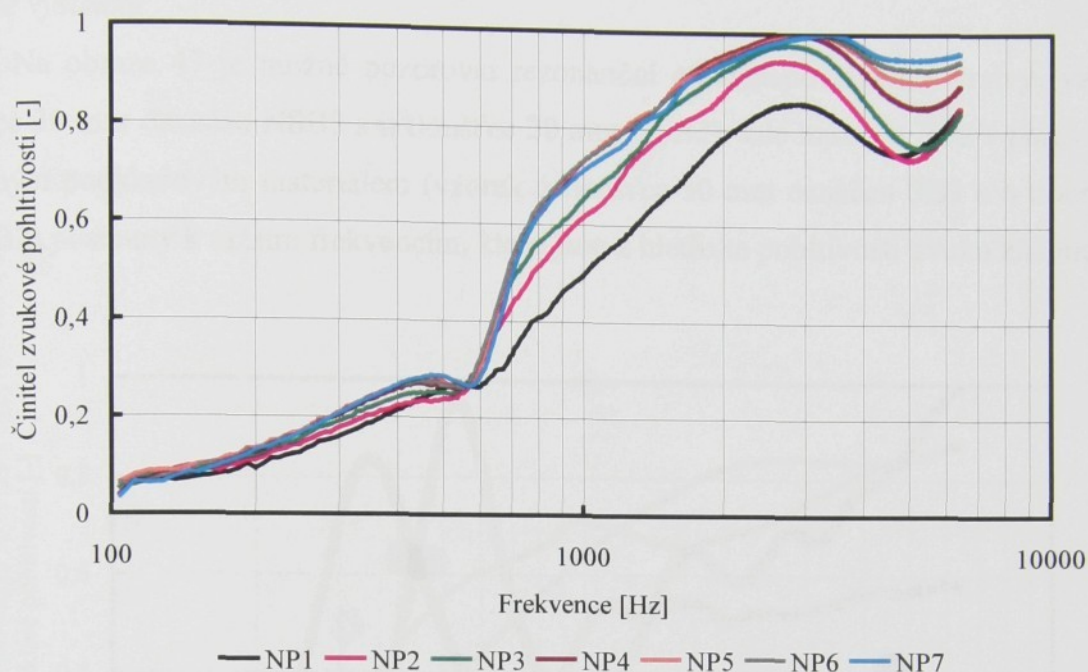
Obraz 45: Schematické znázornění sestavy sedmi rezonančních prvků tlumených porózním materiálem, kde 1) označuje vláknennou podélně kladenou vrstvu o tloušťce 5 mm a 2) označuje nanovláknennou membránu, kde čelní membrána je ve vzdálenosti 35 mm od odrazivé stěny.

### *Diskuse výsledků*

Obraz 46 vypovídá podobně jako obraz 44 o rezonančním efektu nanovláknenné membrány. Z porovnání obou plyne výrazné zvýšení činitele zvukové pohltivosti při zatlumení systému porózním vláknenným materiálem. Z obrazu 46 lze usoudit, že použití více jak čtyř rezonančních prvků v sestavě s výše uvedenými parametry je nadbytečné, jelikož



hodnota činitele zvukové pohltivosti se přidáním dalšího prvku nezvyšuje, pouze v oblasti antirezonance dojde k menšímu poklesu.



Obraz 46: Činitel zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci zvuku a počtu rezonančních prvků (1 – 7).

II. Dále byl prověřen rezonanční efekt nanovlákněné vrstvy tlumené netkanou textilií vyrobenou technologií spun bond. Takto připravený materiál byl vrstven na tloušťku 20mm a 30mm. Podkladový má funkci tlumiče akustické energie rezonátoru, reprezentovaného nanovlákněnou vrstvou.

#### Parametry výroby vzorků

Netkaná textilie o plošné hmotnosti  $20 \text{ g.m}^{-2}$  byla vyrobena z polypropylenu technologií spun bond.

Na netkanou textilií byla nanesena elektrostatickým zvlákňováním vodného roztoku polymeru (kap. 4.3.2) vrstva nanovláken o plošné hmotnosti  $4 \text{ g.m}^{-2}$ . Nanovlákněná vrstva byla zesíťována v teplovzdušné komoře při teplotě cirkulujícího vzduchu  $140^\circ\text{C}$ .

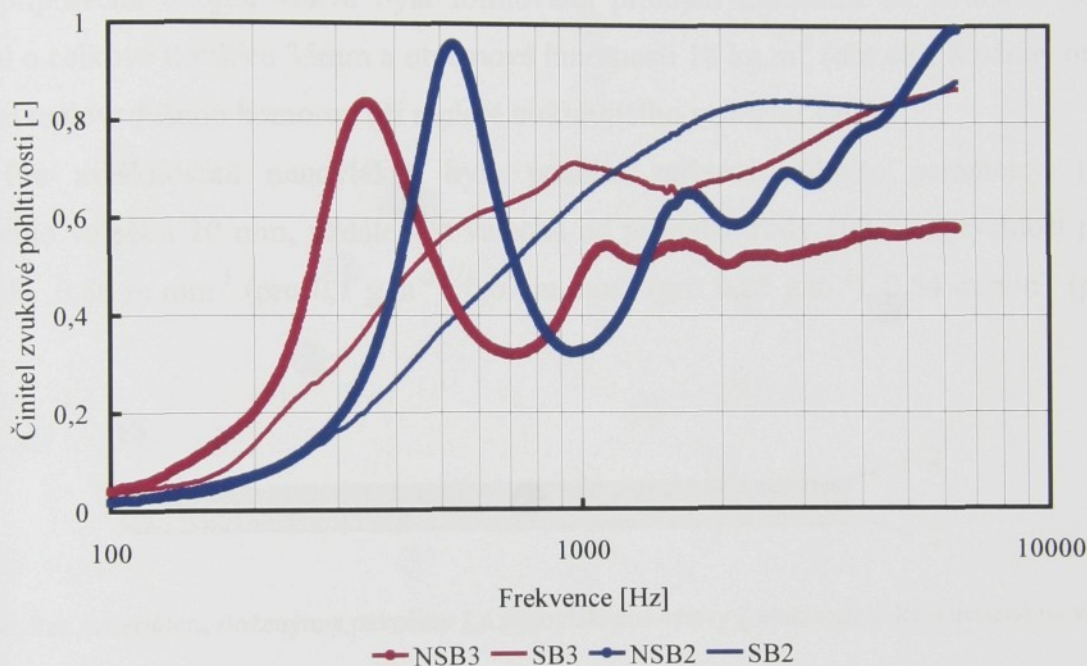
Pro zvlákňování nanovláken bylo použito zařízení s těmito parametry: průměr vynášecího válečku 20 mm, vzdálenost válečku od protielektrody 102 mm, rychlost posuvu materiálu  $0.05 \text{ m.min}^{-1}$ .

Takto připravený materiál byl vrstven na požadovanou tloušťku 20 nebo 30 mm a objemovou hmotnost  $64 \text{ kg.m}^{-3}$ . Podobně byl sestaven referenční vzorek ze samotné netkané

textilie vyrobené technologií spun bond navrstvené na stejnou tloušťku 20 nebo 30 mm a objemovou hmotnost  $95 \text{ kg.m}^{-3}$ .

#### *Diskuse výsledků*

Na obraze 47 je možné pozorovat rezonanční efekt nanovlákněné vrstvy (vzorek o tloušťce 30 mm označen NSB3 a o tloušťce 20 mm NSB2), kde maxima jsou v porovnání se samotným podkladovým materiálem (vzorek o tloušťce 30 mm označen SB3 a o tloušťce 20 mm SB2) posunuty k nižším frekvencím, které jsou z hlediska pohltivosti zvuku žádoucí.



Obraz 47: Činitel zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci zvuku a tloušťce vzorku (20 a 30 mm).

#### **4.3.4. Plošné hmotnosti rezonančního prvku**

Tato kapitola diskutuje vliv plošné hmotnosti nanovlákněné membrány na velikost činitele zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci zvuku.

Jednotlivé rezonanční prvky jsou sdruženy do jednoho rezonančního systému položením těchto prvků na sebe. Vrstvením rezonančních elementů je snaha vyrobit materiál, který díky rezonanční vrstvě nanovláken pohltí zvuk o nízkých frekvencích a zároveň prostřednictvím pavučiny také zvuk o vyšších frekvencích.

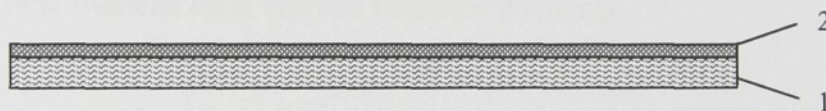


I. Nejprve je sledován vliv plošné hmotnosti rezonanční nanovlákněné membrány, která není tlumena dalším porózním materiálem, mimo pavučiny, na které je elektrostaticky nanesena.

#### Parametry výroby vzorků

Vlákněná pavučina o plošné hmotnosti  $11 \text{ g.m}^{-2}$  byla připravena na mykacím stroji z bikomponentních vláken typu jádro plášť složených z polyesterového jádra a kopolyesterového pláště o jemnosti 5,3 dtex. Na vlákněnou pavučinu byla nanesena elektrostatickým zvlákňováním vrstva nanovláken o plošné hmotnosti 0,1; 0,25 a 0,5  $\text{g.m}^{-2}$ . Takto připravená dvojitá vrstva byla formována příčným kladením na zvukově pohltivý materiál o celkové tloušťce 35mm a objemové hmotnosti  $18 \text{ kg.m}^{-3}$  (obr.48). Složený materiál prochází teplovzdušnou komorou při teplotě cirkulujícího vzduchu  $140^\circ\text{C}$ .

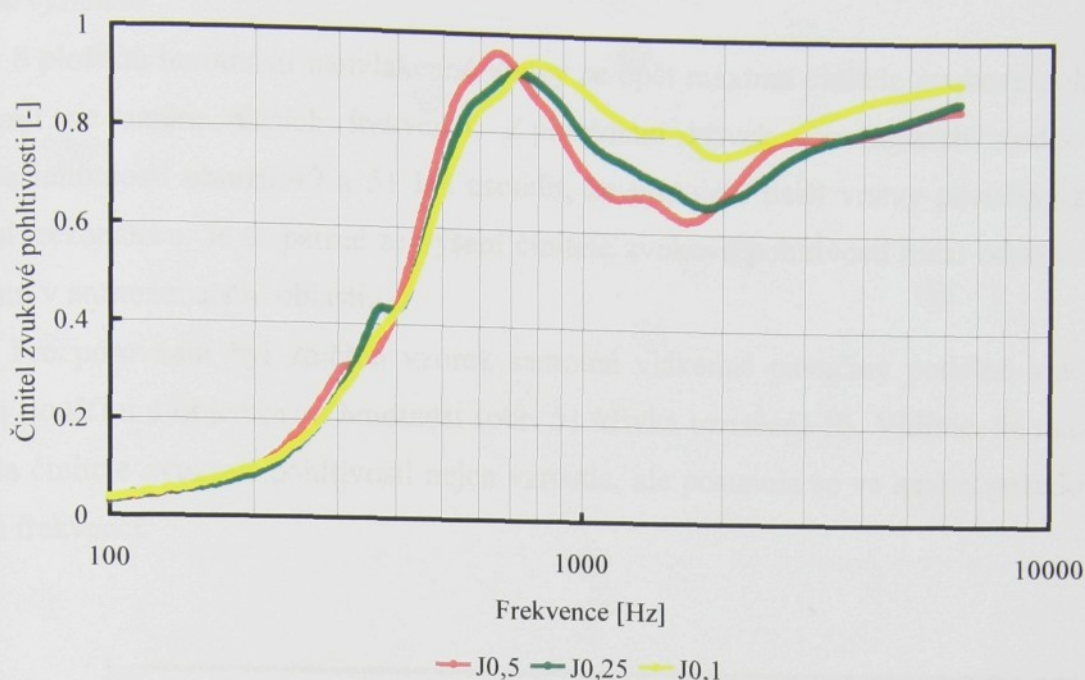
Pro zvlákňování nanovláken bylo použito zařízení s těmito parametry: průměr vynášecího válečku 20 mm, vzdálenost válečku od protielektrody 102 mm, rychlost posuvu materiálu  $0,86 \text{ m.min}^{-1}$  (pro  $0,1 \text{ g.m}^{-2}$ ),  $0,67 \text{ m.min}^{-1}$  (pro  $0,25 \text{ g.m}^{-2}$ ),  $0,54 \text{ m.min}^{-1}$  (pro  $0,5 \text{ g.m}^{-2}$ ).



Obraz 48: Řez materiálem složeným z pavučiny 1 a nanovlákněné vrstvy 2 elektrostaticky nanesené na vrstvu 1.

#### Diskuse výsledků

S plošnou hmotností nanovlákněné vrstvy se maxima činitele zvukové pohltivosti posouvají ve směru nižších frekvencí (obr.49). Zvuková pohltivost v oblasti antirezonancí s plošnou hmotností klesá, je to způsobeno nedostatečným zatlumením rezonanční nanovlákněné vrstvy vlákněnou pavučinou. Tloušťka a objemová hmotnost vzorku je vzhledem k vysokému maximu činitele zvukové pohltivosti dostatečná.

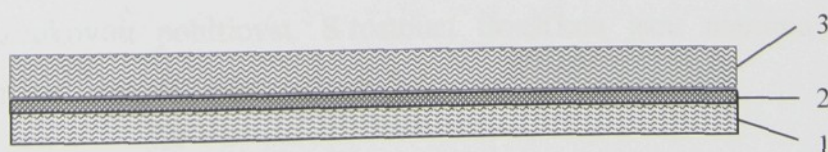


Obraz 49: Činitel zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci zvuku a plošné hmotnosti nanovláknenné vrstvy (0,5; 0,25 a 0,1  $\text{g.m}^{-2}$ ).

II. V tomto případě je sledován vliv plošné hmotnosti rezonanční nanovláknenné membrány, která je tlumena další vrstvou vláknenné pavučiny.

#### Parametry výroby vzorků

Rezonanční nanovláknenný materiál je vyroben se stejnými parametry jako v odsazení I. Rychlost posuvu materiálu byla  $0,86 \text{ m.min}^{-1}$  (pro  $0,1 \text{ g.m}^{-2}$ ),  $0,67 \text{ m.min}^{-1}$  (pro  $0,25 \text{ g.m}^{-2}$ ),  $0,54 \text{ m.min}^{-1}$  (pro  $0,5 \text{ g.m}^{-2}$ ),  $0,35 \text{ m.min}^{-1}$  (pro  $1 \text{ g.m}^{-2}$ ) a  $0,14 \text{ m.min}^{-1}$  (pro  $2 \text{ g.m}^{-2}$ ). Nanovláknenná vrstva o plošné hmotnosti  $0,1$ ;  $0,25$ ;  $0,5$ ;  $1$  a  $2 \text{ g.m}^{-2}$ , nanesená na mykanou vláknennou vrstvu je v kombinaci s další jednou vrstvou vláknenné pavučiny a formována příčným kladením na zvukově pohltivý materiál o celkové tloušťce 25 nebo 35 mm a objemové hmotnosti  $18 \text{ kg.m}^{-3}$  (obr.50).



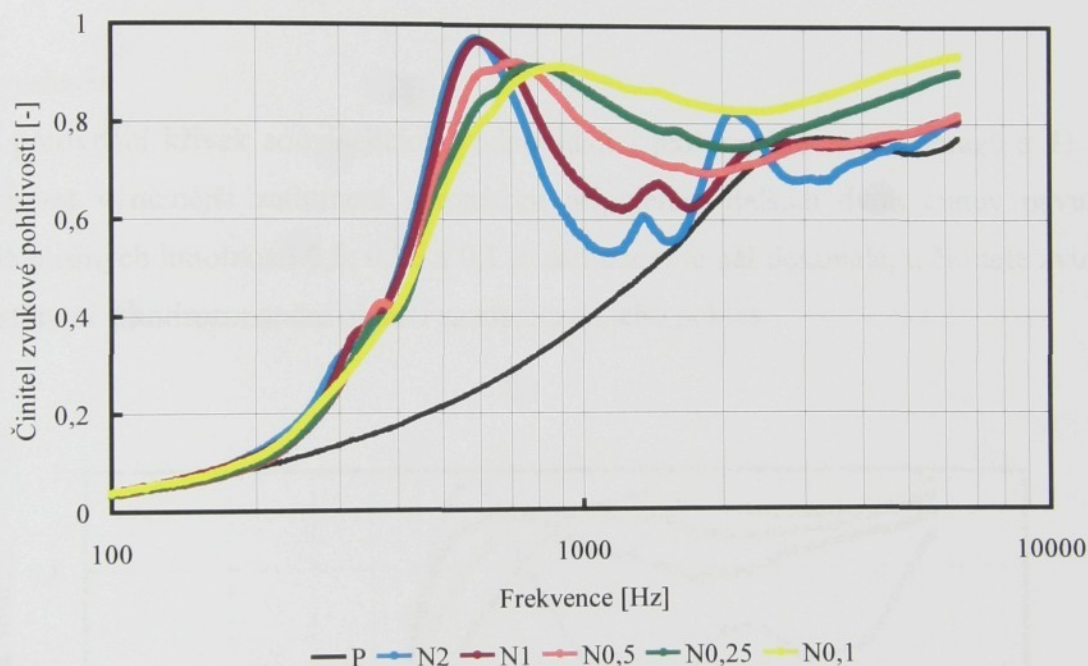
Obraz 50: Řez materiálem složeným z pavučiny 1, nanovláknenné vrstvy 2 elektrostatičsky nanesené na vrstvu 1 a jedné vrstvy pavučiny 3.



## Diskuse výsledků

S plošnou hmotností nanvlákněné vrstvy se opět maxima činitele zvukové pohltivosti posouvají ve směru nižších frekvencí. Z porovnání křivek souvisejících s odpovídající plošnou hmotností obrazů 49 a 51 lze usoudit, že připojení další vrstvy pavučiny zlepšuje tlumení rezonátoru. Je to patrné ze zvýšení činitele zvukové pohltivosti mezi odpovídajícími křivkami v antirezonanční oblasti.

Pro porovnání byl změřen vzorek samotné vlákně pavučiny podélně kladené na stejnou tloušťku a objemovou hmotnost (obr. 51 křivka označená P). Vidíme, že maximální hodnota činitele zvukové pohltivosti nejen vzrostla, ale posunula se ve směru požadovaných nižších frekvencí.



Obraz 51: Číselník zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci zvuku a plošné hmotnosti nanovlákněné vrstvy (2; 1; 0,5; 0,25 a 0,1  $\text{g.m}^{-2}$ ) Celková tloušťka materiálu je 35 mm.

Z porovnání obrazu 51 a obrazu 75 (Příloha 2) lze pozorovat vliv celkové tloušťky materiálu na zvukovou pohltivost. S rostoucí tloušťkou jsou maxima činitele zvukové pohltivosti opět posunuta ve směru nižších frekvencí.

III. V tomto případě je sledován vliv plošné hmotnosti rezonanční nanovlákněné membrány, která je tlumena dalšími dvěma vrstvami vlákně pavučiny.

### Parametry výroby vzorků

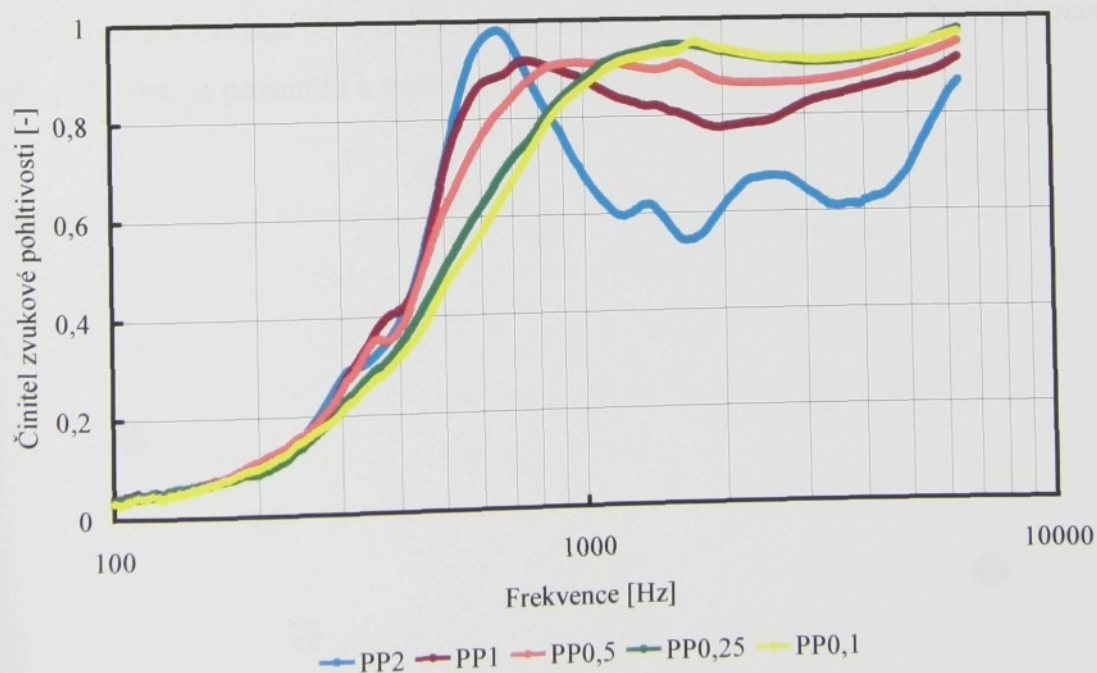
Materiál je vyroben se stejnými parametry jako v odsazení I a II. Nanovláknenná vrstva nanesená na mykanou vláknennou vrstvu je v kombinaci se dvěma vláknennými pavučinami a formována příčným kladením na zvukově pohltivý materiál o celkové tloušťce 25 nebo 35 mm a objemové hmotnosti 13 nebo 18 kg.m<sup>-3</sup> (obr.52).



Obraz 52: Řez materiálem složeným z pavučiny 1, nanovláknenné vrstvy 2 elektrostaticky nanesené na vrstvu 1 a dvou vrstev pavučiny 3.

### Diskuse výsledků

Z porovnání křivek souvisejících s odpovídající plošnou hmotností obrazů a 51 a 53 lze pozorovat výraznější zatlumení rezonátoru připojením dalších dvou vrstev pavučiny. V případě plošných hmotností 0,5; 0,25 a 0,1 je zatlumení téměř dokonalé, u činitele zvukové pohltivosti není v antirezonanční oblasti zaznamenán jeho pokles.



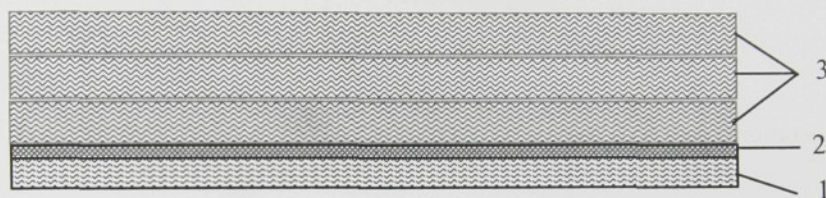
Obraz 53: Činitel zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci zvuku a plošné hmotnosti nanovláknenné vrstvy (2; 1; 0,5; 0,25 a 0,1 g.m<sup>-2</sup>).



Z porovnání obrazu 53 a obrazu 76 (Příloha 2) lze opět pozorovat vliv celkové tloušťky materiálu na zvukovou pohltivost. Podobně lze z obrazů 53 a 77 (Příloha 2) sledovat vliv objemové hmotnosti materiálu na hodnoty činitele zvukové pohltivosti. V obou případech jak s tloušťkou tak s objemovou hmotností materiálu rezonanční frekvence klesá a maximum činitele zvukové pohltivosti stoupá.

#### *Parametry výroby vzorků*

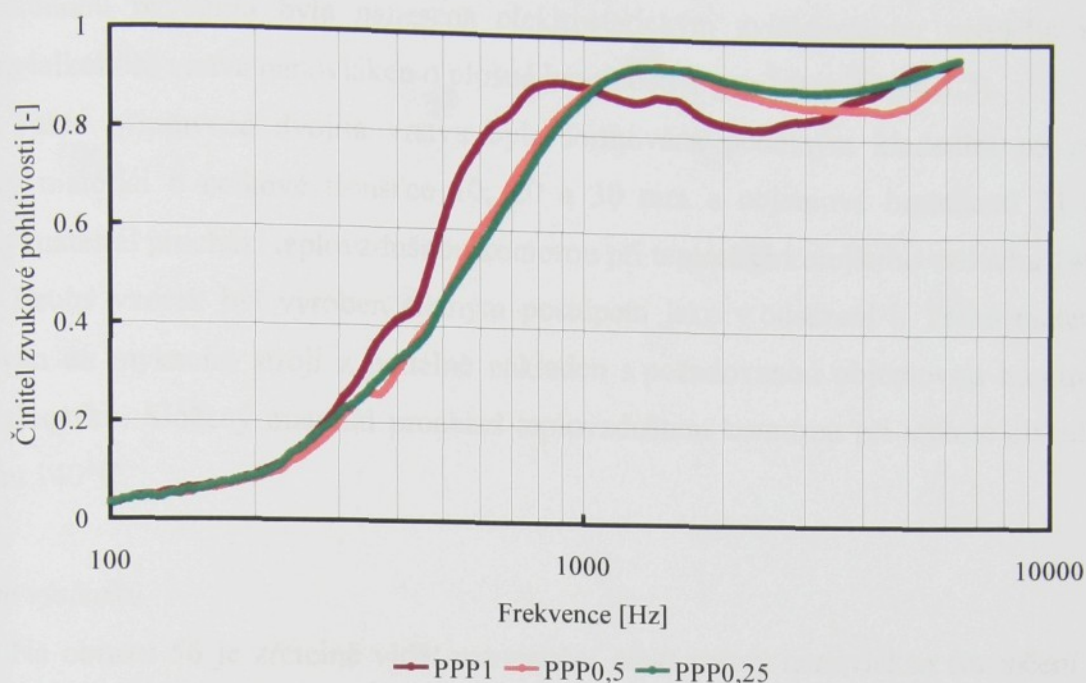
Materiál je vyroben se stejnými parametry jako v předchozím odstavci. Nanovláknenná vrstva nanesená na mykanou vláknennou vrstvu je v kombinaci se dvěma vláknennými pavučinami (obr.54).



Obraz 54: Řez materiálem složeným z pavučiny 1, nanovláknenné vrstvy 2 elektrostaticky nanesené na vrstvu 1 a třech vrstev pavučiny 3.

#### *Diskuse výsledků*

Ve srovnání obrazu 53 s obrazem 55 není ztlumení výraznější. Naopak maximum zvukové pohltivosti je posunuto k nežádoucím vyšším frekvencím.



Obraz 55: Činitel zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci zvuku a plošné hmotnosti nanovláknenné vrstvy (1; 0,5 a 0,25 g.m<sup>-2</sup>).

Z porovnání obrazu 55 a obrazu 78 (Příloha 2) lze opět pozorovat vliv celkové tloušťky materiálu na zvukovou pohltivost. Podobně lze z obrazů 55 a 79 (Příloha 2) sledovat vliv objemové hmotnosti materiálu na hodnoty činitele zvukové pohltivosti. V obou případech jak s tloušťkou tak s objemovou hmotností materiálu rezonanční frekvence klesá ale maximum činitele zvukové pohltivosti klesá také.

#### 4.3.5. Rezonanční efekt nanovláknenné vrstvy

I. Zkoumaný efekt rezonátoru spočívá v uspořádání nanovláken v ploše. Je nezbytné potvrdit tuto hypotézu experimentem, ve kterém je porovnán vliv distribuce nanovláken na zvukovou pohltivost. V prvním případě nanovlákn tvoří vrstvu, v druhém případě jsou v podobě shluků distribuována v celém objemu vzorku.

##### Parametry výroby vzorků

i. Vlákenná pavučina o plošné hmotnosti 11g/m<sup>2</sup> byla připravena na mykacím stroji z 73% bikomponentních vláken typu jádro plášť složených z polyesterového jádra a kopolyesterového pláště o jemnosti 2.2 dtex a 27% polyesterových vláken o jemnosti 6.7dtex.



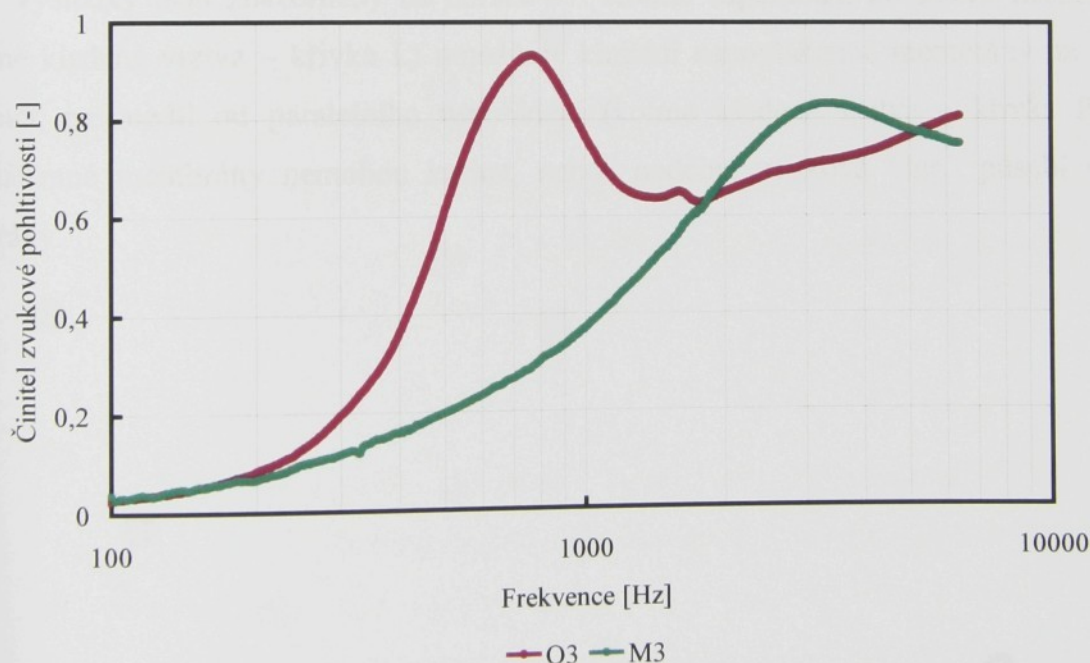
Na vláknennou pavučinu byla nanесena elektrostatickým zvlákňováním vodného roztoku polyvinylalkoholu vrstva nanovláken o plošné hmotnosti  $1 \text{ g.m}^{-2}$  (viz. kap 4.3.2).

Takto připravená dvojité vrstva byla formována podélným kladením na zvukově pohltivý materiál o celkové tloušťce 10, 20 a 30 mm a objemové hmotnosti  $21 \text{ kg.m}^{-3}$ . Složený materiál prochází teplovzdušnou komorou při teplotě cirkulujícího vzduchu  $140^{\circ}\text{C}$ .

ii. Druhý vzorek byl vyroben stejným postupem jako v odsazení i. Tento materiál byl zpracován na mykacím stroji a podélně nakladen s požadovanou objemovou hmotností na danou tloušťku. Složený materiál prochází teplovzdušnou komorou při teplotě cirkulujícího vzduchu  $140^{\circ}\text{C}$ .

### Diskuse výsledků

Na obrazu 56 je zřetelně vidět rezonanční efekt vrstvy nanovláken (označení křivky O3) oproti materiálu, ve kterém jsou nanovlákná v podobě shluků distribuována v celém jeho objemu (označení křivky M3). Lze tedy potvrdit hypotézu, že funkce rezonátoru je daná jeho spojitou plochou určité plošné hmotnosti, která kmitá jako membrána při určité vlastní frekvenci. Obraz 56 znázorňuje materiál o tloušťce 30mm.



Obraz 56: Činitel zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci zvuku a způsobu přípravy pohltivého systému. Celková tloušťka materiálu je 30 mm.

Materiály o tloušťce 20 mm jsou znázorněny na obraze 80 (příloha 2) a materiály o tloušťce 10 mm na obraze 81 (příloha 2). V obou případech lze konstatovat již zmíněné závěry, které potvrzují rezonanční efekt nanovlákněné vrstvy.

II. Nanovlákněná vrstva byla v materiálu uspořádána jednak podélně a jednak kolmo na směr šíření podélné zvukové vlny a byl zkoumán rezonanční efekt nanovlákněné vrstvy na zvukovou pohltivost.

#### *Parametry výroby vzorků*

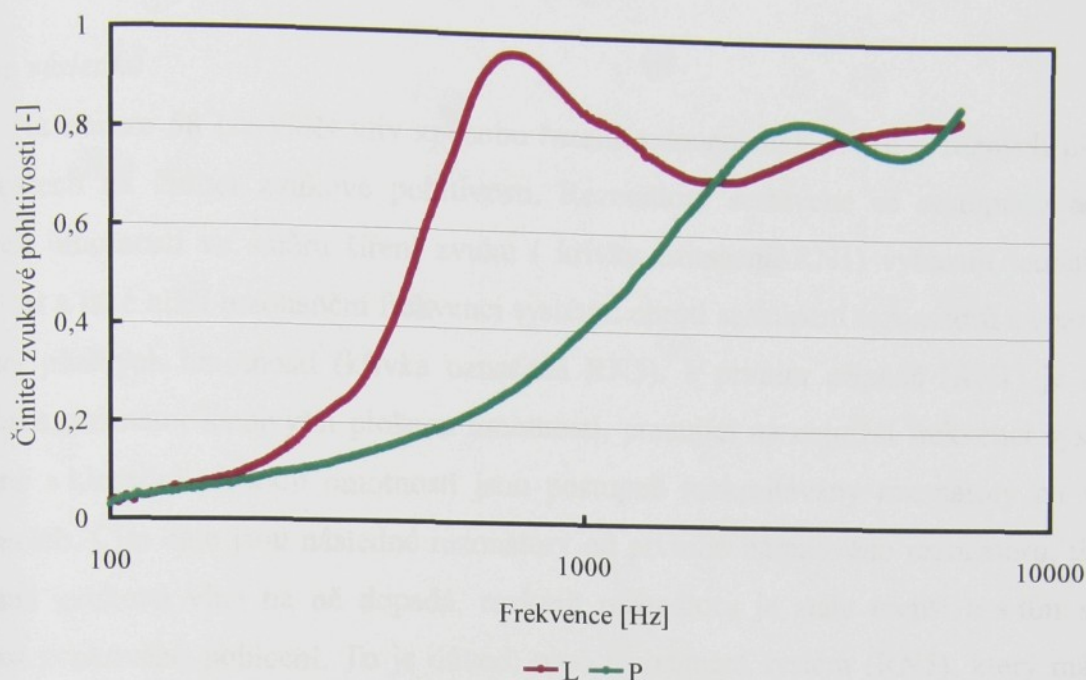
Materiál byl vyroben jako v odsazení I. Vrstva nanovláken měla plošnou hmotnost  $0,5 \text{ g.m}^{-2}$ . Objemová hmotnost výsledného materiálu byla  $18 \text{ kg.m}^{-3}$  a tloušťka 35mm.

- i. Nanovlákněná vrstva nanesená na vlákněné pavučině byla podélně kladena a zajistila tak kolmé uspořádání membrán ke směru šíření podélné zvukové vlny.
- ii. Nanovlákněná vrstva nanesená na vlákněné pavučině byla kolmo kladena a zajistila tak paralelní uspořádání membrán se směrem šíření podélné zvukové vlny.

#### *Diskuse výsledků*

Výsledky jsou znázorněny na obraze 57. Kolmé uspořádání ke směru šíření zvuku (podélně kladená vrstva – křivka L) umožňuje kmitání nanovlákněné membrány na vlastní frekvenci, na rozdíl od paralelního uspořádání (kolmo kladená vrstva – křivka P), kde nanovlákněné membrány nemohou kmitat, neboť podélná zvuková vlna působí v ploše membrány.





Obraz 57: Činitel zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci zvuku a způsobu přípravy pohltivého systému. Plošná hmotnost nanovláknenné vrstvy je  $0,5 \text{ g.m}^{-2}$ .

Stejný efekt lze pozorovat i na obraze 82 (příloha 2).

#### 4.3.6. Sled rezonančních prvků

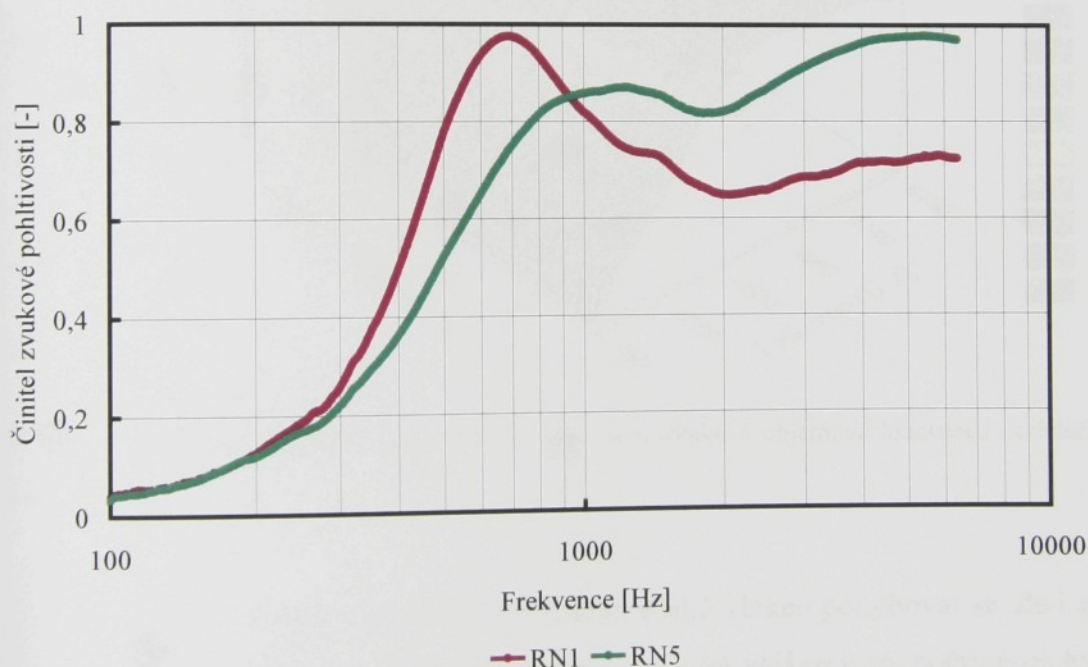
Studie [7] zmiňuje vliv způsobu řazení rezonančních prvků o různých plošných hmotnostech. V této kapitole je zkoumán činitel zvukové pohltivosti rezonátorů pěti plošných hmotností sestavených jednak v pořadí stoupajících plošných hmotností ve směru šíření zvuku a jednak v pořadí klesajících plošných hmotností.

##### Parametry výroby vzorků

Vláknenná pavučina o plošné hmotnosti  $11 \text{ g/m}^2$  byla připravena na mykacím stroji z 73% bikomponentních vláken typu jádro plášť složených z polyesterového jádra a kopolyesterového pláště o jemnosti 2.2 dtex a 27% polyesterových vláken o jemnosti 6.7dtex. Na vláknennou pavučinu byla nanесena elektrostatickým zvlákňováním vodného roztoku polyvinylalkoholu vrstva nanovláken o plošné hmotnosti 0,1; 0,25; 0,5; 1 a  $2 \text{ g.m}^{-2}$  (viz. kap 4.3.2). Vzorek byl sestaven z nanovrstev uvedených plošných hmotnostech v pořadí jednak stoupajících plošných hmotností ve směru šíření zvuku a jednak klesajících plošných hmotnostech.

## Diskuse výsledků

Na obraze 58 lze vidět vliv způsobu řazení rezonančních prvků o různých plošných hmotnostech na činitel zvukové pohltivosti. Rezonátory sestavené se sestupnou tendencí plošných hmotností ve směru šíření zvuku (křivka označená RN1) vykazují jednak vyšší pohltivost a také nižší rezonanční frekvenci systému oproti seskupení rezonátorů s vzestupnou tendencí plošných hmotností (křivka označená RN5). V prvním případě (RN1) je nejprve rozkmitán rezonátor s nejvyšší plošnou hmotností, pracující na nejnižší frekvenci systému a následně s klesající plošnou hmotností jsou postupně rozkmitávány rezonátory na vyšších frekvencích. Čím dále jsou následné rezonátory od prvního nárazového rezonátoru, tím více utlumená zvuková vlna na ně dopadá, rozkmit rezonátoru je stále menší a s tím spojená účinnost zvukového pohlcení. To je důvod, proč rezonanční systém (RN5), který má prvek pracující na nejnižší frekvenci zařazen jako poslední je v nižších frekvencích méně účinný než rezonanční systém s prvkem pracujícím na nejnižší frekvenci zařazeným jako první (RN1).



Obraz 58: Činitel zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci zvuku a způsobu přípravy pohltivého systému.

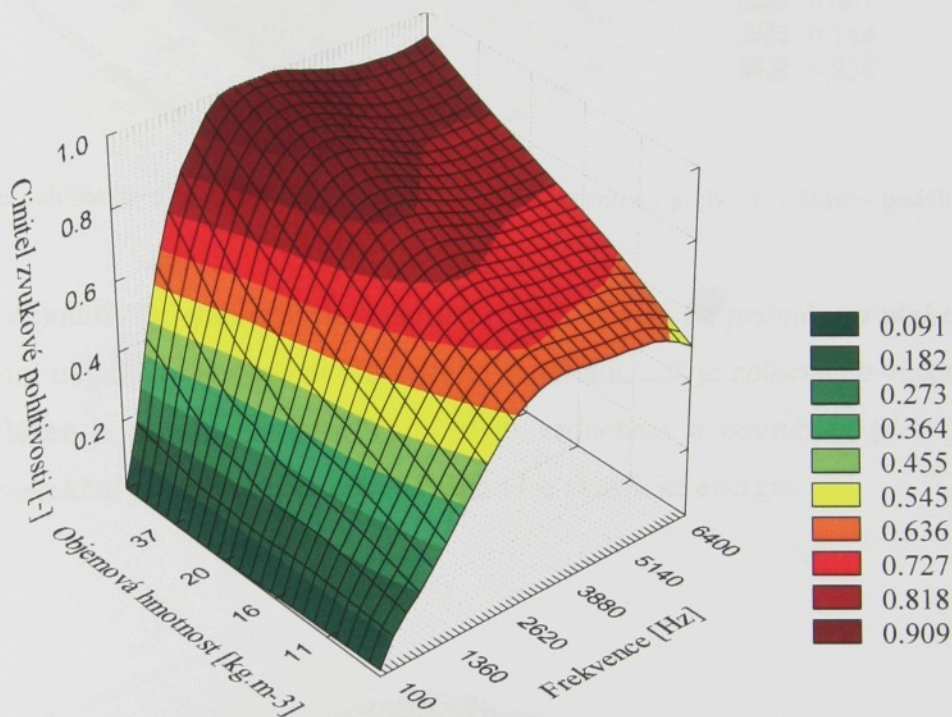


#### 4.4. SHRUTÍ EXPERIMENTÁLNÍCH VÝSLEDKŮ

Vývoj zvukově pohltivého materiálu s použitým rezonančním prvkem je založen na výzkumu jednotlivých komponent materiálu, tedy výzkumu parametrů zásadních pro velikost činitele zvukové pohltivosti.

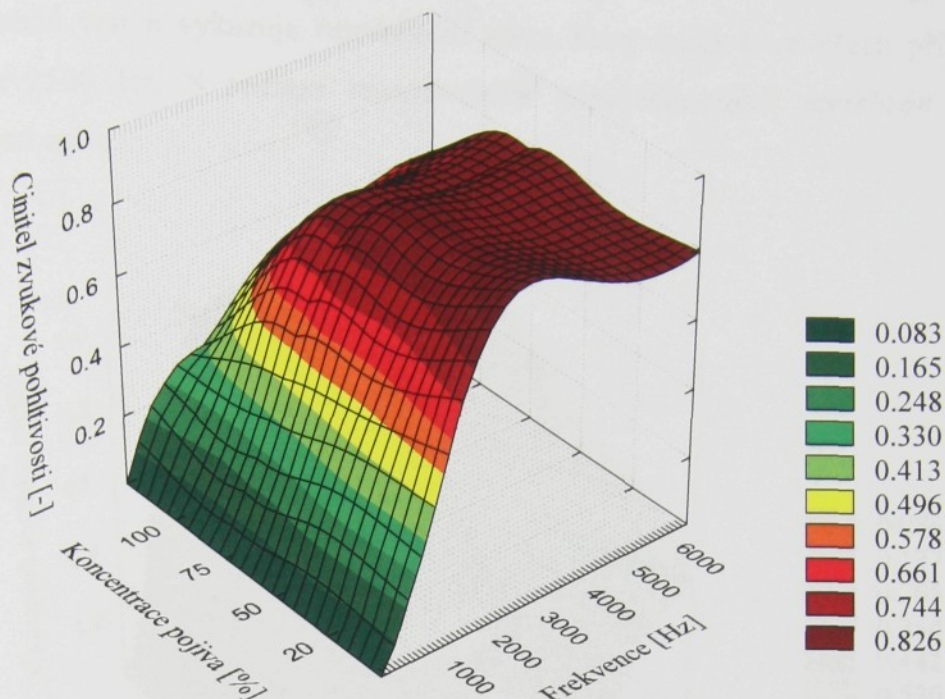
V této kapitole budou pro přehlednost shrnuty výsledky experimentů, které jsou stěžejní při vývoji akustického materiálu s vysokou zvukovou pohltivostí v širokém frekvenčním pásmu.

Činitel zvukové pohltivosti vláknenných materiálů roste s jejich *objemovou hmotností*.



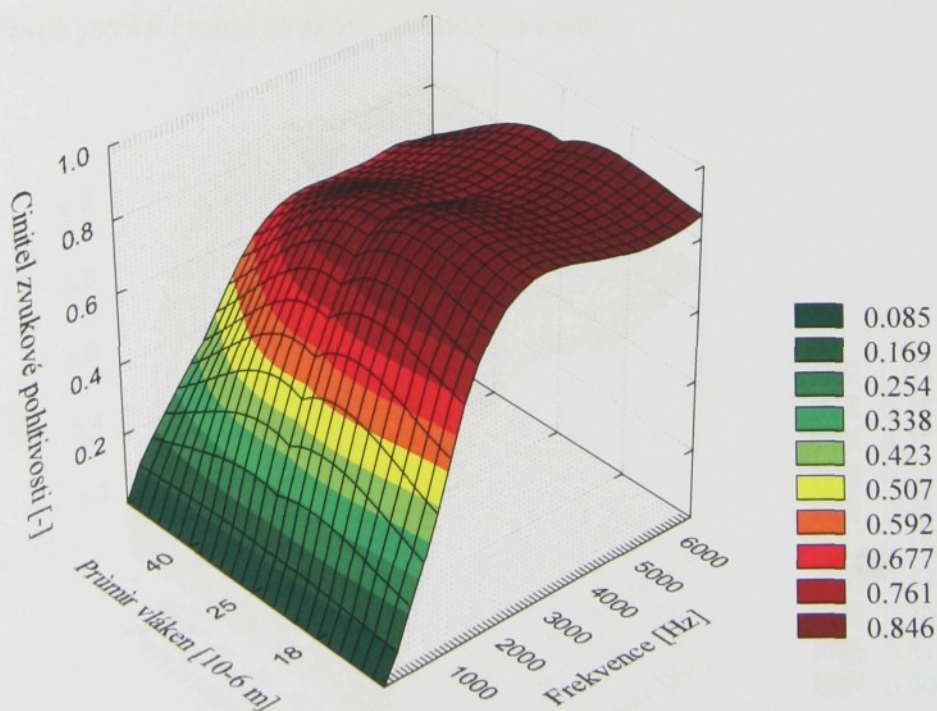
Obraz 59: Činitel zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci zvuku a objemové hmotnosti podélně kladené netkané textilie

Činitel zvukové pohltivosti roste s možností úseků vláken pohybovat se ale i na délce těchto úseků, která je nepřímo úměrná *koncentraci pojivých vláken* resp. počtu pojících bodů.



Obraz 60: Činitel zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci zvuku a koncentraci pojivých vláken v podélně kladené netkané textilií

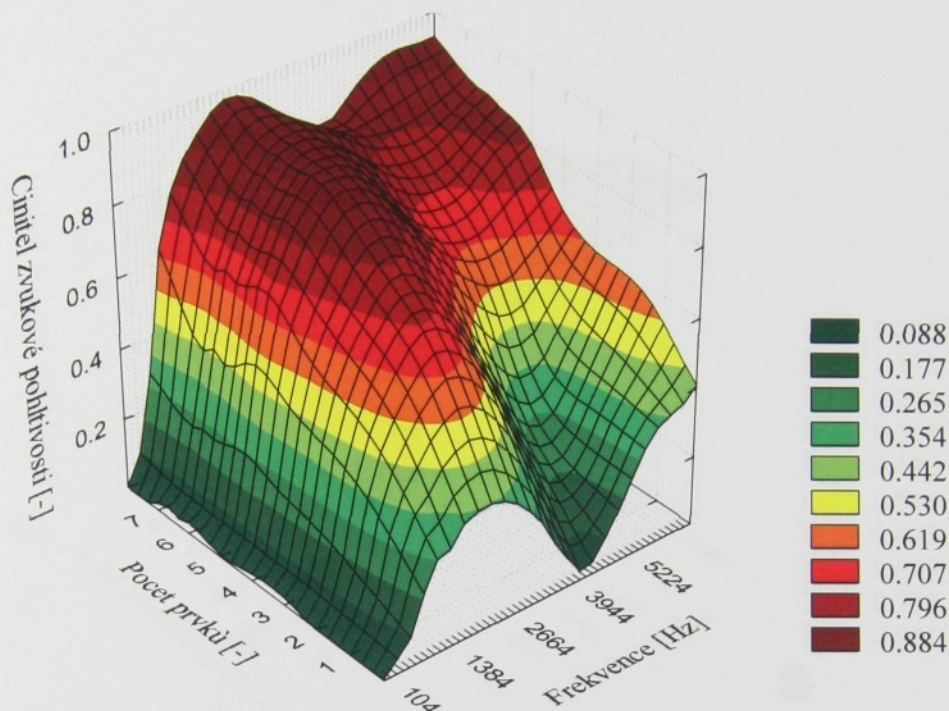
Činitel zvukové pohltivosti vláknenných materiálů roste s klesajícím **průměrem vláken** při zachování konstantní objemové hmotnosti vláknenného materiálu, což je způsobeno větším měrným povrchem vláken o menší jemnosti. Tření mezi vzduchem a povrchem póru je realizováno na větší interakční ploše a je tak spotřebováno více akustické energie.



Obraz 61: Činitel zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci zvuku a průměru vláken v podélně kladené netkané textilií

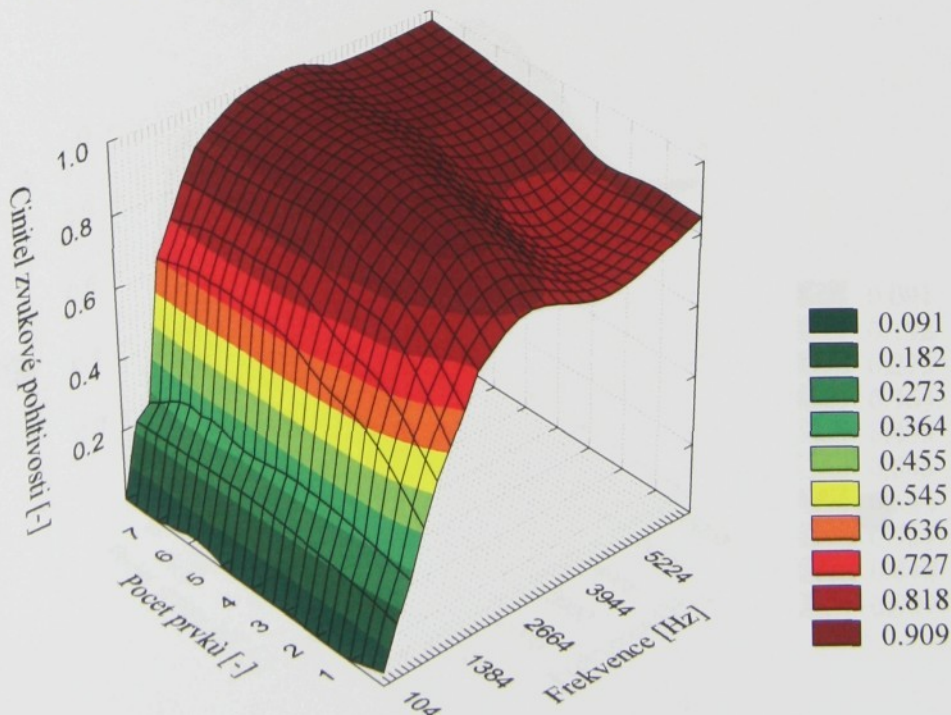


Nanovláknenná vrstva vykazuje **rezonanční efekt**, který nastává ve všech případech kolem frekvence 2500 Hz. S **počtem rezonančních nanovláknenných membrán** činitel zvukové pohltivosti roste.



Obraz 62: Činitel zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci zvuku a počtu rezonančních membrán.

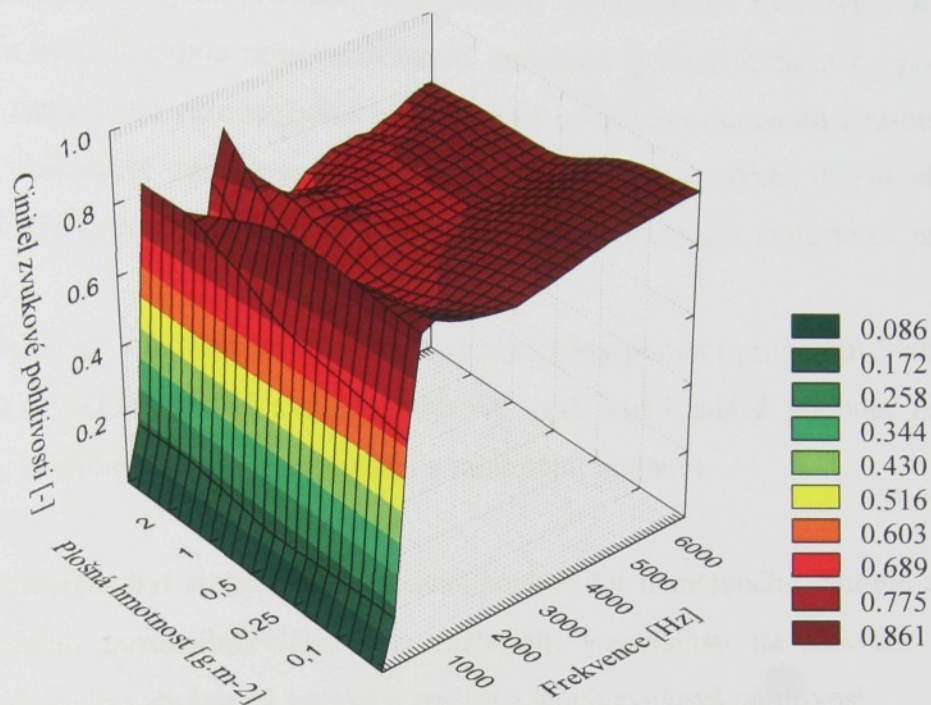
Obraz 63 vypovídá podobně jako předchozí obraz o **rezonančním efektu** nanovláknenné membrány, v tomto případě je rezonátor tlumen vrstvou vláknenné pavučiny. S **počtem rezonančních prvků** činitel zvukové pohltivosti roste.



Obraz 63: Činitel zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci zvuku a počtu rezonančních prvků.

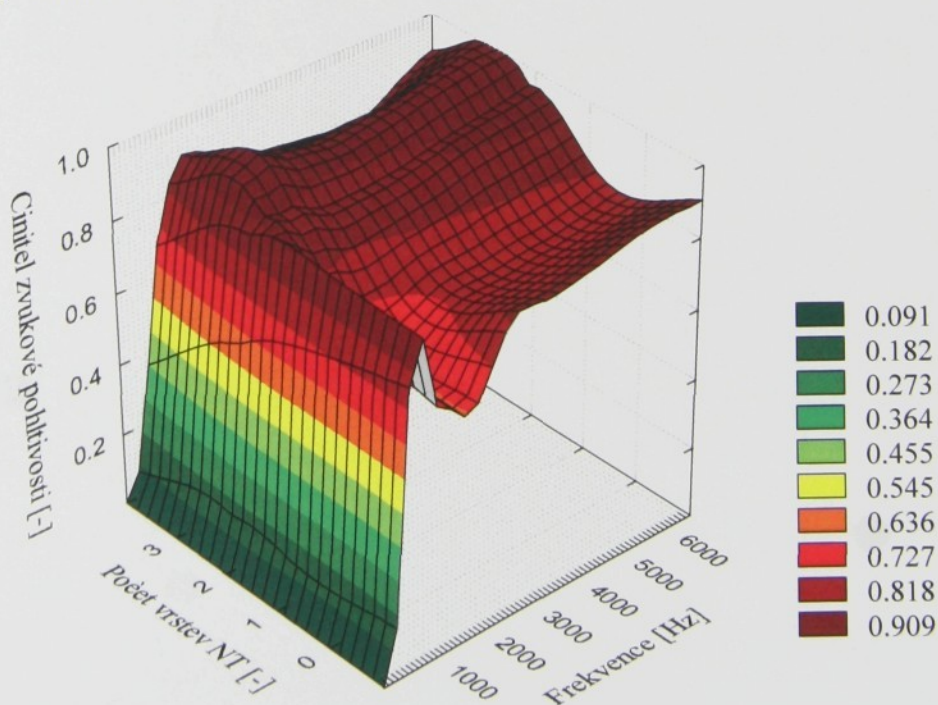


Maximum činitele zvukové pohltivosti se s **plošnou hmotností** nanovláknenné membrány posouvá k požadovaným nižším frekvencím. Vyšší plošná hmotnost membrány však způsobuje větší pokles činitele zvukové pohltivosti v antirezonanční oblasti.



Obraz 64: Činitel zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci zvuku a plošné hmotnosti rezonančních nanovláknenných membrán.

S počtem vláknenných pavučin se zvyšuje **tlumení** soustavy a nedochází k poklesům činitele zvukové pohltivosti v antirezonanční oblasti.



Obraz 65: Činitel zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci zvuku a počtu tlumících vláknenných vrstev.



## 4.5. STATISTICKÉ VYHODNOCENÍ

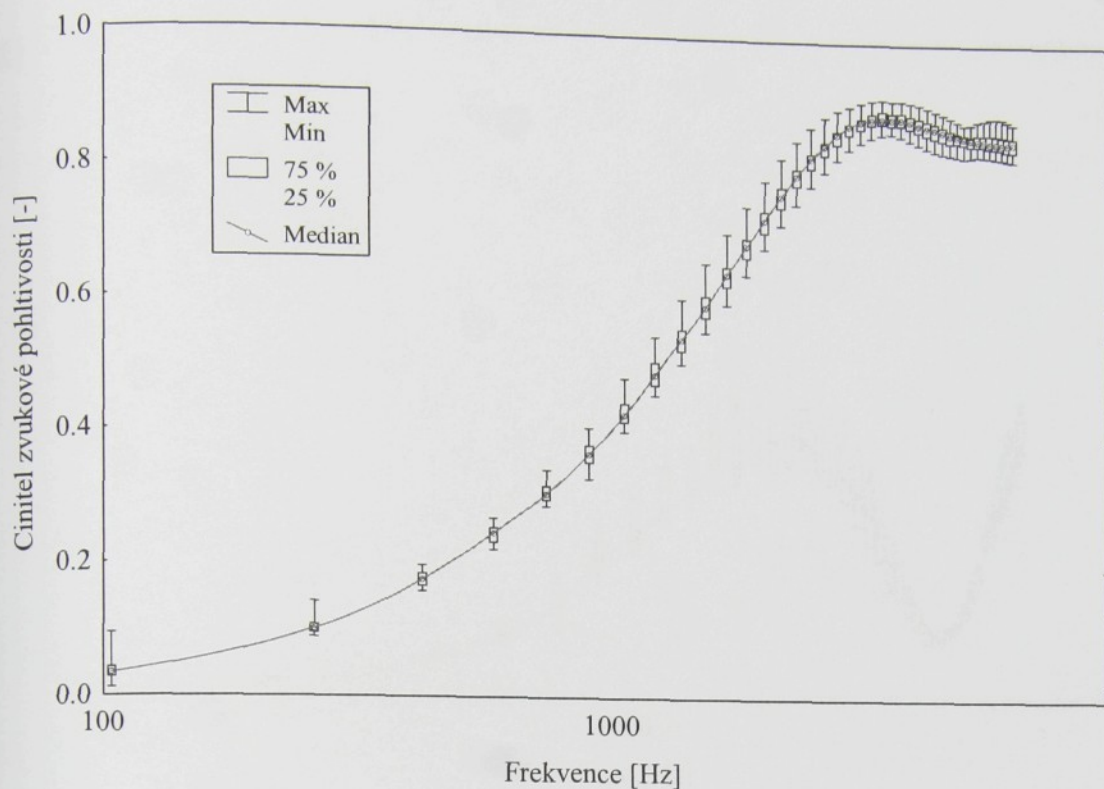
Statistické vyhodnocení naměřených hodnot bylo provedeno pro všechny experimenty. V této kapitole jsou pro názornost uvedeny tři statistická zpracování dat, která reprezentují chybu měření danou nestejnoměrností materiálu (jednak samotného porózního materiálu, jednak samotného rezonančního prvku a také porózního materiálu s rezonančním prvkem) a jedno statistické zpracování, které reprezentuje chybu měření danou uložením jednoho vzorku v měřicím zařízení. Přístroj je před každým měřením kalibrován pro daný materiál.

Soubory dat byly vyhodnoceny a graficky znázorněny pomocí programu Statistica 5. Pro jednoduchost a názornost byl zvolen krabicový graf, který udává hodnotu mediánu, spodního kvartilu, horního kvartilu a maximální a minimální hodnotu.

I. V tomto odsazení byl statisticky zpracován soubor dat naměřeného činitele zvukové pohltivosti samotného porózního vlákenného materiálu v závislosti na frekvenci zvuku. Z jednoho materiálu bylo vybráno 29 vzorků a změřena jejich zvuková pohltivost.

### *Diskuse výsledků*

Variabilita porózního vlákenného materiálu není velká. Statistické vyhodnocení je vzhledem k velkému počtu dat vypovídající.



Obraz 66: Statistické zpracování dat činitele zvukové pohltivosti 29 vzorků jednoho porózního materiálu v závislosti na frekvenci zvuku.

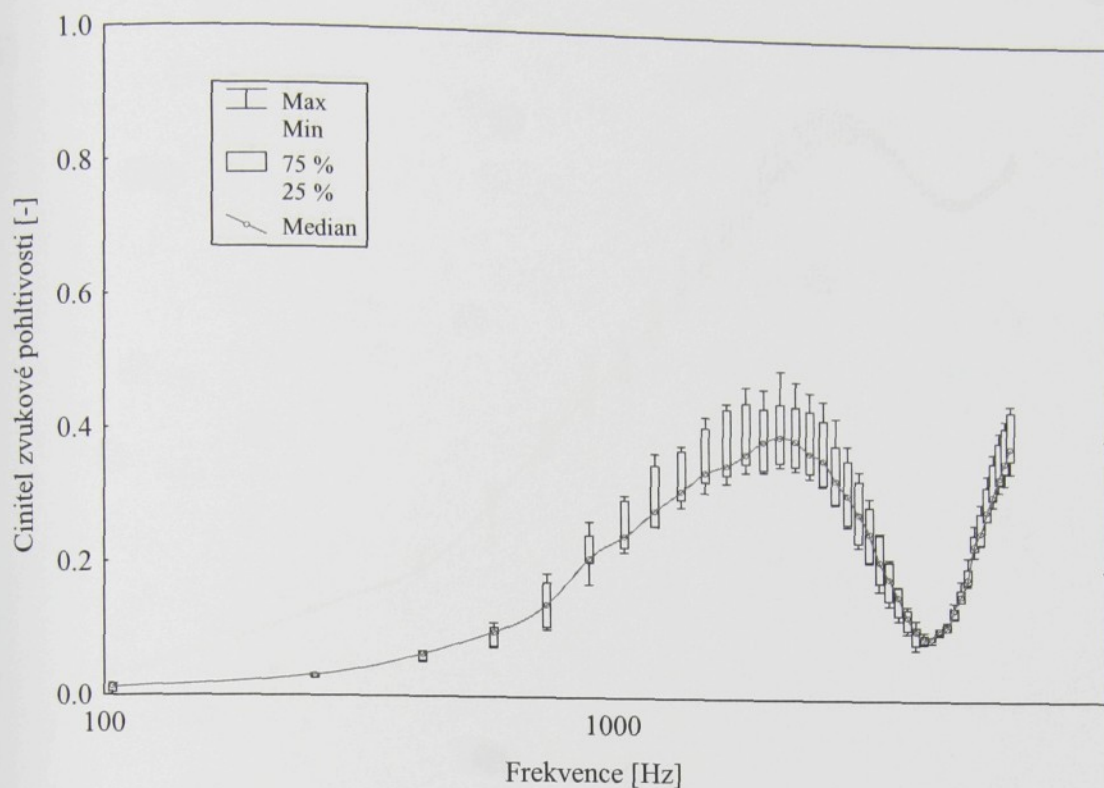
V příloze 3 je uveden průběh činitele zvukové pohltivosti všech naměřených vzorků v závislosti na frekvenci (obr.83).

II. V tomto odsazení byl statisticky zpracován soubor dat naměřeného činitele zvukové pohltivosti samotné rezonanční nanovlákněné membrány v závislosti na frekvenci zvuku. Z jednoho materiálu bylo vybráno 7 vzorků a změřena jejich zvuková pohltivost.

#### *Diskuse výsledků*

Variabilita rezonanční nanovlákněné membrány je značná. Je to do velké míry způsobeno přípravou vzorku pro měření zahrnující napnutí nanovlákněné vrstvy na tenký váleček, který zajišťoval požadovanou vzdálenost mezi jednotlivými membránami a upevnění membrány do měřicího zařízení.





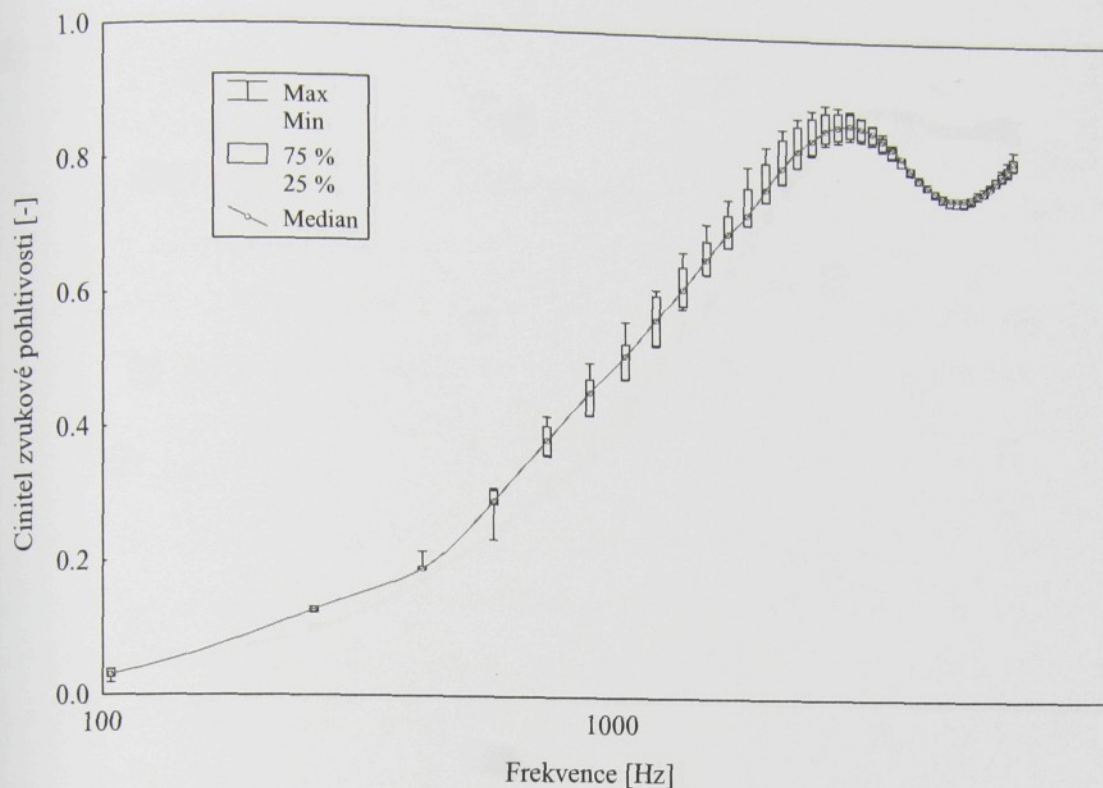
Obraz 67: Statistické zpracování dat činitele zvukové pohltivosti 7 vzorků rezonanční membrány jednoho nanovlákněného materiálu v závislosti na frekvenci zvuku.

V příloze 3 je uveden průběh činitele zvukové pohltivosti všech naměřených vzorků v závislosti na frekvenci (obr.84).

III. V tomto odsazení byl statisticky zpracován soubor dat naměřeného činitele zvukové pohltivosti porózního vlákněného materiálu s rezonanční nanovlákněnou membránou v závislosti na frekvenci zvuku. Z jednoho materiálu bylo vybráno 7 vzorků a změřena jejich zvuková pohltivost.

#### *Diskuse výsledků*

Variabilita porózního vlákněného materiálu není velká. Statistické vyhodnocení je vzhledem k malému počtu dat pouze orientační.



Obraz 68: Statistické zpracování dat činitele zvukové pohltivosti 7 vzorků porózního vlákenného materiálu s nanovláknennou vrstvou v závislosti na frekvenci zvuku.

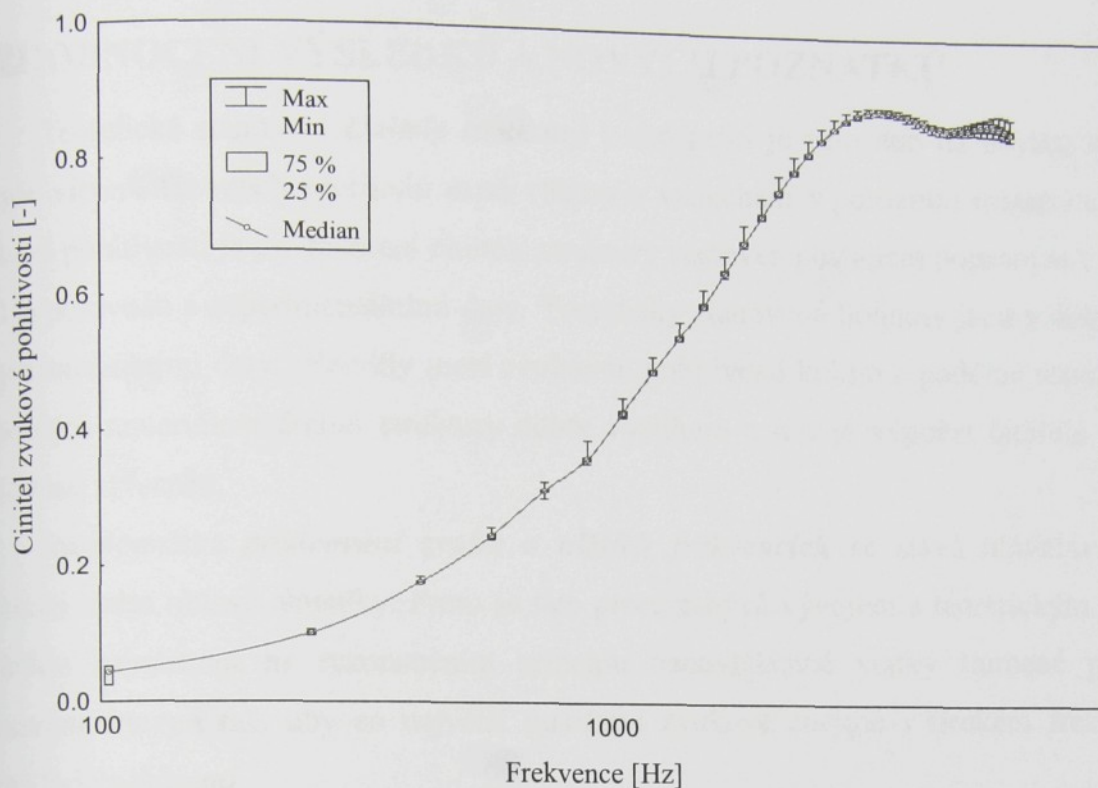
V příloze 3 je uveden průběh činitele zvukové pohltivosti všech naměřených vzorků v závislosti na frekvenci (obr.85).

IV. V tomto odsazení byl statisticky zpracován soubor dat naměřeného činitele zvukové pohltivosti samotného porózního vlákenného materiálu v závislosti na frekvenci zvuku. Jediný vzorek byl vložen do měřicího zařízení a změřena jeho zvuková pohltivost. Vzorek byl z přístroje vyňat a znovu nainstalován celkem 30krát. Před každým měřením byl přístroj znovu nakalibrován.

#### Diskuse výsledků

Chyba měření je nepatrná, statistické vyhodnocení je vzhledem k velkému počtu dat vypovídající.





Obraz 69: Statistické zpracování dat činitele zvukové pohltivosti 1 vzorku porózního vlákenného materiálu měřeného 30krát v závislosti na frekvenci zvuku.

V příloze 3 je uveden průběh činitele zvukové pohltivosti všech naměřených vzorků v závislosti na frekvenci (obr.86).

## 5. ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ A NOVÝCH POZNATKŮ

Teoretické stanovení *činitele struktury* v této práci je založeno na úbytku akustické energie vlivem fázových přechodů mezi vlákny a vzduchem v porózním materiálu. Činitel zvukové pohltivosti je po dosazení činitele struktury stanoven postupem popsáním v kapitole 2.3.1 a porovnán s experimentálními daty. Teoreticky stanovené hodnoty jsou v dobré shodě s experimentálními daty. Rozdíly mezi zvukovou pohltivostí kolmo a podélně uspořádaným vlákenným materiálem činitel struktury dobře vystihuje a tím je výpočet činitele zvukové pohltivosti zpřesněn.

Problematika *pohlcování zvuku o nižších frekvencích* se stává hlavním směrem výzkumu v této oblasti akustiky. Proto se tato práce zabývá vývojem a teoretickým popisem materiálu založeném na rezonančním principu nanovlákněné vrstvy tlumené pohltivou vláknitou vrstvou tak, aby co největší množství zvukové energie v širokém frekvenčním pásmu bylo pohlceno.

*Teoreticky stanovená hodnota vlastní frekvence* jednoduchého rezonančního systému se blíží experimentálně stanoveným hodnotám. Nedostatečná shoda výsledků ve víceprvkovém systému mezi teoretickým výpočtem a experimentálními daty je dána zanedbáním akustického odporu ve výpočtech. Tímto směrem také doporučuji pokračování výzkumu. Experimentální data potvrzují růst hodnoty rezonanční frekvence vlivem útlumu akustické energie, který je způsoben třením mezi vzduchem a povrchem vláken.

*Vývoj* zvukově pohltivého materiálu s použitým rezonančním prvkem je založen na výzkumu jednotlivých komponent materiálu, tedy výzkumu parametrů zásadních pro velikost činitele zvukové pohltivosti. Výsledky vlivů jednotlivých parametrů jak samotného porózního materiálu tak samotného rezonančního prvku a konečně materiálu kombinujícího oba prvky na zvukovou pohltivost jsou v tomto závěru shrnuty.

Činitel zvukové pohltivosti vlákenných materiálů s *uspořádáním vláken* kolmo na směr zvuku je vyšší než u paralelně uspořádaných materiálů. Tento jev je způsoben jednak možností pohybu jednotlivých vláken a také úbytkem akustické energie vlivem fázových přechodů mezi vlákny a vzduchem v porózním materiálu.

Úseky obloučků *tvarovaných vláken* přispívají k celkovému směru uspořádání vláken v materiálu a akustické charakteristiky se stávají spíše izotropní.

Akustická energie dopadající na usek vlákna, který se může pohybovat se přeměnění na kinetickou energii vibrujícího vlákna, tím pádem pohltivost zvuku naroste. U podélně



kladených vzorků závisí nejen na možnosti úseků pohybovat se ale i na délce těchto úseků, která je regulována **koncentrací pojivých vláken** resp. počtem pojících bodů.

Činitel zvukové pohltivosti vláknenných materiálů roste s klesajícím **průměrem vláken** při zachování konstantní objemové hmotnosti vláknenného materiálu, což je způsobeno větším měrným povrchem vláken o menší jemnosti. Tření mezi vzduchem a povrchem póru je realizováno na větší interakční ploše a je tak spotřebováno více akustické energie.

Nanovláknenná vrstva aplikovaná na podkladovou netkanou textilií vykazuje **rezonanční efekt**. Maximální hodnota činitele zvukové pohltivosti je oproti samotné podkladové textilií posunuta k nižším frekvencím, které jsou z hlediska absorpce zvuku žádoucí.

S **počtem rezonančních prvků** roste činitel zvukové pohltivosti. Jelikož zůstává plošná hmotnost a s tím i související tuhost membrány konstantní, prvky vykazují amplitudu pro určitý mód při stejné frekvenci.

S **plošnou hmotností nanovláknenné vrstvy** se maxima činitele zvukové pohltivosti posouvají ve směru požadovaných nižších frekvencí. S **plošnou hmotností výplňkového vláknenného materiálu** se zlepšuje zatlumení rezonančního systému, což se projevuje menším poklesem činitele zvukové pohltivosti v oblasti antirezonance.

Jak s **tloušťkou** tak s **objemovou hmotností materiálu** rezonanční frekvence klesá k požadovaným nižším hodnotám a činitel zvukové pohltivosti roste.

Rezonátory sestavené se **sestupnou tendencí plošných hmotností** ve směru šíření zvuku vykazují jednak vyšší pohltivost a také nižší rezonanční frekvenci systému oproti seskupení rezonátorů s **vzestupnou tendencí plošných hmotností**. Čím dále jsou následné rezonátory od prvního nárazového rezonátoru, tím více utlumená zvuková vlna na ně dopadá, rozkmit rezonátoru je stále menší a s tím spojená účinnost zvukového pohlcení. To je důvod, proč rezonanční systém, který má zařazen prvek pracující na nejnižší frekvenci jako poslední je v nižších frekvencích méně účinný než rezonanční systém s prvkem pracujícím na nejnižší frekvenci zařazeným jako první.

**Nový materiál**, který je výsledkem výzkumu vláknenných charakteristik, umožňuje vysokou zvukovou pohltivost v široké frekvenční škále. Je to způsobeno použitím rezonanční nanovláknenné membrány, která je tlumena pohltivou vláknennou vrstvou. Především pohlcování zvuku o nižších frekvencích je velkým problémem, který tento materiál řeší na velmi dobré úrovni.

Předpokládá se jeho **využití** převážně u výrobců zvukově pohltivých obkladů a komponent pro automobilový, letecký, stavební a strojní průmysl.



## LITERATURA

- [1] Škvor, Z. Akustika a elektroakustika. 1. vydání Academia Praha, 2001. ISBN 80-200-0461-0.
- [2] Smetana, C a kolektiv. Hluk a vibrace. Měření a hodnocení. 1. Vydání Sdělovací technika Praha, 1998. ISBN 80-901936-2-5.
- [3] Krňák, M. Akustické obklady. 1. vydání VÚZORT Praha, 1971. ISBN 06-066-71
- [4] Feynman, R.P., Leighton, R.B., Sands, M: Feynmanovy přednášky z fyziky s řešenými příklady, 1. české vydání Fragment, 2000, ISBN 80-7200-405-0
- [5] Horák, Z., Krupka, F., Šindelář, V. Technická fyzika. 2. vydání SNTL Praha, 1960.
- [6] Horský, J., Novotný, J., Štefaník, M. Mechanika ve fyzice. 1. vydání Academia Praha, 2001, ISBN 80-200-0208-1
- [7] Kolmer, F, Kyncl, J. Prostorová akustika. SNTL Praha, 1980. ISBN 04-514-80
- [8] Kutman, O. Fyzika II (Akustika). ČVUT Praha, 1991
- [9] Zwikker, C., Kosten, C. W. Sound Absorbing Materials. Elsevier Pub. Co., NY, 1949
- [10] Kawasima, Y. Sound Propagation in a Fiber Block as a Composite Medium. *Acustica*, 1960, vol. 10, p. 208-217.
- [11] Dahl, M. D., Rice, E. J., and Groesbeck, D. E. Effect of Fiber Motion on the Acoustic Behavior of an Anisotropic, Flexible Fibrous Material. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1990, vol. 87, no. 1, p. 54-66.
- [12] Lambert, R. F. Acoustic Resonance in Highly Porous, Flexible, Layered Fine Fiber Materials. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1993, vol. 93, no. 3, p. 1227-1234.
- [13] Merhaut, J. Teoretické základy elektro-akustiky. 3. vydání Academia Praha, 1976.
- [14] Randeberg, R.T. Perforated panel absorbers with viscous energy dissipation enhanced by orifice design. PhD thesis, NTNU Trondheim, 2000. Dostupné na World Wide Web: <http://www.ntnu.no/doktorgrader/2.halvaar.00/11.00/ran...>
- [15] Shoshani, Y., Yakubov, Y. A Model of Calculating the Noise Absorption Capacity of Nonwoven Fiber Webs. *Textile Res. J.*, 1999, vol. 69, no. 7, p. 519-526.
- [16] Shoshani, Y., Yakubov, Y. Numerical Assessment of Maximal Absorption Coefficients for Nonwoven Fiberwebs. *Applied Acoustics*, 2000, vol. 59, no. 1, p.77-87.
- [17] Shoshani, Y., Yakubov, Y. Generalization of Zwikker and Kosten Theory for Sound Absorption in Flexible Porous Media to the Case of Variable Parameters. *Journal of Computational Acoustics*, 2000, vol. 8, no. 3, p. 415-441.



- [18] Goransson, P. Acoustic Finite Element Formulation of a Flexible Porous Material – a Correction for Inertial Effects. *J. of Sound and Vibration*, 1995, vol. 185, no. 4, p. 559-580.
- [19] Goransson, P. A Weighted Residual Formulation of the Acoustic Wave Propagation Through a Flexible Porous Material and a Comparison with a Limp Material Model. *J. of Sound and Vibration*, 1995, vol. 182, no. 3, p. 479-494.
- [20] Sandberg, G., Goransson, P. A Symmetric Finite Element Formulation for Acoustic Fluid-Structure Interaction Analysis. *J. of Sound and Vibration*, 1988, vol. 123, no.3, p. 507-515.
- [21] Craggs, A. A Finite Element model for Rigid Porous Absorbing Materials. *J. of Sound and Vibration*, 1978, vol. 61, no. 1, p. 101-111.
- [22] Craggs, A. Coupling of Finite Element Acoustic Absorption Models. *J. of Sound and Vibration*, 1979, vol. 66, no. 4, p. 605-613.
- [23] Craggs, A., Hildebrandt, J. G. Effective Densities and Resistivities for Acoustic Propagation in Narrow Tubes. *J. of Sound and Vibration*, 1984, vol. 92, no. 3, p. 321-331.
- [24] Van Renterghem, T. The finite-difference time-domain method for simulation of sound propagation in a moving medium. PhD thesis, Academiejaar Gent, 2004. Dostupné na World Wide Web: <http://www.intec.rug.ac.be/groupsites/acoustics/>
- [25] Nikishkov, G. P. Introduction to the Finite Element Method. Lecture Notes, University of Aizu, 1998.
- [26] Míka, S., Kufner, A. *Parciální diferenciální rovnice I. 1. vydání* SNTL Praha, 1983.
- [27] Kolář, V., Němec, I., Kanický, V. *Principy a praxe metody konečných prvků*. Computer Press Praha, 1997. ISBN 80-7226-021-9.
- [28] Valchářová, J. *Soudobé numerické metody v mechanice kontinua*. SNTL Praha, 1986.
- [29] Kriiger, J., Quickert, M. Determination of Acoustic Absorber Parameters in Impedance Tubes, *Applied Acoustics*, 1997, vol. 50, no. 1, p. 79-89.
- [30] Seybert, A.F. Notes on absorption and impedance measurements. Dostupné na World Wide Web: [http://www.engr.uky.edu/vac/public\\_html/Absorption\\_Meas.pdf](http://www.engr.uky.edu/vac/public_html/Absorption_Meas.pdf)
- [31] Schultz, T., Cattafesta, L., Nishida, T., and Sheplak, M. Uncertainty Analysis of the Two-Microphone Method. 8th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, AIAA 2002-2465, June 2002. Dostupné na World Wide Web: [http://www.img.ufl.edu/publications/Uncertainty%20Analysis%20of%20the%20Two-Microphone%20Method\\_Conference\\_June2002.pdf](http://www.img.ufl.edu/publications/Uncertainty%20Analysis%20of%20the%20Two-Microphone%20Method_Conference_June2002.pdf)



- [32] Product Data Impedance Measurement Tube Type 4206. Dostupné na World Wide Web: <http://www.bksv.com/pdf/Bp1039.pdf>
- [33] Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials Using a Tube, Two Microphones, and a Digital Frequency Analysis System. Dostupné na World Wide Web: [http://www.astm.org/cgi-bin/SoftCart.exe/DATABASE.CART/REDLINE\\_PAGES/E1050.htm?E+mystore](http://www.astm.org/cgi-bin/SoftCart.exe/DATABASE.CART/REDLINE_PAGES/E1050.htm?E+mystore)
- [34] ISO 10534-2
- [35] ASTM E1050-98
- [36] ASTM C423 Test method for Sound Absorption and Sound Absorption Coefficients by the Reverberation Room Method
- [37] Reverberation Chamber. Dostupné na World Wide Web: <http://www.krueger-hvac.com/corporate/technology.asp>
- [38] Building a Reverberation Chamber. Dostupné na World Wide Web: <http://www.iee.org/oncomms/pn/emc/reverberation/building.pdf>
- [39] Transmission suites and reverberation chambers. Dostupné na World Wide Web: [http://www.acoustics.salford.ac.uk/enterprise/transmission\\_suite.htm](http://www.acoustics.salford.ac.uk/enterprise/transmission_suite.htm)
- [40] Reverberation Room. Dostupné na World Wide Web: [http://www.mech.canterbury.ac.nz/labs/acoustics\\_rr.shtml](http://www.mech.canterbury.ac.nz/labs/acoustics_rr.shtml)
- [41] Measurements in Building Acoustics. Brüel & Kjær, Nærum, 1988. Dostupné na World Wide Web: [http://www.bksv.com/pdf/Measurements\\_in\\_Building\\_Acoustics.pdf](http://www.bksv.com/pdf/Measurements_in_Building_Acoustics.pdf)
- [42] Belza, J., Krňák, M., Vavřínová, J. Katalog akustických materiálů pro použití v motorových vozidlech. SVÚSS Běchovice, VÚZORT Praha, Pikaz Praha, 1985
- [43] Bradley, J.S. Sound in Rooms. Dostupné též v HTML verzi: [http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/bsi/85-2\\_E.html](http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/bsi/85-2_E.html)
- [44] Brüel, V. Elements for Anechoic Chambers. Dostupné na World Wide Web: <http://www.bruel-ac.com/tr/pi9701/PI9701.html>
- [45] The professional insulation for noise absorption. Dostupné na World Wide Web: [http://www.armacell.com/www/armacell/armacell.nsf/ansHTMLSeitenLookUp/INT-Sound\\_Frame?OpenDocument](http://www.armacell.com/www/armacell/armacell.nsf/ansHTMLSeitenLookUp/INT-Sound_Frame?OpenDocument)
- [46] Sides, D. J., Attenborough, K., Mulholland, K.A. Application of a Generalized Acoustic Propagation Theory to Fibrous Absorbents. J. of Sound and Vibration, 1971, vol. 19, no. 1, p. 49-64.
- [47] Lambert, R. F., Tesar, J. S. Acoustic Structure and Propagation in Highly Porous, Layered, Fibrous Materials. J. Acoust. Soc. Am., 1984, vol. 76, no. 4, p. 1231-1237.



- [48] Lambert, R. F. Low-frequency Acoustic Behavior of Highly Porous, Layered, Flexible, Fine Fiber Materials. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1995, vol. 97, no. 2, p. 818-821.
- [49] Fabric for Acoustic Control, *Technical Textiles*, April 1993, p. 26.
- [50] Absorption. Dostupné na World Wide Web: <http://www.rpginc.com/products/modex/>
- [51] Kimihiro Sakagami, Masakazu Kiyama, Masayuki Morimoto, Daiji Takahashi. Sound Absorption of a Cavity-Backed Membrane: A Step Towards Design Method for Membrane-Type Absorbers. *Applied Acoustics*, 1996, vol. 49, no. 3, p. 231-241.
- [52] Kang, J., Fuchs, H.V. Effect of water-films on the absorption of membrane absorbers. *Applied Acoustics*, 1999, vol. 56, p.127-135.
- [53] Kimihiro Sakagami, Masakazu Kiyama, Masayuki Morimoto. Acoustic properties of double-leaf membranes with a permeable leaf on sound incidence side. *Applied Acoustics*, 2002, vol. 63, p. 911-926.
- [54] Masakazu Kiyama, Kimihiro Sakagami, Masaki Tanigawa, Masayuki Morimoto. A Basic Study on Acoustic Properties of Double-leaf Membranes, *Applied Acoustics*, 1998, vol. 54, no. 3, p. 239-254.
- [55] Youneung Lee, Changwhan Joo. Sound Absorption Properties of Recycled Polyester Fibrous Assembly Absorbers. *AUTEX Research Journal*, 2003, vol. 3, no. 2.
- [56] Pfretzschner, J., Cobo, P., Simón, F., Cuesta, M. Microperforated Insertion Units: an alternative to Microperforated Panels, In 33<sup>th</sup> Inter-Noise Conference 2004, Praha. ISBN 80-01-03055-5.
- [57] RPG Diffusor Systems: Modex. Dostupné na World Wide Web: <http://www.silentsource.com/diffusors-rpg-modex.html>
- [58] Davern, W. A. Perforated Facings Backed with Porous Material as Sound Absorber - an Experimental Study. Dostupné na World Wide Web: <http://www.zainea.com/porous.htm>
- [59] Sound absorbers with tunable resonance frequency. Dostupné na World Wide Web: [http://www.akin.ru/e\\_comm17.htm](http://www.akin.ru/e_comm17.htm)
- [60] Shoshani Y., *Studies of Textile Assemblies Used for Acoustic Control. Technical Textiles*, april 1999, p.32.
- [61] Těleso válcové akustické SONORBER. Dostupné na World Wide Web: <http://www.estav.cz/ram-si/vyrobek.asp?id=3>
- [62] Řešení prostorové akustiky. Dostupné na World Wide Web: [http://www.liko-s.cz/akustika\\_.htm](http://www.liko-s.cz/akustika_.htm)
- [63] PAT 294274



- [64] PCT/CZ 2004/000056
- [65] EP1270771 A
- [66] WO03080905 (A1)
- [67] WO2004014304
- [68] US6110590
- [69] 20040098023
- [70] 20040060269
- [71] Aufbau und Funktion des Raster-Elektronenmikroskops. Dostupné též v HTML verzi:  
[http://pages.unibas.ch/zmb/tafeln\\_REM\\_kellerWEB/aufbau.html](http://pages.unibas.ch/zmb/tafeln_REM_kellerWEB/aufbau.html)
- [72] Mayer, D. Úvod do teorie elektrických obvodů. 2. vydání SNTL Praha, 1981. ISBN 04-505-81
- [73] Pechová, N. Sítování polyvinyl alkoholových nanovláken, diplomová práce TU v Liberci, 2004.

## **PRÁCE AUTORA SE VZTAHEM KE STUDOVANÉ PROBLEMATICE**

- Kalinová, K., Jirsák, O. Sound Absorbing Properties of Superfine Fibrous Material. In Conference STRUTEX 2003, Liberec. ISBN 80-7083-769-1.
- Kalinová, K., Jirsák, O., Novák, J. Sound Absorption Behavior of an Aanisotropic Fibrous Material. In 4<sup>th</sup> AUTEX Conference 2004, Roubaix – France. ISBN 2-9522440-0-6.
- Kalinová, K., Jirsák, O., Novák, J. Sound Absorption Behavior of Aanisotropic Fine Fiber Material. In 33<sup>th</sup> Inter-Noise Conference 2004, Praha. ISBN 80-01-03055-5.
- Kalinová, K., Jirsák, O. Sound Absorbing Properties of Moving Fibers. In Conference STRUTEX 2004, Liberec. ISBN 80-7083-891-4
- Novák, J., Kalinová, K. Měření akustické pohltivosti. In. Technická diagnostika strojů a výrobních zařízení - DIAGO 2004. Ostrava, 2004. ISBN 80-248-0465-4.
- Novák, J., Kalinová, K. Akustická pohltivost. :XXXV. Mezinárodní konference kateder a pracovišť spalovacích motorů českých a slovenských vysokých škol - KOKA 2004. Brno, 2004. ISBN 80-7157-776-6.
- Kalinová, K., Jirsák, O., Novák, J.. Resonance Effect of Nanofibrous Layer. In 5<sup>th</sup> AUTEX Conference 2005, Portorož.
- Kalinová, K., Jirsák, O., Novák, J. Resonance Effect of Nanofibrous Layer on Sound Absorption. In 34<sup>th</sup> Inter-Noise Conference 2005, Rio de Janeiro
- Kalinová, K., Novák, O. Resonant Frequency of Nanofibrous Layer in Relation to its Rigidity. In Conference Ambience 05, 2005, Tampere – Finland.



## SUMMARY

The *sound absorption* of lower frequencies becomes the main problem of this acoustic section. It is why this work deals the development and the theoretical describing of new high absorption material. The resonant nanofibrous layer is damped by the fiber web so that the most of sound energy was absorbed on the broad frequency spectrum.

The sound absorber development is based on the each component research. The structural characteristics of resonant nanofibrous membrane and the damping fibrous material are examined regarding the sound absorption.

One of the aims of my dissertation thesis is the experimental finding of fiber diameter and fiber arrangement influence on the acoustic energy loss. Further, this knowledge will complete theoretical assessment of sound absorption coefficient. Especially, the *structure constant* has been taken for unit for all that the value of structure constant is changed with fiber diameter and fiber arrangement. These structure characteristics are important regarding the damping property of fibrous material.

Second of the aims is research of resonant nanofibrous membrane and final resonant system characteristics. It is mainly weight per area of nanofibrous layer, thickness and density of final acoustic system.

The result of my dissertation thesis is a theoretical describing of new material that absorbs the sound energy on the broad frequency spectrum.

The sound absorption coefficient of porous material and resonance frequency of resonant system was *theoretically determined*. The results are in good agreement with experimental findings.

The structure characteristics of fibrous material have been studied in this project. The first is the *fiber arrangement*, where the fibers are primarily aligned in one direction. It is parallel fiber alignment in the direction of sound wave propagation or perpendicular fiber alignment to the sound wave propagation. It was shown that the sound absorption coefficient of perpendicular arranged sample is higher than the parallel arranged sample. It is attributed to the fiber motion. When the longitudinal sound wave is propagating perpendicular to the fiber alignment, the fibers can move and energy can be changed.



The second structure characteristic have been studied *linear shape* of the fibers. It was shown that the crimp segments contribute to the total direction of the fiber alignment and the acoustic characteristics become isotropic.

For evaluating of *fiber free length* influence on the sound absorption, the concentration range of bonding fibers was taken. The sound absorption coefficient increases with decreasing concentration or more precisely with increasing fiber free length.

The next structure characteristic that has been studied was *fineness* of the fibers or more precisely the fiber diameter. It is evident that the specific surface of fibers increases with the decreasing fiber diameter when the fabric density was kept constant. In case of the smaller fiber diameter, it may be presumed that the drag between the air and pore surface occurs on the bigger interactive surface, so sound absorption coefficient increases. Number of moving fiber parts increases with the decreasing fiber diameter. Thus, the sound absorption coefficient increases again.

Finally the *resonance effect* of nanofibrous layer has been studied. The absorption tops are displaced in the direction of lower frequency where is critical with respect to sound absorption.

With the *number of resonant nanofibrous membranes* the sound absorption coefficient increases, with the *weight per area* of resonant nanofibrous membrane the maximum of sound absorption coefficient displeases to the requested lower frequencies. The *damping* of resonant system improves with the weight per area of fibrous material.

Resonant frequency decreases and sound absorption coefficient increases with the *thickness and density of final resonant system*.

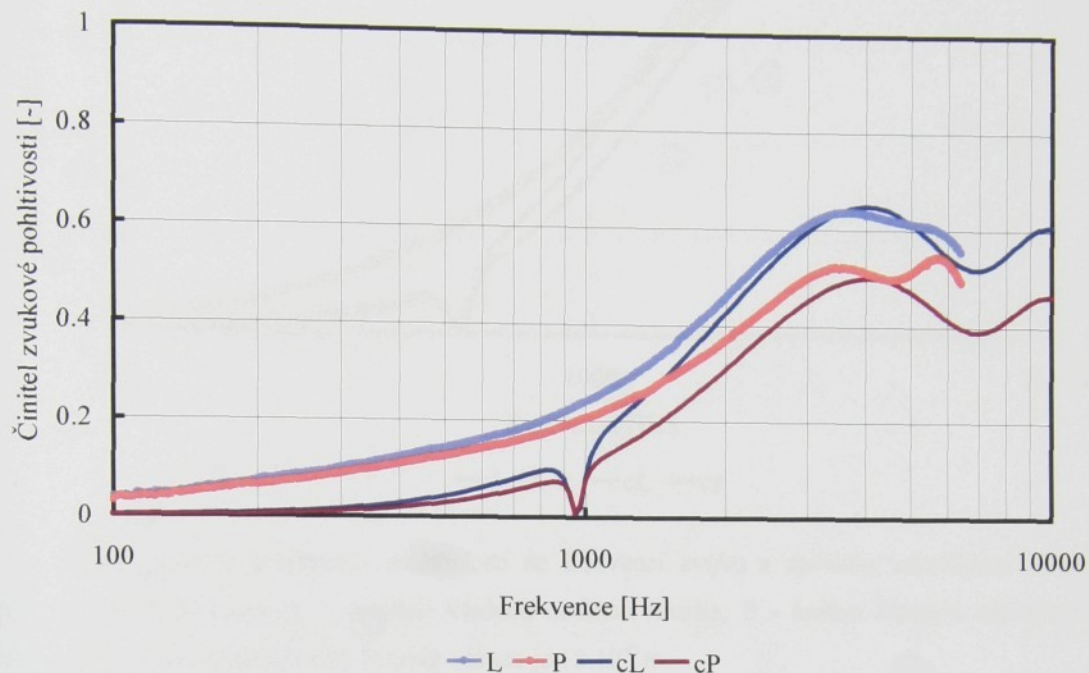
The resonant system can be compound of resonant nanofibrous membrane of different weight per area. It was shown that the *resonator order* is mainly factor of sound absorption.

The new absorption material can be used in automotive, building and machine industry.

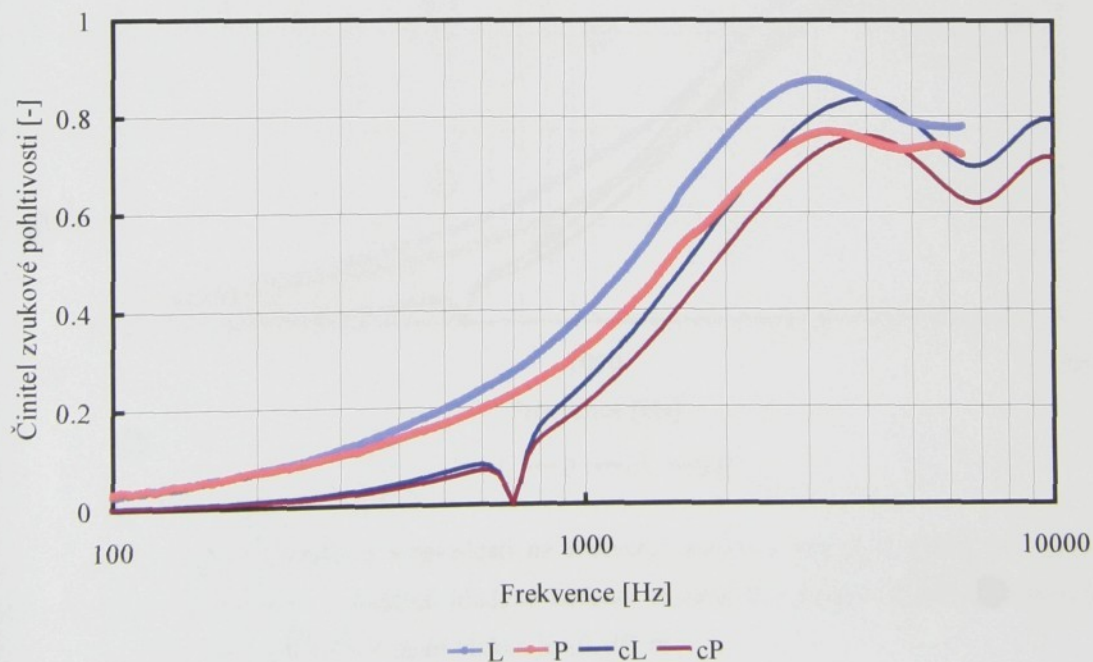


## PŘÍLOHY

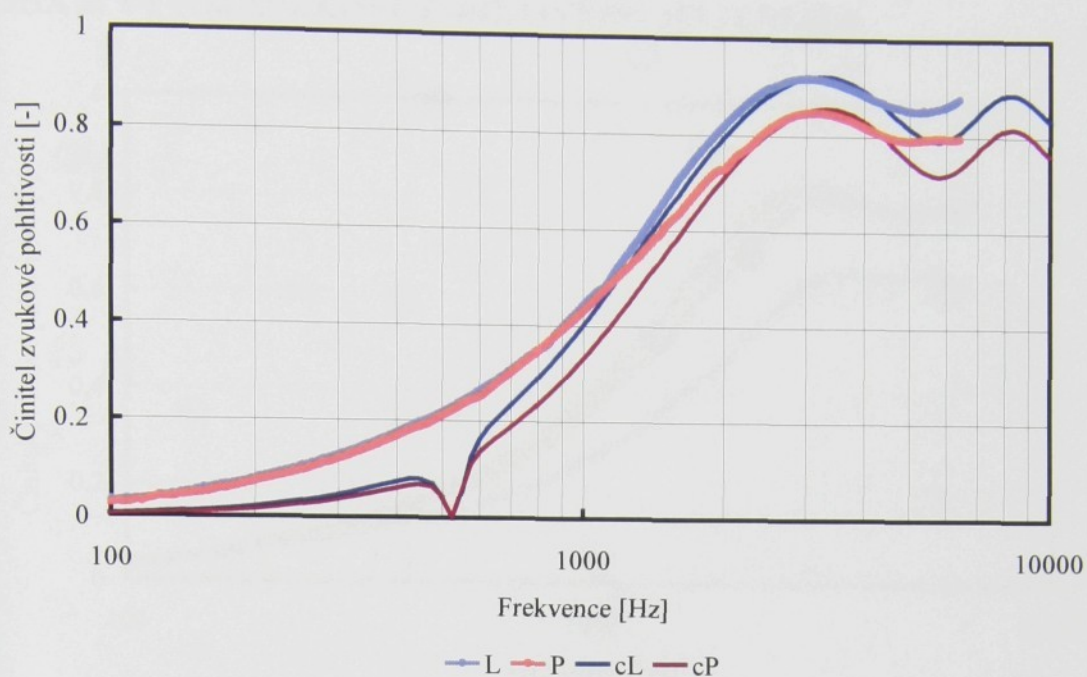
### PŘÍLOHA 1: TEORETICKÉ STANOVENÍ Činitele STRUKTURY VLÁKENNÉHO MATERIÁLU



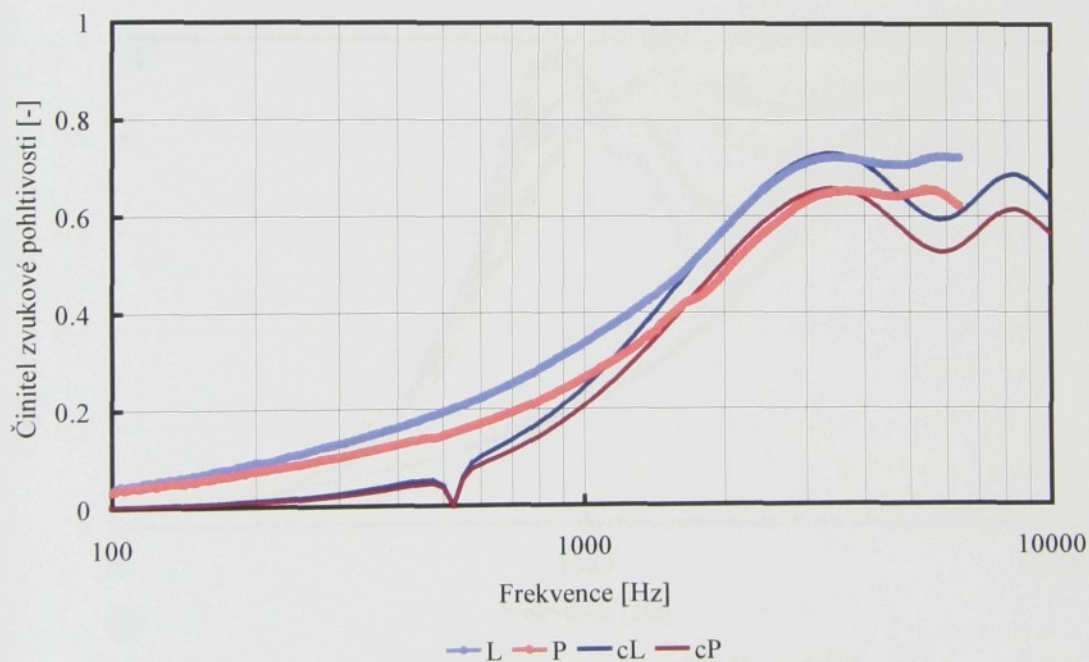
Obráz 70: Činitel zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci zvuku a způsobu uspořádání vláken. Obráz porovnává naměřené hodnoty (L - podélně kladená netkaná textilie, P - kolmo kladená netkaná textilie) a teoreticky stanovené hodnoty (cL, cP). Objemová hmotnost vlákeného materiálu je 11 kg.m<sup>-3</sup>.



Obráz 71: Činitel zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci zvuku a způsobu uspořádání vláken. Obráz porovnává naměřené hodnoty (L - podélně kladená netkaná textilie, P - kolmo kladená netkaná textilie) a teoreticky stanovené hodnoty (cL, cP). Objemová hmotnost vlákeného materiálu je 20 kg.m<sup>-3</sup>.



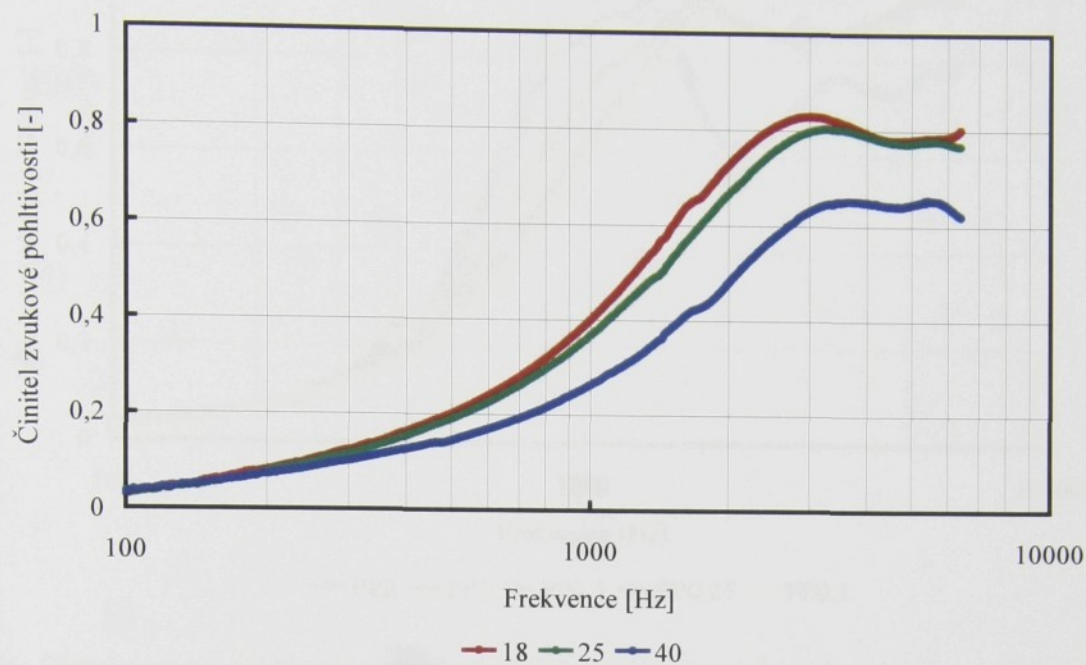
Obraz 72: Činitel zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci zvuku a způsobu uspořádání vláken. Obrázek porovnává naměřené hodnoty (L - podélně kladená netkaná textilie, P - kolmo kladená netkaná textilie) a teoreticky stanovené hodnoty (cL, cP). Průměr vláken je  $18 \cdot 10^{-6}$  m.



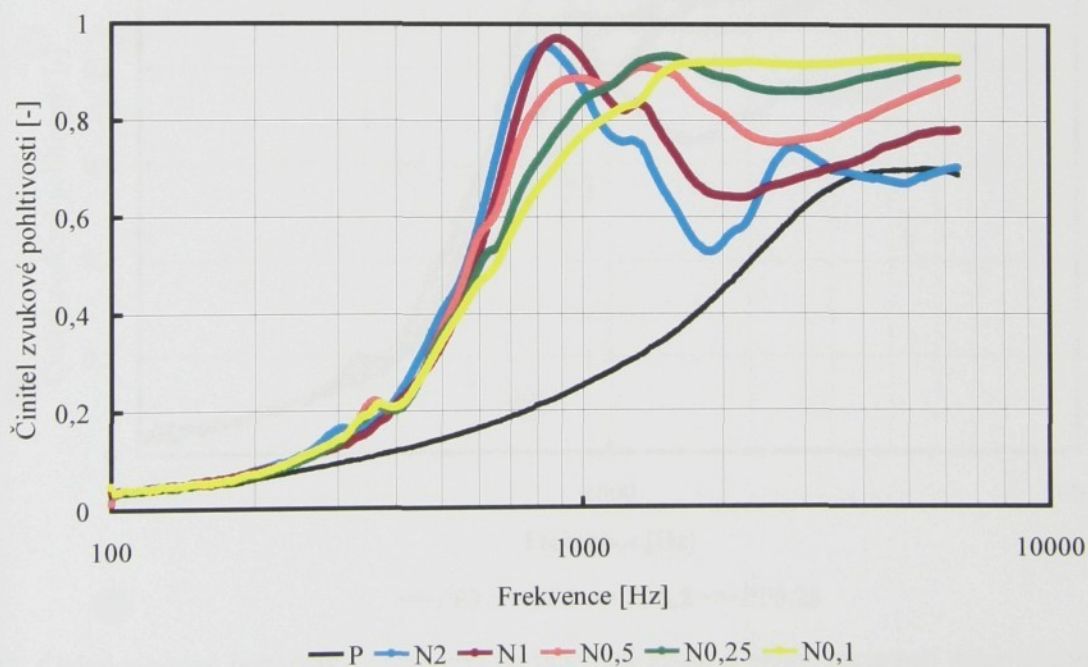
Obraz 73: Činitel zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci zvuku a způsobu uspořádání vláken. Obrázek porovnává naměřené hodnoty (L - podélně kladená netkaná textilie, P - kolmo kladená netkaná textilie) a teoreticky stanovené hodnoty (cL, cP). Průměr vláken je  $40 \cdot 10^{-6}$  m.



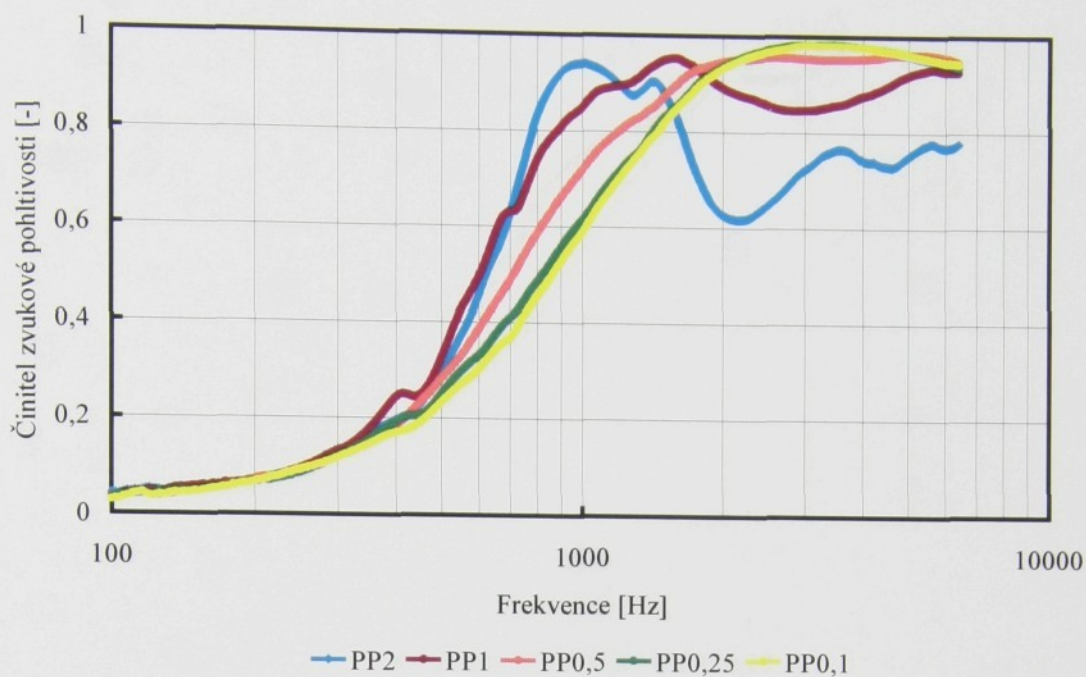
## PŘÍLOHA 2: VÝVOJ ZVUKOVĚ POHLTIVÉHO MATERIÁLU



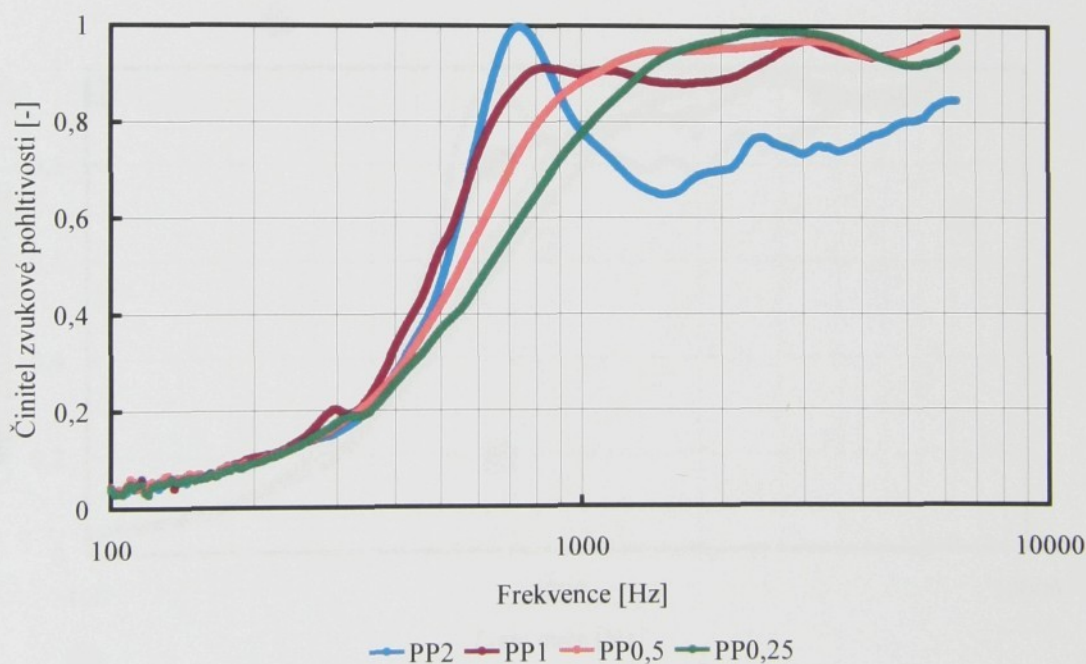
Obráz 74: Činitel zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci zvuku a průměru vláken (18, 20 a 40  $\mu\text{m}$ ) v kolmo kladené netkané textilií.



Obráz 75: Činitel zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci zvuku a plošné hmotnosti nanovláknenné vrstvy (2; 1; 0,5; 0,25 a 0,1  $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ ). Celková tloušťka materiálu je 25 mm.

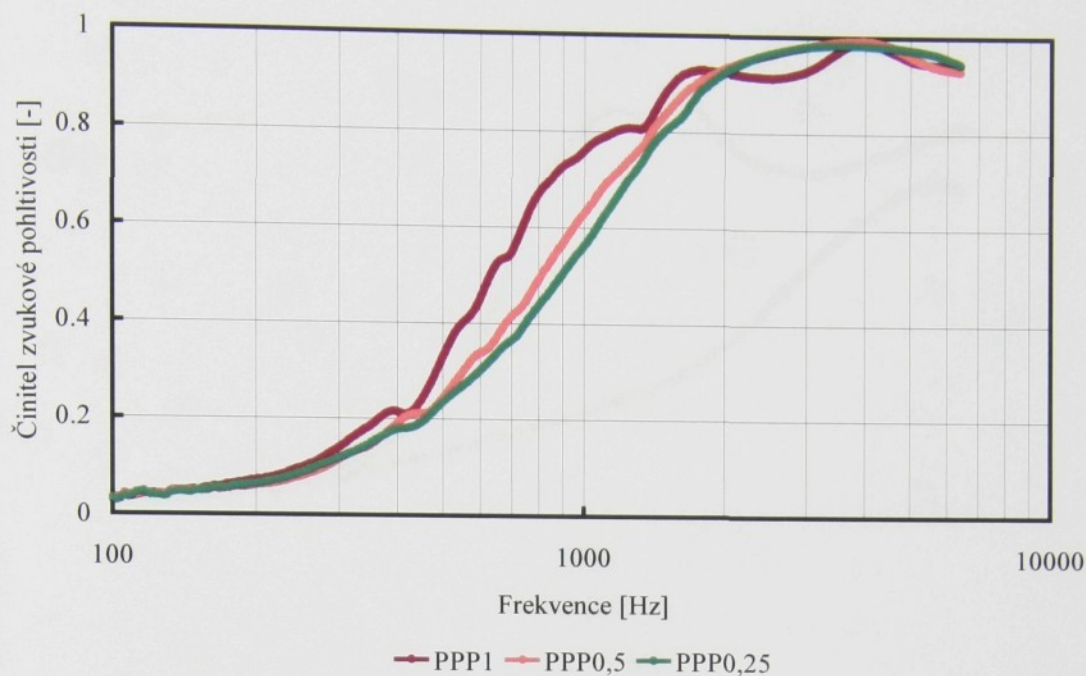


Obraz 76: Činitel zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci zvuku a plošné hmotnosti nanovláknenné vrstvy (2; 1; 0,5; 0,25 a 0,1  $\text{g.m}^{-2}$ ). Celková tloušťka materiálu je 25 mm.

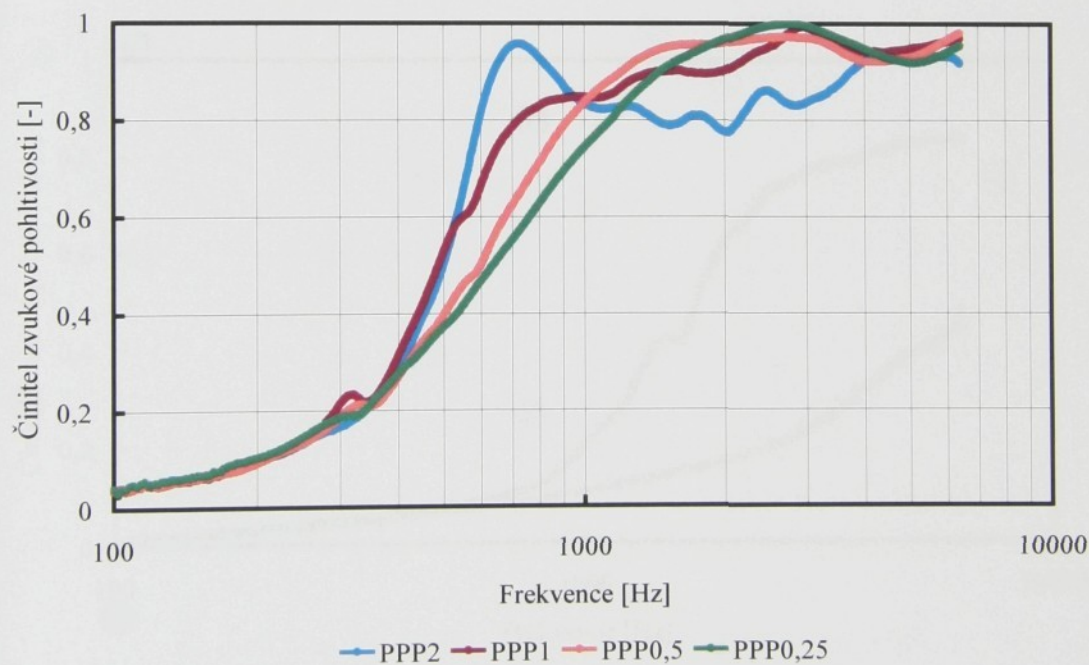


Obraz 77. Činitel zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci zvuku a plošné hmotnosti nanovláknenné vrstvy (2; 1; 0,5 a 0,25  $\text{g.m}^{-2}$ ). Objemová hmotnost materiálu je  $13 \text{ kg.m}^{-3}$ .

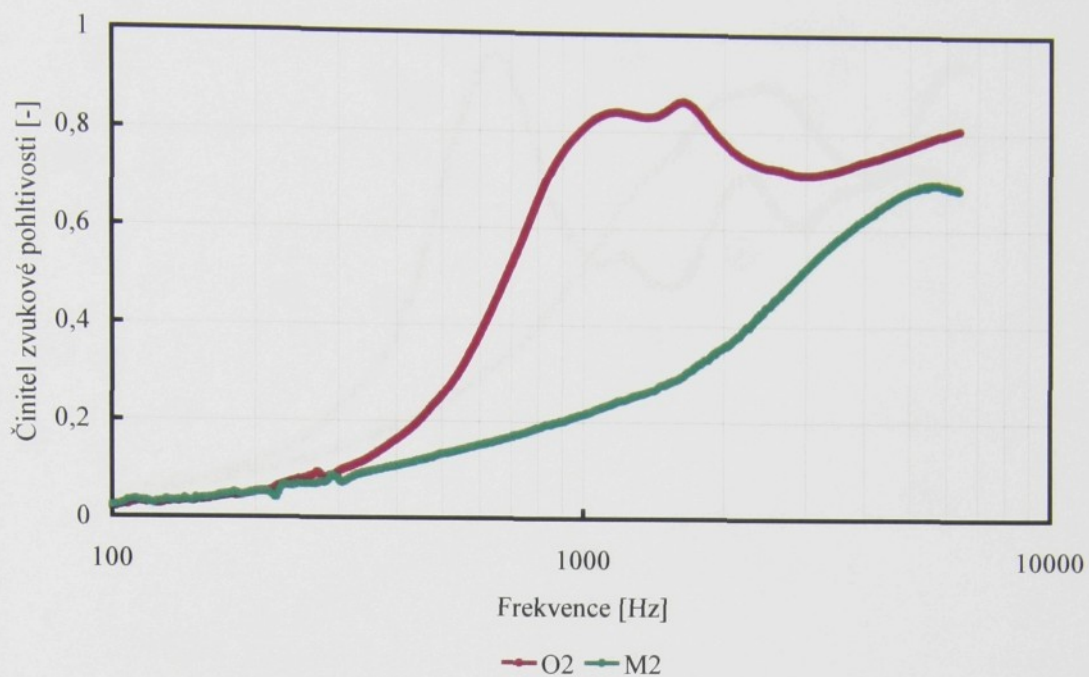




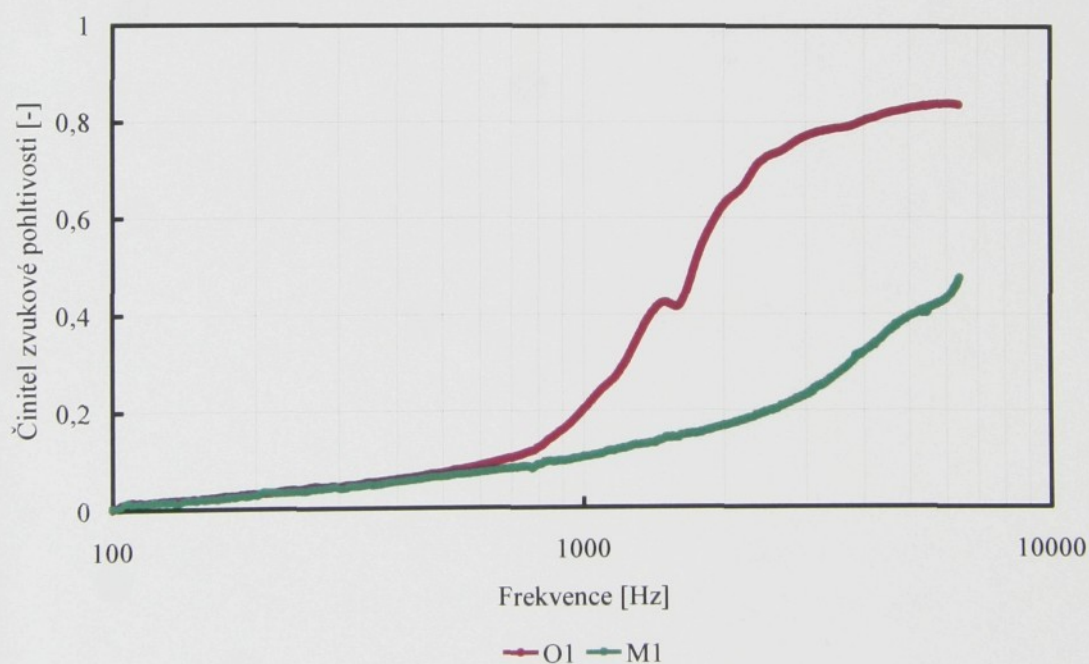
Obraz 78: Činitel zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci zvuku a plošné hmotnosti nanovláknenné vrstvy (1; 0,5 a 0,25  $\text{g.m}^{-2}$ ). Celková tloušťka materiálu je 25 mm.



Obraz 79: Činitel zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci zvuku a plošné hmotnosti nanovláknenné vrstvy (2; 1; 0,5 a 0,25  $\text{g.m}^{-2}$ ). Objemová hmotnost materiálu je  $13 \text{ kg.m}^{-3}$ .

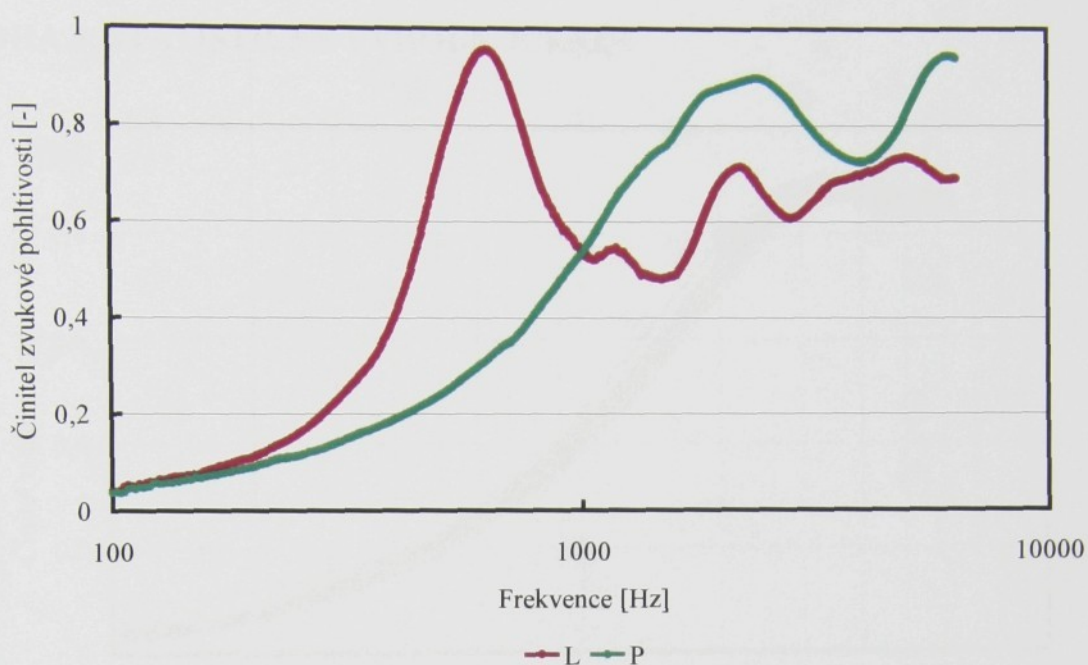


Obraz 80: Činitel zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci zvuku a způsobu přípravy pohltivého systému. Celková tloušťka materiálu je 20 mm.



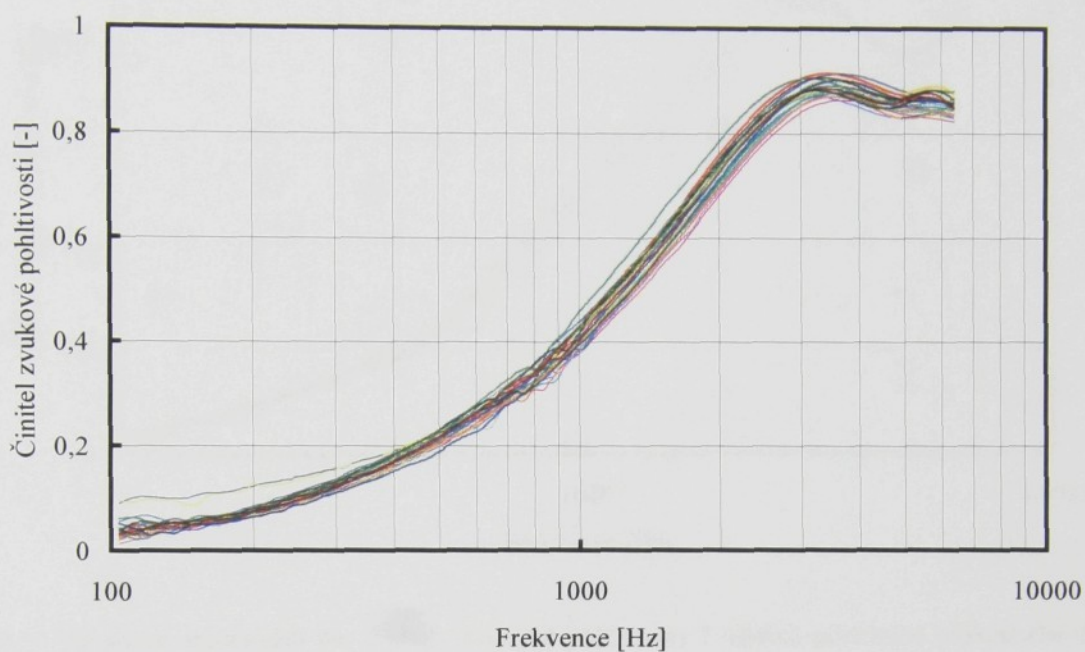
Obraz 81: Činitel zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci zvuku a způsobu přípravy pohltivého systému. Celková tloušťka materiálu je 10 mm.



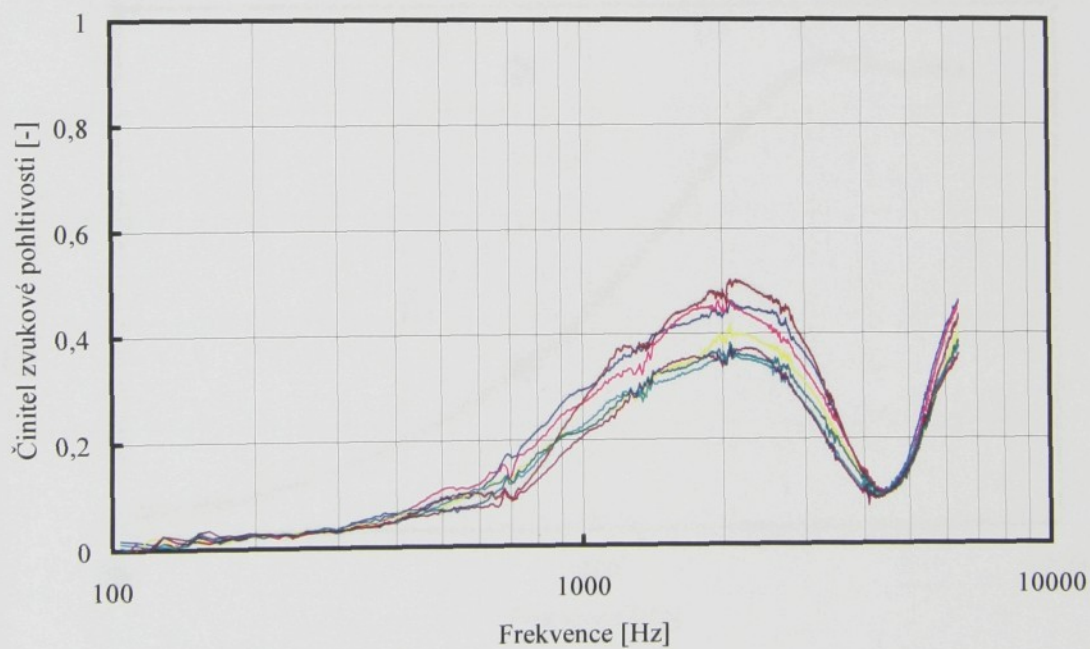


Obraz 82: Činitel zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci zvuku a způsobu přípravy pohltivého systému. Plošná hmotnost nanovlákněné vrstvy je  $2 \text{ g.m}^{-2}$ .

### PŘÍLOHA 3: STATISTICKÉ VYHODNOCENÍ

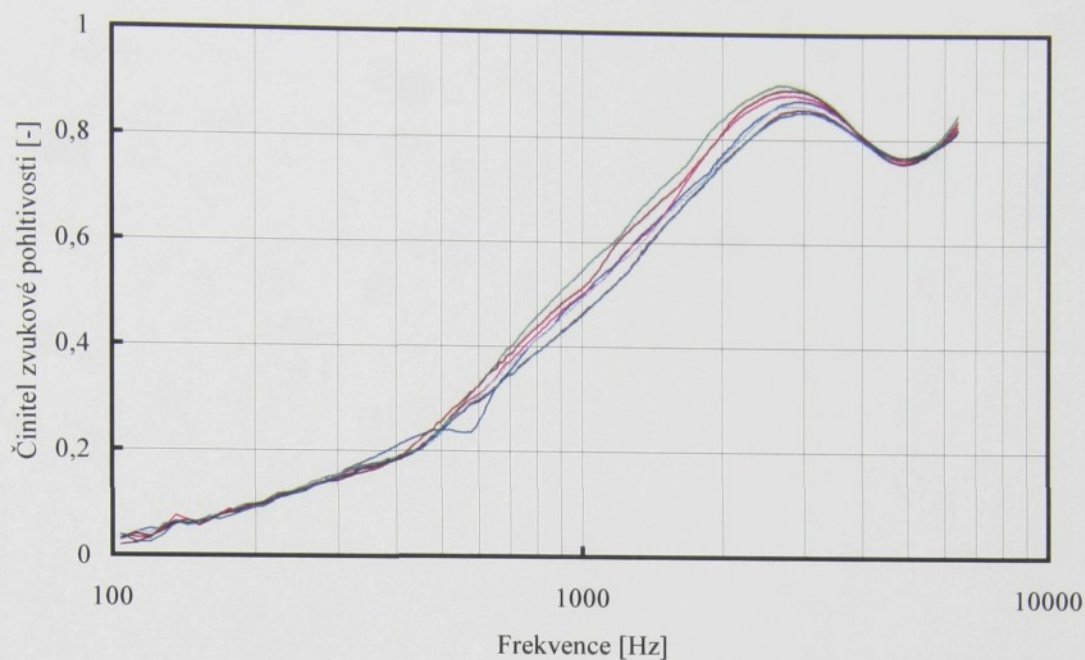


Obraz 83: Statistické zpracování dat činitele zvukové pohltivosti 29 vzorků jednoho porózního materiálu v závislosti na frekvenci zvuku.

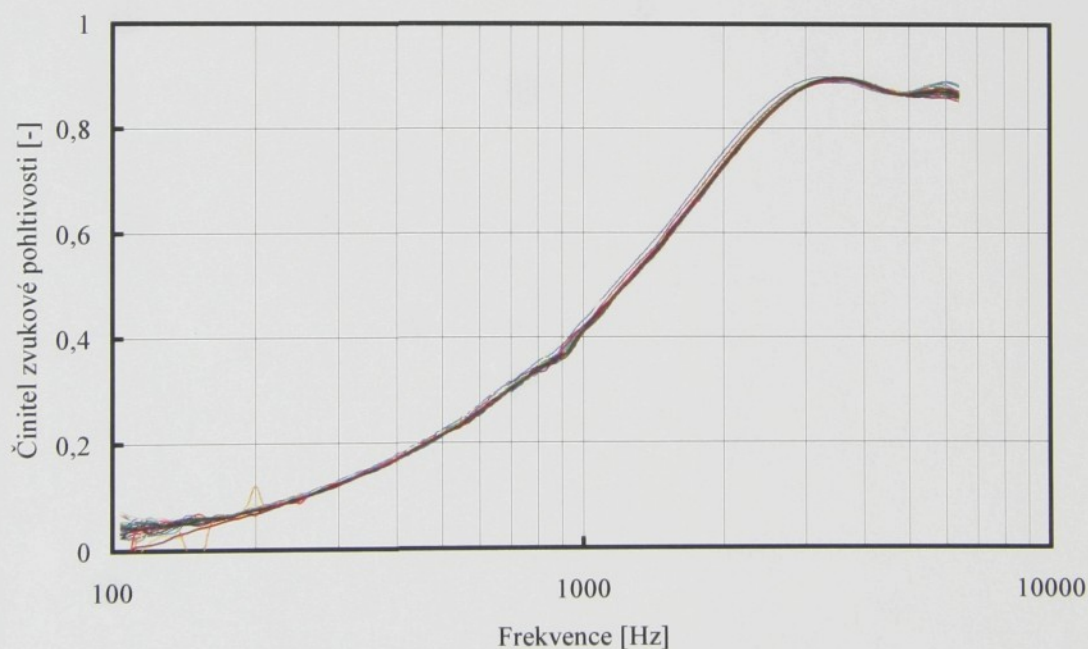


Obraz 84: Statistické zpracování dat činitele zvukové pohltivosti 7 vzorků rezonanční membrány jednoho nanovlákného materiálu v závislosti na frekvenci zvuku.





Obraz 85: Statistické zpracování dat činitele zvukové pohltivosti 7 vzorků porózního vlákenného materiálu s nanovláknennou vrstvou v závislosti na frekvenci zvuku.



Obraz 86: Statistické zpracování dat činitele zvukové pohltivosti 1 vzorku porózního vlákenného materiálu měřeného 30krát v závislosti na frekvenci zvuku.

U 601 T