



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky, informatiky
a mezioborových studií ■

OPTIMALIZACE PARAMETRŮ DUTINOVÝCH REZONÁTORŮ S REZONANČNÍ MEMBRÁNOU

Diplomová práce

Studijní program: N3942 – Nanotechnologie
Studijní obor: 3942T002 – Nanomateriály

Autor práce: **Bc. Tomáš Ulrich**
Vedoucí práce: Ing. Klára Kalinová, Ph.D.





TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC
Faculty of Mechatronics, Informatics
and Interdisciplinary Studies ■

OPTIMISATION OF PROPERTIES OF HELMHOLTZ RESONATORS WITH RESONANCE MEMBRANE

Diploma thesis

Study programme: N3942 – Nanotechnology
Study branch: 3942T002 – Nanomaterials

Author: **Bc. Tomáš Ulrich**
Supervisor: Ing. Klára Kalinová, Ph.D.



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Tomáš Ulrich**
Osobní číslo: **M12000278**
Studijní program: **N3942 Nanotechnologie**
Studijní obor: **Nanomateriály**
Název tématu: **Optimalizace parametrů dutinových rezonátorů s rezonanční membránou**
Zadávací katedra: **Ústav nových technologií a aplikované informatiky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Studium literatury na téma dutinové a membránové rezonátory ve světových vědeckých publikacích, studium metod hodnocení akustických vlastností materiálů.
2. Návrh strukturních parametrů jednotlivých prvků akustického systému (dutinový rezonátor, membránový rezonátor, výplň, krycí materiál).
3. Návrh materiálu jednotlivých prvků s ohledem na požadavky aplikace (nehořlavost, tepelná odolnost, ...).
4. Výroba laboratorních vzorků.
5. Hodnocení akustických vlastností vzorků (činitel zvukové pohltivosti, vložný útlum).
6. Optimalizace strukturních parametrů jednotlivých prvků akustického systému.
7. Ověření akustických vlastností optimálních akustických systémů.
8. Popis optimálních geometrických uspořádání prvků rezonátorů vzhledem ke zvoleným frekvencím zvuku.

Rozsah grafických prací: **dle potřeby**
Rozsah pracovní zprávy: **cca 50-60 stran**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

- [1] Zwikker, C., Kosten, C. W. Sound Absorbing Materials. Elsevier Pub. Co., Amsterdam, 1949. ISBN 0-444-40661-1.
[2] KOLMER, F., KYNCL, J. Prostorová akustika. SNTL Praha, 1980. ISBN 04-514-80.
[3] KALINOVÁ, Klára. Zvuková pohltivost vláknenných materiálů s ohledem na charakteristiku struktury. V Liberci: Technická univerzita, 2005. ISBN 80-7083-997-X.

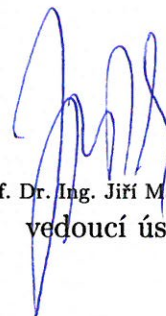
Vedoucí diplomové práce: **Ing. Klára Kalinová, Ph.D.**
Ústav nových technologií a aplikované informatiky

Datum zadání diplomové práce: **20. října 2014**
Termín odevzdání diplomové práce: **15. května 2015**



prof. Ing. Václav Kopecký, CSc.
děkan

L.S.



prof. Dr. Ing. Jiří Maryška, CSc.
vedoucí ústavu

V Liberci dne 20. října 2014

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

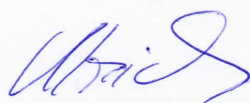
Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum: 14.5.2015

Podpis:



Poděkování

Touto oficiální cestou bych nejprve rád poděkoval především své vedoucí práce, nyní šťastné mamince, paní Ing. Kláře Kalinové, Ph.D., a to nejen za trpělivé a odborné vedení, za umožnění věcně nahlédnout do tajů jiné oblasti fyziky, ale především za její cenné rady při vzniku tohoto díla. Dále bych rád poděkoval zejména Filipu Sanetníkovi, jehož vstřícný přístup mi umožnil vyrobit veškeré testované vzorky. Za ten nejdůležitější prvek mého snažení, nanovláknennou vrstvu, vděčím vždy ochotné Kláře Kučerové. Poděkovat též musím Ing. Ondřeji Kolkovi, Ph.D., bez něhož by tento projekt nedosáhl takových výsledků. Moje velké poděkování patří též panu prof. Dr. Ing. Jiřímu Maryškovi, CSc., který mi ukázal, že vědecká činnost bez odezvy v běžném životě má pramalý smysl.

Ať už přímo, či nepřímo, byl jsem ovlivněn množstvím myšlenek a nápadů lidí, jejichž prostý jmenný seznam by tu nedokázal vystihnout jejich přínos. Děkuji ze srdce všem!

ABSTRAKT

Obečným problémem dneška je vyřešení otázky všudypřítomného hluku, který je velmi obtížné pohlcovat v oblasti nízkých frekvencí zvukového vlnění. Neboť je z principu potřeba materiálu velké tloušťky. Pohltivá sendvičová řešení uvažovaná v této práci jsou založena na rezonančním principu nanovláknenné membrány a úspěšně působí jako tenká širokospektrální zvukově pohltivá řešení. Nanovláknenná vrstva zanedbatelné tloušťky, připravená z roztoku polymeru (např. PA6, PVA, PUR, aj.) metodou elektrostatického zvláknování, je schopna rezonovat na vlastní frekvenci a tím pohlcovat kritické nižší zvukové frekvence. Tyto výjimečné vlastnosti jsou dány povahou nanovláknenných vrstev - zejména malým průměrem vláken, resp. velkým specifickým povrchem. To umožňuje vyšší viskózní ztráty. Optimální tuhost membrány pak díky nanovláknenné struktuře umožňuje snadnější rezonanci systému. Tak byly vyvinuty a optimalizovány akustické systémy ve formě nanovláknenné rezonanční membrány tlumené pohltivým porózním materiálem, které pohlcují zvuk již od oblasti nízkých frekvencí a přitom zůstávají pohltivými pro frekvence vyšší. Resonanční membránou byly dále optimalizovány dutinové rezonátory a perforované panely. Byly navrženy optimální materiály a strukturální parametry jednotlivých akustických prvků. Ty byly poté vyrobeny a jejich pohltivost hodnocena metodou Dvounmikrofonové impedanční trubice. Na základě toho došlo k optimalizaci strukturálních parametrů a byla vybrána nejvýhodnější uspořádání akustických systémů, která byla testována nejprve v laboratorním měřítku opět pomocí Dvou-mikrofonové impedanční trubice, poté nezávislou laboratoří v dozvukové místnosti a nakonec ještě podstoupila zkoušky hořlavosti. Ukázalo se, že akustické systémy s nanovláknennou vrstvou zvyšují hodnoty zvukové pohltivosti a posouvají ji do oblastí nízkých a středních kmitočtů. Oproti samotným akustickým systémům přitom dochází k výraznému snížení tloušťky pohltivého materiálu, přičemž zvuková pohltivost je vyšší či stejná.

Zde optimalizovaná akustická řešení jsou novým technologickým směrem akustiky. Při nízké hmotnosti a minimální tloušťce (nižším odsazení od obkládaných stěn) nabízí účinný, esteticky zajímavý, funkčně modifikovatelný a ekonomicky výhodný způsob jak řešit prostorovou akustiku objektů nebo odhlučnění provozních elektromechanických zařízení.

Klíčová slova

Nanovláknenný, rezonanční, akustický, nízké frekvence, širokospektrální, porózní, činitel zvukové pohltivosti, impedanční trubice, nanovrstva, membrána, perforace, Helmholtz, sendvič.

ABSTRACT

One of the current issues is a solution of an omnipresent background noise, which is really difficult to absorb in the area of low frequencies of sound waves. The basic principle of sound absorption is the fact that the effectiveness of the sound absorbing material increases with its thickness. Absorbing sandwich-like solutions developed in this thesis are based on a resonant principle of a nanofibrous membrane and they function successfully as slim broadband sound absorbing solutions. The resonant nanofibrous layer of insignificant thickness was prepared from a solution of polymer (PA6, PVA, PUR, etc.) with the electrospinning method. Due to the possibility of resonating on its own resonant frequency the nanofibrous membrane is able to absorb critical lower sound frequencies. These unique properties come from the nature of nanofibrous layers – small fibrous diameter, respectively enormous surface area of the layer. This makes it possible to reach higher viscous loss inside the material. Optimal rigidity of the membrane then makes an acoustic system possible to vibrate easier. Thus were developed and optimized acoustic structures in the form of the resonant nanofibrous membrane damped by the fiber web and sound absorbing porous bulk material which absorb sound already from a low-frequency range while they stay absorbing for higher frequencies. Helmholtz-based resonators – cavity resonators and perforated panels, were also optimized with the resonant membrane. The optimal material types and structural characteristics of the each acoustic component have been proposed. Then the earlier designed solutions were made and their sound absorbing ability was estimated in an impedance tube. Structural characteristics were then optimized on the basis of obtained sound absorption coefficients from the impedance tube. The optimal adjustment of acoustics systems, which was tested by an independent reverberant chamber and underwent flammability tests at the same time, were chosen. It turned out the acoustic systems with the nanofibrous layer increase values of sound absorption and move it to the range of low and middle frequencies. While the thickness of those absorption materials is rapidly decreasing, sound absorption remains still the same or higher.

The acoustic solutions presented in this thesis were optimized by adding a nanofibrous membrane. These structures are a new technological section of acoustics. They offer an efficient, aesthetically appealing, functionally modifiable and economically advantageous way how to deal with architectural acoustics or noise elimination of electromechanical operation devices, whereas they excel at low weight and minimal thickness (or air gaps).

Keywords

Nanofibrous, resonant, acoustic, low frequencies, broadband, porous, sound absorption coefficient, impedance tube, nanolayer, membrane, perforation, Helmholtz, sandwich.

OBSAH

Poděkování.....	6
Abstrakt	7
Klíčová slova	7
Abstract	8
Keywords.....	8
Obsah	9
Seznam obrázků	11
Seznam grafů.....	12
Seznam tabulek	14
Seznam příloh.....	14
Seznam použitých symbolů, zkratek a termínů	15
ÚVOD.....	18
Teoretická část	20
1. Vybrané kapitoly z akustiky.....	20
1.1. Zvuk	20
1.1.1. Vlnová délka a frekvence	21
1.1.2. Akustická výchylka.....	21
1.1.3. Akustická rychlost.....	22
1.1.4. Akustický tlak.....	22
1.1.5. Rychlost šíření zvuku	23
1.1.6. Akustický výkon	23
1.1.7. Akustická intenzita	23
1.1.8. Hladinové veličiny	24
1.2. Pohlcování zvuku.....	24
1.2.1. Základní vztahy.....	25
Porózní materiál	27
Rezonanční prvek	27
1.2.2. Mechanika pohlcování	28
1.3. Metody hodnocení akustických vlastností.....	31
2. Návrh strukturních parametrů akustického systému	34
2.1. Výplň.....	34

2.2.	Membránové rezonátory	36
2.3.	Deskové rezonátory.....	39
2.4.	Helmholtzovy rezonátory.....	39
2.5.	Krycí materiál	40
3.	Návrh materiálů akustického systému.....	41
3.1.	Materiál výplně	42
3.2.	Resonanční prvek	44
3.2.1.	Perforované panely	44
3.2.2.	Resonanční membrána.....	46
	Experimentální část.....	48
1.	Výroba laboratorních vzorků.....	48
1.1.	Termická laminace	48
1.2.	Laminace lepením	49
2.	Hodnocení akustických vlastností vzorků	50
2.1.	Metody měření činitele zvukové pohltivosti.....	50
2.2.	Optimální zvuková pohltivost systému	53
2.3.	Naměřené hodnoty činitele zvukové pohltivosti	54
3.	Optimalizace strukturních parametrů.....	62
3.1.	Membránové rezonátory	62
3.2.	Rezonátory Helmholtzova typu.....	65
4.	Ověření zkoumaných vlastností	69
4.1.	Akustické vlastnosti.....	69
4.2.	Hořlavost	72
5.	Popis optimálních uspořádání prvků.....	73
	Závěr.....	81
	Seznam použité literatury	84
	Přílohy	88

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr.1:	Schematická ilustrace Helmholtzova rezonátoru.	27
Obr.2:	Zobrazení mechanické analogie akustické rezonanční soustavy.	30
Obr.3:	Schematické zobrazení Helmholtzova rezonátoru ve formě perforovaného panelu.	31
Obr.4:	Názorná ilustrace rozkladu dopadající akustické energie na energie jiné.	31
Obr.5:	Schéma principu fungování membránové rezonanční akustické soustavy.	36
Obr.6:	Průběh činitele zvukové pohltivosti pro kmitající membránu následovanou vzduchovým polštářem a výplní z porózního materiálu.....	37
Obr.7:	Zobrazení akustického panelu na principu Helmholtzova rezonátoru.	40
Obr.8:	Obrázek průřezu použité Dvoumikrofonové impedanční trubice.	51
Obr.9:	Fotografie zobrazující schéma použité měřící aparatury.	52
Obr.10:	Graf znázorňující rozdílné trendy zvukové pohltivosti mezi základními druhy zvukově pohltivých řešení.	54
Obr.11:	Činitel zvukové pohltivosti pro 20mm desku Cello HR 290/0.	70
Obr.12:	Praktický činitel zvukové pohltivosti pro 20mm desku Cello HR 290/0.	70
Obr.13:	Činitel zvukové pohltivosti pro 20mm desku Cello F800 FR HO.	70
Obr.14:	Činitel zvukové pohltivosti pro 1mm Al panel Qg 8-10 s nanovláknennou vrstvou.	71
Obr.15:	Činitel zvukové pohltivosti pro 1mm Al panel Qg 8-10 s nanovláknennou vrstvou - výsledky z impedanční trubice.	71

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1: Činitel zvukové pohltivosti pro 20mm desku Isover TDPS (105 gsm) bez a s nanovláknennou vrstvou (1,3 gsm).....	55
Graf 2: Činitel zvukové pohltivosti pro 30mm desku Cello 491 s Eswegee a Eswegee s nanovláknennou vrstvou (0,2 gsm).....	56
Graf 3: Činitel zvukové pohltivosti pro 32mm desku z recyklovaného PUR bez a s nanovláknennou vrstvou různých plošných hmotností.	56
Graf 4: Činitel zvukové pohltivosti pro 20mm desku Cello F800 FR HO bez nano, s Eswegee a s nanovláknennou vrstvou o plošné hmotnosti 0,2 gsm.	57
Graf 5: Činitel zvukové pohltivosti pro 50mm desku Cello HR 290/0 bez nano a s nanovláknennou vrstvou o plošných hmotnostech 0,2-1 gsm.	58
Graf 6: Činitel zvukové pohltivosti pro 16mm Akustickou kazetu AVS3 - vlevo bez nano a vpravo s nanovláknennou vrstvou (0,2 gsm).	58
Graf 7: Činitel zvukové pohltivosti pro 13mm panel z PA6 s čtvercovým otvorem (56 mm) - vlevo bez nano a vpravo s nanovláknennou vrstvou (0,2 gsm).....	59
Graf 8: Činitel zvukové pohltivosti pro 3mm desku z PMMA s kruhovým otvorem (6 mm) - vlevo bez nano a vpravo s nanovláknennou vrstvou (0,2 gsm).....	60
Graf 9: Činitel zvukové pohltivosti pro 1mm plech z Al s kruhovými otvory (2,3/3 mm) - vlevo bez nano a vpravo s nanovláknennou vrstvou (0,2 gsm).....	61
Graf 10: Činitel zvukové pohltivosti pro 0,2mm sklovláknitou mřížku R56 se čtvercovým vzorem (2,2 mm) - vlevo s nanovláknennou vrstvou (0,2 gsm) z jedné strany, vpravo s tou samou nanovláknennou vrstvou z obou stran.....	62
Graf 11: Činitel zvukové pohltivosti pro tři různé polymery o dvou koncentracích zvláknovacího roztoku. Za nanovláknennou vrstvou (1 gsm) byla umístěna 30 mm výplň Tarotex (600 gsm).	63
Graf 12: Činitel zvukové pohltivosti v závislosti na plošné hmotnosti (0,2 – 1 gsm) nanovláknenné membrány nanosené na 46mm rouno F800 FR HO vlevo a 50mm pěnu HR 290/0. 63	
Graf 13: Činitel zvukové pohltivosti v závislosti na plošné hmotnosti (0,2 – 1 gsm) nanovláknenné membrány nanosené na 46mm rouno F800 FR HO vlevo a 50mm pěnu HR 290/0. 64	
Graf 14: Činitel zvukové pohltivosti pro porózní vláknitý materiál z PES, porózní pěnový materiál založený na melaminové pryskyřici a porózní materiál z recyklovaného PUR.	64
Graf 15: Činitel zvukové pohltivosti pro Akustické kazety AVS3 s menší roztečí otvorů - vlevo a AVS1 s větší roztečí otvorů – vpravo.	65
Graf 16: Činitel zvukové pohltivosti pro Akustickou kazetu AVS1 s nanovrstvou (0,2 gsm).	66
Graf 17: Činitel zvukové pohltivosti pro desky z PA6 s kruhovým otvorem 80 mm - vlevo a 40 mm - vpravo.	66
Graf 18: Činitel zvukové pohltivosti pro 2mm panel z HPS s kruhovým otvorem 8 mm.	67

Graf 19:	Činitelé zvukové pohltivosti pro 2mm panel z HPS s kruhovým otvorem 6 mm. Vlevo s aplikovanou nanovláknennou membránou (0,2 gsm) a vpravo s těsně přiloženým 20mm rounem Cello F800...	67
Graf 20:	Činitel zvukové pohltivosti pro 1mm Al panel perforovaný kruhovými otvory 2,3 mm – vlevo s nanovrstvou z jedné strany, vpravo z obou.	68
Graf 21:	Činitel zvukové pohltivosti pro 0,95mm sklovláknitou mřížku R267 s otvory 8,5x6,5 mm v provedení s nanovrstvou (0,2 gsm) z obou stran.	68
Graf 22:	Činitel zvukové pohltivosti pro 8mm vzorek rouna Cellofoam F800FR HO bez povrchové úpravy, s krycí tenkou netkanou textilií a nakonec s nanovláknennou vrstvou.	74
Graf 23:	Činitel zvukové pohltivosti pro 18mm vzorek rouna Cellofoam F800FR HO bez povrchové úpravy, s krycí tenkou netkanou textilií a nakonec s nanovláknennou vrstvou.	74
Graf 24:	Činitel zvukové pohltivosti pro 43mm vzorek rouna Cellofoam F800FR HO bez povrchové úpravy, s krycí tenkou netkanou textilií a nakonec s nanovláknennou vrstvou.	75
Graf 25:	Činitel zvukové pohltivosti pro 8mm vzorek rouna Cellofoam F800FR HO s nanovláknennou vrstvou (0,4 gsm) v porovnání s 8 a 18mm rounem bez nano.	75
Graf 26:	Činitel zvukové pohltivosti pro 18mm vzorek rouna Cellofoam F800FR HO s nanovláknennou vrstvou (0,4 gsm) v porovnání s 18 a 43mm rounem bez nano.	76
Graf 27:	Činitel zvukové pohltivosti pro sendvič tří 17mm roun Cello F800 FR HO s nanosenými nanovrstvami o různých plošných hmotnostech VS to samé rouno tloušťky 45 mm s nanovrstvou 0,4 gsm.....	76
Graf 28:	Činitel zvukové pohltivosti pro 10mm vzorek pěny Cellofoam HR 290/0 bez povrchové úpravy, s krycí tenkou netkanou textilií a nakonec s nanovláknennou vrstvou (1 gsm).	77
Graf 29:	Činitel zvukové pohltivosti pro 20mm vzorek pěny Cellofoam HR 290/0 bez povrchové úpravy, s krycí tenkou netkanou textilií a nakonec s nanovláknennou vrstvou (1 gsm).	77
Graf 30:	Činitel zvukové pohltivosti pro 50mm vzorek pěny Cellofoam HR 290/0 bez povrchové úpravy, s krycí tenkou netkanou textilií a nakonec s nanovláknennou vrstvou (1 gsm).	77
Graf 31:	Činitel zvukové pohltivosti pro 10mm vzorek pěny Cellofoam HR 290/0 s nanovláknennou vrstvou (1 gsm) v porovnání s 10 a 20mm penou bez nano.	78
Graf 32:	Činitel zvukové pohltivosti pro 20mm vzorek pěny Cellofoam HR 290/0 s nanovláknennou vrstvou (1 gsm) v porovnání s 20 a 50mm penou bez nano.	78
Graf 33:	Činitel zvukové pohltivosti pro sendvič 0,58mm sklovláknité mřížky R170 a 1mm Al mřížky s kruhovými otvory 2,3 mm s nanovrstvami (0,2 gsm) u obou z rubové strany.	80
Graf 34:	Činitel zvukové pohltivosti pro sendvič 0,95mm sklovláknité mřížky R267 a 1mm Al mřížky s kruhovými otvory 2,3 mm. Mřížka R267 měla nanovrstvy (0,2 gsm) z obou stran, Al mřížka jen z rubové strany	80

SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Tabulka zobrazující třídy zvukové pohltivosti a jim odpovídající hodnoty NRC.	33
Tab. 2: Výsledky zkoušky Stanovení hořlavosti materiálů pro výrobu a interiéry automobilů, traktorů, lesnických a zemědělských strojů pro 20mm Cello HR 290/0.	72
Tab. 3: Výsledky zkoušky Stanovení hořlavosti materiálů pro výrobu a interiéry automobilů, traktorů, lesnických a zemědělských strojů pro 20mm Cello F800 FR H0.	73

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1: Tabulka zobrazující nejefektivnější frekvenční využitelnost pohltivého materiálu podle jeho tloušťky.	88
Příloha 2: Tabulka shrnující základní parametry akustických prvků a pro ně použité laminační techniky při výrobě akustického systému.	88
Příloha 3: Fotografie z dozvukové místnosti zobrazující akustické panely založené na pěnové hmotě Cello HR 290/0.	91
Příloha 4: Fotografie zobrazující kruhové vzorky založené na rounu Cello F800.	91
Příloha 5: Fotografie zobrazující kruhové vzorky sklovláknitých mřížek připravených pro měření v impedanční trubici.	91
Příloha 6: Fotografie zobrazující akustické desky založené na MDF.	91
Příloha 7: Snímek z mikroskopu (SEM) zobrazující průměry vláken použité nanovlákněné rezonanční membrány z PA6.	92
Příloha 8: Snímek z mikroskopu (SEM) zobrazující řez nanovlákněnou membránou z PA6.	92
Příloha 9: Fotografie akustických panelů založených na PUR pěně Cello 461 sloužících k odhlučnění mechanických zařízení (vyrobena pro společnost OCHI-INŽENÝRING).	93

Seznam použitých symbolů, zkratk a termínů

<i>A</i>	plocha rezonátoru
<i>AA</i>	<i>Acidum Aceticum</i> (kyselina octová)
<i>Al</i>	<i>Aluminium</i> (hliník)
<i>alkálie</i>	zásaditá látka (chemicky)
<i>c</i>	rychlost šíření zvuku
<i>c_a</i>	akustická poddajnost
<i>c_m</i>	mechanická poddajnost
<i>CV</i>	<i>cushion vinyl</i> (měkčené PVC)
<i>d</i>	vzdálenost panelu od stěny
<i>d_v</i>	tloušťka vzduchového polštáře (porózního materiálu)
<i>D_v</i>	vložný útlum
<i>DTD</i>	základní dřevotřísková deska bez povrchové úpravy
<i>el.</i>	elektrický
<i>electrospining</i>	elektrostatické zvlákňování
<i>EPDM</i>	etylen propylenová pryž
<i>EVA</i>	etylen vinyl acetát (kopolymer)
<i>f</i>	frekvence kmitání (kmitočet)
<i>f_m</i>	mezní frekvence
<i>f_r</i>	vlastní (rezonanční) frekvence
<i>FA</i>	<i>Acidum Formicum</i> (kyselina mravenčí)
<i>gsm</i>	plošná hmotnost (gram per square meter)
<i>h</i>	poróznost; tloušťka materiálu
<i>H</i>	frekvenční přenosová funkce
<i>HPS</i>	houževnatý polystyren
<i>I</i>	akustická intenzita (obecně symbol pro intenzitu)
<i>k</i>	vlnové číslo (vlnočet)
<i>K</i>	modul objemové pružnosti
<i>l</i>	výška (dutiny), nebo tloušťka panelu
<i>L</i>	hladina akustické intenzity
<i>LTD</i>	laminovaná dřevotřísková deska
<i>L_p</i>	hladina akustického tlaku
<i>m_a</i>	akustická hmotnost
<i>m_s</i>	parametr struktury materiálu
<i>m_{sq}</i>	plošná hmotnost membrány (desky)
<i>melamin</i>	organická sloučenina typu formaldehydové pryskyřice s různými plnivy
<i>MFD</i>	středně hustá dřevovláknitá deska (bez lepidla)
<i>n</i>	činitel udávající typ termodynamických pochodů v pórech materiálu
<i>NRC</i>	koeficient hlukové redukce (součinitel zvukového útlumu)
<i>OSB</i>	dřevoštěpková stavební deska
<i>p</i>	akustický tlak (obecně symbol pro tlak)
<i>p₀</i>	amplituda akustického tlaku
<i>p_i</i>	složka dopadajícího akustického tlaku

p_r	ložka odraženého akustického tlaku
PA	polyamid (varianty PA6; PA 6,6)
PA6	varianta polyamidu
PAN	polyakrylonitril
PC	polykarbonát
PE	polyetylen
peak	anglicky vrchol (maximum křivky)
PES	polyester
PET	polyetylentereftalát
PMMA	polymethylmetakrylát (plexisklo)
PP	polypropylen
PUR, PU	polyuretan
PVA	polyvinylalkohol
PVC	polyvinylchlorid
r	poloměr (dutiny)
r_p	průměrný poloměr pórů materiálu
R	stupeň vzduchové neprůzvučnosti
R_a	akustický odpor
R_m	mechanický odpor
R_0	činitel zvukové odrazivosti
S	plocha (dutiny, hrdla)
t	čas
T	časová perioda; doba dozvuku
T_1	doba dozvuku prázdné dozvukové místnosti
T_2	doba dozvuku s vloženým zkoumaným materiálem
v	akustická rychlost (obecně symbol pro rychlost)
v_m	amplituda akustické rychlosti
V	objem
W	akustický výkon (obecně symbol pro výkon)
x	vzdálenost (od počátku) ve směru osy x
y	uvažovaná veličina
z	měrná akustická impedance (akustický vlnový odpor prostředí)
Z	akustická impedance
a	akustická výchylka
a_m	maximální akustická výchylka
α	činitel zvukové pohltivosti
α_w	vážený činitel zvukové pohltivosti
α_s	činitel zvukové pohltivosti pro třetinooktávové pásmo
α_p	praktický činitel zvukové pohltivosti pro oktávové pásmo
β	činitel zvukové odrazivosti
ε	činitel přeměny akustické energie
ϕ	úhel dopadu; fáze
λ	<i>lambda</i> (vlnová délka)

η	viskozita vzduchu (případně dynamická viskozita vystihující vzájemné tření)
ω	úhlová rychlost
ρ	hustota (plynu)
σ	měrný odpor porózního materiálu
τ	součinitel zvukové průzvučnosti
ϑ	činitel struktury
χ	Poissonova konstanta

ÚVOD

Dnešní doba je čím dál tím více charakterizovaná odklonem od přírody a jejího řádu. Jednou ze změn, která stále nabývá na významu, je ztráta přirozeného prostředí na úkor prostředí umělého. S touto ztrátou se pojí snižování soukromí, které je právě podmíněno neustále vzrůstající lidskou populací a její činností. Rozvoj techniky a narůstající závislost lidské populace na ní vede k jejímu nutnému obklopení člověka. A právě s tím vším souvisí i narůstání míry nežádoucích zvuků – hluk. Ten stále více negativně ovlivňuje větší množství populace a má vliv na její zdraví. Vzhledem k tomu, že jsou lidé téměř všude vystaveni tomuto zdravotnímu riziku způsobujícím neurologické i biologické poruchy, hledají se stále účinnější metody, jak hluk eliminovat. V této práci se navázalo na dosavadní poznatky a byla vyvinuta účinná řešení pro širokopásmové pohlcení nežádoucích zvukových projevů, která mohou najít uplatnění v široké sféře oblastí komerčních i nekomerčních.

Ačkoli se z názvu práce může zdát, že její náplní je optimalizace jen jednoho z akustických prvků, který je sice k pohlcování zvuku velmi často využíván – Helmholtzův rezonátor, tak skutečné meritum práce leží jinde a je komplexnější. Cílem je, jak vyplývá ze zadání, volbou a kombinací prvků vhodných vlastností, dosáhnout optimálních funkčních akustických systémů jako celku. Takovéto systémy skládající se z několika prvků tak vlastně tvoří jakési sendviče, jejichž úkolem je zkombinovat užité vlastnosti jednotlivých složek, aby bylo dosaženo co nejefektivnějšího pohlcení zvuku v širokém pásmu frekvencí. Takovéto „sendviče“ jsou založeny na rezonančním principu jedné, či více složek. Ve své podstatě tak vlastně jde o realizaci z definice podobnou kompozitnímu materiálu, přičemž zde již samotné jednotlivé prvky jsou často charakteru kompozitu. Úvodem je však pro ujasnění třeba říci, že o kompozit jako takový, v pravém slova smyslu, se zde nejedná. Ačkoli ona analogie je pro pochopení problematiky příhodná, u těchto akustických systémů se nedosahuje lepších výsledných vlastností pouhým součtem průměrných vlastností jednotlivých prvků, jakožto spíše citlivým hledáním optimálního vyváženého řešení. Samotné akustické prvky totiž často vykazují velmi dobré akustické vlastnosti již sami o sobě, nicméně tyto vlastnosti jsou cíleně zaměřeny na určitou frekvenční oblast zvuku. Typicky jsou to deskové dutinové rezonátory zaměřené na pohlcení specifické nízké frekvence. Potom, co jsou prvky zakomponovány do celostního akustického systému, jsou jejich vlastnosti ovlivněny dalšími prvky a dochází jak k jejich změně oproti samotnému působení, tak ke změnám chování pohlcovaných zvukových vln. Nereagují totiž na zvukové vlnění samostatně, ale už s ohledem na další část systému. To se projevuje změnou akustických parametrů – posun maxima zvukové pohltivosti, snížení (resp. zvýšení) maxima pohltivosti, změna pohltivé oblasti obecně...

Následující kapitoly se tak počínají základním přiblížením problematiky pohltivosti zvuku, přes návrhy jednotlivých pohltivých systémů, až po konkrétní výsledky z měření vyrobených pohltivých systémů, snaží najít optimální možná řešení pohlcování zvuku vhodnou volbou jednotlivých částí, aby bylo dosaženo co nejlepšího výsledku v co nejširším frekvenčním rozsahu, a to s důrazem na zvukovou pohltivost již od problematických nejnižších frekvencí. K tomu výrazně přispívá začlenění jedinečného akustického prvku, který využívá pokroku, k němuž došlo v poslední desítky let v nanotechnologiích, mezidisciplinárním uchopením světa jdoucím až na úroveň atomů, a sice rezonanční membrány na bázi nanovláken. Díky tomu, že jsme nyní schopni vyrábět požadovaná nanovlákná ve velkém měřítku, takřka průmyslově, mohou být uplatněny nové specifické vlastnosti nanovláken v porovnání se stávajícími vlákny, často mikronových rozměrů, i v akustice. Zvukově pohltivé systémy v této práci tedy využívají rezonančních prvků založených právě na nanovláknenných vrstvách, kde se s úspěchem uplatňuje jejich malý průměr, resp. velký měrný povrch. Toto řešení využívající nanovláken je vidět ve všech zde vyzkoušených provedeních, kdy se hledaly i jeho optimální parametry. [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 43]

TEORETICKÁ ČÁST

1. Vybrané kapitoly z akustiky

Akustikou rozumíme rozsáhlý vědní obor zabývající se komplexně zvukem. Popisuje jeho vznik, přenos prostorem až po vnímání lidskými smysly. Následující podkapitoly se zaměřují jen na to nejnútnejší, pro hlubší vhléd do problematiky autor odkazuje na citovanou literaturu. Níže bude řečeno, co to vlastně zvuk je. Jak se zvuk popisuje. Jak je možné zvuk pohlcovat. A nakonec, jak je to prakticky prováděno.

1.1. Zvuk

Za zvuk je považováno jakékoliv kmitání pevného či tekutého prostředí v oblasti kmitočtů schopných vyvolat v lidském sluchovém orgánu zvukový vjem. Standardně bývá uváděna oblast mezi 16 Hz a 16 kHz. Kde pod touto slyšitelnou hranicí je zvuk označován jako infrazvuk a nad ní jako ultrazvuk. Každý zvuk, který člověk vnímá rušivě, nepříjemně, nebo na něj působí obecně negativně (psychika i měřitelné poškození), se nazývá hlukem. Hluk může mít jak charakter periodického (nadměrný zvuk tónového charakteru), tak i neperiodického zvuku. Ačkoli je lidské ucho citlivé převážně na vyšší frekvence zvuku odpovídající lidskému hlasu (1 – 4 kHz), vnímá i frekvence nižší (brum elektrických spotřebičů využívajících střídavé napětí). Lidské tělo je však obecně citlivé na jakoukoli formu hluku. [3, 5, 13, 14]

Hovoříme-li o šíření zvuku, máme na mysli hmotná látková prostředí. Ve vakuu se zvuk nešíří. Zvukové vlnění postupuje prostředím od zdroje zvuku ve vlnoplochách. Vlnoplocha je význačná tím, že ve všech bodech obálky vlnoplochy je v daném časovém okamžiku stejný akustický stav. Každý bod vlnoplochy, do kterého dospělo v určitém okamžiku vlnění, můžeme pokládat za bodový zdroj elementárního vlnění. To se z něj dále šíří v elementárních vlnoplochách. Každý hmotný element prostředí je tak vlastně oscilátorem. Vychýlením z jeho rovnovážné polohy se poruší rovnováha sil a začnou převládat síly, které se snaží hmotný bod vrátit do rovnovážné polohy. Takovéto prostředí označujeme jako pružné prostředí. Jde tak o vlnění mechanické, jehož podstatou je přenos kmitání látkovým prostředím, kdy šíření vln není spojeno s přenosem látky samotné, ale s přenosem energie. Částice vzduchu přenášejí zvuk kmitáním kolem svých rovnovážných poloh ve směru šíření zvukových vln. Dochází tak k neustálému zhušťování a zředování částic vzduchu, což se makroskopicky projevuje časovými i prostorovými změnami tlaku. Zde je dobré poznamenat, že s tlakovými změnami dochází ke změnám teplotním. [2, 5, 10, 13, 14, 42]

Běžně se zabýváme šířením zvuku ve vzduchu, kde se zvuk šíří, stejně jako v jiných plynech a kapalinách, podélným vlněním. To zda jde o vlnění podélné, nebo příčné, obecně určuje směr kmitání částic prostředí vzhledem ke směru šíření vlnění. Plyny a kapaliny jsou prostředí pružná pouze ve smyslu objemové stlačitelnosti. U materiálů elastických se však může vyskytovat spolu s podélným i vlnění příčné, protože vykazují pružnost nejenom v tahu a tlaku, ale i smyku. Kombinací těchto namáhání vzniká kmitání ohybové.

Z výše uvedeného vyplývá, že můžeme nejjednodušší fyzikální oscilátory (struna, ladička, pružina apod.) považovat za zdroje zvuku. Jestliže hmotný bod, který vytváří vlnění, kmitá harmonicky, vzniká vlna sinusového průběhu, která je charakterizovaná vztahem:

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

kde λ je vlnová délka, c je rychlost šíření zvuku, T je perioda a f značí frekvenci kmitání. Je však nutné připomenout, že takovéto děje též mohou probíhat i neperiodicky. [1, 3, 4, 5, 14, 38, 43]

1.1.1. Vlnová délka a frekvence

Vlnovou délkou rozumíme vzdálenost (v metrech) mezi dvěma nejbližšími body, které jsou v daném časovém okamžiku ve stejném akustickém stavu – kmitají ve fázi. Uvažujeme-li zvukovou vlnu, tak vzdálenost, kterou zvuková vlna urazí za dobu jedné periody (jednoho svého kmitu), je právě vlnová délka zvukové vlny.

Frekvence (kmitočet) udává počet opakování periodického děje za daný časový úsek, tedy počet kmitů zvukové vlny za jednotku času. Jednotkou frekvence je jeden hertz – Hz (s^{-1}).

Mezi oběma těmito fyzikálními veličinami existuje převrácený vztah vyplývající z rovnice (1) a jde o velmi důležité základní akustické parametry, viz dále. [2, 3, 4, 5, 10, 14, 38, 42, 43]

1.1.2. Akustická výchylka

Výchylku kmitající částice daného prostředí z její rovnovážné polohy nazýváme akustickou výchylkou. Kmitání jednotlivých částic je fázově opožděno vůči kmitání počáteční. Pro okamžitou akustickou výchylku platí vztah:

$$a = a_m \cdot \sin \omega \left(t \pm \frac{x}{c} \right), \quad (2)$$

kde a_m je maximální akustická výchylka, ω je úhlová rychlost, t je čas, x je vzdálenost od počátku a c je rychlost šíření zvuku. Přičemž záporné znaménko v závorce platí pro šíření v kladném smyslu osy x a kladné znaménko naopak v záporném smyslu osy x . [2, 3, 5, 14, 38, 43]

1.1.3. Akustická rychlost

Střídavá rychlost, kterou částice daného prostředí, jímž se šíří zvuková vlna, kmitají kolem svých rovnovážných poloh, nazýváme akustickou rychlostí. Akustická rychlost je určována nejen velikostí, ale i směrem. Jde tedy o vektorovou veličinu a lze ji popsat třemi hodnotami. Její vztah získáme, provedeme-li první parciální derivaci akustické výchylky ze vztahu (2) podle času:

$$v = \frac{\partial a}{\partial t} = \omega \cdot a_m \cdot \cos \omega \left(t \pm \frac{x}{c} \right) = v_m \cdot \cos \omega \left(t \pm \frac{x}{c} \right) \quad (3)$$

Součin úhlové rychlosti a amplitudy výchylky nám dává amplitudu akustické rychlosti v_m . Porovnejme mezi sebou vztahy pro akustickou výchylku a rychlost a zjistíme, že se výchylka od akustické rychlosti liší jak amplitudou, tak i fází (sin/cos). Akustická rychlost je jednou z nejdůležitějších akustických veličin a je jí nutné odlišit od rychlosti šíření zvuku. Velikost akustické rychlosti je řádově mnohem menší než rychlost šíření zvuku. [2, 3, 5, 10, 13, 14, 38, 42, 43]

1.1.4. Akustický tlak

Uvažujeme-li případ, kdy se prostředím nešíří zvuk, je v takovém omezeném prostředí stejný tzv. atmosférický tlak (daná teplota a nadmořská výška). Šíří-li se však prostředím zvuková vlna, dochází, jak již bylo řečeno výše, k nárůstu a poklesu koncentrace částic prostředí. To se v plynech a kapalinách navenek projevuje k přetlaku a podtlaku. Tlak atmosférický (barometrický) je tak doprovázen tlakem akustickým a celkový statický tlak je dán jejich součtem. Pro srovnání je dobré si uvědomit, že zatímco hodnota atmosférického tlaku je řádově 10^5 Pa, akustický tlak je veličina o mnoho řádů menší. Je uváděno, že zdravé lidské ucho začíná vnímat akustické tlaky od hodnot $2 \cdot 10^{-5}$ Pa.

Akustický tlak způsobuje změny hustoty a teploty prostředí. V námi uvažovaném prostředí - vzduchu, ho z hlediska termodynamiky považujeme za děj adiabatický. Adiabatický kvůli malé tepelné vodivosti vzduchu a příliš rychlému průběhu tlakových změn i pro velmi nízké frekvence zvuku. Matematický zápis jeho průběhu je analogický zápisu vztahů pro akustickou výchylku a rychlost, přičemž akustický tlak je veličina skalární. Navíc mezi akustickou rychlostí a tlakem je v obecném případě fázový rozdíl ($\pi/2$). Pro postupující rovinou vlnu je fázový rozdíl $\varphi = 0$, pro stojaté vlnění je rozdíl fází $\varphi = 90^\circ$.

$$\begin{aligned} p &= p_0 \cdot \cos \omega \left(t - \frac{x}{c} \right) \\ p &= p_0 e^{i\omega \left(t - \frac{x}{c} \right)} \end{aligned} \quad (4)$$

Přičemž p_0 značí amplitudu akustického tlaku a p jeho komplexní hodnotu. [2, 3, 4, 5, 10, 13, 38, 42]

1.1.5. Rychlost šíření zvuku

Rychlost, kterou se šíří zvukové vlny prostředím, nazýváme rychlost šíření zvuku. Jde o konstantní fyzikální veličinu, uvažujeme-li daný fyzikální stav prostředí. Na rozdíl od akustické rychlosti je rychlost šíření zvuku veličinou stejnosměrnou a její velikost je určována tepelnými vlastnostmi prostředí – hustotou a atmosférickým tlakem.

$$c = \sqrt{\frac{\chi \cdot p}{\rho}} \quad (5)$$

Ve vztahu (5) značí p tlak plynu v rovnovážném stavu, χ Poissonovu konstantu a ρ je hustota plynu. Pro teplotu 20 °C se v literatuře standardně objevuje hodnota rychlosti šíření zvuku $c = 344$ m/s.

Obecně určit rychlost akustického vlnění v pevných látkách je velice složité. Proto se nejprve odvozují modely šíření akustických vln tenkou tyčí, deskou atd. Zde je vhodné upozornit na to, že pro výpočet rychlosti šíření zvuku v daném materiálu je třeba znát dynamický modul pružnosti a ten se od statického modulu pružnosti u některých materiálů značně liší. Přičemž pokud v našich modelech uvažujeme i šíření příčných vln, tak např. pro běžné konstrukční materiály vlivem kontrakce dosahuje rychlost příčných (torzních) vln zhruba dvou třetin rychlosti podélných vln a s tím je nutné dále počítat. [2, 3, 5, 13, 38, 42, 43]

1.1.6. Akustický výkon

Pod pojmem akustický výkon rozumíme výkon, který do svého okolí vyzařuje zdroj zvuku. Je závislý na velikosti plochy a intenzitě zvukového zdroje. Vyjadřuje celkovou zvukovou energii procházející plochou. Akustický výkon W [W] je dán následujícím vztahem:

$$W = \int_{(S)} \vec{I} \cdot \vec{dS}, \quad (6)$$

kde \vec{dS} je vektor velikosti dS ležící ve směru normály na plochu S , I je akustická intenzita a S je plocha, na kterou působí akustický výkon. Jak vidno, jde o integrál ze skalárního součinu. [3, 4, 5, 38, 42, 43]

1.1.7. Akustická intenzita

Jak bylo řečeno dříve, šíření zvuku je spojeno s přenosem energie. Potom akustický výkon (tok akustické energie), který projde jednotkovou plochou kolmou na směr šíření zvukové vlny, nazýváme intenzitou zvuku I [W/m²]. Intenzita zvuku je dána vztahem svazujícím hustotu prostředí s rychlostí šíření zvuku, kvadrátem úhlové rychlosti a kvadrátem maximální výchylky: [4, 5, 38, 42]

$$I = \frac{1}{2} \cdot \rho c \omega^2 a_m^2 \quad (7)$$

1.1.8. Hladinové veličiny

Vzrůst individuálního sluchového vjemu se v zásadě řídí logaritmickým zákonem. Uvážíme-li, že akustický tlak slyšitelného rozsahu vjemů přesahuje sedm dekad, jeho vyjádření v Pascálech vede k nepraktickému zápisu, který by vybízel k chybování. Oba tyto důvody vedou k tomu, že jsou vjemové veličiny vyjadřovány v stupnici logaritmické [dB] k určité vztažené, referenční hodnotě (ta je vždy dána):

$$L_y = 10 \cdot \log\left(\frac{y^2}{y_0^2}\right) = 20 \cdot \log\left(\frac{y}{y_0}\right) \quad (8)$$

A u energetických veličin, např. výkonu či intenzity, závislých na kvadrátu sledované veličiny následovně:

$$L_{energ} = 10 \cdot \log\left(\frac{y_{energ}}{y_0}\right) \quad (9)$$

Údaj hladiny dané veličiny by neměl sám o sobě význam, jelikož nevyovídá nic o poloze signálu na frekvenční ose. Například pro **hladinu akustického tlaku** L_p (za y v rovnici (8) dosadíme p), kde je za výchozí (referenční) hodnotu akustického tlaku zvolena $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa, odpovídá v decibelové hladinové stupnici hodnota 0 dB. V praxi tak odpovídá každému desetinásobnému zvětšení akustického tlaku zvýšení hladiny akustického tlaku o 20 dB. **Hladinu akustické intenzity** L obdržíme obdobně (např. pro $f = 1$ kHz dosadíme $I_0 = 10^{-12}$ W.m⁻²), jen dosadíme do vztahu (9). A každému desetinásobnému zvýšení akustické intenzity tedy odpovídá zvýšení hladiny akustické intenzity o 10 dB. [2, 3, 4, 5, 13, 42]

1.2. Pohlcování zvuku

V důsledku toho, že je zvuk vlnění, se v akustice uplatňují vlivy odrazu, lomu, ohybu a skládání vlnění. Vztahy mezi výše uváděnými proměnnými veličinami akustického pole z *podkapitoly 1.1.* lze využít k sestavení obecné vlnové rovnice a naopak. Zvukové pole obecně, si lze představit jako soubor rovinných zvukových vln, které se šíří v různých směrech. Obecnou vlnovou rovnici musí splňovat každé zvukové pole. Pro uvedení a porozumění dalších akustických charakteristik vypovídajících o pohlcování zvuku je nezbytné je zde přiblížit. Stanovit pohlktivost znamená zabývat se šířením zvuku v hmotě a okolním prostředí a zároveň také interakcí obou prostředí. Rovinnou zvukovou vlnu v homogenním prostředí popisujeme pomocí dvou základních

rovnice: pohybové a kontinuity. Při podélném vlnění šířícím se ve směru osy x v místě souřadnice x pak stačí jen x -ové složky těchto rovnic. Zde uvedené obecné vztahy tedy vycházejí z podmínky homogenity prostředí. [2, 3, 4, 5]

1.2.1. Základní vztahy

Pohybová rovnice se opírá o druhý Newtonův zákon. Vychází z jeho aplikace na elementární krychličku tekutiny (vzduchu). Hledá se vztah nezávislý na zvolené souřadné soustavě, ta je pro jednoduchost volena jako pravoúhlá. Na jednu stranu (plochu) krychličky působí zleva akustický tlak p a zprava $p + (\partial p / \partial x) dx$. Výsledná síla $-(\partial p / \partial x) dx dy dz$ pak ve směru x způsobuje zrychlení dv_x / dt elementární hmotnosti $\rho \cdot dx dy dz$. Změny hustoty vzduchu působením akustického tlaku jsou zanedbatelné vzhledem k její hodnotě $1,2 \text{ kg/m}^3$ za teploty $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Vyjádření zrychlení lze s odvozením z totálního diferenciálu funkce v_x a zanedbáním členu, jež v oboru akustiky nabývá velmi malých hodnot, aplikovat i pro směry y a z .

$$-\nabla p = \rho \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} \right) \quad (10)$$

Dostaneme tak výraz, který popisuje jak je zrychlení hmotného elementu proudící tekutiny přímo úměrné tlakovému spádu (gradientní závislost). Tato rovnice (10) nese v akustice název **linearizovaná Eulerova rovnice**.

Odvození rovnice kontinuity vychází ze zákona zachování hmoty. Uvažujeme opět elementární objem ve tvaru krychličky. V tomto dV nedochází ani k tvorbě, ani k zániku média (prostředí určité hustoty). Ze změny hustoty prostředí proudícího do a ven z krychličky tak dostaneme rovnici popisující změnu hmotnosti elementu v čase. Za čas dt vejde do elementu hmotnost $\rho(x)v_x(x) dt dy dz$ a odejde hmotnost $\rho(x+dx)v_x(x+dx) dt dy dz$. Jejich vzájemným odečtením obdržíme přírůstek hmotnosti v elementu, to opět pro každý směr. Tyto přírůstky hmotnosti pro každý směr x, y, z sečteme a dáme do rovnosti s celkovým zvětšením hmotnosti elementu za dobu dt .

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = \text{div } \mathbf{v} = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} \right) \quad (11)$$

Obdrželi jsme tak vektorovou rovnici (11), která je známá jako **rovnice kontinuity**. Změny v plynu při podélném vlnění považujeme za adiabatické, lze tak položit $(p + p_0)\rho^{-\kappa} = \text{konst.}$, po derivaci tohoto výrazu podle času a po zanedbání veličiny p oproti p_0 plyne pro rovnici kontinuity následující tvar:

$$\text{div } \mathbf{v} = -\frac{1}{\rho c^2} \left(\frac{\partial p}{\partial t} \right) = -\frac{1}{K} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (12)$$

, kde $c = \sqrt{\frac{\kappa p_0}{\rho}}$ je ona dříve zmíněná rychlost šíření zvuku, K je modul objemové pružnosti a κ Poissonova konstanta. Z obou pohybových rovnic (10) a (12) pak snadno odvodíme vlnové rovnice pro akustický tlak a rychlost.

Podíl akustického tlaku a akustické rychlosti se nazývá **akustický vlnový odpor prostředí**, někdy také měrná akustická impedance z . Z rovnic pro akustický tlak a rychlost vyplývá, že jsou spolu ve fázi. Maximální amplituda jednoho znamená zápornou maximální (minimální) výchylku druhého, jelikož se od sebe liší o $\pi/2$.

$$\frac{p(x, t)}{v(x, t)} = \rho c = z \quad (13)$$

Z výrazu (13) samého je vidět, že vlnový odpor je pro rovinnou postupnou vlnu konstantní. Jeho hodnota ve vzduchu teploty $20\text{ }^\circ\text{C}$ a za atmosférickém tlaku $0,1\text{ MPa}$ činí $415\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$. Tento poměr tedy není neměnný a závisí na vlastnostech prostředí, nevyjímaje vzdušnou vlhkost.

Akustická impedance Z je určena podílem akustického tlaku a rychlosti objemové. Má reálnou a imaginární složku. Objemovou rychlostí je nazýván součin akustické rychlosti a průřezu, jímž se zvuk šíří.

$$\frac{p}{v} = \frac{z}{S} = Z \quad (14)$$

Vzájemně se tedy liší o vztáhnost k ploše. Reálná složka akustické impedance je dána odporem vznikajícím v porózním materiálu. Imaginární složka je dána vzájemným působením hmotové reaktance rezonančního prvku a reaktance poddajností (poddajnost vzduchu ve vzduchovém polštáři mezi rezonančním prvkem a stěnou). Obě reaktance jsou frekvenčně závislé, a pokud se sobě rovnají, mizí imaginární složka akustické impedance. Tato rovnost nastává při určité frekvenci, která se nazývá rezonanční frekvencí. Převrácenou hodnotou akustické impedance je pak akustická admitance, která naopak vyjadřuje, jak snadno zvukové vlny prostředím pronikají.

To, jak je nějaký materiál schopen absorbovat nebo pohlcovat zvuk, vyjadřuje hodnota činitele zvukové pohltivosti. **Činitel zvukové pohltivosti α** je definován jako poměr zvukové energie pohlcované určitou plochou a zvukové energie na tuto plochu dopadající. Je možné ho též vyjádřit pomocí akustické impedance a vlnového odporu (měrné akustické impedance).

$$\alpha = 1 - \left| \frac{Z - z}{Z + z} \right|^2 \quad (15)$$

Při přechodu zvuku ze vzduchu do zvukově pohltivého materiálu bude činitel zvukové pohltivosti největší, tedy roven jedné, bude-li vlnový odpor roven akustické impedanci. Čím více se však bude akustická impedance obou prostředí lišit, tím bude činitel zvukové pohltivosti menší. [1, 3, 4, 5, 6, 15]

Porózní materiál

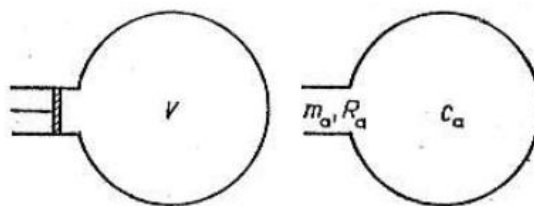
Uvažujeme-li porózní materiál a schopnost jeho zvukové pohltivosti, můžeme pomocí Poiseuilleova zákona popsat **měrný odpor porózního materiálu** následovně:

$$\sigma = \frac{m_s}{h} \frac{8\eta}{r_p^2} \quad (16)$$

, kde m_s je parametrem struktury materiálu, h je jeho poróznost, η je viskozita vzduchu a r_p značí průměrný poloměr pórů materiálu. [1, 5]

Rezonanční prvek

Prvky rezonančního obvodu akustických soustav jsou odvozeny z Helmholtzova rezonátoru, což je dutina určitého objemu a na ní navazující hrdlo. Vzduch v hrdle funguje jako určitá hmotnost, což si můžeme představit připodobněním pístu. Objem dutiny zase udává jak je schopen onen píst pracovat, jak je vlastně dutina poddajná. Hovoříme tak o akustické poddajnosti a akustické hmotnosti. Pohybu pístu, tedy akustické hmotnosti, je kladen určitý odpor.



Obr.1: Schematická ilustrace Helmholtzova rezonátoru. [5]

Akustickou hmotnost m_a si lze představit jako část prostředí o dané hustotě uvnitř trubice daného průřezu a délky, která při šíření zvuku kmitá jako jeden celek, jako pevné těleso hmotnosti $m = \rho Sl$.

$$m_a = \frac{m}{S^2} = \frac{\rho l}{S} \quad (17)$$

Uvažujeme přitom, že hrdlo je mnohem kratší, než délka vlny jím procházející a má tak malý objem, že nedochází ke stlačování sloupce plynu v hrdle a jsou zanedbány ztráty vzniklé třením částic o stěny hrdla.

Akustická poddajnost c_a opět předpokládá mnohem větší vlnovou délku zvukové vlny, než jsou rozměry uzavřeného prostoru dutiny. Dále předpokládá tak rychlé změny tlaku a objemu vlivem šíření zvukové vlny, že uvažujeme adiabatický děj, a při jejím určení vycházíme ze stavové rovnice pro plyn. Následující vztah tak vlastně vyjadřuje, kolikrát se zmenší celkový objem plynného prostředí při jednotkovém vzrůstu celkového tlaku. Vztah (18) vyjadřuje poddajnost prostředí pro změny tlaku. Parametr c_m značí mechanickou poddajnost.

$$c_a = \frac{V}{\kappa p} = S^2 c_m \quad (18)$$

Akustický odpor (19) je důsledkem mechanismů tření hmotných částic s povrchem zvukovodu a mezi sebou samými. Souvisí s viskozitou, tepelnou vodivostí a relaxačními procesy na molekulární úrovni. Odpor lze zvyšovat výplní z jemných vláken. Pomocí mechanického odporu R_m ho lze vyjádřit jako $R_a = R_m/S^2$. Obecně je k překonání odporu potřeba tlaku – akustického tlaku, který je ve vztahu s tzv. průtokovou zvukovou rychlostí. Ta se dá vysvětlit tak, že vlivem třecích mechanismů je na povrchu trubice rychlost částic minimální, kdežto v její ose maximální. Rychlost proudících částic se mění (gradientně) ve směru od středu k povrchu. Do rovnosti se tak dostávají síla tlaková od působícího akustického tlaku a síla daná třením částic. Akustický odpor je pak úměrný dynamické viskozitě η , která vzájemné tření vystihuje, výšce dutiny l a jejímu poloměru r . [1, 3, 5, 38, 42]

$$R_a = \frac{8\eta l}{\pi r^4} = \sigma l \quad (19)$$

1.2.2. Mechanika pohlcování

Pojmem pohlcování rozumíme úroveň snížení hlukové hladiny uvnitř nějakého objektu, nejčastěji místnosti. Pohltivé akustické systémy fungují na principu absorpce zvukové energie (snížení akustické energie odražených vln) a mimo jiné slouží k řízení doby dozvuku a upravují vnitřní akustiku. Vzduchová neprůzvučnost vyjadřuje schopnost tlumení hluku pronikajícího do objektu zvenčí. Materiály a akustické prvky, které jsou konstruované pro pohlcování zvuku, však mají činitel zvukové neprůzvučnosti nízký a k zvukoizolačním vlastnostem tak z principu nejsou určeny.

Objemové materiály vykazují pohltivost především v oblastech vyšších kmitočtů. Maxima činitele zvukové pohltivosti se však s narůstající tloušťkou materiálu posouvají směrem ke kmitočtům nižším. Vztah (20) přibližně vyjadřuje tloušťku vrstvy, při níž považujeme materiál za účinný nad kmitočtem f_m , který odpovídá pohltivosti $\alpha > 0,6$.

$$h = \frac{1}{10} \cdot \frac{c}{f_m} \quad (20)$$

Vyžaduje-li situace tlumení zvuku o nízkých frekvencích, jsou takové obklady v důsledku nepraktického nárůstu tloušťky neefektivní a neúčinné. Na druhé straně akustické prvky založené na principu rezonance vykazují pohltivost zvukové energie úzkého pásu nižších kmitočtů. Nicméně takovéto prvky zase nemají širokopásmový účinek. Tyto skutečnosti vybízí odstranit nevýhody obou jednotlivých systémů při zachování jejich kladných vlastností a vytvořit z nich celek pohlcující od nízkých po vysoké frekvence, který bude mít vyšší užitnou hodnotu.

Obkladů založených na objemových materiálech s porózní strukturou, tedy realizovaných formou pórů či vláken, se využívá ke zmenšování amplitudy (akustického tlaku)

odražené zvukové vlny. Pojmem pohlcování prakticky rozumíme nevratnou přeměnu energie zvukové do jiné formy, nejčastěji tepelné. V pevných látkách dochází k energetickým přeměnám vznikajících především třením, poklesy akustického tlaku a nepružnou deformací těles. Mimo to existují i jiné mechanismy, např. efekt pohybu vláken, kde je v energii tepelnou přeměněna kinetická energie pohybujícího se vlákenného segmentu.

Největší množství zvukové energie je přeměněno třením kmitajících částíček vzduchu podél určité plochy. Proto se k pohlcování zvuku tímto způsobem hodí porózní materiály, u nichž se zvuk šíří v látce jemnými póry, jejichž celková plocha je značně veliká vzhledem k jejímu objemu. K viskózním ztrátám kinetické energie zvukových vln dochází na stěnách otvorů, pórů, na povrchu kanálků nebo vláken atd. Na rozhraní pevné látky a plynu dochází ke snížení rychlostního gradientu a nevratné přeměně akustické energie v energii tepelnou. U jevů neadiabatických, které nastávají v systémech při nízkých kmitočtech, může v souvislosti se zředováním a zhušťováním částic v blízkosti mezivrstvy (stěny póru) docházet k nevratnému odvodu tepelné energie. Ze studií však vyplývá, že mechanismus odvodu tepla je ve srovnání s efektem tření zanedbatelný.

Přeměna zvukové energie vlivem akustického tlaku se nazývá relaxační. Jak se zvukové vlnění šíří látkou, místy dochází k zhuštění částic a nárůstu celkového tlaku (tj. akustický tlak nabývá kladných hodnot). Místy však také dochází k jeho poklesu, nebo-li relaxaci, a v důsledku toho se zmenšuje nashromážděná potenciální energie v daném místě a tedy i energie zvukového vlnění. Příčin relaxace může být několik. Stlačení vzduchu způsobuje nárůst teploty, a jelikož soustava pórů není od zbytku tepelně izolována, dochází k přestupu tepla ze vzduchu do materiálu. Jiný způsob relaxace tlaku nastává, mění-li se např. u porózní látky průřez „kostry“, tak dochází v místech malého průřezu (vláken) k výraznějšímu vzrůstu teploty, a je-li látka dobrým tepelným vodičem, dojde k vyrovnání teplot s okolím a tím k relaxaci tlaku.

Přeměny zvukové energie nastávající vlivem nepružné deformace těles se uplatňují u látek vykazujících tzv. pružnou hysterezi. Tyto přeměny se tedy týkají látek, které když jsou vystaveny určité síle, tak se po skončení jejího působení nevrací do výchozího stavu. Práce vynaložená na deformaci je tedy větší než práce získaná pružností tělesa zpět při návratu do výchozího stavu. Rozdíl prací spojených s deformací a pružností tělesa tak odpovídá úbytku zvukové energie vlivem plasticity tělesa.

U materiálů založených na rezonančním principu, ať už jde o uspořádání chovající se jako kmitající membrány, desky či uspořádání na principu Helmholtzových rezonátorů, vycházíme z mechanické analogie akustické rezonanční soustavy. Ta sestává z akustické hmotnosti připojené na akustickou poddajnost, jejíž pohyb je tlumený akustickým odporem (viz *Obr.2*).



Obr.2: Zobrazení mechanické analogie akustické rezonanční soustavy. [1]

Potom chování membrány nebo desky můžeme přirovnat k chování tělesa určité hmotnosti, které je pružně zachyceno na pružině (vzduchový polštář, vzduch v pórech materiálu). Dopad akustického vlnění na akustickou rezonanční soustavu způsobí její uvedení do tzv. vynucených kmitů, jejichž výchylka je v případě resonance maximální. Rezananční soustava by měla být dostatečně tlumena, aby co největší část zvukové energie nashromážděné v rezonátoru, byla přeměněna na teplo. Zároveň tlumení slouží i k potlačení antirezonancí vibrujícího prvku a tak brání poklesu hodnoty činitele zvukové pohltivosti v oblasti vyšších frekvencí. Soustava pak efektivně pohlcuje zvuk a nechová se sama jako zvukový zářič. Budeme-li dále uvažovat dokonalou tuhost elementů představujících hmotnost a nulovou hmotnost elementů představujících pružnost, můžeme tuto problematiku přirovnat k teorii lineárních elektrických obvodů, kde jsou cívky uvažovány bez kapacity, kondenzátory bez indukčnosti a odpory jako čistě ohmické. Námí dříve zavedenou veličinu akustická impedance Z lze pak v tomto přiblížení připodobnit elektrické impedanci, která je dána jako podíl el. napětí a proudu. Pro jednotlivé prvky akustické rezonanční soustavy pak píšeme:

$$Z = j\omega m_a, \quad Z = R_a, \quad Z = \frac{1}{j\omega c_a} \quad (21)$$

K rezonanci soustavy tak dochází na frekvenci:

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{m_a c_a}} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho}{m_{sq} d_v}} \quad (22)$$

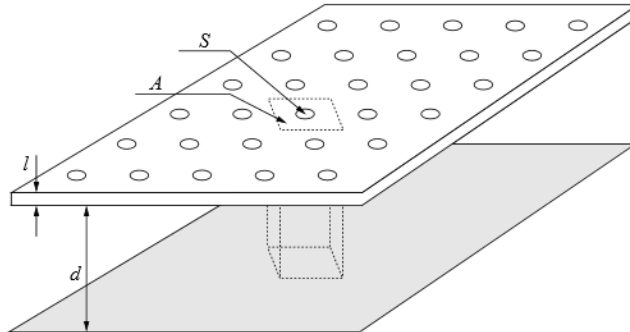
, kde c je rychlost šíření zvuku, ρ je hustota vzduchu (porózního materiálu), m_{sq} je plošná hmotnost membrány (desky) a d_v je tloušťka vzduchového polštáře (porózního materiálu). Za předpokladu, že je akustický odpor nulový a soustava tudíž není tlumena, platí rovnice (23):

$$j\omega m_a + \frac{1}{j\omega c_a} = 0 \quad (23)$$

Další variantou akustické rezonanční soustavy jsou rezonátory Helmholtzova typu. Ty jsou realizovány buď jednotlivě, nebo sdružené do formy perforovaných panelů umístěvaných do určité vzdálenosti od odrazivé překážky (stěna). Potom budící frekvence, která odpovídá frekvenci vlastních kmitů Helmholtzova rezonátoru (ve formě panelu), na níž dochází k pohlcení zvuku soustavou, závisí na strukturních parametrech rezonátoru:

$$f_r = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{Ald}} \quad (24)$$

ploše průřezu dutiny (hrdla) S , ploše rezonátoru A , tloušťce panelu l a jeho vzdálenosti od stěny d .

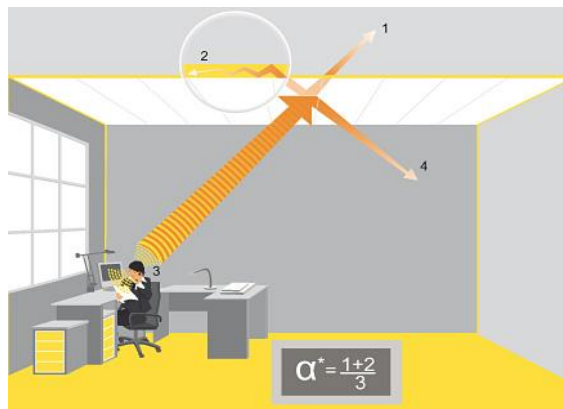


Obr.3: Schematické zobrazení Helmholtzova rezonátoru ve formě perforovaného panelu.[9]

Důležité je připomenout, že na rezonanční frekvenci rezonátoru má pochopitelně vliv jeho tlumení. V závislosti na míře tlumení jeho vibrací dochází k posunu jeho rezonančního kmitočtu. S touto skutečností je proto nutné dále citlivě počítat při návrhu akustických systémů. [1, 2, 3, 5, 9, 10, 11, 13, 14, 16, 38, 39, 42, 43]

1.3. Metody hodnocení akustických vlastností

Uvažujme obecný nejčastější případ, kdy vzduchem šířící se zvuková vlna dopadá na překážku, tedy nějaký materiál pevného skupenství, např. stěnu domu. Iniciační energie zvukové vlny šířící se vzduchem je po dopadu na materiál ve výsledku částečně odražena, částečně absorbována a částečně prostupuje materiálem (viz Obr.4). Přičemž sám materiál se do jisté míry může stát zdrojem zvukové energie, je-li rozkmitán a jeho vibrace nejsou tlumeny.



Obr.4: Názorná ilustrace rozkladu dopadající akustické energie (3) na energii odraženou (4), pohlcenou (2) a prostupující (1)[17]

Potom schopnost nějakého materiálu pohlcovat zvukovou energii popisuje bezrozměrná veličina zmíněná výše – **činitel zvukové pohltivosti α** . Její velikost je dána intervalem od 0 do 1. Kdy pro těleso dokonale pohltivé nabývá alfa jedné (100% pohltivost) a pro dokonale odrazivé nuly (žádná pohltivost). Za dobře pohltivé materiály považujeme ty, pro něž je α vyšší než 0,6. Činitel pohltivosti je definován poměrem pohlcené akustické energie k celkové energii dopadající. Zároveň lze činitel zvukové pohltivosti získat z poměru zvukových intenzit, které popisují množství zvukové energie vztažené na plochu.

$$\alpha = \frac{E_{pohl.}}{E_{iniciač.}} = \frac{I_{pohl.}}{I_{iniciač.}} \quad (25)$$

Pohltivost závisí nejen na strukturních a materiálových vlastnostech těles (měkké a pórovité látky oproti kompaktním hladkým), ale především na frekvenci dopadajícího zvukového vlnění (problematika nižších kmitočtů) a v neposlední řadě též na úhlech, pod kterými zvukové vlny dopadají.

Analogicky k činiteli zvukové pohltivosti je **činitel zvukové odrazivosti β** (26) dán poměrem odražené akustické energie k celkové energii dopadající.

$$\beta = \frac{E_{odraž.}}{E_{iniciač.}} \quad (26)$$

Podíl akustické energie prošlé látkou a celkové energie dopadající potom určuje **součinitel zvukové průzvučnosti τ** .

$$\tau = \frac{E_{prostup.}}{E_{iniciač.}} \quad (27)$$

Ze zákona zachování energie tak plyne vzájemný vztah: $\alpha + \beta + \tau = 1$.

Další veličinou je **vložný útlum D_v , [dB]**, který vyjadřuje zvukoizolační účinek tlumícího prvku, jehož vložením dochází k tlumení hluku. Je definován jako rozdíl hladin akustického tlaku v daném místě pro zdroj hluku bez a se zvukovou izolací (protihlukový kryt). Jeho hodnotu lze pro určité frekvenční pásmo stanovit ze vztahu:

$$D_v = 10 \log \left[1 + \frac{\sum_{i=1}^n \varepsilon_i S_i}{\sum_{i=1}^n \tau_i S_i} \right] \quad (28)$$

, kde τ_i je činitel průzvučnosti i -té plochy, ε_i je činitel přeměny akustické energie i -té plochy, S_i je plošný obsah i -té plochy a n značí počet ploch tvořících izolaci, které se akusticky liší. Vztah (28) je platný za předpokladu, že se akustická energie šíří od zdroje převážně vzduchem, tj. zvuková izolace sama není zdrojem – nevyzařuje. Pak můžeme vycházet ze vztahů $\tau_i = 10^{-0,1R}$ a $\varepsilon = \alpha - \tau$, kde R značí **stupeň vzduchové neprůzvučnosti**.

Stupňů neprůzvučnosti je mnoho (stavební, kročejová, vážená,...), všechny tyto hladinové veličiny [dB] však vyjadřují přechod zvuku z jedné oblasti do druhé (příjmové), přičemž uvažují přímý i nepřímý přenos zvuku vzduchem a jeho přenos dělicími i bočními prvky. Ze vzduchové

neprůzvučnosti se tak například dozvíme, jak se změní hladina akustické intenzity v místnosti oddělené stěnou od místnosti v níž se nachází zdroj hluku. Vztahují do výpočtu vlastnosti okolí izolace. Tak v praxi obecně platí, že stupeň vzduchové neprůzvučnosti stěn krytu má ekonomické využití pouze tehdy, jsou-li vnitřní stěny krytu pohltivě obloženy ($\alpha > 0,5$). Experimentálně je prokázáno, že úplným zakrytím zdroje hluku je možné snížit jeho hlučnost až o 25 dB.

Na závěr této kapitoly uvedme veličinu definovanou Americkou Společností pro Testování Materiálů (ASTM), jež je součástí normy C423 a je aritmetickým průměrem hodnot činitelů zvukové pohltivosti při frekvencích 250, 500, 1000 a 2000 Hz zaokrouhleným nejbližší k 0,05. Touto veličinou popisující pohltivost v širokém kmitočtovém pásmu je jednočíslná vážená hodnota, tzv. **koeficient hlukové redukce (NRC)**. Jde o jednu z prvních souhrnných hodnot, které se začaly používat k vyjádření křivky zvukové pohltivosti jednočíslným údajem. V tuzemském prostředí je také známá jako „součinitel zvukového útlumu“. Mimo ni je u nás běžněji používanou souhrnnou hodnotou **vážený činitel zvukové pohltivosti α_w** (dle ČSN EN 11654). Ten vychází z naměření činitelů zvukové pohltivosti v třetinooktávových pásmech (α_s) převedených do oktávových pásem (α_p). Poté je ze vzájemného vztahu (míry překrytí) mezi normou danou referenční křivkou a křivkou naměřenou (α_p) odvozena hodnota stupně pohltivosti daného výrobku, která se odvíjí od hodnoty pohltivosti referenční křivky na frekvenci 500 Hz. Na základě toho je pak stanovena příslušná třída zvukové pohltivosti (A, B, C, D, E). [1, 2, 3, 10, 13, 15, 18, 19, 20, 42, 43]

Tab. 1: Tabulka zobrazující třídy zvukové pohltivosti a jim odpovídající hodnoty NRC (*Fasádní deska FKD S je komerční minerální izolace).

Třída zvukové pohltivosti <i>(Podle ČSN EN ISO 11654)</i>	Hodnoty α_w	Třída pohltivosti <i>(Podle VDI 3755/2000)</i>	Produkt	NRC
A	0,90; 0,95; 1,00	Velmi vysoce pohltivý	Fasádní deska FKD S*	$NRC \geq 0,75$
B	0,80; 0,85	Velmi vysoce pohltivý	Minerální podhledy	
C	0,60; 0,65; 0,70; 0,75	Vysoce pohltivý	Dřevěná vlna	$0,5 \leq NRC \leq 0,75$
D	0,30; 0,35; 0,40; 0,45; 0,50; 0,55	Pohltivý	Polystyren	
E	0,15; 0,20; 0,25	Málo pohltivý	Beton	$0,25 \leq NRC \leq 0,5$
Neklasifikováno	0,05; 0,10	Odrzivý	Ocel	$NRC < 0,25$

2. Návrh strukturních parametrů akustického systému

Spolu s požadavky na účinné zvukově pohltivé řešení dochází v této problematice jak k rozvoji po stránce materiální, tak i teoretické. Kromě nových materiálů jsou tak rozvíjeny i analytické metody modelující jejich chování. Na základě předešlé kapitoly a modelů pohltivosti zvuku, které poměrně dobře korelují s výsledky získanými empiricky, jsou dále uvedeny parametry ovlivňující výběr vhodného prvku výsledné akustické soustavy. Jde o strukturní parametry. Vnitřní struktura materiálu totiž jednoznačně předurčuje jeho funkčnost.

2.1. Výplň

Uvažujeme-li v akustice materiál výplně, máme na mysli pevnou látku, v jejímž objemu jsou v nějaké formě malé dutinky vyplněné vzduchem. Tuto strukturní vlastnost materiálu vystihuje **poróznost** (též poróznost), tedy poměr objemu pórů k celkovému objemu materiálu. Za porózní materiál považujeme látku, u níž poróznost dosahuje alespoň 60 %, přičemž obvykle se v akustice setkáváme s vyššími hodnotami poróznosti (přes 90 %).

Porózní materiály mají různé struktury, typicky vláknitou, kanálkovitou, či pěněnou. Aby porózní materiál dobře plnil svou pohltivou funkci, měly by být póry vzájemně propojeny. Tak nebudou bránit dalšímu šíření zvuku materiálem, který třením a odrazy odebírá akustickou energii zvukové vlny. Skutečnost, zda je **buněčná struktura materiálu** otevřená, či nikoli, má velký vliv. Tak se například odlišuje akustická pěna fungující na bázi otevřených buněk od běžného molitanu s uzavřenou buněčnou strukturou. Nicméně na propojenost pórů se neklade takový důraz u porózních materiálů, jako jsou měkké plastické hmoty, vlákněná rouna atd., neboť jejich kostra je velmi elasticky poddajná a zvuk do ní z pórů přechází snadněji. Vliv pórů v kostře materiálu na akustické vlastnosti vystihuje tzv. činitel struktury, který je vždy větší než 1. **Činitel struktury σ** závisí právě na vzájemném uspořádání kostry látky a pórů. **Činitel udávající typ termodynamických pochodů v pórech materiálu n** udává, zda stlačování a zředování vzduchu při šíření zvuku póry materiálu probíhá adiabaticky (vyšší kmitočty), izotermicky (nižší frekvence) nebo polytropicky (střední frekvence).

Míra zaplnění porózního materiálu ovlivňuje šíření zvuku. Čím větší zaplnění porózního materiálu, tím více narůstá tlak. Tlak narůstá až do mezního stavu, kdy je zaplnění tak velké, že se zvuk dále nešíří póry, ale je odražen. Akustická rychlost v pórech materiálu, jejichž rozměry na ní mají přímý vliv, je $1/h$ krát vyšší než akustická rychlost vně porózního materiálu. Činitel zvukové

pohltivosti tak narůstá se zaplněním. Bude-li hustota polymeru, z něhož zvlákňujeme, konstantní, zaplnění bude růst s **objemovou hmotností** vlákenného materiálu. Samotná hustota polymeru vlákenného materiálu má na činitel zvukové pohltivosti pouze nepatrný vliv. Optimální hodnoty hustoty polymeru však existují.

Jak bylo uvedeno výše, s **tloušťkou výplně** narůstá činitel zvukové pohltivosti v oblastech nižších kmitočtů, zároveň dochází i ke zvýšení akustické poddajnosti akustické izolace. Vzhledem k tomu, jak jsou spolu fázově svázány akustická rychlost s akustickým tlakem, nabývá u zadní stěny uvažovaného objektu akustická rychlost nulové hodnoty (uzel akustické rychlosti), zatímco akustický tlak nabývá maximální hodnoty (kmitna akustického tlaku). Průběhy těchto dvou veličiny jsou posunuty o $\frac{1}{4}$ vlnové délky. S tím, jak roste vzdálenost od stěny, stoupá hodnota akustické rychlosti a v její první kmitně, vzdálené právě čtvrtinu vlnové délky od stěny, dosáhne maximální hodnoty. Další kmitny vždy pokračují v násobcích čtvrtiny vlnové délky. **Poloha akustického prvku** tedy ovlivňuje jeho funkční vlastnosti. Proto se snažíme umístit porózní materiál do míst s největší rychlostí částic vzduchu, kde dojde k největším ztrátám třením o materiál. V praxi se podobného účinku dosahuje vytvořením uzavřeného vzduchového polštáře („air gap“) za porózní vrstvou. Účinek vzduchové mezery se však projeví tehdy, je-li zamezeno kmitání porózní vrstvy.

Dalším z faktorů, které ovlivňují šíření zvukového vlnění, je **průměr vláken**. Jak bylo řečeno dříve, rozhodující vlastností pro pohlcování zvuku je velikost akustické impedance, zvláště její reálné složky. Ta do jisté míry odpovídá měrnému odporu porózního materiálu, který zase závisí na velikosti povrchu vláken. Z experimentálních výsledků vyplývá, že měrný akustický odpor je nepřímo úměrný čtvrté mocnině průměru vláken. Zmenší-li se tedy průměr vláken dvakrát, měrný akustický odpor se zvětší šestnáctkrát, což je žádoucí. V jedné ze studií byl na základě měření propustnosti výplní stanoven statický měrný odpor. Bylo zjištěno, že propustnost vlákenných materiálů je při konstantním zaplnění funkcí vlákenného průměru. Použijeme-li tedy výplň s jemnějšími vlákny, která mají větší **měrný povrch**, tření mezi vzduchem a vlákny bude realizováno na větší interakční ploše a taková výplň bude lépe absorbovat zvukovou energii.

V závislosti na tom, zda je šířící se zvukové vlně do cesty postaven vlákenný materiál s uspořádáním vláken kolmo, či paralelně na směr šíření vlny, dochází ke změnám ve zvukové pohltivosti. S ohledem na **anizotropii vlákenného materiálu** byl měřen činitel zvukové pohltivosti, a ukázalo se, že při uspořádání vláken kolmém na zvukovou vlnu dochází k rezonančnímu efektu, kdežto při paralelním uspořádání rezonance nevznikají. Uvažujeme tak **efekt pohybu vláken**. Vlákenný materiál výplně můžeme v přiblížení považovat za blok strun vždy pevně upevněných na svých koncích, přičemž amplitudy kmitajících strun (vlákenných segmentů) uvažujeme velmi malé. K rezonančnímu efektu tak spíše dojde při kolmém dopadu vlnění na vlákno, než při jiné orientaci vlákna. Navíc při kolmo uspořádaných vláknech výplně na směr šíření podélné zvukové vlny

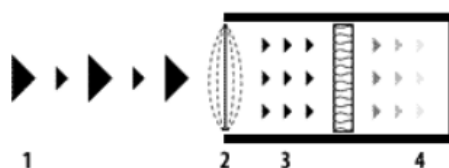
dochází vlivem fázových přechodů mezi vlákny a vzduchem v porózním materiálu k vyššímu úbytku akustické energie. Z toho plyne, že pokud budou vlákna nějakým způsobem tvarována, tak i v případě jejich podélného uspořádání na směr šíření zvuku může dojít ke zlepšení pohltivosti.

Měření ukázala, že na absorpci zvuku má vliv **koncentrace pojivých vláken materiálu**. Dopadá-li akustická energie na vlákenný segment, který se může pohybovat, přemění se její část na kinetickou energii vibrací vlákna a tím narůstá absorpce zvuku. Při konstantní objemové hmotnosti je činitel zvukové pohltivosti pro kolmo kladené vzorky závislý na možnosti pohybu vlákenných úseků tak, že jen nepohyblivé úseky vláken materiálu ze stoprocentně pojivých vláken způsobují znatelný pokles v absorpci zvuku. Pokud je koncentrace vláken nižší než 100 %, může dojít k jejich vibracím a vykazují vyšší pohltivost, ta se však s poklesem koncentrace příliš nemění. U podélně kladených vzorků má kladný vliv na pohltivost nejen možnost pohybu vlákenných segmentů, ale i větší délka těchto segmentů, což znamená opět nižší koncentraci vláken. Čím nižší je koncentrace vláken, tím delší jsou vlákenné úseky a nakonec i pohltivost.

Na základě poznatků vlivu těchto strukturních parametrů na účinnost zvukové absorpce byly pro výplň vybrány materiály s velkou porózitou, otevřenou i uzavřenou buněčnou strukturou, různými tloušťkami s ohledem na objemovou hmotnost. Byly zvoleny výplně s rozdílnými, avšak s co nejmenšími běžně se vyskytujícími průměry vláken, a tak velkým měrným povrchem. Vlákenná struktura zvolených výplní byla vždy kolmá na směr šíření zvukového vlnění. Objemové prvky akustické soustavy byly aplikovány jak přímo na stěnu měřeného objektu, tak se vzduchovou mezerou. [1, 3, 4, 5, 6, 10, 15, 16, 21, 22, 42, 46]

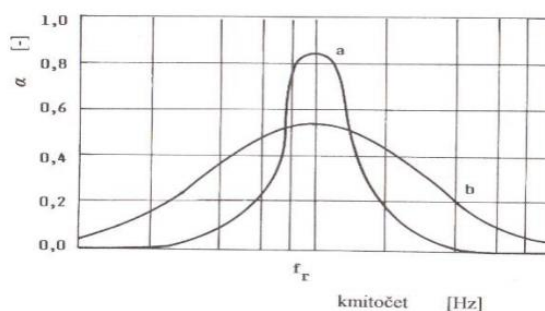
2.2. Membránové rezonátory

Za membránové rezonátory považujeme konstrukce založené na kmitající membráně. Touto membránou může být fólie, tenká deska, či vlákenná vrstva, jejíž tuhost v ohybu je velmi nepatrná. Aby kmitající membrána mohla pohlcovat akustickou energii, jak bylo popsáno v kapitole 1.2, je vždy umístěna tak, aby mohla kmitat. To znamená, buď v určité vzdálenosti od pevné stěny, kdy akustický odpor pružiny je realizován vzduchovým polštářem, nebo je vzduchový polštář doplněn či úplně nahrazen porózním materiálem tlumícím kmitání částic vzduchu v tomto prostoru a tím i celé soustavy. Tento princip, kdy zvuk dopadne na membránu (1), uvede ji do vynucených kmitů (2), a s tím jak se změní tlak za ní, rozhýbe se vzduch za membránou (3) a ten pak pronikne do pohltivého porózního materiálu, v němž ztrácí rychlost (4), je zobrazen na Obr.5.



Obr.5: Schéma principu fungování membránové rezonanční akustické soustavy. [1]

Obvykle je volena membrána z takové látky, aby byla její ohybová tuhost ve srovnání s tuhostí vzduchového polštáře mnohem menší. Poté se vliv upevnění membrány (na okraji) téměř neprojeví a membrána se pohybuje jako celek analogicky odpovídající kmitajícímu pístu. Obrázek 6 srovnává situaci, kdy je akustický odpor realizován pouze vzduchem s případem vložení pohltivého porózního materiálu mezi membránu a stěnu. Je vidět ostré maximum pro *samotný vzduch* a pozvolné maximum pro vložený *porózní materiál*. Při rezonanční frekvenci dochází v obou případech k maximální přeměně akustické energie, nicméně v rozdílném frekvenčním pásmu.



Obr.6: Průběh činitele zvukové pohltivosti pro kmitající membránu následovanou (a) vzduchovým polštářem a (b) výplní z porózního materiálu.[38]

Jako kmitající membrána může s výhodou sloužit vláknenná vrstva tvořená z nanovláken, jejíž vnitřní struktura se od běžných mikronových netkaných textilií liší. Taková vrstva má výborné pohltivé vlastnosti vyplývající z malého rozměru nanovláken, defacto z velkého *měrného povrchu* výsledné porózní membrány. Taktéž mezivláknenné prostory u takové membrány jsou oproti běžně používaným membránám z netkaných textilií mnohem menší. Uplatňuje se jak kmitání membrány jako celku, tak dokonce i kmitání jednotlivých vláken či jejich segmentů, což schopnost zvukové absorpce ještě více zvyšuje. Rezonanční frekvence daná vztahem (22) závisí na hmotnosti membrány a poddajnosti vzduchového polštáře, resp. na *plošné hmotnosti membrány* a její *vzdálenosti od pevné stěny*. Obecně platí, že čím větší je plošná hmotnost, tím větší jsou maxima činitele zvukové pohltivosti a ty se posouvají směrem k nižším frekvencím. Od jisté hodnoty plošné hmotnosti membrány však maximum pohltivosti přestává růst a naopak s posunem k nižším frekvencím zase klesá. To samé nastává u vláknenného průměru; u kterého obecně platí, že s nižším průměrem vláken dochází k růstu a posunu maxim činitele zvukové pohltivosti směrem k nižším frekvencím. I zde lze nicméně najít určitou optimální hodnotu, od které už nižší průměr není přínosem.

Byly zkoušeny dvojité rezonanční systémy s rozdílnými hodnotami *měrného odporu* a ukázalo se, že systém s větším měrným odporem posouvá maxima činitele zvukové pohltivosti směrem k nižším frekvencím, avšak jeho maximum je nižší, než je maximum systému s menším měrným odporem. Též bylo ověřeno, že *počet rezonančních prvků* akustické soustavy má vliv na její výslednou funkčnost. Začleňováním více rezonančních membrán, od sebe vzájemně

oddělených vzduchovou mezerou či porózní výplní, docílíme (do jistého maximálního počtu) zvýšení činitele zvukové pohltivosti. Přitom se ukazuje dříve zmíněná výhodnost ztlumení, ať už pomocí porózního materiálu, či vlákenné pavučiny z netkaných textilií, které řeší antirezonance membrán. Zde dodejme, že v praxi je nanovlákněná vrstva často nanosená na podkladový substrát právě z netkané textilie, která slouží zároveň i k tlumení jejích vibrací.

Na hodnoty činitele zvukové pohltivosti má také vliv jak daný počet rezonančních prvků, liší-li se svými parametry, uspořádáme. Byl zkoumán například **vliv způsobu řazení rezonančních prvků** lišících se v plošných hmotnostech. Rezonátory, které byly uspořádány se sestupnou plošnou hmotností ve směru šíření zvuku, vykazovaly jednak vyšší zvukovou pohltivost, jednak nižší rezonanční frekvenci takového akustického systému. Je to dáno tím, že na rozkmitání prvku s vyšší plošnou hmotností, který kmitá na nižší vlastní frekvenci, je spotřebováno více akustické energie než na prvek s nižší plošnou hmotností. Když je tak prvek s vyšší plošnou hmotností umístěn jako poslední, nemá zvuková vlna prostupující soustavou s rostoucí plošnou hmotností prvků na uvedení takových prvků do vynucených kmitů dostatek energie. Proto má pro sestupné uspořádání klíčový vliv i vzdálenost mezi prvky, kdy jejich větší vzdálenost znamená snížení energie zvukové vlny a to je nutné brát při návrhu akustické soustavy v potaz.

Upravíme-li nějak povrch membrány – např. impregnací, dojde tak do jisté míry k **zaplnění pórů** membrány. V závislosti na tom jaká část pórů je takto zaplněna, a do jaké míry, vykazuje materiál odlišnou zvukovou pohltivost. Ve většině případů dochází k ucpání pórů a k zmenšení délky úseků vláken, která mohou volně kmitat, a tak posléze k snížení činitele zvukové pohltivosti.

Za kmitající membránu byly zvoleny nanovlákněné vrstvy z PA6 různých plošných hmotností (0,2; 0,4 a 1 g.m⁻²), které byly vyvinuty přímo na půdě TUL. Vlákna byla do takovýchto vrstev kladena podélně, aby bylo membráně umožněno co nejefektivněji kmitat na vlastní frekvenci. Byly zvoleny takové koncentrace pojivových vláken, aby byly délky úseků vláken a jejich možnost pohybovat se, co největší. Průměr nanovláken by měl být při dané objemové hmotnosti vrstvy co nejnižší. Po předchozích zkušenostech byl za zvláknovací roztok zvolen 14% roztok PA6. Průměry vláken tvořících vrstvy jsou přibližně mezi 100 – 300 nm (střední hodnoty průměrů). Vrstva by měla být kladena přímo na podkladový materiál odpovídající (vyšší) plošné hmotnosti. Také by měla být tlumena porózním materiálem výplně. Tím vším by mělo být dosaženo co největší přeměny akustické energie v kinetickou energii kmitů membrány. [1, 3, 38, 43]

2.3. Deskové rezonátory

Analogicky k tenké kmitající membráně uvažujeme i membrány s vyšší hmotností a vyšší tuhostí v ohybu. Tím už fakticky máme na mysli tuhou kmitající desku. Ta by na svých okrajích měla být velmi **měkce upevněna** a tak tlumena. Mechanické ztráty realizované třením v pružném uložení desky mají obvykle větší hodnotu, než ztráty plynoucí z průchodu materiálem výplně. Proto není možné akustickou impedanci kmitajících desek výrazně ovlivňovat porózním materiálem výplně ve vzduchovém polštáři. Aby však bylo zabráněno vlastním kmitům, vkládá se přesto i porózní materiál. Deska tedy kmitá opět jako píst, a kromě základních (pístových) kmitů typických pro tenké membrány vykazuje i kmity vyšších řádů (ohybové). Její tuhost je značně větší než tuhost vzduchového polštáře a kmitočtové charakteristiky jsou vzhledem k velké plošné hmotnosti desek velmi úzké.

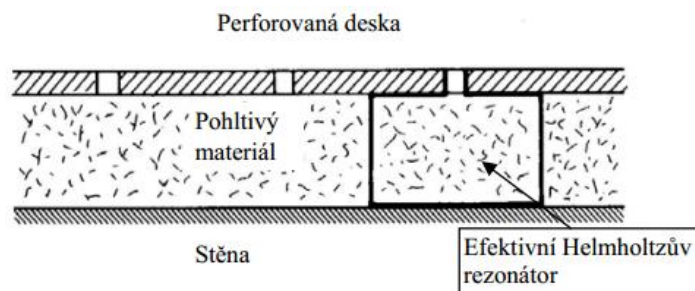
Z měření vyplývá, že pokud je na desky použit materiál s větší **tloušťkou, pevností** a menší **objemovou hmotností**, roste v oblasti vyšších frekvencí vliv koincidenčního efektu. Použijeme-li však v systému i **výplňový prvek**, činitel zvukové pohltivosti takového akustického systému nabývá vysokých hodnot na nižších frekvencích a zároveň již neklesá vlivem antirezonancí v oblastech frekvencí vyšších.

U návrhu deskového rezonátoru tedy vycházíme z jeho mechanických parametrů (hmotnost, tuhost, rozměry...), které přímo ovlivňují vlastní kmity rezonátoru, zejména jejich frekvenci, a ze vzdálenosti jeho umístění od stěny. Rezonátor by měl být na svých okrajích měkce upevněn. Případné vlastní kmity eliminujeme vhodným porózním materiálem. V praxi vidíme i aplikaci tříprvkové soustavy realizované kombinací kmitající desky s fólií. [1, 2, 3, 7, 8, 10, 23]

2.4. Helmholtzovy rezonátory

Ohlédneme-li se v pár slovech zpět, zjistíme, že předchůdcem pohltivých konstrukcí založených na rezonančním principu byly zazděné vázy, které byly částečně vyplněny např. popelem, nebo konopím. Takové vázy různých tvarů byly nalezeny ve skandinávských kostelích postavených v minulém století. V Maďarsku ve městě Pécs byla v mešitě nalezena váza o objemu dutiny $1,5 \text{ dm}^3$, délce hrdla $1,6 \text{ cm}$ a jeho průměrem $4,2 \text{ cm}$. Její rezonanční frekvence tudíž činí 243 Hz a leží u dolního spektra lidské řeči. V minulosti se tak již dávno využívalo Helmholtzových dutinových rezonátorů k řízení akustiky kostelů, chrámu a mešit. Rezonátory Helmholtzova typu jsou druhým typem rezonančních soustav používaných k pohlcování zvukové energie. Vytváří je nějaká dutina se vstupním otvorem, vyplněná vzduchem (porózním materiálem). Realizují se jako uspořádání jednotlivá, či sdružená do perforovaných panelů. Výhodou tohoto druhého typu rezonančních soustav je možnost nastavení frekvence maximálního

pohlcování zvuku v široké frekvenční oblasti pouhou změnou geometrie otvorů. Tyto rezonátory krom toho nabízí i dostatečnou mechanickou pevnost.



Obr.7: Zobrazení akustického panelu na principu Helmholtzova rezonátoru.[47]

Hodnoty činitele zvukové pohltivosti tak ladíme rozměrovými parametry dutinového rezonátoru a jeho polohou. Perforované panely konstruujeme tak, aby mezera (vzduch, výplň) mezi panelem a odrazivou stěnou byla optimální s ohledem na zvukovou frekvenci, kterou chceme utlumit. Často tak dochází ke kombinaci různého vzduchového polštáře a různého objemu výplně. Perforovaný panel následuje výplň dané tloušťky a za ní ideálně ještě určitá vzduchová mezera.

Pozitivní vliv na pohltivost by měl mít i akustický prvek, který využívá postupného gradientního zúžení jednotlivých kuželovitých otvorů perforovaného panelu. V důsledku velkého vnějšího rozměru otvorů panelu a malého rozměru vnitřního má takto perforovaný panel větší plochu pro dopad zvukového vlnění a zároveň u něj narůstá rychlost kmitajících částic vzduchu uvnitř zužujícího se kuželovitého otvoru.

Na základě těchto poznatků byly do vyvinutých akustických systémů vybrány perforované panely odlišné tloušťky s různou geometrií otvorů a různým ztlumením provedeným vzduchovým polštářem nebo výplní. [1, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 11, 12, 14, 21, 23, 24, 25, 45, 47]

2.5. Krycí materiál

Volba vhodného krytí akustického panelu by měla pozitivně přispívat k jeho akustickým vlastnostem a neměla by snižovat jeho pohltivý účinek, čehož je prakticky velmi obtížné docílit. Vzhledem k tomu, že taková krycí vrstva je dána hlavně materiálovými vlastnostmi, větší důraz je kladen na samotný materiál krycí vrstvy, než na její strukturní parametry.

Pokud je však s ohledem na aplikaci nutné krycí materiál použít, pro zabránění oděru svrchní nanovrstvy volíme krycí materiál ve formě síťky s co největšími **rozměry ok**. Taková síťka může účinně bránit oděru a zároveň nenarušuje akustický účinek rezonančního prvku. Právě takto může plnit funkci krytí i sám perforovaný panel dané geometrie. Budeme-li uvažovat překrytí svrchního rezonančního prvku textilní látkou, je třeba volit látku takových strukturních parametrů, aby opět nebylo zabráněno kmitání rezonančního prvku. Takový krycí materiál by tedy měl být co

nejvíce **prodyšný** a neměl by bránit přístupu zvukového vlnění (odrazivý povrch) do akustického systému.

V praxi je možné využívat vlastností nanovlákněné vrstvy, která může být různě modifikována, přímo bez krytí. Je možné přizpůsobit už zvláknovací polymerní roztok, nebo je možná až impregnace hotové nanovrstvy. Pokud nedostačují její mechanické vlastnosti, je možné při lehkém snížení zvukové pohltivosti výsledného uspořádání využít toho, že nanovlákněná vrstva je vždy na nějakém **podkladovém materiálu**, který může být mechanicky poměrně odolný. Pokud takový prodyšný podkladový materiál ztelně nesníží akustické schopnosti membrány, může být na čelní straně akustického systému právě podkladový materiál, nanovrstva až za ním. Prodyšná podkladová vrstva tak ve finálním materiálu tvoří ochrannou vrstvu bránící poškození nanovláken.

Výhodné se může jevit i použití pojivového materiálu, který může přispívat k lepším mechanickým vlastnostem svrchní nanovlákněné vrstvy jejím zpevněním. Nakonec i s ohledem na útlum akustické energie může být krytí realizováno jakýmsi předřadným závěsem. [1, 3, 38]

3. Návrh materiálů akustického systému

Pro vývoj zvukově pohltivého materiálu s použitým rezonančním prvkem je důležité nejen zkoumat parametry zásadní pro velikost činitele zvukové pohltivosti, tedy strukturní vlastnosti; výsledný akustický systém také musí vyhovovat jeho budoucím aplikacím po stránce materiálové s ohledem na jeho další užité vlastnosti. V souvislosti s předešlou kapitolou a se záměrným upřednostněním běžně dostupných materiálových řešení se tato kapitola snaží popsat odpovídající možnosti volby materiálů jednotlivých prvků akustického systému, které splňují možné požadavky kladené na vlastnosti materiálu.

Výsledné akustické systémy najdou své uplatnění především v soukromé, či veřejné oblasti stavebnictví, tj. v bytech, podnicích nebo v kulturních zařízeních. Zde by měly splňovat požadavky snadné instalace, ekologičnosti, dlouhodobé životnosti a v neposlední řadě požadavky estetické. Další významnou oblastí, kde by se mohla navrhovaná řešení uplatnit, je odhlučnění mechanických zařízení. V této sféře jsou kladené nároky na použité materiály přirozeně vyšší a konkrétnější. Od materiálů uplatňovaných v průmyslu se očekávají v souvislosti s jejich funkčností specifitější vlastnosti fyzikální (hmotnost, rozměry, pevnost, mechanická odolnost, ...), chemické (odolnost vůči prachu, vlhkosti, olejovým látkám, ...), protipožární (tepelná odolnost, nehořlavost, samozhášivost, ...). Zvláště na protipožární vlastnosti stanovené dle ČSN ISO 3795 (rychlost hoření < 100 mm/min při zkoušce malým plamenem) a normy DIN 75 200 (německý předchůdce ISO 3795) je v souvislosti s bezpečností kladen vyšší důraz a proto je většina vybraných materiálů od výroby samozhášivá, tedy odolná proti šíření plamene. Obecně lze říci, že materiál je

samozhášivý, pokud po oddálení zdroje plamene za normou stanovený čas plamen zhasne. Zároveň s akustickými vlastnostmi tyto materiály (výplňový prvek) ze své podstaty jeví i tepelně izolační vlastnosti. Akustický systém je tak do jisté míry i řešením tepelně izolačním, což může být zejména při výběru izolací v bytové sféře výhodné funkční řešení šetřící náklady. Zde poznamenejme, že přirozeným hlediskem při výběru je též finanční stránka věci; tou se tato kapitola (ani práce celkově) nezabývá. Možností materiálů vybraných pro jednotlivé prvky akustických systémů se však řídili dostupností na trhu a v té míře představují řešení zajímavá i ekonomicky.

Jednotlivé varianty materiálů uvažovaných do konečných akustických řešení a jejich rozměrové parametry jsou přehledně uvedeny na konci práce (viz *Přílohy*). [4, 12, 22, 26, 43, 44, 46]

3.1. Materiál výplně

Za materiály výplně byly vybrány porózní materiály na bázi polymerů, minerálních a skelných vláken různých tloušťek. Zamýšleny byly i materiály organického původu (konopí, balsa,...), ty však do uvažovaných akustických systému nebyly včleněny. Nejčastěji uplatňovanými výplněmi, vždy ve více modifikacích, byly pěnové hmoty a vlákenná rouna společností Cellofoam a Isover.

Šedočerné impregnované rouno **Cello® F800 FR HO** je tvořeno pojenými polyesterovými vlákny a proto díky použití PES odpuzuje jak látky polární (voda), tak i nepolární (olej, nafta). Objemová hmotnost rouna činí s deseti procentní tolerancí 24 kg/m^3 . Jeho povrch lze různě laminovat a tak zajistit další vlastnosti, např. sám výrobce nabízí varianty se samolepem, netkanou textilií, PES vlákennou vrstvou, s tenkou hliníkovou fólií odolnou korozi a s Al fólií vyztuženou mřížkou ze skelných vláken. V takovém materiálu se dlouho nedrží vlhkost, je odolný běžným technickým kapalinám (zvláště při jeho povrchové úpravě). Samozřejmostí je stabilní struktura vláken (vibrační testy) a jejich hygienická nezávadnost. Jde o ekologický a plně recyklovatelný výrobek. Tepelně je základní varianta rouna dlouhodobě stabilní v rozmezí -50°C až $+100^\circ\text{C}$ (krátkodobě do 160°C) a mezi testy na hořlavost výrobce uvádí splnění mj. *DIN 75 200* a *ISO 3795*. Rouno je dodáváno ve formě desek, díky své měkkosti však může kopírovat obložený povrch. Navíc výrobce nabízí i tepelně tvarované díly.

Šedomodrá měkká pěnová hmota **Cello® HR 290/0** na bázi melaminové pryskyřice nabízí chemickou odolnost proti uhlovodíkům a lihu. Melamin (2,4,6-triamino-1,3,5-triazin) je organická sloučenina, která se používá k výrobě umělých hmot, pryskyřic, hnojiv atd. a je velmi málo rozpustná ve vodě. Objemová hmotnost pěny činí $9,5 \pm 1,5 \text{ kg/m}^3$. Výrobce má ve své nabídce i variantu se samolepem, netkanou textilií, Al fólií (ochrana proti mech. poškození, prachu, pronikání kapalin, plamenům apod.). Teplotní stabilita je u pěny vyšší než u rouna – dlouhodobá je

v rozmezí -50°C až $+180^{\circ}\text{C}$ a krátkodobě vydrží pěna teploty do 200°C . Pěna díky vyššímu obsahu dusíku (67%), který se uvolní při hoření a tlumí oheň, vykazuje vynikající požární vlastnosti. Výrobce tak mezi vyhovujícími testy hořlavosti uvádí opět *DIN 75 200*, *ISO 3795* a další jako *FMVSS 302* (hořlavost v okolí motorových jednotek) a *DIN 4102 - B1* (snížená hořlavost, kde B1 znamená nesnadno zápalný).

Akusticky velmi zajímavé jsou i varianty polyuretanových (PUR) pěn založených na polyetheru či polyesteru, které kromě běžných vlastností - odpudivosti vůči vodě a oleji, odolnosti proti zašpinění a usazování prachu, nabízí i zajímavé neprůzvučné vlastnosti a v neposlední řadě jsou vzhledově velmi atraktivní variantou. Tak byla vybrána 30 mm PUR-etherová černá pěna **Cello[®] 491** s širokým absorpčním pásmem; odolná látkám polární i nepolární povahy, a tak vhodná např. do kapotází mechanických zařízení. Dalším zástupcem polyuretanové-etherové pěny byla zvolena tmavě šedá **Cello[®] 461/0** tloušťky 20 mm ve variantě se samolepem. Tato pěna s širokým frekvenčním pásmem zvukové absorpce je neproniknutelná pro vodu, olej i paliva - tudíž se opět hodí do kapotází strojních zařízení, např. motorů. Teplotně jsou obě stabilní od -40°C do $+100^{\circ}\text{C}$ a splňují *DIN 75 200*, *ISO 3795* a *FMVSS 302*. **Recyklovaná PUR pěna** vykazující jak absorpční tak izolační (neprůzvučné) vlastnosti byla další zvolenou výplní, a to v tloušťce 30 mm. Její povrch je velmi odolný vůči olejům a palivům nebo vlhkému a mokrému prostředí (impregnace). Pěna vykazuje velmi dobré mechanické vlastnosti (např. zatížení). Je dlouhodobě stabilní v rozmezí teplot -40°C až $+100^{\circ}\text{C}$ (krátkodobě do 170°C) a mezi testy na hořlavost výrobce uvádí splnění *DIN 75 200*, *ISO 3795* a *FMVSS 302*.

Společnost Cellofoam má velmi širokou paletu materiálů a kromě výše zmíněných materiálů dále nabízí pěny na bázi polyetylenu (PE), které vykazují dobrou chemickou odolnost a nízkou nasákavost. V jejich nabídce má své místo i vysoce teplotně odolná izolace na bázi skelného vlákna (Cello[®] 1116 ALG) nebo těžké fólie s obsahem protipožárních minerálních látek řešící především vzduchovou neprůzvučnost a vibrace. Pro výsledná akustická řešení v této práci se tak uplatnila např. těžká fólie **Cello[®] EVA 6-01** složená ze speciálních protipožárních minerálních látek smíchaných s plastovou směsí na bázi EPDM/EVA polymerů. Plošná hmotnost této 3 mm silné fólie je přitom už 6 kg/m^2 .

Za materiály výplně s vysokou tepelnou odolností a vysokou protipožární odolností byly od společnosti Isover vybrány ve třech variantách hydrofobizované izolační desky z minerálních (skelných či čedičových) vláken ve formě plsti. Varianty **Isover TDPS** a **TDPT** vydrží teploty jdoucí k 200°C a z protipožárních vlastností splňují reakci na oheň A2 (*ČSN EN 13501-1*), vývoj kouře s1 a plamenně hořící částice d0 (*ČSN EN 13823*). Stejně tak i varianta **Isover Akustik Platte**, což je deska navíc jednostranně kaširovaná černou netkanou textilií. Tyto desky jsou určeny

k aplikaci ve stavebnictví (podhledy, stropy, podlahy, ...), odolávají dobře zatížení, mají velmi dobré tepelně izolační vlastnosti a mimo pohlcování zvuku zlepšují kročejovou a vzduchovou neprůzvučnost. Jsou odolné vůči dřevokazným škůdcům, hlodavcům a hmyzu. A jako ostatní splňují podmínky ekologické a hygienické nezávadnosti. [3, 4, 6, 22, 26, 27, 28, 44, 46]

3.2. Resonanční prvek

Materiály pro resonanční prvek byly dvojího určení. První skupinou byly materiály vhodné pro rezonátory helmholtzova typu, a to ve formě perforované či děrované. Druhou skupinu obsáhly resonanční membrány založené na nanovlákněné pavučině. V první skupině se vyskytují materiály běžně dostupné ve stavebninách. Požadované resonanční nanovlákněné membrány byly vytvořeny na půdě TUL pomocí metody elektrostatického zvlákňování (electrospinningu). Resonanční funkce obou skupin se často prolínaly, a tvořily tak často jediný akustický minisystém. Přičemž upevnění resonančního prvku na objemový prvek výplně bylo realizováno pojícím materiálem.

3.2.1. Perforované panely

Pro perforované panely, na které bylo zamýšleno aplikovat nanovlákněnou membránu, byly zvoleny materiály z hliníku, termoplastů, dřevěné drti a sklovláknitých tkanin. Jednu část tvořily **děrované Al-plechy** společnosti **West Steel**. Šlo o plechy z válcovaného hliníku o tloušťce 1 mm. Ty byly použity s vystředěnými čtvercovými a kruhovými otvory různých velikostí v základním pravidelném uspořádání. Hliníkové plechy se vyznačují velmi dobrými technologickými i fyzikálními vlastnostmi (bod tání cca 650°C).

Další částí byly panely tvořené z plastických hmot, které vynikají především svou nízkou hmotností. Pro rezonátory s nevelkou ohybovou tuhostí byly vybrány bílé desky tloušťky 2 mm z houževnatého polystyrenu (HPS) a číré desky tloušťky 3 mm z extrudovaného plexiskla (PMMA). Byla zvolena i varianta 4mm desek z čírého komůrkového polykarbonátu (PC). Konkrétně tedy desky **HPS Iroplast**, **Perspex 0X00** a **PC Arla** od společnosti **Axom Kladno**. Tyto materiály nesou všechny obvyklé vlastnosti pro dané plasty, proto je záhodno zvýšit jejich protipožární vlastnosti buďto další vrstvou z nehořlavého materiálu, nebo impregnací (retardérem hoření). Jsou to totiž materiály těžce hořlavé, ačkoli v jistých variantách samozhášivé.

Desky z materiálu **HPS** jsou zdravotně nezávadné, mají zvýšenou tepelnou (do 100°C) i mechanickou odolnost a zvýšenou odolnost k polárním látkám (díky své nepolární povaze). Nabízí velmi dobré izolační vlastnosti a pohledovou atraktivitu. HPS je materiál těžce hořlavý, samozhášivý v určitých provedeních (*typ B1*).

Dalším termoplastem je extrudované plexisklo s vynikajícími optickými vlastnostmi, avšak s náchylností k prasknutí při nárazu (díky své křehkosti) a menší odolností proti hoření.

Desky z extrudovaného **PMMA** nabízejí výbornou průhlednost, dobré mechanické vlastnosti, odolnost proti UV záření, vlivu počasí a stárnutí. Jsou snadno použitelné a jejich barva je dlouhodobě stabilní. Pokud nejsou vystaveny silným kyselinám, nebo zásadám, jsou i poměrně chemicky odolné. Dlouhodobá teplotní stabilita u tohoto materiálu pohybuje kolem 70-100°C, je však snadno zápalný a podle *UL 94* je klasifikován jako třída HB. *Kde UL-94 je norma zpracovaná Underwriters Laboratories. Jde o standardní test hořlavosti často užívaný průmyslovými podniky, kde pořadí stupňů hořlavosti je následující: HB (nejvíce hořlavý), 5VA či 5VB, V2, V1, V0, no (nehořlavý).*

Oproti PMMA je **PC** mimořádně odolný vůči nárazu (netříštivý materiál) a je tak třeba hojně využíván při výrobě ochranných krytů pracovních strojů. Ve srovnání s PMMA vydrží vyšší teploty (trvale až 120°C). Dutinový PC je tak transparentní prakticky nerozbitný materiál vykazující dobré izolační vlastnosti, vyšší teplotní odolnost (-40 °C až +115 °C). Jedná se o materiál nízké hmotnosti s ohybovou schopností za studena. Díky vysoké houževnatosti, a tak velké netříštivosti, se však jedná o materiál snadno poškrabatelný. Také jde o materiál těžce hořlavý, nicméně v určitých variantách samozhášivý (*Makrolon Multi UV*).

Naopak pro rezonátory s vyšší ohybovou tuhostí a tloušťkou byly voleny krom plastů i dřevovláknité desky. Plastové perforované panely tloušťky 13 mm byly založeny na **polyamidu (PA6)**. PA6 je látka s atraktivními mechanickými i fyzikálními vlastnostmi, které mohou být ještě zvýšeny přidáním skelných vláken při procesu výroby (PA 6,6). Maximální provozní teploty jsou mezi -40 °C až +125 °C, krátkodobě odolává teplotám do 200°C a tavi se, až když teplota překročí 220°C. Je též poměrně chemicky odolná, až na koncentrované kyseliny. Desky z PA6 nevykazují barevnou stálost (žloutnutí díky UV), ale jsou dostatečně odolné vůči stárnutí. Tak byly 13mm desky z PA6 perforovány otvory ve tvaru čtverce, kruhu, hvězdy a trojúhelníku.

Materiálem akustických kazet **AVS**, které jsou perforované v celé své tloušťce 16 mm, byla dřevěná drť, která byla z jedné strany opatřena laminátem. Jádro akustických kazet je tvořeno **MFD dřevovláknitou deskou**, ta je vyrobena bez použití lepidel, tudíž je ekologičtější ve srovnání s deskami spojenými chemicky (LTD, DTD či OSB). MFD (středně hustá vláknitá deska) má velmi jemnou (objemová hmotnost okolo 700-900 kg/m³) homogenní, a tak dobře tvarově opracovatelnou strukturu, která dovoluje, na rozdíl od ostatních dřevovláknitých desek, její snadné profilování. Povrch MFD se dále upravuje. Buď foliováním (tepelně nalisovaná PVC fólie), nebo lakováním, či laminátem. V našem případě akustických kazet byla MFD deska z jedné strany pokryta laminátem. Pro větší estetický účinek je však možné ji pokrýt dýhou z různých dřevin. Tyto desky dle výrobce vynikají především vysokou odolností proti tepelnému namáhání a snadnou údržbou, ačkoli přesné hodnoty tepelné stability chybí. Co se týče hořlavosti, tak se svými protipožárními parametry řadí do třídy stavebních hmot B2 (normální hořlavost dle *ČSN EN 13501-1*), D-s2,d0. Použitím dalších přísad při výrobě MDF lze nicméně dosáhnout zlepšení určitých vlastností

(hořlavost, odolnost proti vlhkosti, nebo biologickým vlivům, ...). Na základě toho byly zvoleny **akustické kazety AVS10** - jen kruhové otvory a **AVS1,2,3** - kruhové otvory překryté různě vzdálenými šterbinami v celé délce panelu.

Sklovláknité mřížkové tkaniny (tzv. perlinky) vybrané do uvažovaných akustických řešení tvoří jakýsi předěl mezi rezonátorem Helmholtzova typu a rezonátorem membránovým. Materiálově se jedná, jak už název napovídá, o tkané textilie (nejčastěji perlinková vazba) ze skelných vláken. Díky tomu výsledné mřížky nabízí mnoho příznivých vlastností, za něž uvedme alespoň jejich pevnost a rozměrovou stálost, odolnost vůči degradaci, chemickou odolnost (i alkáliím), požární odolnost (ohnivzdornost a tepelná stabilita v rozsahu -296°C až $+538^{\circ}\text{C}$) a v neposlední řadě flexibilitu a nízkou cenu. Mřížkové tkaniny jsou během výroby různě impregnovány. Způsob jejich impregnace je zakódován ve značení jednotlivých perlinek. Tak tedy např. R (typ tkaniny) 117 (plošná hmotnost rezné tkaniny) A101 (povrchová úprava odolná alkáliím). Od společnosti **Saint-Gobain ADFORS** tak byla zvolena široká paleta (celkem 27) různých mřížkových tkanin ze sklovláknitého materiálu s označením Vertex® (viz *Přílohy*). [2, 4, 24, 26, 29–35, 44]

3.2.2. Resonanční membrána

Materiálem nanovlákněné resonanční membrány byl zvolen **PA6 (14% vodný roztok)**. Konkrétně byl zvolen granulát PA6 typu B27 (případně B24) od společnosti BASF. Rozpouštědlem byla směs kyseliny octové a mravenčí v poměru 2:1 (AA:FA (2:1)). Ten byl vybrán na základě předchozích rozsáhlých zkušeností (srovnání s PVA a PAN) jako nejvhodnější řešení. Kromě svých dobrých materiálových vlastností, které se přímo promítají i akusticky, jde o nesnadno zápalné řešení výhodné ekonomicky. Pro nanovlákněnou vrstvu z PA6 platí uvedené vlastnosti u děrovaného panelu o velké ohybové tuhosti z PA6 (viz výše). Jedná se tedy o pružný, tuhý a pevný materiál s nízkým sklonem k opotřebení a stárnutí. PA6 odolává běžným rozpouštědlům (aceton, alkohol, benzol), olejům, tukům, všem alkáliím a většině kyselin (nikoli koncentrovaným). Kromě velmi dobré chemické odolnosti je i tepelně odolný (až k 200°C), špatně hoří a po chvíli uhasíná. Ze své podstaty (polyamid) však vykazuje ve srovnání s jinými polymery (PE, PVC, PET) mírně vyšší hydrofilnost. V delším časovém horizontu může vlivem UV záření žloutnout. Zde vybraná varianta byla v původní bílé barvě, nicméně je možné výsledný vzhled změnit přidáním barevných aditiv už do zvlákněvacího roztoku. Obecně je však možné nanovrstvu různě impregnovat, a tak pozměňovat její fyzikální i vzhledové vlastnosti.

Sama nanovlákněná vrstva byla vyrobena v zařízení Nanospider™, které pracuje na principu elektrostatického zvlákněvání z volné hladiny vodných roztoků polymerů v elektrickém poli. To umožňuje kontinuální řízenou výrobu homogenních vrstev s většími plošnými rozměry. Zde byla zvlákněna na **podkladový materiál ESWEGEE** šířky 50 cm vždy v třech plošných

hmotnostech (0,2; 0,4 a 1 g/m²). ESWGEE je netkaná textilie složená z vláken PET a CV (80 a 20 %). Výrobce ji dodává o plošné hmotnosti 35 gsm a tloušťce 0,2 mm. Byla použita jak v této základní, tak i ve variantě s pojící látkou (potažená PE). Bodové pojící adhezivum pak sloužilo k spojení (termickému 125°C) vibrační membrány s porózní výplní.

K spojení nanovlákněné rezonanční membrány s porózním tlumícím materiálem byla často používána tenká **polypropylenová mřížka** (převážně od společnosti Industrial Netting Inc.). Ta byla volena v provedení z různými velikostmi ok. Polypropylen (PP), ačkoli se začíná tavit za vyšších teplot než PE, plní s ohledem na vyšší tepelnou odolnost ostatních použitých materiálů též funkci termicky aktivovaného adheziva. Jako další možnost spojení dvou akustických prvků byla zvolena laminace. Laminace byla provedena buď výběrem materiálu s polepem (porózní materiály), nebo u rezonátorů Helmholtzova typu za pomoci disperzního lepidla (**Akrylep 417-E**).

Jako poslední materiálový prvek, a to neméně důležitý, je pro správné fungování celého akustického systému nutné uvažovat materiál použitý k instalaci akustických systémů. Materiály objemové je možné připevňovat přímo na zeď, nebo lépe s určitou vzduchovou mezerou (viz *kapitulu 2.1.*) od zdi. To lze realizovat pevným spojením (**PU-pěna**, tavná pistole, lepidla, atd.) či pomocí nosné konstrukce, případně i zavěšením. U samotných vibračních akustických prvků nesmíme narušit jejich funkčnost (kmitání na vlastní frekvenci) a jejich instalaci tomu přizpůsobujeme (měkký materiál, zavěšení, ...). Tak je v zde uvažovaných sendvičových řešeních nanovlákněná vrstva kladena pružně na podkladový materiál a ten je pevně navázán na materiál výplně jen v adhezních bodech. [1, 37, 38, 43]

EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

1. Výroba laboratorních vzorků

Laboratorní vzorky byly vyráběny s ohledem na jejich konečné použití. Největší skupinu tvořily vzorky, u nichž se činitel zvukové pohltivosti stanovoval metodou impedanční trubice. S ohledem na výsledky měření v trubici byly potom vyráběny vzorky, které byly použity jednak pro stanovení činitele zvukové pohltivosti v dozvukové místnosti, jednak pro testy hořlavosti. Zde uvedme, že tyto vzorky pak posloužili k obložení stěn, jakožto demonstrační místnosti. Poslední skupinou vzorků byly optimální varianty akustických panelů pro testování v reálných podmínkách. Parametry všech uvedených vzorků jsou přehledně uvedeny na konci této práce (*Příloha 2*). Uvažované akustické systémy skládající se z vícero prvků byly nejprve laminovány, aby došlo k vytvoření jednotného funkčního řešení. Druhým krokem po laminaci byla úprava na rozměry vhodné pro impedanční trubici, přičemž vzorky vybrané pro další měření a testy v reálných podmínkách byly laminovány přímo v požadovaných rozměrech.

1.1. Termická laminace

Pro akustické systémy založené na rezonanční nanovlákně membráně tlumené porózním materiálem došlo k laminaci následujícím postupem. Nejdříve byly vyříznuty nanovlákně vrstva dané plošné hmotnosti adhezerovaná k Eswegee textilií a PP-adhezní síťka - obě odpovídající rozměru výsledného panelu. Poté došlo k přiložení a upevnění síťky a na ní Eswegee textilie k desce porózního materiálu; přičemž síťka byla mezi deskou a Eswegee, nanovrstva byla nahoře. Byly však vyrobeny i vzorky, kde na pohledové straně byla Eswegee textilie a nanovrstva směřovala dovnitř. Následně byly připraveny, buď pomocí samolepící vrstvy nanosené na porózním materiálu výplně, nebo pomocí hydraulického vyhřívaného lisu (*HVL 150*), akustické panely s nanovlákně rezonanční vrstvou (0,2 – 1 gsm) na/pod Eswegee. Jelikož rozměry desek lisu (40x40 cm) vždy neumožňovaly přípravu výsledného panelu na jedno slisování, bylo posléze nutné neslisované části panelu ještě dodělat manuálně žehličkou, jejíž teplota byla držena na hodnotu odpovídající té v lisu. Adheze je umožněna tím, že se PP-síťka vlivem teploty roztaví a tím spojí oba akustické prvky, tj. rezonanční membránu a porózní tlumící materiál. Pro srovnání byly vždy vyrobeny i vzorky jen s Eswegee podkladovou textilií, bez nanovrstvy. Podmínky lisování spolu s parametry vzorků uvádí *Příloha 2*.

1.2. Laminace lepením

Laminace nanovláknenné rezonanční membrány u druhé skupiny rezonačních prvků, perforovaných panelů a mřížek, byla provedena disperzním lepidlem. Na začátku byla nejprve vyříznuta nanovláknenná vrstva dané plošné hmotnosti adherovaná k Eswegee textilií odpovídající rozměru panelu. Ta byla posléze za pomoci štětce nebo malířského válečku přilepena lepidlem Akrylep k perforovanému rezonančnímu prvku nanovrstvou dovnitř panelu. Následně byl každý takový panel zatížen hmotností cca 80 kg po dobu nejméně 10 minut. Po odstranění zátěže byly takto připravené vzorky před měřením ještě nechány dosychat (min. 1 hodinu). Obdobně byly připraveny vzorky pro impedanční trubici, které byly již kruhového tvaru a průměru trubice (získání kruhového tvaru popisují následující odstavce). Jediným rozdílem bylo, že byly kladeny přímo na nanovláknennou vrstvu nanosenou na nosiči Eswegee, ale po zaschnutí lepidla byly od této vrstvy vyříznuty aranžérským (odlamovacím) nožem nebo za použití nůžek. Tak byly získány požadované kruhové vzorky pro měření v impedanční trubici.

Vzorky jednotlivých částí akustického systému vyráběné pro testování v impedanční trubici měly konečné rozměry odpovídající velké (pro nižší frekvence) a malé trubici (pro vyšší frekvence). Byly tak vyrobeny kruhové vzorky o průměru 100 mm a 29 mm. Proces výroby se lišil pro jednotlivé akustické prvky. Ty materiály, které umožňovaly využít razicího zařízení, které za pomoci ostřených kovových raznic (právě těchto dvou průměrů) umožňuje vykrojení vzorků vyvinutým rázovým tlakem, byly připraveny tímto způsobem. Razicí zařízení tak sloužilo k úpravě rozměrů pro většinu vzorků: porózních materiálů výplně, tenké nanovláknenné membrány s podkladovou textilií, pojící PP-mřížky, sklovláknitých mřížek a těžké EVA folie. Ty vzorky, které díky svým mechanickým vlastnostem neumožňovaly využít ostrých ocelových nožů razicího zařízení, byly na požadované průměry buďto vyříznuty již od výroby (Al-plech), nebo soustruženy (PA6, HPS, PMMA, MDF), nebo vystřihovány k tomu vhodnými nůžkami (některé sklovláknité mřížky). Soustružení probíhalo povětšinou na soustruhu TUL a to pod dohledem. Nejdříve byly z dodaných velkých desek přímočarou pilou nařezány menší (přenosné) desky. Z menších desek byly poté na vertikální elektrické pile nařezány destičky s rozměry co nejvíce se blížíci požadovaným 100 mm a 29 mm v průměru. To proto, aby se usnadnilo soustružení (uchycení a samotný proces). Poté byly tyto destičky uchyceny v soustruhu a vysoustruženy na požadovaný rozměr.

Geometrii vibračních prvků založených na perforovaném hliníkovém plechu a perforovaných MFD deskách nebylo nutné nijak dále upravovat. Finální podobu kruhových vzorků vibračního prvku založeného na plastech z HPS a PMMA však bylo nutné teprve vytvořit. Na základě kapitoly 2 byly navrženy kruhové otvory různé geometrie uspořádání. Ty byly do kruhových vzorků posléze vytvořeny s využitím kolmé rotační frézy, vrtačky i soustruhu.

Tak vznikly vzorky s jedním centrálním otvorem určitého průměru. Dále vznikly vzorky s jedním centrálním a v určité vzdálenosti okolo něj s čtyřmi dalšími otvory. Vzorkům reprezentujícím perforované panely z PA6 byly po vyříznutí na požadované kruhové rozměry vyfrézovány centrální otvory kruhového, čtvercového, trojúhelníkového a hvězdicovitého půdorysu určitých rozměrů (viz *Přílohu 2*).

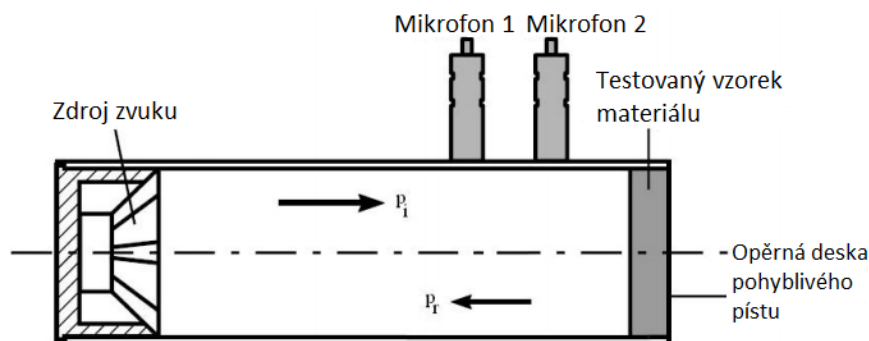
Za úplně poslední krok můžeme považovat uchycení vzorků v impedanční trubici, které bylo nutno řešit zejména pro tenké vzorky. Nejjednoduššími a také nejlepšími se ukázala řešení pomocí obyčejné plastelíny a lepicí pásky (izolační, elektrikářská, ...). Lepicí páska, nebo plastelína v tenké vrstvě po obvodu, byly schopny dostatečně fixovat vzorek v trubici. Vzorky z PA6 o tloušťce 13 mm byly vybaveny pro lepší těsnost a snadnější manipulaci tenkým pryžovým kroužkem.

2. Hodnocení akustických vlastností vzorků

Ke stanovení činitele zvukové pohltivosti existuje několik metod. Tyto metody lze obecně rozdělit na základě principu měření zvukových vln do dvou skupin. První skupinu tvoří laboratorní metoda, která měří na principu kolmého dopadu zvuku – Dvoumikrofonová impedanční trubice. Kolmý dopad rovinných zvukových vln se však v reálných podmínkách prakticky nevyskytuje. Proto existují metody, patřící do druhé skupiny, které více odpovídají skutečným podmínkám. Mezi metody založené na měření všesměrového dopadu zvukového vlnění patří např. dozvuková místnost, alfa-kabina, metoda odražené vlny či metoda měření intenzity zvuku. V této práci byly vzorky hodnoceny v impedanční trubici a dozvukové místnosti. [1, 3, 5, 13, 15, 41, 42]

2.1. Metody měření činitele zvukové pohltivosti

Dvoumikrofonová impedanční trubice Brüel & Kjaer typ 4206 se používá k měření akustických charakteristik (činitel zvukové pohltivosti nebo odrazivosti, akustická impedance či admittance) u malých laboratorních vzorků. Hodnoty jsou určovány pro kolmý dopad zvuku vyhodnocením pole stojaté rovinné vlny v trubici, vyvolaného superpozicí sinusové rovinné vlny dopadající na zkušební vzorek a rovinné vlny odražené se od něho. Při měření činitele zvukové pohltivosti touto metodou dochází k rozkladu generovaného širokopásmového stacionárního náhodného signálu na jeho dopadající a odražené složky (*Obr. 8*).



Obr.8: Obrázek průřezu použité Dvoumikrofonové impedanční trubice; p_i je dopadající složka akustického tlaku a p_r odražená složka akustického tlaku. [38]

Signál vytvářený zvukovým zdrojem dopadá na testovaný vzorek materiálu umístěný na opačném konci trubice. Na stěně trubice jsou umístěny dva mikrofony snímající složky dopadajícího p_i a odraženého p_r akustického tlaku. Pomocí těchto dvou složek akustického tlaku jsou vypočítány tři tzv. frekvenční přenosové funkce: H_l (frekvenční přenosová funkce), H_i (frekvenční přenosová funkce pro dopadající složku) a H_r (frekvenční přenosová funkce pro odraženou složku). Z těchto tří funkcí je potom dle vztahu (29) určen celkový činitel zvukové odrazivosti R_0 .

$$R_0 = \left(\frac{H_l - H_i}{H_r - H_l} \right) e^{i2k(l+s)} \quad (29)$$

Kde malé k značí vlnové číslo $k = \omega/c$, malé l vzdálenost mezi prvním mikrofonem a zkoušeným vzorkem a malé s značí vzdálenost mezi oběma mikrofony. Výsledný činitel zvukové pohltivosti je pak určen dle převodního vztahu (30) mezi oběma činiteli:

$$\alpha = 1 - |R_0|^2 \quad (30)$$

Dvoumikrofonové měřicí zařízení (Obr. 9) sestává ze dvou trubic. Větší trubice o vnitřním průměru 100 mm slouží k měření na nižších frekvencích (50 Hz – 1600 Hz) a menší trubice o vnitřním průměru 29 mm slouží k měření vyšších frekvencí (500 Hz – 6400 Hz). Výhodou této metody je možnost testování vzorků malých rozměrů. Nevýhodou je již zmíněný kolmý dopad zvukového vlnění. Tato metoda měření rovinné vlny v impedanční trubici byla použita k měření a porovnání vyvíjených vzorků z předchozí kapitoly ve všech případech. Sloužila k měření činitele zvukové pohltivosti, ale je jí možné použít i k měření zvukově izolačního parametru – vložného útlumu. Jsou pro ní ustanoveny dvě normy ČSN ISO 10534-2, která se používá zejména v Evropě a ASTM E1050-98 používaná v USA.



Obr.9: Fotografie zobrazující schéma použité měřicí aparatury.

Metoda měření v dozvukové místnosti podává výsledky, které se více blíží reálným podmínkám; zajišťuje totiž všesměrový dopad zvukového vlnění. Měření činitele zvukové pohltivosti daného materiálu v dozvukové komoře spočívá v měření doby dozvuku prázdné dozvukové místnosti T_1 o objemu V a v měření doby dozvuku s vloženým pohltivým materiálem T_2 o ploše S . Doba dozvuku T je dána charakterem prostoru. Dozvuková místnost je navržena tak, že jednotlivé stěny, hladké a akusticky tvrdé, nejsou souběžné a paralelní. Pro objem místnosti platí, že jeho velikost musí být tak velká, aby se mohlo vytvořit difúzní zvukové pole již pro nízké frekvence zvuku. Tak platí, že má-li prostor dobrou zvukovou pohltivost, je právě doba dozvuku malá. Je definována jako doba T , při níž klesne hustota akustické energie na 10^{-6} původní hodnoty tj. o -60 dB. Tomu odpovídá pokles hladiny akustického tlaku o -60 dB. Doba dozvuku se tedy měří tak, že se určuje čas, za který hladina akustického tlaku poklesne v uzavřeném prostoru, potom co je vypnut zdroj zvuku, na tisícinu původní hodnoty, tj. o 60 dB. Z toho plyne, že měření takového poklesu předpokládá, aby hladina akustického tlaku před vypnutím zdroje byla o 60 dB vyšší než hladina zvuku pozadí, což ale není vždy reálné. Proto norma předpokládá, že se bude měřit pokles o 30 dB a doba se zdvojnásobí. Z naměřených dob dozvuku je poté vypočítán činitel zvukové pohltivosti pro všesměrový dopad zvuku dle následujícího vztahu:

$$\alpha = \frac{0,16V}{S} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \quad (31)$$

Přesný popis této metody udává norma ČSN ISO 354. Vyhodnocení činitele zvukové pohltivosti v dozvukové místnosti je založeno na řadě zjednodušujících a aproximativních předpokladů, týkajících se zvukového pole a velikosti pohltivého vzorku. Proto někdy nabývá činitel zvukové pohltivosti hodnot větších než 1. Naproti tomu metoda s impedanční trubicí počítá s existencí dopadající rovinné zvukové vlny a za této podmínky dává přesné hodnoty (neberou-li se

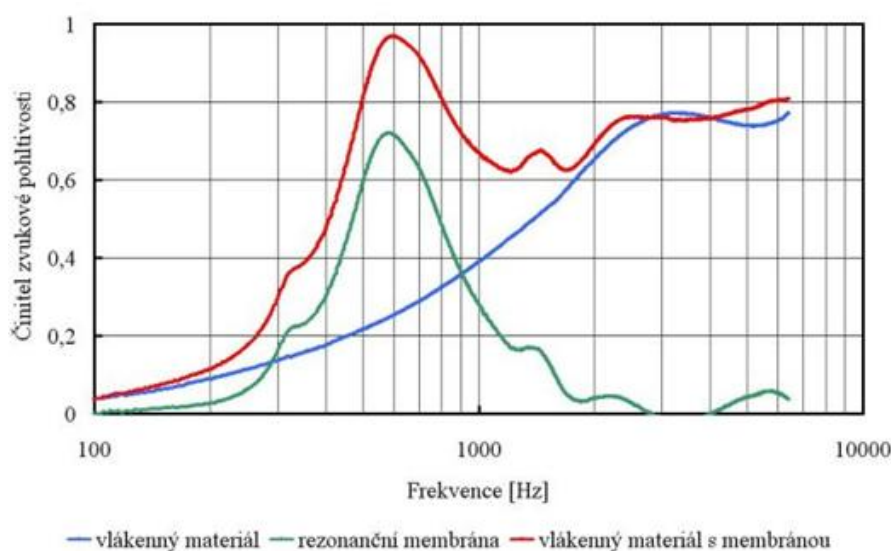
v úvahu chyby montáže a měření). Nevýhodou jsou nároky na měřicí místnost (velikost, nerovnoběžnost absolutně odrazivých stěn) a na vzorky (v našem případě rozměry 10,8 m²).

Alternativou k dozvukové místnosti může být tzv. **Alfa-kabina**, která respektuje metodiku danou normou *ISO 354*, avšak odstraňuje nevýhodu potřeby vzorku o velkých rozměrech. Poměry v difúzním poli α -kabiny jsou prakticky stejné jako ve velké dozvukové komoře, ale pro třikrát kratší vlnové délky, resp. třikrát vyšší frekvence. Rozdíl v měření mezi kabinou a místností spočívá v povrchových jevech vzorku díky menšímu objemu prostoru. Dalšími metodami měření činitele zvukové pohltivosti pro všesměrový dopad zvuku jsou **Metoda odražené vlny**, která měří hladiny akustického tlaku, rozdílné pro přímý dopad zvukového vlnění na mikrofon vzdálený x a pro dopad zvukového vlnění na mikrofon přes měřený vzorek vzdálený jak od zdroje zvuku, tak mikrofonu, pod stejným úhlem o $x/2$. Z toho plyne nutnost použití směrového reproduktoru i mikrofonu a dokonale odrazivé podložky. Touto metodou je možné měřit i malé vzorky. **Metoda měření intenzity zvuku** je založena na umístění vzorku spolu s širokopásmovým zdrojem hluku v dozvukové místnosti. Měřený vzorek se přitom nachází v poli odražených vln. Měří se průměrné hladiny akustického tlaku a intenzity zvuku. Měření touto metodou odpovídá skutečným podmínkám, avšak měření veličiny intenzity zvuku je poměrně nepřesné. [1, 13, 15, 18, 19, 20, 41,42]

2.2. Optimální zvuková pohltivost systému

Jak už bylo řečeno dříve, bulkový materiál výplně, jenž je často samotným zvukově pohltivým řešením, pohlcuje v prakticky uvažovaných tloušťkách v pásmu vysokých frekvencí (viz *Příloha 1*). Pokud chceme pohlcovat zvukové vlnění z nízkého frekvenčního pásma, využíváme akustické řešení založené na rezonančním principu – nejčastěji dutinové (Helmholtzovy) rezonátory. Ať už zařadíme akustický prvek ve formě panelu s dutinami, tenké pružně uložené kmitající desky, nebo rezonanční membrány zanedbatelné tuhosti, vždy obdržíme řešení, které vykazuje účinek jen na úzké části frekvenčního spektra. Tento nedostatek obou zmíněných přístupů jak pohlcovat zvuk, vzhledem ke snaze dosáhnout širokospektrálního zvukově pohltivého řešení, je možno efektivně potlačit průnikem jejich užitných vlastností. Cílem je aplikovat rezonanční membránu na samotná, jak bulková (objemová porózní či vlákenná), tak dutinová akustická řešení. Srovnání trendů zvukové pohltivosti pro samotné zvukové systémy a sendvičový kompozitní systém je ukázáno na *Obr.10*. Ten pomocí grafu s bezrozměrným činitelem zvukové pohltivosti (svislá osa) v závislosti na frekvenci zvukového vlnění (vodorovná osa) názorně demonstruje pozvolný charakter křivky pro samotný objemový (zde vlákenný) pohltivý materiál – modrá

křivka, rázový charakter křivky s typicky výrazným „peakem“ odpovídajícím rezonanční frekvenci pro pohltivý materiál typu rezonátoru (zde rezonanční membrána) – zelená křivka, a kýženou kombinaci obou trendů pro pohltivý materiál založený na membráně aplikované na samostatném pohltivém materiálu – červená křivka. Přínos takového řešení, které efektivněji pohlcuje zvuk již na frekvencích nízkých, přitom neztrácí schopnost pohlcování i pro frekvence vyšší je naprosto zřetelný. Zde vyvíjené unikátní akustické systémy využívají nanovláčkové rezonanční membrány, v důsledku toho bylo možné dosáhnout vyššího zvukově pohltivého účinku než nabízí standardní zvukově pohltivá řešení.

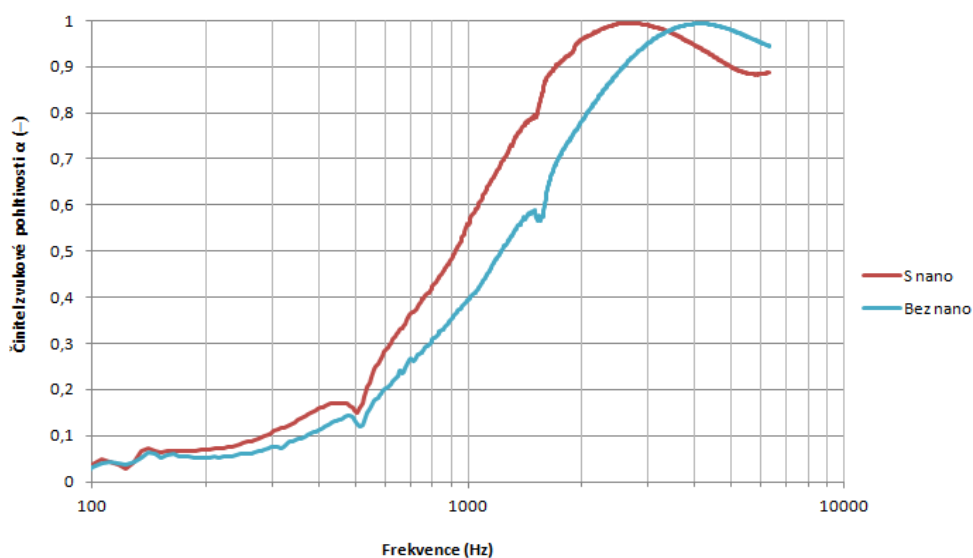


Obr.10: Graf znázorňující rozdílné trendy zvukové pohltivosti mezi základními druhy zvukově pohltivých řešení.

2.3. Naměřené hodnoty činitele zvukové pohltivosti

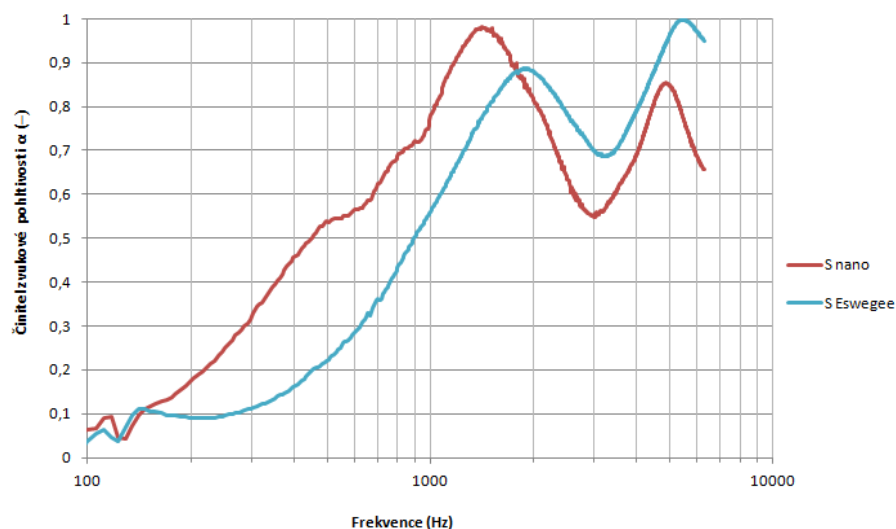
Po proměření vzorků v trubici byly hodnoty uloženy do formátu (*etx.*) odpovídajícím frekvenční závislosti (*windowed frequency response*) získaných dat. Pomocí programu využívajícího makra v standardním kancelářském balíku Office (zde *Microsoft Office Excel*) byly potom obdrženy výsledné hodnoty jako závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci zvukového vlnění. Tím bylo získáno velmi obsáhlé množství dat. Tato data byla zapracována do protokolů o měření, jakožto archivního materiálu o měření. Pro všechna takto získaná naměřená data zde však není dostatek prostoru. Proto jsou v každé kategorii vzorků uvedena data (v grafické podobě) co nejvíce vypovídající o celé skupině měřených vzorků. Vzhledem k homogenní povaze měřených prvků byly pro jeden vzorek použity tři zástupci a i tak došlo k odchylkám mezi nimi zanedbatelným, nejspíše způsobeným manipulací s nimi a jejich usazením do trubice. V následující kapitole jsou pak co nejreprezentativnější varianty různých sendvičových uspořádání akustických systémů.

První proměřenou skupinou byly izolační desky Isover ze skelné plsti. Celkem bylo proměřeno dvanáct desek, a to bez a s nanovláknennou rezonanční membránou. Z každé testované desky, pokryté z jedné strany černou tkaninou, byly vyraženy tři kruhové vzorky. Jednotlivé desky se lišily v plošných hmotnostech – prvních 9 desek TDPS mělo nižší plošnou hmotnost (hodnoty okolo 100 gsm), zbylé 3 desky TDPT měly vyšší plošnou hmotnost (okolo 150 gsm). Vliv vyšší plošné hmotnosti se na posun a růst maxim činitelů zvukové pohltivosti projevil, avšak nepatrně. Daleko větší vliv na posun činitelů zvukové pohltivosti měla aplikace nanovrstvy (viz *Graf 1*). Samotné desky ze skelné plsti vykazovaly zvukovou pohltivost od frekvence jdoucí zhruba od 1,5 kHz, zatímco ve variantě s nanovláknennou membránou již od frekvence 1 kHz.



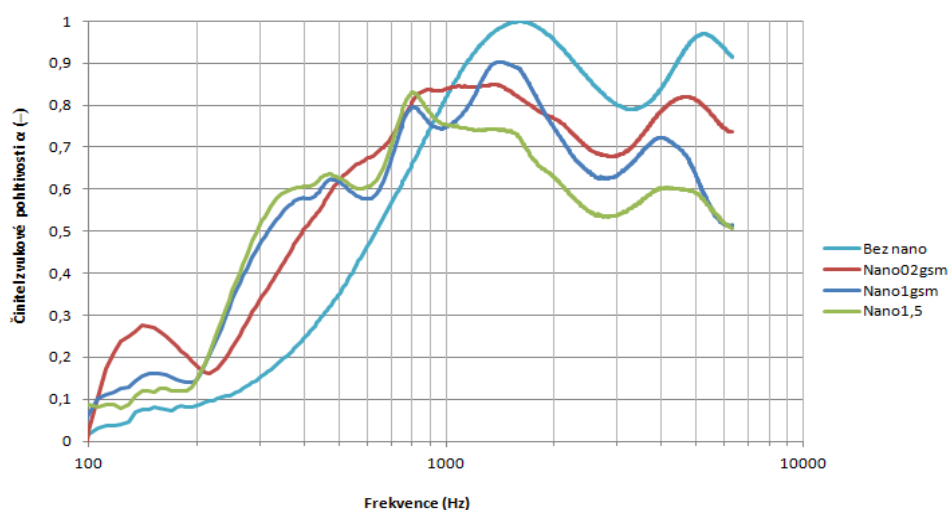
Graf 1: Činitel zvukové pohltivosti pro 20mm desku Isover TDPS (105 gsm) bez a s nanovláknennou vrstvou (1,3 gsm).

Další skupinou byla černá PUR pěna Cello[®] 491 a recyklovaná PUR pěna Cellofoam. U pěny Cello[®] 491 tloušťky 30 mm byly zkoušeny čtyři desky. Byly obdrženy výsledky samotné pěny, pěny s Eswegee podkladovou vrstvou a s nanovláknennou rezonanční membránou (0,2; 0,4 a 1 gsm) na Eswegee. Opět se ukázal přínos aplikace nanovláknenné membrány. Na činitel zvukové pohltivosti měly rozdílné plošné hmotnosti nanovrstvy zanedbatelný vliv. Rozdíl v pohltivosti mezi Eswegee podkladovou vrstvou a Eswegee s nanovrstvou ukazuje *Graf 2*. Samotné desky z PUR pěny vykazovaly zvukovou pohltivost na frekvenci jdoucí zhruba od 1 kHz, zatímco ve variantě s aplikovanou nanovláknennou membránou již od frekvence 600 Hz. Včetně posunu k nižším frekvencím byl jasně patrný nárůst maxima činitele zvukové pohltivosti vlivem rezonanční frekvence užitých nanovláknenných membrán.



Graf 2: Činitel zvukové pohltivosti pro 30mm desku Cello 491 s Eswegee a Eswegee s nanovláknennou vrstvou (0,2 gsm).

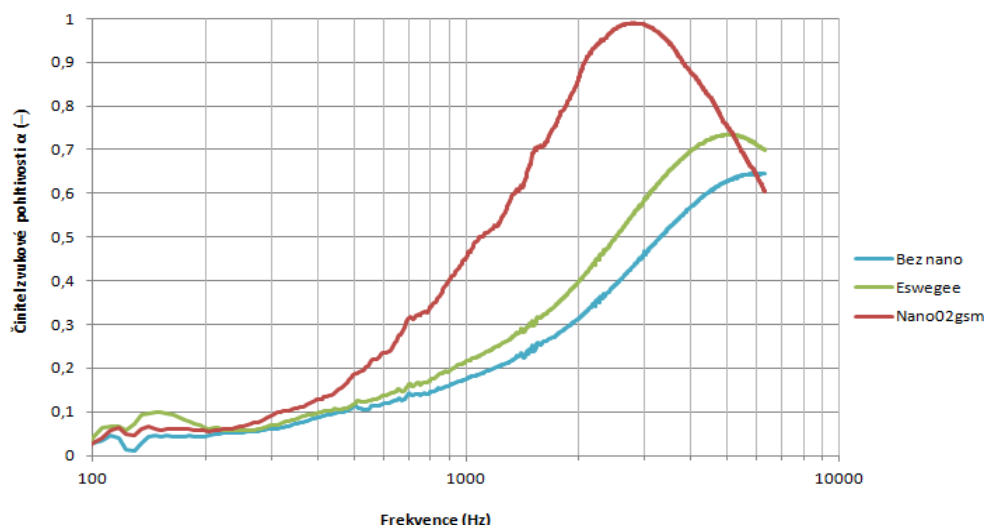
U desky z recyklovaného PUR, o tloušťce 32 mm, byl patrnější vliv vyšší plošné hmotnosti aplikované nanovláknenné rezonanční membrány. Pozitivní vliv nanovláknenné membrány je opět zřetelně vidět (Graf 3).



Graf 3: Činitel zvukové pohltivosti pro 32mm desku z recyklovaného PUR bez a s nanovláknennou vrstvou různých plošných hmotností.

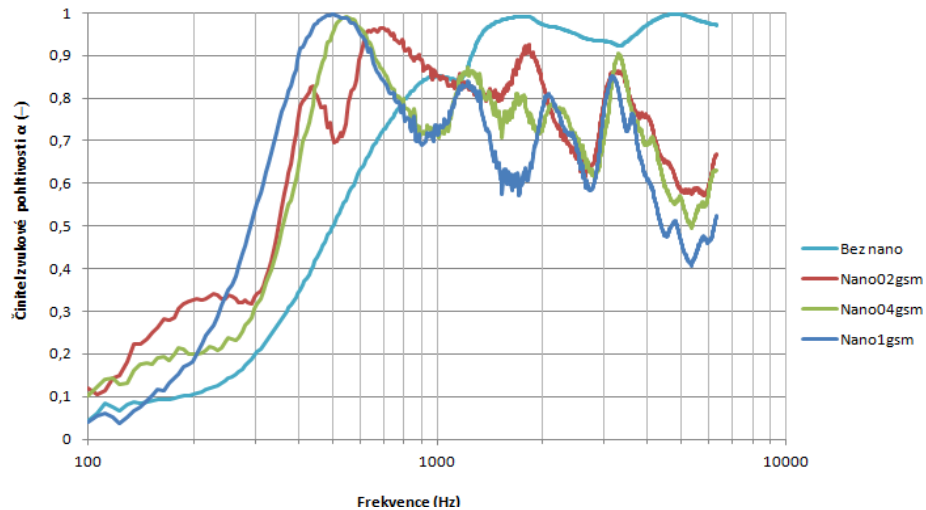
Černé rouno Cellofoam bylo měřeno ve třech tloušťkových provedeních (10, 20 a 50 mm). Později byla též vyzkoušena i varianta s hliníkovou fólií. Vliv plošné hmotnosti nanovláknenné rezonanční membrány se více projevil pro 20mm rouno, kde nejlepší výsledky vykazovala nanovrstva s plošnou hmotností 0,4 gsm. Obecně je u této měkké vzdušné varianty porózní výplně významně znát vliv nanovláknenné rezonanční membrány – viz Graf 4 porovnávající samotnou výplň, výplň s Eswegee a výplň s nanovrstvou. Samotné desky 20mm rouna tak dosahovaly zvukové pohltivosti na frekvenci jdoucí od 4-5 kHz, zatímco ve variantě s aplikovanou nanovláknennou membránou již od frekvence cca 1,5 kHz. Tak kromě velkého posunu k nižším

frekvencím je jasně patrný nárůst maxima činitele zvukové pohltivosti vlivem rezonanční frekvence užití nanovlákněné membrány (1 oproti 0,65).



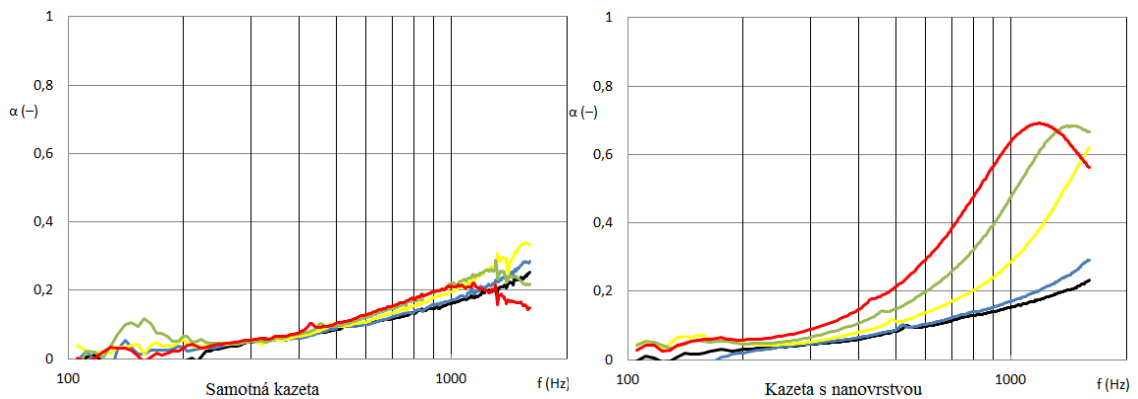
Graf 4: Činitel zvukové pohltivosti pro 20mm desku Cello F800 FR HO bez nano, s Eswegee a s nanovlákněnou vrstvou o plošné hmotnosti 0,2 gsm.

Rovněž ve třech tloušťkových provedeních (10, 20 a 50 mm) byla měřena i modrá pěna Cellofoam. I zde byla vyzkoušena varianta s hliníkovou fólií, ta vykazuje i antirezonanční maximum, oproti nanovrstvě však celkově vykazuje nižší účinek. Vliv plošné hmotnosti nanovlákněné rezonanční membrány se zde projevil silně, nejvyšší plošná hmotnost znamenala nejvyšší pohltivost. U nalaminované Eswegee vrstvy byl v porovnání se samotnou pěnou znát jen malý účinek. Účinek nanovlákněné rezonanční membrány je naprosto zřetelný, zejména u nižší tloušťky materiálu (10 a 20 mm). Vliv nanosené nanovrstvy v závislosti na její plošné hmotnosti na činitel zvukové pohltivosti je jasně vidět i u nejvyšší měřené tloušťky pěny (Graf 5). Z Grafu 5 je zároveň patrný pokles hodnoty činitele zvukové pohltivosti u vzorků s vyšší plošnou hmotností nanovrstvy v oblasti antirezonancí. Samotné 50mm pěnové desky tak vykazovaly zvukovou pohltivost na frekvenci jdoucí cca od 600 Hz, zatímco ve variantě s aplikovanou nanovlákněnou membránou pohlcovaly účinně již od frekvence 300 Hz – tedy poloviční. Včetně posunu k nižším frekvencím byl opět jasně patrný nárůst maxima činitele zvukové pohltivosti (stoprocentní pohltivost) v požadované oblasti nízkých frekvencí.



Graf 5: Činitel zvukové pohltivosti pro 50mm desku Cello HR 290/0 bez nano a s nanovláknennou vrstvou o plošných hmotnostech 0,2-1 gsm.

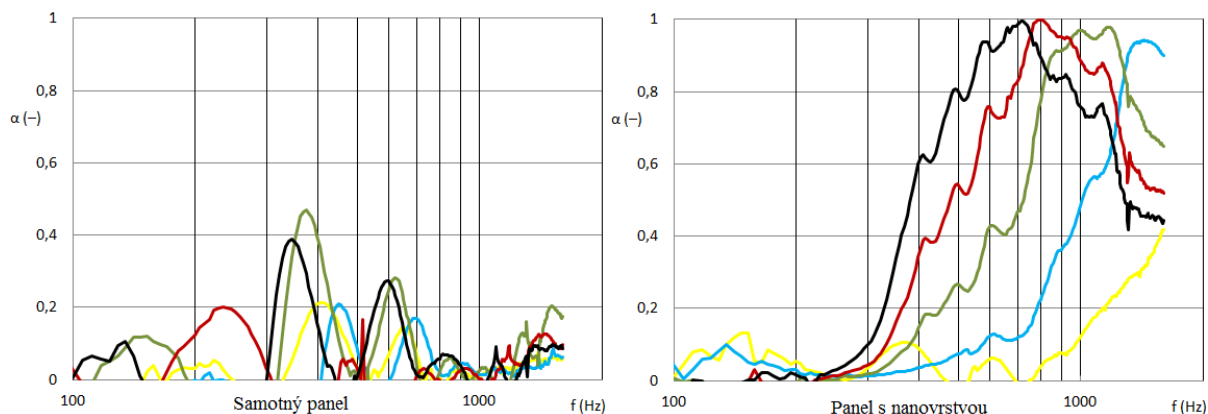
Akustické kazety tloušťky 16 mm vyrobené z MDF desek byly první proměřenou skupinou perforovaných desek. Po proměření se ukázalo, že pro vzduchové mezery za měřeným materiálem uvažované v této práci (5, 10, 20, 30, 40 a 50 mm) jsou tyto kazety vhodné na pohlcování vysokých frekvencí. Na kazety byla opět aplikována nanovláknenná rezonanční membrána, přičemž došlo k výraznému nárůstu hodnot činitele zvukové pohltivosti jdoucím z hodnot kolem 0,2 na 0,7 při aplikované membráně (viz Graf 6). Též byl pozorován významný posun v pohltivosti do oblasti nízkých frekvencí. Jak je patrné, pro tento typ perforovaných akustických prvků jsou typická výrazná maxima na užší frekvenční škále.



Graf 6: Činitel zvukové pohltivosti pro 16mm Akustickou kazetu AVS3 - vlevo bez nano a vpravo s nanovláknennou vrstvou (0,2 gsm). Červená křivka odpovídá její vzdálenosti 50 mm od stěny, zelená 40 mm, žlutá 30 mm, modrá 20 mm a černá 0 mm.

Další řadou perforovaných desek byly plastové 13mm desky z PA6. Samotné desky s otvory (kruh, čtverec, trojúhelník a hvězda) na měřených vzduchových mezerech vykazovaly velmi špatnou pohltivost. Po nalaminování nanovláknenné rezonanční membrány došlo k rapidnímu nárůstu zvukové pohltivosti. Činitel zvukové pohltivosti se u vzorků s nanovrstvou posunul k nižším frekvencím a jeho maximální hodnota vzrostla (z hodnot kolem 0,2 na 1). Vzhledem

k otvorům různých geometrických tvarů byla vidět i další maxima; to bylo nejvíce patrné u vzoru hvězdy a trojúhelníku. U všech vzorů byl pozorován větší posun maxim činitele zvukové pohltivosti směrem k nižší frekvenci u otvorů s menším rozměrem (viz *vztah 24*). U vzorků s kruhovým otvorem byla primární maxima činitele zvukové pohltivosti patrná již na nejnižších frekvencích (50-150 Hz), sekundární maxima dalších módů vlnění byla potom posunuta mírně doprava k vyšším frekvencím. Celkově zkoumané desky z PA6 dobře pohlcovaly od nižších středních frekvencí (400 Hz). Tato skutečnost je vidět i na *Grafu 7*, který ukazuje pozitivní vliv nanovláknenné rezonanční membrány na zvukovou pohltivost.

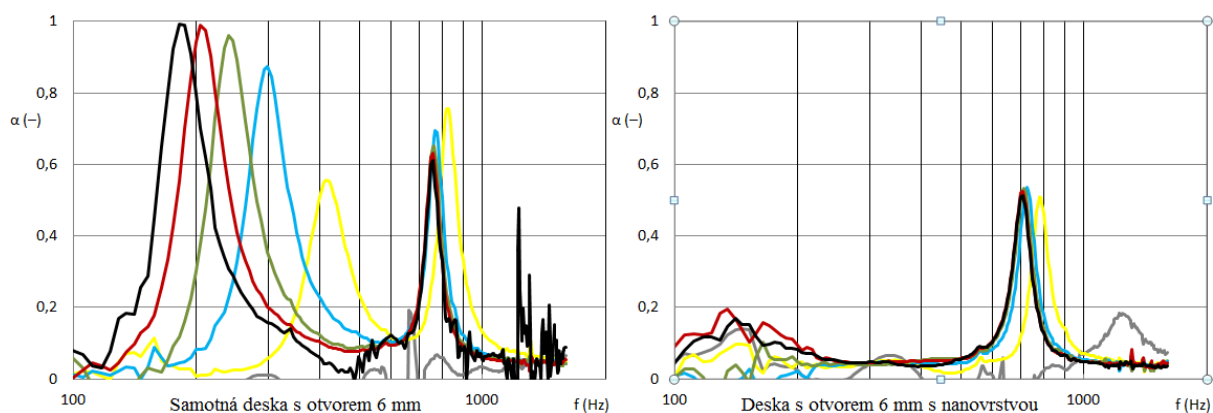


Graf 7: Činitel zvukové pohltivosti pro 13mm panel z PA6 s čtvercovým otvorem (56 mm) - vlevo bez nano a vpravo s nanovláknennou vrstvou (0,2 gsm). Černá křivka odpovídá vzdálenosti čela panelu 50 mm od stěny, červená 40 mm, zelená 30 mm, modrá 20 mm a žlutá 13 mm.

Jak je vidno, posun maxim činitele zvukové pohltivosti se u pohltivého materiálu typu rezonátor řídí vzdáleností od stěny, resp. vzduchovou mezerou. Nicméně nezávisle na ní bylo dosaženo vždy maximální hodnoty zvukové pohltivosti, tj. 1.

Další sérií vzorků byly plastové desky z HPS a PMMA. Ty byly proměřeny nejprve samotné, poté perforované, dále s Eswegee a nakonec s nanovláknennou vrstvou. Samotné desky vykazovaly téměř nulovou zvukovou pohltivost a jde tak o variantu zvukově odrazivou. Nejlepších výsledků bylo dosaženo se samotnými perforovanými deskami. Pomocí změny rozměru centrálního otvoru ve vzorku bylo možné naladit desky obou plastů na určitou frekvenci (50 – 1000 Hz). S přibývajícím otvorem v desce docházelo ke zmenšení objemu dutiny pod otvorem, a tak k mírnému posunu k vyšším frekvencím, zároveň však i k mírnému růstu peaků. Po aplikaci Eswegee došlo k výraznému posunu zvukové pohltivosti směrem k vyšším frekvencím. Poprvé u všech testovaných vzorků se zde projevil negativní vliv nanovláknenné rezonanční membrány. Ta způsobovala u činitele zvukové pohltivosti vymizení primárních maxim a sjednocení maxim primárních a sekundárních, to pro různé vzduchové mezery. Došlo též k poklesu hodnot činitele zvukové pohltivosti. To je způsobeno tím, že dochází k potlačení kmitání vzduchové zátky v otvoru tenké desky tím, jak kmitá nanovláknenná membrána sama na své vlastní frekvenci. Tento vesměs negativní vliv konsolidace, kdy dochází ke kolizi obou rezonátorů, byl však u některých vzorků pozitivním pro vzduchové mezery 10 a 20 mm. Maxima se pro tyto dvě vzdálenosti posunula

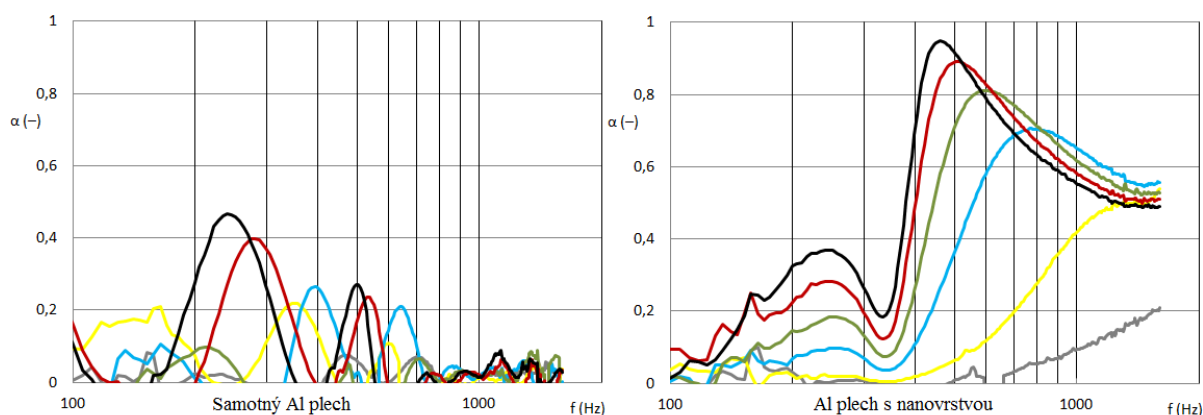
směrem k nižším frekvencím a mírně vzrostla. Celkově však u tohoto typu akustického prvku jednoznačně nelze doporučit laminaci nanovláknennou vrstvou. Negativní účinek nanovláknenné membrány na zvukovou pohltivost tenké perforované desky ukazuje následující graf (*Graf 8*).



Graf 8: Činitel zvukové pohltivosti pro 3mm desku z PMMA s kruhovým otvorem (6 mm) - vlevo bez nano a vpravo s nanovláknennou vrstvou (0,2 gsm). Černá křivka odpovídá vzdálenosti čela desky 50 mm od stěny, červená 40 mm, zelená 30 mm, modrá 20 mm, žlutá 10 mm a šedá 5mm.

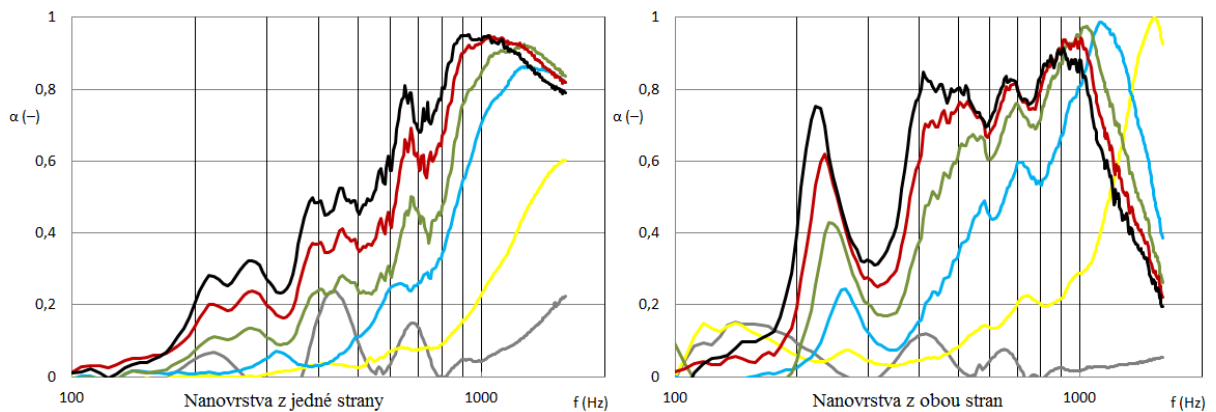
Na hliníkovém plechu tloušťky 1 mm byly založeny rezonátory typu tenkých kmitajících mříží. Byly vyzkoušeny perforované plechy s čtvercovými a kruhovými otvory mříže různých rozměrů. Nejprve byly proměřeny samotné plechy, které vykazovaly velmi malou zvukovou pohltivost. Poté byly plechy různě laminovány. Laminace Eswegee textilií přinesla zvukovou pohltivost až od vyšších frekvencí (přes 1 kHz). Poměrně dobrého výsledku bylo dosaženo laminací vrstvou meltblown/spunbond textilie o plošné hmotnosti 3 a 12 gsm. Samotná meltblown vrstva měla malý účinek, ale ve spojení s podkladovou vrstvou spunbond bylo dosaženo dobré zvukové pohltivosti od pásma středních kmitočtů, charakterizované pozvolna narůstajícím činitelem zvukové pohltivosti až do pásma vyšších frekvencí (nad 1 kHz). Po aplikaci nanovrstvy byl patrný nárůst zvukové pohltivosti odpovídající vlastním kmitům nanovláknenné rezonanční membrány (400-500 Hz). Tak bylo u všech vzorků patrné několik maxim. U vzorků s nejmenšími otvory začínala první maxima, rozložitější a nepřilíživě výrazná, již od nejnižších kmitočtů, ta byla následovaná výraznými sekundárními maximy, která pomalu klesala do oblasti vyšších frekvencí. Tato sekundární význačná maxima nakonec vymizela u vzorků s největšími rozměry otvorů, které tak vykazovaly pohltivost od vyšších frekvencí. Tento trend vícera maxim způsobený módy zvukového vlnění byl velmi výrazný u vzorků, které byly pro porovnání laminovány obyčejnou eurodeskou (41 gsm) a potravinovou folií (6,9 gsm). Na rozdíl od nanovrstvy zde byla díky vyšší plošné hmotnosti a nižší prodyšnosti vrstev první maxima mnohem výraznější a ostřejší. Tak byla první ostrá maxima zřetelná mezi 50 a 250 Hz, u potravinové folie blíže nejnižším frekvencím. Sekundární maxima byla patrná obdobně jako u nanovrstvy od 400 Hz, nicméně právě ostřejší. Nanovrstva byla nadto aplikována z obou stran perforovaného plechu, přičemž se toto řešení ukázalo jako nedostatečně přínosné oproti jednostrannému. Výrazný přínos nanovláknenné

resonanční membrány na zvukovou pohltivost perforovaného hliníkového plechu je zejména v střední oblasti kmitočtů, kde mohou být výhodou právě roztaženější maxima zvukové pohltivosti (viz Graf 9).



Graf 9: Činitel zvukové pohltivosti pro 1mm plech z Al s kruhovými otvory (2,3/3 mm) - vlevo bez nano a vpravo s nanovláknennou vrstvou (0,2 gsm). Černá křivka odpovídá vzduchové mezeře 50 mm od stěny, červená 40 mm, zelená 30 mm, modrá 20 mm, žlutá 10 mm a šedá 5mm.

Sklovláknité mřížkové tkaniny byly svou geometrií podobné tuhému hliníkovému plechu, měly však nižší ohybovou tuhost. I u těchto vzorků byla vyzkoušena různá geometrie vzoru a to v různých provedeních. U těchto mřížek byla vynechána aplikace Eswegee textilie, zkoušela se však opět kombinace s textilií meltblown a spunbond (3 a 12 gsm), kdy se opět více osvědčila varianta meltblown vrstvy nanesené na spunbond podkladu. Znovu se ukázal příznivý vliv na zvukovou pohltivost od středních frekvencí. U sklovláknitých mřížek činitel zvukové pohltivosti pozvolna narůstal od vyšších středních frekvencí až do pásma vysokých frekvencí (nad 1 kHz). Pro porovnání byly vzorky vyzkoušeny i s nanosenou potravinovou folií a eurodeskou. Tentokrát byla primární maxima pozorována až v oblasti středních a vyšších středních kmitočtů. Maxima tentokrát nebyla tak ostrá a obsáhla větší část frekvenčního spektra (rozsah i 300 Hz), přičemž maxima vyšších řádů navazovala souvisleji. Folie a eurodeska byly mimoto nanoseny i z obou stran testovaných vzorků. U oboustranných vzorků byl vidět lehký posun činitele zvukové pohltivosti k nižším frekvencím, item jeho nárůst. Aplikace nanovláknenné resonanční membrány znamenala zvukovou pohltivost zhruba od 400 Hz, přičemž maxima činitele zvukové pohltivosti mírně narůstala směrem k vyšším frekvencím. Nejlépe se jevily mřížky s větší tuhostí a většími otvory, jelikož právě ty dávaly více prostoru ke kmitání membrány na vlastní frekvenci. Aplikace nanovláknenné membrány z obou stran mřížky byla přínosem; u vzorků s menší ohybovou tuhostí a menšími otvory význačnějším (viz Graf 10).



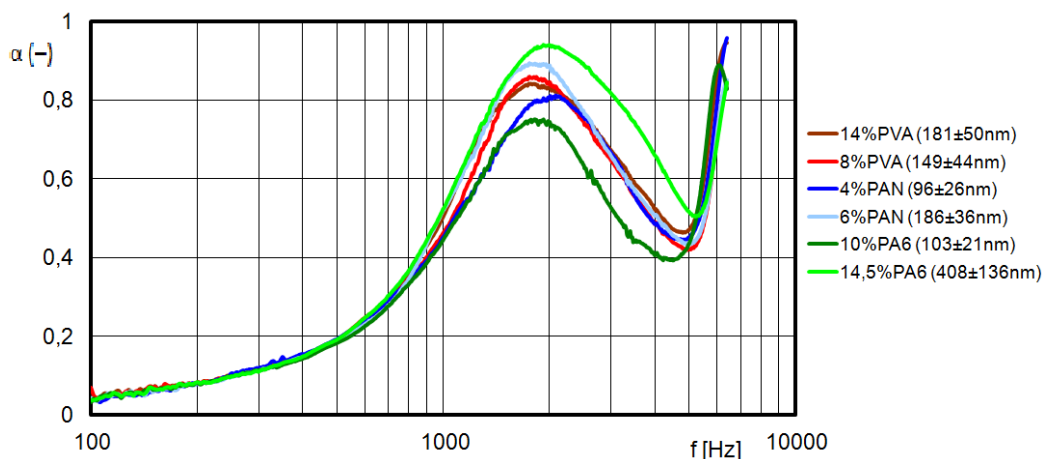
Graf 10: Činitel zvukové pohltivosti pro 0,2mm sklovláknitou mřížku R56 se čtvercovým vzorem (2,2 mm) - vlevo s nanovláknennou vrstvou (0,2 gsm) z jedné strany, vpravo s tou samou nanovláknennou vrstvou z obou stran. Černá křivka odpovídá vzduchové mezeře 50 mm od stěny, červená 40 mm, zelená 30 mm, modrá 20 mm, žlutá 10 mm a šedá 5mm.

3. Optimalizace strukturních parametrů

S ohledem na kapitoly 2 a 3 byly vysledovány, navrženy a potvrzeny konkrétní strukturní parametry, které mají vliv na co nejúčinnější navržená řešení. Zde budou tyto parametry ukázány na optimalizovaných akustických systémech. Konkrétně došlo k optimalizování strukturních parametrů nanovláknenné rezonanční membrány a na ní doléhajícího porózního tlumícího materiálu – membránového rezonátoru, vhodné volbě geometrie otvorů dutinových rezonátorů a nakonec byla stanovena nejlepší geometrie perforace pro tenké kmitající mříže. Tato optimalizace potom vedla k požadované zvukové pohltivosti jednotlivých prvků, potažmo celých akustických systémů.

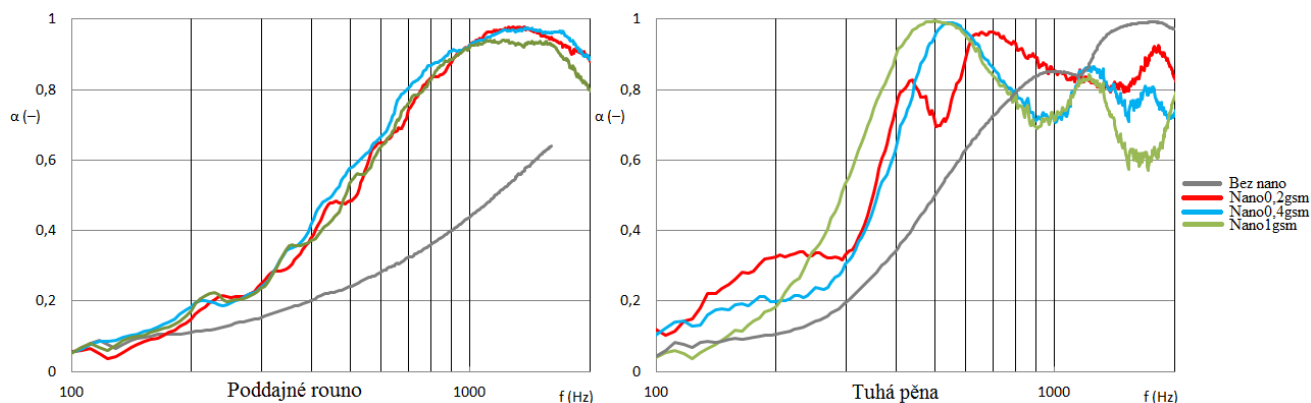
3.1. Membránové rezonátory

U membránových rezonátorů s nanovláknennou rezonanční membránou byly optimalizovány parametry dvou akustických prvků. Optimální strukturní parametry nanovláknenné rezonanční membrány jsou potom s výhodou uplatnitelné u jiných akustických systémech. Optimalizace membrány se týkala hlavně plošné hmotnosti a průměru vláken. Už při samotné výrobě membrány založené na PA6 se vycházelo z dřívějších měření. Měření vlivu průměru vláken zde uvažovaných polymerů bylo provedeno již ve společnosti Elmarco, která spolupracuje s TUL. Z měření lze nalézt optimální průměr vláken z PA6 pro zvukovou pohltivost (Graf 11). Nejlepších výsledků je možné dosáhnout s vlákny o průměrech jdoucím k 400 nm.



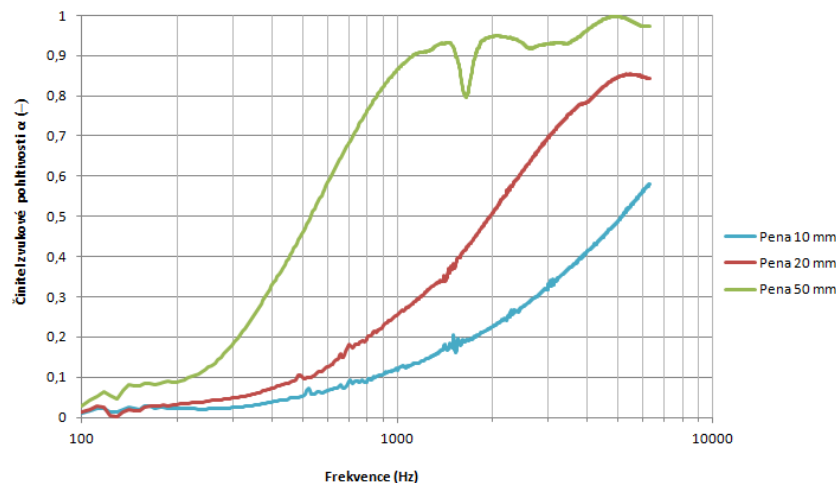
Graf 11: Činitel zvukové pohltivosti pro tři různé polymery o dvou koncentracích zvláknovacího roztoku. Za nanovláknennou vrstvou (1 gsm) byla umístěna 30 mm výplň Tarotex (600 gsm).

Stejně tak bylo na základě předchozích měření patrné, že s narůstající plošnou hmotností vrstvy dochází k růstu a posunu činitele zvukové pohltivosti směrem k nižším frekvencím. Proto byla vyráběna vrstva o plošných hmotnostech 0,2; 0,4 a 1 gsm. Zde je nutné uvést, že jak hodnoty plošné hmotnosti, tak průměru vláken, je nutné vlivem výrobního procesu požadovat za hodnoty průměrné. Aby bylo dosaženo co nejvyšší homogenity při zvláknování, byla jako optimální podkladová vrstva zvolena netkaná textilie s plošnou hmotností 35 gsm (Eswegee). Substrát Eswegee navíc umožňuje dobrou přilnavost nanovláken, a díky své nepatrné vlastní hmotnosti citelně nezvyšuje výslednou hmotnost akustického prvku. Vliv plošné hmotnosti nanovláknenné rezonanční membrány je znát především u porózních materiálů vyšší tuhosti; měkčí a poddajnější výplně umožňují využít už nejnižší plošné hmotnosti 0,2 gsm bez ztráty pohltivých vlastností (viz Graf 12). Zároveň bylo potvrzeno, že s vyšší plošnou hmotností je pokles zvukové pohltivosti v oblasti vyšších frekvencí znatelnější. Přesto se celkově jako optimální jeví plošné hmotnosti 0,2 až 0,4 gsm. U vyšších plošných hmotností (nad 1 gsm) by bylo nutné lépe tlumit vibrace nanovláknenné membrány (jiná podkladová vrstva nebo poddajnější výplň), navíc s ohledem na zvláknovací výkon, resp. cenu produktu, je jejich přínos k zvukové pohltivosti nevyváženým.



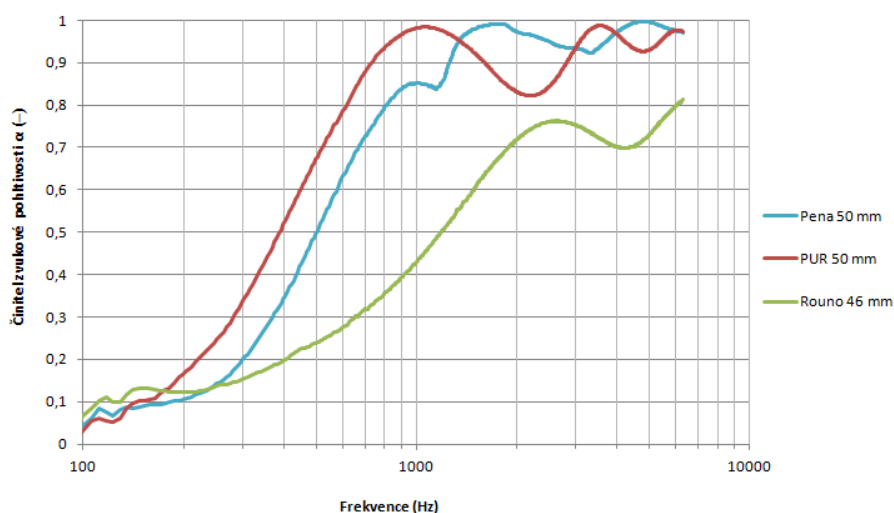
Graf 12: Činitel zvukové pohltivosti v závislosti na plošné hmotnosti (0,2 – 1 gsm) nanovláknenné membrány nanesené na 46mm rouno F800 FR H0 vlevo a 50mm pěnu HR 290/0.

U porózního materiálu uvažujeme především jeho tloušťku a jeho strukturu – vlákenný nebo pěnový, z toho potom poróznitu a objemovou hmotnost. Nejlepším řešením byl porózní materiál typu pěna (větší poróznita), který má otevřenou buněčnou strukturu a co největší tloušťku. Vliv tloušťky výplně na pohltivost zobrazuje *Graf 13*.



Graf 13: Číselník zvukové pohltivosti v závislosti na plošné hmotnosti (0,2 – 1 gsm) nanovlákněné membrány nanesené na 46mm rouno F800 FR H0 vlevo a 50mm pěnu HR 290/0.

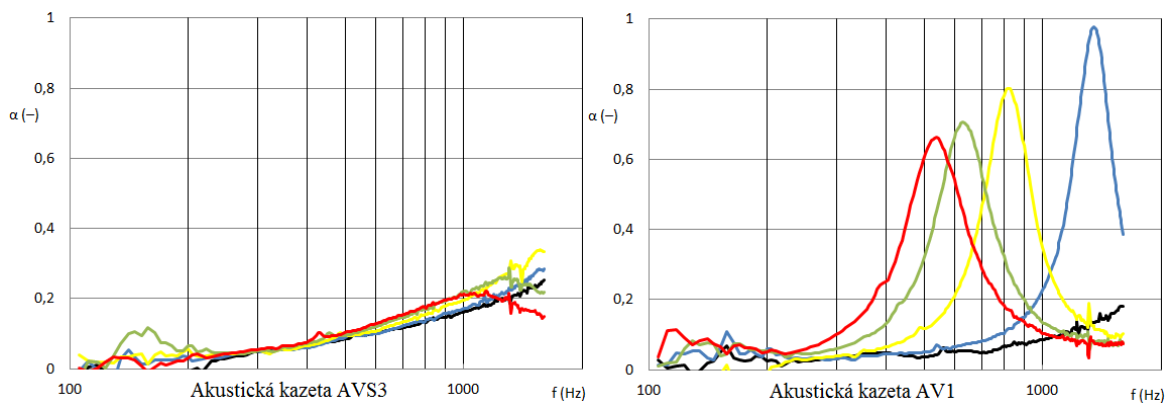
Porovnání jednotlivých porózních materiálů dané tloušťky ukazuje *Graf 14*, z něhož je možné vyzorovat, jak pěnový materiál s větší poróznitou pohlcuje znatelně více oproti vlákennému materiálu (*Rouno Cellofoam F800 FR H0 bylo dodáno „sedlé“ z původní tloušťky 50 na tloušťku 46 mm*). Výběr optimálního materiálu však musí vždy zohledňovat konkrétní aplikaci a přitom jeho cenu.



Graf 14: Číselník zvukové pohltivosti pro porózní vlákenný materiál z PES, porózní pěnový materiál založený na melaminové pryskyřici a porózní materiál z recyklovaného PUR.

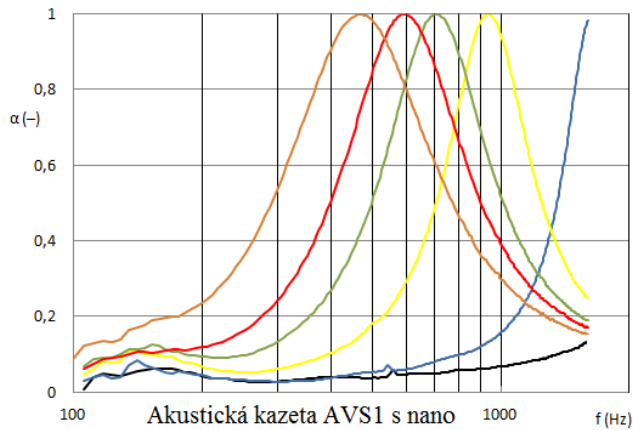
3.2. Rezonátory Helmholtzova typu

U rezonátorů Helmholtzova typu je nejdůležitějším parametrem geometrie jejich perforace a jejich tloušťka (viz *vztah 24*). Obecně jsou tedy tyto akustické prvky velmi dobře laditelné na požadované frekvence právě svými strukturálními parametry. Jsou pro ně charakteristická ostřejší maxima vyšších řádů, přičemž lze tuto cílenost na určité frekvence rozšířit začleněním akustického porózního prvku za rezonátor. To však zároveň znamená pokles hodnot maxima činitele zvukové pohltivosti. Tak mají u dutinových rezonátorů nejpozitivnější vliv na pohlcování nižších frekvencí co nejmenší otvory. Čím větší jednotlivý otvor, tím větší musí být celková rozteč mezi otvory, tedy otvory musí být více vzdáleny od sebe, nebo musí narůst tloušťka rezonátoru. Pro co nejplynulejší charakteristiku činitele zvukové pohltivosti se optimálními jeví nejjednodušší kruhové a čtvercové otvory, trojúhelníkové otvory již začínají vykazovat vícero marginálních maxim a složitější strukturální otvory typu hvězd vykazují pilovitý průběh činitele zvukové pohltivosti. Konkrétně u dutinových rezonátorů v provedení 16mm laminovaných MFD desek s 8mm kruhovými otvory můžeme jako nejvýhodnější variantu zvolit Akustickou kazetu AVS1, která měla otvory nejvíce vzdáleny od sebe a štěrby krycí otvory byly nejširší a s největší roztečí. Tudíž jednotlivé dutiny rezonátoru mohli pracovat na nižších frekvencích. Srovnání mezi deskou AVS3 (nejhustší perforace) a AVS1 ukazuje *Graf 15*.



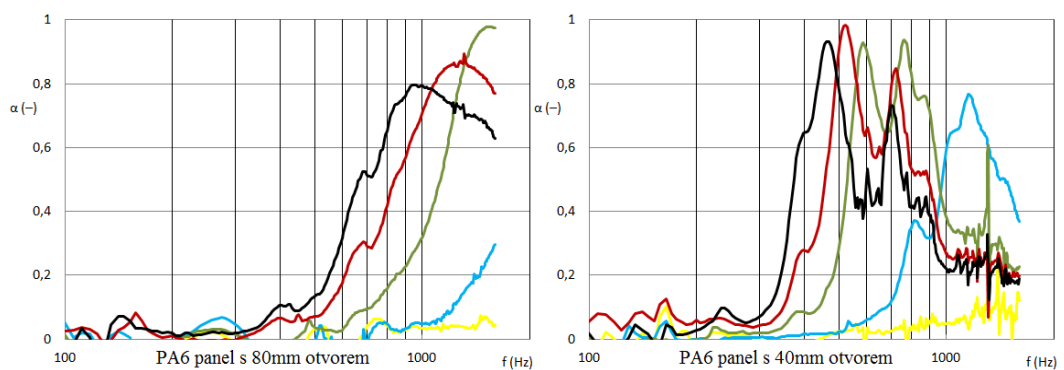
Graf 15: Činitel zvukové pohltivosti pro Akustické kazety AVS3 s menší roztečí otvorů - vlevo a AVS1 s větší roztečí otvorů - vpravo. Červená křivka odpovídá vzdálenosti čela desky od stěny 50 mm, zelená 40 mm, žlutá 30 mm, modrá 20 mm a černá 16 mm.

Aby tyto desky pohlcovaly v pásmu nízkých frekvencí, musela by být zvolena jemnější perforace (4mm otvory), nebo větší vzduchové mezery za deskou. Větší vzduchová mezera za samotnou deskou však znamená pokles maximální hodnoty činitele zvukové pohltivosti. To je však možné eliminovat právě nanovláknennou rezonanční membránou (*Graf 16*), která hodnoty činitele zvukové pohltivosti maximalizuje nezávisle na vzduchové mezeře za deskou (viz *předchozí kapitolu*).



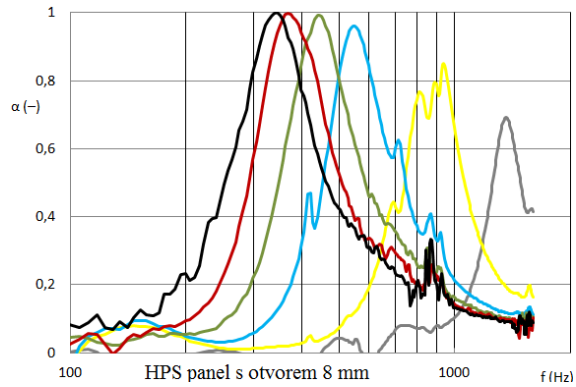
Graf 16: Činitel zvukové pohltivosti pro Akustickou kazetu AVS1 s nanovrstvou (0,2 gsm) Hnědá křivka odpovídá vzdálenosti čela desky od stěny 70 mm, červená 50 mm, zelená 40 mm, žlutá 30 mm, modrá 20 mm a černá 16 mm.

To samé platí pro dutinové rezonátory z plastů. U plastů z 13mm desek PA6 však k pohltivosti dochází až po aplikaci nanovlákněné membrány, jelikož pro testované vzduchové mezery byly zvolené rozměry otvorů příliš velké. To ovšem podnítilo snahu tuto situaci řešit právě pomocí rezonanční nanovlákněné membrány. Vzhledem k velikosti otvorů nebyly velké rozdíly v pohltivosti mezi nanovlákněnou membránou aplikovanou na lícové či rubové straně vzorku. U jemnější perforace s menšími otvory by však optimálnější variantou bylo umístění nanovrstvy na rubovou stranu. Rozdíl ve zvukové pohltivosti pro vzorky s kruhovým otvorem průměru 80 mm a 40 mm překryté nanovlákněnou membránou zobrazuje *Graf 17*. Optimální by tak bylo pro danou tloušťku panelu výrazně zmenšit rozměry otvorů (10 mm) nebo zvýšit jejich rozestupy a tím se dostat do pásma nízkých frekvencí.



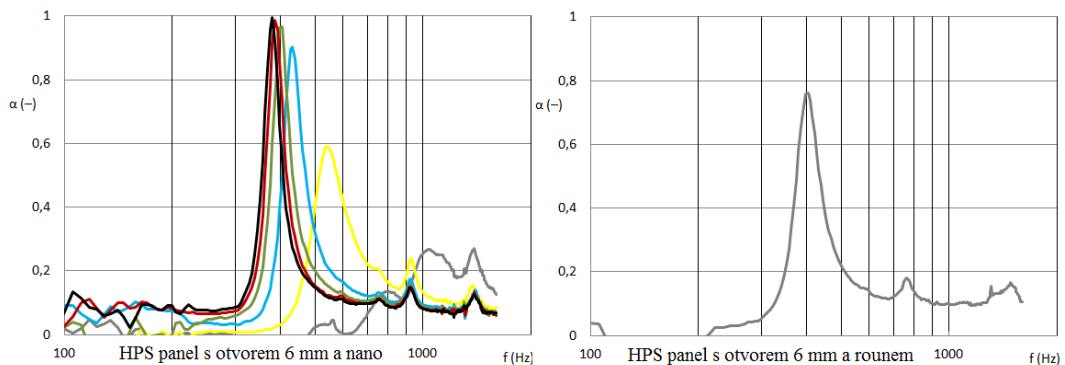
Graf 17: Činitel zvukové pohltivosti pro desky z PA6 s kruhovým otvorem 80 mm - vlevo a 40 mm - vpravo. Černá křivka odpovídá vzdálenosti čela panelu 50 mm od stěny, červená 40 mm, zelená 30 mm, modrá 20 mm a žlutá 13 mm.

Tenké perforované rezonátory z plastů HPS a PMMA díky své menší tloušťce a menším zvoleným otvorům umožňují bez použití nanovlákněné vrstvy, pouhou změnou struktury, snadno pohltit jakoukoli frekvenci. Maxima činitele zvukové pohltivosti jsou však opět ostrá a zabírají pouze úzkou část frekvenčního spektra (*Graf 18*).



Graf 18: Činitel zvukové pohltivosti pro 2mm panel z HPS s kruhovým otvorem 8 mm. Černá křivka odpovídá vzdálenosti čela panelu 50 mm od stěny, červená 40 mm, zelená 30 mm, modrá 20 mm, žlutá 10 mm a šedá 5 mm.

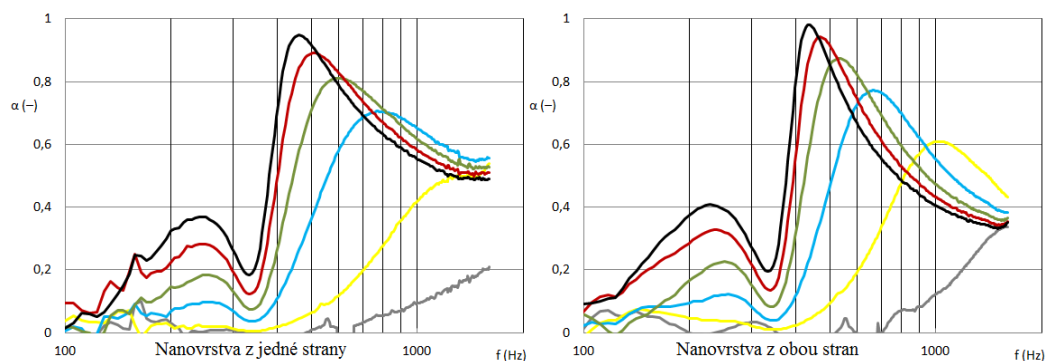
Tomu nepomohla ani aplikace nanovláčkové rezonanční membrány (úzká maxima okolo hodnot vlastní frekvence), ani porózní výplně (zúžení a pokles peaků) – Graf 19. Možným širokospektrálním řešením se jeví perforace s různými průměry otvorů na jednom panelu nebo použití vícera panelů s různými perforacemi.



Graf 19: Činitel zvukové pohltivosti pro 2mm panel z HPS s kruhovým otvorem 6 mm. Vlevo s aplikovanou nanovláčkovou membránou (0,2 gsm) a vpravo s těsně přiloženým 20mm rounem Cello F800. Černá křivka odpovídá vzdálenosti čela panelu 50 mm od stěny, červená 40 mm, zelená 30 mm, modrá 20 mm, žlutá 10 mm a šedá 5 mm (resp. 20mm pro panel s rounem).

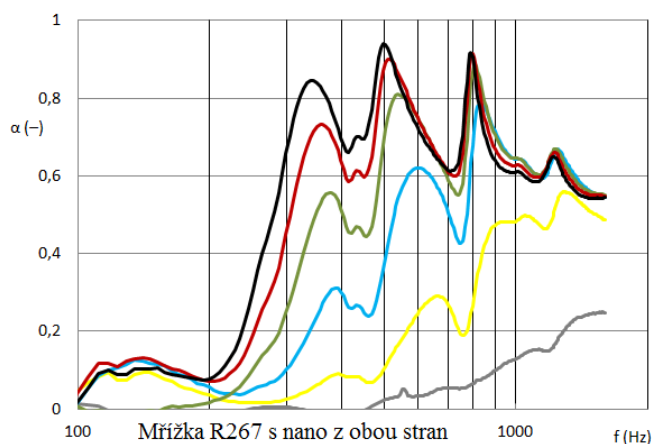
Poslední skupinou jsou tenké perforované panely ve formě mřížek, určené převážně jako lehčí závěsná akustická řešení. Mříž zde vlastně slouží jako kostra pro nanovláčkovou rezonanční membránu, sama o sobě pohlcuje zvuk velmi málo. Geometrie mříží určuje vlastní kmity nalaminované rezonanční membrány. Optimální perforací u hliníkových panelů byly otvory 8-10 mm, kdy tato perforace poskytovala zvukovou pohltivost začínající na středních a končící na vysokých frekvencích (té frekvenčně odpovídá i nejhustěji perforovaný plech s kruhovými otvory 2,3 mm). Menší rozměry otvoru než 5 mm už obecně způsobovaly ostrá maxima a strmý pokles hodnoty činitele zvukové pohltivosti v oblastech vyšších frekvencí. Naopak velké rozměry otvoru od 12 mm výše ladily pohltivost na frekvence vysoké. Varianty s membránou z obou stran se nejevily dostatečně přínosnými. Optimální varianta A1 panelu s nejhustší kruhovou perforací

s nanovláknennou membránou z jedné strany ve srovnání s oboustrannou variantou je vidět na *Grafu 20*, který ukazuje přínos druhé membrány především na nižších vzduchových mezerách.



Graf 20: Činitel zvukové pohltivosti pro 1mm Al panel perforovaný kruhovými otvory 2,3 mm – vlevo s nanovrstvou z jedné strany, vpravo z obou. Černá křivka odpovídá vzdálenosti čela panelu 50 mm od stěny, červená 40 mm, zelená 30 mm, modrá 20 mm, žlutá 10 mm a šedá 5 mm.

Sklovláknité mřížky se lišily jak v geometrii perforace, tak ve své tloušťce. Neoptimálnější se ukázaly varianty mřížek s větší tuhostí a rozměrem otvorů odpovídajícím jejich tloušťce – R170 a R267 s obdélníkovými otvory, které korelovaly se zubatějším průběhem křivky činitele zvukové pohltivosti. Ty vykazovaly pohltivost již od nízkých frekvencí, přičemž hodnoty činitele zvukové pohltivosti rostly ve směru k vyšším frekvencím. Velmi dobrou pohltivost od nižších středních frekvencí vykazovaly mřížky R71, R72, R79, R131 a R153. Tedy mřížky tloušťky 0,3 - 0,6 mm s otvory 3 - 6 mm. Jak bylo řečeno v předchozí kapitole, aplikace nanovláknenné membrány z obou stran měla větší význam na zvukovou pohltivost především pro tenčí mřížky s jemnější perforací. Hypoteticky by nejlepším řešením bylo předřazení první membrány vyšší plošné hmotnosti do čela panelu a jako druhé membrány použít tu s plošnou hmotností nižší. Tuto hypotézu je však nutné potvrdit experimentálně, což zde nebylo provedeno, tudíž se zde otevírá možnost dalšího výzkumu. Činitel zvukové pohltivosti pro tužší mřížku R267 s nanovláknennou membránou nalaminovanou z obou stran zobrazuje *Graf 21*.



Graf 21: Činitel zvukové pohltivosti pro 0,95mm sklovláknitou mřížku R267 s otvory 8,5x6,5 mm v provedení s nanovrstvou (0,2 gsm) z obou stran. Černá křivka odpovídá vzdálenosti mřížky 50 mm od stěny, červená 40 mm, zelená 30 mm, modrá 20 mm, žlutá 10 mm a šedá 5 mm.

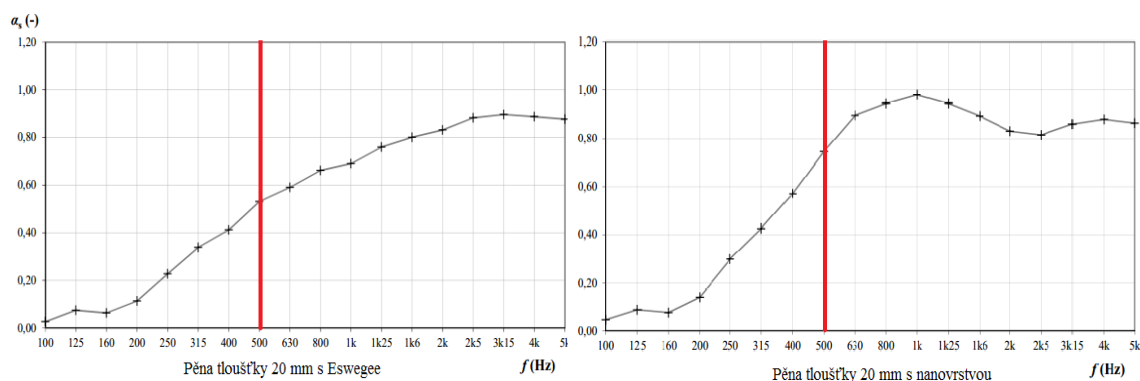
4. Ověření zkoumaných vlastností

Abychom mohli mluvit o navržených akustických systémech v termínech zvukové pohltivosti běžně uvažované v reálné praxi, bylo nutno naše řešení zasadit do podmínek co nejvíce se blížícím jejich potenciálnímu reálnému využití. Ježto samotné proměřování vzorků v impedanční trubici vypovídá o akustických vlastnostech materiálu nedostatečně – kolmý dopad zvukového vlnění, bylo zvoleno proměření vybraných vzorků v dozvukové místnosti. Toto měření provedla nezávislá společnost *Aveton s.r.o.* se sídlem v Praze 6. Po proměření v dozvukové místnosti společnosti *SONING Praha a.s.* byly výsledky testovaných materiálů potvrzeny a uvažované akustické systémy připraveny na nasazení do reálných podmínek. Mimoto byly též u dvou zvolených variant akustických systémů provedeny testy na hořlavost. Zkoušky hořlavosti provedla nezávislá akreditovaná *Požárně technická laboratoř Centra Stavebního Inženýrství a.s.* sídlící v Praze 10 - Hostivaři.

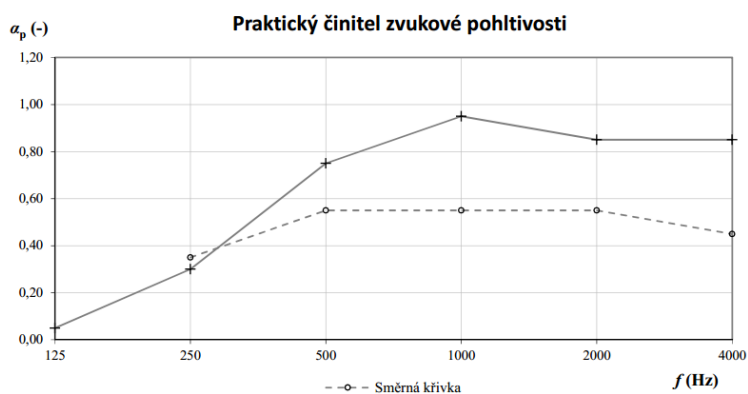
4.1. Akustické vlastnosti

Měření činitele zvukové pohltivosti pro všesměrový dopad zvukového vlnění v dozvukové místnosti se řídilo normou *ČSN EN ISO 354*. Obecně se vážený činitel zvukové pohltivosti α_w stanovuje dle *EN ISO 11654*. Činitel zvukové pohltivosti α_s naměřené dle *EN ISO 354* pro každé třetinooktávové frekvenční pásmo se převádějí do praktických činitelů zvukové pohltivosti α_p v oktávových pásmech. Nedostatkem této metody je tak právě ono průměrování do oktáv, tzn. že případné rezonanční peaky jsou smazány a příznivé rezonance, resp. vysoké hodnoty pohltivosti, nejsou již potom viditelné. Normou daná referenční křivka se poté posouvá po výsledné křivce α_p tak, aby se co nejvíce vzájemně překrývaly. Přitom jsou odchylky směrem dolů normou velmi omezeny. Hodnota referenční křivky pro frekvenci 500 Hz pak určuje vážený činitel zvukové pohltivosti α_w daného produktu. Pokud je rozdíl mezi referenční křivkou a na ní ležící hodnocenou křivkou zvukové pohltivosti příliš velký, mohou být k upřesnění použity tři indikátory (L, M, H) vyjadřující skutečnost, že se křivka α_p od té referenční výrazně odchyluje v nízkém (L), středním (M) nebo vysokém (H) frekvenčním pásmu a hodnocený produkt je tak významně pohltivější, než udává obdržená hodnota α_w . Pro zvolenou dozvukovou místnost objemu 151 m³ bylo nutno připravit vzorek o celkové ploše 10,8 m². K testování byly určeny vzorky s Eswegee a s nanovláknennou rezonanční membránou. Celkem bylo tedy vyrobeno a odesláno: Černé rouno Cello F800 FR HO (2x36 panelů 500x600x20 mm), Modrá pěna Cello HR 290/0 (2x36 panelů 500x600x20 mm), Děrovaný Al plech Qg 8-10 (36 panelů 500x600x1 mm), Děrovaný Al plech Rv 12-15 (36 panelů 500x600x1 mm) a Děrovaný Al plech Qg 25-30 (2x36 panelů 500x600x1 mm).

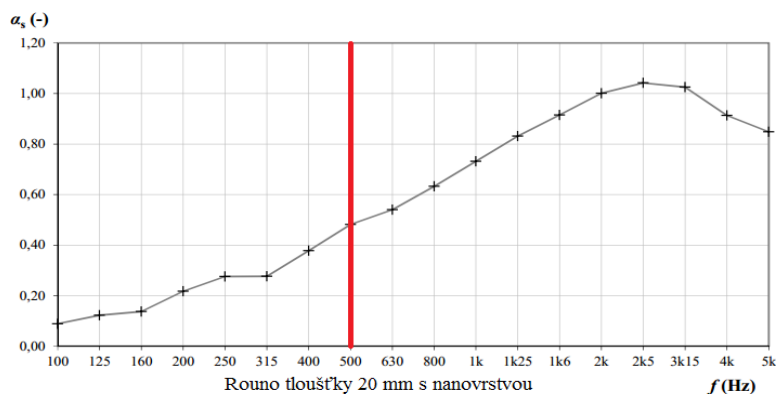
Konkrétně bylo pro modrou pěnu s nanovrstvou stanoveno $\alpha_w = 0,55$ (MH) a třída zvukové pohltivosti D. Rozdíl mezi variantou pouze s Eswegee a variantou s nanovláknennou membránou ukazuje *Obr.11*. Průměrování do oktáv pro praktický činitel zvukové pohltivosti u tohoto panelu s nanovláknennou membránou ukazuje *Obr.12*. Pro černé rouno s nanovrstvou bylo stanoveno $\alpha_w = 0,45$ (MH) a třída zvukové pohltivosti D. Činitel zvukové pohltivosti v třetinooktávních pásmech pro černé rouno s nanovrstvou ukazuje *Obr.13*. U obou variant se potvrdily výsledky naměřené v trubici, tato řešení jsou v tloušťce 20 mm pohltivá již od nižších středních frekvencí a jejich pohltivost pozvolna narůstá směrem k vyšším frekvencím.



Obr.11: Činitel zvukové pohltivosti pro 20mm desku Cello HR 290/0 s Eswegee vlevo a Eswegee s nanovláknennou vrstvou (0,2 gsm) vpravo.

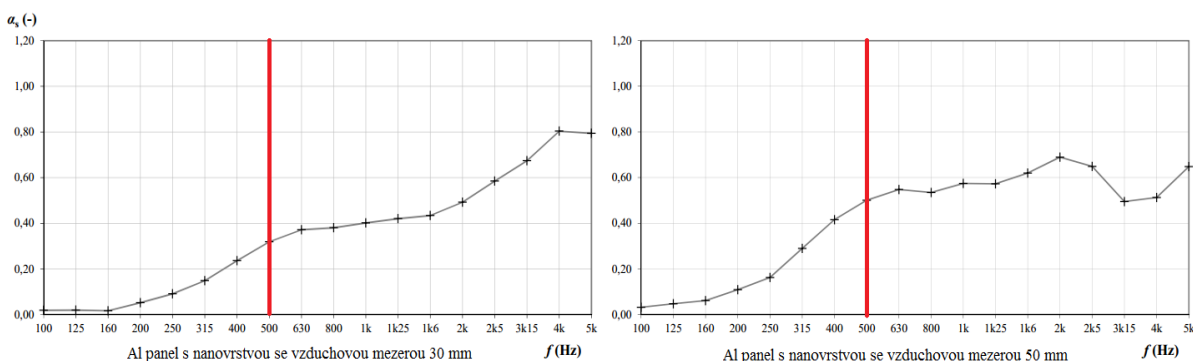


Obr.12: Praktický činitel zvukové pohltivosti pro 20mm desku Cello HR 290/0 s Eswegee+nanovláknenná vrstva (0,2 gsm).

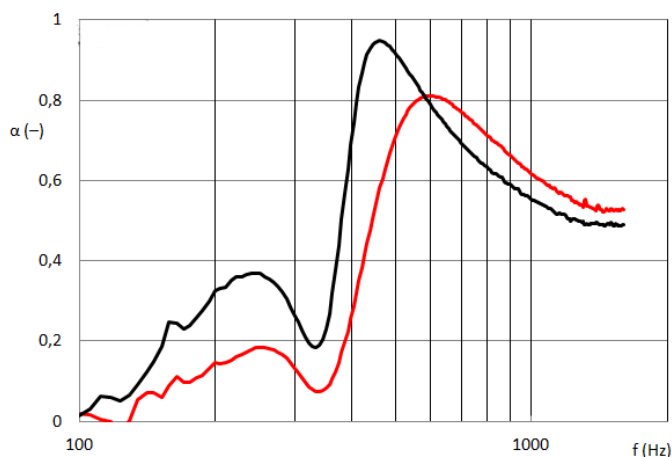


Obr.13: Činitel zvukové pohltivosti pro 20mm desku Cello F800 FR HO s nanovláknennou vrstvou (0,2 gsm).

Perforované hliníkové panely byly proměřeny ve dvou vzdálenostech od podlahy, kde byly umístěny na 30, 40 a 50mm dřevěné hranolky. Tak bylo pro Děrovaný Al plech Qg 25-30 s nanovrstvou a vzduchovou mezerou 50 mm stanoveno $\alpha_w = 0,15$ (MH) a třída zvukové pohltivosti E. Což odpovídá navržené geometrii otvorů. Pro Děrovaný Al plech Qg 8-10 s nanovrstvou a vzduchovou mezerou 50 mm bylo stanoveno $\alpha_w = 0,45$ a třída zvukové pohltivosti D. A pro Děrovaný Al plech Rv 12-15 s nanovrstvou a vzduchovou mezerou 50 mm bylo stanoveno $\alpha_w = 0,40$ (H) a třída zvukové pohltivosti opět D. Jemnější perforace tak posunuje pohltivost směrem k nižším frekvencím. Obr.14 ukazuje vliv vzduchové mezery za akustickým panelem z perforovaného hliníku s čtvercovými otvory (Qg 8/10 mm) v provedení s nanovláknennou membránou, který byl vzdálený 30 mm a 50 mm od podlahy. Jak je vidět, zde obdržené výsledky se výrazně odlišují od výsledků z trubice (Obr.15). To je zřejmě způsobeno především jinými měřicími podmínkami (všesměrový dopad), metodikou, ale i uložením hliníkových panelů na pevné dřevěné hranolky. Tyto pevné hranolky, ačkoli umístěné pouze na okrajích, totiž ovlivňují hlavní funkci resonátoru, tj. kmitání. Zde se tak můžeme domnívat, že uložení hliníkových panelů na poddajnější měkkčí a pružnější materiál by pravděpodobně poskytlo rozdílné výsledky. Opět se však ukázal přínos nanovláknenné rezonanční membrány. [18, 19, 20, 41]



Obr.14: Činitel zvukové pohltivosti pro 1mm Al panel Qg 8-10 s nanovláknennou vrstvou (0,2 gsm) vzdálený od stěny 30 mm (vlevo) a 50 mm (vpravo).



Obr.15: Činitel zvukové pohltivosti pro 1mm Al panel Qg 8-10 s nanovláknennou vrstvou (0,2 gsm) vzdálený od stěny 30 mm (červeně) a 50 mm (černě) - výsledky z impedanční trubice.

4.2. Hořlavost

Na testy hořlavosti pro nezávislou laboratoř *CSI* byly vybrány a vyrobeny dva typy vzorků, každý v provedení s *Eswegee* textilií a s nanovláknennou membránou. Do Požárně technické laboratoře tak bylo odesláno: černé rouno Cello F800 FR HO (2x5 panelů 500x600x20 mm) a modrá pěna Cello HR 290/0 (2x5 panelů 500x600x20 mm). V laboratoři byly provedeny dva druhy zkoušek. Stanovení hořlavosti materiálů pro konstrukci kolejových vozidel bylo první zkouškou. Tato zkouška, stanovená pro materiály pro konstrukci kolejových vozidel, byla provedena na základě zkušebních postupů řídicích se německými normami: *DIN 54837: 2007-12* a *DIN 5510 – 2: 2009-05*. Druhým druhem zkoušky bylo Stanovení hořlavosti materiálů pro výrobu a interiéry automobilů, traktorů, lesnických a zemědělských strojů. Tato zkouška se řídila českou verzí normy *ČSN ISO 3795 (té odpovídá DIN 75200)*. První zkouška pracovala s deskami seřízlými na rozměr (500x190x20 mm). K expozici malému plamenu došlo ze strany s povrchovou úpravou. Druhá zkouška pracovala s deskami seříznutými na tloušťku 13 mm.

Pro modrou pěnu Cello HR 290/0 dopadla první zkouška pro obě verze tak, že při hoření vznikal šedočerný kouř a plamen se šířil po povrchové úpravě, která nakonec zcela shořela. Nedošlo sice k samovolnému hoření, ale též nedošlo k samozhášení. Závěr zkoušky pro obě povrchové varianty vyzněl stejně. Na základě výsledků zkoušek je vzorek výrobku Cello HR 290/0 s povrchovou úpravou v obou případech úpravy klasifikován dle *DIN 5510-2:2009-05*, článku 4.2.3, 4.3 a 4.4, do tříd: hořlavost – nelze klasifikovat, kouřivost – SR2 a odkapávání ST2. Při druhé zkoušce došlo k zapálení vzorku a ten poté vyhořel v celé měřené délce. K tomu došlo u obou variant. Výsledky z této zkoušky, které vypovídají ve prospěch samotné pěny bez povrchové úpravy, jsou uvedeny v *Tab. 2*.

Tab. 2: Výsledky zkoušky Stanovení hořlavosti materiálů pro výrobu a interiéry automobilů, traktorů, lesnických a zemědělských strojů pro 20mm Cello HR 290/0.

Vzorek číslo	1	2	3	4	5	průměr	U
Doba hoření [s]	94	97	108	89	104	98,4	9,1
Délka vyhořelé části [mm]	254	254	254	254	254	254,0	2,0
Rychlost hoření [mm/min]	162,1	157,1	141,1	171,2	146,5	155,6	14,3

Modrá pěna s povrchovou úpravou *Eswegee*

Vzorek číslo	1	2	3	4	5	průměr	U
Doba hoření [s]	89	91	85	99	89	90,6	6,3
Délka vyhořelé části [mm]	254	254	254	254	254	254,0	2,0
Rychlost hoření [mm/min]	171,2	167,5	179,3	153,9	171,2	168,6	11,0

Modrá pěna s povrchovou úpravou *Eswegee+Nano*

U černého rouna Cello F800 FR HO dopadla první zkouška pro obě verze tak, že obě varianty zcela shořely. U rouna již došlo i k samovolnému hoření a opět nedošlo k samozhášení.

Závěr zkoušky pro obě povrchové varianty vyzněl opět stejně. Na základě výsledků zkoušek je vzorek výrobku Cello F800 FR HO s povrchovou úpravou v obou případech úpravy klasifikován dle *DIN 5510-2:2009-05*, článku 4.2.3, 4.3 a 4.4 do tříd: hořlavost – nelze klasifikovat, kouřivost – SR2 a odkapávání ST1. Při druhé zkoušce však byly mezi oběma variantami rozdíly. U varianty jen s Eswegee došlo k zapálení vzorku a ten poté vyhořel v celé měřené délce, to bylo doprovázeno odkapáváním hořících kusů. V provedení s nanovláknou vrstvou bylo ale prokázáno samovolné zhasnutí a to před dosažením první měřicí značky. Z toho je zřejmý přínos aplikace nanovrstvy. Výsledky z této zkoušky, které vypovídají ve prospěch rouna s aplikovanou nanovláknou vrstvou, uvádí *Tab. 3*. [26, 36, 40, 44]

Tab. 3: *Výsledky zkoušky Stanovení hořlavosti materiálů pro výrobu a interiéry automobilů, traktorů, lesnických a zemědělských strojů pro 20mm Cello F800 FR HO.*

Vzorek číslo	1	2	3	4	5	průměr	U
Doba hoření [s]	265	279	286	258	271	271,8	13,2
Délka vyhořelé části [mm]	254	254	254	254	254	254,0	2,0
Rychlost hoření [mm/min]	57,5	54,6	53,3	59,1	56,2	56,1	2,7

Černé rouno s povrchovou úpravou Eswegee

Vzorek číslo	1	2	3	4	5	průměr	U
Doba hoření [s]	0	0	0	0	0	0	(-)
Délka vyhořelé části [mm]	0	0	0	0	0	0	(-)
Rychlost hoření [mm/min]	0	0	0	0	0	0	(-)

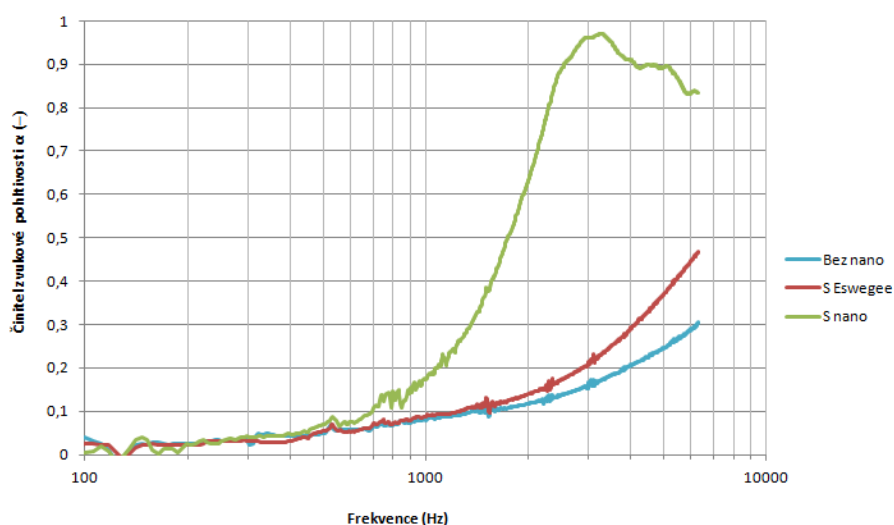
Černé rouno s povrchovou úpravou Eswegee+Nano

5. Popis optimálních uspořádání prvků

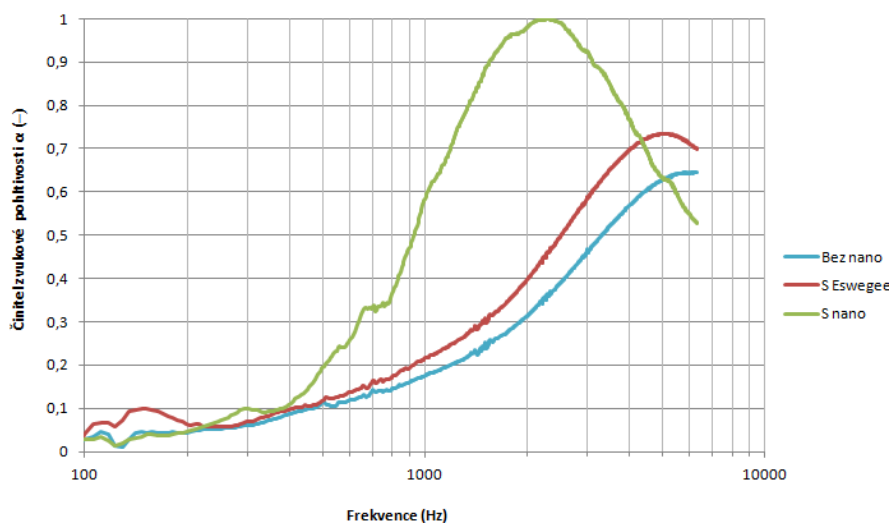
Popis optimálních geometrických uspořádání prvků rezonátorů vzhledem ke zvoleným frekvencím zvuku má smysl, jen pokud je tento popis směřován ke konkrétní aplikaci pro řešené prostředí. Proto zde budou popsána optimální uspořádání jednotlivých akustických systému, vybraná na základě předešlých kapitol, a k jednotlivému systému bude uvedena jeho předpokládaná aplikace.

U **membránových rezonátorů** je vidět jasný přínos nanovlákněné rezonanční membrány, která posouvá hodnoty činitele zvukové pohltivosti k nižším frekvencím a zároveň zvyšuje jeho maximální hodnoty. U těchto řešení bez rezonanční nanovlákněné rezonanční membrány, tedy membrány maximálně velkého měrného povrchu, minimálního průměru vláken a velmi malých plošných hmotností, se pohltivost v závislosti na frekvenci odvíjí především podle tloušťky (viz *Graf 13, podkapitola 3.1.*). Frekvenční využitelnost pohltivého materiálu je uvedena v tabulce v přílohách. S aplikovanou nanovláknou membránou na porózním materiálu jsme však schopni

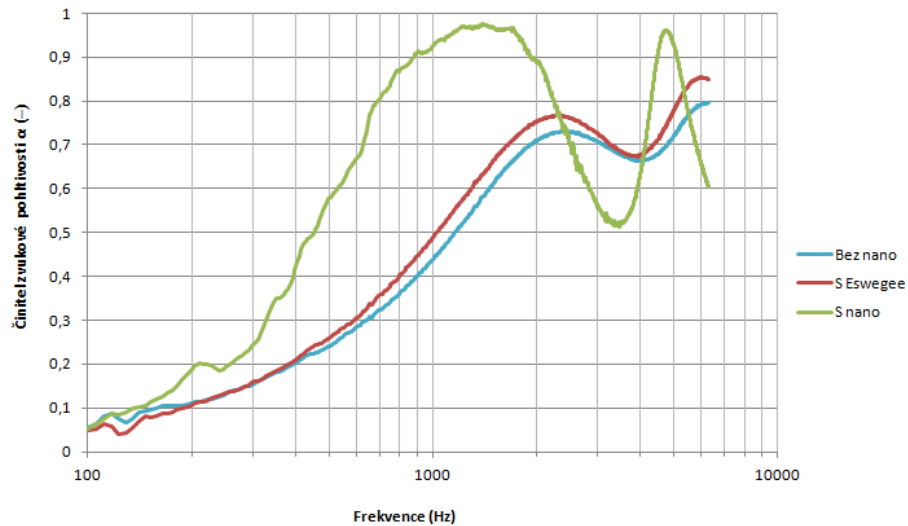
pohlcovat zvuk pomocí prvku s mnohem menší tloušťkou. Nanovláknenná vrstva byla vždy nanesena na podkladovou tenkou vrstvu s adhesivem - Eswegee, která má ve výsledném akustickém systému, kromě podkladové, zároveň ochrannou funkci, kdy brání před poškozením vlastních nanovláken. Jak můžeme vyčíst z přiložených grafů, sama o sobě nemá téměř žádný akustický vliv. Přínos a optimální konfigurace s nanovláknennou rezonanční membránou jsou uvedeny níže. Tyto širokospektrální varianty jsou tak celostními akustickými řešeními, které najdou své uplatnění nejen při umístění na obytné stěny, ale i v strojních zařízeních (motorové jednotky, dopravní prostředky, zemědělská technika, bílá technika atd.), neboť jejich zvuko-izolační a pohltivý účinek může být zvýšen zařazením dalšího prvku do výsledného akustického sendviče – např. těžkou akustickou folií malé tloušťky.



Graf 22: Činitel zvukové pohltivosti pro 8mm vzorek rouna Cellofoam F800FR HO bez povrchové úpravy, s krycí tenkou netkanou textilií a nakonec s nanovláknennou vrstvou (0,4 gsm).

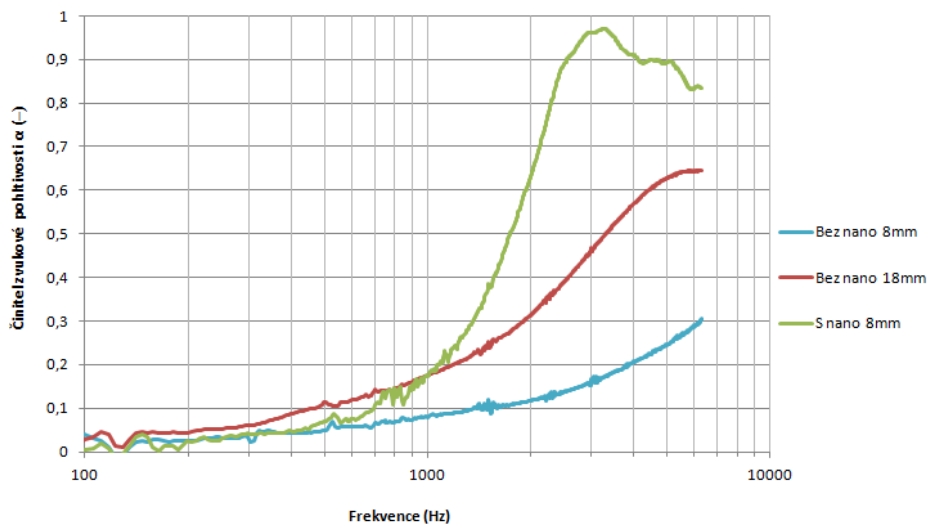


Graf 23: Činitel zvukové pohltivosti pro 18mm vzorek rouna Cellofoam F800FR HO bez povrchové úpravy, s krycí tenkou netkanou textilií a nakonec s nanovláknennou vrstvou (0,4 gsm).

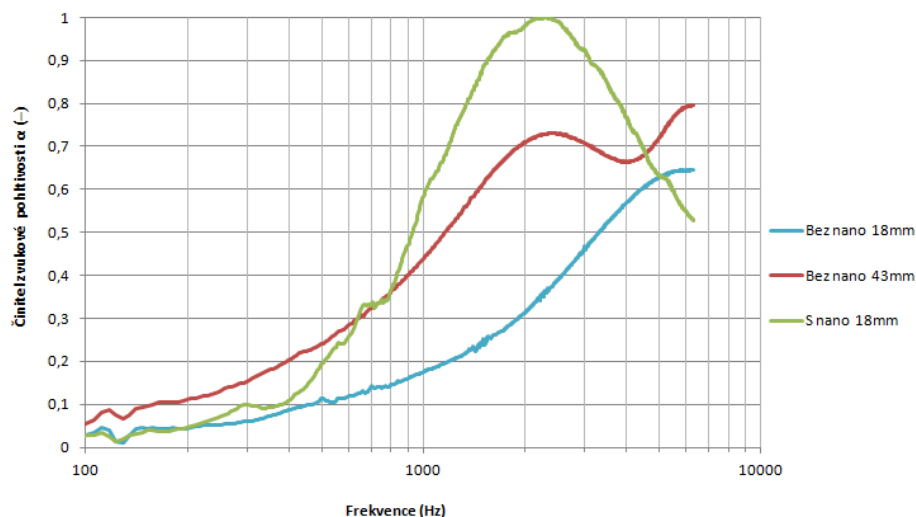


Graf 24: Činitel zvukové pohltivosti pro 43mm vzorek rouna Cellofoam F800FR HO bez povrchové úpravy, s krycí tenkou netkanou textilií a nakonec s nanovláknennou vrstvou (0,4 gsm).

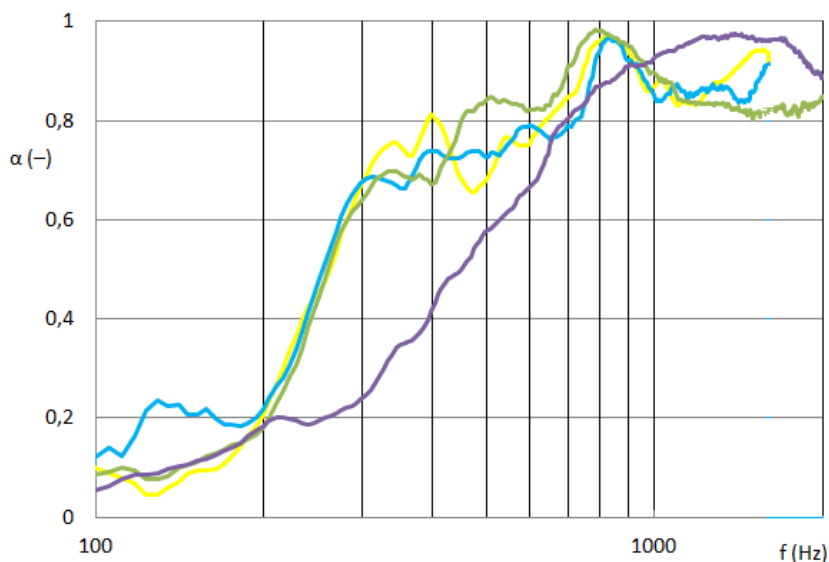
Grafy 22, 23 a 24 porovnávají rouna Cellofoam F800FR HO ve třech provedeních a ve třech vyrobených tloušťkách. Z grafů je jasně patrná velmi vysoká účinnost takovýchto systémů využívajících efekt nanovláknenné rezonanční membrány. Jde o systémy účinné v širokém rozmezí frekvencí – od nižších středních po vysoké. Grafy 25 a 26 ukazují značný přínos aplikace nanovláknenné rezonanční membrány na vzorek nižší tloušťky, který vykazuje lepší pohltivost než samotný vzorek tloušťky vyšší. Ještě vyšší pohltivosti je možné u měkkých vláknitých porózních materiálů dosáhnout sendvičovým uspořádáním panelů s membránami stejných (či rozdílných) plošných hmotností, namísto jednoho panelu s membránou (viz Graf 27).



Graf 25: Činitel zvukové pohltivosti pro 8mm vzorek rouna Cellofoam F800FR HO s nanovláknennou vrstvou (0,4 gsm) v porovnání s 8 a 18mm rounem bez nano.

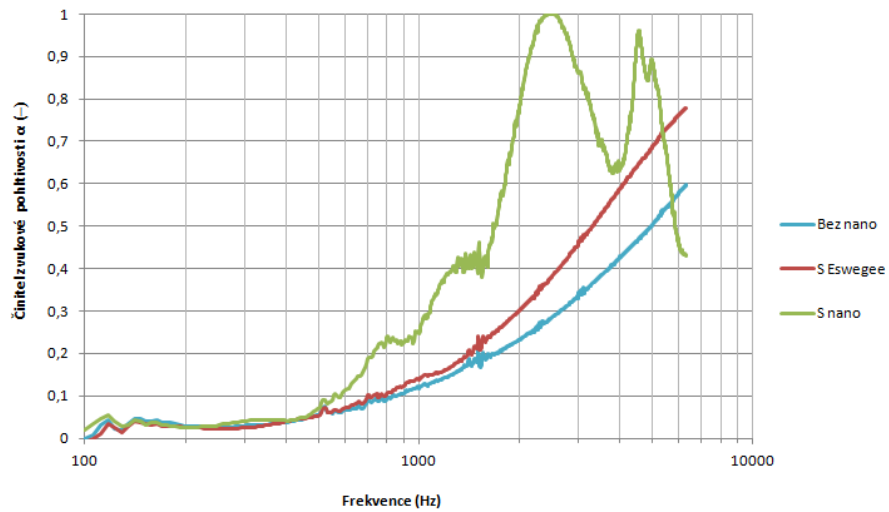


Graf 26: Činitel zvukové pohltivosti pro 18mm vzorek rouna Cellofoam F800FR HO s nanovláknennou vrstvou (0,4 gsm) v porovnání s 18 a 43mm roumem bez nano.

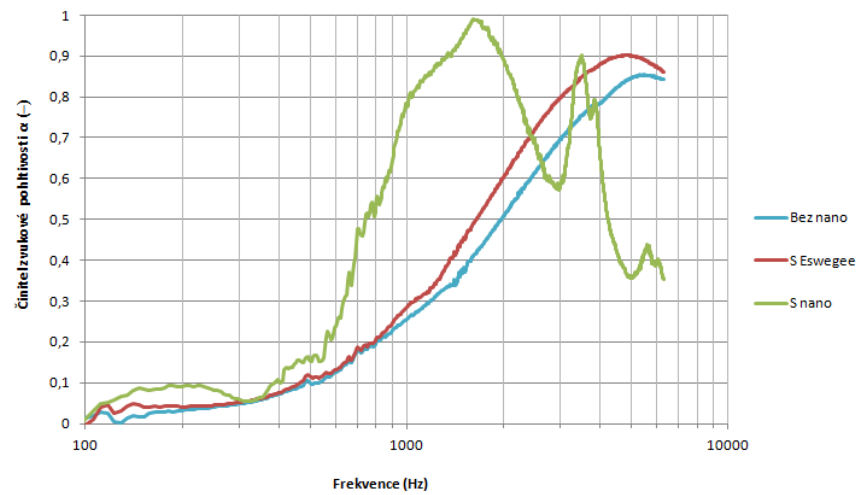


Graf 27: Činitel zvukové pohltivosti pro sendvič tří 17mm roun Cello F800 FR HO s nanovrstvami o různých plošných hmotnostech VS to samé rouno tloušťky 45 mm s nanovrstvou 0,4 gsm (fialová křivka). Žlutá křivka značí sestupnou tendenci (1; 0,4 a 0,2) plošných hmotností, modrá vzestupnou a zelená odpovídá 0,4 gsm.

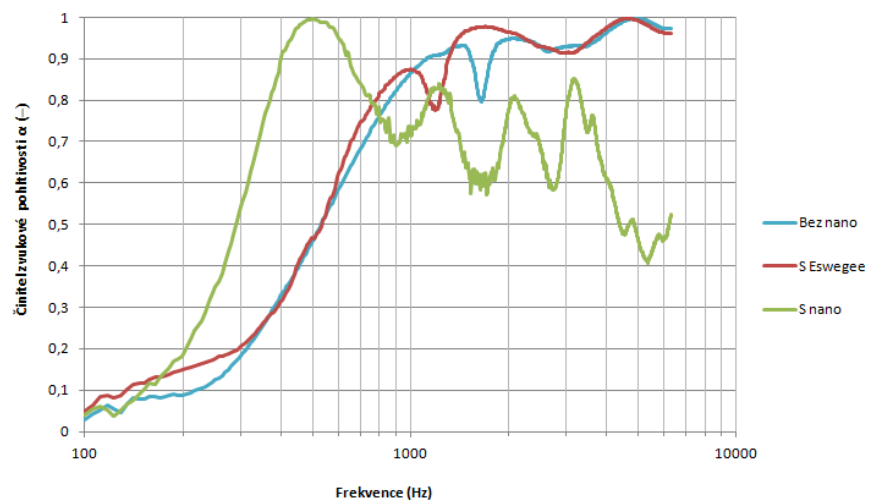
Grafy 28, 29 a 30 srovnávají pěny Cellofoam HR 290/0 opět ve třech provedeních a ve třech vyrobených tloušťkách. Z grafů je jasně patrná vysoká účinnost těchto pěnových akustických systémů využívajících efekt nanovláknenné rezonanční membrány. Opět jde o systémy účinné v širokém rozmezí frekvencí – od nízkých (tloušťka 50 mm) až po vysoké. Grafy 31 a 32 opět ukazují značný přínos aplikace nanovláknenné rezonanční membrány na vzorek nižší tloušťky, který vykazuje lepší pohltivost než samotný vzorek tloušťky vyšší. Přínos na pohltivost nízkých kmitočtů je významný i při začlenění 3mm těžké folie na rubovou stranu akustického systému.



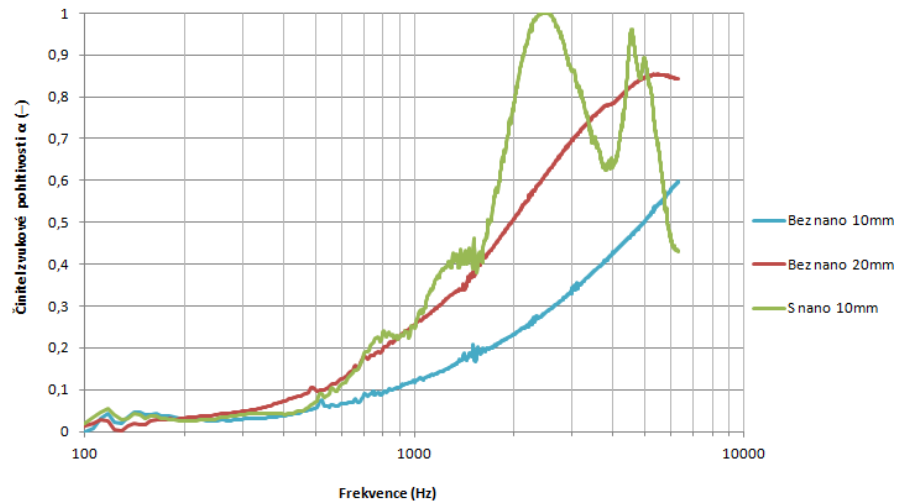
Graf 28: Číselník zvukové pohltivosti pro 10mm vzorek pěny Cellofoam HR 290/0 bez povrchové úpravy, s krycí tenkou netkanou textilií a nakonec s nanovláknennou vrstvou (1 gsm).



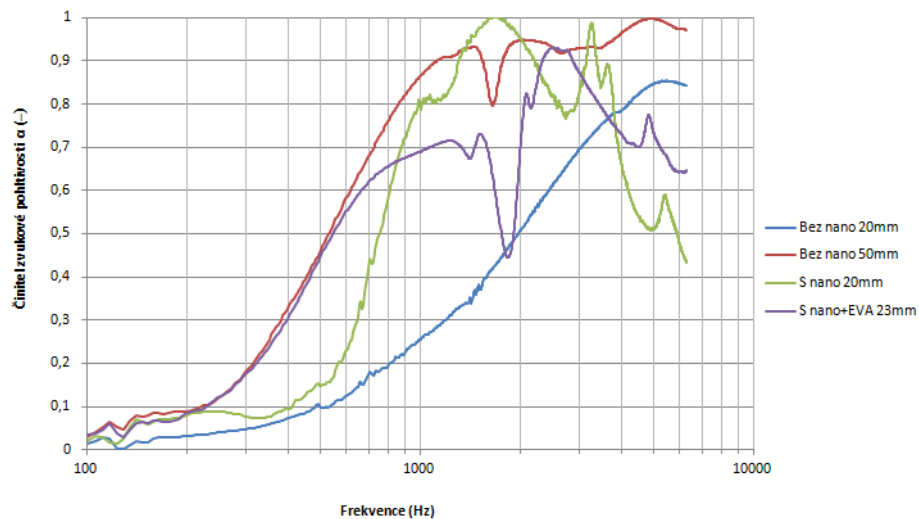
Graf 29: Číselník zvukové pohltivosti pro 20mm vzorek pěny Cellofoam HR 290/0 bez povrchové úpravy, s krycí tenkou netkanou textilií a nakonec s nanovláknennou vrstvou (1 gsm).



Graf 30: Číselník zvukové pohltivosti pro 50mm vzorek pěny Cellofoam HR 290/0 bez povrchové úpravy, s krycí tenkou netkanou textilií a nakonec s nanovláknennou vrstvou (1 gsm).



Graf 31: Činitel zvukové pohltivosti pro 10mm vzorek pěny Cellofoam HR 290/0 s nanovláknennou vrstvou (1 gsm) v porovnání s 10 a 20mm pěnou bez nano.



Graf 32: Činitel zvukové pohltivosti pro 20mm vzorek pěny Cellofoam HR 290/0 s nanovláknennou vrstvou (1 gsm) v porovnání s 20 a 50mm pěnou bez nano.

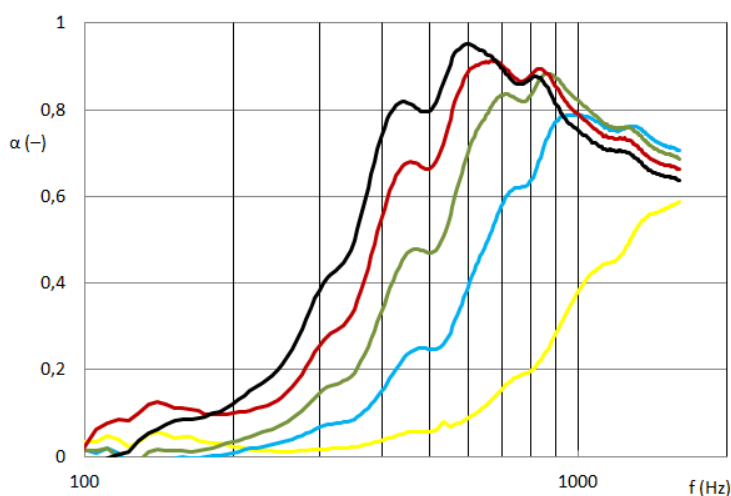
Samotné **dutinové rezonátory** se svou podstatou neřadí k optimálním variantám akustických systémů pro naše účely, jde totiž o řešení frekvenčně selektivní. Ze zkoumaných vzorků vyplynula dobrá laditelnost rezonátoru na požadované frekvence pouhou změnou geometrie. U akustických kazet z MDF v pásmu nízkých kmitočtů nejlépe pohlcovaly modely s nejméně hustou perforací, jelikož jednotlivé rezonátory měly k dispozici větší tlumící objem. Čelo panelu akustické kazety AVS1 ve vzdálenosti 70 cm od stěny vykazovalo maximální pohltivost v oblasti 300 – 700 Hz. Pokud by se zmenšily otvory, či ještě více zvýšila jejich vzájemná rozteč, bylo by možné se dostat do oblastí nejnižších frekvencí. Nejlepší dutinové rezonátory z PA6 díky jednomu většímu centrálnímu otvoru a přes něj aplikovanou nanovláknennou rezonanční membránou vykazovaly pohltivost formou několika pozvolna přecházejících

rezonančních maxim. Ve vzdálenosti jejich čela od stěny 50 mm byla tato maxima ve frekvenčním pásmu (350 – 800 Hz). U těchto variant by bylo možné úpravou geometrie perforace pohlcovat zvukové frekvence od nejnižšího po střední pásmo. Aplikováním nanovláknenné rezonanční membrány zde bylo patrné výrazné zvýšení účinnosti těchto akustických prvků. Zařazení porózního materiálu do určité vzdálenosti za dutinový rezonátor (optimum mezi 1-5 mm) znamenalo jisté zlepšení oproti pouhé vzduchové mezeře, avšak v porovnání s variantou membránových rezonátorů – kmitající nanovláknenná membrána na porózním materiálu, šlo o nedostatečně účinná řešení. Samotná pěna zařazená přímo na panel znamená lehké zlepšení pohltivosti samotné pěny odpovídající tloušťky, ale opět v porovnání s aplikovanou nanovláknennou membránou jde o řešení nedostatečná. Námi zvolené a měřené varianty (vzduchové mezery max. 50 mm) se tak hodí k pohlcování převážně užší oblasti kmitočtů. Pro pohlcení co nejširšího pásma je vhodné zvolit takovou geometrii uspořádání prvků, kde jsou buď již na samotném panelu otvory různých rozměrů, nebo jsou panely kladeny různě vzdáleny od stěny, tím se dosáhne požadovaného širokospektrálního pohlcení zvukového vlnění (viz *podkapitolu 3.2.*). Jde tak o systémy vhodné do interiérů k řešení prostorové akustiky.

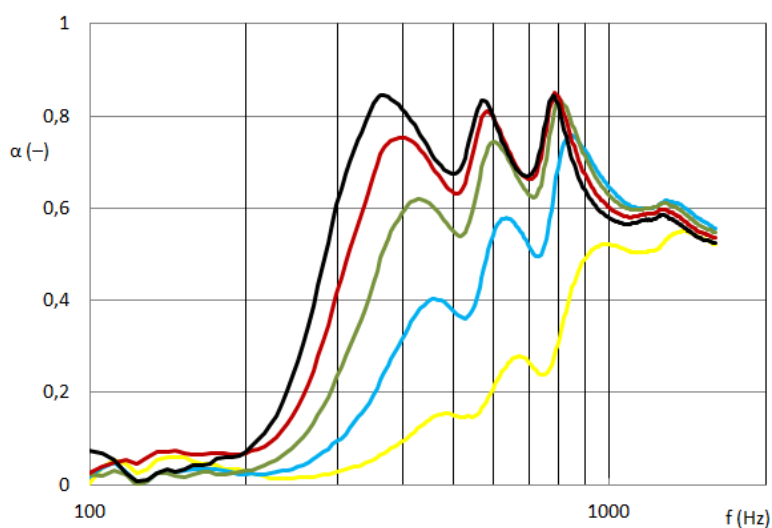
Perforované panely ve formě mřížky s kmitající rezonanční membránou v provedení Al-panelů a sklovláknitých mřížek představují lehká esteticky zajímavá řešení vhodná především do stropních podhledů a zvláště efektním se jeví jejich použití zároveň jako stínítek pod stropním osvětlením, jelikož průsvitná nanovláknenná membrána částečně brání průchodu světla. Provedení založená na hliníku vykazovala centrální maximum okolo 400 Hz, které pozvolna klesalo k vyšším frekvencím. Panely v provedení rezonančních mřížek pohlcovaly již od 300 Hz, přičemž jejich pohltivost dále pokračovala k frekvencím vysokým. Lze je tak považovat za širokospektrální zvukově pohltivá řešení. Jejich laditelnost na nejnižší frekvence spočívá především ve vzduchové mezeře za nimi. Se vzrůstající vzduchovou mezerou narůstá pohltivost v nižším frekvenčním pásmu. Zde však větší vzduchové mezery nemusí být považovány za limitující, jelikož jejich aplikace počítá především s umístěním na stropy. Takto umístěné panely v různých vzdálenostech a provedeních mohou představovat akusticky účinnou a zároveň esteticky zajímavou variantu širokospektrálního pohlcení zvuku v interiérech, která díky své jednoduchosti nemusí být finančně náročná.

Nejoptimálnější se jeví varianty sklovláknitých mřížek v uspořádání s nanovláknennou membránou vyšší plošné hmotnosti na čelní straně a nižší plošné hmotnosti na rubové straně. Byly též vyzkoušeny varianty spojující Al-panely se sklovláknitou mřížkou, které vyhladily frekvenční křivku u sklovláknitých mřížek a zároveň mírně snížily pokles ve vyšším frekvenčním pásmu u hliníkových panelů (*Graf 33 a 34*). Sendvičové uspořádání panelů se skládalo z mřížky R170 (otvory 4,5x5mm) s nanovláknennou vrstvou na rubové straně a na ní přiléhající hliníkové mřížky s 2,3mm kruhovými otvory (*Graf 33*). Uspořádání s nanovláknennou membránou z obou stran na

sklovláknité mřížce R267 (otvory 8,5x6,5mm), na kterou přiléhala hliníková mřížka s 2,3mm kruhovými otvory a nanovláknennou vrstvou na rubové straně, dosahovalo vůbec nejlepší zvukové pohltivosti (*Graf 34*).



Graf 33: Činitel zvukové pohltivosti pro sendvič 0,58mm sklovláknité mřížky R170 a 1mm Al mřížky s kruhovými otvory 2,3 mm s nanovrstvami (0,2 gsm) u obou z rubové strany. Černá křivka odpovídá vzdálenosti mřížky 50 mm od stěny, červená 40 mm, zelená 30 mm, modrá 20 mm a žlutá 10 mm.



Graf 34: Činitel zvukové pohltivosti pro sendvič 0,95mm sklovláknité mřížky R267 a 1mm Al mřížky s kruhovými otvory 2,3 mm. Mřížka R267 měla nanovrstvy (0,2 gsm) z obou stran, Al mřížka jen z rubové strany. Černá křivka odpovídá vzdálenosti mřížky 50 mm od stěny, červená 40 mm, zelená 30 mm, modrá 20 mm a žlutá 10 mm.

ZÁVĚR

Předmětem této práce bylo, na základě dřívějších zkušeností a poznatků v souvislosti s nynějším technickým rozvojem a technologickým stavem, řešit fenomén, který negativně postihuje dnešní, na mechanizaci čím dál více závislou, společnost. Tímto fenoménem je hluk, tedy jakékoli zvukové projevy, které člověk vnímá jako nepříjemné. Z toho důvodu byla navržena, vyrobena, testována, optimalizována a hodnocena akustická řešení, jejichž úkolem bylo eliminovat tyto nechtěné zvukové projevy. Tato problematika se obecně soustředí na zvuková vlnění o nízkých a středních kmitočtech, neboť právě tuto část spektra zvukového vlnění je obtížné pohlcovat. S ohledem na provedený výzkum je možné konstatovat, že výsledné akustické systémy vykazují vynikající zvukovou pohltivost v co nejširším pásmu kmitočtů. Především akustické systémy založené na rezonančním efektu nanovláknenné membrány tlumené porózním materiálem představují jedinečná, velmi účinná širokospektrální řešení. Pohltivý materiál by měl mít obecně velkou vnitřní plochu na realizaci přeměny akustické energie v jinou formu, nejčastěji teplo (vlákna, póry). Ve svém objemu by měl udržovat vzduch, jakožto vhodné médium k pohlcení akustické energie. Jeho buněčná struktura by měla být otevřená pro proudění vzduchu. Též by měl mít odpovídající tloušťku, potažmo umístění, aby se mohlo přeměnit co nejvíce akustické energie nesené v kmitně zvukové vlny. A právě vliv parametru tloušťky se podařilo aplikací nanovláknenné rezonanční membrány výrazně omezit.

Za materiál zvolený pro nanovláknennou membránu se osvědčil PA6, polymer s velmi dobrými fyzikálně chemickými vlastnostmi, nízkým sklonem k opotřebení a netoxickým rozpouštědlem. Spolu s těmito vlastnostmi jde o řešení zajímavé i ekonomicky. Oproti dříve zkoušeným polymerům se jedná o výhodnější variantu (rozpuštěnost PVA ve vodě – nutnost dodatečného síťování struktury). Nanovláknenná membrána založená na PA6 nabízí velký specifický měrný povrch daný malým průměrem vláken (optimum pro zvukovou pohltivost dle polymeru, pro PA6 vlákna jdoucí k 400 nm), vysokou poróznost danou malou velikostí pórů a v neposlední řadě možnost různě aditivovat nanovláknenný materiál (zvláknovací polymerní roztok). Nanovláknenné membrány byly vyrobeny na laboratorním zařízení Nanospider od společnosti Elmarco metodou electrospinningu ve formě rolí šíře 50 cm, s nanovláknem o střední hodnotě průměru 100 - 150 nm. Ovšem s delší zvláknovací hlavou je možné dosáhnout průmyslové výroby materiálu větších šířek (až do 1600 mm).

Tlumičím prvkem pro membránové rezonátory byly zvoleny porózní materiály (pěnové hmoty, minerální vaty, umělá i přírodní rouna atd.), které jsou velmi dobrými zvukově absorpčními materiály a zároveň působí jako vhodné tepelně izolační řešení. I přesto se jedná o nedostatečné zvukově izolační materiály, proto byly tyto výsledné akustické systémy doplněny o izolační materiály typu pryže – konkrétně byla zvolena těžká akustická folie na bázi EPDM/EVA. U tohoto

typu membránových rezonátorů byla optimální akustická řešení založená na tlumícím prvku z PES-rouna, PUR-pěny a akustické pěny na bázi melaminu schopna dosáhnout mnohem lepší pohltivosti než samotný pohltivý objemový materiál dvakrát větší tloušťky.

Neoptimalizované rezonátory Helmholtzova typu pohlcovaly zvuk v nízkém frekvenčním pásmu až při velkých vzduchových mezerách. Jejich zvukovou pohltivost se však nanovláknou resonanční membránou podařilo několikanásobně zvýšit (defacto maximalizovat) a posunout do požadovaného frekvenčního pásma. Přitom u takto optimalizovaných akustických systémů došlo k zachování malých vzdáleností od stěny. Vhodnou kombinací tenkých mříží s nanovláknou resonanční membránou se podařilo vytvořit tenká, lehká a prostorově nenáročná, především závěsná akustická řešení. Ta mohou sloužit díky průsvitnosti nanovlákné membrány třeba jako zvukově pohltivá designová stínítka pod stropní osvětlení.

S využitím nanovlákné resonanční membrány se tak podařilo optimalizovat základní typy konvenčních akustických řešení. Ty byly již dříve hojně popsány, avšak právě ono začlenění nanovlákné membrány a zde popsany vývoj kompozitních systémů na ní založených je novou oblastí výzkumu. Jejím začleněním došlo u všech testovaných typů materiálů a akustických prvků k zlepšení zvukově pohltivých vlastností – významné zvýšení hodnot zvukové pohltivosti, a to zejména v nižším a středním frekvenčním pásmu. Zároveň její aplikace znamená podstatné snížení tloušťky/hmotnosti výrobku, a tak ceny. Zvukově pohltivé vlastnosti výrobku přitom zůstávají zachovány, nebo jsou zlepšeny. Jediná skupina prvků, kde bylo její začlenění negativním, byly plastové dutinové rezonátory malé tloušťky (2-3 mm) s drobnou perforací. Tyto neupravené akustické prvky svou vhodně nastavenou geometrií již sami vykazovaly zvukovou pohltivost v nižší frekvenční oblasti. Nanovlákná membrána pak kmitáním na své vlastní frekvenci lehce posouvala maxima činitele zvukové pohltivosti směrem k vyšším kmitočtům. Celkově vzato byla navržena řešení, která naleznou své uplatnění především v bytové architektuře – řešení prostorové akustiky, a poté ve sféře elektromechanických zařízení – tlumení hluku motorových jednotek, agregátů atd. Širokou paletou úprav výchozího polymeru aditiv (barviva, antibakteriální látky, zhašedla, ...), volbou výchozího objemového materiálu, nebo impregnací hotového řešení mohou tyto akustické systémy oslovit jak designéry, tak techniky.

Kromě domácností, kanceláří, vstupních hal, sportovišť, nákupních center, nahrávacích studií, přednáškových sálů, učeben, divadel, kin, apod., je možné vytvořit čelní povrch funkčnějším - např. hydrofobním a aplikovat taková řešení v místech s velkou vlhkostí (plavecké bazény, lázně, koupelny). Aplikace těchto systémů se otevírá i realizaci v kotelnách. Pokud by se povedlo vytvořit celý systém nehořlavým (impregnace retardéry hoření?), velmi zajímavou oblastí je letectví a kosmický výzkum, zejména řešení hluku motoru raket. Kromě dopravních prostředků (automobilismus, zemědělská technika, atd.), kde se řeší především motorové prostory a s nimi spojený hluk, dále pak akustika interiéru, se vybízí možnost tlumit zvukové vibrace výfukového

potrubí (auto-moto). Stejně tak velkým aplikačním polem je tzv. bílá technika a kapotáže strojního zařízení obecně. Podnětně působí i nápad využít vlastností těchto řešení při výrobě reproduktorů k vnitřnímu tlumení beden na ozvučnice.

Testování bylo podrobena poměrně velké množství vzorků, nicméně stále zbývá spousta možností jak materiálových (přírodní materiály typu konopí, vlna, balza), strukturních (jiné plošné a objemové hmotnosti), tak funkčních (úpravy materiálu). Možnosti výzkumu na tomto poli jsou skutečně široké – za všechny zmiňme vícevrstvá sendvičová řešení s rezonančními membránami rozdílných plošných hmotností. Závěrem je nutné připomenout, že primárně použitá metoda měření impedanční trubici je pouze orientační laboratorní metodou, která slouží hlavně k porovnání vzorků. Zde vynesené závěry proto nejsou obecně platnými pro každý materiál, zejména nehomogenní. Na základě návržení, výroby, hodnocení (impedanční trubice a dozvuková místnost) a ověření (hořlavost), byly optimální varianty zvoleny k subjektivnímu posouzení. K tomu došlo nejprve v přehlídkové místnosti na univerzitní půdě, později následovala implementace v reálných podmínkách: divadelní technika společnosti OCHI-INŽENÝRING, kogenerační jednotky společnosti TEDOM, spolupráce s bytovými architekty, vývoj designových akustických panelů ve spolupráci s firmou AVETON...

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

1. KALINOVÁ, Klára, TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI a TEXTILNÍ FAKULTA. *Zvuková pohltivost vláknenných materiálů s ohledem na charakteristiku struktury*. V Liberci: Technická univerzita, 2005. ISBN 807083997X 9788070839973.
2. HŘEBAČKA, Petr. Studium akustických vlastností vybraných plastových materiálů. [online]. 2007 [vid. 13. duben 2015]. Dostupné z: <http://dspace.k.utb.cz/handle/10563/3252>
3. ZWIKKER, C. a C. W. KOSTEN. *Sound Absorbing Materials* [online]. B.m.: Elsevier Publishing Company, 1949 [vid. 13. duben 2015]. ISBN 0-444-40661-1. Dostupné z: <http://books.google.cz/books?id=pCQ6AQAAIAAJ>
4. KOVÁČ, Jan. Návrh sendvičové vrstvy materiálů s optimální akustickou pohltivostí pro interiéurní aplikace [online]. 2011 [vid. 13. duben 2015]. Dostupné z: <http://dspace.k.utb.cz/handle/10563/15437>
5. KOLMER, F. a J. KYNCL. *Prostorová akustika* [online]. B.m.: SNTL, 1980. Dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=kXC3rQEACAAJ>
6. LIU, X.-Y., M.-S. ZHAN a K. WANG. Influence of foam structure and service environment on sound absorption characteristics of polyimide foams. *High Performance Polymers* [online]. 2012, roč. 24, č. 7, s. 646–653 [vid. 5. květen 2015]. ISSN 0954-0083, 1361-6412. Dostupné z: doi:10.1177/0954008312448073
7. SANADA, Akira a Nobuo TANAKA. Extension of the frequency range of resonant sound absorbers using two-degree-of-freedom Helmholtz-based resonators with a flexible panel. *Applied Acoustics* [online]. 2013, roč. 74, č. 4, s. 509–516. ISSN 0003-682X. Dostupné z: doi:10.1016/j.apacoust.2012.09.012
8. MIN, Shen, Kazuteru NAGAMURA, Noritoshi NAKAGAWA a Masaharu OKAMURA. Design of compact micro-perforated membrane absorbers for polycarbonate pane in automobile. *Applied Acoustics* [online]. 2013, roč. 74, č. 4, s. 622–627. ISSN 0003-682X. Dostupné z: doi:10.1016/j.apacoust.2012.05.009
9. RANDEBERG, Rolf Tore. Perforated panel absorbers with viscous energy dissipation enhanced by orifice design. *DOCTORAL THESIS* [online]. 2000 [vid. 13. duben 2015]. Dostupné z: <http://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2:125365>
10. ČÍHAL, Roman. *Akustika staveb: vzduchová a kročejová neprůzvučnost = Building acoustics : airborne and impact sound insulations : zkrácená verze PhD Thesis*. V Brně: Vysoké učení technické, Fakulta architektury, Ústav techniky staveb, 2002. ISBN 8021422718 9788021422711.
11. PARK, Soon-Hong. Acoustic properties of micro-perforated panel absorbers backed by Helmholtz resonators for the improvement of low-frequency sound absorption. *Journal of Sound and Vibration* [online]. 2013, roč. 332, č. 20, s. 4895–4911. ISSN 0022-460X. Dostupné z: doi:10.1016/j.jsv.2013.04.029

12. PIRK, Rogrio, Carlos DANDRADE, Gustavo PAULINELLI a Luiz Carlos SANDOVAL GES. Acoustics and Vibro-Acoustics Applied in Space Industry. In: Marco G. BEGHI, ed. *Modeling and Measurement Methods for Acoustic Waves and for Acoustic Microdevices* [online]. B.m.: InTech, 2013 [vid. 5. květen 2015]. ISBN 978-953-51-1189-4. Dostupné z: <http://www.intechopen.com/books/modeling-and-measurement-methods-for-acoustic-waves-and-for-acoustic-microdevices/acoustics-and-vibro-acoustics-applied-in-space-industry>
13. JAKSCH, Ivan. Technická diagnostika. *Liberec: TUL* [online]. 2010 [vid. 13. duben 2015]. Dostupné z: http://www.rss.tul.cz/download/tdg/P7_hluk_ESF.pdf
14. FEYNMAN, Richard P, Robert B LEIGHTON a Matthew SANDS. *Feynmanovy přednášky z fyziky s řešenými příklady*. Havlíčkův Brod: Fragment, 2000. ISBN 8072004212 9788072004218 8072004050 9788072004058 8072004204 9788072004201.
15. D'ANTONIO, Peter. Low-frequency control options in surround-sound critical listening rooms. *The Journal of the Acoustical Society of America* [online]. 2006, roč. 119, č. 5, s. 3280 [vid. 5. květen 2015]. ISSN 00014966. Dostupné z: doi:10.1121/1.4786177
16. LEE, Youneung a Changwhan JOO. Sound absorption properties of recycled polyester fibrous assembly absorbers. *AUTEX Research Journal*. 2003, roč. 3, č. 2, s. 78–84.
17. Zvuková absorpce. *Ecophon* [online]. [vid. 13. duben 2015]. Dostupné z: <http://www.ecophon.com/cz/zdroje/banka-akusticky-znalosti/Zaklady-o-akustice/Zvukova-absorpce/>
18. ČSN EN ISO 354 - *Náhled* [online]. [vid. 19. duben 2015]. Dostupné z: http://csnonlinefirmy.unmz.cz/html_nahledy/73/68915/68915_nahled.htm
19. ČSN ISO 10534-1 - *Náhled* [online]. [vid. 19. duben 2015]. Dostupné z: http://import.technickenormy.cz/nahledy/54724_nahled.htm
20. VÝROBKY | *Informace o produktech/ Novinky | Knauf AMF Deckensysteme - Mehr Raum für Neues* [online]. [vid. 17. duben 2015]. Dostupné z: http://www.amfgrafenau.de/index.php?&l=14&mode=listarticles&subcatid=369&ipage=produkt_info_akustik_schall
21. R. VENEGAS, F. Bechwati. Low frequency sound propagation in activated carbon. <http://scitation.aip.org> [online]. 7 2012 [vid. 5. květen 2015]. Dostupné z: <http://scitation.aip.org/content/asa/journal/jasa/132/1/10.1121/1.4725761>
22. *Cellofoam* [online]. [vid. 14. duben 2015]. Dostupné z: http://www.cellofoam.de/cellofoam/cellofoam_wrs.nsf?opendatabase&lang=cz
23. NAKANISHI, Shinsuke. Structures of resonators in a cavity for improving a sound insulation of a thin double-leaf panel. In: *Proceedings of Meetings on Acoustics* [online]. B.m.: Acoustical Society of America, 2013, s. 015046 [vid. 5. květen 2015]. Dostupné z: <http://scitation.aip.org/content/asa/journal/poma/19/1/10.1121/1.4798995>
24. OMRANI, Abderrazak a Imad TAWFIQ. Vibro-acoustic analysis of micro-perforated sandwich structure used in space craft industry. *Mechanical Systems and Signal Processing* [online]. 2011, roč. 25, č. 2, s. 657–666. ISSN 0888-3270. Dostupné z: doi:10.1016/j.ymsp.2010.07.010

25. QIAN, Y.J., D.Y. KONG, S.M. LIU, S.M. SUN a Z. ZHAO. Investigation on micro-perforated panel absorber with ultra-micro perforations. *Applied Acoustics* [online]. 2013, roč. 74, č. 7, s. 931–935. ISSN 0003-682X. Dostupné z: doi:10.1016/j.apacoust.2013.01.009
26. *FR Fabric Standard | German DIN 4102 (B1)* [online]. [vid. 14. duben 2015]. Dostupné z: <http://www.fr-one.com/en/standard/german-din-4102-b1>
27. *Melamine - Wikipedia, the free encyclopedia* [online]. [vid. 14. duben 2015]. Dostupné z: <http://en.wikipedia.org/wiki/Melamine>
28. *EPDM rubber - Wikipedia, the free encyclopedia* [online]. [vid. 14. duben 2015]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/EPDM_rubber
29. *Akustická kazeta AVS10 | AkustickéMateriály.cz* [online]. [vid. 15. duben 2015]. Dostupné z: <http://www.akustickematerialy.cz/shop/akusticke-desky/akusticka-kazeta-avs10/>
30. *HPS desky Elima - Nedakonice* [online]. [vid. 15. duben 2015]. Dostupné z: <http://www.prodej-montaz-lexanu.cz/hps-desky>
31. *LTD, DTD, MDF: co znamenají záhadné zkratky na nábytku? - iDNES.cz* [online]. [vid. 15. duben 2015]. Dostupné z: http://bydleni.idnes.cz/ltd-dtd-mdf-co-znamenaji-zahadne-zkratky-na-nabytku-f8i-/stavba.aspx?c=A080522_121457_dum_stavime_web
32. *Polykarbonát - prodej a zpracování - PLEXIPLAST s.r.o.* [online]. [vid. 15. duben 2015]. Dostupné z: <http://www.plexiplast.cz/polykarbonat.html>
33. *Plexisklo - popis plexiskla | koplast.cz* [online]. [vid. 15. duben 2015]. Dostupné z: <http://www.koplast.cz/plexisklo-popis-plexiskla/>
34. *Sklovláknité mřížkové tkaniny Vertex® | Stavebnictvi3000.cz* [online]. [vid. 15. duben 2015]. Dostupné z: <http://www.stavebnictvi3000.cz/clanky/sklovlaknite-mrizkove-tkaniny-vertex-reg/>
35. *Tkani - SAINT-GOBAIN ADFORS* [online]. [vid. 15. duben 2015]. Dostupné z: <http://www.sg-adfors.com/cz/Technologie/Textilie/Tkani>
36. *DIN 5510-2 Fire test to railway components – Germany Standard_Railway Component_Fire test center_FireTC.net* [online]. [vid. 5. květen 2015]. Dostupné z: <http://www.firetc.net/firetesting/show.php?itemid=658>
37. *HEYMAN - Všeobecné vlastnosti materiálu polyamid (PA)* [online]. [vid. 15. duben 2015]. Dostupné z: http://www.heyman.de/media/useruploads/files/de/documentation/eigenschaften_kunststoffen.pdf
38. ŠAMAN, Aleš. Parametry kmitajících tenkých membrán a jejich vliv na zvukově pohltivé vlastnosti. [online]. 2011 [vid. 13. duben 2015]. Dostupné z: <http://knihovna-opac.tul.cz/externalResources/theses/21085>
39. HALAŠ, Rostislav. Optimalizace reprodukčního řetězce pro poslechové testy. [online]. 2009 [vid. 10. duben 2015]. Dostupné z: http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=15622

40. HAJNÁ, Kateřina. Vliv materiálu a konstrukce na retardaci hoření výrobků společnosti Stap, a. s.. [online]. 2013 [vid. 15. duben 2015]. Dostupné z: <http://www.kht.tul.cz/items/A-DP/dp2013/Hajn%C3%A1%20-%20Vliv%20materi%C3%A1lu%20a%20konstrukce%20na%20retardaci%20ho%C5%99en%C3%AD%20v%C3%BDrobk%C5%AF%20Stap,%20a.s..pdf>
41. *Measurements in Building Acoustics. Brüel & Kjaer, Naerum* [online]. 1988 [vid. 15. duben 2015]. Dostupné z: <http://www.bksv.com/doc/br0178.pdf>
42. *Akustická diagnostika, NĚMEČEK, Pavel* [online]. 2009 [vid. 15. duben 2015]. Dostupné z: <http://www.kvm.tul.cz/getFile/id:1848>
43. HEJGRLÍKOVÁ, Zuzana. Stanovení rezonance nanovlákně vrstvy v závislosti na jejích parametrech. [online]. 2007 [vid. 15. duben 2015]. Dostupné z: <http://knihovna-opac.tul.cz/externalResources/theses/12804?type=0&individualBuildingCatalogsEnabled=false>
44. *European Fire Standards* [online]. [vid. 15. duben 2015]. Dostupné z: <http://www.eurocobusiness.com/resources/European%20Fire%20Standards.pdf>
45. Deyu Li, Ganghua Yu, and Li Cheng. Noise transmission control of double partition windows using T-shaped acoustic resonators. [online]. 2007 [vid. 13. duben 2015]. Dostupné z: http://www.acoustics.asn.au/conference_proceedings/ICSV14/papers/p405.pdf
46. HROUDOVÁ, Jitka. Vývoj a výzkum environmentálně úsporných izolačních materiálů. [online]. 2013 [vid. 15. duben 2015]. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/34635/18595.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
47. *Akustické charakteristiky Helmholtzova (dutinového) rezonátoru* [online]. [vid. 12. únor 2015]. Dostupné z: http://physics.fme.vutbr.cz/~mirdo/frvs09/helmholtz/Priloha_2_Helmholtzuv_rezonator.pdf

PŘÍLOHY

Příloha 1: Tabulka zobrazující neefektivnější frekvenční využitelnost pohltivého materiálu podle jeho tloušťky.

f [Hz]	$\lambda/4$ [m]	f [Hz]	$\lambda/4$ [cm]	f [kHz]	$\lambda/4$ [cm]	f [kHz]	$\lambda/4$ [mm]
20	4,3	125	68,80	0,8	10,75	5	17,2
25	3,44	160	53,75	1	8,60	6,3	13,7
31,5	2,73	200	43	1,25	6,88	8	10,8
40	2,15	250	34,40	1,6	5,38	10	8,6
50	1,72	315	27,30	2	4,3	12,5	6,9
63	1,37	400	21,50	2,5	3,44	16	5,4
80	1,08	500	17,20	3,15	2,73	20	4,3
100	0,86	630	13,65	4	2,15		

Příloha 2: Tabulka shrnující základní parametry akustických prvků a pro ně použité laminační techniky při výrobě akustického systému.

Výchozí akustický prvek	Materiál	Výrobce	Tloušťka (mm)	Geometrie otvoru (mm)	Laminace	Adhezivum
Porózní panel	Skelná vata TDPS	Isover	20		Tepelný lis, 140 °C, 45 sec	PP síťka 178-D12 (TUL)
Porózní panel	Skelná vata TDPT	Isover	20		Tepelný lis, 140 °C, 45 sec	PP síťka 178-D12 (TUL)
Porózní panel	Tmavěšedá PUR pěna	Cellofoam	20		Lepení	Polep
Porózní panel	Černá PUR pěna	Cellofoam	30		Tepelný lis, 140 °C, 45 sec	PP síťka 178-D12 (TUL)
Porózní panel	Recyklovaný PUR	Cellofoam	32		Tepelný lis, 150 °C, 40 sec	PP síťka Industrial Netting ON5340-23
Porózní panel	Modrá pěna na bázi melaminu	Cellofoam	10/20/50		Tepelný lis, 170 °C, 40 sec	PP síťka Industrial Netting ON5340-23
Porózní panel	Černé rouno z PES	Cellofoam	10/19/46		Tepelný lis, 125 °C, 45 sec	PP síťka Industrial Netting ON5340-23
Perforovaný plech	Al plech s kruhovými otvory	West Steel	1	Průměr/rozteč=2,3/3	Lepení	Akrylep 417E
Perforovaný plech	Al plech s kruhovými otvory	West Steel	1	Průměr/rozteč=3/4	Lepení	Akrylep 417E
Perforovaný plech	Al plech s kruhovými otvory	West Steel	1	Průměr/rozteč=4/5	Lepení	Akrylep 417E
Perforovaný plech	Al plech s kruhovými otvory	West Steel	1	Průměr/rozteč=8/10	Lepení	Akrylep 417E
Perforovaný plech	Al plech s kruhovými otvory	West Steel	1	Průměr/rozteč=10/12	Lepení	Akrylep 417E
Perforovaný plech	Al plech s kruhovými otvory	West Steel	1	Průměr/rozteč=12/15	Lepení	Akrylep 417E
Perforovaný plech	Al plech s kruhovými otvory	West Steel	1	Průměr/rozteč=18/5	Lepení	Akrylep 417E
Perforovaný plech	Al plech s kruhovými otvory	West Steel	1	Průměr/rozteč=21/8	Lepení	Akrylep 417E
Perforovaný plech	Al plech s kruhovými otvory	West Steel	1	Průměr/rozteč=40/0	Lepení	Akrylep 417E
Perforovaný plech	Al plech s čtvercovými otvory	West Steel	1	Strana/rozteč=3/5	Lepení	Akrylep 417E

Perforovaný plech	Al plech s čtvercovými otvory	West Steel	1	Strana/rozteč=4/6	Lepení	Akrylep 417E
Perforovaný plech	Al plech s čtvercovými otvory	West Steel	1	Strana/rozteč=5/7	Lepení	Akrylep 417E
Perforovaný plech	Al plech s čtvercovými otvory	West Steel	1	Strana/rozteč=8/10	Lepení	Akrylep 417E
Perforovaný plech	Al plech s čtvercovými otvory	West Steel	1	Strana/rozteč=9/11	Lepení	Akrylep 417E
Perforovaný plech	Al plech s čtvercovými otvory	West Steel	1	Strana/rozteč=10/12	Lepení	Akrylep 417E
Perforovaný plech	Al plech s čtvercovými otvory	West Steel	1	Strana/rozteč=25/30	Lepení	Akrylep 417E
Perforovaná deska	MFD deska s otvory AVS10	Akustické materiály	16	r=8/rozteč=16/16	Lepení	Akrylep 417E
Perforovaná deska	MFD deska s otvory a štěrbinami AVS1	Akustické materiály	16	r=8/rozteč=16/32, š=4/3/32	Lepení	Akrylep 417E
Perforovaná deska	MFD deska s otvory a štěrbinami AVS2	Akustické materiály	16	r=8/rozteč=16/16, š=4/3/16	Lepení	Akrylep 417E
Perforovaná deska	MFD deska s otvory a štěrbinami AVS3	Akustické materiály	16	r=8/rozteč=11/11, š=4/3/8	Lepení	Akrylep 417E
Perforovaný panel	PA6 deska s centrálním otvorem		13	Centrální čtverec/d=56	Lepení	Akrylep 417E
Perforovaný panel	PA6 deska s centrálním otvorem		13	Centrální čtverec/d=36	Lepení	Akrylep 417E
Perforovaný panel	PA6 deska s centrálním otvorem		13	Centrální kruh/r=20	Lepení	Akrylep 417E
Perforovaný panel	PA6 deska s centrálním otvorem		13	Centrální kruh/r=40	Lepení	Akrylep 417E
Perforovaný panel	PA6 deska s centrálním otvorem		13	Centrální trojúhelník/d=54	Lepení	Akrylep 417E
Perforovaný panel	PA6 deska s centrálním otvorem		13	Centrální trojúhelník/d=68	Lepení	Akrylep 417E
Perforovaný panel	PA6 deska s centrálním otvorem		13	Čtyřcípá hvězda/cíp=29/22	Lepení	Akrylep 417E
Perforovaný panel	PA6 deska s centrálním otvorem		13	Čtyřcípá hvězda/cíp=39/29	Lepení	Akrylep 417E
Perforovaný panel	PA6 deska s centrálním otvorem		13	Čtyřcípá hvězda/cíp=38/31	Lepení	Akrylep 417E
Perforovaná deska	HPS deska s centrálním otvorem	AXOM Kladno	2	r=1	Lepení	Akrylep 417E
Perforovaná deska	HPS deska s centrálním otvorem	AXOM Kladno	2	r=2	Lepení	Akrylep 417E
Perforovaná deska	HPS deska s centrálním otvorem	AXOM Kladno	2	r=3	Lepení	Akrylep 417E
Perforovaná deska	HPS deska s centrálním otvorem	AXOM Kladno	2	r=4	Lepení	Akrylep 417E
Perforovaná deska	HPS deska s centrálním otvorem	AXOM Kladno	2	r=5	Lepení	Akrylep 417E
Perforovaná deska	HPS deska s centrálním otvorem	AXOM Kladno	2	r=6	Lepení	Akrylep 417E
Perforovaná deska	HPS deska s centrálním otvorem	AXOM Kladno	2	r=8	Lepení	Akrylep 417E
Perforovaná deska	HPS deska s centrálním otvorem	AXOM Kladno	2	r=12	Lepení	Akrylep 417E
Perforovaná deska	HPS deska s kruhovými otvory	AXOM Kladno	2	r=1/45x45	Lepení	Akrylep 417E
Perforovaná deska	HPS deska s kruhovými otvory	AXOM Kladno	2	r=2/45x45	Lepení	Akrylep 417E
Perforovaná deska	HPS deska s kruhovými otvory	AXOM Kladno	2	r=4/25x25	Lepení	Akrylep 417E
Perforovaná deska	HPS deska s kruhovými otvory	AXOM Kladno	2	r=4/45x45	Lepení	Akrylep 417E
Perforovaná deska	HPS deska s kruhovými otvory	AXOM Kladno	2	r=6/25x25	Lepení	Akrylep 417E
Perforovaná deska	HPS deska s kruhovými otvory	AXOM Kladno	2	r=6/40x40	Lepení	Akrylep 417E

Perforovaná deska	PMMA deska s centrálním otvorem	AXOM Kladno	3	r=2	Lepení	Akrylep 417E
Perforovaná deska	PMMA deska s centrálním otvorem	AXOM Kladno	3	r=3	Lepení	Akrylep 417E
Perforovaná deska	PMMA deska s centrálním otvorem	AXOM Kladno	3	r=4	Lepení	Akrylep 417E
Perforovaná deska	PMMA deska s centrálním otvorem	AXOM Kladno	3	r=5	Lepení	Akrylep 417E
Perforovaná deska	PMMA deska s centrálním otvorem	AXOM Kladno	3	r=6	Lepení	Akrylep 417E
Perforovaná deska	PMMA deska s centrálním otvorem	AXOM Kladno	3	r=12	Lepení	Akrylep 417E
Perforovaná deska	PMMA deska s kruhovými otvory	AXOM Kladno	3	r=2/45x45	Lepení	Akrylep 417E
Sklovláknitá mřížka	Sklovláknitá mřížková tkanina R40 A105	Saint-Gobain	0,4	Čtvercový vzor 5x4; 1x4	Lepení	Akrylep 417E
Sklovláknitá mřížka	Sklovláknitá mřížková tkanina R51 A101	Saint-Gobain	0,24	Čtvercový vzor 2,2x2,3	Lepení	Akrylep 417E
Sklovláknitá mřížka	Sklovláknitá mřížková tkanina R52 A101	Saint-Gobain	0,34	Čtvercový vzor 4,8x5,1	Lepení	Akrylep 417E
Sklovláknitá mřížka	Sklovláknitá mřížková tkanina R56 A101	Saint-Gobain	0,2	Čtvercový vzor 2,2x2,2	Lepení	Akrylep 417E
Sklovláknitá mřížka	Sklovláknitá mřížková tkanina R58 A101	Saint-Gobain	0,33	Čtvercový vzor 3,5x4,2	Lepení	Akrylep 417E
Sklovláknitá mřížka	Sklovláknitá mřížková tkanina R69 A105	Saint-Gobain	0,33	Čtvercový vzor 4x4	Lepení	Akrylep 417E
Sklovláknitá mřížka	Sklovláknitá mřížková tkanina R71 A105	Saint-Gobain	0,35	Čtvercový vzor 4x5	Lepení	Akrylep 417E
Sklovláknitá mřížka	Sklovláknitá mřížková tkanina R72 A101	Saint-Gobain	0,32	Čtvercový vzor 3,2x3,2	Lepení	Akrylep 417E
Sklovláknitá mřížka	Sklovláknitá mřížková tkanina R79 A101	Saint-Gobain	0,48	Čtvercový vzor 5,5x6,5	Lepení	Akrylep 417E
Sklovláknitá mřížka	Sklovláknitá mřížková tkanina R82 A101	Saint-Gobain	0,45	Čtvercový vzor 4,2x4,8	Lepení	Akrylep 417E
Sklovláknitá mřížka	Sklovláknitá mřížková tkanina R85 A101	Saint-Gobain	0,75	Čtvercový vzor 10x10	Lepení	Akrylep 417E
Sklovláknitá mřížka	Sklovláknitá mřížková tkanina R86 A101	Saint-Gobain	0,5	Čtvercový vzor 6x5,5	Lepení	Akrylep 417E
Sklovláknitá mřížka	Sklovláknitá mřížková tkanina R93 A101	Saint-Gobain	0,65	Čtvercový vzor 11x10	Lepení	Akrylep 417E
Sklovláknitá mřížka	Sklovláknitá mřížková tkanina R96 A101	Saint-Gobain	0,5	Čtvercový vzor 4,1x4,1	Lepení	Akrylep 417E
Sklovláknitá mřížka	Sklovláknitá mřížková tkanina R108 A101	Saint-Gobain	0,74	Čtvercový vzor 9x9	Lepení	Akrylep 417E
Sklovláknitá mřížka	Sklovláknitá mřížková tkanina R110 A101	Saint-Gobain	0,6	Čtvercový vzor 4x4	Lepení	Akrylep 417E
Sklovláknitá mřížka	Sklovláknitá mřížková tkanina R117 A101	Saint-Gobain	0,5	Čtvercový vzor 4x4,5	Lepení	Akrylep 417E
Sklovláknitá mřížka	Sklovláknitá mřížková tkanina R118 A101	Saint-Gobain	0,67	Čtvercový vzor 9x10	Lepení	Akrylep 417E
Sklovláknitá mřížka	Sklovláknitá mřížková tkanina R120 A101	Saint-Gobain	0,65	Čtvercový vzor 6,5x6,5	Lepení	Akrylep 417E
Sklovláknitá mřížka	Sklovláknitá mřížková tkanina R131 A101	Saint-Gobain	0,52	Čtvercový vzor 3,5x3,8	Lepení	Akrylep 417E
Sklovláknitá mřížka	Sklovláknitá mřížková tkanina R153 A101	Saint-Gobain	0,61	Čtvercový vzor 4x4	Lepení	Akrylep 417E
Sklovláknitá mřížka	Sklovláknitá mřížková tkanina R170 A101	Saint-Gobain	0,58	Čtvercový vzor 4,5x4	Lepení	Akrylep 417E
Sklovláknitá mřížka	Sklovláknitá mřížková tkanina R178 A101	Saint-Gobain	0,82	Čtvercový vzor 8x8	Lepení	Akrylep 417E
Sklovláknitá mřížka	Sklovláknitá mřížková tkanina R179 A101	Saint-Gobain	0,7	Čtvercový vzor 6x6	Lepení	Akrylep 417E
Sklovláknitá mřížka	Sklovláknitá mřížková tkanina R267 A101	Saint-Gobain	0,95	Čtvercový vzor 8,5x6,5	Lepení	Akrylep 417E
Sklovláknitá mřížka	Sklovláknitá mřížková tkanina R275 A101	Saint-Gobain	0,9	Čtvercový vzor 6x6	Lepení	Akrylep 417E
Sklovláknitá mřížka	Sklovláknitá mřížková tkanina R451 A101	Saint-Gobain	1,1	Čtvercový vzor 5x5	Lepení	Akrylep 417E
Izolační folie	Těžká folie EPDM/EVA	Cellofoam	3		Lepení	Polep



Příloha 3: Fotografie z dozvukové místnosti zobrazující akustické panely založené na pěnové hmotě Cello HR 290/0.



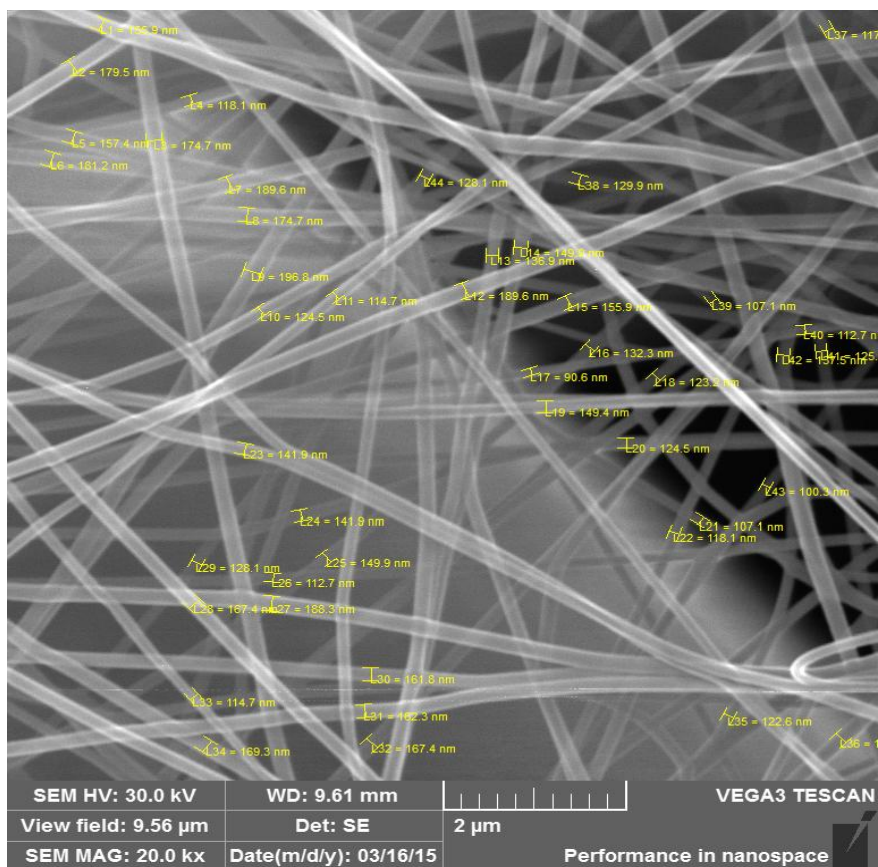
Příloha 4: Fotografie zobrazující kruhové vzorky založené na rounu Cello F800.



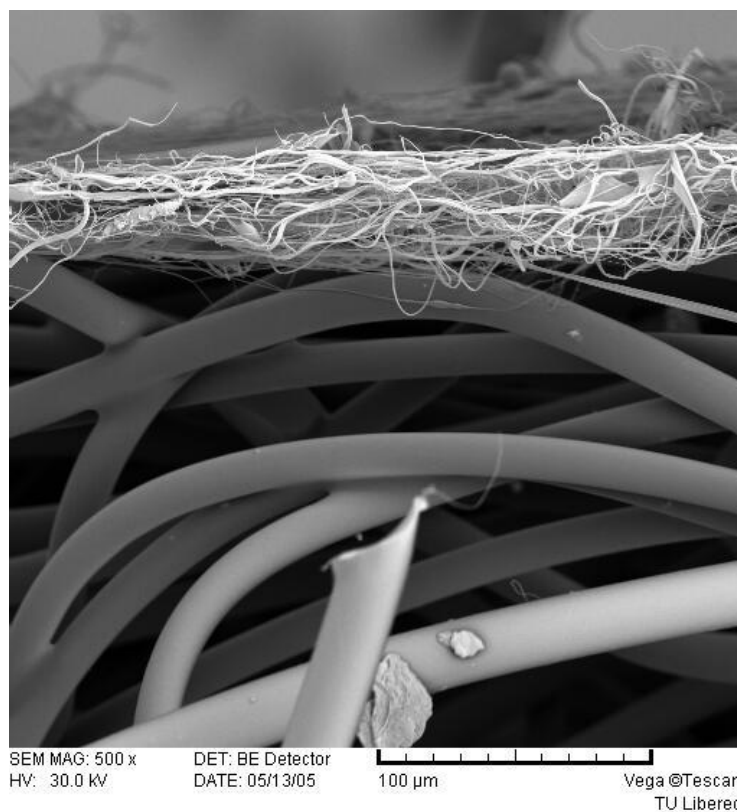
Příloha 5: Fotografie zobrazující kruhové vzorky sklovláknitých mřížek připravených pro měření v impedanční trubici..



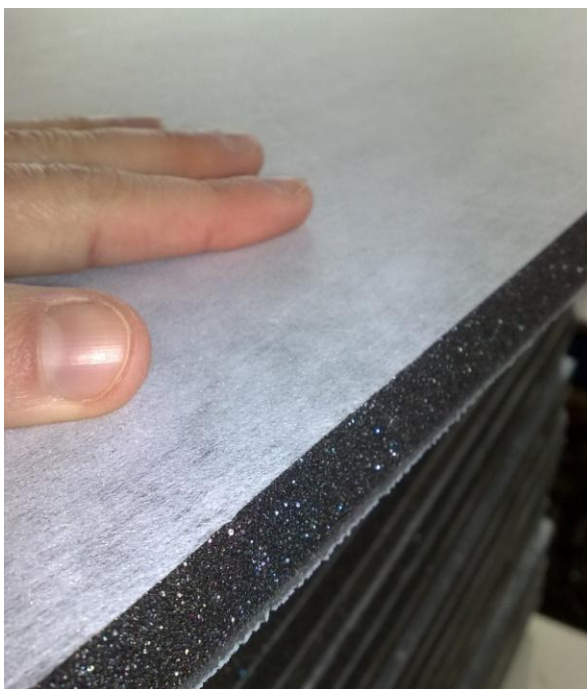
Příloha 6: Fotografie zobrazující akustické desky založené na MDF.



Příloha 7: Snímek z mikroskopu (SEM) zobrazující průměry vláken použité nanovlákněné rezonanční membrány z PA6.



Příloha 8: Snímek z mikroskopu (SEM) zobrazující řez nanovlákněnou rezonanční membránou z PA6.



Příloha 9: *Fotografie akustických panelů založených na PUR pěně Cello 461 sloužících k odhlučnění mechanických zařízení (vyrobena pro společnost OCHI-INŽENÝRING).*