

Studium vlivu pórovitosti na vibroakustické vlastnosti materiálů

Zbyněk Pavlát

Bakalářská práce
2011



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Zbyněk PAVLÁT**

Osobní číslo: **T07375**

Studijní program: **B 3909 Procesní inženýrství**

Studijní obor: **Technologická zařízení**

Téma práce: **Vliv pórovitosti materiálů na tlumení zvuku a vibrací**

Zásady pro vypracování:

Úvod

I. Teoretická část

- Popište veličiny charakterizující pórovitost materiálů, šíření a tlumení zvuku a vibrací a experimentální metody jejich měření

II. Experimentální část

- Specifikujte materiály pro měření, porovnejte materiály z hlediska pórovitosti, změřte frekvenční závislosti činitele zvukové pohltivosti a přenosového útlumu

- Zhodnoťte naměřené výsledky s patřičnými závěry

Závěr

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

- [1] JIŘÍČEK, O. Úvod do akustiky. 1. vyd. Praha : ČVUT, 2002. 146 s. ISBN 80-01-02460-1.
- [2] MIŠUN, V. Vibrace a hluk. 2. vyd. Brno : Nakladatelství CERM, 2005. 177 s. ISBN 80-214-3060-5.
- [3] NOVÝ, R. Hluk a chvění. 2. vyd. Praha : ČVUT, 2000. 389 s. ISBN 80-01-02246-3.
- [4] VAŇKOVÁ, M. Hluk, vibrace a ionizující záření v životním a pracovním prostředí, část I. 1. vyd. Brno : PC-DIR spol. s.r.o., 2005. 140 s. ISBN 80-214-0695-1.

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Martin Vašina, Ph.D.

Ústav fyziky a mater. inženýrství

Datum zadání bakalářské práce:

14. února 2011

Termín odevzdání bakalářské práce:

3. června 2011

Ve Zlíně dne 6. ledna 2011



doc. Ing. Petr Hlaváček, CSc.
děkan



doc. Ing. Miroslav Maňas, CSc.
ředitel ústavu

Příjmení a jméno: PAVLÁT Zbyněk

Obor: Tech. zařízení

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl jsem seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 18.5.2011

.....


¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevdělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

²⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacího zařízení (školní dílo).

³⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Cílem mé práce bylo změřit vibroakustické vlastnosti polyuretanových pěn. Byl měřen přenosový útlum, koeficient zvukové pohltivosti a také byla měřena pórovitost objemovou metodou. U měření přenosového útlumu se zjišťoval vliv tloušťky materiálu a zatížení působícího při měření na vzorek. U měření koeficientu zvukové pohltivosti se zjišťoval taktéž vliv tloušťky a vliv vzduchové mezery za vzorkem v době dopadu zvukového signálu na vzorek. U obou měření se vyhodnocoval vliv pórovitosti materiálu jak na schopnost tlumit tak na schopnost pohlcovat.

Klíčová slova: přenosový útlum, koeficient zvukové pohltivosti, pórovitost, polyuretan

ABSTRACT

The aims of my thesis is measurement vibroacoustic properties of polyurethans foam. I measured transmission damping, sound absorption coefficient and also was measured porosity by volume method. The influence of the thickness of material and measuring load acting on the sample were investigated by measuring of transmission damping. Also the influence of the thickness and the influence of the air gap behind the sample at the time of the incidence of audio signal on the sample were investigated by the measurement of sound absorption coefficient. The influence of the porosity of material was evaluated by both measurements on the ability to suppress the ability to absorp.

Keywords: transmission damping, sound absorption coefficient, porosity, polyurethans

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu panu Ing. Martinu Vašinovi, Ph.D. za odborné rady, ochotu a věcné připomínky při vypracování této mé bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval mé rodině za plnou podporu v době zpracování práce.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD.....	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 AKUSTIKA.....	12
1.1 MECHANICKÉ VIBRACE.....	12
1.1.1 Základní veličiny charakterizující vibrace	13
1.1.2 Efekt tlumení	14
1.1.3 Přenosový útlum.....	15
1.2 ZVUK A HLUK	16
1.2.1 Základní pojmy.....	16
1.2.2 Základní veličiny charakterizující zvuk a hluk	17
1.2.2.1 Vlnová délka	17
1.2.2.2 Akustický tlak	18
1.2.2.3 Rychlost šíření akustických vln	19
1.2.2.4 Akustická rychlost	22
1.2.2.5 Akustický výkon	22
1.2.2.6 Akustická intenzita	23
1.2.2.7 Akustická impedance prostředí.....	24
1.2.3 Decibelové veličiny	24
1.2.3.1 Hladina akustického výkonu	24
1.2.3.2 Hladina akustického tlaku.....	26
1.2.3.3 Hladina intenzity zvuku	28
1.2.3.4 Vzájemná souvislost decibelových veličin	28
1.2.4 Činitele zvuku	29
1.2.4.1 Odraz a průchod zvuku	30
1.2.4.2 Činitel zvukové pohltivosti.....	31
1.2.4.3 Spektra vibroakustických signálů	34
1.2.4.4 Oktávová frekvenční spektra	34
2 PÓROVITOST MATERIÁLŮ	37
2.1 ZÁKLADNÍ POJMY A VELIČINY CHARAKTERIZUJÍCÍ PÓROVITOST	37
2.1.1 Druhy pórovitosti	37
2.1.2 Měření pórovitosti	38
2.2 PÓROVITÉ MATERIÁLY.....	38
2.2.1 Vlastnosti pórovitých akustických materiálů	39
3 CÍLE PRÁCE	41
II PRAKTICKÁ ČÁST	42
4 VLASTNÍ MĚŘENÍ.....	43
4.1 VLASTNOSTI MĚŘENÝCH MATERIÁLŮ	43
4.2 PŘÍPRAVA VZORKŮ K MĚŘENÍ.....	43
4.2.1 Vzorky k měření přenosového útlumu	43
4.2.2 Vzorky k měření zvukové pohltivosti	44
4.2.3 Vzorky k měření objemové pórovitosti.....	45

4.3	METODIKA MĚŘENÍ.....	45
4.3.1	Popis měření přenosového útlumu	45
4.3.2	Popis měření zvukové pohltivosti	47
4.3.3	Popis měření objemové pórovitosti.....	49
4.4	VYHODNOCOVÁNÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ	50
4.4.1	Výsledné charakteristiky přenosového útlumu	50
4.4.2	Výsledné charakteristiky zvukové pohltivosti.....	54
4.4.3	Výsledné hodnoty pórovitosti	58
5	DISKUZE VÝSLEDKŮ	59
5.1	PŘENOSOVÝ ÚTLUM.....	59
5.1.1	Vliv tloušťky a zatížení vzorku	59
5.1.2	Vliv pórovitosti	59
5.2	KOEFICIENT ZVUKOVÉ POHLTIVOSTI.....	61
5.2.1	Vliv tloušťky vzorku a vzduchové mezery za vzorkem	61
5.2.2	Vliv pórovitosti	61
	ZÁVĚR	64
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	66
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	67
	SEZNAM OBRÁZKŮ	69
	SEZNAM TABULEK.....	72
	SEZNAM PŘÍLOH.....	73

ÚVOD

Zvuk a jeho o poznání nepříjemnější verze hluk jsou s mechanickými vibracemi již takřka každodenním koloritem člověka žijícího ve 21. století. Doba tomu vyloženě přeje, kde lze jen částečně nahradit člověka, pracují stroje. Přináší to pozitivum v podobě ušetření manuální práce, ale výrazné negativum jsou právě dopady působení hluku a vibrací na člověka a také na životní prostředí. U některých strojních zařízení je vyloženě požadavkem, aby vibrace vznikaly (např. vibrační silniční válce), ale většinou je předmětem zájmu jejich potlačení. Je časté, že kde je hluk, vznikají také vibrace. Proto jsou v různých zemích po celém světě v zákoně uvedena různá hluková kritéria, aby se nežádoucím vlivu alespoň částečně zabránilo. Vznikají protihlukové stěny kolem cest, navrhuje se konstrukce, které by více tlumily a v neposlední řadě se využívají materiály, které mají tlumící a pohlcující vlastnosti. Koncertní síně a sály, ale také výrobní haly musí mít nějak zabezpečen vliv hluku a vibrací na okolí. V poslední době se technici snaží zdokonalit výrobu strojních zařízení, aby byla co nejpřesnější a nejdokonalejší, tímto se dá docílit zefektivnění výroby, ke které tyto strojní součásti slouží, ale také velkého snížení rušivých vlivů, jakými hluk a vibrace jsou. Řešení se hledá těžce, ovšem neúčinnější je vyřešit problém hned v zárodku od zdroje, který vydává hluk a vibrace, což je u výrobních hal dobrá volba, ale ne vždy neekonomičtější, proto bývají pracovníci ve výrobních halách vybavení ochrannými pomůckami (např. sluchátka), což je pro firmu finančně únosnější. Naopak v koncertních sálech je vhodnější pokrýt stěny sálu pohltivými materiály, jelikož za ochranná sluchátka proti hluku by platící posluchači vděční nebyli.

Právě materiály, které mají sloužit k tlumení těchto jevů a zkoumáním jejich vibroakustických vlastností se budu v této práci zabývat. Jako tlumící a pohlcující materiály se velmi dobře osvědčily pórovité materiály. Tyto materiály navíc splňují i kritérium, že jsou relativně levné a snadno dostupné. Ovšem musí se brát samozřejmě v úvahu, že u konstrukcí nelze používat pouze pórovité materiály, ale musí se kombinovat s materiály konstrukčními, proto je velmi výhodné znát jejich vibroakustické vlastnosti a tím co nejlépe zefektivnit výrobu těchto tlumících a pohlcujících konstrukcí.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 AKUSTIKA

Akustika je obor zabývající se vznikem, šířením a působením zvuku. V obecnější rovině je třeba nahradit zvuk libovolným mechanickým vlněním. [1]

Akustika jako věda se začala vyvíjet v devatenáctém století. Zvuky, kterým byla tehdy věnována pozornost, byly zvuky příjemné a žádoucí. Studovali se např. zvuky generované vibrujícími strunami hudebních nástrojů a varhanními píšťalami. [5]

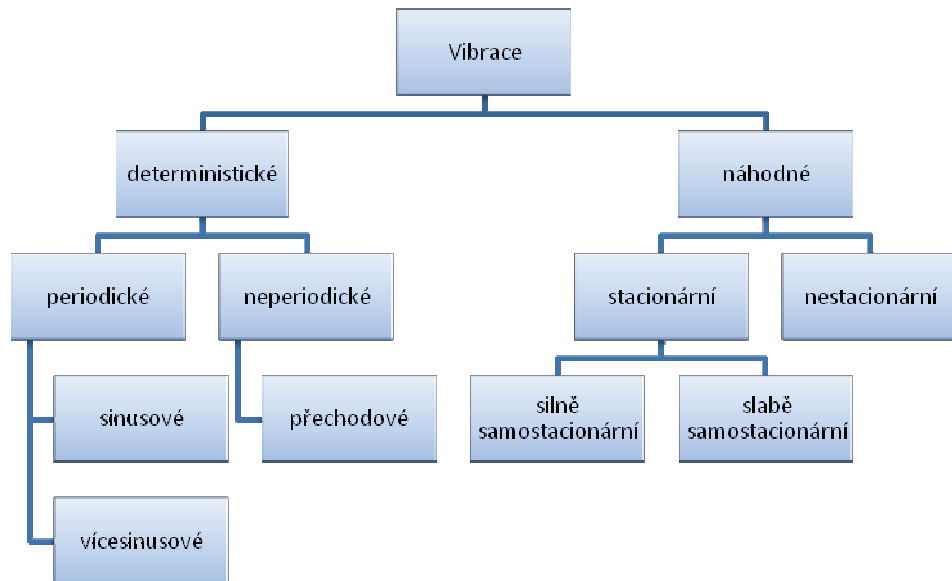
V dnešní době je objektem inženýrského zájmu sledování všech zvuků, které jsou většinou nežádoucími akustickými signály, jež se nazývají hlukem. V mnoha státech po celém světě se stále více rozvíjí výzkumné programy, které sledují zvuky a ty jsou vyhodnocovány stroji různých typů.

1.1 Mechanické vibrace

Jednou z oblastí, kam se zaměřuje úsilí mnoha států, je snížení mechanického kmitání působícího na člověka. Aby bylo možno provést účinná opatření, je nutno mechanické kmitání nejdříve změřit, měření vyhodnotit a technicky je popsat. Mechanické kmitání, s nímž se běžně setkáváme, je v převážné míře vyvozováno různými stroji a mechanismy. Nežádoucí mechanické kmitání však působí nejen na člověka, ale i na předměty. Poněvadž má vliv i na životnost a spolehlivost různých mechanismů a strojů, je nutno sledovat je i z tohoto hlediska. Mechanické kmitání je však také užitečné a žádoucí. U mnohých strojů je určitý druh a velikost mechanického kmitání bezpodmínečně nutný pro správnou pracovní funkci a výkonnost stroje. V těchto případech je opět nutné mechanické kmitání změřit a vyhodnotit. [8]

Pod pojmem vibrace chápeme kmitání (oscilace) mechanické soustavy. Jednoduché kmitání se definuje amplitudou a frekvencí. Podle nové názvoslovné normy ČSN ISO 2041 vibrace představují pohyb pružného tělesa nebo prostředí, jehož jednotlivé body kmitají kolem své rovnovážné polohy. Dříve se k popisu kmitání lidského organismu v rozsahu slyšitelných kmitočtů používal také název chvění. Velikost vibrací může být vyjádřena výchylkou, nebo jejími časovými derivacemi, tj. rychlostí, zrychlením nebo ryvem kmitavého pohybu (ryv: vektor, udávající časovou derivaci zrychlení). Každá z těchto veličin může být zvolena za určující veličinu vibrací. Z praktických důvodů a dostupnosti široké

škály akcelerometrů se nyní nejčastěji používá zrychlení, podle časového průběhu se vibrace rozdělují do dvou hlavních kategorií, znázorněných v (obr. 1). [7]



Obr. 1. Druhy vibrací dle časového průběhu.

Deterministické vibrace jsou takové vibrace, u kterých je okamžitá hodnota vibrací v daném čase určena přesně jejich časovým průběhem (tj. záznamem jejich okamžitých hodnot), zaznamenaným dříve, než je daný časový okamžik. Náhodné vibrace jsou takové vibrace, pro které nemůže být okamžitá hodnota vibrací v daném čase určena z jejich časového průběhu. [7]

1.1.1 Základní veličiny charakterizující vibrace

U sledování kmitavého pohybu hmotného bodu v prostředí, se u něj může v časovém okamžiku určit jeho výchylka z rovnovážné polohy, rychlost kmitání nebo také zrychlení tohoto pohybu. Tyto tři veličiny jsou navzájem závislé, jak ukazují následující vztahy:

Rychlost kmitání v definuje vztah:

$$v = \frac{\partial y}{\partial \tau} \quad (1)$$

Zrychlení kmitání a se určí pomocí první derivace rychlosti dle času vztahem:

$$a = \frac{\partial v}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 y}{\partial \tau^2} \quad (2)$$

Výchylka kmitajícího bodu z rovnovážné polohy y je dána vztahem:

$$y = y_0 \sin(\omega\tau) \quad (3)$$

Po provedení první a druhé derivace dle času vzorce (3), se dostanou výrazy popisující vzájemné závislosti základních veličin kmitání:

$$v = \omega y_0 \cos(\omega\tau) \quad (4)$$

$$a = -\omega^2 y_0 \sin(\omega\tau) = -\omega^2 y \quad (5)$$

Pro amplitudy rychlosti kmitání v_0 a zrychlení a_0 existují vztahy:

$$v_0 = y_0 \omega \quad (6)$$

$$a_0 = y_0 \omega^2 = v_0 \omega \quad (7)$$

Dle norem se doporučuje používat efektivních hodnot veličin charakterizujících kmitání, pro něž jsou definovány tyto vztahy:

$$v_{ef} = \frac{v_0}{\sqrt{2}} = \frac{y_0}{\sqrt{2}} \omega = y_{ef} \omega \quad (8)$$

$$a_{ef} = \frac{a_0}{\sqrt{2}} = \frac{v_0}{\sqrt{2}} \omega = v_{ef} \omega = y_{ef} \omega^2 \quad (9)$$

1.1.2 Efekt tlumení

Dynamické odezvy a charakteristiky akustických přenosů struktur jsou určeny v podstatě třemi parametry:

- vlastními frekvencemi
- tvary kmitů
- modálním tlumením

Tlumení způsobuje disipaci energie systému, což znamená přeměnu mechanické energie při chvění struktury na jinou formu energie, nejčastěji se jedná o tepelnou. Tento děj je nevratný.

Tlumení struktur dosahuje nejvýraznějšího efektu při rezonanci systému nebo v jeho blízkém okolí. Mimo rezonance se tlumení u mechanických struktur výrazně neuplatňuje. Při buzení se budící silou dodává energie do struktury, čímž narůstá amplituda kmitavého pohybu až na hodnotu, při které dochází k rovnováze mezi energií dodávanou a energií disipovanou (ztracenou) v důsledku tlumení. Tlumení u různých materiálů se mění v poměrně širokých mezích a také se mění u dynamických odezev jednotlivých rezonančních modů. [3]

Zvýšení vnitřního tlumení materiálu má za následek [3]:

- rychlejší zánik volných kmitů (rychlejší doznívání)
- rychlejší úbytek volně se šířících strukturálních vln v konstrukci se vzdáleností od zdroje vibrací; tím se zmenšuje plocha účinně vyzařující akustickou energii
- snížením amplitud vibrací v rezonanci
- snížením vyzařované akustické energie i mimo rezonance struktury
- snížením hodnoty nárůstu vibrací a tím i hluku při přechodu rezonančních oblastí
- snížením amplitud u samobuzených kmitů

1.1.3 Přenosový útlum

Přenosový útlum je decibelová veličina, která charakterizuje materiály z hlediska jejich schopnosti tlumit mechanické vibrace. [11]

$$D_p = 20 \cdot \log \frac{|v_1|}{|v_2|} = 20 \cdot \log \frac{|F_1|}{|F_2|} \quad (10)$$

V případě harmonického sinusového budícího signálu lze rovnici pro přenosový útlum vyjádřit pomocí vztahu:

$$D_p = 20 \cdot \log \frac{|a_1|}{|a_2|} \quad (11)$$

Z hlediska velikosti přenosového útlumu mohou nastat při určité frekvenci kmitání tři případy:

- $D_p > 0$, amplituda na výstupu je menší než amplituda na vstupu, tím dochází k tlumení mechanických vibrací

- $D_p = 0$, amplituda na výstupu se rovná amplitudě na vstupu, tím nedochází k žádnému přenosovému tlumení
- $D_p < 0$, amplituda na výstupu je větší než amplitudou na vstupu, tím dochází k rezonanci

Přenosový útlum závisí kromě typu materiálu zejména na frekvenci mechanického kmitání, dále na tloušťce materiálu, velikosti setrvačné zátěže, struktuře materiálu (např. objemová pórovitost, velikost a tvar pórů apod.), teplotě aj. [11]

1.2 Zvuk a hluk

1.2.1 Základní pojmy

Zvukem se rozumí každé mechanické vlnění, které se šíří od zdroje ve vlnoplochách jakýmkoliv prostředím, fázovou rychlostí, která je závislá na fyzikálních vlastnostech určitého prostředí. Zvuk vznikne rozkmitáním částic pružného prostředí, částice na sebe vzájemně působí elastickými silami. Zvuk je zvláštním případem elastických vln. Rozruch se šíří ze zdroje fázovou rychlostí, prostředím, kterým se vzduch šíří se ale nepohybuje, nýbrž částice prostředí kmitají kolem rovnovážných poloh. Šíření zvuku je spojeno s přenosem energie.

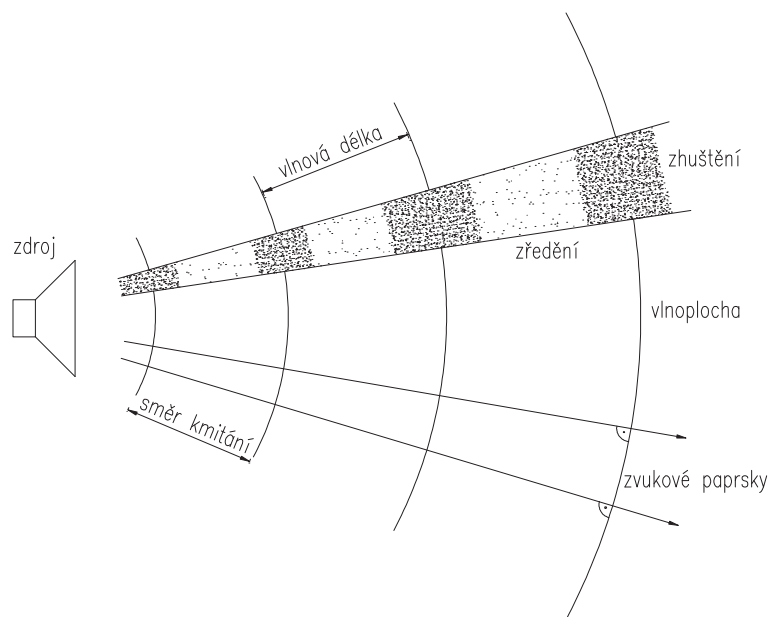
Pokud se frekvence zvuku nachází v rozsahu slyšitelnosti lidského ucha, tj. od 16 Hz do 20 kHz, vnímáme zvuk sluchem. Akustické vlnění o kmitočtu vyšším než 20 kHz se nazývá ultrazvuk a akustické vlnění o kmitočtu nižším než 16 Hz se nazývá infrazvuk.

Pokud se zvuk mění z příjemného na nežádoucí nebo rušivý a je-li nepříjemný, označuje se jako hluk. Hlukem se může nazvat i čistý tón, častěji se však jedná o směs zvuků o různých frekvencích.

Akustické vlnění postupuje od místa rozruchu na všechny strany. Je-li prostředí izotropní, šíří se rozruch všemi směry stejně rychle. Místa, do nichž dospělo vlnění ze zdroje za tutéž dobu, leží na spojitě ploše, tzv. vlnoploše. Vlnoplochou rozumíme geometrické místo bodů, které kmitají v daném okamžiku se stejnou fází. V obecných případech mohou mít vlnoplochy libovolný tvar. Zvlášť důležité jsou [8]:

- vlnoplochy kulové – jedná se o vlnoplochy, které vznikají z bodového zdroje a pokud je zdroj rozruchu menší než vlnová délka vzniklého vlnění
- vlnoplochy rovinné – jedná se o vlnoplochy, které vznikají z plošných zdrojů a pokud je zdroj rozruchu o mnoho větší než vlnová délka vzniklého vlnění

Kulové a rovinné vlny se vyskytují pouze při šíření vlnění prostorem bez překážek, tj. volným akustickým polem. [8]



Obr. 2. Šíření zvukového vlnění od zdroje. [9]

1.2.2 Základní veličiny charakterizující zvuk a hluk

1.2.2.1 Vlnová délka

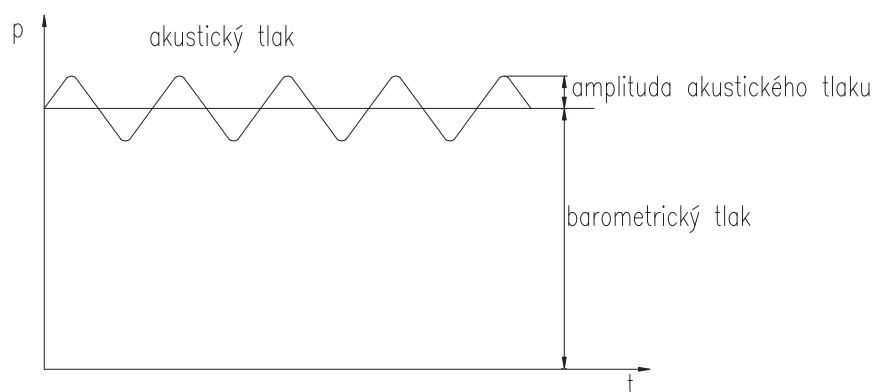
Vlnová délka je vzdálenost dvou po sobě časově následujících např. maxim kmitů vlny u sledovaného vlnění. Obecně je to vzdálenost mezi nejbližšími vlnoplochami se stejnými akustickými stavy kmitajících částic. Lze ji také definovat jako vzdálenost, kterou urazí zvuková vlna za dobu jednoho kmitu, tedy periodu T . [3]

Pokud se akustická vlna od zdroje šíří rychlostí zvuku c a vlnění je s frekvencí f , pak pro vlnovou délku platí vztah:

$$\lambda = cT = \frac{c}{f} \quad (12)$$

1.2.2.2 Akustický tlak

Zhušťování a zředování kmitajících částic prostředí odpovídá zvýšení či snížení tlaku v plynech a kapalinách. To znamená, že celkový tlak v daném prostředí se při šíření vlnění mění, tedy kolísá okolo původního statického nebo barometrického tlaku v ovzduší. [3]



Obr. 3. Znárodnění průběhu akustického tlaku.

Za akustický tlak p [Pa] se považuje odchylka celkového tlaku vzduchu nebo i kapaliny od tlaku, které vzniká při statickém vlnění v daném prostředí. Akustický tlak je nasuperponován na barometrický tlak p_b .

Akustický tlak při vlnění o frekvenci f a fázovém posuvu φ má tvar harmonické funkce

$$p_c = p_b + p(t) \quad (13)$$

kde

$$p(t) = p_0 \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi) = p_0 \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot t + \varphi) \quad (14)$$

Efektivní hodnota akustického tlaku:

$$p_{ef} = \frac{p_0}{\sqrt{2}} \quad (15)$$

Protože lidské ucho je citlivé na tlak vzduchu obecně, je samozřejmě citlivé i na akustický tlak. Z tohoto důvodu je akustický tlak jednou ze dvou akustických veličin, které se měří v inženýrské akustice. [3]

1.2.2.3 Rychlost šíření akustických vln

V kapalinách a plynech se šíří pouze vlnění podélné, které je provázeno zhušťováním a zředováním částic prostředí. V pevných látkách vzniká i vlnění příčné a ohybové. Všechna tato vlnění se šíří rychlostí, kterou označujeme [3]:

c_L - pro vlnění podélné

c_T - pro vlnění příčné

c_B - pro vlnění ohybové

Rychlost šíření vlnění v pevných látkách:

Obecně určit rychlost šíření akustického vlnění v pevných látkách je složité. Do vztahů se totiž musí zahrnout vliv kontrakce materiálu ve formě Poissonova poměru.

$$\mu = \frac{E - G}{2G} \quad (16)$$

Pak lze odvodit vztahy pro:

a) podélné vlny

- v tenkých tyčích

$$c_L = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (17)$$

- v desce

$$c_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1}{1 - \mu^2}} \quad (18)$$

Tab. 1. Rychlost šíření podélných vln v různých látkách. [5]

materiál	hustota ρ [kg/m ³]	modul pružnosti E [N/m ²]	rychlost zvuku c [m/s]	akustická impedance Z [Ns/m ³]
vzduch 20°C	1,21		344	4,14E+02
voda 13°C	1000		1440	5,12E+02
pryž měkká	900	4,4E+04	70	6,3E+04
pryž tvrdá	1100	2,2E+09	1400	1,5E+06
korek	250	6,3E+07	500	1,3E+05
dřevo bukové	650	1,0E+10	3900	2,5E+06
hliník	2700	6,2E+10	4800	1,3E+07
ocel	7850	2,6E+11	5750	4,5E+07
olovo	11400	2,3E+10	1410	1,6E+07
pórobeton	900	2,9E+09	1800	1,6E+06
azbestocement	1950	1,8E+10	3040	5,9E+06
beton	2300	2,2E+10	3100	7,1E+06
cihly	2000	1,6E+10	2800	5,6E+06
sádra	1050	4,4E+09	2040	2,1E+06
sklo	2700	7,5E+10	5270	1,4E+07
překližka	700	9,3E+09	3645	2,6E+06
sololit	1000	4,7E+09	2170	2,2E+06
polystyren	13	1,3E+06	315	4,1E+03
novodur	1450	1,0E+09	850	4,8E+05
silon	1150	1,8E+09	1250	1,44E+06
plexisklo	1200	3,0E+09	1580	1,9E+06
epoxy 2000	1200	3,5E+09	1700	2,0E+06

b) příčné vlny

$$c_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (19)$$

Poměr rychlostí podélných a příčných vln je pro daný materiál konstantní:

$$\frac{c_L}{c_T} = \sqrt{\frac{2(1+\mu)}{1-\mu^2}} \quad (20)$$

Rychlost šíření vlnění nezávisí na jeho kmitočtu.

$$c_T = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1}{2(1+\rho)}} \quad (21)$$

Pro výpočet rychlostí zvuku je nutno ovšem použít dynamické moduly pružnosti příslušných materiálů a které mohou být (5 až 20)krát vyšší než odpovídající statistické hodnoty. [3]

c) ohybové vlny

Vzniknou ze spojení podélných a příčných vln, nejčastěji u desek a tyčí, šíří se rychlostí:

$$c_B = \sqrt{2\pi f} \cdot \sqrt[4]{\frac{4EI}{m}} \quad (22)$$

Pro materiály obdélníkového průřezu lze rovnici vyjádřit:

$$c_B = \sqrt{1,8c_L \cdot h \cdot f} \quad (23)$$

Rychlost šíření ohybových vln je závislá na:

- materiálu
- rozměru tyče
- frekvenci vlnění šířeného v tyči

Z hlediska šíření a vyzařování zvuku je ohybové vlnění nejnebezpečnější, neboť při něm dochází k výraznému přenosu energie z kmitajícího povrchu tělesa (např. stroje) do okolního vzdušného nebo kapalného prostředí. [3]

Podmínka vzniku vlnění:

Hlavní podmínkou pro vznik vlnění v určitém materiálu je, aby jeho nejdelší rozměr l [m] byl minimálně roven poloviční délce příslušné vlny. [3]

Pro podélné vlny musí platit:

$$l \geq \frac{\lambda}{2} = \frac{c_L}{2f} \quad (24)$$

U běžných konstrukčních materiálů jsou rychlosti podélných vln c_L vysoké, proto u strojů obyčejných rozměrů nevzniká podélné vlnění. Nebezpečnější je proto z hlediska hluku vlnění ohybové.

Vlnová délka ohybových vln se vypočte ze vztahu:

$$\lambda_B = \frac{c_B}{f} = \sqrt{\frac{1,8 \cdot c_L \cdot h}{f}} \quad (25)$$

Tab. 2. Délky podélných a ohybových vln. [3]

frekvence f [Hz]	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
materiál	délky podélných vln [m] v tyčích z vybraných materiálů								
ocel	182	91	46	23	11,5	5,7	2,88	1,44	0,72
hliník	152	76	38	19	9,6	4,8	2,4	1,2	0,6
olovo	45	22	11	5,6	2,8	1,4	0,7	0,35	0,17
beton	98	49	24,8	12,4	6,2	3,1	1,55	0,77	0,39
	délky ohybových vln [m] ocelové tyče, $h = 10$ mm								
	1,78	1,25	0,89	0,63	0,44	0,33	0,22	0,16	0,11

1.2.2.4 Akustická rychlost

Rychlost s jakou kmitají jednotlivé částičky prostředí, kterým se šíří akustická vlna, se nazývá akustická rychlost v [m/s]. Vztah pro výpočet se získá snadno, provede-li se první parciální derivace akustické výchylky dle času.

$$v = \frac{\partial u}{\partial \tau} = \omega \cdot u_0 \cdot \cos \omega \left(\tau \mp \frac{x}{c} \right) \quad (26)$$

Součin amplitudy výchylky a kruhové frekvence dává amplitudu akustické rychlosti.

$$v_0 = \omega \cdot u_0 \quad (27)$$

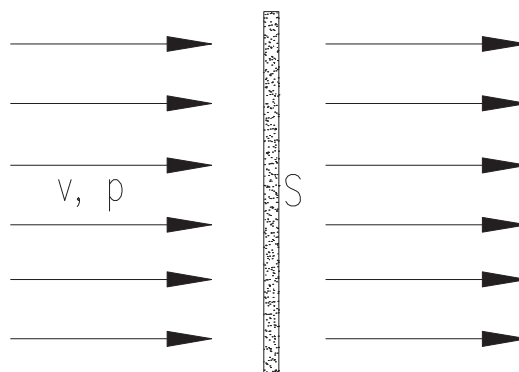
Akustická rychlost je jednou z nejdůležitějších akustických veličin a je jí nutno přísně odlišovat od rychlosti šíření zvuku. Její velikost je o mnoho řádů menší než rychlost šíření zvuku. [5]

1.2.2.5 Akustický výkon

Množství akustické energie, procházející za jednotku času myšlenou prostorovou plochou, se nazývá akustickým výkonem P [W]. [3]

$$P = F \bullet v = F \cdot v = p \cdot v \cdot S \quad (28)$$

Vztah platí pro rovinnou akustickou vlnu, kde jsou ve fázi akustický tlak a akustická rychlost.



Obr. 4. Průchod vlnění plochou. [3]

Každý zdroj hluku je definován akustickým výkonem jakožto základním parametrem akustického výstupu. Je výhodnější definovat zdroj jeho akustickým výkonem než akustickým tlakem. Akustický tlak totiž závisí na vnějších faktorech, mezi něž patří např. vzdálenost od zdroje, na orientaci příjemce, na teplotním a rychlostním gradientu prostředí apod. Akustický výkon zdroje je proto důležitým absolutním parametrem např. hodnocení a srovnávání akustických zdrojů. [3]

1.2.2.6 Akustická intenzita

Akustická intenzita je vektorová veličina, popisující množství a směr toku akustické energie v daném místě prostředí. Vektor akustické intenzity je časově průměrovaný součin okamžitého akustického tlaku $p(t)$ a odpovídající okamžité rychlosti $v(t)$ kmitajících částic prostředí v témže místě. [3]

$$I = \overline{p(t) \cdot v(t)} \quad (29)$$

nebo ve směru r pak je

$$I_r = \overline{p(t) \cdot v_r(t)} \quad (30)$$

Důležitou vlastností akustické intenzity je její směrovost, protože je vektorovou veličinou, takže určuje směr šíření akustického vlnění. Kolmo na směr vlnění je akustická intenzita rovna nule. Tuto vlastnost nemá akustický tlak, protože je skalární veličina.

Akustickou intenzitu pro rovinnou vlnu lze rovněž vyjádřit součinem efektivních hodnot akustického tlaku a akustické rychlosti. [3]

$$I = p_{ef} \cdot v_{ef} = \frac{p_{ef}^2}{\rho \cdot c} \quad (31)$$

1.2.2.7 Akustická impedance prostředí

Akustická impedance se dá charakterizovat jako vlnový odpor určitého akustického prostředí.

$$Z = \rho \cdot c = \frac{p}{v} \quad (32)$$

Pro rovinnou akustickou vlnu, u které je poměr mezi akustickým tlakem a akustickou intenzitou konstantní, lze akustickou impedanci vyjádřit vztahem [3]:

$$\tilde{Z} = \frac{\tilde{p}_0}{\tilde{v}_0} \quad (33)$$

kde jsou \tilde{p}_0 , \tilde{v}_0 komplexní amplitudy příslušných akustických veličin

V obecném případě se tedy dá hovořit o akustické impedanci jako o komplexní veličině.

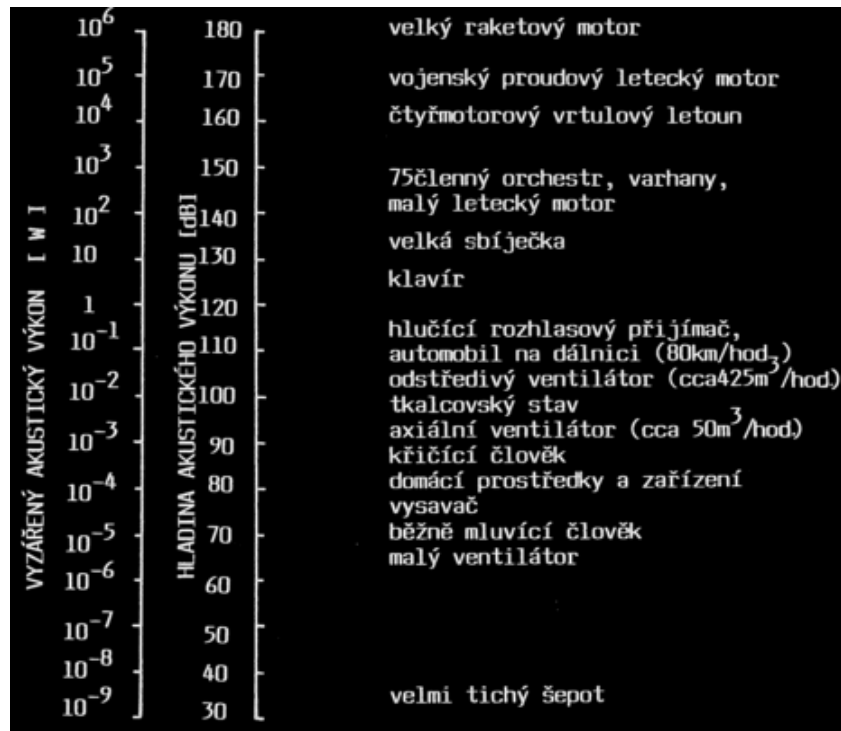
1.2.3 Decibelové veličiny

V praxi se základní akustické veličiny (akustický tlak, akustická rychlost, akustická intenzita, akustický výkon apod.) běžně mění o mnoho řádů. V technické akustice byl zaveden pojem „hladin“ jednotlivých akustických veličin, jejichž jednotkou je „decibel“ [dB]. [5]

1.2.3.1 Hladina akustického výkonu

Akustický výkon, který by se dal přirovnat k slabému šepotu, představuje hodnotu cca $1 \cdot 10^{-9}$ W a křikem se naopak může vyzářit do prostoru akustický výkon asi $1 \cdot 10^{-3}$ W, velký symfonický orchestr vydá akustický výkon 10 W až 20 W a velké proudové letadlo vyzářuje již 10^5 W. V takto širokých rozsazích se dají nalézt i jiné akustické veličiny.

Při použití decibelových stupnic je důležité stanovit referenční hodnotu. Např. mezi referenčními hodnotami 1 W a 10^{-12} W je v decibelových stupnicích konstantní rozdíl 120 dB . [5]



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

Hladina akustického výkonu L_w [dB] je definována vztahem:

$$L_w = 10 \log \frac{W}{W_0} \quad (34)$$

Každému zvýšení akustického výkonu o jeden řád odpovídá zvýšení hladiny akustického výkonu o 10 dB . [5]

Tab. 3. Lineární a decibelová stupnice pro akustický výkon. [5]

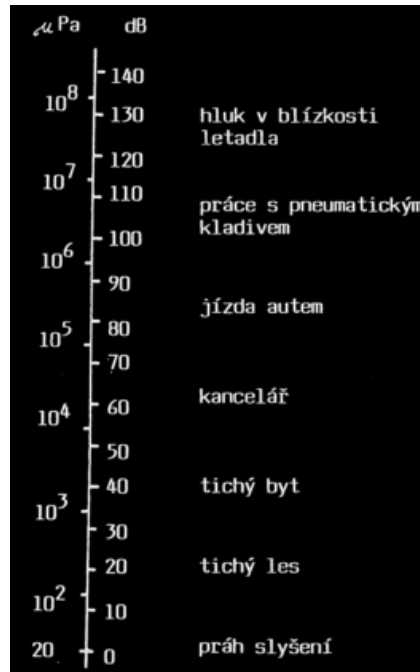
Vyzařovaný akustický výkon W [W]		Hladina akustického výkonu L_w [dB]	
Normální zápis	Ekvivalentní exponenciální notace	vzhledem k $W_0 = 1 \text{ W}$	vzhledem k $W_0 = 10^{-12} \text{ W}$
100 000	1000000	50	170
10 000	100000	40	160
1 000	10000	30	150
100	1000	20	140
10	100	10	130
1	10	0	120
0,1	0,1	-10	110
0,01	0,01	-20	100
0,001	0,001	-30	90
0,0001	0,0001	-40	80
0,00001	0,00001	-50	70
0,000001	0,000001	-60	60
0,0000001	0,0000001	-70	50
0,00000001	0,00000001	-80	40
0,000000001	0,000000001	-90	30

1.2.3.2 Hladina akustického tlaku

Nejslabší zvukový signál, který je schopen zaznamenat nepoškozený lidský sluch, odpovídá dvaceti miliontinám základní jednotky tlaku 1 Pa, což je akustický tlak $20 \mu\text{Pa}$. Tato hodnota je $5 \cdot 10^9$ krát menší než normální barometrický tlak. Změna tlaku o $20 \mu\text{Pa}$ je tak malá, že vyvolává vychýlení membrány lidského sluchového orgánu o hodnotu menší než je průměr jednoho jediného atomu. Na druhé straně je překvapivé, že lidské ucho je schopno snášet akustické tlaky více než 10^6 krát větší. Navíc lidský sluchový orgán rozlišuje tzv. barvy zvuku, což souvisí se schopností rozpoznávat zvuky různých kmitočtů. Z uvedeného vyplývá, že vyjadřování hodnot akustického tlaku v [Pa] by bylo velice nepřehledné a vedlo by k častým chybám. Proto i pro akustický tlak byla zavedena příslušná hladina, kterou je nutno vztahovat vždy k určitému kmitočtu, nebo pásmu kmitočtů. Jinak nemá pouhý údaj hladiny akustického tlaku význam, neboť nevypovídá nic o poloze signálu na kmitočtové ose. [5]

Hladina akustického tlaku L_p [dB] je definována vztahem:

$$L_p = 20 \log \frac{P}{P_0} \quad (35)$$



Obr. 6. Hladina akustického tlaku v různém prostředí. [5]

Akustický výkon nebo akustický tlak jsou veličiny, které úzce souvisejí s teorií vlnění. Každému vlnění odpovídá určitá frekvence nebo frekvenční rozsah. Je proto nezbytné uvádět u hladin akustického výkonu nebo hladin akustického tlaku kmitočet, resp. rozsah kmitočtů, ke kterému daná hodnota přísluší. [5]

- a) **Celková hladina akustického tlaku** sděluje jak je velký celkový akustický tlak, jež je vlněním vyvoláván celkem, v celém slyšitelném frekvenčním rozsahu
- b) **Hladina akustického tlaku v oktávovém pásmu** sděluje, jaký akustický tlak je soustředěn ve frekvenčním pásmu o šíři jedné oktávy o určitém středním kmitočtu f_m .

1.2.3.3 Hladina intenzity zvuku

Hladina intenzity zvuku L_I [dB] je definována vztahem:

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad (36)$$

1.2.3.4 Vzájemná souvislost decibelových veličin

Dosažením vztahu (31) mezi intenzitou zvuku a akustickým tlakem do definičního vzorce hladiny intenzity zvuku lze dostat vztah [5]:

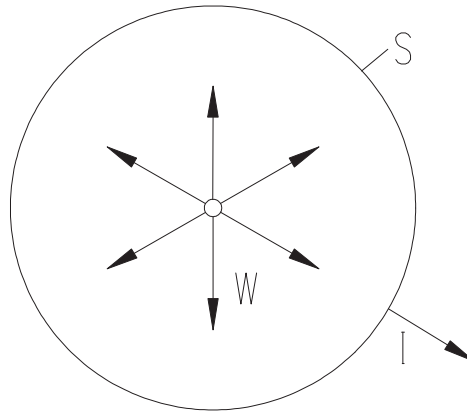
$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0} = 10 \log \frac{\frac{p^2}{\rho \cdot c}}{\frac{p_0^2}{\rho_0 \cdot c_0}} = 20 \log \frac{p}{p_0} + 10 \log \frac{\rho_0 \cdot c_0}{\rho \cdot c} \quad (37)$$

Při běžných klimatických podmínkách má poslední člen rovnic hodnotu $-0,2$ dB, takže se vztah může zjednodušit do tvaru:

$$L_I = L_p - 0,2 \cong L_p \quad (38)$$

Tento vztah se velmi používá v technické akustice, protože vyjadřuje na základě měření hladiny akustického tlaku přímo hladinu intenzity zvuku. Rozdíl $-0,2$ dB je možné zanedbat, aniž by se nějak výrazně ovlivnila přesnost akustických výpočtů nebo měření zvuku.

Hladina akustického výkonu je také vyjadřována v decibelech, avšak je nutné ji odlišovat od ostatních hladin, zejména od hladiny akustického tlaku a hladiny intenzity zvuku. Pro zdroje, které vyzařují akustickou energii rovnoměrně do všech směrů, se odvozuje závislost mezi hladinou akustického výkonu a hladinou akustického tlaku. Obklopí-li se zdroj akustické energie měřicí plochou S [m²], může se na ní měřením zjistit intenzita zvuku. [5]



Obr. 7. Zdroj zvuku vyzařující do všech směrů. [5]

Akustický výkon vyzářený zdrojem projde měřící plochou, tedy platí:

$$W = I \cdot S \quad (39)$$

Pokud se vztah (39) dosadí do definičního vzorce hladiny akustického výkonu, vznikne rovnice:

$$L_W = 10 \log \frac{W}{W_0} = 10 \log \frac{I \cdot S}{I_0 \cdot S_0} \quad (40)$$

Pokud se ve druhém členu zvolí referenční plocha $S_0 = 1 \text{ m}^2$, konečný výraz bude mít tvar:

$$L_W = L_p + 10 \log S \quad (41)$$

Pro přibližně malý zdroj zvuku, vyzařující rovnoměrně do všech směrů, lze konstatovat, že ve vzdálenosti 1 m od středu bodového zdroje zvuku činí rozdíl mezi hladinou akustického tlaku a hladinou akustického výkonu přibližně 10 dB. [5]

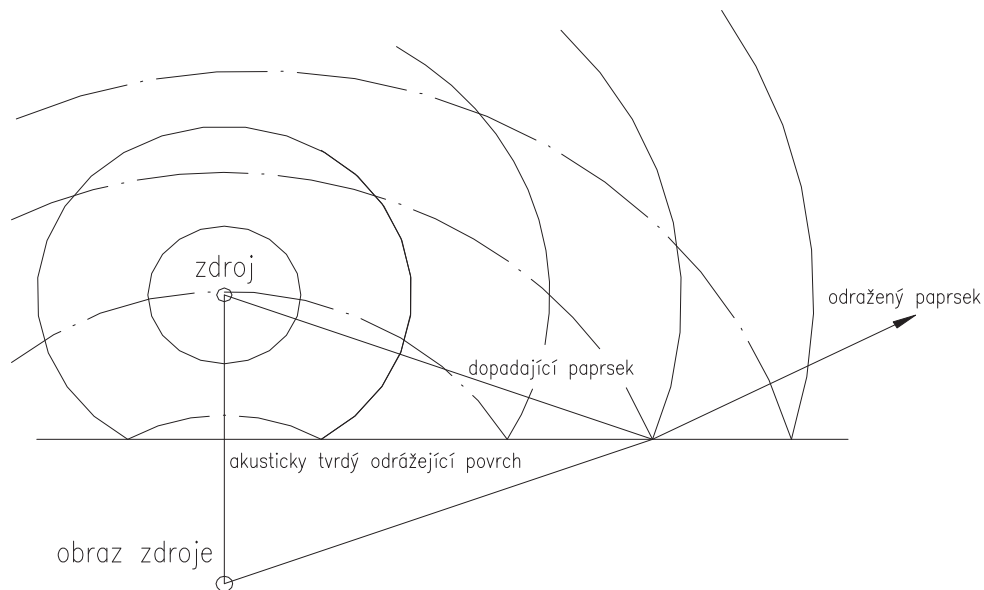
1.2.4 Činitele zvuku

Zvuk se šíří vlněním částic příslušného akustického prostředí. Vedle poklesu akustické intenzity se vzdáleností je akustické vlnění, šířící se v reálném prostředí např. v atmosféře, ovlivňováno řadou dalších faktorů. Například rychlostní a teplotní gradienty akustického prostředí mění směr vlnění, její turbulence akustické pole deformuje a viskozita tekutiny způsobuje pohlcování části akustické energie, tedy absorpci vlnění. Absorpce zvuku je výraznější pro vysoké frekvence než pro nízké. Takže atmosféra působí jako nízko pásmová

propust, zeslabující vysoké frekvence zvuku. Atmosféra tedy upravuje spektrum hluku stejně, jako snižuje jeho intenzitu a pozměňuje cestu jeho šíření. [3]

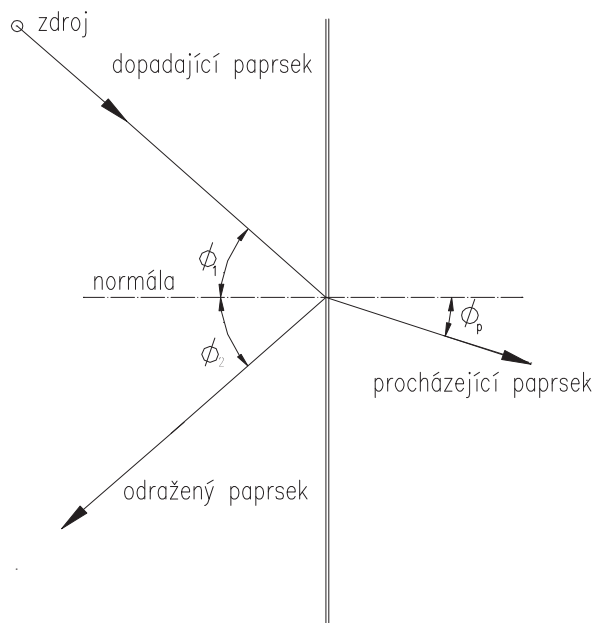
1.2.4.1 Odraz a průchod zvuku

Když dopadne akustická vlna na rovinnou plochu, která má vysokou odrazivost, odraz se bude rovnat odrazu světelného paprsku v zrcadle.



Obr. 8. Odraz akustické vlny.

Pokud rovinná akustická vlna dopadne na rovinné rozhraní s jiným médiem, pak obecně část vlnění se odrazí a část prochází druhým médiem. Podíl odraženého a procházejícího vlnění závisí na úhlu dopadu vlny na rovinné rozhraní, na rychlostech zvuků a hustotách obou materiálů na obou stranách rozhraní. [3]



Obr. 9. Dopad paprsku na rozhraní.

Jestliže rovinná vlna dopadne na rovinné rozhraní pod úhlem ϕ_1 , úhel odrazu akustické vlny bude $\phi_2 = \phi_1$, avšak úhel lomu procházejícího paprsku za rozhraním závisí na poměru rychlostí zvuků v obou materiálech podle Snellova pravidla. [3]

$$\frac{c_1}{c_2} = \frac{\sin \phi_1}{\sin \phi_2} \quad (42)$$

Pokud je rozhraní mezi tekutinami nebo mezi tekutinou a pórovitým absorpčním materiálem, generují se pouze podélné vlny. Avšak na rozhraní mezi tekutinou a pevnou látkou se v pevné látce vlněním přenáší energie prostřednictvím podélných i příčných vln. [3]

1.2.4.2 Činitel zvukové pohltivosti

Pokud akustická vlna dopadne na pevný povrch, část energie vlnění se přemění na jiný druh energie, velmi často je jedná o energii tepelnou.

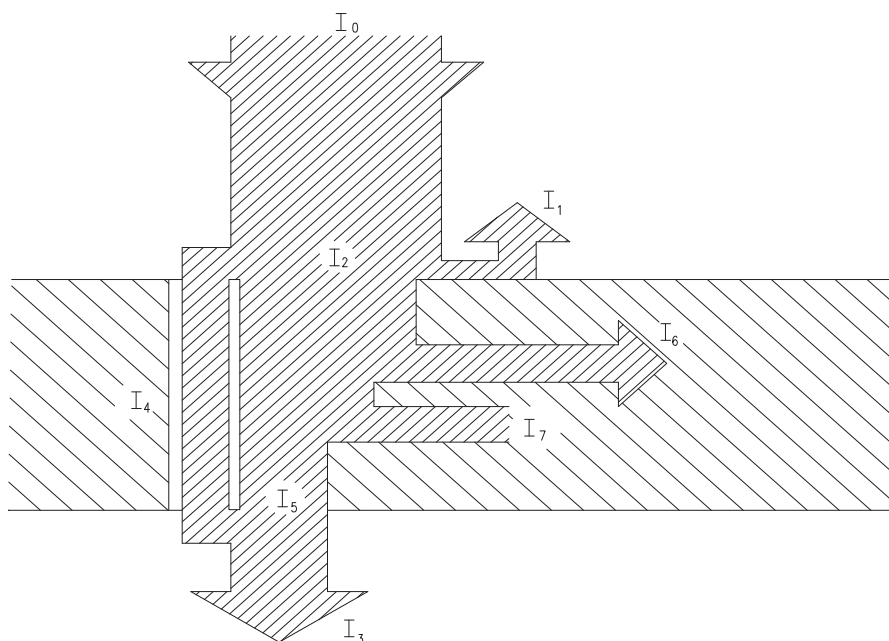
Pod pojmem pohlcování zvuku se chápá nevratná přeměna zvukové energie v energii jinou. Proto se dle tohoto hlediska dělí principy přeměny zvukové energie v pevných látkách:

- a) Přeměny, které vzniknou třením
- b) Přeměny, které vzniknou poklesem akustického tlaku

c) Přeměny, které vzniknou nepružnou deformací těles

Akustický výkon dopadající na 1 m² stěny, označený jako intenzita zvuku I_0 , se rozdělí na části [5]:

- I_1 - intenzita zvuku vlny odražené
- I_2 - intenzita zvuku vlny pohlcené
- I_3 - intenzita zvuku vlny vyzářené za stěnu celkem
- I_4 - intenzita zvuku vlny prošlé za stěnu otvory a póry
- I_5 - intenzita zvuku vlny, kterou stěna vyzáří v důsledku svého ohybového kmitání do druhého poloprostoru
- I_6 - intenzita zvuku vlny, která je vedená ve formě chvění do ostatních částí přiléhajících konstrukcí
- I_7 - intenzita zvuku přeměněná ve stěně na teplo



Obr. 10. Rozdělení akustické energie při dopadu vlny na stěnu. [5]

Schopnost nějakého tělesa pohlcovat zvuk charakterizujeme hodnotou činitele zvukové pohltivosti α , který je definován jako poměr energie I_2 , pohlcené určitou plochou, k energii I_0 , která na tuto plochu dopadá, což je vyjádřeno vztahem [5]:

$$\alpha = \frac{I_2}{I_0} \quad (43)$$

Ze vztahu je patrné, že činitel pohltivosti je bezrozměrné číslo, jehož velikost se může pohybovat v intervalu od 0 do 1. Stěna pohlcující zvuk úplně, má činitel pohltivosti $\alpha = 1$, zatímco stěna dokonale odrážející zvuk má tento činitel $\alpha = 0$.

Podobným způsobem lze definovat činitele zvukové odrazivosti β [5]:

$$\beta = \frac{I_1}{I_0} \quad (44)$$

a činitele průzvučnosti τ :

$$\tau = \frac{I_3}{I_0} = \frac{I_4 + I_5}{I_0} \quad (45)$$

Rozdělení dopadající akustické energie na jednotlivé složky se dá použít pouze v oblasti prostorové akustiky.

Tab. 4. Hodnoty činitele pohltivosti u vybraných materiálů.

Materiál	kmitočet f [Hz]					
	125	250	500	1000	2000	4000
Hladký beton	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03
Dlaždice terasové	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04
Cihlová zeď bez omítky	0,02	0,03	0,03	0,04	0,05	0,07
Cihlová stěna s omítkou	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03
Obkládačky mramor kachle	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03
Papírové tapety na zdi	0,02	0,03	0,04	0,05	0,07	0,09
Stěny obložené dřevem	0,10	0,11	0,10	0,08	0,08	0,11
Podium s parketami	0,50	0,40	0,25	0,10	0,08	0,11
Guma 5 mm na betonu	0,04	0,04	0,07	0,06	0,06	0,07
Linoleum přímo na betonu	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04
Okenní sklo	0,40	0,30	0,20	0,17	0,15	0,10
Plsť technická tl. 25 mm na zdi	0,12	0,18	0,32	0,60	0,88	0,88
Lehké záclony (50% řasení)	0,07	0,31	0,79	0,81	0,66	0,54

1.2.4.3 Spektra vibroakustických signálů

Vibroakustické signály většinou obsahují více frekvenčních složek s různě velkými amplitudami a fázovými posuny vůči sobě. Základní charakteristikou vibroakustických signálů jsou jejich frekvenční spektra, udávající rozložení amplitud jednotlivých frekvenčních složek v signále. Časový signál může představovat např. výchylky, rychlost nebo zrychlení kmitání mechanických částí strojů, nebo akustické veličiny jako akustický tlak, akustická intenzita, akustický výkon apod. K těmto časovým veličinám odpovídají ve frekvenční oblasti jejich spektra. Vibrace a hluk strojních zařízení jsou většinou mnohofrekvenční signály se spojitými spektry. Pro vlastní analýzu jsou spojitá spektra vhodná, neboť pomocí nich lze identifikovat nejvýraznější frekvenční složky v signálu, a které tedy nejvíce přispívají do celkové hladiny např. hluku. [3]

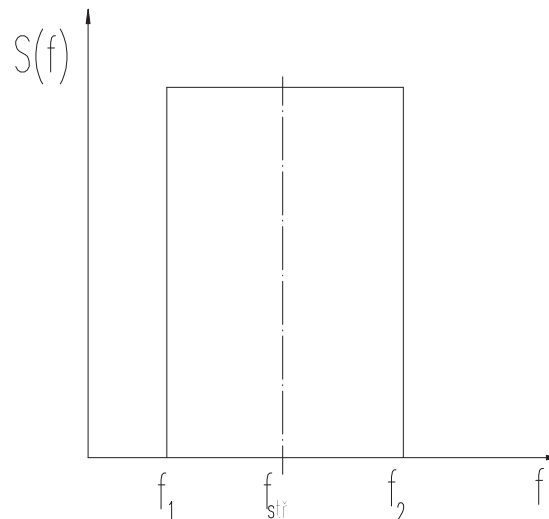
Vibroakustické signály se dají rozdělit na:

- a) Čárové spektrum – harmonický signál
- b) Čárové spektrum – periodický signál
- c) Čárové spektrum – neperiodický signál
- d) Spojité spektrum
- e) Pásmové spektrum
- f) Vícenásobné spektrum
- g) Trackingový diagram
- h) Campbellův diagram

1.2.4.4 Oktávová frekvenční spektra

Speciální místo mezi vibroakustickými spektry mají oktávová pásmová spektra, od nichž se odvozují další pásma. Frekvenční pásmo o šířce jedné oktávy je definováno poměrem krajních frekvencí vymežujících každou oktávu.

$$\frac{f_2}{f_1} = 2 \quad (46)$$



Obr. 11. Oktávové pásmo. [3]

Střední frekvence každé oktávy je:

$$f_{stř} = \sqrt{f_1 \cdot f_2} \quad (47)$$

Ze střední frekvence se odvozují dolní a horní frekvence pro každou oktávu:

$$\begin{aligned} f_1 &= \frac{f_{stř}}{\sqrt{2}} \\ f_2 &= f_{stř} \cdot \sqrt{2} \end{aligned} \quad (48)$$

Hladiny nebo amplitudy oktávových pásem se vyjadřují pro příčné střední frekvence.

Tab. 5. Charakteristické frekvence oktávových pásem. [3]

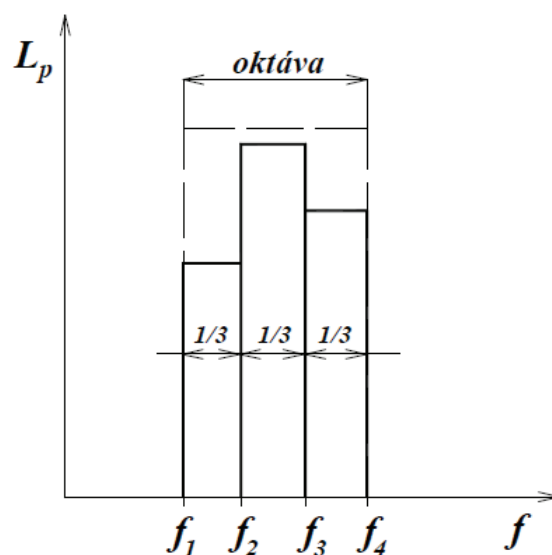
střední frekvence [Hz]	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
dolní frekvence [Hz]	22	44	88	177	355	710	1420	2840	5680	11360
horní frekvence [Hz]	44	88	177	355	710	1420	2840	5680	11360	22720

Třetinooktávová kmitočtová pásma

Tyto pásma vzniknou rozdělením na třetiny oktávového pásma. Mají čtyři různé frekvence, f_1 a f_4 ohraničují pásmo jedné oktávy a f_2 a f_3 jsou krajní frekvence vnitřní třetiny oktávy. Platí vztah:

$$\log \frac{f_2}{f_1} + \log \frac{f_3}{f_2} + \log \frac{f_4}{f_3} = \log \frac{f_4}{f_1} = \log 2 \quad (49)$$

$$\frac{f_2}{f_1} = \frac{f_3}{f_2} = \frac{f_4}{f_3} = \sqrt[3]{2} \quad (50)$$



Obr. 12. Třetinooktávové pásmo [11]

2 PÓROVITOST MATERIÁLŮ

2.1 Základní pojmy a veličiny charakterizující pórovitost

Pod pojmem pórovitost se rozumí přítomnost dutin nejrůznějšího tvaru, rozměru a původu vzniku v materiálu. Póry v materiálu mají zásadní vliv na mechanickou pevnost, odolnost proti korozi, odolnost reagovat na náhlé změny teploty a další důležité veličiny týkající se vlastností materiálů. Záleží nejen na množství pórů v materiálu, ale také na jejich velikosti a jak jsou uspořádány. Veličiny podávající základní informace o pórech v materiálu jsou hustota a objemová hmotnost.

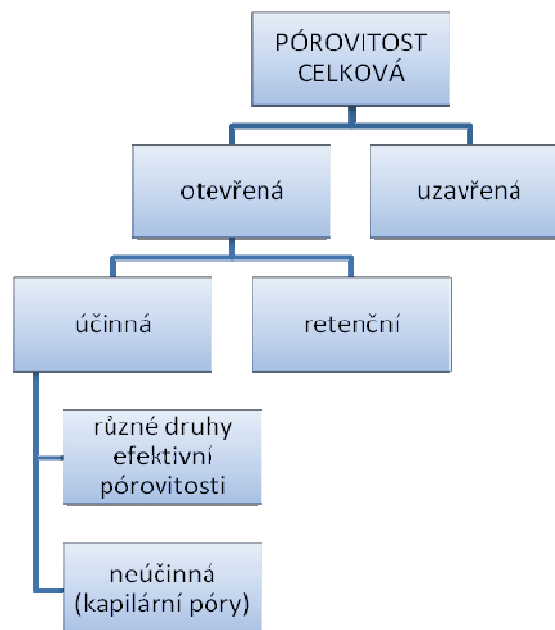
Pórovitost v určitém bodě x se definuje vztahem:

$$n_x = \frac{V_p}{V_c} \quad (51)$$

K vyjádření pórového prostoru se využívá i čísla pórovitosti e definovaného vztahem:

$$e = \frac{V_p}{V_z} = \frac{n}{1-n} \quad (52)$$

2.1.1 Druhy pórovitosti



Obr. 13. Rozdělení pórovitosti.

Základní druhy pórovitosti:

- a) Celková – poměr objemu všech pórů k celkovému objemu materiálu
- b) Uzavřená – podíl objemu izolovaných pórů a celkového objemu materiálu
- c) Kinematická – poměr objemu pórů, kterými proteče voda k celkovému objemu
- d) Retenční – poměr objemu vody, jež může být pojmuta daným objemem pórovitého prostředí, k celkovému objemu prostředí

2.1.2 Měření pórovitosti

Existuje několik způsobů měření k zjištění pórovitosti materiálu:

- a) Metoda objemové hustoty – jedná se o rychlou, ale přesnou metodu. Princip metody spočívá v měření objemu a vážení materiálu, kdy se postupuje ze vztahu $\text{objem pórů} = \text{celkový objem} - \text{objem materiálu}$
- b) Metoda vodní saturační – jedná se o složitější metodu, ale o to přesnější a přímější. Princip metody spočívá v zaplnění pórů uvnitř materiálu vodou, která bude mít určitý objem a z něj se poté určí objem pórů uvnitř materiálu.
- c) Metoda odpařování – jedná se o nejsložitější metodu, ale je také nejpresnější. Princip metody spočívá v odpařování vody z pórů materiálu a vážení hmotností před a po sušení.

2.2 Pórovité materiály

Tyto materiály jsou typické velkým množstvím pórů. Jsou charakteristické svou strukturou, která může být buď velmi měkká, nebo tuhá. Kostra obsahuje kanálky nebo vzájemně propojené póry, kterými se pohybují vzduchové částice. Existují zde také „slepé“ dutiny, v nichž za ustálených podmínek nedochází k pohybu částic. Pórovité materiály mohou být přírodního charakteru jako třeba korky, dřevo, pemza, anebo syntetického charakteru jako polyuretany, polystyreny a polyamidy. Polymery mohou obsahovat dvě dominantní formy pórů podle chemického složení, a to buď buňky otevřené, nebo uzavřené. Toto má základní vliv na konečné vlastnosti a použití polymeru. Otevřené póry mají vyšší absorpční schopnost pro vodu vlhkost, větší propustnost plynů a par, nižší izolační schopnost tepla, ale vyšší schopnost pohlcovat a tlumit zvuk. [10]

Příklady pórovitých materiálů:

- Přírodní – dřevo, pemza, korek, ...
- Syntetické – polystyren, polyuretanové pěny, skleněná a minerální vlákna, pórovité sádry, ...

2.2.1 Vlastnosti pórovitých akustických materiálů

Ideální materiály hodící se k pohlcování zvuku jsou materiály pórovité, u nichž se zvuk šíří v látce jemnými póry, jejichž celková plocha je značně velká vzhledem k jejímu objemu. Pod pojmem pórovitá látka se v akustice obvykle myslí látka pevná, v jejímž objemu se nacházejí malé dutinky, vyplněné vzduchem. Poměr objemu těchto dutinek k celkovému objemu látky je dosti značný a činí asi 60 až 95% celkového objemu. Materiál, tvořící kostru látky je buď vláknitý, nebo má strukturu ztuhlé pěny. Má-li látka dobře pohlcovat zvuk, musejí být její póry navzájem spojeny, aby se jimi zvuk mohl nadále šířit látkou, respektive aby mohl vzduch při akustickém kmitání proudit. Jedině tak bude možno využít prvního principu přeměny akustické energie vlivem tření. Póry nemusejí být spojeny u látek, jejichž kostra je velmi poddajná, elastická, takže zvuk do ní snadno z pórů přechází. Příkladem takových látek jsou pěněné měkké umělé hmoty. [5]

Z hlediska fyzikálního se může u pórovitých látek s tuhou kostrou stanovit jejich pohltivé vlastnosti, jsou-li známy jejich [5]:

- a) Činitel poréznosti σ , definovaný jako poměr objemů pórů V_p k celkovému objemu látky V_c
- b) Stejnoseměrný akustický odpor R_s [Ns/m^3], definovaný jako odpor, který klade jednotka objemu látky průtoku vzduch
- c) Činitel struktury κ závislý na uspořádání kostry látky a pórů
- d) Exponent n , který udává, zda stlačování a zředování vzduchu při šíření zvuku póry se děje izotermicky ($n = 1$), adiabaticky ($n = 1,4$) nebo polytropicky ($n < 1$ až $1,4 >$).

Pomocí těchto konstant lze stanovit vlastnosti porézních látek matematickou cestou za předpokladu, že látky jsou izotropní a že jsou přesně definovány a známy podmínky upevnění. Přednost se však dává údajům, které byly získány měřením. Na základě měření měrné akustické impedance pohltivého materiálu se získá činitel pohltivosti pro kolmý dopad akustických vln ze vztahu [5]:

$$\alpha = \frac{1}{0,5 + 0,25 \left(\frac{x}{\rho \cdot c} + \frac{\rho \cdot c}{x} \right)} \quad (53)$$

kde je x [Ns/m³] reálná složka měrné akustické impedance, pro niž platí [5]:

$$Z = x + j \cdot y \quad (54)$$

Činitel pohltivosti bude mít maximální hodnotu $\alpha = 1$ pro $x = \rho \cdot c$

Základní materiál pro pórovité látky se používají různé organické i anorganické hmoty. Jedním z nejrozšířenějších materiálů je dřevovláknitá surovina, z níž jsou pak zhotovovány desky tvrdé nebo měkké. Dřevovláknité desky tvrdé (Sololit) se jako pórovité látky k pohlcování příliš nehodí, protože mají malou pohltivost. Hodí se jako náhrada překližek k výrobě kmitajících pohltivých desek.

3 CÍLE PRÁCE

Cílem této bakalářské práce je seznámit se s vlivem pórovitosti určitých pórovitých materiálů na vibroakustické vlastnosti, konkrétně zvuk, hluk a mechanické vibrace. Tato práce získala inspiraci pro téma v trendu poslední doby, kdy je žádoucí, aby materiály eliminovaly vliv zvuku, hluku a mechanických vibrací co možná nejvíce vzhledem k okolí, což samozřejmě přispívá ke zlepšení životního prostředí a chrání více osoby, jež jsou vystaveny těmto vibroakustickým vlivům.

Obzvláště se tato práce zabývá vlivem objemové pórovitosti materiálu na tlumení zvuku a mechanických vibrací pro vybrané pórovité materiály, měření frekvenční závislosti koeficientu zvukové pohltivosti, ať už u vzorků materiálů samotných nebo i u kombinování vzorků různých materiálů a měření přenosového útlumu materiálu pomocí metody nucených kmitů, jež je nejpoužívanější metodou měření, taktéž jak u vzorků samotných, i u vzorků různých materiálu kombinovaně.

Z výsledků měření se vyhodnocuje, které pórovité materiály mají nejlepší tlumící schopnosti a jsou tedy nejvhodnější pro použití v určitém druhu praxe k tlumení vibroakustických vlivů.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 VLASTNÍ MĚŘENÍ

4.1 Vlastnosti měřených materiálů

K proměřování vibroakustických vlastností bylo použito polyuretanových pěn, v této práci se měřilo s šesti různými typy materiálů lišících se na první pohled hlavně velikostí pórů. Některé materiály měly více vzorků k měření z důvodu různých tloušťek jednoho typu materiálu. Hustoty materiálů se dají považovat spíše za orientační, jelikož byly pouze počítány z ručně řezaných vzorků na základě podílu hmotnosti a objemu vzorku.

Tab. 6. Vlastnosti měřených materiálů.

číslo materiálu	číslo vzorku	barva materiálu	tloušťka [mm]	hustota [kg/m ³]	poznámky
1	1.1	modrá	10	24	
	1.2		30		
	1.3		50		
2	2.1	žlutá	30	36	
	2.2		50		
3	3	hnědá	50	28	
4	4	zelená	50	26	
5	5.1	oranžová	20	75	nelze brát hustotu jako určující, protože z jedné strany materiálu byla tenká tvrdší část, která značně zkresluje hodnotu hustoty, u měření se vzorek měřil z obou stran. (5.1 tvrdá strana na vstupu (zvuk, vib.) a 5.2 naopak)
	5.2				
6	6.1	různobarevný	30	83	recyklát
	6.2		50		

4.2 Příprava vzorků k měření

4.2.1 Vzorky k měření přenosového útlumu

Vzorky se připravovaly ručně řezáním pomocí ulamovacího nože z připravených desek materiálů. Tvar podstavy vyřezávaných kvádrů byl čtverec o rozměrech 60x60 mm, třetím rozměrem byla tloušťka materiálu.



Obr. 14. Připravené vzorky k měření přenosového útlumu.

4.2.2 Vzorky k měření zvukové pohltivosti

Vzorky se připravovaly vyřezáváním na lisu s ručním pohonem. Z každé z připravených desek jednotlivých materiálů bylo potřeba vyřezat vždy dva vzorky o průměrech 30 mm a 100 mm, k přesnému tvaru vzorků po vyřezání posloužily dvě formy, průměry odpovídají velikosti trubíc, do kterých se vzorky vkládaly při měření zvukové pohltivosti.



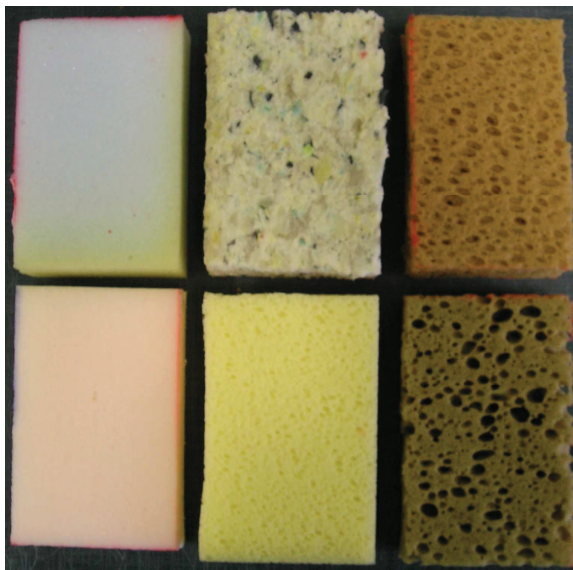
Obr. 15. Ruční lis a formy.



Obr. 16. Připravené vzorky k měření zvukové pohltivosti.

4.2.3 Vzorky k měření objemové pórovitosti

Vzorky se připravovaly ručně řezáním pomocí ulamovacího nože z připravených desek materiálů. Tvar podstavy vyřezávaných kvádrů byl obdélník o vnitřních rozměrech dvou krabiček použitých k měření a to 73x112 mm nebo 72x113 mm, třetím rozměrem byla tloušťka materiálu. Od každého materiálu byl použit jeden vzorek, celkem tedy šest vzorků materiálů.



Obr. 17. Připravené vzorky k měření objemové pórovitosti.

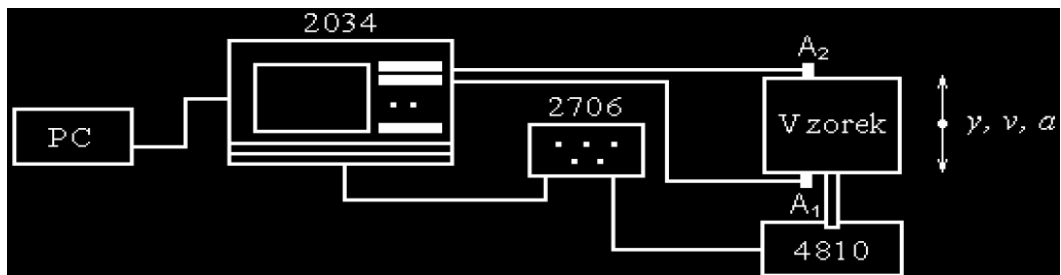
4.3 Metodika měření

4.3.1 Popis měření přenosového útlumu

Připravené vzorky se zesponu nalepily na kovovou desku, která se pomocí šroubu, jež se nacházel na spodní straně desky, upevnila k budicímu vibrátoru. Každý vzorek se měřil třikrát, jednou samostatně (b), podruhé s deskou o hmotnosti $m = 85$ g nalepenou na horní část vzorku (d) a potřetí se na horní desku přidalo závaží o celkové hmotnosti i s deskou $m = 500$ g (z). Měření přenosového útlumu D probíhalo ve frekvenčním rozsahu $f = (50-125)$ Hz s frekvenčním krokem $\Delta f = 25$ Hz.

Měřicí systém

Měřicí systém se skládal z budícího vibrátoru Brüel & Kjær 4810, zesilovače Brüel & Kjær 2706, analyzátoru Brüel & Kjær 2034 a PC pro uložení a vyhodnocení měřených dat. A_1 a A_2 jsou snímače zrychlení upevněné protilehle na horní a dolní straně vzorku, které slouží k měření zrychlení na obou stranách vzorku.



Obr. 18. Schéma zapojení měřicího systému pro měření přenosového útlumu. [11]

Příklad značení vzorků dle druhu zatížení

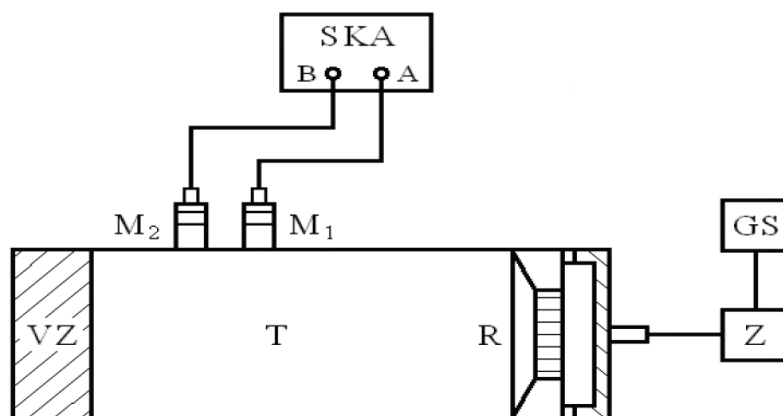
- Samostatné vzorky: 1.2-b (modrý materiál o tloušťce 30mm měřený bez zatížení)
- Sendvičové soustavy: 1.1+2.1-d (modrý materiál o tloušťce 10mm je na spodní straně - u budícího vibrátoru, na něm je žlutý materiál o tloušťce 30mm, celá soustava je zatížena deskou)



Obr. 19. Vibrátor se vzorkem 1.2-z.

4.3.2 Popis měření zvukové pohltivosti

Měření zvukové pohltivosti α probíhalo na Kundtově impedanční trubici metodou přenosové funkce dle normy ČSN ISO 10534-2. Na jednom konci trubice T je umístěn reproduktor R, který je napájen generátorem signálu GS, signál je zesílen v zesilovači Z. Na druhém konci trubice je umístěn měřený vzorek VZ. M_1 a M_2 jsou mikrofony umístěné na trubici a slouží k měření akustických tlaků. Naměřené veličiny jsou dále zpracovávány v systému kmitočtové analýzy SKA.



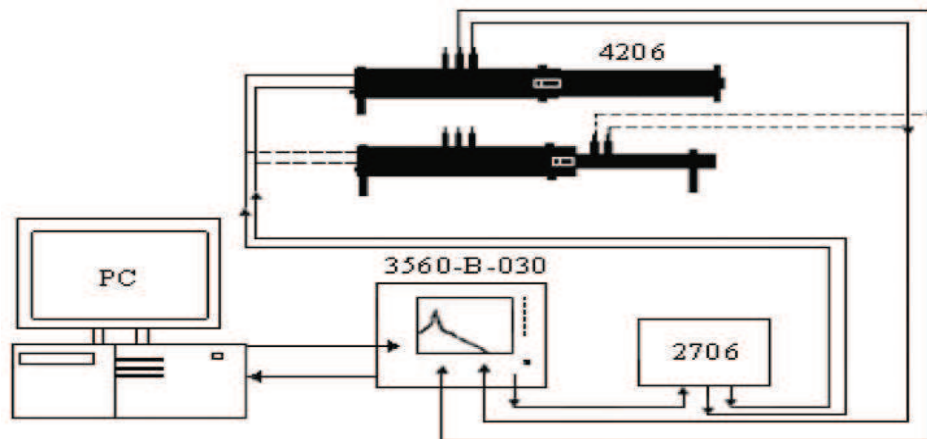
Obr. 20. Princip měření Kundtovy impedanční trubice. [11]

Měření se provádělo pro každý vzorek zvlášť v malé ($d = 30$ mm) i velké trubici ($d = 100$ mm), nakonec se naměřená data z malé i velké trubice sloučila v kombinaci a vznikla jedna charakteristika společná pro obě trubice u každého vzorku. Frekvenční rozsah byl $f = (0-6400)$ Hz a frekvenční krok byl $\Delta f = 2$ Hz. Každý vzorek se měřil třikrát v závislosti na vzduchové mezeře za vzorkem, první bylo bez vzduchové mezery (m_0), druhé bylo se vzduchovou mezerou 2 cm (m_2) a třetí bylo se vzduchovou mezerou 8cm (m_8). Sendvičové soustavy se měřily bez vzduchové mezery.

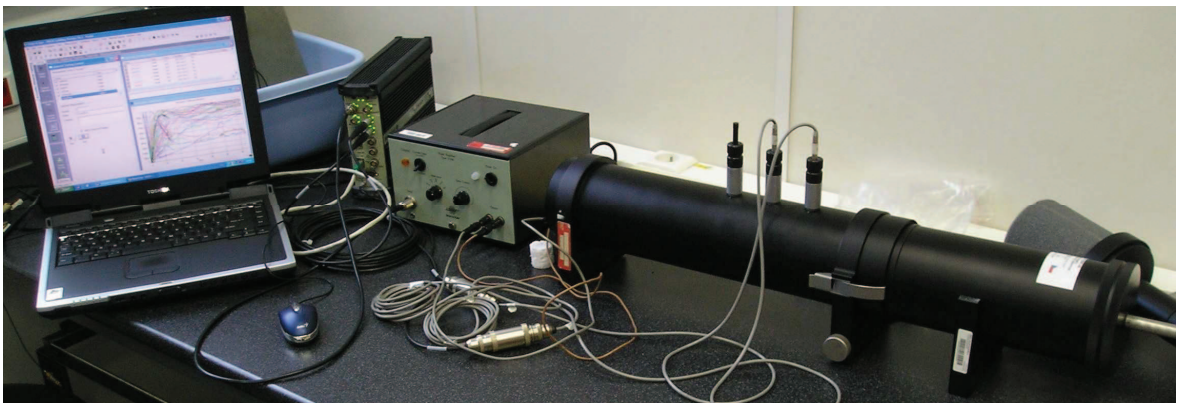
Měřicí systém

Měřicí systém se skládal z Kundtovy impedanční trubice Brüel & Kjær 4206, zesilovače Brüel & Kjær 2706 pro zesílení vstupního signálu, tříkanálového PULSE multianalyzátoru Brüel & Kjær 3560-B-030 a PC pro uložení a vyhodnocení dat. Kundtova impedanční trubice je složena ze dvou trubic, jedny malé $d = 30$ mm a jedny velké $d = 100$ mm. Každá se používá pro jiný frekvenční rozsah měření. Malá pro $f = (0-6400)$ Hz a velká pro $f = (0-1600)$ Hz, dochází tak u obou trubic k přechodové fázi, proto se měří na obou trubi-

cích pro různé frekvenční rozsahy a následně dochází ke kombinaci obou charakteristik, z níž vyjde jedna výsledná.



Obr. 21. Schéma měřicího systému pro měření zvukové pohltivosti. [11]



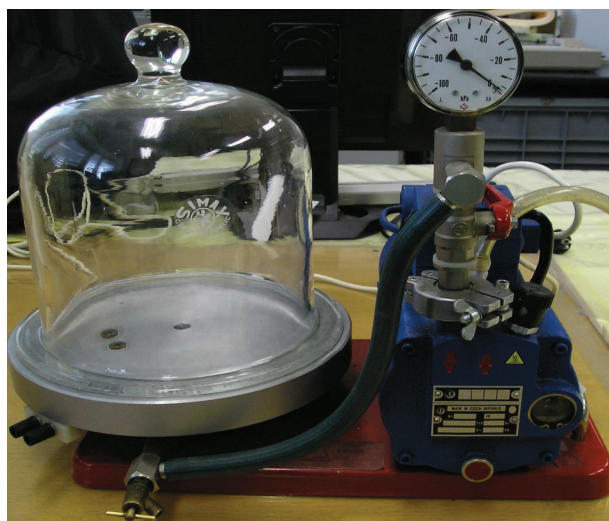
Obr. 22. Fotografie měřicího systému pro měření zvukové pohltivosti.

Příklad značení vzorků

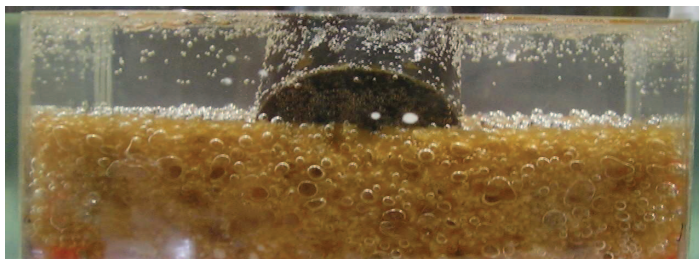
- Samostatné vzorky: 1.2-m2 (modrý materiál o tloušťce 30mm se vzduchovou mezerou o velikosti 2 cm)
- Sendvičové soustavy: 3+6.1 (hnědý materiál o tloušťce 50mm je na vstupní straně signálu – dopadá na něj zvuk jako první, za ním je materiál recyklát o tloušťce 30mm, sendvičová soustava je bez vzduchové mezery)

4.3.3 Popis měření objemové pórovitosti

Princip metody měření objemové pórovitosti spočívá ve změně hmotnosti vzorku před a po zaplnění pórů vodou a následného přepočítání na procentuální množství pórů uvnitř materiálu. Nejprve se zvážil samostatný vzorek, poté se zvážil i vložený ve skleněné krabičce, ve které se vzorek i měřil. Do krabičky se vzorkem byla přidána destilovaná voda, občasným stlačením se docílilo odstranění určitého procenta vzduchu z pórů vzorku, mělo to za následek urychlení samotného měření. Zbylý vzduch musel být odstraněn ze vzorků pomocí olejové rotační vývěvy, která pracovala při maximálním podtlaku 100 kPa. Doba odsávání vzduchu z pórů se pohybovala u všech vzorků kolem 4 hod. Měření bylo ukončeno, když se minimálně 5 min neuvolnila ze vzorku ani jedna vzduchová bublina. Muselo se brát v potaz také značné zahřívání vývěvy. Po vyjmutí krabičky se vzorkem a vodou byla přebytečná voda odsána stříkačkou přesně po vrchní stěnu vzorku. Následně se celá krabička se vzorkem a vodou zvážila a v porovnání s váhou pouze krabičky a vzorku se zjistila hmotnost vody, která zaplnila póry uvnitř vzorku. Na základě hmotnosti se stanovil objem při dané teplotě kapaliny.



Obr. 23. Rotační olejová vývěva.



Obr. 24. Detail měřeného vzorku – 3.

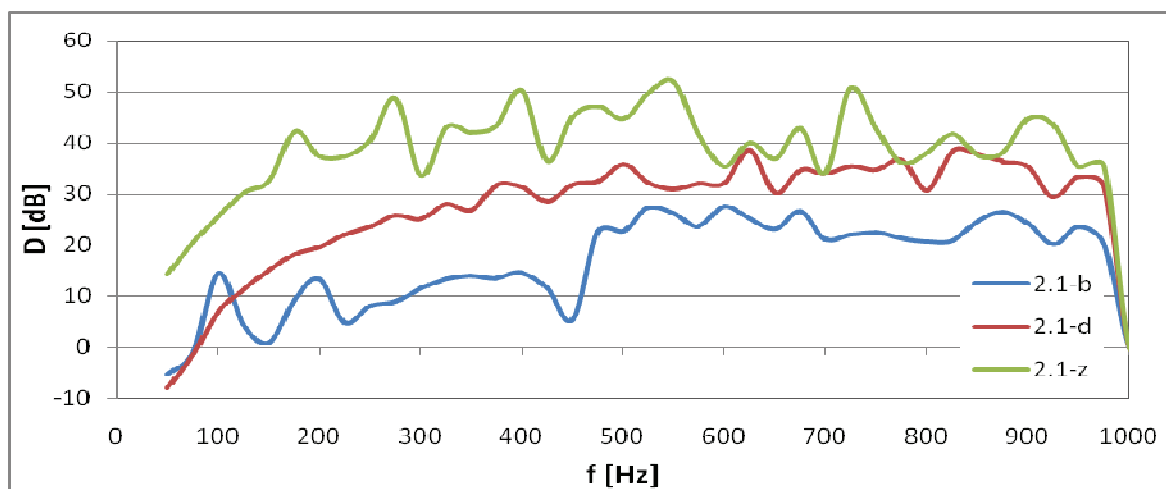
4.4 Vyhodnocování výsledků měření

4.4.1 Výsledné charakteristiky přenosového útlumu

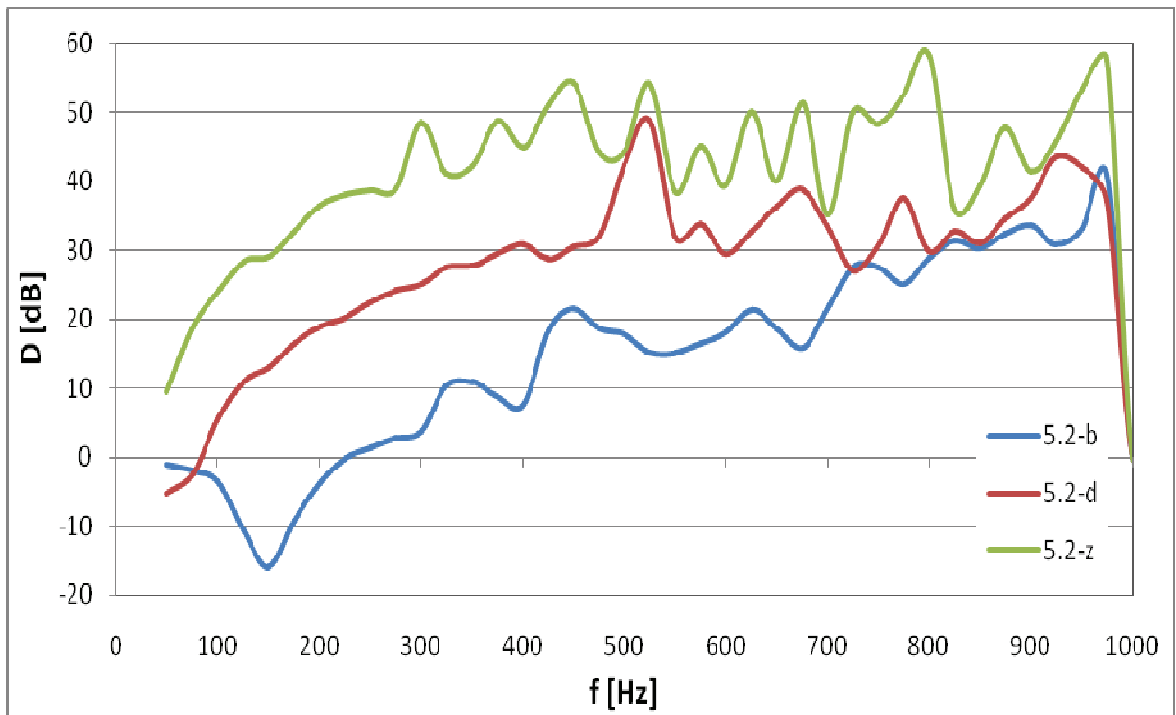
Z důvodu velkého počtu řádků ve výsledných tabulkách je vhodnější a přehlednější uvést pouze grafické zpracování výsledných hodnot přenosového útlumu. Celkem se měřilo 11 vzorků a 6 sendvičových soustav se 3 typy zatížení, kdyby se měly uvést všechny možné kombinace a porovnání vyšlo by velké množství grafů, proto byl zvolen pouze určitý počet, který by měl nejlépe vystihovat, jak se liší hodnoty přenosového útlumu u různých vzorků. Tyto charakteristiky jsou vloženy v praktické části a několik dalších je vloženo ještě v příloze PI. V grafech je vykreslen průběh pouze do frekvence 1000 Hz, jelikož přesně od této hranice až do 1250 Hz mají všechny vzorky přenosový útlum roven nule.

Vybrané charakteristiky:

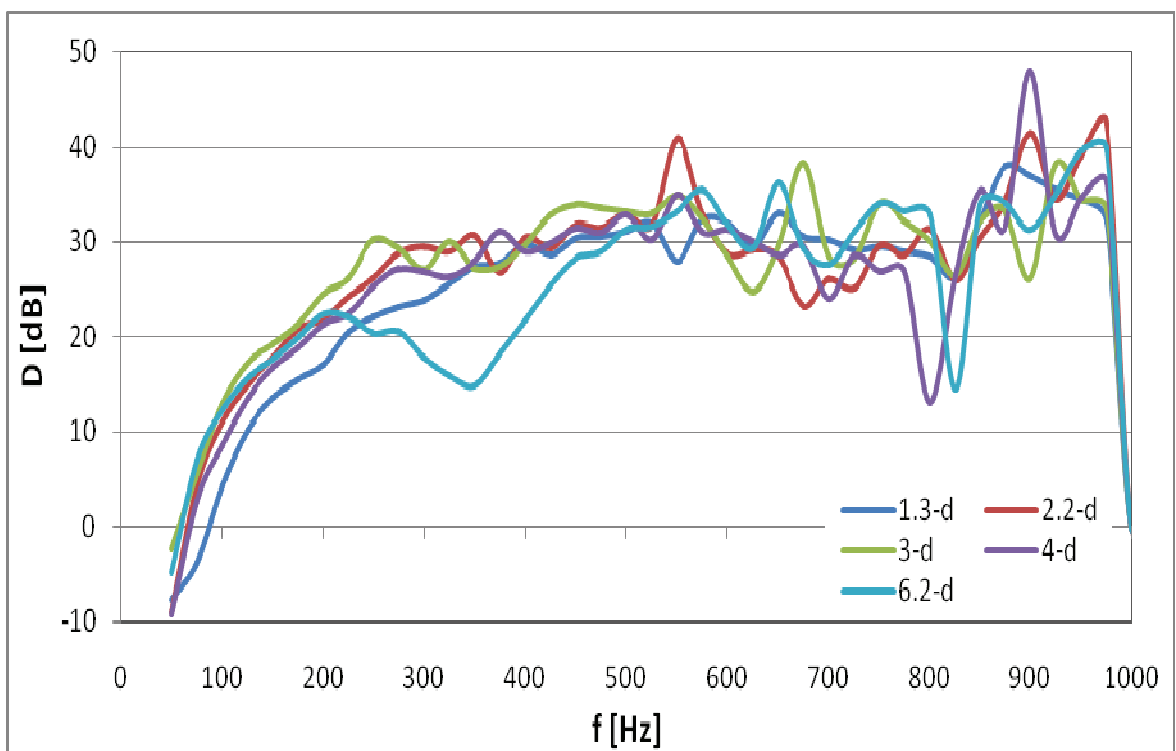
- 1 vzorek, který je měřen se 3 typy zátěže (bez zátěže, zatížen deskou a zatížen deskou a závažím). (Obr. 24 a 25)
- 5 vzorků o tloušťce 50 mm zatížený deskou. (Obr. 26)
- 1 materiál – 3 vzorky tloušťky 10, 30 a 50 mm zatížený deskou a závažím. (Obr.27)
- 1 materiál – 2 vzorky tloušťky 30 a 50 mm zatížený 3 typy zátěže. (Obr. 28)
- 1 sendvič, poté otočený zatížen 3 typy zátěže (Obr. 29)
- 1 sendvič, poté otočený + 2 vzorky použité v sendviči zvlášť, vše zatíženo deskou (Obr. 30)



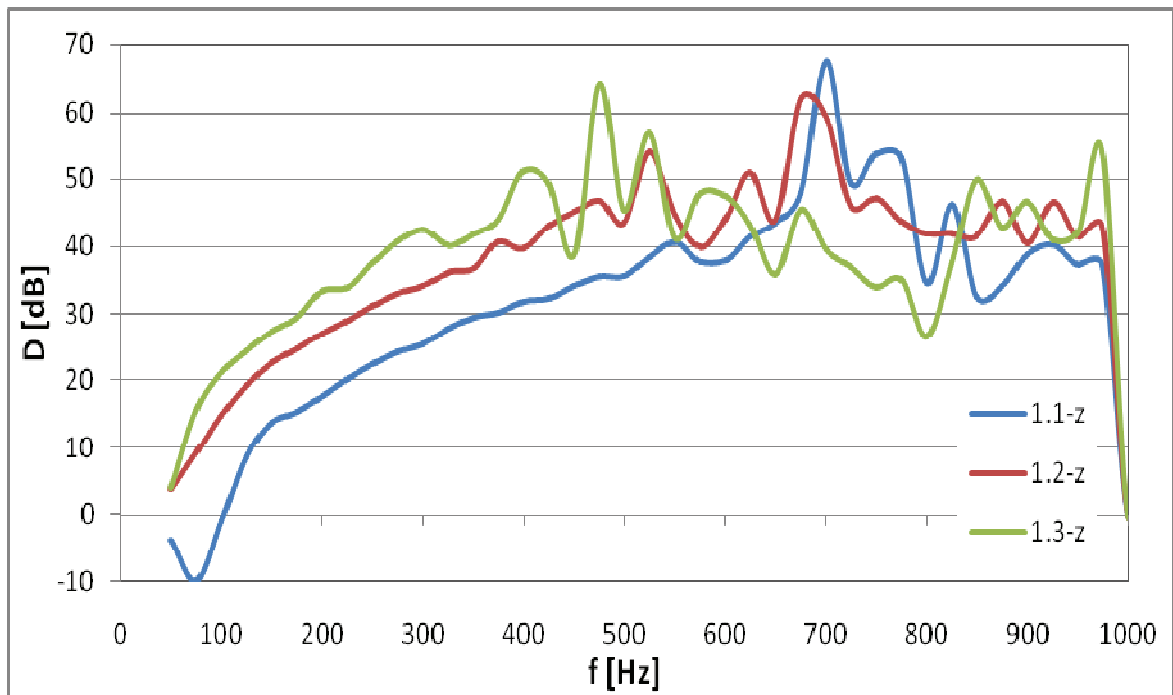
Obr. 25. Závislost přenosového útlumu na frekvenci pro vzorek 2.1 zatížen 3 typy zátěže.



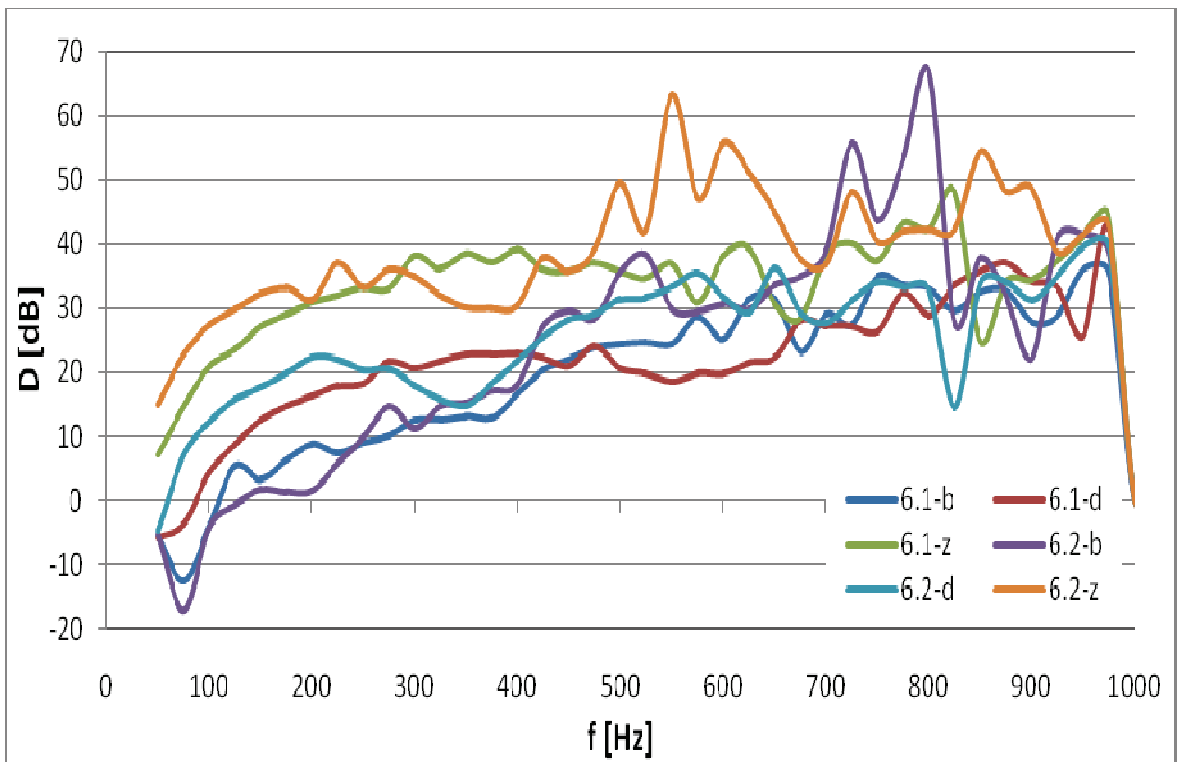
Obr. 26. Závislost přenosového útlumu na frekvenci pro vzorek 5.2 zatížen 3 typy zátěže.



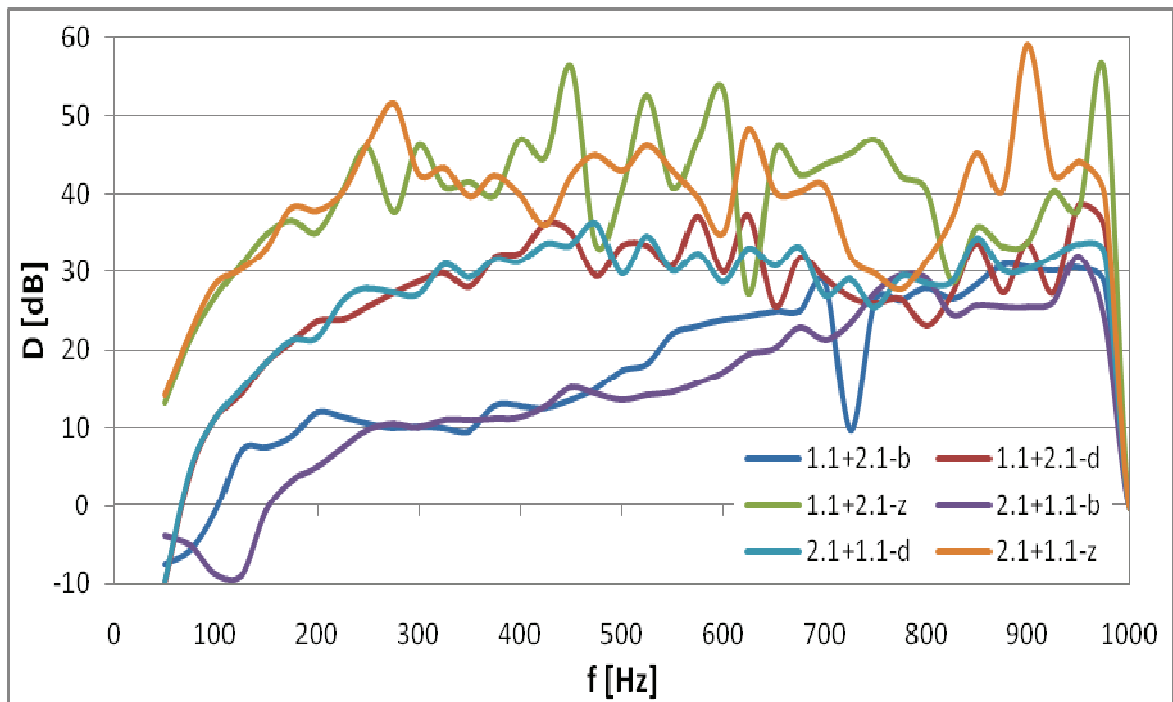
Obr. 27. Závislost přenosového útlumu na frekvenci pro vzorky 1.3, 2.2, 3, 4 a 6.2 o tloušťce 50 mm zatíženy deskou.



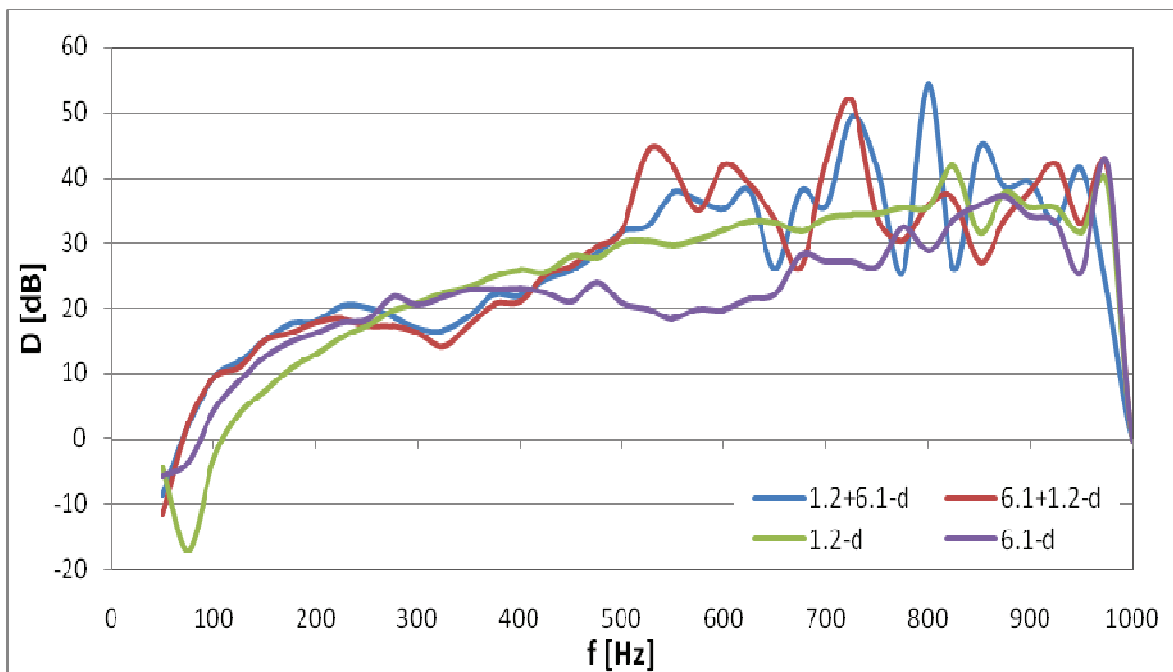
Obr. 28. Závislost přenosového útlumu na frekvenci pro vzorky 1.1, 1.2 a 1.3 zatíženy deskou a závažím.



Obr. 29. Závislost přenosového útlumu na frekvenci pro vzorky 6.1 a 6.2 zatíženy 3 typy zátěže.



Obr. 30. Závislost přenosového útlumu na frekvenci pro sendviče 1.1+2.1 a 2.1+1.1 zatíženy 3 typy zátěže.



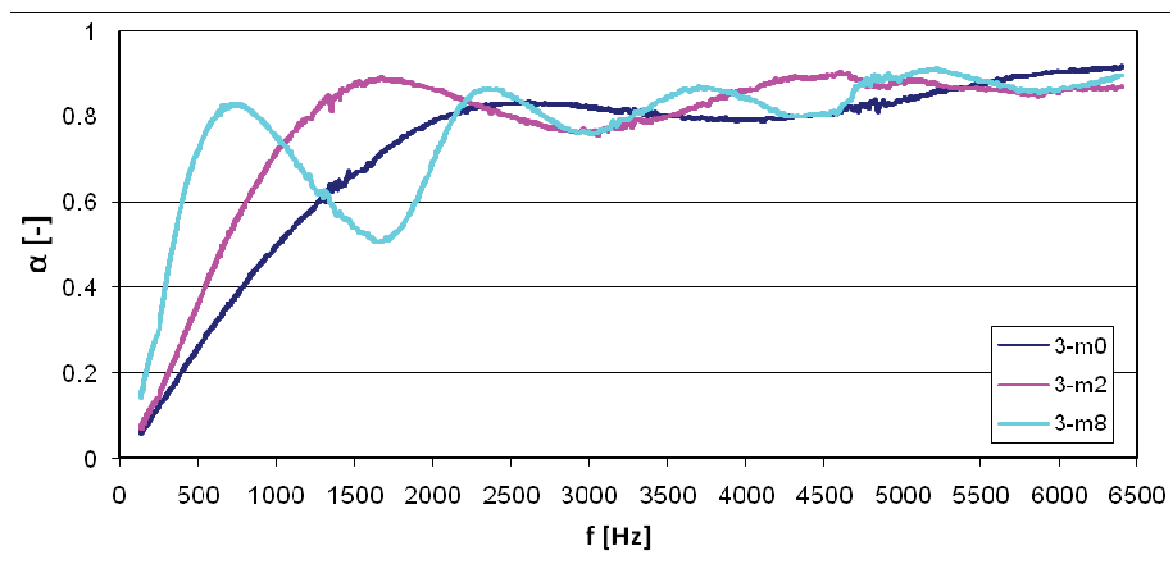
Obr. 31. Závislost přenosového útlumu na frekvenci pro sendviče 1.2+6.1 a 6.1+1.2 a pro vzorky 1.2 a 6.1, vše zatíženo deskou.

4.4.2 Výsledné charakteristiky zvukové pohltivosti

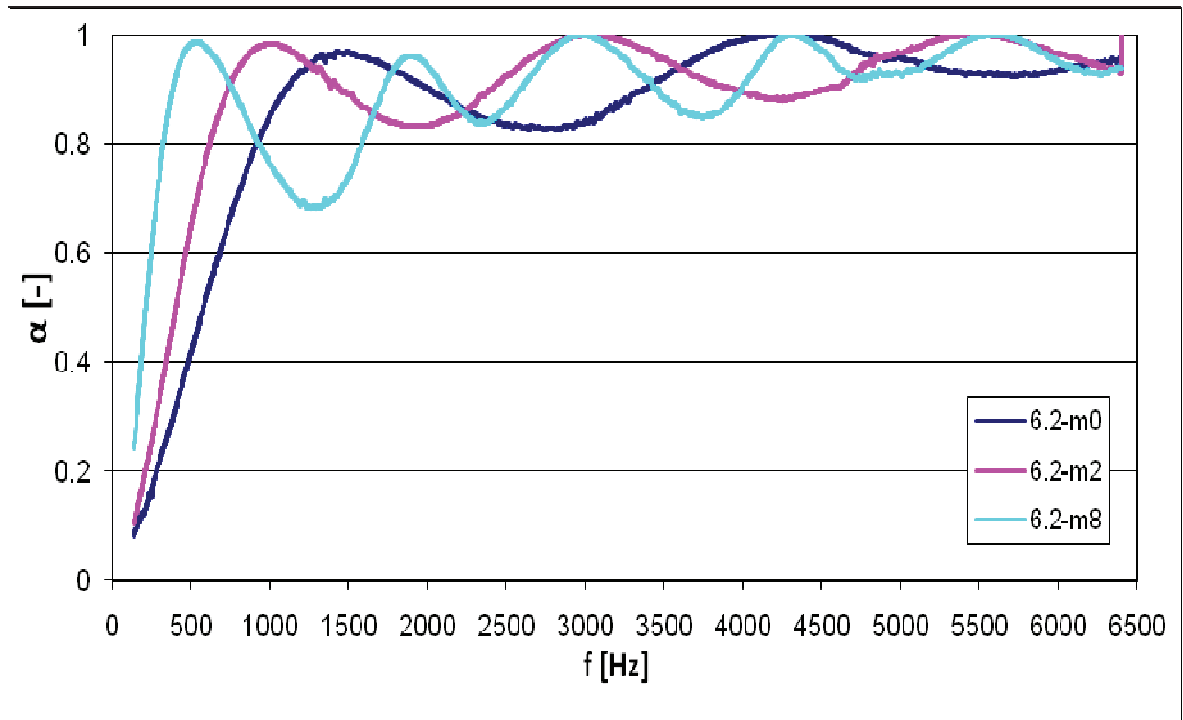
Také u tohoto měření bylo z důvodu velkého počtu řádků ve výsledných naměřených tabulkách vhodnější a přehlednější uvést pouze grafické zpracování výsledných hodnot zvukové pohltivosti. Celkem se měřilo 11 vzorků se 3 druhy vzduchových mezer za vzorky a 22 sendvičových soustav, kdyby se měly uvést všechny možné kombinace a porovnání vyšlo by obrovské množství grafů, proto byl zvolen určitý počet grafického vyhodnocení, který by měl nejlépe vystihovat, jak se liší hodnoty zvukové pohltivosti u různých vzorků. Tyto charakteristiky jsou vloženy v praktické části a několik dalších charakteristik je vloženo ještě v příloze PII.

Vybrané charakteristiky:

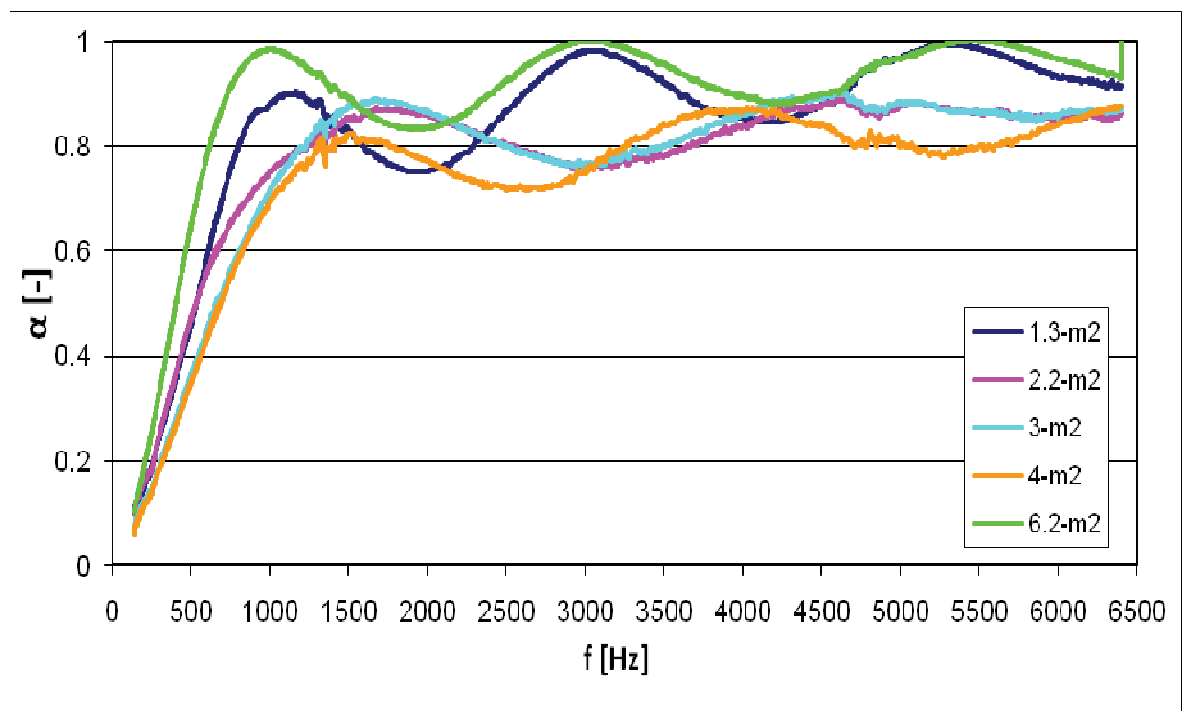
- 1 vzorek, který je měřen se 3 druhy vzduchových mezer (bez vzduchové mezery, s mezerou o velikosti 2 cm a s mezerou o velikosti 8 cm). (Obr. 31 a 32)
- 5 vzorků o tloušťce 50 mm se vzduchovou mezerou o velikosti 2 cm. (Obr. 33)
- 1 materiál – 3 vzorky tloušťky 10, 30 a 50 mm se vzduchovou mezerou o velikosti 8 cm. (Obr. 34)
- 2 sendviče, poté otočené (složeny ze 3 vzorků, ale 2 materiálů). (Obr. 35)
- 1 sendvič, poté otočený + 2 vzorky ze sendviče zvlášť bez mezery. (Obr. 36 a 37)



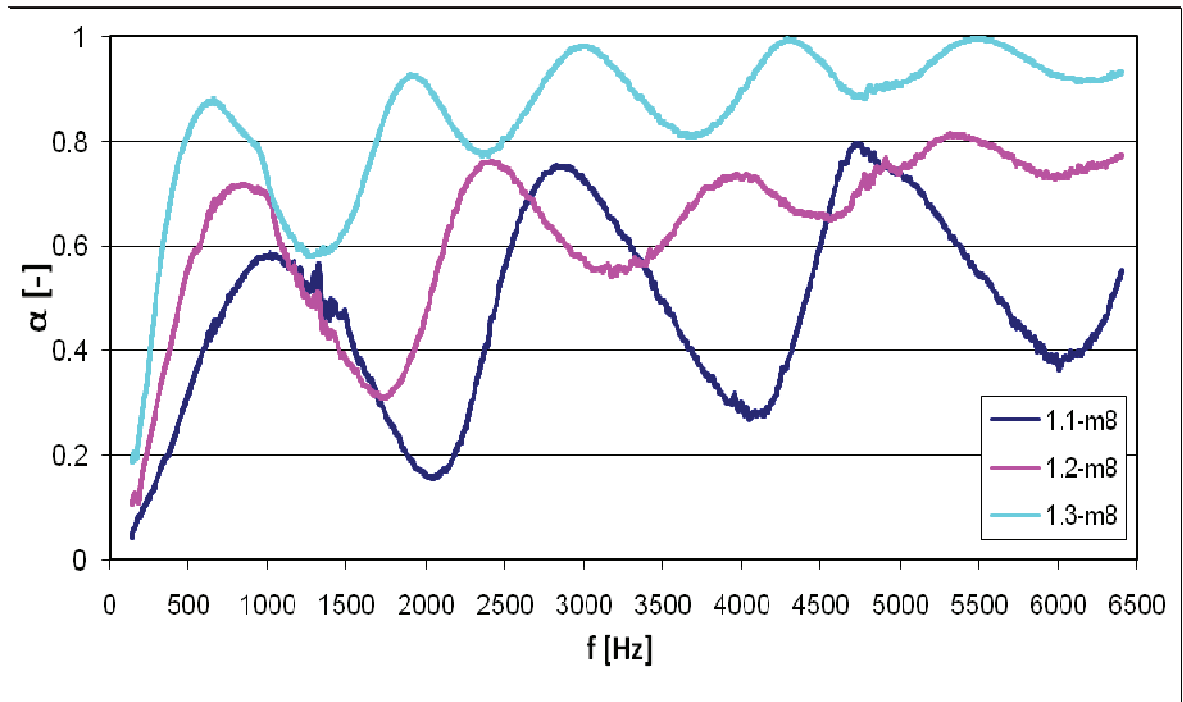
Obr. 32. Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci pro vzorek 3 se 3 druhy vzduchových mezer.



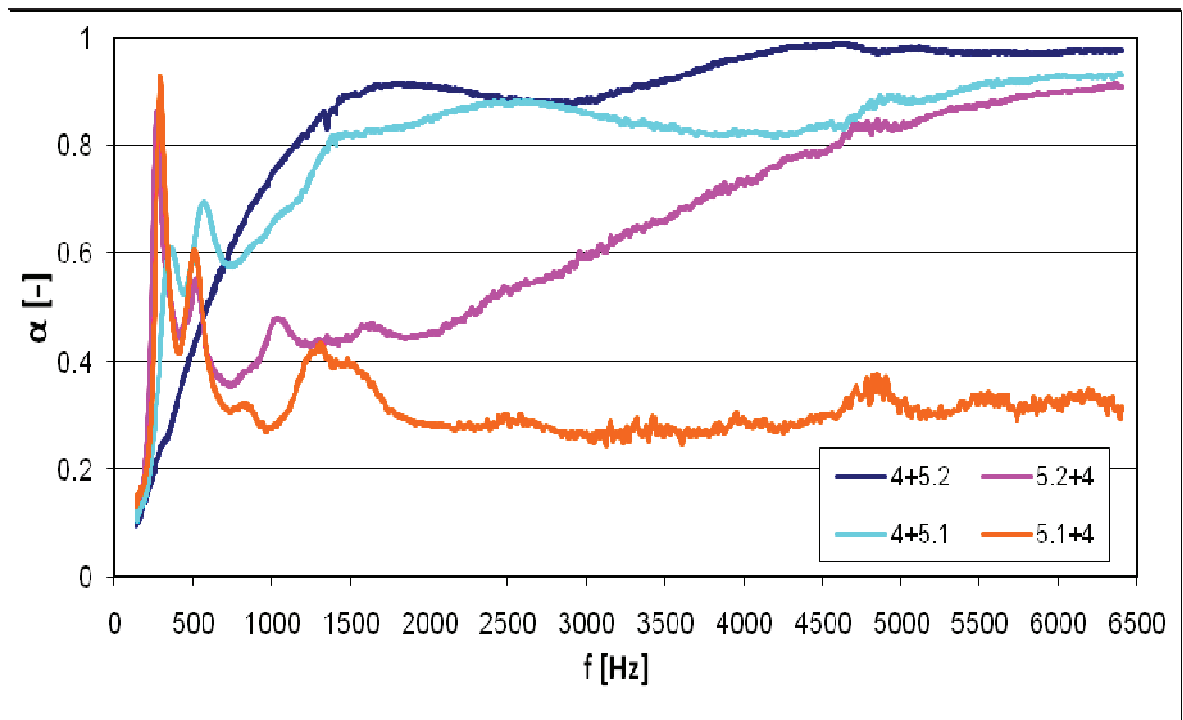
Obr. 33. Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci pro vzorek 6.2 se 3 druhy vzduchových mezer.



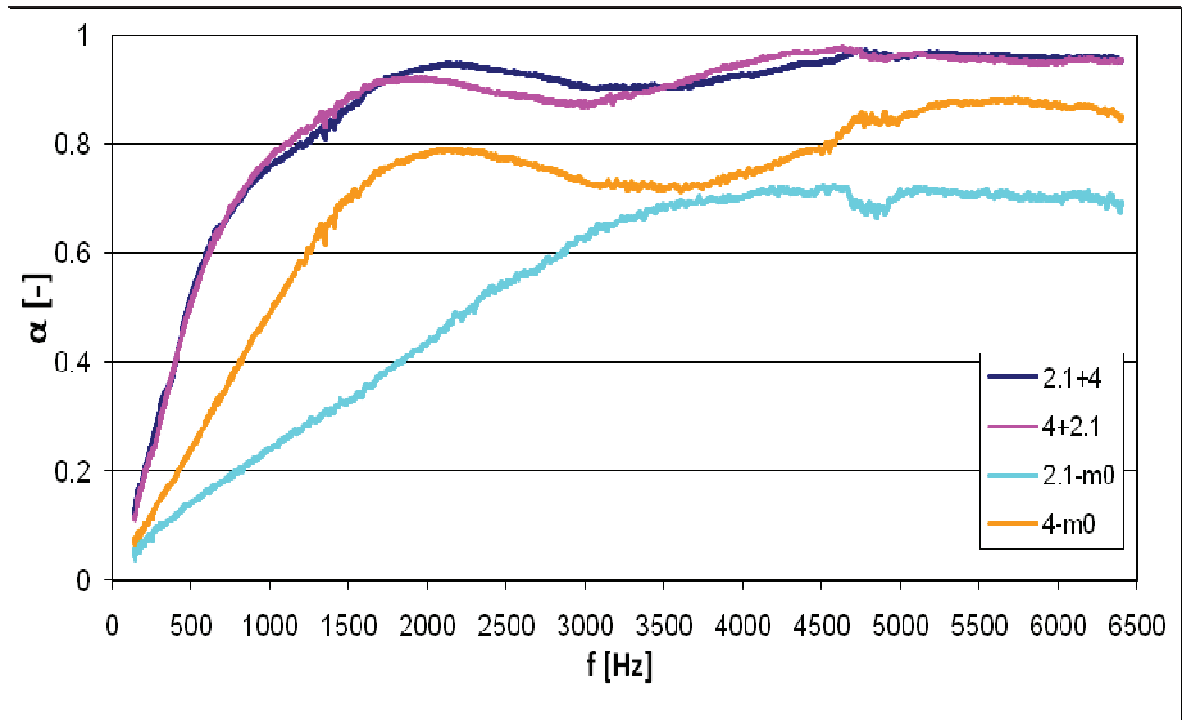
Obr. 34. Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci pro vzorky 1.3, 2.2, 3, 4 a 6.2 s tloušťkou 50 mm se vzduchovou mezerou 2 cm.



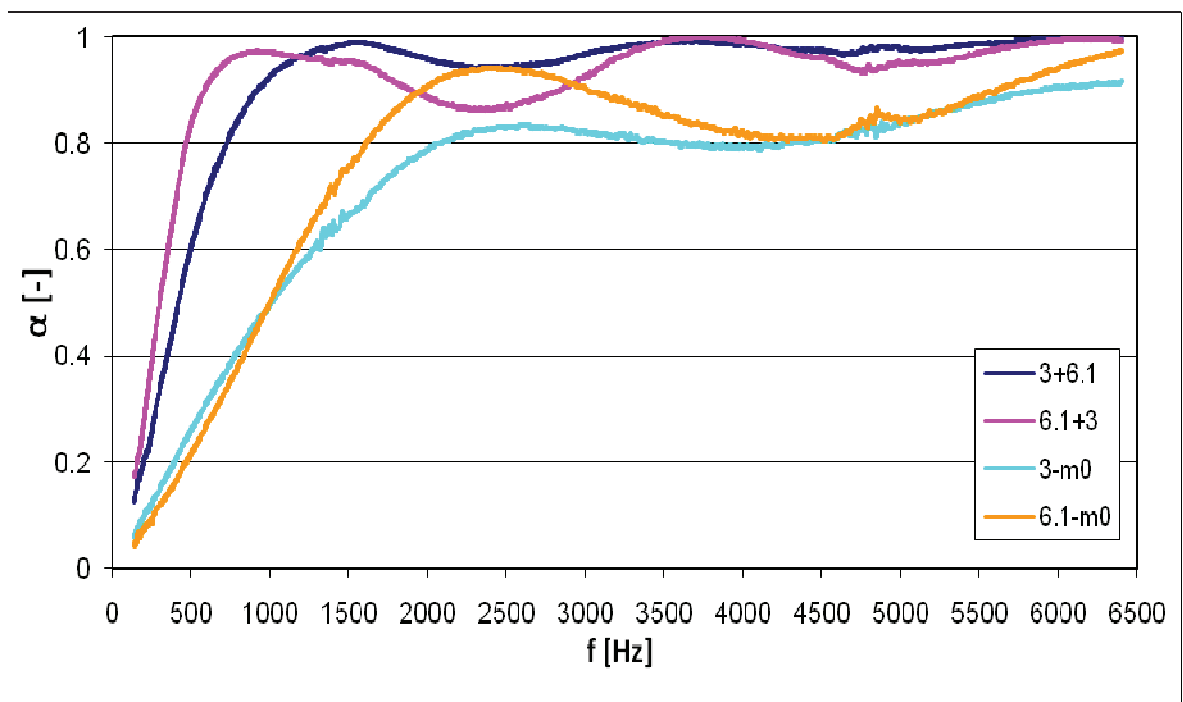
Obr. 35. Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci pro vzorky 1.1, 1.2 a 1.3 se vzduchovou mezerou 8 cm.



Obr. 36. Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci pro sendviče 4+5.2, 5.2+4, 4+5.1 a 5.1+4 bez vzduchové mezery.



Obr. 37. Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci pro sendviče 2.1+4 a 4+2.1 a pro vzorky 2.1 a 4, vše bez vzduchové mezery.



Obr. 38. Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci pro sendviče 3+6.1 a 6.1+3 a pro vzorky 3 a 6.1, vše bez vzduchové mezery.

4.4.3 Výsledné hodnoty pórovitosti

Použité vzorce:

$$a) \text{ Hmotnost vody} \quad m_{H_2O} = m_{vz+kr+H_2O} - m_{vz+kr}$$

$$b) \text{ Objem vody} \quad V_{H_2O} = \frac{m_{H_2O}}{\rho_{(t)H_2O}}$$

$$c) \text{ Objem vzorku} \quad V_{vz} = a \cdot b \cdot c$$

$$d) \text{ Pórovitost vzorku} \quad P = \frac{V_{H_2O}}{V_{vz}} \cdot 100$$

$m_{vz+kr+H_2O}$ - hmotnost vzorku + krabičky + vody, m_{vz+kr} - hmotnost vzorku + krabičky,

$\rho_{(t)H_2O}$ - hustota vody při určité teplotě okolí v době vážení vzorku

Dosazení do vzorců pro materiál 1:

$$a) \quad m_{H_2O} = 547,8g - 303,8g = 244g = 0,244kg$$

$$b) \quad V_{H_2O} = \frac{0,244kg}{\rho_{(22,6^\circ C)H_2O}} = \frac{0,244kg}{997,652kg \cdot m^{-3}} = 0,000244574m^3$$

$$c) \quad V_{vz} = 0,073m \cdot 0,112m \cdot 0,031m = 0,000253456m^3$$

$$d) \quad P = \frac{0,000244574m^3}{0,000253456m^3} \cdot 100 = 96,5\%$$

Tab. 7. Vypočítané hodnoty pórovitosti

číslo materiálu	tloušťka [mm]	teplota [°C]	hmotnost vzorku [g]	hmotnost vzorku + vody [g]	pórovitost [%]
1	30	22,6	5,8	249,9	96,5
2	30	22,1	7,1	248,1	95,7
3	30	24,1	7,3	249,6	95,9
4	30	24	7	249,1	96,2
5	20	22,8	12,1	165,9	92,4
6	30	21,8	24,7	217,5	77,4

5 DISKUZE VÝSLEDKŮ

5.1 Přenosový útlum

5.1.1 Vliv tloušťky a zatížení vzorku

- Obecně z naměřených a zpracovaných charakteristik každého vzorku plyne, že s vyšším setrvačným zatížením vzorku roste schopnost materiálu tlumit vibrace. (Obr. 24, 25, 38, 39 a 40)
- Vzorky, které mají stejnou tloušťku a jsou zatíženy stejným zatížením, mají při malých frekvencích cca do 250 Hz velmi podobné hodnoty útlumu, naopak při vyšších frekvencích se jejich hodnoty přenosového útlumu začínají lišit. (Obr. 26, 41 a 42)
- U stejného materiálu tloušťky 30 mm a 50 mm zatíženy stejným závažím jde při nízkých frekvencích vidět stejné hodnoty útlumu (u většího zatížení – vyšší hodnoty útlumu), které se při vyšších frekvencích již rozcházejí. (Obr. 28 a 45)
- S větší tloušťkou materiálu obecně platí větší schopnost tlumit vibrace (Obr. 28), ale u materiálu 1 bez zátěže vyšly nejlepší hodnoty pro nejtenčí vzorek 1.1 o tloušťce 10 mm (Obr. 43) u zatížení deskou byl už nejhorší a vyšly podle předpokladu lépe vzorky s větší tloušťkou (Obr. 44), ale u zatížení deskou a závažím se hodnoty útlumu vzorku 1.1 pohybují v měřeném frekvenčním rozsahu průměrně níže, než u vzorků 1.2 a 1.3, ale přesto má nakonec nejvyšší hodnotu maximálního přenosového útlumu. (Obr. 27)
- U sendvičové soustavy (Obr. 30) se docílilo spojením vzorků lepších hodnot, než když byly materiály samostatně, naopak tomu bylo u sendvičů (Obr. 46 a 47) kdy byl jeden z materiálu vysoce tlumivý a proto byly jeho hodnoty vyšší, než když byl ve spojení s materiálem dosahujícím nižších kvalit tlumení.
- Při nízkých frekvencích je u některých vzorků obzvláště bez zátěže patrné, že nejdříve rezonují a až při vyšších frekvencích začínají tlumit.

5.1.2 Vliv pórovitosti

- Souvislost mezi pórovitostí a schopností materiálu tlumit funguje velmi dobře, je to patrné z Tab. 8. Bylo zjištěno, že vzorky o vyšší pórovitosti mají i lepší hodnoty

tlumení. Velmi dobré výsledky v tlumení vykazuje materiál 6 recyklát, který má ale nízkou hodnotu pórovitosti, je to částečně zapříčiněno tím, že při měření se nedokázal úplně odstranit vzduch, který zůstal ve vzorku zadrženo lepidlem, kterým se lepí kousky použitých polyuretanových pěn zpět do desek a vzniká tento materiál.

Výsledné nejvyšší hodnoty přenosového útlumu všech vzorků:

- Vzorek bez zátěže:	6.2	D = 66,86 dB	f = 800 Hz
- Vzorek s deskou:	5.2	D = 48,85 dB	f = 525 Hz
- Vzorek s deskou a závažím:	1.1	D = 67,54 dB	f = 700 Hz
- Sendvič bez zátěže:	1.2+6.1	D = 47,26 dB	f = 875 Hz
- Sendvič s deskou:	1.2+6.1	D = 54,26 dB	f = 800 Hz
- Sendvič s deskou a závažím:	2.1+1.1	D = 59,13 dB	f = 900 Hz
- Vzorek tl. = 50 mm (b)	6.2	D = 66,86 dB	f = 800 Hz
- Vzorek tl. = 50 mm (d)	4	D = 47,94 dB	f = 900 Hz
- Vzorek tl. = 50 mm (z)	4	D = 64,88 dB	f = 425 Hz

Tab. 8. Výsledné max. hodnoty přenosového útlumu a jejich budící frekvence

vzorek	$D_{max,b}$ [dB]	f_b [Hz]	$D_{max,d}$ [dB]	f_d [Hz]	$D_{max,z}$ [dB]	f_z [Hz]	P [%]
1.1	36,1	850	28,64	875	67,54	700	96,5
1.2	33,6	575	41,88	825	62,07	675	
1.3	30,03	950	37,98	875	64,21	475	
2.1	27,61	600	38,06	625	52,08	550	95,7
2.2	28,83	675	42,42	975	50,8	800	
3	37,4	675	38,3	675	59,6	200	95,9
4	31,64	925	47,94	900	64,88	425	96,2
5.1	33,13	450	44,67	900	52,07	750	92,4
5.2	40,91	975	48,85	525	58,41	800	
6.1	35,91	950	42,38	975	48,13	825	77,4
6.2	66,86	800	39,74	975	63,35	550	
1.1+2.1	30,94	875	38,66	950	56,35	450	-
2.1+1.1	32,07	950	36,2	475	59,13	900	
1.2+6.1	47,26	875	54,26	800	54,75	825	
6.1+1.2	40,82	975	51,86	725	53,68	750	
4+5.2	46,1	875	43,3	850	54,23	500	
5.1+4	38,6	775	53,74	825	53,19	775	

5.2 Koeficient zvukové pohltivosti

5.2.1 Vliv tloušťky vzorku a vzduchové mezery za vzorkem

- Obecně z naměřených a zpracovaných charakteristik každého vzorku plyne, že s větší tloušťkou roste schopnost materiálu pohlcovat zvukový signál. (Obr. 34, 53 a 54)
- Vliv vzduchové mezery za vzorkem (o kolik se posune pevná stěna od vzorku) jde vysledovat z grafu silným zvlněním výsledné křivky, čím je mezera větší. (Obr. 31, 32 a 50) Hlavní předností vzduchové mezery je, že už začíná pohlcovat zvuk při nízkých frekvencích. Přičemž jde vyzorovat, že vlny mají největší rozptyl při malých frekvencích a při vyšších se začíná rozptyl vlny zmenšovat a jakoby směřoval k rovné přímce. Proto je u nízkých frekvencí značně kolísavá hodnota koeficientu zvukové pohltivosti a směrem k vyšším frekvencím už se hodnota koeficientu tak značně nemění. (Obr. 31 a 32)
- U sendvičových soustav se u měření koeficientu zvukové pohltivosti můžeme na rozdíl od měření přenosového útlumu setkat s výrazným prospěchem spojení materiálů do sendviče. Hodnoty pohltivosti sendvičů už od nízkých frekvencí strmě stoupají a takřka nekolísají a mají vysokou hodnotu koeficientu až do 6400 Hz. (Obr. 36, 37, 56 a 57) Výjimku tvoří sendviče, v kterých je obsažen materiál 5 (má z jedné strany nalepenou tvrdou stranu), (Obr. 48 a 49), dalo by se vysvětlit, že když zvukový signál narazí na tuto stěnu, tak místo aby byl pohlcen, se spíše odrazí, proto má tento sendvič tak špatné hodnoty pohltivosti, přestože je s ním spojen materiál 4, který má jinak dobré pohlcující vlastnosti. I když materiál 5 má při velmi nízkých frekvencích vysoké číslo koeficientu pohltivosti, při zvyšujících frekvencích jeho schopnost pohlcovat spíše upadá. Částečně je aspoň řešením umístit vzorek 4 na vstupní stranu zvukového signálu před materiál 5, aby už před dopadem na tento materiál byl nějaký zvuk pohlcen. (Obr. 35)

5.2.2 Vliv pórovitosti

- Obecně platí, že pohltivost závisí na tom, jak je materiál pórovitý a v jaké formě se póry vyskytují. Cílem je aby materiál měl póry co nejmenší, ale aby jich bylo co nejvíc a byly dobře vzájemně propojeny, aby byla třecí akustická plocha značně

velká. Např. materiál 4 je vysoce pórovitý, ale jeho hodnoty nebyly nejlepší, důvodem nejspíše bylo, že velikost pórů u materiálu 4 byla značně velká a tudíž mohl zvuk pronikat kolem stěn trubice, kde byly otvory díky velikosti pórů. Naopak výborné pohlcující vlastnosti má opět materiál 6, konkrétně vzorek 6.2. Nejspíše se lepidlo spojující kousičky recyklovaných pěn osvědčilo jako velmi dobrý pohlcovač zvuku spolu s pórovitým materiálem. Dalším důvodem je, že materiál 6 není celek, jako ostatní měřené materiály, ale je spojen z mnoha malých celků, mezi těmito celky, které do sebe zapadají, vzniká tření, když na něj působí zvuk (nebo vibrace), což se pozitivně projevuje na jeho schopnostech tlumit zvuk. (Obr. 55)

Výsledné nejvyšší hodnoty koeficientu zvukové pohltivosti všech vzorků:

- Vzorek bez mezery:	6.2	$\alpha = 0,999963$	$f = 4224 \text{ Hz}$
- Vzorek s mezerou 2 cm:	6.2	$\alpha = 0,999958$	$f = 5475 \text{ Hz}$
- Vzorek s mezerou 8 cm:	6.2	$\alpha = 0,999955$	$f = 5600 \text{ Hz}$
- Sendvič bez mezery:	6.1+4	$\alpha = 0,999961$	$f = 3688 \text{ Hz}$
- Vzorek tl. = 50 mm (m0)	6.2	$\alpha = 0,999963$	$f = 4224 \text{ Hz}$
- Vzorek tl. = 50 mm (m2)	6.2	$\alpha = 0,999958$	$f = 5475 \text{ Hz}$
- Vzorek tl. = 50 mm (m8)	6.2	$\alpha = 0,999955$	$f = 5600 \text{ Hz}$

Tab. 9. Výsledné max. hodnoty koeficientu zvukové pohltivosti a jejich budící frekvence.

vzorek	$\alpha_{max,m0}$ [-]	f_{m0} [Hz]	$\alpha_{max,m2}$ [-]	f_{m2} [Hz]	$\alpha_{max,m8}$ [-]	f_{m8} [Hz]	P [%]
1.1	0,709775	6392	0,742011	2880	0,795736	4712	96,5
1.2	0,745473	6392	0,781586	5200	0,812713	5320	
1.3	0,993789	4272	0,994207	5312	0,995479	5496	
2.1	0,724292	4576	0,759811	6240	0,760935	5800	95,7
2.2	0,887628	6392	0,891525	4624	0,897859	5248	
3	0,916902	6400	0,903138	4608	0,91181	5216	95,9
4	0,881757	5744	0,876918	6392	0,933963	6400	96,2
5.1	0,704565	590	0,796798	262	0,999891	198	92,4
5.2	0,901847	6328	0,894964	6360	0,991335	212	
6.1	0,973106	6392	0,975174	4584	0,985473	5064	77,4
6.2	0,999963	4224	0,999958	5475	0,999955	5600	
3+4	0,988601	4232					
4+3	0,993534	6328					
2.1+4	0,973129	4776					
4+2.1	0,976505	4632					
1.2+3	0,992685	4184					
3+2.1	0,985065	4696					
4+6.1	0,998164	4678					
6.1+4	0,999961	3688					
3+6.1	0,999913	6328					
6.1+3	0,99982	3736					
2.1+6.1	0,982526	6384					
6.1+2.1	0,998923	4416					
6.1+1.2	0,999883	4112					
1.2+6.1	0,996335	6392					
2.1+1.2	0,948553	5800					
1.2+2.1	0,965534	4816					
2.2+1.1	0,96198	6328					
1.1+2.2	0,998258	5464					
4+5.2	0,988942	4592					
5.2+4	0,915306	6360					
4+5.1	0,934206	6384					
5.1+4	0,928764	290					

ZÁVĚR

Cílem mé bakalářské práce bylo změřit vibroakustické vlastnosti a pórovitost polyuretanových pěn.

V teoretické části jsem se v první části zabýval problematikou rozdělení akustiky, jejich základních veličin a pojmů. Zvláště jsem se v jedné kapitole věnoval problematice mechanických vibrací, kde jsem rozebíral jejich druhy a veličiny a ve druhé kapitole problematice zvuku a hluku, kde jsem se věnoval charakteristickým veličinám, činitelům zvuku a decibelovým veličinám. Ve druhé části jsem popisoval pórovitost materiálů, druhy měření pórovitosti a spojitost pórovitých materiálů a akustiky.

V praktické části jsem nejdříve popsal, které materiály se budou měřit. Uvedl jsem je do tabulky dle jejich tloušťky, vlastností a hustoty. Když byly samotné vzorky rozděleny, popsal jsem přípravu vzorků pro jednotlivá měření, jak se vyráběly a zdokumentoval jsem jejich tvar a vzhled. Poté jsem se začal věnovat metodice měření, jakým způsobem budu měřit přenosový útlum, koeficient zvukové pohltivosti a pórovitost materiálů, jež byla měřena objemovou metodou na rotační olejové vývěvě. Výsledné hodnoty jsem zpracoval graficky a nakonec v diskuzi výsledků rozvedl, jaké jsou nejlepší hodnoty a co jakým způsobem může výsledné průběhy ovlivnit.

Z vibračních vlastností byl měřen přenosový útlum na budícím vibrátoru metodou nucených kmitů. Byl zkoumán vliv tloušťky vzorku, velikost setrvačného zatížení působícího na vzorek, spojení vzorků do sendvičových soustav a vliv pórovitosti. Jednoznačným pozitivem na tlumení je vliv větší setrvačné zátěže na vzorek, jinak u přenosového útlumu nejde jednoznačně určit jeden vzorek, který by ve všech měřeních vynikal. Velmi dobré hodnoty vykazaly nejvíce pórovité materiály 1 a 4, které díky své pórovitosti ($P_1 = 96,5\%$, $P_4 = 96,2\%$), jež mají nejvyšší ze všech měřených materiálů, dokázaly velmi dobře tlumit vibrace, k nim se přidal materiál 6 – recyklát jež už ale nemá tak vysokou pórovitost. Nejvyšší dosažený přenosový útlum byl u vzorku 1.1z; $D = 67,54$ dB; $f = 700$ Hz.

Z akustických vlastností byl měřen koeficient zvukové pohltivosti v Kundtově impedanční trubici. Byl zkoumán vliv tloušťky vzorku, velikost vzduchové mezery, spojení vzorků do sendvičových soustav a vliv pórovitosti. Z výsledků jsem zjistil výrazně pozitivní vliv tloušťky na pohlcování zvuku, tím pádem byl prokázán i příznivý vliv spojením do sendvičů, jelikož se tím opět zvětšila tloušťka. Vliv vzduchové mezery byl patrný v grafech

silným zvlněním při nízkých frekvencích a tím kolísavostí hodnoty útlumu. Pozitivem vzduchových mezer je, že čím jsou větší, tím začíná materiál tlumit vibrace dříve, při nižších frekvencích. Nejlépe dopadl materiál 6 a konkrétně jeho větší tloušťka 50 mm u vzorku 6.2. Vykazuje velmi vysoké hodnoty koeficientu zvukové pohltivosti, ať je měřen s mezerou i bez ní, navíc je také zastoupen v sendviči 6.1+4 s vysoce pórovitým materiálem 4. Nejvyšší dosažený koeficient zvukové pohltivosti byl u vzorku 6.2b; $\alpha = 0,999963$; $f = 4224$ Hz.

Z měření přenosového útlumu i koeficientu zvukové pohltivosti je třeba konstatovat, že si velmi dobře vedl materiál 6. Jeho hodnota pórovitosti je ovšem vzhledem k ostatním materiálům pouze 77,4%. Tento materiál je složen z malých kousíčků recyklovaných polyuretanových pěn a ve formě desek jsou spojeny lepidlem. To částečně zabránilo při měření pórovitosti dosáhnout vyšších hodnot, protože část vzduchu zůstala zachycena uvnitř vzorku. Jeho výborné vlastnosti při pohlcování a tlumení jde přičíst, že je složen z mnoha malých celků, které do sebe zapadají a když na ně působí vibrace nebo zvuk, vzniká mezi těmito malými celky tření, což výrazně přispívá k tlumení a pohlcování. Tento materiál má navíc velkou výhodu oproti ostatním měřeným materiálům, protože jeho výroba je levnější, tím že se jedná o recyklát, oproti výrobě nových polyuretanových pěn. V dnešní době je kladen velký důraz na životní prostředí, proto může být výroba tohoto materiálu podpořena různými dotacemi a granty. Negativem tohoto materiálu je jeho životnost oproti nově vyrobeným polyuretanovým pěním.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] JIŘÍČEK, O. Úvod do akustiky. 1. vyd. Praha : ČVUT, 2002. 146 s.
ISBN 80-01-02460-1.
- [2] LAPČÍK, Ľ., RAAB, M. Nauka o materiálech II. 2. vyd. Zlín : UTB ve Zlíně, 2004. 132 s. ISBN 80-7318-229-7.
- [3] MIŠUN, V. Vibrace a hluk. 2. vyd. Brno : Nakladatelství CERM, 2005. 177 s.
ISBN 80-214-3060-5.
- [4] MLEZIVA, J. Polymery – struktura vlastnosti a použití. 1. vyd. Praha : Sobotáles, 1993. 528 s. ISBN 80-901570-4-1.
- [5] NOVÝ, R. Hluk a chvění. 2. vyd. Praha : ČVUT, 2000. 389 s.
ISBN 80-01-02246-3.
- [6] NOVÝ, R. Hluk a otřesy. 3. vyd. Praha : ČVUT, 1989. 190 s.
ISBN 80-01-00101-6.
- [7] SMETANA C., Hluk a vibrace. 1. vyd. Praha : Sdělovací technika, 1998. 188 s.
ISBN 80-901936-2-5
- [8] VAŇKOVÁ, M. Hluk, vibrace a ionizující záření v životním a prac. prostředí.
část I. 1. vyd. Brno : PC-DIR spol. s.r.o., 1995. 140 s. ISBN 80-214-0695-1.
- [9] VAŇKOVÁ, M. Hluk, vibrace a ionizující záření v životním a prac. prostředí.
část II. 1. vyd. Brno : PC-DIR spol. s.r.o., 1996. 161 s. ISBN 80-214-0818-9.
- [10] STRUHAŘOVÁ, V. Polyuretany a jejich využití v technické akustice
[Bakalářská práce]. Zlín 2008. UTB ve Zlíně. Fakulta technologická
- [11] Environmentální fyzika. ÚFMI UTB ve Zlíně. [online].
[cit. 2011-2-15] Dostupné z
<http://ufmi.ft.utb.cz/index.php?page=env_fyzika>
- [12] Pórovitost. Wikipedia. [online]. [cit. 2011-2-15] Dostupné z
<http://cs.wikipedia.org/wiki/P%C3%B3rovitost>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

a	[m/s ²]	Zrychlení mechanického kmitání
a_1	[m/s ²]	Amplituda zrychlení na vstupu 1 do kmitavé soustavy
a_2	[m/s ²]	Amplituda zrychlení na výstupu 2 z kmitavé soustavy
a_{ef}	[m/s ²]	Efektivní hodnota zrychlení kmitavého pohybu
c	[m/s]	Rychlost šíření vlnění (rychlost zvuku)
E	[Pa]	Modul pružnosti materiálu v tahu
f	[Hz]	Frekvence vlnění (kmitočet)
F_1	[N]	Amplituda síly na vstupu 1 do kmitavé soustavy
F_2	[N]	Amplituda síly na výstupu 2 z kmitavé soustavy
G	[Pa]	Modul pružnosti ve smyku
h	[m]	Výška průřezu tyče
I_0	[W/m ²]	Referenční hodnota intenzity zvuku, $I_0 = 10^{-12}$ W/m ²
I	[W/m ²]	Intenzita zvuku sledovaného akustického signálu
I	[m ⁴]	Moment setrvačnosti průřezu tyče
m	[kg/m]	Hmotnost jednotkové délky tyče
p	[Pa]	Akustický tlak
p_0	[Pa]	Amplituda akustického tlaku
p_{ef}	[Pa]	Efektivní hodnota akustického tlaku
S	[m ²]	Plocha
T	[s]	Perioda vlnění
v	[m/s]	Rychlost kmitání
V_p	[m ³]	Objem pórového prostoru
V_c	[m ³]	Celkový objem
V_z	[m ³]	Objem zrn materiálu
v_I	[m/s]	Amplituda rychlosti na vstupu 1 do kmitavé soustavy

v_2	[m/s]	Amplituda rychlosti na výstupu 2 z kmitavé soustavy
v_{ef}	[m/s]	Efektivní hodnota rychlosti kmitání
v_r	[m/s]	Rychlost kmitání částic ve směru r
W_0	[W]	Referenční akustický výkon, $W_0 = 10^{-12}$ W
W	[W]	Sledovaný akustický výkon
x	[Ns/m ³]	Reálná složka měrné akustické impedance
y	[m]	Výchylka kmitajícího bodu z rovnovážné polohy
y_0	[m]	Amplituda výchylky chvění
y_{ef}	[m]	Efektivní hodnota výchylky kmitání
ω	[1/s]	Úhlový kmitočet
λ	[m]	Vlnová délka
φ	[rad]	Fázový posun
ρ	[kg/m ³]	Hustota prostředí

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1. Druhy vibrací dle časového průběhu.</i>	13
<i>Obr. 2. Šíření zvukového vlnění od zdroje. [9]</i>	17
<i>Obr. 3. Znázornění průběhu akustického tlaku.....</i>	18
<i>Obr. 4. Průchod vlnění plochou. [3]</i>	23
<i>Obr. 5. Akustický výkon a jeho hladina. [5]</i>	25
<i>Obr. 6. Hladina akustického tlaku v různém prostředí. [5].....</i>	27
<i>Obr. 7. Zdroj zvuku vyzařující do všech směrů. [5]</i>	29
<i>Obr. 8. Odraz akustické vlny.....</i>	30
<i>Obr. 9. Dopad paprsku na rozhraní.</i>	31
<i>Obr. 10. Rozdělení akustické energie při dopadu vlny na stěnu. [5]</i>	32
<i>Obr. 11. Oktávové pásmo. [3]</i>	35
<i>Obr. 12. Třetinooktávové pásmo [11]</i>	36
<i>Obr. 13. Rozdělení pórovitosti.</i>	37
<i>Obr. 14. Připravené vzorky k měření přenosového útlumu.</i>	44
<i>Obr. 15. Ruční lis a formy.....</i>	44
<i>Obr. 16. Připravené vzorky k měření zvukové pohltivosti.</i>	44
<i>Obr. 17. Připravené vzorky k měření objemové pórovitosti.</i>	45
<i>Obr. 18. Schéma zapojení měřicího systému pro měření přenosového útlumu. [11]</i>	46
<i>Obr. 19. Vibrátor se vzorkem 1.2-z.....</i>	46
<i>Obr. 20. Princip měření Kundtovy impedanční trubice. [11]</i>	47
<i>Obr. 21. Schéma měřicího systému pro měření zvukové pohltivosti. [11]</i>	48
<i>Obr. 22. Fotografie měřicího systému pro měření zvukové pohltivosti.....</i>	48
<i>Obr. 23. Rotační olejová vývěva.</i>	49
<i>Obr. 24. Detail měřeného vzorku – 3.....</i>	49
<i>Obr. 25. Závislost přenosového útlumu na frekvenci pro vzorek 2.1 zatížen 3 typy zátěže.</i>	50
<i>Obr. 26. Závislost přenosového útlumu na frekvenci pro vzorek 5.2 zatížen 3 typy zátěže.</i>	51
<i>Obr. 27. Závislost přenosového útlumu na frekvenci pro vzorky 1.3, 2.2, 3, 4 a 6.2 o tloušťce 50 mm zatíženy deskou.....</i>	51

<i>Obr. 28. Závislost přenosového útlumu na frekvenci pro vzorky 1.1, 1.2 a 1.3 zatíženy deskou a závažím.</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 29. Závislost přenosového útlumu na frekvenci pro vzorky 6.1 a 6.2 zatíženy 3 typy zátěže.</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 30. Závislost přenosového útlumu na frekvenci pro sendviče 1.1+2.1 a 2.1+1.1 zatíženy 3 typy zátěže.</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 31. Závislost přenosového útlumu na frekvenci pro sendviče 1.2+6.1 a 6.1+1.2 a pro vzorky 1.2 a 6.1, vše zatíženo deskou.</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 32. Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci pro vzorek 3 se 3 druhy vzduchových mezer.</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 33. Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci pro vzorek 6.2 se 3 druhy vzduchových mezer.</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 34. Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci pro vzorky 1.3, 2.2, 3, 4 a 6.2 s tloušťkou 50 mm se vzduchovou mezerou 2 cm.</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 35. Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci pro vzorky 1.1, 1.2 a 1.3 se vzduchovou mezerou 8 cm.</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 36. Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci pro sendviče 4+5.2, 5.2+4, 4+5.1 a 5.1+4 bez vzduchové mezery.</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 37. Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci pro sendviče 2.1+4 a 4+2.1 a pro vzorky 2.1 a 4, vše bez vzduchové mezery.</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 38. Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci pro sendviče 3+6.1 a 6.1+3 a pro vzorky 3 a 6.1, vše bez vzduchové mezery.</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 39. Závislost přenosového útlumu na frekvenci pro vzorek 1.3 zatížen třemi typy zátěže.</i>	<i>74</i>
<i>Obr. 40. Závislost přenosového útlumu na frekvenci pro vzorek 3 zatížen třemi typy zátěže.</i>	<i>74</i>
<i>Obr. 41. Závislost přenosového útlumu na frekvenci pro vzorek 4 zatížen třemi typy zátěže.</i>	<i>75</i>
<i>Obr. 42. Závislost přenosového útlumu na frekvenci pro vzorky 1.3, 2.2, 3, 4 a 6.2 o tloušťce 50 mm bez zátěže.</i>	<i>75</i>
<i>Obr. 43. Závislost přenosového útlumu na frekvenci pro vzorky 1.3, 2.2, 3, 4 a 6.2 o tloušťce 50 mm zatíženy deskou a závažím.</i>	<i>76</i>

<i>Obr. 44. Závislost přenosového útlumu na frekvenci pro vzorky 1.1, 1.2 a 1.3 bez zátěže.</i>	<i>76</i>
<i>Obr. 45. Závislost přenosového útlumu na frekvenci pro vzorky 1.1, 1.2 a 1.3 zatížené deskou.</i>	<i>77</i>
<i>Obr. 46. Závislost přenosového útlumu na frekvenci pro vzorky 2.1 a 2.2 zatíženy 3 typy zátěže.</i>	<i>77</i>
<i>Obr. 47. Závislost přenosového útlumu na frekvenci pro sendviče 1.1+2.1 a 2.1+1.1 a pro vzorky 1.1 a 2.1, vše bez zátěže.</i>	<i>78</i>
<i>Obr. 48. Závislost přenosového útlumu na frekvenci pro sendviče 4+5.2 a 5.2+4 a pro vzorky 4, 5.1 a 5.2, vše bez zátěže.</i>	<i>78</i>
<i>Obr. 49. Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci pro vzorek 5.1 se 3 druhy vzduchových mezer.</i>	<i>79</i>
<i>Obr. 50. Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci pro vzorek 5.2 se 3 druhy vzduchových mezer.</i>	<i>79</i>
<i>Obr. 51. Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci pro vzorek 2.2 se 3 druhy vzduchových mezer.</i>	<i>80</i>
<i>Obr. 52. Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci pro vzorky 1.3, 2.2, 3, 4 a 6.2 bez vzduchové mezery.</i>	<i>80</i>
<i>Obr. 53. Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci pro vzorky 1.3, 2.2, 3, 4 a 6.2 se vzduchovou mezerou 8 cm.</i>	<i>81</i>
<i>Obr. 54. Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci pro vzorky 1.1, 1.2 a 1.3 bez vzduchové mezery.</i>	<i>81</i>
<i>Obr. 55. Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci pro vzorky 1.1, 1.2 a 1.3 se vzduchovou mezerou 2 cm.</i>	<i>82</i>
<i>Obr. 56. Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci pro vzorek 6.1 a 6.2 se 3 druhy vzduchových mezer.</i>	<i>82</i>
<i>Obr. 57. Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci pro sendviče 2.2+1.1 a 1.1+2.2 a pro vzorky 2.2 a 1.1, vše bez vzduchové mezery.</i>	<i>83</i>
<i>Obr. 58. Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci pro sendviče 3+4 a 4+3 a pro vzorky 3 a 4, vše bez vzduchové mezery.</i>	<i>83</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1. Rychlost šíření podélných vln v různých látkách. [5]</i>	20
<i>Tab. 2. Délky podélných a ohybových vln. [3]</i>	22
<i>Tab. 3. Lineární a decibelová stupnice pro akustický výkon. [5]</i>	26
<i>Tab. 4. Hodnoty činitele pohltivosti u vybraných materiálů.</i>	33
<i>Tab. 5. Charakteristické frekvence oktavových pásem. [3]</i>	35
<i>Tab. 6. Vlastnosti měřených materiálů.</i>	43
<i>Tab. 7. Vypočítané hodnoty pórovitosti</i>	58
<i>Tab. 8. Výsledné max. hodnoty přenosového útlumu a jejich budící frekvence</i>	60
<i>Tab. 9. Výsledné max. hodnoty koeficientu zvukové pohltivosti a jejich budící frekvence.</i>	63

SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA PI: FREKVENČNÍ ZÁVISLOSTI PŘENOSOVÉHO ÚTLUMU

Vybrané charakteristiky:

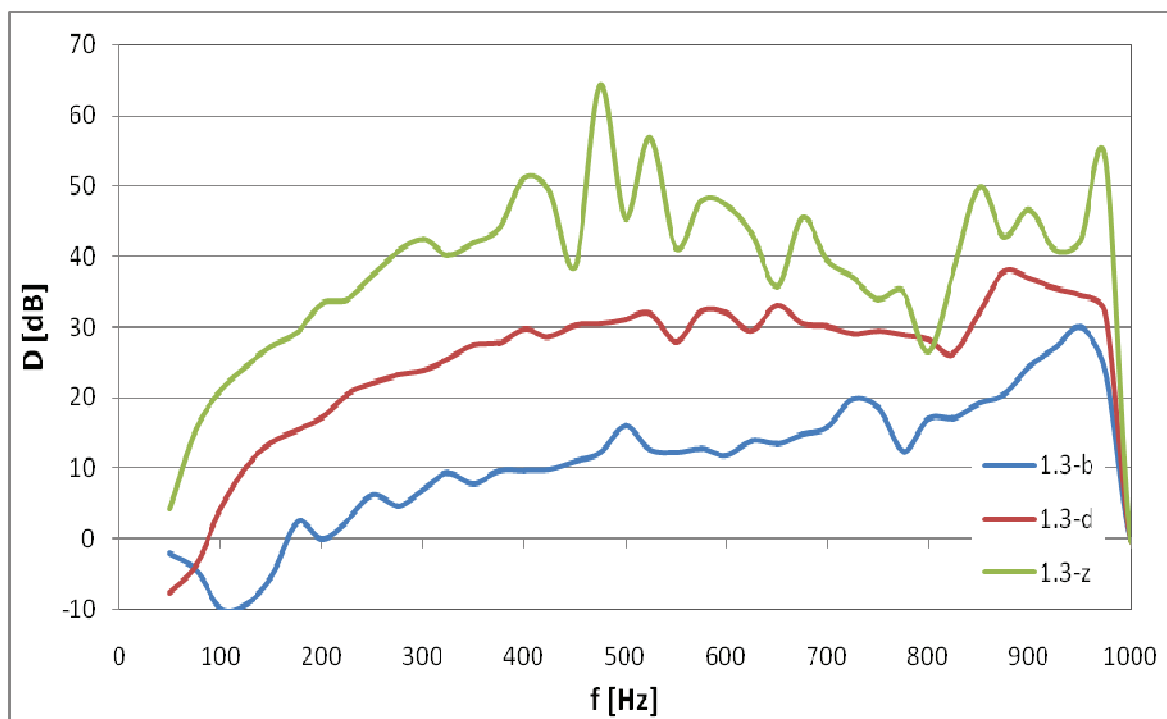
- 1 vzorek, který je měřen se 3 typy zátěže (bez zátěže, zatížen deskou a zatížen deskou a závažím). (Obr. 38, 39 a 40)
- 5 vzorků o tloušťce 50 mm bez zátěže (Obr. 41) a zatížený deskou a závažím (Obr. 42)
- 1 materiál – 3 vzorky tloušťky 10, 30 a 50 mm bez zátěže (Obr. 43) a zatížený deskou. (Obr. 44)
- 1 materiál – 2 vzorky tloušťky 30 a 50 mm zatížený 3 typy zátěže. (Obr. 45)
- 1 sendvič, poté otočený + 2 vzorky použité v sendviči zvlášť, vše měřeno bez zátěže (Obr. 46)
- 1 sendvič, poté otočený + 3 vzorky použité v sendviči zvlášť, vše měřeno zatížené deskou a závažím (Obr. 47)

PŘÍLOHA PII: FREKVENČNÍ ZÁVISLOSTI KOEFICIENTU ZVUKOVÉ POHLTIVOSTI

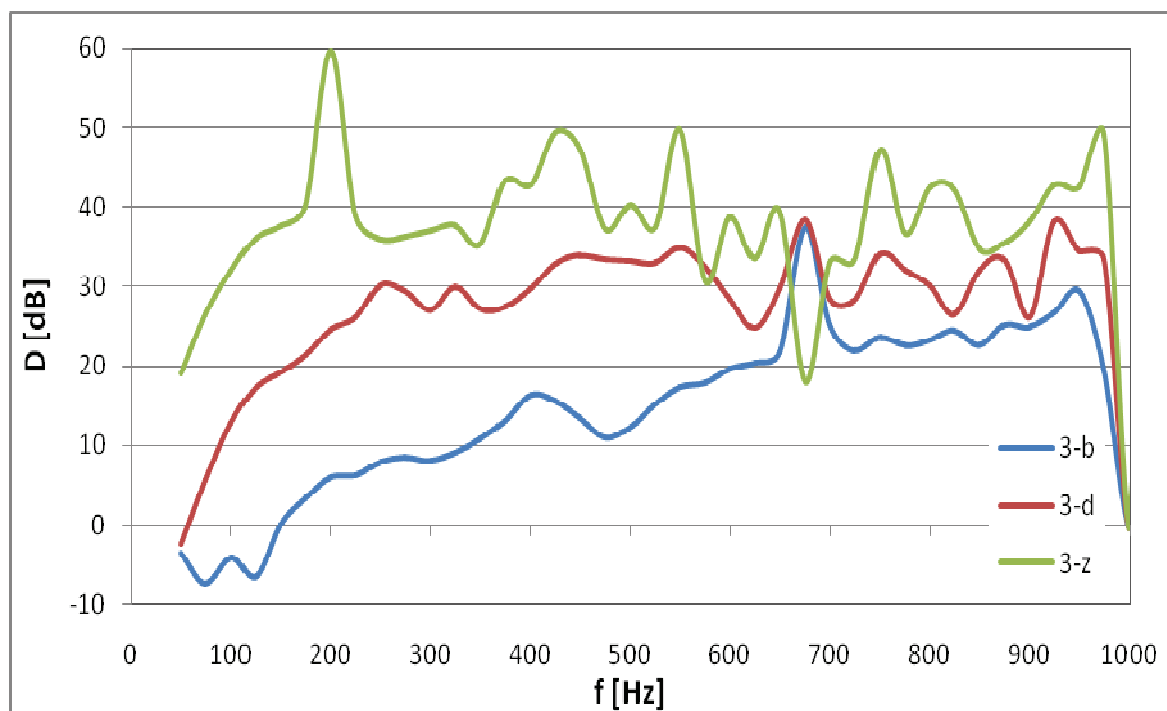
Vybrané charakteristiky:

- 1 vzorek, který je měřen se 3 druhy vzduchových mezer (bez vzduchové mezery, s mezerou o velikosti 2 cm a s mezerou o velikosti 8 cm). (Obr. 48, 49 a 50)
- 5 vzorků o tloušťce 50 mm bez vzduchové mezery (Obr. 51) a se vzduchovou mezerou 8 cm. (Obr. 52)
- 1 materiál – 3 vzorky tloušťky 10, 30 a 50 mm bez vzduchové mezery (Obr. 53) a se vzduchovou mezerou o velikosti 2 cm. (Obr. 54)
- 1 materiál – 2 vzorky tloušťky 30 a 50 mm se 3 druhy vzduchových mezer. (Obr. 55)
- 1 sendvič, poté otočený + 2 vzorky ze sendviče zvlášť bez mezery. (Obr. 56 a 57)

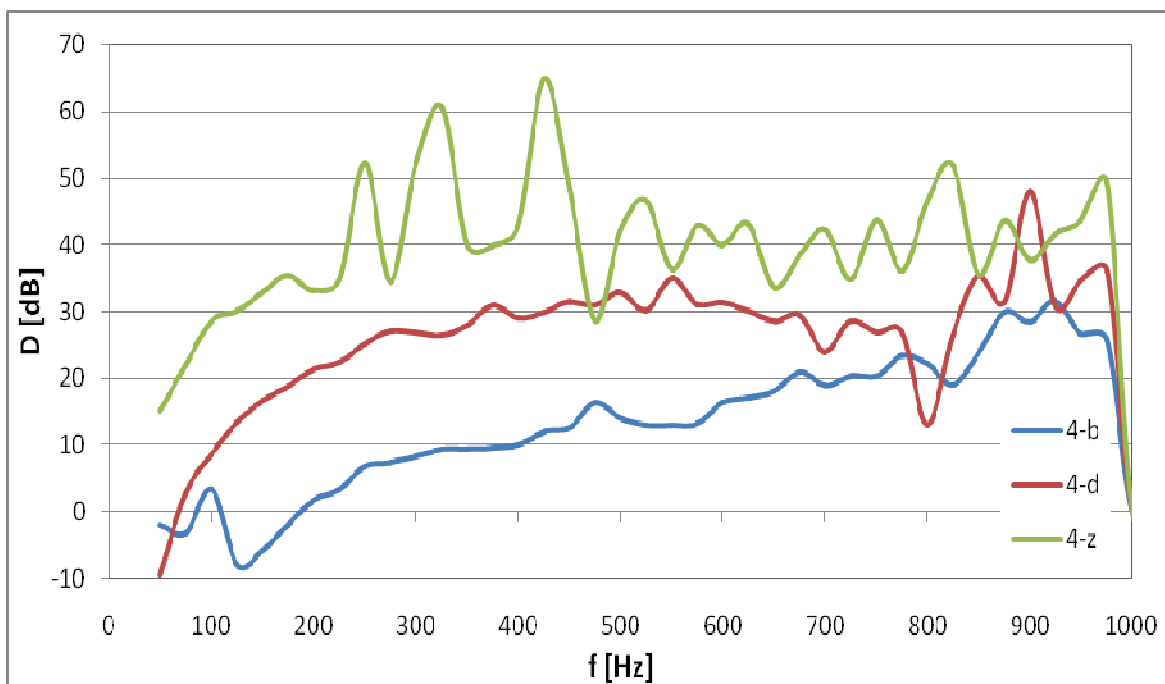
PŘÍLOHA P I: FREKVENČNÍ ZÁVISLOSTI PŘENOSOVÉHO ÚTLUMU



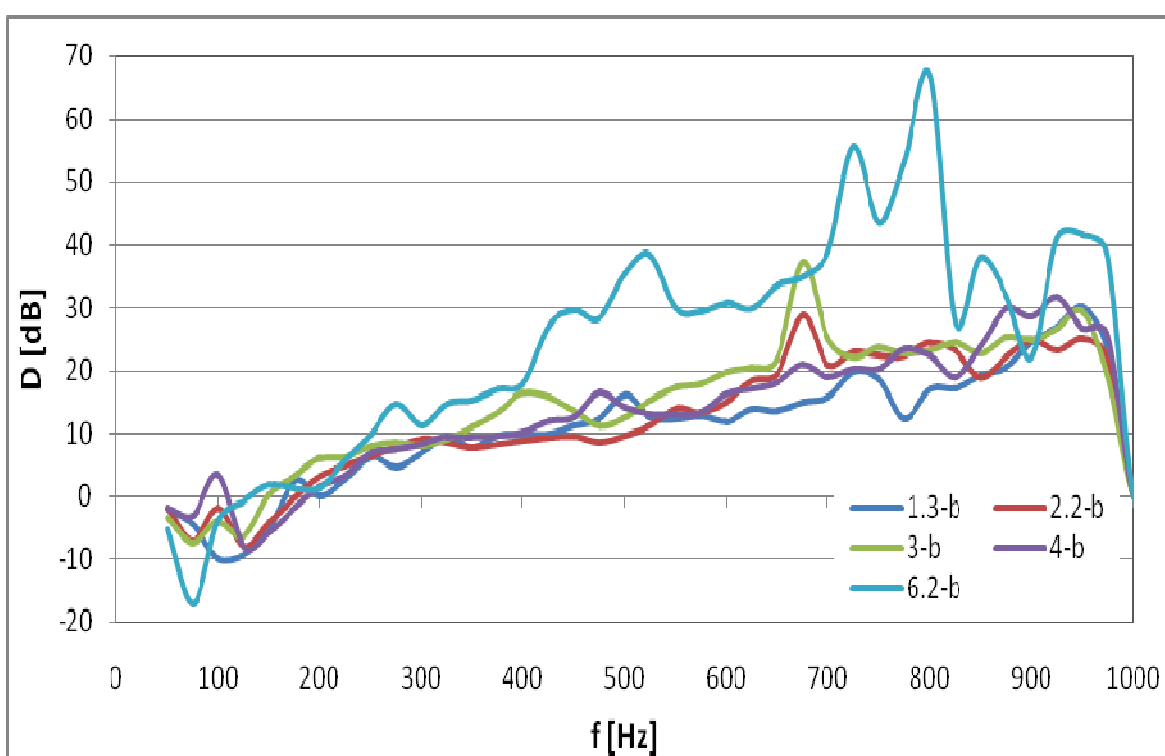
Obr. 39. Závislost přenosového útlumu na frekvenci pro vzorek 1.3 zatížen třemi typy zátěže.



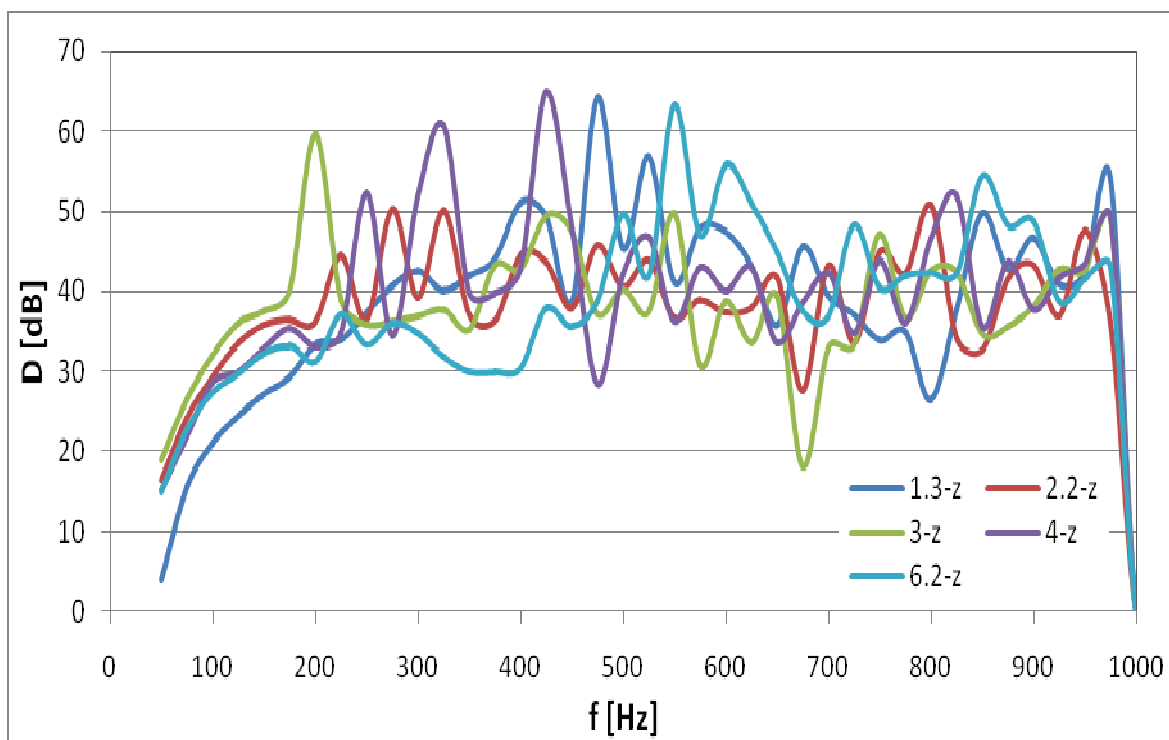
Obr. 40. Závislost přenosového útlumu na frekvenci pro vzorek 3 zatížen třemi typy zátěže.



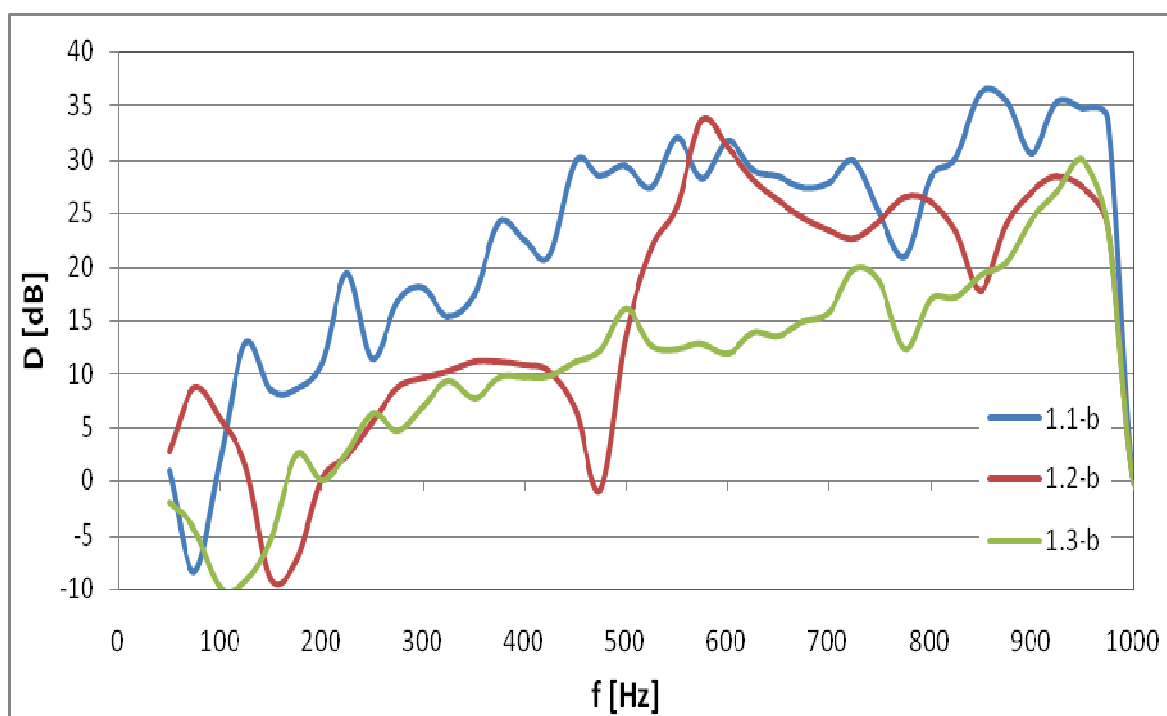
Obr. 41. Závislost přenosového útlumu na frekvenci pro vzorek 4 zatížen třemi typy zátěže.



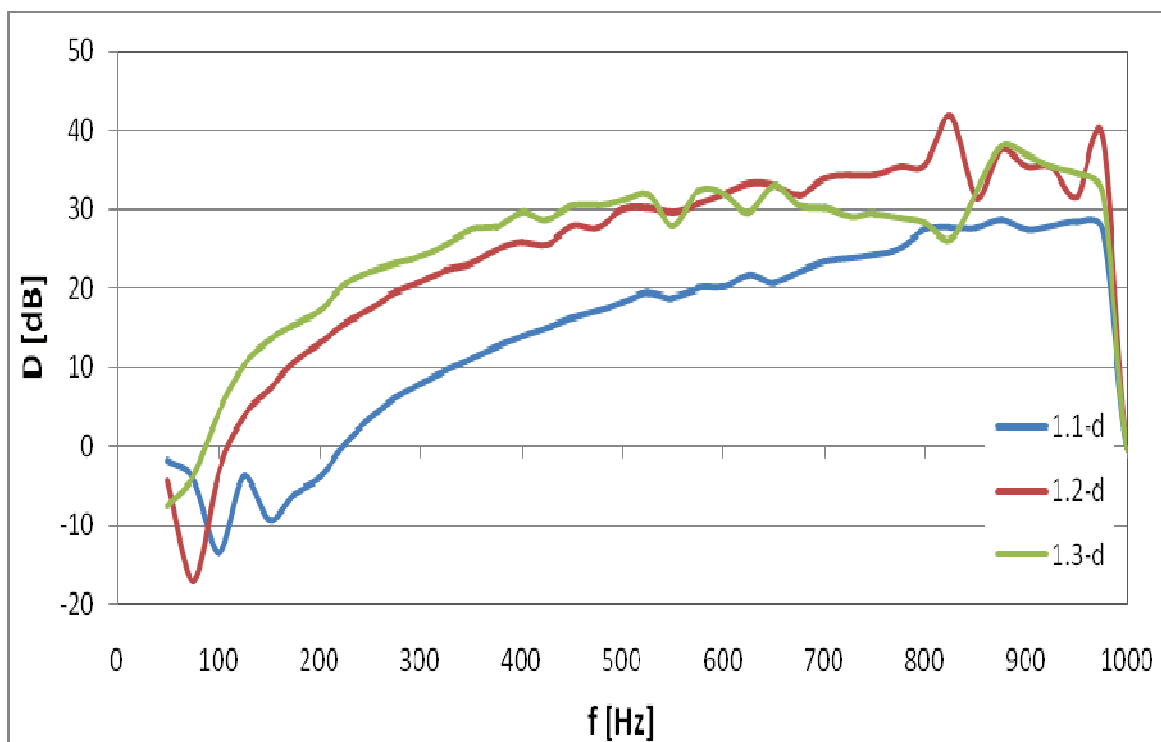
Obr. 42. Závislost přenosového útlumu na frekvenci pro vzorky 1.3, 2.2, 3, 4 a 6.2 o tloušťce 50 mm bez zátěže.



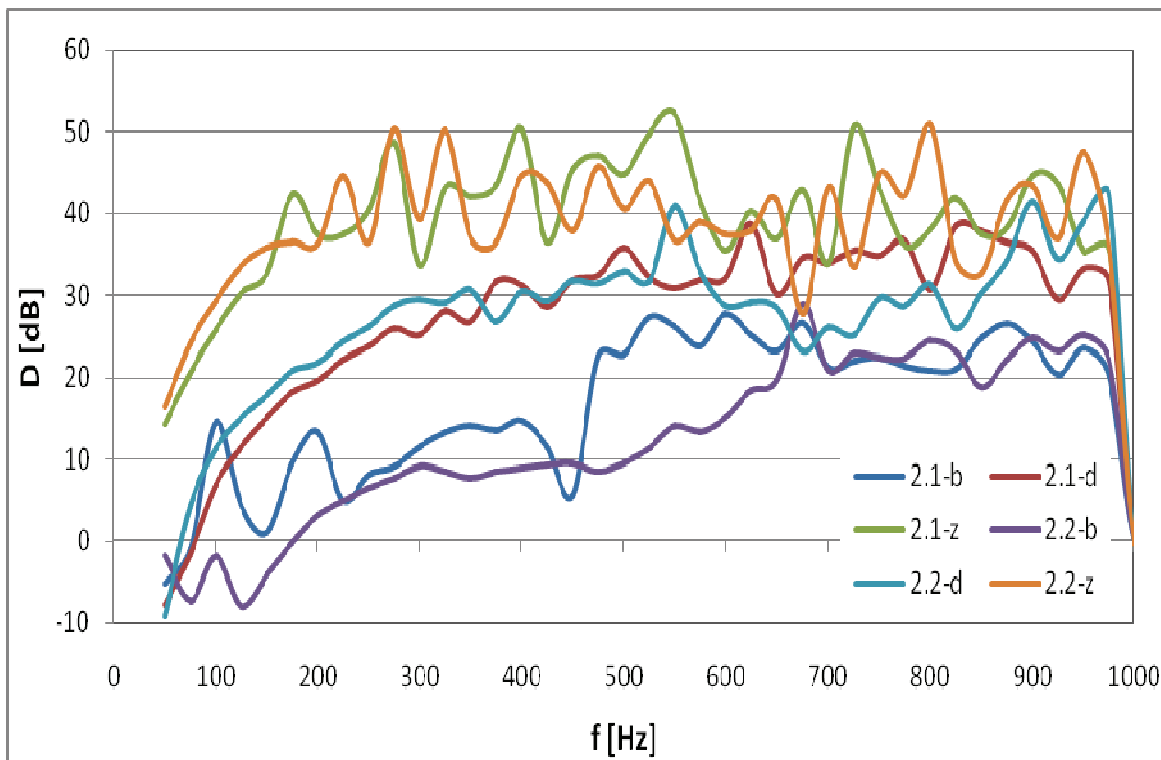
Obr. 43. Závislost přenosového útlumu na frekvenci pro vzorky 1.3, 2.2, 3, 4 a 6.2 o tloušťce 50 mm zatíženy deskou a závažím.



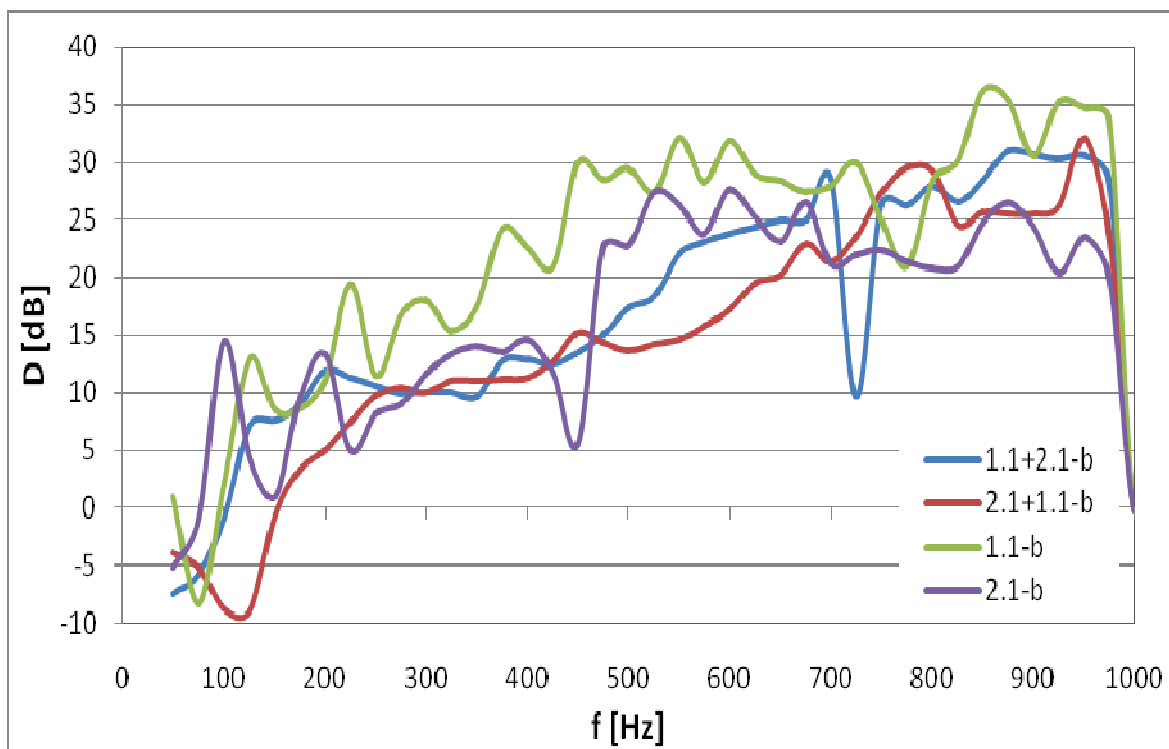
Obr. 44. Závislost přenosového útlumu na frekvenci pro vzorky 1.1, 1.2 a 1.3 bez zátěže.



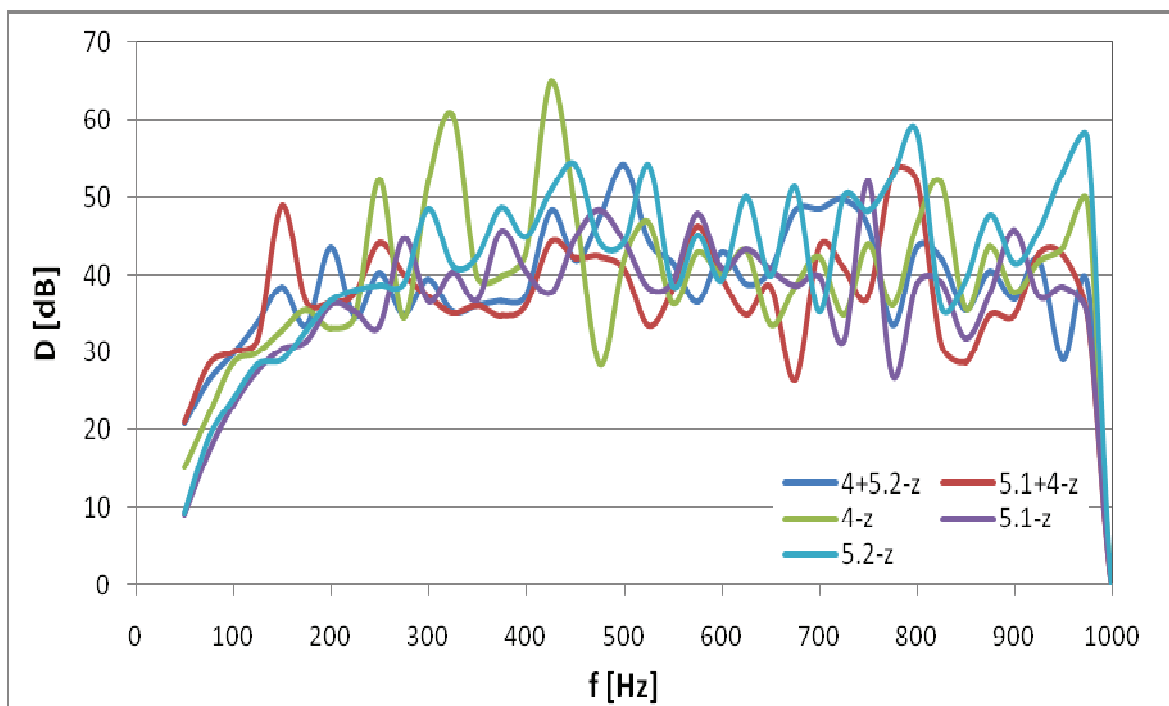
Obr. 45. Závislost přenosového útlumu na frekvenci pro vzorky 1.1, 1.2 a 1.3 zatížené deskou.



Obr. 46. Závislost přenosového útlumu na frekvenci pro vzorky 2.1 a 2.2 zatížený 3 typy zátěže.

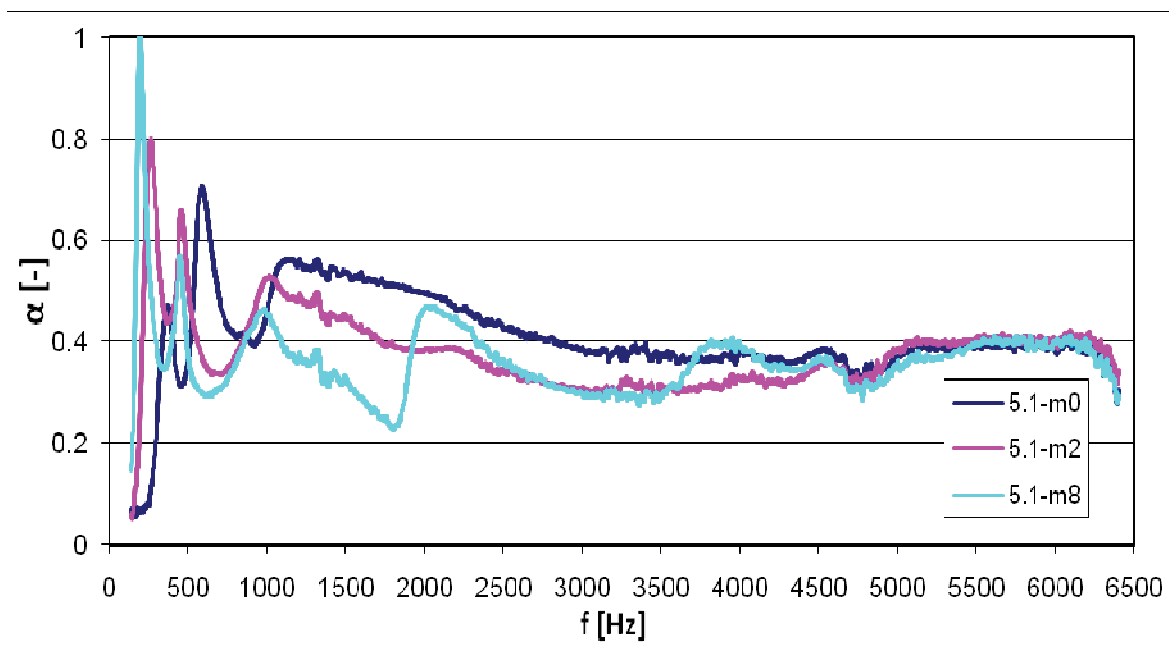


Obr. 47. Závislost přenosového útlumu na frekvenci pro sendviče 1.1+2.1 a 2.1+1.1 a pro vzorky 1.1 a 2.1, vše bez zátěže.

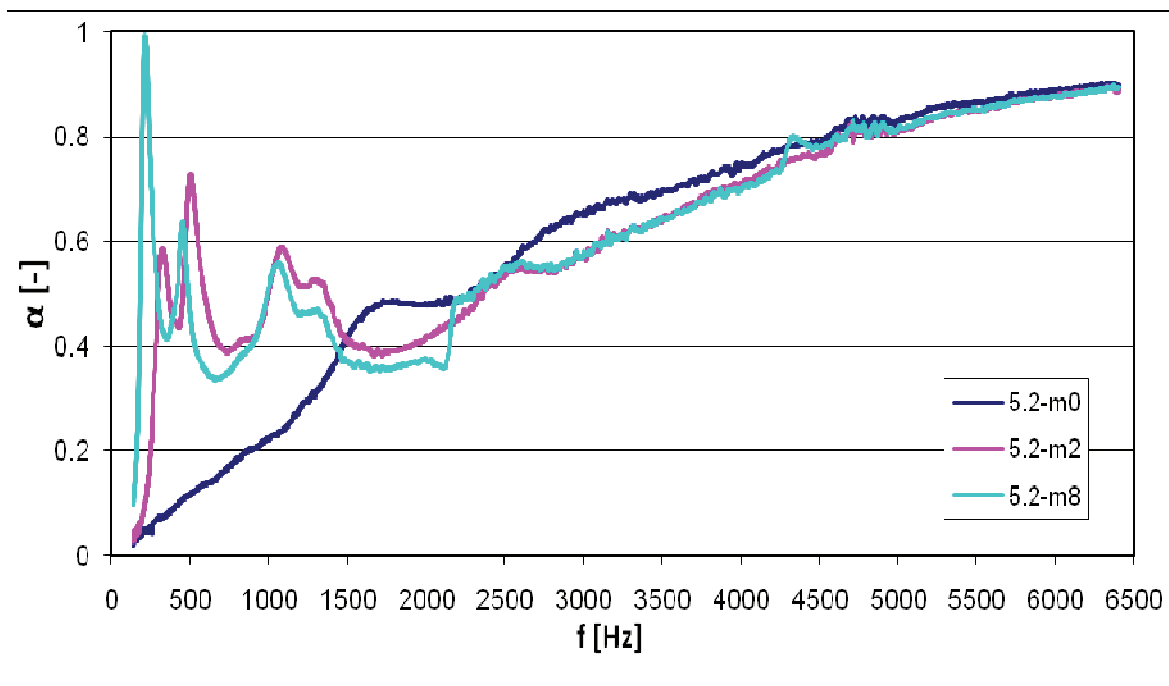


Obr. 48. Závislost přenosového útlumu na frekvenci pro sendviče 4+5.2 a 5.2+4 a pro vzorky 4, 5.1 a 5.2, vše bez zátěže.

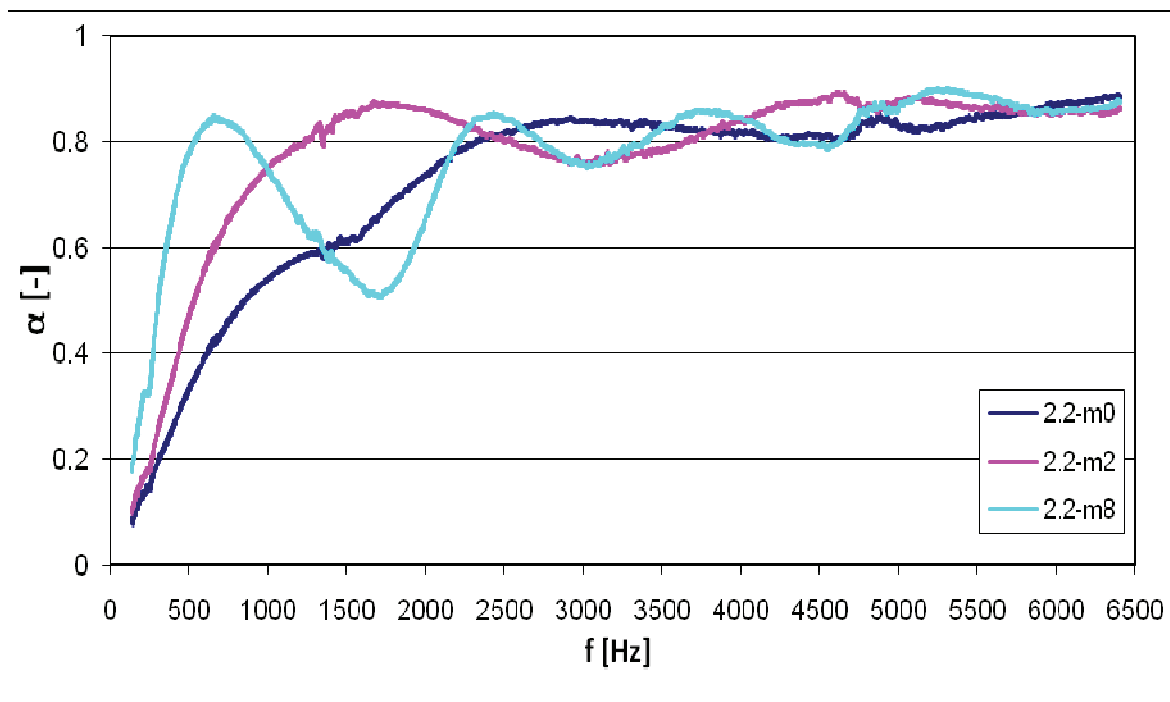
PŘÍLOHA P II: FREKVENČNÍ ZÁVISLOSTI KOEFICIENTU ZVUKOVÉ POHLTIVOSTI



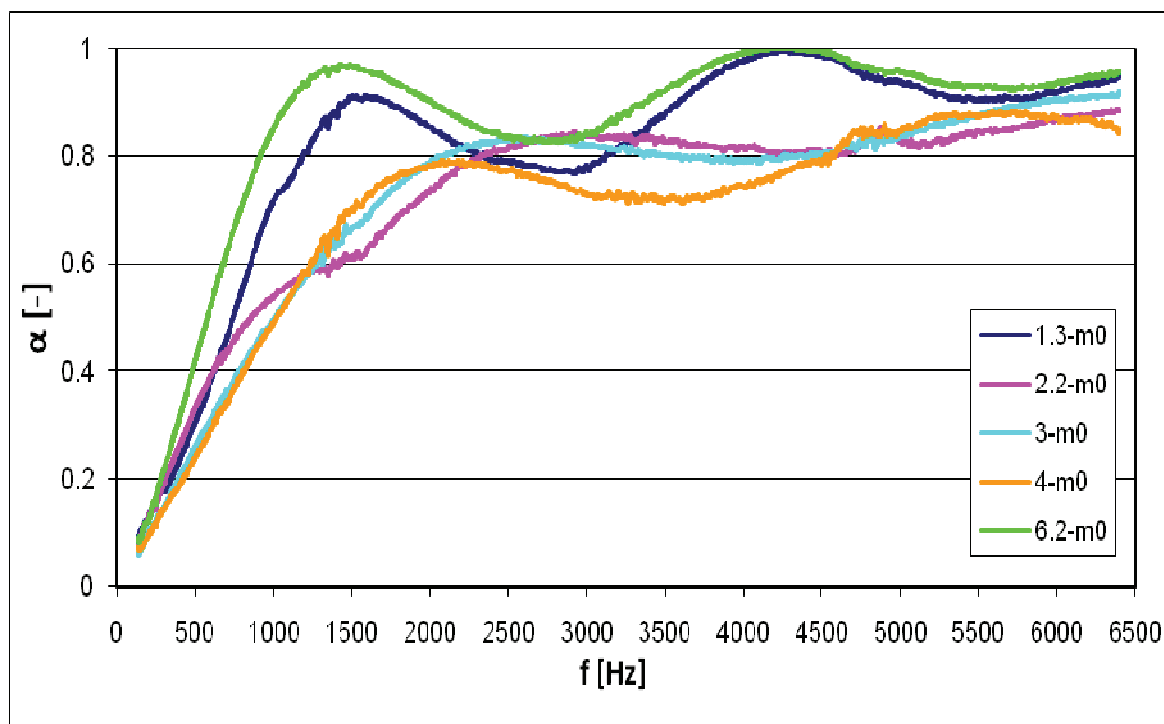
Obr. 49. Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci pro vzorek 5.1 se 3 druhy vzduchových mezer.



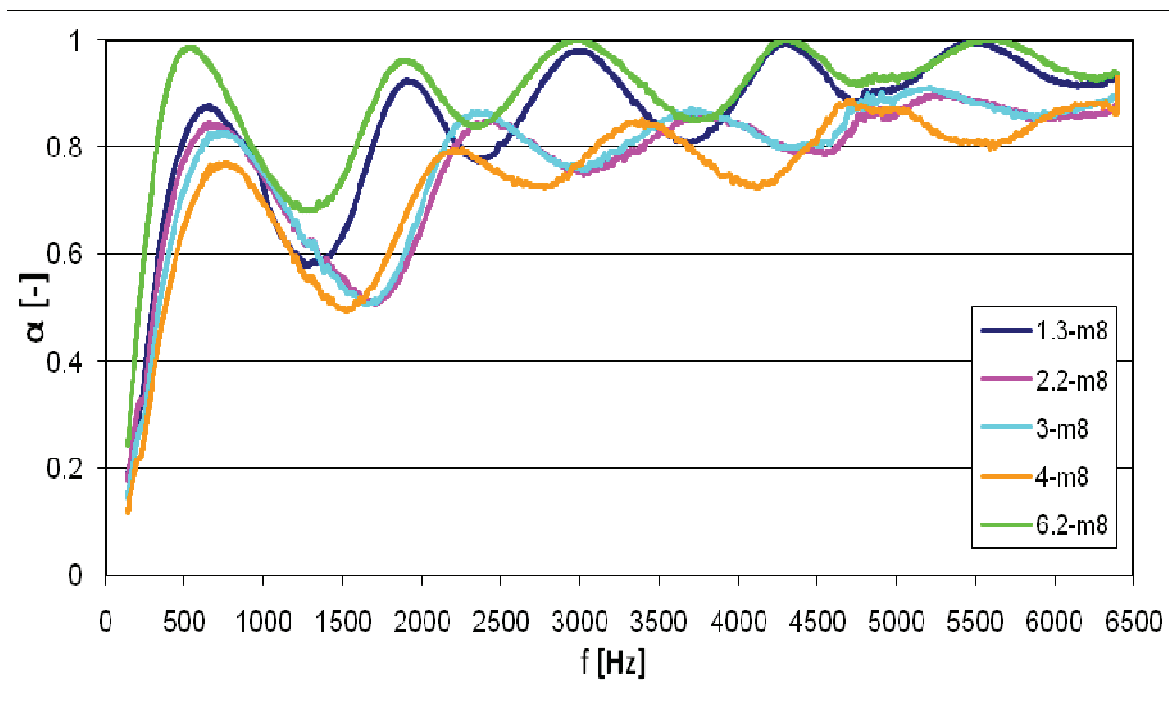
Obr. 50. Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci pro vzorek 5.2 se 3 druhy vzduchových mezer.



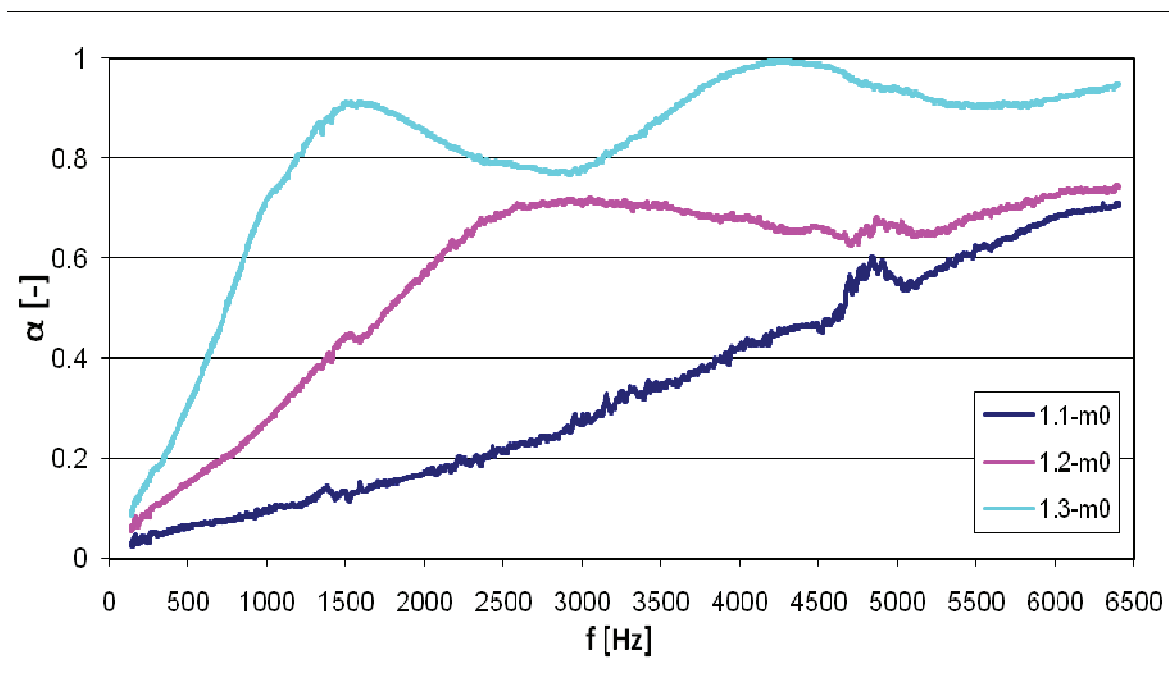
Obr. 51. Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci pro vzorek 2.2 se 3 druhy vzduchových mezer.



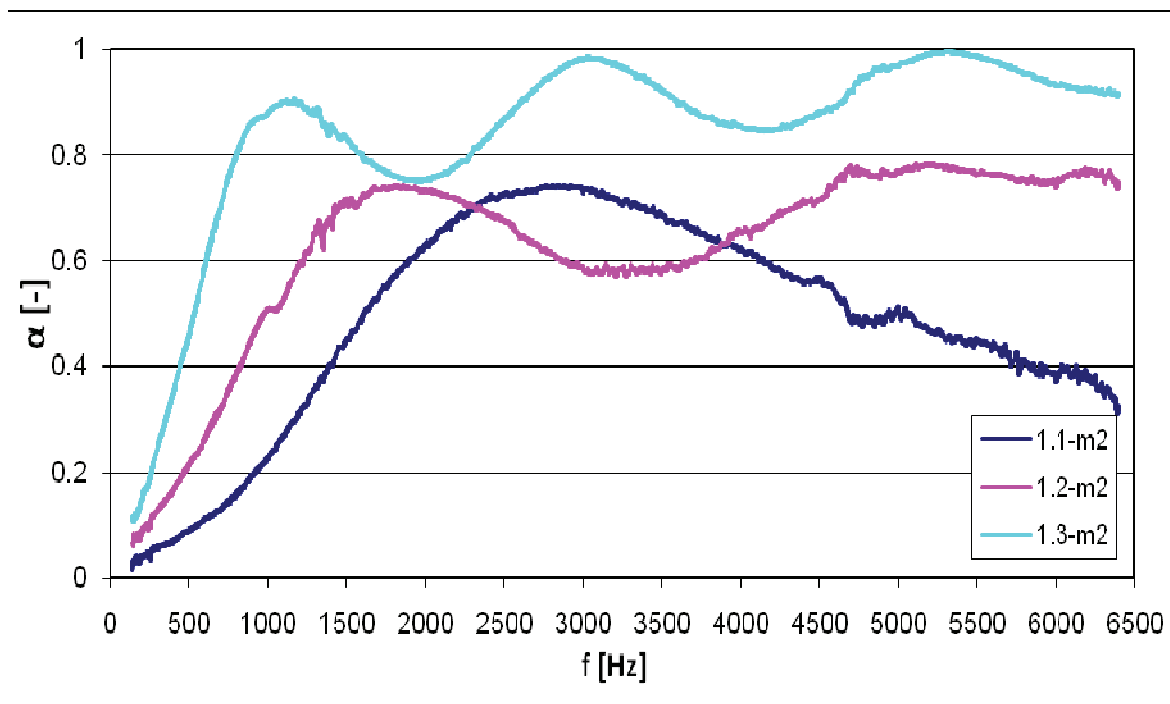
Obr. 52. Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci pro vzorky 1.3, 2.2, 3, 4 a 6.2 bez vzduchové mezery.



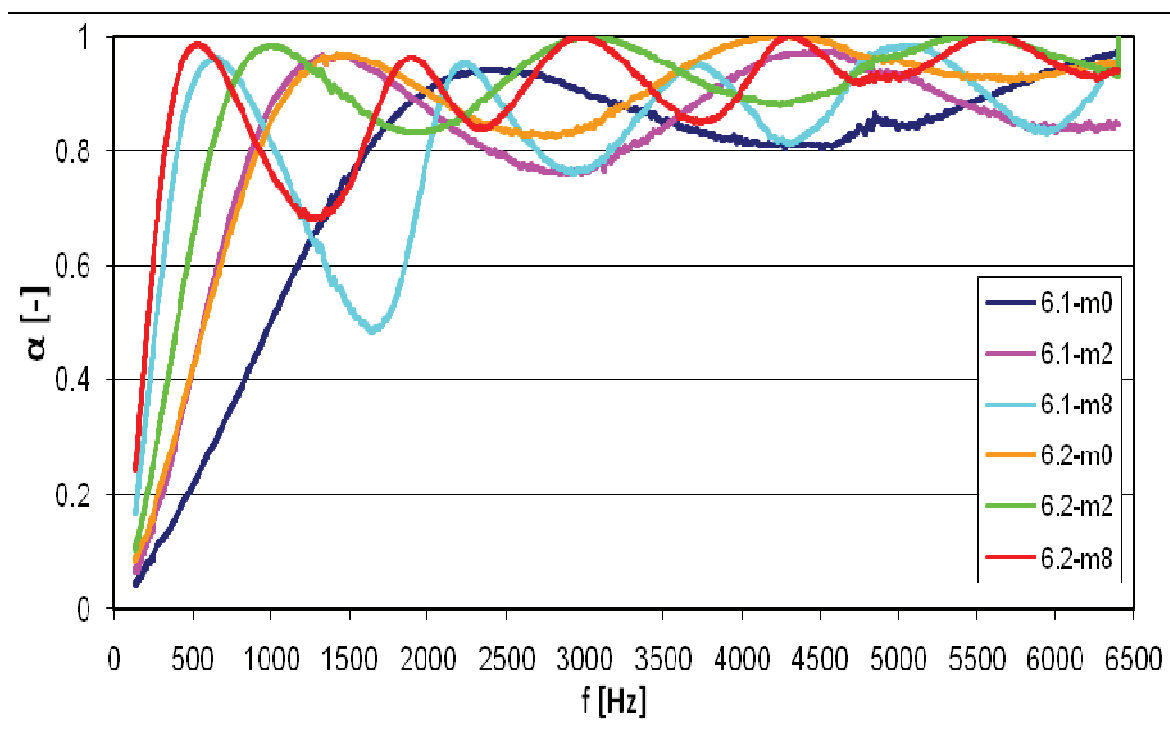
Obr. 53. Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci pro vzorky 1.3, 2.2, 3, 4 a 6.2 se vzduchovou mezerou 8 cm.



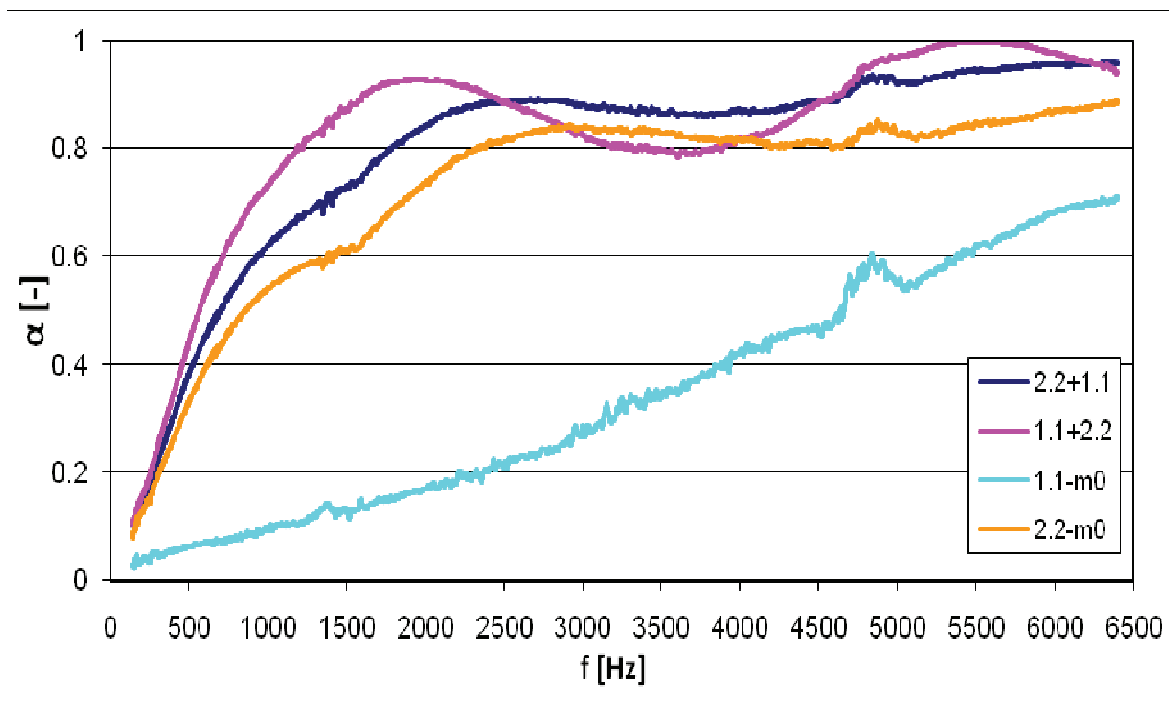
Obr. 54. Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci pro vzorky 1.1, 1.2 a 1.3 bez vzduchové mezery.



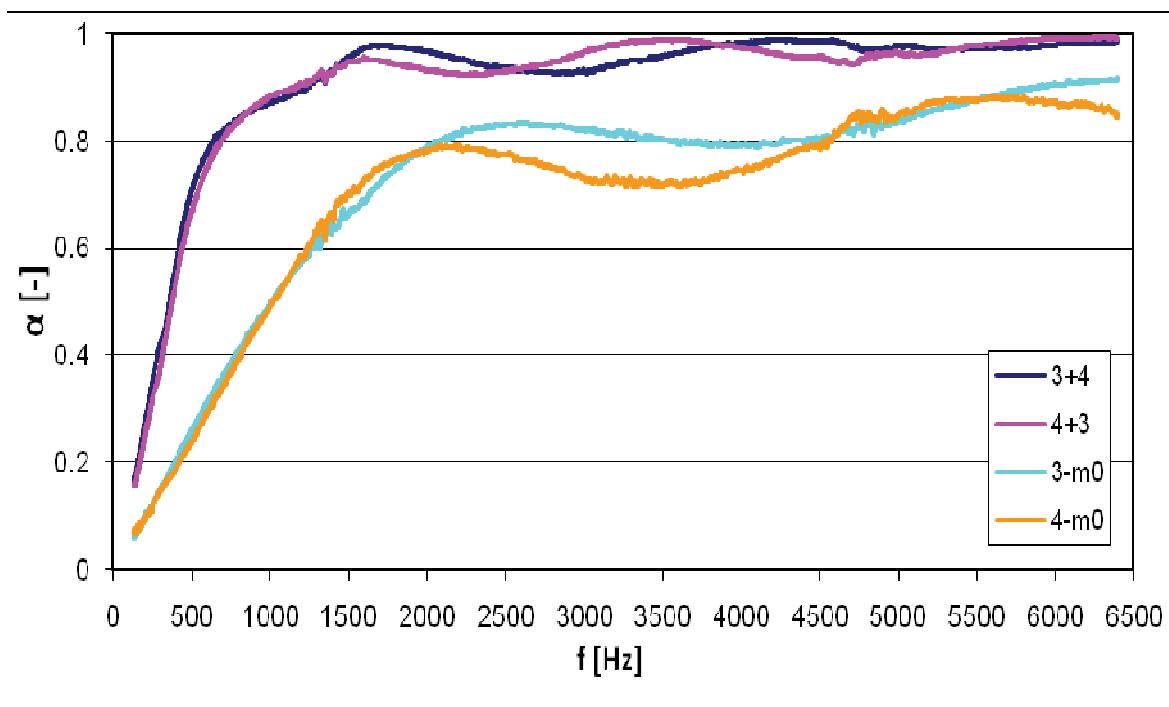
Obr. 55. Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci pro vzorky 1.1, 1.2 a 1.3 se vzduchovou mezerou 2 cm.



Obr. 56. Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci pro vzorek 6.1 a 6.2 se 3 druhy vzduchových mezer.



Obr. 57. Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci pro sendviče 2.2+1.1 a 1.1+2.2 a pro vzorky 2.2 a 1.1, vše bez vzduchové mezery.



Obr. 58. Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci pro sendviče 3+4 a 4+3 a pro vzorky 3 a 4, vše bez vzduchové mezery.