

Využití numerických metod při analýze tlumících parametrů materiálu

Ondřej GRULICH

Bakalářská práce
2007

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav fyziky a mater. inženýrství
akademický rok: 2006/2007

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Ondřej GRULICH**
Studijní program: **B 2808 Chemie a technologie materiálů**
Studijní obor: **Chemie a technologie materiálů**

Téma práce: **Využití numerických metod při analýze tlumících parametrů materiálu.**

Zásady pro vypracování:

1. Řešerše na téma: - akustické vlastnosti materiálů - tlumící prvky a parametry materiálu - numerické metody BEM/FEM
2. Simulace chování materiálu při působení akustického tlaku v prostředí SAMCEF.
3. Experimentální ověření nasimulovaných výsledků pomocí zařízení Brüel&Kjaer.

Rozsah práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

1. Mišun V.: "Vibrace a hluk", FS VUT v Brně (1998), 1. vydání (ISBN 80-214-1262-3).
2. Petyt, M. : Introduction to finite element vibration analysis. Cambridge University Press 1998.
3. Weaver, W., Johnston, P., R. : Finite Elements for Structural Analysis, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1984.
4. Segerlind, J., L.: Applied Finite Analysis. John Wiley, New York, 1984.
5. Bathe, K., J.: Finite Element Procedures in Engineering Analysis, Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey 1982, 1996.
6. Reddy, J., N.: An Introduction to the Finite Element Method, John Willey, New York 1984, 2005.
7. F. Alton Everest: "Master Handbook of Acoustics", McGraw-Hill Companies, Inc., USA (2001), 4. vydání (ISBN 0-07-136097-2).
8. Nový R.: "Hluk a chvění.", Učební texty vysokých škol. ČVUT Praha (2000), 1 - 389. 2. vydání (ISBN 80-01-02246-3).

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Dušan Fojtů

Ústav fyziky a mater. inženýrství

Datum zadání bakalářské práce:

5. února 2007


Termín odevzdání bakalářské práce:

4. června 2007

Ve Zlíně dne 13. února 2007


prof. Ing. Ignác Hoza, CSc.
děkan




19.2.2007
prof. Ing. Lubomír Lapčík, Ph.D.
ředitel ústavu

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá akustickými a mechanickými vlastnostmi vybraných materiálů. Pro měření byly vybrány materiály – minerální vlna, extrudovaný polystyren, PP koberec a papírová tapeta s PVC povrchem. Byla měřena a vyhodnocena závislost koeficientu zvukové pohltivosti na frekvenci a Youngův modul pružnosti v tahu. Byly vytvořeny simulace působení akustického tlaku na rovinnou desku pro vybrané materiály v simulačním prostředí SAMCEF software pomocí metody konečných prvků. Byla vyhodnocena vhodnost použití těchto materiálů vzhledem k jejich akustickým vlastnostem.

Klíčová slova: Koeficient zvukové pohltivosti, Frekvence, Youngův modul pružnosti v tahu, Minerální vlna, PP koberec, Papírová tapeta, Polystyren, MKP, SAMCEF software .

ABSTRACT

This work is focused on acoustic and mechanical properties of selected materials. Materials as mineral wool, extruded polystyrene, PP carpet and wallpaper were selected for measurement. Relationship of sound absorption coefficient on frequency and Young's modulus of elasticity were evaluated. Simulations of incidence of acoustic pressure on plane desk for selected materials were made in the SAMCEF software by the finite element method. Applicability of materials for application with respect to acoustic properties was evaluated

Keywords: Sound absorption coefficient, Frequency, Young's modulus of elasticity, Mineral wool, PP carpet, Wallpaper, Polystyrene, FEM, SAMCEF software .

Chtěl bych poděkovat vedoucímu bakalářské práce, Ing. Dušanovi Fojtů. Jeho pomoc mne provázela všemi fázemi této práce, ať už se jednalo o stylistickou úpravu formulací v úvodu a závěru, o radu při výběru literatury ke studiu dané problematiky, o vedení při experimentálním měření v laboratoři a provedení simulací v prostředí SAMCEF software, nebo o vyhodnocení výsledků. S jeho přispěním se mi podařilo překonat všechny překážky, které se vyskytly v průběhu této práce, a předejít případným komplikacím, které se vyskytnout mohly.

Dále bych chtěl poděkovat prof. Ing. Lubomíru Lapčíkovi DrSc., Dr.h.c. za další motivaci a vštěpování zásad správného zpracování vědecké práce a paní Konečné za asistenci při experimentálních měřeních v laboratoři.

Tato bakalářská práce o názvu „Využití numerických metod při analýze tlumících parametrů materiálu“ byla vypracována na Ústavu fyziky a materiálového inženýrství Fakulty technologické Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně za pomoci finančního zabezpečení této instituce. Je proto jejím majetkem a jakékoliv údaje v této bakalářské práci obsažené mohou být využity literárně, technicky a technologicky jen po společném souhlasu ředitele uvedeného ústavu a vedoucího bakalářské práce. V případě publikování výsledků v odborných časopisech budu uveden jako spoluautor.

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval.

Ve Zlíně dne 25.5.2007

.....

podpis bakaláře

OBSAH

ÚVOD	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 ZÁKLADNÍ POJMY A VELIČINY CHARAKTRIZUJÍCÍ ZVUK A JEHO ŠÍŘENÍ	11
1.1 ZVUK A JEHO VLASTNOSTI.....	11
1.2 VLNOVÁ ROVNICE A RYCHLOST ŠÍŘENÍ AKUSTICKÝCH VLN.....	13
1.3 AKUSTICKÉ POLE.....	17
1.4 ŠÍŘENÍ ZVUKU V UZAVŘENÉM PROSTORU	18
1.4.1 Rozložení akustického pole.....	18
1.4.2 Vlnová rovnice a její řešení při šíření zvuku v poli odražených vln.....	19
1.4.3 Statistické řešení akustického pole v uzavřeném prostoru.....	24
1.4.4 Doba dozvuku	26
1.4.5 Vztah mezi hladinami akustického tlaku a akustického výkonu v poli odražených vln	28
1.4.6 Kombinace pole přímých a odražených vln.....	29
1.5 AKUSTICKÉ PROSTŘEDKY SNIŽOVÁNÍ HLUKU	30
1.5.1 Tlumení hluku pohlcováním	31
1.5.2 Činitel zvukové pohltivosti	32
1.5.3 Měření činitele zvukové pohltivosti.....	33
1.5.4 Neprůzvučné konstrukce	34
1.5.5 Činitel průzvučnosti a stupeň neprůzvučnosti	35
1.5.6 Stupeň vzduchové neprůzvučnosti.....	36
1.5.7 Pohltivé konstrukce	39
1.5.7.1 Zvětšení zvukové pohltivosti v prostoru.....	40
1.5.7.2 Účinky zvětšení zvukové pohltivosti.....	41
1.5.7.3 Realizace zvětšení zvukové pohltivosti	41
1.5.7.4 Zásady praktického použití zvětšení zvukové pohltivosti	42
1.6 AKUSTICKÉ VLASTNOSTI POHLTIVÝCH MATERIÁLŮ A JEJICH APLIKACE V PRAXI	43
1.6.1 Vlastnosti materiálů pohlcujících zvuk.....	44
1.6.2 Činitel zvukové pohltivosti	47
1.6.3 Pohltivé konstrukce	48
1.6.3.1 Pohltivé obklady	49
1.6.3.2 Akustická tělesa	50

1.6.3.3	Absorpční tlumiče	50
1.6.4	Snižování hluku v uzavřených prostorech	50
2	METODA KONEČNÝCH PRVKŮ	52
2.1	DETERMINISTICKÉ MODELY	53
II	PRAKTICKÁ ČÁST	55
3	CHARAKTERISTIKA VYBRANÝCH MATERIÁLŮ	56
3.1	VÝROBCE - SAINT-GOBAIN	56
3.1.1	Deska akustická ISOVER SSP2 (P3/V).....	56
3.1.2	Deska akustická pro sportovní haly EUROCOUSTIC ACOUSTICHOC	56
3.2	VÝROBCE - GUMOTEX, A.S.	57
3.2.1	Podložka pod plovoucí podlahy IZOTAN	57
3.2.2	Pojená PUR pěna MOLITAN® RE	57
3.3	VÝROBCE - SONING PRAHA	57
3.3.1	SONIT DV30, P10, SP5.....	58
3.3.2	Deska SONIT P30, PP20, PK10	58
3.3.3	Protihlukový panel SONIT - SSŽ	59
3.3.4	Protihlukový panel ROADSON	59
3.3.5	Akustický materiál POLYSON.....	61
3.3.6	Akustický pohledový systém TK-SON.....	61
3.3.7	Kmitající panely KPS30, KPS60	62
3.3.8	Rezonátor PR-SON 1	62
3.3.9	Rezonátor DR-SON 1	62
3.3.10	Rezonátor BF1-SON	62
3.3.11	Difuzor D1	63
3.3.12	ILLBRUCK PYRAMIDE, ILLBRUCK WAFFEL	63
3.3.13	ILLBRUCK ABSORBER WETROOM	63
3.3.14	ILLBRUCK ACOUSTIC PANEL	64
3.3.15	ILLBRUCK SQUARELINE.....	64
3.3.16	AKURAL	64
3.3.17	SONIRAL	65
3.4	VÝROBCE – EUROFOAM TP SPOL. S R.O.....	65
3.4.1	Akustické dekorativní panely – BASOTECT	65

3.5	VÝROBCE - BS-GROUP, S.R.O.....	66
3.5.1	Tvárnice BS - AKUSTIK.....	66
3.6	VÝROBCE - RIGIPS, S.R.O.....	67
3.6.1	Deska RIGIDUR.....	67
3.6.2	Děrované desky Rigiton, BIG Quattro, Gyptone, Caso.....	67
3.7	VÝROBCE - AC PLUS.....	67
3.7.1	S O U N D B L O X.....	67
3.8	VÝROBCE - CIUR A.S.....	68
3.8.1	Tepelná a akustická izolace CLIMATIZER PLUS.....	68
4	PŘÍPRAVA A ROZMĚRY VZORKŮ PRO MĚŘENÍ.....	69
4.1	ROZMĚRY VZORKŮ.....	70
5	MĚŘENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ VYBRANÝCH MATERIÁLŮ.....	71
5.1	ZAŘÍZENÍ PRO MĚŘENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ.....	71
5.2	VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ.....	72
6	SIMULACE NAMÁHÁNÍ A DEFORMACE MATERIÁLU.....	73
6.1	MODÁLNÍ ANALÝZA ROVINNÉ DESKY V PROSTŘEDÍ SAMCEF.....	73
6.1.1	Postup simulace v prostředí SAMCEF.....	73
6.1.2	Výsledky simulace dopadu akustického tlaku na rovinnou desku.....	75
7	MĚŘENÍ AKUSTICKÝCH VLASTNOSTÍ VYBRANÝCH MATERIÁLŮ.....	78
7.1	ZAŘÍZENÍ PRO MĚŘENÍ AKUSTICKÝCH VLASTNOSTÍ.....	78
7.1.1	Návod na obsluhu Brüel & Kjaer trubice s obslužným programem BZ 5050 (pro trubici 100 mm).....	79
7.2	VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ KOEFICIENTU ZVUKOVÉ POHLTIVOSTI.....	80
7.3	SROVNÁNÍ NASIMULOVANÝCH VÝSLEDKŮ S EXPERIMENTÁLNÍM MĚŘENÍM.....	80
	ZÁVĚR.....	82
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	83
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	85
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	87
	SEZNAM TABULEK.....	88
	SEZNAM PŘÍLOH.....	89

ÚVOD

Akustické vlnění je vlnění v rozsahu 16 Hz – 20 kHz. Vědní disciplínou, která se tímto vlněním zabývá, je akustika.

Neustále a naprosto všude jsme v životě provázeni zvukovými vjemy, které jsou nám buď příjemné (hudba, šumění listí na stromech a jiné) nebo nepříjemné (hluk dopravních prostředků, hluk strojních zařízení, atd.).

Během posledních několika desetiletí se prokázalo, že nežádoucí hluk má velmi negativní účinky na jak duševní tak i fyzické zdraví člověka. Lidé pracující v hlučném prostředí mají v pozdějším věku problémy se sluchovým ústrojím a také při vlastní pracovní činnosti je tato nepříznivě ovlivňována právě nadměrnou hlukovou zátěží.

Studium akustických vlastností materiálů je proto velmi důležité, aby bylo možné při návrhu pracovních prostředí správně aplikovat dané materiály. V minulých dobách, kdy ještě nebyly informační technologie na dnešní úrovni, se musely základní akustické charakteristiky – koeficient zvukové pohltivosti, vzduchová neprůzvučnost a další – stanovit způsobem, kdy pro měření bylo potřeba velkého množství vzorků o velkých rozměrech. Tyto vzorky se upevňovaly na zdi místnosti, kde měření probíhalo. Soudobé informační technologie umožňují za pomoci numerických metod provádět simulace chování materiálu např. při dopadu akustického tlaku na tento materiál, a proto již není potřeba tak velkých vzorků a náročných experimentálních měření.

Tato práce je malým příspěvkem při stanovování akustických vlastností materiálů. Hlavní důraz je kladen na jednu ze základních akustických veličin – koeficient zvukové pohltivosti. Pro měření byly vybrány materiály - extrudovaný polystyren, PP koberec, papírová tapeta s PVC povrchem a minerální vlna. Byly naměřeny mechanické vlastnosti těchto materiálů – Youngův modul pružnosti v tahu, Poissonova čísla – a tyto hodnoty byly použity pro vytvoření simulací dopadu akustického tlaku na rovinnou desku v simulačním prostředí SAMCEF software.

Dále byly stanoveny závislosti koeficientu akustické pohltivosti na frekvenci výše uvedených materiálů a vyhodnoceny tlumící vlastnosti každého materiálu.

V závěru práce je prezentována souvislost mezi průhybem rovinné desky materiálu získaného simulací a koeficientem zvukové pohltivosti tohoto materiálu.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 ZÁKLADNÍ POJMY A VELIČINY CHARAKTRIZUJÍCÍ ZVUK A JEHO ŠÍŘENÍ

1.1 Zvuk a jeho vlastnosti

Zvukem rozumíme každé mechanické vlnění, které se šíří od zdroje ve vlnoplochách libovolným prostředím, fázovou rychlostí závislou na fyzikálních vlastnostech prostředí. Zvuk vzniká kmitáním částic pružného prostředí, které na sebe vzájemně působí elastickými silami. Zvuk je zvláštní případ tzv. elastických vln. Rozruch se šíří ze zdroje fázovou rychlostí, ale prostředí, které ho přenáší, se nepohybuje, nýbrž částice prostředí kmitají kolem rovnovážných poloh. Dalším závažným faktem je, že šíření zvuku je spojeno s přenosem energie.

Důležitým parametrem je *vlnová délka*, definovaná vztahem

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

λ vlnová délka m

c fázová rychlost, rychlost plochy konstantní fáze ve směru šíření $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

T perioda s

f kmitočet Hz

Leží-li kmitočet zvuku v rozsahu slyšitelnosti lidského ucha, t. j. *od 16 Hz do 20 kHz*, *vnímáme zvuk sluchem*. Akustické vlnění o kmitočtu vyšším než 20 kHz spadá do oblasti *ultrazvuku*. Akustické vlnění o kmitočtu nižším než 16 Hz se označuje jako *infrazvuk*.

Projevuje-li se zvuk rušivě, je-li nežádoucí nebo nepříjemný, označujeme jej jako hluk. Hlukem může být např. i čistý tón, častěji však jde o směs zvuků o různých kmitočtech.

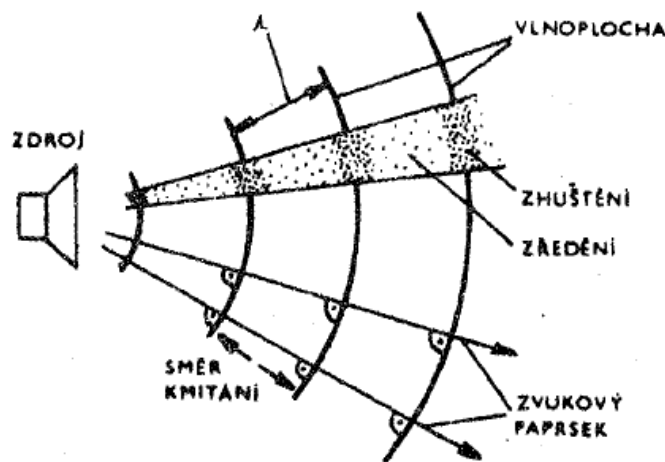
Akustické vlnění postupuje od místa rozruchu na všechny strany. Je-li prostředí izotropní, šíří se rozruch všemi směry stejně rychle. Místa, do nichž dospělo vlnění ze zdroje za tutéž dobu, leží na spojitě ploše, tzv. *vlnoploše*.

Vlnoplochou rozumíme geometrické místo bodů, které kmitají v daném okamžiku se stejnou fází. V obecných případech mohou mít vlnoplochy libovolný tvar. Zvlášť důležité jsou:

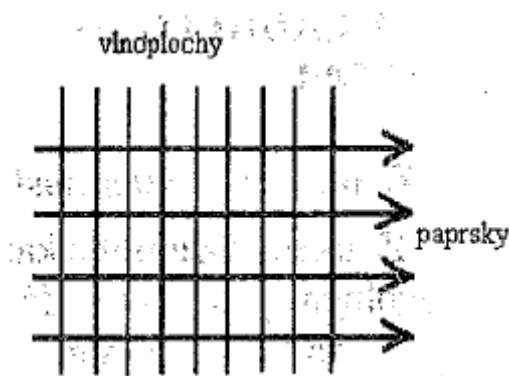
Vlnoplochy kulové - vznikají při šíření vlnění z bodového zdroje, je-li zdroj rozruchu menší než vlnová délka vzniklého vlnění (obr.1).

Vlnoplochy rovinné - vznikají při šíření vlnění z plošných zdrojů, je-li zdroj rozruchu podstatně větší než vlnová délka vzniklého vlnění – (obr.2). Velmi přibližně se kulové vlnoplochy ve velké vzdálenosti od zdroje považují za rovinné. Rovinné vlny se dají početně jednodušeji zpracovat, a proto většinu úvah provádíme právě pro tento druh vlnoploch.

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

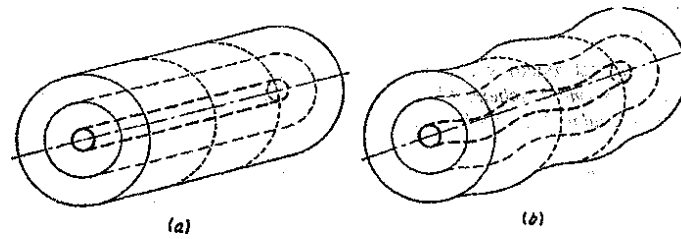


Obr.1 – Kulové vlnoplochy



Obr.2 – Rovinné vlnoplochy

Vlnoplochy složitější povahy, např. *válcové* (obr.3) vznikají při šíření vlnění z liniového zdroje zvuku. Jsou vlastně přechodným typem mezi rovinou a kulovou vlnou. Při nerovnoměrném vyzařování v radiálním směru vzniká dvojrozměrná válcová vlnoplocha.



Obr.3 – Válcové vlnoplochy

a) jednorozměrná válcová vlnoplocha, b) dvojrozměrná válcová vlnoplocha

1.2 Vlnová rovnice a rychlost šíření akustických vln

Průběh kmitání částic prostředí, kterým se šíří akustické vlnění, závisí na jejich poloze v prostoru. Prostorové vlnění popisuje tzv. *vlnová rovnice*

$$\frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2} \quad (2)$$

Jejím řešením je rovnice pro okamžitou výchylku částic z rovnovážné polohy

$$\vec{u} = \vec{f}(x, y, z, t) \quad (3)$$

Protože se v prostoru může šířit mnoho vln různých tvarů, je nutno řešit vlnovou rovnici v každém případě zvlášť s přihlédnutím k vlastnostem zdroje a okrajovým podmínkám. Úplné analytické řešení je možné pouze v jednoduchých případech.

Řešení (2) pro rovinné vlny, které postupují např. ve směru osy x vychází ve tvaru

$$u = f_1\left(t - \frac{x}{c}\right) + f_2\left(t + \frac{x}{c}\right) \quad (4)$$

U kulových vln v isotropním prostředí

$$u = \frac{1}{r} \left[f_1\left(t - \frac{x}{c}\right) + f_2\left(t + \frac{x}{c}\right) \right] \quad (5)$$

kde $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ je vzdálenost od společného středu kulových ploch. Člen $\frac{1}{r}$

v rovnici (5) ukazuje, že amplituda u kulových vln klesá úměrně se vzdáleností od zdroje rozruchu, zatímco u vln rovinných zůstává konstantní.

Podrobná řešení vlnové rovnice mají význam pro základní teoretické výpočty. Využitím rovnice (2) získáme různé vztahy pro *fázovou rychlost šíření vlnění* podle toho, o jaký druh vlnění se jedná, zda se vlnění šíří v prostředí kapalném, plynném nebo pevném a podle toho, zda je prostor, jímž se vlnění šíří, omezen či nikoliv.

V kapalinách a plynech se může šířit pouze *vlnění podélné*, charakterizované zhuštěním a zředěním, kdy hodnota celkového tlaku p_s kolísá okolo hodnoty barometrického tlaku b .

$p_s = b + p$, kde tlak p je tzv. *okamžitý akustický tlak*, představující rozdíl mezi okamžitým tlakem a statickým tlakem v určitém bodě prostředí. Hodnoty jsou řádově srovnatelné s hodnotami okamžitých výchylek kmitání jednotlivých bodů prostředí.

Pro fázovou rychlost šíření podélných vln v kapalinách vychází

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \quad (6)$$

K modul objemové pružnosti Pa

ρ objemová hmotnost prostředí kg.m^{-3}

U plynů je situace složitější, protože hodnota modulu K závisí na druhu stavové změny, která v plynu probíhá. Pro vlnění o kmitočtech nad 20 Hz jsou změny okamžitého akustického tlaku velmi rychlé a stavovou změnu lze považovat za adiabatickou. Využitím Poissonova zákona pro adiabatický děj, případně další úpravou pomocí stavové rovnice pro ideální plyn, získáme vztah pro výpočet *fázové rychlosti šíření podélných vln v plynech* ve tvaru

$$c = \sqrt{\frac{\kappa p_s}{\rho}} = \sqrt{\frac{\kappa RT}{M}} \quad (7)$$

p_s celkový statický tlak (při šíření ve vzduchu jde o tlak barometrický) Pa

κ Poissonova konstanta

ρ hustota plynného prostředí kg.m^{-3}

M kilomolová hmotnost plynu kg.kmol^{-1}

R univerzální plynová konstanta $\text{J.kmol}^{-1}.\text{K}^{-1}$

T absolutní teplota K

Obecná úloha určit *rychlost šíření podélných vln v pevných látkách* je složitá. Pro *fázovou rychlost šíření podélných vln v tenké tyči* vychází

$$c_L = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (8)$$

E Youngův dynamický modul pružnosti Pa

Pro *fázovou rychlost podélných vln v desce* vychází

$$c_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{1-\mu^2}} \quad (9)$$

μ Poissonův poměr příčné kontrakce neboli Poissonovo číslo

V pevných látkách se mohou šířit také vlny příčné. *Fázová rychlost šíření příčných vln v pevných látkách* vychází ze vztahu

$$c_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (10)$$

G dynamický modul pružnosti ve smyku Pa

Mezi oběma moduly platí

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)} \quad (11)$$

Dosadíme-li rovnici (11) do (10)

$$c_T = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1+\mu)}} \quad (12)$$

Je vidět, že poměr c_L/c_T je konstantní. Vzhledem k tomu, že $G < E$, je i $c_T < c_L$. Pro běžné konstrukční materiály je $\mu = 0,3$, takže

$$c_T = 0,62c_L \quad (13)$$

V tělesech, v nichž převládá jeden, případně dva rozměry oproti ostatním (např. v tyčích nebo deskách), vzniká vlnění složené z podélného a příčného, tzv. vlnění ohybové. Řešením příslušné vlnové rovnice vyjde *pro fázovou rychlost šíření ohybových vln v tyči*

$$c_B = \sqrt{2\pi f} \sqrt[4]{\frac{4EJ}{\tau}} \quad (14)$$

J moment setrvačnosti průřezu tyče m^4

τ hmotnost na jednotku délky $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}$

f kmitočet Hz

E Youngův dynamický modul pružnosti Pa

Pro tyče obdélníkového průřezu

$$c_B = \sqrt{1,8c_L hf} \quad (15)$$

h menší rozměr průřezu m

Vztah pro *fázovou rychlost šíření ohybových vln v deskách* získáme z předešlých vztahů s ohledem na vliv příčné kontrakce ve tvaru

$$c'_B = c_B \frac{1}{\sqrt[4]{1 - \mu^2}} \quad (16)$$

U běžných konstrukčních materiálů lze však rozdíl mezi c_B a c'_B často zanedbat.

Ohybové vlnění je příčinou vyzařování zvuku. Je tedy důležité z hlediska hodnocení neprůzvučnosti dělicích prvků.

Šíří-li se deskou ohybové vlnění, částice desky kmitají v kolmém směru k povrchu a energie kmitání se přenáší na částice vzduchu, který desku obklopuje.

1.3 Akustické pole

Protože každému bodu prostředí, kterým se zvuk šíří, můžeme přiřadit příslušné hodnoty tzv. *akustických veličin*, které jsou funkcí polohy a času, hovoříme o akustickém poli. *Akustickým polem rozumíme oblast pružného prostředí, v němž existují zvukové vlny.*

Soustředíme-li se na nejdůležitější případ šíření zvuku ve vzduchu, můžeme akustické pole popsat: *akustickou výchylkou, akustickou rychlostí, akustickým tlakem.*

Akustické veličiny zavedeme na příkladu *šíření harmonických rovinných vln*. Pro harmonickou rovinnou vlnu, která se šíří v kladném směru osy x fázovou rychlostí c , má vlnová rovnice (2) tvar

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (17)$$

jejímž řešením je rovnice pro okamžitou akustickou výchylku $u(x,t)$

$$u(x,t) = A \sin\left(\omega t - \omega \frac{x}{c}\right) = A \sin(\omega t + \varphi) \quad (18)$$

A amplituda vlnění m

$\omega = 2\pi f$ kruhová frekvence s^{-1}

φ počáteční fáze (fázové posunutí) rad

Okamžitá akustická rychlost $\vec{v} = \frac{\partial \vec{u}}{\partial t}$ je rychlost s jakou kmitají jednotlivé částice prostředí, kterým se vlna šíří. Pro vlnu (17) dostáváme

$$v(x,t) = \frac{\partial u}{\partial t} = A\omega \cos\left(\omega t - \omega \frac{x}{c}\right) = v_{\max} \cos(\omega t + \varphi) \quad (19)$$

$v_{\max} = A\omega$ amplituda okamžité akustické rychlosti $m \cdot s^{-1}$

Okamžitý akustický tlak $p = -K \frac{\partial u}{\partial r} \cdot \vec{r}^o$ je hodnota, která je namodulovaná na středním barometrickém tlaku.

Pro vlnu (17) dostáváme

$$p(x, t) = -K \frac{\partial u}{\partial r} = \frac{KA\omega}{c} \cos\left(\omega t - \omega \frac{x}{c}\right) = p_{\max} \cos(\omega t + \varphi) \quad (20)$$

$$p_{\max} = \frac{KA\omega}{c} = A\omega\rho c \quad \text{amplituda okamžitého akustického tlaku} \quad \text{Pa}$$

Z rovnic (19) a (20) je vidět, že u rovinných vln je okamžitá akustická rychlost a okamžitý akustický tlak ve fázi. U jiných tvarů vlnoploch tomu tak není. Fázové posunutí mezi oběma veličinami je tím větší, čím více je vlnoplocha zakřivena.

Pro kulovou vlnu platí pro okamžitý akustický tlak

$$p(r, t) = \frac{P_{\max}}{r} \cos\left(\omega t - \omega \frac{r}{c}\right) = \frac{P_{\max}}{r} \cos(\omega t - \varphi), \quad \text{kde } \operatorname{tg}(\varphi) = \frac{\lambda}{2\pi r} \quad (21)$$

Těsně u zdroje (pro $r \rightarrow 0$) je $\varphi \rightarrow \frac{\pi}{2}$. Ve velkých vzdálenostech (pro $r \geq \lambda$) je $\varphi \rightarrow 0$.

Vlnu kulovou můžeme aproximovat vlnou rovinnou. [1]

1.4 Šíření zvuku v uzavřeném prostoru

1.4.1 Rozložení akustického pole

Akustické pole uvnitř prostoru vybuze­né zvukovým zdrojem konečných rozměrů lze při měření hlukových problémů rozdělit do 3 oblastí .

Blízká oblast, sahající od zdroje do vzdálenosti několika jeho průměrů.

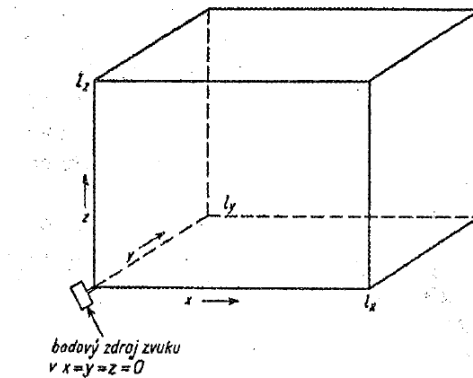
Oblast přímých vln, charakterizována tím, že hladina akustického tlaku klesá o 6 dB při zdvojnásobení vzdálenosti od středu zdroje (má charakter volného pole).

Dozvukové pole (pole odražených vln), vznikající v takových vzdálenostech, kde se začínají významněji projevovat násobené odrazy od omezujících ploch. V této části pole se vlny odražené skládají s vlnami, vycházejícími přímo od zdroje, dochází také ke značným fluktuacím akustického tlaku, v závislosti na poloze. Od určité, tzv. *dozvukové vzdálenosti* je prostor vyplněn mnoha odraženými vlnami o střední hodnotě akustického tlaku a dosahuje (na délce několika metrů) hladiny, která v podstatě nezávisí na vzdálenosti od zdroje.

Takové dozvukové pole nazýváme *difúzní*. V něm je směr šíření vlnění náhodně rozložen a objemová hustota akustické energie je téměř konstantní.

1.4.2 Vlnová rovnice a její řešení při šíření zvuku v poli odražených vln

V praxi se často setkáváme s případy, že zdroj hluku je umístěn v uzavřeném prostoru, který je tvořen navzájem kolmými rovinnými plochami (stěny místnosti).



Obr.4 – Model kvádrové místnosti

Uvažujme nejčastěji se vyskytující prostory ve tvaru kvádru s rozměry l_x , l_y , l_z (obr.4).

V daném prostoru se vytvoří charakteristické šíření zvuku, vyznačující se určitými směry a odrazy od stěn, což vytváří obdobu stojatých vln. Kmitočty, tzv. *vlastní kmitočty uzavřeného prostoru*, při nichž charakteristické rozdělení nastane, lze určit řešením vlnové rovnice.

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2}, \quad (22)$$

Φ rychlostní potenciál $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$

c fázová rychlost zvuku $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

Akustické pole je v každém bodě popsáno vektory akustické výchylky a akustické rychlosti. Lze dokázat, že jde o pole nevírové neboli potenciální a lze je převést na pole skalární, např. pole akustického tlaku. V akustice byla zavedena tedy hypotetická skalární veličina tzv. rychlostní potenciál Φ , definovaný rovnicí

$$\vec{v} = \text{grad} \Phi \quad (23)$$

\vec{v} akustická rychlost $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

Pro složky akustické rychlosti platí

$$\vec{v}_x = \frac{\partial \Phi}{\partial x} \cdot \vec{i}, \quad \vec{v}_y = \frac{\partial \Phi}{\partial y} \cdot \vec{j}, \quad \vec{v}_z = \frac{\partial \Phi}{\partial z} \cdot \vec{k} \quad (24)$$

Podobně jako pro akustickou výchylku (2), respektive akustickou rychlost a akustický tlak, i pro rychlostní potenciál lze psát vlnovou rovnici ve tvaru (22) a pomocí (24) určit složky akustické rychlosti.

Akustický tlak počítáme ze vztahu

$$p = -\rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} \quad (25)$$

Výsledné řešení (22) předpokládáme ve tvaru

$$\Phi = \Psi(x, y, z) \cdot \cos \omega t \quad (26)$$

Dosazením (26) do (22) vychází

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} \cdot \cos \omega t = -\frac{\omega^2}{c^2} \cdot \cos \omega t \cdot \Psi(x, y, z) \quad (27)$$

$$\frac{\omega}{c} = k \quad \text{úhlové vlnové číslo} \quad \text{m}^{-1}$$

Úpravou (27) dostaneme vztah

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} \cdot \cos \omega t = -k^2 \cdot \Psi(x, y, z) \quad (28)$$

Řešení (28) budeme předpokládat ve tvaru

$$\Psi(x, y, z) = X(x) \cdot Y(y) \cdot Z(z) \quad (29)$$

Provedením příslušných parciálních derivací a dosazením do (28)

$$\frac{1}{X} \cdot \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 Z}{\partial z^2} + k^2 = 0 \quad (30)$$

Aby se rovnice (29) rovnala nule, musí platit

$$k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = k^2 \quad (31)$$

To znamená, že např. pro šíření akustické vlny ve směru osy x bude platit

$$\frac{\partial^2 X}{\partial x^2} + k^2 X = 0, \text{ jejímž řešením je vztah } X = A_x \cdot \cos(k_x x + \varphi_x), \text{ kde } A_x \text{ je konstanta.}$$

Protože podobné vztahy platí i pro šíření ve směru osy y a z , můžeme psát

$$\Phi = A \cdot \cos(k_x x + \varphi_x) \cdot \cos(k_y y + \varphi_y) \cdot \cos(k_z z + \varphi_z) \cdot \cos \omega t \quad (32)$$

kde A je konstanta.

Souřadnice akustické rychlosti určíme z (32) podle (24)

$$v_x = \frac{\partial \Phi}{\partial x} = -A k_x \sin(k_x x + \varphi_x) \cos \omega t \quad (33)$$

Akustická rychlost na stěně se musí rovnat nule, neboli pro $x = 0$ a $x = l_x$, je $v_x = 0$.

To je splněno pro

$$\varphi_x = 0, \quad k_x = \frac{n_x}{l_x} \pi, \quad n_x = 0, 1, 2, \dots, \infty \quad (34)$$

Totéž je možno napsat i pro proměnné y a z . To znamená, že podle (31) a (34) musí platit

$$\left(\frac{n_x}{l_x} \pi \right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y} \pi \right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z} \pi \right)^2 = \left(\frac{\omega_n}{c} \right)^2 \quad (35)$$

Úpravou rovnice (35) dostaneme výrazy pro výpočet vlastních rezonančních frekvencí

$$f_{x,y,z} = \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x} \right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y} \right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z} \right)^2} \quad (36)$$

l_x, l_y, l_z rozměry prostoru m

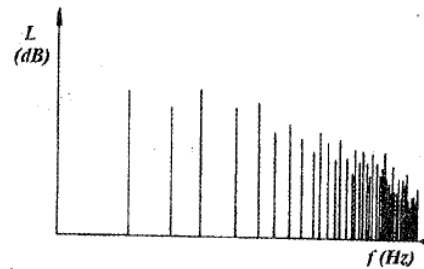
c fázová rychlost zvuku $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

Z rovnice (36) plyne, že každá místnost má nekonečně mnoho rezonančních frekvencí. Nejnížší možné kmitočty určíme pro kombinaci hodnot (n_x, n_y, n_z) : $(1, 0, 0)$,

$(0, 1, 0)$, $(0, 0, 1)$, apod., což odpovídá výrazům

$$f_{1,0,0} = \frac{c}{2l_x}, \quad f_{0,1,0} = \frac{c}{2l_y}, \quad f_{0,0,1} = \frac{c}{2l_z} \quad (37)$$

Z rovnice (37) je vidět, že se v prostoru vytvoří púlvlny ve směru hlavních os prostoru a pozorujeme výrazné rozložení stojatých vln. Při kmitočtu nižším, než je nejnižší vypočtená hodnota, nenastane v uvažovaném prostoru vlnový charakter šíření zvuku. Zvyšujeme-li hodnoty n_x, n_y, n_z při různých kombinacích, roste kmitočet $f_{x,y,z}$ a zmenšuje se kmitočtový interval mezi jednotlivými vypočtenými kmitočty (obr.5).



Obr.5 - Interval mezi kmitočty

Pro jednotlivé kmitočty se může považovat ohraničený prostor za tlumený rezonátor. Tlumení je způsobeno částečným pohlcováním zvuku stěnami.

Směry šíření vln jsou pro různé kmitočty $f_{x,y,z}$ odlišné a při jejich velkém počtu zahrnují mnohé z možných směrů v prostorovém úhlu 4π a vytváří pole odražených vln. Tím se také přibližujeme představě difúzního pole.

Při měření hladin akustického tlaku v kmitočtových pásmech se ukazuje, že ve vymezeném kmitočtovém pásmu má být nejméně asi 20 možných charakteristických kmitočtů $f_{x,y,z}$, aby se pole odražených vln blížilo předpokladu difúzního pole. Ze zkušenosti se ukazuje, že pro *oktávová pásma* se může považovat pole za dostatečně difúzní přibližně nad kmitočtem

$$f = \frac{400}{\{V\}^{\frac{1}{3}}} \quad (38)$$

$\{V\}$ velikost objemu ohraničeného prostoru

Pro pásma *třetin oktávy* nad kmitočtem

$$f = \frac{600}{\{V\}^{\frac{1}{3}}} \quad (39)$$

Akustický tlak a akustickou rychlost pro libovolný počet vidů možno určit z upravené rovnice (32)

$$\Phi = A \cos\left(\pi \frac{n_x x}{l_x}\right) \cos\left(\pi \frac{n_y y}{l_y}\right) \cos\left(\pi \frac{n_z z}{l_z}\right) \cos \omega t \quad (40)$$

Využitím rovnice (25) určíme akustický tlak

$$p = C_x \cos\left(\frac{n_x}{l_x} x \pi\right) \sin \omega t \quad (41)$$

kde C_x je konstanta.

Pro souřadnici akustické rychlosti, využitím (24) a (40) vychází

$$v_x = -D_x \sin\left(\frac{n_x}{l_x} x \pi\right) \cos \omega t \quad (42)$$

kde D_x je konstanta.

Z posledních vztahů vyplývá (obr.6):

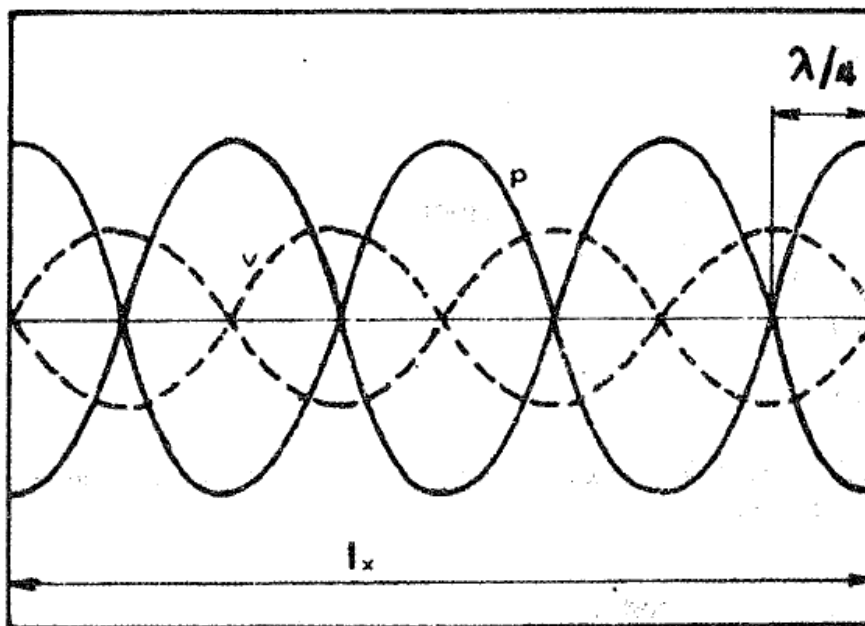
- Na stěně má akustický tlak maximum, akustická rychlost je tam nulová.
- Posunutí mezi akustickým tlakem a akustickou rychlostí je $\frac{\lambda}{4}$. Tam, kde má akustická rychlost uzel, má akustický tlak kmitnu.
- Amplitudy akustického tlaku a rychlosti jsou pro určitý bod v místnosti konstantní.
- V uzavřeném prostoru existují tři druhy vlastních vidů kmitání:

axiální, vlnové složky se pohybují rovnoběžně s jednou z os;

tangenciální, vlny jsou tečné k některé dvojici stěn,

šikmé, vlnové složky jsou šikmé ke všem trojicím stěn.

- Pro všechny vidy je akustický tlak maximální v rozích místností.



Obr.6 - Stojaté vlnění uvnitř místnosti

1.4.3 Statistické řešení akustického pole v uzavřeném prostoru

Stanovení okamžitých akustických veličin, charakterizujících zvukové vlnění, je pro velké uzavřené prostory početní cestou z vlnové rovnice nemožné. Vzhledem k velkému počtu dějů můžeme tedy akustické pole v uzavřeném prostoru řešit statisticky. Z tohoto pohledu bude základní veličinou objemová *hustota energie w* nebo *intenzita zvuku I*.

I v tomto případě je nutné zavést následující předpoklady:

- *Velikost akustické energie v libovolném bodě uzavřeného prostoru je součet středních hodnot energií, které do vyšetřovaného bodu dospěly vlivem odrazů od stěn.*
- *Objemová hustota energie je ve všech bodech prostoru stejná.*
- *Všechny úhly, pod kterými dopadá zvuk do sledovaného bodu, jsou stejně pravděpodobně zastoupeny.*

Objemová hustota energie v libovolném bodě uzavřeného prostoru je závislá na energii E , kterou vysílá zdroj, a na pohltivých vlastnostech stěn. Základní rovnici pro výpočet objemové hustoty energie v libovolném bodě prostoru odvodíme ze zákona zachování energie: *Energie vysílaná zdrojem je rovna součtu energie pohlcené stěnami E_s a energie obsažené v uzavřeném prostoru E' :*

$$E = E_s + E' \quad (43)$$

Pro příslušné akustické výkony platí

$$P = P_s + P' \quad (44)$$

$$P' = \frac{dw}{dt}V \quad (45)$$

je akustický výkon obsažený v uzavřeném prostoru o objemu V .

$$P_s = \frac{dE_s}{dt} \quad (46)$$

je akustický výkon pohlcený stěnami ohraničujícími uzavřený prostor.

Z rovnic (44) a (46) plyne

$$P - P_s = V \frac{dw}{dt} \quad (47)$$

P akustický výkon vyzářený zdrojem W

w objemová hustota energie v uzavřeném prostoru J.m^{-3}

Zavedeme-li pro charakteristiku stěn z hlediska pohlcování zvuku tzv. činitel zvukové pohltivosti α

$$\alpha = \frac{E_s}{E} = \frac{P_s}{P} \quad (48)$$

E_s energie pohlcená určitou plochou J

E energie dopadající na tuto plochu J

Předpokládáme-li, že vlastnosti stěn jsou všude stejné a energie dopadající na stěny je rovnoměrně rozložena, lze odvodit pro střední hodnotu intenzity pole odražených vln

$$I = \frac{wc}{4} \quad (49)$$

Za předpokladu, že vysílání a pohlcování zvuku je nepřetržité, obklopují-li prostor stěny

o plochách S_i ; a činitelích zvukové pohltivosti α_i , bude podle rovnic (49) a (48) celková akustická energie pohlcená za sekundu všemi ohraničujícími plochami

$$P_s = \sum_i^n \alpha_i S_i \frac{wc}{4} = \alpha_i \sum_i^n S_i \frac{wc}{4} = \frac{1}{4} A_n cw \quad (50)$$

kde střední činitel zvukové pohltivosti je

$$\alpha_s = \frac{\sum \alpha_i S_i}{\sum S_i} \quad (51)$$

a celková zvuková pohltivost je

$$A_n = \sum \alpha_i S_i \quad (52)$$

A_n celková zvuková pohltivost Sab

c fázová rychlost šíření zvuku m.s⁻¹

Zákon zachování energie (49) dostane tvar

$$P = \frac{1}{4} A_n c w + \frac{dw}{dt} V \quad (53)$$

a pro výpočet hustoty akustické energie v poli odražených vln získáme diferenciální rovnici

$$\frac{dw}{dt} + \frac{1}{4} \frac{A_n c}{V} w = \frac{P}{V} \quad (54)$$

Řešením (54) vychází

$$w = \frac{4P}{cA_n} \left(1 - e^{-\frac{A_n c}{4V} t} \right) + w_1 e^{-\frac{cA_n}{4V} t} \quad (55)$$

w_1 okamžitá objemová hustota energie v čase $t = 0$ J.m⁻³

1.4.4 Doba dozvuku

Důležitou veličinou v akustice uzavřených prostorů je tzv. *doba dozvuku* T definovaná jako doba od vypnutí zdroje, za kterou poklesne objemová hustota energie (nebo intenzita zvuku) na milióntinu své původní hodnoty.

$$\frac{w_2}{w_1} = \frac{I_2}{I_1} = 10^{-6} \quad (56)$$

Zavedeme-li hladinu intenzity (nebo hladinu akustického tlaku), je doba dozvuku definována jako doba od vypnutí zdroje, za kterou hladina intenzity (nebo hladina akustického tlaku) klesne o 60 dB.

Pro výpočet doby dozvuku vyjdeme z rovnice (54)

$$\frac{dw}{dt} + \frac{1}{4} \frac{A_n c}{V} w = 0 \quad (57)$$

$$\int_{w_1}^{w_2} \frac{dw}{w} = -\frac{1}{4} \frac{A_n c}{V} \int_0^t dt, \quad w_2 = w_1 e^{-\frac{A_n c}{4V} t} \quad (58)$$

Platí-li (54), pak $t = T$, a tedy

$$T = \frac{4V}{A_n c} \ln 10^6 \text{ s} \quad (59)$$

Je-li $c = 343.7 \text{ m.s}^{-1}$, vyjde tzv. Sabinův vzorec pro výpočet doby dozvuku

$$T = 0,161 \frac{V}{A_n} \text{ s} \quad (60)$$

který platí pro malé hodnoty činitele zvukové pohltivosti α . Experimentálně bylo zjištěno, že přesněji platí

$$T = 0,164 \frac{V}{A_n} \text{ s} \quad (61)$$

V objem uzavřeného prostoru m^3

A_n celková pohltivost Sab

Sabine předpokládal plynulé pohlcování energie. Ve skutečnosti ubývá energie při každém odrazu skokem. Na základě této skutečnosti vznikl tzv. Eyringův vzorec, který platí i pro prostory s vysokým α_s

$$T = 0,164 \frac{V}{-S \ln(1 - \alpha_s)} \text{ s} \quad (62)$$

1.4.5 Vztah mezi hladinami akustického tlaku a akustického výkonu v poli odražených vln

Řešíme-li otázky snižování hluku v uzavřených prostorech, nestačí znát pouze hladinu akustického tlaku a hladinu akustického výkonu, ale i akustickou kvalitu daného prostoru, charakterizovanou středním činitelem zvukové pohltivosti α_s nebo celkovou pohltivostí A_n .

Část výkonu zdroje, která zůstane v prostoru pole odražených vln po prvním odrazu zvuku na ohraničujících plochách, je podle (44)

$$P' - P - P_s = P - \alpha_s P = P(1 - \alpha_s) \quad (63)$$

V praxi nás zajímá *ustálený stav*, kdy $\frac{dw}{dt} = 0$, kdy výkon obsažený v poli odražených

vln je roven výkonu pohlcenému stěnami

$$P' = P(1 - \alpha_s) = P_s \quad (64)$$

Podle rovnice (53) upravené pro ustálený stav bude (64) mít tvar

$$P(1 - \alpha_s) = \frac{1}{4} A_n I = \frac{1}{4} \frac{p_{ef}^2}{\rho c} \quad (65)$$

takže pro střední hodnotu intenzity v takovém *difúzním poli* užitím (65)

$$I = \frac{4P(1 - \alpha_s)}{A_n} = \frac{p_{ef}^2}{\rho c} \quad (66)$$

Zavedeme-li do (66) hladinu akustického tlaku a hladinu intenzity, můžeme psát vztah

$$L_p = 10 \log \frac{p_{ef}^2}{p_{0ef}^2} + 10 \log S + \frac{4(1 - \alpha_s)}{A_n} = L_w + 10 \log \frac{4(1 - \alpha_s)}{A_n} = L_w + 10 \log \frac{4}{A_n} \quad (67)$$

L_p hladina akustického tlaku v kmitočtovém pásmu dB

L_w hladina akustického výkonu v kmitočtovém pásmu dB

α_s střední činitel pohltivosti ohraničujících ploch při uvažovaném kmitočtu

A_n celková pohltivost prostoru, kterou můžeme vypočítat z (52) Sab

S povrch ohraničujících stěn, včetně stropu a podlahy m²

1.4.6 Kombinace pole přímých a odražených vln

V ohraničeném prostoru, v němž je zdroj hluku, se vytváří pole přímých vln v nejbližším okolí zdroje a pole odražených vln v ostatním prostoru. Pro hluk s převážně spojitým spektrem a náhodným časovým průběhem signálu v libovolném místě prostoru se sčítá střední hodnota intenzity přímé vlny a odražených vln (66).

Sečteme-li tedy účinky přímých a odražených vln, můžeme psát základní vztah pro hladiny akustického tlaku v ohraničeném prostoru ve tvaru

$$L_p = L_w + 10 \log \left[\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4(1-\alpha_s)}{S\alpha_s} \right] \approx L_w + 10 \log \left[\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{A_n} \right] \quad (68)$$

L_p hladina akustického tlaku v kmitočtovém pásmu dB

L_w hladina akustického výkonu v kmitočtovém pásmu dB

Q činitel směrovosti

r vzdálenost myšleného centra akustického vyzařování m

S celkový povrch ohraničujících stěn m²

A_n celková pohltivost prostoru Sab

Podle vzájemné velikosti zlomků v rovnici (68) můžeme usuzovat, zda vyšetřovaný bod uzavřeného prostoru leží v poli přímých nebo odražených vln.

Pro pole přímých vln platí

$$\frac{Q}{4\pi r^2} > \frac{4(1-\alpha_s)}{A_n} \quad (69)$$

Pro pole odražených vln platí

$$\frac{Q}{4\pi r^2} < \frac{4(1-\alpha_s)}{A_n} \quad (70)$$

Jestliže

$$\frac{Q}{4\pi r^2} = \frac{4(1-\alpha_s)}{A_n} \quad (71)$$

pak

$$r = \sqrt{\frac{A_n Q}{16\pi(1-\alpha_s)}} \approx \sqrt{\frac{A_n Q}{16\pi}} \quad (72)$$

určuje rozhraní mezi polem přímých a odražených vln.

Z rovnice (68) plyne:

Hlavní veličiny, které mají vliv na rozložení zvuku uvnitř uzavřeného prostoru, jsou hladina akustického výkonu L_w , činitel směrovosti zdroje zvuku Q , vzdálenost od zdroje r a celková pohltivost prostoru (místnosti) A_n .

Hladina akustického výkonu zdroje zvuku je důležitá pro výpočet hladiny akustického tlaku v kterémkoli místě uzavřeného prostoru. Činitel směrovosti a vzdálenost od zdroje mají význam pro volné pole. Celková pohltivost přitom je důležitá pro pole dozvukové.

Odchytky od těchto ideálních podmínek (následkem směrovosti způsobené rozptylem zvuku na předmětech v místnosti) mají za následek, že rozdíl mezi hladinou L_w a L_p je větší, než by se dalo očekávat podle teorie difúzního pole. [1]

1.5 Akustické prostředky snižování hluku

Vysoké hodnoty hladin hluku jak v pracovním tak mimopracovním prostředí vytvořily situaci, jejíž pozitivní ovlivnění se stává nezbytnou potřebou. Na jedné straně došlo k zastavení růstu celodenních ekvivalentních hladin hluku na hlavních komunikacích, na druhé straně se významně snížila doba nočního klidu a rozšířila území a pracoviště postižená nepřijatelnými hladinami. Dodržování hygienických limitů, které jsou závazným hlukovým kritériem, je nezbytné, nechceme-li zvyšovat riziko poškození zdraví dnešní generace.

Opatření používaná ke snížení hlučnosti prostředí a ke snížení expozice osob hlukem je možné v zásadě realizovat čtyřmi základními způsoby:

1. omezením vzniku hluku přímo u zdroje,
2. zabráněním nebo omezením šíření hluku od zdroje k příjemci,
3. zvukovou izolací člověka od hlučného prostředí,
4. provozními organizačními opatřeními a osobními ochrannými protihlukovými pomůckami.

Z těchto opatření je snižování hluku strojů a zařízení již ve fázi jejich vývoje, konstrukce a výroby nejúčinnější a nejméně nákladné. Aplikují se speciální měřicí metody, které využívají např. frekvenční, fázové a směrové analýzy a umožňují rozeznat, který konstrukční díl stroje vyzařuje zvuk. I při použití dodatečných protihlukových úprav je třeba vždy umět rozeznat pravou příčinu vzniku hluku.

Navíc je nutné:

- důsledné zamezení přenosu vibrací, resp. zvukových vln konstrukcí od zdrojů do nosných částí budov,
- kvalita provádění stavebních a montážních prací (zamezení netěsnostem, spárám a akustickým mostům).

1.5.1 Tlumení hluku pohlcováním

Existují dvě oblasti, v nichž se využívá zvukové pohltivosti. Do první oblasti patří prostorová akustika, která řeší zvukové poměry v prostorech určených pro poslech slova a hudby. První známky o použití pohltivých materiálů k úpravě akustiky prostorů pocházejí již z období starého Řecka, kdy bylo vkládáno konopí nebo bavlna do štíhlých váz vhodně umístěných v řeckých chrámech. V druhém případě se používá pohltivosti ke snižování hlučnosti, a to jednak v prostorech, kde je umístěn zdroj zvuku, jednak v prostoru, kam hluk proniká odjinud a dále při šíření zvuku různými kanály a potrubími, kde se např. používá absorpčních tlumičů.

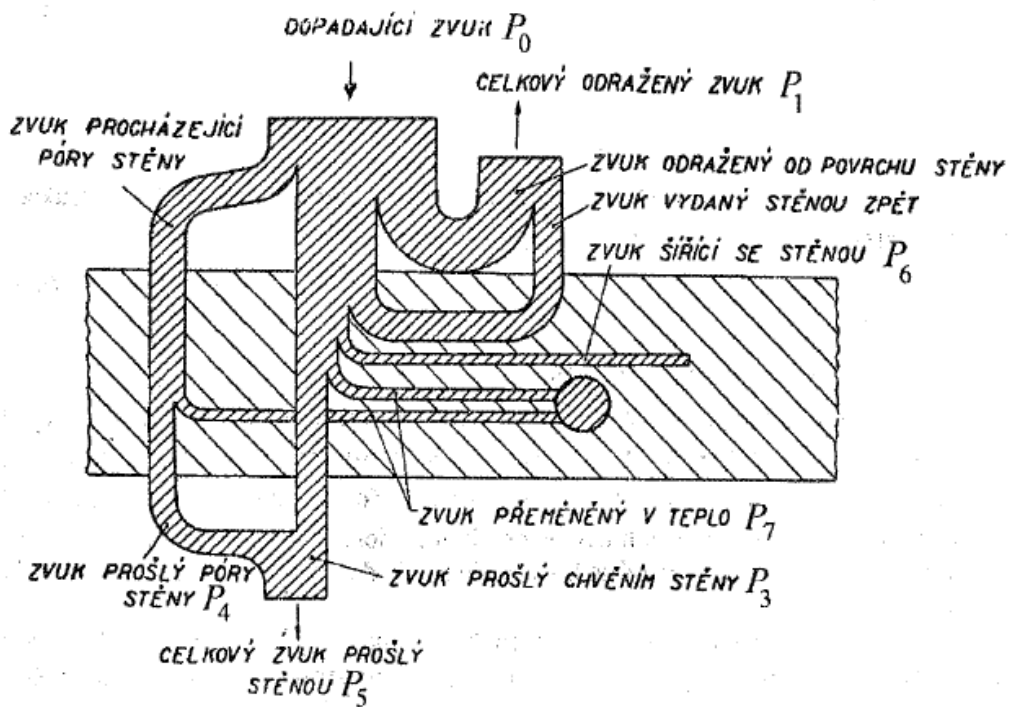
Pohlcování zvuku v látce je vysvětlováno přeměnou akustické energie v jinou, obvykle tepelnou. K úbytku zvukové energie dochází v podstatě trojím způsobem:

1. Třením mezi pohybujícími se vzduchovými částicemi a materiálem. K této přeměně kinetické energie v tepelnou dochází zejména u materiálů obsahujících velké množství pórů.
2. Snižováním potenciální energie zvukové vlny způsobeným relaxací akustického tlaku, k němuž dochází např. při přestupu tepla ze vzduchu do pohltivého materiálu při periodických tlakových změnách.
3. Nepružnou deformaci vláken pohltivého materiálu, k níž je třeba vyšší energie než se opět z materiálu vyzáří. Jejich rozdíl představuje úbytek zvukové energie.

Většinou se na ztrátě zvukové energie uplatňují, i když v různé míře, všechny uvedené pochody.

1.5.2 Činitel zvukové pohltivosti

Při dopadu zvukové vlny na povrch stěny nebo nějaké překážky se část zvukové vlny odrazí zpět, část se pohltí ve stěně a část projde do prostoru za stěnou (obr.7).



Obr.7 - Průchod zvuku stěnou

P_0 dopadající akustický výkon

P_1 odražená složka akustického výkonu

P_6 složka, která se dále šíří stěnou

P_7 složka, která se ve stěně mění v teplo

P_3 složka, která je vlivem kmitání stěny vyzářena do prostoru na druhé straně stěny

P_4 složka procházející póry na druhou stranu stěny

$P_2 = P_6 + P_7$ pohlcená složka akustického výkonu

$P_5 = P_3 + P_4$ složka propuštěná stěnou

Schopnost materiálu nebo konstrukce pohlcovat zvuk charakterizujeme *činitelem zvukové pohltivosti* α , který je dán poměrem pohlceného P_2 a dopadajícího P_0 akustického výkonu.

$$\alpha = \frac{P_2}{P_0} \quad (73)$$

Podobně můžeme definovat činitel zvukové odrazivosti β poměrem odraženého P_1 a dopadajícího P_0 akustického výkonu a činitel zvukové průzvučnosti τ poměrem prošlého P_5 a dopadajícího P_0 akustického výkonu.

$$\beta = \frac{P_1}{P_0} \quad (74)$$

$$\tau = \frac{P_5}{P_0} \quad (75)$$

Veličiny α , β , τ nabývají hodnoty 0 až 1. Pro pohltivé materiály a konstrukce je τ řádově nižší než α a β a je možné psát

$$\alpha + \beta \approx 1 \quad (76)$$

1.5.3 Měření činitele zvukové pohltivosti

Činitel zvukové pohltivosti je závislý na kmitočtu a směru dopadu zvukové vlny. Pro kolmý dopad jej označujeme jako *činitel pohltivosti pro kolmý dopad* α_N , pro všesměrový dopad zvuku jako *činitel pohltivosti pro všesměrový dopad* α_S (Sabinův).

Měření činitele zvukové pohltivosti pro kolmý dopad se provádí metodou analýzy stojatých vln v interferometru (Kundtově trubici). Podmínky a způsob měření popisuje norma ČSN 73 0501.

Tato metoda je vhodná zejména pro předběžné měření při vývoji nových materiálů, k porovnání pohltivosti různých materiálů a jejich konstrukčního uspořádání nebo ke stanovení dalších charakteristik materiálu, např. akustické impedance. Výhodou jsou malé rozměry zkušebních vzorků.

Měření činitele zvukové pohltivosti pro všesměrový dopad se provádí ve speciální dozvučkové místnosti podle normy ČSN 73 0537. Tato metoda je přesnější a dává výsledky blížící se technické praxi.

V obou případech se činitel zvukové pohltivosti měří a uvádí pro střední oktávové kmitočty v rozmezí 125 Hz až 4 000 Hz. Materiály, jejichž činitel zvukové pohltivosti nabývá hodnoty menší než 0,25, se považují za špatně pohltivé; materiály, pro něž je činitel zvukové pohltivosti do 0,60 za středně pohltivé a materiály, pro něž je činitel zvukové pohltivosti v širokém frekvenčním rozsahu nad 0,60 za velmi dobré. Jsou to zejména látky s pórovitou, vláknitou nebo houbovitou strukturou. Jednotlivé póry musí být vzájemně propojeny, aby se mohly uplatnit mechanismy přeměny akustické energie.

Vysokých hodnot činitele zvukové pohltivosti dosahují také ty materiály, jejichž struktura je uzpůsobena pronikání zvukové energie ze vzduchu do pohltivého materiálu. Je to splněno

u těch materiálů, kde vlnovému odporu vzduchu $\rho_0 c$ se blíží reálná složka akustické impedance materiálu. Reálnou i imaginární složku akustické impedance ($Z = R + iX$) můžeme stanovit měřením v interferometru.

Zkušenosti i teoretický rozbor ukazují, že činitel zvukové pohltivosti jednoduché vrstvy na tuhé stěně značně závisí na tloušťce vrstvy. Pro praktické účely můžeme vyjádřit vztah mezi tloušťkou vrstvy h a kmitočtem f_m , nad kterým je materiál akusticky účinný, přibližným výrazem

$$h \approx \frac{1}{10} \frac{c}{f_m} \quad (77)$$

kde c je fázová rychlost zvuku ve vzduchu.

Je zřejmé, že pro pohlcení nízkých kmitočtů by bylo třeba velké tloušťky materiálu, což se řeší různými konstrukčními úpravami.

1.5.4 Neprůzvučné konstrukce

Často je potřeba zamezit pronikání zvuku nebo hluku z prostoru, kde je umístěn zdroj, do určité části jiného - chráněného - prostoru. K tomu slouží metoda zvukové izolace. Pokud hovoříme o konstrukcích, míníme tím stěny staveb ohraničující prostory včetně oken a

dveří (tzv. otvorových výplní), ale také kryty na stroje a hlučná zařízení a také stěny ohraničující prostory dopravních prostředků.

Na Obr.8 jsou vyznačeny cesty přenosu akustické energie, dopadající na velkou rovinnou stěnu konečné tloušťky ze zdroje o výkonu P_0 , dopadající tedy na jakýkoliv dělicí prvek uložený svise (příčky, otvorové výplně) nebo vodorovně (strop, střecha) či v jakékoliv jiné poloze (izolační kryt).

Z hlediska snížení hluku dělicím prvkem jsou nejdůležitější složky P_3 a P_4 . Označíme-li

$$P_5 = P_3 + P_4, \quad (78)$$

je složka akustického výkonu P_5 ta část, která je stěnou, dělicím prvkem, přenášena na druhou stranu do chráněného prostoru a musíme se snažit, aby byla co nejmenší.

Složku P_4 odstraníme tím, že se snažíme odstranit póry, spáry a trhliny. Snížení akustického výkonu P_5 , speciálně výkonu P_3 , je závislé na tzv. zvukoizolačních vlastnostech konstrukce, z nichž se budeme zabývat tzv. *neprůzvučností* dělicích prvků.

Podle způsobu šíření zvuku rozeznáváme:

- *Vzduchovou neprůzvučnost* - vlastnost dělicího prvku propouštět zvuk, který se šíří vzduchem, do chráněného prostoru (týká se vertikálních i horizontálních dělicích prvků) v zeslabené míře.
- *Kročejevá neprůzvučnost* - vlastnost dělicího prvku propouštět zvuk, který se šíří prvkem do chráněného prostoru (týká se pouze prvků horizontálních.) v zeslabené míře. Snížení hladin hluku, kterého se dosahuje neprůzvučnou konstrukcí bývá v rozmezí 15 dB až 50 dB. To je tak významný účinek, že neprůzvučné konstrukce vkládáme všude, kde je možno použít.

1.5.5 Činitel průzvučnosti a stupeň neprůzvučnosti

Schopnost stěny propustit část dopadající energie akustického výkonu označujeme jako *průzvučnost stěny*. Kvantitativně je průzvučnost prvku charakterizována *činitelem prů-*

zvučnosti (75): $\tau = \frac{P_5}{P_0} = \frac{I_5}{I_0}$ definovaným poměrem intenzity prošlého zvuku k intenzitě dopadajícího zvuku na dělicí prvek.

V praxi užíváme k hodnocení neprůzvučnosti *stupeň neprůzvučnosti*

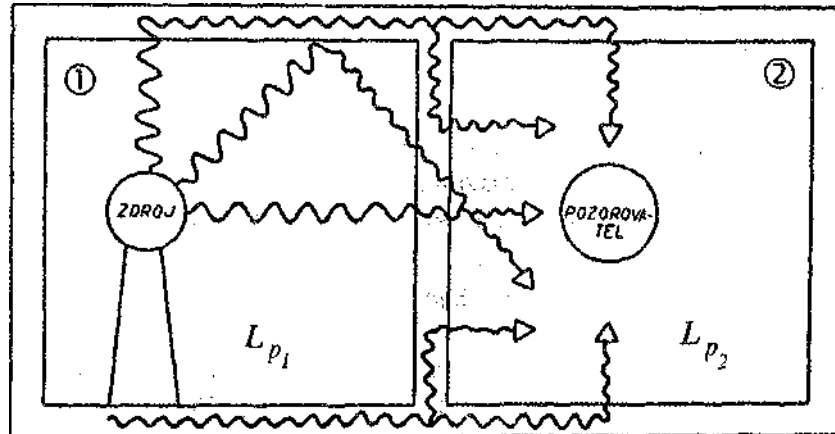
$$R = 10 \log \frac{1}{\tau} = 10 \log \frac{P_0}{P_5} \quad (79)$$

Protože neměříme akustické výkony, nýbrž akustické tlaky, dosazujeme do (79) za akustický výkon odpovídající vztahy.

1.5.6 Stupeň vzduchové neprůzvučnosti

Jestliže do uzavřeného prostoru proniká hluk z vnějšku, budí v něm intenzitu zvuku závislou na neprůzvučnosti stěn a akustických vlastnostech chráněného prostoru.

Na obr. 8 jsou vyznačeny cesty přechodu zvuku z prostoru 1 do prostoru 2.



Obr.8 - Různé způsoby šíření zvuku do sousedního prostoru.

Pro odvození rovnice k výpočtu stupně vzduchové neprůzvučnosti předpokládáme: Zvuk se šíří vzduchem z tzv. vysílacího prostoru 1, kde je zdrojem vytvořeno difúzní pole o hladině akustického tlaku L_{p1} , pouze přes dělicí prvek bez otvorů a trhlin do chráněného prostoru 2, kde se vytváří difúzní pole o hladině akustického tlaku L_{p2} .

V prostoru **1**, kde je hustota energie w_1 , dopadá na dělicí stěnu akustický výkon P_0

$$P_0 = \frac{w_1 c}{4} \cdot S_d \quad (80)$$

S_d plocha dělicího prvku m^2

c fázová rychlost zvuku ms^{-1}

Stěna propustí akustický výkon

$$P_5 = \tau P_0 = \tau \frac{w_1 c}{4} S_d \quad (81)$$

Za ustáleného stavu musí platit

$$P_5 = P_{S2} \quad (82)$$

kde P_{S2} je výkon pohlcený stěnami prostoru **2**

$$P_{S2} = \alpha_S \frac{w_2 c}{4} S \quad (83)$$

α_S střední hodnota činitele pohltivosti stěn chráněného prostoru

S celkový povrch stěn chráněného prostoru m^2

Užitím rovnic (81), (82), a (83) vychází

$$\tau w_1 S_d = \alpha_S w_2 S$$

$$\frac{w_1}{w_2} = \frac{\alpha_S S}{\tau S_d} = \frac{P_{ef1}^2}{P_{ef2}^2} \quad (84)$$

Logaritmováním rovnice (84) a zavedením hladin akustického tlaku L_{p1} a L_{p2} dostaneme

$$10 \cdot \log \frac{\alpha_S S}{\tau S_d} = 10 \log \frac{P_{ef1}^2}{P_{ef0}^2} - 10 \log \frac{P_{ef2}^2}{P_{ef0}^2}$$

Zavedeme-li veličinu pohltivost chráněného prostoru A_n v jednotkách Sab vztahem $A_n = \alpha_S S$, dostaneme rovnici pro výpočet *stupně vzduchové neprůzvučnosti*

$$R = L_{p_1} - L_{p_2} + 10 \log \frac{S_d}{A_n} \quad (85)$$

L_{p1}, L_{p2} hladina akustického tlaku v příslušném frekvenčním pásmu

tzv. zvukoizolační oblasti (100,Hz - 3150 Hz)

A_n celková pohltivost chráněného prostoru v příslušném frekvenčním pásmu

R stupeň vzduchové neprůzvučnosti v příslušném frekvenčním pásmu

Pro horizontální konstrukce (stropy, podlahy) se zavádí tzv. *kročejová neprůzvučnost*, vyjádřená hladinou normalizovaného kročejového hluku

$$L_n = L_p - 10 \log \frac{A_n}{A_0} \quad (86)$$

L_p hladina akustického tlaku pod zkoušenou konstrukcí (stropem), způsobená normalizovaným zdrojem kročejového hluku - klepadla

A_n celková pohltivost chráněného prostoru pod konstrukcí (stropem)

A_0 referenční pohltivost, stanovená pro typ uvažovaného prostoru. (Pro obytné místnosti $A_0 = 10 \text{ Sab}$)

Také rovnice (86) je vztah, pomocí něhož lze veličinu $L_n = f(f)$ vypočítat

z naměřených hodnot hladin akustického tlaku a celkové pohltivosti prostoru, vypočítané z naměřených hodnot doby dozvuku.

Kromě vzduchové a kročejové neprůzvučnosti je zvuková izolace chráněných prostorů ohraničujícími konstrukcemi závislá ještě na tlumení chvění a hluku, který se šíří konstrukcí. Zatímco zajištění neprůzvučnosti závisí především na vhodné skladbě, určité plošné hmotnosti a ohybové tuhosti použitých dělicích prvků, útlum zvuku a chvění, šířícího se konstrukcí, vyžaduje volbu speciálních akusticky efektivních materiálů a spojovacích článků.

Ukazuje se, že přesného zjištění uvedených zvukoizolačních vlastností konstrukcí lze dosáhnout experimentálně, měřením za přesně definovaných podmínek. Existuje však celá řada důležitých metod pro teoretické hodnocení neprůzvučnosti.

1.5.7 Pohltivé konstrukce

Při snižování hluku v uzavřených prostorech je třeba důsledně rozlišovat mezi zvukovou pohltivostí a zvukovou izolací. Zvuková vlna šířící se od zdroje prostorem dopadne na stěnu a část její energie projde různým způsobem stěnou. Druhá část její energie se odrazí zpět do místnosti. Vlastnost stěny omezit procházející část zvukové energie nazýváme neprůzvučnost a dosahujeme jí zvukovou izolací. Vlastnost stěny zmenšit odraženou část zvukové energie nazýváme zvukovou pohltivostí - absorpcí a dosahujeme jí zvuk pohlcujícím obkladem stěny. Tyto dvě vlastnosti, neprůzvučnost a zvukovou pohltivost, nelze zaměňovat, neboť vycházejí z různých fyzikálních principů a jsou realizovány zcela odlišnými technickými prostředky.

Materiály a konstrukce vhodné pro pohlcování zvuku jsou nevhodné pro zvukovou izolaci, neboť mívají malou neprůzvučnost. Naopak těžký tvrdý hladký materiál použitý např. na stěnu má značnou neprůzvučnost, ale její činitel zvukové pohltivosti je malý, zvuková energie se od něj dobře a prakticky beze ztrát odrazí zpět do místnosti.

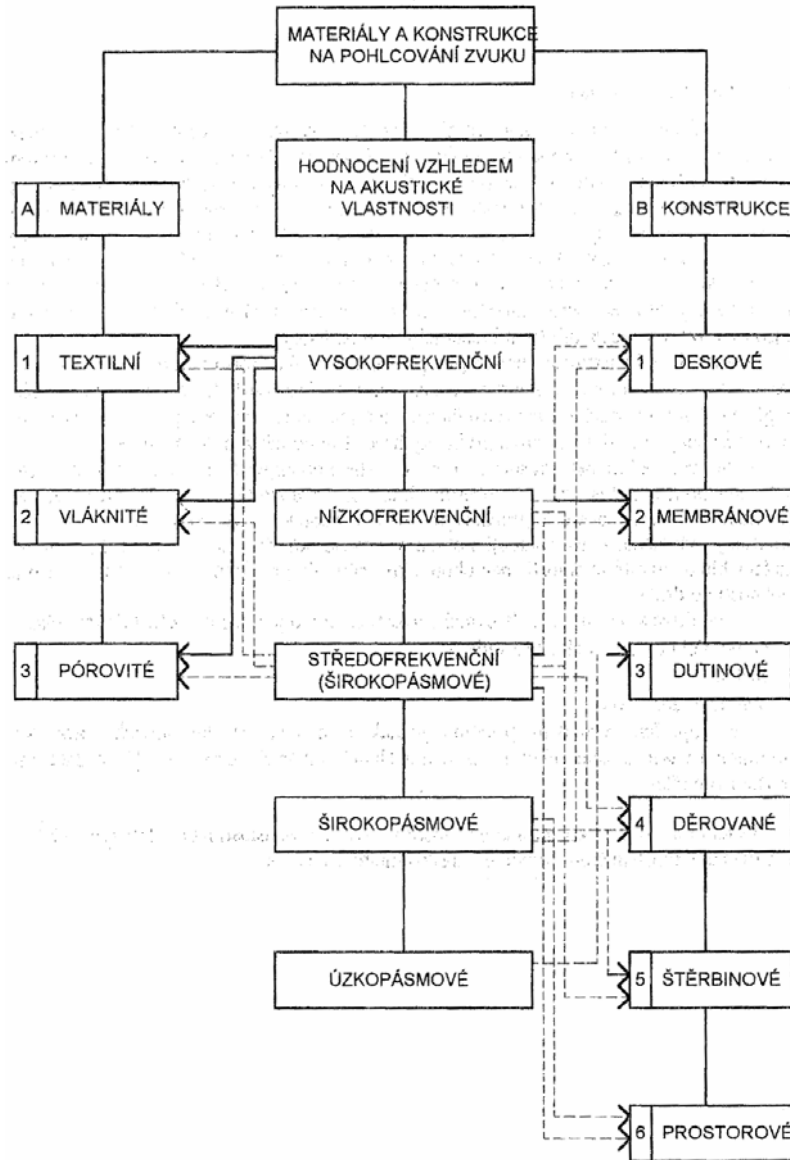
Zvukovou pohltivostí, absorpcí, pomocí zvuk pohlcujících obkladů může být tedy pohlcena pouze ta část zvukové energie, která se po dopadu na stěnu odrazí zpět do místnosti. Zvuková energie procházející stěnou nebude zvuk pohlcujícím obkladem prakticky ovlivněna. Zvuk pohlcující obklady a akustická tělesa mohou značně přispět ke snížení hluku uvnitř místnosti, nemohou však zabránit pronikání hluku stěnou z jedné místnosti do druhé.

Pohltivé konstrukce realizované v akustické praxi je možno rozdělit do tří oblastí:

- pohlcující obklady a akustická tělesa,
- zástěny,
- polouzavřené kryty.

Tato opatření využívají principu jednak rezonance, tj. kmitajících membrán, kmitajících desek a konstrukce na principu Helmholtzových rezonátorů a dále pak akustických těles.

Dělení materiálů a konstrukcí pro absorpci zvuku v závislosti na činiteli zvukové pohltivosti a konstrukčním řešením (obr.9).



Obr.9 - Dělení materiálů a konstrukcí pro absorpci zvuku

1.5.7.1 Zvětšení zvukové pohltivosti v prostoru

- Použije se ke snížení hluku doznívajícího, šířícího se odrazy od stropu a stěn v celém prostoru ve vzdálenosti od zdroje větší, než je dozvuková vzdálenost.

- Použije se při větším počtu zdrojů ke snížení výsledné hladiny hluku omezením vlivu hluku od okolních zdrojů, zejména nepracují-li všechny zdroje současně a neustále a mění-li svoji polohu v prostoru.
- Použije se také jako doplněk dalších opatření snižujících hluk - zástěn , polouzavřených krytů, krytů a tvarového řešení prostoru.
- Nepoužije se, je-li třeba snížit hladinu hluku v bezprostřední blízkosti zdroje, tj. ve vzdálenosti menší než dozvuková vzdálenost (v místě obsluhy), zde je toto opatření neúčinné.

1.5.7.2 Účinky zvětšení zvukové pohltivosti

- Účinek zvětšení zvukové pohltivosti se projeví v celém prostoru s výjimkou míst ve vzdálenosti kolem zdroje hluku až do dozvukové vzdálenosti. Projeví se pro všechny osoby v prostoru s výjimkou vlastní obsluhy zdroje hluku a osob v bezprostřední blízkosti zdroje hluku.
- Snížení hladiny odraženého, doznívajícího hluku; toto zvětšení má vlivná snížení hluku ve větší části chráněného prostoru
- Zkrácení doby dozvuku; toto zkrácení má pozitivní vliv na srozumitelnost řeči a tím i na možnost dorozumívání a na akustickou pohodu
- Omezení nežádoucích odrazů hluku od akusticky upravených ploch
- Účinek zvětšení zvukové pohltivosti je málo závislý na poloze zdroje hluku v prostoru, při větším počtu zdrojů na jejich rozmístění v prostoru.
- Kmitočtová závislost účinku zvětšení zvukové pohltivosti je dána kmitočtovou závislostí činitele zvukové pohltivosti použitých absorpčních prvků.
- Zvětšením zvukové pohltivosti akustickou úpravou stropu se zvětší pokles hladiny hluku se vzrůstající vzdáleností od zdroje; pokles se projevuje i déle než je dozvuková vzdálenost. Tento vliv je zejména výrazný v nízkých a protáhlých prostorech.

1.5.7.3 Realizace zvětšení zvukové pohltivosti

Zvětšení celkové základní zvukové pohltivosti v uzavřeném prostoru dosáhneme akustickou úpravou zvuk pohlcujícími prvky:

- Obložením povrchu (stěn, stropů) zvuk pohlcujícími obklady ve formě desek či kazet.
- Zavěšením stropních podhledů, které umožňují vytvoření souvislé plochy v určité vzdálenosti od stropu bez ohledu na tvarové členění stropní konstrukce. Tato plocha umožňuje zakrýt instalaci či zařízení připevněných na stropě, mohou být do ní začleněna i osvětlovací tělesa, vyústění klimatizace či ventilace může spojit funkci akustickou se sálovým vytápěním.
- Otevřené kazety tzn. kazety nebo desky jsou zavěšeny kolmo ke stropu. Výhodou tohoto uspořádání je větší plocha zvuk pohlcujícího obkladu než plocha stropu a zachování volné stropní plochy, např. pro denní osvětlení střešními světlíky.
- Umístěním (zavěšením) akustických těles do prostoru.
- Obložením zástěn zvuk pohlcujícími obklady, je-li těchto zástěn větší počet. Jinak vliv obkladu zástěny na celkové zvětšení zvukové pohltivosti v prostoru můžeme zanedbat.

Volba vhodného typu zvuk pohlcujících prvků se provede dle těchto zásad:

- Kmitočtová závislost činitele zvukové pohltivosti má být zásadně širokopásmová.
- Ve speciálních případech, kdy je hluk výrazně úzkopásmový, je možno též použít zvuk pohlcující prvek, jehož maximum pohlcování je v tomto pásmu.
- Činitel zvukové pohltivosti má dosáhnout hodnoty min. 0,75.
- Je třeba respektovat i hledisko montáže, odolnosti vůči vlivům prostředí, hledisko estetické, aj.

1.5.7.4 Zásady praktického použití zvětšení zvukové pohltivosti

Zkrácení doby dozvuku bez ohledu na snížení hladiny hluku je nutné všude tam, kde vyžadujeme dobrou možnost dorozumívání řeči přímou i reprodukovanou a dále všude tam, kde vyžadujeme dobrou akustickou pohodu prostředí. Pro tyto účely je max. ještě přípustná doba dozvuku pro velké prostory 1,5 s, pro prostory menší než 2 000 m³ 1,0 s s tolerancí ± 10% .

Zvětšení zvukové pohltivosti jako doplňkové opatření je nutno uplatnit vždy při použití zástěn. Zvuk pohlcující obklad na okolních plochách (stropě, příp. i svislých bočních stěnách) omezí dopad odraženého hluku na zástěnu.

Zvětšení zvukové pohltivosti jako doplňkové opatření je třeba uplatnit i při použití polouzavřeného krytu - proti otvoru je nutno umístit zvuk pohlcující obklad, aby se omezilo další šíření hluku vycházejícího otvorem z krytu.

Zvuk pohlcujícími obklady je nutno obložit zástěny a vnitřní stěny polouzavřených i uzavřených krytů, aby nedocházelo ke zvýšení hladiny hluku před zástěnou nebo uvnitř krytu vlivem odrazu.

Pro výsledný účinek je rozhodující zvuková pohltivost celé akusticky upravené plochy (např. stěny), tedy i celého souboru akustických těles nebo otevřených kazet.

Na okraji plochy zvuk pohlcujících obkladů se projevuje ohybový jev. Z tohoto důvodu je účelné pro zvětšení účinku obkladu rozdělit velkou plochu na několik menších, užívá-li se více typů obkladů, šachovnicově je prostřídát. Z tohoto důvodu rovněž není na závadu, je-li plocha obkladu přerušena např. osvětlovacími tělesy, vyústěním klimatizace, apod.

Činitel zvukové pohltivosti akustického obkladu závisí na úhlu dopadu zvukových vln. Zjednodušeně lze uvést, že pro kolmý dopad je největší, pro tečný dopad nejmenší. Při rovinném akustickém obkladu stropu či zavěšeném podhledu v nízké místnosti lze očekávat max. účinek nad zdrojem, pro kolmo dopadající zvuk, tedy potlačení prvních odrazů v této oblasti a menší účinek v částech místnosti více vzdálených od zdroje.

Otevřené kazety, jež jsou vzhledem ke stropu orientovány svisle, mají účinek opačný. Vytváří se oblast s netlumenými prvními odrazy zvuku blízko zdroje a více tlumenými odrazy zvuku ve větší vzdálenosti od zdroje.[1]

1.6 Akustické vlastnosti pohltivých materiálů a jejich aplikace v praxi

Pohlcování zvukové energie a její přeměna v jinou, nejčastěji tepelnou energii, je významným prostředkem k řešení akustických problémů uzavřených prostorů. V oblasti prostorové akustiky se využívá pohltivosti k úpravě doby dozvuku v prostorech a místnostech pro kulturní účely; v koncertních sálech, divadlech, kinosálech, konferenčních místnostech apod., aby co nejdokonaleji sloužily svému účelu. Pro tuto oblast použití se nejlépe hodí akustické materiály a konstrukce úzkopásmové s frekvenční charakteristikou zvukové po-

hltivosti ve tvaru rezonanční křivky. Technická akustika využívá zvukopohltivých materiálů ke snížení hladiny akustického tlaku v prostorech, kde je umístěn zdroj hluku nebo do kterých hluk proniká odjinud. Jedná se o průmyslové haly, sportovní haly, kryté plovárny, telefonní ústředny, výpočetní stanice, ale také lékařské vyšetřovny apod. Pro tyto účely jsou vhodné materiály a konstrukce se širokopásmovým účinkem. Akustické materiály mohou být účinné v široké oblasti slyšitelného spektra. Závisí to na jejich struktuře, tloušťce, povrchové úpravě, na typu konstrukce a na montáži.

Z hlediska uspořádání a typické frekvenční závislosti činitele zvukové pohltivosti je možné rozdělit materiály a konstrukce pro absorpci zvuku na:

- materiály: pórovité a vláknité
- konstrukce: pohltivé obklady, konstrukce typu Helmholtzových rezonátorů kmitající membrány a desky akustická tělesa

1.6.1 Vlastnosti materiálů pohlcujících zvuk

Materiály pohlcující zvuk mají převážně porézní strukturu. Jsou to látky pórovité nebo vláknité, v jejichž objemu se nacházejí póry vyplněné vzduchem a jejichž povrchová úprava umožňuje pronikání zvukové vlny ze vzduchu dovnitř pohltivého materiálu.

Aplikací pohltivého materiálu nebo pohltivé konstrukce se podaří snížit zvukovou energii odrážející se od stropu, podlahy a stěn v místnosti a tím také hladinu akustického tlaku v tomto prostoru. Klasickými pórovitými materiály jsou např. polyuretanové pěny (militan), které se hodí k použití především v těch prostorech, kde není nebezpečí požáru. Vláknité materiály jsou tvořeny z mikrovláken ze skla, minerální plsti apod. a používají se tam, kde musí odolávat vysokým teplotám.

V porézních látkách dochází k nevratné přeměně zvukové energie v tepelnou energii třemi základními způsoby:

- třením
- relaxací akustického tlaku
- nepružnou deformací.

K přeměně akustické energie vlivem *tření* dochází při pohybu částic vzduchu póry pohltivého materiálu. Množství pohlcené energie závisí na rozměrech a uspořádání pórů a na

tloušťce materiálu. Jelikož styčné plochy mezi částicemi vzduchu a materiálem jsou u vláknitých a pórovitých materiálů poměrně velké, dochází tak ke značné přeměně kinetické energie zvukových vln v tepelnou energii.

K *relaxaci akustického tlaku* v daném místě materiálu může dojít různými způsoby. Šíří-li se zvuková vlna látkou, nastane v místech zhuštění částic vzduchu v pórech zvýšení akustického tlaku a tím také dojde v těchto místech ke zvýšení teploty. Jelikož soustava porů není od kostry materiálu tepelně izolována, přejde teplo ze vzduchu do kostry. Přechod tepla má za následek snížení teploty vzduchu a tím také pokles tlaku, jemuž odpovídá snížení potenciální energie zvukové vlny. Jiný způsob relaxace tlaku nastává při šíření zvuku kostrou materiálu. V místech zmenšení průřezu kostry nastane zvýšení teploty a jestliže je látka dobrým vodičem tepla, dojde k vyrovnání teplot s okolím a tím opět k relaxaci tlaku.

K přeměně zvukové energie vlivem *nepružné deformace* dochází u látek, které vykazují tzv. nepružnou hysterizi. Stlačíme-li takovou látku určitou silou, nevrátí se tato látka do původního stavu, přestane-li síla působit. Práce vynaložená na deformaci je tedy větší než práce získaná pružností tělesa při návratu do původního tvaru a jejich rozdíl představuje úbytek zvukové energie vlivem nedokonalé pružnosti. Základními fyzikálními vlastnostmi pórovitých materiálů, které ovlivňují jejich pohltivé vlastnosti, jsou:

- poréznost
- měrná akustická impedance
- odpor proti proudění vzduchu
- činitel struktury
- činitel udávající typ termodynamických pochodů v pórech materiálu

Poréznost Y je definována jako poměr objemu porů V_p k celkovému objemu materiálu V_c , tj.

$$Y = \frac{V_p}{V_c} \quad (87)$$

Za pórovité se považují látky, u kterých je poréznost minimálně 60%.

Měrná akustická impedance (charakteristická impedance) je definována jako poměr akustického tlaku a akustické rychlosti částic na vstupní ploše materiálu na nějž dopadá rovinná zvuková vlna kolmo.

$$Z_s = \frac{p}{v} \quad (88)$$

Z_s měrná akustická impedance materiálu Pa.s.m⁻¹

p akustický tlak Pa

v akustická rychlost m.s⁻¹

Na povrchu materiálu není akustický tlak a akustická rychlost ve fázi. Měrná akustická impedance je pak komplexní číslo vyjádřené vztahem

$$Z_s = r + ix \quad (89)$$

r reálná složka měrné akustické impedance zvaná též *měrný akustický odpor* nebo *činný odpor* Pa.s.m⁻¹

x imaginární složka měrné akustické impedance, někdy nazývaná *měrná akustická reaktance* Pa.s.m⁻¹

Odpor proti proudění vzduchu je definován jako poměr rozdílu tlaků vzduchu před a za vrstvou porézního materiálu a objemové rychlosti proudění vzduchu do vrstvy

$$R = \frac{\Delta p}{q} \quad (90)$$

R odpor proti proudění vzduchu Pa.s.m⁻³

Δp rozdíl akustického tlaku před a za vrstvou akustického materiálu Pa

$q = uS$ objemová rychlost vzduchu proudícího do vrstvy m³.s⁻¹

u rychlost proudění vzduchu do vrstvy m.s⁻¹

S velikost plochy kolmé na směr proudění m²

Odpor materiálu proti proudění vzduchu závisí na průměru vláken, na jejich orientaci a na pórovitosti materiálu.

Činitel struktury, který je vždy větší než 1, udává vliv pórů v kostře materiálu na akustické vlastnosti. Závisí na vzájemném uspořádání kostry látky a pórů.

Činitel udávající typ termodynamických pochodů v pórech materiálu n udává, zda stlačování a zředování vzduchu při šíření zvuku póry materiálu probíhá adiabaticky, izotermicky nebo polytropicky. Při velmi nízkých frekvencích, kdy je dostatek času pro výměnu tepla mezi kostrou materiálu a celkovým objemem vzduchu v dutinách, probíhá děj izotermicky, tj. $n = 1$. Při vysokých kmitočtech se akustický tlak velmi rychle mění a doba jedné periody je pro výměnu tepla příliš krátká. Zředování a stlačování vzduchu v pórech probíhá adiabaticky, tj. $n = 1,4$. V úzkém pásmu středně vysokých frekvencí je děj stlačování a zředování vzduchu polytropicky a hodnota n se pohybuje mezi 1 až 1,4.

1.6.2 Činitel zvukové pohltivosti

Schopnost materiálu nebo nějakého tělesa pohlcovat zvuk a účinnost tohoto pohlcování vyjadřuje činitel zvukové pohltivosti α , schopnost tělesa odrazet zvuk vyjadřuje *činitel zvukové odrazivosti* β . Jejich velikost se může pohybovat od 0 do 1.

Odráží-li stěna dokonale dopadající zvukovou vlnu, je $\alpha = 0$, $\beta = 1$, je-li všechna dopadající energie pohlcena, je $\alpha = 1$, $\beta = 0$. Za dobře pohltivé považujeme materiály, pro něž α je vyšší než 0,60. Jsou to materiály, jejichž vnitřní struktura je přizpůsobena jak přeměně akustické energie v teplo, tak přenosu energie ze vzduchu do pohltivého materiálu, tj. materiály, jejichž činný odpor (reálná složka měrné akustické impedance) se blíží vlnovému odporu vzduchu $\rho_0 c$. Činitel zvukové pohltivosti je závislý na frekvenci a na směru dopadu zvukové vlny. Při kolmém dopadu zvukové vlny jej označujeme α_N a měříme v interferometru metodou analýzy stojatých vln, pro všerozměrný dopad se označuje α_S (Sabinův) a měření se provádí v dozvukové komoře. Přednostně se měří a uvádí činitel pohltivosti pro střední frekvence třetinooktávových pásem v oblasti 125 Hz až 6300 Hz.

Známe-li měrnou akustickou impedanci materiálu, je možné určit α_N pro kolmý dopad zvuku přibližně výpočtem

$$\alpha_N = \frac{1}{\frac{1}{2} + \frac{1}{4} \left(\frac{r}{\rho_0 c} + \frac{\rho_0 c}{r} \right)} \quad (91)$$

r reálná složka měrné akustické impedance materiálu

$\rho_0 c = 400 \text{ Pa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$ vlnový odpor vzduchu za normálních podmínek

Je zřejmé, že $\alpha_N = 1$ pro $r = \rho_0 c$.

Pro všesměrový dopad můžeme reprezentovat dopad zvukové vlny úhlem $\nu = 45^\circ$ a přibližně počítat as podle upraveného vztahu

$$\alpha_S = \frac{1}{\frac{1}{2} + \frac{1}{4} \left(\frac{r}{\rho_0 c \sqrt{2}} + \frac{\rho_0 c \sqrt{2}}{r} \right)} \quad (92)$$

Při aplikaci pohltivých materiálů v praxi však dáváme vždy přednost změřeným výsledkům.

1.6.3 Pohltivé konstrukce

Počátek vývoje akustických konstrukcí pro pohlcování zvuku spadá do 20. století. Byl vynucen moderní architekturou používající jednoduchých tvarů a strohého pojetí interiérů. Základním materiálem bylo dřevo a tkaniny, které se používají i nyní vedle kovů a plastických hmot. Předchůdcem pohltivých konstrukcí založených na rezonančním principu byly zazděné vázy, částečně tlumené popelem nebo konopím. Používaly se již v minulém století k řešení akustiky chrámů a kostelů. Vázy různých tvarů byly nalezeny ve skandinávských kostelích postavených v minulém století. V Maďarsku ve městě Pécs byla v mešitě nalezena váza s objemem dutiny $1,5 \text{ dm}^3$, s délkou hrdla $1,6 \text{ cm}$ a s průměrem hrdla $4,2 \text{ cm}$. Její rezonanční kmitočet 243 Hz leží u dolního okraje spektra lidské řeči.

1.6.3.1 Pohltivé obklady

Použití porézních pohltivých materiálů jako obkladů je možné v praxi realizovat dvěma způsoby. V prvním případě je látka upevněna přímo na pevnou stěnu, v druhém případě se mezi stěnou a pohltivým materiálem nachází vzduchový polštář. Pohltivosti obkladu bez vzduchové mezery je nízká v oblasti nízkých kmitočtů a směrem k vyšším kmitočtům roste a dosahuje určité maximální hodnoty závislé na poréznosti použitého materiálu. To, jak látka pohlcuje zvuk v oblasti nízkých kmitočtů, závisí na její tloušťce

$$h = \frac{1}{10} \frac{c}{f_m} \quad (93)$$

h tloušťka vrstvy m

c rychlost zvuku ve vzduchu $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

přibližně vyjadřuje tloušťku vrstvy, při níž se materiál stává účinným nad kmitočtem f_m , tj. kde činitel pohltivosti α vzrůstá nad 60%. Ze vztahu (93) je zřejmé, že pohlcování nízkých kmitočtů by vyžadovalo materiály velké tloušťky. Je nevhodné klást vrstvu materiálu přímo na stěnu, neboť tam je akustická rychlost částic vzduchu nulová a na její velikosti závisí přeměna akustické energie v energii tepelnou. S rostoucí vzdáleností od stěny rychlost stoupá a maximální hodnoty dosáhne v kmitně vzdálené o čtvrtinu vlnové délky od stěny. Kmitočtová charakteristika činitele zvukové pohltivosti pak bude mít maxima pro liché násobky čtvrtiny vlnové délky rovné vzdálenosti látky v od pevné stěny. To jsou případy, kdy se látka nachází v kmitně akustické rychlosti. Popsaný účinek vzduchové vrstvy se projeví tehdy, je-li porézní obkladová deska upevněna tak, aby sama nemohla kmitat, nebo je-li porézní látka tak ohybově poddajná, že ohybové kmity nepřicházejí v úvahu.

V převážné míře mají pohltivé materiály drobný, ke znečištění a poškození náchylný povrch. Proto se překrývají ochrannou vrstvou, která však nesmí nepříznivě ovlivňovat zvukopohltivý účinek. K překrytí se používají tkaniny, sítě nebo děrované desky. Při použití děrovaných desek (plechů nebo dřevovláknitých desek) nesmí činitel děrování E , t.j. poměr velikosti plochy otvorů a celkové plochy desek překročit 20%.

1.6.3.2 Akustická tělesa

Jedná se o prostorové pohltivé konstrukce, které se zavěšují v místnosti tak, aby nepřekážely osvětlovacím systémům nebo ventilačnímu zařízení. Vyrábějí se v různých geometrických tvarech, např. kužely, hranoly, rovnoběžnostěny apod. Mají poměrně vysokou akustickou účinnost, která se zvětšuje s rostoucí vzdáleností těles. Z důvodu poměrně snadné montáže a z důvodu možnosti jejich snadného udržování a možnosti opakovaného použití se těchto pohltivých konstrukcí používá hlavně ve sportovních halách, tělocvičnách, nádražních halách apod.

1.6.3.3 Absorpční tlumiče

Další významné uplatnění pohltivých materiálů je v absorpčních tlumičích. Bývají to části potrubí většího průřezu, v nichž je pohltivý materiál uspořádán tak, aby procházející zvuková energie přišla s ním do styku na maximální možné ploše. Na množství aplikovaného materiálu a jeho pohlcujících vlastnostech závisí útlumové vlastnosti tlumiče. Útlum se vyjadřuje počtem decibelů na 1 m délky. Absorpční tlumiče se používají v potrubí a kanálech pro ventilátory, kompresory apod.

1.6.4 Snižování hluku v uzavřených prostorech

Pohltivé konstrukce v různé realizaci používáme ke snižování nadměrného hluku v obytných, společenských, průmyslových i jiných prostorech. Je třeba si však vždy uvědomit, že pohltivým obkladem snížíme akustickou energii odražených vln, kdežto pole přímých zvukových vln, je-li zdroj hluku umístěn v uzavřeném prostoru, zůstane beze změny.

Celková pohltivost prostoru A je frekvenčně závislá a je dána součtem akustického účinku všech ohraničujících ploch, tj.

$$A = \sum \alpha_i S_i \quad (94)$$

A pohltivost prostoru m^2

α_i činitel pohltivosti ohraničující plochy S_i .

Celkovou pohltivost můžeme chápat také tak, jako by všechny ohraničující plochy měly stejný činitel zvukové pohltivosti $\alpha_{stř}$. Pak je možné vyjádřit pohltivost prostoru rovnicí

$$A = \alpha_{stř} S \quad (95)$$

S celkový povrch všech ohraničujících ploch.

Experimentální údaje ukazují, že v provozech průmyslového charakteru je $\alpha_{stř} = 0,12$ až $0,20$. Pro orientační výpočty předpokládáme $\alpha_{stř} = 0,15$.

Známe-li objem prostoru V a odhadneme-li $\alpha_{stř}$, můžeme pro praktické účely přibližně určit pohltivost prostoru ve vztahu

$$A = \alpha_{stř} 6,6 V^{\frac{2}{3}} \text{ m}^2 \quad (96)$$

Přesněji lze vypočítat celkovou pohltivost prostoru pomocí Sabinova vztahu, známe-li dobu dozvuku.

Budeme-li zvyšovat činitel pohltivosti α u všech nebo alespoň u některých ohraničujících ploch, zvýšíme celkovou pohltivost prostoru. To se projeví poklesem původní hladiny akustického tlaku L_1 na hodnotu L_2 . Platí

$$\Delta L = L_1 - L_2 = 10 \log \frac{A_2}{A_1} \quad (97)$$

A_1 původní pohltivost prostoru m^2

A_2 pohltivost prostoru po úpravě m^2

Vztah (97) můžeme použít pro výpočet snížení hladiny akustického tlaku pro celý uzavřený prostor pouze v tom případě, je-li zdroj zvuku umístěn mimo tento prostor. Jeli zdroj zvuku uvnitř, pak vztah (97) platí pouze pro pole odražených vln, kdežto v poli přímých vln je zvýšení pohltivosti neúčinné. V praxi je možné dosáhnout snížení hladiny odraženého zvuku o 5 až 10 dB. Větší snížení je většinou již neefektivní, neboť pro poměrně malý přírůstek ΔL je zapotřebí velkého zvětšení pohltivosti. Obvykle je účelné upravit vhodným pohltivým materiálem 30% až 50% povrchu místnosti. [2]

2 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ

Metoda konečných prvků (též MKP) představuje moderní, vysoce efektivní numerickou metodu pro řešení technických a vědeckých úloh. V současnosti je považována za jednu z neúčinnějších přibližných metod pro řešení problémů popsaných diferenciálními rovnicemi. Metodu konečných prvků navrhl v roce 1943 Richard Courant, americký matematik německého původu. Zhruba o deset let později byla znovu objevena americkými inženýry při provádění pevnostních výpočtů leteckých konstrukcí. Systematické teoretické studium MKP (FEM) začalo až v šedesátých letech. V roce 1968 dokázal jako první konvergenci MKP brněnský profesor Miloš Zlámal (1924 – 1997).

Základní myšlenkou metody je, že se nejprve trianguluje vyšetřované těleso, tj. rozdělí se na konečný počet jednotlivých oblastí, což jsou pro rovinnou úlohu většinou trojúhelníky či čtyřúhelníky a pro prostorové úlohy čtyřstěny, pětistěny, kvádry a podobně. Poté se minimalizuje odpovídající potenciální energie na množině spojitých a po částech polynomických funkcí nad již vytvořenou triangulací. Vhodnou volbou bázových funkcí lze tuto úlohu převést na řešení soustavy lineárních (popř. nelineárních) algebraických rovnic, jejíž matice je řídká, tj. obsahuje většinou nulové prvky.

Řídkost matice snižuje nároky na paměť počítače a počet prováděných aritmetických operací. To nám již v současnosti umožňuje řešit obrovské soustavy až o miliónech rovnic a miliónech neznámých na počítačích s paralelní architekturou. Pokud je úloha nelineární, její řešení se většinou převádí na posloupnost lineárních rovnic.

Hlavní výhodou MKP je, že umožňuje dokonale aproximovat vyšetřované těleso a že celý výpočtový proces lze na počítačích zautomatizovat:

- Interpolace vstupních dat
- Generování triangulí
- Sestavení soustavy algebraických rovnic
- Vyřešení soustavy algebraických rovnic
- Vyhlazení numerického řešení
- Aposteriorní odhady chyby
- Grafické znázornění výsledků

Těchto sedm bodů je implementováno v nepřehledném množství souborů programů, které vytvářejí uživatelsky příjemné prostředí pro zadání úlohy spolu s kontrolou vstupních údajů (např. v programu SIMTEC, kterého je používáno pro výpočet úloh spojených s řešením teplotního pole).

Zjemňování sítě probíhá buď interaktivně, kdy si uživatel sám volí oblasti, kde chce získat lepší aproximaci řešení, nebo adaptivně (tj. bez zásahu člověka). V tomto druhém případě počítač sám vyhodnocuje velikost chyby na jednotlivých prvcích, které pak případně dále rozděluje. Příslušná výstupní data jsou pak ve formě izolinií, různě obarvených, stínovaných či vyšrafovaných ploch.

Metoda konečných prvků (nebo také elementů) je nejpoužívanější metodou používanou pro numerické modelování okrajových počátečních problémů jak v oblasti mechaniky, tak i pro přenosové jevy tepla. Vývoj směrem k osobním počítačům a CAD systémům ještě zvýšil význam této metody, která je dnes začleňována do CAD systémů a tvoří jeden ze základních bloků moderního počítačového navrhování.

Značná pozornost je v současnosti věnována rozvoji nového směru v metodě konečných prvků, pro který se vžil anglický termín "domain decomposition method". Při tomto postupu je těleso rozděleno na několik oblastí, které mají relativně jednoduchý geometrický tvar, využije se toho, že na oblastech takto jednoduchého tvaru lze počítat tzv. rychlé algoritmy, čímž se značně sníží počet výpočtových operací.

2.1 Deterministické modely

S ohledem na vlastnosti reálných strojních soustav je nutno při jejich počítačovém řešení používat jiné výpočetní postupy a metody při řešení nízkofrekvenčního nebo vysokofrekvenčního zvuku a tím i hluku.

Podle použitelné frekvenční oblasti a algoritmu řešení se používají dva základní modely vibroakustických systémů:

- modely deterministické
- modely statistické

Deterministické modely jsou popsány diferenciálními rovnicemi druhého řádu, jejichž maticový zápis je standardně typu

$$M\ddot{q} + B\dot{q} + Kq = f \quad (98)$$

Modely tohoto typu se vyznačují velkým počtem rovnic, což je dáno nutným použitím metody konečných prvků (MKP) pro modelování struktury strojů případně akustického prostředí. U některých soustav lze výhodně použít metodu hraničních elementů (MHE), definovaných na povrchu kmitající struktury.

Modely deterministické jsou proto velmi náročné jak na nutné softwarové tak i hardwarové vybavení řešitelského pracoviště. Řešení odezev v čase takovýchto modelů vyžaduje řešení velkého počtu diferenciálních rovnic, použití vhodných integračních metod apod. Vyžadují rozsáhlou paměť počítačů a časy pro výpočet odezev jsou neúměrně dlouhé. Řešení odezev ve frekvenční oblasti se převádí na řešení soustavy algebraických rovnic stejného počtu.

Tradiční analýza mechanických kmitů a tím i hlučnosti strojních zařízení pomocí tzv. deterministických modelů je směřována na několik nízkých rezonančních tvarů kmitů. Tyto tvary kmitů totiž vykazují největší odezvy ve výchylkách při rovněž nízkých budících frekvencích. Vzhledem na „houstnoucí spektrum“ vlastních frekvencí strojních systémů ve vyšších frekvenčních pásmech bylo však možno odezvy deterministických modelů sledovaných struktur sledovat přibližně jen do frekvencí 2500 Hz. Frekvenční odezvy s vyššími frekvencemi byly již získávány nespolehlivě a nepřesně. Řešení vyžaduje totiž jemnější frekvenční kroky, což vede samozřejmě k výraznému a nežádoucímu prodlužování výpočtových časů. Velkou výhodou deterministických modelů je naopak skutečnost, že řešitelé poskytnou konkrétní odpovědi o konkrétních frekvenčních složkách, které nejvíce přispívají do celkové hladiny hluku.

Souhrnně lze charakterizovat vlastnosti deterministických modelů:

- jsou popsány soustavou pohybových (diferenciálních) rovnic
- vyžadují vysoký počet stupňů volnosti (většinou je nutno použít MKP)
- výpočet vyšších vlastních frekvencí je zatížen chybou (např. při použití MKP)
- použitelné pro oblast nízkých frekvencí
- lze sledovat akustickou odezvu systému při dané frekvenci

II. PRAKTICKÁ ČÁST

3 CHARAKTERISTIKA VYBRANÝCH MATERIÁLŮ

V ČR existuje řada firem, které se zabývají výrobou pohltivých materiálů. Za klasické pohltivé materiály se považují minerální vlny, skleněná mikrovlákna, skleněné rohože známé např. pod názvem ITAVER, ROTAFLEX, skleněné tkaniny a polyuretany (molitan). V pohltivých konstrukcích se dále běžně používají dřevovláknité desky Sololit, Smrekolit, Akulit, dále pórovité desky Akuplat a Akubas nebo perforovaný hliníkový plech.

3.1 Výrobce - Saint-Gobain

3.1.1 Deska akustická ISOVER SSP2 (P3/V)

Deska akustická jednostranně kaširovaná černou netkanou skleněnou textilií pro pohltivé vložky do děrovaných obkladových prvků pro akustické stěny a stropy a pro tepelné a akustické izolace klimatizačních zařízení s prouděním vzduchu do $30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; teplota použití do $100 \text{ }^\circ\text{C}$.

Tab. 1 – Koeficient zvukové pohltivosti desky ISOVER SSP2 (P3/V)

tloušťka (mm)	rozměry (mm)	tepelný odpor R ($\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$)	frekvence f (Hz)					
			125	250	500	1000	2000	4000
20	1250 x 600	0,526	0,08	0,21	0,57	0,73	0,9	0,92
30	1250 x 600	0,789	0,15	0,39	0,67	0,85	1	0,97
40	1250 x 600	1,052	0,22	0,49	0,79	0,94	1	1
50	1250 x 600	1,315	0,23	0,57	0,94	1	1	1

3.1.2 Deska akustická pro sportovní haly EUROCOUSTIC ACOUSTICHO

Deska akustická tepelně-izolační nárazuvzdorná odolná vlhku z kamenné vlny potažená speciálně upravenou probarvenou tkaninou ze skleněného vlákna zpevněnou speciální skelnou mřížkou pro obklad stropů a stěn v tělocvičnách apod.; koeficient akustické pohltivosti 0,85; 0,90, objemová hmotnost $150 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, tepelný odpor $1,28 \text{ m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$, součinitel tepelné vodivosti $0,9 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ [13], [14].

3.2 Výrobce - GUMOTEX, a.s.

3.2.1 Podložka pod plovoucí podlahy IZOTAN

Zvukovo-kročejevá neprůzvučnost (17 dB) a s výborná izolace tepelná.

3.2.2 Pojená PUR pěna MOLITAN® RE

Pojena PUR pěna vzniká spojením částic PUR drtě a je dodávána ve formě bloků, desek, přířezů, tvarovek a lepených výrobků o hustotě 50 - 230 kg.m⁻³.

Zvukově izolační vlastnosti desek z materiálu MOLITAN® RE

Použití:

A) pro dvojitě příčky, těžké klasické stěny s lehkou předstěnou a stropy se zavěšeným zvukoizolačním podhledem.

Nejvhodnějším typem je MOLITAN® RE 80 a RE 100.

Tab. 2 – Index vzduchové neprůzvučnosti dvojitě sádrokartonové příčky s výplněmi

Dvojitá sádrokartonová příčka s izolační výplní	Tloušťka izolační výplně (mm)	Index vzduchové neprůzvučnosti R _w
- bez výplně	-	41
- výplň - MOLITAN® RE 80	50	46
- výplň - MOLITAN® RE 100	50	49

B) odhlučnění strojních zařízení

Nejvhodnějším typem je MOLITAN® RE 65 a RE 80 [15].

3.3 Výrobce - SONING Praha

Desky SONIT

Popis: Akustický stěnový obklad s efektním vzhledem přírodního kamene. Vyznačuje se nehořlavostí, ekologickou čistotou (neobsahuje vlákna) a velmi dobrou mechanickou, klimatickou a chemickou odolností.

Materiál: Velikostně tříděný barvený písek pojený epoxidovou kompozicí.

Další charakteristiky:

- objemová hmotnost: 1575 kg.m^{-3}
- pevnost v tlaku: 12 MPa
- hořlavost: A – nehořlavý
- klimatická odolnost: -30 až $+60^\circ\text{C}$, mrazuvzdorný (50 cyklů)
- součinitel tepelné vodivosti: $0,717 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$
- hygiena: neobsahuje minerální vlákna ani těžké kovy, je schválen pro použití ve zdravotnictví a potravinářství
- chemická odolnost: odolává zředěným roztokům louhů a kyselin, ropným produktům i chemickým rozmrazovacím prostředkům

Použití: Akustické úpravy interiérů

3.3.1 SONIT DV30, P10, SP5

Tvar: Deska s rovinnou lícovou stranou se zkosenými hranami a s dutinou na rubové straně vyplněnou tlumicí vložkou z melaminové pěny (DV30). Deska s rovinnou lícovou stranou se zkosenými hranami určená k lepení na dřevěný rošt nebo přímo na stěnu (P10). Deska s rovinnou lícovou stranou určená pro montáž do viditelných závěsných systémů (SP5).

Plošná hmotnost: 31 kg.m^{-2} (DV30), 17 kg.m^{-2} (P10), $9,5 \text{ kg.m}^{-2}$ (SP5)

Akustická funkce:

- absorpce zvuku na středních a vysokých kmitočtech
- $NRC = 0,55 - 0,70$
- $\alpha_w = 0,55 - 0,70$
- index vzduchové neprůzvučnosti: $R_w = 13 \text{ dB}$ (DV30)

3.3.2 Deska SONIT P30, PP20, PK10

Popis: Akustický stěnový obklad pro interiérové i exteriérové aplikace s efektním vzhledem přírodního kamene.

Tvar: Deska s rovinnou lícovou stranou se zkosenými hranami. Na dvou protilehlých bočních stranách je opatřena drážkou pro montáž do nosné konstrukce.

Materiál: Velikostně tříděný barvený písek pojený epoxidovou kompozicí. Pro exteriérové aplikace je lícová strana obkladu opatřena ochrannou vrstvou silikonového emailu.

Plošná hmotnost: 48 kg.m⁻² (P30), 30 kg.m⁻² (PK10), 17 kg.m⁻² (PP20)

Akustické vlastnosti:

-absorpce zvuku na středních a vysokých kmitočtech

- $NRC = 0,6 - 0,7$

- $\alpha_w = 0,55 - 0,7$

-index vzduchové neprůzvučnosti: $R_w = 13$ dB

Použití: Akustické úpravy průmyslových provozů a použití v exteriéru.

3.3.3 Protihlukový panel SONIT - SSŽ

Popis: Akustický panel SONIT – SSŽ je určen pro konstrukci protihlukových stěn, které tvoří ochrannou bariéru proti šíření hluku silniční a železniční dopravy. Sestává se z prefabrikovaného železobetonového skeletu, jehož čelní plocha je osazena zvukoabsorpčními deskami SONIT PP20 se vzduchovou mezerou 30 mm.

Tvar: Obdélníková deska se zvýšenými okraji na delších stranách, které jsou opatřeny drážkou pro instalaci 4 kusů desek SONIT.

Akustické vlastnosti:

- zvuková pohltivost: $DL_\alpha = 4,4$ dB

- vzduchová neprůzvučnost: $DL_R = 44,5$ dB

Další charakteristiky:

- klimatická odolnost: -30 až +60°C, mrazuvzdorný (50 cyklů)

3.3.4 Protihlukový panel ROADSON

Popis: Typová řada akustických panelů ROADSON je určena pro konstrukci protihlukových stěn, které tvoří ochrannou bariéru proti šíření hluku silniční a železniční dopravy. Základem panelu je univerzální ocelový rám, do kterého je vsazena cementovláknitá deska zabezpečující dostatečnou neprůzvučnost protihlukového panelu. Jednotlivé typy se liší pohledovou stranou, kterou tvoří různé typy akustických prvků SONIT a dalším vnitřním uspořádáním.

Rozměry: základní – 3995 × 1200 × 100 mm, možné i atypické dle požadavků projektanta

Hmotnost: cca 300 kg/kus dle typu

Další charakteristiky:

- klimatická odolnost: - 30 až + 60°C, mrazuvzdorný (50 cyklů)

- chemická odolnost: odolává chemickým rozmrazovacím prostředkům, zředěným roztokům louhů a kyselin i ropným produktům
- hořlavost: třída A – nehořlavý

Popis jednotlivých typů a jejich akustické vlastnosti:

1) ROADSON PP20

Do ocelového rámu je osazeno 6 ks desek SONIT PP20 o rozměrech $1200 \times 650 \times 20$ mm. Prostor mezi deskami SONIT a neprůzvučným prvkem je vyplněn hydrofobizovanou minerální plstí.

Akustické vlastnosti:

- zvuková pohltivost: $DL_{\alpha} = 6,3$ dB
- vzduchová neprůzvučnost: $DL_R > 25$ dB

2) ROADSON P30

Do ocelového rámu jsou upevněny pomocí profilů „H“ desky SONIT P30 ($300 \times 300 \times 30$ mm). Prostor mezi deskami SONIT a neprůzvučným prvkem je vyplněn hydrofobizovanou minerální plstí.

Akustické vlastnosti:

- zvuková pohltivost: $DL_{\alpha} = 6,2$ dB
- vzduchová neprůzvučnost: $DL_R > 25$ dB

3) ROADSON PPM 30

Pro dosažení maximálních hodnot absorpce bylo navržena akustická soustava, která využívá několika principů pohlcování zvuku. Lícovou stranu prvků tvoří strukturované šterbinové zvukoabsorpční prvky z materiálu SONIT. Doplnkový absorbér (hydrofobizovaná minerální plst') je překryt netkanou textilií a ochrannou mřížkou.

Akustické vlastnosti:

- zvuková pohltivost: $DL_{\alpha} = 12,9$ dB
- vzduchová neprůzvučnost: $DL_R > 25$ dB

Použití: Panely SONIT SSŽ a ROADSON jsou určeny pro konstrukci protihlukových stěn „aktivního typu“ tj. nejen neprůzvučných ve směru chráněné oblasti, ale i pohlcujících hluk na přivrácené straně k dopravnímu koridoru. Typickým příkladem použití jsou silniční a dálniční protihlukové bariéry, zvukové clony podél železničních tratí a protihlukové stěny pro obytné aglomerace.

3.3.5 Akustický materiál POLYSON

Popis: Akustický materiál s vysokými hodnotami zvukové pohltivosti (v oblasti středních a zejména vyšších frekvencích).

Tvar: Deska s čtyřbokými jehlany na lícové straně.

Rozměry: 990 × 490 × 75 mm, jehlan 70 × 70 mm, výška 50 mm

Hmotnost: 0,7 kg/ks (1,4 kg.m⁻²)

Materiál: Měkký lehčený polyuretan.

Další charakteristiky: Třída hořlavosti C2 (snížená hořlavost), hustota 30 kg.m⁻³, trvalá tepelná odolnost do 70 °C (krátkodobě do 150 °C), hygienicky nezávadný.

Použití: Akustické úpravy uzavřených prostorů – kanceláře, dílny, malá TV a zvuková studia apod.

3.3.6 Akustický pohledový systém TK-SON

Popis: Akustický prvek sloužící k širokopásmové absorpci zvuku.

Tvar: Pravoúhlá podhledová kazeta.

Rozměry: Standardní formáty 600 × 600 mm, 600 × 1200 mm a 1200 × 1200 mm. Atypické formáty až do rozměrů 1500 × 3000 mm.

Materiál: Kazeta je zhotovena z tahokovu, zvukaabsorpční vložka z pěnových nebo vláknitých materiálů.

Akustická funkce: Širokopásmová absorpce zvuku zejména v oblasti středních a vysokých kmitočtů.

Použití: Akustické úpravy prostorů s vysokými nároky na vyrovnanou dobu dozvuku např. sportovní haly, divadla a kongresové sály.

3.3.7 Kmitající panely KPS30, KPS60

Popis: Obdélníkový panel absorbující zvuk na nízkých kmitočtech. Ideální použití je např. v kombinaci se stěnovým akustickým obkladem SONIT DV30.

Rozměry: 1200 × 600 × 80 mm

Hmotnost: 16 kg/ks (35 kg.m⁻²)

Materiál: Aglomerované dřevo, MDF deska, překližka, pryž, minerální plst'.

Použití: Akustické úpravy prostorů s velkými nároky na vyrovnanou dobu dozvuku jako jsou zvuková studia a režie, poslechové místnosti, divadla, koncertní sály, atd.

3.3.8 Rezonátor PR-SON 1

Popis: Akustický prvek sloužící k selektivní absorpci nízkých kmitočtů.

Tvar: Pravoúhlý hranol, na čelní straně s laděnou podélnou šterbinou.

Rozměry: 1200 × 600 × 180 mm

Materiál: Plech, antivibrační folie, molino, minerální vlna.

3.3.9 Rezonátor DR-SON 1

Popis: Akustický prvek sloužící k selektivní absorpci nízkých kmitočtů.

Tvar: Pravoúhlý hranol, na čelní straně s laděnou podélnou šterbinou.

Rozměry: 1200 × 600 × 180 mm

Materiál: Laminovaná dřevotříska, molino, minerální vlna.

Použití: Akustické úpravy prostorů s vysokými nároky na vyrovnanou dobu dozvuku, např. zvuková studia, režie, poslechové místnosti. Určený pro skrytou i viditelnou montáž.

3.3.10 Rezonátor BF1-SON

Popis: Akustický prvek sloužící k selektivní absorpci nízkých kmitočtů.

Tvar: Pravoúhlý hranol, na čelní straně s laděnými otvory.

Rozměry: 1000 × 1000 × 200 mm

Materiál: Laminovaná dřevotříska, sololit, vatelin, minerální vlna.

Použití: Akustické úpravy prostorů s vysokými nároky na vyrovnanou dobu dozvuku např. zvuková studia, režie, poslechové místnosti. Určený pro skrytou montáž např. nad prodyšným podhledem. Ideální použití v kombinaci s podhledem SONIT SP 5.

3.3.11 Difuzor D1

Popis: Akustický prvek rozptylující zvuk na středních kmitočtech (1 - 3,5 kHz) . Doporučené použití je v kombinaci s akustickými absorpčními obklady.

Tvar: Čtvercová kazeta se štěrbinami na čelní straně.

Rozměry: 600 × 600 × 180 mm

Hmotnost: 22 kg/ks (88 kg.m⁻²)

Materiál: Aglomerované dřevo nebo Grenamat B s různou povrchovou úpravou, minerální plst'.

Použití: Akustické úpravy prostorů s velkými nároky na difuzitu zvukového pole jako jsou zvuková studia a režie, poslechové místnosti, atd.

3.3.12 ILLBRUCK PYRAMIDE, ILLBRUCK WAFFEL

Popis: Pěnový akustický materiál s tvarovaným povrchem.

Hustota: (11 ± 2) kg.m⁻³

Materiál: illtec – měkká pěnová hmota na bázi melaminové pryskyřice.

Akustická funkce: Absorpce zvuku na středních až vysokých kmitočtech.

Další charakteristiky: Třída hořlavosti B1 (obtížně vznětlivý). Bez umělých a přírodních minerálních vláken, halogenů a halogenidů vodíku. Klimatická odolnost –60 až +150 °C. Nižší mechanická odolnost. Certifikát Státní zkušebny v Praze.

Použití: Akustické úpravy uzavřených prostorů – kanceláře, bezprašné dílny, malá TV a zvuková studia apod.

3.3.13 ILLBRUCK ABSORBER WETROOM

Popis: Závěsný prvek ve tvaru desky. Splňuje hygienické požadavky v potravinářském a farmaceutickém průmyslu. Je odolný vůči bakteriím a neobsahuje minerální vlákna.

Tvar: Opláštěná deska, na jedné straně opatřena závěsnými oky.

Rozměry: 1200 × 600 × 50 mm.

Hustota: (11 ± 2) kg.m⁻³

Barvy a povrchová úprava: Bílá, deska uzavřená v PVF fólii.

Materiál: illtec, opláštěný pevnou nehořlavou fólií.

Použití: Velmi vhodné především pro sportovní zařízení (bazény, zimní stadiony, sportovní haly), dále pivovary nebo prostory plnění lahví.

3.3.14 ILLBRUCK ACOUSTIC PANEL

Popis: Zvukově pohltivý prvek ve tvaru desky.

Rozměry:

a) Dle přání, max. 1250 × 2500 mm, tloušťka 20 – 50 mm

b) v provedení „absorber“ ke svislému pověšení na strop 1250 × 625 × 50 mm

Hustota: (11 ± 2) kg.m⁻³

Materiál: illtec, v provedení „Acoustic panel“ jednostranně se strukturovanou tkaninou, u provedení „Whiteline“ s oboustranně kaširovanou tkaninou.

Akustické vlastnosti: Absorpce zvuku na středních a vysokých kmitočtech (a dále dle typu instalace).

Další charakteristiky: Třída hořlavosti B1 (obtížně vznětlivý). Bez umělých a přírodních minerálních vláken, halogenů a halogenidů vodíku, odolný proti bakteriím, vodotěsný, snadné čištění. Certifikát Státní zkušebny v Praze.

3.3.15 ILLBRUCK SQUARELINE

Popis: Čtvercová kazeta z tahokovu (pozink) s integrovanou vysoce účinnou absorpční vložkou z materiálu illtec FM.

Rozměry: 600 × 600 × 6 mm, 625 × 625 × 6 mm

Akustické vlastnosti: Mimořádné útlumové vlastnosti v širokém frekvenčním spektru.

Další charakteristiky: Splňuje všechny požadavky hygienické, požární i zdravotní. Certifikát Státní zkušebny v Praze.

Použití: Pro řešení akustických a estetických požadavků pro interiéry kanceláří, společenských prostor, bank, obchodních a kulturních center, apod.

3.3.16 AKURAL

Popis: Zvukoabsorpční opláštěná deska, na jedné straně opatřena závěsnými oky.

Materiál: Deska z minerální plsti Orsil UNI uzavřená v obalu z mikrotenové folie a vložená do textilního potahu z bavlněné tkaniny s keprovou vazbou a nehořlavou úpravou Proban.

Základní rozměry: 1000 × 500 × 50 mm

Hmotnost: 2,2 kg/kus, (40 kg.m⁻³)

Akustické vlastnosti:

- absorpce zvuku v širokém kmitočtovém pásmu
- kmitočtový průběh činitele zvukové pohltivosti závisí na uspořádání prvků

Další charakteristiky:

- hořlavost: B – nesehnadno hořlavý
- klimatická odolnost: interiér, teplota prostoru +5 až +40°C
- emise: nevydává škodlivé pachové emise (hygienická nezávadnost)

Použití: Umožňuje vysoce efektivní způsob řešení akustických poměrů v průmyslových a sportovních interiérech (např. tělocvičny, krytá sportoviště).

3.3.17 SONIRAL

Popis:

Akustický závěsný systém s minimální hmotností.

Materiál: Obdélníkové desky z oboustranně kaširované skelné vaty (typ A) nebo melaminové pěny (typ B) zatavené v PVC folii se sníženou hořlavostí. Obal je na delší straně opatřen pevným páskem z nehořlavého vysokotlakého laminátu (HPL) s kovovými oky pro zavěšení.

Rozměry: 1000 × 500 × 50 mm

Hmotnost: typ A: cca 1,00 kg/kus, typ B: cca 0,45 kg/kus

Akustické vlastnosti:

- absorpce zvuku na středních kmitočtech
- $NRC = 0,45$; $\alpha_w = 0,40$ - platí pro vzdálenost prvků 500 mm
- hodnoty činitele zvukové pohltivosti lze ovlivnit hustotou a uspořádáním prvků

Použití: Akustické úpravy průmyslových provozů a sportovních zařízení (zimní stadiony, plavecké bazény). Aplikace závěsného systému přináší výrazné snížení hladiny hluku, zlepšení srozumitelnosti mluveného slova a vytvoření optimálních poslechových podmínek [16].

3.4 Výrobce – Eurofoam TP spol. s r.o.

3.4.1 Akustické dekorativní panely – BASOTECT

Akustické dekorativní panely z melaminové pěny. Jsou určeny pro snížení doby dozvuku v místnostech. Basotect byl testován podle ČSN 730862 - C2 - středně hořlavý, ČSN 730865 - nescapává ani hořící neodpadává.

Absorpční pěna BASOTECT® se vyrábí ve třech základních tvarech, jimiž jsou: povrch hladký, pyramidy, nopky (obr.10) [17].

Tab. 3 – Koefficient zvukové pohltivosti pěn BASOTECT

Objednací čís- to	Rozměry v mm	α					
		125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
S 000-030	1230x615x30	0,12	0,31	0,66	0,86	0,87	0,92
S 000-040	1230x615x40	0,12	0,44	0,87	0,96	0,97	0,97
S 000-050	1230x615x50	0,16	0,56	0,96	1,00	1,00	1,00
S 000-080	1230x615x80	0,31	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
S 020-070	1000x1000x70	0,14	0,41	0,77	0,95	0,92	0,98
S 020-100	1000x1000x100	0,14	0,54	0,95	1,00	1,00	1,00
S 080-020	1230x615x20	0,06	0,25	0,63	0,91	0,90	0,93
S 080-030	1230x615x30	0,10	0,42	0,84	1,00	0,99	0,95
S 080-040	1230x615x40	0,13	0,56	0,96	1,00	0,99	1,00



Obr.10 – Druhy pěny BASOTECT

3.5 Výrobce - BS-Group, s.r.o.

3.5.1 Tvárnice BS - AKUSTIK

Tvárnice zvukově absorpční dvoukomorová s přední vstupní štěrbinou do každé komory pro venkovní a vnitřní protihlukové stěny a přízdívky, v kombinaci se stropními trámcí BSK pro stropy; rozměry v mm: d 398, š 200, v 190, štěrbinu š 10, 15, 20, hmotnost 16,5 kg, pevnost v tlaku 3,5 MPa, vzduchová neprůzvučnost 40 až 43 dB, materiál: mezerovitý vibrolisovaný beton, pohltivost lze zvýšit vložkou z minerální vaty [18].

3.6 Výrobce - Rigips, s.r.o.

3.6.1 Deska RIGIDUR

Deska sádrovláknitá univerzální pro vnitřní suchou výstavbu s vysokými nároky na pevnost, pro protipožární a akustické obklady, suché podlahy atd.; varianty: desky maloformátové, velkoformátové, podlahové, impregnované, rozměry v mm: š 1000 až 1249, d 1500 až 3000, tl. 10 až 15, hmotnost 12 až 18 kg.m⁻², požární odolnost 30 až 90 min, vzduchová neprůzvučnost konstrukcí až 65 dB.

3.6.2 Děrované desky Rigiton, BIG Quattro, Gyptone, Caso

Stupeň hořlavosti dle ČSN 730862: A - nehořlavé

Děrované desky Rigiton je možno montovat v prostorách s max. vzdušnou vlhkostí 70 %.

Děrované desky Rigiton 8/18, 10/23, 15/30, 12-20/66, 8-1 5-20 a 8-1 5-20 super jsou na rubové straně opatřeny akusticky účinnou textilií (vliesem). Ve frekvencích lidského hlasu nabízejí desky opatřené vliesem dobré zvukopohltivé vlastnosti, které jsou závislé na typu děrování a použití případné další izolační vrstvy [19].

3.7 Výrobce - AC plus

3.7.1 S O U N D B L O X

Popis: Akustické betonové rezonanční bloky s vysokou pohltivostí zvuku v oblasti nízkých frekvencí.

Použití: Tento zdící materiál lze použít všude tam, kde je požadováno snížení hluku především v oblasti nízkých frekvencí. Velice vhodné jsou v místnostech pro kompresory, dieselaagregáty, ve výrobních halách, ale i ve studiích, kinech, stělnicích a ve venkovním prostoru jako protihlukové zdi např. u silnic a dálnic [20].

Rozměry: délka 500 mm x šířka 200 mm x výška 220 /±5/ mm

TYP A - s vložkou z minerální vlny

TYP B - bez vložky z minerální vlny

Tab. 4 – Činitel zvukové pohltivosti bloků *SOUNDBLOX*

f/Hz/	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300
TYP A	0,7	0,61	0,92	1,28	0,93	0,89	0,67	0,64	0,7	0,84	0,81	0,67	0,55	0,5	0,48	0,54	0,52	0,48	0,52
TYP B	0,19	0,18	0,37	0,63	0,7	0,58	0,3	0,26	0,2	0,2	0,4	0,6	0,44	0,41	0,51	0,5	0,44	0,32	0,33

3.8 Výrobce - CIUR a.s.

3.8.1 Tepelná a akustická izolace CLIMATIZER PLUS

Materiál: vlna z celulóзовých vláken z recyklovaného papíru impregnovaná boraxem a kyselinou boritou. Funkce výrobku: tepelná a zvuková izolace **Vhodné:** pro novostavby i rekonstrukce do teplot max. 105 °C. **Zakázané:** nesmí přijít do přímého styku s louhy a kyselinami [21].

Tab. 5 – Koeficient zvukové pohltivosti izolace
CLIMATIZER PLUS

kmitočet (Hz)	ti. izol. 50 mm	ti. izol. 100
250	0,45	0,67
500	0,71	0,87
2000	0,57	0,83

4 PŘÍPRAVA A ROZMĚRY VZORKŮ PRO MĚŘENÍ

Experimentální část byla zaměřena na vybraných pět materiálů:

A. Stropní tenká EPS deska 6-7 mm (s estetickým reliéfem, na 70% plochy 6 mm, na 30% 7 mm).

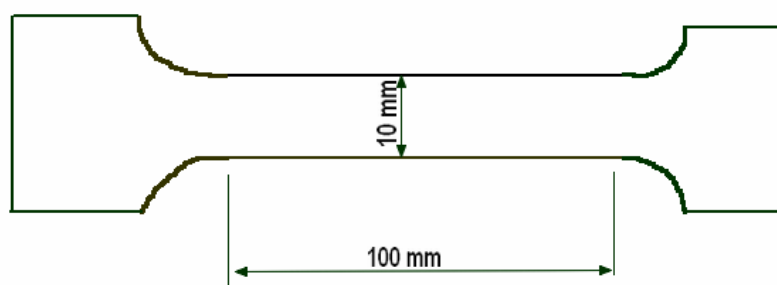
B. Zateplovací tlustá EPS deska 28 mm (jmenovitá tloušťka 30 mm).

C. Tepelná izolace z minerální vlny Rotaflex super TP03040 tloušťka 10-50 mm (jmenovitá tl. 40 mm, tepelná vodivost $\lambda=0,04 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$).

D. Koberec ze 100% PP s nízkým chlupem LIMEX ČR, s.r.o., typ STEREO (rozměry na průřezu: z 50% tloušťka cca 2 mm, z 50% tloušťka cca 3 mm; protože je materiál anizotropní pro vyhodnocení mechanických vlastností byly v použity vzorky D1 podél vlákna a D2 napříč vláknem).

E. Papírová tapeta s PVC povrchem Bohemia Vavex – VELATI vzor č.1881804 tloušťka cca 0,13 mm s jemným vytlačěným profilem cca 0,05mm.

Bylo připraveno pět vzorků kruhového tvaru každého materiálu o průměru cca 100 mm pro vyhodnocení akustických vlastností a pět vzorků každého materiálu ve tvaru lopatky (obr.11) pro vyhodnocení mechanických vlastností.



Obr.11 – Vzhled lopatkového vzorku pro vyhodnocení mechanických vlastností

4.1 Rozměry vzorků

Tab. 6 - Rozměry pro stanovení koeficientu zvukové pohltivosti

Materiál	Průměr (mm)	Tloušťka (mm)	Hmotnost (g)	Hustota (kg.m⁻³)
EPS 6-7mm	99,58 ± 0,12	6,67 ± 0,06	0,868 ± 0,015	16,7 ± 0,4
EPS 30mm	98,9 ± 0,2	27,82 ± 0,12	2,64 ± 0,02	12,36 ± 0,06
Minerální vlna	99,3 ± 0,4	45,7 ± 0,4	3,6 ± 0,3	10,2 ± 0,6
Koberec ze 100% PP	99,5 ± 0,2	2,98 ± 0,11	13,0 ± 0,2	561 ± 9
Papírová tapeta s PVC povrchem	100,2 ± 0,3	0,1419 ± 0,0013	0,972 ± 0,003	872 ± 4

Tab. 7 - Rozměry vzorků pro stanovení modulu pružnosti v tahu

Materiál	Šířka (mm)	Tloušťka (mm)	Průřez (mm²)
EPS 6-7mm	9,75 ± 0,08	6,67 ± 0,06	65,0 ± 1,7
EPS 30mm	8,62 ± 0,19	27,82 ± 0,12	239 ± 8
Minerální vlna	70,2 ± 0,2	53,6 ± 0,8	3752 ± 69
Koberec ze 100% PP podél vlákna	9,54 ± 0,11	2,80 ± 0,04	26,7 ± 0,3
Koberec ze 100% PP napříč vláknem	9,48 ± 0,12	2,98 ± 0,11	28,3 ± 0,9
Papírová tapeta s PVC povrchem	10,66 ± 0,12	0,1419 ± 0,0013	1,51 ± 0,02

5 MĚŘENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ VYBRANÝCH MATERIÁLŮ

K vytvoření simulací dopadu akustického tlaku na rovinnou desku v simulačním prostředí SAMCEF software bylo nutné stanovit Youngův modul pružnosti v tahu, Poissonovo číslo a hustotu každého vzorku a tyto hodnoty zadat do databáze materiálů SAMCEF software.

5.1 Zařízení pro měření mechanických vlastností

Měření bylo provedeno na trhacím stroji Tiratest 2160 (obr.12). Vzorky byly lopatkového tvaru o rozměrech viz. tab.7. Byla nastavena upínací délka $L = 100$ mm, rychlost trhu 20 mm/min.



Obr.12 - Trhací stroj TIRATEST 2160

Výstupem měření bylo prodloužení ΔL v okamžiku přetržení vzorku při působení maximální tahové síly F při které došlo k tomuto přetržení. Z těchto veličin je možné vyhodnotit tahové napětí a poměrné prodloužení, nutné pro výpočet Youngova modulu pružnosti v tahu a Poissonova čísla.

Tahové napětí lze určit pomocí vztahu

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (99)$$

a poměrné prodloužení v okamžiku přetržení vzorku ze vztahu

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta L}{100} \quad (100)$$

Youngův modul pružnosti vypočteme ze vztahu

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (101)$$

a Poissonovo číslo

$$\mu = \frac{\Delta d / d_0}{\Delta L / L_0} \quad (102)$$

kde Δd je zúžení průřezu v okamžiku přetržení vzorku vůči původnímu průřezu d_0 .

5.2 Vyhodnocení měření mechanických vlastností

Hodnoty požadovaných veličin získané mechanickou zkouškou (tab.8).

Tab. 8 – Výsledky měření mechanických vlastností materiálů

Materiál	F (N)	σ (MPa)	ΔL (mm)	ε (-)	E (MPa)	μ (-)
EPS 6-7mm	13	0,200	1,74	0,0174	11,5	0,33
EPS 30mm	23	0,094	2,9	0,029	3,23	0,33
Minerální vlna	26	0,0069	10,2	0,102	0,076	0,25
Koberec ze 100% PP podél vlákna	63,4	2,38	31,2	0,312	7,7	0,35
Koberec ze 100% PP napříč vláknem	30,4	1,08	90	0,90	1,21	0,34
Papírová tapeta s PVC povrchem	37,2	24,6	1,36	0,0136	1832	0,31

6 SIMULACE NAMÁHÁNÍ A DEFORMACE MATERIÁLU

6.1 Modální analýza rovinné desky v prostředí SAMCEF

Modální analýzu deskové konstrukce jsme provedli v simulačním prostředí SAMCEF software pomocí metody konečných prvků. Postup a výsledky analýzy jsou uvedeny níže.

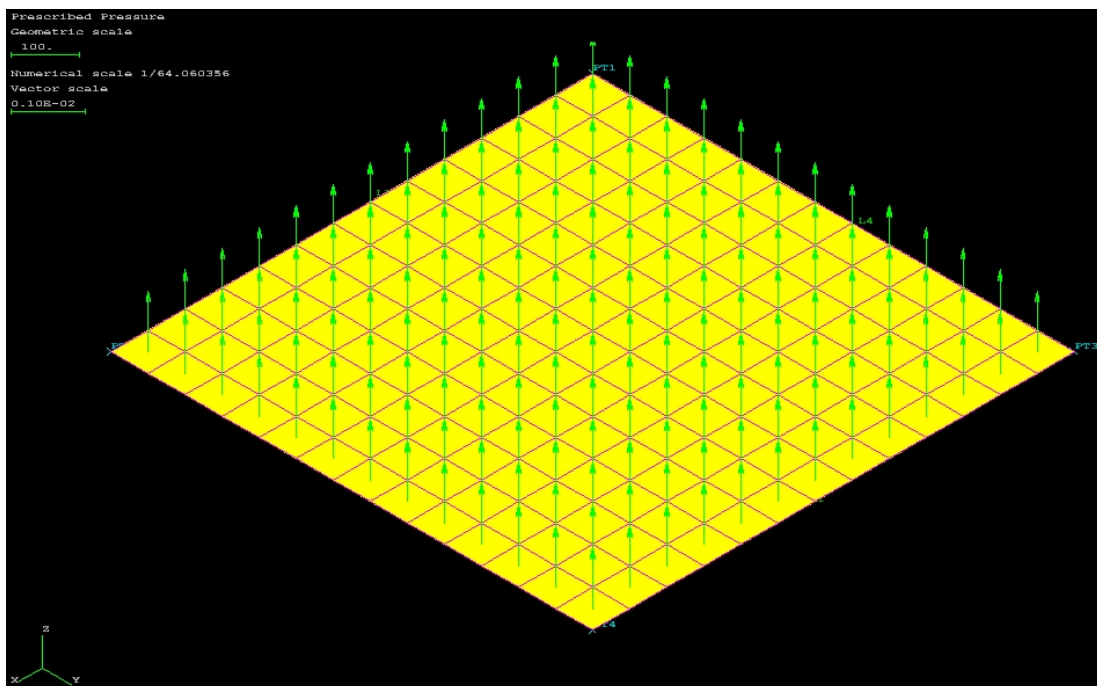
6.1.1 Postup simulace v prostředí SAMCEF

- | | |
|-------------------------------------|-----------------------------|
| 1. Spuštění SAMCEF | (Spuštění prostředí SAMCEF) |
| 2. Add Module – Bacon | (Volba modulu) |
| 3. Run | (Spuštění modulu) |
| 4. V příkazovém okně zadání.menu on | (Spuštění menu) |
| 5. Pre-processing | |
| a. 2D-geometry | (Definice 2D model) |
| i. Point | (Definice bodů) |
| 1. Create | |
| 2. Rect. Coordinates | |
| 3. 0 0,0 1000, 1000 1000, 1000 0 | (Souřadnice bodů) |
| ii. Straight Line 2d | (Čárové spojení bodů) |
| 1. Create ... | |
| 2. Points | |
| 3. Označení bodů | |
| b. Structure | (Definice struktury) |
| i. Pre-mesher | |
| 1. Line | |
| a. Countour | (Definice kontury) |
| Create | |
| Auto | |
| OK | |
| 2. 3lines/surfaces | (definice povrchu) |
| a. Domain | |
| Create | |
| Auto | |
| Accept | |
| ii. Mesher | (Mešování plochy) |
| 1. Mesh | |
| a. Free | |
| b. Klik na linu | |
| iii. Post-mesh | |
| 1. Merge | |
| a. Mergin elements | |
| Execution | |
| 2. Edit Mesh | |
| a. Check | |
| Check | |
| iv. Element type | (Definování elementu) |

-
1. Default
 - a. Beams+Shells+Volumes
 - c. Structure F (Definice fyzikální struktury)
 - i. Material (Definice materiálu)
 1. Load Mat (Definice materiálu)
 - a. std
 - b. Apply
 2. Apply
 - a. On All Ele
 - b. Mat 1 Steel
 - d. Mechanical properties (Definice mechanických vlast.)
 - i. Physical properties
 1. Thickness
 - a. create
 - b. 10
 - c. Attributes
 - d. 1
 - e. Loads and BC (Definice zatížení a uložení)
 - i. Fixations
 1. Node, All, Line
 - a. Create
 - b. Klik na linu
 - c. Accept
 2. Nodal loading
 - a. Prescribed Displacement
 - b. 3, 0.001, Nodes
 - c. Create
 - d. Vyber uzlu
 - e. Accept
 6. File (Vlastní výpočet)
 - a. Export computation (Vlastní výpočet)
 - i. Analysis (Interaktivní a asertivní analýza)
 - b. Asef, Interactive
 - i. Execute
 - ii. Edit listing – kontrola chyby
 7. Post –processing (Přístup k výsledkům)
 - a. Access to results... (Přístup k výsledkům)
 - i. Asef
 - ii. Get results
 1. Drawing+lists (Vykreslení posunutí a deformací)
 - iii. Load
 - iv. selection
 - v. Nodal displacements
 - vi. Display displacement
 - vii. Disable, X comp

6.1.2 Výsledky simulace dopadu akustického tlaku na rovinnou desku

Na (obr.13) je znázorněno zatížení rovinné desky akustickým tlakem 1kPa ve směru osy z v simulačním prostředí SAMCEF software, kdy deska byla uchycena po celém svém obvodu.

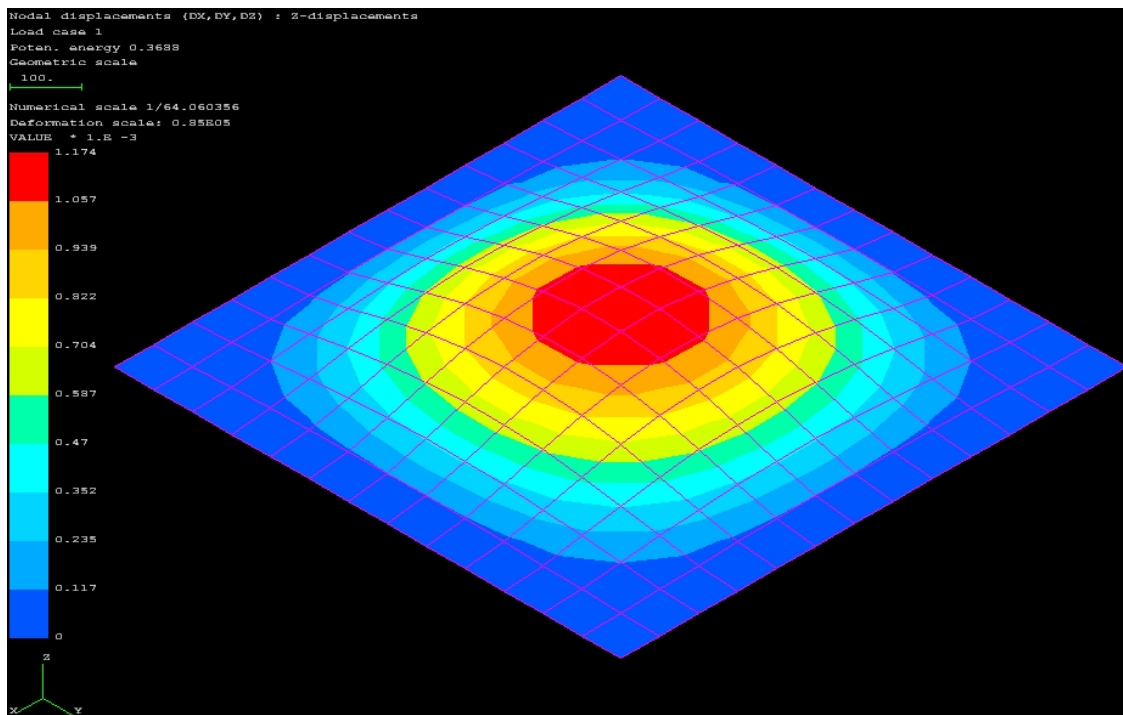


Obr.13 – Zatížení a uchycení rovinné desky

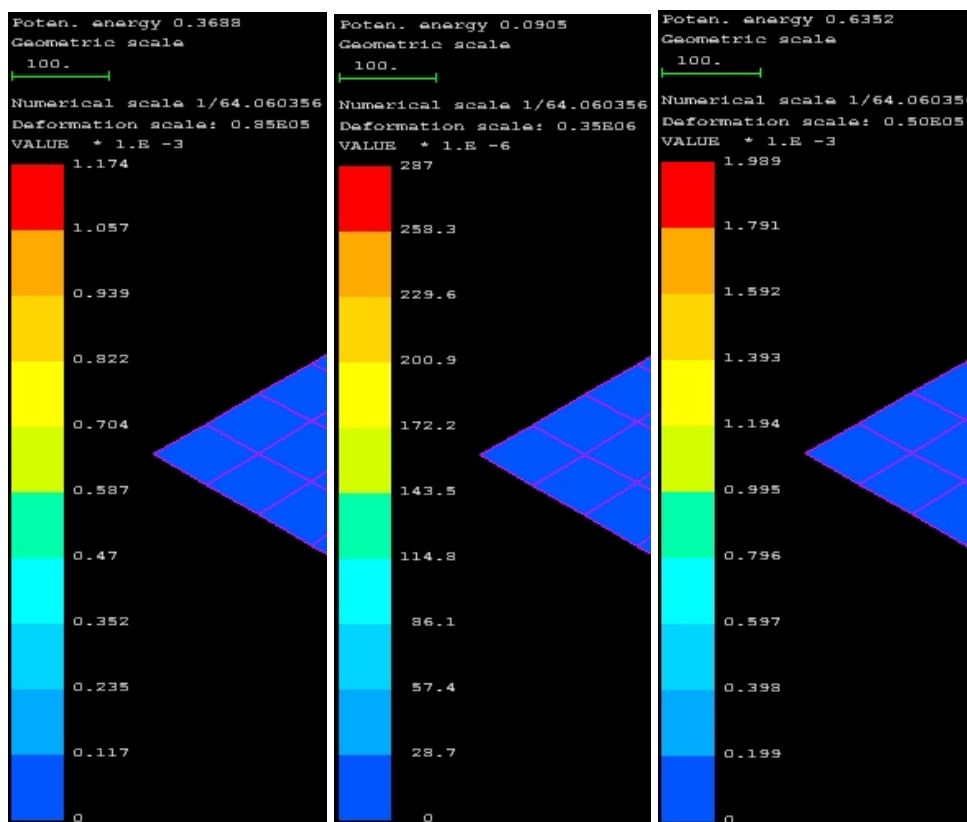
Pro názornost je dále zobrazena nasimulovaná deformace desky tloušťky 6-7 mm z extrudovaného polystyrenu (obr.14). Hodnota maximálního průhybu tohoto materiálu je $d_z = 1,173 \mu\text{m}$.

Na dalších obrázcích (obr.15) a (obr.16) jsou uvedeny stupnice s hodnotami průhybu rovinných desek vybraných materiálů při stejném zatížení a stejném uchycení.

Z těchto výsledků lze konstatovat, že nejvyšší hodnotu průhybu $d_z = 406,2 \mu\text{m}$ vykazuje materiál D2 – PP koberec s orientací napříč vláken. Nejnižší hodnoty průhybu $d_z = 0,287 \mu\text{m}$ dosáhl materiál B – extrudovaný polystyren o tloušťce 30 mm.



Obr.14 - Průhyb desky EPS 6-7mm

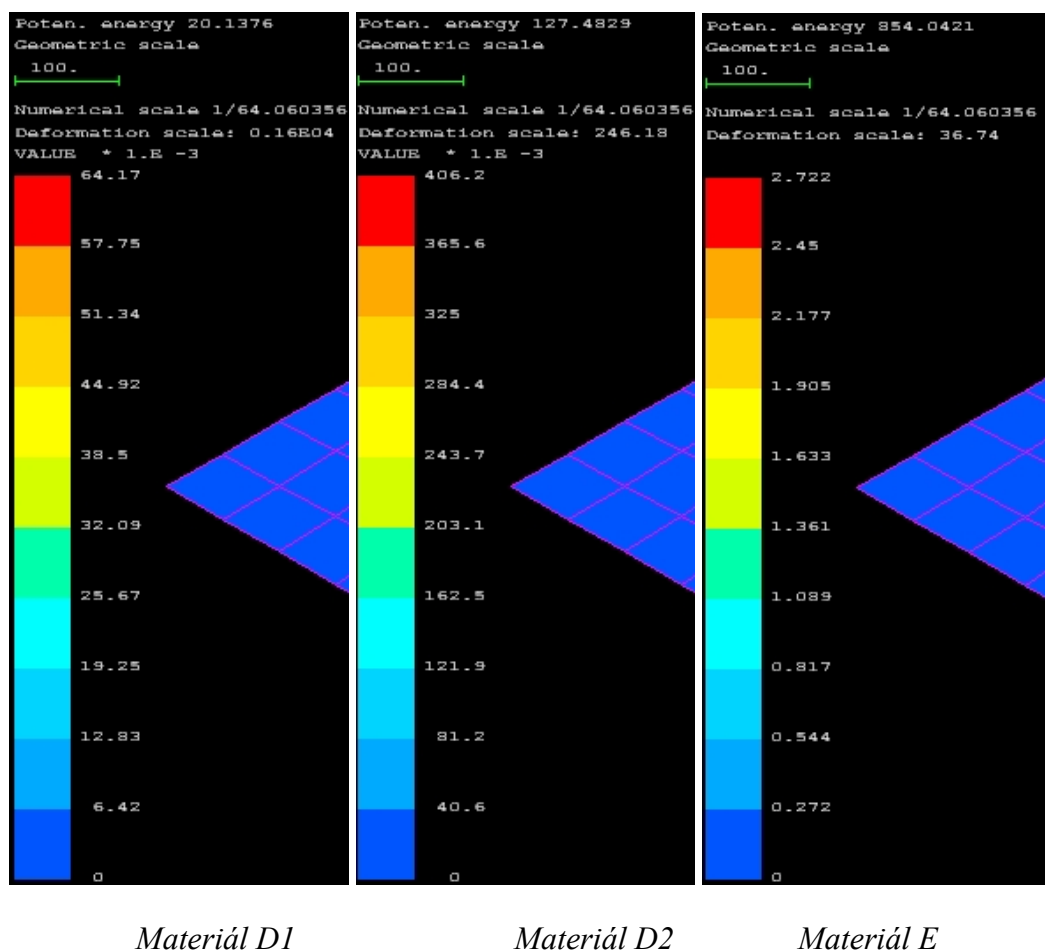


Materiál A

Materiál B

Materiál C

Obr.15 – Nasimulovaný průhyb rovinných desek - materiály A, B, C



Obr.16 - Nasimulovaný průhyb rovinných desek - materiály D1, D2, E

Výsledky simulací dopadu akustického tlaku o velikosti 1 kPa na rovinnou desku tvořenou vybranými materiály (tab.9).

Tab. 9 – Výsledky simulací dopadu akustického tlaku na rovinnou desku

Materiál	Průhyb (μm)
EPS 6-7mm	1,174
EPS 30mm	$287 \cdot 10^{-3}$
Minerální vlna	1,989
Koberec ze 100% PP podél vlákna	64,17
Koberec ze 100% PP napříč vláknem	406,2
Papírová tapeta s PVC povrchem	2,722

7 MĚŘENÍ AKUSTICKÝCH VLASTNOSTÍ VYBRANÝCH MATERIÁLŮ

7.1 Zařízení pro měření akustických vlastností

Měření koeficientu zvukové pohltivosti byla provedena na dvoumikrofonové impedanční trubici Brüel & Kjaer typ 4206 (obr.17), která je používána ke zjišťování koeficientu zvukové pohltivosti, koeficientu zvukové odrazivosti pro malé vzorky. Pro měření byla použita trubice o průměru 100 mm umožňující měření ve frekvenčním rozsahu od 50 Hz do 1.6 kHz. Pro samotnou analýzu byl využit dvoukanálový signální analyzátor Brüel & Kjaer typ 2034 a aplikační software BZ5050 zabezpečující jednoduchou obsluhu prostřednictvím PC.



Obr.17 - Dvoumikrofonová impedanční trubice Brüel & Kjaer typ 4206

7.1.1 Návod na obsluhu Brüel & Kjaer trubice s obslužným programem BZ 5050 (pro trubici 100 mm)

- Na počítači vejít do složky: E:\BZ 5050
- Spustit program: VELKATR.BAT
- V programu spustit: SET-UP
- V SET-UP zvolit: LARGE TUBE STANDART
- V programu spustit: F3 – CALIBRATION
- Na trubici vložit mikrofon A do otvoru 3, mikrofon B do otvoru 2
- Do trubice vložit standardní kalibrační vzorek
- V SET-UP zvolit: LINEAR, Na trubici přepnout přepínač na: LINEAR
- V SET-UP zvolit: POCET PRUMERU 50
- V programu spustit: F4 - měření
- Na trubici vložit mikrofon A do otvoru 2, mikrofon B do otvoru 3
- V programu spustit: F4 - měření
- V programu uložit kalibraci
- Do trubice vložit vzorek
- V programu spustit: F4 - měření (v rozsahu 16-1600Hz)
- V programu uložit měření
- V programu spustit: PRINT
- V PRINT zvolit: SELECTED BUFFERS
- V SELECTED BUFFERS zvolit:měření, které chceme uložit
- V SELECTED BUFFERS změnit výstup na ASCII
- vytisknout jako ASCII FILE (měření se uloží na HDD PC v souboru typu *.prn zpracovatelném dále v MS Excel)

7.2 Vyhodnocení měření koeficientu zvukové pohltivosti

Naměřené závislosti koeficientu zvukové pohltivosti na frekvenci jsou zobrazeny v přílohách (PI až PV), grafické znázornění těchto závislostí pak v přílohách (PVII až PXI) a porovnání koeficientu zvukové pohltivosti ve frekvenčním rozmezí 50 – 1600 Hz vybraných materiálů v příloze (PXII).

Na základě těchto závislostí lze konstatovat, že nejvyšších hodnot koeficientu zvukové pohltivosti $\alpha = 0,65$ při frekvenci $f = 1600$ Hz dosahuje materiál minerální vlna. Extrudovaný extrudovaný polystyren tloušťky 30 mm při stejné frekvenci vykazuje hodnotu koeficientu zvukové pohltivosti $\alpha = 0,47$ a extrudovaný polystyren tloušťky 6-7 mm $\alpha = 0,11$.

Materiály PP koberec ($\alpha = 0,085$) a papírová tapeta ($\alpha = 0,034$) mají ze všech měřených materiálů nejnižší hodnoty koeficientu zvukové pohltivosti při frekvenci $f = 1600$ Hz.

Z měření lze konstatovat, že z použitých materiálů je materiálem s nejlepšími akustickými vlastnostmi minerální vlna, kdy koeficient zvukové pohltivosti nabýval při středních a vyšších frekvencích větších hodnot než u ostatních měřených materiálů. Nejhorší akustické vlastnosti vykazovaly materiály PP koberec a papírová tapeta s PVC povrchem, což je zřejmě způsobeno plastovým povrchem obou materiálů.

7.3 Srovnání nasimulovaných výsledků s experimentálním měřením

V (tab.9) je znázorněno srovnání mezi nasimulovaným průhybem rovinné desky každého materiálu a koeficientem zvukové pohltivosti tohoto materiálu při frekvenci $f = 1600$ Hz. Tato frekvence byla vybrána pro srovnání, protože při této frekvenci dosahoval koeficient zvukové pohltivosti každého materiálu své maximální hodnoty.

Ze srovnání je patrné, že materiály, které dosahovaly vyšších hodnot koeficientu zvukové pohltivosti mají nízkou hodnotu průhybu a nízkou hustotu.

Mezi tyto materiály podle získaných výsledků patří minerální vlna a extrudovaný polystyren. Naopak materiály s vysokou hodnotou průhybu, vysokou hustotou a zároveň se špatnými tlumícími vlastnostmi jsou PP koberec a papírová tapeta s PVC povrchem.

Tab. 10 – Srovnání experimentálně zjištěných a nasimulovaných dat

Materiál	Průhyb (μm)	α_{1600} (-)	Hustota ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
EPS 6-7mm	1,174	0,11	16,7
EPS 30mm	0,287	0,47	12,36
Minerální vlna	1,989	0,65	10,2
Koberec ze 100% PP podél vlákna	64,17	0,085	561
Koberec ze 100% PP napříč vláknem	406,2	0,085	561
Papírová tapeta s PVC povrchem	2,722	0,034	872

ZÁVĚR

Tato práce se zabývá studiem akustických vlastností vybraných materiálů s využitím numerických metod, konkrétně MKP.

V teoretické části byla zpracována problematika zvuku a akustického pole, problematika šířením zvuku ve uzavřeném prostoru, akustickými prostředky snižování hluku, akustickými vlastnostmi pohltivých materiálů a jejich aplikací v praxi a metodou konečných prvků.

V praktické části jsou zpracovány současné poznatky o vybraných výrobcích pro akustické aplikace se zaměřením na složení, rozměry a konkrétní aplikace výrobku.

V druhé části byly experimentálně stanoveny hodnoty Youngova modulu pružnosti v tahu a Poissonovo číslo vybraných materiálů a tyto hodnoty byly použity pro vytvoření simulací dopadu akustického tlaku na rovinnou desku v SAMCEF software. Byly získány hodnoty maximálního průhybu každé z desek.

Dále byly naměřeny hodnoty koeficientu zvukové pohltivosti při frekvenci 50 – 1600 Hz pro výše uvedené materiály. Jako materiál s nejlepšími akustickými vlastnostmi byla vyhodnocena minerální vlna.

V závěru práce jsou srovnány experimentálně stanovené akustické veličiny každého z materiálů a simulované výsledky získané pomocí SAMCEF software.

Ze srovnání je patrné, že materiály, které dosahovaly vyšších hodnot koeficientu zvukové pohltivosti mají nízkou hodnotu průhybu a nízkou hustotu.

Mezi tyto materiály podle získaných výsledků patří minerální vlna a extrudovaný polystyren. Naopak materiály s vysokou hodnotou průhybu, vysokou hustotou a zároveň se špatnými tlumícími vlastnostmi jsou PP koberec a papírová tapeta s PVC povrchem.

Všechny získané výsledky ovlivňuje také procentuální zastoupení vzduchu v materiálu a pórovitost každého z měřených materiálů.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Vaňková, M. a kol.: „*Hluk, vibrace a ionizující záření v životním a pracovním prostředí část I*“, PC-DIR spol. s r.o. - Nakladatelství, Brno (1995), 1. vydání (ISBN 80 - 214 - 0695 – X).
- [2] Vaňková, M. a kol.: „*Hluk, vibrace a ionizující záření v životním a pracovním prostředí část II*“, VUT v Brně (1996), 1. vydání (ISBN 80-214-1262-3).
- [3] Mišun V.: „*Vibrace a hluk*“, FS VUT v Brně (1998), 1. vydání (ISBN 80-214-1262-3).
- [4] Nový R.: „*Hluk a chvění*“, Učební texty vysokých škol. ČVUT Praha (2000), 1 - 389. 2. vydání (ISBN 80-01-02246-3).
- [5] Petyt, M.: „*Introduction to finite element vibration analysis*“, Cambridge University Press (1998).
- [6] Weaver, W., Johnston, P., R.: „*Finite Elements for Structural Analysis*“, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey (1984).
- [7] Segerlind, J., L.: „*Applied Finite Analysis*“, John Wiley, New York (1984).
- [8] Bathe, K., J.: „*Finite Element Procedures in Engineering Analysis*“, Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey (1982, 1996).
- [9] Reddy, J., N.: „*An Introduction to the Finite Element Method*“, John Willey, New York (1984, 2005).
- [10] Alton Everest: „*Master Handbook of Acoustics*“, McGraw-Hill Companies, Inc., USA (2001), 4. vydání (ISBN 0-07-136097-2).
- [11] *eStav.cz* , „webový katalog výrobců a dodavatelů stavebních a izolačních materiálů“, [cit. 2007-05-15] , [on-line], Dostupný z WWW: <<http://www.estav.cz>>
- [12] *Akustika Praha s.r.o.* , „měření, studie, projekty, dodávky akustických a protihlukových řešení“, [cit. 2007-05-15] , [on-line], Dostupný z WWW: <<http://www.akustika.cz>>
- [13] *Saint-Gobain Orsil, s.r.o.* , „výrobce izolací“, [cit. 2007-05-15] , [on-line], Dostupný z WWW: <<http://www.orsil.com/cz/index.aspx>>

-
- [14] *Saint-Gobain (UK)* , „výrobce izolací“, [cit. 2007-05-15] , [on-line],
Dostupný z WWW: <http://www.eurocoustic.com/UK/>
- [15] *GUMOTEX, a.s.* , „výrobce izolací“, [cit. 2007-05-15] , [on-line], Do-
stupný z WWW: <http://gumotex.trade.cz/>
- [16] *SONING Praha – centrum akustických služeb, a.s.* , „Měření, projektování, do-
dávku a akustických materiálů“, [cit. 2007-05-15] , [on-line], Dostupný z WWW:
<http://www.soning.cz>
- [17] *Eurofoam TP spol. s r.o.* , „výrobce izolací“, [cit. 2007-05-15] , [on-line], Do-
stupný z WWW: http://www.eurofoam-tp.cz/akustika_2.php
- [18] *BS-Group, s.r.o.* , „výrobce izolací“, [cit. 2007-05-15] , [on-line], Do-
stupný z WWW: <http://www.betonstavby.cz/index.php>
- [19] *Rigips, s.r.o.* , „výrobce izolací“, [cit. 2007-05-15] , [on-line], Dostupný z WWW:
<http://www.rigips.cz/pages/customerService/literature/srcData/s4.pdf>
- [20] *AC plus* , „výrobce izolací“, [cit. 2007-05-15] , [on-line], Dostupný z WWW:
<http://www.acplus.cz>
- [21] *CIUR a.s.* , „výrobce izolací“, [cit. 2007-05-15] , [on-line], Dostupný z WWW:
<http://www.ciur.cz>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

A_n	Celková pohltivost prostoru (Sab)
c	Fázová rychlost zvuku (m/s)
d_z	Průhyb v ose z (μm)
E	Energie (J)
E	Youngův modul pružnosti (Pa)
EPS	Extrudovaný polystyren
f	Frekvence (Hz)
FEM	Finite elements method
G	Modul pružnosti ve smyku (Pa)
h	Tloušťka (m)
J	Moment setrvačnosti (m^4)
L_p	Hladina akustického tlaku (dB)
L_W	Hladina akustického výkonu (dB)
P	Akustický výkon (W)
PP	Polypropylén
Q	Činitel směrovosti (-)
r	Měrný akustický odpor ($\text{Pa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$)
R	Odpor proti proudění vzduchu ($\text{Pa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-3}$)
R	Stupeň vzduchové neprůzvučnosti (-)
S	Plocha (m^2)
T	Absolutní teplota (K)
T	Perioda (s)
v	Rychlost (m/s)
V	Objem (m^3)

x	Měrná akustická reaktance ($\text{Pa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$)
Y	Poréznost (-)
Z_s	Měrná akustická impedance materiálu ($\text{Pa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$)
α	Činitel zvukové pohltivosti (-)
β	Činitel zvukové odrazivosti (-)
κ	Poissonova konstanta
λ	Vlnová délka (m)
μ	Poissonovo číslo
ρ	Hustota ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
τ	Činitel zvukové průzvučnosti (-)
φ	Fázové posunutí (rad)

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr.1 – Kulové vlnoplochy	12
Obr.2 – Rovinné vlnoplochy.....	12
Obr.3 – Válcové vlnoplochy	13
Obr.4 – Model kvádrové místnosti	19
Obr.5 - Interval mezi kmitočty	22
Obr.6 - Stojaté vlnění uvnitř místnosti	24
Obr.7 - Průchod zvuku stěnou	32
Obr.8 - Různé způsoby šíření zvuku do sousedního prostoru.	36
Obr.9 - Dělení materiálů a konstrukcí pro absorpci zvuku.....	40
Obr.10 – Druhy pěny BASOTECT.....	66
Obr.11 – Vzhled lopatkového vzorku pro vyhodnocení mechanických vlastností	69
Obr.12 - Trhací stroj TIRATEST 2160	71
Obr.13 – Zatížení a uchycení rovinné desky	75
Obr.14 - Průhyb desky EPS 6-7mm.....	76
Obr.15 – Nasimulovaný průhyb rovinných desek - materiály A, B, C.....	76
Obr.16 - Nasimulovaný průhyb rovinných desek - materiály D1, D2, E	77
Obr.17 - Dvoumikrofonová impedanční trubice Brüel & Kjaer typ 4206.....	78

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 – Koeficient zvukové pohltivosti desky ISOVER SSP2 (P3/V)	56
Tab. 2 – Index vzduchové neprůzvučnosti dvojité sádrokartonové příčky s výplněmi.....	57
Tab. 3 – Koeficient zvukové pohltivosti pěn BASOTECT	66
Tab. 4 – Činitel zvukové pohltivosti bloků SOUNDBLOX.....	68
Tab. 5 – Koeficient zvukové pohltivosti izolace CLIMATIZER PLUS	68
Tab. 6 - Rozměry pro stanovení koeficientu zvukové pohltivosti.....	70
Tab. 7 - Rozměry vzorků pro stanovení modulu pružnosti v tahu	70
Tab. 8 – Výsledky měření mechanických vlastností materiálů	72
Tab. 9 – Výsledky simulací dopadu akustického tlaku na rovinnou desku.....	77
Tab. 10 – Srovnání experimentálně zjištěných a nasimulovaných dat.....	81

SEZNAM PŘÍLOH

- P I: Závislost koeficientu zvukové pohltivosti na frekvenci - materiál extrudovaný polystyren tloušťky 6-7 mm
- P II: Závislost koeficientu zvukové pohltivosti na frekvenci - materiál extrudovaný polystyren tloušťky 30 mm
- P III: Závislost koeficientu zvukové pohltivosti na frekvenci - materiál minerální vlna
- P IV: Závislost koeficientu zvukové pohltivosti na frekvenci - materiál koberec ze 100% PP
- P V: Závislost koeficientu zvukové pohltivosti na frekvenci - materiál papírová tapeta s PVC povrchem
- P VI: Mechanické vlastnosti vybraných materiálů
- P VII: Grafická závislost koeficientu zvukové pohltivosti na frekvenci - materiál extrudovaný polystyren tloušťky 6-7 mm
- P VIII: Grafická závislost koeficientu zvukové pohltivosti na frekvenci - materiál extrudovaný polystyren tloušťky 30 mm
- P IX: Grafická závislost koeficientu zvukové pohltivosti na frekvenci - materiál minerální vlna
- P X: Grafická závislost koeficientu zvukové pohltivosti na frekvenci - materiál koberec ze 100% PP
- P XI: Grafická závislost koeficientu zvukové pohltivosti na frekvenci - materiál papírová tapeta s PVC povrchem
- P XII: Porovnání hodnot koeficientů zvukové pohltivosti pro frekvenční rozpětí 50 - 1600 Hz vybraných materiálů

**Příloha P I: Závislost koeficientu zvukové pohltivosti na frekvenci –
materiál extrudovaný polystyren tloušťky 6-7 mm**

Frekvence	Činitel zvukové pohltivosti vzorku A1	Činitel zvukové pohltivosti vzorku A2	Činitel zvukové pohltivosti vzorku A3	Činitel zvukové pohltivosti vzorku A4	Činitel zvukové pohltivosti vzorku A5	Průměrné α materiá- lu A	střední kvadr. chyba
f (Hz)	$\alpha_{A1} ()$	$\alpha_{A2} ()$	$\alpha_{A3} ()$	$\alpha_{A4} ()$	$\alpha_{A5} ()$	$\bar{\alpha}_A ()$	σ_x
16	0,015	0,326	0,365	0,829	0,522	0,41	0,13
20	0,242	0,490	0,401	0,038	0,040	0,24	0,09
25	0,133	0,215	0,050	0,133	0,133	0,13	0,03
31,5	0,228	0,114	0,059	0,030	0,108	0,11	0,03
40	0,041	0,041	0,041	0,041	0,041	0,04	0,00
50	0,018	0,103	0,046	0,018	0,027	0,042	0,016
63	0,024	0,023	0,012	0,020	0,040	0,024	0,005
80	0,018	0,011	0,031	0,016	0,032	0,022	0,004
100	0,012	0,005	0,014	0,005	0,012	0,0096	0,0019
125	0,003	0,005	0,002	0,009	0,006	0,0050	0,0012
160	0,007	0,004	0,006	0,006	0,009	0,0064	0,0008
200	0,008	0,009	0,011	0,007	0,010	0,0090	0,0007
250	0,009	0,010	0,011	0,009	0,014	0,0106	0,0009
315	0,013	0,012	0,013	0,013	0,017	0,0136	0,0009
400	0,016	0,015	0,016	0,015	0,020	0,0164	0,0009
500	0,020	0,020	0,019	0,019	0,025	0,0206	0,0011
630	0,018	0,018	0,018	0,017	0,021	0,0184	0,0007
800	0,021	0,021	0,021	0,020	0,024	0,0214	0,0007
1000	0,033	0,030	0,033	0,035	0,035	0,0332	0,0009
1250	0,103	0,074	0,067	0,085	0,076	0,081	0,006
1600	0,114	0,220	0,052	0,052	0,135	0,11	0,03

**Příloha P II: Závislost koeficientu zvukové pohltivosti na frekvenci –
materiál extrudovaný polystyren tloušťky 30 mm**

Frekvence	Činitel zvukové pohltivosti vzorku B1	Činitel zvukové pohltivosti vzorku B2	Činitel zvukové pohltivosti vzorku B3	Činitel zvukové pohltivosti vzorku B4	Činitel zvukové pohltivosti vzorku B5	Průměrné α materiá- lu B	střední kvadr. chyba
f (Hz)	$\alpha_{B1} ()$	$\alpha_{B2} ()$	$\alpha_{B3} ()$	$\alpha_{B4} ()$	$\alpha_{B5} ()$	$\bar{\alpha}_B ()$	σ_x
16	0,231	0,474	0,547	0,374	0,745	0,47	0,09
20	0,356	0,114	0,356	0,542	0,411	0,36	0,07
25	0,103	0,166	0,166	0,228	0,166	0,166	0,020
31,5	0,107	0,235	0,125	0,007	0,060	0,11	0,04
40	0,020	0,029	0,025	0,025	0,026	0,025	0,0014
50	0,008	0,014	0,014	0,030	0,004	0,014	0,004
63	0,003	0,023	0,037	0,003	0,000	0,013	0,007
80	0,038	0,025	0,021	0,005	0,015	0,021	0,005
100	0,013	0,011	0,014	0,009	0,010	0,011	0,0009
125	0,012	0,013	0,013	0,009	0,008	0,011	0,0010
160	0,017	0,019	0,017	0,023	0,018	0,019	0,0011
200	0,031	0,028	0,024	0,030	0,025	0,028	0,0014
250	0,043	0,043	0,025	0,037	0,036	0,037	0,003
315	0,055	0,056	0,026	0,044	0,049	0,046	0,005
400	0,057	0,065	0,027	0,044	0,055	0,050	0,007
500	0,051	0,062	0,031	0,043	0,052	0,048	0,005
630	0,041	0,050	0,033	0,039	0,042	0,041	0,003
800	0,042	0,050	0,051	0,049	0,044	0,047	0,0018
1000	0,062	0,071	0,086	0,086	0,065	0,074	0,005
1250	0,140	0,187	0,170	0,251	0,172	0,184	0,018
1600	0,414	0,507	0,394	0,514	0,503	0,47	0,03

**Příloha P III: Závislost koeficientu zvukové pohltivosti na frekvenci –
materiál minerální vlna**

Frekvence	Činitel zvukové pohltivosti vzorku C1	Činitel zvukové pohltivosti vzorku C2	Činitel zvukové pohltivosti vzorku C3	Činitel zvukové pohltivosti vzorku C4	Činitel zvukové pohltivosti vzorku C5	Průměrné α (bez C3) materiálu C	střední kvadr. chyba
f (Hz)	$\alpha_{C1} ()$	$\alpha_{C2} ()$	$\alpha_{C3} ()$	$\alpha_{C4} ()$	$\alpha_{C5} ()$	$\bar{\alpha}_C ()$	σ_x
16	0,392	0,534	0,154	0,496	0,394	0,45	0,07
20	0,344	0,418	0,091	0,361	0,054	0,29	0,08
25	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,00	0,00
31,5	0,027	0,026	0,205	0,121	0,095	0,07	0,03
40	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,00	0,00
50	0,013	0,008	0,009	0,013	0,021	0,014	0,002
63	0,019	0,038	0,018	0,037	0,009	0,026	0,006
80	0,027	0,035	0,039	0,031	0,028	0,030	0,002
100	0,033	0,047	0,040	0,046	0,038	0,041	0,003
125	0,043	0,054	0,051	0,045	0,046	0,047	0,002
160	0,058	0,072	0,074	0,065	0,067	0,066	0,003
200	0,081	0,091	0,107	0,086	0,088	0,087	0,004
250	0,106	0,118	0,144	0,115	0,115	0,114	0,006
315	0,135	0,151	0,191	0,146	0,148	0,145	0,010
400	0,178	0,195	0,251	0,189	0,191	0,188	0,013
500	0,224	0,243	0,326	0,235	0,239	0,235	0,018
630	0,281	0,307	0,417	0,295	0,299	0,30	0,02
800	0,353	0,387	0,519	0,371	0,376	0,37	0,03
1000	0,441	0,479	0,636	0,459	0,467	0,46	0,04
1250	0,544	0,585	0,754	0,562	0,571	0,57	0,04
1600	0,629	0,662	0,831	0,642	0,651	0,65	0,04

**Příloha P IV: Závislost koeficientu zvukové pohltivosti na frekvenci –
materiál koberec ze 100% PP**

Frekvence	Činitel zvukové pohltivosti vzorku D1	Činitel zvukové pohltivosti vzorku D2	Činitel zvukové pohltivosti vzorku D3	Činitel zvukové pohltivosti vzorku D4	Činitel zvukové pohltivosti vzorku D5	Průměrné α materiá- lu D	střední kvadr. chyba
f (Hz)	α_{D1} ()	α_{D2} ()	α_{D3} ()	α_{D4} ()	α_{D5} ()	$\bar{\alpha}_D$ ()	σ_x
16	0,604	0,383	0,712	0,676	0,588	0,59	0,06
20	0,399	0,094	0,229	0,348	0,073	0,23	0,07
25	0,037	0,037	0,037	0,037	0,037	0,037	0,000
31,5	0,145	0,109	0,129	0,097	0,166	0,129	0,012
40	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,00	0,00
50	0,005	0,012	0,017	0,018	0,032	0,017	0,004
63	0,018	0,028	0,017	0,036	0,047	0,029	0,006
80	0,019	0,002	0,033	0,005	0,019	0,016	0,006
100	0,006	0,007	0,012	0,015	0,007	0,0094	0,0017
125	0,006	0,004	0,008	0,012	0,004	0,0068	0,0015
160	0,009	0,016	0,013	0,012	0,009	0,0118	0,0013
200	0,016	0,021	0,016	0,017	0,017	0,0174	0,0009
250	0,017	0,022	0,020	0,023	0,018	0,0200	0,0011
315	0,023	0,025	0,024	0,025	0,022	0,0238	0,0006
400	0,027	0,030	0,029	0,031	0,026	0,0286	0,0009
500	0,035	0,036	0,036	0,037	0,032	0,0352	0,0009
630	0,037	0,037	0,037	0,039	0,032	0,0364	0,0012
800	0,045	0,044	0,044	0,045	0,039	0,0434	0,0011
1000	0,056	0,051	0,053	0,053	0,046	0,0518	0,0017
1250	0,078	0,069	0,071	0,071	0,062	0,070	0,003
1600	0,097	0,081	0,086	0,086	0,073	0,085	0,004

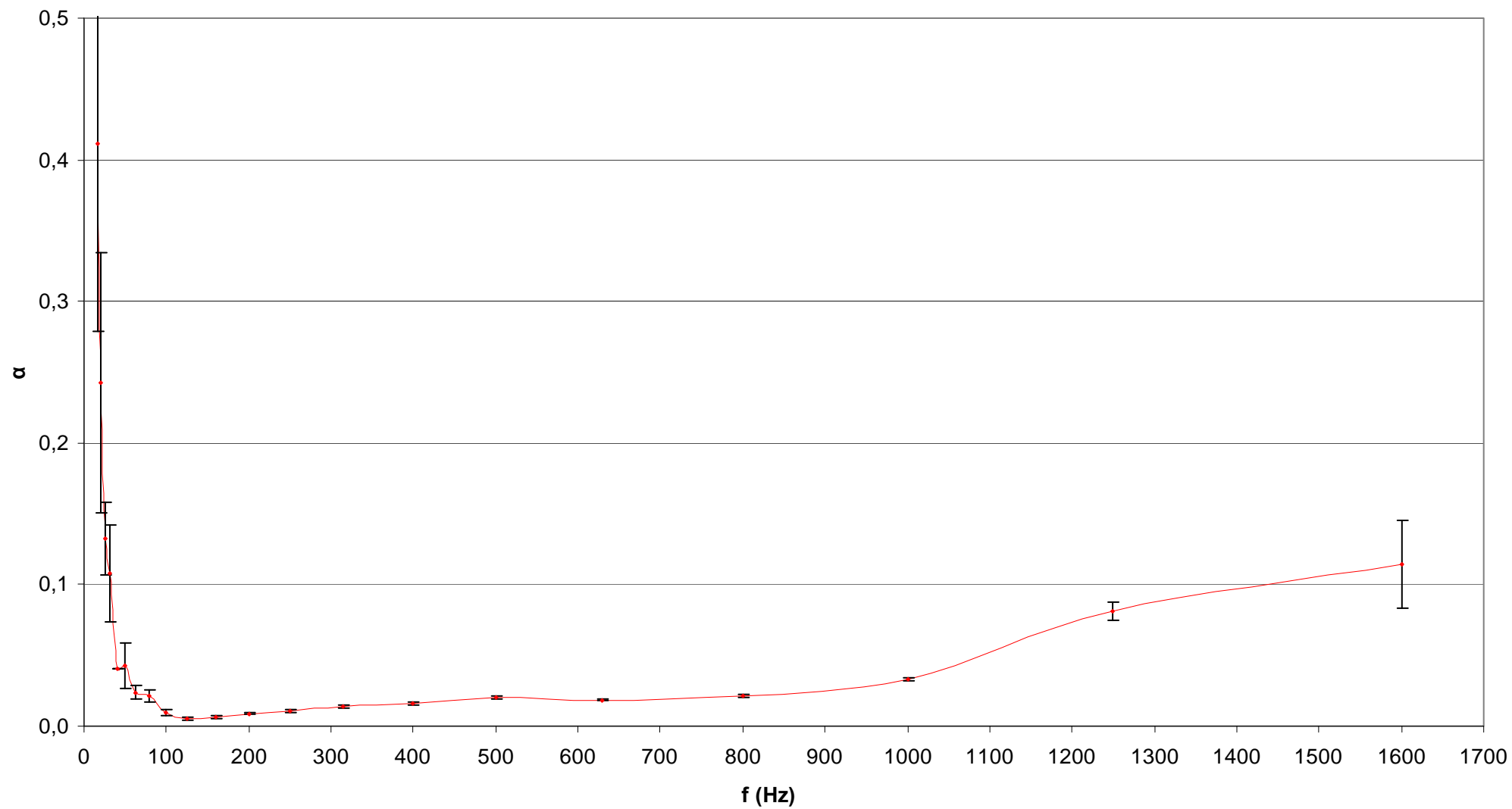
**Příloha P V: Závislost koeficientu zvukové pohltivosti na frekvenci –
materiál papírová tapeta s PVC povrchem**

Frekvence	Činitel zvukové pohltivosti vzorku E1	Činitel zvukové pohltivosti vzorku E2	Činitel zvukové pohltivosti vzorku E3	Činitel zvukové pohltivosti vzorku E4	Činitel zvukové pohltivosti vzorku E5	Průměrné α materiá- lu E	střední kvadr. chyba
f (Hz)	α_{E1} ()	α_{E2} ()	α_{E3} ()	α_{E4} ()	α_{E5} ()	$\bar{\alpha}_E$ ()	σ_x
16	0,159	0,284	0,287	0,588	0,492	0,36	0,08
20	0,316	0,364	0,192	0,426	0,240	0,31	0,04
25	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,00	0,00
31,5	0,058	0,100	0,001	0,073	0,058	0,058	0,016
40	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,000
50	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,000
63	0,031	0,015	0,028	0,023	0,036	0,027	0,004
80	0,020	0,008	0,032	0,028	0,018	0,021	0,004
100	0,009	0,006	0,003	0,013	0,014	0,009	0,002
125	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,000
160	0,004	0,006	0,002	0,005	0,006	0,0046	0,0007
200	0,010	0,008	0,007	0,008	0,009	0,0084	0,0005
250	0,008	0,009	0,009	0,009	0,011	0,0092	0,0005
315	0,012	0,010	0,010	0,010	0,011	0,0106	0,0004
400	0,014	0,014	0,014	0,014	0,013	0,0138	0,0002
500	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017	0,000
630	0,015	0,014	0,015	0,013	0,014	0,0142	0,0004
800	0,016	0,016	0,015	0,015	0,015	0,0154	0,0002
1000	0,020	0,019	0,019	0,017	0,017	0,0184	0,0006
1250	0,030	0,029	0,029	0,029	0,028	0,0290	0,0003
1600	0,034	0,034	0,035	0,035	0,032	0,0340	0,0005

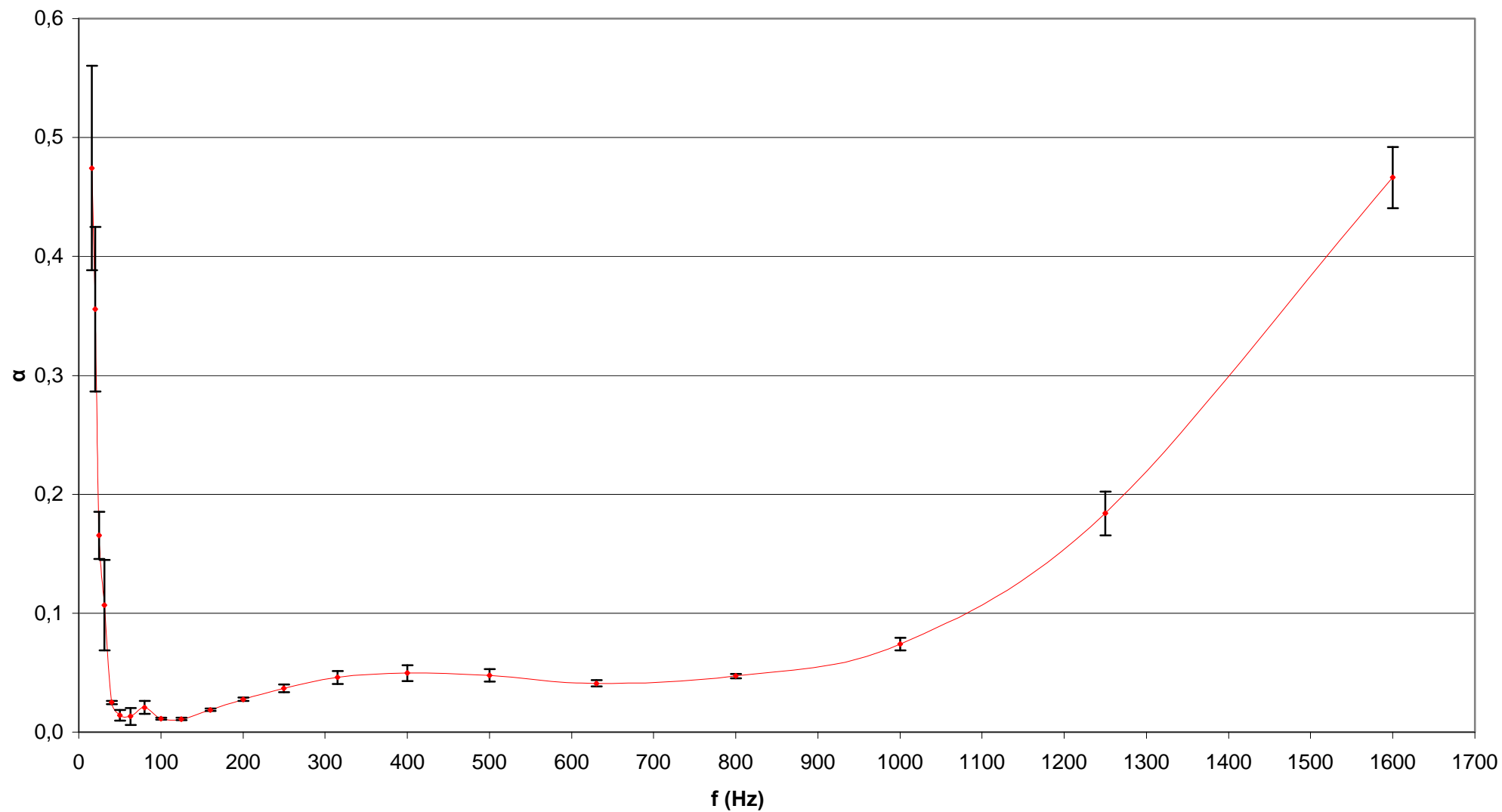
Příloha P VI: Mechanické vlastnosti vybraných materiálů

Materiál	F (N)	σ (MPa)	ΔL (mm)	ε (-)	E (MPa)	μ (-)
EPS 6-7mm	13,1 ± 0,2	0,200 ± 0,005	1,74 ± 0,02	0,0174 ± 0,0002	11,5 ± 0,4	0,33
EPS 30mm	23,0 ± 1,9	0,094 ± 0,006	2,9 ± 0,2	0,029 ± 0,002	3,23 ± 0,16	0,33
Minerální vlna	26,0 ± 1,9	0,0069 ± 0,0005	10,2 ± 1,3	0,102 ± 0,013	0,076 ± 0,018	0,25
Koberec ze 100% PP podél vlákna	63,4 ± 1,6	2,38 ± 0,07	31,2 ± 1,3	0,312 ± 0,013	7,7 ± 0,2	0,35
Koberec ze 100% PP napříč vláknem	30,4 ± 0,7	1,08 ± 0,03	90 ± 5	0,90 ± 0,05	1,21 ± 0,10	0,34
Papírová tapeta s PVC povrchem	37,2 ± 1,0	24,6 ± 0,8	1,36 ± 0,09	0,0136 ± 0,0009	1832 ± 80	0,31

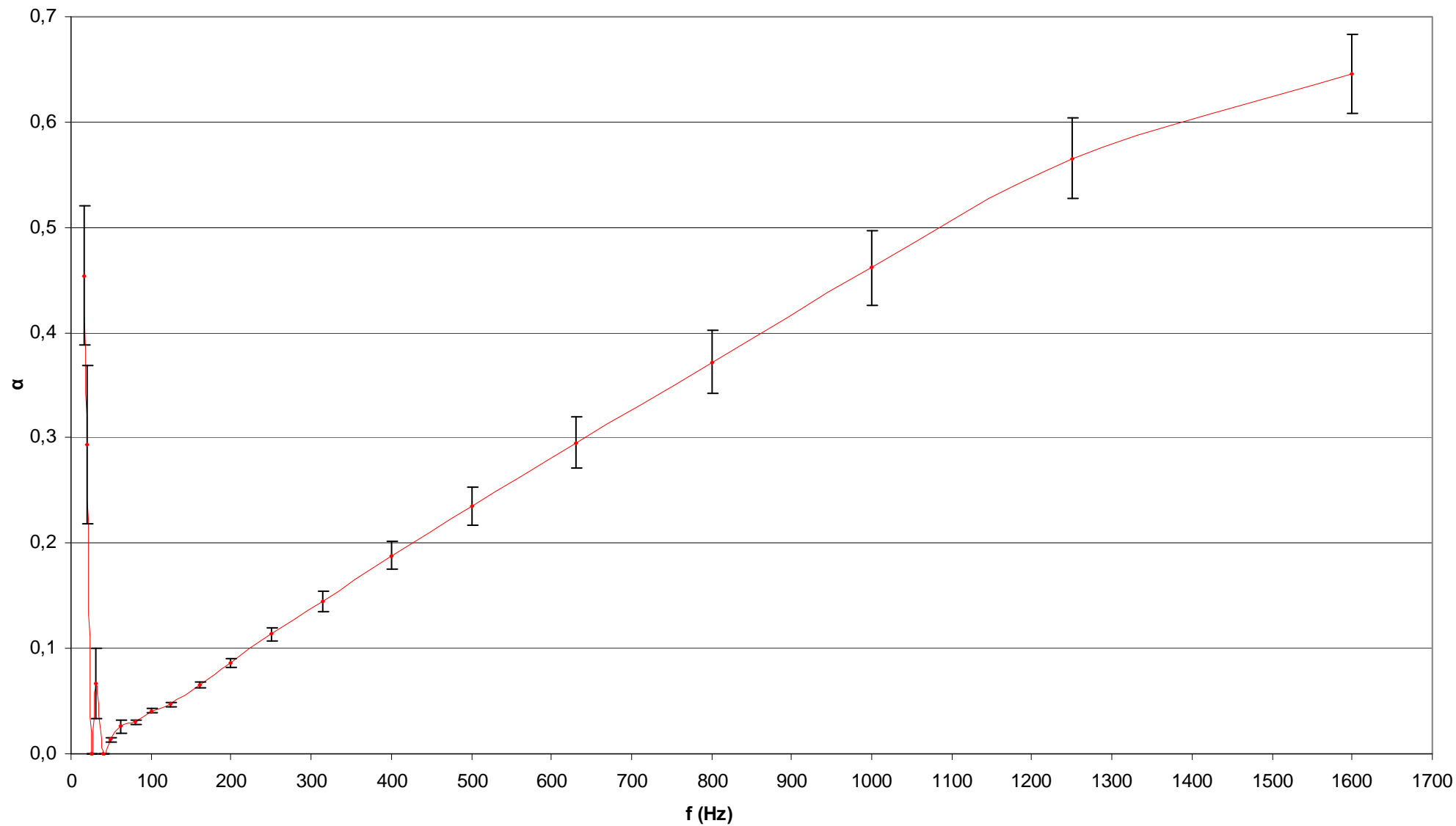
**Příloha P VII: Grafická závislost koeficientu zvukové pohltivosti na frekvenci – materiál extrudovaný polystyren
tloušťky 6-7 mm**



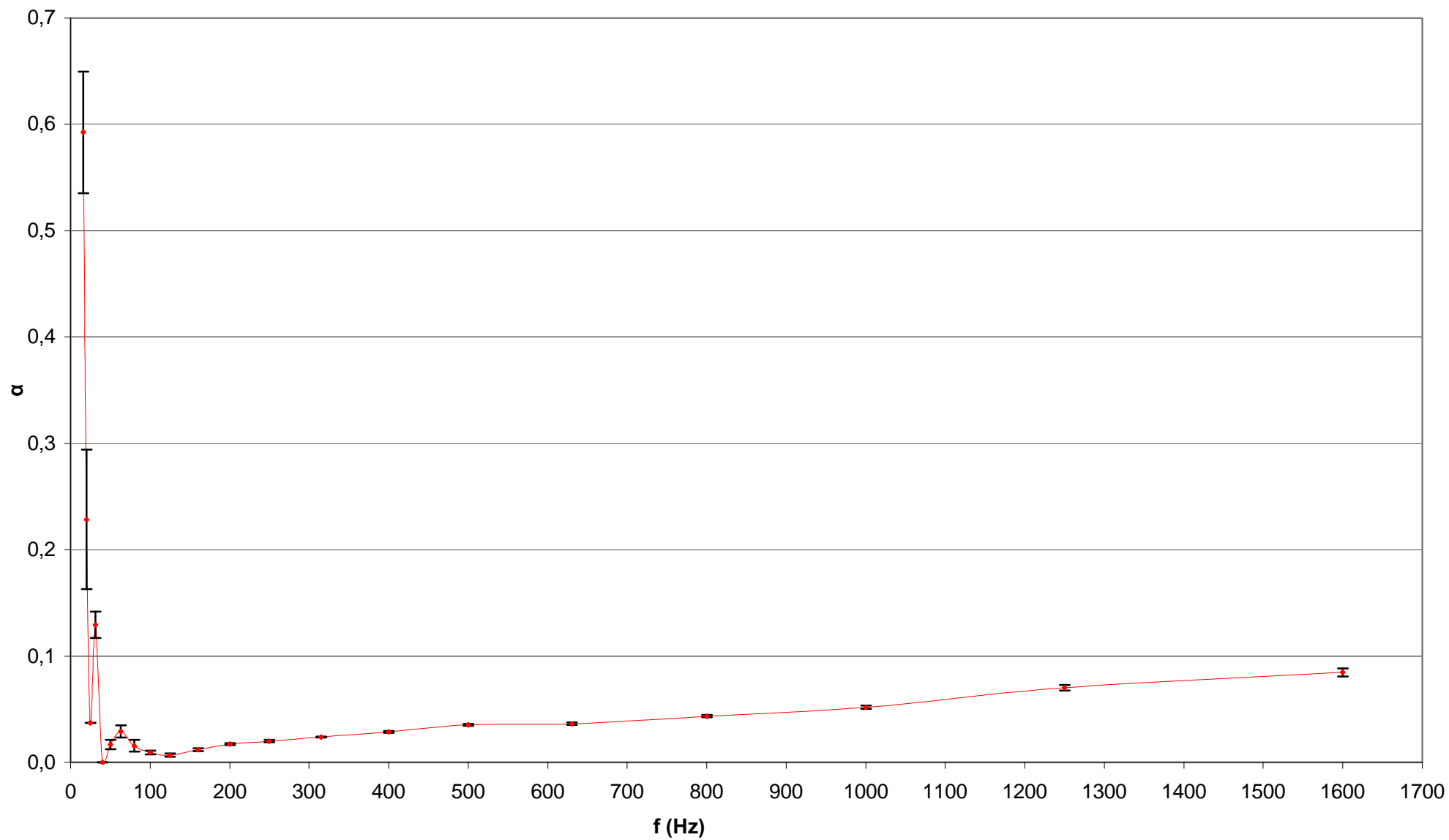
**Příloha P VIII: Grafická závislost koeficientu zvukové pohltivosti na frekvenci – materiál extrudovaný polystyren
tloušťky 30 mm**



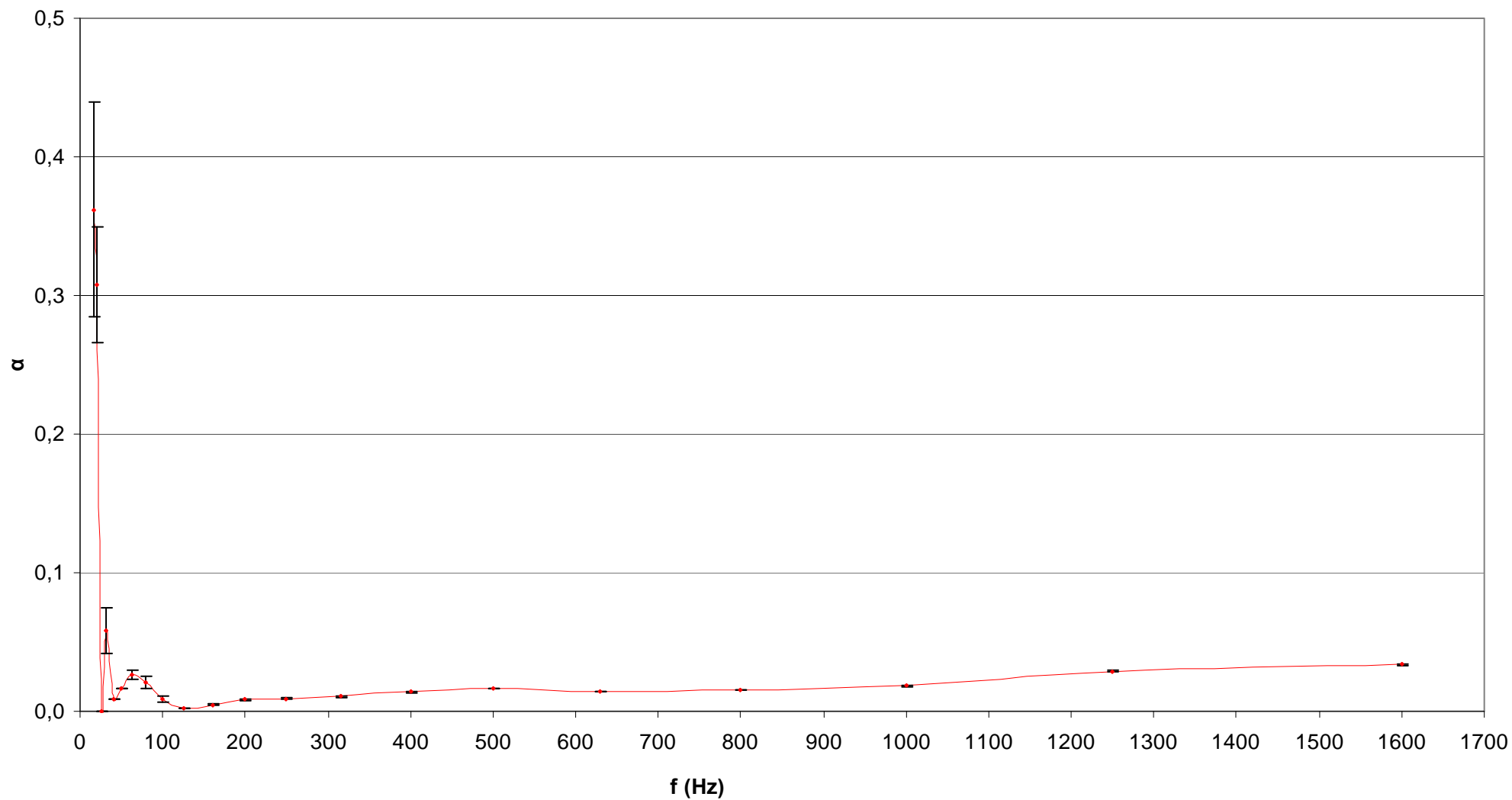
Příloha P IX: Grafická závislost koeficientu zvukové pohltivosti na frekvenci – materiál minerální vlna



Příloha P X: Grafická závislost koeficientu zvukové pohltivosti na frekvenci – materiál koberec ze 100% PP



Příloha P XI: Grafická závislost koeficientu zvukové pohltivosti na frekvenci – materiál papírová tapeta s PVC povrchem



Příloha P XII: Porovnání hodnot koeficientů zvukové pohltivosti pro frekvenční rozpětí 50 – 1600 Hz vybraných materiálů

