

Modelování akustických vlastností panelů připravených z produktů recyklační technologie

Acoustic properties modeling of panels as products of
recycling technology

Bc. Ondřej Malaník

Diplomová práce
2011



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky
akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Ondřej MALANÍK**
Osobní číslo: **A09341**
Studijní program: **N 3902 Inženýrská informatika**
Studijní obor: **Automatické řízení a informatika**

Téma práce: **Modelování akustických vlastností panelů
připravených z produktů recyklační technologie**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte literární studii týkající se šíření zvuku v tuhých látkách a možnosti přípravy protihlukových panelů z produktů recyklační technologie.
2. Aplikujte vhodný model popisující šíření zvuku v panelu s ohledem na jeho maximální pohltivost a simulujte úlohu v prostředí Comsol Multiphysics.
3. Verifikujte model pomocí naměřených akustických vlastností připravených vzorků.
4. Dosažené výsledky zhodnoťte v závěru práce.

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

1. JIŘÍČEK, O. Úvod do akustiky. Učební texty vysokých škol. ČVUT v Praze, 2002. 146 str. (ISBN 80-01-02460-1)
2. MIŠUN, V. Vibrace a hluk. Učební texty vysokých škol. VUT v Brně, 1998. 177 str. (ISBN 80-214-1262-3)
3. NOVÝ, R. Hluk a otřesy. Učební texty vysokých škol. ČVUT v Praze, 1989. 190 str. (ISBN 80-01-00-101-6)
4. POKUSA, J. Měření a vyhodnocení akustických vlastností materiálů. Diplomová práce, UTB 2008. 111 str.
5. ESTORFF, V., O. Boundrady Elements in Acoustics. Technical University Hamburg, Germany, 2000. 476 str. (ISBN 1-85312-556-3)
6. KAŇKA, J. Stavební fyzika 1 – Zvuk a denní světlo v architektuře. ČVUT v Praze, 2002. 118 str. (ISBN 80-01-02645-0)
7. Akustika, vznik a šíření zvuku, frekvenční analýza a syntéza, sluchový vjem zvukového signálu [online], l.cit. 2011-01-26]. Dostupné z : [http://homen.vsb.cz/ber30/texty/varhany/anatomie/pistaly_akustika.html]

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Dagmar Janáčková, CSc.

Ústav automatizace a řídicí techniky

Datum zadání diplomové práce:

25. února 2011

Termín odevzdání diplomové práce:

3. června 2011

Ve Zlíně dne 25. února 2011

prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.

děkan



prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.

ředitel ústavu

ABSTRAKT

Obsahem diplomové práce je řešení problematiky zabývající se možnostmi využití elektronického odpadu za účelem přípravy protihlukových panelů a zhodnocení jejich akustických vlastností. Teoretická část je zaměřena na způsoby šíření zvuku v pevných látkách, na pojmy hluk a možnosti boje proti hluku a vibracím. V praktické části je popsána příprava vzorků a následné měření akustické pohltivosti na Kundtově impedanční trubici a simulace navrženého akustického modelu v prostředí COMSOL MULTIPHYSICS. V závěru praktické části byla naměřená data akustické pohltivosti připravených vzorků zhodnocena a vytvořený model jimi verifikován.

Klíčová slova: Recyklace, elektronický odpad, desky plošných spojů, hluk, boj proti hluku, akustické vlastnosti materiálu, protihluková bariéra.

ABSTRACT

The diploma thesis deals with the potential utilization of electronic waste meant for sound-protective panels and an evaluation their acoustic attributes.

The theoretical part concerns the ways how the sound spreads throughout solid substances, a concept of the sound, sound-control options, and also an oscillation.

Referring to the practical part, making the samples and consequential measuring of acoustic absorbency on Kundt's impedance pipe, and simulation of the designed acoustic model in COMSOL MULTIPHYSICS have been described there. At the end of the practical part, the measured data of acoustic absorbency of the prepared samples have been evaluated and the created model has been verified by the data.

Key words: recycling, e-waste, electronic waste, printed circuit plates, sound-control options, acoustic attributes of the substance, sound-protective panel.

Rád bych poděkoval vedoucí své diplomové práce doc. Ing. Dagmar Janáčové CSc. za trpělivost a cenné rady a připomínky. Také všem kolegům, kteří mi poskytli odborné rady a zázemí k realizaci mé práce.

Prohlašuji, že

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

Prohlašuji,

- že jsem na diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně

.....
podpis diplomanta

OBSAH

ÚVOD	9
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 AKUSTIKA	12
1.1 ZVUK.....	12
1.1.1 Vznik zvuku	13
1.1.2 Šíření zvuku	20
1.1.3 Rychlost šíření zvuku.....	27
1.1.4 Šíření akustické vlny v pevných látkách.....	29
2 HLUK	31
2.1 ZDROJE HLUKU	33
2.2 METODY BOJE PROTI HLUKU	34
2.3 MECHANIZMY POHLCOVÁNÍ ZVUKU	36
2.3.1 Porézní látky.....	37
2.3.2 Obklady na rezonančním principu	37
2.4 ÚTLUM CHVĚNÍ V KONSTRUKCÍCH	40
2.5 PROTIHLUKOVÉ BARIÉRY/PANELY.....	43
3 AKUSTICKÉ MODELÝ	44
3.1 DETERMINISTICKÉ MODELÝ	44
3.1.1 Metoda konečných prvků (MKP).....	45
3.1.2 Metoda hraničních elementů (MHE)	46
3.2 STATISTICKÉ MODELÝ	47
3.2.1 Statistická energetická analýza (SEA)	47
3.3 MODELOVÁNÍ V COMSOL MULTIPHYSICS	48
II PRAKTICKÁ ČÁST	49
4 VÝROBA VZORKŮ	50
4.1 PŘÍPRAVA MATERIÁLU	50
4.2 SEPARACE DRTI	52
4.3 LISOVÁNÍ VZORKŮ	53
5 TESTOVÁNÍ VZORKŮ	58
5.1 PRINCIP MĚŘÍČÍHO ZAŘÍZENÍ	58
5.2 VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH VÝSLEDKŮ	60
5.2.1 Vzorek z hrubé drti.....	60
5.2.2 Vzorek ze středně hrubé drti	61
5.2.3 Vzorek z jemné drti	62
5.2.4 Vzorek z práškové drti	62

5.3	SIMULACE AKUSTICKÉ POHLTIVOSTI MATERIÁLU	63
5.4	POROVNÁNÍ NAMĚŘENÝCH VÝSLEDKŮ	64
ZÁVĚR.....		66
ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ.....		67
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY		69
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK		71
SEZNAM OBRÁZKŮ		75
SEZNAM TABULEK.....		77
SEZNAM GRAFŮ		78

ÚVOD

Současným trendem moderní doby je známá fráze: „Jít s dobou“. Každý z nás má jistě vizi, kterou se snaží v budoucnu realizovat. Ne vždy se nám však naše vize podaří přenést do reálného života. Díky pokroku moderní doby si můžeme část našich snů prožít prostřednictvím televizních obrazovek a dnes již pro mnohé mladistvé nezbytnou virtuální realitou. Počítačové hry mají téměř autentické grafické zpracování a dokážou hráče natolik vtáhnout do děje, že si připadá jako by byl tím neprůstředním akčním hrdinou on sám.

O tom zda je multimediální výchova dnešní moderní mládeže krok správným směrem nechám na uvážení samotných posluchačů. Každá doba má svůj trend a tím současným je mít pokud možno pohodlný život plný vymožeností, které nám ulehčují život a bez kterých bychom si současný svět již nedokázali představit. Vzpomeňme jen na situaci, když vypnou proud a my jsme odkázáni pouze na svíčky. Jednoduše řečeno, dnes si již svůj svět bez elektřiny a technických vymožeností moderní doby ani nedokážeme představit.

To nás přivádí k otázce, co pak s těmi zastaralými, nefunkčními a již nemoderními věcmi?

Odpověď je zdánlivě jednoduchá - zrecyklovat. Jak je známo naše planeta není bezdná a nerostného bohatství máme jen omezené množství a je jen na nás jak s ním naložíme.

Proces recyklace je proto velmi důležitým aspektem moderní doby, díky kterému si můžeme oněch všudypřítomných prostředků každodenního použití nadále užívat. Recyklované výrobky jsou všude kolem nás a dnes již k nerozeznání od originálů. Mnohdy tak nevědomky užíváme produkty recyklační technologie vyrobené výhradně z alternativních zdrojů. Díky spoustě vědců a v poslední řadě i politice životního prostředí řada států přijala novely, které zajistí důmyslnější zacházení s odpadem, především s elektroodpadem. Existují také společnosti zabývající se přímo jeho zpracováním, které

dokáží tento relativně nepoužitelný zdroj materiálu zpracovat a přetvořit na spoustu novým výrobků denního použití.

Proces recyklace elektroodpadu je však mnohem složitější než může vyznít z těchto řádků. Základem je účelné třídění odpadu a jeho zpracování. V každém větším městě existují příslušná sběrná místa pro tento nebezpečný odpad, čímž elektroodpad bezpochyby je.

Proces třídění elektroodpadu je jak časově, tak i finančně náročný. Náklady na recyklaci se však díky uvědomělosti občanů, kteří odpad třídí, může částečně snížit. Staré a nefunkční elektrospotřebiče tak mohou být levným zdrojem surovin pro výrobu nových produktů a díky ekologickým továrnám i šetrným k životnímu prostředí.

Deska plošného spoje (DPS) je, dovoluji si říct, součástí každého elektrického zařízení. Na základě studií bylo zjištěno, že tento zdroj je možno využít k výrobě protihlukových bariér a panelů. Cílem práce je tak vytvořit produkt, který dokáže nežádoucí zvuky pohltit, což je vzhledem k rostoucímu hluku velmi aktuální.

Proces recyklace se tak stal fenoménem moderní doby a je nutno na něj nahlížet, jako na způsob nebo řekněme možnost jak využít alternativních zdrojů surovin a získat tak jiný neinvazivní zdroj nerostného bohatství a mnoho dalších surovin.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 AKUSTIKA

Jedná se o rozsáhlý vědní obor zabývající se zvukem. od jeho vzniku, přenosu prostorem až po vnímání lidskými smysly.

Dělí se do několika odvětví na: hudební akustika, stavební akustika, prostorová akustika, fyziologická akustika, psychoakustika.

Hudební akustika – zkoumá fyzikální základy hudby, hudebních nástrojů a prostorů

Stavební akustika – zvukové jevy a souvislosti v uzavřeném prostoru, budovách a stavbách

Prostorová akustika - šíření zvuku v obecném prostoru

Fyziologická akustika – vznik zvuku v hlasovém orgánu člověka a jeho vnímání v uchu

Psychoakustika – vnímání zvuku v mozku [1], [7].

1.1 Zvuk

Obecně můžeme definovat jako mechanické kmitání, které je charakterizováno parametry a pohybu částic pružného prostředí nebo u vlnového pohybu parametry zvukového pole. Část zvuků se projevuje jako slyšitelný zvuk – což je akustické kmitání pružného prostředí v pásmu s frekvencí od 16 Hz do 20 kHz, schopné vyvolat zvukový vjem. Frekvenční závislost definice slyšitelného zvuku je silně individuální. Jen málokdo je schopen vnímat celé pásmo frekvencí (zejména horní hranice, která je mimo jiné závislá na věku).

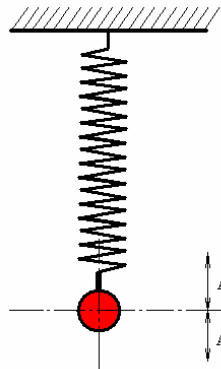
Zvuky, které jsou mimo slyšitelné frekvenční pásmo nevnímáme, ale mohou mít velice negativní dopad na zdraví či psychiku člověka.

Zvuky pod slyšitelnou hranicí s frekvencí 0,7 – 16 Hz nazýváme infrazvukem (velmi nízké frekvence, které lidský organizmus vnímá pouze hmatem, vnímání vibrací)

Zvuky nad hranicí slyšitelnosti s frekvencí do 50 kHz označujeme jako ultrazvuk.

1.1.1 Vznik zvuku

Zvuk vzniká kmitáním bodů a bodových soustav. Kmitavý pohyb je fyzikální děj, při kterém se v čase mění střídavě (periodicky) charakteristické veličiny např. poloha, rozměr, tlak, rychlost apod. Nejjednodušší je periodický pohyb sinusového (tj. harmonického) průběhu, který lze jednoduše znázornit kmitavým pohybem na pružině zavěšeného tělíska (např. kuličky). Tento periodický pohyb tělesa lze v čase znázornit sinusovkou.



Obrázek 1: Kmitavý pohyb [6]

Harmonický pohyb lze popsat vztahem:

$$a = A \cdot \sin \frac{2\pi}{T} t \quad (1.1)$$

Kde T = perioda je čas, za který soustava provedla jeden kmit (koncový bod vektoru oběhl celou kružnici 0° až 360°), A = maximální výchylka, největší vzdálenost, o kterou se soustava vychýlí od rovnovážné polohy (poloměrem kružnice, po které obíhá koncový bod vektoru), a = okamžitá amplituda vzdáleností soustavy od rovnovážné polohy ve sledovaném okamžiku t . ω = vlnový kmitočet.

Zjednodušením a dosazením získáme vztah:

$$a = A \cdot \sin 2\pi f \cdot t = A \cdot \sin \omega \cdot t \quad (1.2)$$

Kmitočet

Neboli frekvence určuje počet kmitů, které vykoná pohybující se těleso za sekundu.

Označuje se písmenem f s jednotkou [Hz] [3], [6].

Mezi dobou kmitu a frekvencí platí vztah:

$$f = \frac{1}{T} \quad (1.3)$$

Vlnový kmitočet s jednotkou [Rad] lze jednoduše převést na [Hz] pomocí vztahu:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f \quad (1.4)$$

Vlnová délka λ

Vlnová délka λ [m] je určena vzdáleností mezi dvěma nejbližšími body bodové řady se stejným akustickým stavem v daném okamžiku. Jedná se o vzdálenost, kterou urazí akustická vlna v průběhu jednoho kmitu T [s].

Pro vlnovou délku v tomto případě platí vztah.

$$\lambda = \frac{c}{f} = c \cdot T \quad (1.5)$$

Kde c = rychlost šíření vzduchu [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$].

Zvuková vlna

Je charakterizována amplitudou a vlnovou délkou λ , která určuje vzdálenost dvou nejbližších bodů vlny se stejnou fází a amplitudou.

V některých místech prostoru dochází vlivem impulsu generovaným zdrojem zvuku k přibližování/oddalování částic, čímž dochází k „zhuštění“ nebo „zředění“ (přetlaku, podtlaku).

Tyto změny se šíří rychlostí c , která je ve vzduchu cca 340 m/s (tato hodnota je závislá na teplotě, při 0°C je rychlost zvuku 331,8 m/s, při 30°C pak 349,6 m/s).

Akustická rychlost

Jedná se o rychlost, se kterou kmitají jednotlivé částice prostředí, kterým se šíří zvuková vlna. Akustická rychlost je definována rovnicí:

$$v = \frac{\partial u}{\partial \tau} = v_0 \cdot \cos \omega \left(\tau \pm \frac{x}{c} \right) \quad (1.6)$$

Kde v_0 = amplituda akustické rychlosti, τ = čas, x = vzdálenost od počátku šíření zvuku [5].

Akustický tlak

Při šíření zvuku dochází k zředění nebo zhuštění částic v bodové řadě odpovídající místům přetlaku a podtlaku. Akustický tlak p [Pa] vnímá lidský organizmus již od hodnoty $2 \cdot 10^{-5} Pa$, ve srovnání s barometrickým tlakem je však zanedbatelný $p_b \cong 10^5 Pa$. Průběh akustického tlaku je závislý na průběhu akustické rychlosti a výchylky.

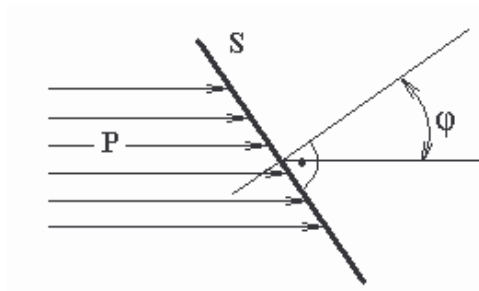
Pro harmonický signál lze akustický tlak vyjádřit rovnicí:

$$p = p_0 \cdot \cos \omega \left(\tau - \frac{x}{c} \right) \quad (1.7)$$

Kde p_0 je amplituda akustického tlaku. Z rovnice je patrné, že akustický tlak závisí především na kruhové frekvenci ω . U akustických veličin je třeba pracovat s jejich frekvenčními spektry, která mohou být čárová (diskrétní) nebo spojitá. Je to z toho důvodu, že v reálném prostředí se akustické signály o jednom kmitočtu nevyskytují, ale skládají se z řady jednotlivých signálů [5], [6], [7].

Měrný akustický výkon

Při průchodu akustické vlny prostorem vzniká na základě vlnění akustická energie. Množství procházející akustické energie za jednotku času nazýváme akustickým výkonem P [W]. Tento výkon vztažený na jednotku plochy, kterou je přenášen pak nazýváme měrným akustickým výkonem N [W.m⁻²]. Z obrázku [6] vyplívá vztah:



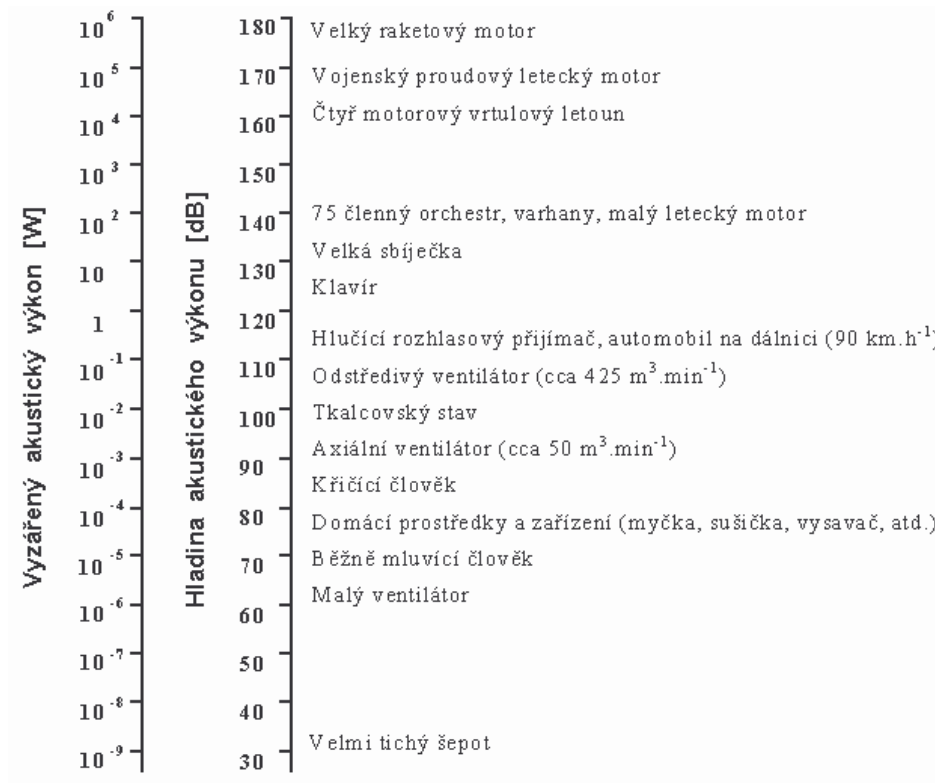
Obrázek 2: Měrný akustický výkon [6]

$$N = \frac{dP}{dS \cdot \cos \varphi} \quad (1.8)$$

Hladina akustického výkonu

Šíří-li se zvuk od zdroje k posluchači, tak platí pravidlo základního zákona fyziky a to zákon o zachování hmoty. Vedle veličin akustické rychlosti, tlaku, intenzity zvuku atd.

existuje také tzv. akustický výkon – hladina akustického výkonu L_p [dB]. Hodnoty akustického výkonu se, mimo i jiné veličiny, v běžné praxi mění i o několik řádů. Na obrázku [3] můžete vidět příklady hladin akustického výkonu.



Obrázek 3: Hladiny akustického výkonu [6]

Pro hladinu akustického výkonu platí vztah:

$$L_p = 10 \log \frac{P}{P_0} \quad (1.9)$$

Kde P_0 = referenční akustický výkon = 10^{-12} W.

Intenzita akustického signálu

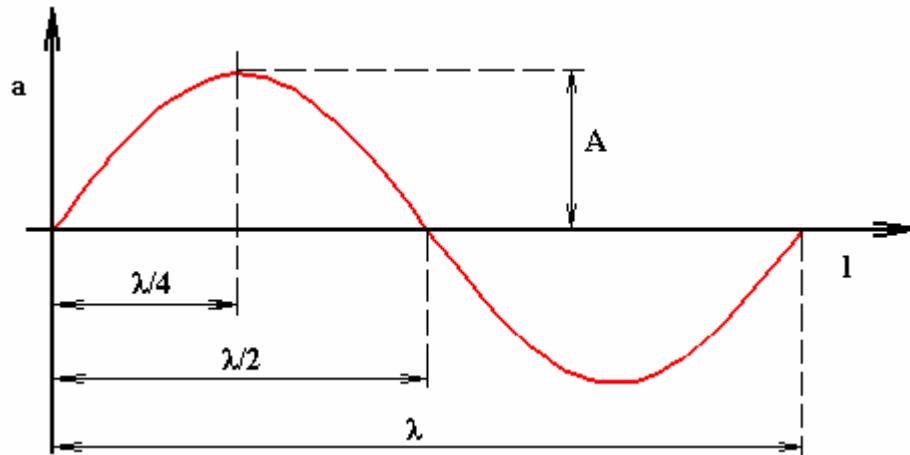
Intenzita akustického signálu závisí především na akustickém tlaku v místě šíření akustického signálu. Ucho nevnímá zvyšování akustického tlaku lineárně, jeho citlivost se zvyšováním intenzity klesá logaritmicky. Intenzita akustického signálu L [dB] je pak popsána vztahem:

$$L = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad (1.10)$$

Kde I_0 = referenční hodnota (obvykle prahová intenzita)[2].

Kmitavý pohyb

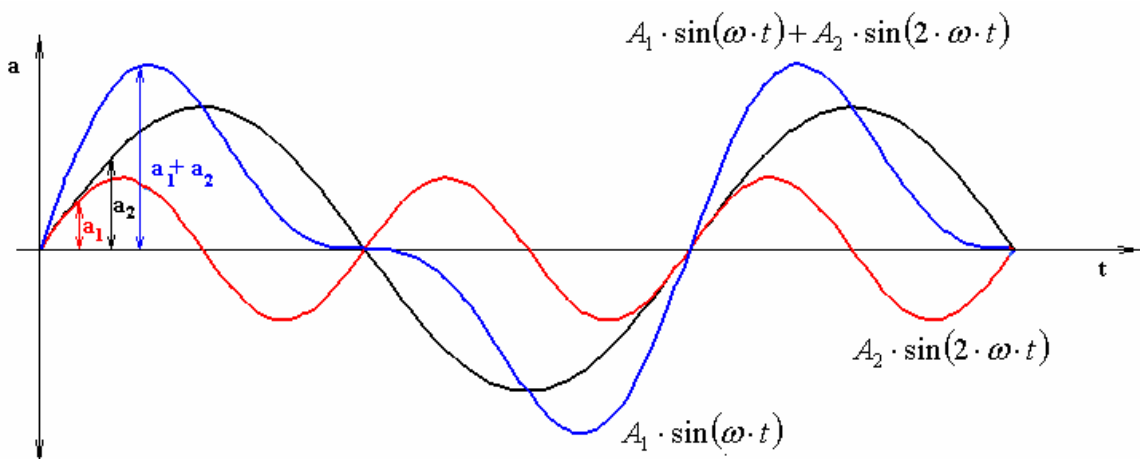
Jedná se o zdroj impulsu, který se v prostoru šíří formou postupného podélného vlnění jako zvukové vlny. U harmonického pohybu vznikne harmonická vlna. Její charakteristické parametry jsou popsány na následujícím obrázku[4].



Obrázek 4: Harmonická vlna [1]

Čistě harmonický průběh se však vyskytuje jen u nejjednodušších zvuků, v běžné akustice se s ním téměř nesetkáme. Zvukový signál většiny zdrojů je oproti základní sinusovce více či méně deformovaný. Přesto lze v každém periodickém signálu určit základní frekvenci a pomocí frekvenční analýzy určit všechny harmonické složky, tj. podíl dalších frekvencí, které v součtu se základní vytvářejí deformovanou křivku.

Výsledkem analýzy je frekvenční spektrum, z něhož lze zpětným postupem frekvenční syntézou složit původní signál [1], [6].



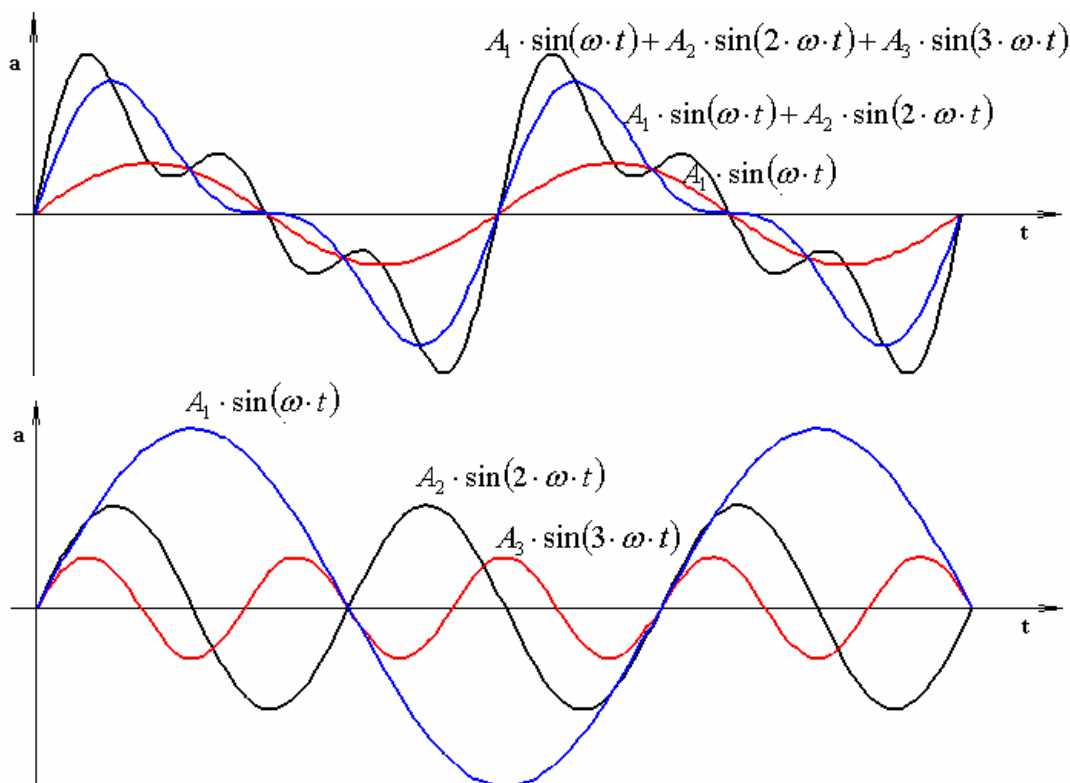
Obrázek 5: Syntéza a analýza harmonických vln [1]

Na obrázku je patrný základ problematiky skládání (syntézy) a rozkládání (analýzy) harmonických vln. Zobrazuje deformaci harmonické vlny přičtením vlny s dvojnásobnou frekvencí a menší amplitudou. V každém okamžiku či místě u postupující vlny se sečtou okamžité hodnoty obou vln. Výsledkem je součtová vlna s tvarem obecně různým od sinusové (harmonické). Na obrázku je nejjednodušší případ skládání harmonických vln s nulovým fázovým posunem [1].

Sčítání harmonických vln

Součtem dvou (obecně více) harmonických vln získáme periodický průběh obecného tvaru, který je oproti sinusové vlně více či méně zkreslený. Frekvence vlny s nejvyšší amplitudou je tzv. dominantní, základní tzv. harmonická. Frekvence násobně vyšší jsou její harmonické, frekvence násobně nižší jsou subharmonické, přičemž násobek frekvence označuje pořadí harmonické i příslušné frekvenční čáry ve spektru.

Druhá odpovídá dvojnásobné frekvenci, pátá pětinasobné atd. Následující obrázek [6] ukazuje postupnou deformaci sinusové křivky přičítáním dalších harmonických vln s postupně se snižující amplitudou [1].



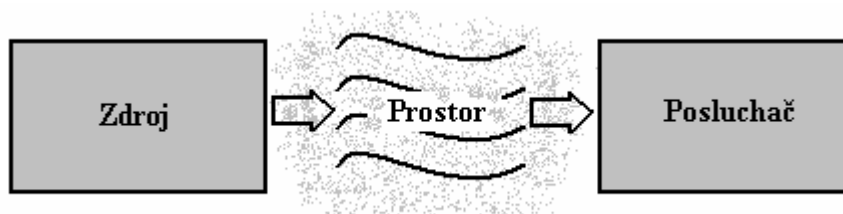
Obrázek 6: Postupná deformace sinusových křivek a přičítání dalších harmonických vln [1]

U skutečných zdrojů zvuku se často projevuje kolísání frekvence, která v čase pravidelně či nepravidelně klesá či stoupá vůči dominantní (základní) úrovni. Toto kolísání se ve spektru projeví vznikem pásma okolo každé takto kolísající frekvence. Jeho šířka odpovídá velikosti kolísání a tvar reprezentuje zastoupení frekvencí odlišných od dominantní.

Skutečná spektra reálných zvukových signálů mají podstatně složitější tvar a jednotlivé harmonické mají obecně různou velikost (nemusí být rovnoměrně klesající, jako u předchozích příkladů). Četnost a obsah harmonických vln mají zásadní vliv na tzv. barvu zvuku [1].

Sluchový vjem zvukového signálu.

Z hlediska hudební akustiky je důležitý i koncový prvek celého akustického řetězce.



Obrázek 7: Akustický řetězec

Výše popisovaný kmitavý pohyb zdroje dorazí až do sluchového orgánu, kde z roviny objektivní fyzikální reality přejde do oblasti subjektivního vnímání. Zvuk je ve vnitřním uchu převeden na nervové signály, které jsou složitým způsobem zpracovány v mozku. Jejich analýza, srovnání s dosavadními zkušenostmi a vybavení ve vědomí a podvědomí už probíhají u každého jedince individuálně. Konečný účinek zvukového signálu tak není přesně popsitelný. Lze definovat jen obecné a obecně platné závislosti.

Vjem zvukového signálu je souhrnem subjektivních veličin - výška tónu, hlasitost a barva zvuku, které jsou přímým obrazem objektivních fyzikálních veličin - frekvence, amplitudy, intenzity a časového průběhu zvukového signálu (zkreslení - podílu harmonických).

Sluchový vjem je velmi silně závislý na frekvenci a intenzitě zvuku, výsledný vjem je taktéž značně ovlivněn tím, zda posloucháme zvuk s jednou nebo s více frekvencí. Zvuky, které u posluchače vyvolají sluchový vjem lze zařadit do tzv. sluchového pole [1], [6], [7].

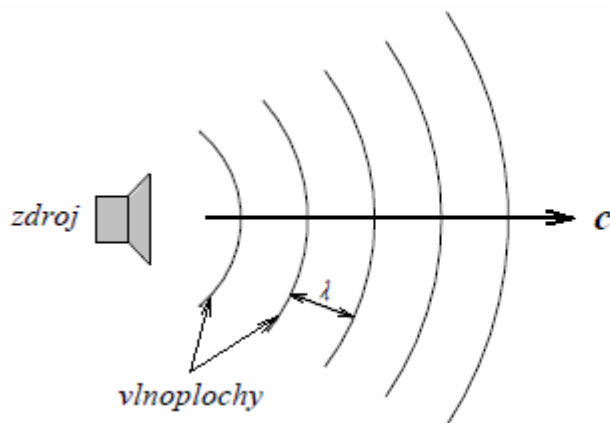
1.1.2 Šíření zvuku

Zvuk se může šířit v kapalinách, plynech nebo i pevných látkách formou akustického vlnění, jehož šíření je spojeno s přenosem energie. Částice daného prostředí se přitom nepohybují jednosměrně se šířícím se vlněním, ale kmitají pouze kolem svých rovnovážných stavů.

U plynů a kapalin se vyskytuje pouze podélné akustické vlnění, protože tyto látky jsou pružné pouze ve smyslu objemové stlačitelnosti. V pevných elastických látkách se může vyskytovat vlnění podélné i příčné. Tyto látky vykazují pevnost nejen v tahu a tlaku, ale i ve smyku. Kombinací těchto namáhání vzniká i ohybové kmitání. Akustické vlnění se šíří od zdroje zvuku rychlostí šíření zvuku c skrz dané prostředí ve vlnoplochách.

Vlnoplocha

Je charakteristická tím, že ve všech jejích bodech je v daném čase stejný akustický stav. Vzdálenost mezi vlnoplochami je vlnová délka λ . Kolmice na vlnoplochu je tzv. akustický paprsek. Mezi pevnými látkami a plyny (resp. kapalinami) může docházet k přenosu kmitů. Každý hmotný element může být tzv. oscilátorem, který je považován za akustický oscilátor. K nejjednodušším oscilátorům patří pružina, struna, ladička apod. [5], [6], [7].



Obrázek 8: Šíření zvuku v prostředí [5]

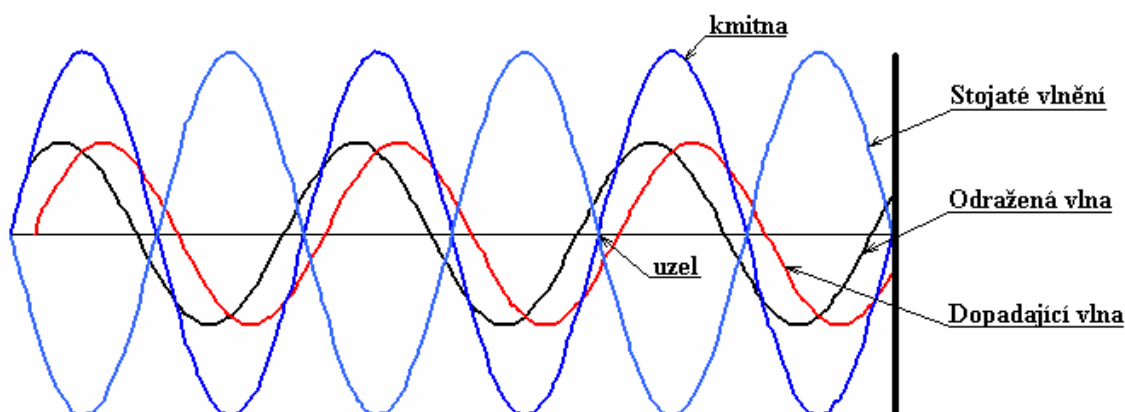
Ve volném prostoru se zvuk šíří všemi směry volně od zdroje a jeho šíření můžeme popsat právě tzv. vlnoplochami.

Je-li zdroj zvuku malý (bodový), mají vlnoplochy tvar koule, je-li zdrojem např. rozměrná deska, jsou vlnoplochy rovinné.

Šíření zvukových vln v prostoru popisuje celá řada fyzikálních principů. Vlny se v prostoru odrážejí, lámou i ohýbají, sčítají se s jinými vlnami, podléhají tlumení atd.

Dopadá-li zvuková vlna na překážku, dojde k jejímu odrazu. Na vlastnostech překážky závisí průběh odražené vlny.

U pevné překážky se vlna odrazí s opačnou fází. Odražená vlna postupuje proti přímé vlně a dochází k jejich skládání - interferenci. Výsledkem je stojaté vlnění, u něhož jsou některé body prostoru neustále v klidu (uzly) a jiné v maximálním pohybu (kmitna). Proto se tento jev někdy označuje jako chvění [1].



Obrázek 9: Šíření zvukové vlny při dopadu na překážku [1]

Z hlediska akustiky je důležitým údajem hladina akustického tlaku. Ta určuje, o co je okamžitá hodnota vyšší, než referenční hodnota. Udává se v dB:

$$L = 20 \log \frac{P}{p_0} \quad (1.11)$$

p = změřená či okamžitá, p_0 = vztažná referenční. Referenční hladina má hodnotu

$$p(0) = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa.}$$

Jednotka akustického tlaku dB je logaritmická, platí tedy že o 6 dB větší hladina akustického tlaku odpovídá dvojnásobné hlasitosti. O 20 dB větší hodnota desetinásobné hlasitosti atd. Běžně se setkáme ještě s jinou jednotkou - dBa, ta označuje akustický tlak,

který je „pře počítán“ podle závislostí, které charakterizují vlastnosti lidského ucha. Tyto závislosti modeluje tzv. „váhový filtr A“.

V reálném prostředí se tedy zvuk šíří od zdroje konečnou rychlostí k posluchači. Ve volném i uzavřeném prostoru je dominantní přímá vlna - postupující po přímce mezi místem, kde zvuk vzniká (zdrojem) a místem jeho příjmu (uchem či hlavou posluchače, membránou mikrofonem, atd.) [1].

Zvuková vlna

Její „čelo“ dorazí k místu poslechu se zpožděním, daným rychlostí šíření c (340 m/s) a se stejným zpožděním po ukončení generování zvuku dorazí i tyl vlny. Pokud se celý děj odehrává v uzavřeném prostoru, přistupují k přímé vlně ještě i vlny, které se odrazí od stěn, které tento prostor ohraničují [1].

Odražená vlna

Odražená vlna se k posluchači nešíří přímo, ale odrazem ode stěn či jiných předmětů. Díky tomu je její cesta delší a do místa poslechu dorazí se zpožděním jak její čelo, tak i tyl. V místě poslechu se odražená vlna skládá s vlnou přímou a mění tak charakter přijímaného zvuku.

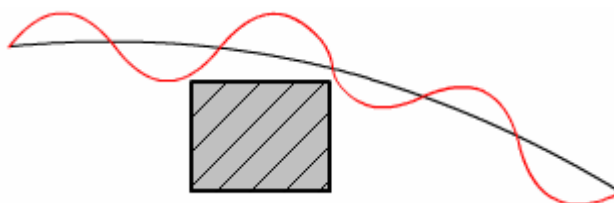
V prostoru pak vytváří obecné zvukové pole. Vlna se od stěn odráží pod stejným úhlem, v jakém na ně dopadá a díky nedokonalému odrazu (pohlcení - ztrátám části energie) je její intenzita po každém odrazu menší a menší.

Část energie dopadající vlny se odrazí zpět do prostoru před stěnou. Vlastnosti stěny zásadně ovlivňují energii zvukové vlny [1], [7].

Ohyb akustické vlny

Dalším jevem, který ovlivňuje šíření zvukových vln v prostoru je ohyb. Vyskytují-li se v poslechovém prostoru objekty, jejichž rozměry jsou srovnatelné s délkou zvukové vlny (pro slyšitelné frekvence to jsou centimetry až jednotky metrů, 2cm až 21m), zvuková vlna se kolem nich ohne.

Vlastnosti ohybu jsou tedy opět frekvenčně závislé. Díky ohybu se zvuk dostane i za překážku. Na obrázku [10] je uveden příklad ohybu. Červená linka představuje sinusový harmonický průběh zvukové vlny [1], [6], [7].



Obrázek 10: Ohyb akustické vlny [1]

Délka vln

Délka vln je jeden s velmi důležitých parametrů, který ovlivňuje navrhování technických opatření proti vzniku a šíření zvuku. Důvodem jsou různé druhy akustického vlnění, které se mohou šířit daným konstrukčním prvkem.

Hlavní podmínkou pro vznik akustického vlnění v materiálu je, aby jeho rozměr byl menší nebo roven poloviční délce vlny.

Pro podélné vlny tedy vyplývá vztah:

$$L \geq \frac{\lambda_L}{2} = \frac{c_L}{2f} \quad (1.12)$$

Kde L = rozměr součásti, λ_L = délka vln, c_L = rychlost vlnění v tenkých tyčích.

Běžné konstrukční materiály mají vlnovou délku poměrně velkou tudíž se musí při jejich užití brát v úvahu i tato fyzikální veličina. V tabulce 1 jsou uvedeny některé materiály a jejich zvukové vlny v závislosti na vlnové délce.

Materiál	Vlnová délka λ_L [m]								
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Ocel	182,50	91,30	46,00	23,00	11,50	5,70	2,88	1,440	0,720
Hliník	152,00	76,00	38,50	19,20	9,60	4,80	2,40	1,200	0,600
Olovo	44,80	22,40	11,30	5,60	2,80	1,40	0,70	0,350	0,170
Novodur	27,00	13,50	6,80	3,40	1,70	0,85	0,42	0,210	0,100
Silon	39,60	19,80	10,00	5,00	2,50	1,25	0,62	0,310	0,150
Plexisklo	50,20	25,10	12,60	6,30	3,20	1,58	0,78	0,390	0,190
Korek	15,90	7,90	4,00	2,00	1,00	0,50	0,25	0,120	0,060
Měkká pryž	2,20	1,10	0,56	0,28	0,14	0,07	0,03	0,017	0,009
Tvrdá pryž	44,50	22,20	11,10	5,60	2,80	1,40	0,70	0,350	0,170
Beton	98,00	49,00	24,80	12,40	2,60	3,10	1,55	0,770	0,390

Tabulka 1: Některé druhy materiálů a jejich vlnové délky [6]

Ohybové vlny

Vedle podélných a příčných vln, jsou neméně důležité z hlediska boje proti hluku vlny ohybové. To, jaké ohybové vlnění se může šířit v daném konstrukčním prvku zjistíme na základě jeho délky a velikosti délky jedné půlvlny daného zvuku.

Vlnová délka je pak dána drobnou úpravou vztahu (1.5):

$$\lambda_B = \frac{c_B}{f} = \sqrt{\frac{1,8 \cdot c_L \cdot h}{f}} \quad (1.13)$$

Kde c_B = rychlost šíření ohybových vln v tyči, h = příčný rozměr.

Níže je uvedena tabulka 2 délek ohybových vln pro různé frekvence v materiálu ocelové tyče s příčným rozměrem $h = 10\text{mm}$. Délky ohybových vln jsou výrazně menší než podélné vlny.

	Frekvence f [Hz]								
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Délky ohybových vln λ_B [m]	1,78	1,25	0,89	0,63	0,44	0,32	0,22	0,16	0,11

Tabulka 2: Délky ohybových vln [6]

Výše uvedená tabulka délek ohybových vln platí pro tyče. Pro materiály deskového typu po úpravě platí vztah pro výpočet rychlosti ohybových vln ve tvaru:

$$c'_B = c_B \frac{1}{\sqrt[4]{1 - \mu^2}} \quad (1.14)$$

Kde μ je Poissonův poměr příčné kontrakce, který se stanoví ze vztahu:

$$\mu = \frac{E - 2G}{2G} \quad (1.15)$$

Kde G je modul pružnosti ve smyku, E je Youngův modul pružnosti v tahu.

Rychlost ohybových vln v deskách je výrazně vyšší než je tomu u tyčí. V běžných konstrukčních materiálech však můžeme tento rozdíl téměř zanedbat.

Diagram uvedený níže[11] zobrazuje možnosti šíření ohybových vln v deskách.

$$I = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T N d\tau \quad (1.16)$$

Kde T = doba integrace, N = měrný akustický výkon.

Úpravou rovnice získáme konečný tvar:

$$I = \frac{p_{ef}^2}{\rho \cdot c} \quad (1.17)$$

Kde p_{ef} = efektivní hodnota akustického tlaku, ρ = měrná hmotnost.

Tento výraz hraje důležitou roli v technické akustice, na jehož základě je založeno nejen měření hluku, ale i ostatní akustické výpočty.

Absorpce zvuku

Jednou ze základních fyzikálních veličin absorpce zvuku je tzv. koeficient absorpce zvuku odrazu α , který je popsán vztahem:

$$\alpha = \frac{I_0 - I}{I_0} \quad (1.18)$$

Kde I = intenzita odraženého vlnění, I_0 = intenzita dopadajícího vlnění.

Závisí především na materiálu stěny, ale i na frekvenci zvuku (pro nižší tóny je koeficient absorpce nižší, pro vyšší tóny o něco vyšší).

Důležitým pojmem je i celková absorpce A [m^2]. Je dána součtem násobků velikostí všech ploch a stěn s jejich absorpčními koeficienty. Platí že, $1m^2$ plochy je $A = 1 m^2$. Při počítání celkové absorpce ploch v místnosti musíme počítat i s absorpcí těl osob (pro průměrného člověka je například $a = 0,42 m^2$) a nábytku [3], [7].

Absorpční koeficienty některých materiálů a nábytku jsou uvedeny v tabulce 3 níže.

Materiál	Koeficient absorpce α	Materiál	Koeficient absorpce α
Mramor	0,010	Linoleum	0,12
Beton	0,015	Dřevěná židle	0,01
Sklo	0,025	Čalouněné křeslo	0,09 - 0,28
Omítnutá stěna	0,027	Obrazy	0,28
Neomítnutá stěna	0,032	Koberce	0,29
Stěna obložená dřevem	0,10	Plyš	0,59
Dřevěná podlaha	0,10	Celotex	0,64

Tabulka 3: Apbsopční koeficienty některých materiálů [3]

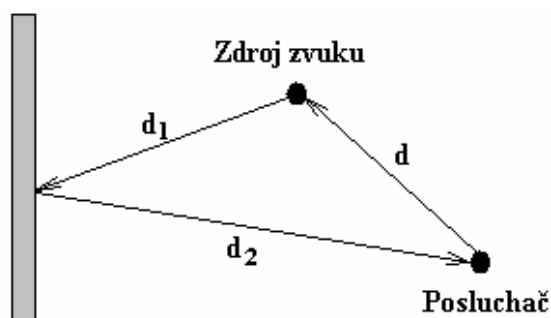
Odras zvuku

Tento jev můžeme zaznamenat především na velké překážce. Sluchem můžeme rozlišit dva krátké zvuky jdoucí po sobě tehdy, je-li mezi nimi časová mezera minimálně 0,1s.

Je-li časový interval zvukové vlny od zdroje k překážce a zpět delší než 0,1s. Vnímáme tento jev jako ozvěnu [3], [7].

Jiná situace nastává za předpokladu, že zdroj zvuku a posluchač jsou od sebe vzdáleni. Potom se čas ozvěny závisí na rozdílu vzdáleností, kterou urazí zvuk jdoucí přímo od zdroje k posluchači a vzdáleností, kterou urazí zvuk jdoucí k posluchači od odražené stěny. Tak jak je níže na obrázku [12]. Tento princip lze popsat vztahem:

$$\Delta t = \frac{d_1 + d_2 - d}{v} \quad (1.19)$$



Obrázek 12: Odras zvuku [3]

1.1.3 Rychlost šíření zvuku

Ze studií např. R. Nového [6] vyplývá, že v kapalinách a plynech se může šířit pouze podélné vlnění, v pevných látkách se může šířit podélné i příčné vlnění. Všeobecně se zvuk nejrychleji šíří v pevných látkách, nejpomaleji v plynech.

- **Rychlost šíření zvuku v kapalinách**

Rychlost šíření podélného vlnění v kapalinách je dána vztahem:

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \quad (1.20)$$

kde K je modul objemové pružnosti.

- **Rychlost šíření zvuku v plynech**

Stanovení rychlosti šíření zvuku v plynech je složitější ve srovnání s šířením zvuku v kapalinách z důvodu dané stavové změny, která v plynu probíhá.

Pro rychlost šíření zvuku v plynech platí vztah:

$$c = \sqrt{\kappa \frac{p_b}{\rho}} \quad (1.21)$$

Kde κ je Poissonova konstanta.

Speciálně pro vzduch v závislosti na teplotě t lze rychlost šíření zvuku stanovit podle rovnice:

$$c = 331,6 \sqrt{1 + \frac{t}{273,1}} \quad (1.22)$$

Kde t je teplota vzduchu ve °C.

- **Rychlost šíření zvuku v pevných látkách**

Rychlost šíření podélného vlnění v tenké tyči je dána vztahem:

$$c_L = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (1.23)$$

Rychlost šíření podélného vlnění v desce je určena rovnicí:

$$c_L = \sqrt{\frac{E}{\rho(1 - \mu^2)}} \quad (1.24)$$

Rychlost šíření příčného vlnění v pevných látkách je dána vztahem [5], [6]:

$$c_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (1.25)$$

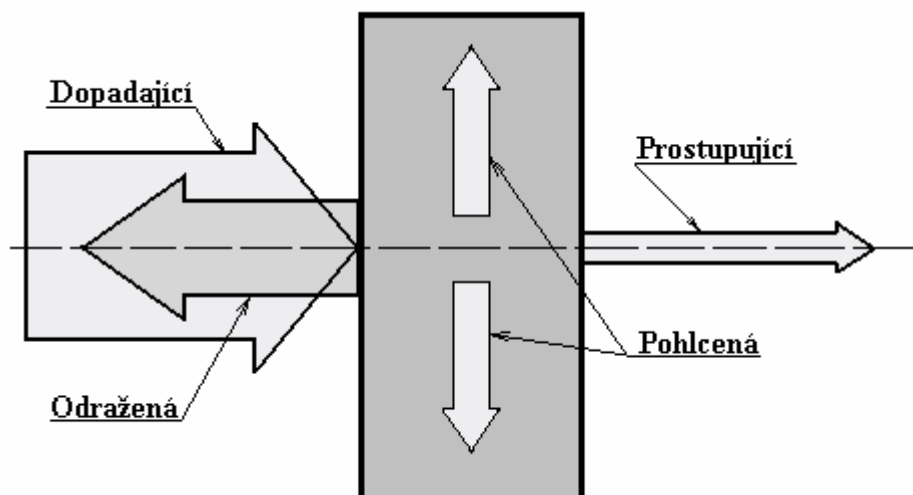
Pro srovnání jsou v níže v tabulce 4 uvedeny rychlosti šíření příčného vlnění v některých látkách.

Látka	Teplota [°C]	c_L [m.s-1]	Látka	Teplota [°C]	c_L [m.s-1]
Vzduch	0	332	Olovo	-	1410
Vzduch	20	344	Bukové dřevo	-	3900
Dusík	0	334	Hliník	-	4800
Helium	0	971	Ocel	-	5750
Vodík	0	1286	Beton	-	3100
Voda	13	1440	Cihly	-	2800
Petrolej	25	1315	Sklo	-	5270
Aceton	20	1190	Plexisklo	-	1580
Rtuť	20	1451	Tvrdá pryž	-	1400
Glycerin	20	1923	Měkká pryž	-	70

Tabulka 4: Rychlost šíření příčného vlnění [5]

1.1.4 Šíření akustické vlny v pevných látkách

Na následujícím obrázku je vidět šíření zvukové vlny po dopadu na pevnou stěnu.



Obrázek 13: Šíření zvukové vlny po dopadu na pevnou stěnu [1]

Mohou nastat dva případy:

- **akusticky odrazivá plocha (tzv. akustické zrcadlo).**
Poměr energií je téměř 1:1. Tvrdé a masivní materiály.

- **akusticky pohltivá plocha**

Poměr energií se blíží 1:0. Neodrazí se téměř žádná energie. Měkké a poddajné materiály, např. závěsy, pěnové hmoty apod.).

Poměr dopadající a odražené energie je u většiny reálných překážek kmitočtově závislý (pro některé kmitočty je plocha akusticky odrazivá, pro jiné neutrální a pro jiné pohltivá).

Energie, která se neodrazí, ale postupuje dále „dovnitř“ překážky se jednak pohltí či rozptýlí a jednak projde stěnou na druhou stranu. Což je považováno z hlediska akustiky prostoru „před stěnou“ jako ztráta [1].

Šíření zvuku ve dřevě

V pružném prostředí – pevných látkách a tekutinách – jsou částice mezi sebou vázány nebo na sebe působí při vzájemných srážkách. Tyto vazby způsobují, že kmitání částic se v kontinuu přenáší a dochází k šíření mechanického vlnění, které je doprovázeno vznikem elastických vln. Znalost šíření elastických vln v materiálu má značný význam jak pro hodnocení dynamické odezvy při zatěžování, tak i pro popis kmitů různých konstrukčních prvků. Na rozdíl od řady technických materiálů (zejména kovů) je studium šíření vln ve dřevě výrazně složitější, protože dřevo vykazuje anizotropní vlastnosti související s chemickým složením a anatomickou stavbou. Teoretické představy o šíření elastické vlny v homogenním anizotropním neomezeném prostředí vychází ze všeobecného znění Hookeova zákona.

Rychlost šíření zvuku je tím větší, čím je větší modul pružnosti a menší hustota dřeva. Rychlost šíření zvuku ve dřevě je tedy závislá na dřevině a má také anizotropní charakter. Průměrná rychlost šíření zvuku ve dřevě některých dřevin je uvedena v tabulce 5 níže [4].

Druh dřeva	ρ [kg.m ⁻³]	Modul pružnosti E [Mpa]		Rychlost zvuku c [m.s ⁻¹]		c_{rovno} : c_{kolmo}
		Rovnoběžně s vlákny	Kolmo na vlákna	Rovnoběžně s vlákny	Kolmo na vlákna	
Smrk	470	11 000	550	4 790	1 072	4,47
Jedle	460	11 000	490	4 890	1 033	4,73
Javor	630	9 400	915	3 826	1 194	3,21
Buk	730	16 000	1 500	4 638	1 420	3,27
Dub	690	13 000	1 000	4 304	1 193	3,61

Tabulka 5: Rychlost zvuku v některých dřevinách [4]

2 HLUK

Zvuk, který slyšíme můžeme zařadit do jednoho z nejdůležitějších informačních zdrojů. Jedná se o přirozený přírodní jev. V přírodě se však setkáme i s hlukem. Za hluk je považován každý nežádoucí zvuk. Tato definice je však velmi subjektivní a každý jedinec může posuzovat hranici mezi zvukem a hlukem odlišně. Obecně je však hluk definován jako zvuk, který ruší či jinak obtěžuje prostředí, ve kterém se pohybuje a znepríjemňuje mu pobyt, popřípadě ohrožuje samotné zdraví jedince.

V mezinárodním měřítku je hluk považován za jeden z faktorů ohrožující naše životní prostředí a je zpravidla řazen ihned za znečišťování ovzduší a ochranu povrchových vod.

Většina hluků které nás obklopují nepovažujeme za bezprostřední hrozbu, jelikož se nemusí projevovat přímo bolestí nebo jakoukoliv jinou poruchou tělesné funkce.

V současné době se škodlivému působení hluku na lidský organizmus věnuje stále více odborníků jednak z oblasti zdravotnictví, ale i z různých druhů profesí.

Jednou z nejzávažnějších vlastností hluku je ta, že se akustická vlna šíří na poměrně velkou vzdálenost úměrnou s vlastností prostředí, kterým šíří.

V technické literatuře se někdy udává, že hlučnost prostředí, ve kterém se pohybujeme vzrůstá ročně o cca 1 dB. Tento údaj je však velmi hrubý. Současně s technickým vývojem se zvyšují i samotné výkony strojů a technologických zařízení a mezi mechanickým a akustickým výkonem existuje přímá úměrnost [6], [7].

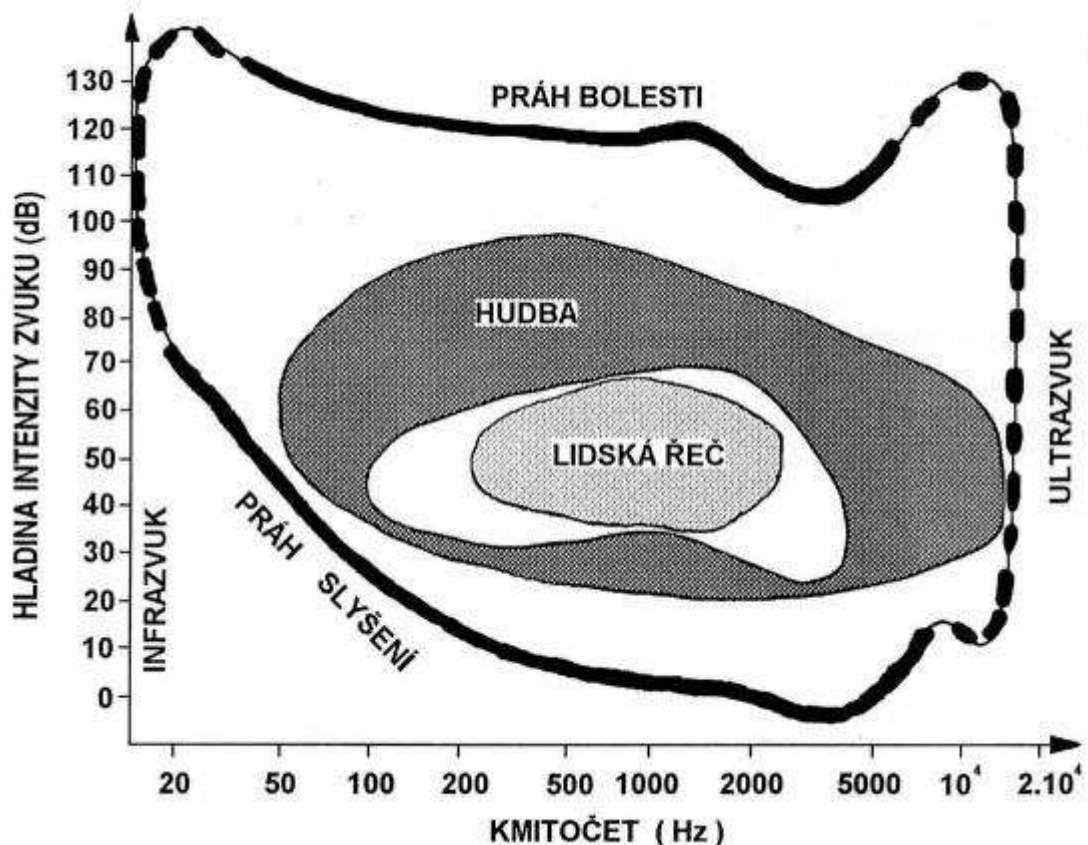
Základním parametrem určujícím účinek zvuku je jeho intenzita. Člověk se necítí dobře v prostředí s velmi nízkou hladinou zvuku. Hodnoty hladin okolo 20 dB považuje spousta lidí za hluboké ticho. Hladina 30 dB je považována za příjemné ticho. Při hladinách nad 65 dB se již začínají projevovat účinky hluku především změnami vegetativních reakcí. Od 85 dB výše již dochází k trvalým poruchám sluchu a ve větší míře se projevují účinky na vegetativní systém a celou nervovou soustavu. Od 130 dB se obvykle účinky hluku mění na bolesti sluchového orgánu. Při hladinách cca 160 dB již dochází k protržení bubínku sluchového orgánu.

Nebezpečnost hluku spočívá hlavně v tom, že člověk jako takový nemá vnější obranné mechanismy a tudíž je proti nadměrnému hluku bezbranný (k ochraně sluchových orgánů se však používají různé ochranné pomůcky).

Problém ochrany zvuku však nespočívá jen v jeho technickém řešení, ale vstupuje zde také ekonomický faktor. To znamená, že u výrobku chráněného protihlukovým opatřením je dražší jeho výroba a o to dražší je i samotný výrobek.

Nadměrný hluk má rovněž negativní vliv na kvalitu a produktivitu práce a významně ohrožuje její bezpečnost. Tyto aspekty následně ovlivňují i hospodářský faktor.

Z těchto důvodů patří hluk k důležitým enviromentálním faktorům, které je důležité nepřehlížet [6], [7].



Obrázek 14: Sluchové pole [8]

Tvar sluchového pole je pro každého člověka individuální. Pole je zdola vymezeno křivkou, popisující práh slyšitelnosti. Seshora pak křivkou prahu bolesti. Zvuky nad tímto

prahem vyvolávají bolestivý vjem a mohou vést k poškození psychiky i samotného sluchového orgánu. Maximální citlivost sluchu spadá do oblasti mezi 500 až 4000 Hz, pro nižší a vyšší frekvence prudce klesá.

Sluchový vjem jako takový přesně nekopíruje fyzikální skutečnost. Zřetelné je to především u vjemu hlasitosti, kde míra podráždění sluchu způsobená zvukem není přímo úměrná této fyzikální energii. Podle Fechner-Weberova zákona hlasitost roste s logaritmem intenzity zvuku. Tato závislost však opět není lineární (je frekvenčně závislá). Jednotkou hlasitosti je fón [Ph] - (odpovídá hodnotě intenzity při referenční frekvenci 1 kHz) [1], [6].

2.1 Zdroje hluku

V zásadě rozlišujeme 2 základní zdroje akustické energie. Jedná se o zdroj mechanický (kmitavý), který může výrazně ovlivnit statiku nejen stroje, ale v horším případě i samotného objektu.

Druhým zdrojem je neustálé proudění plynného nebo kapalného prostředí, což zapříčiňuje on nežádoucí hluk.

- **Kmitavý pohyb**

Jedná se o chvění povrchu těles, jehož kmitavý pohyb je přenášen na další části stroje a obvykle se přenáší i na okolní vzduch. Velikost takto přenášené akustické energie je samozřejmě závislá na velikosti stroje a prostoru, ve kterém se nachází a na veličinách, které charakterizují jeho kmitání.

Tento zdroj akustického kmitání je způsoben zpravidla nevyvážeností příslušného stroje nebo některé jeho součásti zejména rotační. Dále také tvrdými nárazy mechanických částí, nerovnoměrným přenosem a rozvržení sil apod.

- **Proudění**

Druhým a stejně důležitým zdrojem akustické energie je proudění plynného nebo kapalného prostředí. Jedná se o takový zdroj, kde existuje neustálé proudění a kde dochází ke změnám rychlostí a objemů.

Jako typický příklad je ventilátor, čerpadlo, výfuky pístových a proudových strojů, vypouštěcí ventily apod.

Některé stroje vyzařují akustickou energii oběma způsoby jako například elektromotor, který vyzařuje hluk do okolí prostřednictvím chvění svého povrchu a jednak také v důsledku proudění z ventilačního systému, který slouží jako jeho chlazení.

Nadměrný hluk může být generován také ze zdroje, který nemusí být přímo stroj, nebo strojní zařízení, ale také nevhodně navržené větrací šachty, klimatizace nebo topná zařízení.

Hluk tak může být srovnatelný nebo dokonce vyšší než u samotných výrobních strojů.

Opatření která mohou zamezit a eliminovat akustickou energii můžeme shrnout následovně:

- 1) Konstrukční úpravy strojů
- 2) Použití krytů a překážek proti hluku
- 3) Použití tlumičů hluku
- 4) Použití izolátoru chvění
- 5) Použití speciálních materiálů pohlcujících hluk přímo ze zdroje
- 6) Změna technologie
- 7) Vhodné rozmístění zdrojů zvuku v prostoru
- 8) Organizace práce a provozu zařízení [6]

2.2 Metody boje proti hluku

Kromě uvedených závislostí na frekvenci a intenzitě se při vnímání zvuku uplatňuje ještě celá řada dalších jevů. Patří zde adaptace - sluch po určité době působení zvuku ztrácí citlivost (především při působení zvuků velké intenzity nastává částečné "ohluchnutí" - únava sluchu), schopnost znovu slyšet se obnovuje do jedné sekundy, v případě větších intenzit zvuku i po několika minutách až dnech.

Dalším významným jevem je maskování - posloucháme-li současně více zvuků, mohou silnější z nich překrýt slabší natolik, že je nejsme schopni vnímat a ve slyšeném zvuku

rozlišit (na této skutečnosti je založena např. celá oblast záznamu zvuku a jeho komprese mj. známý formát MP3) [1].

Pro eliminaci hluku a následné ochraně sluchového orgánu slouží několik eliminačních metod.

- **Metoda redukce hluku ve zdroji**

Spočívá v úplném odstranění zdroje hluku nebo ve snížení jeho hlučnosti. Např. tlumením vibrací strojních zařízení lze dosáhnout částečného snížení vyzařovaného zdroje hluku strojních zařízení a jedná se o nejlevnější variantu boje proti hluku a je možno ji uplatňovat především u navrhování konstrukcí strojů a technologických zařízení. V neposlední řadě také nahrazení určitého technologického úkonu jiným méně hlučným.

- **Metoda dispozice**

Spočívá ve vhodném umístění hlučných strojů a zařízení (resp. celých hlučných prostorů) od chráněných a méně hlučných prostorů. Této metody se využívá např. při územním plánování, projektování průmyslových zón, dopravních komunikací apod. tak, aby hlučné stroje a provozy neměly negativní vliv na akustickou pohodu v chráněných prostorech (např. školy, školky, sídliště, nemocnice, rekreační zóny apod.). Uvnitř budov to znamená situovat místnosti s vyšším výskytem hluku tak, aby ovlivňovali chráněné místnosti co nejméně.

- **Metoda izolace**

Spočívá ve zvukovém odizolování hlučného stroje, zařízení nebo celého hlučného prostoru od chráněného prostoru prostřednictvím zvukoizolačních příček, stropů, krytů, zákrytů apod. Ve strojírenství se často odhlučňuje způsobem takovým, že se stroj s nadměrnou hlučností uzavře krytem nebo dá do zákrytu, tak aby se co nejvíce zamezilo šíření nežádoucího hluku. Toto opatření je vhodné samozřejmě jen tehdy, má-li stroj nebo zařízení vhodné dispozice a požadavky na prostor ovládnutí a manipulaci.

- **Metoda využívající zvukové pohltivosti materiálů**

Spočívá ve schopnosti některých materiálů a konstrukcí pohlcovat akustickou energii a zamezit tak dalšímu šíření nežádoucí akustické vlny. Aplikuje se především při snižování hlučnosti uvnitř místností.

- **Metoda využívající osobní ochranné pomůcky**

Tj. sluchátka, přilby nebo zvukově tlumicí zátky vkládané do ucha. Tato metoda se aplikuje, pokud z určitých důvodů nelze použít žádnou z předchozích metod nebo jestliže u těchto metod nedojde k dostatečnému snížení hlukové expozice člověka.

V těchto případech musí pracovník využívat osobních ochranných pomůcek, které jsou mnohdy nepříjemné, nicméně funkční a můžou zabránit poškození sluchových orgánů člověka.

Pro nejlepší výsledky v boji proti hluku se s výhodou využívají vhodné kombinace výše uvedených metod. Samozřejmostí je upřednostnění takové metody, která zaručí nejvyšší snížení hluchnosti.

Při budování komplexů (ať místností, budov nebo celých sítí výrobních hal) je nutno akustickými opatřeními počítat již při samotném projektování jednotlivých objektů. Jak již bylo výše zmíněno, se zvyšování nároků na akustické odhlučnění rostou také náklady na realizaci. Tato opatření mají však dlouhodobý vliv jednak na zvýšení životnosti strojů a zařízení (díky eliminaci vibrací způsobené průchodem akustické vlny) a také již zmíněné enviromentální vlivy na člověka.

Při snižování hluku v oblasti konstrukcí strojů je důležité rozeznat a najít zdroj hluku. K tomu nám slouží řada speciálních měřících metod jako je například metoda umožňující rozeznat ten konstrukční díl, který vyzařuje nadměrný hluk, prostřednictvím frekvenční a fázové směrové analýzy. Jako zdroj hluku se může někdy jevit celá část stroje, avšak pomocí zmíněných metod lze přesně určit zdroj a odhlučnit tak jen konkrétní detaily, což může výrazně snížit celkové náklady [6].

2.3 Mechanizmy pohlcování zvuku

Všechny akustické parametry šíření zvukové vlny v uzavřeném prostoru jsou ovlivňovány především povrchem na který dopadají. Základním prvkem jsou akustické obklady, které jsou přizpůsobeny potřebám usměrnění akustické energie. Cílem je dosáhnout větší zvukovou odrazivost, snaha dosáhnout optimálního rozložení zvukové energie (v poslechových místnostech, sálech, atd.), nejčastěji však zvýšení zvukové pohltivosti povrchů [6], [9].

2.3.1 Porézní látky

Principem využití porézních látek jako materiálu pohlcujícího akustickou energii je přeměna této energie na jinou formu energie. Existují základní principy přeměny:

- 1) Přeměna třením - souvisí s třením vzduchu v pórech látky, jejich účinnost závisí na rozměru a množství pórů
- 2) Přeměna relaxační – jsou doprovázeny relaxačním snížením tlaku (vlivem stlačení zvukových vln dojde k lokálnímu zahřátí, pokud jsou stěny pórů vodivé je část tepla odvedena a tím dojde ke snížení tlaku
- 3) Přeměna na principu nepružné deformace těles – u látek s pružnou hysterezí

Množství energie přeměněné na teplo je závislé na amplitudě akustické rychlosti. Na tuhé stěně, která je pod pohltivým obkladem z porézní látky dochází ke vzniku tzv. uzlu akustické rychlosti. Důsledkem toho hodnota činitele zvukové pohltivosti této porézní látky umístěné přímo na tuhé stěně roste se vzrůstajícím kmitočtem. Pro maximální frekvenci pak platí vztah:

$$f = \frac{c}{4d} \quad (2.1)$$

Kde d je tloušťka obkladu v [mm].

2.3.2 Obklady na rezonančním principu

Principem rezonančního obkladu je dopad zvukové vlny na akustický rezonátor, čímž vzniknou tzv. nucené kmity, které dosáhnou svojí maximální amplitudy pro rezonanční frekvenci f_r [Hz]. Pro tuto frekvenci může v závislosti na tlumení rezonátoru dosáhnout činitel zvukové pohltivosti až 1.

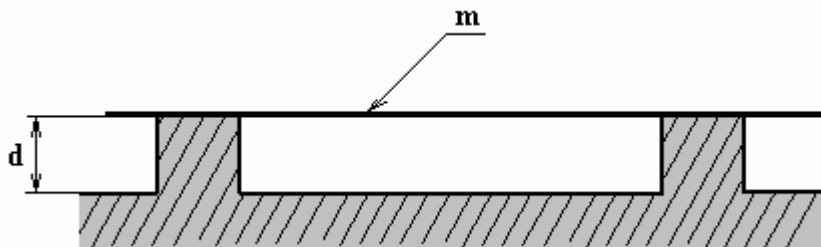
Obklady se dělí dle konstrukce na: kmitající membrány, kmitající desky, kmitající panely nebo Helmholtzovy rezonátory. Důležitou vlastností těchto rezonátorů je především tzv. dozívání. Jedná se o dokmitávání rezonátorů na rezonanční frekvenci po zániku dopadající budící zvukové vlny [6], [9].

- **Kmitající membrána**

Kmitající membrána je tenká deska nebo fólie s malou ohybovou tuhostí upevněná v určité vzdálenosti od tuhé stěny. Rezonanční frekvence pro kmitající membránu je dána vztahem:

$$f_r = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho S}{md}} \quad (2.2)$$

Kde m = hmotnost membrány [kg], S = plocha membrány [m^2], d = tloušťka vzduchové vrstvy [m], ρ = hustota vzduchu.



Obrázek 15: Kmitající membrána [9]

- **Kmitající deska**

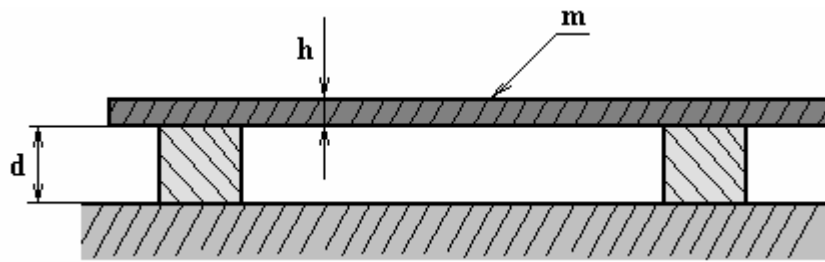
Pro kmitající desky se využívají pro dosažení nižších frekvencí, kde je zapotřebí větších hmotností rezonančních prvků. Vztah pro výpočet vlastní rezonanční frekvence obdélníkové desky o rozměrech $a \times b$ a tloušťce h upevněné na krajích tuhé stěny je ve tvaru:

$$f_{p,q} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho \cdot c^2 \cdot S}{m \cdot d} + \frac{\pi^4 \cdot S}{m} \left[\left(\frac{p}{a} \right)^2 + \left(\frac{q}{b} \right)^2 \right] \frac{E \cdot h^3}{12(1 - \sigma^2)}} \quad (2.3)$$

Kde S = plocha desky [m^2], m = hmotnost desky [kg], E = modul pružnosti desky,

σ = Poissonova konstanta elastická konstanta, d = vzdálenost desky od stěny [m],

$p, q = 1, 2, \dots$ mód kmitů.



Obrázek 16: Kmitající deska [9]

- **Helmholtzův rezonátor**

Využívá se pro tlumení zvukových vln o velkém rozsahu rezonančních frekvencí. Jsou vhodné pro pohlcování zvuku i ke konstrukci akustických filtrů. Vztah pro výpočet malého tlumení rezonanční frekvence je ve tvaru (se zanedbáním akustického odporu R_a):

$$f_r = \frac{c \cdot S}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho}{mV}} \quad (2.4)$$

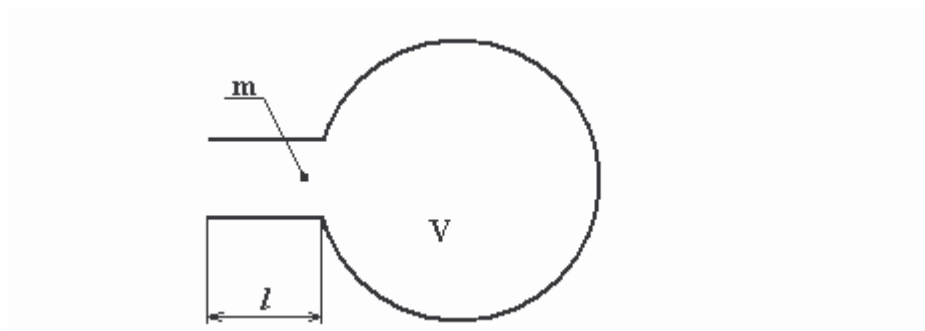
Kde V = objem [m^3].

Vztah pro vyšší rezonanční frekvence s zanedbáním akustického odporu:

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{M_a C_a} - \left(\frac{R_a}{2M_a}\right)^2} \quad (2.5)$$

Kde $M_a = \frac{m}{S^2}$ = akustická hmota kmitajícího vzduchu, $C_a = \frac{V}{\rho \cdot c^2}$ = akustická poddajnost

dutiny, $R_a = \frac{\rho \cdot f^2}{c}$ = akustický odpor.



Obrázek 17: Helmholtzův rezonátor [9]

- **Děrované panely**

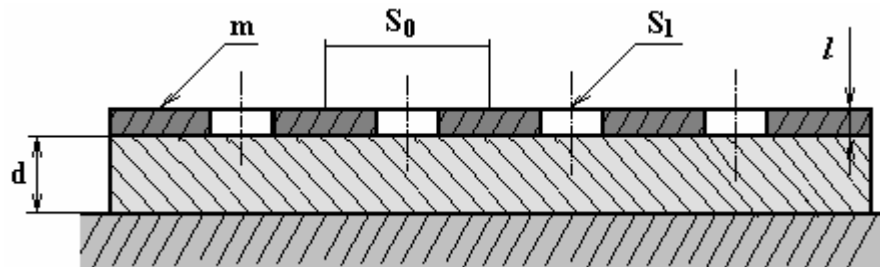
Nejčastěji používaných v praxi jsou tzv. děrované panely. Jejich konstrukce spočívá v tuhé desce o určité tloušťce s otvory ve vzdálenosti d od tuhé stěny.

Vztah pro výpočet rezonanční frekvence je ve tvaru:

$$f_r = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{\varepsilon}{l_e d}} \quad (2.6)$$

Kde $\varepsilon = \frac{S_1}{S_0}$ = činitel děrování, S_1 = plocha otvoru nebo drážek [m^2], S_0 = plocha stěny [m^2],

$l_e \approx l + 0,8\sqrt{S}$ = efektivní délka [9].



Obrázek 18: Děrový panel [9]

2.4 Útlum chvění v konstrukcích

Jak bylo výše řečeno, hluk se projevuje jako vyzařování určitého akustického výkonu. Z hlediska boje proti hluku jsou nejdůležitější frekvence, které vnímá lidský sluchový orgán. Tyto frekvence samozřejmě působí i jako zdroj, způsobující chvění v konstrukcích. Proto je jakýkoliv útlum chvění velmi pozitivní. Vyzařovaný akustický výkon je možno utlumit základním omezením v podobě:

- 1) Snížení amplitudy chvění vyzařující plochy
- 2) Zmenšení vyzařujících ploch
- 3) Zkrácení doby vyzařování

Dalším nepříznivým faktorem z hlediska hluku je amplituda chvění. K útlumu této amplitudy slouží řada konstrukčních detailů, které spojují místo budící síly a vyzařující plochy.

- **Útlum chvění odrazem**

K částečnému odrazu chvění dochází u takových částí konstrukcí, kde je tzv. diskontinuita (změna průřezu, materiálu, ohyb nebo rozvětvení). Dopadem zvukové vlny na tuto diskontinuitu dojde k odrazu a částečnému přestupu akustické energie (obr 13: Šíření zvukové vlny po dopadu na pevnou stěnu). Velikost této energie můžeme popsat součinitelem přestupu akustické energie d , který je definován poměrem mezi dopadající a prošlou energií:

$$d = \frac{I_2}{I_+} \quad (2.7)$$

Kde I_2 = intenzita prošlého chvění [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$], I_+ = intenzita dopadajícího chvění [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$]. Pro řešení musí v místě rozhraní platit 2 podmínky: rovnováha napětí, kontinuita rychlosti chvění.

Jednoduchým dosazením a úpravou vztahu (2.7) získáme výraz:

$$d = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \quad (2.8)$$

Kde Z_1, Z_2 = mechanická impedance [$\text{s} \cdot \text{m}^{-3}$].

$$Z_n = \rho_n c_{Ln} \quad (2.9)$$

Na základě součinitele přestupu lze vypočítat přenosový útlum D [dB] definovaný vztahem:

$$D = 10 \log \frac{1}{d} \quad (2.10)$$

Dosazením získáme vztah:

$$D = 10 \log \frac{(Z_1 + Z_2)^2}{4Z_1Z_2} \quad (2.11)$$

- **Útlum zvuku na rozhraní dvou prostředí**

Ze vztahu (2.11) lze vyčíst, že při rovnosti impedancí $Z_1 = Z_2$ bude útlum D nulový. V případě velkého rozdílu impedancí bude úměrně velký i útlum.

V případě, že neznáme jednotlivé mechanické impedance platí vztah:

$$D = 10 \log \frac{(\rho_1 c_{L1} + \rho_2 c_{L2})^2}{4 \rho_1 c_{L1} \rho_2 c_{L2}} \quad (2.12)$$

- **Útlum při změně průřezu tyče nebo desky**

Pro útlum podélného vlnění v tyči nebo desce platí vztah :

$$D = 10 \log \frac{(S_1 + S_2)^2}{4 S_1 S_2} \quad (2.13)$$

Kde $S_1, S_2 =$ průřezy tyče nebo desky [m^2]. Pro běžné změny průřezů jsou však změny útlumu akustického výkonu poměrně malé.

- **Útlum při použití hradících hmot**

Těchto konstrukčních dílů se využívá přímo při navrhování strojních konstrukcí. Hradící hmota příznivě zvyšuje moment setrvačnosti a tím také frekvenčním pásmo tlumení. Hradící hmota však musí sledovat kmitání desky a je třeba zajistit jejich plné spojení. Tyto prvky tlumí hlavně ohybové kmitání [6].

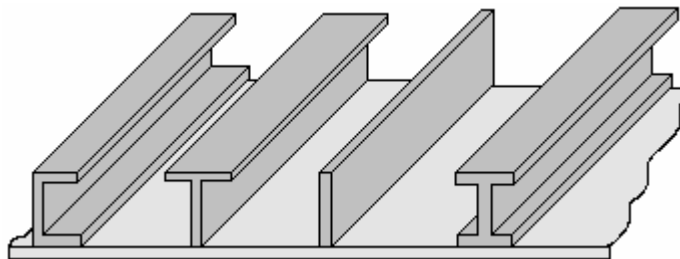
Platí vztah:

$$D = 10 \log \frac{\pi \cdot m_0}{\lambda_B \cdot m} \quad (2.14)$$

Kde $m =$ hmotnost 1 m^2 desky [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$], $m_0 =$ hmotnost 1 m hradící hmoty [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$].

Útlum podélných vln je podstatně nižší a platí pro něj vztah:

$$D = 10 \log \left(1 + \frac{\omega \cdot m_0}{2m \cdot c_{L1}} \right) \quad (2.15)$$



Obrázek 19: Různé druhy hradících hmot [6]

2.5 Protihlukové bariéry/panely

Význam a vůbec smysl protihlukových bariér/panelů je hlavně ve snížení nežádoucích enviromentálních vlivů na člověka. Nejčastěji se s těmito bariérami můžeme setkat u silnic a dálnic, kde chrání okolní obyvatele od nežádoucího a velmi nepříjemného hluku. Existuje spousta druhů protihlukových bariér lišící se především v materiálovém složení a konstrukčních řešeních.

Každý používaný konstrukční materiál má své specifické vlastnosti. Běžně používané materiály jsou tak na bázi železobetonu, dřeva, kovových tabulí, plastových recyklátů, průhledných akrylátových nebo polykarbonátových skel. Můžeme se setkat také s přírodními bariérami v podobě zemních valů, kamenů sestavených do drátěných gabionů případně porostlých vegetacích.

• Požadavky na protihlukové bariéry

Konstrukční požadavky musí odpovídat specifikacím, které podléhají normám ČSN. Přesněji se jedná o normu ČSN EN 14388 (737063) Zařízení pro snížení hluku silničního provozu [14].

- Zvuková pohltivost označována dle ČSN DL_{α} by měla pro nejvyšší třídu přesahovat hodnotu 11 dB. V kategorii o stupeň nižší 8 – 11 dB.
- Vzduchová neprůzvučnost označována dle ČSN DL_R by měla pro nejvyšší kategorii přesahovat hodnotu 23 dB.
- Odolnost vůči chemickým rozmrazovacím posypovým látkám.
- Odolnost vůči mrazu, vodě a různým škůdcům.
- Ohnivzdornost
- Hmotnost dílce při délce 4m a výšce 1,5 – 2 m pod 800 kg.
- Osazení s minimálními mezerami, spárami a netěsnostmi v konstrukci.
- Odolnost celé konstrukce vůči zatížení větrem [14].

3 AKUSTICKÉ MODELY

Problematika spojená s vlastnostmi fyzikálních veličin a jejich popisem pomocí příslušných vztahů je jednou z možností řešení této problematiky. Vztahy se však ve většině případů využívají k výpočtům v tzv. laboratorních úlohách s využitím obecných hodnot veličin a výsledky se od reálných soustav mohou lišit.

K větší specifikaci se s výhodou využívají tzv. matematické modely, které dokáží danou problematiku podrobně popsat a díky tomu získat přesnější popis celého reálného systému. Tyto metody jsou však daleko náročnější jednak na čas, výpočetní postupy, ale i na hardwarové zatížení počítače.

Podle různých způsobů algoritmů řešení se rozdělují modely na dva základní: deterministické a statistické.

3.1 Deterministické modely

Deterministické modely jsou charakterizovány diferenciálními rovnicemi druhého řádu. Maticový zápis těchto rovnic je standardně ve tvaru:

$$M \cdot \ddot{q} + B \cdot \dot{q} + K \cdot q = f \quad (3.1)$$

Pro výpočet těchto rovnic se používá jedna z metod konečných prvků (MKP), která je vhodná pro modelování struktury strojů a akustického prostředí. Druhou a složitější metodou je metoda hraničních elementů (MHE), která je definována na povrchu kmitající struktury.

Odezvy v čase takových modelů vyžaduje řešení velkého počtu diferenciálních rovnic a použití vhodných integračních metod. Proto jsou náročné i na hardwarové vybavení řešitele. Časy pro výpočet jsou neúměrně dlouhé, a proto vyžadují rozsáhlou paměť počítačů. Řešení odezev ve frekvenční oblasti se převádí na řešení soustavy algebraických rovnic o stejném počtu.

Tradiční analýza mechanických kmitů (tím i hlučnost strojních zařízení) pomocí těchto modelů je zaměřena spíše na několik nízkých rezonančních tvarů kmitů. Tvary těchto kmitů vykazují největší odezvy ve výchylkách při nižších budících frekvencích. Frekvenční odezvy s vyššími frekvencemi již deterministická metoda vyhodnocuje méně

spolehlivě a nepřesně. Přesnější měření totiž vyžaduje menší frekvenční kroky, což následně prodlužuje výpočtové časy.

Velkou výhodou deterministických modelů je to, že poskytuje konkrétní odpovědi o konkrétních frekvenčních složkách, které nejvíce přispívají do celkové hladiny hluku.

Základními vlastnostmi deterministických modelů jsou:

- Popis pomocí soustavy pohybových (diferenciálních) rovnic
- Požadavek na vysoký počet stupňů volnosti (většinou použití MKP)
- Výpočet vyšších frekvenčních odezev je zatížen chybou
- Použitelné pro oblast nižších frekvencí
- Lze sledovat akustickou odezvu systému při dané frekvenci [7].

3.1.1 Metoda konečných prvků (MKP)

Pro řešení řady technických úloh je vhodné akustické prostředí modelovat pomocí MKP. K nejčastějším úlohám tohoto typu patří především řešení vnitřní akustiky uzavřených prostorů, dutin, kabin dopravních prostředků.

Podmínkou modelování akustického prostředí je, aby na délce akustické vlny bylo alespoň 6 akustických prvků. Pro splnění podmínky musí platit vztah pro maximální délku akustických prvků:

$$l_{MAX} \leq \frac{\lambda}{6} = \frac{1}{6} \cdot \frac{c}{f} \quad (3.2)$$

Z rovnice vyplývá, že délka akustických vln je závislá na frekvenci daného vlnění v akustickém prostředí. Pro šíření akustických vln v akustickém prostředí platí Helmholtzova rovnice v prostoru.

$$\nabla^2 p + k^2 p = 0 \quad (3.3)$$

Kde $k = \frac{\omega}{c}$ je vlnové číslo.

Akustické pole lze vyjádřit jako lineární kombinace polynomiální tvarové funkce N a diskretních tlaků v uzlech:

$$p = p_j N_j \quad (3.4)$$

Kde p_j = aproximativní hodnota tlaku v uzlu j , N_j = tvarová funkce vázaná s uzlem j .

Výsledná maticová pohybová rovnice akustického systému zapsaná ve frekvenční oblasti bude ve tvaru:

$$\{K - \omega^2 M + i\rho\omega B\}p = -i\rho\omega F \quad (3.5)$$

$$\text{Kde } K \text{ je matice tuhosti s prvky } K_{ij} = \int \partial_k N_i \partial_k N_j dV \quad (3.6)$$

$$M \text{ je matice hmotnosti s prvky } M_{ij} = \int \frac{N_i N_j}{c^2} dV \quad (3.7)$$

$$B \text{ je matice tlumení s prvky } B_{ij} = \int_{S_3} A_n N_i N_j dS \quad (3.8)$$

A_n = admitance povrchu na ploše S_3 , F je sloupcový vektor zatížení akustického prostoru s

$$\text{prvky } F_{ij} = \int_{S_2} \bar{v}_n N_i dS \quad (3.9)$$

\bar{v}_n = normálová složka rychlosti. Sloupcový vektor p je soubor neznámých akustických tlaků v uzlových bodech modelu konečného počtu prvků. Z rovnice (3.5) vyplývá také definice tvarů kmitů akustického prostoru. Tvary kmitů zobrazují rozložení akustických tlaků v prostoru akustického systému [7].

3.1.2 Metoda hraničních elementů (MHE)

Výhodou metody je především to, že dokáže předpovědět vyzařovaný hluk ze struktury, odezvu uzavřených akustických systémů, u komplexních systémů přenosové ztráty. K výpočtům se užívají jednoduché analytické prostředky. MHE se lze použít pouze na akustické systémy.

Existují dvě metody řešení hraničních elementů (HE): přímá a nepřímá metoda.

- **Přímá metoda HE**

Generování modelu je jednoduché, jelikož se vztahuje pouze na rozhraní akustického subsystému. Analýza akustického média je buď to z interiéru nebo z exteriéru nikoliv zároveň. V modelu by se neměli vyskytovat volné hrany. Je možná analýza modelů s více zónami. Vnitřní otvory mohou být modelovány za použití více-zónové aproximace.

- **Nepřímá metoda HE**

Stejně jako u přímé metody se zaměřuje pouze na akustický subsystém. Akustická odezva je řešena na obou stranách současně. Tenká žebra a otvory mohou být modelovány jako jednovrstvé elementy. Je možná vázaná analýza, lze tak vyhodnocovat přenosové ztráty jednotlivými subsystémy. Lze provádět pouze jedno-zónovou analýzu [7].

3.2 Statistické modely

U předchozí deterministické metody se uvažovalo o využití při nižších frekvencích. Statistická metoda se zaměřuje na struktury povrchu typu stěna, stropy a hlavně tenkostěnné strojní konstrukce, u kterých dochází k vyzařování akustické energie při vyšších frekvencích. Tyto systémy je potřeba analyzovat vyššími řády modální analýzy za účelem předpovědi strukturální únavy, defektům zařízení a také generování hluku. Pro struktury těchto vlastností byla vyvinuta nová metoda pracující se statistickými modely. Nazývá se statistická energetická analýza (SEA) a je jednou z metod použitelných pro vyšší frekvence.

Oproti předchozí metodě se k řešení odezvy využívá stejný počet algebraických rovnic jako je počet subsystémů. Model je pak popsán soustavou simultánních lineárních rovnic.

3.2.1 Statistická energetická analýza (SEA)

Modely SEA rozloží systém na jednotlivé subsystémy se stejnými typy modů, se kterými dále pracuje. Model je založen na vzájemné rovnováze dynamické energie a toků výkonu mezi skupinami subsystémů. Každá ze skupin modů má jeden stupeň volnosti tzv. střední energetickou odezvu. Rozložení dynamické odezvy v systému je tak získáno z rozložení energie mezi skupinami modů. U metody SEA jsou mody analyzovány ve skupinách, tedy modů jednotlivých subsystémů, což vede k redukci stupňů volnosti oproti deterministické metodě. Díky této metodě lze identifikovat přenosové cesty od zdroje a vyšetřovat tak tzv. slabá místa (z hlediska šíření vlnění akustickým systémem) [7].

Základními vlastnostmi využití modelu SEA jsou:

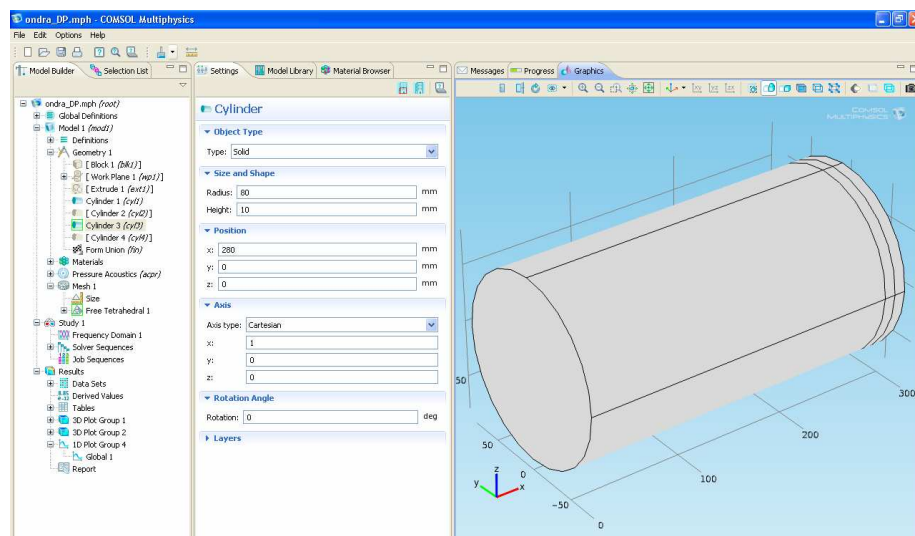
- Poskytuje jednoduše orientované výsledky (vyzařovaný výkon, atd.)
- Nízký počet stupňů volnosti
- Popis systémů realizován soustavou algebraických rovnic

- Přesnost řešení vzrůstá se zvyšující se frekvencí
- Popis modelu je vyjádřen několika vlastnostmi modálního modelu
- Umožňuje vyhodnotit rozložení energií mezi subsystémy
- Umožňuje identifikovat hlavní zdroje buzení systému

3.3 Modelování v COMSOL MULTIPHYSICS

Tento programovací nástroj sloužící pro simulaci matematického modelu obsahuje rozsáhlou knihovnu fyzikálních matematických modelů. Díky jeho variabilitě ho lze použít k řadě řešení problematiky týkající se fyzikálních vlastností. Mnohé z nich lze pomocí knihovny obsahující již hotové modely po úpravách aplikovat na konkrétní problematiku. Rozsáhlá knihovna materiálů nabízí nepřehledné množství různých materiálů od samotných prvků, minerálů po slitiny a kombinace plastů.

Díky příjemnému uživatelskému prostředí se lze poměrně rychle v programu zorientovat, nutností jsou však odborné znalosti v oboru týkající se řešení dané problematiky. Pracovní prostředí je rozděleno na tři pole, kde na levé straně je stromová struktura s možností nastavení konkrétního problému, vykreslení grafů, provedení výpočtu atd. V následující poli je možnost zadávání potřebných hodnot, knihovna modelů a materiálů. Poslední pole vykresluje vytvořený model a výsledné grafy. Ukázka uživatelského prostředí je na snímku [20] níže. Nevýhodou jsou vysoké nároky na grafiku a procesor kvůli vykreslování a složitým početním operacím [18].



Obrázek 20: Ukázka uživatelského prostředí COMSOL MULTIPHYSICS

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 VÝROBA VZORKŮ

Cílem mé diplomové práce bylo vytvořit vzorky z materiálu desek plošných spojů (DPS) získaného procesem recyklace. DPS jsou vyrobeny z materiálů, které dokáží poměrně dobře akusticky a tepelně izolovat. Materiál na výrobu desek musí splňovat určitá kritéria, která se odvíjí především od požadavků výrobce. Jedním z nejdůležitějších kritérií je tzv. stupeň zahoření označovaný odborně jako FR (Flame Rezist).

Výpočetní nároky se zvyšují a úměrně s nimi se zvyšují i pracovní teploty jednotlivých zařízení a komponent. DPS tak musí odolat vysokým teplotám, aby nedošlo k jejich poškození. Další a neméně důležitou vlastností je frekvenční tuhost. Materiál desek musí být schopen přenést vysoké frekvence způsobující vibrace a mohou velmi výrazným způsobem poškodit funkčnost zařízení či jeho nepřesnost [10].

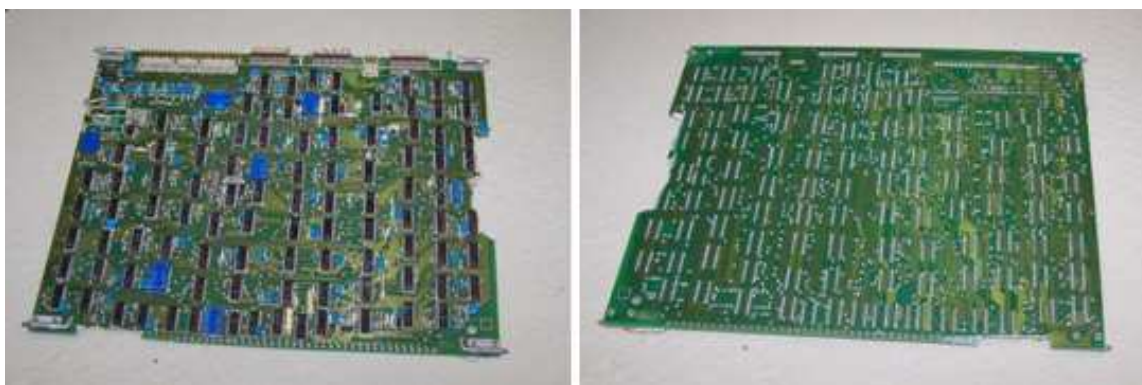
Těchto vlastností jsem využil k možnosti výroby zvukově a tepelně izolačních panelů, kterými jsem se zabýval i ve své bakalářské práci [11], [16].

4.1 Příprava materiálu

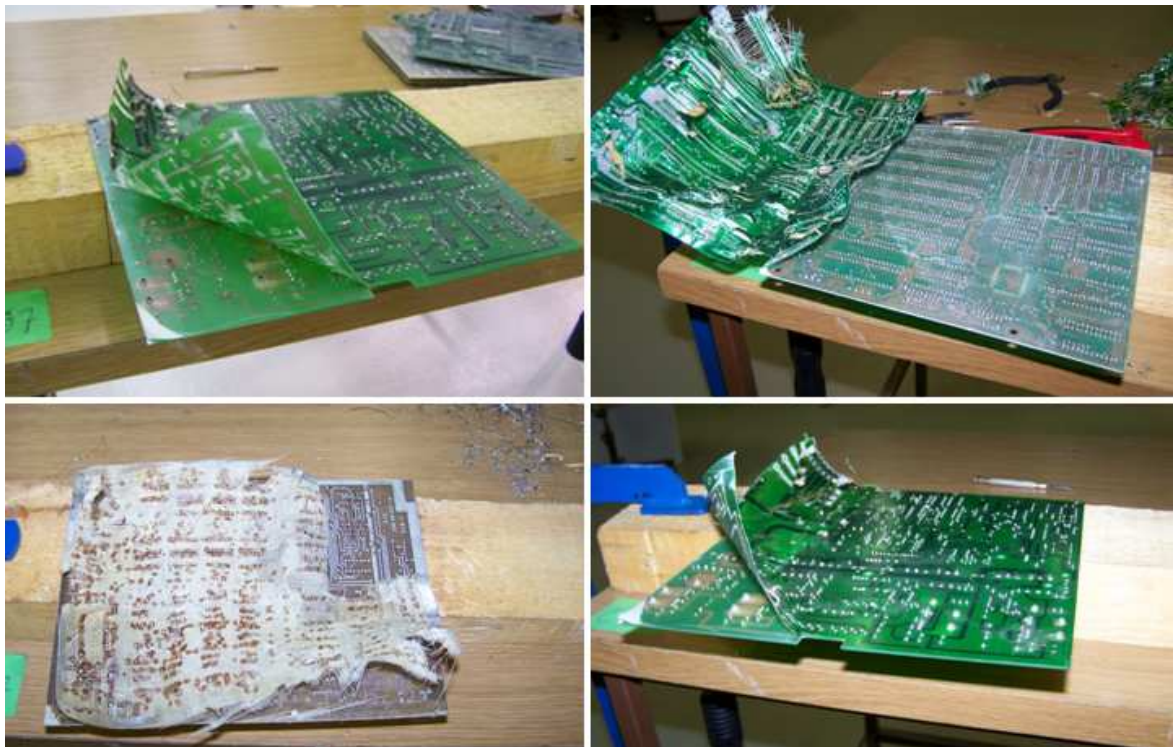
Za přípravou materiálu k výrobě vzorků z DPS bylo spoustu hodin práce v laboratoři a snaha získat materiál s co nejmenším obsahem kovu. K dispozici jsem měl jednovrstvé a oboustranné DPS bez komponent. Po konzultacích a pokusech docílit čistého materiálu byl za nejvhodnější způsob zvoleno zahřátí nejvrchnější síťové vrstvy DPS tavnou pistolí.

Touto technologií jsem oddělil vrchní část se zbytky cínu a vodivých cest od samotné desky. Zbylé pokovení průchozích děr jsem odstranil ručně pomocí kleští.

Na snímcích níže je znázorněn postup oddělování vrchní vrstvy DPS.



Obrázek 21: DPS zleva s komponenty, bez komponent



Obrázek 22: Postup oddělení vrchní vrstvy s obsahem kovu

Touto metodou jsem získal DPS bez měděných vodivých cest a zbytku cínu.

Čisté hmotnosti jednotlivých DPS jsou uvedeny v tabulce 6 níže.

Číslo	Hmotnost m_0 před separací [g]	Hmotnost m po separaci [g]	Rozměry [cm]	Čistý materiál [%]
1	50,49	33,05	13,5 x 13,0	65
2	47,59	30,21	13,5 x 13,0	63
3	48,14	30,35	13,5 x 13,0	63
4	47,24	30,06	13,5 x 13,0	64
5	46,43	30,82	13,5 x 13,0	66
6	185,61	133,72	21,3 x 22,0	72
7	132,86	89,53	24,0 x 17,0	67
8	111,05	49,95	23,5 x 16,5	45
9	186,40	130,53	23,5 x 22,5	70
10	126,81	91,74	23,5 x 16,0	72
11	116,94	85,34	23,5 x 17,0	73
12	125,53	90,17	24,0 x 17,0	72
13	87,69	62,47	24,0 x 13,5	71
14	135,23	93,34	24,0 x 20,0	69
15	116,01	88,11	23,5 x 17,0	76
			Průměr	67

Tabulka 6: Hmotností desek před a po separaci

Odseparované desky jsem následně nastříhal pákovými nůžkami na přibližnou velikost 3x3cm kvůli dalšímu zpracování drtičem. Drcení jsem provedl společně s Ústavem inženýrství polymerů Fakulty technologické, UTB. Pomocí drtiče Fritsch Pulverisette 19 (velikost síta 3mm) jsem získal drť o celkové hmotnosti 1111,9g.



Obrázek 23: Drtič Fritsch Pulverisette 19 [15]

4.2 Separace drti

Společně s Bc. T. Goňou [13] a spoluprací s Ústavem výrobního inženýrství Fakulty technologické, UTB jsme provedli roztřídění drti na 4 druhy s rozdílnou zrnitostí. Třídění proběhlo manuálně pomocí tří sít s různou velikostí oček. Separace se tak skládala celkem ze tří fází. V první fázi jsme získali nejhrubší směs s průměrnou zrnitostí 3mm. V druhé fázi jsme použili síto s velikostí oček 1,5mm. Poslední třetí fázi jsme pomocí síta se zrnitostí 0,5mm získali jemnou a práškovou drť. V tabulce 7 jsou uvedeny příklady jednotlivých drtí, jejich hmotnosti a procentuální obsah z celkového množství.

Drť	Zrnitost [mm]	Hmotnost [g]	Hmotnost z celkového množství [%]
Hrubá	3	529,4	52
Středně hrubá	1,5	186,1	18
Jemná	1	189,4	19
Prášková	-	117,7	12
	Σ	1022,6	

Tabulka 7: Hmotnosti jednotlivých drtí

Takto připravenou drť jsem následně použil k výrobě jednotlivých vzorků.

Na snímcích [24] – [27] níže jsou zobrazeny jednotlivé drtě.



Obrázek 24: Hrubá drť



Obrázek 25: Středně hrubá drť



Obrázek 26: Jemná drť



Obrázek 27: Prášková drť

4.3 Lisování vzorků

Ve své bakalářské práci jsem použil jako spojovací materiál HYKOL, který je produktem recyklačního procesu činěných kožedělných odpadů. Jedná se o bílkovinný hydrolyzát získaný z tzv. postružin procesem enzymové hydrolýzy. Je tak čistě přírodním produktem a není nijak škodlivý k životnímu prostředí [12], [16].

Nespornou výhodou HYKOLU je relativně dobrá adhezivní vlastnost. Ve své čisté formě je však rozpustný ve vodě a pro praktické využití při výrobě protihlukových panelů nevhodný. Pro použití HYKOLU jako vodě-odolného pojiva jej bylo potřeba modifikovat síťováním. Panely vyrobené tímto modifikovaným HYKOLEM budou mít schopnost odolávat i vlhkému prostředí. Principem síťování bylo vytvořit roztok 30% HYKOLU, kyseliny ftalové a krotonaldehydu. Níže je uvedena tabulka 8 hmotností jednotlivých složek na 50g HYKOLU. Problematika síťování HYKOLU a podrobnější popis modifikace je uvedena v práci [13].

Látka	Navážka [g]
HYKOL	50
K. Ftalová	0,075
Krotonaldehyd	4,5

Tabulka 8: Navážka modifikovaného HYKOLU

Při práci s krotonaldehydem bylo nutné dbát na zvýšenou opatrnost a nepotřísnit či jej vdechnout. Jedná se o velmi těkavou a čpějící látku, která může způsobit nepříjemné pálení v oblasti úst a očí.

Nezbytnou součástí lisování bylo potřeba vyrobít formy kruhového průřezu o požadovaných rozměrech 100_{-1}^0 mm a 30_{-1}^0 mm pro testování akustických vlastností materiálů na Kundtově impedanční trubici.

Formy jsem vyráběl z duralu osobně ve spolupráci s Ústavem výrobního inženýrství Fakulty technologické, UTB.



Obrázek 28: Formy pro lisování vzorků zleva malá, velká

Před lisováním bylo nutné smíchat drť s vytvořeným lepidlem. Množství složek pojiva a drti jsem zjistil experimentálně z předchozích zkušeností z bakalářské práce [11], [16]. Celkově jsem vyrobil 8 vzorků, ze kterých byly 4 vzorky o průměru 100_{-1}^0 mm a 4 vzorky o průměru 30_{-1}^0 mm od jednotlivých zrnitostí drti.

Každou z drtí jsem navážil tak, aby výška drti ve formě byla přibližně 15mm. Míra stlačení se však v laboratorních podmínkách nedala přesně určit. Mým cílem však byla snaha vyrobit výlisek o přibližné tloušťce 10mm.

Jako první jsem vyráběl vzorky většího průměru. V tabulce 9 jsou uvedeny hmotnosti jednotlivých složek a konečná váha vylisovaného vzorku o průměru 100mm.

Drť	Ø [mm]	Množství drti [g]	Množství pojiva [g]	Celková hmotnost vzorku po vylisování [g]
Hrubá	100	67,466	25,367	85,159
Středně hrubá	100	67,915	26,827	73,208
Jemná	100	58,587	26,399	65,320
Prášková	100	59,206	38,946	66,119

Tabulka 9: Množství drti a lepidla vzorků o průměru 100mm

V tabulce 10 jsou uvedeny hmotnosti složek při výrobě vzorků o menším průměru 30mm.

Drť	Ø [mm]	Množství drti [g]	Množství pojiva [g]	Celková hmotnost vzorku po vylisování [g]
Hrubá	30	6,131	2,782	6,381
Středně hrubá	30	5,691	2,274	5,929
Jemná	30	5,892	3,170	5,973
Prášková	30	5,119	4,552	5,468

Tabulka 10: Množství drti a lepidla vzorků o průměru 30mm

Na vzorky jsem použil vždy stejnou technologickou metodu. Po navážení drti a pojiva jsem obě suroviny smíchal (kvůli bezpečnosti v odvětrávané digestoři). Na formy jsem nanesl film separačního spreje bez příměsi silikonu, aby nedošlo k zapečení materiálu do formy a jeho znehodnocení. Formu jsem položil na kovovou desku, na kterou jsem taktéž nanesl separační sprej. Připravenou směs drti a pojiva jsem rovnoměrně rozprostřel do formy a přiklopil její vrchní částí.

Samotné lisování jsem prováděl na lisu s nastavením horní a spodní topné desky v rozmezí teplot od 0°C do 200°C. Teplotu obou desek jsem nastavil jednotně na 150°C kvůli síťování pojiva. Teplota síťování byla experimentálně zjištěna na základě studia [13]. Velikosti jednotlivých vzorků z různých drtí jsou uvedeny v tabulce 11.

Drť	100 mm		30 mm	
	Ø [mm]	Tloušťka [mm]	Ø [mm]	Tloušťka [mm]
Hrubá	99,1	9,9	29,0	8,6
Středně hrubá	99,2	9,5	29,0	7,2
Jemná	99,2	9,2	29,0	7,5
Prášková	99,2	9,4	29,0	7,6

Tabulka 11: Rozměry jednotlivých vzorků



Obrázek 29: Pracoviště pro lisování vzorků

Doba lisování byla vždy stejná a to 1h. Po uplynutí této doby jsem nechal formu zchladnout a vyndal vzorek. Výsledky jsou na snímcích níže.



Obrázek 30: Vzorky z hrubé drti



Obrázek 31: Vzorky ze středně hrubé drti



Obrázek 32: Vzorky z jemné drti



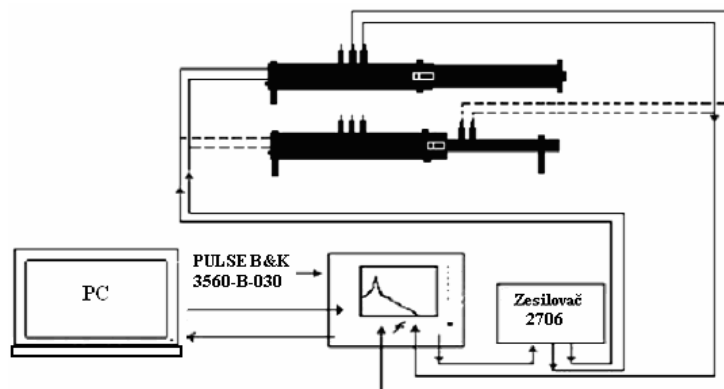
Obrázek 33: Vzorky z práškové drti

5 TESTOVÁNÍ VZORKŮ

Hlavním cílem a důvodem, proč jsem vytvářel vzorky byl zjistit, zda je tento druh elektroodpadu vhodný jako zdroj materiálu pro výrobu protihlukových bariér. Samotné testování vzorků jsem realizoval ve spolupráci s Ústavem fyziky a materiálového inženýrství Fakulty technologické, UTB.

5.1 Princip měřícího zařízení

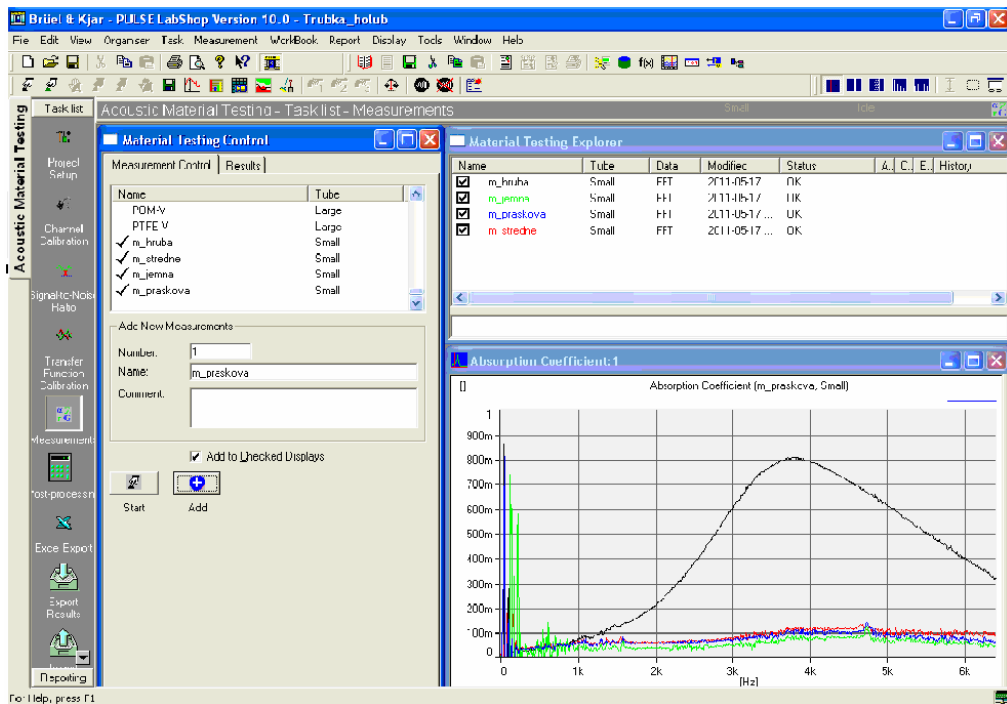
Měření akustických vlastností, přesněji – koeficientu zvukové pohltivosti α jsem měřil na sestavě pro měření součinitele zvukové pohltivosti a odrazivosti. Součástí tohoto speciálního zařízení je Kundtova impedanční trubice (malá $\varnothing 30\text{mm}$, velká $\varnothing 100\text{mm}$), generátor zvukového signálu Brüel & Kjær 2706, dvoukanálový analyzátor PULSE Brüel & Kjær 3560-B-030. Samozřejmě je také připojení přes sériovou linku k PC a aplikační program BZ 5050 [11], [16], [17]. Schéma zapojení měřícího zařízení je na obrázku [34].



Obrázek 34: Schéma zapojení měřícího zařízení

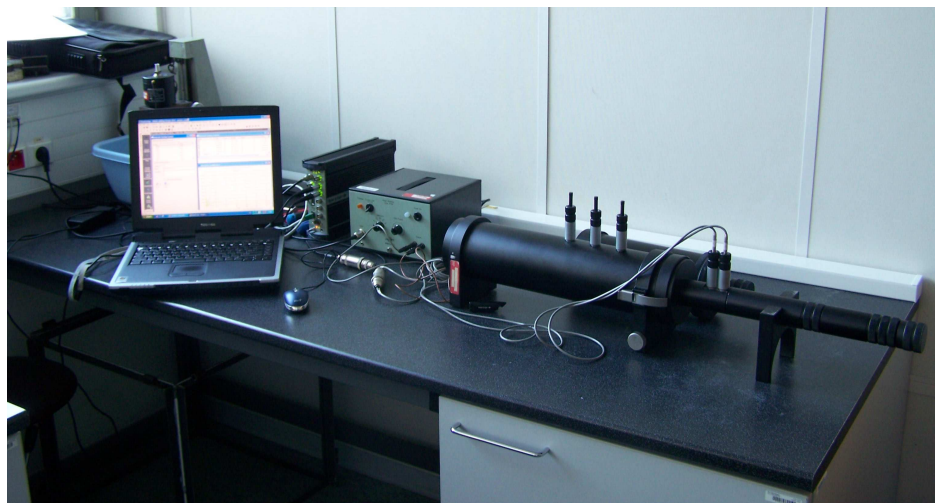
Kundtova impedanční trubice měří koeficient zvukové pohltivosti α v závislosti na budící frekvenci. Ta je v rozsahu od 16 Hz do 6,4 kHz. Přičemž malá trubice je určena pro měření frekvencí od 64 Hz do 6,4 kHz a velká trubice pro frekvence od 16 Hz do 1,6 kHz.

Součástí trubice jsou dva mikrofony spojené s analyzátozem PULSE B&K 3560-B-030. Mikrofony jsou umístěny mezi zdrojem zvuku a testovaným vzorkem. První mikrofón snímá intenzitu signálu vyslaného zdrojem těsně před vzorkem, druhý mikrofón intenzitu akustické vlny, která byla vzorkem odražena [11], [16], [17].



Obrázek 35: Prostředí LapShop verze 10.0

Před vlastním měřením bylo nutné nejprve zařízení nakalibrovat. Měření jsem u každého ze vzorků provedl pětkrát s nulovou, centimetrovou a dvoucentimetrovou vzduchovou mezerou mezi vzorkem a akusticky pevnou stěnou měřící trubice. Získané hodnoty jsem zprůměroval a zkomponoval frekvence do jednoho grafu. Získaná data jsem vyhodnotil pomocí příloženého programu Brüel & Kjær – PULSE LabShop verze 10.0 a exportoval do MS Excelu.



Obrázek 36: Měřící pracoviště

5.2 Vyhodnocení naměřených výsledků

Měřeních jsem provedl pro každou z drtí celkem 5 a to s nulovou, jednocentimetrovou a dvoucentimetrovou vzduchovou mezerou v rozsahu 64 Hz až 6,4 kHz. Získaná data jsem zprůměroval a exportoval do MS Excel, vyhodnotil a zaznamenal do grafu. Z naměřené frekvenční závislosti koeficientu zvukové pohltivosti byl také vyhodnocen koeficient redukce hluku (Noise Reduction Coefficient - NRC), který udává míru absorpce α v nejdůležitějším frekvenčním rozmezí pro lidský sluch. Stejně jako pro koeficient akustické pohltivosti nabývá hodnot v intervalu $\langle 0;1 \rangle$. Přičemž pro hodnotu 1 absorbuje materiál nejlépe a naopak.

Platí vztah (5.1):

$$NRC = \frac{\alpha_{250} + \alpha_{500} + \alpha_{1000} + \alpha_{2000}}{4} \quad (5.1)$$

V tabulce 12 jsou uvedeny jednotlivé NRC pro všechny druhy drtí a vzduchové mezery mezi vzorkem a akusticky pevnou zadní deskou.

Vzorek	NRC		
	0 cm	1 cm	2 cm
Hrubá drť	0,234	0,349	0,429
Středně hrubá drť	0,046	0,113	0,241
Jemná drť	0,048	0,091	0,294
Prášková drť	0,137	0,266	0,239

Tabulka 12: NRC jednotlivých vzorků

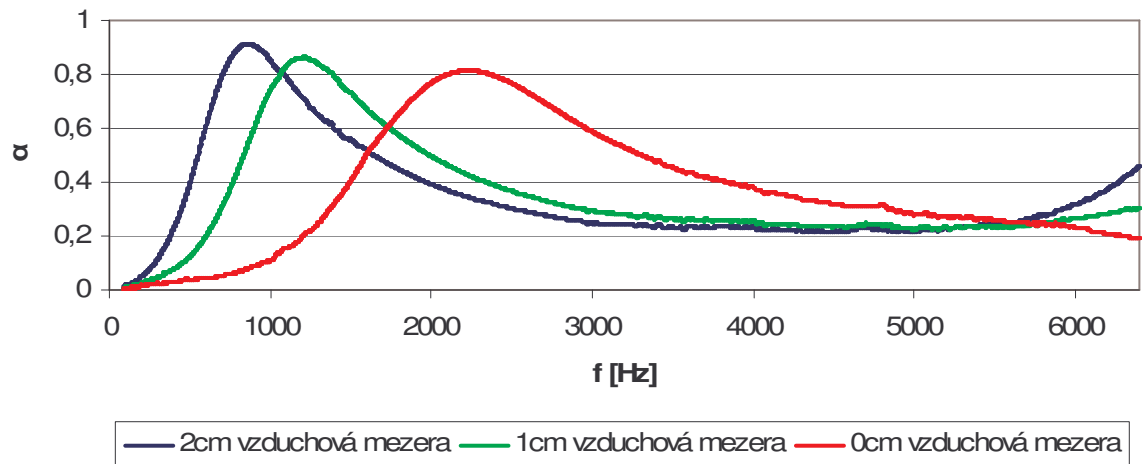
5.2.1 Vzorek z hrubé drti

Jako první jsem naměřil a vyhodnotil vzorek z hrubé drti. V tabulce 12 je uveden NRC. Jako nejlépe absorpční materiál vyšel vzorek s dvoucentimetrovou vzduch. mez. s hodnotou $NRC = 0,429$. V grafu číslo 1 jsou vykresleny průběhy pro jednotlivé vzduch. mez., kde jako nejlépe absorpční vyšel vzorek s dvoucentimetrovou vzduch. mez. znázorněn modrou křivkou. V nejvyšším bodě dosahoval koeficientu $\alpha = 0,907$ při frekvenci 900 Hz.

Z hlediska zvukové pohltivosti je tak vzorek považován za poměrně pohltivý. Se zvyšující se frekvencí však hodnota koeficientu prudce klesá. V kombinaci s vhodnými materiály

však může koeficient zvukové pohltivosti pro vyšší frekvence stoupat a obsáhnout tak širší sluchové spektrum.

Koeficient zvukové pohltivosti vzorku z hrubé drti

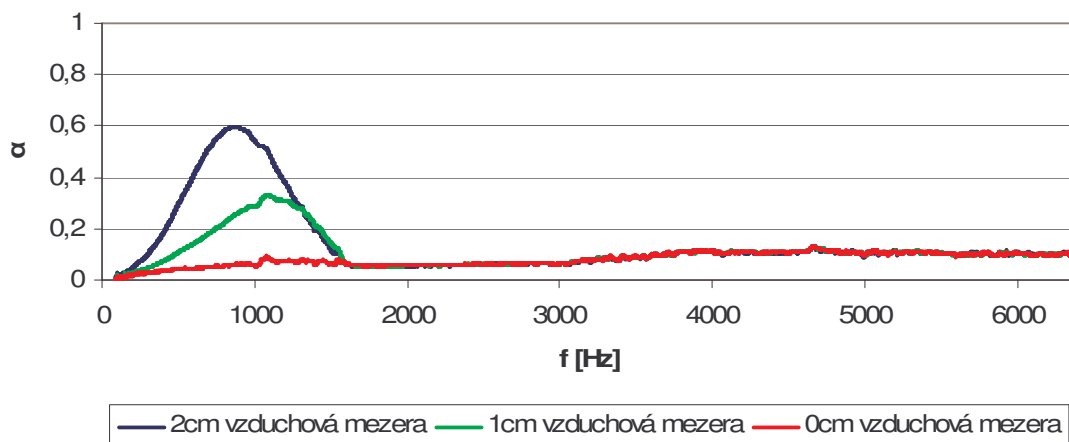


Graf 1: Koeficient zvukové pohltivosti vzorku z hrubé drti

5.2.2 Vzorek ze středně hrubé drti

Následující ze vzorků vyšel jako méně pohltivý. I přes to nejvyšší hodnoty koeficientu zvukové pohltivosti dosahoval vzorek s dvoucentimetrovou vzduch. mez. reprezentovaný modrou křivkou a to $\alpha = 0,590$ při frekvenci 850 Hz, $NRC = 0,241$. Při vyšších frekvencích byl vzorek velmi málo pohltivý a jeho vlastnosti jsou vhodnější pro odraz akustické vlny.

Koeficient zvukové pohltivosti vzorku ze středně hrubé drti



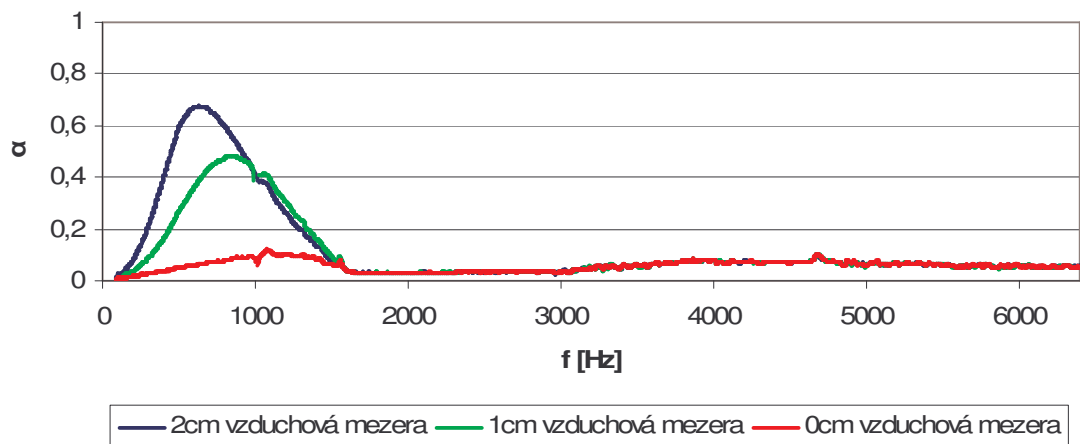
Graf 2: Koeficient zvukové pohltivosti vzorku ze středně hrubé drti

5.2.3 Vzorek z jemné drti

Výsledek měření vzorku z jemné drti dopadl lépe jako předchozí. Nejvyšší hodnota koeficientu α se však pohybovala na hodnotě $\alpha = 0,674$ při frekvenci 628 Hz,

NRC = 0,294 a to pro vzorek s centimetrovou vzduch. mez. reprezentovaný modrou křivkou. Pro vyšší frekvence byl vzorek téměř nepohltivý a vhodný pro odraz nebo odclonění akustické energie.

Koeficient zvukové pohltivosti vzorku z jemné drti

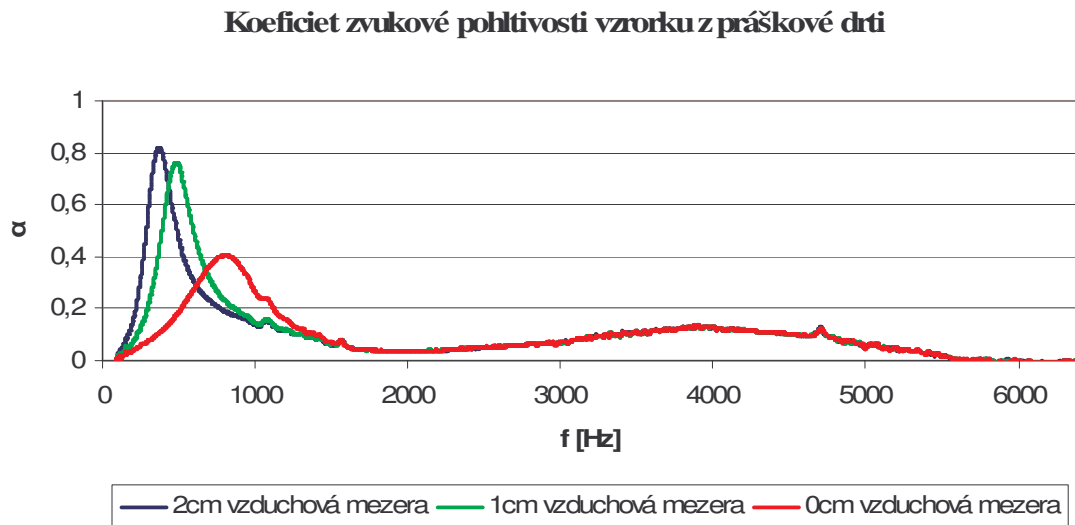


Graf 3: Koeficient zvukové pohltivosti vzorku z jemné drti

5.2.4 Vzorek z práškové drti

Poslední ze vzorků z práškové drti vyšel z hlediska zvukové pohltivosti nejhůře. Dosahoval sice nejvyšší hodnoty koeficientu $\alpha = 0,822$ ale pouze při frekvenci 372 Hz u vzorku s dvoucentimetrovou vzduch. mez. reprezentovaný modrou křivkou. Redukční koeficient pro tento vzorek NRC = 0,239. U vyšších frekvencí zvuková pohltivost prudce klesá a materiál se stává téměř nepohltivým.

V kombinaci s vhodným materiálem však může sloužit jako bariéra pro odraz, odclonění nebo usměrnění akustické energie. Redukční koeficient nejvyšší pro vzorek s jednocentimetrovou vzduch. mez. NRC = 0,266 reprezentovaný zelenou křivkou.



Graf 4: Koeficient zvukové pohltivosti vzorku z práškové drti

5.3 Simulace akustické pohltivosti materiálu

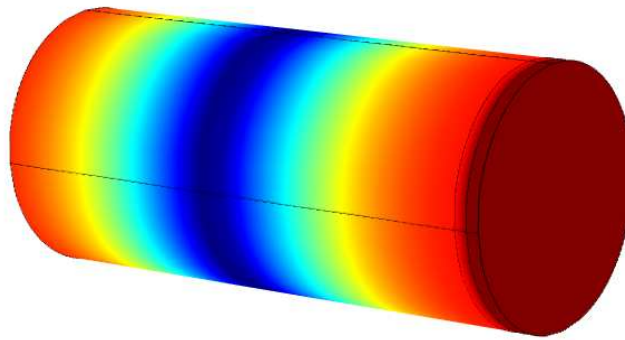
Pomocí knihovny geometrie jsem vytvořil model shodný s reálným vzorkem. Aby byl model co nejpodobnější reálnému měření na Kundtově impedanční trubici, umístil jsem vzorek do vzduchové trubice o reálné velikosti. Akustická vlna tak procházela vzduchovou mezerou na jehož konci se nacházel testovaný vzorek.

Počáteční a okrajové podmínky jsem nastavil tak, aby odpovídaly fyzikálním vlastnostem měření zvukové pohltivosti.

Přestože je součástí COMSOLU MULTIPHYSICS rozsáhlá knihovna materiálů, konkrétní však neobsahovala. Jelikož se jednalo o nehomogenní materiál, musel jsem nastavit takové vlastnosti na základě informací, které jsem o něm znal. Jednalo se především o hustotu ρ a rychlost šíření zvuku c_w .

Pro účel modelování však platí: čím více informací o materiálu a daném problému, tím získám kvalitnější výpočty. V laboratorních podmínkách jsem však nebyl schopen dosáhnout dokonalějšího popisu. Model tak přesně nekopíruje vlastnosti měřeného vzorku, ale je schopen se mu velmi přiblížit.

Ukázka modelu je na snímku [20] výše.



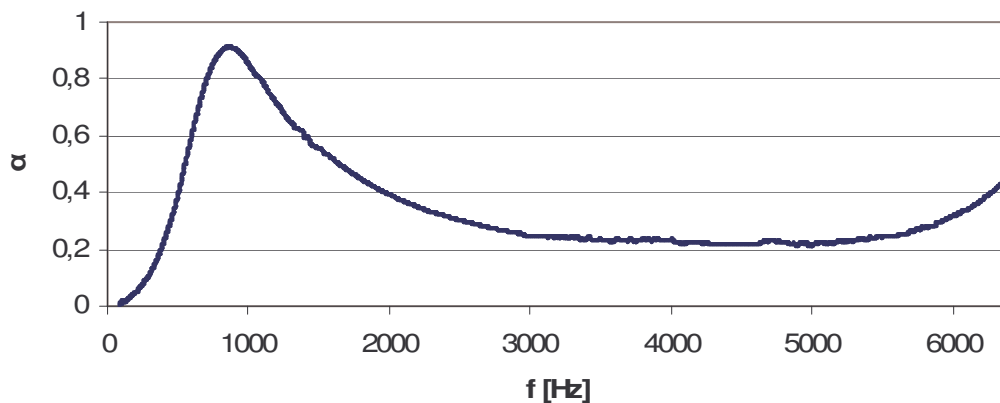
Obrázek 37: Simulovaný model

Na snímku [37] je vykreslen průběh simulace, kde zleva ze zdroje vstupuje akustický signál reprezentován akustickým tlakem, narazí na překážku (vzorek), ten akustický signál absorbuje, čímž akustický tlak prudce vzroste ($\alpha = \max$). V prostoru za vzorkem je pak akustický tlak nejvyšší, což znamená, že za vzorkem neprochází téměř žádný akustický signál. Červená barva znázorňuje nejsilnější signál, tmavě modrá pak signál nejslabší.

5.4 Porovnání naměřených výsledků

Z naměřených výsledku vyplývá, že jako nejlepším materiálem schopným absorbovat akustickou energii je vzorek z hrubé drti. Se zmenšující se pórovitostí materiálu klesá také schopnost akustické vlny proniknout do struktury materiálu. Pro srovnání výsledků jsem tak vybral výsledek měření vzorku z hrubé drti a to s dvoucentimetrovou vzduchovou mezerou.

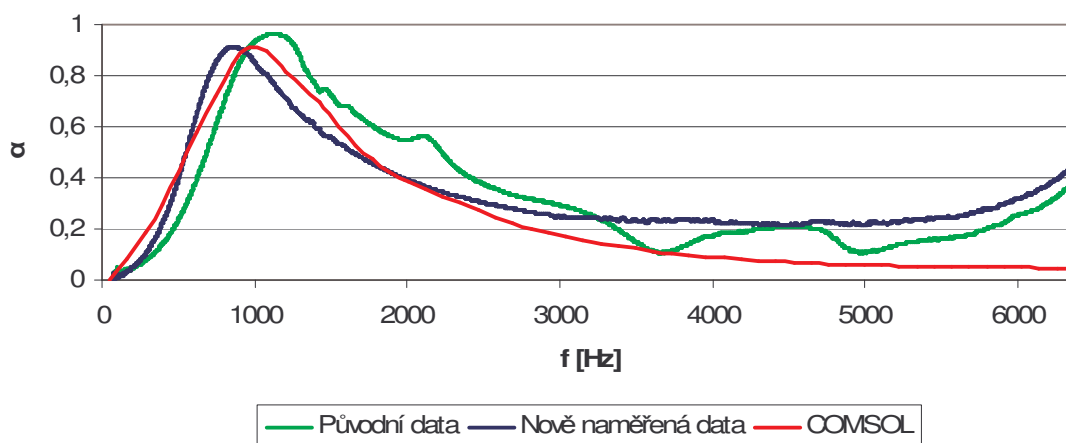
Vzorek z hrubé drti s 2cm vzduchovou mezerou



Graf 5: Vzorek z hrubé drti s dvoucentimetrovou vzduchovou mezerou

Pro srovnání kvality vzorků jsem vybral data z dřívějšího měření akustické pohltivosti vzorku z hrubé drti s dvoucentimetrovou vzduchovou mezerou ze své bakalářské práce [11]. Koeficient zvukové pohltivosti původního vzorku $\alpha = 0,966$ při frekvenci 1134 Hz. Redukční koeficient NRC = 0,446 a s daty získané simulací modelu v COMSOL MULTIPHYSICS.

Srovnání naměřených dat se simulací v COMSOL MULTIPHYSICS



Graf 6: Srovnání naměřených dat se simulovanými

Z grafu je patrné, že nově vyrobený vzorek (modrá křivka) má průběh daleko plynulejší. Důvodem je hlavně kvalitnější zpracování drtě a výroba vzorků. Hodnoty koeficientů však ukazují lepší hodnoty u původního vzorku (zelená křivka). Důvodem je větší zrnitost původní drtě.

Rozdílnost simulované křivky a reálně získaných dat je způsobena tím, že při simulování v COMSOL MULTIPHYSICS je nutné pro kvalitnější vykreslení nastavit jemnější síť. Toto nastavení lze však provést u výkonnějších počítačů, které jsem k dispozici neměl.

A také tím, že jsem nebyl schopen detailně popsat vlastnosti testovaného reálného materiálu vzorku. Simulovaná data jsou reprezentována červenou křivkou. $\alpha = 0,959$ při 1080 Hz, NRC = 0,478.

Z výsledků měření vyplývá, že kvalitnějším zpracováním a hrubší zrnitostí vzorků lze dosáhnout pozitivnějších výsledků zvukové absorpce. Lze tak s jistotou konstatovat, že vzorky jsou vhodné pro výrobu protihlukových bariér.

ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo analyzovat akustické vlastnosti připravených vzorků za účelem jejich využití pro výrobu protihlukových bariér. Vzorky byly připraveny ze dvou komponent. První, plastová drť, získaná separací elektronického odpadu a druhá, síťovaný bílkovinný hydrolyzát, jako pojivo, který je produktem enzymové hydrolyzy.

Teoretická část se zabývá šířením akustických vln v pevných látkách, hlukem, možnostem boje proti hluku, nežádoucím vibracím a modelováním akustických vlastností.

Praktická část je věnována přípravě vzorků a měření jejich akustických vlastností s ohledem na jejich maximální pohltivost. Příprava zahrnovala jednak výrobu samotných forem, tak separaci DPS z elektroodpadu. Měření zvukové pohltivosti bylo realizováno na zařízení Kundtově impedanční trubici. Naměřená data byla v návaznosti na předchozí výsledky mé práce, prezentované na STOČ 2010, vzájemně porovnána společně s hodnotami získanými simulací vytvořeného modelu v prostředí COMSOL MULTIPHYSICS.

Přínosem bylo zhodnocení zkušeností z předchozích prací, díky kterým bylo použito odlišné technologie výroby a separace materiálu DPS a dosaženo tak kvalitnějšího zpracování a výroby vzorků. Přiložené grafy zobrazují frekvenční závislost koeficientu zvukové pohltivosti α v rozsahu od 64 Hz do 6,4 kHz frekvenčního pásma. Z jejich výsledků je patrné, že vlastnosti testovaného materiálu jsou schopny absorbovat akustické vlny lépe pro nižší frekvence v rozsahu od 450 Hz do 1850 Hz, které jsou však pro lidský sluch nejdůležitější. Nejvyšší zvuková pohltivost byla $\alpha = 0,590$ při frekvenci 850 Hz, $NRC = 0,241$. Hodnoty získané z vytvořeného modelu s konkrétně zadanými počátečními a okrajovými podmínkami do jisté míry odpovídaly hodnotám z reálného měření v laboratoři. Nabývala hodnot $\alpha = 0,959$ při 1080 Hz, $NRC = 0,478$.

Lze konstatovat, že vyrobené vzorky lze s jistotou využít za účelem přípravy protihlukových bariér vyrobených z alternativních zdrojů materiálů. Přínosem pak zjištění, že při kvalitnějším zpracování a vyšší pórovitosti je materiál DPS v kombinaci s běžně využívanými materiály vhodný pro výrobu těchto protihlukových bariér. Další velký přínos spočívá v tom, že při zpracování elektrického odpadu lze 100% využít separovanou plastovou drť a bílkovinný hydrolyzát, který vzniká při zpracování kožedělných odpadů. Tudíž ze dvou recyklačních technologií vzniká opět využitelný produkt.

ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ

The diploma thesis intends to analyse the acoustic attributes of the prepared samples in order to utilize them as the sound-control barriers. The samples were produced from two components. The first, the shattered plastic obtained through separation of the electronic waste, and the second, the reticulated protein hydrolysate, used as a bond, which has been produced by enzyme hydrolysis.

The theoretical part deals with the spread of acoustic waves in solid substance, the sound-control options, unwanted vibration and simulation of the acoustic attributes.

Referring to the practical part, it copes with the samples production and measuring their acoustic attributes in term of their absorbency capacity. The preparation phase had involved not only producing the forms but the separation the DPS from electronic waste as well. Having measured the absorbency capacity, it has been realized thanks to Kundt's impedance pipe. The measured data were compared in connection to the previous results of my research presented at STOČ 2010. The data were compared to the results obtained from the simulation of the created model in COMSOL MULTIPHYSICS.

The gained experience from the former activities has led to employing a different technology in the production and the separation of DPS substances. Hence, an elaboration and sample production of better-quality have been achieved. The enclosed charts illustrate the frequency dependency of absorbency capacity coefficient α in a scope from 64 Hz to 6,4 kHz of frequency zone. It is evident from the results that the attributes of the tested substance are able to absorb the acoustic waves better at lower frequencies in a range from 450 Hz to 1850 Hz; however, those are the most important ones for human's hearing. The highest sound absorbency $\alpha = 0,590$ at 850 Hz frequency, $NRC = 0,241$. The results obtained from the created model, with concrete initial and marginal conditions being set, correspond to a certain extent to outputs from real measuring in laboratory. Take the values $\alpha = 0,959$ at 1080 Hz, $NRC = 0,478$.

It is possible to state that the produced samples can be used in order to prepare sound-control barriers produced from the alternative sources of material. The contribution lies behind the detection that the DPS substance utilized at better quality and at higher porosity density is appropriate in combination with commonly used substances for the sound-control barriers.

The second great contribution seems to be the fact that the separated shattered plastic and protein hydrolysate produced while utilizing the leather manufacture waste might be, during utilizing the electronic waste, for 100% utilized. Therefore, the usable utilizable product is formed from two recycling technologies.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] BERNAT, P.: *Akustika, vznik a šíření zvuku, frekvenční analýza a syntéza*.
[online]. [cit. 2011-20-5]. Dostupné z WWW:
http://homen.vsb.cz/~ber30/texty/varhany/anatomie/pistaly_akustika.htm
- [2] KAŠPAŘÍK, J.: *Šíření zvuku*. [online]. [cit. 2011-25-5]. Dostupné z WWW:
<http://www.volny.cz/kasparik.j/AKUSTIKA%20II.htm>
- [3] VLACHOVÁ, M.: *Šíření zvuku – Edutorium*. [online]. [cit. 2011-20-5].
Dostupné z WWW:
http://www.techmania.cz/edutorium/art_exponaty.php?xkat=fyzika&xser=416b757374696b61h&key=662
- [4] PŘEMYSLOVSKÁ, E.: *Šíření zvuku ve dřevě*. Ústav nauky o dřevě. [online].
[cit. 2011-18-5]. Dostupné z WWW:
<http://wood.mendelu.cz/cz/sections/Props/?q=node/51>
- [5] *Fyzika – akustika, základní pojmy UTB – Projekt investice do rozvoje vzdělání*.
[online]. [cit. 2011-20-5]. Dostupné z WWW:
http://ufmi.ft.utb.cz/texty/env_fyzika/EF_02.pdf
- [6] NOVÝ, R.: *Hluk a otřesy*. Skripta CVUT v Praze. 1989. 190 str.
(ISBN 80-01-00101-6)
- [7] MIŠUN, V.: *Vibrace a hluk*. Skripta VUT v Brně. 1998. 177 str.
(ISBN 80-214-1262-3)
- [8] VAVERKA, J.: *Akustické vlastnosti materiálů*. [online]. [cit. 2011-29-5].
Dostupné z WWW:
<http://www.imaterialy.cz/Materialy/Akusticke-vlastnosti-lehkych-delicich-konstrukci.html>
- [9] JIŘÍČEK, O.: *Úvod do akustiky*. ČVUT Praha. Fakulta elektrotechnická. 2002. 146 str.
(ISBN 80-01-02460-1)

- [10] ABE.TEC, s.r.o.: *Materiál desek plošných spojů*. [online]. [cit. 2011-20-5].
Dostupné z WWW:
<http://www.smtcentrum.cz/vyroba-desek-plosnych-spoju/zakladni-materialy-pro-vyrobu-desek-plosnych-spoju/>
- [11] MALANÍK, O.: *Možnosti recyklace elektronického odpadu*. Bakalářská práce. 2008. 55 str.
- [12] JANÁČOVÁ, D.: *Řízení enzymové hydrolyzy* - Habilitační přednáška.
Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava. Fakulta strojní. Ostrava. 2002. 1. vydání
- [13] GOŇA, T.: *Optimalizace síťovací reakce proteinových hydrolyzátů pro přípravu termo-izolačních panelů z recyklovaného plastu*. Diplomová práce. 2011.
- [14] EXPO DATA spol. s.r.o.: *Časopis stavebnictví*. [online]. [cit. 2011-23-5].
Dostupné z WWW:
http://www.casopisstavebnictvi.cz/protihlukove-bariery-ze-sklovlaknobetonu_N254
- [15] Fritsch - Katalogový list. [online]. [cit. 2011-30-5]. Dostupné z WWW:
<http://www.fritsch.de/en/sample-preparation/products/milling/cutting-mills/pulverisette-19/download/>
- [16] MALANÍK, O.: *Možnosti využití desek plošných spojů*. STOČ 2010
- [17] JUŘIČKA, M.: *Fyzikální vlastnosti a šíření zvuku*. Fakulta technologická. UTB ve Zlíně
- [18] COMSOL MULTIPHYSICS – *oficial website*. [online]. [cit. 2011-15-5].
Dostupné z WWW: <http://www.comsol.com/>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

A	Maximální výchylka
A	Celková absorpce [m^2]
a	Okamžitá amplituda
α	Koeficient absorpce zvuku
A_n	Admitance povrchu na ploše S_3
B	Matice tlumení
c	Rychlost šíření zvuku [$m \cdot s^{-1}$]
C_a	Akustická poddajnost dutiny
c_B	Rychlost šíření ohybových vln v tyči [$m \cdot s^{-1}$]
\dot{c}_B	Rychlost ohybových vln na ploše [$m \cdot s^{-1}$]
c_L	Rychlost vlnění v tenkých tyčích [$m \cdot s^{-1}$]
d	Součinitel přestupu akustické energie
d, d_1, d_2	Dráhy zvuků [m]
D	Přenosový útlum [dB]
DPS	Desky Plošných Spojů
Δt	Celkový čas odrazů zvuků [s]
E	Youngův modul pružnosti v tahu
ε	Činitel děrování
f	Frekvence [Hz]
F	Sloupcový vektor zatížení akustického prostoru
FR	Flame Rezist
f_r	Rezonanční frekvence [Hz]
G	Modul pružnosti ve smyku

h	Příčný rozměr [m]
HE	Hraniční elementy
I	Intenzita zvuku [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]
I_+	Intenzita dopadajícího chvění [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]
I_0	Referenční hodnota prahové intenzity [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]
I_2	Intenzita prošlého chvění [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]
k	Vlnové číslo
K	Matice tuhosti
K	Modul objemové roztažnosti
λ	Vlnová délka [m]
λ_B	Délka ohybových vln [m]
λ_L	Délka vln [m]
κ	Poissonova konstanta
l_e	Efektivní délka [m]
L	Rozměr součásti [m]
L	Intenzita akustického signálu [dB]
L_p	Hladina akustického výkonu [dB]
m	Hmotnost 1 m^2 desky [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
m_0	Hmotnost 1 m hradící hmoty [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
M_a	Akustická hmota kmitajícího vzduchu
MHE	Metoda hraničních elementů
μ	Poissonův poměr příčné kontrakce
MKP	Metoda konečných prvků
N	Měrná akustický výkon [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]

N_j	Tvarová funkce vázaná s uzlem j
NRC	Noise Reduction Koeficient
ω	Vlnový kmitočet [Rad]
p_0	Amplituda akustického tlaku [Pa]
p	Akustický tlak [Pa]
p, q	1, 2, ... mód kmitů
p_b	Barometrický tlak [Pa]
p_{ef}	Efektivní hodnota akustického tlaku [Pa]
π	Ludolfovo číslo
p_j	Aproximativní hodnota tlaku v uzlu j
P_0	Referenční akustický výkon [W]
P	Akustický výkon [W]
PS	Plošný spoj
R_a	Akustického odporu
ρ	Měrná hmotnost [kg.m ³]
S	Plocha [m ²]
S_0	Plocha stěny[m ²]
S_1	Plocha otvoru nebo drážek[m ²]
S_1, S_2	Průřezy tyče nebo desky [m ²]
SEA	Statistická energetická analýza
φ	Úhel odrazu [°]
σ	Poissonova konstanta elastická konstanta
t	Čas [s]
T	Perioda [s]

τ	Čas [s]
v_0	Amplituda akustické rychlosti [m.s ⁻¹]
V	Objem [m ³]
v	Akustická rychlost [m.s ⁻¹]
\bar{v}_n	Normálová složka rychlosti
x	Vzdálenost od počátku šíření zvuku [m]
Z_n	Mechanická impedance [s.m ⁻³]

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1: Kmitavý pohyb [6]</i>	13
<i>Obrázek 2: Měrný akustický výkon [6]</i>	15
<i>Obrázek 3: Hladiny akustického výkonu [6]</i>	16
<i>Obrázek 4: Harmonická vlna [1]</i>	17
<i>Obrázek 5: Syntéza a analýza harmonických vln [1]</i>	17
<i>Obrázek 6: Postupná deformace sinusových křivek a přičítání harmonických vln [1]</i>	18
<i>Obrázek 7: Akustický řetězec</i>	19
<i>Obrázek 8: Šíření zvuku v prostředí [5]</i>	20
<i>Obrázek 9: Šíření zvukové vlny při dopadu na překážku [1]</i>	21
<i>Obrázek 10: Ohyb akustické vlny [1]</i>	23
<i>Obrázek 11: Diagram šíření ohybových vln v deskách [6]</i>	25
<i>Obrázek 12: Odraz zvuku [3]</i>	27
<i>Obrázek 13: Šíření zvukové vlny po dopadu na pevnou stěnu [1]</i>	29
<i>Obrázek 14: Sluchové pole [8]</i>	32
<i>Obrázek 15: Kmitající membrána [9]</i>	38
<i>Obrázek 16: Kmitající deska [9]</i>	39
<i>Obrázek 17: Helmholtzův rezonátor [9]</i>	39
<i>Obrázek 18: Děrový panel [9]</i>	40
<i>Obrázek 19: Různé druhy hradících hmot [6]</i>	42
<i>Obrázek 20: Ukázka uživatelského prostředí COMSOL MULTIPHYSICS</i>	48
<i>Obrázek 21: DPS zleva s komponenty, bez komponent</i>	50
<i>Obrázek 22: Postup oddělení vrchní vrstvy s obsahem kovu</i>	51
<i>Obrázek 23: Drtič Fritsch Pulverisette 19 [15]</i>	52
<i>Obrázek 24: Hrubá drť</i> <i>Obrázek 25: Středně hrubá drť</i>	53
<i>Obrázek 26: Jemná drť</i> <i>Obrázek 27: Prášková drť</i>	53
<i>Obrázek 28: Formy pro lisování vzorků zleva malá, velká</i>	54
<i>Obrázek 29: Pracoviště pro lisování vzorků</i>	56
<i>Obrázek 30: Vzorky z hrubé drti</i>	56
<i>Obrázek 31: Vzorky ze středně hrubé drti</i>	57
<i>Obrázek 32: Vzorky z jemné drti</i>	57
<i>Obrázek 33: Vzorky z práškové drti</i>	57

<i>Obrázek 34: Schéma zapojení měřicího zařízení.....</i>	<i>58</i>
<i>Obrázek 35: Prostředí LapShop verze 10.0.....</i>	<i>59</i>
<i>Obrázek 36: Měřící pracoviště</i>	<i>59</i>
<i>Obrázek 37: Simulovaný model</i>	<i>64</i>

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Některé druhy materiálů a jejich vlnové délky [6]	23
Tabulka 2: Délky ohybových vln [6]	24
Tabulka 3: Absorpční koeficienty některých materiálů [3]	27
Tabulka 4: Rychlost šíření příčného vlnění [5]	29
Tabulka 5: Rychlost zvuku v některých dřevinách [4]	30
Tabulka 6: Hmotností desek před a po separaci	51
Tabulka 7: Hmotnosti jednotlivých drtí	52
Tabulka 8: Navážka modifikovaného HYKOLU	54
Tabulka 9: Množství drti a lepidla vzorků o průměru 100mm	55
Tabulka 10: Množství drti a lepidla vzorků o průměru 30mm	55
Tabulka 11: Rozměry jednotlivých vzorků	56
Tabulka 12: NRC jednotlivých vzorků	60

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1: Koeficient zvukové pohltivosti vzorku z hrubé drti.....	61
Graf 2: Koeficient zvukové pohltivosti vzorku ze středně hrubé drti	61
Graf 3: Koeficient zvukové pohltivosti vzorku z jemné drti	62
Graf 4: Koeficient zvukové pohltivosti vzorku z práškové drti	63
Graf 5: Vzorek z hrubé drti s dvoucentimetrovou vzduchovou mezerou.....	64
Graf 6: Srovnání naměřených dat se simulovanými	65