

Aplikace numerických metod BEM/FEM při analýze akustických vlastností materiálů

Ondřej Turecký

Bakalářská práce
2006



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Ondřej TURECKÝ**
Studijní program: **B 2807 Chemické a procesní inženýrství**
Studijní obor: **Automatizace a řídicí technika**

Téma práce: **Aplikace numerických metod BEM/FEM při analýze akustických vlastností materiálů**

Zásady pro vypracování:

- 1. Rešerše na téma:**
 - akustické vlastnosti materiálů
 - numerické metody BEM/FEM.
- 2. Simulace chování materiálu při dopadu akustického vlnění v prostředí SAMCEF pomocí BEM/FEM.**
- 3. Experimentální ověření nasimulovaných výsledků pomocí zařízení Brüel&Kjaer.**

Rozsah práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

- 1.O. Von. Estorff: **Boundary Elements in Acoustics: Advances and Applications (Advances in Boundary Elements Vol 9)**, Witpress (2000) (ISBN 1-85312-556-3)
- 2.Nový R.: "Hluk a chvění.", Učební texty vysokých škol. ČVUT Praha (2000), 1 - 389. 2. vydání (ISBN 80-01-02246-3).
- 3.Mišun V.: "Vibrace a hluk", FS VUT v Brně (1998), 1. vydání (ISBN 80-214-1262-3).
- 4.Samtech S.A. : **User Manuals, Release 10.1, 4000 Liege-Belgium, 2005.**
- 5.Petyt, M. : **Introduction to finite element vibration analysis. Cambridge University Press 1998.**
- 6.Weaver, W., Johnston, P., R. : **Finite Elements for Structural Analysis, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey,1984.**
- 7.Vaňková M. a kol.: "Hluk, vibrace a ionizující záření v životním a pracovním prostředí, část I". Učební texty vysokých škol. VUT Brno (1995), 1 - 144. 1. vydání (ISBN 80-214-0695-X).
- 8.Vaňková M. a kol.: "Hluk, vibrace a ionizující záření v životním a pracovním prostředí, část II". Učební texty vysokých škol. VUT Brno (1996), 1 - 164. 1. vydání (ISBN 80-214-0818-9).

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Dušan Fojtů

Ústav fyziky a mater. inženýrství

Datum zadání bakalářské práce:

14. února 2006

Termín odevzdání bakalářské práce:

16. června 2006

Ve Zlíně dne 25. února 2006

prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.

pověřený děkan



prof. Ing. Petr Dostál, CSc.

ředitel ústavu

ABSTRAKT

Byly vytvořeny simulace chování stavebních materiálů při dopadu akustického vlnění pomocí numerických metod BEM/FEM ve vývojovém prostředí SAMCEF. Získané výsledky byly experimentálně ověřeny na Kundtově trubici společnosti Brüel&Kjaer. U vybraných stavebních materiálů byl tímto způsobem vyhodnocen koeficient zvukové pohltivosti a stupeň vzduchové neprůzvučnosti.

Klíčová slova:

Akustika, koeficient zvukové pohltivosti, stupeň vzduchové neprůzvučnosti, FEM/BEM, numerické metody, simulace.

ABSTRACT

Results of acoustic testing of selected mineral based materials used in building construction are presented. The sound absorption of the normal incidence sound wave on tested materials in the frequency range of 50 – 6500 Hz was determined. Obtained results were confronted with the theoretical numerical prediction models based on FEM BEM methods as obtained from the SAMCEF software. Obtained results allow optimization of the wall structure construction for household and building industry applications.

Keywords:

acoustic , sound absorption, FEM/BEM, numerical prediction models, simulations.

Na tomto místě chci poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Dušanovi Fojtů, za odborné vedení, podnětné rady a trvalý zájem při vypracování této práce.

OBSAH

ÚVOD	8
I TEORETICKÁ ČÁST	9
1 ZVUK	10
1.1 AKUSTICKÉ VLNĚNÍ.....	10
1.1.1 Vlnová délka.....	11
1.1.2 Akustická rychlost	12
1.1.3 Akustický tlak.....	13
1.2 RYCHLOST ŠÍŘENÍ PODÉLNÝCH VLN V PEVNÝCH LÁTKÁCH.....	14
1.3 RYCHLOST ŠÍŘENÍ PŘÍČNÝCH VLN V PEVNÝCH LÁTKÁCH.....	15
2 HLADINA AKUSTICKÉHO VÝKONU	17
2.1 HLADINA AKUSTICKÉHO VÝKONU L_w [DB].....	18
2.2 HLADINA INTENZITY ZVUKU L_1 [DB]	19
2.3 VZÁJEMNÁ SOUVISLOST DECIBELOVÝCH VELIČIN.....	21
3 ŠÍŘENÍ CHVĚNÍ V KONSTRUKCÍCH	24
3.1 VELIČINY CHARAKTERIZUJÍCÍ CHVĚNÍ.....	24
3.2 KMITÁNÍ DESEK	29
3.2.1 Ohybové kmitání nekonečně velkých desek	29
3.2.2 Volné kmitání pravoúhlých desek.....	30
4 AKUSTICKÉ PROSTŘEDKY SNIŽOVÁNÍ HLUKU	31
4.1 MATERIÁLY A KONSTRUKCE PRO POHLCOVÁNÍ ZVUKU	31
4.2 NEPRŮZVUČNÉ KONSTRUKCE	31
4.2.1 Šíření zvuku přes stěnu	31
4.2.2 Stupeň vzduchové neprůzvučnosti	34
4.2.3 Neprůzvučnost jednoduché stěny	38
5 NUMERICKÉ METODY V AKUSTICE	48
5.1 DETERMINISTICKÉ MODELY	48
5.2 INTERAKCE STRUKTURA- FLUID	49
5.2.1 Základní rovnice a hraniční podmínky	49
II PRAKTICKÁ ČÁST	52
6 PRAKTICKÁ ČÁST	53
6.1 AKUSTICKÁ SOUSTAVA- DESKOVÉ KONSTRUKCE.....	53
6.2 TEORETICKÝ ÚVOD DO STRUKTURÁLNÍ DYNAMIKY- ZÁKLADNÍ ROVNICE MKP PRO DYNAMIKU.....	54
6.3 MODÁLNÍ ANALÝZA DESKOVÉ KONSTRUKCE.....	56
6.3.1 Podrobný postup simulace v prostředí SamCef.....	56
6.3.2 Grafická podoba klíčových kroků simulace	59

6.3.3	Tenké desky- Shell prvek	61
6.3.4	Výpočet stupně vzduchové neprůzvučnosti	62
6.4	EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ NASIMULOVANÝCH VÝSLEDKŮ	63
6.4.1	Dvoustrojová impedanční trubice Brüel & Kjaer typ 4206.....	63
6.4.2	Dvoukanálový signální analyzátor Brüel & Kjaer typ 2034	63
6.4.3	Praktické ověření nasimulovaných výsledků	64
ZÁVĚR		65
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....		66
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK		67
SEZNAM OBRÁZKŮ.....		70
SEZNAM TABULEK		71

ÚVOD

Akustika je rozsáhlý vědní obor, zabývající se komplexně zvukem od jeho vzniku, přenosu prostorem až po vnímání lidskými smysly. Má celou řadu poddisciplín, např. 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 vznikem zvuku v hlasovém orgánu člověka a jeho vnímáním v uchu, psychoakustika vnímání zvuku v mozku, elektroakustika zabývající se záznamem reprodukcí a šířením zvuku s využitím elektrického proudu, fyzikální akustika, která studuje způsob šíření a vzniku zvuku, zabývá se odrazem a pohlcováním v různých materiálech atd.

V akustice se obvykle pojednává i o vzniku, vlastnostech a účinku tzv. ultrazvuku (a infrazvuku), mechanického vlnění s velmi vysokou (pro infrazvuk nízkou) frekvencí, na kterou už lidské ucho nereaguje.

Zvuk obecně můžeme definovat jako mechanické kmitání, které je charakterizováno parametry 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 frekvencí od 16 Hz do 20 kHz, schopné vyvolat zvukový vjem.

Aby lidé mohli dobře a efektivně pracovat, musí být obklopeni optimálním akustickým prostorem. Termín „dobrá akustika“ lze aplikovat mnoha různými způsoby. Obecně však tento termín vyjadřuje vyváženou souhru mezi dobou dozvuku, hlukem v pozadí a zvukovou izolací. V místnosti s dobrou akustikou je požadovaný zvuk zdůrazněn, zatímco nežádoucí zvuky jsou eliminovány nebo omezeny do té míry, že zanikne jejich rušivý účinek.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 ZVUK

Podstatou zvuku je mechanické kmitání pružného prostředí ve frekvenčním rozsahu 20 až 20000 kmitů za sekundu, které se šíří konečnou rychlostí určitým prostředím. Akustická vlna se ve vzduchu pohybuje rychlostí cca 340 m/s. Frekvenční rozsah akustického vlnění, kterým se zabývá technická akustika, odpovídá kmitočtovému rozsahu lidského ucha. Jinak akustika se zabývá mechanickými kmity v širším frekvenčním pásmu. Hovoříme potom o třech pásmech: o infrazvuku, slyšitelném pásmu a ultrazvuku.

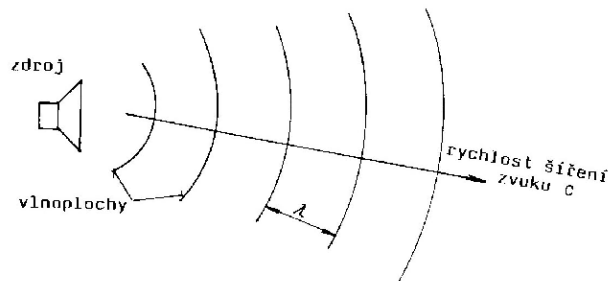
1.1 Akustické vlnění

Zvuk se může šířit v plynech, kapalinách i pevných látkách ve formě akustického vlnění. V homogenním izotropním prostředí se šíří vlnění přímočaře. Podle toho, zda částice prostředí kmitají ve směru šíření vlnění nebo kolmo k němu, dělíme vlnění na podélné a příčné. Zatímco u podélného vlnění je směr kmitů jednoznačně dán směrem šíření vlnění, u příčného vlnění musíme udávat též rovinu ve které dochází k příčným kmitům. Pokud se všechny kmity dějí v jedné rovině, říkáme o takovém vlnění, že je lineárně polarizováno.

Důležitou skutečností je, že se částice jednosměrně nepohybují se šířícím se vlněním, nýbrž kmitají pouze kolem svých rovnovážných poloh. Dalším závažným faktem je, že šíření akustického vlnění je spojeno s přenosem energie.

U plynů a kapalin se může vyskytovat pouze podélné akustické vlnění, neboť tyto látky jsou pružné pouze ve smyslu objemové stlačitelnosti. U materiálů elastických se může vyskytovat vlnění podélné i příčné, protože vykazují pružnost nejenom v tahu a tlaku, ale i smyku. Kombinací těchto namáhání vzniká kmitání ohybové.

Akustické vlnění postupuje prostředím od zdroje zvuku ve vlnoplochách, jak je ukázáno schématicky na obr 1. Vlnoplocha se vyznačuje tím, že v jejích všech bodech je v daném časovém okamžiku stejný akustický stav. Kolmice na vlnoplochu se nazývá akustickým paprskem.



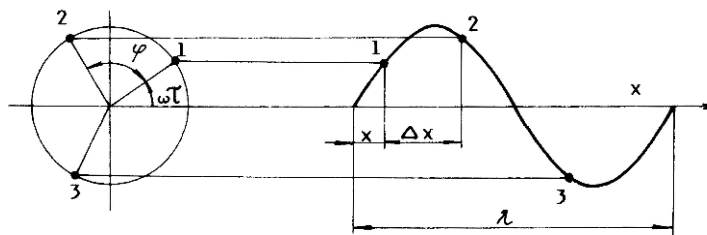
Obr. 1. Šíření zvuku od zdroje.

Mezi pevnými látkami a plyny resp. Kapalinami může docházet k přenosu kmitů. Každý hmotný element prostředí může být tzv. oscilátorem. Vychýlením hmotného bodu z jeho rovnovážné polohy se poruší rovnováha sil a začnou převládat síly, které se snaží hmotný bod vrátit do rovnovážné polohy. Z uvedeného vyplývá, že můžeme nejjednodušší fyzikální oscilátory, jako je např. struna, ladička, pružina apod. považovat za akustické generátory.

1.1.1 Vlnová délka

V obr 2 je zakótována veličina λ [m], která se nazývá délkou vlny. Je to vzdálenost mezi nejbližšími dvěma body bodové řady, u nichž je v daném časovém okamžiku stejný akustický stav. Jinak lze říci, že je to vzdálenost, kterou zvuková vlna urazí za dobu jednoho kmitu T . Délka vlny je nejdůležitým akustickým parametrem, který umožňuje modelování v akustice. Mezi délkou vlny, frekvencí a rychlostí šíření zvuku platí následující vztah:

$$lf = c$$



Obr. 2. Akustická výchylka jako funkce vzdálenosti.

1.1.2 Akustická rychlost

Rychlost s jakou kmitají jednotlivé částice prostředí, kterým se šíří akustická vlna, nazýváme akustickou rychlostí v [m/s]. Výraz pro její výpočet získáme snadno, provedeme-li první parciální derivaci akustické výchylky (1) podle času.

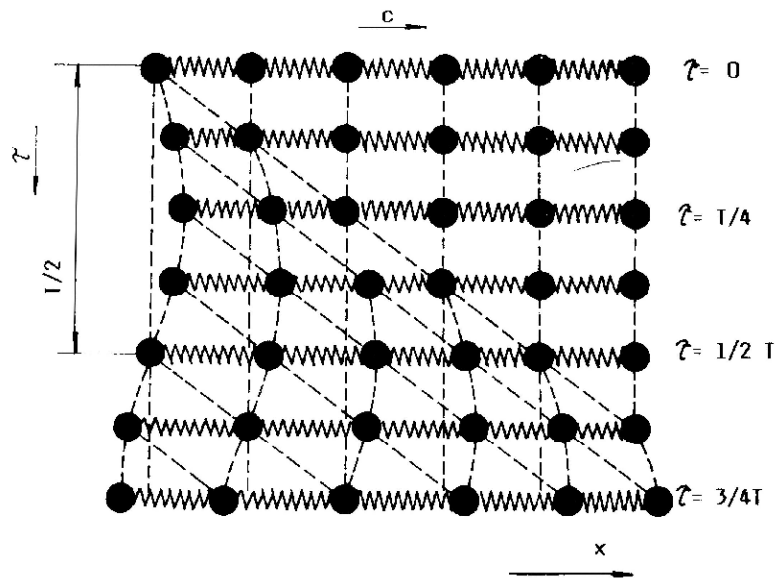
$$u = u_0 \sin w \left(t \pm \frac{x}{c} \right) \quad (1)$$

$$v = \frac{\partial u}{\partial t} = w u_0 \cos w \left(t \pm \frac{x}{c} \right) \quad (2)$$

Součin amplitudy výchylky a kruhové frekvence dává amplitudu akustické rychlosti.

$$v_0 = w u_0 \quad (3)$$

Porovnáme-li mezi sebou vztahy (1) a (2) zjistíme, že se výchylka od akustické rychlosti liší jak amplitudou, tak i fází. Funkce sin je proti funkci cos fázově pootočena o $\pi/2$. Akustická rychlost je jednou z nejdůležitějších akustických veličin a je jí nutno přísně odlišovat od rychlosti šíření zvuku. Její velikost je o mnoho řádů menší než rychlost šíření zvuku.



Obr. 3. Vývoj akustické vlny v bodové řadě.

1.1.3 Akustický tlak

Na obrázku 3 je mimo jiné znázorněno, že při šíření vlnění v bodové řadě lze v daném časovém okamžiku najít místa, kde dochází ke shluku většího počtu kmitajících bodů a naopak také místa, kde je menší hustota molekul. Tomu odpovídají v plynech a kapalinách místa přetlaku a místa podtlaku. S tímto zhuštěním a zředěním částic souvisí změny celkového statického tlaku vzduchu. Na obr. 4 je vyznačen celkový statický tlak jako součet středního barometrického tlaku p_b a tlaku akustického p . Diagram možno také interpretovat tak, že na barometrickém tlaku je namodulován tlak akustický. Barometrický tlak je hodnota přibližně 100 000 Pa, kdežto akustický tlak je veličina o mnoho řádů nižší. Zdravé lidské ucho začíná vnímat akustické tlaky od hodnot $2 \cdot 10^{-5}$ Pa, což je v porovnání s barometrickým tlakem hodnota téměř zanedbatelná.

Průběh akustického tlaku je z hlediska matematického zápisu totožný s průběhem akustické býchylky nebo akustické rychlosti. Pro harmonický signál možno psát výraz

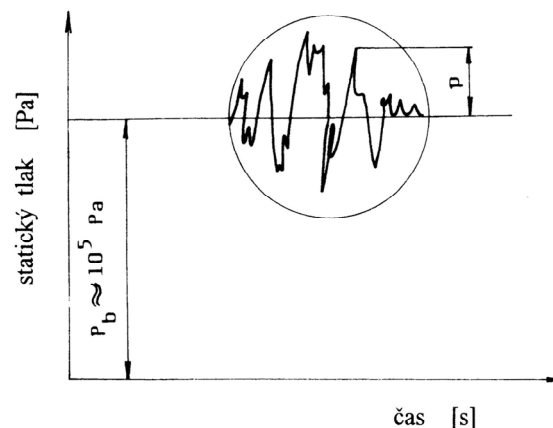
$$p = p_0 \cos w \left(t - \frac{x}{c} \right) \quad (4)$$

Resp.:

$$p = p_0 e^{jw \left(t - \frac{x}{c} \right)} \quad (5)$$

Kde je p_0 [Pa] - amplituda akustického tlaku

p [Pa] - komplexní hodnota akustického tlaku.



Obr. 4. Časový průběh celkového statického tlaku ve vzduchu.

1.2 Rychlost šíření podélných vln v pevných látkách

Obecná úloha určit rychlost šíření akustického vlnění v pevných látkách je velice složitá. Proto jsme nejprve odvodili jednoduchý výraz (6) který platí pro šíření podélných vln v tenkých tyčích.

$$c_L = \sqrt{\frac{E}{r}} \quad (6)$$

Kde je E [N/m²] - dynamický modul pružnosti v tahu.

Budeme-li sledovat šíření akustických vln v deskách, musíme již do vztahů zahrnout vliv kontrakce ve formě Poissonova poměru

$$m = \frac{E - 2G}{2G} \quad (7)$$

Kde je G [N/m²] - modul pružnosti ve smyku

Pro rychlost šíření podélných vln v desce potom platí vzorec:

$$c_L = \sqrt{\frac{E}{r} \frac{1}{1 - m^2}} \quad (8)$$

U běžných materiálů, u nichž je Poissonův poměr malý, se prakticky neliší rychlosti šíření podélných vln v tyči a v desce. U pryže ($\mu = 0,49$), která je prakticky nestlačitelná, činí rozdíl mezi výsledky podle vzorců (6) a (8) cca 15%.

Přehled o rychlostech šíření podélných vln v tekutinách a v tyčích z různých materiálů získáme z tabulky 1. Nutno upozornit na to, že pro výpočet rychlosti šíření zvuku v určitém materiálu je třeba znát dynamický modul pružnosti. U některých materiálů je rozdíl mezi dynamickým modulem pružnosti a statickým modulem pružnosti dosti veliký a když ho zanedbáme dopustíme se velkých omylů.

V tabulce 1 je uvedena také hodnota měrné akustické impedance, která je dána u rovinné skustické vlny poměrem mezi akustickým tlakem a akustickou rychlostí. Tento poměr se rovná součinu hustoty a rychlosti šíření zvuku

Tab. 1. Rychlost šíření podélních vln v různých látkách.

materiál	ρ [kg/m ³]	E [N/m ²]	c_L [m/s]	Z [Ns/m ³]
vzduch 20 °C	1,21		344	4,14.10 ²
voda 13 °C	1000		1440	5,12.10 ²
pryž měkká	900	4,4.10 ⁴	70	6,3.10 ⁴
pryž tvrdá	1100	2,2.10 ⁹	1400	1,5.10 ⁶
korek	250	6,3.10 ⁷	500	1,3.10 ⁵
dřevo bukové	650	1,0.10 ¹⁰	3900	2,5.10 ⁶
hliník	2700	6,2.10 ¹⁰	4800	1,3.10 ⁷
ocel	7850	2,6.10 ¹¹	5750	4,5.10 ⁷
olovo	11400	2,3.10 ¹⁰	1410	1,6.10 ⁷
pórobeton	900	2,9.10 ⁹	1800	1,6.10 ⁶
azbestocement	1950	1,8.10 ¹⁰	3040	5,9.10 ⁶
beton	2300	2,2.10 ¹⁰	3100	7,1.10 ⁶
cihly	2000	1,6.10 ¹⁰	2800	5,6.10 ⁶
sadra	1050	4,4.10 ⁹	2040	2,1.10 ⁶
sklo	2700	7,5.10 ¹⁰	5270	1,4.10 ⁷
překližka	700	9,3.10 ⁹	3645	2,6.10 ⁶
sololit	1000	4,7.10 ⁹	2170	2,2.10 ⁶
polystyrén	13	1,3.10 ⁶	315	4,1.10 ³
novopdur	1450	1,0.10 ⁹	850	4,8.10 ⁵
silon	4450	1,8.10 ⁹	1250	1,44.10 ⁶
plexisklo	1200	3,0.10 ⁹	1580	1,9.10 ⁶
epoxy 2000	1200	3,5.10 ⁹	1700	2,0.10 ⁶

1.3 Rychlost šíření příčných vln v pevných látkách

Rychlost šíření příčného vlnění c_T je možno počítat ze vztahu

$$c_T = \sqrt{\frac{G}{r}} \quad (9)$$

Dosazením z rovnice (7) získáme výraz, který ukazuje, že poměr mezi rychlostí podélných vln a příčných vln je konstantní. Opět nutno upozornit, že rychlost podélných vln i příčných vln v tyčích a deskách je nezávislá na kmitočtu.

$$c_T = \sqrt{\frac{E}{r} \frac{1}{2(1+m)}} \quad (10)$$

Pro běžné konstrukční materiály je $\mu = 0,3$, z čehož po dosazení do (10) plyne závěr, že rychlost příčných (torzních) vln činí cca 62% z rychlosti podélných vln.

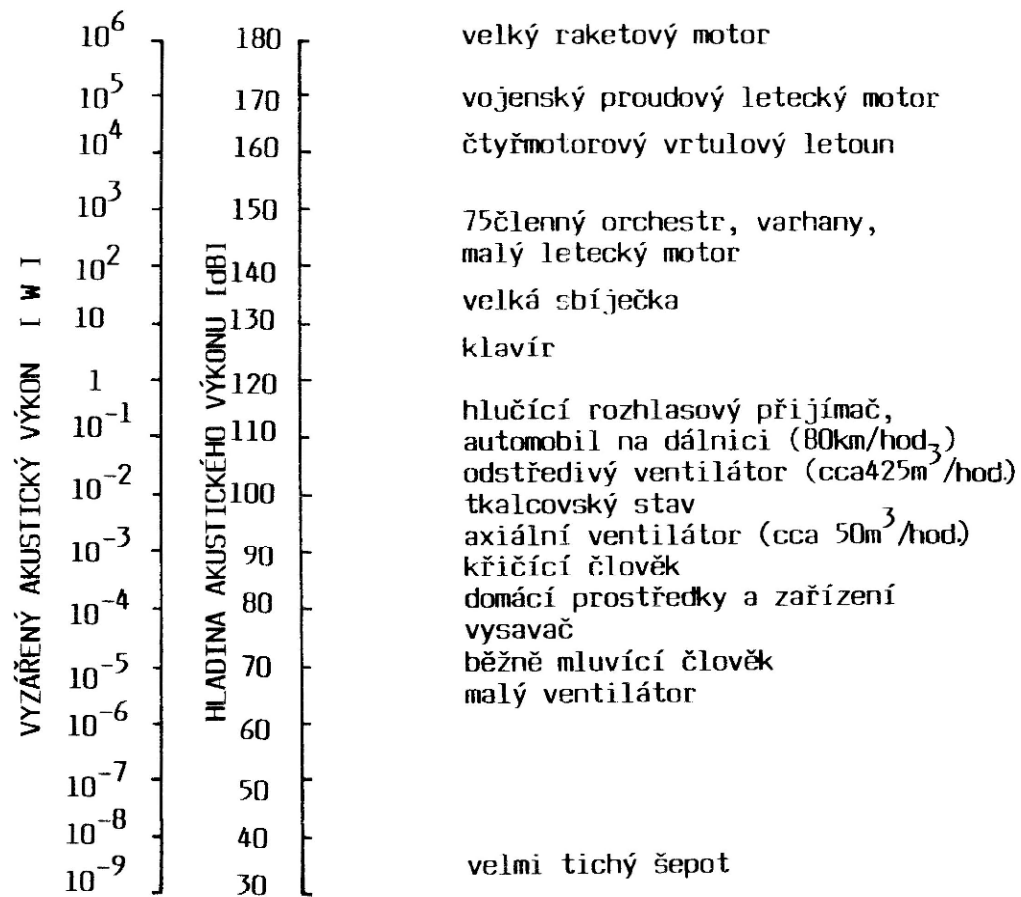
$$c_T = 0,62 c_L \quad (11)$$

Je třeba dodat, že pro výpočet rychlosti šíření zvuku je nutno používat dynamické moduly pružnosti, jejichž hodnota bývá u některých materiálů 5 až 20 krát větší než je hodnota statických modulů pružnosti.

2 HLADINA AKUSTICKÉHO VÝKONU

Sledujeme-li šíření zvuku od zdroje k posluchači, zjišťujeme, že se při tom uplatňují základní zákony fyziky, jako je např. zákon o zachování hmoty a energie. Veličiny, s kterými jsme do této doby operovali, byly akustický tlak p [Pa], akustická rychlost v [m/s], intenzita zvuku I [W/m^2], akustický výkon W [W] apod. Podrobnějším koumáním zjistíme, že se tyto veličiny mění běžně v praxi o mnoho řádů. Např. akustický výkon, který odpovídá slabému šepotu, představuje hodnotu cca $1 \cdot 10^{-9}$ W a křikem naopak můžeme vyzářit do prostoru akustický výkon asi $1 \cdot 10^3$ W, velký symfonický orchestr reprezentuje akustický výkon 10 až 20 W a velký proudový letou vyzařuje již 10^5 W. V širokém rozsahu se pohybují i ostatní akustické veličiny. Podobně jako je tomu i v jiných oborech, musíme pro grafické vyjádření závislostí použít logaritmické stupnice resp. logaritmický papír. Navíc podle Weber-Fechnerova zákona lze prokázat logaritmickou závislost mezi objektivními akustickými veličinami a subjektivním vjemem člověka. Z uvedených důvodů byl v technické akustice zaveden pojem „hladin“ jednotlivých akustických veličin, jejichž jednotkou je „decibel“ [dB]. Decibelové stupnice nejsou používány pouze v technické akustice, ale setkáme se s tímto rozměrem i v elektrotechnice v případech, kdy se např. napětí mění o řády. Vhodnost zápisu pomocí decibelů je zcela zřejmá z tab. 2.

Z posledních dvou sloupců tabulky vyplývá, že při použití decibelových stupnic je důležité stanovit referenční hodnotu. Např. mezi referenčními hodnotami 1 W a 10^{-12} je v decibelových stupnicích konstantní rozdíl 120 dB. Norma ČSN 01 1304 „veličiny, jednotky a značky v akustice“ stanoví, v souladu s mezinárodními úmluvami ISO, jako referenční hodnotu akustického výkonu 10^{-12} W. Ve starší technické literatuře, zejména z USA, můžeme najít jiné referenční hodnoty. Proto je třeba přejímat informace z této oblasti s určitou opatrností.



Obr. 5. Akustický výkon a jeho hladina.

2.1 Hladina akustického výkonu L_w [dB]

Tato hladina je definována vztahem:

$$L_w = 10 \log \frac{W}{W_0} \quad (12)$$

kde je W_0 [W] - referenční akustický výkon, $W_0 = 10^{-12}$ W,

W [W] - sledovaný akustický výkon

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

Tab. 2. Lineární a decibelová stupnice pro akustický výkon.

Vyzařovaný akustický výkon W [W]		Hladina akustického výkonu L_W [dB]	
Normální zápis	Ekvivalentní exponenciální notace	vzhledem k $W_0 = 1$ W	vzhledem k $W_0 = 10^{-12}$ W
100 000	10^5	50	170
10 000	10^4	40	160
1 000	10^3	30	150
100	10^2	20	140
10	10^1	10	130
1	10^0	0	120
0,1	10^{-1}	-10	110
0,01	10^{-2}	-20	100
0,001	10^{-3}	-30	90
0,0001	10^{-4}	-40	80
0,00001	10^{-5}	-50	70
0,000001	10^{-6}	-60	60
0,0000001	10^{-7}	-70	50
0,00000001	10^{-8}	-80	40
0,000000001	10^{-9}	-90	30

2.2 Hladina intenzity zvuku L_I [dB]

Tato hladina je definována vztahem

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad (13)$$

kde je I_0 [W/m²] - referenční hodnota intenzity zvuku,

I [W/m²] - intenzita zvuku sledovaného akustického signálu.

Na příkladu hladiny intenzity zvuku si vysvětlíme důležitost údaje o frekvenčním pásmu, ke kterému určitý decibelový údaj patří.

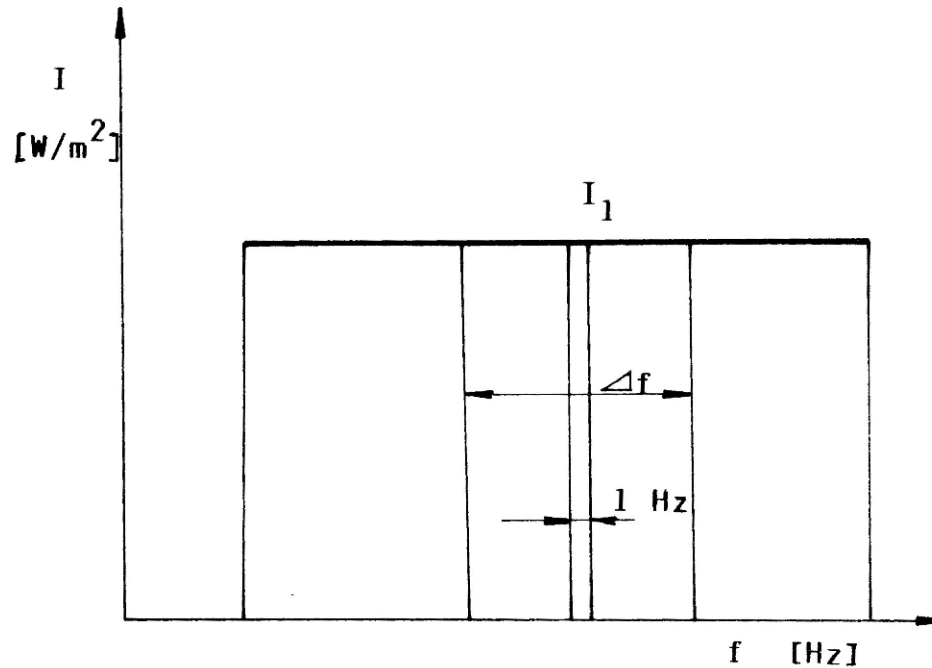
Mějme spojitě spektrum zvuku, jehož sledovanou veličinou je intenzita zvuku. Spektrum bude vyneseno pro frekvenční šíři pásma 1 Hz a bude to hodnota konstantní, jak je vidět z obr. 7. Bude-li nás zajímat intenzita zvuku při určité frekvenci a v šíři pásma 1 Hz, lze

tento údaj z obr. 7 jednoduše odečíst. Jak však určíme, kolik energie je obsaženo např. ve frekvenčním pásmu Δf , které je větší než 1 Hz.

Intenzitu zvuku lze vyjádřit vztahem

$$I = I_1 \Delta f \quad (14)$$

kde je I_1 [W/m^2] - intenzita zvuku pro šíři pásma 1 Hz



Obr. 6. Spektrum intenzity zvuku pro $\Delta f = 1$ Hz.

Znamená to tedy, že spektra stejného zvuku zakreslený do diagramů pro různou šíři pásma nebudou dosahovat stejných hodnot. Na našem Příkladu se dá ukázat, že spektrum pro šíři pásma $\Delta f = 10$ Hz bude dávat výsledky 10 krát větší. Převedeme-li tento příklad do decibellových stupnic, bude hladina intenzity zvuku ve frekvenčním pásmu 10 Hz o 10 dB vyšší než hladina intenzity zvuku pro jednotkovou šíři pásma, protože můžeme psát na základě platnosti předcházejícího vztahu

$$L_1 = L_{11} + 10 \log \Delta f \quad (15)$$

V příkladu jsme pro jednoduchost použili pásma 1 Hz a 10 Hz, což jsou z hlediska běžné zvukoměrné aparatury pásma velice úzká. V technické praxi se vžilo použití oktávových a třetinoktávových frekvenčních pásem.

V obecném případě, kdy spektrum zvuku bude závislé na kmitočtu, bude třeba hladinu intenzity pro širší kmitočtové pásmo určovat ze vzorce

$$L_I = 10 \log \left[\frac{1}{I_0} \int_{f_1}^{f_2} I(f) df \right] \quad (16)$$

Kde je $I(f)$ [W/m²Hz] - spektrální hustota intenzity zvuku.

2.3 Vzájemná souvislost decibelových veličin

Dosadíme-li výraz (17) do definičního vzorce hladiny intenzity zvuku,

$$I = \frac{P_{ef}^2}{rc} \quad (17)$$

můžeme psát

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0} = 10 \log \frac{\frac{p^2}{rc}}{\frac{p_0^2}{r_0 c_0}} = 20 \log \frac{p}{p_0} + 10 \log \frac{r_0 c_0}{rc} \quad (18)$$

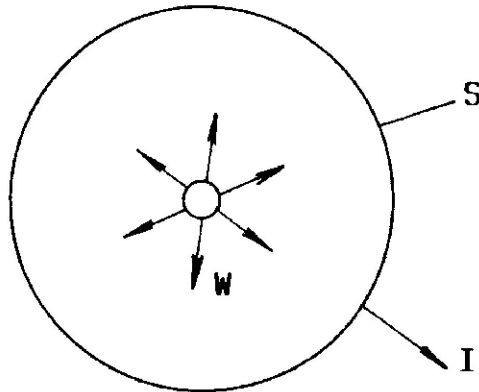
Při běžných klimatických podmínkách poslední člen rovnice má hodnotu $-0,2$ dB, takže vztah můžeme zjednodušit do tvaru

$$L_I = L_p - 0,2 \approx L_p \quad (19)$$

Tento vzorec má velký význam v technické akustice, protože nám umožňuje na základě měření hladiny akustického tlaku přímo určovat hladinu intenzity zvuku. Rozdíl $-0,2$ dB možno zanedbat, aniž bychom podstatně ovlivnili přesnost akustických výpočtů nebo měření zvuku.

Hladina akustického výkonu L_w je také vyjadřována v decibelech, avšak je nutné ji odlišovat od ostatních hladin, zejména od hladiny akustického tlaku a hladiny intenzity zvuku. Tento rozdíl si zřetelně uvědomíme, budeme-li si pamatovat, že hladina akustického výkonu určuje vždy akustický výkon vyzařovaný určitým zdrojem a je to tudíž vlastnost jenom zdroje zvuku. Hladina akustického tlaku naopak určuje akustický děj v kontrolním místě resp. v místě posluchače. Tato veličina se výrazně mění se vzdáleností a směrem od zdroje, v závislosti na cestě šíření akustické energie, okolním prostředí apod.

Pro zdroje, které vyzařují akustickou energii rovnoměrně do všech směrů si nyní odvodíme závislost mezi hladinou akustického výkonu a hladinou akustického tlaku. Obklopíme-li zdroj akustické energie měřicí plochou S [m^2], jak ukazuje obr. 8., můžeme na ní měřením zjistit intenzitu zvuku.



Obr. 7. Zdroj zvuku vyzařující rovnoměrně

do všech stran.

Veškerý akustický výkon vyzářený zdrojem musí projít měřicí plochou, takže platí

$$W = IS \quad (20)$$

Dosadíme-li nyní tento vztah do definičního vzorce hladiny akustického výkonu dostaneme následující rovnici

$$L_w = 10 \log \frac{W}{W_0} = 10 \log \frac{IS}{I_0 S_0} \quad (21)$$

Pravou stranu rovnice možno rozdělit na dvě části. První člen v rovnici je hladina intenzity zvuku, kterou můžeme nahradit na základě předcházejících odvození hladinou akustického tlaku. Ve druhém členu volíme referenční plochu $S_0 = 1 \text{ m}^2$, takže konečný výraz bude mít tvar

$$L_w = L_p + 10 \log S \quad (22)$$

Pro přibližně bodový malý zdroj zvuku, vyzařující rovnoměrně do všech směrů, lze konstatovat, že ve vzdálenosti 1m od středu bodového zdroje zvuku činí rozdíl mezi hladinou akustického tlaku a hladinou akustického výkonu přibližně 10 dB. Při větších vzdálenostech je tento rozdíl podstatně větší. Je to důvod, proč se firmy vyrábějící hlučné stroje brání

zveřejnění spektra hladiny akustického výkonu, které by nebylo dobrou reklamou. Jsou to hodnoty podstatně vyšší, než odpovídá spektru hladiny akustického tlaku. Projektant, který se v tomto údaji splete, se dopustí velkých nepřesností v akustických výpočtech. Tak např. chladicí věž, jejíž hladina akustického výkonu bude 100 dB, ve vzdálenosti 20 m bude mít odpovídající hladinu zvuku pouze 66 dB.

3 ŠÍŘENÍ CHVĚNÍ V KONSTRUKCÍCH

3.1 Veličiny charakterizující chvění

V úvodní kapitole jsme konstatovali, že zvuk je mechanické vlnění, projevující se kmitáním částic prostředí, kterým se šíří od zdroje. V případě šíření zvuku pevnými materiály nazýváme toto kmitání chvěním. Od obecnějších pojmů vibrace nebo otřesy se liší svým frekvenčním rozsahem, který je dán pásmem slyšitelných kmitočtu. Všechny materiály, s kterými se v tomto případě setkáváme, vykazují při pružných deformacích určité ztráty energie způsobené vnitřním tlumením. To znamená, že při šíření vlnění určitou konstrukci bude intenzita chvění klesat v závislosti na vzdálenosti od zdroje. U běžných konstrukčních materiálů je tento pokles velmi malý. Ke snížení energie chvění může docházet i vlivem vyzařování zvuku z konstrukce do vzduchu, což se především stává při šíření ohybového vlnění v deskách a tyčích. Prochází-li chvění určitým místem v konstrukci, kde je nějaká diskontinuita, jako např. změna průřezu, změna materiálu, ohyb nebo rozvětvení, tam nastává odraz akustické vlny nazpět ke zdroji, což se navenek projevuje opět jako určitý útlum. Nutno však zdůraznit, že se nejedná o přeměnu akustické energie na teplo, ale pouze o její odraz zpět ke zdroji, což může vyvolat v úseku mezi místem diskontinuity a zdrojem zvuku úplné nebo částečné stojaté vlnění.

Budeme-li sledovat kmitavý pohyb hmotného elementu prostředí, můžeme jej v určitém časovém okamžiku určit jeho výchylku z rovnovážné polohy, rychlost kmitání nebo zrychlení tohoto pohybu. Ze základů fyziky víme, že tyto tři veličiny jsou navzájem závislé, jak ukazují následující vztahy. Rychlost kmitání získáme první derivací okamžité výchylky podle času

$$v = \frac{dy}{dt} \quad (23)$$

kde je v [m/s] - rychlost kmitání,

y [m] - výchylka kmitajícího bodu z rovnovážné polohy.

Podobně získáme zrychlení pomocí první derivace rychlosti podle času

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2 y}{dt^2} \quad (24)$$

Kde je a [m/s^2] - zrychlení mechanického kmitání

Průběh veličin určujících mechanické kmitání v čase bývá v praxi velmi obecný a je obtížné jej fyzikálně charakterizovat. V takových případech je zvykem průběh příslušné veličiny převést na průběh frekvenční, tj. na spektrum. Provádí se to pomocí Fourierových vzorců. Vztahy mezi veličinami chvění se obvykle odvozují pro jednoduché harmonické kmitání. Platnost těchto základních vztahů se potom pomocí Fourierových vzorců uplatňuje i na obecné kmitání. V dalším se budeme proto zabývat harmonickým kmitáním, jehož okamžitou výchylku je možno vyjádřit ve tvaru

$$y = y_0 \sin \omega t \quad (25)$$

Kde je y_0 [m] - amplituda výchylky chvění,

ω [1/s] - úhlový kmitočet

Provedme jeho první a druhou derivaci podle času. Dostaneme tak výrazy popisující vzájemné závislosti základních veličin kmitání

$$v = \omega y_0 \cos \omega t \quad (26)$$

$$a = -\omega^2 y_0 \sin \omega t = -v^2 / y \quad (27)$$

Pro amplitudy rychlosti kmitání v_0 a zrychlení a_0 je možno psát

$$v_0 = y_0 \omega \quad (28)$$

$$a_0 = y_0 \omega^2 = v_0 \omega \quad (29)$$

ČSN 01 1390 "Měření mechanického kmitání" doporučuje používat efektivních hodnot veličin charakterizujících kmitání, pro něž lze psát vztahy

$$v_{ef} = \frac{v_0}{\sqrt{2}} = \frac{y_0}{\sqrt{2}} \omega = y_{ef} \omega \quad (30)$$

$$a_{ef} = \frac{a_0}{\sqrt{2}} = \frac{v_0}{\sqrt{2}} \omega = v_{ef} \omega = y_{ef} \omega^2 \quad (31)$$

Kde je y_{ef} [m] - efektivní hodnota výchylky kmitání,

v_{ef} [m/s] - efektivní hodnota rychlosti kmitání,

a_{ef} [m/s^2] - efektivní hodnota zrychlení kmitavého pohybu.

Uvedené závislosti dokazují, že není třeba zjišťovat vždy tři veličiny, ale pouze tu, pro kterou jsou vhodné podmínky k měření odpovídající kvalitní měřící aparatura. Nejčastěji měříme efektivní hodnoty hodnoty zrychlení nebo rychlosti chvění. Jejich vzájemný vztah je zakreslen v grafu na obrázku 9.

Šíření chvění pevnými materiály je doprovázeno střídavými změnami napětí a $[\text{N/m}^2]$, které má obdobný význam jako akustický tlak při šíření zvuku ve vzduchu. Můžeme pomocí něho a rychlosti chvění vyjádřit intenzitu chvění, což je množství energie chvění, které prochází plošnou jednotkou za 1 s

$$I = \sigma_{ef} v_{ef} \quad (32)$$

Kde je I $[\text{W/m}^2]$ - intenzita chvění v tyči,

v_{ef} $[\text{m/s}]$ - efektivní rychlost chvění,

σ_{ef} $[\text{N/m}^2]$ - efektivní napětí.

Při úvahách a výpočtech šíření akustického signálu v konstrukcích se pracuje velice často s důležitou veličinou, která se nazývá mechanická impedance Z_m $[\text{Ns/m}]$. Udává poměr mezi budící silou F $[\text{N}]$ a rychlostí chvění ve sledovaném místě

$$Z_m = \frac{F}{v} \quad (32)$$

Mechanická impedance v konstrukcích se mění vlivem změn průřezu tyčí a desek nebo změnou hustoty materiálu a modulem pružnosti. Se změnou mechanické impedance potom souvisí i útlumy vlivem odrazu v místech diskontinuity.

Dosadíme-li do vztahu (32) za sílu F , můžeme psát

$$Z_m = \frac{\sigma S}{v} \quad (33)$$

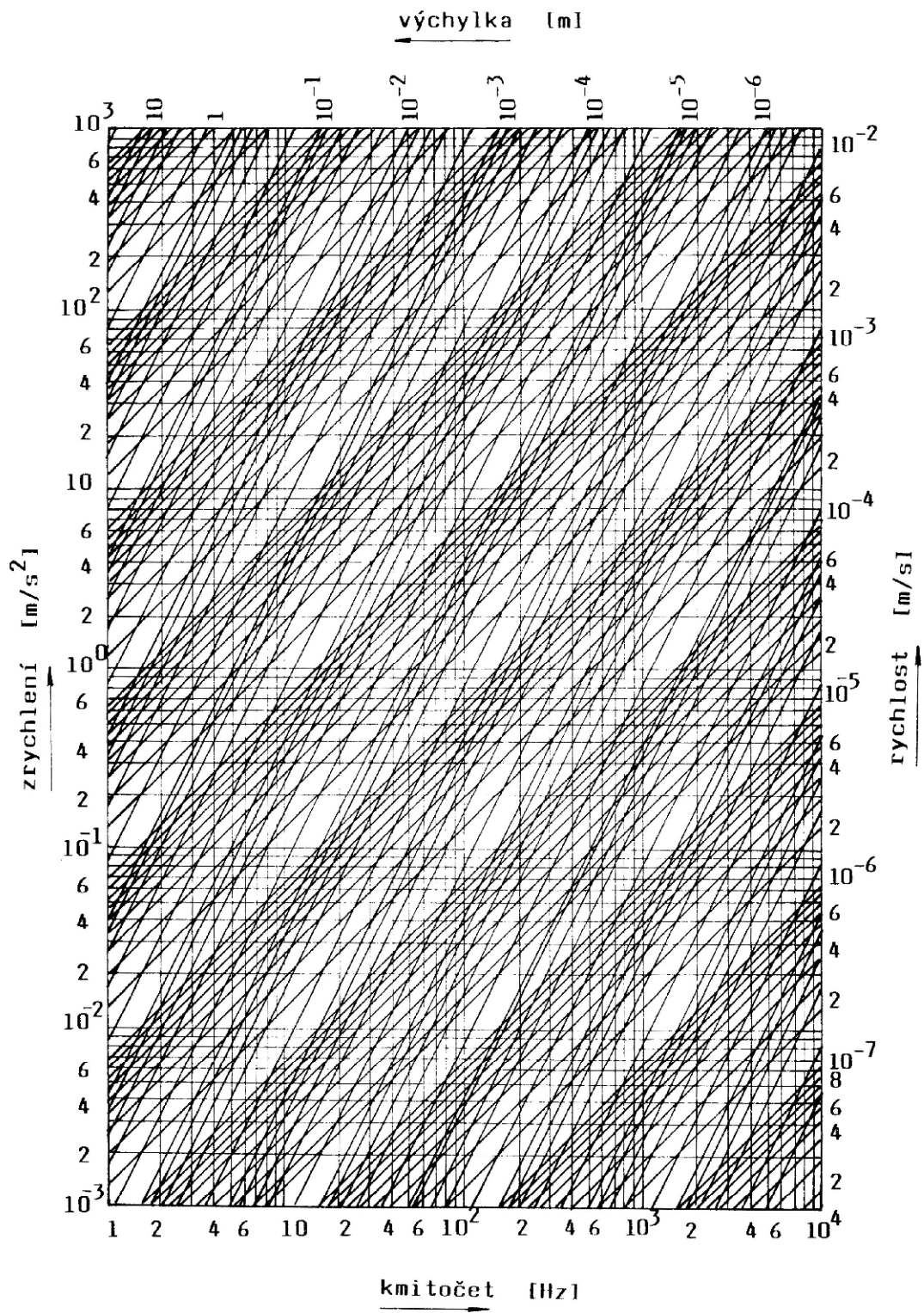
Kde je σ $[\text{N/m}^2]$ - napětí ve sledovaném průřezu,

S $[\text{m}^2]$ - průřez tyče nebo desky.

Poměr mezi napětím a rychlostí chvění nazýváme měrnou mechanickou impedancí Z_s

$$Z_s = \frac{\sigma}{v} \quad (34)$$

Což je analogické vztahu pro vlnový odpor prostředí.



Obr. 8. Vzájemná závislost veličin mítání.

Měrná mechanická impedance podélně kmitající nekonečně dlouhé tyče se dá vypočítat ze vztahu

$$Z_s = rc_L \quad (35)$$

Podobně pro případ ohybového vlnění v nekonečně dlouhé tyči bude platit

$$Z_s = rc_B \quad (36)$$

Zavedením pojmu měrná mechanická impedance můžeme vztah (32) pro výpočet intenzity přenášeného chvění ještě upravit do tvaru

$$I = v^2 rc_L \quad (37)$$

Kde je v [m/s] efektivní hodnota rychlosti chvění. Index e_f se obvykle v akustice vynechává.

Význam této rovnice vyplývá z praktické nemožnosti přímého měření dynamického namáhání např. tyče, kterou se šíří akustický signál. Naopak měření rychlosti chvění není pro nás technickým problémem.

Praxe ukázala, že je výhodné, stejně jako při šíření zvuku vzduchem, používat logaritmických stupnic při určování velikosti jednotlivých veličin chvění.

Byla proto zavedena hladina zrychlení chvění

$$L_a = 20 \log \frac{a}{a_0} \quad (38)$$

Kde je L_a [dB] - hladina zrychlení chvění,

a [m/s²] - efektivní hodnota zrychlení chvění,

a_0 [m/s²] - referenční hodnota zrychlení chvění ($a_0 = 10^{-6}$ m/s²).

Podobně lze definovat výraz pro hladinu rychlosti chvění

$$L_v = 20 \log \frac{v}{v_0} \quad (39)$$

Kde je L_v [dB] - hladina rychlosti chvění,

v [m/s] - efektivní hodnota rychlosti chvění,

v_0 [m/s] - referenční hodnota rychlosti chvění ($v_0 = 10^{-8}$ m/s).

Každá z vyjmenovaných hladin má svoje spektrum. Je proto důležité určovat, pro jaké kmitočtové pásmo byla určitá hladina chvění stanovena.

V tyčích a deskách se při jejich kmitání výrazně projevují okrajové podmínky, které mají vliv na vlastní frekvence. Chceme-li řešit problémy spojené se snižováním chvění v konstrukcích, nemůžeme dost dobře sledovat šíření chvění v konstrukcích jako celku. Snažíme se proto rozdělit konstrukce na jednotlivé základní konstrukční prvky, které by bylo možno pokládat za tyče nebo desky.

3.2 Kmitání desek

3.2.1 Ohybové kmitání nekonečně velkých desek

Pro praktické použití má význam se zabývat deskami relativně tenkými, pro které platí, že jejich tloušťka $h \ll \lambda_B$. Budeme tak moci uplatnit poznatky z ohybového kmitání tenkých tyčí. Předpokládejme, že:

- a) příčný průřez desky je stále rovinný i při namáhání;
- b) na neutrální ose neexistuje žádné podélné ani příčné napětí.

Přibližně budou tyto podmínky splněny pro desku, jejíž tloušťka bude $h \ll 1/6 \lambda_B$

Za těchto předpokladů je možno podle [2] odvodit rovnici, která popisuje ohybové kmitání desky

$$B \left(\frac{\partial^4 u}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 u}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 u}{\partial y^4} \right) + rh \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = f(x, y) \quad (40)$$

Kde je B - ohybová tuhost desky,

$f(x, y)$ - funkce vnějšího silového působení na desku.

Ohybovou tuhost určíme ze vzorce

$$B = \frac{Eh^3}{12(1 - \mu^2)} \quad (41)$$

Kde je μ [-] - Poissonův poměr.

Součet tří členů v závorce rovnice (40) představuje dvojnásobný Laplaceův operátor $\nabla^2 u$, který lze vyjádřit pro případ harmonického kmitání jako součin

$$(\nabla^2 u + k_B^2 u)(\nabla^2 u + k_B^2 u) = 0 \quad (42)$$

Budeme-li do výpočtu zahrnovat i ztráty energie vlivem vnitřních ztrát v materiálu desky, obdržíme upravenou rovnici (40) ve tvaru

$$\left(B + m \frac{\partial}{\partial t} \right) \nabla^4 u + m'' \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = f(x, y) \quad (43)$$

Kde je μ [-] - činitel vnitřních ztrát v materiálu,

M [kg/m²] - plošná hmotnost desky.

3.2.2 Volné kmitání pravoúhlých desek

Desky se od membrán liší ohybovou tuhostí. Také okrajové podmínky u desek jsou mnohem složitější než u membrán. V zásadě mohou nastat tři případy:

- deska je na všech okrajích volná,
- deska je volně podložena na svém okraji,
- deska je na obvodu vetknuta.

V deskách je na rozdíl od membrán rychlost šíření vlny závislá na kmitočtu.

Podle Maleckého [2] lze určit pro desku volně podloženou na okrajích vlastní frekvence ze vzorce

$$f_{mn} = \frac{p}{2} \sqrt{\frac{B}{m''} \left[\left(\frac{m}{a} \right)^2 + \left(\frac{n}{b} \right)^2 \right]} \quad (44)$$

Kde jsou a a b [m] strany desky,

m a n různá celá kladná čísla

Spektrum volně kmitající obdélníkové desky je odlišné od spektra vlastních kmitů membrán zejména z důvodu odlišných okrajových podmínek. Prakticky každé konkrétní upnutí desky vyvolává odlišné rezonanční kmitočty a proto velmi často jsou v technické literatuře publikována řešení pro různá konstrukční uspořádání.

4 AKUSTICKÉ PROSTŘEDKY SNIŽOVÁNÍ HLUKU

4.1 Materiály a konstrukce pro pohlcování zvuku

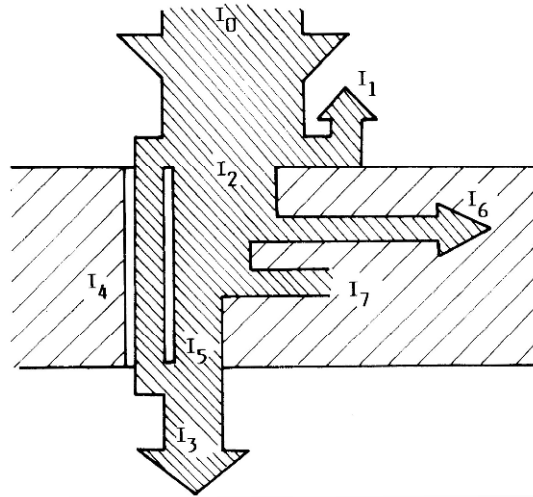
V této části se budeme zabývat základními typy látek pro pohlcování zvuku. Jejich základní akustická vlastnost, tj. přeměna akustické energie na teplo bude dána kmitočtovou závislostí činitele zvukové pohltivosti. Pokud nebude uvedeno jinak, budeme vždy uvažovat, že se jedná o všesměrový dopad zvukových vln.

Z hlediska uspořádání a typické závislosti činitele pohltivosti na kmitočtu můžeme pohltivé látky rozdělit na látky porézní, a látky a konstrukce, spočívající na rezonančním principu. Kromě toho se používají i úpravy smíšené nebo úpravy vzniklé kombinací absorpčních prvků a tzv. konstantami koncentrovanými (akustická hmota, poddajnost) a konstantami rozdělenými (vlnovody).

4.2 Neprůzvučné konstrukce

4.2.1 Šíření zvuku přes stěnu

V úvodní kapitole jsme vyjmenovali základní metody boje proti hluku. Metoda izolace využívá při snižování hluku vlastnosti stěn, příček, stropů, podlah a zákrytů, které obecně říkáme neprůzvučnost. Na obr. 10 je znázorněno rozdělení akustické energie při dopadu vlny na stěnu na několik částí. Nyní se budeme zabývat tou složkou, která prochází za stěnu. Přesněji řečeno bude nás zajímat energie vyzářená za stěnu do druhého prostoru.



Obr. 9. Schéma rozdělení akustické energie při dopadu zvukové vlny na stěnu.

Uvažujme nyní zvukovou vlnu, která dopadá kolmo na ohybově měkkou stěnu, která rozděluje plynné prostředí na dva zcela oddělené prostory, jak je schématicky znázorněno na obr. 11. Část akustické energie bude odražena nazpět ke zdroji, druhá část bude pronikat za stěnu. Musí opět platit rovnice kontinuity pro akustickou rychlost. Akustický tlak dopadající vlny vyjádříme zápisem.

$$p_+ = p_D e^{j\omega(t-x/c)} \quad (45)$$

a podobně i pro vlnu odraženou bude platit

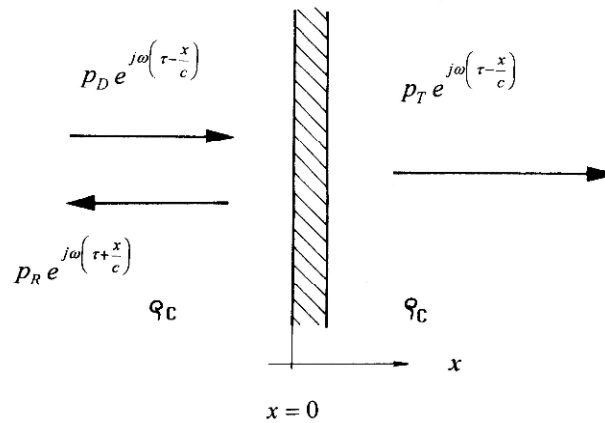
$$p_- = p_R e^{j\omega(t+x/c)} \quad (46)$$

Význam jednotlivých veličin je vysvětlen na schématickém obr. 10-13. Akustický tlak p_1 působící na stěnu zleva bude dán součtem předcházejících složek, když dosadíme za vzdálenost $x = 0$

$$p_1 = (p_D + p_R) e^{j\omega t} \quad (47)$$

Akustický tlak na druhé straně stěny bude vyjádřen obdobným vztahem, když zanedbáme tloušťku stěny d

$$p_2 = p_T e^{j\omega t} \quad (48)$$



Obr. 10. Přenos akustického signálu stěnou.

Při platnosti rovnice kontinuity musí být rychlost kmitání stěny v rovna akustickým rychlostem zleva i zprava, což lze vyjádřit rovnicí

$$v_2 = v_1 = v_+ - v_- \quad (49)$$

Dosažením z předcházejících vztahů a po nezbytných úpravách dostaneme rovnici

$$\frac{1}{rc}(p_D - p_R)e^{j\omega t} = \frac{p_T}{rc}e^{j\omega t} \quad (50)$$

Nyní napíšeme pro stěnu pohybovou rovnici

$$(p_D + p_R - p_T)e^{j\omega t} = m'' \frac{\partial v}{\partial t} \quad (51)$$

Kde je m'' [kg/m^2] - plošná hmotnost stěny

Provedením substituce z rovnice (50) získáme rovnici

$$(p_D + p_R - p_T) = m'' \frac{j\omega p_T}{rc} \quad (52)$$

Amplitudu akustického tlaku vlny prošlé za stěnu možno získat řešením uvedených rovnic ve tvaru

$$p_T = \frac{2rc}{2rc + j\omega m''} p_D \quad (53)$$

Intenzita I_2 zvuku, který pronikl za stěnu je

$$I_2 = \frac{1}{rc} |p_T|^2 = \frac{4r^2 c^2}{4r^2 c^2 + w^2 m'^2} I_+ \quad (54)$$

Kde I_+ [W/m^2] - značí intenzitu dopadajícího zvuku.

4.2.2 Stupeň vzduchové neprůzvučnosti

Množství, respektive podíl akustického výkonu, který se dostává za stěnu, budeme udávat opět v decibelech. Akustickou kvalitu stěny vyjádříme stupněm vzduchové neprůzvučnosti R [dB], který je definován vztahem

$$R = 10 \log \frac{1}{t} \quad (55)$$

Stupeň vzduchové neprůzvučnosti je veličina kmitočtově závislá a proto musíme uvádět její spektrum. Snížení hladin hluku v důsledku neprůzvučnosti stěn bývá v praxi 10 až 50 dB, což jsou velmi vysoké hodnoty. Proto při konstrukci i projekci hlučných zařízení se snažíme mezi zdroj a posluchače vkládat dělicí stěny.

V praxi může nastat několik základních případů aplikace dělicích stěn. Nejčastějším případem bývá dispozice popsaná na obr. 12. Jsou-li známy hladiny akustického tlaku ve dvou sousedních místnostech, přičemž L_1 je hodnota naměřená v dozvukovém poli hlučné místnosti, kde se nalézá zdroj hluku a L_2 je hladina akustického tlaku v přijímací místnosti ve vzdálenosti rovné $\frac{1}{2}$ šířky stěny, bude jejich rozdíl dán rovnicí

$$L_1 - L_2 = R + 10 \log \frac{A_2}{S} \quad (56)$$

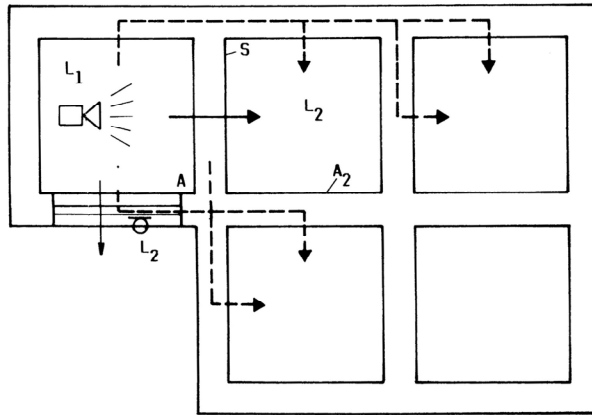
Kde je S [m^2] - plocha dělicí stěny,

A_2 [m^2] - celková pohltivost přijímacího prostoru

$$A_2 = \sum (a_i S_i)_2 \quad (57)$$

Levá strana rovnice (56) je nazývána stupněm zvukové izolace D [dB]

$$D = L_1 - L_2 \quad (58)$$

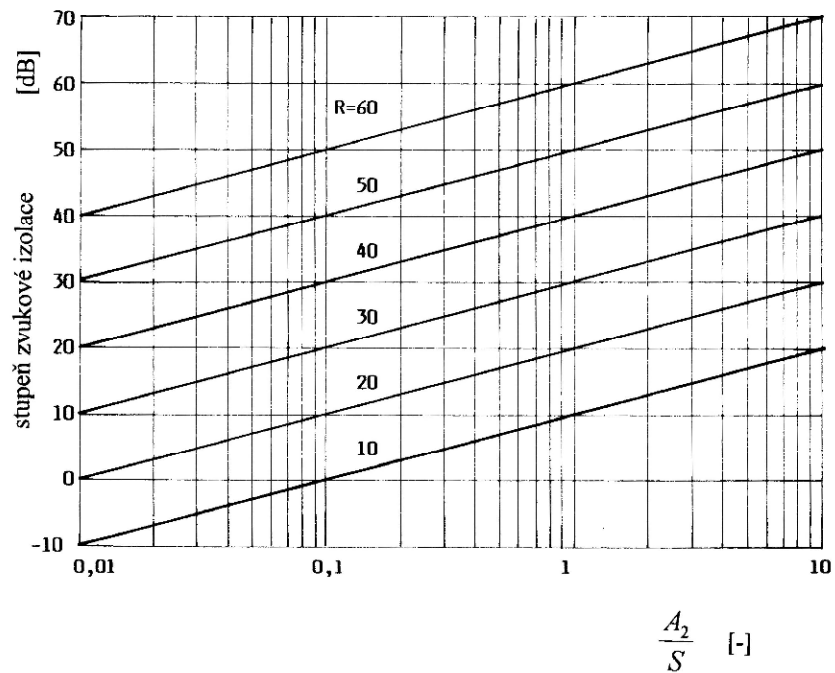


Obr. 11. Dvě místnosti oddělené stěnou.

Tato veličina udává výsledný zvukoizolační efekt. Jestliže je stupeň vzduchové neprůzvučnosti vlastností stěny, tak stupeň zvukové izolace závisí nejen na R , ale především na velikosti stěny a celkové pohltivosti přijímacího prostoru. Projektanti si tuto okolnost často neuvědomují a posuzují hlukovou situaci pouze podle hodnoty stupně vzduchové neprůzvučnosti. Tak např. ve zdravotnictví bývají z hygienických důvodů povrchy stěn místnosti tvořeny keramickými obklady, což je materiál akusticky tvrdý. Projeví se to tím, že poměr A_2/S je hodnota velmi malá (menší než 1) a v rovnici (56) je druhý člen záporný, snižující stupeň zvukové izolace. Přehled o této závislosti získáme z diagramu na obr. 12

Kdyby nás zajímala hladina akustického tlaku L_2 těsně za stěnou, musel' bychom vztah (56) upravit do tvaru

$$L_1 - L_2 = R - 10 \log \left[\frac{1}{4} + \frac{S(1 - a_2)}{S_2 a_2} \right] \quad (60)$$



Obr. 12. Stupeň zvukové izolace jako funkce stupně vzduchové neprůzvučnosti, pohltivosti prostoru a velikosti dělicí stěny.

Třetím případem bývá např. vyzářování hluku z budov do venkovního volného prostoru, který se vyznačuje tím, že přijímací prostor (místnost) má velkou pohltivost $\alpha > 0,8$. Potom lze pro stupeň izolace psát

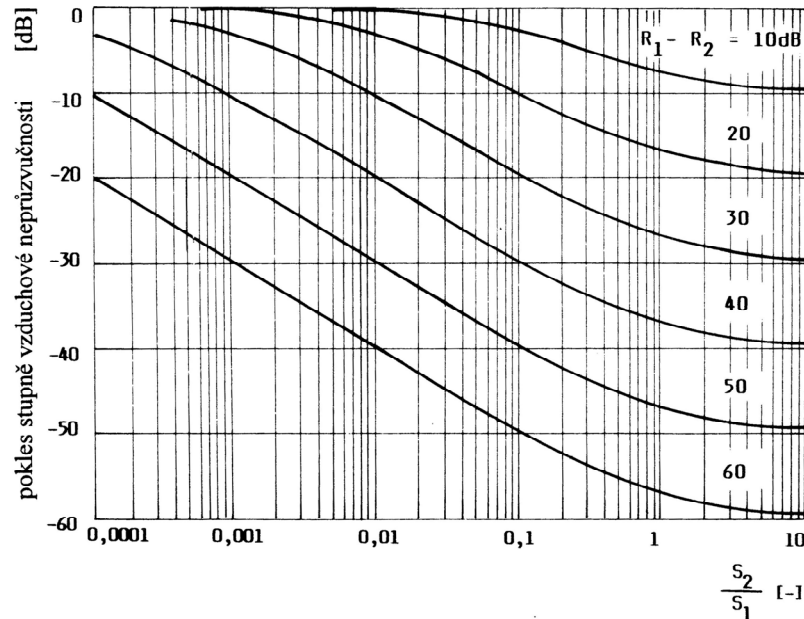
$$L_1 - L_2 = R + 6 \quad (61)$$

Velice často se setkáváme s případem, že dělicí stěna nemá po ploše stejnou tloušťku nebo není ze stejného materiálu. Při určování výsledného stupně vzduchové neprůzvučnosti musíme vyjít z energetické bilance. Jestliže je stěna složena z dílčích ploch S_1 až S_n , jejichž stupeň vzduchové neprůzvučnosti je R_1 až R_n , získáme výslednou celkovou průzvučnost prostým sečítáním průzvučností.

Dosažením do definičního vztahu (55) a po provedení nezbytných úprav získáme konečný vztah pro stupeň vzduchové neprůzvučnosti kombinované stěny

$$R = 10 \log \frac{\sum_{i=1}^n S_i}{\sum_{i=1}^n (10^{-0,1R_i} S_i)} \quad (62)$$

Bude-li stěna složena ze dvou dílčích ploch S_1 a S_2 pro jejichž stupně vzduchové neprůzvučnosti platí $R_1 \geq R_2$ můžeme stanovit výsledný stupeň vzduchové neprůzvučnosti pomocí diagramu na obr. 13 a vzorce



Obr. 13. Pokles stupně vzduchové neprůzvučnosti.

$$R = R_1 + \Delta R \quad (63)$$

Kde je ΔR [dB] - pokles stupně vzduchové neprůzvučnosti vlivem stěny s menším stupněm vzduchové neprůzvučnosti

Máme-li navrhnout zvukoizolační stěnu, je obvykle zadáný stupeň zvukové izolace. Nutno však zdůraznit, že se do chráněného prostoru nedostává akustický signál pouze vlivem průzvučnosti dělicí stěny. Existuje celá řada vedlejších cest šíření zvuku, což může způsobit velké problémy. Proto je zvykem zadáný stupeň zvukové izolace zvětšit o rezervní hodnotu cca 3,0 dB. Požadovaný stupeň vzduchové neprůzvučnosti potom určíme z rovnice

$$R = D + 10 \log \frac{S}{A_2} + 3 \quad (64)$$

Ve stavební akustice je zvykem udávat stupeň vzduchové neprůzvučnosti v 1/3 oktávových pásmech od středního kmitočtu 100 Hz až do 3150 Hz. Pro rychlou orientaci se používá pojem střední stupeň vzduchové neprůzvučnosti \bar{R} , který je dán aritmetickým průměrem ze 16 dílčích hodnot v 1/3 oktávových pásmech

$$\bar{R} = \frac{1}{16}(R_1 + R_2 + \dots + R_{16}) \quad (65)$$

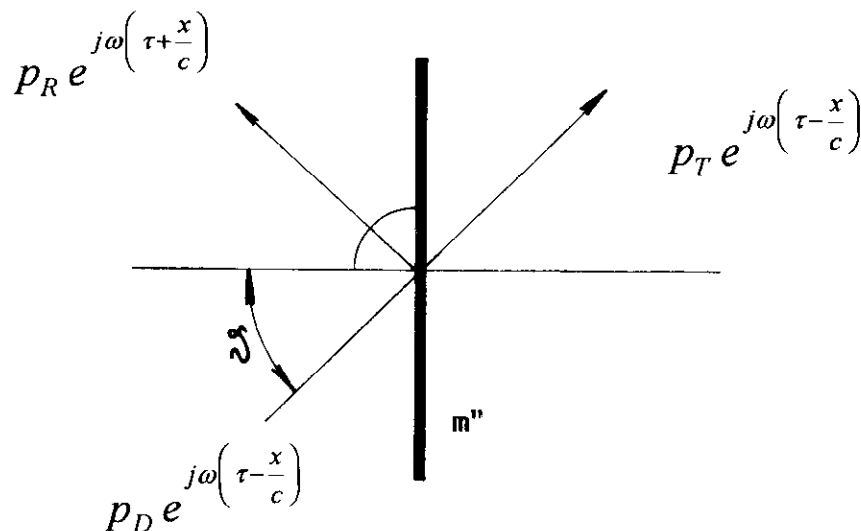
Pro přesnější výpočty, zejména při navrhování zvukoizolačních opatření v oblasti strojírenství, nemá tato hodnota praktický význam.

4.2.3 Neprůzvučnost jednoduché stěny

Při sledování akustických dějů v deskách rozdělujeme jednotlivé případy podle velikosti ohybové tuhosti stěn. U tenkých stěn a v oblasti nízkých frekvencí můžeme obvykle zanedbat ohybovou tuhost. Nechme za tohoto předpokladu dopadat na rovinnou homogenní neprodyšnou stěnu akustické vlnění pod obecným úhlem J , jak je znázorněno na obr. 14. Akustický tlak na levé straně stěny bude dán součtem akustického tlaku dopadající a odražené vlny.

Předpokládejme dále, že se jedná o akusticky tvrdou stěnu, takže akustický tlak na stěně můžeme vyjádřit jako dvojnásobek akustického tlaku vlny dopadající

$$p_1 = 2p_D e^{j\omega t} \quad (66)$$



Obr. 14 Schéma šikmo dopadajícího vlnění na stěnu.

Akustický tlak těsně za stěnou bude dán vztahem

$$p_2 = p_T e^{j\omega t} \quad (66)$$

Z rovnice (50) vyplývá možnost zápisu pohybové rovnice ve vektorovém znázornění

$$p_1 - p_2 = j\omega m'' v \quad (67)$$

Kde je součin $j\omega m''$ tzv. reaktivní odpor stěny a v rychlost kmitání stěny.

Dopadající vlnění na stěnu má v čase proměnlivý akustický tlak, což vyvolává ve stěně nucené ohybové kmitání. Mezi délkou zvukových vln ve vzduchu λ a délkou vynucených ohybových vln ve stěně λ'_B proto musí platit jednoduchá závislost

$$l'_B = \frac{l}{\sin J} \quad (68)$$

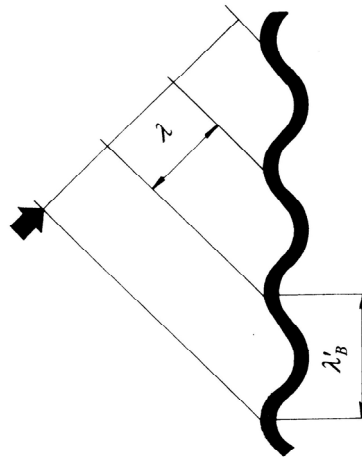
Rovnice (50) má řešení ve tvaru

$$\left| \frac{p_D}{p_T} \right|^2 = \left[1 + \left(\frac{\omega m'' \cos J}{2rc} \right)^2 \right] \quad (69)$$

kde je J [-] - úhel dopadu zvukové vlny na stěnu,

ω [1/s] - úhlový kmitočet přenášeného akustického signálu,

m'' [kg/m²] - plošná hmotnost stěny.



Obr. 15 Vynucené ohybové kmitání stěny.

Jelikož je činitel průzvučnosti dán poměrem intenzit vlny vyzářené za stěnu a vlny dopadající, musí platit pro stupeň vzduchové neprůzvučnosti

$$R = 10 \log \frac{1}{t} = 10 \log \left| \frac{p_D}{p_T} \right|^2 \quad (70)$$

Po dosazení ze vztahu (69) obdržíme rovnici

$$R = 10 \log \left[1 + \left(\frac{wm' \cos J}{2rc} \right)^2 \right] \quad (71)$$

Z uvedeného výrazu vyplývá směrová závislost stupně vzduchové neprůzvučnosti, která se skutečně projevuje při dopadu akustických vln např. na fasádu budov, kdy spodní podlaží vykazují vyšší stupeň zvukové izolace než horní poschodí, když je zdroj hluku na zemi. Pro kolmý dopad můžeme vztah (71) zjednodušit a upravit do tvaru

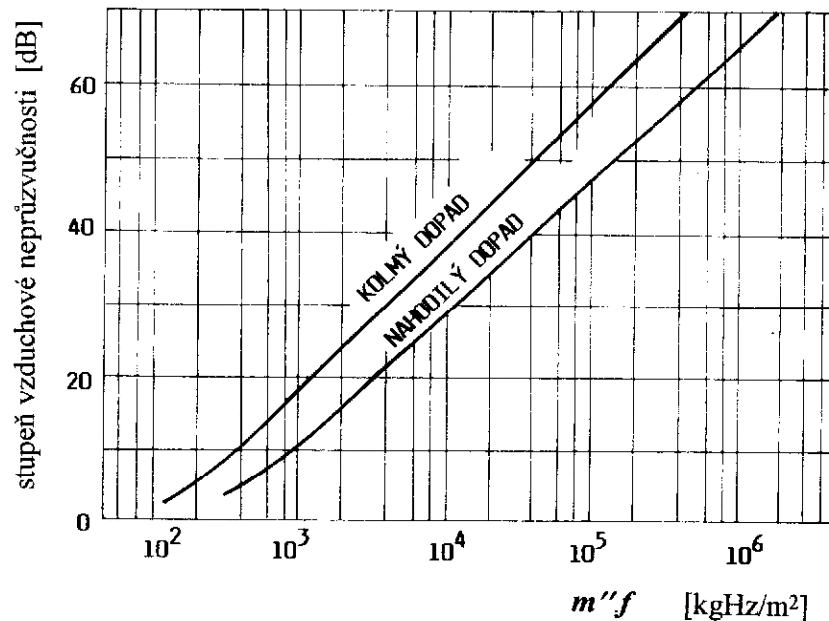
$$R = 20 \log m' + 20 \log f - 47,5 \quad (72)$$

který říká, že zdvojnásobením plošné hmotnosti nebo frekvence získáme stupeň vzduchové neprůzvučnosti o 6 dB vyšší. Z hlediska vzduchové neprůzvučnosti jsou tedy stěny z cihel, betonu nebo kamene vhodnější než stěny z lehkých porézních hmot, protože jsou hmotnější.

Pro všesměrový dopad se v literatuře doporučuje k praktickému použití vztah

$$R = 18 \log m' + 12 \log f - 25 \quad (73)$$

V diagramu na obr. 16 je zakreslen kmitočtový průběh stupně vzduchové neprůzvučnosti podle posledních dvou vztahů. Nutno zdůraznit, že uvedené závislosti platí pouze za předpokladu, že se stěna chová jako ohybově měkká.



Obr. 16 Stupeň vzduchové neprůzvučnosti ohybově měkkých stěn pro kolmý i všesměrový dopad akustických vln.

Při odvozování vztahů nebyla uvažována ohybová tuhost stěny, tzn. že byly zanedbány smykové síly mezi jednotlivými hmotnými elementy stěny. Předpoklad ohybově měkké stěny platí jen u tuhých stěn v oblasti nízkých kmitočtů. Pro ohybově tuhou stěnu nutno rozšířit výchozí rovnici (67) o člen vyjadřující existenci příčných smykových sil

$$p_1 - p_2 + \frac{\partial F}{\partial y} = j\omega m''v \quad (74)$$

Stupeň vzduchové neprůzvučnosti ohybově tuhých stěn můžeme vypočítat z následujícího vztahu, který je konečným řešením rovnice (74)

$$R = 10 \log \left\{ 1 + \left[\frac{\omega m'' \cos J}{2rc} \left(1 - \frac{c_B^4 \sin^4 J}{c^4} \right) \right]^2 \right\} \quad (75)$$

Vztah odvozený pro ohybově měkké stěny se rozšířil o člen, který je dán poměrem čtvrtých mocnin rychlosti ohybových vln ve stěně k rychlosti šíření zvuku ve vzduchu a to násobeno 4. mocninou funkce $\sin J$.

Ze vztahu (75) je zřejmé, že stupeň vzduchové neprůzvučnosti může klesnout teoreticky až na nulu, jestliže bude platit rovnost

$$\left(\frac{c_B \sin J}{c} \right)^4 = l \quad (76)$$

Tento stav odpovídá tzv. koincidenčnímu efektu, který nastane, jestliže se délka volných ohybových vln v desce rovná vlnové délce vynuceného ohybového kmitání

$$l'_B = l_B \quad (77)$$

Po dosazení ze vzorce (68) získáme rovnici

$$\frac{c}{f \sin J} = \sqrt{\frac{1,8c_L h}{f}} \quad (78)$$

jejímž řešením je vztah pro výpočet koincidenčního kmitočtu

$$f_k = \frac{c^2}{1,8c_L h \sin^2 J} \quad (79)$$

kde je h [m] - tloušťka desky,

c [m/s] - rychlost šíření zvuku ve vzduchu,

c_L [m/s] - rychlost podélných vln v desce,

J [-] - úhel dopadu zvukové vlny na stěnu.

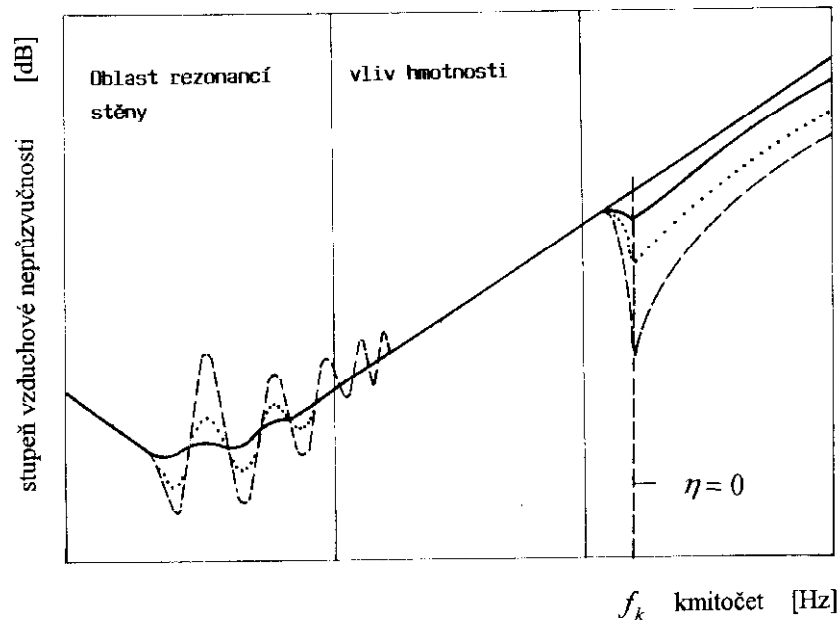
Při tomto kmitočtu dojde teoreticky k poklesu stupně vzduchové neprůzvučnosti na nulovou hodnotu. Koincidenčních kmitočtů je nekonečně mnoho, tak jako je nekonečně mnoho různých úhlů J .

Nejnižší koincidenční kmitočet nastane pro úhel dopadu $J = 90^\circ$

$$f_{k \min} = \frac{c^2}{1,8c_L h} = f_{kr} \quad (80)$$

Zajímavé je, že jsme došli ke stejnému vzorci jako je vztah pro kritický kmitočet při vyzáření zvuku ohybově kmitající deskou.

Při všesměrovém dopadu akustické energie (difuzní pole) na stěnu nedochází k úplné ztrátě neprůzvučnosti v důsledku koincidence. Praktický průběh stupně vzduchové neprůzvučnosti ukazuje obr. 17. Kmitočtový průběh stupně vzduchové neprůzvučnosti můžeme rozdělit do několika oblastí.



Obr. 17 Frekvenční průběh stupněň vzduchové neprůzvučnosti jednoduché stěny.

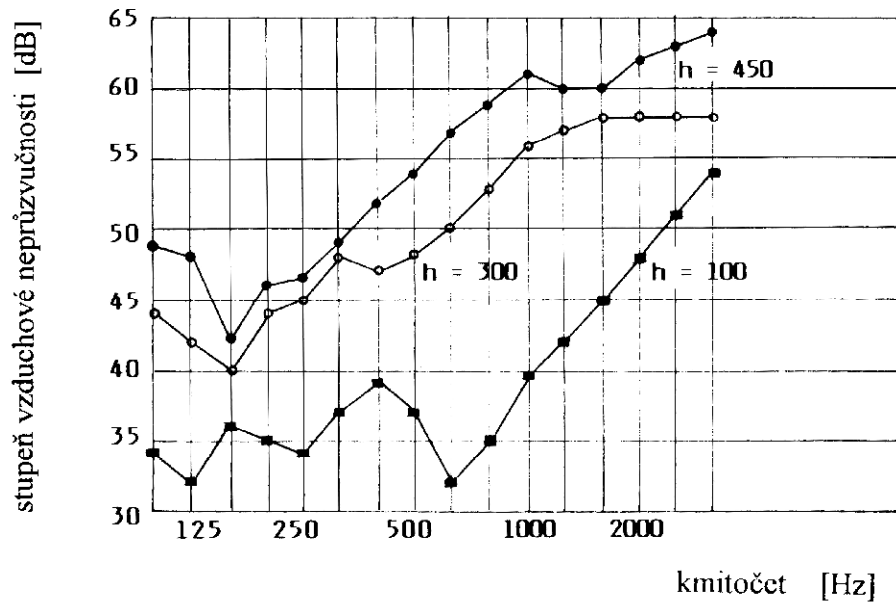
V I. oblasti se projevuje vliv rezonančních kmitočtů desky, v II. oblasti platí závislost stupněň vzduchové neprůzvučnosti na hmotnosti stěny. III. oblast je pásmo koincidenčních kmitočtů, kde se projevuje vliv ohybové tuhosti stěny. První pásmo neuvažujeme jako zvukoi- zolační, protože rezonanční kmitočty jsou celkem náhodné veličiny a neumíme je přesně určit.

Pokles stupněň neprůzvučnosti v oblasti koincidence je značný, cca o 10 až 20 dB proti prů- běhu, který odpovídá vztahu (72). V oblasti vyšších kmitočtů nad dvojnásobkem kritické frekvence je možno určit neprůzvučnost podle Cremera ze vztahu

$$R = 20 \log \frac{wm''}{2rc} + 30 \log \frac{f}{f_{kr}} - 30 \log h \quad (80)$$

kde je h [-] - činitel vnitřního tlumení materiálu stěny.

Činitel vnitřního tlumení může příznivě ovlivnit stupeň vzduchové neprůzvučnosti v oblasti koincidenčních kmitočtů. Při provádění stěn z ocelových plechů je proto vhodné aplikovat buď antivibrační nátěry nebo vrstvené konstrukce.



Obr. 18 Praktický průběh stupně vzduchové neprůzvučnosti cihelné stěny různé tloušťky.

Praktický výpočet stupně vzduchové neprůzvučnosti jednoduché stěny se provádí na základě poznatku, že frekvenční průběh stupně vzduchové neprůzvučnosti vykazuje v oblasti koincidenčních kmitočtů prodlevu která je patrná v diagramu na obr. 18. Při konkrétním návrhu stěny nahrazujeme zvlněnou část úsečkou A-B, jejíž frekvenční šířka i poloha nad frekvenční osou byla zjištěna experimentálně pro různé konstrukční materiály. Tyto konstanty jsou shrnuty do tabulky 3. Na obr. 19 je ukázána náhrada skutečného kmitočtového průběhu stupně vzduchové neprůzvučnosti jeho kvalifikovaným odhadem. Hodnota R_A udává výšku prodlevy. Můžeme ji odečíst z tabulky, nebo stanovit výpočtem ze vzorce

$$R_A = 41 + 30 \log r - 10 \log E + 2 \log h \quad (81)$$

kde je r [kg/m^3] - hustota materiálu stěny,

E [N/m^2] - modul pružnosti materiálu stěny,

h [-] - činitel vnitřního tlumení stěny.

Tab. 3 Materiálové konstanty

Materiál	r [kg/m ³]	E [N/m ²]	h [-]	R_A [dB]	$m'' f_A$ [Hzkg/m ²]	$m'' f_B$ Hzkg/m ²
Olovo	11400	23.10 ⁹	0,035	56	141000	648000
Ocel	7850	260.10 ⁹	0,003	38	18400	177000
Beton	2300	22.10 ⁹	0,030	36	14100	66000
Cihly	2000	16.10 ⁹	0,035	35	12600	58000
Sádra	1050	4,4.10 ⁹	0,020	32	8900	47000
Pórobeton	900	2,9.10 ⁹	0,010	31	8000	51000
Hliník	2700	62.10 ⁹	0,003	30	7100	67000
Sklo	2700	75.10 ⁹	0,002	29	6300	69300
Překližka	700	9,3.10 ⁹	0,010	23	3200	20400
Sololit	1000	4,7.10 ⁹	0,020	31	7940	44500
Azbestocement	1950	18.10 ⁹	0,010	33	10000	65000
Polystyren	13	1,3.10 ⁶	0,060	11	794	3260

Ze součinů ($m''f_A$) resp. ($m''f_B$) můžeme určit šířku prodlevy. Kdybychom změnili činitel vnitřního tlumení, např. u ocelové stěny použitím např. anti-vibračního nátěru, změní se především šířka prodlevy. Pro rozdíl krajních frekvencí prodlevy platí vztah

$$\frac{f_B - f_A}{f_A} = 2^x - 1 \quad (82)$$

do kterého dosadíme hodnotu 2^x podle tab. 4. Současně platí pro frekvenci v bodě A

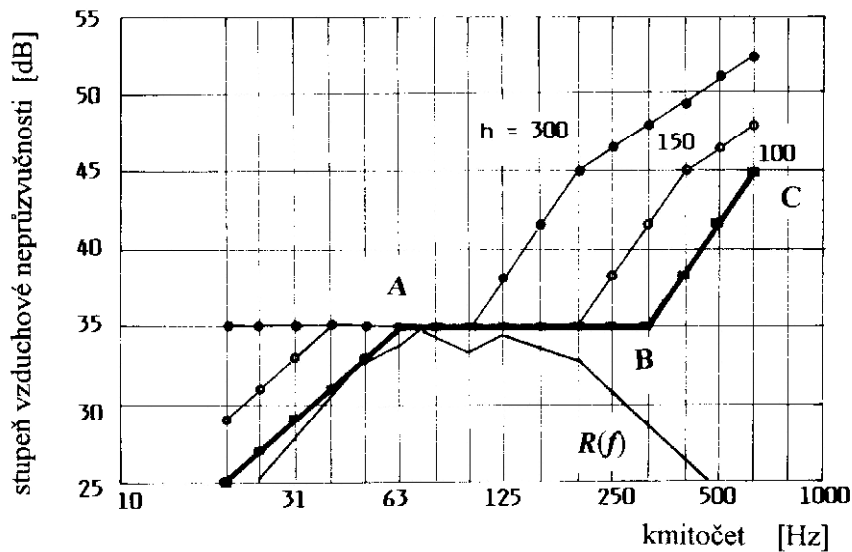
$$f_A = f_{kr} \cdot k_h \quad (83)$$

kde je k_h konstanta závislá na činiteli vnitřního tlumení h .

Tuto konstantu určíme z tab. 4. Na základě uvedených faktů umíme pro různé materiály stanovit kmitočtový průběh stupně vzduchové neprůzvučnosti zakreslený v obr. 19 silnou čarou. Jedná se o kvalifikovaný odhad stupně vzduchové neprůzvučnosti jednoduché homogenní stěny. Budeme-li měnit tloušťku stěny, budeme tím měnit plošnou hmotnost, z čehož vyplývá podle vztahu (72) nárůst stupně vzduchové neprůzvučnosti o 6 dB při zdvojnásobení hmotnosti. Ze vztahu (80) je vidět, že se současně posune kritický kmitočet o 1 oktávu směrem k nižším kmitočtům. To platí tudíž i pro body A a B.

Tab. 4 Šířka prodlevy v oblasti koincidence.

h	x	2^x	k_h
0,001	3,9	14,8	0,200
0,002	3,5	11,0	0,214
0,003	3,25	4,4	0,224
0,005	3,00	8,0	0,235
0,007	2,85	7,2	0,245
0,010	2,70	6,4	0,255
0,020	2,40	5,3	0,270
0,030	2,26	4,8	0,284
0,050	2,10	4,3	0,295
0,070	2,00	4,0	0,310
0,100	1,90	3,7	0,320



Obr. 19 Změny stupně vzduchové neprůzvučnosti vlivem tloušťky stěny.

Z toho plyne pro praktický návrh zvukoizolačních stěn velmi důležitý závěr. Požadujeme-li určitý kmitočtový průběh stupně vzduchové neprůzvučnosti dělicí stěny $R(f)$, jak ukazuje diagram na obr. 19, musíme lomenou čáru, aproximující kmitočtový průběh stupně vzduchové neprůzvučnosti, posunout doleva, nebo doprava tak, až je funkce $R(f)$ ve všech kmitočtových pásmech pod čarou obsahující body A, B, C. Z polohy bodu A na frekvenční ose můžeme určit potřebnou plošnou hmotnost m'' resp. tloušťku stěny h

$$m'' = \frac{(m'' f_A)}{f_A} \rightarrow h = \frac{m''}{r} \quad (84)$$

V oblasti B-C stoupá neprůzvučnost v šířce jedné oktávy o 10 dB. Pro frekvence vyšší než f_c platí vzrůst pouze o 4,5 dB/oktávu.

Pro statiky je vždy důležité znát zatížení nosné konstrukce. Uvedený výpočtový postup umožňuje technikům předem, než je přikročeno k prováděcímu projektu budovy, seriózně odhadnout potřebné parametry dělicí stěny včetně její nezbytné hmotnosti. Dosud poskytnuté informace zcela jasně prokázaly, že k dosažení potřebného stupně vzduchové neprůzvučnosti je třeba vytvořit dostatečně hmotné stěny. Představa laiků, že tepelně izolační materiály mají dobré i zvukoizolační vlastnosti je samozřejmě nesprávná. Vyšších hodnot stupně vzduchové neprůzvučnosti lze dosáhnout rozdělením hmotné stěny na dva dílčí izolační prvky. Hovoříme potom o dvojitéch stěnách.

5 NUMERICKÉ METODY V AKUSTICE

5.1 Deterministické modely

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

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

- modely deterministické
- modely statistické

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

$$M\ddot{x} + B\dot{x} + Kx = f \quad (85)$$

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

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

Tradiční analýza mechanických kmitů a tím i hlučnosti strojních zařízení pomocí tzv. deterministických modelů je směřována na několik nízkých rezonančních tvarů kmitů. Tyto tvary kmitů totiž vykazují největší odezvy ve výchylkách při rovněž nízkých budících frekvencích.

Vzhledem na „houstonoucí spektrum“ vlastních frekvencí strojních systémů ve vyšších frekvenčních pásmech bylo však možno odezvy deterministických modelů sledovaných struktur sledovat přibližně jen do frekvencí 2500 Hz. Frekvenční odezvy s vyššími frekvencemi byly

již získávají nespolehlivě a nepřesně. Řešení vyžaduje totiž jemnější frekvenční kroky, což vede samozřejmě k výraznému a nežádoucímu prodlužování výpočtových časů.

Velkou výhodou deterministických modelů je naopak skutečnost, že řešiteli poskytnou konkrétní odpovědi o konkrétních frekvenčních složkách, které nejvíce přispívají do celkové hladiny hluku.

Souhrnně lze charakterizovat vlastnosti deterministických modelů:

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

5.2 Interakce struktura- fluid

5.2.1 Základní rovnice a hraniční podmínky

Při interakci struktura – akustické prostředí je nutno definovat vlastnosti akustického prostředí (tekutina, vzduch) a rovněž příslušné hraniční podmínky obou subsystémů.

Za akustické prostředí budeme většinou standardně považovat vzdušné prostředí. Vzduch je považován za neviskózní, nerotující fluidní prostředí s proměnnými tlaky po prostoru tohoto subsystému. [1]

Základní rovnice, popisující stlačitelné fluidní prostředí jsou:

rovnice kontinuity

$$\frac{\partial r}{\partial t} + r \cdot \nabla v = 0 \quad (86)$$

Eulerova rovnice

$$r \cdot \left[\frac{\partial v}{\partial t} + v \cdot \nabla v \right] + \nabla p = 0 \quad (87)$$

kde jsou r [kg/m^3] - hustota fluida

v [m/s] - rychlost kmitání částic

∇ - Laplaceův operátor

p [Pa] - tlak

vztah mezi tlakem a hustotou

$$p = f(\mathbf{r}) \quad (88)$$

Výše uvedené vztahy spolu s vhodnými hraničními podmínkami tvoří kompletní popis tlakového a rychlostního fluidního pole.

Pro akustickou analýzu jsou dále použity následující tři předpoklady:

- jde o malé pohyby, takže rychlost pohybu částic $\mathbf{v} = u\mathbf{e}$, kde u je přemístění částic v uzlových bodech.
- hybnost proudícího média se zanedbává, neboť proudění se nedpředpokládá; pak platí

$$\mathbf{r} \cdot \mathbf{e} = -\nabla p \quad (89)$$

což je vztah mezi tlakem a posunutím.

- závislost mezi $p = f(\mathbf{r})$ je lokálně lineární, prostředí považujeme za homogenní.

Jestliže ve fluidu předpokládáme perturbaci proměnných p, ρ, \mathbf{v} , pak s použitím rovnic (87) a (89) a jejich úpravě obdržíme vlnovou rovnici pro perturbaci (změnu) tlaku fluida

$$\nabla^2 p(\mathbf{r}, t) - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p(\mathbf{r}, t)}{\partial t^2} = 0 \quad (90)$$

kde $p(\mathbf{r}, t)$ signalizuje, že tlak ve fluidu je funkcí prostoru i času.

Předpokládáme v dalším textu, že tlakové změny v čase mají harmonický charakter, takže můžeme psát

$$p(\mathbf{r}, t) = p(\mathbf{r}) \cdot e^{j\omega t} \quad (91)$$

Po dosazení do vlnové rovnice obdržíme Helmholtzovu rovnici pro komplexní tlak $p(\mathbf{r})$ ve tvaru

$$\nabla^2 p + k^2 p = 0 \quad (92)$$

kde $k = \omega/c$ je vlnové číslo, c je rychlost šíření vlnění.

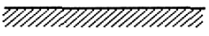
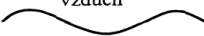

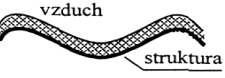
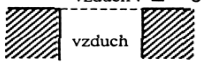
Jestliže dále zavedeme harmonické perturbace tlaku a rychlosti do Eulerovy rovnice (87) a po její úpravě obdržíme vztah mezi komplexními amplitudami tlaku a rychlosti ve tvaru

$$\frac{\partial p}{\partial n} = -r \cdot \frac{\partial v_n}{\partial t} = -j \cdot r \cdot \omega \cdot v_n \quad (93)$$

kde n je vnější normála k vyzařovanému povrchu, v_n je normálová složka rychlosti kmitajícího povrchu tělesa.

Ve spojení s Helmholtzovou rovnicí lze definovat hraniční podmínky mezi strukturou a akustickým, obecně fluidním prostředím dle Tab. 5.

Tab. 5 Hraniční podmínky a rychlost částic vzduchu pro různá rozhraní.

Typ rozhraní	Hraniční podmínky	Rychlost částic vzduchu
1. Tuhé vzduch : $ Z \rightarrow \infty$ 	Dirichletova podmínka stejně tlaku $\frac{\partial p}{\partial n} = 0$	$v_n = 0$
2. Pružné vzduch  \dot{w} - normálová rychlost povrchu w - deformace povrchu	Neumannova podmínka stejně rychlosti $\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} = -\dot{w}$	$v_n = \dot{w}$
3. Absorbent vzduch  Z_a - akustická impedance absorbentu	$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} = -\frac{1}{Z_a} \dot{p}$ Robinova podmínka $A \cdot p + B \cdot v_n = C$	$v_n = \frac{p}{Z_a}$ nebo pro admitanci A_n $\frac{v_n}{p} = A_n$
4. Pružné s absorbentem vzduch  Z_a Z_s struktura	$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} = -\left(\frac{1}{Z_a} - \frac{1}{Z_s}\right) \frac{\partial p}{\partial t}$	$v_n = \frac{p}{Z_a} + \frac{p}{Z_w}$
5. Otevřené vzduch : $Z = 0$  vzduch	uvolnění tlaku $p = 0$	určení z analýzy

Poznámka : pouze jedna podmínka u téhož rozhraní může být použita.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

6 PRAKTICKÁ ČÁST

V praktické části jsme se zabývali možnostmi použití deskových konstrukcí pro pohlcování zvuku a to v první fázi problematikou kmitajících desek a stupněm jejich neprůzvučnosti při aplikaci na konkrétní geometrický tvar při zadaných okrajových podmínkách. Jedinou rychlou a komplexní metodou, kterou lze efektivně používat pro řešení celého spektra problémů kmitajících desek je metoda konečných prvků (FEM) případně metoda hraničních prvků (BEM), pro kterou je bohužel nedostatečně zpracovaný software. Ihned zpočátku je ovšem třeba předeslat, že se jedná o velmi širokou problematiku, která značně přesahuje rámec a možnosti této práce.

6.1 Akusická soustava- deskové konstrukce

Z hlediska akustického desková konstrukce představuje pohltivou akustickou soustavu s určitou rezonanční frekvencí. Při dopadu zvukového vlnění je taková soustava uvedena do vynuceného kmitání. Amplituda kmitů dosáhne maxima pro rezonanční kmitočet. Jestliže zvukové vlnění přestane dopadat na akustickou soustavu, tak tato bude ještě určitou dobu dokmitávat na vlastní (rezonanční) frekvenci. Doba, po kterou dochází k dozívání rezonanční frekvence je závislá na vnitřním tlumení desky a nazývá se doba dozívání. Vzhledem k celkovému množství energie dochází vždy při působení rezonátoru k útlumu, neboť část část zvukové energie je přeměněna v energii jinou, zpravidla tepelnou. Z tohoto vyplývá, že rezonanční soustava je při pohlcování zvuku účinná jen tehdy, jestliže je dostatečně tlumena. Tlumení soustavy je charakterizováno činitelem pohltivosti. Závislost činitele pohltivosti na frekvenci vykazuje u každé rezonanční soustavy maximum na vlastním kmitočtu soustavy. Množství zvukové energie přeměněné na energii jinou roste s velikostí amplitudy akustické veličiny (zpravidla akustické rychlosti) a ta dosahuje maxima při rezonančním kmitočtu. Kritická frekvence f_K , při které se rovnají vlastní frekvence f ohybových kmitů desky a kmitů akustického vlnění se nazývá koincidenční kmitočet a odpovídající jev je tzv. koincidenční jev. Stupeň neprůzvučnosti desky je potom daný výrazem

$$R(\Phi) = 10 \cdot \log \left\{ 1 + \left[\frac{r_M \cdot h_w \cdot \cos \Phi}{2 \cdot r_0 \cdot c_0} \cdot \left[1 - \left(\frac{f}{f_K} \right)^2 \right] \cdot \sin^4 \Phi \right]^2 \right\} \quad (94)$$

Vztah platí pro homogenní izotropní desku.

6.2 Teoretický úvod do strukturální dynamiky- základní rovnice MKP pro dynamiku

Pro elastickou strukturu dynamického systému, na který působí dynamická zatížení je tenzor deformace závislý na čase. Pro třídímní element e lze tenzor deformace vyjádřit [6]

$$\left\{ \tilde{d} \right\}^e = \left\{ \begin{array}{l} u(x, y, z, t) \\ v(x, y, z, t) \\ w(x, y, z, t) \end{array} \right\}^e = \left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^r N_i(x, y, z) u_i(t) \\ \sum_{i=1}^r N_i(x, y, z) v_i(t) \\ \sum_{i=1}^r N_i(x, y, z) w_i(t) \end{array} \right\}^e \quad (95)$$

kde u, v, w jsou časově závislé složky posunutí ve směrech os třídímního kartézského souřadného systému a $N_i(x, y, z)$ představuje tvarové (interpolační) funkce. Minimalizace potenciální energie systému vzhledem k tenzoru deformací v uzlech vede k vztahu mezi silami a posunutími a to tak, že všechny parametry jsou nyní závislé na čase. Pro sílu v zatíženém uzlu q lze psát rovnici [6]

$$[F_B]_q = \int_{\Omega} \left[N_q \{F^*\}_q - c N_q \{\dot{d}\}_q - r N_q \{d\}_q \right] d\Omega^e \quad (96)$$

Sestavením uzlových rovnic dostáváme pohybovou rovnici pro element e ve tvaru

$$[M]^e \{\ddot{d}\}^e + [C]^e \{\dot{d}\}^e + [K]^e \{d\}^e = \{F(t)\}^e \quad (97)$$

kde pro element e s r uzly dostáváme rovnici pro výpočet matice hmotnosti ve tvaru

$$[M]^e = \int_{\Omega^e} r [N]^T [N] d\Omega^e \quad (98)$$

a pro matici tlumení

$$[C]^e = \int_{\Omega^e} c [N]^T [N] d\Omega^e \quad (99)$$

Matici interpolačních funkcí lze zapsat ve tvaru

$$[N] = [[I]_{N_1}, [I]_{N_2}, \dots, [I]_{N_r}] \quad (100)$$

kde jednotkovou matici $[I]$ lze vyjádřit

$$[I] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (101)$$

Interpolační funkce lze nalézt např. [3,4,5]

Pohybová rovnice systému má potom standardní tvar

$$[M] \{\ddot{d}\} + [C] \{\dot{d}\} + [K] \{d\} = \{F(t)\} \quad (102)$$

Volné kmitání- modální analýza

V případě, že v systému není žádné tlumení, tj. matice tlumení $[C] = 0$ se rovnice (102) redukuje do tvaru

$$[M] \{\ddot{d}\} + [K] \{d\} = \{F(t)\} \quad (103)$$

Pro nalezení vlastních frekvencí a vlastních tvarů kmitu vyjádříme vektor posunutí ve tvaru

$$\{d\} = [\Phi] e^{i\omega t} = \{\Phi\} \{\cos \omega t + i \sin \omega t\} \quad (104)$$

kde $\{\Phi\}$ je modální vektor neznámých amplitud v uzlech (modální vektor) a ω je vlastní frekvence.

Řešení rovnice (103) hledáme ve tvaru

$$\begin{aligned} \{d\} &= [\Phi] e^{i\omega t} \\ \{\ddot{d}\} &= -\omega^2 [\Phi] e^{i\omega t} \end{aligned} \quad (105)$$

a rovnici (103) můžeme s použitím (105) přepsat do tvaru

$$[[K] - \omega^2 [M]] \{\Phi\} = \{0\} \quad (106)$$

Tato rovnice má netriviální řešení jen tehdy, jestliže determinant $[[K] - \omega^2 [M]] = \{0\}$

a tomu vyhovuje polynom

$$(\omega^2)^n + (\dots)(\omega^2)^{n-1} + \dots + (\dots)(\omega^2) + (\dots) = \{0\} \quad (107)$$

Pro matici typu $n \times n$ existuje n hodnot w_i^2 vyhovujících rovnici (107) a z toho vyplývá, že existuje n vektorů, které vyhoví rovnici (106)

Řešení úloh vlastního kmitání konstrukce při použití MKP, tj. nalezení vlastních čísel a vlastních vektorů představuje problém vlastních čísel, který lze obecně vyjádřit rovnicí

$$[A] \cdot \{y\} = I \cdot \{y\} \quad (108)$$

Při použití klasických metod je třeba nejprve zobecněný problém převést na standardní, což lze provést v případě, že matice $[M]$ je diagonální se všemi prvky různými od nuly. Pro konzistentní hmotnostní matici $[M]$, která není diagonální je přechod na standardní problém komplikovanější a náročný na numerickou přesnost. Pro numerické řešení rovnice (107) se používá řada metod např. Jacobi, Householder, statická kondenzace, Grammova-Schmidtova atd. Tato problematika přesahuje rámec práce a teoretické základy lze nalézt např. [3,4,6,7,8]

6.3 Modální analýza deskové konstrukce

Modální analýzu deskové konstrukce jsme provedli v simulačním prostředí SamCef. Postup a výsledky analýzy jsou uvedeny níže.

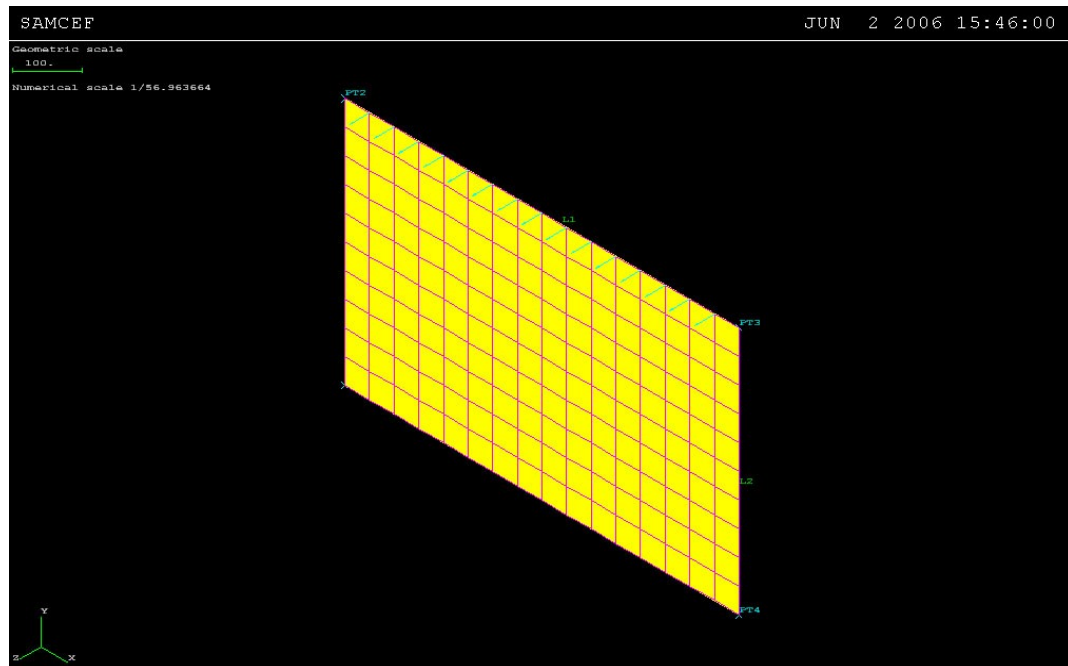
6.3.1 Podrobný postup simulace v prostředí SamCef

- | | |
|---------------------------------|-----------------------------|
| 1. Spuštění Samcef | (Spuštění prostředí SamCef) |
| 2. Add Module – Bacon | (Volba modulu modelace) |
| 3. Run | (Spuštění modulu) |
| 4. Přepnutí do příkazového okna | |
| 5. .menu on | (Spuštění menu) |
| 6. Pre-processing | |
| a. 2D-geometry | (Definice 2D model) |
| i. Point | (Definice bodů) |
| 1. Create | |
| 2. Rect. Coordinates | |
| 3. 0 0,0 500,500 500,500 ,0 | (Souřadnice bodů) |
| b. Geo2D | |
| i. Straight Line 2d | (Čárové spojení bodů) |
| 1. Create ... | |
| 2. Points | |
| 3. Označení bodů | |
| c. Structure | (Definice struktury) |

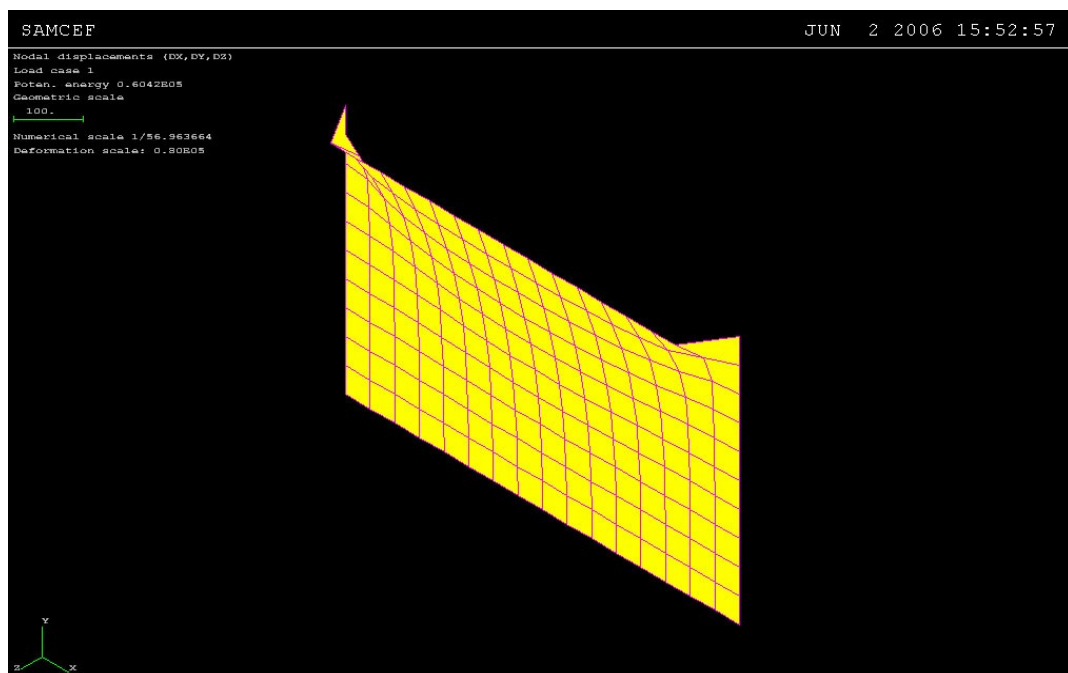
- i. Pre-mesher
 - 1. Line
 - a. Countour (Definice kontury)
 - i. Create
 - ii. Auto
 - iii. OK
 - 2. 3lines/surfaces (Definice povrchu)
 - a. Domain
 - i. Create
 - ii. Auto
 - iii. Accept
 - ii. Mesher (Mešování plochy)
 - 1. Mesh
 - a. Free
 - b. Klik na linu
 - iii. Post-mesh
 - 1. Merge
 - a. Mergin elements
 - i. Execution
 - Edit Mesh
 - b. Check
 - i. Check
 - iv. Element type (Definování elementu)
 - 1. Default
 - a. Beams+Shells+Volumes
- d. Structure F (Definice fyzikální struktury)
 - i. Material (Definice materiálu)
 - 1. Load Mat
 - a. std
 - b. Apply
 - 2. Apply
 - a. On All Ele
 - b. Mat 1 Steel
- e. Mechanical properties (Definice mechanických vlast.)
 - i. Physical properties
 - 1. Thickness
 - a. create
 - b. 10
 - c. Atrributes
 - d. 1
- f. Loads and BC (Definice zatížení a uložení)
 - i. Fixations
 - 1. Node, All, Line
 - a. Create
 - b. Klik na linu
 - c. Accept
 - 2. Nodal loading
 - a. Prescribed Displacement (Definice zatížení v uzlech)

- b. 3, 0.001, Nodes
 - c. Create
 - d. Vyber uzlu
 - e. Accept
- 7. File
 - a. Export computation (Vlastní výpočet)
 - i. Analysis
 - ii. Asef, Interactive (Interaktivní a asertivní analýza)
 - iii. Execute
 - iv. Edit listing – kontrola chyb
- 8. Post –processing
 - a. Access to results... (Přístup k výsledkům)
 - i. Asef
 - ii. Get results
 - 1. Drawing+lists (Vykreslení posunutí a deformací)
 - iii. Load
 - iv. selection
 - v. Nodal displacements
 - vi. Display displacement
 - vii. Disable, X comp ...
 - b. Animation (Animace posunutí a deformace)
 - i. Static...
 - 1. Sequence repetition
 - 2. 20
 - 3. Interpole
 - 4. 50
 - 5. Play

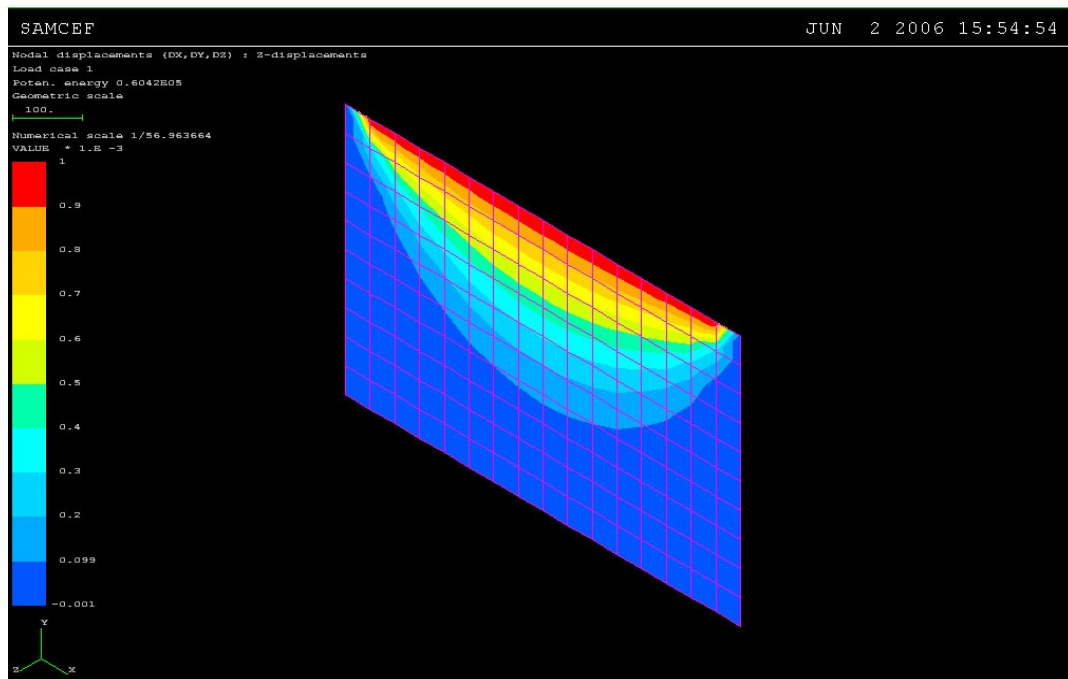
6.3.2 Grafická podoba klíčových kroků simulace



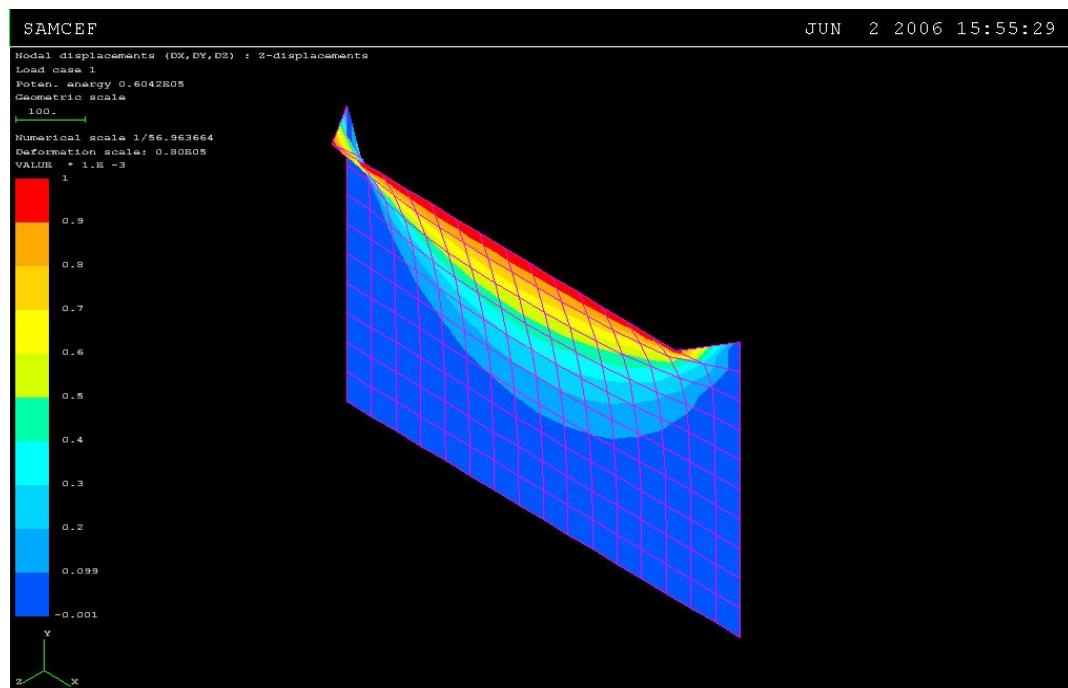
Obr. 20 Uložení a zatížení definované desky.



Obr. 21 Vykreslení deformace při tlaku 0.001 MPa na základě uchycení a zatížení desky.



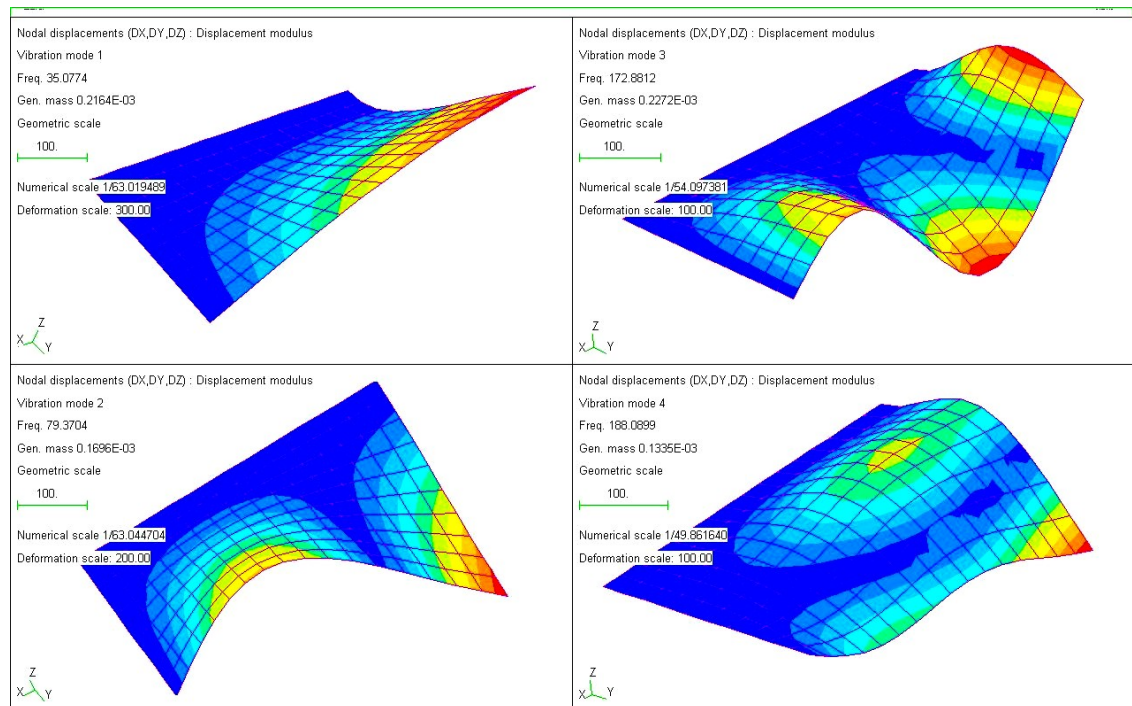
Obr. 22 Vykreslení deformace desky v ose x.



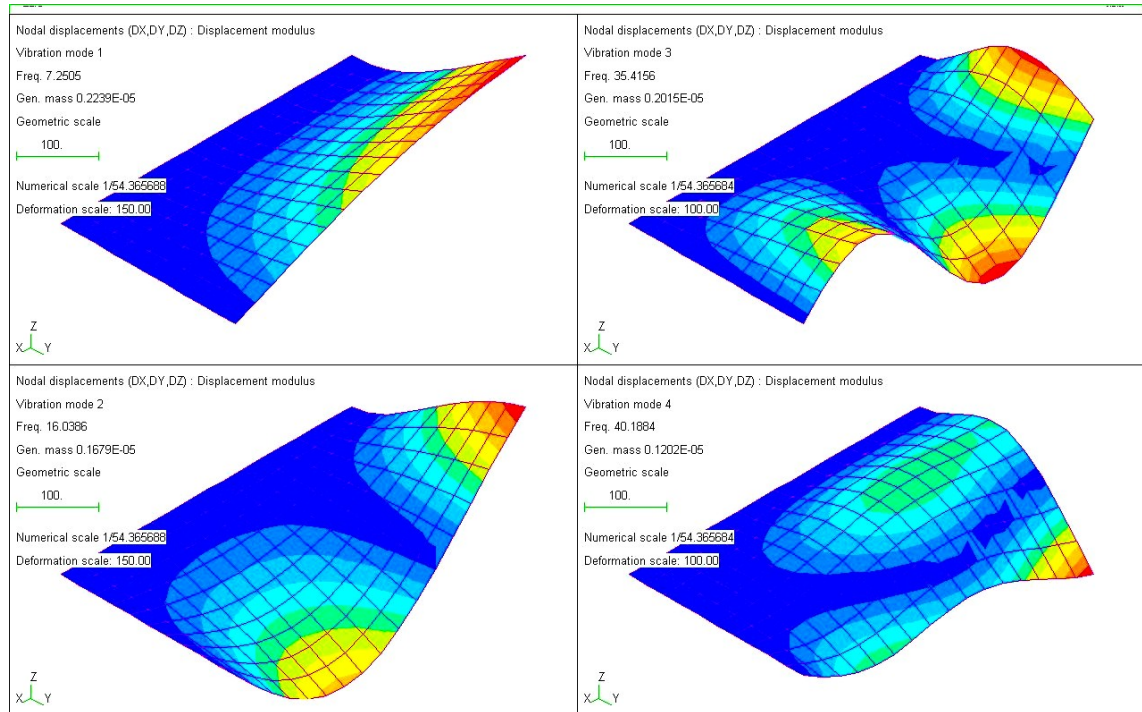
Obr. 23 Vykreslení deformace desky v osách x,y a z.

6.3.3 Tenké desky- Shell prvek

Pro výpočet vlastních frekvencí a tvarů kmitu byla uvažována tenká deska rozměrů $a \times b = 500\text{mm} \times 300\text{mm}$ z materiálů sádrokarton a polystyren. Řešení vlastních frekvencí a vlastních tvarů kmitů bylo provedeno pomocí tenkostěnných deskových (shell) prvků. První 4 vlastní tvary kmitů a vlastní frekvence desek z různých materiálů jsou na dalších obrázcích č.24,25. Výpočty byly provedeny ve FEM softwarovém balíku "SAMCEFV10.1-03."



Obr. 24 Materiál sádrokarton- vlastní frekvence a tvary kmitu.



Obr. 25 Materiál polystyren- vlastní frekvence a tvary kmitu.

6.3.4 Výpočet stupně vzduchové neprůzvučnosti

Pro stěnu na kterou dopadá zvuková vlna kolmo platí pro výpočet stupně vzduchové neprůzvučnosti vztah

$$R = 20 \cdot \log \frac{w \cdot m'}{2 \cdot Z_0} \quad (117)$$

kde je R [dB] - stupeň zvukové neprůzvučnosti

ω [rad/s] – úhlová rychlost kmitů stěny

m' [kg] - plošná hmotnost stěny

Z_0 [N.s.m⁻³]- vlnový odpor vzduchu (400 N.s.m⁻³)

Pro námi vybrané materiály byly stanoveny hodnoty viz. tab. 6:

Tab. 6 Výpočet stupně zvukové neprůzvučnosti.

Materiál / hustota (kg.m ⁻³)	Vlastní frekvence (Hz)	Pl.hm.stěny (kg.m ⁻²)	Stupeň zvukové neprůzvučnosti (dB)
Sádrokarton	35,0774	20,88	15,19255093
2320	79,3704	20,88	22,2851744
	172,8812	20,88	29,04695839
	188,0899	20,88	29,77931253
Polystyren	7,2506	0,225	37,85147757
25	16,0386	0,225	29,86847413
	35,4156	0,225	24,07506443
	40,1864	0,225	22,97737445

Vlnový odpor vzduchu (N.s.m⁻³) = 400

Objem vzorku (m³) = 0,009

6.4 Experimentální ověření nasimulovaných výsledků

6.4.1 Dvouvokřonová impedační trubice Brüel & Kjaer typ 4206

Používána ke zjišťování koeficientu zvukové pohltivosti, koeficientu zvukové odrazivosti pro malé vzorky. Skládá se ze dvou trubic o průměru 100 a 29 mm umožňující měření ve frekvenčním rozsahu od 50 Hz do 1.6 kHz a od 500 Hz do 6.4 kHz. Pro samotnou analýzu využívá dvoukanálový signální analyzátor Brüel & Kjaer typ 2034 a aplikační software BZ5050 zabezpečující jednoduchou obsluhu prostřednictvím PC.

6.4.2 Dvoukanálový signální analyzátor Brüel & Kjaer typ 2034

Přístroj je založen na Fourierově transformaci, umožňuje složité zpracování a analýzu signálů v reálném čase a v kmitočtovém rozsahu od 0 Hz do 25.6 kHz. V kombinaci s dvouvokř-

rofonovou impedanční trubicí Brüel & Kjaer 4206 slouží ke zjišťování absorpčních charakteristik materiálů a v kombinaci se zdrojem vibrací Brüel & Kjaer 4810 slouží k popisu tlumících charakteristik a určování komplexního modulu pružnosti různých materiálů.

6.4.3 Praktické ověření nasimulovaných výsledků

Takto získané výsledky (viz Tab. 6) byly experimentálně ověřeny na zkonstruovaném zařízení dvoumikrofonové impedanční trubicí Brüel & Kjaer typ 4206 (obr. 26).

Závislost koeficientu zvukové pohltivosti na frekvenci pro sádrokarton viz. příloha č. 1.

Závislost koeficientu zvukové pohltivosti na frekvenci pro polystyren viz. příloha č. 2.



Obr. 26 Dvoumikrofonová impedanční trubice Brüel & Kjaer typ 4206

ZÁVĚR

Tato práce se zabývá aplikací numerických metod – metodou konečných prvků – konkrétně metodou hraničních prvků. V teoretické části jsou shrnuty základní akustické veličiny (přenos zvuku, útlum zvuku), dále pak praktické řešení stavebních konstrukcí a poté úvod do numerických metod.

Zaměření práce je na stavební materiály, jelikož akustické vlastnosti staveb bývají často opomíjeny a v dnešní době se tato problematika stává častěji uvažovanou a to nejen z praktického, ale i z hygienického a zdravotního hlediska. Většina staveb bývá realizována především jako tepelně nepropustná a problematika hluku bývá řešena až na sekundární úrovni, ikdyž má na zdravotní stav člověka, z dlouhodobého hlediska, také velmi negativní dopad.

Byly provedeny simulace chování materiálu při dopadu akustické vlny a simulace vlastních tvarů kmitů a frekvencí pro vybrané stavební materiály a frekvenční rozmezí. Tyto simulace byly vytvořeny pomocí simulačního prostředí SAMCEF, které je určeno pro výpočty pomocí numerických metod BEM/FEM (The Boundary Element Method/ The finite Element Method).

Bylo provedeno experimentální ověření nasimulovaných akustických jevů vybraných stavebních materiálů.

Tyto metody představují moderní, vysoce efektivní nástroje pro řešení vědeckých a technických úloh. V současnosti jsou tyto metody považovány jako jedny z nejúčinnějších přibližných metod pro řešení problémů určených diferenciálními rovnicemi při zadání okrajových a počátečních podmínek.

Z hlediska materiálového pohledu je třeba podotknout, že akustické i tepelné vlastnosti každého materiálu, tedy i stavebního, se odvíjejí od mikrostruktury. Její studium a následné využití všech dostupných metod, jak experimentálních, tak také numerických, při simulaci chování mikrostruktury materiálu se jeví jako velmi důležité.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] NOVÝ, R. *Hluk a chvění*. Praha : ČVUT, 2000. 389 s. ISBN 80-01-02246-3.
- [2] MALECKI, I.: *Physical Foundations of technical Acoustics*, Pergamon I Press, 1969
- [3] WEAVER, W., Johnston, P., R. : *Finite Elements for Structural Analysis*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1984.
- [4] BATHE, K., J.: *Finite Element Procedures in Engineering Analysis*, Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey 1982, 1996.
- [5] VAŇKOVÁ M. A KOL.: *Hluk, vibrace a ionizující záření v životním a pracovním prostředí, část I*. Učební texty vysokých škol. VUT Brno (1995), 1 - 144. 1. vydání. ISBN 80-214-0695-X
- [6] SAMTECH S.A. : *User Manuals*, Release 10.1, 4000 Liege-Belgium, 2005.
- [7] PETYT, M.: *Introduction to finite element vibration analysis*. Cambridge University Press 1998
- [8] SEGERLIND, J., L.: *Applied Finite Analysis*. John Wiley, New York, 1984.
- [9] O. VON ESTORFF, *Boundary Elements in Acoustics: Advances and Applications*, Witpress, 2000. ISBN 1-85312-556-3
- [10] MIŠUN V., *Vibrace a hluk*, FS VUT v Brně, 1998. ISBN 80-214-1262-3
- [11] VAŇKOVÁ M. A KOL.: *Hluk, vibrace a ionizující záření v životním a pracovním prostředí, část II*. Učební texty vysokých škol. VUT Brno (1996), 1 - 164. 1. vydání. ISBN 80-214-0695-X.
- [12] CTIRAD SMETANA A KOL., *Hluk a vibrace- Měření a hodnocení*, Sdělovací technika Praha, 1998. ISBN 80-901936-2-5
- [13] TŮMA JIŘÍ, *Zpracování signálů získaných z měchanických systémů užitím FTT*, Sdělovací technika Praha, 1997. ISBN 80-901936-1-7
- [14] BRÜEL & KJAER, *Pulse analyzers & Solutions- product catalogue*, Brüel & Kjaer, Denmark 2005.
- [15] BRÜEL & KJAER, *Brüel & Kjaer magazine*, Brüel & Kjaer, Denmark 2005.
- [16] BRÜEL & KJAER, *Technická diagnostika*, Asociace technických diagnostiků České Republiky, 2004.
- [17] BOUČNÍK, Pavel. *Popis matematických modelů použitých v simulačních programech [online]*. 2005 [cit. 2006-06-13]. Dostupný z WWW: <<http://www.boucnik.cz/kap6.htm>>.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

i	–	jednotkový vektor
j	–	jednotkový vektor
k	–	jednotkový vektor
x	–	souřadnice ve směru x (m)
y	–	souřadnice ve směru y (m)
z	–	souřadnice ve směru z (m)
f	–	frekvence (Hz)
λ	–	vlnová délka (m)
t	–	čas (s)
T	–	perioda vlnění (s)
τ	–	činitel zvukové propustnosti
Q	–	množství tepla (J)
q	–	hustota tepelného toku ($\text{J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)
q_s	–	hustota tepelného toku na povrchu tělesa ($\text{J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)
R	–	tepelný odpor ($\text{m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$)
S	–	plocha (m^2)
t	–	teplota ($^{\circ}\text{C}$)
Δt	–	rozdíl teplot ($^{\circ}\text{C}$)
t_s	–	teplota povrchu tělesa ($^{\circ}\text{C}$)
V	–	variační koeficient (%)
α	–	koeficient přestupu tepla ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$)
δ	–	tloušťka (m)
λ	–	tepelná vodivost ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
r	–	hustota ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)

λ_c	–	tepelná vodivost kompozitu ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
α	–	koeficient zvukové pohltivosti
A	–	amplituda (m)
b	–	konstanta tlumení (s^{-1})
β	–	činitel zvukové odrazivosti
c	–	rychlost zvuku ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
c_L	–	podélné vlnění v tenkých tyčích ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
δ	–	fázový úhel mezi napětím a poměrnou deformací (rad, °)
η	–	činitel vnitřních ztrát
E	–	dynamický modul pružnosti v tahu (Pa)
E	–	energie (J)
E^*	–	komplexní modul pružnosti (Pa)
E'	–	reálná složka komplexního modulu pružnosti (Pa)
E''	–	imaginární složka komplexního modulu pružnosti (Pa)
ε	–	poměrná deformace
G	–	modul pružnosti ve smyku (Pa)
I	–	intenzita zvuku ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)
I_0	–	prahová intenzita zvuku ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)
I_p	–	pohlčená akustická intenzita ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)
I_{dop}	–	dopadající akustická intenzita ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)
I_{odr}	–	odražená akustická intenzita ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)
I_{pr}	–	propuštěná akustická intenzita ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)
I_q	–	intenzita chvění přeměněná na tepelnou energii ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)
L_p	–	hladina akustického tlaku (dB)
L_I	–	hladina akustické intenzity (dB)

L_p	–	hladina akustického výkonu (dB)
μ	–	Poissonova konstanta
ω	–	úhlový kmitočet (Hz)
ω_0	–	kruhová frekvence netlumených kmitů (s^{-1})
π	–	Ludolfovo číslo – konstanta
P	–	akustický výkon (W)
P_0	–	referenční hodnota akustického výkonu (W)
P_p	–	pohlčený akustický výkon (W)
P_{dop}	–	dopadající akustický výkon (W)
p	–	efektivní hodnota akustického tlaku (Pa)
p_0	–	referenční hodnota akustického tlaku (Pa)
ρ	–	hustota materiálu ($kg \cdot m^{-3}$)
ρ_m	–	hustota vzduchu na hladině moře ($kg \cdot m^{-3}$)
ρ_H	–	hustota vzduchu ve výšce H ($kg \cdot m^{-3}$)
R	–	stupeň neprůzvučnosti (dB)
U	–	rychlost proudu vzduchu ($m \cdot s^{-1}$)
Z_0	–	impedance vzduchu ($N \cdot s \cdot m^{-3}$)

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Šíření zvuku od zdroje.	11
Obr. 2. Akustická výchylka jako funkce vzdálenosti.	11
Obr. 3. Vývoj akustické vlny v bodové řadě.	12
Obr. 4. Časový průběh celkového statického tlaku ve vzduchu.	13
Obr. 5. Akustický výkon a jeho hladina.	18
Obr. 6. Spektrum intenzity zvuku pro $\Delta f = 1$ Hz.	20
Obr. 7. Zdroj zvuku vyžarující rovnoměrně.	22
Obr. 8. Vzájemná závislost veličin mítání.	27
Obr. 9. Schéma rozdělení akustické energie při dopadu zvukové vlny na stěnu.	32
Obr. 10. Přenos akustického signálu stěnou.	33
Obr. 11. Dvě místnosti oddělené stěnou.	35
Obr. 12. Stupeň zvukové izolace jako funkce stupně vzduchové neprůzvočnosti, pohltivosti prostoru a velikosti dělicí stěny.	36
Obr. 13. Pokles stupně vzduchové neprůzvočnosti.	37
Obr. 14 Schéma šikmo dopadajícího vlnění na stěnu.	38
Obr. 15 Vynucené ohybové kmitání stěny.	39
Obr. 16 Stupeň vzduchové neprůzvočnosti ohybově měkkých stěn pro kolmý i všesměrový dopad akustických vln.	41
Obr. 17 Frekvenční průběh stupně vzduchové neprůzvočnosti jednoduché stěny.	43
Obr. 18 Praktický průběh stupně vzduchové neprůzvočnosti cihelné stěny různé tloušťky.	44
Obr. 19 Změny stupně vzduchové neprůzvočnosti vlivem tloušťky stěny.	47
Obr. 20 Uložení a zatížení definované desky.	59
Obr. 21 Vykreslení deformace při tlaku 0.001 MPa na základě uchycení a zatížení desky.	59
Obr. 22 Vykreslení deformace desky v ose x.	60
Obr. 23 Vykreslení deformace desky v osách x,y a z.	60
Obr. 24 Materiál sádrokarton- vlastní frekvence a tvary kmitu.	61
Obr. 25 Materiál polystyren- vlastní frekvence a tvary kmitu.	62
Obr. 26 Dvoumikrofonová impedanční trubice Brüel & Kjaer typ 4206.	64

SEZNAM TABULEK

Tab. 1. Rychlost šíření podélních vln v různých látkách.....	15
Tab. 2. Lineární a decibelová stupnice pro akustický výkon	19
Tab. 3 Materiálové konstanty	45
Tab. 4 Šířka prodlevy v oblasti koincidence	46
Tab. 5 Hraniční podmínky a rychlost částic vzduchu pro různá rozhraní.....	51
Tab. 6 Výpočet stupně zvukové neprůzvučnosti	63

SEZNAM PŘÍLOH

P I Závislost koeficientu zvukové pohltivosti na frekvenci pro sádrokarton

P II Závislost koeficientu zvukové pohltivosti na frekvenci pro polystyren