



ZÁPADOČESKÁ
UNIVERZITA
V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Konstrukce nízkofrekvenčních tlumicích akustických prvků na principu
kmitajících panelů

Autor práce: Martin Lucák

Vedoucí práce: Ing. Stanislav Bouzek

Plzeň 2020

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Martin LUCÁK**
Osobní číslo: **E17B0082P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektronika a telekomunikace**
Téma práce: **Konstrukce nízkofrekvenčních tlumicích akustických prvků na principu kmitajících panelů**
Zadávací katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

Zásady pro vypracování

1. Prostudujte fyzikální princip funkce kmitajícího panelu.
2. Navrhněte modulární systém pro ověření teoreticky získaných znalostí o kmitajících panelech.
3. Ověřte vliv konstrukčního provedení (tlumení, pružnost uložení, velikost panelu) na rezonanční frekvenci a činitel jakosti kmitajícího panelu.

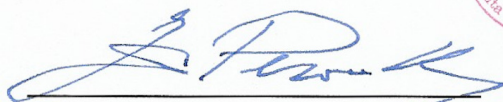
Rozsah bakalářské práce: **30 – 40 stran**
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. VAVERKA, J.: Stavební fyzika I. Brno: VUTIUM, 1998. ISBN 8021412836.
2. KRŇÁK, M.: Akustické obklady. Praha: VÚZORT, 1971.
3. KOLMER, F.; KYNCL, J.: Prostorová akustika. Praha: SNTL, 1982.
4. COX, T.; D'ANTONIO, P.: Acoustic Absorbers and Diffusers 2. Rev Ed. United Kingdom: Taylor & Francis Ltd, 2009. ISBN-10: 0415471745
5. EVEREST, F., Alton; POHLMANN, C., Ken: Master Handbook of Acoustics – 5th edition. McGraw-Hill Professional Publishing, 2009. ISBN 9780071603324.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Stanislav Bouzek**
Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **4. října 2019**
Termín odevzdání bakalářské práce: **11. června 2020**



Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan



L.S.



Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev
vedoucí katedry

Abstrakt

Tato bakalářská práce popisuje návrh a konstrukci nízkofrekvenčního tlumícího akustického prvku na principu kmitajícího panelu. První tři kapitoly pojednávají o teoretických znalostech z oboru prostorové akustiky, způsobu měření činitele pohltivosti akustických prvků a fyzikálním principu funkce kmitajícího panelu. Následující kapitoly popisují návrh měřicí metody pro ověření kmitání čelní plochy panelu a ověření vlivu konstrukčního provedení na rezonanční frekvenci. Bylo zkonstruováno několik variant kmitajících panelů s různým tlumením, uložením a velikostí vzduchové mezery. Jejich parametry byly ověřeny měřením v bezodrazové komoře. Výsledky měření jsou uvedeny v závěru práce.

Klíčová slova

kmitající panel, rezonanční frekvence, akustické obklady, činitel jakosti

Abstract

Lucák, Martin. *Construction of low-frequency acoustic elements based on vibrating plate principle* [*Konstrukce nízkofrekvenčních tlumicích akustických prvků na principu kmitajících panelů*]. Pilsen, 2020. Bachelor thesis (in Czech). University of West Bohemia. Faculty of Electrical Engineering. Department of Applied Electronics and Telecommunications. Supervisor: Stanislav Bouzek

This bachelor thesis describes the design and construction of a low-frequency acoustic element based on the vibrating panel principle. The first three chapters describe theoretical knowledge in the field of room acoustics, the method of measuring the absorption factor of acoustic elements and the physical principle of the vibrating panel. The following chapters describe the design of a measuring method for verifying the vibration of the front surface of the panel and verifying the influence of the design on the resonant frequency. Several variants of vibrating panels with different damping, mounting and size of the air gap were constructed. Their parameters were verified by measurements in an anechoic chamber. The results of the measurements are in the conclusion of this thesis.

Keywords

vibrating panel, resonant frequency, acoustic element, quality factor

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem svou závěrečnou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 270 trestního zákona č. 40/2009 Sb.

Také prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

V Plzni dne 18. června 2020

Martin Lucák

.....

Podpis

Obsah

Seznam obrázků	vii
Seznam tabulek	viii
Seznam symbolů a zkratek	ix
1 Úvod	1
2 Prostorová akustika	2
2.1 Mechanika pohlcování	2
2.2 Vlastní kmity	2
2.3 Doba dozvuku	3
2.4 Činitel zvukové pohltivosti	4
2.5 Činitel jakosti	5
3 Akustické obklady	6
3.1 Porézní materiály	6
3.2 Akustické prvky založené na rezonančním principu	7
3.2.1 Helmholtzovy rezonátory	7
3.2.2 Kmitající membrány	8
3.2.3 Kmitající panely	10
4 Měření činitele zvukové pohltivosti v dozvukové komoře	13
5 Snímače vibrací	15
5.1 Akcelerometry	16
5.1.1 Piezoelektrické akcelerometry	16
6 Návrh měřicí metody pro ověření kmitajících panelů	17
6.1 Návrh měřicí konstrukce	17
6.2 Měření kmitání čelní desky	20
7 Měření vzorků kmitajících panelů	22
7.1 Varianta 1	23

7.2	Varianta 2	25
7.3	Varianta 3	25
7.4	Varianta 4	27
7.5	Varianta 5	27
7.6	Zhodnocení výsledků	30
8	Závěr	31
	Reference, použitá literatura	33
	Přílohy	34
	A Grafy	34
	B Tabulky	35

Seznam obrázků

2.1	Kolmý dopad zvuku na rozhraní dvou prostředí. [Převzato z [2]]	5
2.2	Příklad určení činitele jakosti.	5
3.1	a) Příklad akustické pěny [Převzato z [5]]; b) Graf závislosti činitele zvukové pohltivosti na tloušťce vrstvy porézního materiálu. [Převzato z [4]]	7
3.2	Příklad Helmholtzova rezonátoru. [Převzato z [6]]	8
3.3	Náčrt membrány se vzduchovým polštářem. [Převzato z [1]]	9
3.4	Ohybové kmity tenké ocelové desky.	10
3.5	Náčrt kmitajícího panelu se vzduchovým polštářem.	10
3.6	Příklad kmitajícího panelu. [Převzato z [7]]	11
3.7	Náčrt kmitající desky s pružným uložením; a) deska přilepená na koženku uchycenou v rámu, b) deska uložená v dutém gumovém těsnění, c) deska uložená v sylomeru.	12
5.1	Piezoelektrický snímač zrychlení. [Převzato z [8]]	16
6.1	Model navrženého kmitajícího panelu bez dodatečného vyztužení s pohledem shora na rozložení prvku; modře znázorněna kmitající deska, červeně znázorněn přední rám	19
6.2	Model navrženého kmitajícího panelu bez dodatečného vyztužení	19
6.3	Blokové schéma zapojení pro měření v bezodrazové komoře	21
6.4	Rozmístění přípravku a zdroje buzení v bezodrazové komoře	21
7.1	Závislost kmitání přední a zadní desky panelu na frekvenci - varianta 1; ověření tuhosti konstrukce	22
7.2	Gumové těsnění na předním rámu	23
7.3	Závislost kmitání čelní desky panelu na frekvenci - varianta 1; vliv pružnosti uložení	24
7.4	Závislost kmitání čelní desky panelu na frekvenci - varianta 1; vliv změny objemu	24
7.5	Závislost kmitání čelní desky panelu na frekvenci - varianta 1; kmitání středu a kraje desky	25

7.6	Závislost kmitání čelní desky panelu na frekvenci - varianta 2; vliv tlumení vzduchové mezery	26
7.7	Závislost kmitání čelní desky panelu na frekvenci - varianta 2; určení činitele jakosti	26
7.8	Uložení desky v sylomeru - varianta 3	27
7.9	Závislost kmitání čelní desky panelu na frekvenci - varianta 3; kmitání středu a kraje desky	28
7.10	Závislost kmitání čelní desky panelu na frekvenci - varianta 2 a 3; vliv přidání sylomeru	28
7.11	Přípravek s deskou na kožence	29
7.12	Závislost kmitání čelní desky panelu na frekvenci - varianta 4; vliv změny objemu	29
7.13	Závislost kmitání čelní desky panelu na frekvenci - varianta 4 a 5; vliv přidání druhé desky	30
A.1	Závislost kmitání čelní desky panelu na frekvenci - varianta 2; kmitání středu a kraje desky	34
A.2	Závislost kmitání čelní desky panelu na frekvenci - varianta 2; vliv změny objemu	34

Seznam tabulek

4.1	Tabulka středních kmitočtů oktávových pásem a jejich minimální doby dozvuku prázdné komory o objemu 180 m^3 Převzat z [1] 	14
6.1	Tabulka hodnot vypočtené hmotnosti a plošné hmotnosti desky s reálnými rozměry	18
6.2	Tabulka celkového objemu a hmotnosti měřicího přípravku	20
B.1	Tabulka rozměrů a množství materiálu	35

Seznam symbolů a zkratek

f_N	Vlastní kmitočet prostoru.
c_0	Rychlost šíření zvuku ve vzduchu 340 m/s.
f_k	Kritický kmitočet.
T	Doba dozvuku v místnosti.
α	Činitel zvukové pohltivosti.
W_1	Energie na plochu dopadající.
W_4	Energie pohlcovaná plochou.
f_0	Rezonanční kmitočet.
M_s	Měrná plošná hmotnost.
d	Výška vzduchového polštáře.
ρ	Hustota vzduchu 1,276 kg/m ³
ρ_m	Hustota materiálu.
S_1	Plocha všech ploch dozvukové komory.
S_2	Plocha měřeného vzorku.
A_1	Pohltivost dozvukové komory.
A_2	Pohltivost vzorku.
α_1	Činitel zvukové pohltivosti prázdné dozvukové komory.
α_S	Činitel zvukové pohltivosti vzorku.
T_1	Doba dozvuku prázdné dozvukové komory.
T_2	Doba dozvuku dozvukové komory se vzorkem.
Q	Činitel jakosti.
E	Modul pružnosti.
σ	Poissonova elastická konstanta.
p, q	Módová čísla příslušného vlastního kmitu.

1

Úvod

V uzavřených prostorech je z hlediska akustiky důležitá srozumitelnost řeči či hudby. Touto problematikou se zabývá obor prostorové akustiky, který popisuje šíření zvuku a vlastnosti akustického pole v uzavřených prostorech. Zabývá se také celkovou akustickou kvalitou prostoru a předepisuje kritéria v závislosti na účelu jeho použití. K dosažení požadovaných parametrů je často nutné využít pohltivých nebo rozptylových akustických prvků.

Problematikou akustických prvků se již v minulosti zabývalo mnoho autorů, kteří popsali chování a konstrukční provedení různých variant obkladů v prostoru a definovali základní vzorce pro jejich návrh. Hlavními zdroji informací byly knihy od pana Krňáka[1], Kolmera a Kyncla[2] a Vaverky[4].

Návrh akustického prvku může být čistě teoretický za použití běžně dohledatelných rovnic. Tyto rovnice jsou ovšem do jisté míry nepřesné. Zanedbávají některé vlastnosti materiálů nebo konstrukcí, které ovlivní výsledek. Proto je nutné ověřit finální konstrukci akustických prvků měřeními k zjištění reálných vlastností a chování prvku. Standardní ověření je měření vzorku o ploše minimálně 10 m² v dozvukové komoře. Podmínky a postup měření určuje norma. Detailněji je tento postup popsán v kapitole 4. Měření činitele zvukové pohltivosti několika variant kmitajících panelů touto metodou by bylo časově velmi náročné. Proto v rámci této práce byla navržena nová měřicí metoda pro experimentální ověření kmitání panelu (viz kapitola 6). S její pomocí poté bylo otestováno několik konstrukčních variant kmitajících panelů. Zhodnocení výsledků těchto měření je uvedeno v závěru práce.

2

Prostorová akustika

Prostorová akustika popisuje šíření zvuku v uzavřených prostorech. Při návrhu takového prostoru se vychází ze základů akustiky, díky jejichž znalosti je možné následně zvolit vhodné materiály a konstrukce přímo pro daný prostor. Parametry jako jsou doba dozvuku a rozložení akustického pole je potřeba splnit pro dosažení maximální akustické kvality daného prostoru. Pouze tak dojde k zajištění ideální srozumitelnosti a slyšitelnosti.

2.1 Mechanika pohlcování

Pohlcování zvuku je jev, kdy dojde k nevratné přeměně zvukové energie na energii jiného typu. Při pohlcování zvukové energie nejčastěji dochází k přeměně na energii tepelnou. Energie je pohlcována třením při pohybu látkou a přestupem mezi různými prostředími. Aby bylo množství pohlcené energie dostatečně velké, musí být plocha, na které nastává tření, co největší. Toho lze docílit použitím porézních materiálů, ve kterých se zvuk šíří póry a celková plocha těchto pórů je velká. Viskózní ztráty zvukové energie vznikají na stěnách pórů, otvorů, na povrchu vláken nebo kanálků.

Akustické obklady založené na rezonančním principu jsou desky nebo celé stěny schopné kmitání ve zvukovém spektru. Část mechanické energie se přemění v teplo vlivem vnitřního tření v kmitající desce nebo stěně. Zároveň se ale část mechanické energie mění zpět na energii akustickou. Ta se šíří dál v prostoru za deskou nebo stěnou a je nutné ji pohltit (např. opět porézním materiálem). U některých konstrukcí je tedy možné využít oba zmiňované způsoby přeměny akustické energie na teplo. Poté, co se část zvukového vlnění přemění v teplo vlivem tření v rozkmitané desce nebo stěně a zbytek energie se přemění na teplo v pórech materiálu za deskou.

2.2 Vlastní kmity

Vybuzené akustické pole v uzavřeném prostoru je dáno jeho vlastními kmity. Ty vznikají v případě, že se rovná budící kmitočet a vlastní kmitočet prostoru.

Vlastní kmity prostoru jsou dány jeho rozměry a pro jednoduché kvádrové prostory je můžeme získat výpočtem podle rovnice 2.1 [Převzato z [4]].

$$f_N = \frac{c_0}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2} \quad [Hz] \quad (2.1)$$

kde:

c_0 – rychlost šíření zvuku ve vzduchu (340 m/s)

l_x, l_y, l_z – rozměry uvažovaného prostoru v m

$n_x, n_y, n_z = 0, 1, 2, \dots$ celá čísla a jejich kombinace

Základní kmity prostoru na nízkých frekvencích odpovídají vzdálenosti stěn prostoru. Jejich počet je velmi malý a rozložení ve frekvenční ose velmi nerovnoměrné. To má za následek značně nerovnoměrné rozložení akustického pole v prostoru (střídání maxim a minim akustického tlaku). Dostatečný počet a rovnoměrné rozložení vlastních kmitů je až od tzv. kritického kmitočtu f_k , který je definován rovnicí 2.2 [Převzato z [4]].

$$f_k = 2000 \sqrt{\frac{T}{V_m}} \quad [Hz] \quad (2.2)$$

kde:

T – doba dozvuku místnosti v s

V_m – objem místnosti v m^3

2.3 Doba dozvuku

Pokud je v uzavřeném prostoru zapnut zdroj zvuku, je jeho akustická energie pohlcována povrchy prostoru a šířením ve vzduchu. Po určité době dojde k ustálení hladiny akustického tlaku v prostoru, protože se dodávaná a pohlcovaná energie vyrovnají. Po vypnutí zdroje bude akustická energie v místnosti ubývat dokud nebude úplně pohlcena. Doba, po kterou se zvuk šíří prostorem i po vypnutí zdroje zvuku, se nazývá doba dozvuku. Udává čas potřebný k poklesu hladiny akustické energie v místnosti o 60 dB. Doba dozvuku zahrnuje zvuk od zdroje, odrazy a okolní zvuky (hluk). Doba dozvuku je jedním ze základních parametrů prostorové akustiky a při znalosti vlastností prostoru je ji možné vypočítat. Například Eyringův vzorec 2.3 [Převzato z [4]], který lze uplatnit i pro prostory s velkým činitelem zvukové pohltivosti stěn dle ČSN 73 0525.

$$T_E = \frac{0,164V}{-S_p \ln(1 - \alpha_S) + 4m_t V_m} \quad [s] \quad (2.3)$$

kde:

V_m – objem místnosti v m^3

S_p – celková plocha ohraničujících stěn v m^2

α_S – střední činitel pohltivosti

α_{S_i} – činitel pohltivosti dílčího materiálu

S_i – plocha dílčího materiálu v m^2

m_t – činitel útlumu ve vzduchu v m^{-1} (u kmitočtů nad 2000 Hz a pro velké prostory)

Pro prostory s malým činitelem zvukové pohltivosti stěn se používá Sabineův vzorec

2.4 |Převzato z [4]|.

$$T_E = \frac{0,164V}{A_c + 4m_t V_m} \quad [s] \quad (2.4)$$

kde:

A_c – celková pohltivost v m^2

V_m – objem místnosti v m^3

m_t – činitel útlumu ve vzduchu v m^{-1}

2.4 Činitel zvukové pohltivosti

Tento parametr udává schopnost tělesa pohlcovat zvuk. Jedná se o bezrozměrné číslo, značí se symbolem α a nabývá hodnot od 0 do 1.

Činitel zvukové pohltivosti je dán obecně rovnicí 2.5 |Převzato z [2]|.

$$\alpha = \frac{W_4}{W_1} = \frac{W_1 - W_3}{W_1} = 1 - \frac{W_3}{W_1} = 1 - |\beta|^2 \quad [-] \quad (2.5)$$

kde:

W_4 – zvuková energie pohlcovaná určitou plochou

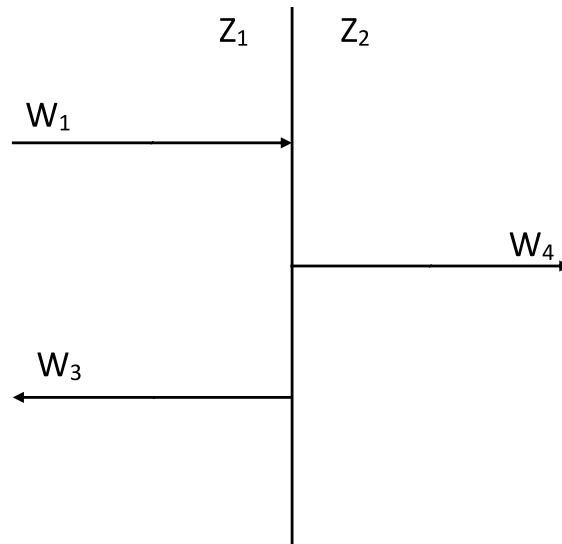
W_1 – energie na plochu dopadající

W_3 – energie odražená od stěny

β – činitel zvukové odrazivosti

Výsledek rovný 1 značí úplné pohlcení zvuku stěnou. Naopak výsledek rovný 0 značí dokonalé odražení zvuku od stěny. Při měření zvukové pohltivosti vzorku materiálu může být, vlivem ohybových jevů na krajích, plocha pohlcování zvuku větší než plocha vzorku. Pak může hodnota činitele zvukové pohltivosti dosáhnout vyšších hodnot než 1.

Kolmý dopad zvuku ukazuje obrázek 2.1.



Obr. 2.1: Kolmý dopad zvuku na rozhraní dvou prostředí. [Převzato z [2]]

2.5 Činitel jakosti

Rezonanční obvod má na své rezonanční frekvenci f_0 maximum určité veličiny (např. rychlosti kmitání). Vydělením maxima této veličiny odmocninou ze dvou klesne hodnota na mez, kdy lze odečíst horní a dolní frekvence. Rozdílem těchto frekvencí dostaneme šířku pásma BW . Poté lze činitel jakosti rezonančního obvodu vyjádřit rovnicí:

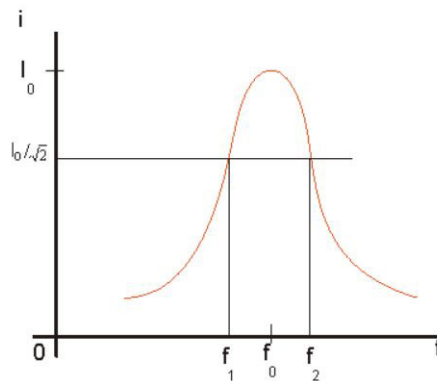
$$Q = \frac{f_0}{BW} \quad [-] \quad (2.6)$$

kde:

f_0 – rezonanční frekvence v Hz

BW – šířka pásma v Hz

Čím je činitel jakosti větší, tím je výsledná křivka užší.



Obr. 2.2: Příklad určení činitele jakosti.

3

Akustické obklady

K pohlcování či rozptylování zvuku se využívá různých akustických materiálů a obkladů. Snažíme se s nimi docílit zvýšení srozumitelnosti řeči či hudby nebo snížení hluku v prostoru, kde se nachází zdroj zvuku. Kritérii pro výběr vhodných akustických prvků nejsou jen jejich akustické vlastnosti. Je nutné brát v potaz hlediska požární, hygienická a v neposlední řadě estetická.

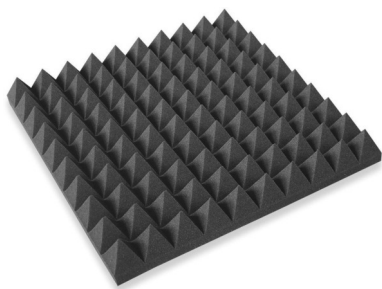
Informace do této kapitoly byly čerpány z [1] [2].

3.1 Porézní materiály

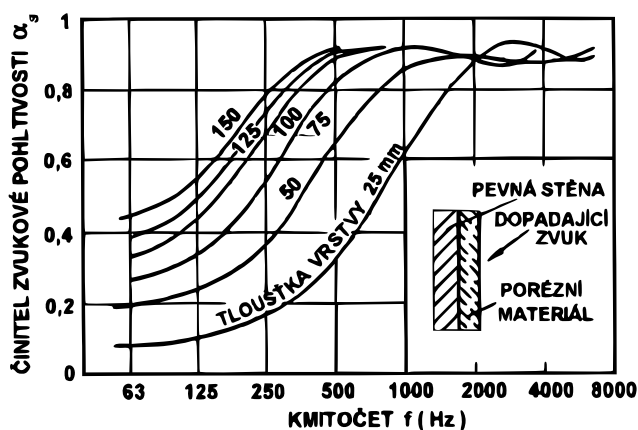
Porézním materiálem se uvažuje pevná látka, která ve své struktuře obsahuje malé póry vyplněné vzduchem. Těchto pórů je v celé struktuře materiálu mnoho a z hlediska pohlcování zvuku musí být póry propojeny, aby se zvuk materiálem šířil. Výjimkou jsou materiály, které mají poddajnou a elastickou strukturu. U nich se zvuk snáze šíří z pórů do struktury materiálu. Používají se hlavně pro pohlcení pásem středních a vysokých kmitočtů. Pro pohlcení nízkých kmitočtů se používají jen ve specifických případech, protože je potřeba velká hloubka materiálu.

Porézní materiály se dělí dle různých hledisek. Z hlediska struktury materiálu se dělí na vláknité, kanálkovité a pěnové. Z hlediska původu materiálu se dělí na organické, minerální, skleněné a plastické.

Hlavním parametrem porézního materiálu je jeho měrná akustická impedance Z . Tu je třeba znát k určení činitele zvukové pohltivosti α (2.5). Impedance je dána třemi kmitočtově nezávislými parametry. Porézností σ , činitelem struktury χ a měrným stejnosměrným odporem r_s . V mnoha případech v praxi je její výpočet neaplikovatelný, protože nelze jednoznačně určit některé potřebné materiálové konstanty. Poté se činitele zvukové pohltivosti zjišťuje měřením v dozvukové komoře nebo impedanční trubici.



(a) Akustická pěna



(b) Graf frekvenčního průběhu pohltivosti

Obr. 3.1: a) Příklad akustické pěny [Převzato z [5]]; b) Graf závislosti činitele zvukové pohltivosti na tloušťce vrstvy porézního materiálu. [Převzato z [4]]

3.2 Akustické prvky založené na rezonančním principu

Dopadem zvuku na rezonanční soustavu začne soustava kmitat. Nejvyšší amplituda kmitů vzniká při dosažení rezonanční frekvence. Když přestane zvuk dopadat na soustavu, bude ještě určitou dobu kmitat vlastním kmitočtem. Tento jev se nazývá doznívání a lze ho omezit tlumením rezonátoru. Aby rezonanční soustava efektivně pohlcovala zvuk, musí být navržena s dostatečným tlumením. Tyto akustické prvky se používají hlavně ke snížení doby dozvuku na nízkých frekvencích a k tlumení vlastních kmitů prostoru. Většina zvukové energie se přeměňuje na teplo.

Závislost činitele zvukové pohltivosti na kmitočtu rezonančních soustav je nejvyšší při vlastním kmitočtu soustavy. Obecně amplitudy akustických veličiny v závislosti na kmitočtu vykazují svoje maximum při rezonančním kmitočtu.

Obklady založené na rezonančním principu lze rozdělit dle konstrukce na:

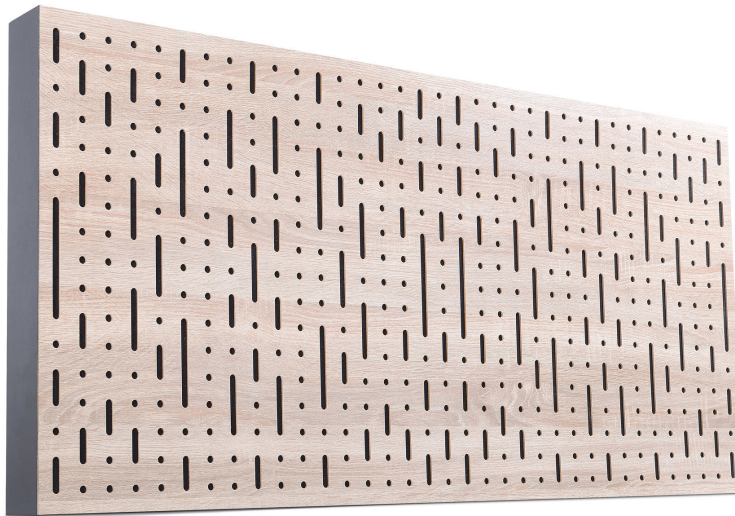
- Obklady na principu Helmholtzových rezonátorů
- Kmitající membrány
- Kmitající panely

3.2.1 Helmholtzovy rezonátory

Pro akustické úpravy účelových prostor se převážně používají akustické obklady na principu Helmholtzových rezonátorů. Skládá se z děrovaných desek na pevné konstrukci. Otvory představují soubor jednotlivých rezonátorů. Výhodou tohoto rezonátoru oproti jiným prvkům je:

- Variabilita změn otvorů, která umožňuje nastavit kmitočet maximálního pohlcování v širokém pásmu kmitočtů
- Použití rozličných materiálů pro konstrukci čelní desky
- Dostatečná mechanická pevnost a odolnost s libovolnou povrchovou úpravou

Za těchto podmínek se vzduch v otvoru chová jako nestlačitelný píst a vzduch ve vzduchovém polštáři jako poddajnost. Přechod mezi dutinou a otvorem je plynulý. Poté je třeba uvažovat korekci délky otvoru. Ta představuje hmotu kmitající před a za otvorem.



Obr. 3.2: Příklad Helmholtzova rezonátoru. [Převzato z [6]]

Z výše uvedených poznatků lze rezonanční kmitočet Helmholtzova rezonátoru obecně definovat rovnicí 3.1 [Převzato z [1]].

$$f_0 = 54,2 \sqrt{\frac{S_0}{V (1 + 2\Delta l)}} \quad [Hz] \quad (3.1)$$

kde:

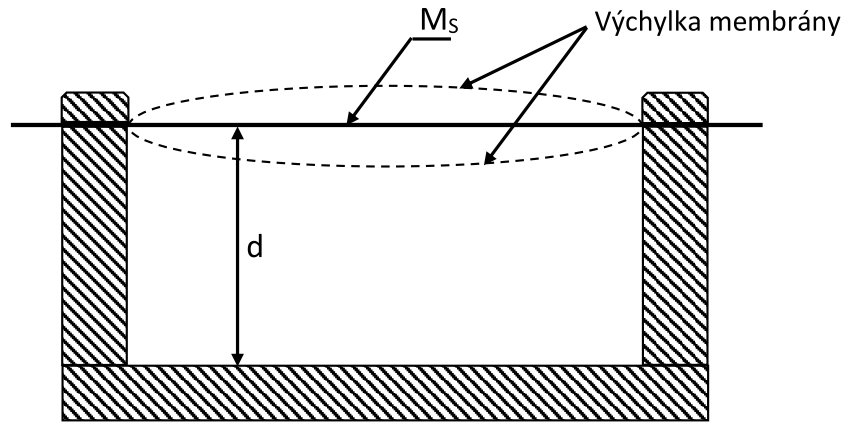
S_0 – plocha otvoru v m^2

V – objem dutiny v m^3

$2\Delta l$ – korekce délky otvoru v m

3.2.2 Kmitající membrány

Kmitající membrány jsou akustické prvky založené na ohybovém kmitání čelní plochy. Používají se tenké kovové, dřevěné nebo plastové desky, případně napnuté látky, folie nebo koženky. Konstrukce kmitající membrány je složena z membrány upevněné na nosné konstrukci (obr.3.3).



Obr. 3.3: Náčrt membrány se vzduchovým polštářem. [Převzato z [1]]

Hlavním parametrem kmitající membrány je její rezonanční kmitočet f_0 . Většina dostupné literatury uvádí pouze velmi jednoduchou rovnici 3.2 [Převzato z [2]].

$$f_0 = 60 \sqrt{\frac{1}{M_s d}} \quad [Hz] \quad (3.2)$$

kde:

M_s – měrná plošná hmotnost membrány v kg/m^2

d – výška vzduchového polštáře za membránou v m

Z rovnice je zřejmé, že výškou vzduchového polštáře lze zásadně ovlivnit velikost rezonančního kmitočtu membrány. Tento jednoduchý vzorec ale zcela zanedbává ohybové kmitání membrány závislé na jejích materiálových vlastnostech a rozměrech. Z literatury [9] lze uvést složitější rovnici 3.3, která výše zmíněné parametry respektuje. Dále lze měrnou plošnou hmotností a výškou vzduchového polštáře nastavit činitel zvukové pohltivosti.

$$f_{p,q} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho c^2}{M d} + \frac{4\pi^2}{M} \left[\left(\frac{p}{a}\right)^2 + \left(\frac{q}{b}\right)^2 \right]^2 \frac{E h^3}{12(1-\sigma^2)}} \quad [Hz] \quad (3.3)$$

kde:

M – plošná hmotnost membrány v kg/m^2

ρ – hustota vzduchu v kg/m^3

d – výška vzduchového polštáře v m

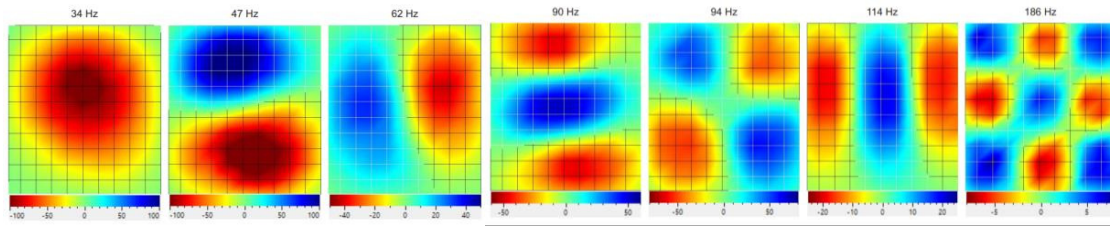
E – modul pružnosti v Pa

σ – Poissonova elastická konstanta

p, q – módová čísla příslušného vlastního kmitu

a, b – rozměr stran obdélníkové membrány v m

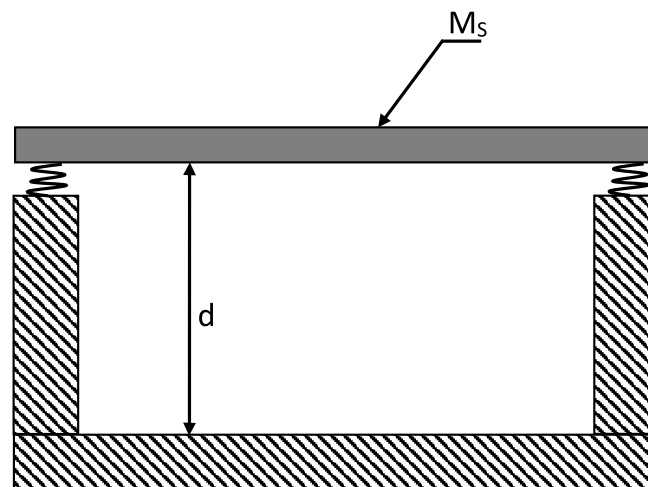
h – tloušťka membrány v m



Obr. 3.4: Ohybové kmity tenké ocelové desky.

3.2.3 Kmitající panely

Konstrukce kmitajícího panelu je složena z desky pružně upevněné na nosné konstrukci. Upevnění desky ke konstrukci musí být vzduchotěsné. Příklady upevnění ukazuje obrázek 3.7. Deska může být z libovolného materiálu. Musí mít však dostatečnou tuhost, která zabrání vlastním ohybovým kmitům. Deska pak ideálně kmitá se stejnou amplitudou v celé ploše - tzv. pístově. Rezonanční frekvenci lze s použitím vhodné čelní desky, pružného uložení a hloubky vzduchového polštáře ladit v širokém rozsahu frekvencí s vysokým činitelem jakosti. Konstrukce rámu musí být dostatečně tuhá, aby se zamezilo jeho vlastnímu kmitání, které by mohlo zhoršit účinnost celého akustického prvku. Vlastní kmity lze do určité míry omezit vepříčkováním stěn.



Obr. 3.5: Náčrt kmitajícího panelu se vzduchovým polštářem.

Pro výpočet rezonančního kmitočtu lze obecně použít stejný vzorec jako u kmitající membrány (rov.3.2), který už počítá s dosazenými konstantami prostředí. Výpočet bez dosazených konstant prostředí je dán rovnicí 3.4 [Převzato z [2]].

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho}{M_s d}} \quad [Hz] \quad (3.4)$$

kde:

c – rychlost zvuku při teplotě okolo 20° v m/s

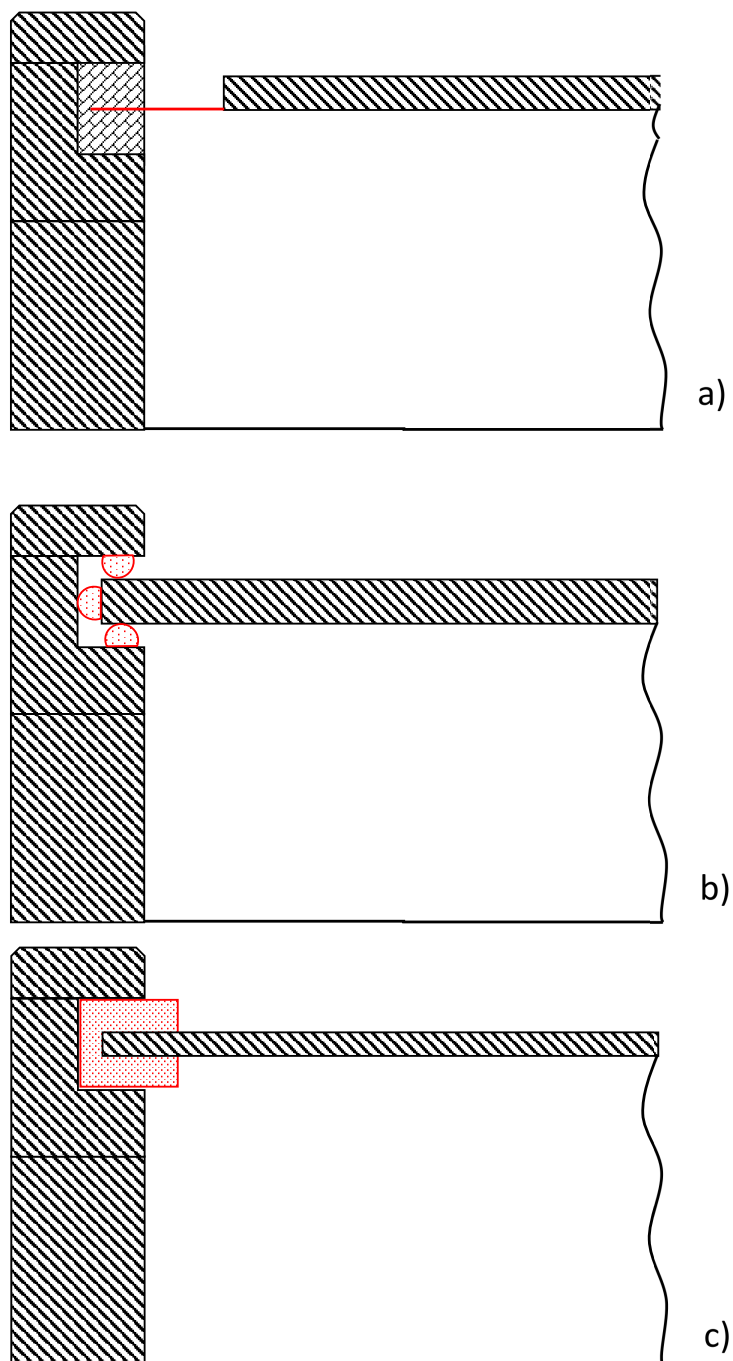
ρ – hustota vzduchu při teplotě okolo 20° v kg/m³

M_s – měrná plošná hmotnost desky v kg/m²

d – výška vzduchového polštáře za deskou v m



Obr. 3.6: Příklad kmitajícího panelu. [Převzato z [7]]



Obr. 3.7: Náčrt kmitající desky s pružným uložením; a) deska přilepená na koženku uchycenou v rámu, b) deska uložena v dutém gumovém těsnění, c) deska uložena v sylomeru.

4

Měření činitele zvukové pohltivosti v dozvukové komoře

Informace do této kapitoly byly čerpány z [2] a [1].

Ověření činitele zvukové pohltivosti prototypů akustických prvků se provádí pomocí měření v dozvukové komoře. Měření probíhá tak, že se nejprve změří doba dozvuku prázdné dozvukové komory a poté doba dozvuku s vloženým vzorkem v dozvukové komoře. Výsledný činitel zvukové pohltivosti se vypočítá z naměřených dob dozvuku.

Protože je celková plocha dozvukové komory mnohem větší oproti ploše měřeného vzorku a stěny komory mají nízký činitel zvukové pohltivosti, je výsledný činitel zvukové pohltivosti dozvukové komory i s měřeným vzorkem také malý. Pro výpočet činitele zvukové pohltivosti je možné vycházet ze Sabinovi rovnice (4.3).

Výpočet doby dozvuku prázdné dozvukové komory T_1 je dán rovnicí 4.1 [Převzato z [2]].

$$T_1 = \frac{0,16V}{S_1\alpha_1} = \frac{0,16V}{A_1} \quad [s] \quad (4.1)$$

kde:

V – objem prázdné dozvukové komory v m^3

S_1 – plocha všech ploch dozvukové komory v m^2

α_1 – činitel zvukové pohltivosti prázdné dozvukové komory

A_1 – pohltivost dozvukové komory

Výpočet doby dozvuku dozvukové komory se vzorkem T_2 je dán rovnicí 4.2 [Převzato z [2]].

$$T_2 = \frac{0,16V}{(S_1 - S_2)\alpha_1 + S_2\alpha_S} = \frac{0,16V}{A_1 - S_2\alpha_1 + A_2} \quad [s] \quad (4.2)$$

kde:

S_2 – plocha měřeného vzorku v m^2

α_S – činitel zvukové pohltivosti vzorku

A_2 – pohltivost vzorku

Součin $S_2\alpha_1$ z rovnice 4.2 je malý, proti součtu $A_1 + A_2$, a proto ho lze zanedbat. Dosazením A_1 z rovnice 4.1 po úpravě dostaneme vztah pro výpočet Sabinova činitele zvukové pohltivosti vzorku α_S daný rovnicí 4.3 |Převzato z [2]|.

$$\alpha_S = \frac{0,16V}{S_2} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \quad [-] \quad (4.3)$$

Ve vzorci se neuvažuje se ztrátami při šíření zvuku vzduchem. Nepředpokládá se, že se teplota ani vlhkost vzduchu v dozvukové komoře během měření prázdné komory a komory se vzorkem mění, tudíž ztráty nemusíme uvažovat.

Hlavní podmínky pro měření činitele zvukové pohltivosti udává norma ČSN 73 0535 |Převzato z [1]|:

1. Splnění podmínky rovnoměrného úhlového rozložení vln dopadajících na plochu vzorku
2. Objem dozvukové komory musí být větší než 180 m^3
3. Doba dozvuku prázdné místnosti, se středními kmitočty oktávových pásem, musí přesahovat hodnoty dle tabulky 4.1
4. Plocha měřeného vzorku S_2 musí být mezi 10 až 12 m^2
5. Záznamy doby dozvuku vykazující monotonní zakřivení poklesu hladiny akustického tlaku musí být z vyhodnocení vyloučeny
6. Pro výpočet aritmetického průměru doby dozvuku daného kmitočtového pásma je zapotřebí minimálně šesti záznamů s různými polohami mikrofonů, které jsou od sebe minimálně dva metry
7. Rozsah středních kmitočtů oktávových pásem musí být od 125 do 4000 Hz , kde střední kmitočty volíme dle normy ČSN 01 1601

f [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
T_1 [s]	5	5	5	4,5	3,5	2,5

Tab. 4.1: Tabulka středních kmitočtů oktávových pásem a jejich minimální doby dozvuku prázdné komory o objemu 180 m^3 |Převzato z [1]|

5

Snímače vibrací

Pro měření rezonančních kmitočtů kmitajícího panelu byla zvolena metoda snímáním vibrací. V této kapitole budou tyto snímače detailněji popsány.

Snímače vibrací jsou elektronická zařízení, která zpracovávají vibrační signály a převádí je na elektrický signál. Signál je možné po úpravě zobrazit jako časový záznam nebo ho přes Fourierovu transformaci převést na frekvenční spektrum. Na měřeném přípravku mohou být snímače pevně uchyceny nebo lze použít bezkontaktní snímače, které jsou většinou laserové. Jejich hlavní výhodou je, že nezatěžují měřený objekt další přidanou hmotností. Naopak nevýhodou může být zkreslení výsledků vlivem nerovností povrchu vzorku, kdy jsou nerovnosti podobné měřeným výchylkám. Pevně uchycené snímače mohou být připevněné šroubem, magnetem, oboustrannou lepicí páskou nebo lepidlem. Zvolený způsob montáže má vliv na frekvenční rozsah měření. Základní rozdělení snímačů vibrací závisí na druhu měřené veličiny:

- Snímače výchylky
- Snímače rychlosti
- Snímače zrychlení

Snímače mají různé frekvenční a dynamické rozsahy. Požití snímačů závisí na konkrétní aplikaci a na frekvenčním rozsahu, který chceme měřit. Mezi snímače výchylky patří kapacitní senzory a potenciometry. Snímači rychlosti jsou elektrodynamické senzory a snímači zrychlení jsou akcelerometry. Právě jednoosé akcelerometry byly použity při praktickém měření kmitajícího panelu, kdy bylo zapotřebí snímat pouze v ose kolmé na čelní desku.

Informace do této kapitoly byly čerpány z [8].

5.1 Akcelerometry

Akcelerometry jsou senzory měřící zrychlení. Integrací zrychlení lze získat hodnotu rychlosti nebo výchylky. Musí dosahovat co nejvyšší hodnoty vlastní frekvence aby obsáhly frekvence měřených vibrací. Používají se pro měření odstředivých a setrvačných sil, k určení polohy prvku a k měření vibrací.

Akcelerometry se dělí podle principu funkce na:

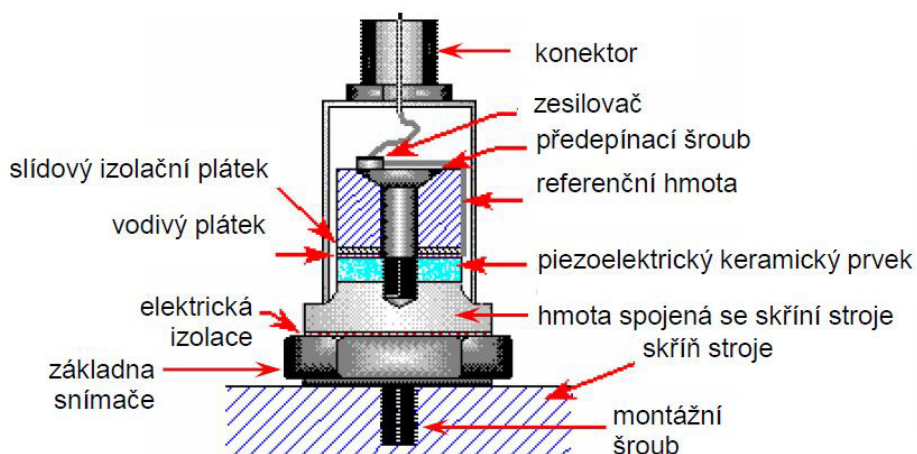
- Piezoelektrické
- Piezorezistivní
- Kapacitní
- Servoakcelerometry

Bližší budou popsány piezoelektrické akcelerometry, protože jsou použity v praktické části práce.

5.1.1 Piezoelektrické akcelerometry

Fungují na principu piezoelektrického jevu. Piezoelektrický krystal se deformuje dle působící síly a na určitých plochách krystalu se vytvoří elektrický náboj, který je přímo úměrný zrychlení měřeného vzorku.

Použitým piezoelektrickým akcelerometrem byl Brüel & Kjaer 4507 B 004 s frekvenčním pásmem 0,3 až 6000 Hz a citlivostí 10 mV/ms⁻², což bylo dostačující pro měření přípravku buzeném do 300 Hz |Převzato z [10]|.



Obr. 5.1: Piezoelektrický snímač zrychlení. |Převzato z [8]|

6

Návrh měřicí metody pro ověření kmitajících panelů

Pro měření zvukové pohltivosti v dozvukové komoře by bylo zapotřebí dle normy navrhnout a rozmístit soustavu kmitajících panelů o rozloze 10 m². Měření v dozvukové komoře je časově náročné a vyžaduje množství nákladné měřicí techniky. Také výroba konstrukce potřebné plochy vzorku, s úpravou pro různé varianty, by si vyžádala mnohem více času a materiálu. Proto se hledala efektivnější metoda pro ověření parametrů zamýšlených prototypů. Z teoretických předpokladů vyplývá, že nejvyšší pohltivost kmitajícího panelu je na jeho rezonanční frekvenci a že kmitá v celé ploše stejně (pístové kmitání). Proto byla zvolena jednodušší metoda přes snímání vibrací čelní desky pomocí akcelerometrů. Pro jednodušší otestování různých variant byla vyrobena jedna multifunkční konstrukce kmitajícího panelu navržená tak, aby umožnila jednoduchou výměnu tlumícího prvku, pružného uložení a změnu hloubky vzduchové mezery za deskou. Velikost čelní desky byla zvolena 600x600 mm.

6.1 Návrh měřicí konstrukce

Při návrhu konstrukce se vycházelo z rovnice rezonanční frekvence kmitajícího panelu 3.4 uvedené v kapitole 3. Z této rovnice byly provedeny dílčí výpočty pro plošnou hmotnost materiálu M_s dle rovnice 6.1.

$$M_s = \frac{m}{S} \quad [kg/m^2] \quad (6.1)$$

kde:

m – hmotnost desky v kg

S – plocha vzorku v m²

Výpočet hmotnosti desky m dle rovnice 6.2.

$$m = \rho_m V \quad [kg] \quad (6.2)$$

kde:

ρ_m – hustota materiálu desky v kg/m^3

V – objem desky v m^3

Výpočet objemu desky V dle rovnice 6.3.

$$V = abc \quad [m^3] \quad (6.3)$$

kde:

a – šířka desky v m

b – délka desky v m

c – hloubka desky v m

Pro testování byla zvolena 10 mm silná MDF deska, která by měla mít při relativně nízké hmotnosti malé ohybové kmitání a velké vnitřní tlumení. Konkrétní použitý kus o rozměrech 600x600x10 mm váží 2,37 kg, z čehož můžeme dopočítat hustotu materiálu 658 kg/m^3 . Hustota prostřední ρ pro vzduchu byla zvolena 1,276 kg/m^3 dle tabulek [3].

m [kg]	2,37
M_s [kg/m^2]	6,58

Tab. 6.1: Tabulka hodnot vypočtené hmotnosti a plošné hmotnosti desky s reálnými rozměry

Dle rovnice 3.4 můžeme měnit rezonanční frekvenci pomocí plošné hmotnosti desky a hloubkou vzduchového polštáře. Byla požadována variabilita předního uchycení pro různé tloušťky materiálu a jednoduchá změna objemu vzduchového polštáře. Dále nelze zanedbat vliv tlumení na rezonanční frekvenci, takže byla požadována jednoduchá výměna pružného uložení. Aby bylo možné naladit panel dostatečně nízko, byla zvolena minimální hloubka vzduchové mezery 60 mm. Pro jednoduché ověření vlivu zvětšení objemu byla druhá hloubka zvolena jako dvojnásobná hodnota té minimální, tedy 120 mm. S hloubkou vzduchové mezery 120 mm dosahuje celková hloubka konstrukce hodnoty nad 150 mm, což už je skoro maximální hloubka konstrukce, kterou lze zavěsit na zeď bez výrazného zmenšení prostoru.

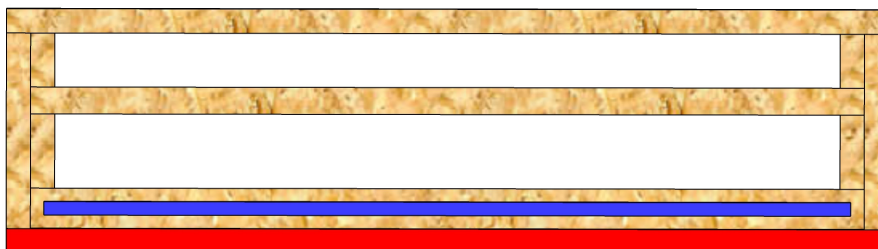
Příklad vlivu hloubky vzduchové mezery na rezonanční frekvenci:

- pro hloubku za deskou $d_1=0,065$ m je $f_0=94,3$ Hz
- pro hloubku za deskou $d_2=0,125$ m je $f_0=68$ Hz

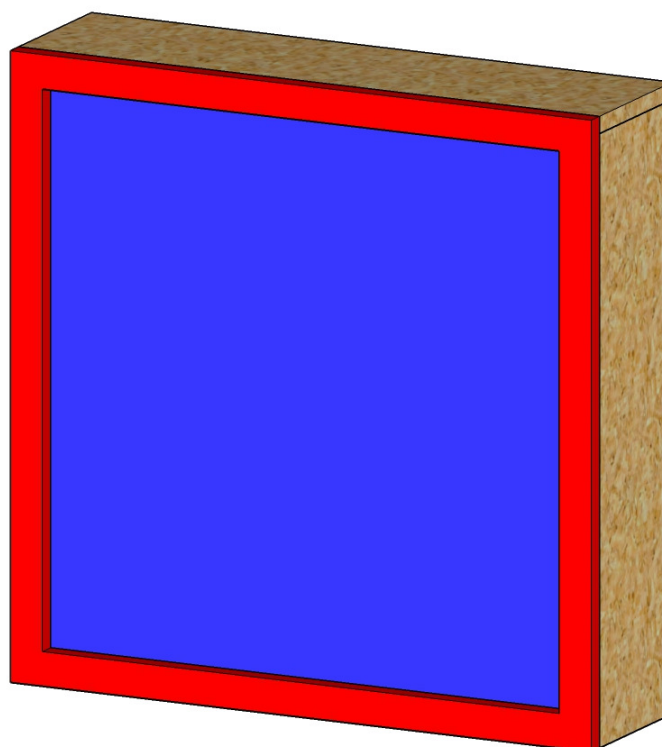
Celá konstrukce byla navržena tak, aby do ní bylo možné umístit čelní desky o rozměru 600x600 mm. V 3D modelovacím programu SketchUp byl navržen vzhled celé konstrukce.

Konstrukce je tvořena několika částmi, které po sestrojení tvoří celistvý model kmitajícího panelu. Sestává z pevné hlavní části konstrukce, odnímatelného předního rámu pro snadnou výměnu těsnění a čelní desky. Odnímatelné boční víko umožňuje přístup do vzduchového polštáře pro změnu jeho objemu nebo přidání tlumícího materiálu.

Celá konstrukce je vyrobena z 18 mm MDF desek. Všechny boční stěny byly dodatečně vyztuženy další vrstvou materiálu pro omezení vlastních kmitů panelu. Rozložení vnitřku modelu je na obrázku 6.1. Model kmitajícího panelu je na obrázku 6.2.



Obr. 6.1: Model navrženého kmitajícího panelu bez dodatečného vyztužení s pohledem shora na rozložení prvku; modře znázorněna kmitající deska, červeně znázorněn přední rám



Obr. 6.2: Model navrženého kmitajícího panelu bez dodatečného vyztužení

Kompletní soupis včetně rozměrů materiálu je uveden v příloze v tabulce B.1.

Přístup ke vzduchovému polštáři za kmitajícím panelem byl zajištěn odnímatelnou boční stěnou s kovovými zámky a předním rámem. Přední rám je uchycen metrickými šrouby, které se zavrtávají do vlepených narážecích matic. Matice byly, po výbrusu drážky, pravidelně rozmístěny do všech bočních stěn. Na jednu z bočních stěn byly našroubovány dva šrouby s okem pro budoucí uchycení v bezodrazové komoře.

Celkový objem [m ³]	0,046302
Hustota dřeva [kg/m ³]	658
Hmotnost [kg]	30,47

Tab. 6.2: Tabulka celkového objemu a hmotnosti měřicího přípravku

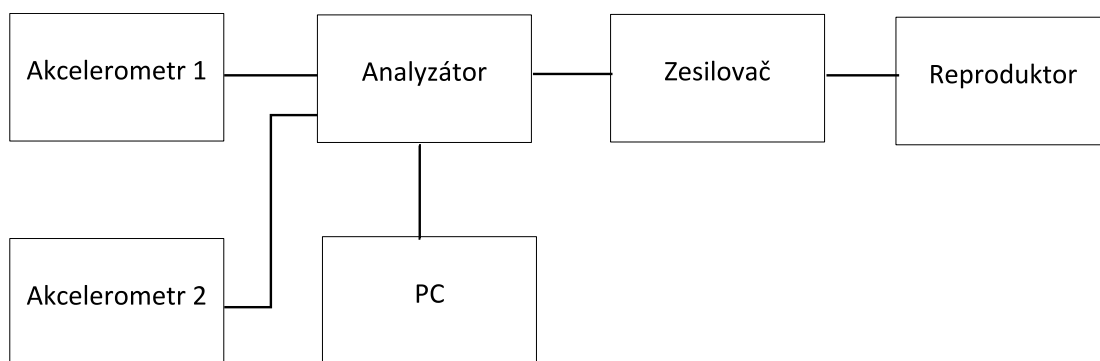
6.2 Měření kmitání čelní desky

Ověření kmitání čelní desky bylo provedeno metodou snímání vibrací. Na povrch měřeného přípravku byly upevněny tavnou pistolí plastové sáňky pro uchycení akcelerometrů Brüel & Kjaer 4507 B 004. Jejich frekvenční pásmo je 0,3 až 6000 Hz a citlivost 10 mV/ms⁻², což bylo dostačující. Snímač 1 byl umístěn na střed desky a snímač 2 na kraj desky 50x50 mm od rohu. Pro zjištění vlastních kmitů konstrukce byl umístěn jeden akcelerometr i na kraj jedné z vyztužovacích stěn a na zadní desku.

Reproduktor byl buzen sinusovým signálem přeladovaným od 50 do 300 Hz. Zdrojem buzení byl reproduktor Yamaha S115V s frekvenčním rozsahem 55 až 16000 Hz. Reproduktor byl od přípravku ve vzdálenosti 114 cm (viz 6.4).

Bylo zapotřebí omezit vlivy prostředí tak, aby na konstrukci kmitajícího panelu nepůsobily vlastní kmity místnosti (kmitající panel by fungoval jako velká membrána mikrofonu a jeho vlastní rezonance by nebyla jednoznačně viditelná). Pro měření je také důležité nízké hlukové pozadí. Proto byla měřicí metoda realizována v bezodrazové komoře. V komoře byla snaha zajistit kolmý dopad zvuku na desku pro jednodušší popsání chování panelu. Pro omezení přenosu rušivých vibrací z budovy byl panel pružně zavěšen několik centimetrů nad pochozí síť komory. Tlumícím materiálem do vzduchové mezery za čelní deskou byla zvolena melaminová akustická pěna Basotect před běžně používanou minerální vatou a to z důvodu stálosti tvaru a jednoduché manipulace. Při měření malého objemu byla deska melaminu o rozměru 600x600x40 mm umístěna k střední příčce. Při měření velkého objemu byla umístěna k zadní stěně.

Snímané vibrace byly vyhodnoceny FFT analýzou v programu Pulse LabShop a integrací převedeny ze zrychlení na rychlost kmitání. Funkce MAX hold ukládala maximální hodnoty rychlostí kmitání pro jednotlivé frekvenční čáry, kdy jedna čára odpovídala 1 Hz. Pomocí přeladování budícího signálu byl získán frekvenční průběh kmitání čelní desky panelu. Blokové schéma zapojení měřicí metody je na obrázku 6.3.



Obr. 6.3: Blokové schéma zapojení pro měření v bezodrazové komoře

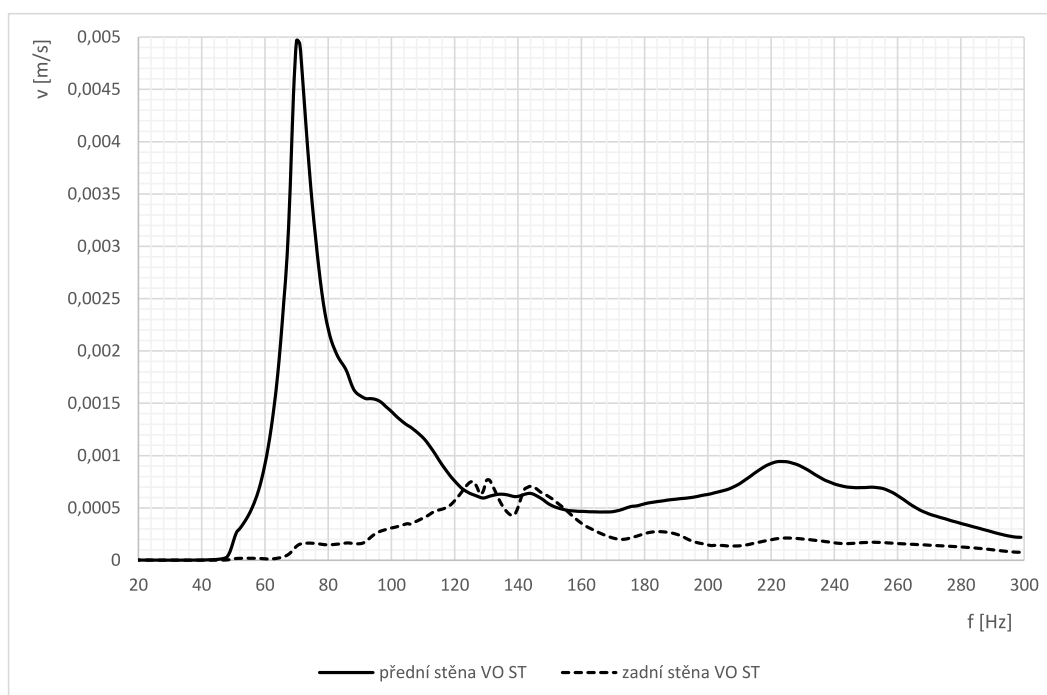


Obr. 6.4: Rozmístění přípravku a zdroje buzení v bezodrazové komoře

7

Měření vzorků kmitajících panelů

V této kapitole jsou popsány varianty konstrukcí kmitajícího panelu s výsledky měření. Prvním měřením byla ověřena tuhost konstrukce. Zadní deska vykazovala velice malé kmitání viz 7.1. Takto nízké kmity nemají vliv na funkci panelu a výrazně se neprojeví při měření jednotlivých variant.



Obr. 7.1: Závislost kmitání přední a zadní desky panelu na frekvenci - varianta 1; ověření tuhosti konstrukce

7.1 Varianta 1

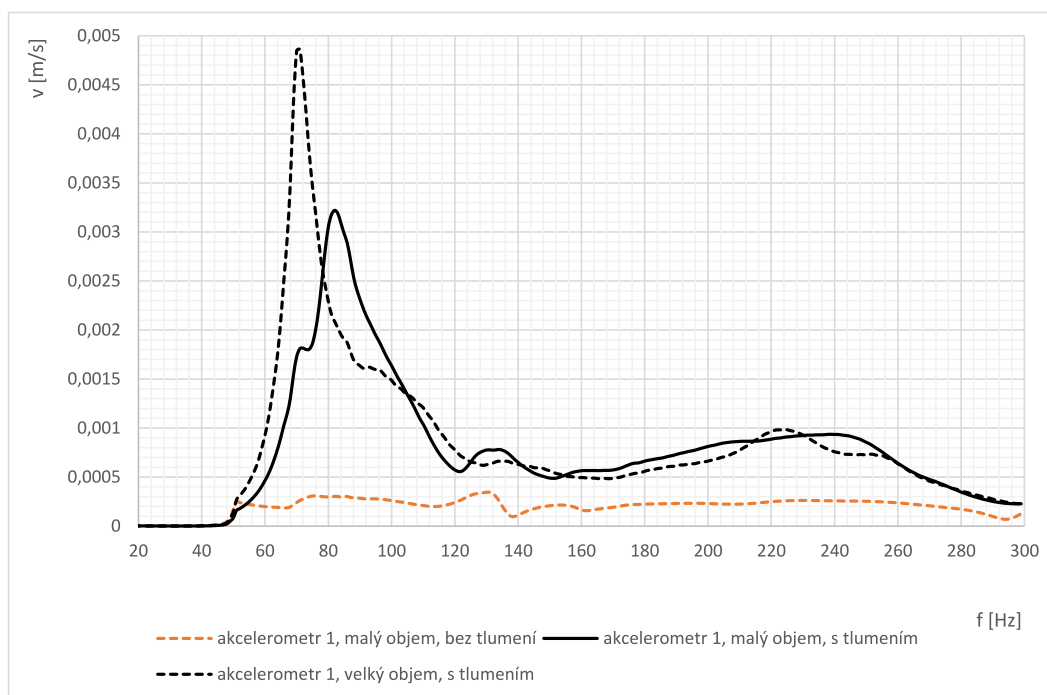
V první variantě bylo k pružnému uložení zvoleno duté okenní samolepicí gumové těsnění. Kmitající panel byl z 10 mm silné MDF desky o rozměru 600x600 mm. Pro dosažení vzduchotěsnosti bylo upevněno na kraje desky, na vnitřní stranu předního rámu a na vnitřní příčky (viz 3.7). Graf 7.3 ukazuje, že při měření s malým objemem bez tlumení nevykazuje prvek žádné výrazné kmitání. Na tomto případě lze ukázat dopad zjednodušeného vzorce rezonanční frekvence 3.4. Ten vůbec nezahrnuje vliv pružnosti uložení. V tomto případě byl vzorek až příliš pevně dotažen předním rámem a těsnění neposkytovalo dostatečnou oporu pro kmitání desky. Ztratilo svoji pružnost a vzorek se choval, jako by byl pevně uchycen po celém svém obvodu. Nemohl tedy ve výsledku kmitat. Po tomto zjištění byly další varianty objemů a tlumení měřeny s méně dotaženým rámem. Graf 7.4 ukazuje vliv změny objemu. Čím je objem větší, tím je rezonanční frekvence nižší. Z grafu 7.5 lze vidět, že deska kmitá ve středu i na kraji ve stejné nejvýraznější rezonanci. Nekmitá ale zcela pístově, protože u kraje je rychlost kmitání menší. Změřené hodnoty rezonančních frekvencí:

- Malý objem, s tlumením – 86 Hz
- Velký objem, bez tlumení – 72 Hz
- Velký objem, s tlumením – 71 Hz

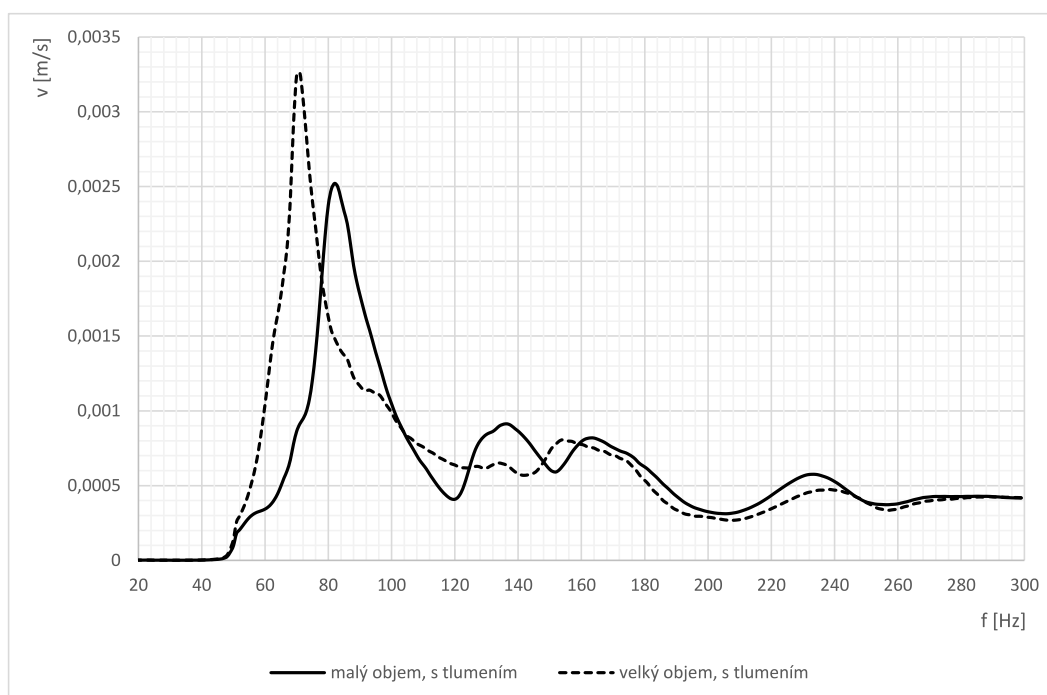
Změřené hodnoty potvrzují předpoklad, že s menším objem (menší výška vzduchového polštáře za deskou) panel pohlcuje na vyšších rezonančních kmitočtech.



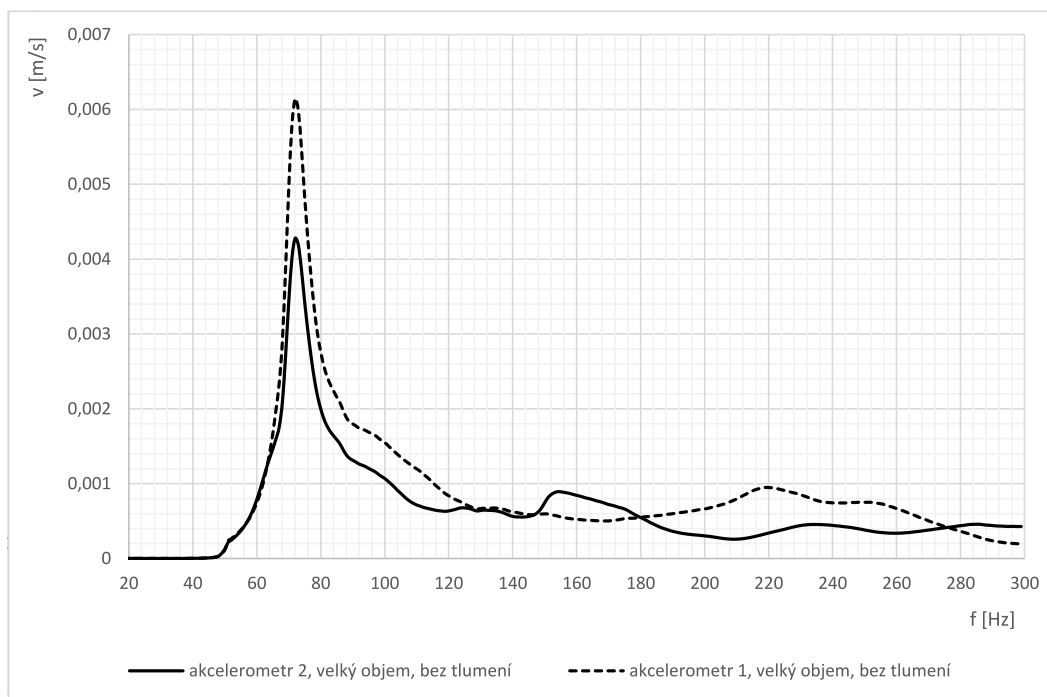
Obr. 7.2: Gumové těsnění na předním rámu



Obr. 7.3: Závislost kmitání čelní desky panelu na frekvenci - varianta 1; vliv pružnosti uložení



Obr. 7.4: Závislost kmitání čelní desky panelu na frekvenci - varianta 1; vliv změny objemu



Obr. 7.5: Závislost kmitání čelní desky panelu na frekvenci - varianta 1; kmitání středu a kraje desky

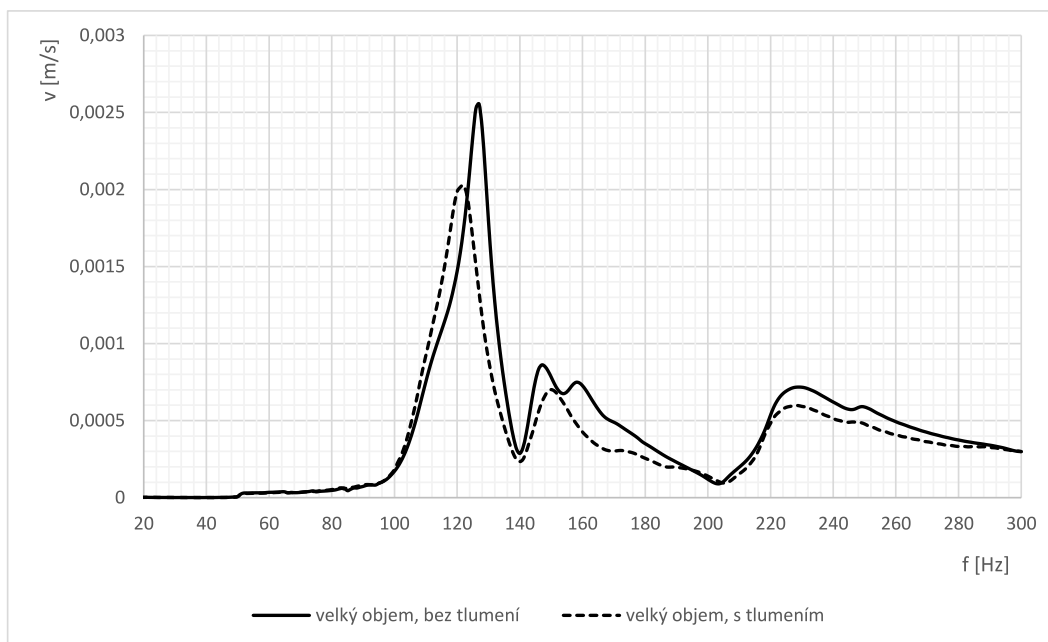
7.2 Varianta 2

V druhé variantě byla k pružnému uložení použita antivibrační pěna Sylomer typu SR11 o tloušťce 12,5 mm umístěná pouze na rozích čelní desky. Díky tomu není celý panel vzduchotěsný a k tlumení nedochází pomocí vzduchového polštáře, ale pouze tlumením v uložení (Sylomeru). Z grafu 7.6 je vidět, že došlo ke snížení rezonančního kmitočtu vlivem tlumení vzduchové mezery. Dále je také vidět značné snížení činitele jakosti (viz 7.7). Obdobně jako u varianty 1 je z grafu A.1 vidět, že deska opět nekmitá zcela pístově.

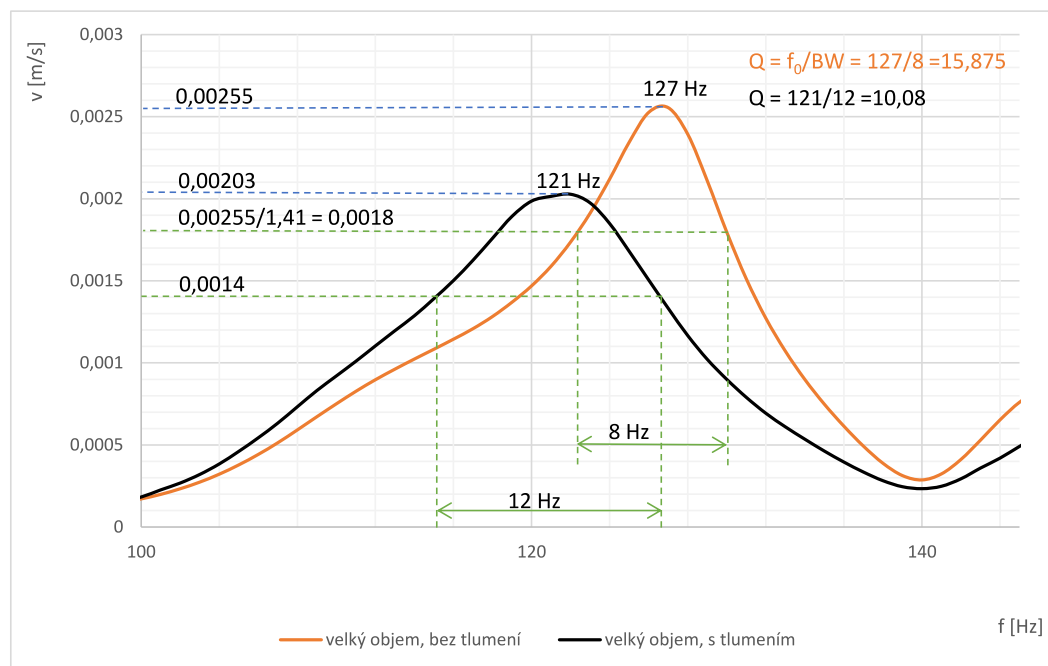
- Malý objem, bez tlumením – 227 Hz
- Malý objem, s tlumením – 184 Hz
- Velký objem, bez tlumení – 126 Hz (158 Hz také výrazná výchylka)
- Velký objem, s tlumením – 121 Hz (150 Hz také výrazná výchylka)

7.3 Varianta 3

Ve třetí variantě byl k pružnému uložení použit sylomer upevněný na krajích a středech okrajů čelní desky (viz 7.8). Rovnoměrným rozmístěním uložení byl zamezen vliv ně-

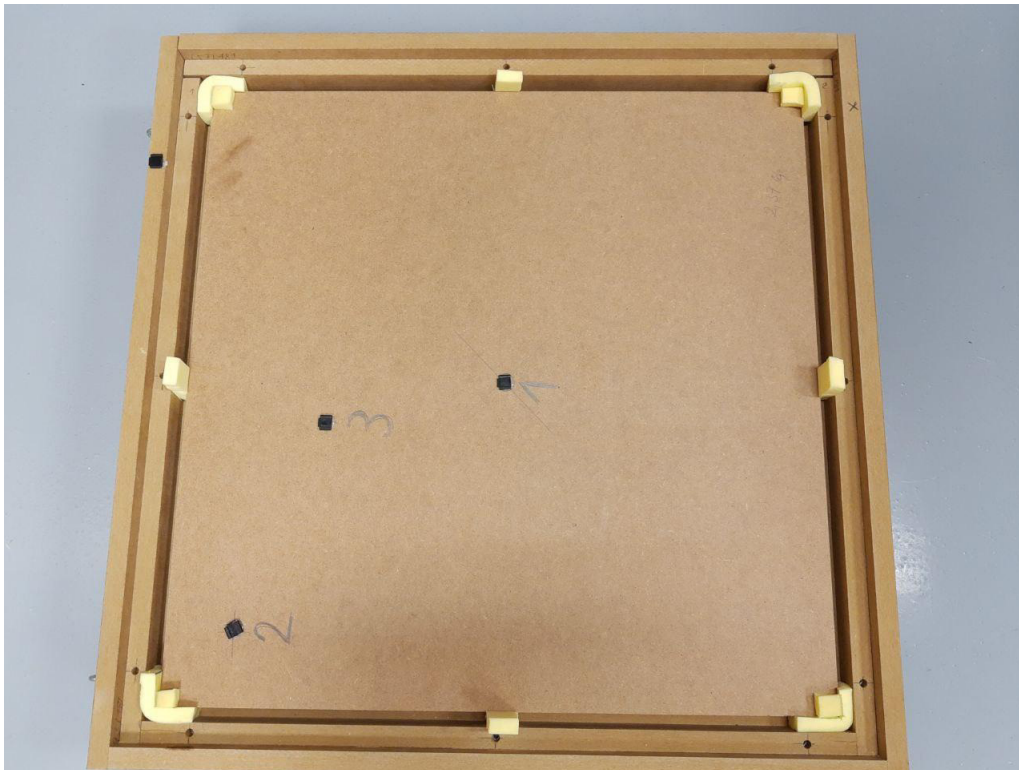


Obr. 7.6: Závislost kmitání čelní desky panelu na frekvenci - varianta 2; vliv tlumení vzduchové mezery



Obr. 7.7: Závislost kmitání čelní desky panelu na frekvenci - varianta 2; určení činitele jakosti

kterých ohybových kmitů. Tím se docílilo pístového kmitání desky (viz 7.9). Graf 7.10 ukazuje vliv přidání sylomeru, kdy došlo ke snížení kmitání na vyšších frekvencích.



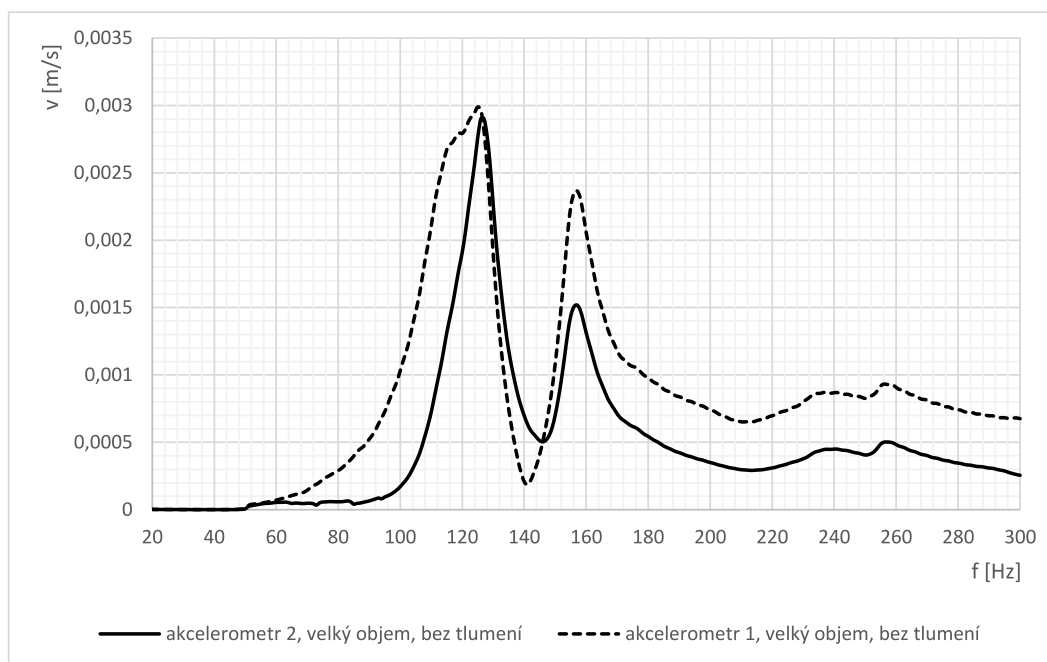
Obr. 7.8: Uložení desky v sylomeru - varianta 3

7.4 Varianta 4

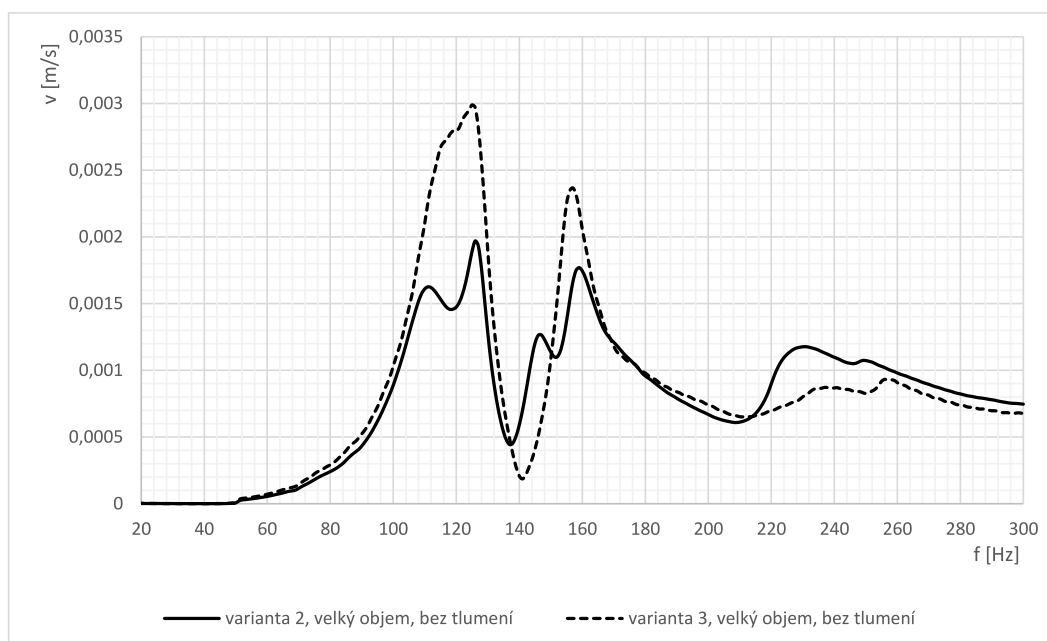
Ve čtvrté variantě byl použit pevný rám s napnutou koženkou. Na ni byla přilepena MDF deska silná 10 mm o rozměrech 500x500 mm. Výsledný graf této varianty 7.12 ukazuje, že kmitá výrazně méně než předchozí zkoušené varianty. Důvodem by mohlo být příliš intenzivní napnutí koženky k rámu, kdy ztratí své elastické vlastnosti.

7.5 Varianta 5

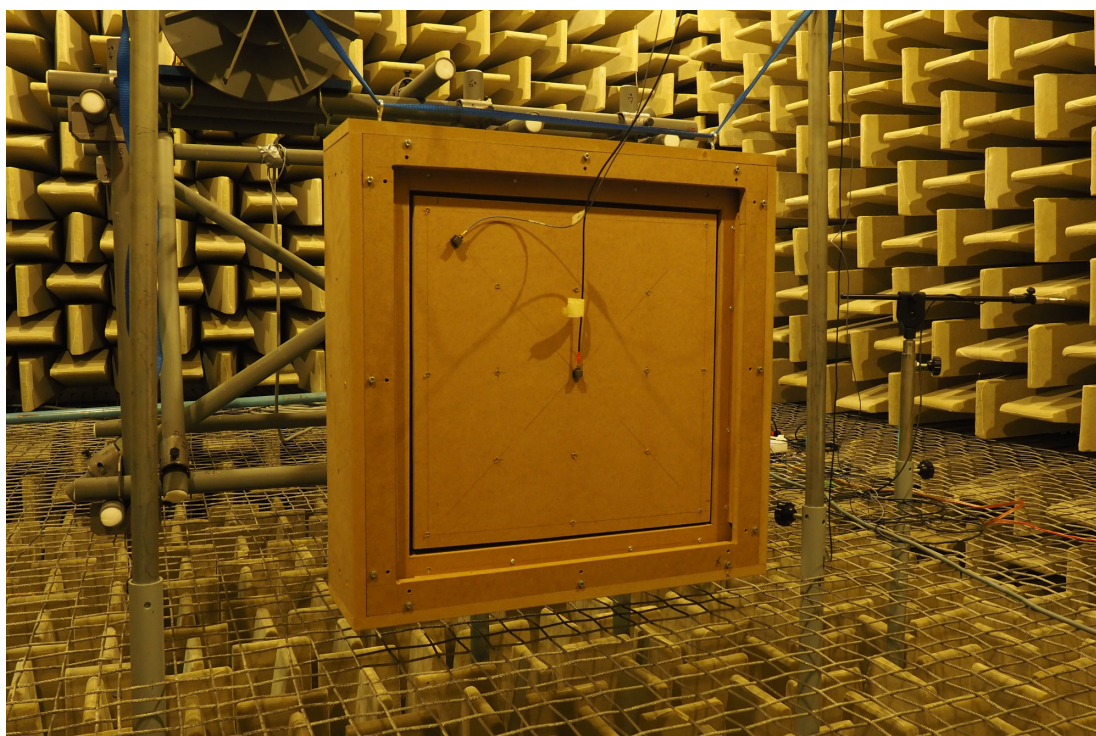
Poslední variantou byla opět koženka v pevném rámu. Tentokrát byla přidána další deska i ze zadní strany koženky. Došlo tedy k dvojnásobnému navýšení plošné hmotnosti kmitající desky. Přidáním druhé desky došlo k dalšímu snížení rozkmitu desky. Výsledky této varianty byly nepoužitelné.



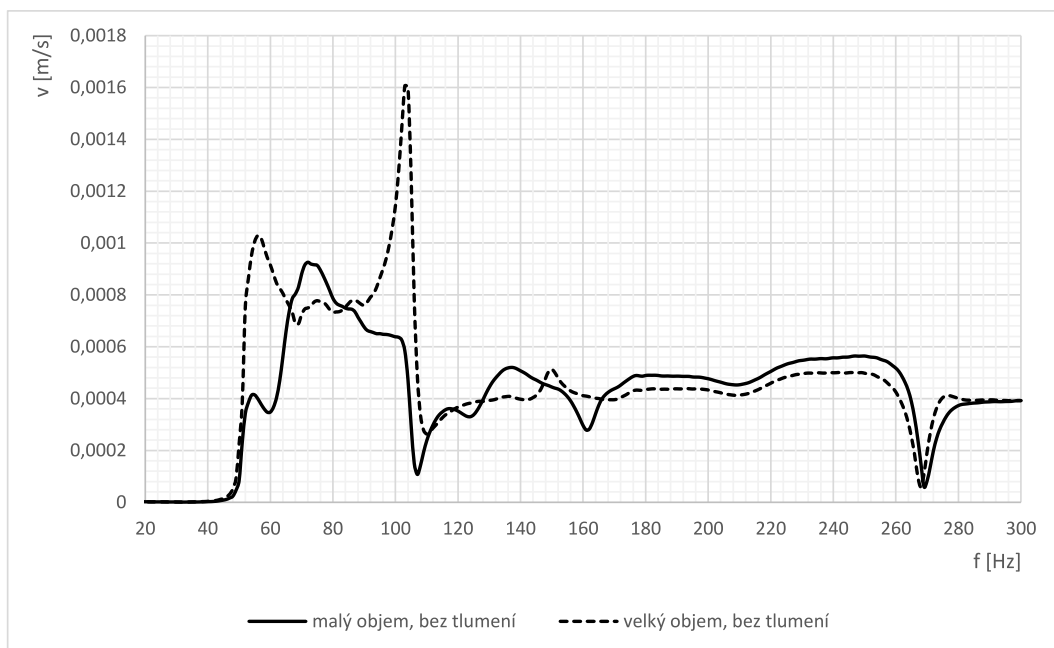
Obr. 7.9: Závislost kmitání čelní desky panelu na frekvenci - varianta 3; kmitání středu a kraje desky



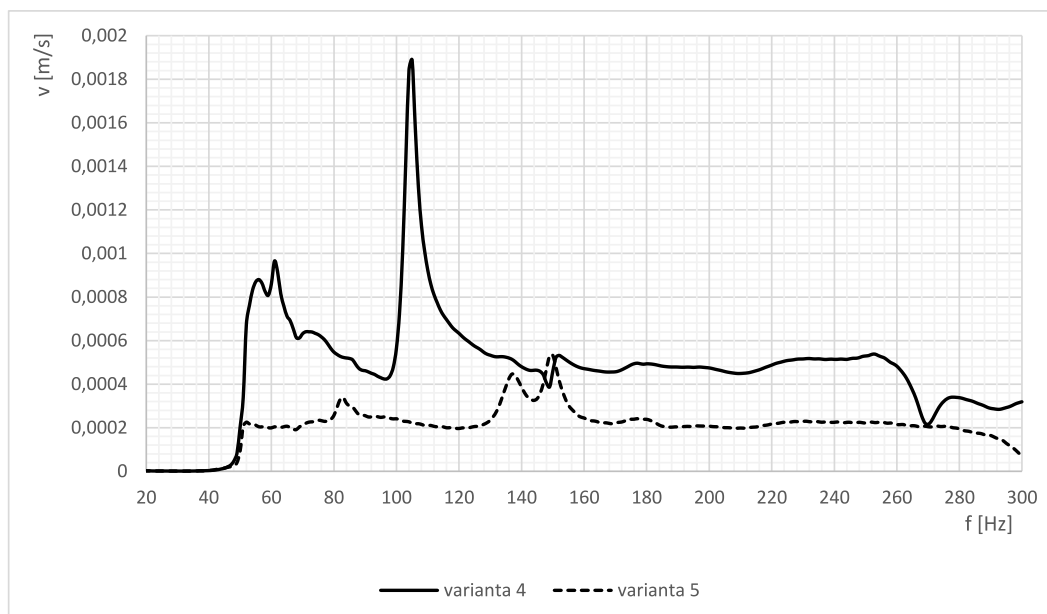
Obr. 7.10: Závislost kmitání čelní desky panelu na frekvenci - varianta 2 a 3; vliv přidání sylomeru



Obr. 7.11: Přípravek s deskou na kožence



Obr. 7.12: Závislost kmitání čelní desky panelu na frekvenci - varianta 4; vliv změny objemu



Obr. 7.13: Závislost kmitání čelní desky panelu na frekvenci - varianta 4 a 5; vliv přidání druhé desky

7.6 Zhodnocení výsledků

Měření potvrzují teoretický předpoklad, že na rezonanční frekvenci panelu má vliv výška vzduchového polštáře za deskou. Čím je tato výška větší, tím se snižuje rezonanční kmitočty. Dále je z grafů patrné, že u malých i velkých objemů za deskou se projevuje vliv tlumení z basotectu. Tlumením došlo k rozšíření rezonančního vrcholu. Vliv pružnosti uložení ukazuje graf 7.3. Použitím pružnějšího sylomeru dojde ke zvýšení rezonanční frekvence. Důvodem je také výrazně méně tuhé uložení oproti okennímu těsnění v kombinaci s uzavřeným vzduchovým polštářem.

8

Závěr

Zadáním práce byla konstrukce nízkofrekvenčního tlumícího akustického prvku na principu kmitajícího panelu. V úvodních kapitolách jsou popsány základní pojmy prostorové akustiky a běžně používané akustické obklady. V dalších kapitolách byly popsány snímače vibrací a měření činitele zvukové pohltivosti v dozvukové komoře.

Na základě prostudování těchto teoretických fyzikálních principů bylo možné navrhnout měřicí metodu pro jednoduché ověření rezonance prototypů kmitajícího panelu. Popsaná metoda může být, oproti časově a technicky náročnému měření činitele zvukové pohltivosti, realizovaná se základním měřicím vybavením sestávajícím ze dvou snímačů vibrací, jednoduchého analyzátoru a budícího reproduktoru. Metoda dosahuje dostatečné přesnosti pro jednoduché a rychlé ověření nových konstrukcí kmitajících panelů. Nákladné měření činitele pohltivosti v dozvukové komoře je tak možné až po vyladění konstrukce a výrobě dostatečného množství panelů. Výrazně se tak sníží náklady na vývoj nových akustických prvků. Součástí měřicí metody byla výroba modulárního systému s nastavitelnou výškou vzduchového polštáře, s možností vložení tlumícího prvku a s možností měnit uložení desky pro více druhů pružných materiálů. K praktickému sestavení kmitajícího panelu a jeho měření byly využity prostory ZČU.

Vložení tlumícího prvku z basotectu do vzduchového polštáře za deskou byla snížena rychlost kmitání na rezonanční frekvenci a snížen činitel jakosti. Změnou výšky vzduchového polštáře za deskou byla měněna hodnota rezonanční frekvence. Čím je výška dutiny větší, tím se zmenšuje rezonanční kmitočet. Volbou pružnosti uložení lze také ovlivnit hodnotu rezonanční frekvence. Pružnější uložení přeladuje rezonanční frekvenci k vyšším kmitočetům. Pružnost použitého materiálu lze ale ovlivnit jeho stlačením. To může zcela ovlivnit rezonanční frekvenci. Při výrobě více kusů je tedy nutné dodržovat stále stejnou technologii výroby a používat stejné materiály.

Z naměřených a vypočtených hodnot vyplývá, že rezonanční kmitočet závisí na hustotě použitého materiálu, výšce vzduchového polštáře za deskou a tedy na hloubce panelu, na vloženém tlumícím materiálu a na pružnosti uložení. Dalšími faktory, které ovlivňují kmitání a nejsou zahrnuty ve výpočtech, je těsnost upevnění desky, těsnost celé konstrukce a vlastní kmity celé konstrukce.

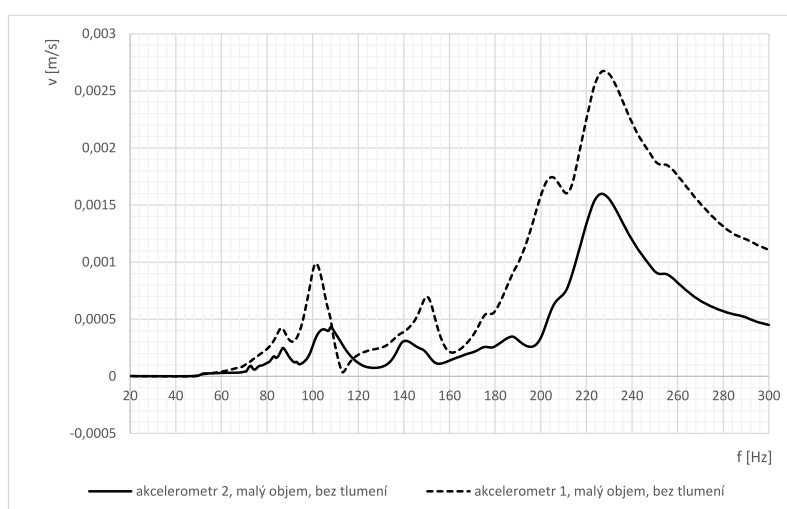
Při kontrole měření ve středu a rohu desky bylo zjištěno, že ani 10 mm silná MDF deska v mnoha případech nekmitá pístově. Proto se na vyšších kmitočtech objevují další rezonance dané nejspíše jejím ohybovým kmitáním. Dále lze konstatovat, že rezonanční frekvence kmitajícího panelu nelze přesně určit pouze výpočty. Výsledné hodnoty jsou ovlivněny více faktory, které vzorce neuvažují. S dnešními softwarovými možnostmi by bylo možné sestavit počítačové modely celých kmitajících panelů. Pro správnost výsledků by ale bylo nutné znát přesné mechanické vlastnosti použitých materiálů desky a uložení. Stále proto nelze získat konečné parametry kmitajícího panelu jinak než měřením konkrétního kusu.

Literatura

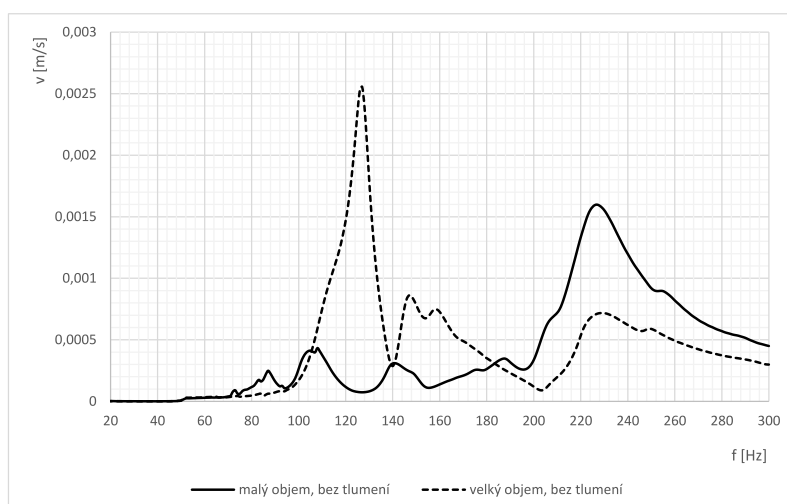
- [1] KRŇÁK, M. *Akustické obklady*. Praha: VÚZORT, 1971.
- [2] KOLMER, F., KYNCL, J. *Prostorová akustika*. Praha: SNTL, 1982.
- [3] MIKULČÁK, J. *Matematické, fyzikální a chemické tabulky pro učební obory SOU*. Praha: SPN, 1990. ISBN 80-04-24445-9.
- [4] VEVERKA, J. *Stavební fyzika I*. Brno: VUTIUM, 1998. ISBN 8021412836
- [5] MUZIKER.CZ. *muziker.cz: Absorpční panely pěnové*. [online]. 2020. [cit. 2020-15-06]. Dostupné z: <https://www.muziker.cz/mega-acoustic-pa-pmp-5-50x50x5-dark-gray>
- [6] MUZIKER.CZ. *muziker.cz: Absorpční panely dřevěné*. [online]. 2020. [cit. 2020-15-06]. Dostupné z: <https://www.muziker.cz/mega-acoustic-fiberpro120-binary-bean>
- [7] ZVUKOVE-STUDIO.CZ. *zvukove-studio.cz: Akustické obklady*. [online]. 2020. [cit. 2020-15-06]. Dostupné z: <http://www.zvukove-studio.cz/index.php?mv=akusticke-obklady-prodej>
- [8] BILOŠ, J., BILOŠOVÁ, A. *Aplikovaný mechanik jako součást týmu konstruktérů a vývojářů: část Vibrační diagnostika*. Ostrava: 2012. Studijní materiály pro studijní obor Aplikovaná mechanika Fakulty strojní. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava. Fakulta strojní.
- [9] SMETANA, C. *Praktická elektroakustika*. Praha: SNTL, 1981.
- [10] BRÜEL & KJAER. *Piezoelectric Accelerometer Types 4507 and 4508*. [online]. Brüel & Kjaer Sound & Vibration Measurement A/S. 2020. [cit. 2020-17-06]. Dostupné z: <https://www.bksv.com/-/media/literature/Product-Data/bp1841.ashx>
- [11] COX, T., D'ANTONIO, P. *Acoustic Absorbers and Diffusers 2 Rev Ed*. United Kingdom: Taylor & Francis Ltd, 2009. ISBN-10: 0415471745
- [12] EVEREST, F., Alton, a POHLMANN, C., Ken. *Master Handbook of Acoustics - 5th edition*. McGraw-Hill Professional Publishing, 2009. ISBN 9780071603324.

Příloha A

Grafy



Obr. A.1: Závislost kmitání čelní desky panelu na frekvenci - varianta 2; kmitání středu a kraje desky



Obr. A.2: Závislost kmitání čelní desky panelu na frekvenci - varianta 2; vliv změny objemu

Příloha B

Tabulky

Název	Počet kusů	[m]			[m ³]
		Hloubka	Délka	Šířka	Objem
Rám	1	0,018	0,656	0,656	0,007746
Vzorek	1	0,01	0,6	0,6	0,0036
Střední příčka	1	0,02	0,618	0,618	0,007638
Vrchní stěna	1	0,018	0,656	0,163	0,001925
Zadní stěna	1	0,018	0,656	0,638	0,007534
Boční stěna	2	0,018	0,638	0,145	0,00333
Spodní stěna	1	0,018	0,620	0,145	0,001618
Větší boční příčka	2	0,018	0,620	0,055	0,001228
Větší spodní příčka	1	0,018	0,584	0,055	0,000578
Větší vrchní příčka	1	0,018	0,582	0,055	0,000576
Menší boční příčka	2	0,018	0,620	0,04	0,000893
Menší spodní příčka	1	0,018	0,584	0,04	0,00042
Menší vrchní příčka	1	0,018	0,582	0,04	0,000419
Vyztužovací boční stěna	2	0,018	0,657	0,181	0,004281
Vyztužovací vrchní a spodní stěna	2	0,018	0,693	0,181	0,004516

Tab. B.1: Tabulka rozměrů a množství materiálu