

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA MATERIÁLŮ A TECHNOLOGIÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Konstrukce tlumicích akustických prvků na principu
kmitajících membrán**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Martin LANDGRÁF**
Osobní číslo: **E18B0148P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Téma práce: **Konstrukce tlumicích akustických prvků na principu kmitajících membrán**
Zadávací katedra: **Katedra materiálů a technologií**

Zásady pro vypracování

1. Prostudujte fyzikální princip funkce kmitajících membrán.
2. Navrhněte měřicí metodu pro ověření teoreticky získaných znalostí o kmitajících membránách.
3. Ověřte vliv konstrukčního provedení (velikost panelu, uložení) na rezonanční frekvenci a činitel jakosti kmitajících membrány.




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

Seznam doporučené literatury:

1. VAVERKA, Jiří. Stavební fyzika I. Brno: VUTIUM, 1998. ISBN 8021412836.
2. KRŇÁK, Milan. 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 a POHLMANN, 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: **9. října 2020**
Termín odevzdání bakalářské práce: **27. května 2021**


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




Doc. Ing. Aleš Hamáček, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 9. října 2020

Abstrakt

Tato bakalářská práce popisuje návrh a konstrukci akustického pohltivého prvku na principu kmitající membrány. V úvodu práce jsou probrány teoretické znalosti z prostorové akustiky a způsoby měření činitele zvukové pohltivosti akustických prvků. Druhá kapitola je věnována přehledu používaných akustických prvků a jejich fyzikálnímu principu funkce. Následující kapitoly se zabývají možnostmi měření vibrací a zvukové pohltivosti materiálů. Další část práce popisuje návrh a konstrukci měřicí metody pro ověření kmitání čelní plochy membrány. Bylo zkonstruováno několik variant kmitajících membrán z různých materiálů, s různým obvodovým uložením a velikostí vzduchové dutiny za membránou. Také byl zkoumán vliv velikosti plochy membrány.

Klíčová slova

kmitající membrána, doba dozvuku, rezonanční frekvence, akustické prvky, bezodrazová komora, akcelerometry

Abstract

This bachelor thesis describes the design and construction of an acoustic absorbing element based on the principle of oscillating membranes. The introduction discusses theoretical knowledge of spatial acoustics and methods of measuring the sound absorption factor of acoustic elements. The second chapter is devoted to an overview of the used acoustic elements and their physical principle of function. The following chapters deal with the possibility of measuring vibrations and sound absorption of materials. The next part of the work describes the design and construction measuring methods for controlling the vibration of the front surface of the membrane. Several variants of oscillating membranes were constructed from different materials, with different circumferential arrangements and air sizes behind the membrane. The effect of membrane surface size was also investigated.

Key words

vibrating membrane, reverberating time, resonant frequency, acoustic element, anechoic chambre, accelerometers

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.

.....

podpis

V Plzni dne 27.5.2021

Martin Landgráf

Obsah

OBSAH	7
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	8
ÚVOD	9
1 PROSTOROVÁ AKUSTIKA	11
1.1 POHLCOVÁNÍ AKUSTICKÉ ENERGIE	11
1.2 ČINITEL ZVUKOVÉ POHLTIVOSTI.....	12
1.3 DOBA DOZVUKU	13
1.4 STŘEDNÍ VOLNÁ DRÁHA.....	14
1.5 VLASTNÍ KMITY.....	14
2 AKUSTICKÉ POHLTIVÉ PRVKY ZALOŽENÉ NA REZONANČNÍM PRINCIPU ..	16
2.1 HELMHOLTZŮV REZONÁTOR A DĚROVANÉ DESKY	16
2.2 PRINCIP KMITAJÍCÍCH PANELŮ	17
2.3 PRINCIP KMITAJÍCÍCH MEMBRÁN	18
3 METODY MĚŘENÍ ZVUKOVÉ POHLTIVOSTI MATERIÁLŮ	21
3.1 METODA MĚŘENÍ V IMPEDANČNÍ (KUNDTOVĚ) TRUBICI [11]	21
3.2 METODA MĚŘENÍ V DOZVUKOVÉ MÍSTNOSTI [1, 12]	21
3.3 METODA MĚŘENÍ V ALFA KABINĚ	22
4 METODY MĚŘENÍ VIBRACÍ	24
4.1 ANALYZÁTORY	24
4.2 SNÍMAČE VIBRACÍ.....	24
4.3 AKCELEROMETRY [17]	25
4.4 PIEZOELEKTRICKÉ AKCELEROMETRY.....	26
5 NÁVRH MĚŘICÍ METODY PRO OVĚŘENÍ KMITAJÍCÍCH MEMBRÁN	27
5.1 MĚŘICÍ KONSTRUKCE	27
5.2 MĚŘENÍ KMITÁNÍ MEMBRÁNY	29
5.3 MĚŘENÉ VZORKY KMITAJÍCÍCH MEMBRÁN	33
6 MĚŘENÍ DÍLČÍCH VZORKŮ KMITAJÍCÍCH MEMBRÁN	34
6.1 MDF 10 MM.....	34
6.2 SOLOLIT 3 MM	35
6.3 PLEXISKLO 2 MM	36
6.4 PERTINAX	38
6.5 OCELOVÝ POZINKOVANÝ PLECH.....	40
7 POROVNÁNÍ ULOŽENÍ MEMBRÁNY V MĚŘICÍ KONSTRUKCI	41
7.1 OCELOVÝ POZINKOVANÝ PLECH.....	41
7.2 PERTINAX – PRUŽNÉ ULOŽENÍ	42
7.3 SOLOLIT	43
7.4 ZJIŠTĚNÉ VÝSLEDKY U PRUŽNÉHO ULOŽENÍ MEMBRÁNY	44
8 MĚŘENÍ POUŽITÝCH VZORKŮ V ROZMĚROVĚ MENŠÍ KONSTRUKCI	45
8.1 OCELOVÝ POZINKOVANÝ PLECH.....	46
8.2 PLEXISKLO	47
8.3 SOLOLIT	48
9 ZÁVĚR	49

SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	51
PŘÍLOHY	1

Úvod

Z pohledu akustiky je důležitá srozumitelnost hudby a řeči. Pro zajištění kvalitního poslechového vjemu v uzavřených prostorech je nutné mít kromě kvalitního zdroje zvuku i dobré akustické parametry prostoru. Touto problematikou se zabývá obor prostorové akustiky, který popisuje šíření zvuku a vlastnosti akustického pole v uzavřených prostorech. Bez správně vyřešené prostorové akustiky neplatí pravidlo, že čím dražší reprosoustava, tím lepší zvukový projev.

Při návrhu akustického prostoru je důležité správné rozmístění reproduktorů. Je nutné mít na paměti, že umístění reproduktoru v příliš malé vzdálenosti od stěny nebo od rohu, dochází k nárustu nízkých frekvencí. Každý objekt v prostoru jako například nábytek, obrazy nebo koberec mohou pohlcovat určité frekvenční pásmo zvukové energie. Může se pak stát, že se zvýrazní nebo potlačí určité frekvenční pásmo, což má za následek zhoršení poslechového vjemu. V takovém případě je potřeba zvýrazněné pásmo utlumit přemístěním objektu nebo přidáním vhodného akustického prvku, který má v potřebném frekvenčním pásmu dostatečně vysokou hodnotu činitele zvukové pohltivosti. Opačným případem je, když v prostoru je nedostatek ploch pohltivých materiálů, čímž se prodlouží doba dozvuku, která může mít za následek horší srozumitelnost.

Čistě teoretický návrh akustických prvků podle dohledatelných rovnic, může být značně nepřesný. Zjednodušené rovnice zanedbávají některé vlastnosti materiálů, které výsledek znatelně mění. Důležité je tedy vlastnosti realizovaných prvků ověřit metodou měření činitele zvukové pohltivosti v dozvukové komoře o minimální ploše vzorku 10 m^2 . Toto měření by ovšem bylo velmi časově a finančně náročné, a proto byla navržena menší měřicí konstrukce pro experimentální ověření vlastností kmitání akustických membrán. V této konstrukci bylo provedeno měření několika membrán z běžně dostupných materiálů. Výsledky měření jsou uvedeny v závěru práce.

Seznam symbolů a zkratek

α	Činitel zvukové pohltivosti.
α_S	Činitel zvukové pohltivosti pro všesměrový dopad.
W_1	Dopadající energie na překážku.
W_3	Odražená energie od překážky.
W_4	Pohlčená energie překážkou.
β	Činitel zvukové odrazivosti.
T_E	Doba dozvuku podle Eirynga.
m_t	Činitel útlumu ve vzduchu.
l_S	Střední volná dráha.
f_n	Vlastní kmity prostoru.
f_k	Kritická frekvence prostoru.
f_r	Rezonanční frekvence.
c	Rychlost šíření zvuku ve vzduchu 340 m/s.
M_s	Měrná plošná hmotnost.
d	Výška vzduchového polštáře.
ρ	Hustota vzduchu 1,276 kg/m ³ .
E	Modul pružnosti.
ω_0	Mezní kmitočet.
σ	Poissonova elastická konstanta.
p, q	Módová čísla příslušného vlastního kmitu.
Q	Činitel jakosti.
MDF deska	Medium density fibreboard. Polotvrdá dřevovláknitá deska.
FFT	Fast Fourier Transform. Rychlá Fourierova transformace.

1 Prostorová akustika

Akustickou kvalitou uzavřených prostorů se zabývá obor prostorové akustiky. Hlavním cílem je zajistit akustické podmínky odpovídající zamýšlenému použití prostoru. Jedním z hlavních sledovaných parametrů uzavřených prostorů je doba dozvuku, která je dána poklesem zvukové energie po vypnutí zdroje o 60 dB (neboli na jednu miliontinu původní energie) [1]. Ke zkrácení doby dozvuku se používají akustické tlumicí obklady. Volba vhodného akustického obkladu závisí na akustických požadavcích daného prostoru. Například v divadle se největší důraz klade na srozumitelnost a slyšitelnost a podle toho se následně volí vhodné materiály a jejich rozmístění v celém prostoru. K potlačení širokého pásma středních a vyšších kmitočtů lze použít obklady tvořené porézními materiály. Když je potřeba potlačit úzké kmitočtové pásmo, volí se obklady založené na principu rezonance [1, 2].

1.1 Pohlcování akustické energie

Při pohlcování akustické energie dochází k nevratné přeměně zvukové energie na energii jinou. Přeměny zvukové energie při šíření v pevných látkách můžeme rozdělit na tři druhy: vznikající třením, vznikající poklesem akustického tlaku, vznikající nepružnou deformací těles [1, 3].

Přeměny zvukové energie vznikající třením se objevují u porézních materiálů. Tyto absorbující pórovité materiály jsou tvořeny vlákny, kanály nebo dutinami, aby zvukové vlny byly pohlceny uvnitř materiálu. Póry jsou vzájemně propojené, aby docházelo k lepšímu šíření zvuku [4]. Pohlcující vlastnosti se regulují použitou tloušťkou materiálu nebo odsazením pórovitého materiálu od pevného povrchu. Při dopadu zvukové vlny na porézní materiál se část energie odrazí do prostoru a zbytek energie projde a při zpětném odrazu se v materiálu pohltí [3]. Pro dostatečnou přeměnu akustické energie musí být třecí plocha pórovité látky co největší. Kinetická energie se v pórech přemění na tepelnou [1]. Nejpoužívanějšími porézními materiály jsou desky z minerálních nebo organických vláken. Pokud je akustický obklad tvořen tuhou deskou, která je schopna mechanických kmitů, rozkmitá se vlivem dopadajících vln. Při dopadu akustické vlny se část energie odrazí, a zbytek přemění v energii tepelnou vlivem vnitřního tření v kmitající desce nebo jejím uložení. [1].

K poklesu akustického tlaku v důsledku stlačení dochází v místech, kde se zhušťují částice a stoupá zároveň celkový tlak. Narůstá i teplota a následně dojde k výměně tepla s kostrou konstrukce. Při zmenšení neboli relaxaci akustického tlaku, zmenší se celková potenciální energie a tím se sníží i energie zvukové vlny [1, 2]. K relaxaci tlaku nastává při šíření zvuku pevnými látkami nebo pevnou kostrou porézní látky [4]. Pokud se u vláknité látky mění průřez kostry, dochází v místech malého průřezu k nárustu teploty. Pokud je zároveň vláknitá látka dobrým vodičem tepla, dojde k vyrovnání tepla s okolím a tím k relaxaci tlaku. K relaxaci tlaku dochází také při šíření příčného vlnění tepelně vodivými kovovými deskami. Dochází k částečnému vyrovnání teplot mezi stlačenou a zahřátou stranou a stranou roztaženou a ochlazenou [1].

Přeměna zvukové energie vlivem nepružné deformace těles dochází u látek, které nevykazují pružnou hysterezi. Stlačíme-li tuto látku dostatečnou silou, i po skončení působení se látka nevrátí do původního stavu. Vynaložená práce na deformaci je větší než získaná pružností látky při zpětném pohybu do původní polohy. Rozdíl představuje úbytek zvukové energie vlivem nedokonalé pružnosti [1–4].

1.2 Činitel zvukové pohltivosti

Činitel zvukové pohltivosti α je bezrozměrné číslo pohybující se v intervalu od 0 do 1. U překážky, která všechnu dopadající energii zvukové vlny odrazí je činitel rovný 0, naopak dokonale zvuk pohlcující překážka má činitel rovný 1. Činitel zvukové pohltivosti udává poměr pohlcené energie k energii dopadající na překážku a je dán rovnicí (1.1) [5].

$$\alpha = \frac{W_4}{W_1} = \frac{W_1 - W_3}{W_1} = 1 - |\beta|^2 \quad [-]. \quad (1.1)$$

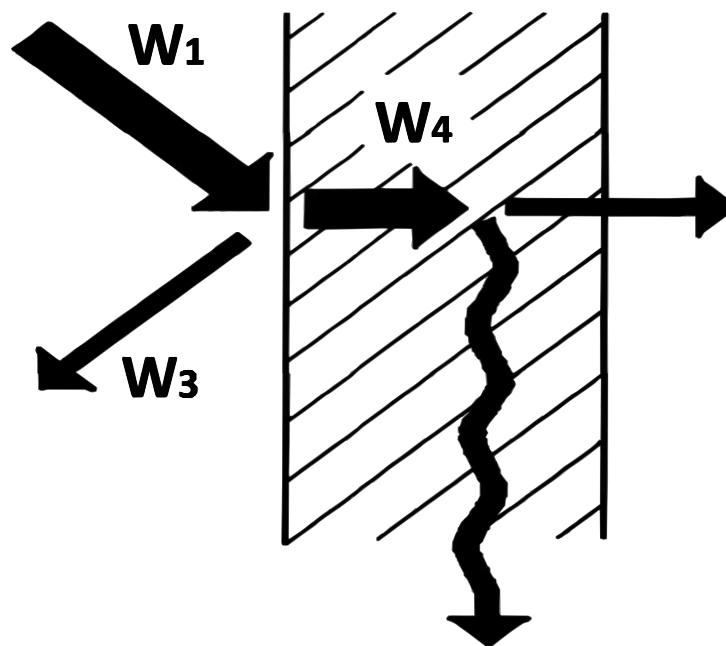
W_4 – Pohlcená energie.

W_3 – Energie odražená.

W_1 – Dopadající energie.

β – Činitel zvukové odrazivosti.

Při dopadu akustické energie na překážku se část energie odrazí a část se pohltí. Pohlcená energie se rozdělí na dvě části. První část se přemění na teplo a druhá část projde skrz překážku a prochází do prostoru za ní.



Obrázek 1-1: Dopad energie na překážku [Překleseno z [6]].

1.3 Doba dozvuku

Doba dozvuku je hlavním kritériem pro hodnocení kvality subjektivního vnímání zvuku v uzavřeném prostoru a udává čas potřebný k poklesu hladiny akustického tlaku o 60 dB [1]. Dozvuk je definován jako dokmitávání stojatých vln různých frekvencí (tzv. módů), které byly předtím v prostoru nějakým způsobem vybudeny. Po vypnutí zdroje zvuku, zvuk v uzavřeném prostoru ještě po určité době doznívá a až po nějaké době je veškerá akustická energie absorbována povrchy prostoru a vzduchem. Pokud je v uzavřeném prostoru příliš dlouhá doba dozvuku, řeč se stává nesrozumitelnou následkem přílišného směšování signálů, naopak pokud je doba dozvuku krátká, přímý zvuk není doplněn o odrazy a subjektivně zní jako ve volném prostoru [2]. Existují tři možnosti výpočtu doby dozvuku: podle Sabina, podle Millingtona, podle Eyringa [1].

Pro prostory z materiálů s malým činitelem zvukové pohltivosti stěn se používá Sabineův vzorec, ve více tlumených prostorách vznikem chyb už použít nelze. Pro výpočet doby dozvuku v prostorech s velkým činitelem zvukové pohltivosti stěn (až do $\alpha = 0,8$) se používá výpočet podle Eyringa z následujícího vztahu (1.2) [5].

$$T_E = 0,164 \cdot \frac{V}{-S \cdot \ln(1 - \alpha_s) + 4m_t V} \quad [s]. \quad (1.2)$$

V – Objem místnosti v m^3 .

S – Plocha ohraničujících stěn v m^2 .

α_s – Střední činitel zvukové pohltivosti v prostoru.

m_t – Činitel útlumu ve vzduchu v m^{-1} (může se zanedbat v auditoriích s objemem menším než $2000 m^3$).

Tento vztah respektuje střední volnou dráhu zahrnutím plochy stěn v prostoru.

1.4 Střední volná dráha

Volná dráha je dráha zvukového paprsku, kterou paprsek urazí mezi jednotlivými odrazy od stěn místnosti. Střední volná dráha je průměrná dráha mezi odrazy [5].

$$l_s = \frac{4V}{S} \quad [m]. \quad (1.3)$$

V – Objem místnosti v m^3 .

S – Povrch stěn v m^2 .

1.5 Vlastní kmity

Uzavřený prostor, stejně jako každé mechanické těleso, má vlastní kmity a ty jsou vybudeny v případě rovnosti budícího kmitočtu s vlastním kmitočtem prostoru. K dobrému přenosu zvuku je nutné zajistit co největší množství vlastních kmitů ve slyšitelném pásmu. Vlastní kmity jsou závislé na rozměrech místnosti a lze je vypočítat z následujícího vztahu (1.4).

$$f_n = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_a}{a}\right)^2 + \left(\frac{n_b}{b}\right)^2 + \left(\frac{n_c}{c}\right)^2} \quad [Hz]. \quad (1.4)$$

c – Rychlost šíření zvuku ve vzduchu v m/s .

n_a, n_b, n_c – Libovolně zvolená kombinace celých čísel 0, 1, 2, ...

a, b, c – Rozměry uvažovaného prostoru v m .

Pro každou zvolenou kombinaci celých čísel vypočítáme jeden vlastní kmit prostoru, získáme tak nekonečnou řadu kmitočtů, která je směrem k vyšším frekvencím stále hustší. Každý takto vypočtený kmitočet může rezonovat a tím zdůrazňovat přenášený signál [5].

Na nízkých frekvencích je počet vlastních kmitů nízký, a to má za následek nerovnoměrné rozložení akustického pole v prostoru, tedy střídání minim a maxim akustického tlaku. Proto se uvádí kritický kmitočet definován vztahem (1.5), od kterého už lze považovat rozložení vlastních kmitů za rovnoměrně rozložené [1].

$$f_k = 2000 \sqrt{\left(\frac{T}{V}\right)} \quad [\text{Hz}]. \quad (1.5)$$

T – Průměrná doba dozvuku v s.

V – Objem místnosti v m³.

2 Akustické pohltivé prvky založené na rezonančním principu

Porézní tlumicí materiály v běžně používaných tloušťkách (jednotky centimetrů) pohlcují zvuk převážně ve vysokých frekvenčních oblastech. V případě, kdy je potřebné tlumit zvuk o nižších frekvencích, použijí se akustické tlumicí prvky založené na principu rezonance. Nejvyšší amplituda kmitů vzniká při dosažení rezonanční frekvence dané konstrukce. Doba dozvuku zvuku v uzavřeném prostoru zkracujeme tlumícími rezonátory, kdy dochází k přeměně zvukové energie v jinou [1]. Doba doznívání je, kdy zvuk přestane dopadat na soustavu a ta po nějakou dobu kmitá vlastním kmitočtem. Aby byla soustava co nejúčinnější, musí být dostatečně tlumena tak, aby co nejvíce zvukové energie nashromážděné v rezonátoru, bylo přeměněno v teplo. Obklady založené na rezonančním principu můžeme rozdělit do tří skupin.

2.1 Helmholtzův rezonátor a děrované desky

Helmholtzův rezonátor je tvořen dutinou o určitém objemu, která je s okolním prostředím spojena hrdlem. a je opatřen hrdlem. Vzduch v otvoru se chová jako nestlačitelný píst (tuhé těleso) a vzduchový polštář v dutině za otvorem jako pružina. K tlumení dochází vlivem odporu třením při pohybu akustické vlny v dutině [1, 7]. Používaly se i ve starověku, jak o tom svědčí nálezy amfor zabudovaných ve stěnách antických chrámů a amfiteátrů [2].

Děrované desky jsou desky tvořené kombinací jednoduchých Helmholtzových rezonátorů a jsou připevněné na pevné konstrukci. Každému otvoru patří příslušná dutina, která tvoří dílčí rezonátor. Resonanční kmitočet se reguluje plochou a hloubkou otvoru a objemem dutiny.

Pro výpočet rezonančního kmitočtu, při kterém dochází k maximálnímu pohlcování akustické energie platí vztah (2.1) [6].

$$f_r = \frac{c}{4\pi} \sqrt{\frac{\pi D^2}{d l S_1}} \quad [Hz]. \quad (2.1)$$

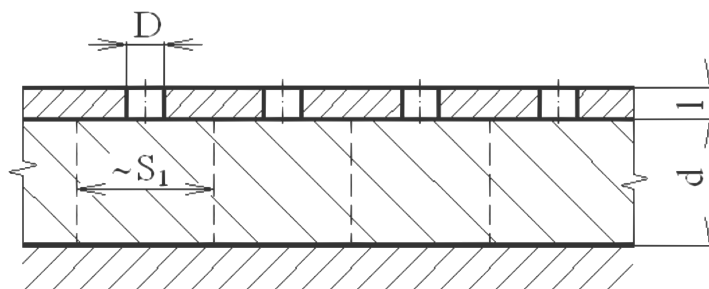
c – Rychlost zvuku ve vzduchu v m/s.

D – Průměr otvoru v mm.

d – Tloušťka vzduchového polštáře v mm.

l – Tloušťka desky v mm.

S_1 – Plocha dutiny připadající na jeden rezonátor v mm².



Obrázek 2-1: konstrukce děrované desky [Převzato z [8]].

2.2 Princip kmitajících panelů

Kmitající panel je pevná deska na okrajích pružně upevněná na nosné konstrukci, takže kmitá jako píst v celé své ploše stejnou výchylkou. Panel může být vyroben z libovolného materiálu, avšak musí splňovat určitou tuhost, aby převládalo pístové kmitání nad ohybovým. Dostatečnou tuhost musí mít i materiál použitý v rámu soustavy. Pokud není v soustavě splněná dostatečná tuhost materiálů, snižuje se pak celková účinnost. Pohybující se deska rozkmitá vzduch v dutině za ní a tato energie je tlumena porézními materiály umístěnými mezi deskou a dnem kazety. Potřebné tlumicí vlastnosti se obvykle dosahují vyplněním dutiny mezi deskou a dnem porézními materiály. U kmitajících panelů je maximální zvukové pohltivosti dosaženo při nízkých frekvencích. Kmitající panely se nejčastěji používají pro pásmo 50 až 300 Hz. Rezonanční kmitočet kmitajícího panelu stanovíme pomocí vzorce (2.2) [6].

$$f_r = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho S}{md}} = \frac{60}{\sqrt{M_s d}} \quad [\text{Hz}]. \quad (2.2)$$

c – Rychlost zvuku ve vzduchu v m/s.

ρ – Hustota vzduchu v kg/m³.

M_s – Měrná plošná hmotnost desky v kg/m².

S – Plocha membrány v m².

m – Hmotnost membrány v kg.

d – Výška vzduchového polštáře za deskou v m.



Obrázek 2-2: Náčrt kmitajícího panelu se vzduchovým polštářem.

2.3 Princip kmitajících membrán

Membránou je definována tenká deska nebo folie, jejíž tuhost v ohybu je velmi malá a je umístěna v rámu v určité vzdálenosti od pevné stěny. Mezi membránou a stěnou je vzduchový polštář, který vytváří pružinu o vlastní tuhosti [9]. Membrána se rozvibruje, když na ní dopadá zvuk. Do dutiny za membránou se opět vkládá porézní materiál. Vzduch je vlivem rozkmitání čelní desky uveden do pohybu a proniká pohltivým porézním materiálem, kde dojde ke přeměně energie. (kinetická energie se v pórech porézního materiálu přemění na tepelnou) [7]. Mohou se objevit rezonance na vyšších kmitočtech dané poddajností materiálu a rozměry membrány. Membrána je nejčastěji zhotovena z tenkých desek různých materiálů nebo umělé textilie, koženky, folie. V literatuře se nejčastěji uvádí vzorec pro základní rezonanční kmitočet (2.3) [1]. Tento vzorec ale neuvažuje vyšší ohybové kmity.

$$f_r = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho}{M_s d}} = \frac{60}{\sqrt{M_s d}} \quad [\text{Hz}]. \quad (2.3)$$

c – Rychlost zvuku ve vzduchu v m/s.

ρ – Hustota vzduchu v kg/m³.

d – Výška vzduchového polštáře v m.

M_s – Měrná plošná hmotnost desky v kg/m².

Pro přesnější výpočet rezonanční frekvence lze uvést rovnici (2.4), která nezanedbává ohybové kmitání membrány závislé na materiálových vlastnostech a rozměrech [10].

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho c^2}{M_s d} + \frac{4\pi^2}{M_s} \left[\left(\frac{p}{a}\right)^2 + \left(\frac{q}{b}\right)^2 \right]^2 \frac{E h^3}{12(1 - \sigma^2)}} \quad [\text{Hz}]. \quad (2.4)$$

E – Modul pružnosti v Pa.

ρ – Hustota vzduchu v kg/m³.

σ – Poissonova elastická konstanta.

d – Výška vzduchového polštáře v m.

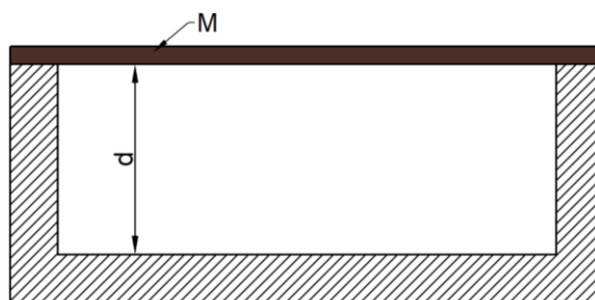
M_s – Měrná plošná hmotnost desky v kg/m².

p, q – Módová čísla příslušného vlastního kmitu.

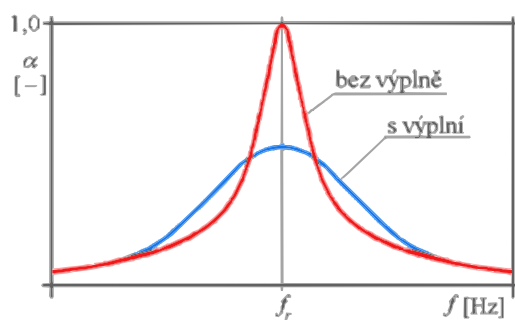
a, b – Rozměr stran obdélníkové membrány v m.

h – Tloušťka membrány v m.

Pro správnou funkci membrány je nutné vyplnit vzduchovou mezeru za membránou porézním materiálem, protože samotný vzduch zajišťuje pouze malé tlumení, navíc jen v úzkém frekvenčním pásmu. Prostor vyplněn pohltivým materiálem má nižší zvukovou pohltivost při rezonanční frekvenci, ale širší pásmo pohltivosti [4]. Toto můžeme pozorovat na obrázku 2-4. Množství a typ použitého porézního materiálu má pak vliv na činitel jakosti celého rezonančního systému.



Obrázek 2-3: Náčrt kmitající membrány se vzduchovým polštářem.



Obrázek 2-4: Graf pohlcování akustické energie [Převzato z [2]].

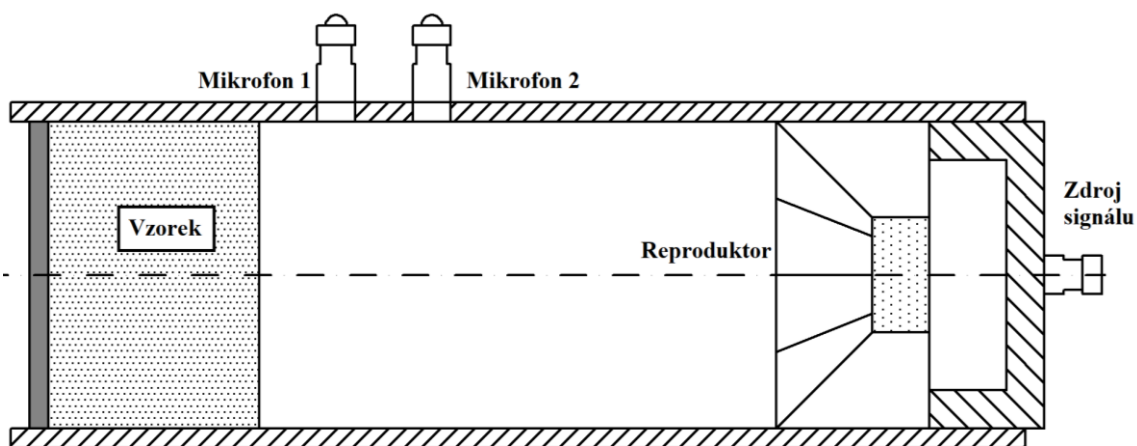
3 Metody měření zvukové pohltivosti materiálů

Akustická pohltivost je schopnost materiálu pohltit část dopadající energie. Může být měřena pro kolmý dopad nebo pro všesměrový dopad akustické energie.

3.1 Metoda měření v impedanční (Kundtově) trubici [11]

Impedanční trubice je speciální válcový zvukovod s tuhými a hladkými stěnami, kde na jednom konci je zdroj zvukových vln a na druhém měřený vzorek. Trubice může mít jeden či dva mikrofony. S jedním mikrofonom se používá k měření poměru stojaté vlny a s dvěma mikrofony k měření přenosové funkce. Metoda se používá pro kolmý dopad akustického vlnění. Měření probíhá na velmi malém vzorku (průměr 100 mm) s vysokou přesností. Tato metoda ale není použitelná pro měření rezonančních akustických prvků, protože jejich parametry často závisí na jejich rozměrech a konstrukci.

Výstupem měření jsou hodnoty činitele zvukové pohltivosti, povrchová impedance a odrazivost vzorku [12].



Obrázek 3-1: Blokové schéma měření metodou přenosové funkce |Překresleno z [13].

3.2 Metoda měření v dozvukové místnosti [1, 12]

Činitel zvukové pohltivosti daného materiálu je určen z měření doby dozvuku v dozvukové místnosti. Stěny a všechny povrchy dozvukové místnosti jsou provedeny tak, aby měly co nejmenší hodnotou činitele zvukové pohltivosti (byly co nejvíce odrazivé). Difúzní

akustické pole a náhodný a všesměrový dopad akustických vln na měřený vzorek jsou zajištěny použitím difuzorů.

Měření se provádí ve dvou fázích. V první je změřena doba dozvuku pro prázdnou místnost, která má objem minimálně 150 m^3 . Ve druhé fázi se do místnosti umístí vzorek o minimální ploše 10 m^2 a je opět změřena doba dozvuku. Poté lze stanovit střední akustickou pohltivost materiálu ve frekvenčním pásmu 100 Hz až 5 kHz. Postup a podmínky měření určuje norma ISO 354 (ČSN EN ISO 354 Akustika – Měření zvukové pohltivosti v dozvukové místnosti.) Nevýhoda této metody je potřeba velkého množství zkoumaného materiálu a jeho následná montáž a upevnění v dozvukové místnosti. Výhoda je, že touto metodou výsledky více odpovídají skutečnosti, než metodou popsanou v předchozím odstavci (3.1), protože díky difúznímu poli v komoře se jedná o měření zahrnující všesměrový dopad akustických vln na měřený vzorek.



Obrázek 3-2: Foto dozvukové komory na fakultě ZČU

3.3 Metoda měření v alfa kabině

Alfa kabina je zmenšeným modelem dozvukové místnosti, která odstraňuje nevýhodu potřeby vzorku o velkých rozměrech. Metoda nedosahuje takové přesnosti jako měření

v dozvukové místnosti. Zvuk uvnitř místnosti vytváří více reproduktorů umístěné v rozích kabiny. Výstupem je činitel zvukové pohltivosti α_s určený z doby dozvuku [14].



Obrázek 3-3: Foto dvou alfa kabin vyrobené od firmy Novosim [Převzato z [15]].

4 Metody měření vibrací

Kmitání jakékoliv plochy může být snímáno kontaktně pomocí vhodně umístěných akcelerometrů nebo bezkontaktně skenováno laserovým vibrometrem. Bezkontaktní snímače nezatěžují svou hmotností měřený objekt, jsou ale výrazně dražší. Pevně uchycené snímače mohou být připevněné lepidlem, oboustrannou lepicí páskou, včelím voskem nebo magnetem.

4.1 Analyzátoři

Analyzátoři jsou obecně zařízení pro záznam a vyhodnocení měřených signálů. K analyzátoru se připojují snímače podle požadované měřené veličiny a analyzátor převádí jejich výstup na elektrický signál. Analogový signál ze snímače prochází vstupním zesilovačem, antialiasingovým filtrem a A/D převodníkem. Signál v převodníku je digitalizován a ukládá se do zásobníku dat (buffer). Z bufferu lze signál zobrazit jako časový záznam, anebo dále zpracovat – např. Fourierovou transformací a získat frekvenční spektrum [16].

4.2 Snímače vibrací

Frekvenční a dynamický rozsah se u jednotlivých typů snímačů liší. Dynamický rozsah je rozsah měřitelných amplitud měřené veličiny. Výběr vhodného snímače závisí na konkrétní aplikaci a na frekvenčním rozsahu, který nás zajímá.

Dle měřené veličiny se snímače dělí [16]:

- Snímače výchylky
- Snímače rychlosti (velometry)
- Snímače zrychlení (akcelerometry)

Snímače výchylky používají nejčastěji bezkontaktní snímač pracující na bázi vířivých proudů. Z jiných typů můžeme zmínit ještě laserové a kapacitní snímače. Využívají se převážně pro měření vibrací hřídele vůči statorové části.

Snímače rychlosti pracují na principu elektromagnetické indukce. Snímač má dvě hlavní součásti: permanentní magnet a cívku. Použitelný frekvenční rozsah snímače bývá od 10 do 1000 Hz [16].

Snímači zrychlení jsou akcelerometry, které byly použité při praktickém měření kmitající membrány. Protože byl předpokládán pohyb membrány hlavně v na ni kolmém směru, byla využita jednoosá varianta akcelerometrů. Pro měření, kde se předpokládá pohyb ve více osách, se využívají tříosé akcelerometry. Akcelerometr měří absolutní vibrace (referencí je nehybná hmota), na rozdíl od snímačů výchylky, která měří relativní vibrace. Akcelerometry jsou popsány v kapitole (4.3)

4.3 Akcelerometry [17]

Akcelerometr je senzor pro měření dynamického nebo statického zrychlení. Dynamické zrychlení způsobuje sílu při změně rychlosti objektu. Statické zrychlení způsobuje síla vzniklá působením zemské gravitace.

Dále se akcelerometry měří absolutní a relativní zrychlení. Absolutní zrychlení je zrychlení vůči zemi (gravitační síla). Relativní zrychlení je zrychlení vůči jinému předmětu. Akcelerometry mohou být jednoosé, dvouosé nebo tříosé.

Akcelerometry mají nejširší frekvenční rozsah. Jsou schopny měřit od frekvence nižší 1 Hz až do 30 kHz. V moderní elektronice se používají k detekci orientace (v mobilních telefonech), k detekci pádu (ochrana HDD) nebo k detekci nárazu (airbagy). Jejich frekvenční rozsah shora omezuje jejich vlastní rezonanční frekvence, ale také rezonanční frekvence použitého uchycení k měřenému objektu.

Podle principu se akcelerometry dělí:

- Piezoelektrické
- Piezorezistivní
- Kapacitní

4.4 Piezoelektrické akcelerometry

Piezoelektrické akcelerometry fungují na principu piezoelektrického jevu. Vlivem působící síly dojde k deformaci krystalu a k vzniku elektrického náboje. Podmínkou pro měření zrychlení kmitání je velká rezonanční frekvence ω_0 až 250 kHz [18]. Pokud frekvence měřeného vzorku je menší než rezonanční frekvence snímače, pak vzniklý elektrický náboj při frekvenční stálosti je úměrný zrychlení měřenému vzorku.

5 Návrh měřicí metody pro ověření kmitajících membrán

K měření zvukové pohltivosti u kmitajících membrán v dozvukové komoře by musela být splněna podmínka normy [19], udávající plochu měřeného prvku minimálně 10 m². Výroba prototypů kmitajících membrán v této ploše by byla časově i finančně náročná. Proto se hledala varianta, která by umožnila určení rezonanční frekvence na pouze jednom kusu vzorku. Protože se prakticky jedná o jednoduchý mechanický rezonanční systém, je možné měřit mechanické kmitání membrány. Membrána mádle teoretických předpokladů největší akustickou pohltivost při své rezonanční frekvenci.

5.1 Měřicí konstrukce

Měřené vzorky membrán budou umístěny do multifunkční konstrukce, která dříve sloužila k měření pístového kmitání desek (viz [20]) tato konstrukce se adaptovala k vložení kmitajících membrán. Aby se ještě více omezilo kmitání zadní desky konstrukce společně s kmitáním přední membrány, byla zadní deska zdvojena další 18mm MDF deskou. Konstrukce umožňuje jednoduchou výměnu tlumicího prvku a 2 varianty hloubky vzduchové mezery za membránou. Rozměry zkoumaných membrán jsou 600x600 mm.

Dle rovnice (4.1) se vypočetly objemy vzduchových mezer za membránou.

$$V = a \cdot b \cdot c \quad [m^3]. \quad (4.1)$$

a – Šířka mezery v m.

b – Délka mezery v m.

c – Hloubka kazety v m.

Rozměry vzduchové mezery za membránou jsou $a = 584$ mm, $b = 584$ mm.

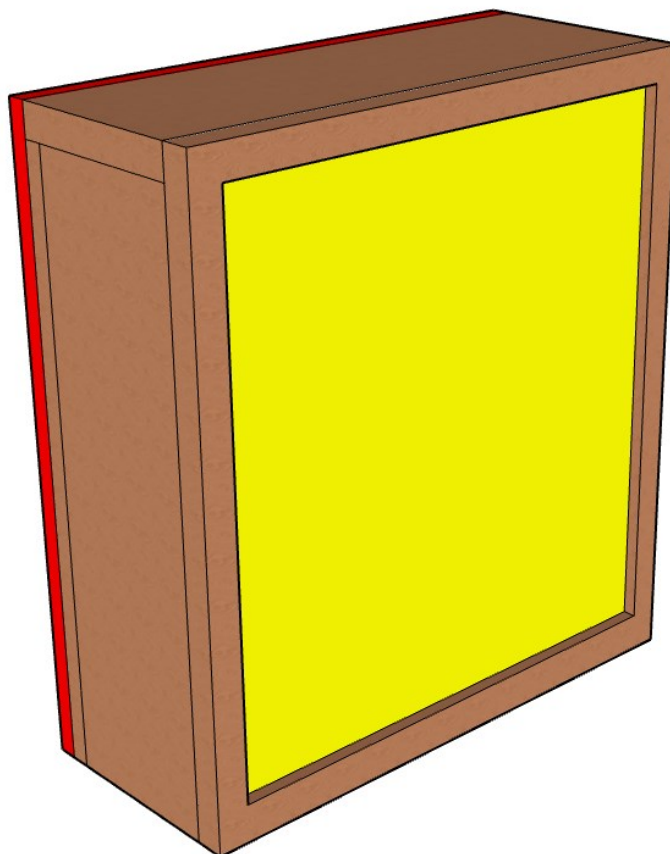
- Pro hloubku $c = 112$ mm je $V_1 = 38,2$ l.
- Pro hloubku $c = 55$ mm je $V_2 = 18,8$ l.

Dle rovnice (2.3) lze změnou hloubky vzduchového polštáře za kmitající membránou měnit rezonanční frekvenci membrány.

Konstrukce je tvořena z pevné hlavní části, odnímatelné boční stěny (umožňující vložení přepážky pro změnu objemu a tlumicího materiálu) a odnímatelného předního rámu, kde bylo požadováno uchycení membrán s různou tloušťkou. Přední rám je uchycen metrickými šrouby, které jsou zašroubovány do vlepených narážejících matic. Uchycení je rovnoměrně rozmístěno po celém obvodu. Boční stěna je uchycena také metrickými šrouby a navíc kovovými zámky. Na vrchní části konstrukce jsou úchyty k zavěšení v bezodrazové komoře. Celá konstrukce je vyrobena z 18-mm MDF desek. Zadní a boční stěny jsou dodatečně vyztuženy další vrstvou MDF desky pro omezení vlastních kmitů konstrukce. Průřez vnitřku modelu je na obrázku 5-1, kde žlutou barvou je zobrazena kmitající membrána a červenou barvou dodatečné vyztužení. Ke grafickému znázornění měřicí konstrukce byl použit 3D modelovací program SketchUP. Celý model je znázorněn na obrázku 5-2.



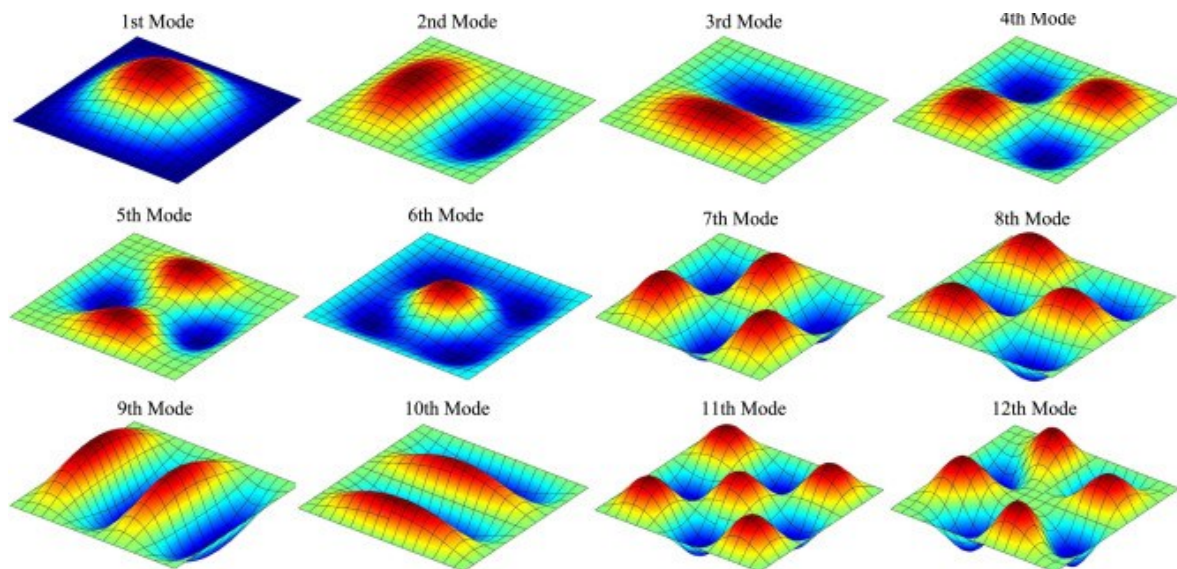
Obrázek 5-1: Průřez měřicího modelu bez vnitřního tlumicího porézního materiálu.



Obrázek 5-2: Znárodnění modelu bez horních úchytů k zavěšení.

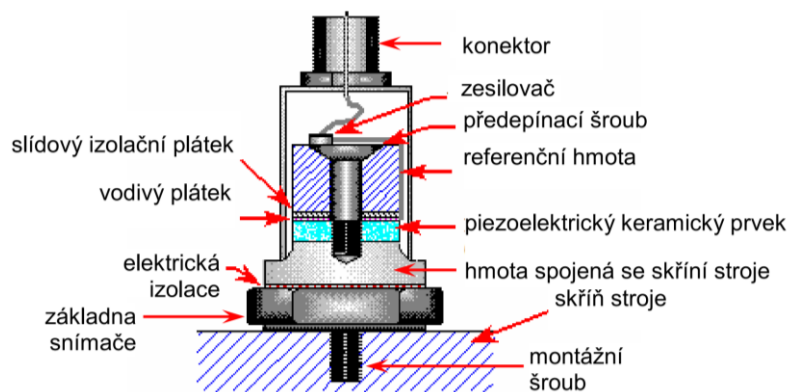
5.2 Měření kmitání membrány

Předpokládá se, že použité vzorky tenkých membrán nebudou kmitat pouze stejnoměrně v celé své ploše (pístově), ale také svými ohybovými kmity na vyšších frekvencích. Proto není možné měřit jedním snímačem pouze střed membrány, ale bude nutné použít více snímačů. Na obrázku 5-3 jsou graficky znázorněny vlastní ohybové kmity tenké čtvercové desky. Měřicí body jsou vybrány tak, aby bylo možné identifikovat i vyšší ohybové kmity.



Obrázek 5-3: Grafické znázornění prvních 12 ohybových kmitů plně upnuté čtvercové desky [Převzato z [21]].

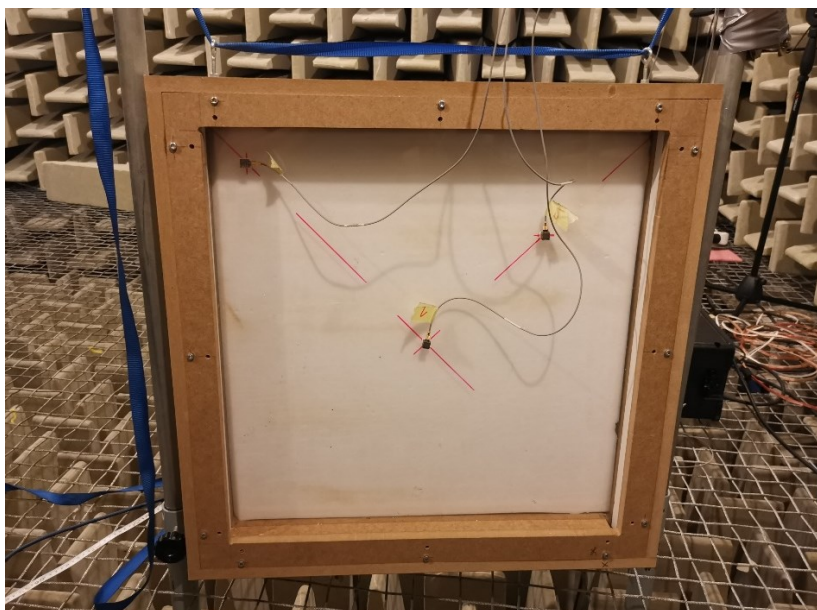
Pro měření rezonančních kmitočtů kmitající membrány byla zvolena metoda využívající univerzální analyzátor značky Brüel & Kjaer typ LAN-Xi 3160 A 042 a akcelerometry Brüel & Kjaer 4507 B 004 s frekvenčním rozsahem 0,3 až 6000 Hz a citlivostí 10 mV/ms^{-2} [22].



Obrázek 5-4: Piezoelektrický akcelometr [Převzato z [17]].

Na povrch měřeného vzorku pomocí tavné pistole nebo oboustranné lepicí pásky byly umístěny montážní destičky pro uchycení akcelerometrů. Snímače byly umístěny od středu po úhlopříčce směrem k rohu membrány. Rozmístění akcelerometrů na kmitající membráně je vidět na obrázku 5-5. Tato konfigurace snímačů umožňuje identifikaci případného pístového kmitání. Snímač (A1) uprostřed membrány snímá základní ohybový kmit a jeho liché násobky. Snímač (A2) je umístěn v kmitně čtvrtého ohybového kmitu a jeho násobků. Na rohu membrány je umístěn snímač (A3), který by měl teoreticky frekvenčně identifikovat všechny kmity desky, ale amplitudy neodpovídají. Snímač (A2) je od pravého rohu ve

vzdálenosti 150x150 mm a třetí snímač (A3) je od vedlejšího rohu ve vzdálenosti 55x55 mm.



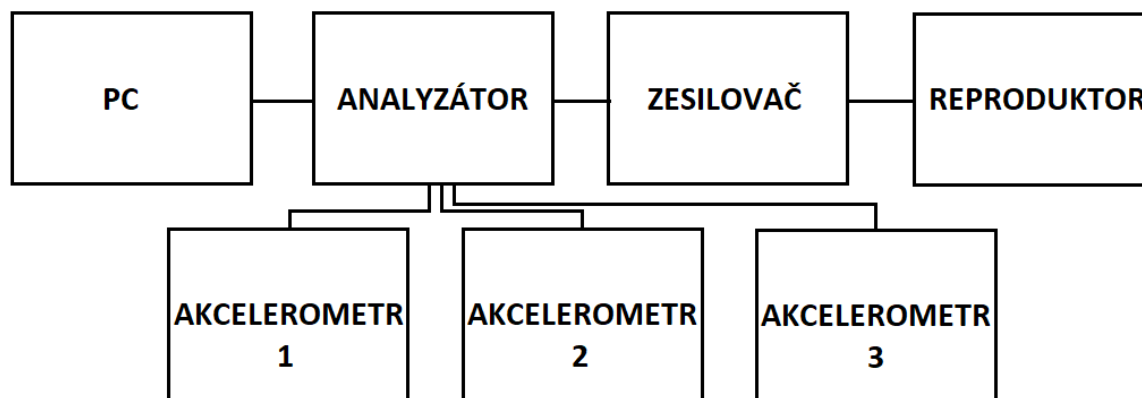
Obrázek 5-5: Rozmístění akcelerometrů na kmitající membráně.

K buzení byl použit reproduktor Yamaha S115V s frekvenčním rozsahem 55 až 16000 Hz. Reproduktor byl buzen přeladovaným sinusovým signálem od frekvence 50 Hz do 500 Hz s amplitudou 1 V. K omezení nežádoucích vlivů okolí, probíhalo měření v bezodrazové místnosti. Měřicí konstrukce byla pružně zavěšena nad pochozí síť komory, aby se zabránilo rušivým vibracím z budovy a od budícího reproduktoru. Reproduktor byl umístěn v ose membrány a také podložen materiálem tlumícím vibrace. Měřicí konstrukce byla umístěna ve vzdálenosti 1,6 m od reproduktoru. Tlumicím prvkem uvnitř konstrukce byla zvolena akustická melaminová pěna Basotect o rozměrech 584x584x40. Byla vložena na zadní stěnu u měření velké hloubky, anebo na střední příčce při měření malé hloubky vzduchového polštáře za kmitající membránou.



Obrázek 5-6: Rozmístění měřicí techniky v bezodrazové místnosti.

V programu Pulse LabShop byly analýzou FFT vyhodnoceny snímané vibrace, a následně integrací převedeny z akcelerometru měřeného zrychlení na rychlost kmitání. Program vykresloval a ukládal hodnoty rychlosti kmitání získané z každého akcelerometru. U měření amplitudy byla zapnuta funkce „max hold“, díky které byly zaznamenány maximální naměřené hodnoty. Pomocí přeladování budícího signálu byla získána frekvenční charakteristika kmitání membrány. Blokové schéma zapojení měření je zobrazeno na obrázku 5-7.



Obrázek 5-7: Blokové schéma zapojení měření v bezodrazové místnosti

5.3 Měření vzorky kmitajících membrán

Pro teoretický odhad frekvenčního průběhu bylo zapotřebí vypočítat plošnou hmotnost membrány z rovnice (4.1).

$$M_s = \frac{m}{S} \quad [kg/m^2]. \quad (4.1)$$

m – Hmotnost membrány v kg.

S – Plocha membrány v m^2 .

Níže uvedené vzorky jsou vybrány z běžně používaných a dostupných plošných materiálů a jejich rozdílná plošná hmotnost umožní různé naladění rezonanční frekvence membrány. Pro výpočet teoretické rezonanční frekvence byl použit vzorec (2.3). Níže uvedené rezonanční frekvence jsou pro vzduchovou mezeru 112 mm a 55 mm za membránou. Při montáži membrány byl vždy kladen důraz na správné mechanické provedení, které zajistilo vzduchotěsnost dutiny za membránou.

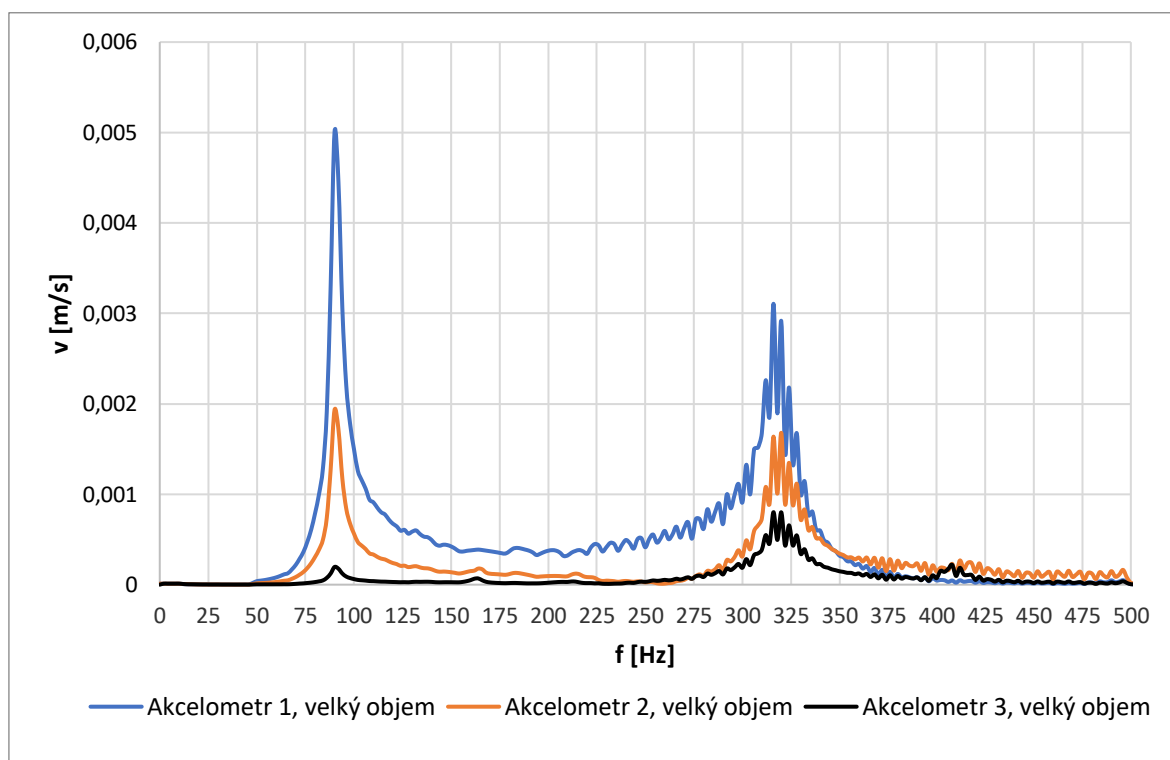
Tabulka 5-1: Přehled měřených vzorků kmitajících membrán a jejich teoretická rezonanční frekvence.

Materiál	Tloušťka [mm]	Plošná hmotnost [kg/m ²]	Rezonanční frekvence, (d=112 mm) [Hz]	Rezonanční frekvence, (d=55 mm) [Hz]
MDF deska	10	6,6	69	99
Sololit	3	3,3	98	140
Plexisklo	2	2,5	113	161
Pertinax	1,5	2,2	120	172
Ocelový pozinkovaný plech	1	6,2	72	102

6 Měření dílčích vzorků kmitajících membrán

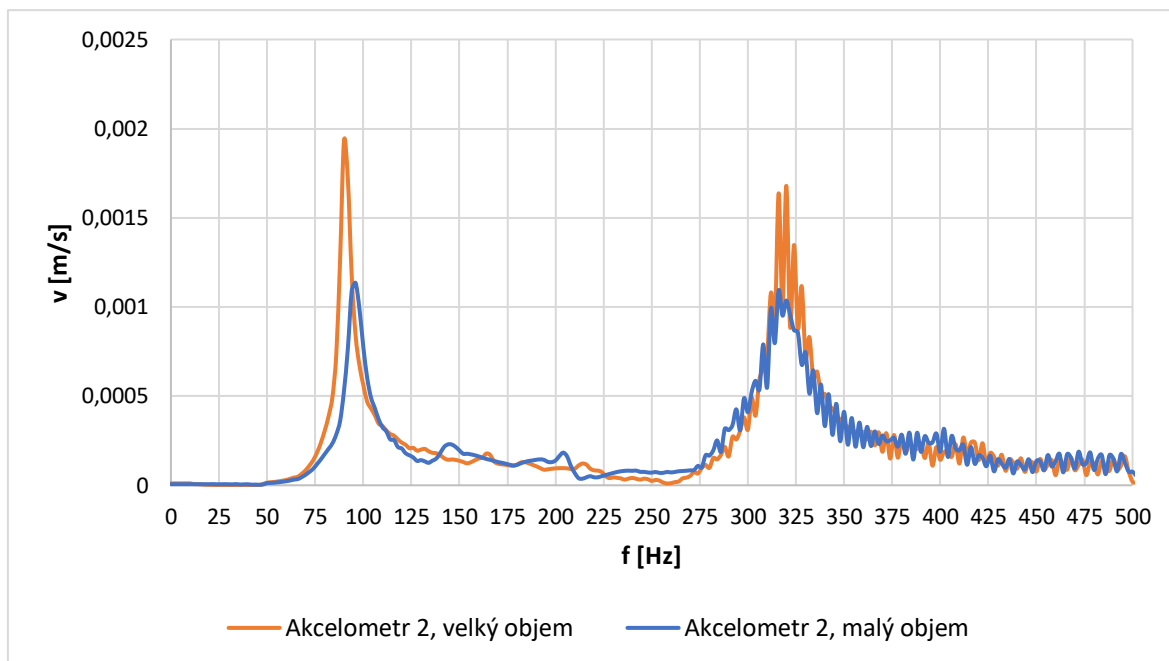
6.1 MDF

První měření proběhlo na 10mm MDF desce. U této desky se projevuje pouze kmitání na základní frekvenci a pak v pásmu odpovídajícím nejspíše rozměru desky. Zvlnění v grafech od 200 Hz výš není způsobeno mechanickým kmitáním, ale nastavením použité analýzy a budícího signálu.



Obrázek 6-1: Závislost kmitání MDF desky na frekvenci, velký objem.

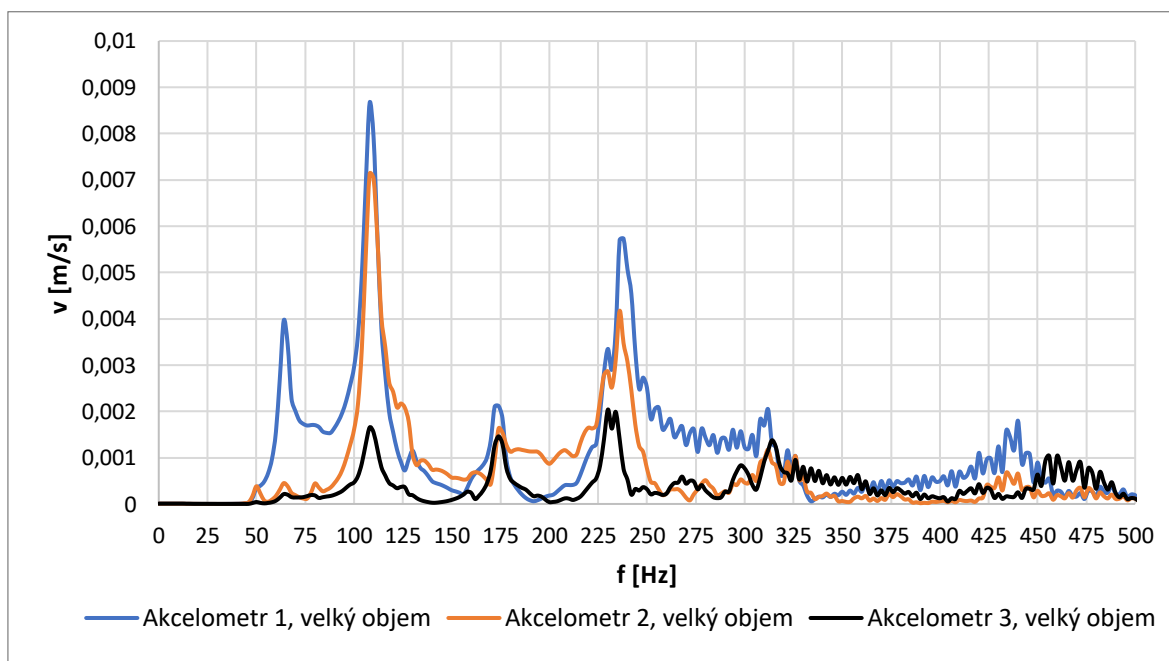
Rozdíl ve změně objemu vzduchového polštáře se nejvýrazněji projevil na akcelerometru 2, kde se posunula frekvence základního kmitu z 88 na 96 Hz. Amplituda rychlosti na frekvenci základního kmitu se zmenšila přibližně o polovinu u použití s malým objemem. Závislosti kmitání MDF desky u malého objemu na zbylých akcelerometrech velmi podobně kopírují rychlosti kmitání u velkého objemu.



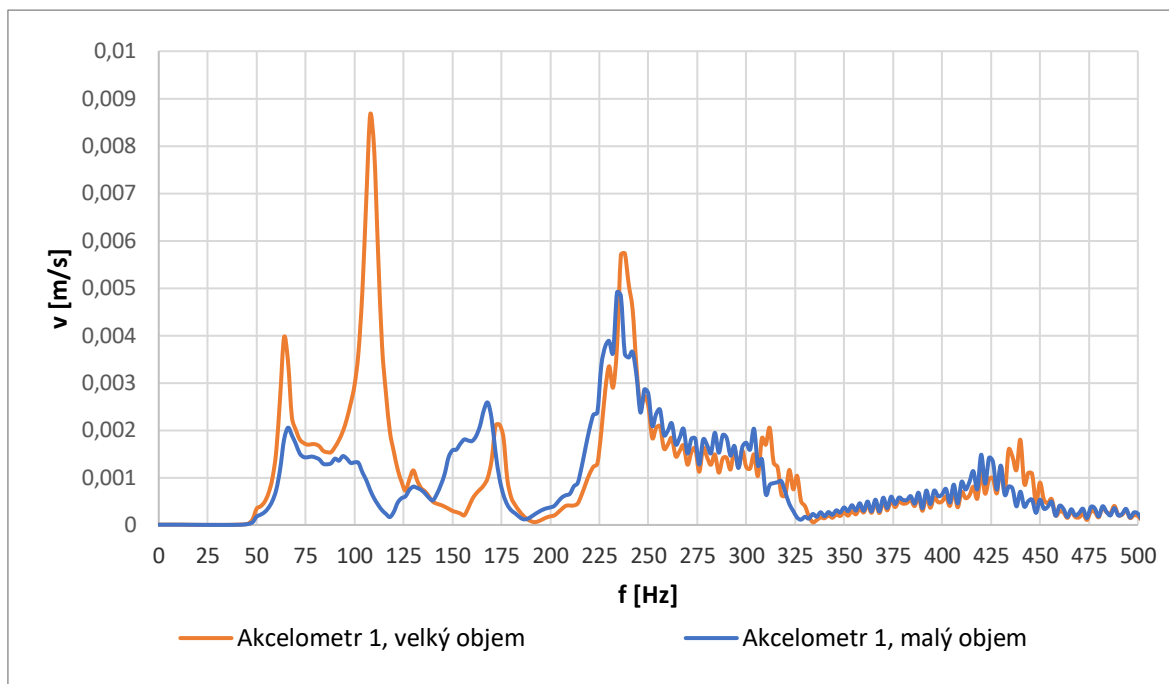
Obrázek 6-2: Porovnání závislosti kmitání MDF desky z akcelometru 2, velký a malý objem

6.2 Sololit

Sololit vykazuje velmi úzkopásmové rezonance při frekvencích 64, 172, 236 a 310 Hz. Základního kmit je při frekvenci 106 Hz. To ale neplatí při použití menšího objemu vzduchového polštáře, kde rezonance v této frekvenci zcela vymizí a nejvýraznější je rezonance na frekvenci 238 Hz.



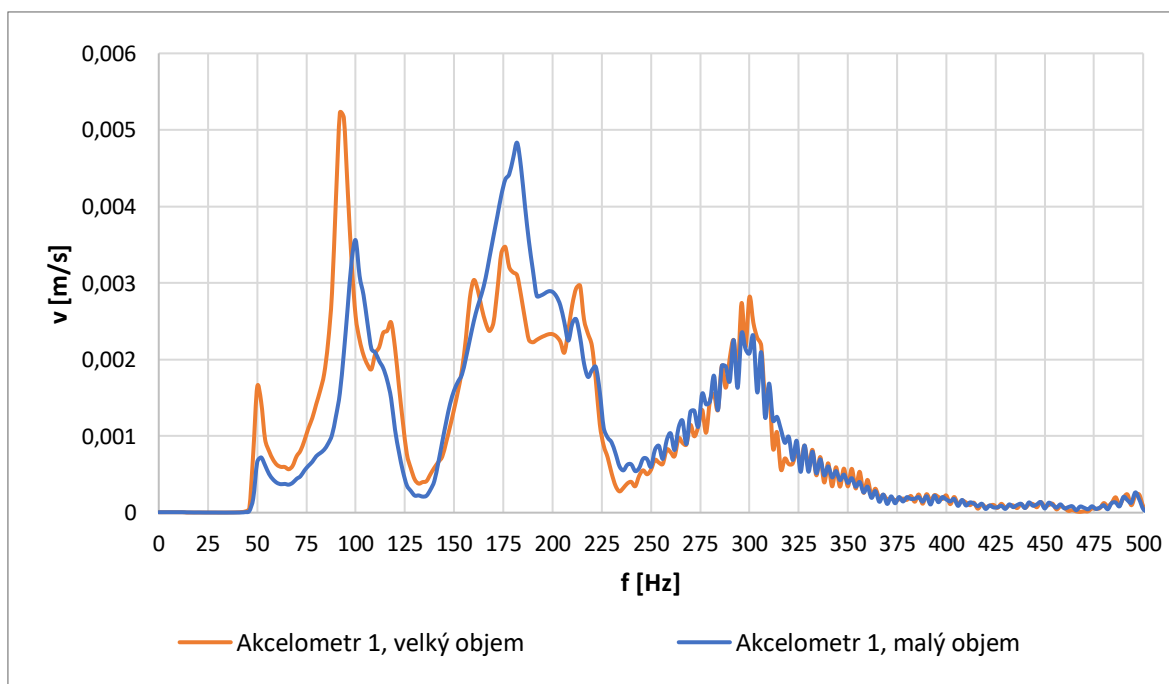
Obrázek 6-3: Závislost kmitání sololitu na frekvenci, velký objem.



Obrázek 6-4: Závislost kmitání sololitu na frekvenci – porovnání průběhů na akcelometru 1, velký a malý objem.

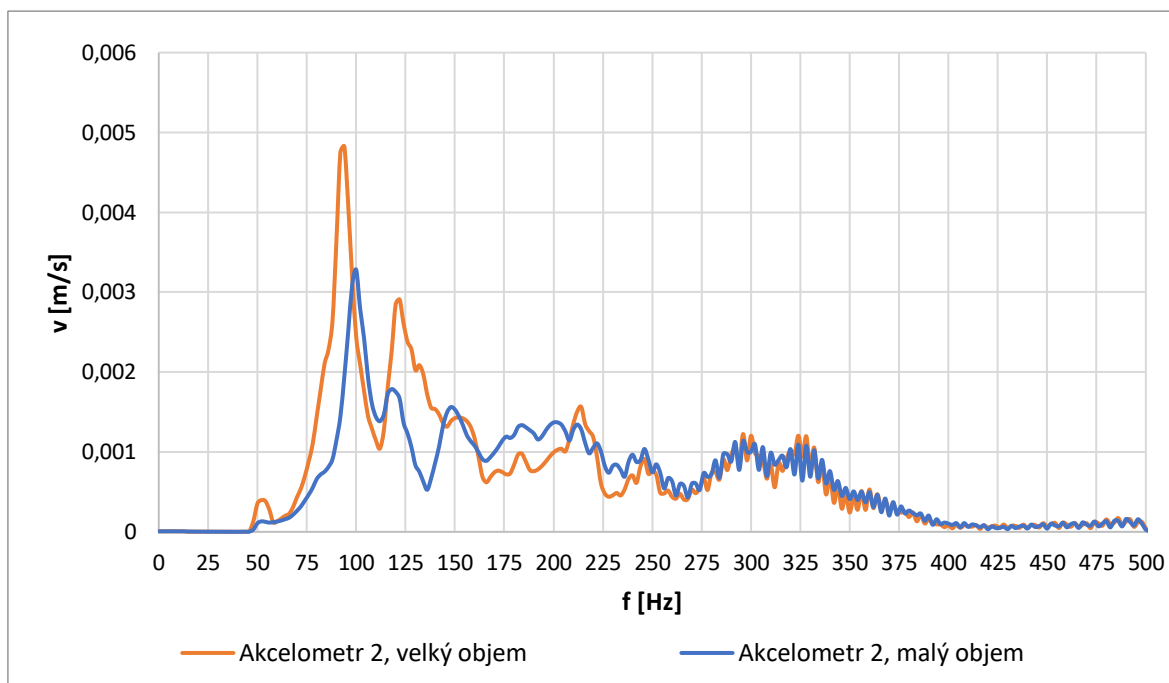
6.3 Plexisklo

Rezonanční frekvence malého objemu s plexisklem dle vzorce (2.3) je 161 Hz, tomu se blíží i naměřená hodnota 182 Hz. Dále se objevují slabší rezonance na frekvenci 100 Hz a 298 Hz.



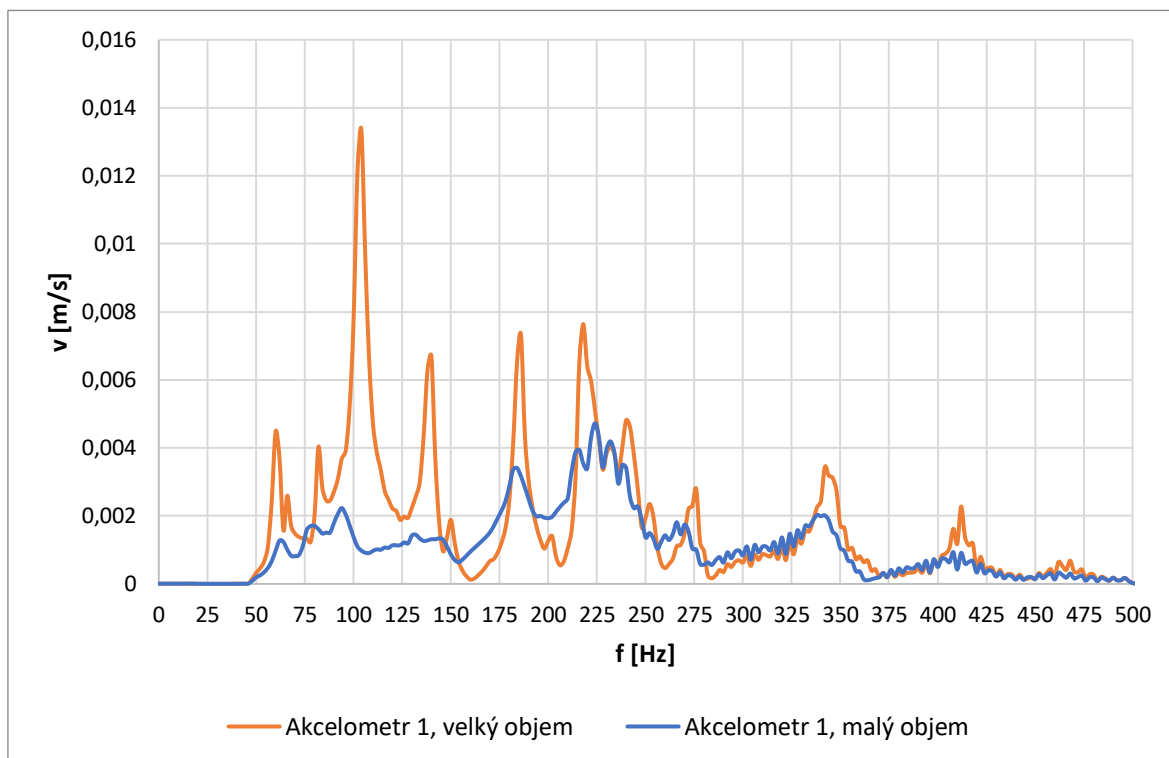
Obrázek 6-5: Závislost kmitání plexiskla na frekvenci – porovnání průběhů na akcelometru 1, velký a malý objem.

Při použití plexiskla v konstrukci s velkým objemem vzduchové mezery, dříve viditelná výrazná rezonance na 182 Hz mizí a objevuje se rezonance s rychlostí kmitání 0,005 m/s při frekvenci 94 Hz. Vypočítaná hodnota rezonance měla být 113 Hz.



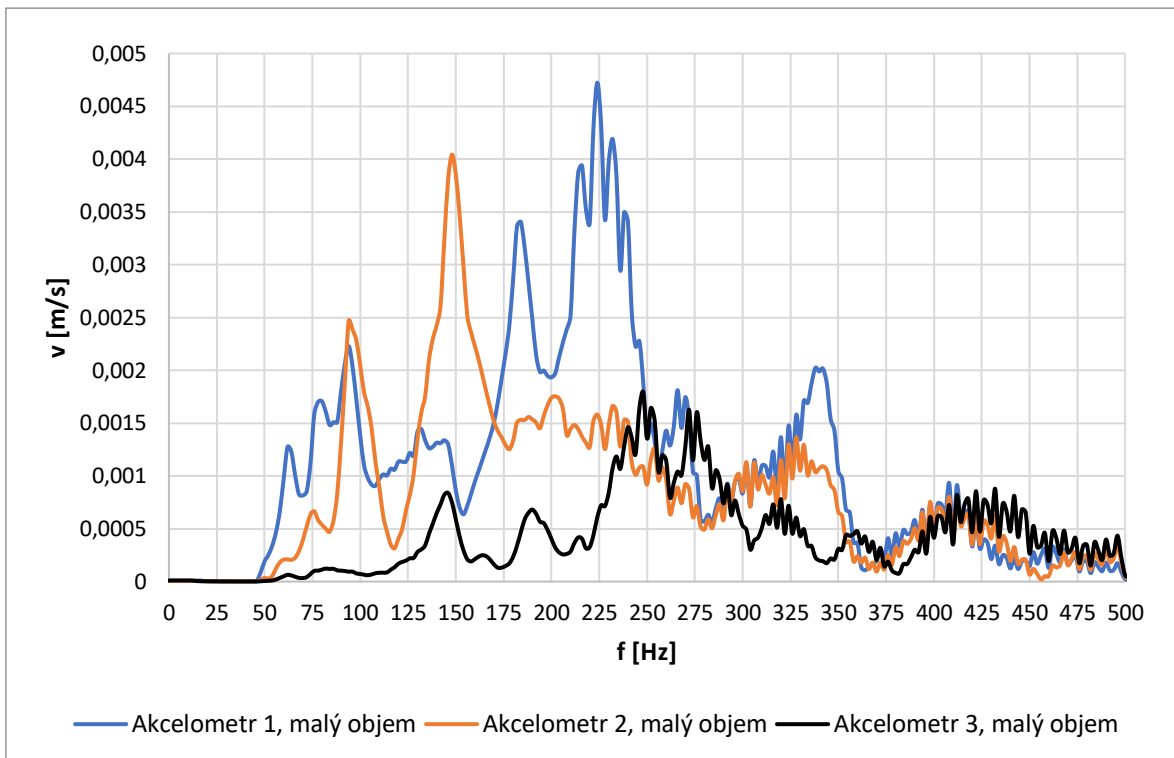
Obrázek 6-6: Závislost kmitání plexiskla na frekvenci – porovnání průběhů na akcelometru 2, velký a malý objem.

6.4 Pertinax

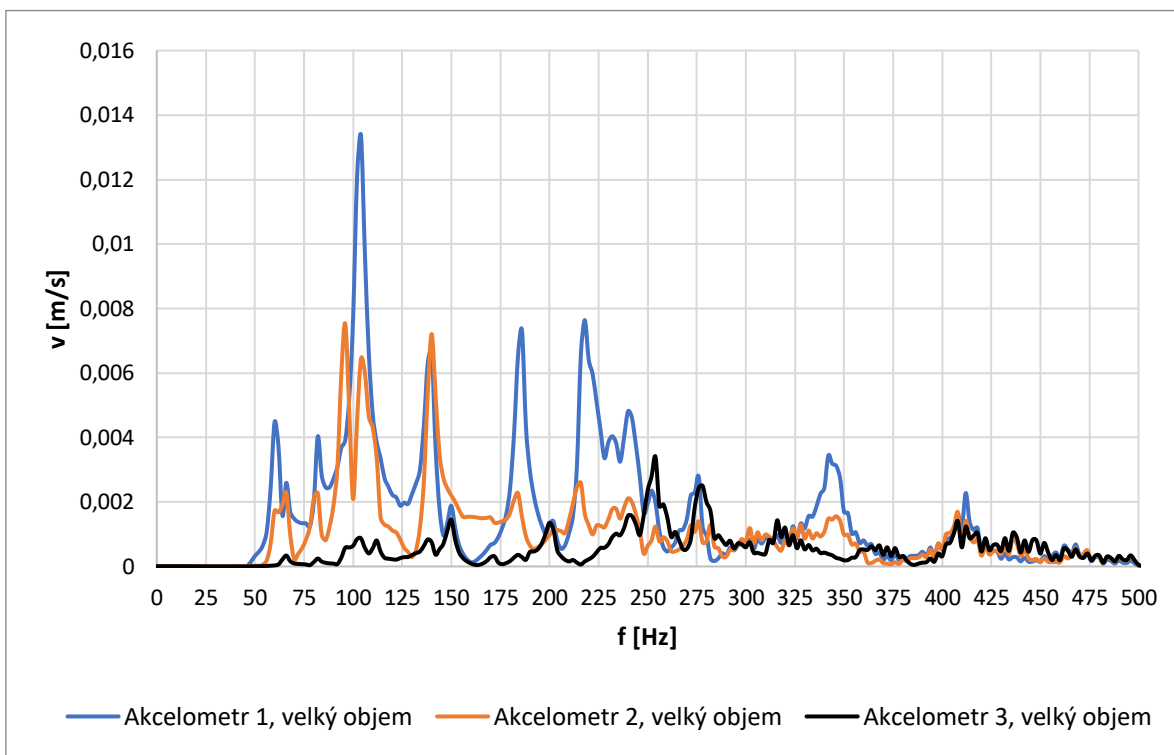


Obrázek 6-7: Závislost kmitání laminátu na frekvenci z akcelometru 1, velký a malý objem.

Pertinax je izolační a konstrukční materiál používaný v elektrotechnice. Jedná se o materiál, kde je papír použit jako výztuž a fenolformaldehydová pryskyřice jako pojivo [23]. U pertinaxu se projevila výrazná rezonance až u velkého objemu, kde při frekvenci 104 Hz byla rychlost kmitání 0,013 m/s. Pertinax v konstrukci s malým objemem vzduchového polštáře by se dal použít k tlumení širšího frekvenčního pásma s výrazným tlumením ve frekvencích 148 – 240 Hz.



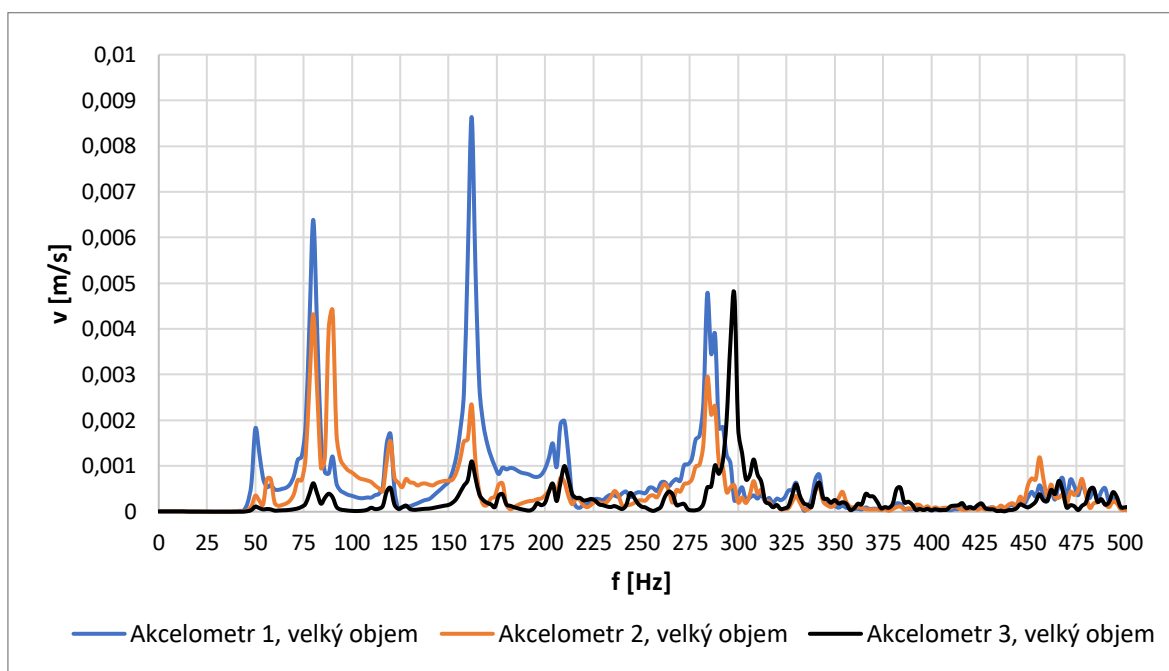
Obrázek 6-8: Závislost kmitání pertinaxu na frekvenci, malý objem.



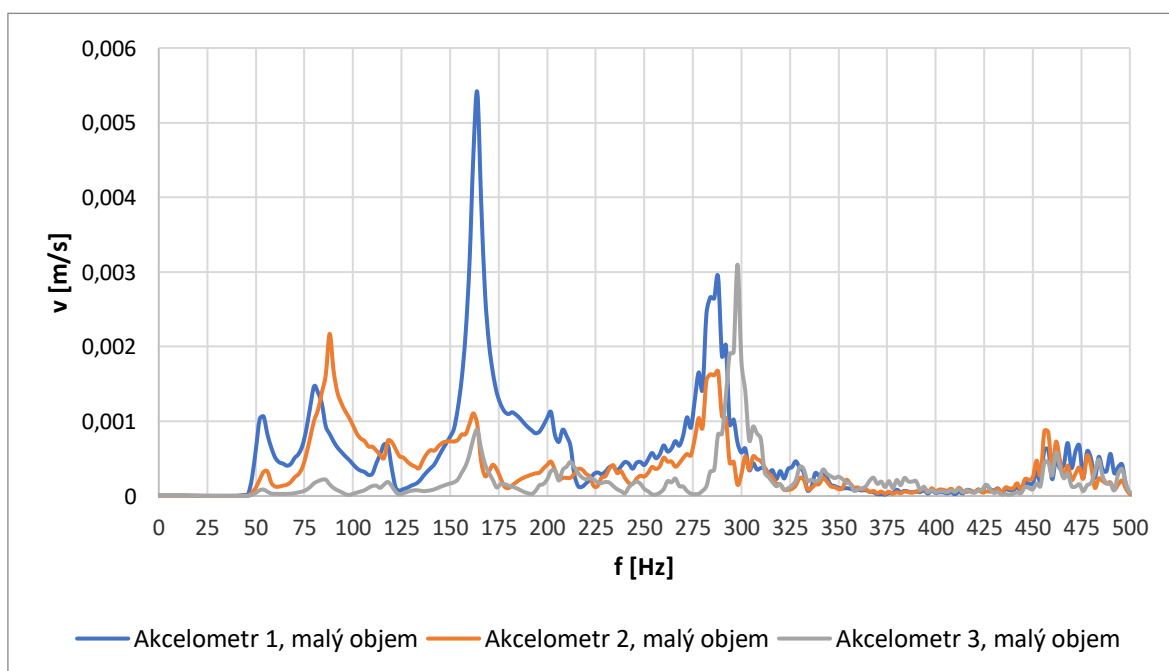
Obrázek 6-9: Závislost kmitání pertinaxu na frekvenci, velký objem.

6.5 Ocelový pozinkovaný plech

Rezonance železného plechu u malého objemu má přibližně poloviční amplitudy a jsou frekvenčně posunuty o 2 – 4 Hz oproti závislosti kmitání u velkého objemu. Plech by se dal aplikovat v případech, kde chceme výrazně utlumit pouze konkrétní úzkou frekvenční oblast.



Obrázek 6-10: Závislost kmitání ocelového pozinkovaného plechu na frekvenci, velký objem.



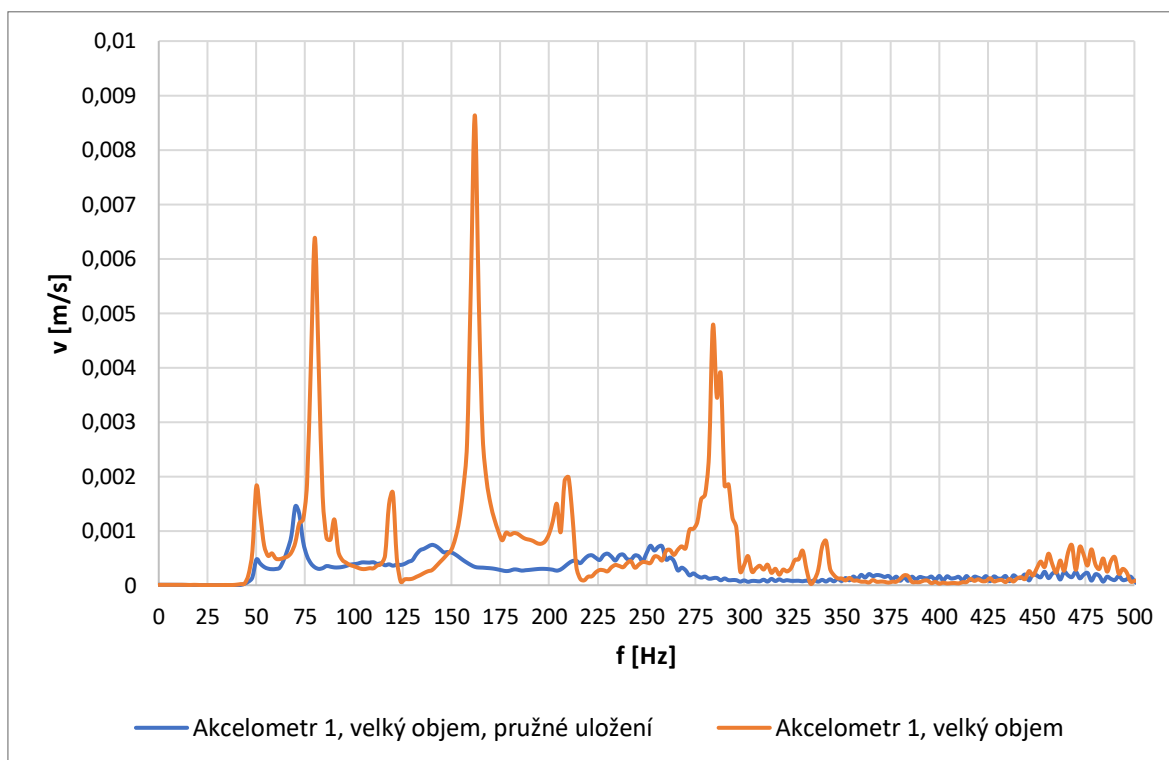
Obrázek 6-11: Závislost kmitání ocelového pozinkovaného plechu na frekvenci, malý objem.

7 Porovnání uložení membrány v měřicí konstrukci

Výše provedená měření ukázala, že pevné vetknutí membrány do rámu má v několika případech za následek velmi ostré a výrazné rezonance (s vysokým činitelem jakosti Q). Dále byl proto zkoumán také vliv jiného obvodového uchycení membrány. Vzorky plechu, laminátu a sololitu byly do rámu uchyceny pružně do okenního těsnění.

7.1 Ocelový pozinkovaný plech

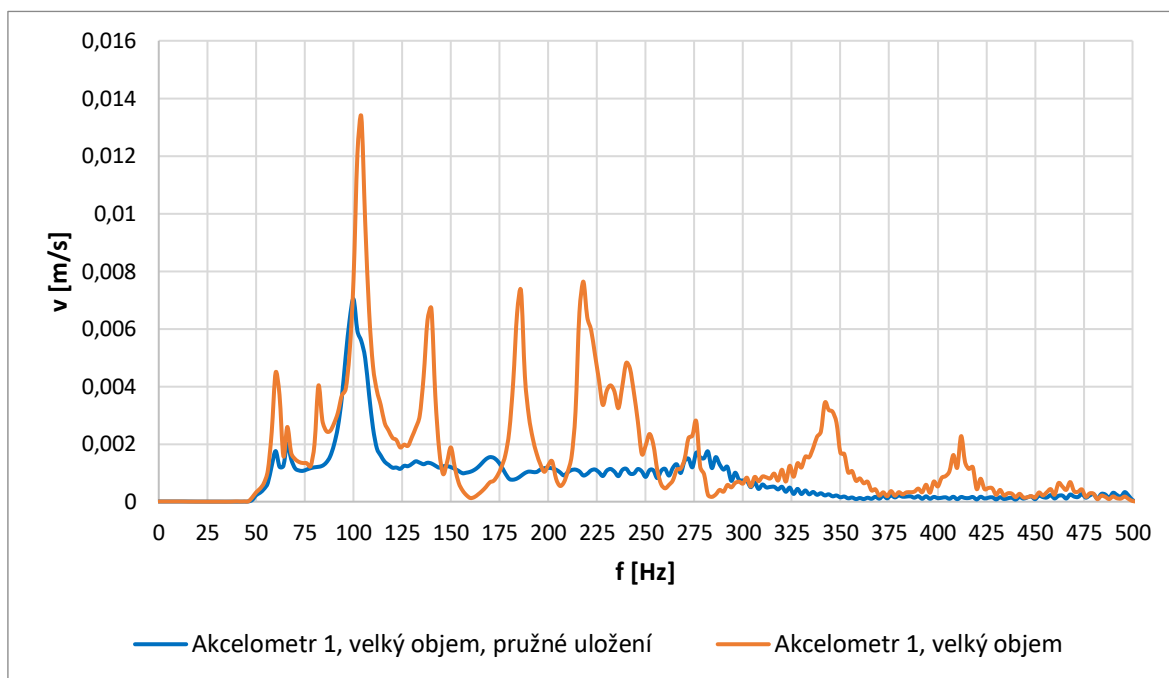
U pevného uložení se vyskytují 3 výrazné kmity na frekvencích 80, 160, 284 Hz. Díky pružnému uložení nedošlo k vybuzení vyšších rezonancí jako u pevného vetknutí do rámu. Výraznější rezonance je pouze na frekvenci 70 Hz, ale celková amplituda je výrazně nižší.



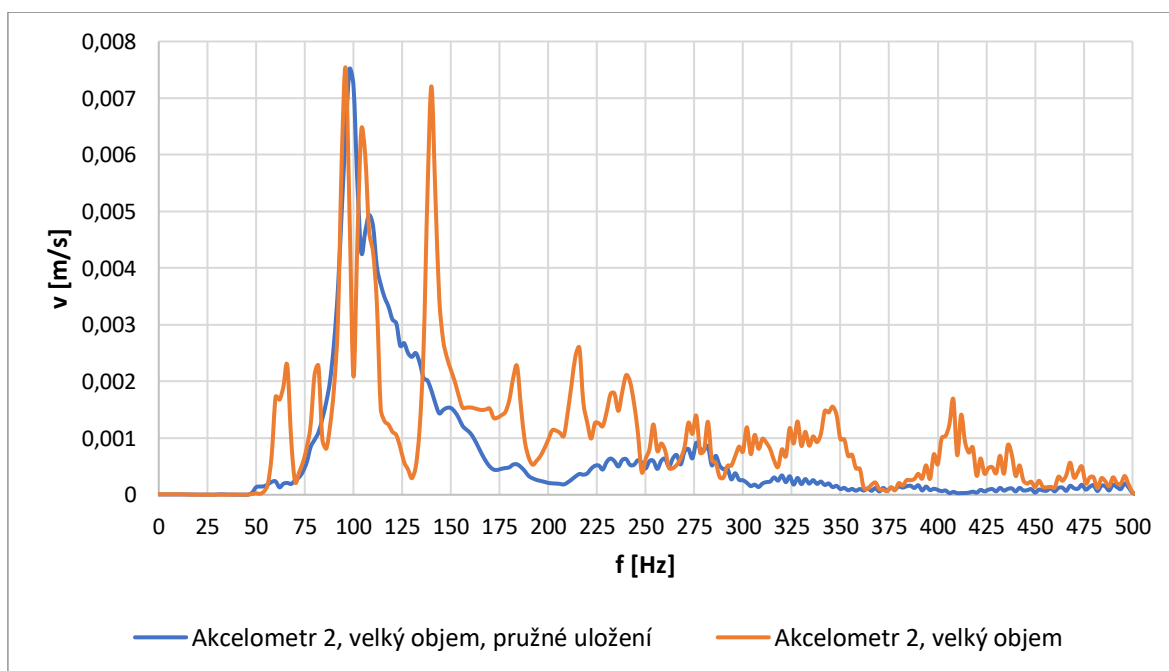
Obrázek 7-1: Závislost kmitání ocelového pozinkovaného plechu na frekvenci sledovaná u akcelerometru 1 u pružně upevněné a pevně vetknuté membrány ke konstrukci, velký objem.

7.2 Pertinax

Na 98 Hz pertinax v pružném uložení pístopě kmitá a pak rychlost tohoto kmitání postupně klesá. Kmitání na vyšších frekvencích viditelné u varianty s pevným uchycením je vlivem pružného uložení zcela ztlumeno.



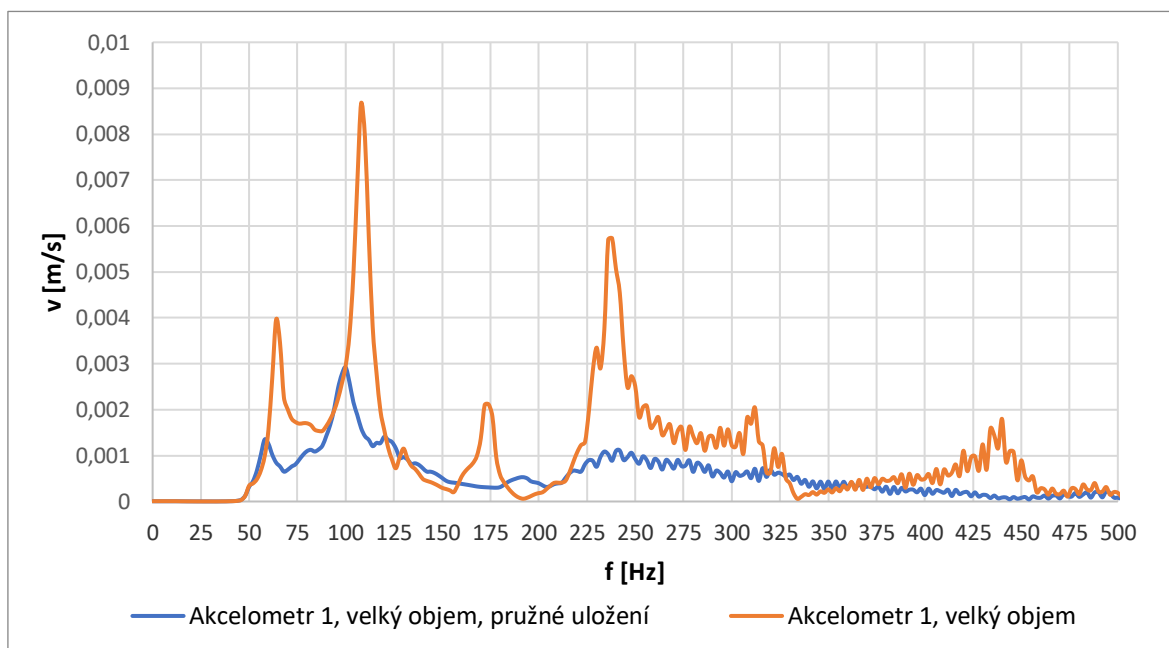
Obrázek 7-2: Závislost kmitání pertinaxu na frekvenci sledovaná u akcelometru 1 u pružně upevněné a pevně vetknuté membrány ke konstrukci, velký objem.



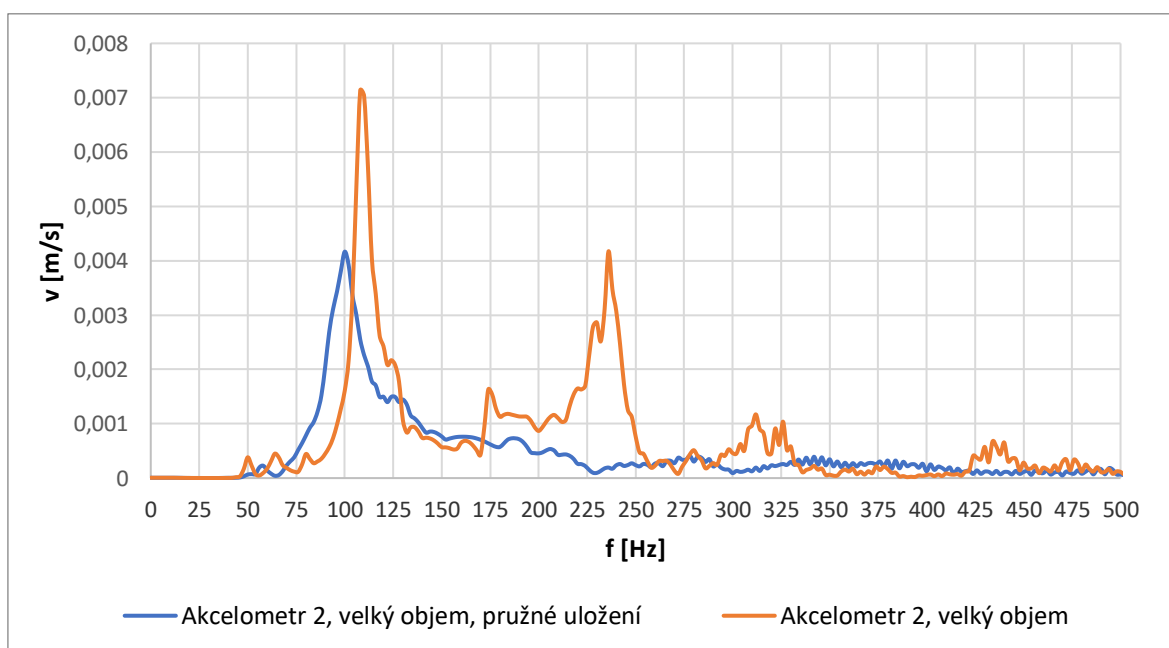
Obrázek 7-3: Závislost kmitání pertinaxu na frekvenci sledovaná u akcelometru 2 u pružně upevněné a pevně vetknuté membrány ke konstrukci, velký objem.

7.3 Sololit

Sololit podobně jako pertinax pístově kmitá ve frekvenci 100 Hz a pak rychlost kmitání klesá s narůstající frekvencí. U pružného uložení se amplituda rychlosti kmitání snížila o polovinu oproti konstrukci s pevně vetknutou sololitovou membránou.



Obrázek 7-4: Závislost kmitání sololitu na frekvenci u akcelometru 1 pro pružně uloženou a pro pevně vetknutou membránu v konstrukci, velký objem.



Obrázek 7-5: Závislost kmitání sololitu na frekvenci u akcelometrů 2 pro pružně uloženou a pevně vetknutou membránu v konstrukci, velký objem.

7.4 Zjištěné výsledky u pružného uložení membrány

Frekvence rezonancí zjištěné při pružném uložení membrány odpovídají vypočítaným hodnotám dle vzorce (2.3).

Tabulka 7-1: Porovnání rezonanční frekvence teoretické a naměřené.

Materiál	Rezonanční frekvence teoretická	Rezonanční frekvence naměřená
Ocelový pozinkovaný plech	72	70
Laminát	120	100
Sololit	98	100

8 Měření použitých vzorků v rozměrově menší konstrukci

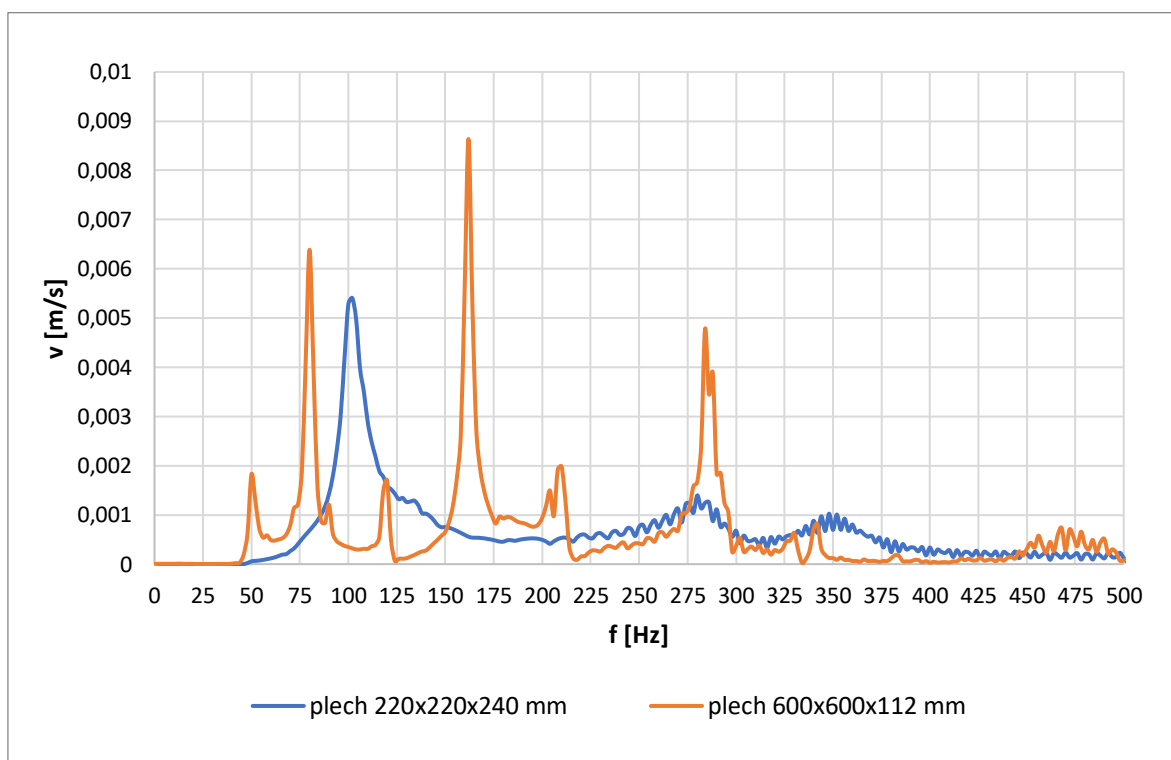
Následující měření proběhlo v měřící ozvučnici, která je původně určena k měření parametrů reproduktorů. Pro naše měření byla využita kvůli variabilitě nastavení různých objemů. Čelní rozměr je 285x250 mm a objem lze nastavit umístěním přepážky. Pro naše měření byla využita přepážka ve vzdálenosti 100 a 240 mm od měřené membrány. Do této konstrukce se vkládaly vzorky 275x245 mm s volnou kmitající plochou o rozměrech 220x220 mm, které byly pevně vetknuty. Akcelerometr se vzhledem k malým rozměrům umístil pouze doprostřed membrány. Foto měřící konstrukce je na obrázku 8-1, využita byla pravá strana měřící ozvučnice



Obrázek 8-1: Foto menšího modelu měřící ozvučnice.

8.1 Ocelový pozinkovaný plech

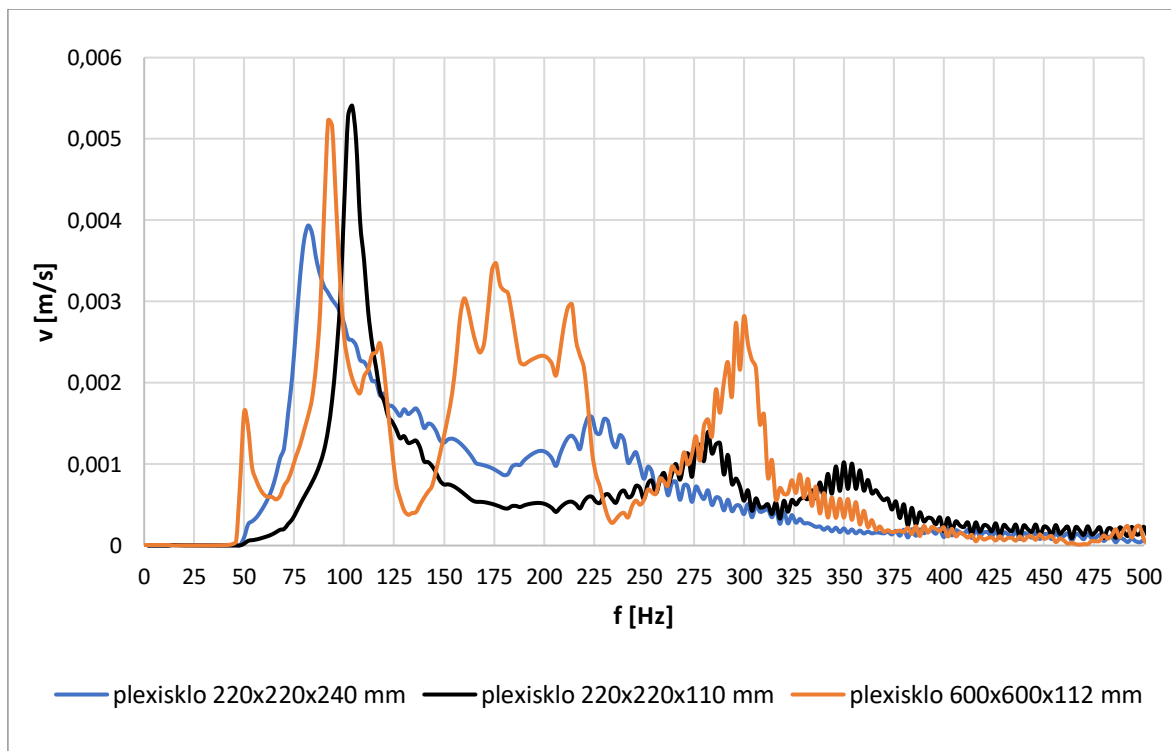
Měření železného plechu vykazuje stejný průběh naměřené rychlosti kmitání při hloubce 100 i 240 mm vzduchového polštáře. V grafu 8-2 je vidět rozdíl v závislostech kmitání na frekvenci ve velké a malé konstrukci. Základní kmit plechu měřeného v malé konstrukci nastává při 102 Hz a s rostoucí frekvencí žádný výrazný kmit nenastane.



Obrázek 8-2: Závislost kmitání ocelového pozinkovaného plechu na frekvenci v malé a velké měřicí konstrukci.

8.2 Plexisklo

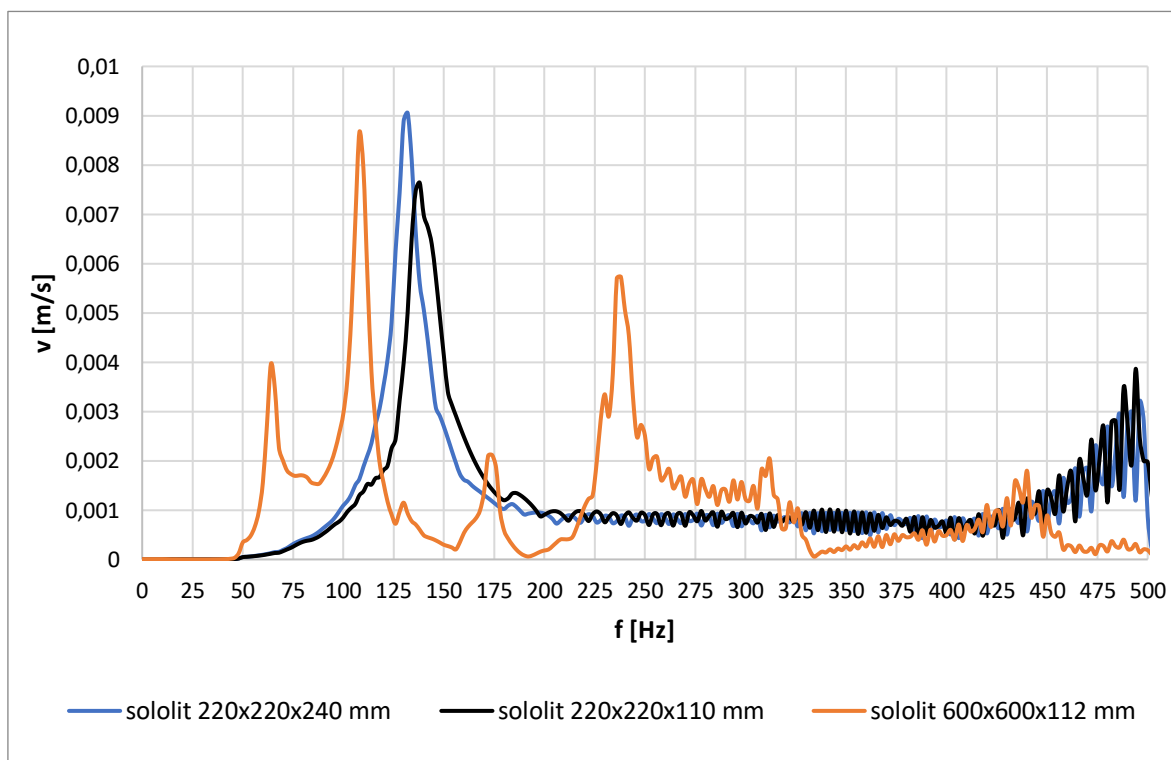
U velkého objemu plexisklo rezonuje při frekvenci 82 Hz. U malého objemu se rezonance přesouvá na frekvenci 102 Hz a zároveň rezonance má vyšší rychlost kmitu než u velkého objemu.



Obrázek 8-3: Závislost kmitání plexiskla na frekvenci v malé a velké měřicí konstrukci.

8.3 Sololit

Základní kmit sololitu u velkého objemu nastává při 132 Hz. U malého objemu vzduchové mezery je základní kmit slabší a frekvenčně posunutý na 136 Hz. S rostoucí frekvencí rychlost kmitání slábne.



Obrázek 8-4: Závislost kmitání sololitu na frekvenci v malé a velké měřicí konstrukci.

9 Závěr

Zadáním práce byla konstrukce tlumicích akustických prvků na principu kmitajících membrán. V prvních kapitolách jsou popsány základní pojmy prostorové akustiky a akustické pohltivé prvky založené na rezonančním principu. Následující kapitoly popisují metody měření akustické pohltivosti materiálů a metody měření kmitání membrány.

Na základě získaných teoretických znalostí bylo možné navrhnout měřicí metodu pro ověření vlastních kmitů vybraných vzorků. Metoda byla realizována pomocí tří snímačů vibrací, analyzátoru a budícího reproduktoru. Navržená metoda dosahuje dostatečné přesnosti měření a jednoduchosti při výměně měřených vzorků membrán z různých materiálů. Měřicí konstrukce byla navržena tak, aby bylo možné měnit výšku vzduchového polštáře s možností vložení porézního tlumicího prvku. Při měření byly použity tyto materiály: MDF deska, sololit, plexisklo, pertinax a ocelový pozinkovaný plech. K praktickému sestavení kmitajících membrán a jejich měření byly využity prostory ZČU.

První měření proběhlo se vzorky o velikosti 600x600 mm. Každý materiál byl pevně vetknut do měřicí konstrukce a proměřen s velkým a malým objemem vzduchové mezery. Jako porézní tlumicí prvek byla použita akustická melaminová pěna. Dle výsledků měření bylo ověřeno, že se změnou výšky vzduchové mezery mění frekvence rezonance. Čím je nižší výška mezery, tím vyšší je rezonanční frekvence. Došlo se k závěru, že pevně vetknutá membrána kmitá s výraznými výchylkami a jednotlivé rezonance jsou ostřejší (vysoký činitel jakosti Q). Další dvě série provedených měření ukazují vliv konstrukčního provedení membrány – byl zkoumán také vliv uložení membrány a velikost kmitající plochy membrány na rezonanční frekvenci.

Druhé měření proběhlo s po obvodu pružně uloženými vzorky ve stejné měřicí konstrukci. Výsledky tohoto měření ukazují, že mechanické rezonance volně uložených membrán jsou výrazně menší. Základní rezonance nastává při téměř shodné frekvenci a dříve viditelné rezonance na vyšších frekvencích se oproti měření s membránou pevně uchycenou po obvodu výrazně ztlumí. Došlo se k závěru, že volně uchycená membrána kmitá pouze na základní rezonanci s výrazně nižším činitelem jakosti Q .

Poslední měření proběhlo se vzorky o velikosti 220x220 mm. Na grafech uvedených v kapitole 8 je vidět porovnání se vzorky o rozměrech 600x600 mm, kde vždy došlo k posunutí základní rezonance a k utlumení kmitů na vyšších frekvencích.

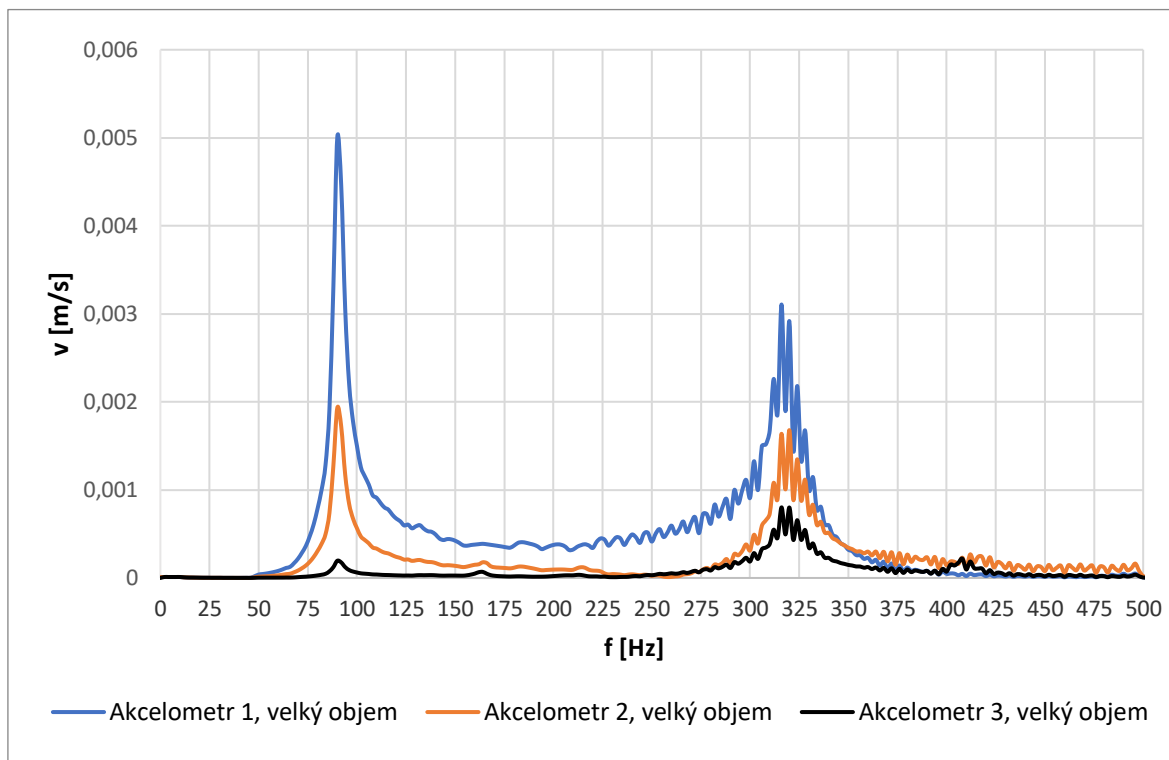
Výsledkem měření jsou frekvenční průběhy kmitání různých materiálů, jejich znalost může být základem pro návrh membrán kmitajících na požadované frekvenci, protože byl ověřen vliv hloubky vzduchové dutiny na rezonanční frekvenci systému. Pro některé zkoumané materiály je při rozměru 600x600 mm opravdu možné spočítat základní rezonanci dle vzorce (2.3) pokud se dodrží vzduchotěsnost dutiny.

Seznam literatury a informačních zdrojů

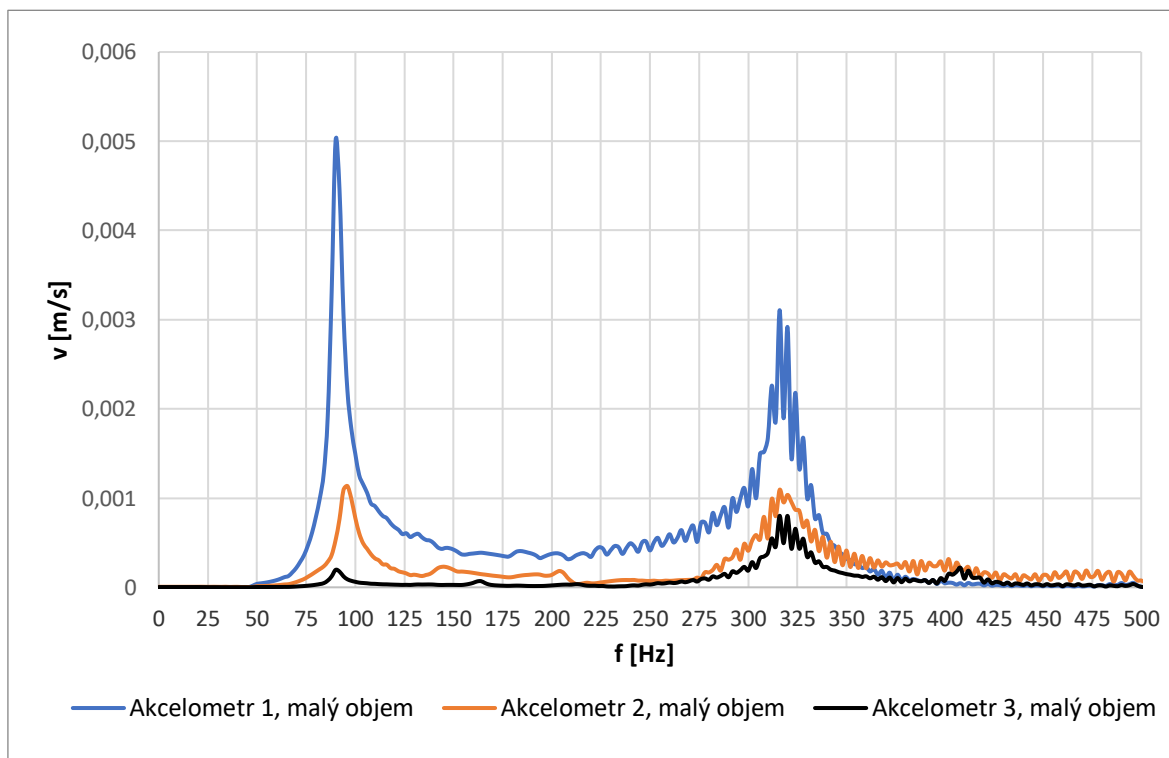
- [1] KOLMER, Felix a Jaroslav KYNCL. *Prostorová akustika*. Praha. 1982.
- [2] Akustika staveb. *TZB-info* [online]. [vid. 2021-03-06]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/akustika-staveb>
- [3] ČERNÁ, Valentýna. *Principy pohlcování a izolace zvuku vláknennými materiály* [online]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/3095694/>
- [4] ŠKVOR, Zdeněk. *Akustika a elektroakustika*. Praha: Academia, 2001. ISBN 978-80-200-0461-1.
- [5] SMETANA, Ctirad. *Ozvučování*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1987.
- [6] VAŠINA, Martin. *Studium materiálů z hlediska tlumení zvuku a vibrací* [online]. 2010. Dostupné z: <https://docplayer.cz/20428789-Vysoke-uceni-technicke-v-brne-fakulta-stavebni-ustav-fyziky.html>
- [7] KALINOVÁ, Klára. *Zvuková pohltivost vláknenných materiálů s ohledem na charakteristiky struktury* [online]. Technická Univerzita v Liberci, 2005. Thesis. b.n. Dostupné z: <https://dspace.tul.cz/handle/15240/38927>
- [8] NOVÝ, Richard. *Hluk a chvění*. Praha: Skriptum ČVUT, 1995.
- [9] SMETANA, Ctirad. *Hluk a vibrace (Měření a hodnocení)*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 2008. ISBN 80-901936-2-5.
- [10] SMETANA, Ctirad. *Praktická elektroakustika*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1981.
- [11] ŠANDA, Filip. *Ověření parametrů impedanční trubice* [online]. Plzeň, 2017. b.n. Dostupné z: https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/27817/1/BP__SANDA_FILIP_OVERENI_PARAMETRU_IMPEDANCNI_TRUBICE.pdf
- [12] ČSN ISO 10534-1 (730501). *Akustika - Určování činitele zvukové pohltivosti a akustické impedance v impedančních trubicích - Část 1: Metoda poměru stojaté vlny*. 1999
- [13] GASSO-TORTAJADA, Vicent, Alastair J. WARD, Hasib MANSUR, Torben BRØCHNER, Claus G. SØRENSEN a Ole GREEN. A Novel Acoustic Sensor Approach to Classify Seeds Based on Sound Absorption Spectra. *Sensors* [online]. 2010. Dostupné z: doi:10.3390/s101110027
- [14] PROCHÁZKA, Michael. *Zvukově pohltivé materiály používané v automobilech*. Liberec, 2012. Technická univerzita v Liberci.

- [15] Acoustic Testing Cabins. *Acoustics and Testing Solutions* [online]. 2. listopad 2018. Dostupné z: <https://novosim.com/acoustic-testing-cabins/>
- [16] BILOŠ, Jan a Alena BILOŠOVÁ. *Aplikovaný mechanik jako součást týmu konstruktérů a vývojářů: část Vibrační diagnostika*. 2012, Studijní materiály pro studijní obor Aplikovaná mechanika Fakulty strojní. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava. Fakulta strojní.
- [17] KREIDL, Marcel a Radislav ŠMÍD. *Technická diagnostika: senzory, metody, analýza signálu*. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 978-80-7300-158-2.
- [18] PIERSOL, Allan G., Thomas L. PAEZ a Cyril M. HARRIS, ed. *Harris' shock and vibration handbook*. 6th ed. New York: McGraw-Hill, 2010. ISBN 978-0-07-150819-3.
- [19] ČSN EN ISO 354 (730535). *Akustika - Měření zvukové pohltivosti v dozvukové místnosti*
- [20] *BP_Lucak_Martin.pdf* [online]. [vid. 2021-04-16]. Dostupné z: https://dSPACE5.zcu.cz/bitstream/11025/41848/1/BP_Lucak_Martin.pdf
- [21] ZHAO, Gang, Xiaoxiao DU, Wei WANG, Bo LIU a Hongbing FANG. Application of isogeometric method to free vibration of Reissner–Mindlin plates with non-conforming multi-patch. *Computer-Aided Design* [online]. 2017, **82**, Isogeometric Design and Analysis, 127–139. ISSN 0010-4485. Dostupné z: [doi:10.1016/j.cad.2016.04.006](https://doi.org/10.1016/j.cad.2016.04.006)
- [22] BRÜEL & KJAER. BRÜEL & KJAER. Piezoelectric Accelerometer Types 4507 and 4508. *Brüel & Kjaer Sound & Vibration Measurement A/S*. 2020. [online]. Dostupné z: <https://www.bksv.com/-/media/literature/Product-Data/bp1841.ashx>
- [23] *Pertinax (materiál)* [online]. 2018. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Pertinax_\(materi%C3%A1l\)&oldid=16002800](https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Pertinax_(materi%C3%A1l)&oldid=16002800)

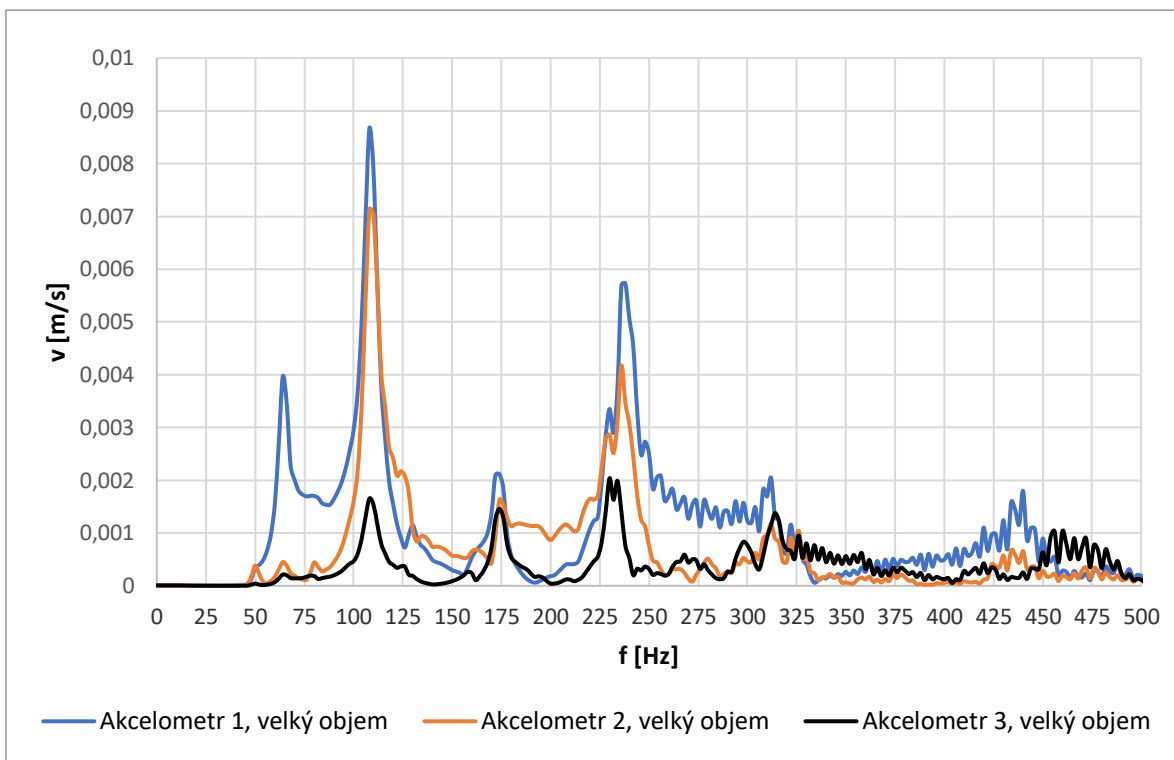
Přílohy



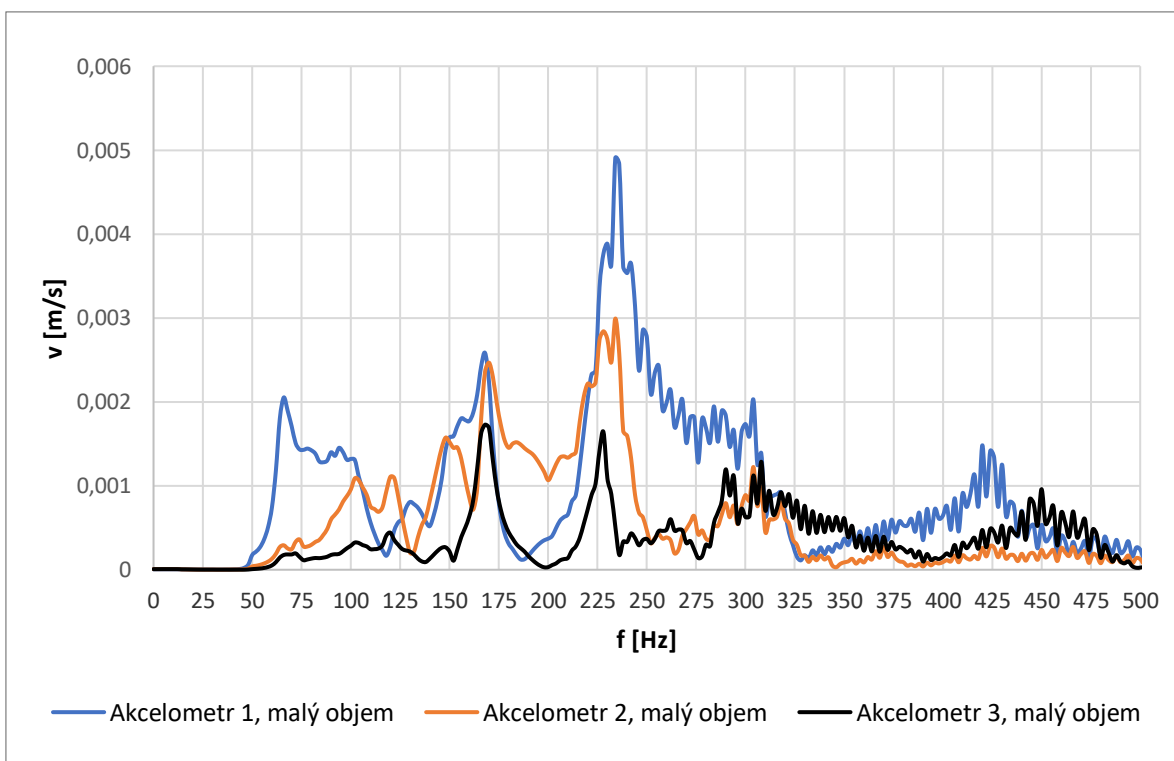
Obrázek 0-1: Závislost kmitání MDF desky na frekvenci, velký objem.



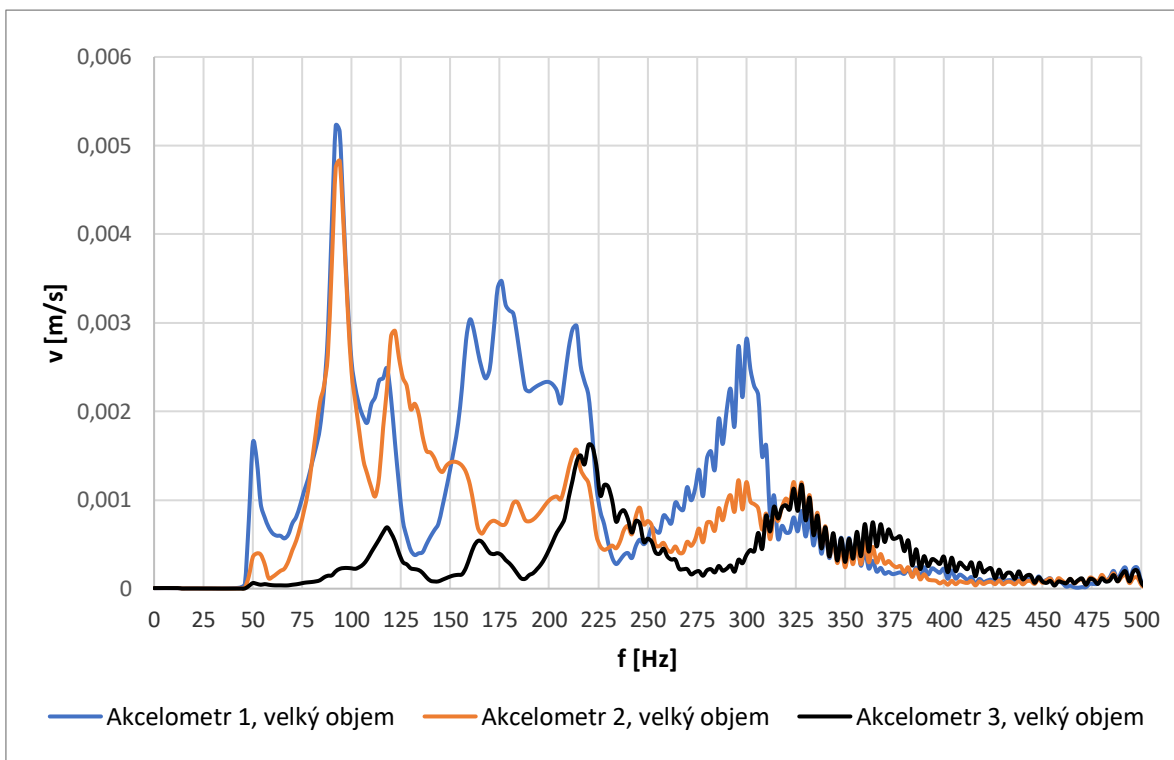
Obrázek 0-2: Závislost kmitání MDF desky na frekvenci, malý objem.



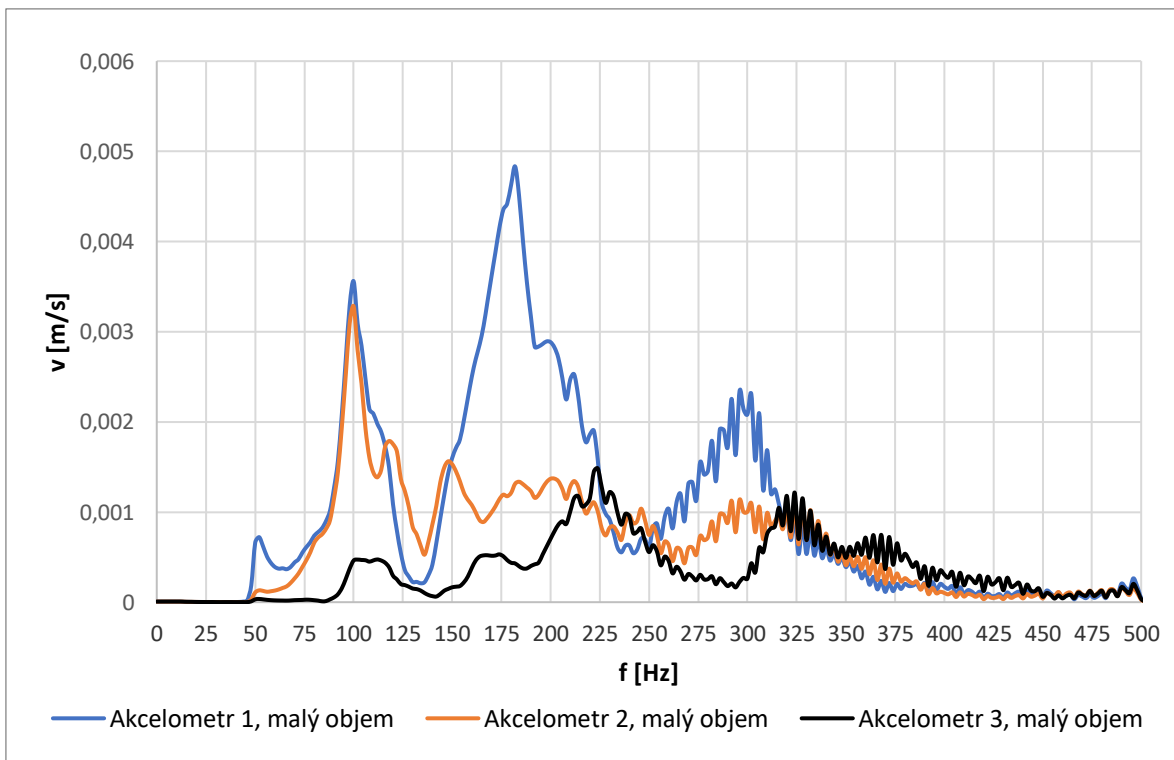
Obrázek 0-3: Závislost kmitání sololitu na frekvenci, velký objem.



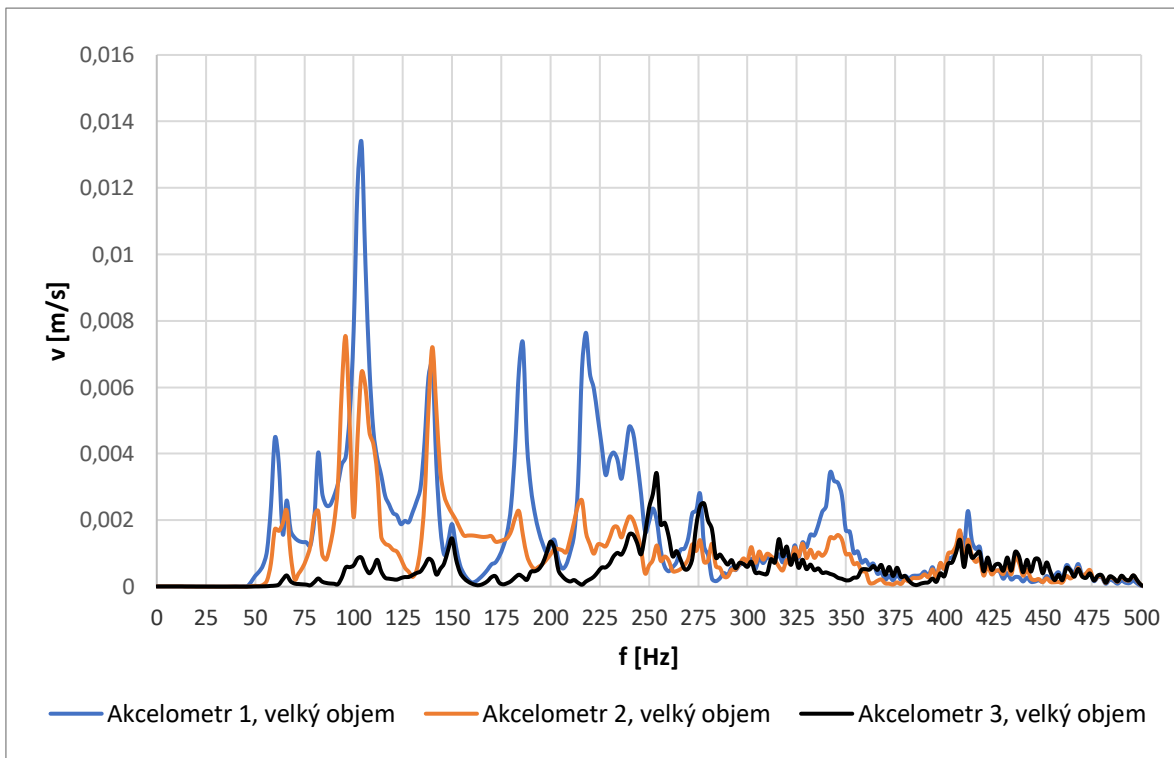
Obrázek 0-4: Závislost kmitání sololitu na frekvenci, malý objem.



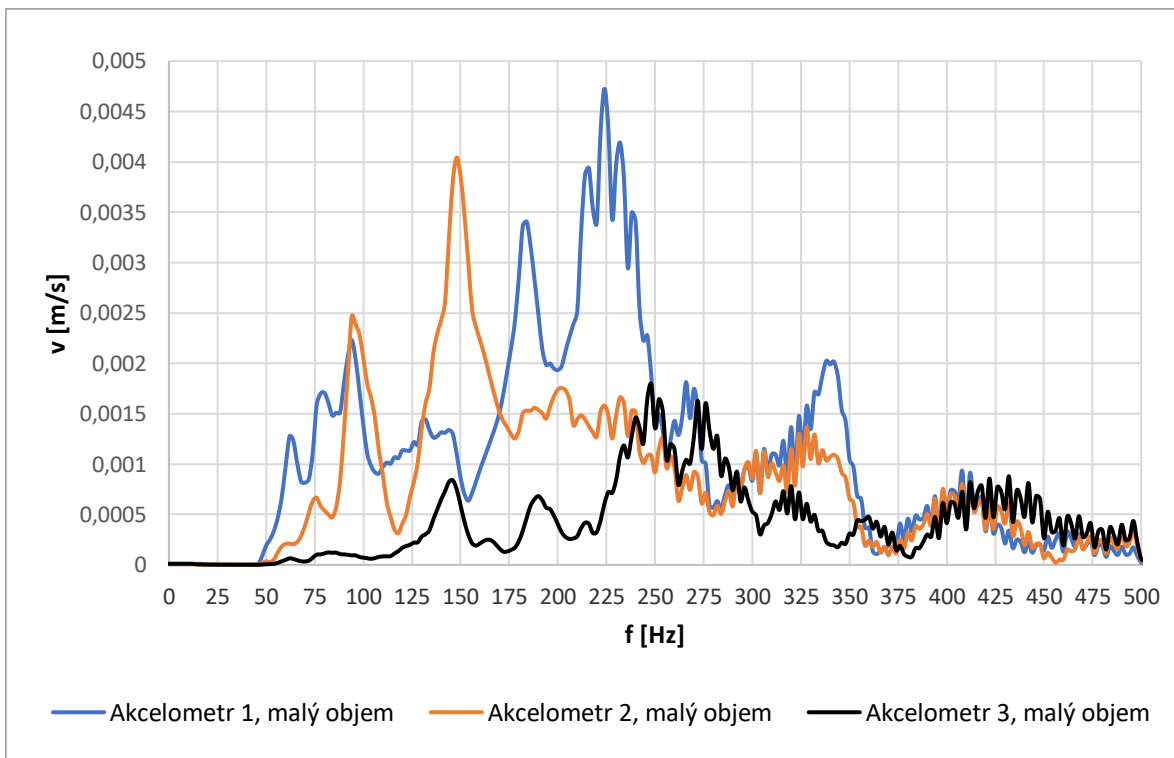
Obrázek 0-5: Závislost kmitání plexiskla na frekvenci, velký objem.



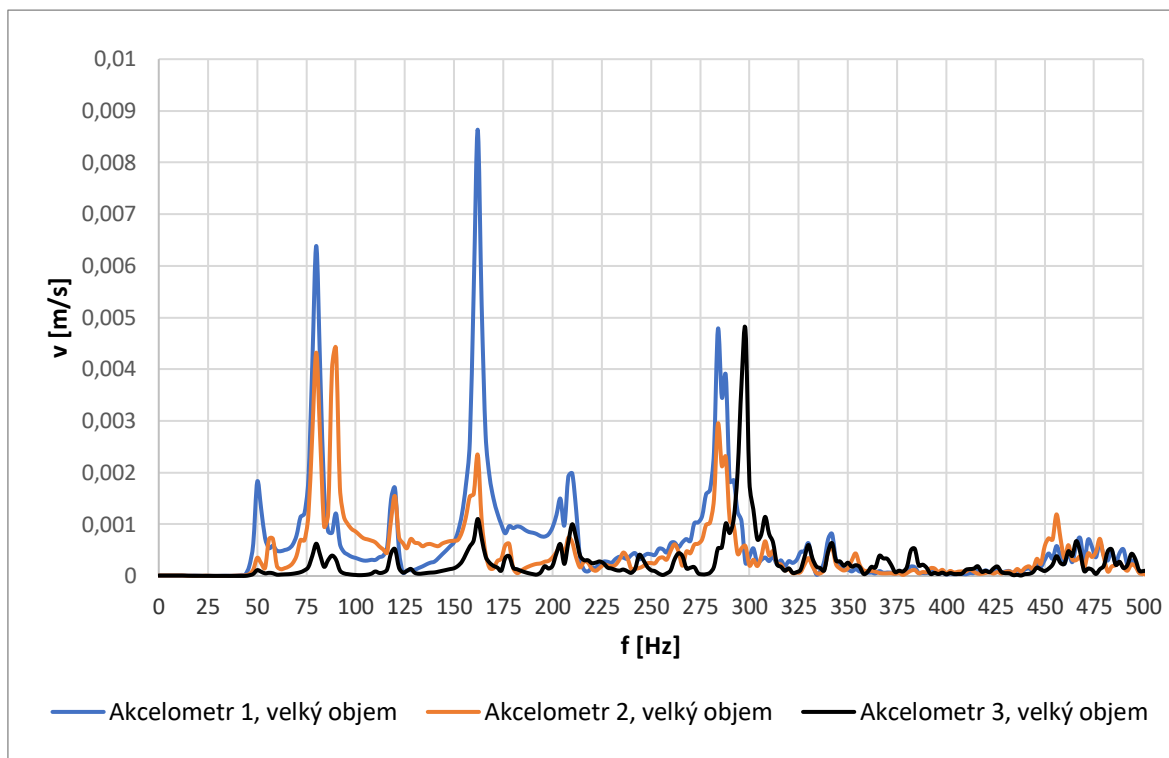
Obrázek 0-6: Závislost kmitání plexiskla na frekvenci, malý objem.



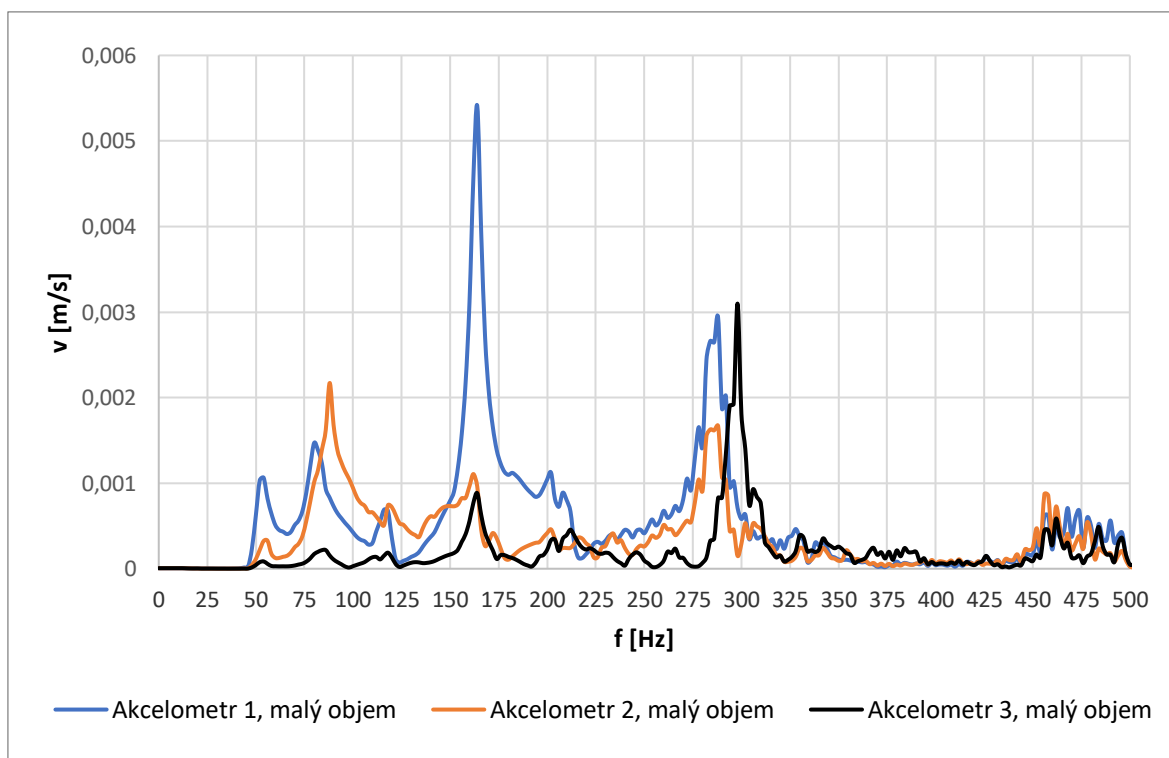
Obrázek 0-7: Závislost kmitání pertinaxu na frekvenci, velký objem.



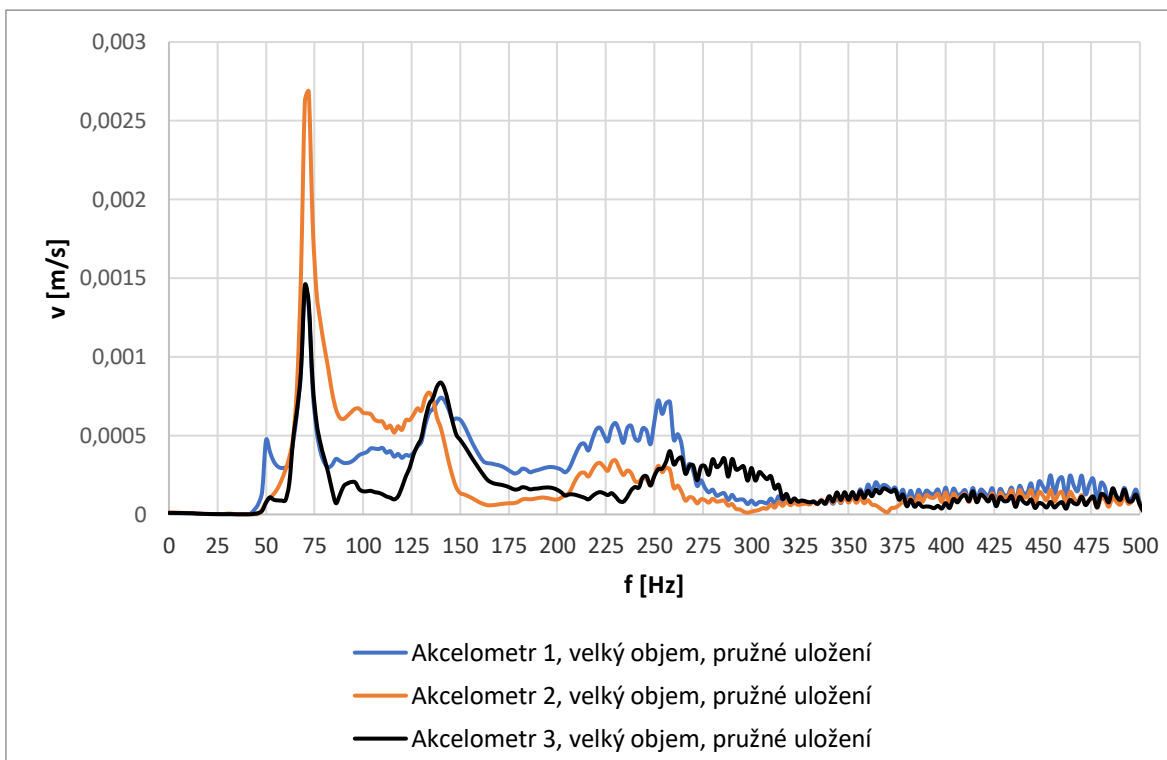
Obrázek 0-8: Závislost kmitání pertinaxu na frekvenci, malý objem.



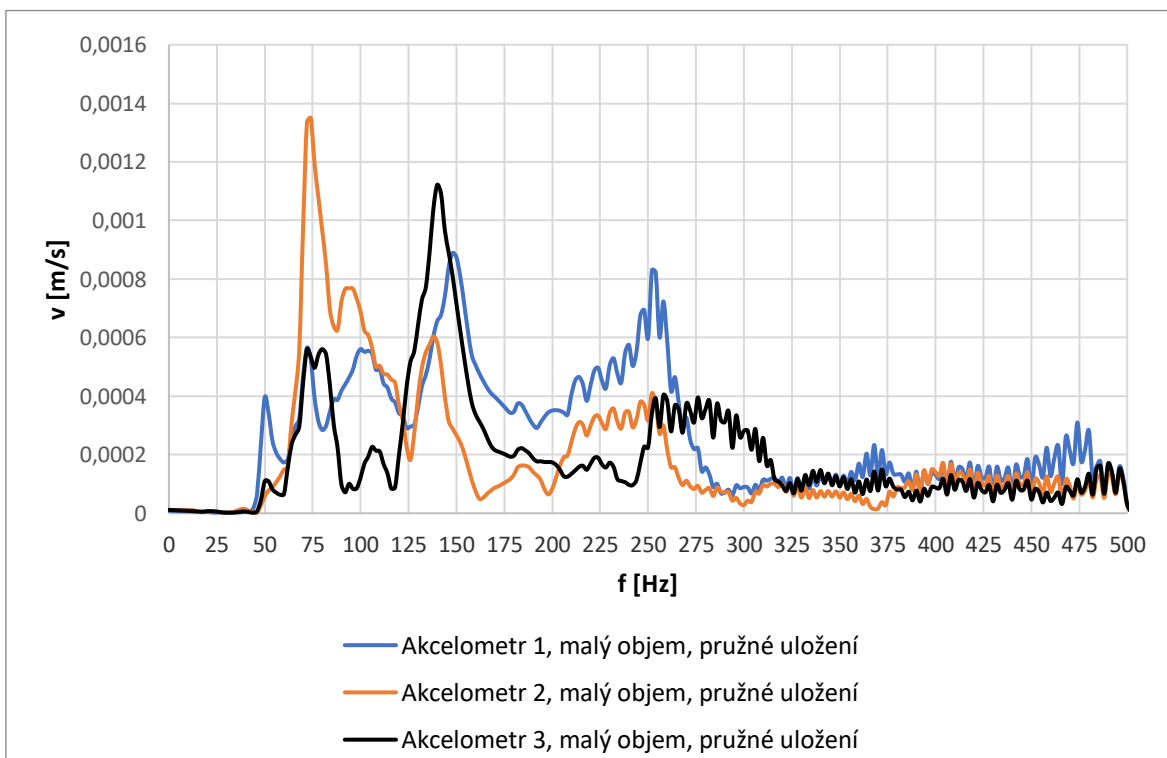
Obrázek 0-9: Závislost kmitání ocelového pozinkovaného plechu na frekvenci, velký objem.



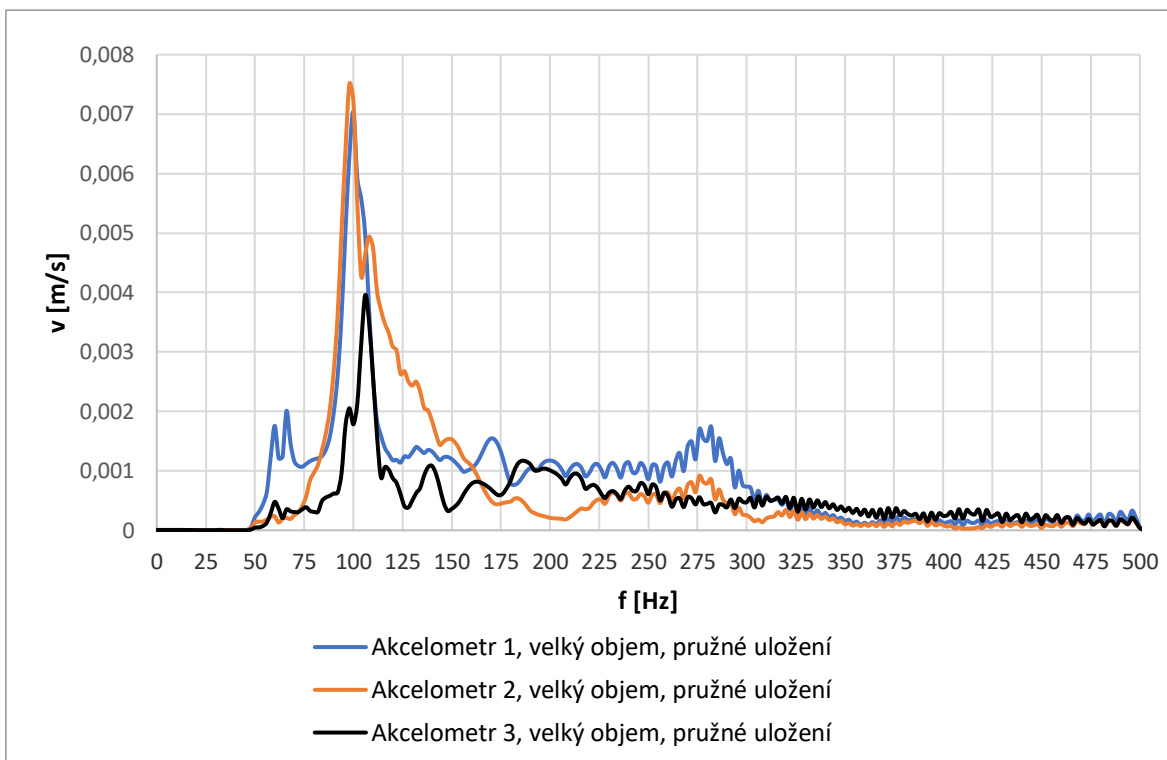
Obrázek 0-10: Závislost kmitání ocelového pozinkovaného plechu na frekvenci, malý objem.



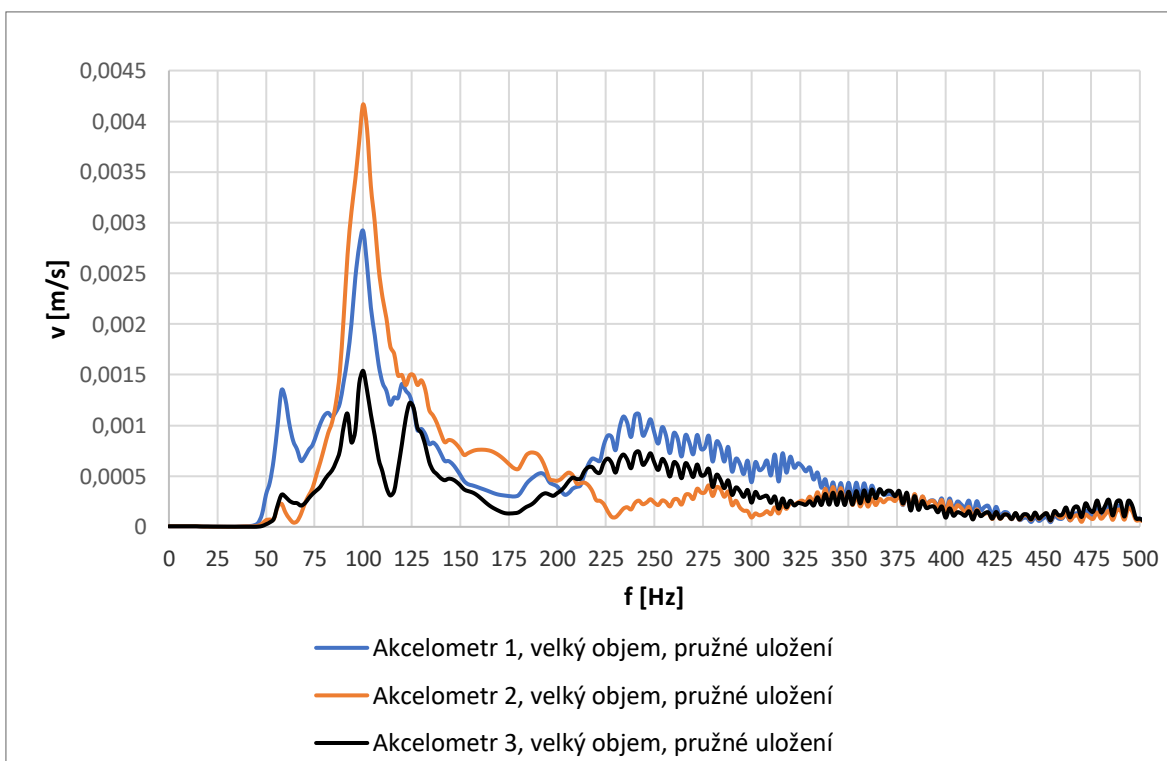
Obrázek 0-11: Závislost kmitání ocelového pozinkovaného plechu na frekvenci, pružně upevněná membrána, velký objem.



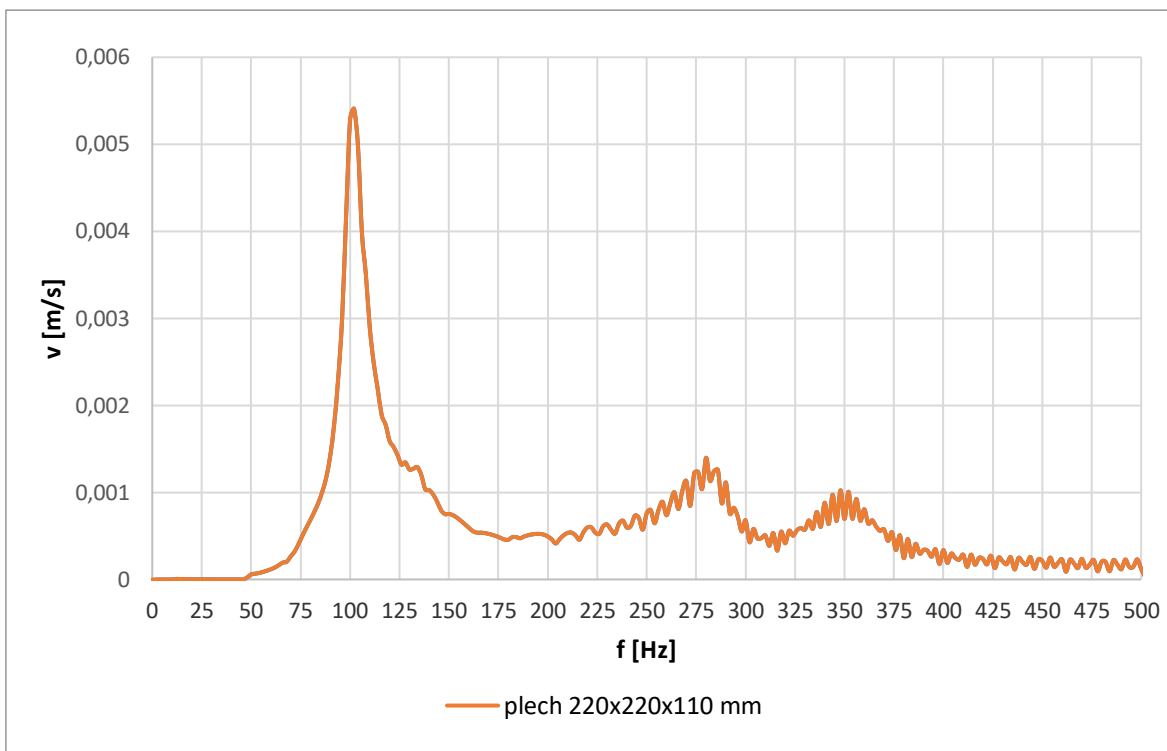
Obrázek 0-12: Závislost kmitání ocelového pozinkovaného plechu na frekvenci, pružně upevněná membrána, malý objem.



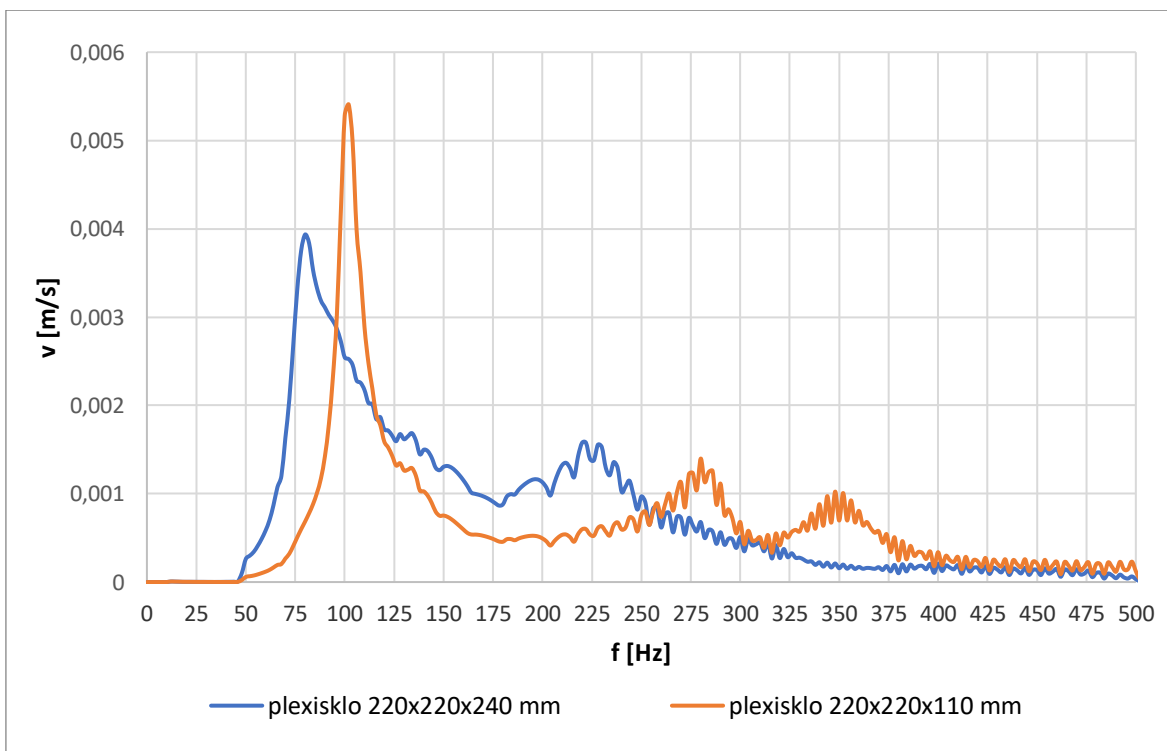
Obrázek 0-13: Závislost kmitání pertinaxu na frekvenci, pružně upevněná membrána, velký objem.



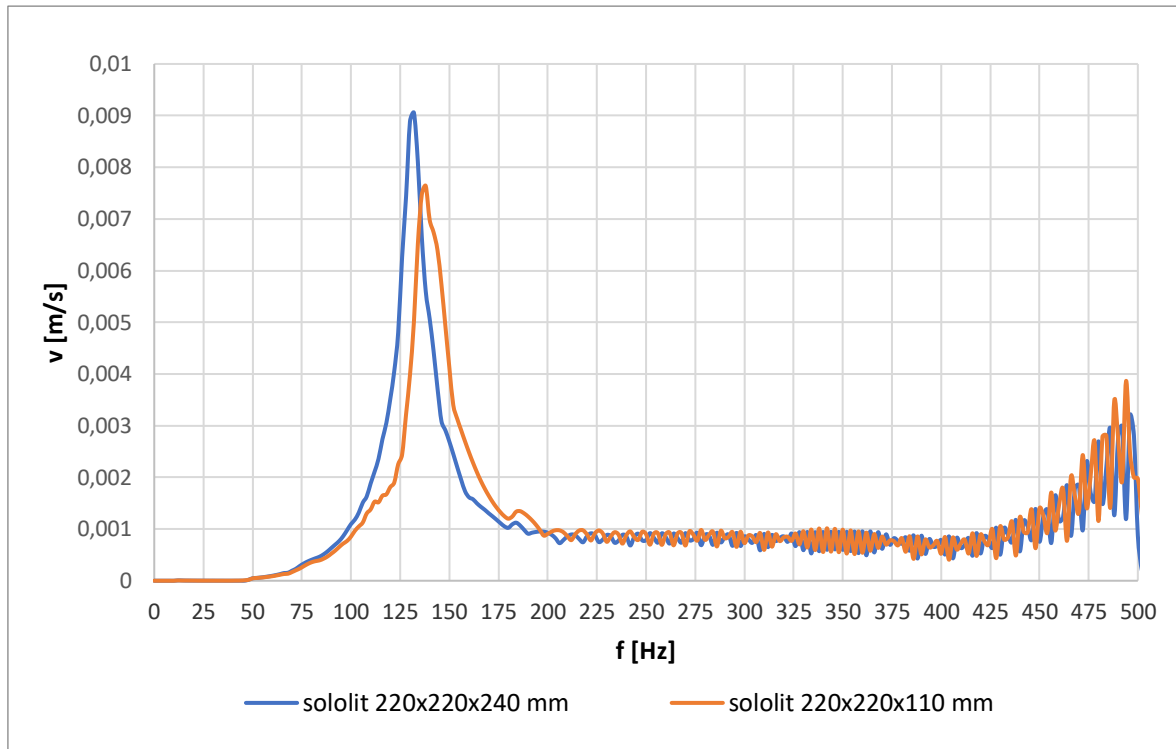
Obrázek 0-14: Závislost kmitání sololitu na frekvenci, pružně upevněná membrána, velký objem.



Obrázek 0-15: Závislost kmitání ocelového pozinkovaného plechu na frekvenci v malé měřicí konstrukci, velký a malý objem.



Obrázek 0-16: Závislost kmitání plexiskla na frekvenci v malé měřicí konstrukci, velký a malý objem.



Obrázek 0-17: Závislost kmitání sololitu na frekvenci v malé měřící konstrukci, velký a malý objem.