

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Katedra materiálů a technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Možnosti řízení pohltivosti nízkofrekvenčních akustických
tlumicích prvků

Autor práce: **Bc. Jan Honzík**
Vedoucí práce: **Ing. Stanislav Bouzek**

2022

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Jan HONZÍK**
Osobní číslo: **E20N0007P**
Studijní program: **N0713A060011 Materiály a technologie pro elektrotechniku**
Téma práce: **Možnosti řízení pohltivosti nízkofrekvenčních akustických tlumicích prvků**
Zadávající katedra: **Katedra materiálů a technologií**

Zásady pro vypracování

1. Prostudujte princip akustických pohltivých prvků pracujících na rezonančním principu.
2. U kmitajícího panelu, jako jedné z variant rezonančních pohltivých prvků, navrhnete možnost jeho tlumení pomocí vhodného elektromechanického aktuátoru.
3. Realizujte modelovou situaci kmitajícího panelu s možností změny pohltivosti řízenou elektricky a ověřte měřením mechanické a akustické vlastnosti.

Rozsah diplomové práce: **40 – 60**
Rozsah grafických prací: **dle doporučení vedoucího**
Forma zpracování diplomové práce: **elektronická**

Seznam doporučené literatury:

- M. Krňák. Akustické obklady
- F. Kolmer, J. Kyncl. Prostorová akustika
- T.J. Cox, P. D'Antonio. Acoustic Absorbers and Diffusers
- L. L. Beranek – Acoustics

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Stanislav Bouzek**
Research and Innovation Centre for Electrical
Engineering

Datum zadání diplomové práce: **8. října 2021**
Termín odevzdání diplomové práce: **26. května 2022**





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



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

V Plzni dne 8. října 2021

Abstrakt

Práce se zabývá akustickými tlumícími prvky založenými na rezonančním principu. Jsou zde tedy popsány Helmholtzův rezonátor, membránový rezonátor a kmitající panel. Další částí práce se věnují konstrukci kmitajícího panelu a návrhu dvou možností změny jeho akustických vlastností vlivem změny elektrického parametru na implementovaném elektromechanickém aktuátoru. Jako elektromechanický aktuátor byl v této práci použit tažný elektromagnet. První možnost spočívá ve změně přitažné síly elektromagnetu vlivem změny připojeného napětí a druhá možnost se zabývá připojením vhodného RLC členu na výstup elektromagnetu.

Klíčová slova

Rezonanční akustické tlumící prvky, kmitající panel, laditelný kmitající panel, rezonanční kmitočet kmitajícího panelu, změna činitele akustické pohltivosti, činitel akustické pohltivosti.

Abstract

The theses deal with acoustic damping elements based on the resonant principle. Thus, a Helmholtz resonator, a membrane resonator and an oscillating panel are described here. Other parts of the thesis are devoted to the construction of the oscillating panel and the design of two possibilities to change its acoustic properties due to the change of the electrical parameter on the implemented electromechanical actuator. An electromagnet was used as an electromechanical actuator in this thesis. The first option consists in changing the pulling force of the electromagnet due to a change in the connected voltage and the second option deals with connecting a suitable RLC element to the output of the electromagnet.

Key Words

Resonant acoustic damping elements, oscillating panel, tunable oscillating panel, resonant frequency of oscillating panel, change of sound absorption factor, sound absorption factor.

Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu práce Ing. Stanislavovi Bouzkovi za jeho ochotu, rady, inspiraci, pomoc při konstrukci a měření a za odborné vedení práce.

Obsah

Úvod.....	- 1 -
1 Teoretická část.....	- 2 -
1.1 Popis zvuku, jeho šíření a tlumení	- 2 -
1.2 Akustické tlumící prvky pracující na rezonančním principu	- 5 -
1.2.1 Helmholtzův (dutinový) rezonátor.....	- 6 -
1.2.2 Membránový rezonátor.....	- 8 -
1.2.3 Kmitající panel.....	- 10 -
1.3 Elektro – akustická analogie	- 11 -
1.4 Elektromagnetický měnič.....	- 14 -
1.5 Měření chvění.....	- 15 -
1.6 Měření akustické pohltivosti	- 18 -
2 Praktická část.....	- 19 -
2.1 Návrh kmitajícího panelu	- 19 -
2.2 Návrh proměnného/ladícího obvodu	- 20 -
2.3 Implementace ladícího obvodu do konstrukce kmitajícího panelu.....	- 25 -
2.4 Měření akustických a mechanických vlastností kmitajícího panelu	- 26 -
2.5 Zhodnocení výsledků vlivu napětí (přitažlivé síly).....	- 28 -
2.6 Zhodnocení výsledků vlivu připojeného kondenzátoru	- 32 -
Zhodnocení a závěr.....	- 35 -
Literatura.....	- 36 -
Přílohy.....	I

Seznam symbolů a zkratek

Značka	Popisek	Jednotka
f	Frekvence	[Hz]
C	Rychlost šíření zvuku	[m/s]
λ	Vlnová délka	[m]
p	Akustický tlak	[Pa]
I_0	Akustická intenzita	[W/m ²]
P_0	Akustický výkon	[W]
α	Činitel zvukové pohltivosti	[-]
β	Činitel zvukové odrazivosti	[-]
S	Plocha pístu	[m ²]
S_d	Plocha zadní stěny rezonátoru	[m ²]
V	Objem vzduchu v rezonátoru	[m ³]
h	Šířka mezery	[m]
h'	Fiktivní výška vzduchového pístu	[m]
Δh	Výška posouvání vzduchového pístu	[m]
m_a	Akustická hmotnost	[kg]
c_a	Akustická poddajnost	[N/m]
R_a	Akustický odpor	[Pa*s/m]
f_0	Mezní frekvence	[Hz]
M_s	Plošná hmotnost	[kg/m ²]
d	Výška vzduchového polštáře	[m]

Úvod

Práce se bude zabývat změnou činitele zvukové pohltivosti, a to za pomoci změny elektrické veličiny. Tato myšlenka vznikla na základě potřeby rozlišných dob dozvuku. Jedním z případů vhodného využití změny zvukového činitele jsou koncertní haly, popřípadě divadla, kdy je optimální pro různé typy produkce různé nastavení doby dozvuku pro co nejlepší subjektivní pocit. Dalším příkladem je využití v domácnosti, například v obývacím pokoji, kdy v případě návštěvy je potřeba mít hodnoty dozvuku podobné požadavkům kavárny, aby subjektivní dojem byl příjemný, a v případě sledování filmu mít hodnoty dozvuku nižší pro lepší prožitek zvukové stopy filmu. Možné využití tohoto řešení by mohlo být použito i pro doladění reálného tlumícího prvku, kdy reálný model může mít posunutou rezonanční frekvenci oproti výpočtům. Změnou akustických vlastností by bylo možné tyto výchyly eliminovat.

Jedním z cílů práce je seznámení se s akustickými pohltivými prvky a návrh kmitajícího panelu, jakožto vhodného testovacího prvku pro primární cíl této práce. Primárním cílem práce je ověření možnosti změny zvukového činitele kmitajícího panelu změnou elektrických parametrů elektromechanického akutátoru. Změnou činitele zvukové pohltivosti je zde chápáno nejen jako změna velikosti, ale optimálně i posun rezonanční frekvence, což bude prvotně sledováno měřením vibrací panelu.

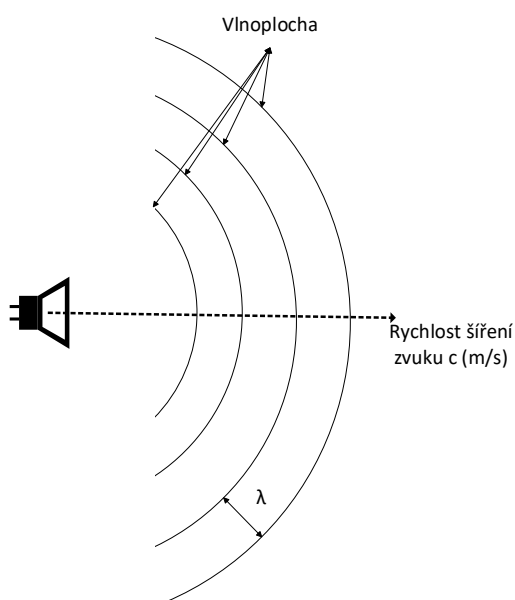
V první části práce budou zmíněny základní akustické parametry a popsány základní akustické pohltivé prvky založené na rezonančním principu. Jedná se právě o dutinový (Helmholtzův) rezonátor, membránový rezonátor a kmitající panel. Dále bude v první části uvedena analogie mezi elektrickými a akustickými veličinami a také zde bude nastíněno měření vibrací a činitele zvukové pohltivosti.

Druhá část bude zaměřena na návrh akustického panelu a systém, kterým by mělo být možné měnit činitel zvukové pohltivosti. Prvotní myšlenka ve změně akustické pohltivosti je inspirovaná elektromagnetickým reproduktorem, tedy instalací kotvy elektromagnetu k panelu a upevnění elektromagnetu k pevné konstrukci systému. Načež by mělo být možné činitel zvukové pohltivosti měnit za pomoci změny velikosti stejnosměrného napětí připojeného k elektromagnetu (cívce), zde by se mělo jednat spíše o změnu velikosti činitele akustické pohltivosti a při dostatečném přitažení by mělo dojít k úplnému zastavení kmitání. Druhá možnost změny spočívá v připojení vhodných pasivních prvků, nebo jejich kombinací, k vývodům aktuátoru, což by mělo vést k posunu rezonanční frekvence.

1 Teoretická část

1.1 Popis zvuku, jeho šíření a tlumení

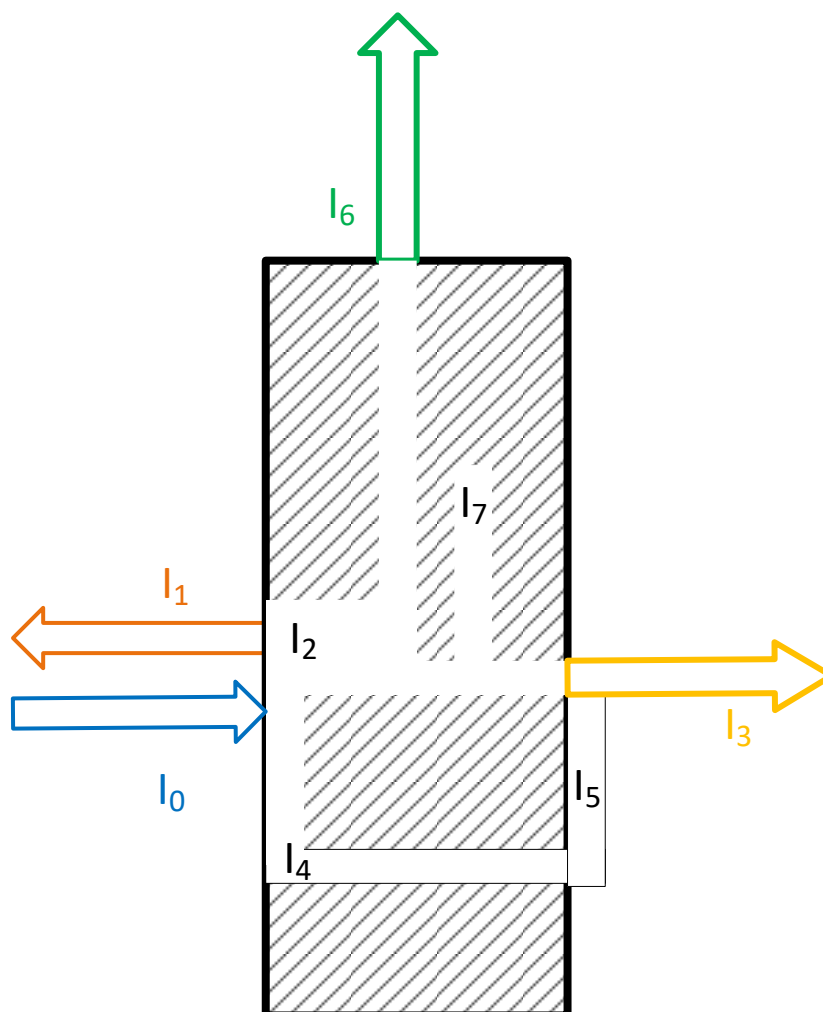
Dle knihy Hluk a chvění od R. Nového [1] se technická akustika zabývá slyšitelným zvukem, který se pohybuje ve frekvencích od 20 Hz do 20 kHz, ovšem akustika se zabývá i infrazvukem (pod 20 Hz) a ultrazvukem (nad 20 kHz). Zvuk je tvořen mechanickým vlněním, které se šíří prostředím, respektive látkou. Rychlost šíření silně závisí na typu prostředí, kdy například ve vzduchu je rychlost šíření přibližně 340 m/s a ve vodě přibližně 1440 m/s. Zvuk se šíří ve vlnoplochách. Vlnoplochy mají ve všech bodech v daném časového okamžiku stejný akustický stav. Pokud vyneseme kolmici na vlnoplochu získáme takzvaný akustický paprsek. Jak bylo řečeno šíření zvuku je dáno prostředím. Toto prostředí může být plynné, kapalné i pevné. Pokud je prostředí homogenní izotropní, tak zvuk, lépe řečeno vlnění, se šíří přímočaře. Podle kmitání částic prostředí se dělí vlnění na podélné (kmitání částic ve směru šíření vlny) a příčné (kmitání částic je kolmé na dráhu šíření vlny). V pevném a kapalném prostředí se zvuk může šířit jen podélně, jelikož fyzická podstata těchto prostředí neumožňuje příčné šíření vlny. V elastickém prostředí může docházet i k příčnému šíření, jelikož v materiálech dochází mimo jiné i ke smyku. Kombinací různých namáhání materiálů dochází i ke vzniku ohybového kmitání.



Obr. 1: Šíření zvuku od zdroje ve formě vlnoploch (překresleno z [1])

Vlastimil Beran ve své knize Chvění a hluk [2] popisuje zvuk jako mechanické kmitání plynů, kapalin nebo pružných médií, kdy kmitající objekt předává část své energie do okolního prostředí, kde se šíří jako vlnění (kmitání částic prostředí kolem rovnovážné polohy). Jak vyplývá z textu, pro vznik a šíření zvuku je potřeba částic, lze tedy říci, že zvuk by se v absolutním vakuu nešířil. Pohyb částic má za následek, že dochází v čase k proměnným tlakovým změnám. Akustický tlak p_a je důležitým parametrem v akustice a vychází z pohybu částic v prostředí, pokud se neuvažuje pohyb částic vlivem teploty. Na základě experimentů byla stanovena prahová křivka slyšitelnosti a prahový akustický tlak $p_0 = 20 \mu\text{Pa}$ při frekvenci 1 kHz. Pro tuto hodnotu frekvence byly stanoveny další významné prahové akustické veličiny, a to prahová akustická intenzita $I_0 = 1 \text{ pW/m}^2$ a prahový akustický výkon $P_0 = 1 \text{ pW}$. *Akustický výkon* je fyzikální vlastností zdroje, a tudíž není ovlivňován orientací a vzdáleností pozorovatele, pohybem posluchače, či zdroje, nebo teplotou a rychlostí proudění prostředí, ani odrazivostí prostředí. Jedná se o veličinu, díky které lze porovnávat jednotlivé akustické zdroje. *Akustická intenzita* je vektor, který má v sobě informace o velikosti a směru toku energie v uvažovaném místě.

Z textu na stránkách Univerzity Tomáše Bati [3] vyplývá, že dopadem zvukové vlny na libovolnou překážku dochází k jejímu neúplnému odražení, a tedy částečnému pohlcení. Míru pohlcení lze stanovit na základě energetické bilance s využitím akustického výkonu, popřípadě intenzity zvukové vlny, dopadajícím na 1 m^2 povrchu stěny. Míra pohlcení závisí mimo jiné na materiálu překážky. Jak lze vidět na Obr. 2, tak k pohlcení zvuku dochází různými způsoby. Celková pohlčená energie I_2 se tedy dělí na intenzity I_3 , I_6 a I_7 . Intenzita I_3 zastupuje celkovou vyzářenou energii za stěnu, která je součtem intenzit I_4 (intenzita zvuku, která prošla otvory a póry) a I_5 (intenzita zvuku vlny, kterou stěna vyzáří do druhého poloprostoru kvůli vlastnímu ohybovému kmitání). Zvuk ve formě chvění (vibrací) přenášené do ostatních přilehlých konstrukcích zastupuje intenzita I_6 a intenzita přeměněná na teplo je pak znázorněna jako I_7 .



Obr. 2: Energetická bilance při dopadu zvukové vlny na překážku (překresleno z [3])

Dále z předchozího textu [3] vyplívají následující rovnice, které popisují vlastnosti pohlcování zvuku materiály.:

Pohltivé vlastnosti materiálů jsou charakterizovány činitelem akustické pohltivosti α viz rovnice (1.1), kde hodnota může nabývat hodnot od 0 (nedochází k žádnému pohlcení zvuku, tzn. veškerá energie se odrazí), do 1 (všechn zvuk se pohltí, tzn. nedochází k odrazu). Definice činitele zvukové pohltivosti dle daného textu [3] zní následovně: „Činitel pohltivosti zvuku je dán poměrem pohlcené akustické energie určitou plochou k dopadající akustické energii na tuto plochu“. Dalším důležitým faktorem, který má vliv na míru pohlcení je frekvence dopadajícího akustického vlnění. Ovšem na pohlcení zvuku mají vliv i jiné faktory, jako jsou tloušťka materiálu, rozložení a velikost pórů v materiálu a podobně.

$$\alpha = \frac{I_2}{I_0} \quad (-) \quad (1.1)$$

α ... činitel zvukové pohltivosti,

I_2 (W/m²) ... pohlcená intenzita zvukové vlny,

I_0 (W/m²) ... celková intenzita zvuku dopadající na překážku.

V opačném případě pohltivosti je definován činitel zvukové odrazivosti β viz rovnice (1.2). Tento činitel nabývá hodnot od 0 (žádná energie se neodrazí) do 1 (všechna energie se odrazí).

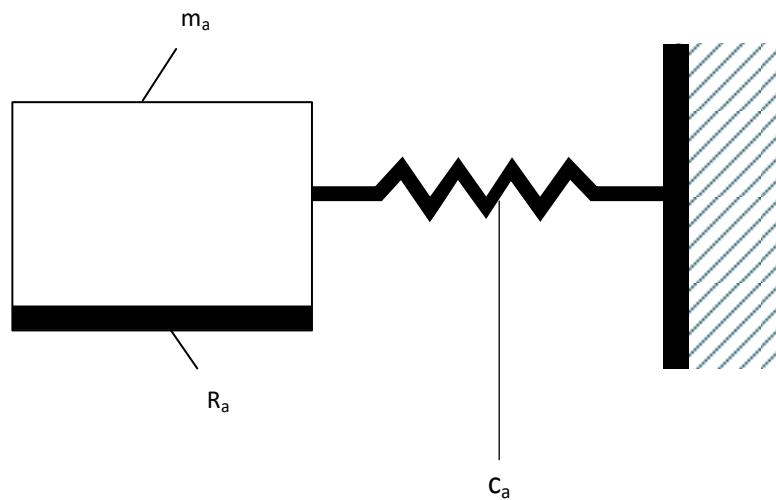
$$\beta = \frac{I_1}{I_0} \quad (-) \quad (1.2)$$

Právě díky energetické bilanci musí platit vztah viz rovnice (1.3) [3], z čehož plyne, že část energie akustického vlnění se pohltí a část se odrazí.

$$\alpha + \beta = 1 \quad (1.3)$$

1.2 Akustické tlumící prvky pracující na rezonančním principu

Dle knihy Prostorová akustika [4] jsou tři základní typy rezonančních tlumících prvků, jedná se o dutinový rezonátor (Helmholtzův rezonátor), membránový rezonátor a kmitající panel. Autor knihy uvažuje složení rezonanční soustavy z akustické hmotnosti m_a , která je připojena na akustickou poddajnost c_a , jejíž pohyb je tlumen akustickým odporem R_a . Princip těchto rezonátorů spočívá v dopadu zvukového vlnění na soustavu, což způsobí nucené kmitání tělesa, toto kmitání má největší amplitudu právě při dopadu vlnění o frekvenci rovné rezonanční frekvenci konstrukce, v tomto případě, pokud je rezonanční obvod dostatečně tlumen dochází i k největšímu tlumicímu účinku rezonátoru. Konstrukce vlivem setrvačnosti začne dokmitávat (doznívat) v momentě, kdy přestane dopadat vlnění na soustavu. Doznívají i jiné akustické prvky, příkladem doznívání zdroje zvuku mohou být struny klavíru. Doba doznívání je závislá na tlumení rezonátoru. Pokud nebude rezonátor dostatečně tlumen, může se stát, že se energie různých kmitočtů pouze přemění na energii o jedné frekvenci, která je dána konstrukcí, a zvuk nebude příliš tlumen. Zvuková energie se v rezonátorech přeměňuje v teplo. Pro lepší pochopení je níže uvedena mechanická analogie akustické rezonanční soustavy.

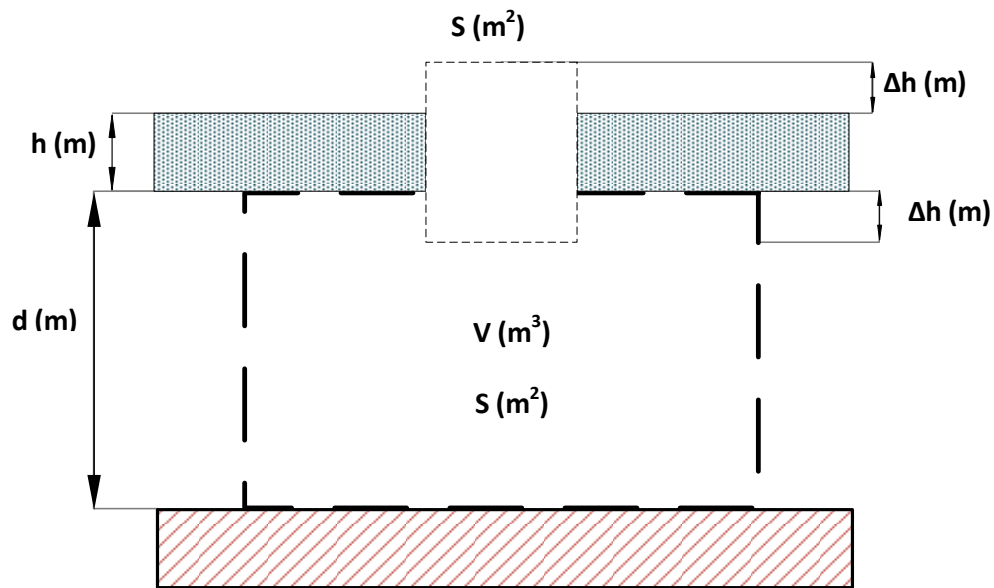


Obr. 3: Mechanická analogie akustické rezonanční soustavy (překresleno z [4])

..

1.2.1 Helmholtzův (dutinový) rezonátor

Jak vyplývá z článku [5] o dutinových rezonátorech, jedná se o velmi starý a celkem jednoduchý způsob tlumení zvuku, přičemž kvalita pohlcení, přesněji činitel zvukové pohltivosti α je podobná kvalitě pohlcovačů typu kmitající membrána, která je popsána níže. Velikost pohlcování je také závislá na vlastnostech materiálu vloženého do dutiny rezonátoru. Dutinový rezonátor má rezonanční charakter, jeho akustické parametry je tedy možné ladit změnou mechanických parametrů.



Obr. 4: Dutinový rezonátor - popis (překresleno z [5])

Dále jsou v textu [5] popsány rovnice potřebné pro výpočet rezonančního kmitočtu dutinového rezonátoru. Kmitočet lze měnit tloušťkou rezonátoru d , resp. šířkou od dutiny k „zadům“ rezonátoru a změnou velikostí otvorů, či jejich hustotou. Rozdíl oproti membránovým rezonátorům, či kmitajícím panelům je zde v tom, že nekmitá tuhé těleso (membrána, nebo deska), ale vzduch o fiktivní výšce h' viz rovnice (1.4). Pokud platí, že všechny rozměry rezonátoru jsou menší než polovina vlnové délky a hodnota činitele děrování desky S/Sd je menší než 0,15, tak se vzduch chová jako píst z tuhé látky a vzduchová mezera d pak vytvoří pružinu.

$$h' = h + 2\Delta h \quad (1.4)$$

h' (m) ... fiktivní šířka vzduchu (vzduchového pístu),

h (m) ... šířka mezery,

Δh (m) ... šířka posouvání vzduchového pístu.

$$f_r = \frac{c_0}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{Vh'}} \approx 54 \sqrt{\frac{S}{Vh'}} \quad (1.5)$$

f_r (Hz) ... rezonanční kmitočet,

c_0 (m/s) ... rychlost zvuku,

S (m²) ... plocha dutiny,

V (m³) ... objem vzduchu v rezonátoru.

Rovnice (1.5) platí pouze pro přímý dopad, pro všesměrový dopad se uvažuje přibližně o polovinu oktávy vyšší rezonanční kmitočet. Pro jednotlivé typy otvorů (kruhový a čtvercový tvar) je potřeba udělat korekci Δh . Pro kruhový otvor poté platí rovnice (1.6) a pro čtvercový rovnice (1.7), kde S_d (m) je plocha na zádech rezonátoru (vnitřní zadní stěna).

$$2\Delta h \approx \sqrt{S} \left(1,05 - \sqrt[3]{\frac{S}{S_d}} \right) \quad (1.6)$$

$$2\Delta h \approx \sqrt{S} \left(1,03 - \sqrt[3]{\frac{S}{S_d}} \right) \quad (1.7)$$

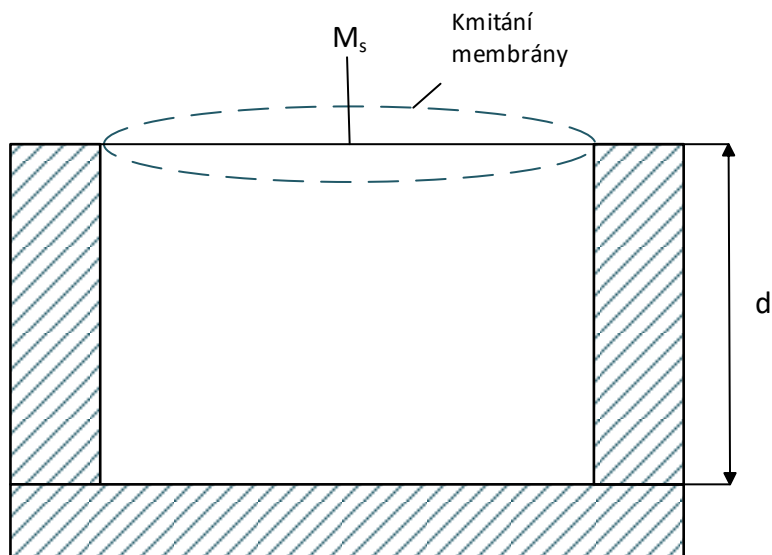
1.2.2 Membránový rezonátor

Autor knihy Akustické obklady [6] M. Krňák popisuje membránový rezonátor jako akustické prvky založené na ohybovém kmitání čelní plochy, která je tvořena z tenkého materiálu jako je například napnutá látka, fólie, koženka, plastová, či kovová deska a podobně. Membrána je upevněna na pevné nosné konstrukci. Dle knihy Prostorová akustika [4] je právě konstrukce (rozměry a použité materiály) důležitá pro vlastnosti rezonátoru, tedy hlavně rezonanční frekvenci, což je hlavní parametr u těchto pohlcovacích prvků. V knize je uvedena i zjednodušená rovnice pro výpočet rezonanční frekvence viz rovnice (1.8). Tato rovnice je složena ze dvou lehce zjistitelných parametrů, které velmi ovlivňují výslednou rezonanční frekvenci viz obr. 4.

$$f_0 = 60 * \sqrt{\frac{1}{M_s * d}} \quad (\text{Hz}) \quad (1.8)$$

M_s (kg/m^2) ... měrná plošná hmotnost membrány,

d (m) ... výška vzduchového polštáře za membránou.



Obr. 5: Principiální schéma membránového rezonátoru (překresleno z [4])

Ovšem pro přesné hodnoty je výpočet moc zjednodušený, jelikož je nutné brát v potaz ohybové kmitání membrány, materiálové vlastnosti a rozměry. Tato rovnice je zmíněna v knize Praktická elektroakustika [7].

$$f_{p,q} = \frac{1}{2\pi} * \sqrt{\frac{\rho c^2}{Md} + \frac{4\pi^2}{M} \left[\left(\frac{p}{a}\right)^2 + \left(\frac{q}{b}\right)^2 \right]^2 * \frac{Eh^3}{12(1-\sigma^2)}} \quad (\text{Hz}) \quad (1.9)$$

M (kg/m^2) ... plošná hmotnost membrány,

ρ (kg/m^3) ... hustota vzduchu,

d (m) ... výška vzduchového polštáře,

E (Pa) ... modul pružnosti,

σ (-) ... Poissonova elastická konstanta,

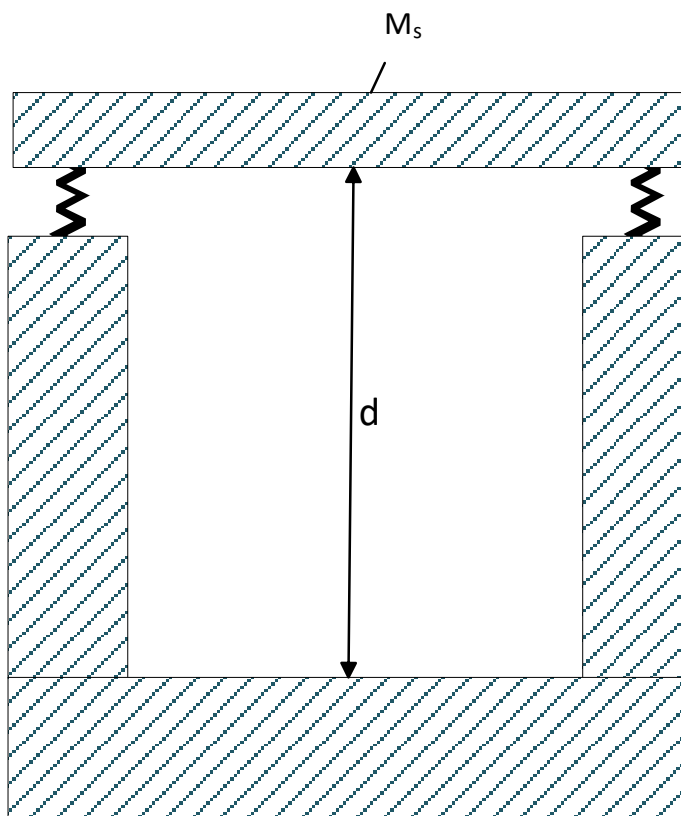
p, q (-) ... módová čísla příslušného vlastního kmitu,

a, b (m) ... rozměr stran obdélníkové membrány,

h (m) ... tloušťka membrány.

1.2.3 Kmitající panel

Autoři knihy *Prostorová akustika* [4] popisují také kmitající panely. V knize uvádějí, že soustava je tvořena z desky, která je pružně, ale vzduchotěsně upevněna ke konstrukci jako je znázorněno na Obr. 6. Konstrukce by měla být pevná, aby se co nejvíce zamezilo vlastnímu kmitání systému a nedocházelo tak ke zhoršení tlumících vlastností. Deska může být teoreticky z libovolného materiálu, ale je nutné, aby měla dostatečnou tuhost zabraňující ohybovým kmitům, což tedy limituje výběr materiálů. Díky tuhosti deska kmitá pístově, tedy se stejnou amplitudou v celé své ploše. Rezonanční frekvence je pak závislá na plošné hmotnosti desky, uložení, respektive pružinám a vzdálenosti desky od zad soustavy, jinak řečeno hloubky vzduchového polštáře. Tyto rezonátory disponují velkým činitelem jakosti v širokém rozsahu frekvencí. Výpočet rezonančního kmitočtu je obdobný s výpočtem pro membránové rezonátory, tedy viz rovnice (1.8).

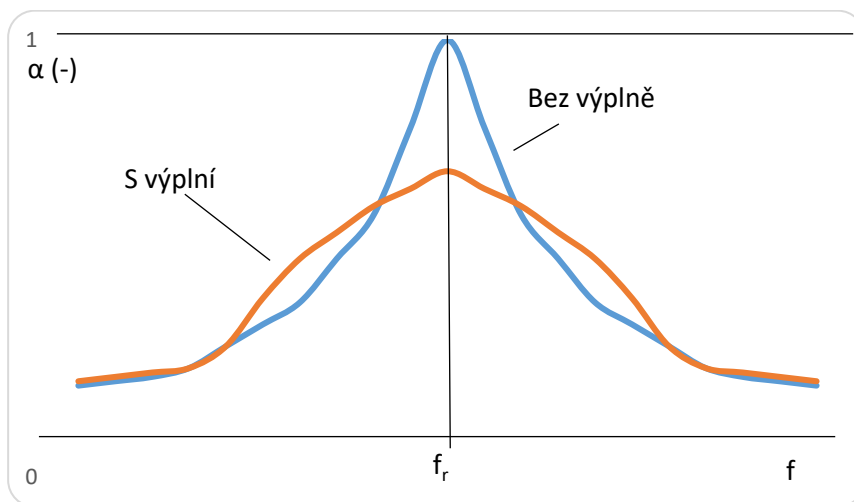


Obr. 6: Principiální schéma panelového rezonátoru (překresleno z [4])

V knize *Hluk a chvění* [1] je uvedeno, že desky se od membrán liší nejen ohybovou tuhostí, ale také okrajovými podmínkami, které jsou u desek složitější. U desek mohou v zásadě nastat tři případy, a to, že deska je na všech okrajích volná, nebo deska je volně podložena na svém okraji, a nebo že deska je vetknuta do obvodu. Z praxe vyplívá, že každé

specifické řešení upnutí desky vyvolává odlišné rezonanční kmitočty, a proto jsou v literárních zdrojích uváděny řešení pro různé konstrukční uspořádání.

Jak bylo zmíněno výše, tak koeficient tlumení α je nejvyšší při rezonanční frekvenci. Dle textu v knize Stavební fyzika – Stavební akustika v teorii a praxi [8] je možné rozšířit absorpční schopnost soustavy vložím pohlcujícího materiálu. Ovšem tím dojde ke zmenšení absorpce při rezonanční frekvenci. Pro stavební akustiku je výhodnější použití kmitajícího panelu s výplní.



Graf 1: Závislost koeficientu tlumení kmitajícího panelu na frekvenci s výplní a bez výplně (překresleno z [8])




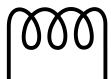
1.3 Elektro – akustická analogie

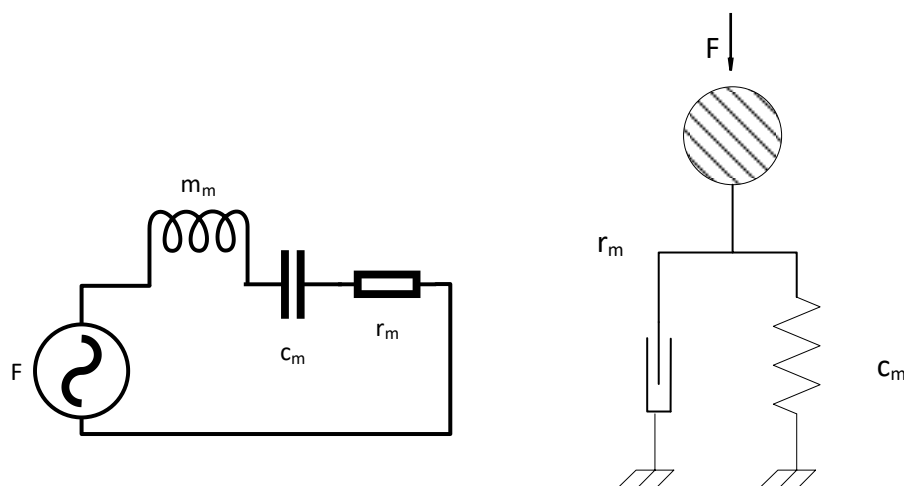
Pro lepší orientaci a pochopení funkčnosti se zavedli náhradní mechanické a elektrické schémata, jelikož se v akustice většinou mísí tři oblasti, a to mechanická, akustická a elektrická [9]. Schématické značky jsou popsány v knize [9] a jsou uvedeny v tabulce níže. Převod mezi mechanickou a elektrickou částí je dán u elektrodynamického systému tzv. silovým faktorem Bl , tento parametr lze pozorovat u reproduktorů, který lze vypočítat jako součin intenzity magnetického pole a délky závitů v magnetickém poli [10]. V knize Elektro-akustika a akustika [11] je odvozen převodní faktor elektromagnetického měniče k_a z rovnice elektromagnetické přeměny a je roven viz rovnice (1.10). Převod se ve schématech značí jako transformátor, či gyrátor, popřípadě se upraví jednotlivé veličiny.

$$k_a = \frac{\mu_0 S n^2 I_0}{l_0} = \frac{n \Phi_0}{l_0} = \frac{L_0 I_0}{l_0} \quad (1.10)$$

k_a (-) ... převodní faktor měniče,
 μ_0 (N/A²) ... permeabilita vakua,
 S (m²) ... plocha vzduchové mezery,
 n (-) ... počet závitů cívky,
 I_0 (A) ... proud v cívce,
 l_0 (m) ... šířka vzduchové mezery,
 Φ_0 (Wb) ... magnetický tok,
 L_0 (H) ... indukčnost cívky.

Tabulka 1: Analogie elektrických, mechanických a akustických prvků (převzato z [9])

Schématická značka	Elektrická veličina	Mechanická veličina	Akustická veličina
	Elektrická impedance Z (Ω)	Mechanická impedance Z_M (N*s/m)	Akustická impedance Z_A (Pa*s/m ³)
	Elektrický odpor R (Ω)	Mechanický odpor R_M (N*s/m)	Akustický odpor R_A (Pa*s/m ³)
	Elektrická kapacita C (F)	Mechanická poddajnost C_M (m/N)	Akustická poddajnost C_A (m ³ /Pa)
	Elektrická Indukčnost L (H)	Hmotnost systému M_M (kg)	Akustická hmotnost M_A (kg)



Obr. 7: Náhradní schéma mechanické části kmitajícího panelu (překresleno z [12])

Náhradní schéma vpravo je znázorněno mechanickými prvky a náhradní schéma vlevo je znázorněno analogickými elektrickými prvky. Z daného schématu vychází rezonanční frekvence viz rovnice (1.11) [12]. Ovšem nejčastěji se využívá pro výpočet rezonanční frekvence zjednodušený vzorec viz rovnice (1.12)[4].

$$f_r = \frac{1}{2\pi} * \sqrt{\frac{1}{m_m * c_m} - \frac{r_m^2}{2m_m^2}} \quad (\text{Hz}) \quad (1.11)$$

f_r (Hz) ... frekvence tlumených kmitů mechanického sériového rezonančního obvodu,

m_m (kg) ... hmotnost kmitajícího systému,

r_m ... mechanický odpor uložení,

c_m (m/N) ... poddajnost uložení.

$$f_r = \frac{c}{2\pi} * \sqrt{\frac{\rho}{M_s * d}} = \frac{60}{\sqrt{Md}} \quad (\text{Hz}) \quad (1.12)$$

c_0 ... rychlost šíření zvuku ve vzduchu 340 m/s,

ρ (kg/m³) ... hustota vzduchu,

M (kg/m²) ... plošná hmotnost desky,

d (m) ... tloušťka vzduchového polštáře.

1.4 Elektromagnetický měnič

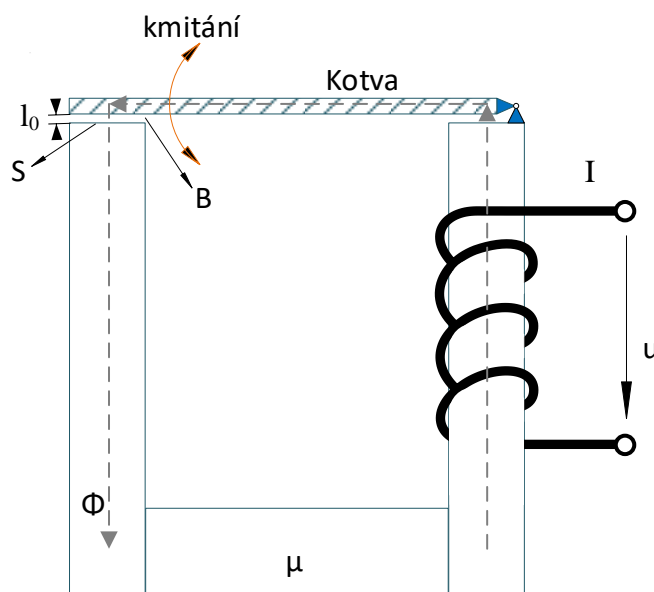
Elektromagnetický měnič, jak z názvu vyplývá funguje na elektromagnetickém principu. Může pracovat jako zdroj zvuku, či jako snímač zvuku. Princip lze vysvětlit za pomoci Obr. 8, který je níže (v některých zdrojích je u kotvy znázorněn elastor, který udržuje stabilní polohu kotvy [11]). V režimu zdroje zvuku je kotva přitahována, nebo odtahována pomocí proměnného magnetického toku Φ , který je dán v tomto případě elektrickým proudem I [13] a lze určit sílu viz rovnice (1.13)[14]. V režimu snímače zvuku (mikrofonu) je akustickým tlakem hýbáno s kotvou a vlivem kmitání kotvy o rychlosti v , dojde ke změně magnetického toku Φ , což má za důsledek změnu napětí u , které lze určit viz rovnice (1.14) [14]. Dalšími ovlivňujícími parametry jsou plocha vzduchové mezery S a permeabilita materiálů μ .

$$F = N \frac{BS}{l} i \quad (1.13)$$

F (N) ... síla působící na kotvu,
 B (T) ... magnetická indukce,
 S (m²) ... plocha vzduchové mezery,
 l (m) ... šířka vzduchové mezery,
 i (A) ... elektrický proud procházející cívkou.

$$u = N \frac{BS}{l} v \quad (1.14)$$

u (V) ... indukované napětí na cívce,
 B (T) ... magnetická indukce,
 S (m²) ... plocha vzduchové mezery,
 l (m) ... šířka vzduchové mezery,
 v (m/s) ... rychlost kmitání kotvy.



Obr. 8: Princip elektromagnetického měniče (překresleno z [14])

1.5 Měření chvění

V knize Chvění a hluk [2] je uvedeno, že chvění lze hodnotit třemi veličinami, a to sice zrychlením a (m/s^2), rychlostí v (m/s^1) a výchylkou A , popřípadě x (m). Za pomoci výchylky lze porovnávat chvění mezi jednotlivými zařízeními. Mimo jiné je možné i výchylku subjektivně vnímat a posuzovat dotykem. Měření amplitudy kmitání se využívá zejména pro nízké frekvence. Veličina rychlosti se využívá pro hodnocení škodlivosti a dopadu chvění na lidský organismus, jelikož energie jsou rovnoměrně rozloženy pro různé frekvence. Zrychlení je vhodné volit pro měření vysokých frekvencí. Tyto skutečnosti lze vypočítat i z grafu závislosti veličin na frekvenci viz Graf 2. Jelikož se rychlost a následně výchylka vypočte integrací, respektive dvojitou integrací zrychlení, je vhodné měřit právě zrychlení, protože integrací se vyhladí poruchové špičky a šумы, které se mohou vyskytovat v čistě naměřeném průběhu (tedy hodnoty jsou naměřené, nikoliv dopočtené). Vztah mezi zmíněnými veličinami je uveden v rovnici (1.15), která je uvedena na stránkách Univerzity Tomáše Bati [15].

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2r}{d^2t} \left(\frac{m}{s^2} \right) \quad (1.15)$$

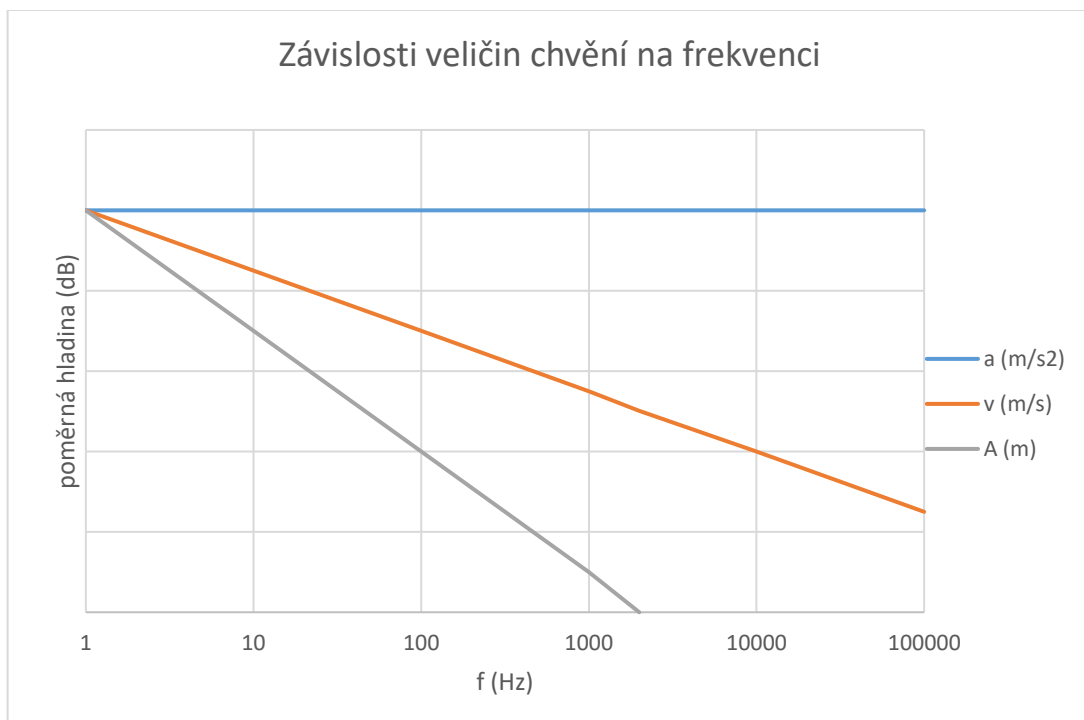
po úpravě:

$$r = \int v dt = \iint a dt \quad (m) \quad (1.16)$$

kde a (m/s^2) ... zrychlení,

v (m/s) ... rychlost,

r (m) ... výchylka.



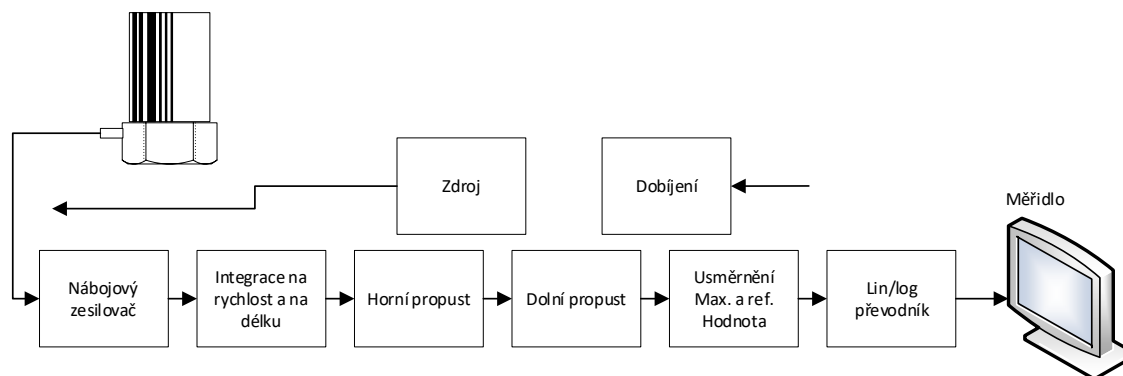
Graf 2: Graf závislosti veličin chvění na frekvenci (překresleno z [2])

Pro výpočet útlumu zrychlení, rychlosti, frekvence a síly je také v knize chvění a hluk [2] znázorněna tabulka, kde jsou uvedeny definice, tedy vzorec pro výpočet a vztažná hodnota. Tabulka je znázorněna níže.

Tabulka 2: Vztažné hodnoty veličin chvění pro decibelovou stupnici (převzato z [2])

Veličina	Definice	Vztažná hodnota
Hladina zrychlení chvění	$L_a = 20 \log \left(\frac{a}{a_0} \right)$	$a_0 = 10^{-6} \frac{m}{s^2}$
Hladina rychlosti chvění	$L_v = 20 \log \left(\frac{v}{v_0} \right)$	$v_0 = 10^{-9} \frac{m}{s}$
Hladina výchylky chvění	$L_A = 20 \log \left(\frac{A}{A_0} \right)$	$A_0 = 10^{-6} m$
Hladina síly	$F = 20 \log \left(\frac{F}{F_0} \right)$	$F_0 = 10^{-6} N$

V knize [2] je dále uveden univerzální měřič chvění, což je vlastně piezoelektrický snímač chvění, který je připojen přímo na vstup nábojového zesilovače. Následně probíhá integrace zrychlení na rychlost, popřípadě výchylku. Nastavení zesilovaného rozsahu lze provádět za pomoci horní a dolní propusti. Signál se následně usměrní a převede na logaritmické měřítko. Výsledné hodnoty se zobrazí na měřidlu. Blokové schéma je znázorněné na obrázku níže. Pokud se měří vibrace na mechanických soustavách, kde je potřebná znalost vektoru chvění a využívá se referenční snímač je výhodné použít vícekanálové soustavy.



Obr. 9: Blokové schéma univerzálního snímače chvění (překresleno z [2])

Dále se v knize [2] uvádí, že měření na mechanických soustavách lze rozdělit na dvě podkategorie, a to analýzu signálů (vyšetřování provozních kmitů) a analýzu systémů – měření vidů kmitání (měří se kmitočet, tlumení a tvar vlastních frekvencí – vidů). Systémy nejvíce kmitají v rezonanci, kde dynamické síly budí vlastní kmity buďto celých mechanických systémů, nebo jejich částí. V případě měření na kmitajícím panelu je vhodné provést právě analýzu systémů, kde se touto metodou zjišťují vidy kmitání. Z výsledné křivky měření lze určit, zda – li v systému nedochází k rezonanci (křivka bude hladká),

nebo naopak k rezoncancím dochází (na křivce budou špičkové náběhy), tedy za předpokladu, že je znám průběh budící síly, protože její maxima a minima mohou podstatně ovlivnit výsledky odezvy. Vidy kmitání lze popsat kmitočtem, tlumením a tvarem vidu. Kmitočtovou charakteristiku lze získat postupným měřením jednotlivých frekvencí.

1.6 Měření akustické pohltivosti

Dle autorů knihy *Acoustic absorbers and diffusers: theory, design and application* [16] se hodnota doby dozvuku T_{60} získá změřením doby, během které dojde k poklesu hladiny akustického tlaku o 60 dB, od doby kdy zvuk ustál. Jinými slovy, po vypnutí akustického zdroje měříme čas, dokud hladina akustického tlaku neklesne o 60 dB. Z impulzní odezvy se nejprve vypočítá zpětnou integrací Schroederova křivka a teprve poté se hodnotí doba dozvuku. Dle Sabineho lze vypočítat dobu dozvuku z objemu místnosti V (m^3) a absorpce A .

Dle knihy *Stavební akustika 1* [17] lze měřit činitel zvukové pohltivosti dvěma metodami. První metoda vychází z normy ČSN ISO 354 (73 0535), kdy k měření dochází v dozvukové komoře při všesměrovém dopadu zvukových vln. Činitel zvukové pohltivosti získaný touto metodou se značí α_s . U tohoto měření se zjistí doba dozvuku v měřící dozvukové místnosti bez měřeného vzorku a následně změřením doby dozvuku v totožné místnosti se vzorkem. Následně se stanoví ekvivalentní pohltivá plocha A (m^2) měřeného vzorku. Výsledkem měření jsou kmitočtové charakteristiky zvukové pohltivosti a ekvivalentní pohltivé plochy, které lze vyjádřit tabulkou, nebo grafem. Dle Krňáka [6] jsou v normě ČSN 73 0535¹ uvedeny podmínky pro měření činitele zvukové pohltivosti, kde jedna z podmínek je velikost plochy měřeného vzorku, který by měl disponovat plochou 10 až 12 m^2 .

Druhá metoda vyplývá z normy ČSN 73 0501, jak je uvedeno v textu [17]. Jedná se o měření zvukové pohltivosti v interferometru. Tato metoda je vhodná pouze pro malé vzorky, ovšem se zde hodnotí pouze kolmý dopad zvukových vln. Proto se tato metoda využívá pro stanovení zvukového činitele jednotlivých materiálů, nikoli systémů, či místností.

¹ Starší značení normy ISO 354

2 Praktická část

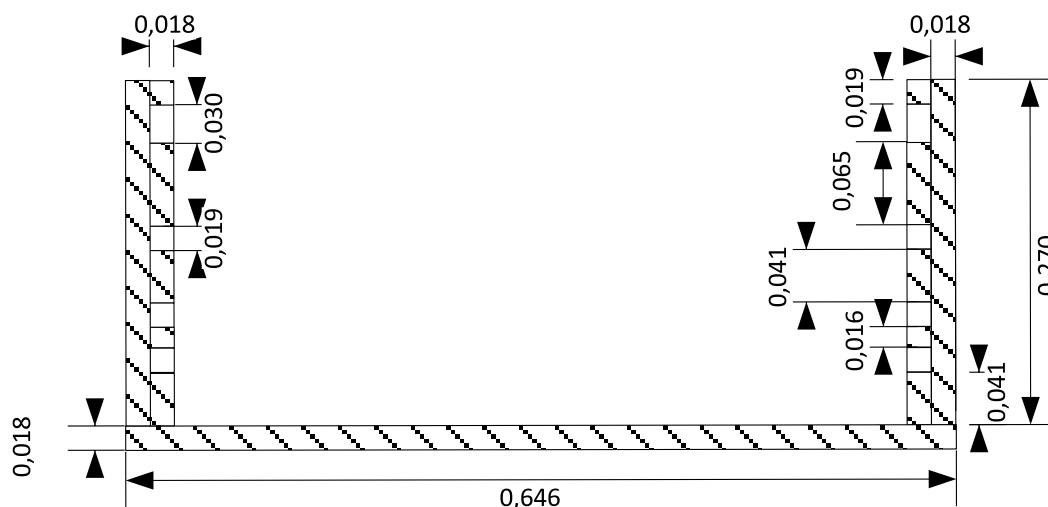
Praktická část je zaměřena na návrh kmitajícího panelu a změnu mechanických, respektive akustických vlastností pomocí vhodného elektromechanického aktuátoru. Kmitající panel musí být upraven, aby bylo možné do soustavy umístit prvky, díky kterým bude možné měnit rezonanční frekvenci a činitel zvukové pohltivosti za pomoci změny elektrické veličiny. Dále je v této části popsán postup měření vibrací desky a činitele zvukové pohltivosti s následným vyhodnocením získaných dat.

2.1 Návrh kmitajícího panelu

Pro prvotní experimenty bylo využito konstrukce z bakalářské práce Martina Lucáka [18]. Velikost desky je 600 x 600 mm, jelikož se jedná o zavedený rastr pro běžně používané akustické prvky. V této práci byla konstrukce navržena tak, aby bylo možné ji nedestruktivně předělat a zajistit tak určitou variabilitu. Mimo samotné konstrukce rámu, která je vytvořena z MDF desek silných 1,8 cm, bylo nezbytné vymyslet vhodné uložení desky. Materiál desky byl zvolen MDF 10 mm, kvůli vhodným výsledkům ze zjednodušeného vzorce pro výpočet rezonanční frekvence (rovnice (1.8)). Vyhodnocení probíhalo na základě tabulky s prakticky využitelnými výškami vzduchového polštáře, tato tabulka je uvedena níže. Z tabulky jsou zvýrazněny hodnoty pro plošnou hmotnost MDF desky o šířce 10 mm (6,58 kg), tedy rezonanční frekvence pro výšku vzduchového polštáře 65 mm je rovna přibližně 92 Hz, pro 125 mm pak 66 Hz, pro 160 mm rovna přibližně 59 Hz a pro 220 mm přibližně 50 Hz.

Tabulka 3: Tabulka pro zjednodušený výpočet hodnot rezonanční frekvence

$f_r = 60/(M_s*d)^{(1/2)}$	$d_1 (m)$	$d_2 (m)$	$d_3 (m)$	$d_4 (m)$
$M_s (kg)$	0,065	0,125	0,16	0,22
5	105,2	75,9	67,1	57,2
5,5	100,3	72,4	64,0	54,5
5,8	97,7	70,5	62,3	53,1
6	96,1	69,3	61,2	52,2
6,3	93,8	67,6	59,8	51,0
6,58	91,7	66,2	58,5	49,9
6,7	90,9	65,6	58,0	49,4
6,8	90,2	65,1	57,5	49,1
6,9	89,6	64,6	57,1	48,7
7	88,9	64,1	56,7	48,3
7,25	87,4	63,0	55,7	47,5
7,5	85,9	62,0	54,8	46,7



Obr. 10: Nákres konstrukce deskového rezonátoru v m

2.2 Návrh proměnného/ladícího obvodu

Vzhledem k možnostem komerčně dostupných elektromechanických aktuátorů byl zvolen jako vhodný aktuátor elektromagnet, jehož kotva byla upevněna na kmitající desku. Tímto zvoleným způsobem vznikly dvě myšlenky pro ladění kmitajícího panelu změnou elektrické veličiny.

První způsob spočívá ve změně stejnosměrného elektrického napětí přivedeného do elektromagnetu. Dle teorie by mělo zvyšující se napětí úměrně působit na přitažlivou sílu. Daná přitažlivá síla, působící na kmitavou desku, by měla zapříčinit přitažení desky, a tím zvýšit tuhost pružného uložení, což by znamenalo snížení výchylky kmitání panelu, respektive snížení koeficientu zvukové pohltivosti α . Mimo to by se přitažením desky mělo dosáhnout snížení hodnoty mechanické poddajnosti, a to na základě rovnice uvedené v knize Elektro – akustika a akustika [11]. V případě maximálního přitažení by mělo dojít k úplnému zastavení kmitání vlivem pevného dosednutí desky na konstrukci.

$$F_s = s * (b - l) \quad (2.1)$$

F_s (N) ... vratná síla elastoru,

$s = l/c$ (m/N) ... tuhost elastoru,

c (N/m) ... poddajnost elastoru,

b (m) ... šířka bez působení síly,

l (m) ... šířka v momentě působení síly.

Z rovnice výše poté vyplývá vztah pro změnu poddajnosti na působení přitažlivé síly elektromagnetu, což má za následek zmenšení hodnoty l , ale zároveň se zvýší hodnota F_s , tudíž v důsledku dojde ke snížení hodnoty poddajnosti c_m .

$$c_m = \frac{b - l}{F_s} \quad (2.2)$$

c_m (N/m) ... poddajnost pružného uložení panelu.

Druhý způsob využívá možnosti změny rezonanční frekvence připojením vhodného RLC členu k elektromagnetu. Princip této myšlenky spočívá v přenosu energie kmitající desky (akustická vlna dopadem rozkmitá desku) přes kotvu připevněnou k desce do elektromagnetu uchyceného k pevné konstrukci systému, a naopak elektromagnet svou silou ovlivní rezonanční frekvenci kmitajícího panelu. Vzhledem k analogickým vlastnostem kmitajícího panelu a vlastností elektromagnetu byl vybrán jako ladící RLC obvod kondenzátor.

Připojením vhodného RLC obvodu s mechanickým převodem lze ovlivnit jednotlivé parametry kmitajícího panelu. V tomto případě se jedná o mechanické parametry poddajnost c_m , hmotnost m_m a odpor r_m .

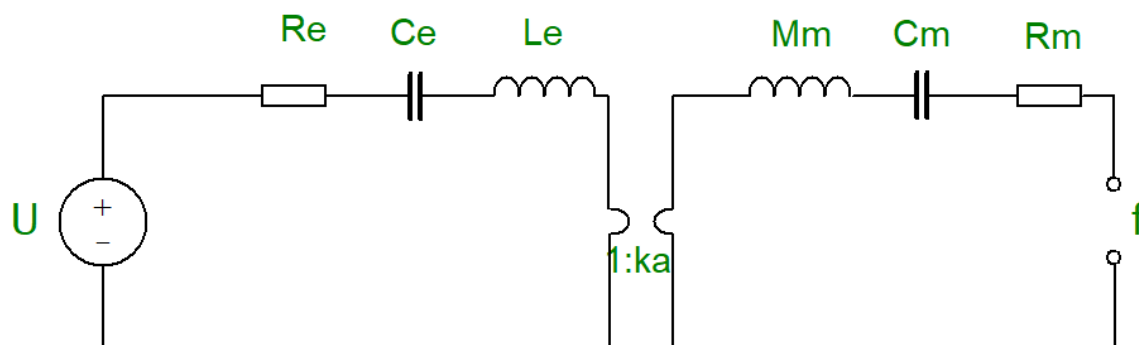
Návrh náhradního schématu

Dle knihy Praktická elektroakustika [7] lze použít náhradní analogii mezi elektrickou a akustickou stranou obvodu. Náhradní elektrický obvod lze transformovat u měničů výchylkových pomocí transformátoru a u měničů rychlostních pomocí gyrace. Gyrací převod lze provést za pomoci tabulky, která je níže. Dalším pravidlem je, že převod přes gyrátor mění uspořádání a to tak, že z paralelně zapojené součástky se stává sériově zapojená součástka a naopak. Elektromagnetický systém je měnič rychlostní, a tedy je potřeba použít převod gyrátorem.

Tabulka 4: Převodová tabulka pro náhradní schéma (převzato z [7])

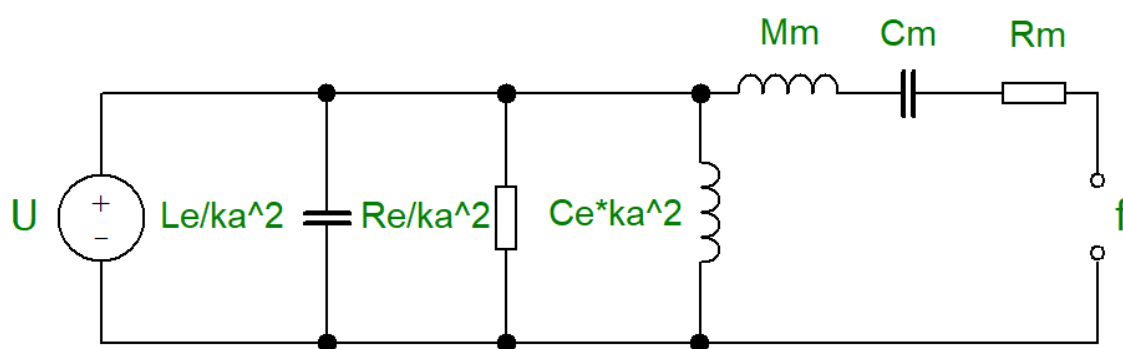
Elektrické veličiny	Mechanické veličiny
u	F
i	v
$G = r/k_a^2$	r
$L = c \cdot k_a^2$	c
$C = m/k_a^2$	m

Náhradní schéma pro kmitající panel a elektromagnet je znázorněno níže. Na levé straně, kde je náhradní obvod elektromagnetu, je mimo cívky a odporu také kondenzátor, jelikož kapacita elektromagnetu je pro dané řešení důležitým faktorem. Faktor $1:k_a$ znázorňuje gyrační převod, kde koeficient k_a je dán rovnicí (1.10).



Obr. 11: Náhradní schéma kmitajícího panelu s elektromagnetem

Po převodu a dodržení pravidel viz. odstavec výše, na základě tabulky 5 vznikne náhradní schéma, které již neobsahuje gyrátor a lze z hodnot jednotlivých prvků obvodu vypočítat rezonanční frekvenci. Rezananční frekvence se vypočítá po úpravách a dosazením do rovnice (1.11), čím vznikne rovnice (2.3).



Obr. 12: Převedené náhradní schéma kmitajícího panelu s elektromagnetem

$$f_r = \frac{1}{2\pi} * \sqrt{\frac{1}{(m_m + C_e * k_a^2) \left(\frac{c_m * \frac{L_e}{k_a^2}}{\left(c_m + \frac{L_e}{k_a^2} \right)} \right) - \frac{R_m + \frac{R_e}{k_a^2}}{2 * (m_m + C_e * k_a^2)}}} \quad (2.3)$$

f_r (Hz) ... rezonanční frekvence systému,

c_m (N/m) ... poddajnost,

L_e (H) ... indukčnost ladícího obvodu,

K_a (-) ... převodní koeficient elektromagnetického systému,

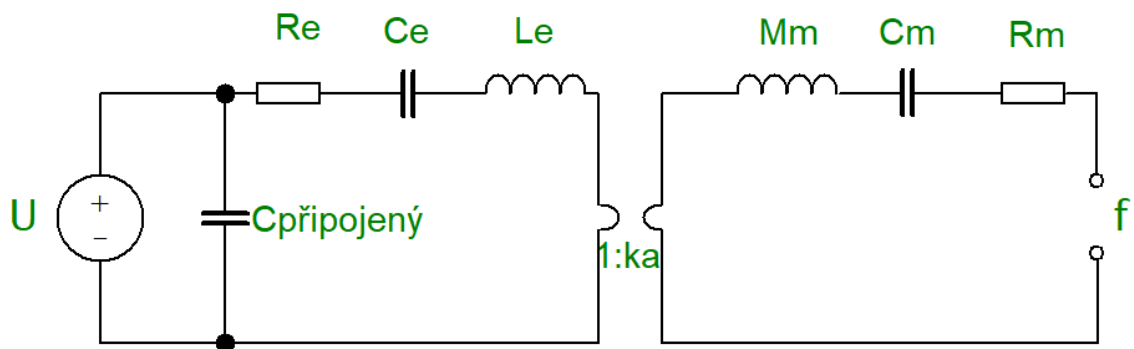
m_m (kg) ... hmotnost kmitající desky,

C_e (F) ... kapacita ladícího obvodu,

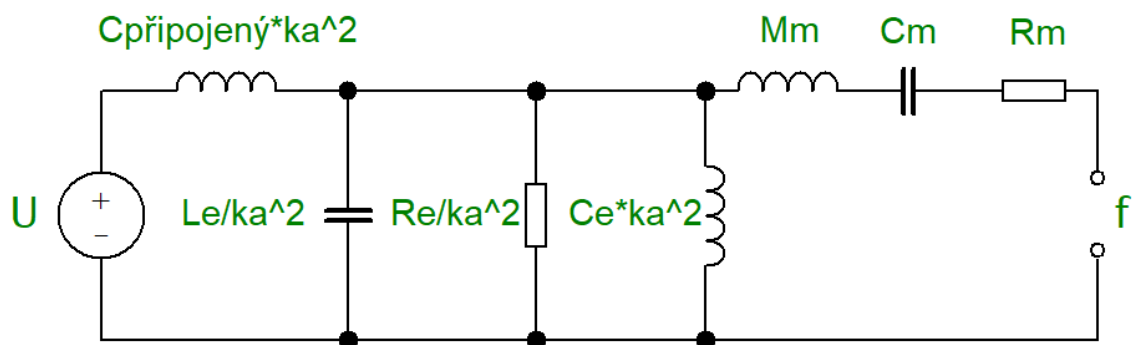
R_m (Pa*s/m) ... mechanický odpor,

R_e (Ω) ... elektrický odpor ladícího obvodu.

V případě uložení na sylomer, který je umístěn pouze v rozích, je nutné místo zjednodušeného vzorce (rovnice (1.12)) zapotřebí použít vzorec z rovnice (1.11). Po dosazení hodnot vyjde rezonanční frekvence bez připojeného ladícího systému $f_r = 132$. V případě připojení kondenzátoru na výstup elektromagnetu, by mělo dojít k posunu rezonanční frekvence. Kondenzátor byl vložen do obvodu viz schéma níže.



Obr. 13: Náhradní schéma s připojeným ladícím kondenzátorem



Obr. 14: Náhradní schéma po transformaci

V případě daného schéma by se v rovnici (2.3) změnila hodnota C_e , která by byla rovna hodnotě paralelního součtu kapacit viz rovnice (2.4) hodnota přenosového koeficientu je zavedena v rovnici pro výpočet rezonanční frekvence.

$$C_{celková} = \frac{C_e * C_{připojený}}{C_e + C_{připojený}} \quad (2.4)$$

Hodnota převodního faktoru k_a je dle vzorečku (1.10) silně závislá na hodnotě proudu I_0 , který do obvodu teče, jelikož hodnoty indukčnosti L_0 a šířky vzduchové mezery l_0 jsou téměř konstantní a dosahují hodnot $L_0 = 132$ mH a $l_0 = 8$ mm. To znamená, že poměr mezi těmito hodnotami je roven 16,5 a při vynásobení jmenovitým proudem elektromagnetu o hodnotě od 0,5 A do 1 A, odpovídá tato hodnota velikosti faktoru k_a od 8,25 do 16,5. V případě malých hodnot proudu např. v řádu jednotek pA by faktor k_a byl velmi malý a ladící obvod by neměl žádný vliv na výslednou rezonanční frekvenci.

Výběr elektromagnetu

Ladící obvod, kterým by mělo být možné měnit vibrační charakteristiku je složen z elektromagnetu, jehož kotva je upevněna ke kmitající desce. Elektromagnety, které jsou komerčně dostupné mají různé vlastnosti a bylo potřeba určit alespoň základní požadavky. Vzhledem k výchylce desky v řádu 10 μm je potřebná pohyblivost kotvy alespoň 0,02 mm. Dalším parametrem pro výběr elektromagnetu byla jeho tažná síla. Zde při stanovení minimální meze hrála roli především hmotnost kmitající desky, což je MDF deska o tloušťce 10 mm a celkové váze 2,37 kg, tedy přibližně 23,2 N.

Jako vhodný pro aplikaci byl na základě stanovených vlastností zvolen tažný elektromagnet JF-1039B 24VDC, který má zdvih 10 mm a sílu 25 N. Zdvih 10 mm je dostačující pro velikost vibrační desky, jelikož deska kmitá maximálně v řádu 10 μm , a tím pádem zde vzniká i možnost posunu kotvy vůči elektromagnetu (změna šířky vzduchové mezery).

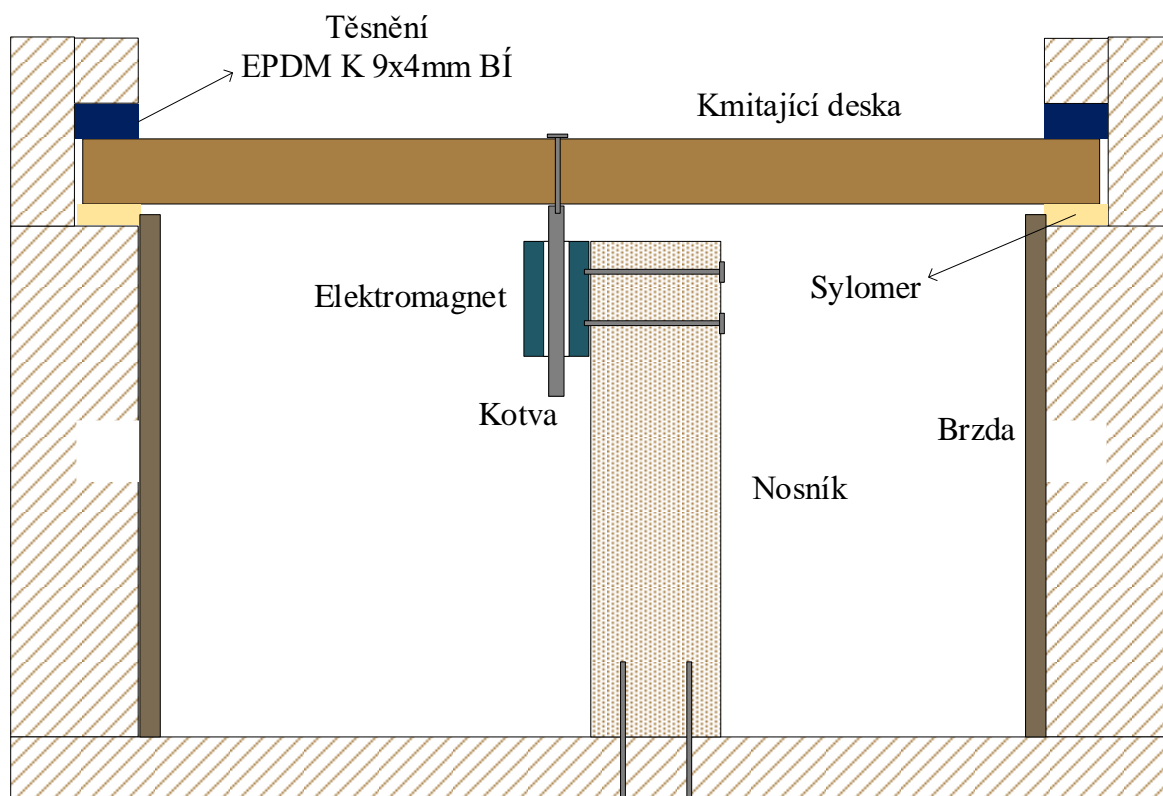
2.3 Implementace ladícího obvodu do konstrukce kmitajícího panelu

Vzhledem k tomu, že ladící obvod je tvořen elektromagnetem, ke kterému by mělo být možné variabilně připojovat různé prvky, bylo zapotřebí elektromagnet implementovat do konstrukce kmitajícího panelu. Před implementací bylo zapotřebí konstrukci elektromagnetu upravit, respektive upravit kotvu elektromagnetu tak, aby bylo možné ji pevně spojit s kmitající deskou. Nejpevnějším možným způsobem je uchycení na šroub, což znamenalo odříznout původní úchyty kotvy a do kotvy vyvrtat otvor a vytvořit závit. Velikost průměru závitu byla zvolena 4 mm, vzhledem k průměru kotvy, a hloubka přibližně 5 mm, což je dostatečné pro pevné přichycení. Kotva byla přichycena k desce šroubem M4 x 15 mm.

Uchycení cívky elektromagnetu muselo být uděláno tak, aby co nejméně kmitalo. Zde vznikly dva návrhy. Jeden návrh byl vynést magnet přes kříž, který by byl vložen do mezipatra, ovšem toto řešení by mohlo ovlivňovat výsledky vzhledem k rozkmitu kmitající desky by nemělo dostatečnou tuhost. Druhým a použitým řešením v této práci je vnesení magnetu od zadní části konstrukce přes dřevěný nosník, který je přišroubovaný k zadní části konstrukce. Elektromagnet je přichycen k nosníku dvěma šrouby M4 x 45 mm viz Obr. 15.

Výstup elektromagnetu je přes svorky prodloužen a vyveden přes vyvrtaný otvor v konstrukci, díky čemu je možné volitelně měnit připojení na výstup elektromagnetu mimo

konstrukci kmitajícího panelu. Parametry ladícího obvodu tedy lze měnit spojením (zkratováním), či rozpojením vývodů, připojením kondenzátoru, či zdroje napětí.



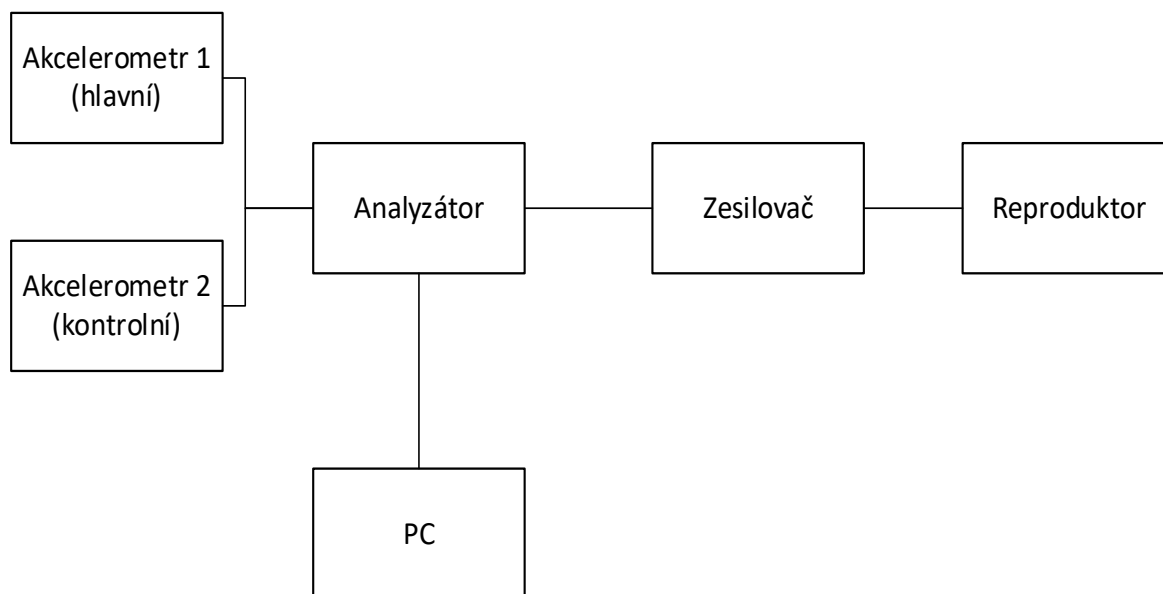
Obr. 15: Uložení ladícího obvodu do kmitajícího panelu

2.4 Měření akustických a mechanických vlastností kmitajícího panelu

Měření vibrací

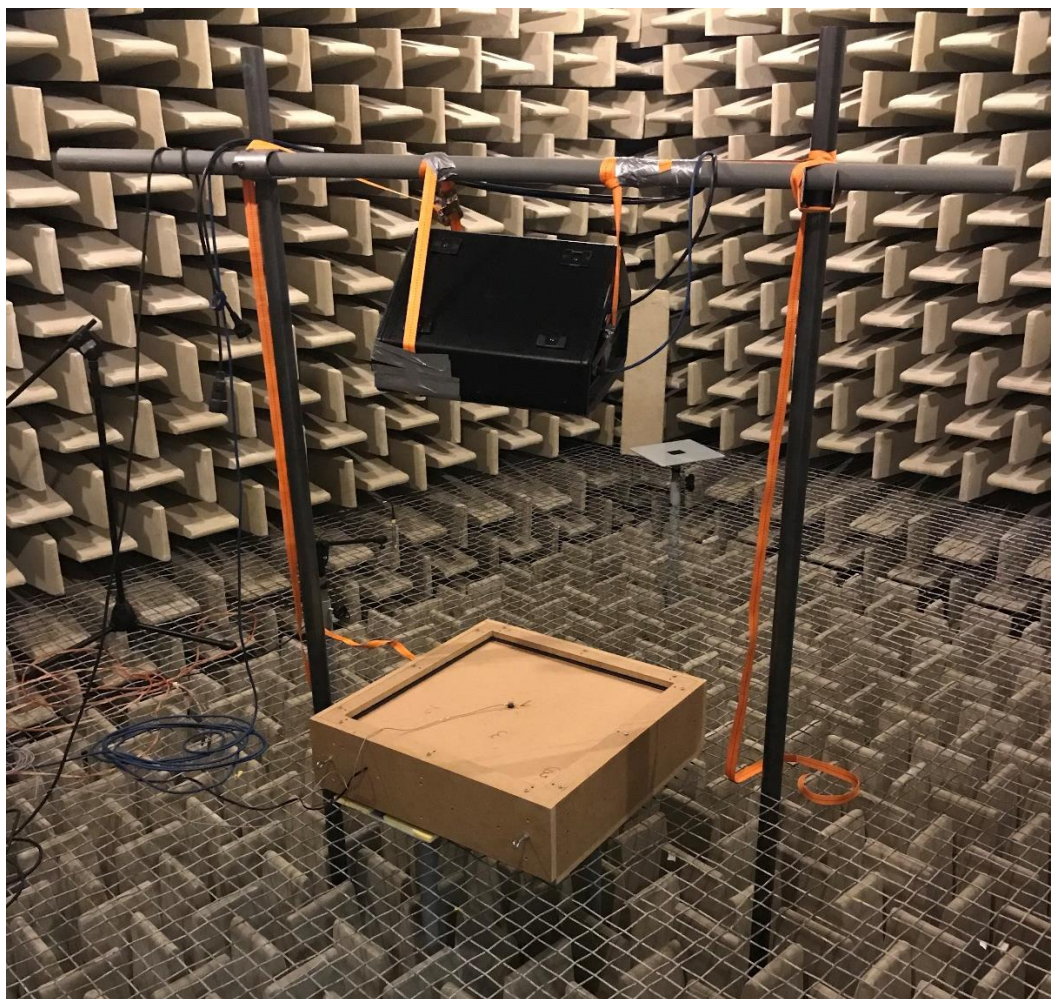
Vibrace se měřily za pomoci analyzátoru, který byl připojen k počítači. Snímač byl upevněn přes kolejničky za pomoci tavné pistole do středu desky, jelikož se uvažovalo pístové kmitání, které je typické pro konstrukce typu kmitající panel. Pro kontrolu vibrací konstrukce byl jeden snímač připevněn i mimo kmitající desku, a to ze strany na konstrukci panelu. Vibrace konstrukce byly zanedbatelné oproti sledovanému kmitání čelní desky.

Čelní deska byla buzena dopadajícím zvukem z reproduktoru zavěšeného nad panelem. Jako budicí signál byl použit přeladovaný sinus o frekvenci 50 až 300 Hz, jelikož se očekávala rezonanční frekvence f_r kolem 130 Hz. Rozsah byl nastaven do 300 Hz pro případné pozorování kmitání na vyšších frekvencích.



Obr. 16: Schéma zapojení měření

Měření vibrací probíhalo v bezdrazové komoře FEL ZČU, z důvodu zamezení působení vlastních kmitů prostředí a snížení okolního hluku na minimum. Vzhledem k velmi měkkému uložení desky bylo nutné systém položit vodorovně, tedy na zadní stranu systému, aby nedošlo k narušení funkčnosti použitého pružného materiálu (sylomer). Celá konstrukce kmitajícího panelu byla uložena na antivibrační materiál, který byl na podpěrách uložených na fixačních bodech místnosti. Toto uložení bylo zvoleno kvůli co největšímu zamezení vlivu vibrací okolních konstrukcí. Jako zdroj vibrací byl zvolen reproduktor RCF NX10 SMA, který byl zavěšen nad kmitajícím panelem tak, aby zvukové vlny dopadaly kolmo na čelo desky. Nosnou konstrukci tvořily lešenářské trubky, které byly umístěny do fixních bodů na podlaze bezdrazové komory. K nosné konstrukci byl uchycen reproduktor za pomoci upínacích pásů. Výsledné rozložení lze vidět na Obr. 17.



Obr. 17: Rozložení pro měření vibrací

2.5 Zhodnocení výsledků vlivu napětí (přitažlivé síly)

Jak bylo řečeno v části návrh proměnného/ladícího obvodu, tak jsou pro tuto práci uvažovány dvě změny akustických, respektive mechanických vlastností na základě změny elektrických parametrů. První myšlenka spočívá ve změně tuhosti na základě přitažné síly elektromagnetu a druhá myšlenka spočívá ve změně rezonanční frekvence připojením vhodných pasivních prvků k elektromagnetu.

Výchozí stav

Jako výchozí stav je považováno měření vibrací pro uložení na sylomeru, který podpírá čelní desku pouze v rozích konstrukce. Přičemž elektromagnet je naprázdno, a tudíž nemá na chování rezonátoru žádný vliv. Výsledná charakteristika je znázorněna na grafu níže.



Graf 3: Výchozí stav vibrací kmitajícího panelu (bez působení ladícího systému) v závislosti na frekvenci

Jak lze vidět, tak vibrace silně zesilují od 105 Hz a maxima dosáhnou při hodnotě frekvence 132 Hz, poté následuje pokles do 200 Hz. Vzhledem k největší hodnotě zrychlení při $f = 132$ Hz lze říci, že kmitající deska rezonuje právě při 132 Hz. Rychlost při rezonanci zde dosahovala hodnot 1,37 mm/s.

Přiložené napětí 15 V

Toto provedení vzniklo připojením stejnosměrného napětí o velikosti 15 V na výstupní svorky elektromagnetu, přičemž hodnota proudu byla 0,6 A.

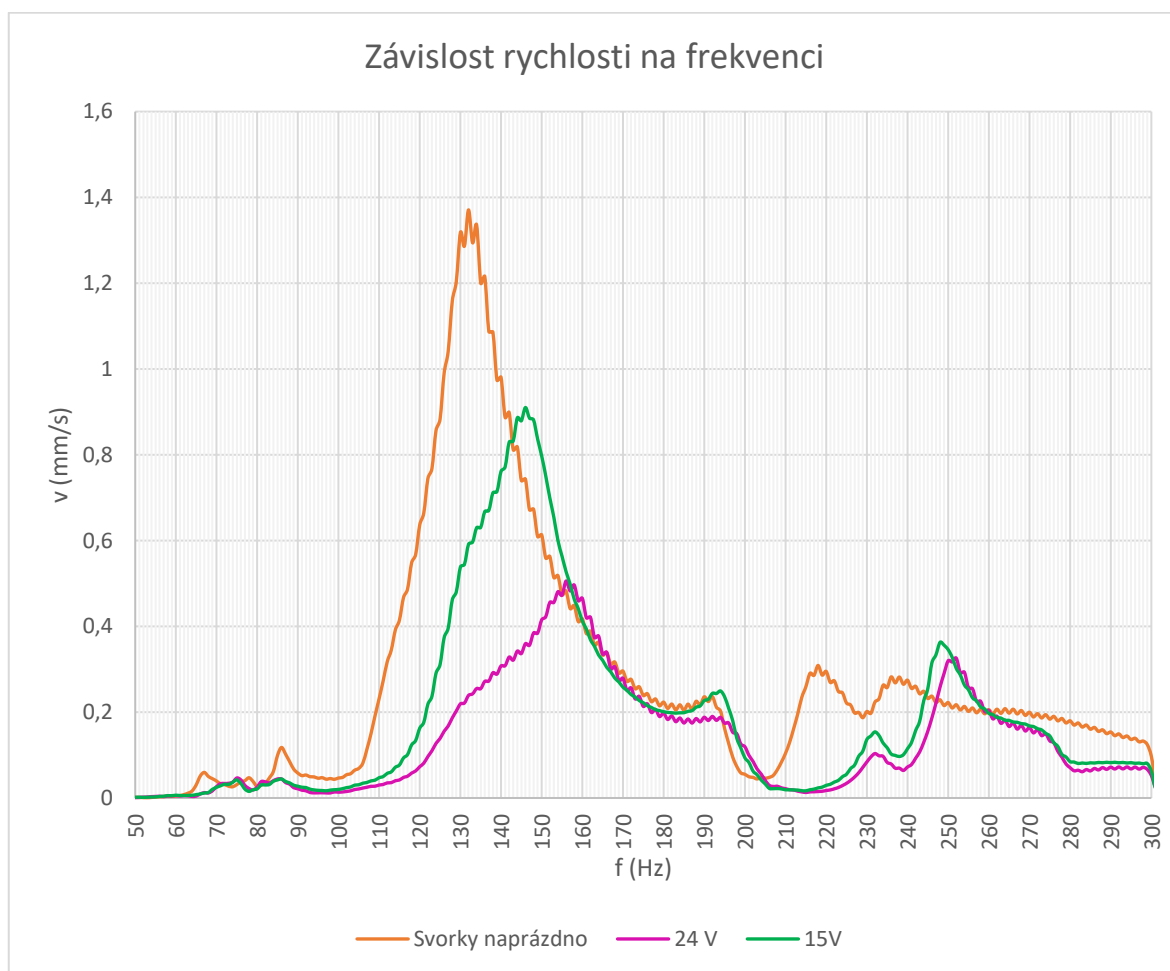
Jak lze vidět na grafu níže, tak nárůst rychlosti začal při 111 Hz a k poklesu došlo od 146 Hz do 208 Hz. Na základě těchto hodnot lze říci, že rezonanční frekvence f_r se rovnala hodnotě 146 Hz. Hodnota rychlosti při rezonanci byla naměřena na 0,91 mm/s.

Přiložené napětí 24 V

Toto provedení vzniklo obdobně jako u předchozího výsledku, a to připojením stejnosměrného napětí o velikosti 24 V na výstupní svorky elektromagnetu, přičemž hodnota proudu tekoucího do elektromagnetu byla 1 A.

Na grafu níže lze vidět zvyšování hodnoty zrychlení od 100 Hz do 156 Hz a následný pokles do 217 Hz. Určení rezonanční frekvence je opět na základě největší naměřené rychlosti o hodnotě 0,51 mm/s a byla stanovena na 156 Hz.

Zhodnocení



Graf 4: Porovnání naměřených hodnot vibrací pro různé modifikace ladícího obvodu v závislosti na frekvenci

Jak si lze všimnout z grafu výše, tak elektromagnet svou silou ovlivnil vlastnosti systému. Změna byla sledována ve velikosti rychlosti kmitání (v tabulce níže uvedená jako v_{fr}), a to neúměrně v závislosti na velikosti přiloženého napětí. Ovšem zde došlo i k posunu rezonanční frekvence, a to vlivem změny poddajnosti. Tento fakt lze vysvětlit zvýšením tuhosti systému a zmenšením hodnoty poddajnosti pružného uložení, jelikož vlivem „přitažení“ desky došlo ke zmenšení výšky sylomeru a zároveň ke zvýšení jeho vratné síly. Tento fakt podkládají výsledky dle rovnice (1.11), které jsou součástí tabulky níže. V průběhu výpočtů bylo zjištěno, že akustický odpor, respektive mechanický odpor r_m nemá na výslednou rezonanční frekvenci skoro žádný vliv, proto jej lze během výpočtů zanedbat. K úplnému zastavení kmitání panelu nedošlo, jelikož elektromagnet neměl sílu přitáhnout desku přes sylomer ke konstrukci panelu, pro tuto možnost by se museli do konstrukce přidělat brzdy, instalace brzd by mohla vypadat jako na Obr. 15.

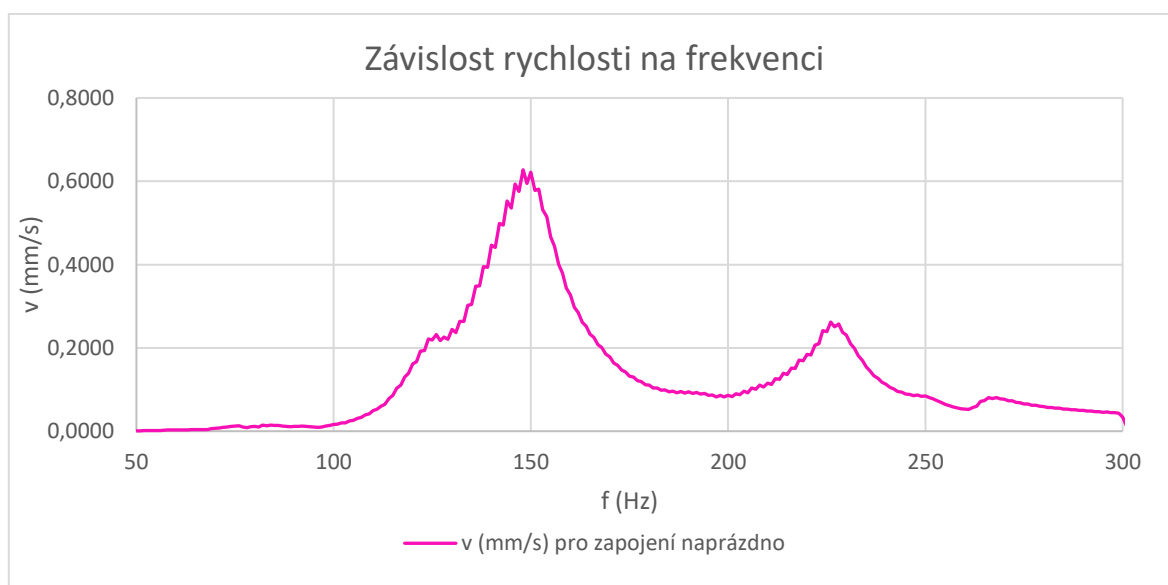
Tabulka 5: Porovnání naměřených a vypočtených hodnot vlivu síly elektromagnetu

U (V)	m_m (kg)	c_m ($\mu\text{N/m}$)	f_r , vypočtená (Hz)	f_r , naměřená (Hz)	v_{fr} (mm/s)
0	2,37	0,61	132,37	132	1,37
15	2,37	0,50	146,20	146	0,91
24	2,37	0,44	155,85	156	0,51

2.6 Zhodnocení výsledků vlivu připojeného kondenzátoru

Výchozí stav

Zde je jako výchozí stav opět brána varianta zapojení svorek elektromagnetu naprázdno. Rezonanční frekvence je zde posunuta oproti prvnímu měření kvůli jiným mechanickým vlastnostem. K této změně došlo vlivem jiného uspořádání konstrukce panelu, respektive rozdílným skládáním panelu (síla utažení šroubů atd.) Rezonanční frekvence výchozího stavu byla 148 Hz a velikost rychlosti 0,63 mm/s.

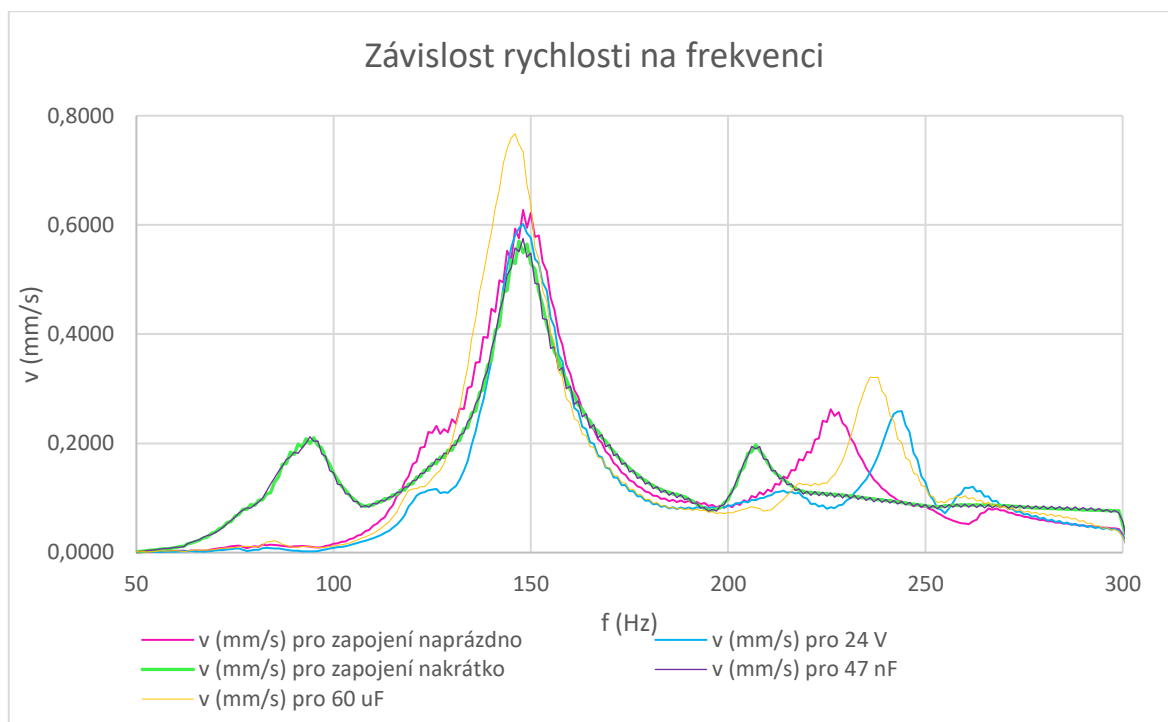


Graf 5: Výchozí stav pro měření vlivu kondenzátoru

Varianty zapojení

První varianta měření vlivu ladícího obvodu na rezonanční frekvenci je dána spojením svorek elektromagnetu nakrátko. Druhá a třetí varianta vznikla připojením kondenzátoru o hodnotě 60 μF a 47 nF.

Zhodnocení vlivu ladícího obvodu na mechanické/akustické vlastnosti



Graf 6: Zhodnocení vlivu kondenzátoru

Z grafu lze vidět, že hodnota hlavní rezonanční frekvence všech variant je téměř totožná a pohybuje se v rozmezí od 148 Hz do 149 Hz. Hodnota rychlosti byla při rezonanci od 0,56 mm/s do 0,76 mm/s, což mohlo být dáno okolními vlivy. Tudíž lze říci, že ladící obvod neměl na rezonanční frekvenci žádný vliv, jelikož elektrické vlastnosti elektromagnetického aktuátoru byli oproti mechanickým vlastnostem kmitajícího panelu zanedbatelné.

V rámci měření bylo zjištěno, že dochází k posunu frekvence druhého vrcholu. Při zapojení naprázdno byla špička rychlosti při 228 Hz, u zapojení nakrátko a připojeném kondenzátoru o hodnotě $C = 47$ nF byla špička rychlosti při 208 Hz a pro kondenzátor $C = 60$ μ F byla špička rychlosti při 238 Hz. Tato skutečnost je viditelná i u měření vlivu napětí, kdy je posun druhého vrcholu dán parametry zdroje, pro lepší orientaci bylo provedeno měření s připojeným napětím i pro danou konfiguraci (druhý vrchol je při frekvenci 242 Hz).

Svorky nakrátko a připojený kondenzátor 47 nF mají totožný průběh, jelikož hodnota připojeného kondenzátoru je přibližně 1000 x menší než kapacita elektromagnetu. Frekvence je v tomto případě menší než u výchozího stavu, který by měl mít čistě mechanické vlastnosti. U hodnoty připojeného kondenzátoru 60 μ F došlo k výraznému posunutí frekvence, a to jak oproti výchozímu stavu, tak stavu nakrátko. Posunutí frekvence druhého

vrcholu bylo možné, jelikož zde byly mechanické vlastnosti kmitajícího panelu srovnatelné s elektrickými vlastnostmi.

Měření činitele akustické pohltivosti α

Jak je uvedeno v teoretické části práce (1.6 Měření akustické pohltivosti), tak je zapotřebí splnit podmínky pro měření. Ovšem zde nastává problém, jelikož podmínka „vzorek musí disponovat plochou S_2 10 až 12 m²“, jelikož plocha vzorku je $S = 0,36$ m² a vytvořit minimálně 28 plně totožných systémů je v experimentálním provedení časově i finančně náročné. Při měření pouze na jednom prototypovém prvku by bylo možné činitel zvukové pohltivosti změřit, ale výsledné hodnoty by byly velmi zkreslené, či dokonce neznatelné. Právě kvůli těmto důvodům nebylo měření činitele akustické pohltivosti provedeno, ovšem určitý obrázek o pohltivých účincích kmitající desky s ladícím obvodem získat z měření vibrací, které je popsáno výše.

Zhodnocení a závěr

Prvním z cílů této práce bylo seznámení se s principem akustických pohltivých prvků pracujících na rezonančním principu. Zde byly popsány základní akustické veličiny, šíření a pohlcování zvuku a konstrukce prvků založených na rezonančním principu.

Druhá část teoretického úvodu poté tvoří nejnútnejší podklady pro návrh laditelného kmitajícího panelu a jsou zde uvedeny analogie mezi elektro-akustickými, respektive mechanickými vlastnostmi, základní popis elektromagnetického měniče a měření mechanických (vibrace) a akustických veličin (činitel zvukové pohltivosti α).

Druhým cílem práce bylo navrhnout kmitající panel, jehož tlumení bude laditelné pomocí vhodného elektromechanického aktuátoru. Jako vhodný aktuátor byl zvolen elektromagnet. Pro ladění rezonanční frekvence kmitajícího panelu byly uvažovány a navrženy dvě možnosti, první možnost spočívala ve změně tuhosti systému vlivem přitažení elektromagnetu a druhý způsob uvažoval změnu rezonanční frekvence vzájemným působením kmitajícího panelu a elektromagnetu s připojeným kondenzátorem.

Třetí cíl spočíval v měření mechanických vlastností kmitajícího panelu. Akustické vlastnosti zastupuje v tomto případě činitel akustické pohltivosti α , který se neměřil kvůli malé ploše vzorku. Mechanické vlastnosti v tomto případě reprezentuje měření vibrací kmitající desky.

První způsob laditelnosti, tedy změna přitažlivé síly elektromagnetu vlivem velikosti napětí se prokázala jako velmi účinná. Nejen, že došlo ke změně velikosti rychlosti kmitání desky, ale i k posunutí rezonanční frekvence vlivem změny poddajnosti uložení c_m . Dle výsledků lze říci, že se zvyšujícím se napětím dochází k menším výchylkám kmitající desky a zároveň se zvyšuje hodnota rezonanční frekvence. K úplnému zastavení panelu by bylo zapotřebí instalovat do konstrukce brzdy.

Druhý způsob laditelnosti za pomoci změny kapacity elektrického obvodu se po připojení kondenzátoru prokázal až posunutím druhého vrcholu, jelikož první vrchol (rezonanční frekvence) byl dán mechanickými vlastnostmi kmitajícího panelu, jejichž vliv byl srovnatelný až v okolí druhého vrcholu.

Práce by mohla pokračovat snížením hmotnosti desky, popřípadě použitím výrazně silnějším elektromagnetem kvůli zvýšení koeficientu k_a , nebo změnou elektromechanického aktuátoru, například místo elektromagnetického systému využít vlastnosti elektrodynamického.

Literatura

- [1] NOVÝ, Richard. *Hluk a chvění*. 3. vyd. Praha: ČVUT v Praze, 2009. ISBN 978-80-01-04347-9.
- [2] BERAN, Vlastimil. *Chvění a hluk*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2010. ISBN 978-80-7043-916-6.
- [3] *Pohlcování zvuku, šíření hluku ve volném a uzavřeném prostoru* [online]. nedatováno [vid. 2021-04-22]. Dostupné z: http://ufmi.ft.utb.cz/texty/env_fyzika/EF_04.pdf
- [4] KOLMER, Felix a Jaroslav KYNCL. *Prostorová akustika*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1980.
- [5] KAŇKA, Jan. *Dutinové rezonátory a kombinované konstrukce - TZB-info* [online]. [vid. 2021-04-28]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/akustika-staveb/231-dutinove-rezonatory-a-kombinovane-konstrukce>
- [6] KRŇÁK, Milan. *Akustické obklady*. Praha: VÚZORT, 1971.
- [7] SMETANA, C. *Praktická elektroakustika*. Praha: SNTL, 1981.
- [8] FIŠAROVÁ, Zuzana. *Stavební fyzika – Stavební akustika v teorii a praxi*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2014. ISBN 978-80-214-4878-0.
- [9] BERANEK, Leo L. a Tim J. MELLOW. *Acoustics: Sound Fields and Transducers*. Oxford: Elsevier Inc., 2012. ISBN 978-0-12-391421-7.
- [10] *ReproMania.NET | Teorie | Parametry reproduktorů* [online]. [vid. 2022-03-08]. Dostupné z: <http://www.repromania.net/teorie/parametry-reproduktoru.php>
- [11] ŠKVOR, Zdeněk. *Elektro-akustika a akustika*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2012. ISBN 978-80-01-025034-7.
- [12] BOUZEK, Stanislav. *Akustické tlumící prvky s řízenou pohltivostí*. B.m., 2019. ZČU.
- [13] KNITR, Jindřich. *NEDESTRUKTIVNÍ METODY DETEKCE BIOLOGICKÉ AKTIVITY DŘEVOŠKŮDCŮ* [online]. B.m., 2014. VUT v Brně. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=86213
- [14] *ELEKTROAKUSTICKÁ ZAŘÍZENÍ - výběr z učebních textů* [online]. Dostupné z: <https://www.roznovskastredni.cz/~fuchs/download/Akustika.pdf>
- [15] *Kinematika* [online]. [vid. 2022-03-14]. Dostupné z: https://ufmi.ft.utb.cz/texty/zakl_fyz/F1_01.pdf
- [16] COX, Trevor J. a Peter D'ANTONIO. *Acoustic absorbers and diffusers: theory, design and application*. 2. vyd. New York: Taylor & Francis, 2009. ISBN 978-

- 0415471749.
- [17] VAVERKA, Jiří, Václav KOZEL, Libor LÁDYŠ, Miloš LIBERKO a Josef CHYBÍK. *Stavební fyzika I. Urbanistická, stavební a prostorová akustik*. Brno: VUTIM, 1998. ISBN 80-214-1283-6.
- [18] LUCÁK, Martin. *Konstrukce nízkofrekvenčních tlumicích akustických prvků na principu kmitajících panelů*. B.m., 2020. Západočeská univerzita v Plzni.