

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav výrobních strojů a zařízení



Bakalářská práce

Návrh laditelného dynamického hltiče s magnety

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Petr** Jméno: **Robin** Osobní číslo: **492456**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav výrobních strojů a zařízení**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Návrh laditelného dynamického hltiče s magnety

Název bakalářské práce anglicky:

Design of a Tunable Mass Damper With Magnets

Pokyny pro vypracování:

Popis tématu: cílem práce je zmapovat možnosti využití magnetů, jakožto pružného prvku v zařízeních potlačujících vibrace. Vznikne ucelený přehled zařízení a přístupů využívající magnety jako pružné elementy. Na základě provedené rešerše vznikne konstrukční návrh pasivního přeladitelného hltiče; osnova práce: rešerše současných řešení a přístupů i mimo oblast obráběcích strojů, simulace pasivního dynamického hltiče s magnety, tři konstrukční návrhy dynamického hltiče s magnety umožňující frekvenční přeladění hltiče; rozsah grafické části: výkres sestavy hltiče s magnety a vybrané výrobní výkresy; rozsah textové části: 45 stran.

Seznam doporučené literatury:

SEDLÁK, Bedřich a Ivan ŠTOLL. Elektřina a magnetismus. Praha: Academia, 1993. ISBN 80-200-0172-7;
SHUVRA, Das. Modeling and Simulation of Mechatronic Systems using Simscape. Detroit: University of Detroit Mercy, 2020. ISBN 978-1-68173-735-5

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Štěpán Fiala, Ph.D. ústav výrobních strojů a zařízení FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Ing. Lukáš Novotný, Ph.D. ústav výrobních strojů a zařízení FS

Datum zadání bakalářské práce: **29.03.2022**

Termín odevzdání bakalářské práce: **26.05.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2022**

Ing. Štěpán Fiala, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

Ing. Matěj Sulitka, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl v příloženém seznamu veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 25. 5. 2022

.....

podpis

Poděkování

Bakalářská práce byla zpracována na Ústavu výrobních strojů a zařízení, FS, ČVUT v Praze.

Tímto bych chtěl poděkovat za podporu při řešení práce. Dík patří zejména vedoucímu práce Ing. Štěpánu Fialovi, Ph.D. a mému konzultantovi Ing. Lukášovi Novotnému, Ph.D. V neposlední řadě bych rád poděkoval firmě Humusoft s.r.o. za konzultace a pracovníkům Ústavu výrobních strojů a zařízení, ČVUT FS za věcné připomínky při konzultacích. Na závěr bych chtěl poděkovat i osobám blízkým, kteří mi byli oporou při tvorbě práce.

Anotace

Autor:	Robin Petr
Název BP:	Návrh laditelného dynamického hltiče s magnety
Rozsah práce:	76 str., 59 obr., 4 tabulek
Školní rok vyhotovení:	2022
Škola:	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Ústav:	Ú12135 – Ústav výrobních strojů a zařízení
Vedoucí bakalářské práce:	Ing. Fiala Štěpán, Ph.D.
Konzultant:	Ing. Novotný Lukáš, Ph.D.
Zadavatel:	ČVUT FS – Ústav výrobních strojů a zařízení
Využití:	Rešeršní podklad pro následné další zpracování dané problematiky, či vypracování konkrétního řešení.
Klíčová slova:	Pasivní dynamický hltič, hltič s magnety, magnetická pružina.
Anotace:	Tato bakalářská práce se zabývá návrhem laditelného dynamického hltiče s magnety, kde odpudivé síly magnetů budou nahrazovat mechanickou pružinu. Za tímto účelem byla vypracována rešerše na rozdělení pasivních metod tlumení vibrací, využití magnetů jakožto pružných prvků a izolace vibrací od základu. Na základě těchto dat byly vytvořeny návrhy 3D řešení a posléze byla vypracována simulace, ve které byla potvrzena funkce magnetů jakožto pružného prvku.

Annotation

Author:	Robin Petr
Title of bachelor dissertation:	Design of a Tunable Mass Damper With Magnets
Extent:	76 p., 59 fig., 4 tab.
Academic year:	2022
University:	CTU, Faculty of Mechanical Engineering
Department:	Ú12135 – Department of Production Machines and Equipment
Supervisor:	Ing. Fiala Štěpán, Ph.D.
Consultant:	Ing. Novotný Lukáš, Ph.D.
Submitter of the Theme:	CTU – Department of Production Machines and Equipment
Application:	Research for subsequent further processing of the issue or elaboration of a specific solution.
Key words:	Tunned mass damper, damper with magnets, magnetic spring.
Annotation:	This bachelor thesis deals with the design of a tunable dynamic damper with magnets, where the repulsive forces of magnets will replace mechanical springs. For this purpose, a search was made for the distribution of passive methods of vibration damping, the use of magnets as elastic elements and the isolation of vibrations from the basement. Based on these data, 3D solution designs were created and then a simulation was developed, in which the function of magnets as a flexible element was confirmed.

Přehled použitých veličin

Veličiny	Jednotky	Význam
B	$[T]$	<i>Magnetická indukce</i>
B_r	$[T]$	<i>Remanence</i>
b	$[N*s/m]$	<i>Koef. tlumení</i>
e	$[-]$	<i>Vektor remanence</i>
F	$[N]$	<i>Síla</i>
f	$[Hz]$	<i>Frekvence</i>
H	$[A/m]$	<i>Intenzita magnetického pole</i>
I	$[A]$	<i>Proud</i>
k	$[N/m]$	<i>Tuhost</i>
L	$[m]$	<i>Délka</i>
m	$[kg]$	<i>Hmotnost</i>
S	$[m^2]$	<i>Plocha</i>
T	$[°C]$	<i>Teplota</i>
V	$[m/s]$	<i>Rychlost</i>
ω	$[rad/s]$	<i>Úhlová rychlost</i>
ρ	$[kg/m^3]$	<i>Hustota</i>
μ	$[eV/T]$	<i>Magnetický moment</i>
μ_r	$[-]$	<i>Relativní permeabilita</i>
μ_o	$[-]$	<i>Permeabilita vakua</i>

Seznam zkratek

TMD	Tuned mass damper (pasivní dynamický tlumič)
VE	Viskoelastický tlumič
HTS	High temperature superconductor (vysoko teplotní supravodič)
EMS	Electromagnetic suspension (elektromagnetické odpružení)
EDS	Electrodynamic suspension (elektrodynamické odpružení)
HEMS	Hybrid electromagnetic suspension (hybridní elektromagnetické odpružení)
M_{s1}	Magnet umístěný na konstrukci humanoidní paže fixovaný č. 1
M_{s2}	Magnet umístěný na konstrukci humanoidní paže fixovaný č. 2
M_{m1}	Magnet umístěný na konstrukci humanoidní paže plovoucí č. 1
M_{m2}	Magnet umístěný na konstrukci humanoidní paže plovoucí č. 2

Obsah

Čestné prohlášení	3
Poděkování.....	4
Anotace	5
Annotation.....	6
Přehled použitých veličin.....	7
Seznam zkratk	8
Obsah	9
1 Úvod	12
2 Cíl práce.....	12
3 Základní rozdělení hltičů	14
3.1 Pasivní hltiče	14
3.2 Semi-aktivní hltiče	15
3.3 Aktivní hltiče.....	15
3.4 Úvod do dynamiky kmitání těles	16
3.5 Pasivní metody tlumení vibrací.....	17
3.5.1 Magnetický tlumič.....	17
3.5.2 Viskózní tlumič	18
3.5.3 Viskoelastický tlumič	19
3.5.4 Třecí tlumič	19
3.5.5 Částicový tlumič.....	20
3.5.6 Impact damper	20
3.5.7 Pasivní piezoeletrický tlumič	21
3.6 Využití magnetů jakožto pružných prvků	22
3.6.1 Magnetické pole	22

3.6.2	Nízkofrekvenční harvestor energie	22
3.6.3	Robotické chapadlo s magnetickou pružinou.....	23
3.6.4	MAGLEV	25
3.6.5	Akumulace energie pro humanoidní paži.....	26
3.6.6	Magnetická pružina pro aktuátory s proměnnou tuhostí.....	27
3.6.7	Princip magnetických ložisek a jejich využití.....	28
3.6.8	Využití magnetické pružiny při redukci vibrací.....	29
3.6.9	Samo nastavitelný hmotnostní tlumič	31
3.7	Izolace od vibrací okolí.....	32
3.7.1	Tlumič pro pobřežní platformu	32
3.7.2	Seismická odezva magneticky levitovaného domu.....	34
3.7.3	Vibrační charakteristiky u zařízení z HTS bloků a permanentních magnetů	35
3.7.4	Magnetický tlumič s dlouhým zdvihem pro seismické izolační zařízení	37
3.8	Závěr rešeršní části.....	39
4	Návrh dynamického hltiče s magnety	40
4.1	Návrh modelu č.1	41
4.2	Návrh modelu č.2	44
4.3	Návrh modelu č.3	48
4.4	Výběr vhodného řešení	52
5	Simulační část s mechanickým hltičem.....	53
5.1	Simulace v programu Comsol Multiphysics	56
5.1.1	Nastavení geometrie a materiálu	56
5.1.2	Nastavení magnetického pole.....	58
5.1.3	Nastavení jemnosti sítě.....	59

5.1.4	Parametrické definování rozměrů	59
5.1.5	Hustota magnetického toku	60
5.1.6	Závislost síly na vzdálenosti magnetu	60
5.2	Matematický model	63
6	Závěr	67
	Seznam použité literatury	69
	Seznam použitých obrázků	73
	Seznam použitého softwaru	75
	Seznam příloh	76

1 Úvod

Motivace tvorby této bakalářské práce byla spojena s využitím mechanických hltičů na obráběcích strojích, a to zejména pro svou jednoduchost, levnou konstrukci a další zjevné výhody. Ty představují tření a obtížná přeladění. O magnetech jakožto pružných prvcích je známo už déle, avšak nebyl zatím nikde zpracován výzkum, kde by bylo zdokumentováno, v jakých konkrétních případech jsou využity a jaké výstupy jednotlivé studie vykazují. Takto vznikla idea na zpracování rešerše, pro následný možný výzkum simulování magnetů jak na sebe působí a vytvoření 3D modelů jak by následný laditelný dynamický hltič s magnety mohl vypadat.

2 Cíl práce

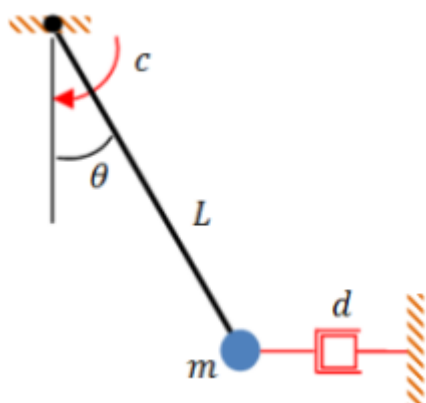
V první části této závěrečné práce je zpracována rešerše, která dále poskytuje pohled na problematiku hlcení vibrací a využití magnetů jako pružného elementu. Ta se dělí do čtyř základních podkategorií: Základní rozdělení hltičů, Pasivní dynamické tlumiče (TMD), Využití magnetů jakožto pružných prvků a Izolace od vibrací okolí. U hltičů budou ohledány jejich základní rozdělení na aktivní, semi-aktivní a pasivní. Následně vznikne ucelený výstup, kde budou více popsány pasivní dynamické tlumiče a jejich rozdělení. Zde bude nutné klást důraz na jejich řádné rozčlenění a detailní popis každého druhu. Opomenuta nebude ani teorie základů magnetického pole a jeho popisu. Na základě těchto důležitých informací se odvíjí velká část praktické části. Ohledání bude podrobeno využití magnetu jako pružiny, tedy nahrazení mechanické pružiny magnetickou.

V praktické části bude třeba navrhnout tři konstrukční návrhy dynamického hltiče s magnety umožňující frekvenční přeladění hltiče. Po shrnutí kladů i záporů jednotlivých návrhů, bude zvoleno nejvýhodnější řešení a k němu bude následně vytvořena výkresová dokumentace. Ta se bude skládat ze sestavného výkresu a vybraných výrobních výkresů. Dále bude vytvořena simulace hlcení za pomoci mechanických pružin a tlumičů v programu Matlab Simulink, pro seznámení se s hlcením. Následně bude muset být vyšetřeno chování magnetů v závislosti na měnící se poloze mezi magnety a hmotou v programu Comsol Multiphysics. Z těchto dat se stanoví závislost síly na velikosti

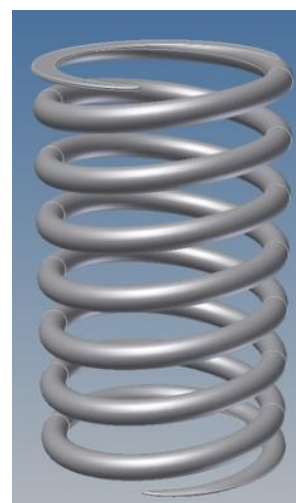
vzduchové mezery, která bude následně použita pro simulaci v programu Matlab Simulink. V konečné fázi simulování budou vyšetřeny vlastní frekvence hmoty v závislosti na přenastavení polohy magnetů.

3 Základní rozdělení hltičů

Hltiče umožňují dodatečné tlumení konstrukcí, struktur a součástí strojů, u kterých může dojít k vybuzení vibrací a tím k nežádoucímu ovlivnění výrobního procesu. Chvění struktury generuje relativní pohyb tlumicí hmoty, který dostačuje k tomu, aby tlumič extrahoval energii vzniklých vibrací. Tato zařízení jsou pevně uchycena na danou soustavu. Nejčastěji se skládají z hmoty, pružného elementu a tlumiče. Jako pružný element lze definovat například pružinu, kyvadlo anebo tvarovou součást hltiče například dřík. Žádoucí je omezení pohybu konstrukce a převedení této energie na hmotu tlumiče. To má za následek mírnění amplitudy tlumené hmoty soustavy při rozkmitání tlumicí hmoty hltiče. Musí však být dodržena podmínka, že rozsah hlcených kmitů musí být v přijatelných mezích tlumicí hmoty. Energie hltiče závisí na rychlosti pohybu hmoty a na její hmotnosti. O tuto myšlenku se začal zajímat p. Frahm (viz obr. 3-1, 3-2). [1, 2]



Obrázek 3-1 - Schéma hltiče [3]

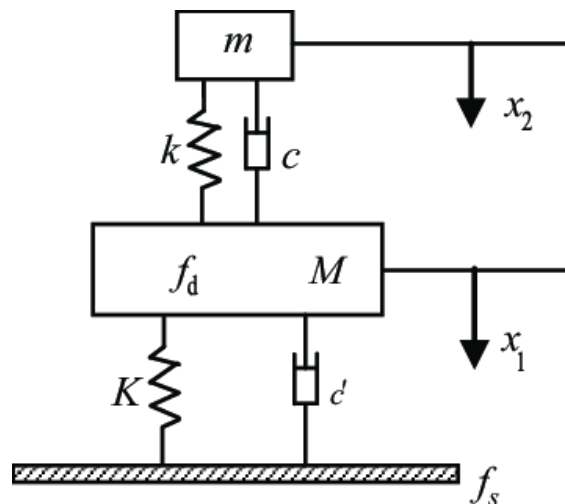


Obrázek 3-2 – Model pružiny

3.1 Pasivní hltiče

Pasivní prvky hltí přednastavené vlastní frekvence, avšak bez možné následné zpětné vazby při změně frekvence hlceného zařízení. Tímto principem dosahují tíženého výsledku a potlačují tím nežádoucí vibrace struktur, jejichž vlastní frekvence se nemění. Dost zásadní je volba materiálu, ze kterého je zhotoven, neboť daný druh materiálu může

do značné míry ovlivnit základní fyzikální vlastnosti. To má za následek přímou změnu technické a provozní charakteristiky stroje. Výhodou tohoto typu hltiče je snadná konstrukce, kdy jako tlumicí prvek se použije mechanické zařízení ke tlumení vibrací, nebo kapalina. Pasivního efektu tlumení lze dosáhnout i díky viskoelastickým materiálům, například různým druhům polymerům anebo asfaltům. Častá nevýhoda pasivních hltičů je, že dokážou pohlcovat vibrace pouze v jednom směru (osa X, Y, Z) a nikoli ve více směrech zároveň. Kinetická energie vibrací je přeměněna na teplo (viz obr. 3-3). [1, 2]



Obrázek 3-3 - Model pasivního hltiče [4]

3.2 Semi-aktivní hltiče

Na rozdíl od výše zmíněných pasivních prvků, obsahují tyto prvky zpětnovazebně řízený tlumicí zdroj síly. Pracují na principu, kde v systému dochází k zaškrcení soustavy ventilem, pokud je tlumicí hmota ve viskózní kapalině, nebo reakcí na magnetické, či elektrické pole, díky čemuž se změní viskozita kapaliny. Navíc umožňují tlumit frekvence nižší než u pasivních hltičů.[1, 5]

3.3 Aktivní hltiče

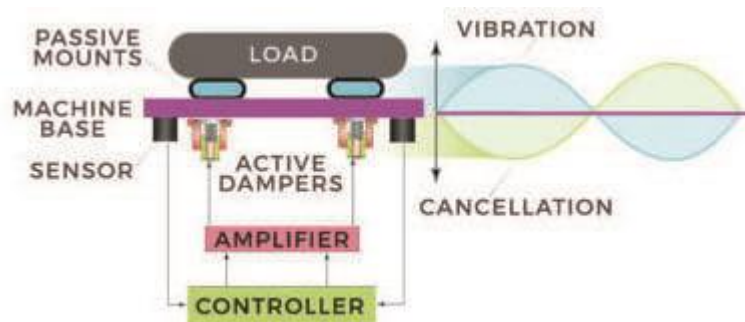
Z této skupiny nejpokročilejší a zároveň nejdražší jsou aktivní tlumicí prvky, které jsou velmi užitečné pro zachycení velmi malých vibrací. Tato zařízení se nazývají mechatronickými zařízeními. Využívají silovou reakci vůči kmitům tělesa. Potlačování

kmitů tedy probíhá piezoelektricky anebo elektromagneticky, kdy jako snímač se nejčastěji využívá akcelerometr. Jsou řízeny buď pomocí zpětnovazebné smyčky (feedback) anebo pomocí metody adaptivních kompenzací rušivého signálu (feedforward). Nevýhoda první metody spočívá v horší citlivosti na vzorkovací frekvenci, která může být až o 2 řády vyšší než u metody feedforward.[5] Ta má naopak nedostatky, kdy při nedostatku kvalitního korelovaného signálu může být dosti nepřesná (viz obr. 3-4).

Principy užití aktivních hltičů:

- Absorpce vibrací, při níž se připojí k soustavě sekundární struktura, která pohlcuje energii vstupního buzení a tím snižuje účinek na stroji.
- Realizace přídavného tlumení zvyšujícího poměrný útlum vlastních tvarů struktury.
- Vibroizolace, při níž je struktura izolována od nežádoucího buzení.
- Vibrokompenzace, tedy zmiňované „feedforward“ metody generování „proti-signálu“.

[1, 6]



Obrázek 3-4 - Model aktivního hltiče [6]

3.4 Úvod do dynamiky kmitání těles

Základním znakem dynamického hltiče v soustavě je, že zvyšuje pohyblivost na dva stupně volnosti. Smysl tohoto zařízení spočívá v připojení přídavné hmoty na kmitající strukturu, která při vhodném naladění tlumící hmoty bude tlumena.

Například pohybová rovnice (1.1) pro tlumení harmonicky buzených vynucených kmitů v obecném případě pro dvou hmotový systém vypadá následovně.

$$M\ddot{x} + B\dot{x} + Kx = f \quad (1.1)$$

$$M = \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} b_2 & -b_2 \\ -b_2 & b_2 \end{bmatrix}, K = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix}, f = \begin{bmatrix} F_0 \\ 0 \end{bmatrix} * e^{i\omega t} \quad (1.2)$$

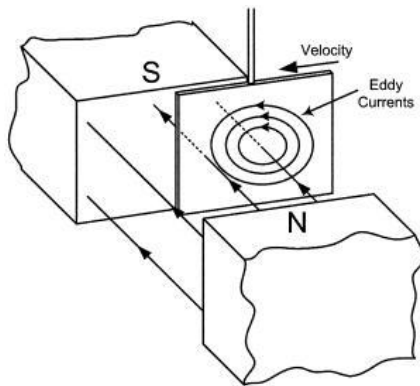
Písmena s indexem 1 náleží k základní hmotě a písmena s indexem 2 patří k tlumícímu zařízení. $m_{1,2}$ označuje hmotnost jednotlivých hmot. b_2 označuje koeficient tlumení a $k_{1,2}$ popisuje tuhost jednotlivých pružin, na kterých se tělesa pohybují. [7]

3.5 Pasivní metody tlumení vibrací

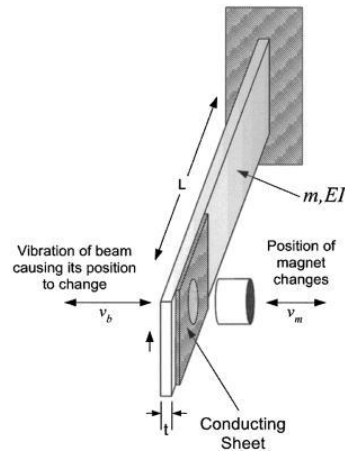
3.5.1 Magnetický tlumič

Magnetický tlumič dosahuje tlumeného efektu jako jeden z mála bezkontaktně. Snížení vibrací způsobují vířivé proudy. Ty jsou tvořeny ve vodivém materiálu v případě, že je vystaven časově se měnícímu magnetickému poli. V důsledku pohybu těchto proudů se tvoří magnetické pole, které interaguje s opačným pólem magnetu. Síla tvořená změnou pólů je závislá na rychlosti změny magnetického toku. V dynamickém systému se vodič nepřetržitě pohybuje a tím se indukují elektromotorická síla, což umožňuje regeneraci proudu. Proces vývoje hustoty proudu závislé na rychlosti a následné rozptýlení těchto proudů umožňuje systému fungovat jako viskózní tlumič. Aplikace magnetických tlumičů je velmi užitečná při hlčení tenkých membrán, jak při okolním tlaku, tak ve vakuu, kdy velikost membrány znemožňuje použití jiného typu hltiče. Bohužel magnetické tlumiče nejsou v dnešní době používány pro komerční využití, nýbrž pro experimenty (viz obr. 3-6). [8]

Na obr. 3-5, je vidět schéma magnetů sestavené tak, že nám brzdí desku procházející skrz magnetické pole.



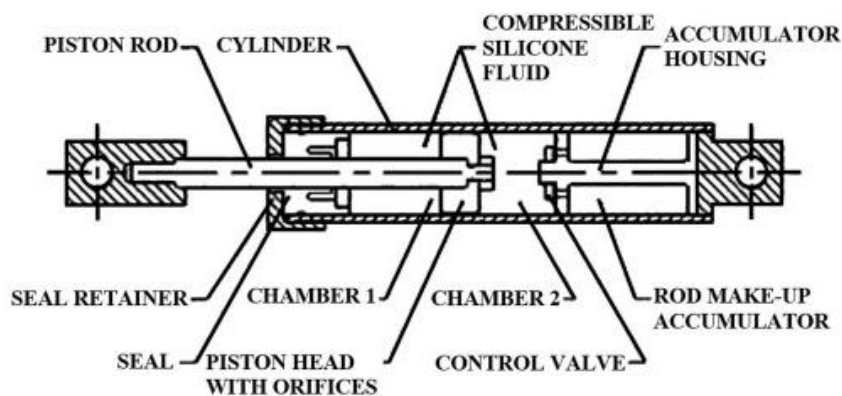
Obrázek 3-5 - Průchod desky skrz magnetické pole [8]



Obrázek 3-6 - Magnet tlumící vibrace [8]

3.5.2 Viskózní tlumič

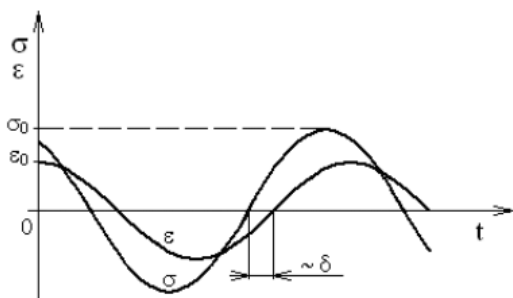
Tyto tlumiče pracují na principu disipace energie v důsledku proudění tekutiny skrz otvory. Bylo ověřeno, že viskózní tlumiče jsou účinné při snižování smyku základny na mostních pilířích. Na rozdíl od ostatních tlumičů má změna teploty na viskózní tlumič mnohem větší vliv, než je tomu tak u ostatních typů. Na druhou stranu je třeba zařízení udržovat po dlouhou dobu v provozu, aby se zabránilo úniku oleje v místech, kde jsou těsnění nejvíce namáhána. V porovnání s viskoelastickým tlumičem pracuje mnohem lépe při snižování relativního posunutí dilatačních spár u mostu (viz obr. 3-7). [9]



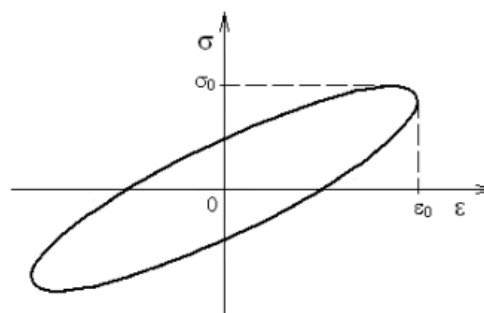
Obrázek 3-7 - Viskózní tlumič [9]

3.5.3 Viskoelastický tlumič

Viskoelastické tlumiče se skládají z vrstev spojených ocelovými pláty sírováním. Viskoelastické tlumiče neboli (VE), rozptylují energii strukturálních vibrací a snižují strukturální odezvy prostřednictvím smykové hysterezní deformace viskoelastických materiálů. Hysterezní křivky VE tlumičů jsou elipsy, což indikuje skvělou dissipaci energie. Tlumiče VE mají nejen výhodu jednoduché konstrukce, snadné výroby, dobré odolnosti a nízké ceny, ale mají také výbornou kapacitu rozptylu energie při jakémkoli zemětřesení nebo buzení větrem. Nevýhodou VE tlumičů je lehká ovlivnitelnost tlumících vlastností teplotou.



Obrázek 3-8 - Viskoelastický materiál [10]

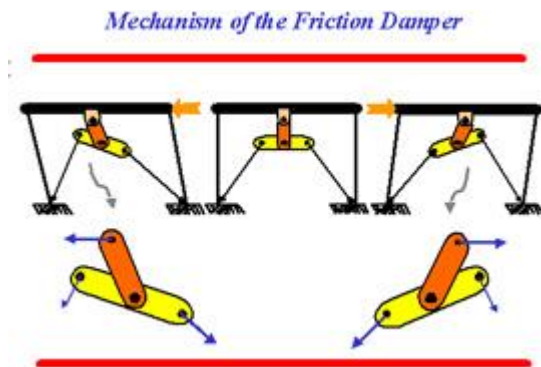


Obrázek 3-9 - Hysterezní smyčka [10]

Princip na jakém viskoelastické materiály pracují lze odečíst z prvního grafu, kdy křivku napětí předbíhá poměrnou deformaci, a přitom fázový posun mezi těmito dvěma veličinami leží na intervalu od 0 do $\frac{\pi}{2}$ (viz obr. 3-8, 3-9). [10]

3.5.4 Třecí tlumič

Základním principem funkčnosti těchto tlumičů je převod kinetické energie na tepelnou, kdy kinetická energie je rozptýlena mezi ostatní součásti. Jedním z kladů je možnost nastavení tlumicí síly utažením nebo povolením prvků pro nastavení tlaku. Třecí tlumiče však mají i některé nedostatky, jako je koroze třecí plochy, která změní tlumicí sílu tlumiče, nebo konstantní tlumicí síla. Skládá se ze dvou pohyblivých částí, které o sebe třou a tím zmírňují vibrace. Třecí síla vzniklá mezi plochami materiálů je z velké části zapříčiněna volbou materiálu (viz obr. 3-10, 3-11). [11, 12]



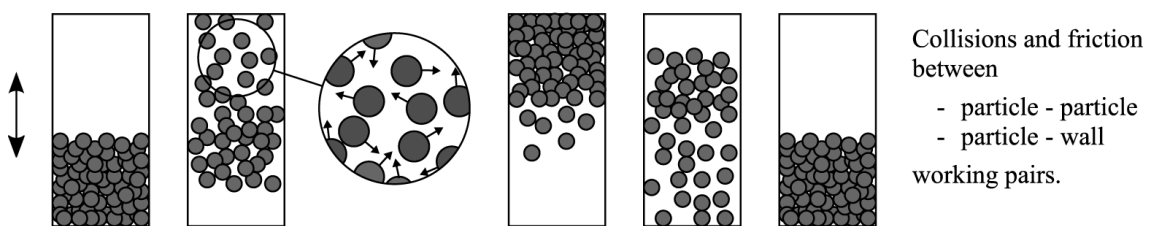
Obrázek 3-10 - Princip třecího tlumiče [13]



Obrázek 3-11 - Třecí tlumič [12]

3.5.5 Částicový tlumič

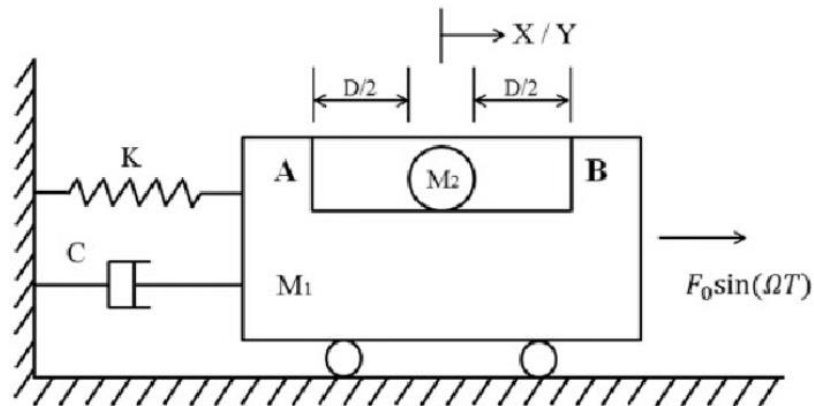
Tento tlumič se skládá z dutinové skříně, různých tvarů a velikostí, které jsou částečně naplněny částicemi. Tato nádoba naplněná částicemi je připojena ke konstrukci, kterou je třeba tlumit. Částice mohou být kovové, keramické, polymerní, kompozitové, nebo ve formě směsi různých materiálů. Velikost částic se může lišit podle aplikace. Můžou se lišit od několika mikrometrů až do decimetrů nebo více. Tvar částic může být kulovitý, válcový nebo nepravidelný. Chování materiálu je velmi nepředvídatelné díky nárazům a klouzání mezi částicemi (viz obr. 3-12). [14, 15]



Obrázek 3-12 - Částicový tlumič [14]

3.5.6 Impact damper

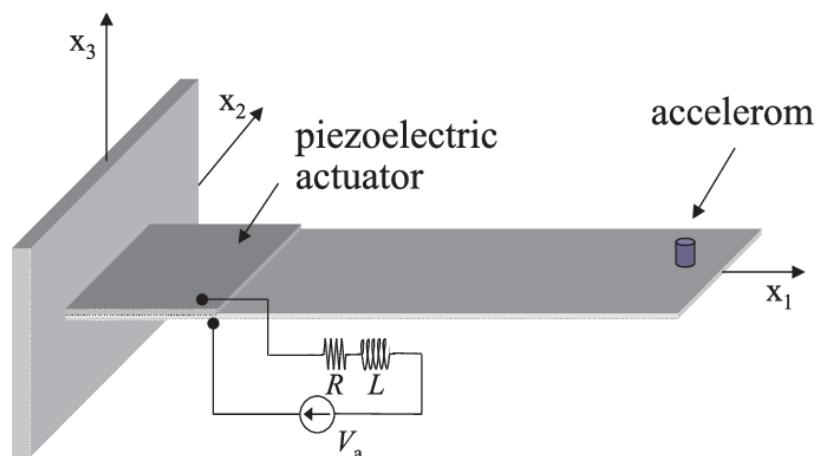
Většinou je tvořen jednou nebo více hmotami uzavřenými v nádobě. Tlumení je dosaženo nepružným nárazem hmoty na stěny nádoby. S ohledem na cenu se jedná o ekonomicky levné a konstrukčně snadno dosažitelné řešení problematiky tlumení těles. Díky robustnímu návrhu soustavy se můžou používat v drsných podmínkách, kde by jiné tlumicí zařízení neobstálo (viz obr. 3-13). [16]



Obrázek 3-13 - Impact damper [17]

3.5.7 Pasivní piezoelektrický tlumič

Dochází zde k disipaci energie pomocí piezoelektrického materiálu, kdy vychýlené piezoelektrikum je použito jako strukturální aktuátor v řídicím systému. Piezoelektrika jsou dobře známa tím, že dokážou měnit mechanickou energii na elektrickou a naopak. V praxi to znamená, že pokud je krystal mechanicky namáhán, tvoří se v něm elektrické napětí. Při střídavém mechanickém namáhání vzniká namáhání piezoelektrického materiálu, který při správném nastavení dokáže tlumit vibrace (viz obr. 3-14). [18, 19]



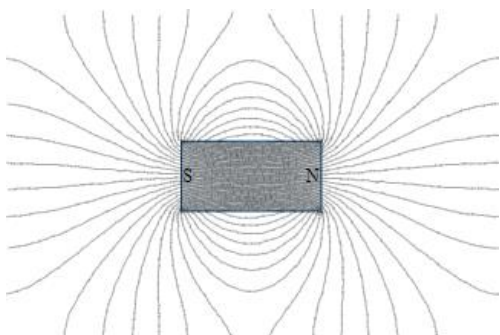
Obrázek 3-14 - Piezoelektrický tlumič [20]

3.6 Využití magnetů jakožto pružných prvků

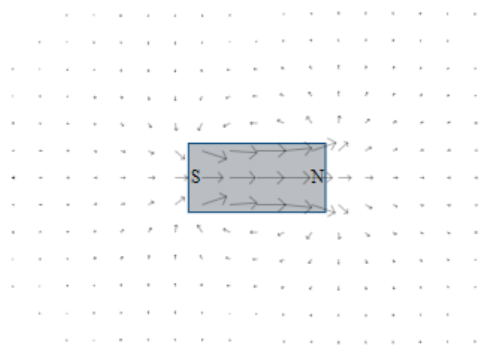
Magnety mají v průmyslu významnou roli. Avšak využití magnetů v průmyslových aplikacích je pouze v počátcích svého uplatnění a v dnešní době se jedná spíše o koncepční návrhy. Díky němu dokážeme hltit kmity, levitovat (MAGLEV), popřípadě uchopovat různé objekty definovanou silou.

3.6.1 Magnetické pole

Magnetické pole lze znázornit pomocí vektorů, nebo siločar. Nachází se okolo každého magnetu ať už je to feromagnet anebo paramagnet (které jsou přitahovány vnějším magnetickým polem, a tak mají permeabilitu větší než jedna). Čím větší permeabilitu magnety mají, tím více se navzájem přitahují. Jelikož je magnetické pole vektorová veličina, tak se u ní určuje její velikost a směr. Toto pole je popisováno magnetickou indukcí jejichž jednotkou je [T] neboli Tesla a intenzitou magnetického pole. Definice indukce je síla působící na náboj v magnetickém poli (viz obr. 3-15, 3-16). [21]



Obrázek 3-15 - Popis pomocí siločar [21]



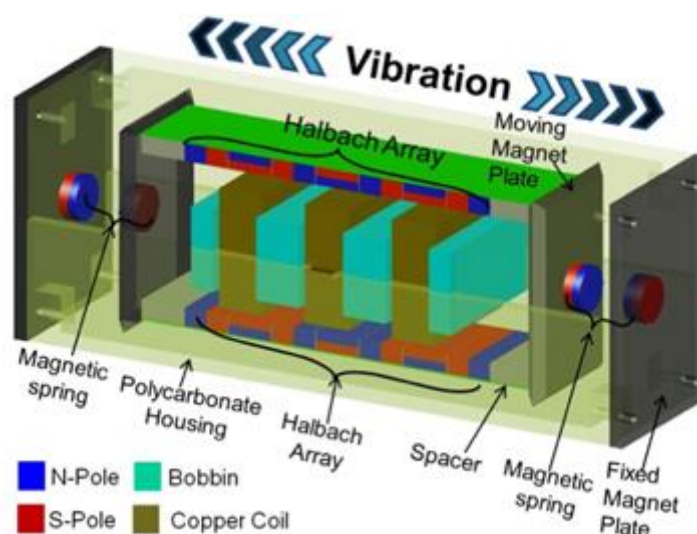
Obrázek 3-16 - Popis pomocí vektorů [21]

Magnetizaci lze popsat i na atomu, který může být magneticky aktivní. Pak prvek obíhající kolem atomu, tedy elektron může vykreslovat proudovou smyčku a jeho magnetické účinky lze charakterizovat magnetickým momentem μ . [22]

3.6.2 Nízkofrekvenční harvestor energie

Díky nízkofrekvenčním vibracím (<100 Hz), které se nachází všude v našem okolí jsme schopni vyrábět energii pomocí elektromagnetu. Harvestory jsou schopné napájet

různá zařízení od biomedicinských implantátů až po náramkové hodinky. U prvních modelů byla k pružnému uložení pohyblivé hmoty harvestoru využívána klasická mechanická pružina, která znemožňovala dosažení uspokojivých účinností výroby energie. Tento problém byl vyřešen magnetickou pružinou, která je známá jednoduchou konstrukcí a schopností pracovat na mimorezonančních frekvencích. Využití magnetické pružiny umožňuje zvýšit účinnost harvestoru až 10krát.



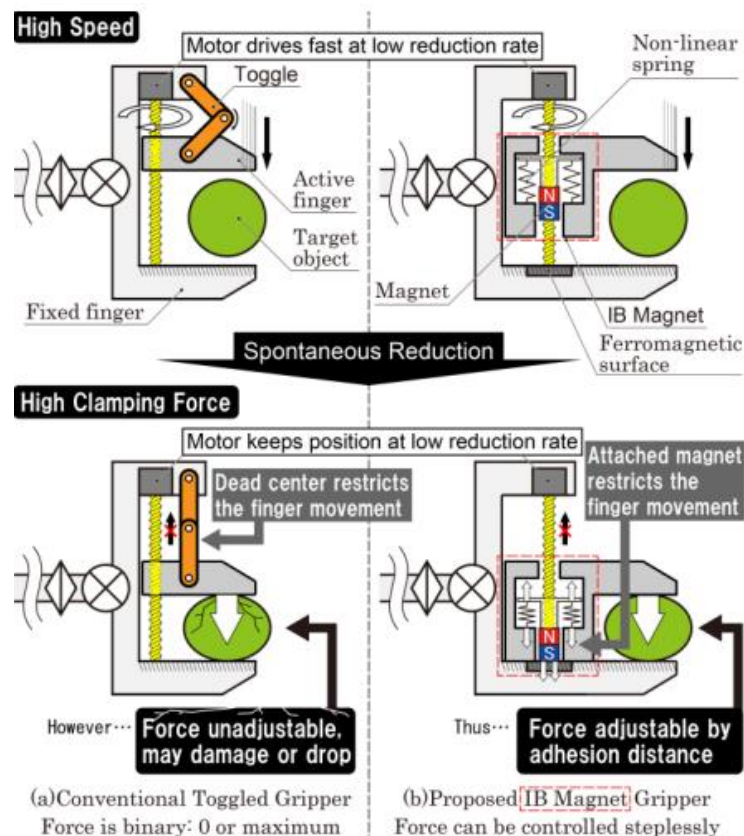
Obrázek 3-17 - Nízkofrekvenční harvester energie [23]

Princip, který harvester především využívá je Halbachovo pole, které je umístěno mezi dvě magnetické pružiny. Halbachovo pole dokáže soustředit čáry magnetického toku na jednu stranu magnetu a na druhé straně je potlačovat. Díky tomu je možná interakce mezi koncentrovanými čarami magnetického toku a cívkou, kde dochází k maximálnímu propojení toků (viz obr. 3-17). [23]

3.6.3 Robotické chapadlo s magnetickou pružinou

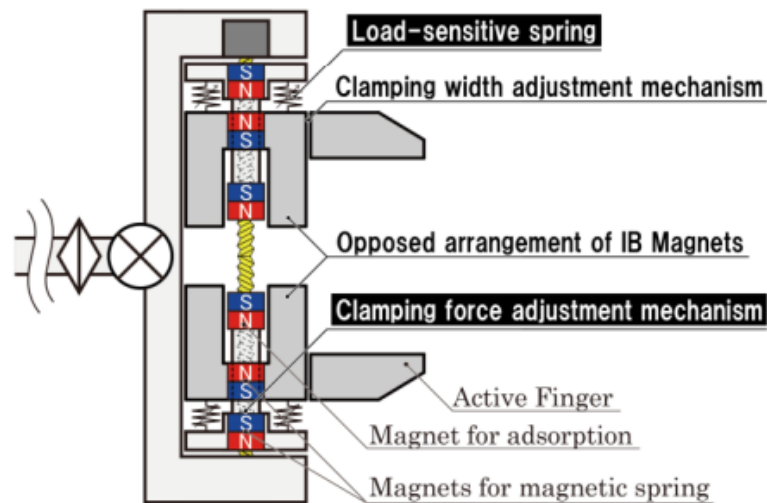
Uvnitř chapadla je zabudován vnitřně vyvážený magnetický mechanismus neboli Internally-Balanced Magnetic Mechanism. Bylo zvoleno použití permanentního magnetu na rozdíl od elektromagnetu z důvodu úspory elektrické energie. Bohužel by tato úspora energie zůstala nezúročena, neboť by bylo potřeba veliké síly k odpojení magnetů. Návrhem prvního řešení tohoto problému bylo sestavení mechanismu skládajícího se z permanentního magnetu pro přitažlivost, který je ovládán tyčí a nelineární pružinou. Ta

zajišťuje udržení celého mechanismu ve vnitřní rovnováze, a tak i ovládací tyče. Prvotní model ukázal, že díky spojení nelineární pružiny s magnetem je možný rychlý posuv prstu chapadla na úchopný předmět a v okamžiku dotyku, dojde k pozvolnému, pevnému úchopu, aniž by se předmět nějak poničil.



Obrázek 3-18 - Způsob úchopu hlavice [24]

Výsledný evoluční model nahradil nelineární pružinu magnetickou. Výhoda oproti předešlé verzi byla ta, že úchopové prsty se vůči sobě pohybovali navzájem. Magnetická pružina musí být tvořena dvěma identickými magnety. Jelikož tento projekt byl zamýšlen pouze jako experiment, tak si sebou nese autory definované nedostatky: upínací mechanismus magnetů, pružina citlivá na zatížení vlastní tíhy a nastavovací mechanismus šířky upnutí mezi prstem a rámem. Jedná se o nepřesnou kompenzaci, která má za následek nulovou kontrolu při vytahování kontrolní tyče a zvětšenou výchylku rovnováhy. Další problém se objevil u magnetické pružiny, která má větší odpudivou sílu magnetů než magnety, které mají funkci přitahovací (viz obr. 3-18, 3-19). [24]



Obrázek 3-19 - Robotické chapadlo s magnetickou pružinou [24]

3.6.4 MAGLEV

Zatímco konvenční vlak jede vpřed pomocí tření mezi koly a kolejnicemi, vlak MAGLEV nahrazuje kola elektromagnety a levituje na vodící dráze. Existují tři základní rozdělení levitace:

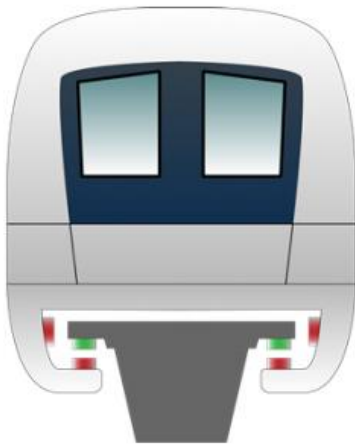
- Elektromagnetické zavěšení (EMS)
- Elektrodynamické odpružení (EDS)
- Hybridní elektromagnetické odpružení (HEMS)

EMS funguje na základě magnetické přitažlivé síly mezi vodící dráhou a elektromagnety. Tato technologie je bohužel nestabilní, a proto se využívá pro levitace v malých vzduchových mezerách ± 10 mm. S rostoucí rychlostí je obtížné tuto vzdálenost dodržet. Tato technologie využívá hlavně elektromagnety. Dnes už se však pracuje na využití supravodivých magnetů, kde je nutné řešit problém s chladícím systémem.

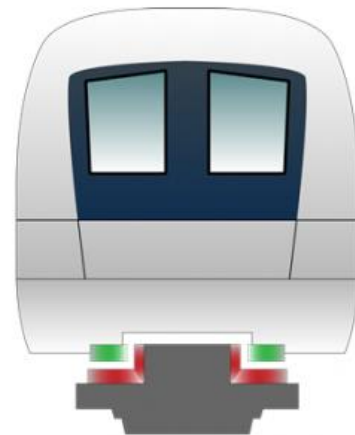
Na rozdíl od EMS, EDS využívá k levitaci odpudivou sílu. Magnety připevněné na desce se pohybují dopředu na indukčních cívkách, nebo vodivých deskách umístěných na vodící dráze, indukované proudy protékají cívkami nebo deskami a vytvářejí magnetické pole. Tento systém je stabilnější než EMS, jelikož není nutné řídit vzduchovou mezeru, a tak je více uzpůsoben na pohyb při vyšších rychlostech.

Potřebuje, však dostatečnou rychlost, aby byl schopen indukovat optimální množství proudu. Dělí se na dva typy jeden využívá permanentní magnet a druhý supravodivý. Druhý jmenovaný je složitý na konstrukci, protože při jeho provozu je vytvářeno kapalné helium.

HEMS pracují na principu stejně jako EMS. Permanentní magnety z části nahrazují elektromagnety. Při provozu to funguje tak, že v určitém ustáleném stavu se vypojí elektromagnety a vlak levituje jen díky permanentním magnetům (viz obr. 3-20, 3-21). [25]



Obrázek 3-20 - MAGLEV EMS [26]

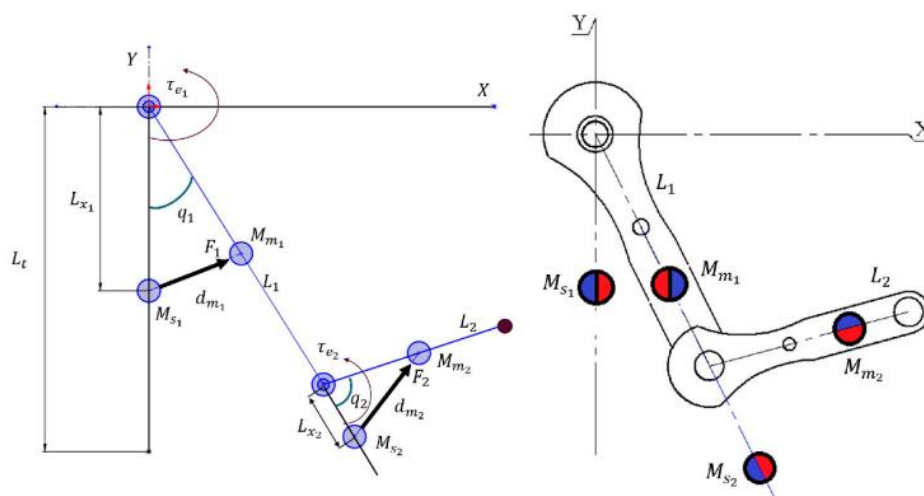


Obrázek 3-21 - MAGLEV EDS [26]

3.6.5 Akumulace energie pro humanoidní paži

Ve většině robotických úkonů se energie používá k překonání gravitačních sil, ale v několika málo průmyslových aplikacích se jako zdroj energie využívá gravitační síla. Z tohoto důvodu je použití magnetické pružiny s pohony výhodné při snížení spotřeby energie robotů. Magnet při průjezdu trajektorií akumuluje energii díky svým magnetickým vlastnostem. Klasická mechanická pružina je zde nahrazená magnetickou a přináší tím výhody jako bezkontaktnost, nulové vibrace či zvukové projevy.

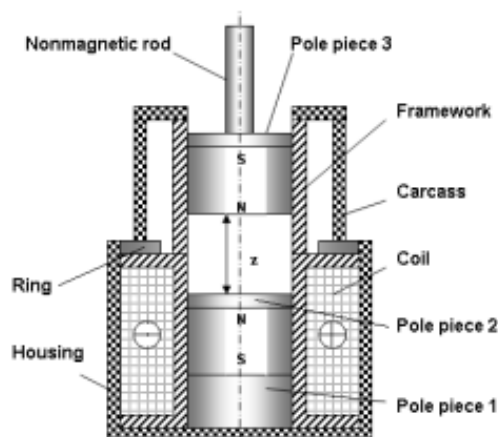
Jsou zde užity dva identické válcové magnety. Kde magnety M_{s1} , M_{s2} jsou magnety, které se zafixují a M_{m1} , M_{m2} jsou plovoucí. Z experimentu vyplynulo, že snížení energie bylo o 17 % při užití magnetické pružiny u humanoidní paže se dvěma stupni volnosti (viz obr. 3-22). [27]



Obrázek 3-22 - Schéma humanoidní paže s magnety [27]

3.6.6 Magnetická pružina pro aktuátory s proměnnou tuhostí

Zde jsou navrženy dva elektromagnety, uspořádané proti sobě s opačnými póly s jednou či dvěma cívkami, kde rozsah použitého proudu je od -2 A až $+2\text{ A}$. Magnetický tok cívky je přeložen přes magnetický tok obou magnetů a v závislosti na směru proudu v cívce je získán vyšší, nebo nižší celkový magnetický tok. Výsledkem je zvýšení, nebo snížení síly magnetické pružiny, což je doprovázeno změnou její tuhosti. Tento návrh je využitelný pro pohon s proměnnou tuhostí anebo řízeném tlumení vibrací. Hlavní výhodou navrhovaného systému je schopnost měnit nejjednodušším a nejrychlejším způsobem tuhost a sílu magnetické pružiny díky jednoduché změně řídicího proudu, která zajišťuje rychlost a dynamiku řízení provozu. Použití jedné pružiny s proměnnou tuhostí, umožňuje režim provozu s proměnnou poddajností používanou například ke snížení zátěžových rázů. Lze také mít dva protichůdné motory se dvěma protichůdnými pružinami. Varianta s antagonistickým schématem umožňuje mnohem více vyhovující a plynulejší provoz (viz obr. 3-23). [28]



Obrázek 3-23 - Schéma cívek s magnety [28]

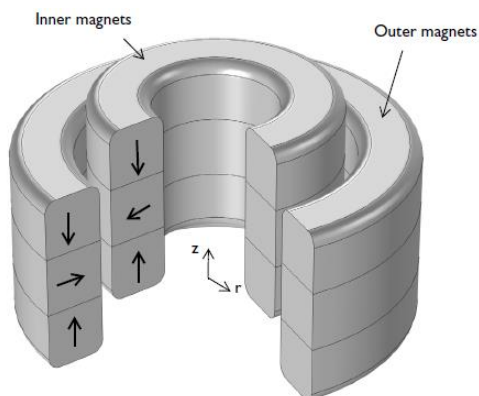
3.6.7 Princip magnetických ložisek a jejich využití

Magnetická ložiska jsou známa pouze pár desítek let. Dělí se na dva základní typy, a to axiální (pokud udržuje polohu rotoru proti posunutí podél osy) a radiální (pokud řídí osu otáčení). Síly permanentních magnetů mohou být přitažlivé anebo odpudivé v závislosti na jejich nasměrování. U návrhové části takového typu ložiska se musí dbát v první řadě na centrovací síly v radiálním směru, v druhé části se pak klade důraz na stabilitu a axiální síly. Při návrhu se nesmí opomenout ani materiál, který určuje sílu magnetizace a také tuhost magnetu. Nejčastější materiály, ze kterých jsou magnety vyrobeny jsou:

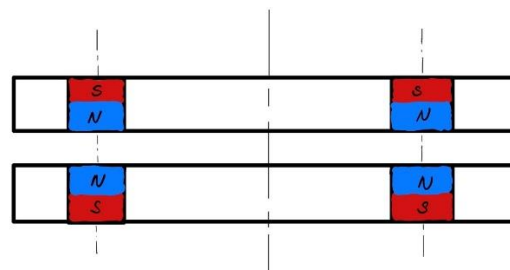
- tvrdé ferity
- samarium-kobalt
- neodým-železo-bor
- hliník-nikl-kobalt

Platí zde Earnshawovo pravidlo, které navzdory tomu, že je definováno pro elektrostatické póly je možné aplikovat i pro magnetickou levitaci. Upozorňuje na náležitost, že je nemožné udržet tělesa stabilní, která na sebe působí silou magnetického pole, pokud je tvořeno pouze tvrdými paramagnety. Tato nestabilita je zapříčiněna tím že, když se magnety přibližují působící síla roste a když se oddalují síla klesá. Proto je pro stabilitu těles nutné zajistit pravý opak. Tento problém se dá vyřešit pomocí vodících

drážek anebo tyčemi procházející osou tělesa. Účinnost magnetických ložisek je dána jejich radiální a axiální tuhostí.



Obrázek 3-24 - Axiální magnetické ložisko [29]



Obrázek 3-25 - Radiální magnetické ložisko

U tohoto typu ložiska se nevyskytuje žádné tření, či mechanické namáhání, jak je tomu u klasického např. kuličkového ložiska. Občas je nutné vyměnit magnety, což bývá velice nákladné. Proto bylo experimentálním způsobem navrženo nové řešení, kdy magnety na obou částech rotoru jsou nahrazeny větším počtem magnetů rozmístěných v kruhu. V konkrétním případě to bylo 24 magnetů umístěných v kruhu po 15° . V druhé části se postupovalo identicky až na změnu poloměru rozmístění magnetů než u první části ložiska (viz obr. 3-24, 3-25).

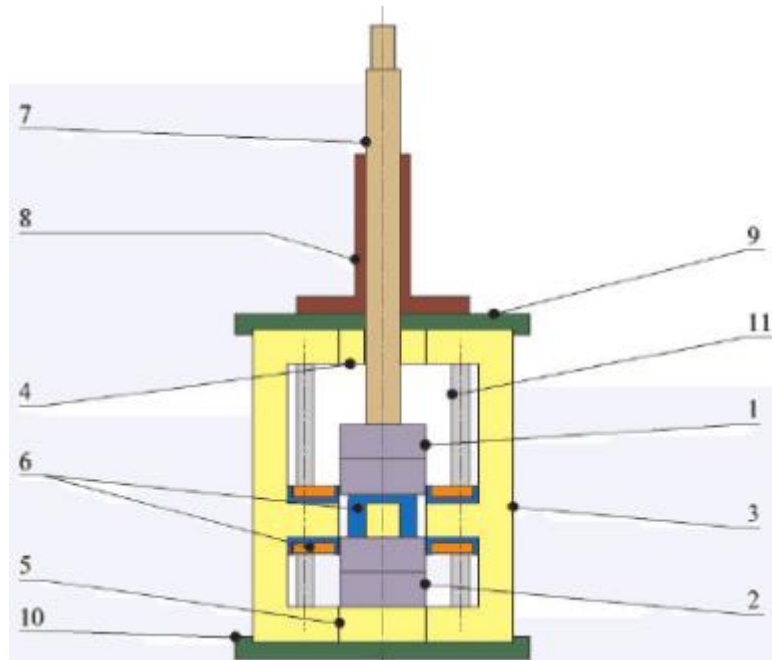
Jedna z nevýhod magnetického ložiska je, že i když nepodléhá opotřebení, jak je tomu například u mechanického, tak po určité době ztrácí své magnetické vlastnosti, což způsobuje nestabilitu a nesprávnou funkčnost.

Řešení v tomto experimentu je nejen výhodné finančně, ale i z hlediska stability, protože pólová intenzita magnetů je soustředěna na jejich středy. [30–32]

3.6.8 Využití magnetické pružiny při redukci vibrací

V návrhu na obr. 3-26 jsou užity klasické a neodymové magnety spolu se 4 cívkami. Klasické a neodymové magnety jsou zde užity jako základní konstantní tuhost. Jejich vzdálenost se dá nastavovat při otáčení hřídele. Dále je možné upravovat proud, který protéká cívkami. V návaznosti na tom kolika cívkami protéká proud se mění koeficient tuhosti. Nabízí se možnosti, že proud protéká 1,

2 anebo 4 cívkami. V závislosti na tom, v jaké poloze jsou magnety, a kolika cívkami protéká proud, je síla působící při vibroizolaci mezi 444 až 733 N. [33]

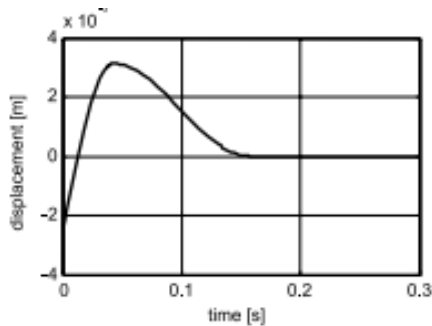


Obrázek 3-26 - Schéma magnetické pružiny [33]

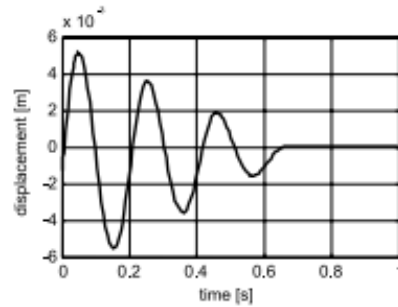
Popis některých důležitých součástí:

- 1, 2 – neodymové magnety
- 6 – cívky
- 7, 8 – posuvný mechanismus
- 11 – stabilizační tyče konstrukce

Na obrázcích 3-27 a 3-28 je vidět, jak ovlivňuje počet sepnutých cívek velikost amplitud výchylek.



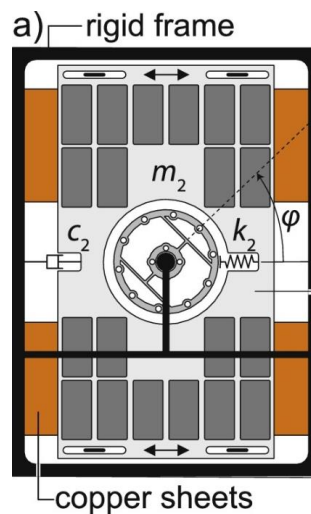
Obrázek 3-27 - 4 sepnuté cívky [33]



Obrázek 3-28 - 1 sepnutá cívka [33]

3.6.9 Samo nastavitelný hmotnostní tlumič

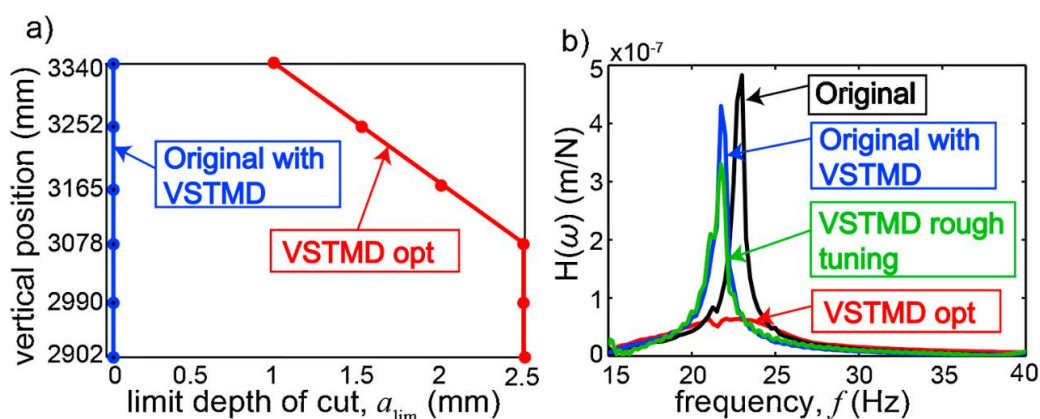
Upínací zařízení je obvykle navrženo tak, aby splňovalo požadavky z hlediska geometrie, anebo upínacích sil, přičemž význam jeho dynamické flexibility je obvykle podceňován. Tento tlumič je využíván pro různé řezné stroje a frézky.



Obrázek 3-29 - Schéma hmotnostního tlumiče [34]

Navržený hmotnostní tlumič s proměnnou tuhostí mění své naladění tlumiče stlačením elastomerového kroužku, čímž se vytvořil vztah mezi předpětím kroužku a frekvencí ladění. Viskózní tlumení bylo zajištěno paralelně pomocí kapalin, nebo magneticky pomocí vířivého proudu.

Tlumicí efekt je fyzikálně dosažen pohybem vodivé desky přes statické a nerovnoměrné magnetické pole vytvořené permanentními magnety. To indukuje vířivé proudy ve vodivé desce, které generují opačné magnetické pole ke změnám původního magnetického pole. Vzniká tak síla působící proti změnám magnetického pole, tj. brzdná síla, která se snaží zpomalit relativní pohyb vodiče v poli. Protože je tato síla úměrná rychlosti, lze ji považovat za tlumicí sílu. Rozptýlená energie se přemění na teplo v důsledku ztrát vířivými proudy Jouleovým efektem (viz obr. 3-29, 3-30). [34]



Obrázek 3-30 - Grafy popisující optimální tlumení [34]

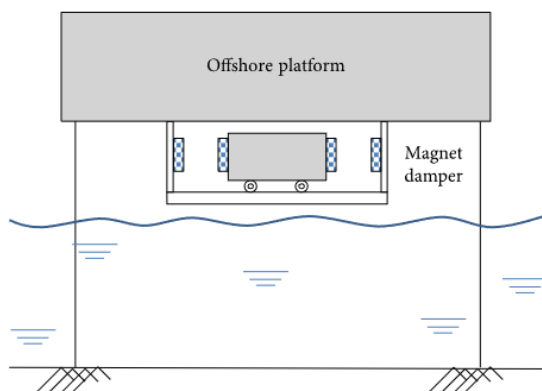
3.7 Izolace od vibrací okolí

Tato technologie využívá pasivní dynamické tlumiče (TMD) k izolování základu od podstavy. Zabraňuje tak nepříznivým vlivům, které by mohly stroj destabilizovat, či porušit strukturu daného základu. Nejčastěji se využívá u konstrukce budov, které jsou v oblastech se zvýšenou seismickou aktivitou. Dále se tato technologie využívá u stavby základů pro měřicí stroje, kde by následné otřesy ovlivnily konečné výsledky měření. Pokud je dána konkrétní rezonanční frekvence, využívá se lineární tlumič. V opačném případě se využívá nelineární tlumič, který je schopen tlumit frekvence v širokém frekvenčním rozsahu. [35]

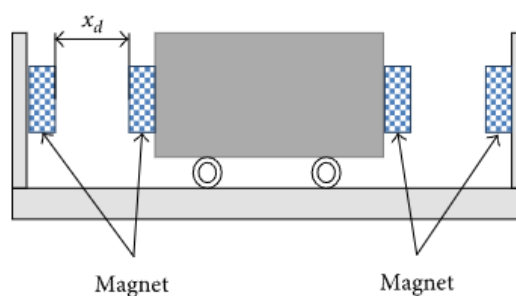
3.7.1 Tlumič pro pobřežní platformu

Pobřežní plošina je ovlivněna větry, vodními vlnami a zemětřesením. Velká amplituda vibrací může poškodit konstrukce nebo sekundární komponenty. Lineární TMD je efektivní při tlumení vibrací při specifické frekvenci buzení, pravděpodobně nejvýznamnějším omezením je její úzká efektivní šířka pásma ve frekvenční doméně. Při tlumení jiné, než naladěné frekvence by mohlo dojít ke zvýšení amplitudy vibrací. Tento

problém lze vyřešit širokopásmovým TMD, který umožňuje snížení vícenásobných rezonančních odezev hlavní struktury. Bohužel aplikace této metody s sebou nese stále rizika. Konečným řešením by v této problematice mohly být tlumiče s vířivými proudy využívající permanentní magnety.



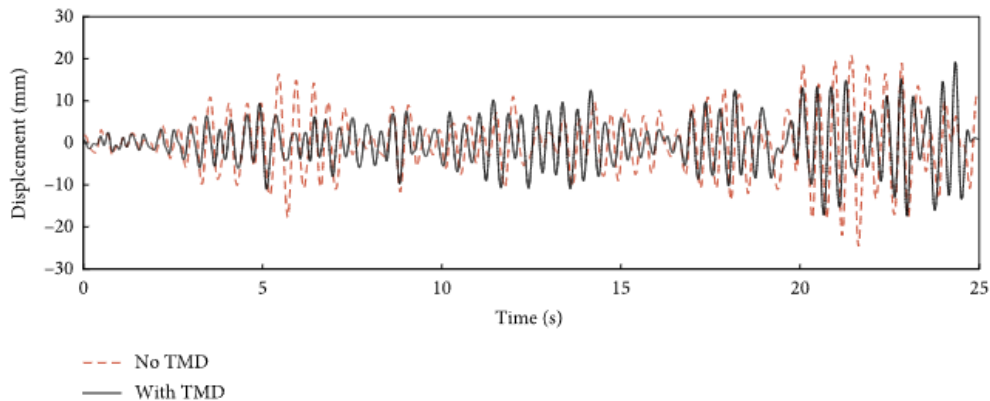
Obrázek 3-31 - Schéma pobřežní plošiny [35]



Obrázek 3-32 - Schéma hmoty a magnetů [35]

Na obrázku 3-31 a 3-32 je model, který permanentními magnety generuje časově proměnnou magnetickou sílu, která je nepřímo úměrná mezeře. Proměnné magnetické síly působí jako pružina s proměnnou tuhostí. Materiál bloku hmoty TMD je ocel a bude mít negativní vliv na magnetické pole. Aby se tomuto efektu zabránilo, byl TMD pocínován.

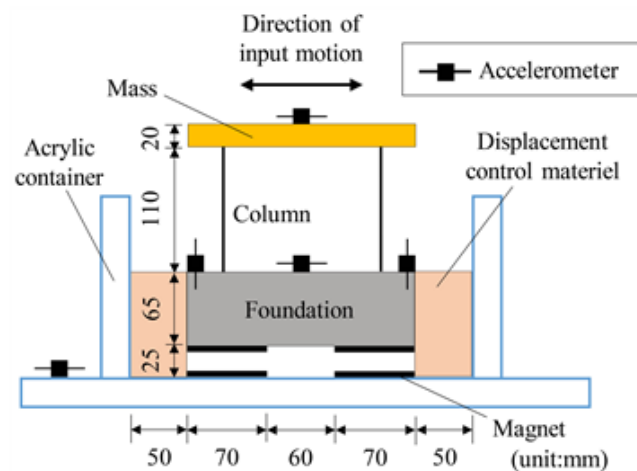
U této studie byl vytvořen matematický model, který byl buzen celkem třemi seismickými vlnami. Ukázalo se, že maximální špičková hodnota by mohla být snížena až o 30 % a vibrace během celé doby zemětřesení by mohly být sníženy o 18 % (viz obr. 3-33). [35]



Obrázek 3-33 - Graf závislosti změny polohy na čase [35]

3.7.2 Seismická odezva magneticky levitovaného domu

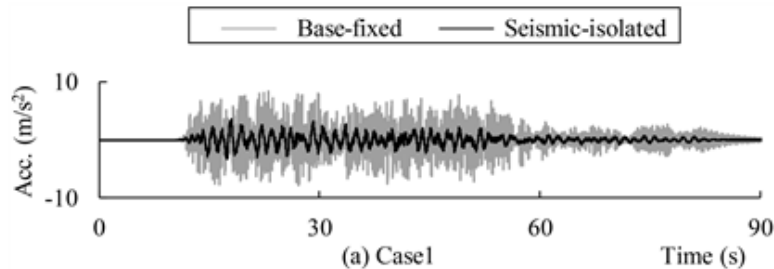
V tomto případě experimentu jsou využity polymerní materiály pro strany základů, které zajišťují řízený posun. Dále jsou využity neodymové magnety pro magnetickou levitaci základny. Jsou zde porovnávány dva modely. První je seismicky izolovaný základ rodinného domu a druhý je model s pevnou základnou.



Obrázek 3-34 - Schéma levitujícího domu [36]

Z výsledků experimentů je patrné, že snížení amplitudy kmitu je přibližně čtyřnásobné u základu na magnetickém polštáři. Maximální zrychlení seismicky

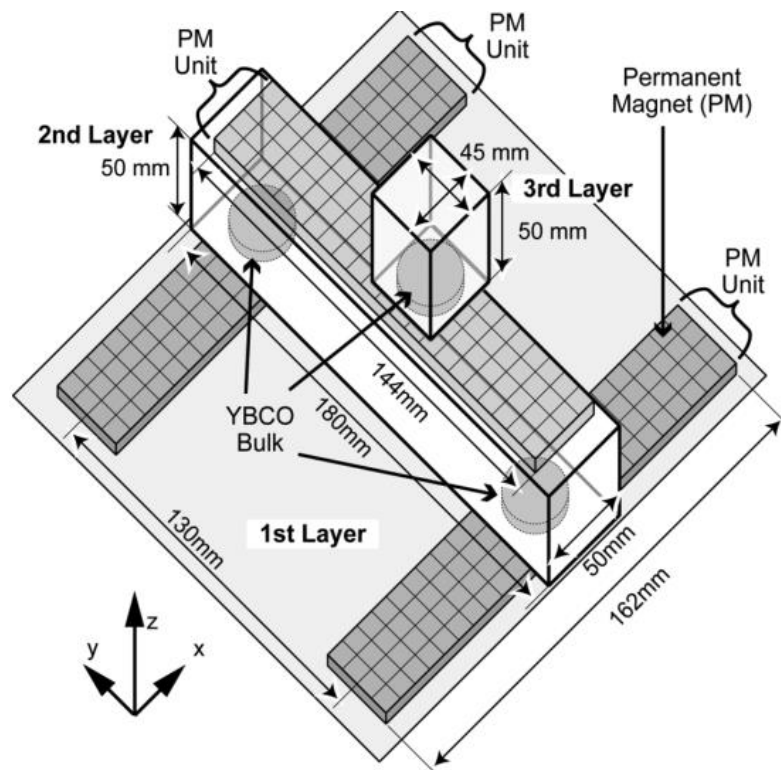
izolovaného modelu je výrazně sníženo ve srovnání s modelem s pevnou základnou (viz obr. 3-34, 3-35). [36]



Obrázek 3-35 - Graf seismické izolace [36]

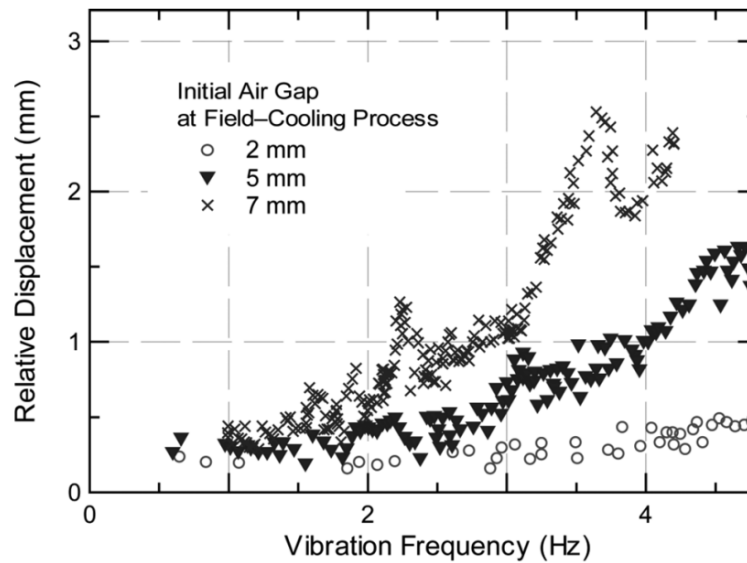
3.7.3 Vibrační charakteristiky u zařízení z HTS bloků a permanentních magnetů

V tomto experimentu byla využita technologie HTS (high temperature superconductor) bloků spolu s permanentními magnety, které zajistily levitaci bez žádných dalších systémů. Toto zařízení nevykazuje žádné horizontální vibrace. Zkoumány zde byly amplitudy vibrací, frekvence a počáteční vzduchové mezery mezi permanentními magnety. Velká počáteční vzduchová mezera je žádoucí pro levitační sílu, zatímco malá vzduchová mezera za provozu je účinná pro zajištění stability.



Obrázek 3-36 - Schéma sestavení HTS bloků [37]

Když se levitující hmota přesune ve vodorovném směru ze svého původního umístění, je na hmotu aplikována vratná síla, která hmotu vrátí na své původní místo. Na druhou stranu, když se permanentní magnet pohybuje v horizontálním směru, hmota se také pohybuje ve stejném směru s permanentním magnetem. HTS bloky nad permanentními magnety umístěnými v řadě se však proti pohybu permanentních magnetů v podélném směru permanentních magnetů vůbec nepohybují. Důvodem je, že vratná síla nepůsobí na hmotu, protože magnetické pole působící na hmotu se nemění proti posunutí permanentního magnetu v podélném směru.

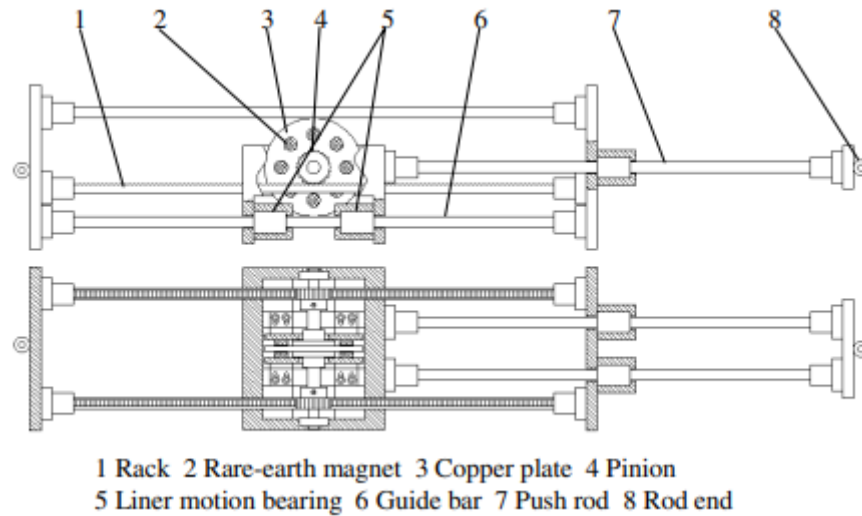


Obrázek 3-37 - Graf frekvence závislé na počáteční vzduchové mezeře [37]

Relativní posun se zvyšoval s počáteční vzduchovou mezerou. Důvod je ten, že hustota magnetického toku a magnetický gradient kolem objemu klesají s počáteční vzduchovou mezerou, takže magnetická tuhost mezi objemem a permanentními magnety klesá s počáteční vzduchovou mezerou (viz obr. 3-36, 3-37). [37]

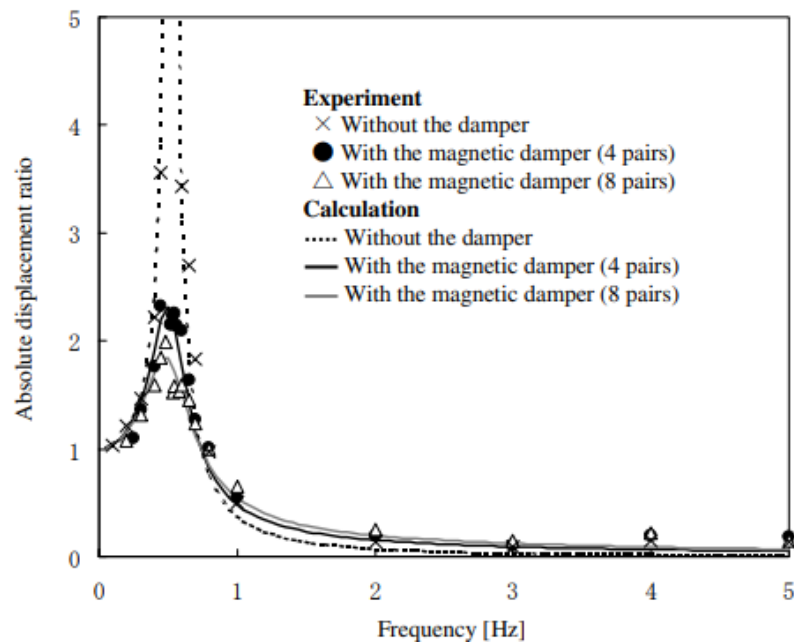
3.7.4 Magnetický tlumič s dlouhým zdvihem pro seismické izolační zařízení

Magnetický tlumič na obr. 3-38 se skládá ze dvou hřebenů, dvou pastorků, měděného disku a magnetů ze vzácných zemin. Tlumič má dlouhý zdvih a je vhodný pro seismické izolační zařízení, které je instalováno ve vysokém podlaží v budově. Byly navrženy dva typy magnetických tlumičů s mechanismem zvětšujícím sílu, jeden je tlumič pomocí kuličkového šroubu a druhý je tlumič využívající mechanismus zvětšování posunu a síly pákového typu.



Obrázek 3-38 - Schéma magnetický tlumiče [38]

Experimenty byly provedeny se dvěma různými počty magnetů, tj. 4 páry (8 magnetů) a 8 párů (16 magnetů). Odporová síla zkušební magnetického tlumiče je dána součtem magnetické tlumicí síly a třecí síly. Třecí síla je však zanedbatelná ve srovnání s magnetickou tlumicí silou v případě vibrací s velkou amplitudou (viz obr. 3-39). [38]



Obrázek 3-39 - Graf popisující nastavení hltiče [38]

3.8 Závěr rešeršní části

V úvodu této práce byly ohledány základní typy hltičů. Jejich vlastnosti poukázaly na hlavní rozdíly díky, kterým se dále budou rozlišovat. Dalším prozkoumaným tématem byly pasivní dynamické tlumiče, kde jsou výstupem základní principy tlumení vlastních kmitů. Zvlášť velký důraz byl kladen při ohledání magnetických tlumičů, které mají mnoho pozitivních vlastností, ať už to je bezkontaktnost, či jasně definovanou sílu magnetického pole. Následně byl proveden úvod do magnetismu a využití magnetů jakožto pružných prvků v průmyslu. Je zde popsáno využití magnetů jakožto pružného elementu například využití magnetické pružiny, kdy je tato metoda aplikována při konstrukci nízkofrekvenčního harvestoru energie, anebo také robotického chapadla s magnetickou pružinou. Ve výše zmiňovaných příkladech jde o nahrazení mechanické pružiny tou magnetickou. V neposlední řadě se rešerše zabývala magnetickou levitací, která je použita v magnetických ložiskách, nebo ve vlcích MAGLEV. Díky frekvenčním charakteristikám u jednotlivých studiích bude možné porovnávat výstupy v simulacích praktické části práce, zda je simulace správně nastavená. V závěrečné části rešerše je popsána problematika izolace okolí od vibrací. Jsou zde hojně využívány magnety, díky kterým izolované soustavy leží na magnetickém polštáři. Ten má za následek minimalizování působení okolních vibrací na těleso tedy jejich hlčení. V tabulce 3.1 níže je tabulka s některými vybranými zařízeními a přístroji, které využívají magnety.

Tabulka 3-1 - Přehled využití magnetů jakožto pružných prvků

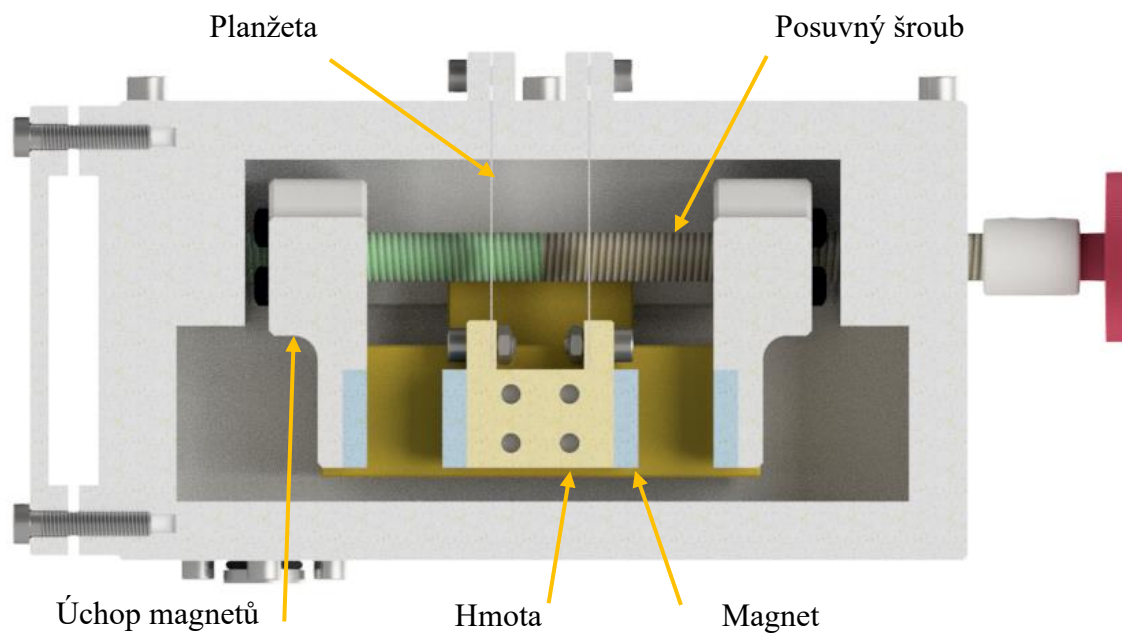
Číslo kapitoly	Název zařízení	Způsob užití magnetů
3.6.2.	Nízkofrekvenční harvestor energie	Nahrazení mechanické pružiny
3.6.3.	Robotické chapadlo s magnety	Definovaná síla magnetu
3.6.5.	Akumulace energie pro humanoidní paži	Nahrazení mechanické pružiny
3.7.1.	Hmotnostní tlumič pro pobřežní platformy	Odpudivá síla magnetů
3.7.3.	HTS bloky s permanentními magnety	Levitace

4 Návrh dynamického hltiče s magnety

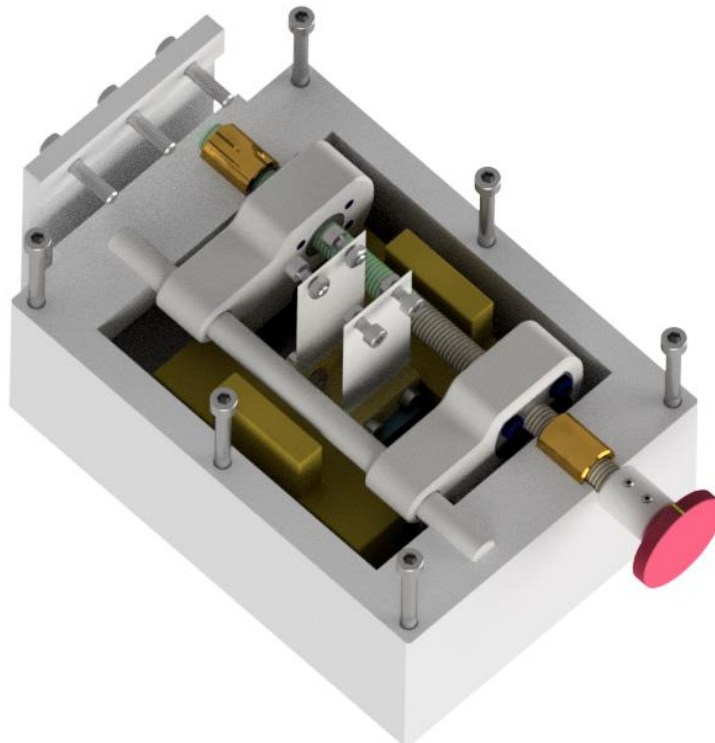
V této části budou navrženy tři konstrukční řešení dynamických hltičů s magnety s různými způsoby přeladění vlastní frekvence kmitů. Zadáním je zástavba 150 x 150 x 150 mm a obecně platná poučka – maximalizace pohyblivé hmoty v zástavbě. Průřez rámu je 10 x 63 mm. Tato řešení se budou lišit jak v konstrukci krabice, ve které bude hltící hmota umístěna, tak i ve způsobu pohybu magnetů, který bude možné vidět následně z návrhů řešení. Dbát se bude na co možná největší vyplnění hltící hmoty do prostoru krabice, a to z důvodu minimalizování parazitní hmoty, která je u jakéhokoliv hlčení vibrací nežádoucí. Opomenuta nebude ani snadná montáž, která zajistí jednoduché odejmutí víka a případnou instalaci akcelerometru či jiného měřicího zařízení pro případný experiment. Bude nutné zde užít ve velké míře samořezných šroubů určených do plastu, neboť velká část komponentů je z plastu, a u případné realizace jakéhokoliv návrhu, se budou plastové části tisknout na 3D tiskárně pro plast. U konstrukčních řešení bude kladen důraz na správné zajištění pohybu hltící hmoty tak, aby bylo zabráněno jejímu nežádoucímu pohybu, kdy například při použití pouze jedné planžety by mohlo vznikat riziko průhybu. To by mohlo mít za následek vznik nežádoucích vlastních tvarů kmitání. Pohyb magnetů u všech řešení bude zajištěn pohybovým šroubem s lichoběžníkovým závitem nerovnoramenným.

V potaz byla zvažena i jiná řešení například použití ozubeného kola. Avšak při snaze zajištění posuvu navzájem proti sobě se toto řešení jevílo jako zbytečně složité. Dále kvůli zajištění snadnosti chodu by vznikaly vůle a ty by zapříčinily zhoršenou citlivost při přeladění frekvence.

4.1 Návrh modelu č.1



Obrázek 4-1 - Řez 3D modelem č. 1



Obrázek 4-2 – Pohled na 3D modelem č. 1

Vnější obal hltiče je tvořen víkem, spodní krabicí a úchytnou deskou. Úchytná deska plní funkci fixace hltiče na rám o rozměrech 63 x 10 mm. Fixace je dosaženo pomocí 6 samořezných šroubů do plastu (ŠROUB KN 6039 M5 x 28). Víko je připevněno ke krabici pomocí 6 samořezných šroubů do plastu (ŠROUB KN 6039 M5 x 55). Na dosedací plochy víka a spodní krabice je aplikován těsnicí tmel LOCTITE 5927. Ze spodu krabice je umístěn výpustný otvor pro olej, kterým se hmota brodí při tlumení vibrací.

Otvor je realizován přes malou přírubu, ve které je závit, pro výpustný šroub (DIN 908 M12 x 1,5 x 12). Umístění příruby do dna krabice bylo zvoleno z důvodu nemožnosti zašroubování výpustného šroubu přímo do plastu. Mezi výpustný šroub a okraj příruby je umístěn těsnicí O – kroužek (TĚSNÍCÍ KROUŽEK DIN 3770 12 x 1), pro utěsnění případných netěsností. Příruba je do dna krabice upevněna pomocí 4 šroubů (ŠROUB DIN 912 M4 x 12), a dosedací plochy jsou utěsněny pomocí těsnicího tmelu LOCTITE 5927.

Planžety, které nesou hmotu a umožňují hmotě pohyb, jsou upevněny na víku pomocí 4 šroubů (ŠROUB DIN 912 M4 x 10) a 4 matic (MATICE DIN 934 M4). Hmota se skládá ze dvou částí: středové a dvou symetrických postranních hmot, z důvodu docílení maximálního využití vnitřního prostoru hltiče. Postranní hmoty jsou upevněny ke střední pomoci 4 šroubů (ŠROUB DIN 912 M5 x 30) z každé strany. Ke středové hmotě jsou uchyceny planžety pomocí 4 šroubů (ŠROUB DIN 912 M4 x 10) a 4 matic (MATICE DIN 934 M4).

Přenastavení vlastní frekvence hltiče, je zajištěno pomocí jedné vodící tyče a dvou závitovými tyčemi s lichoběžníkovým závitem nerovnoramenným (ČSN 01 4052). Tyto závitové tyče jsou vyrobeny s opačnými stoupáními tzn. jedna tyč má levochodé stoupání a druhá má pravochoché. To zaručuje vzájemný pohyb nosičů magnetů od sebe a k sobě pouze jedním nastavitelným kolečkem. Závitové tyče jsou spojeny svarovým spojem. Vodící tyč spolu se závitovou jsou uloženy v konstrukci spodní krabice a víky, kdy závitová tyč je uložena v kluzných pouzdrech vyrobených z mosazi na obou stranách krabice. Závitová tyč je spojena s nastavitelným kolečkem přes spojku se stavěcími šrouby (ŠROUB DIN 913 M3 x 6).

Magnety jsou přilepeny na středové hmotě a na úchopu magnetů pomocí lepidla (LOCTITE 401), kterým se nastavuje mezera mezi působícími magnety. Mezera u tohoto modelu je v rozsahu od 18 až po 0 mm. Avšak při vzdálenosti magnetů 0 mm nenastává hlčení, neboť zde není prostor pro pohyb hmoty, takže pracovní rozsah nastavitelnosti je od 18 do 1 mm.

Úchop magnetů je uložen na vodící tyči a závitové tyči, kdy do úchopu magnetů je vložena matice, která je připevněna na úchop pomocí 4 samořezných šroubů do plastu (ŠROUB WN 1552 M4 x 20).

Typ neodymového magnetu v tomto modelu byl zvolen N50 s rozměry 20 x 20 x 10 mm. Síla magnetu je 174,5 N, což je cca. 17,79 kg (viz obr. 4-1, 4-2).

Díly tisknuté na 3D tisku:

- Víko
- Spodní krabice
- Úchytná deska
- Nastavitelné kolečko
- Úchop magnetů

Ostatní díly:

- Šroub
- Těsnění
- Příruba
- Hltící hmota
- Mosazný kroužek
- Spojka
- Planžeta
- Závitová tyč
- Matice
- Posuvná matice

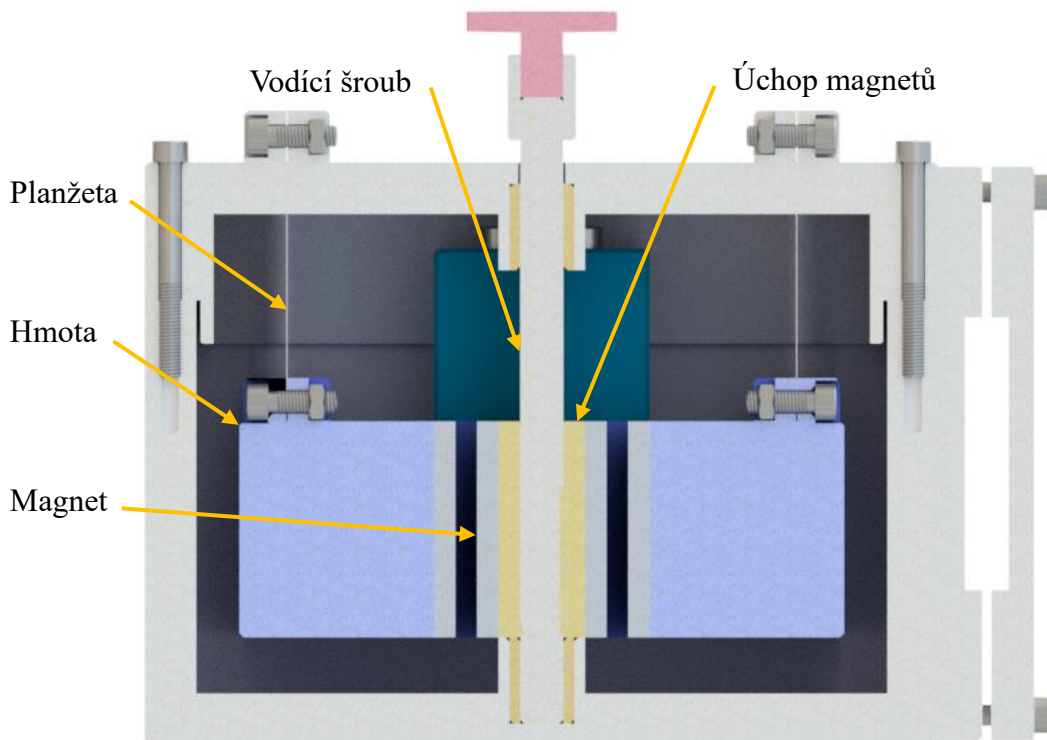
Výhody:

- Možnost vypouštění oleje přes výpustný šroub
- Snadná změna polohy magnetů pomoci jednoho nastavitelného kolečka
- Maximální vyplnění vnitřního prostoru krabice hmotou
- Pohyb hmoty zajištěn dvěma planžetami, což zajišťuje správný pohyb hmoty bez nežádoucích průhybů planžety
- Díky především plastové konstrukci hltiče a jeho součásti, je hmotnost parazitní hmoty minimální

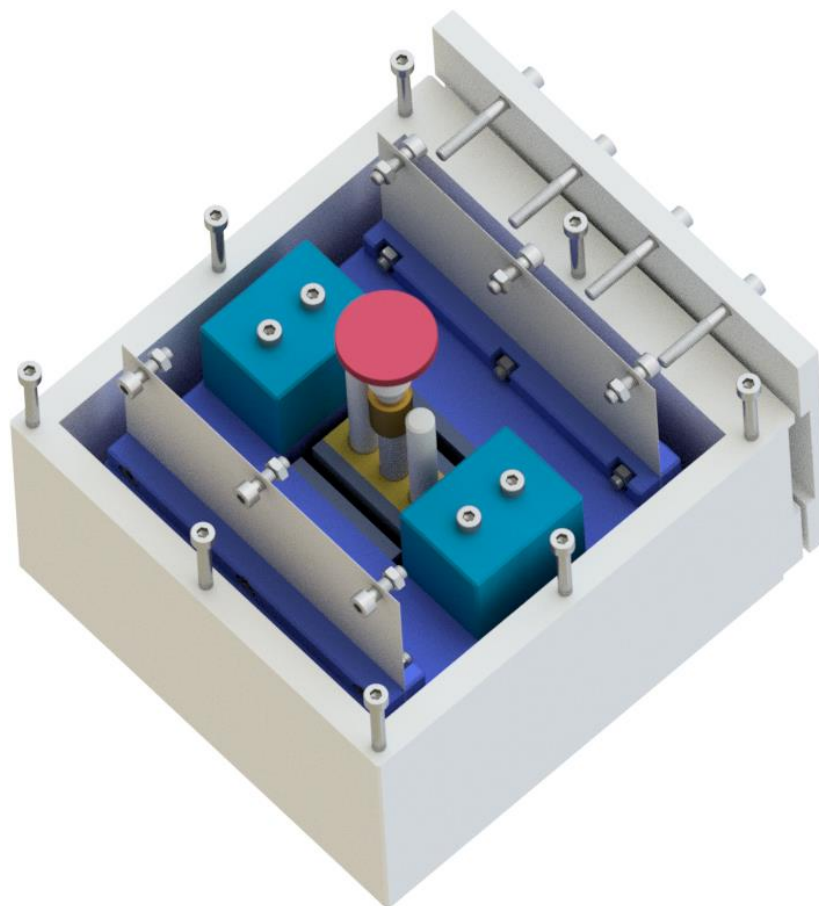
Nevýhody:

- Velké rozměry konstrukce
- Velké namáhání v místě svaru závitových tyčí
- Nutnost vypuštění oleje před odstraněním víka
- Planžety způsobují pohyb hmoty do dvou os, nikoli pouze do jedné což by bylo žádoucí

4.2 Návrh modelu č.2



Obrázek 4-3 - 3D model č. 2



Obrázek 4-4 - Řez 3D modelem č. 2

U této konstrukce bylo nutné zvýšit počet samořezných šroubů do plastu, a to jak při úchytu desky na rám, tak při uchycení víka ke spodní krabici. Opomenuté nejsou ani planžety, které plní funkci uchycení hltící hmoty. Ta byla rozšířena skoro na celou vnitřní délku hltiče. Důvodem je hmotnost hltící hmoty, která se skládá z hlavní hmoty a dále pak dvou nadstavbových.

Vnější obal hltiče se skládá z víka, spodní krabice a úchytné desky. Úchytná deska plní funkci fixace hltiče na rám o rozměrech 63 x 10 mm. Té je dosaženo pomocí 8 samořezných šroubů do plastu (ŠROUB KN 6039 M5 x 38). Víko je připevněno ke krabici pomocí 8 samořezných šroubů do plastu (ŠROUB KN 6039 M5 x 55). Na dosedající plochy víka a spodní krabice je aplikován těsnící tmel LOCTITE 5927. Ze spodu krabice je umístěn výpustný otvor pro olej, kterým se hmota brodí při tlumení vibrací. Ten je realizován přes malou přírubu, ve které je vytvořen závit, pro výpustný

šroub (DIN 908 M12 x 1,5 x 12). Umístění příruby do dna krabice bylo z důvodu nemožnosti zašroubovat výpustného šroub do plastu. Mezi výpustný šroub a okraj příruby je umístěn těsnící O – kroužek (TĚSNÍCÍ KROUŽEK DIN 3770 12 x 1), pro utěsnění případných netěsností. Příruba je do dna krabice upevněna pomocí 4 šroubů (ŠROUB DIN 912 M4 x 12), a dosedací plochy jsou utěsněny pomocí těsnícího tmelu LOCTITE 5927.

Planžety, které nesou hmotu a umožňují hmotě pohyb, jsou uchyceny na víku pomocí 6 šroubů (ŠROUB DIN 912 M5 x 16) a 6 matic (MATICE DIN 934 M5). Hmota se skládá ze dvou částí, spodní hlavní a dvou postranních hmot z důvodu, které jsou umístěny nad hlavní hmotou, aby bylo docíleno maximálního využití vnitřního prostoru hltiče. Postranní hmoty jsou upevněny k hlavní hmotě, každá pomocí 2 šroubů (ŠROUB DIN 912 M5 x 50). K hlavní hmotě jsou připevněny planžety pomocí 6 šroubů (ŠROUB DIN 912 M5 x 16) a 6 matic (MATICE DIN 934 M5).

Přenastavení vlastní frekvence funguje u tohoto modelu trochu jinak, než tomu bylo u předešlého, kdy se měnila vzdálenost mezi magnety. Zde se operuje se změnou působících plochy magnetů, kdy vzdálenost mezi magnety zůstává stejná. Konkrétně je u tohoto modelu zvolena vzduchová mezera mezi magnety na 5 mm. Změna působících ploch je zajištěna pomocí jedné závitové tyče a dvou vodících tyčí. Byly použity dvě z důvodu předpokládání působení velkých odpuzivých magnetických sil. Závitová tyč obsahuje konkrétně lichoběžníkový závit nerovnoramenný (ČSN 01 4052) s pravým smyslem stoupání. Jak závitová, tak vodící tyč jsou uchyceny do dna spodní krabice a vnitřní strany horní krabice. Závitová tyč je ještě uložena v kluzných pouzdrech vyrobených z mosazi. Závitová tyč je spojena s nastavitelným kolečkem přes spojku se stavěcími šrouby (ŠROUB DIN 913 M3 x 6).

Jak už bylo dříve zmíněno, tak mezera mezi magnety je konstantní. Velikost působících ploch v základní poloze je 2500 mm^2 . Naproti tomu velikost působících ploch v krajní poloze magnetů je 750 mm^2 . Úchop magnetů je umístěn na závitové tyči a dvou vodících tyčích, kdy pomocí nastavitelného kolečka měníme velikost působících ploch magnetů.

Typ neodymového magnetu v tomto modelu byl zvolen N50 s rozměry 50 x 50 x 5 mm. Síla magnetu je 215,2 N, což je cca. 21,94 kg (viz obr. 4-3, 4-4).

Díly tisknuté na 3D tisku:

- Úchop na rám
- Nastavitelné kolečko
- Víko
- Spodní krabice

Ostatní díly:

- Spodní hmota
- Vedlejší hmoty
- Úchop magnetů
- Příruba
- Mosazný kroužek
- Šrouby
- Vodící tyče
- Závitová tyč
- Spojka
- Planžeta
- Matice
- Těsnění

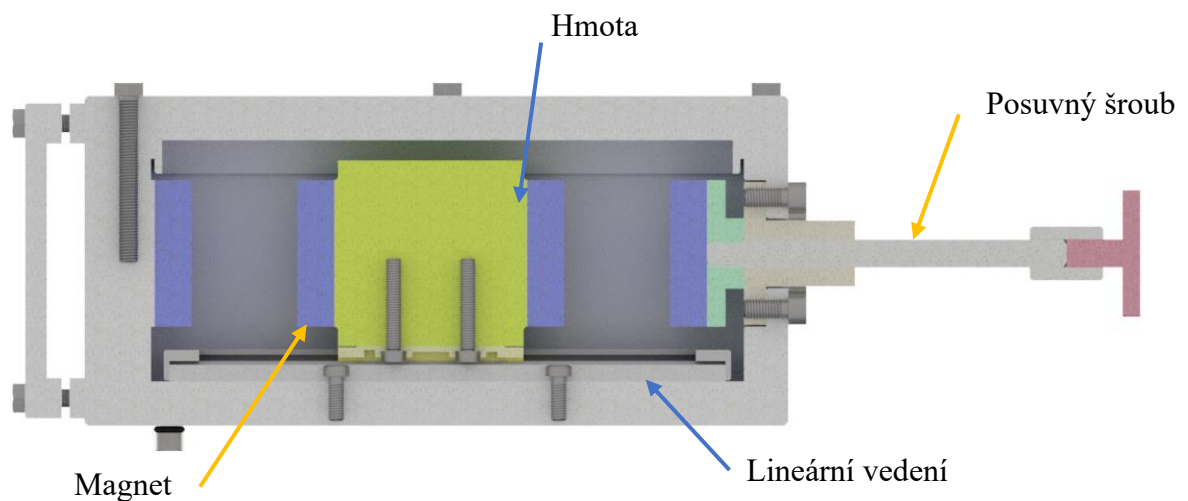
Výhody:

- Jednoduchá konstrukce
- Možnost vypuštění oleje přes vypustný šroub
- Maximální vyplnění vnitřního prostoru
- Pohyb hmoty zajištěn dvěma planžetami, což zajišťuje správný pohyb hmoty bez nežádoucích průhybů planžety
- Přenastavení síly magnetu pouze pomocí jednoho nastavitelného kolečka

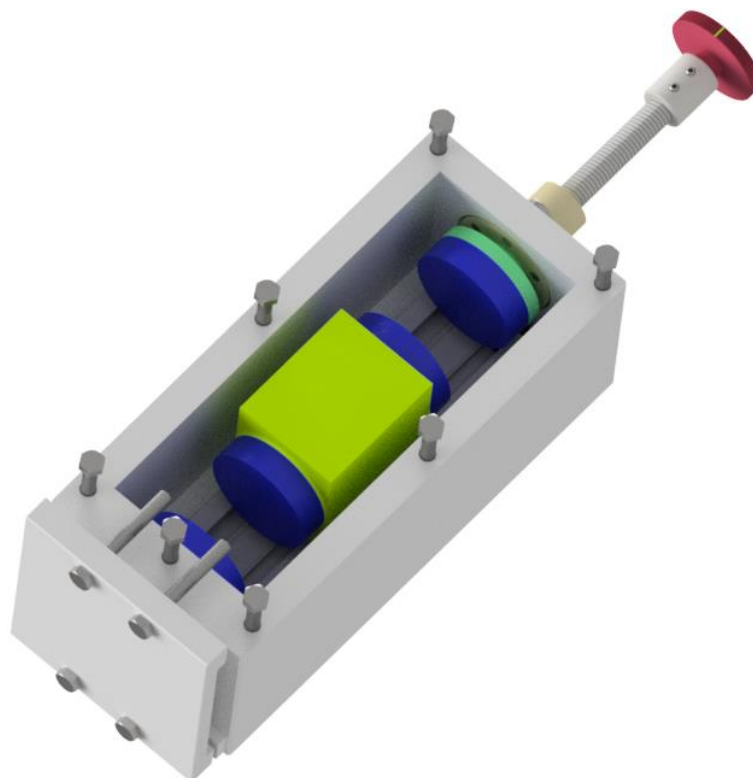
Nevýhody:

- Parazitní hmoty
- Velký rozměr
- Neověřený princip přenastavení vlastní frekvence
- Nutnost vypuštění oleje před demontáží víka
- Planžety způsobují pohyb hmoty do dvou os, nikoli pouze do jedné což by bylo žádoucí

4.3 Návrh modelu č.3



Obrázek 4-5 - 3D model č. 3



Obrázek 4-6 - Řez 3D modelu č. 3

U této konstrukce bylo zvoleno jiné uložení hmoty, než tomu bylo u předešlých dvou návrhů, kde uchycení a následný pohyb hmoty byl zajištěn pomocí planžet připevněných na víku konstrukce hltiče. Bylo zvoleno lineární vedení od firmy Hennlich, které zaručuje pohyb hmoty pouze v jedné ose, čehož nebylo docíleno u žádného z předešlých modelů. Problém planžety byl ten, že ačkoliv zajišťovala pohyb v jedné ose, byl zde také pohyb do další osy což způsobovalo vychýlení magnetů a tím pádem zmenšení dosedací plochy magnetů.

Vnější obal hltiče se skládá z víka, spodní krabice a úchytné desky. Úchytná deska plní funkci fixace hltiče na rám o rozměrech 63 x 10 mm. Díky malým rozměrům hltiče byly použity pouze 4 samořezné šrouby do plastu (ŠROUB KN6039 M5 x 38). Víko je připevněno ke krabici pomocí 7 samořezných šroubů do plastu (ŠROUB KN6039 M5 x 45). Na dosedací plochy víka a spodní krabice je aplikován těsnící tmel LOCTITE 5927. Z konstrukčních důvodů nebyl na dně spodní krabice použit normovaný vypustný šroub pro vypust' oleje, kterým se hmota brodí při hlčení vibrací, ale byla zde vytvořena díra

pro samořezný šroub pro plast (ŠROUB KN6039 M5 x 12). Mezi výpustný šroub a plochu spodní krabice je umístěn těsnící O – kroužek (TĚSNÍCÍ KROUŽEK DIN 3770 5 x 1), pro utěsnění případných netěsností. Do otvoru pro výpusť oleje byl aplikován těsnící tmel LOCTITE 5927.

Pohyb hmoty je zajištěn pomocí lineárního vedení (Hennlich drylin N40), vozíku pro hmotu jezdícím ve vedení (Hennlich NW-01-40) a zátky na kolejnici (Hennlich NSK-40). Zástavbová výška kolejnice je 9,5 mm a šířka 40 mm. Kolejnice je upevněna ke spodní krabici pomocí dvou šroubů do plastu (ŠROUB KN6039 M4 x 13). Aby se zabránilo úniku oleje z nádoby je do díry pro šroub aplikován těsnící tmel LOCTITE 5927. Hmota je připevněna k vozíku pomocí dvou šroubů (ŠROUB GB/T 2671.1-2004 M4 x 25).

K přenastavení vzdálenosti magnetů je použita závitová tyč s lichoběžníkovým závitem nerovnoramenným (ČSN 01 4052) s pravým smyslem stoupání. Díky lineárnímu vedení se závitová tyč pohybuje pouze s jedním magnetem, kdy se při změně polohy jednoho magnetu hltící hmota vystředí mezi oba magnety. Tím vznikne stejná vzdálenost mezi oběma magnety, kde je jeden umístěn na stěně spodní krabice a druhý na úchopu magnetu. Úchop magnetu je připevněn k závitové tyči přes lichoběžníkový závit nerovnoramenný (ČSN 01 4052) a aplikací lepidla (LOCTITE 603). Závitová tyč je vedena do hltiče přes přírubu, která je připevněna do stěny spodní krabice pomocí 6 šroubů (ŠROUB DIN 912 M5 x 12). Nastavitelné kolečko je spojeno se závitovou tyčí pomocí spojky se stavěcími šrouby (ŠROUB DIN 913 M3 x 6).

Magnety jsou připevněny na hmotu, spodní krabici a úchop magnetu pomocí lepidla (LOCTITE 401). Mezera u tohoto modelu je v rozsahu od 28,5 mm až po 0 mm. Avšak při vzdálenosti magnetů 0 mm nenastává hlčení, neboť zde není prostor pro pohyb hmoty, takže účinný rozsah nastavitelnosti je od 28,5 mm do 1 mm. Tvar magnetu, který byl zvolen je válcového typu z důvodu přenastavení vzdálenosti magnetů, kdy dochází k otáčení úchopu magnetů a tím pádem i samotného magnetu.

Typ neodymového magnetu v tomto modelu byl zvolen N50 s rozměry 40 x 10 mm. Síla magnetu je 332,7 N, což je cca. 33,92 kg (viz obr. 4-5, 4-6).

Díly tisknuté na 3D tisku:

- Úchop na rám
- Nastavitelné kolečko
- Víko
- Spodní krabice

Ostatní díly:

- Hmota
- Úchop magnetů
- Příruba
- Šrouby
- Závitová tyč
- Spojka
- Těsnění
- Lineární vedení
- Vozík
- Zátky

Výhody:

- Jednoduchá a malá konstrukce
- Možnost vypuštění oleje přes výpustnou díru
- Maximální vyplnění vnitřního prostoru
- Pohyb hmoty zajištěn lineární vedení, což zajišťuje pohyb hmoty pouze v jedné ose
- Snadná rozebíratelnou
- Přenastavení síly magnetu pouze pomocí jedné závitové tyče

Nevýhody

- Parazitní hmoty
- Nutnost vypuštění oleje před demontáží víka

4.4 Výběr vhodného řešení

Při rozhodování byla brána v potaz následující kritéria.

- Ideální pohyb hmoty, který zaručoval posun hmoty pouze v jedné ose.
- Přenastavení vlastní frekvence hltiče.
- Celková velikost hltiče.
- Složitost celkové konstrukce.

Tabulka 4-1 - Porovnání hltičů

	Model č. 1	Model č. 2	Model č. 3
Pohyb v jedné ose	***	***	*****
Přenastavení vlastní frekvence	****	**	****
Velikost	***	*	****
Konstrukce	**	***	****

Po zvážení všech těchto kritérií na základě tabulky č. 4-1, byl vybrán návrh modelu č. 3. Modely jsou hodnoceny pomocí škály (* - nejhorší, ***** - nejlepší). V úvaze byl také brán návrh modelu č. 1, jelikož je se svým sofistikovaným řešením určitě zajímavým návrhem. Je zde však jeden aspekt, který by při následném přenastavení vlastní frekvence mohl dělat problém. Jedná se o průhyb závitové tyče, kde jsou k sobě připevněny dva protichůdné závity pomocí sváru. Jelikož není jisté, do jaké míry by byl velký průhyb u spojené závitové tyče, bylo by nutné tento model podrobit experimentu v laboratoři a následný průhyb zhodnotit. Model č. 2 je vyřazen z důvodu, neznámého přenastavení vlastní frekvence, neboť ta se zde přenastavuje, nikoli pomocí změny vzdálenosti mezi magnety, ale pomocí změny působících ploch mezi magnety.

5 Simulační část s mechanickým hltičem

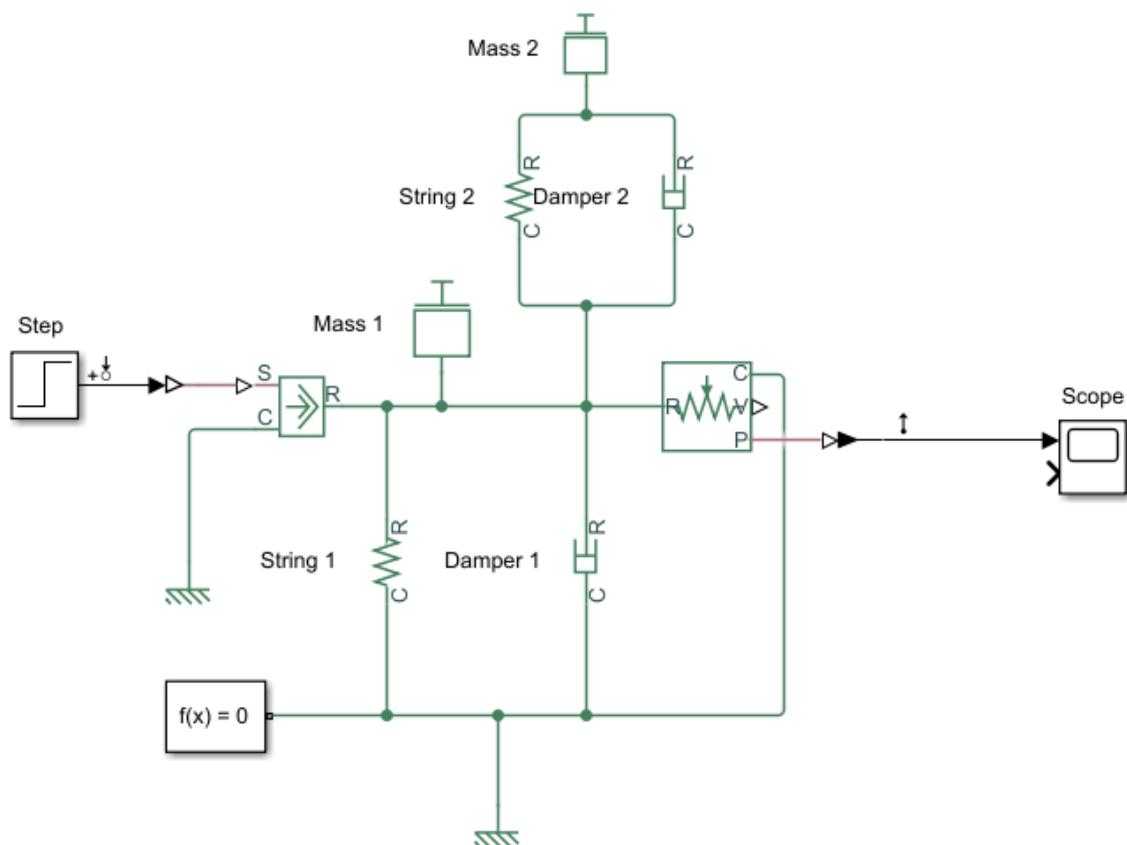
Pro seznámení se s principem hlcení je využit dvou hmotový systém s mechanickými pružinami (viz obr. 3-3). Vlastní frekvence struktury, díky které se určila vlastní frekvence hlticí hmoty, byla vypočtena ze vzorce:

$$f = \frac{1}{2\pi} * \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (4.1)$$

Kde tuhost pružiny se dá vypočíst dle vztahu:

$$k = m * \omega^2 \quad (4.2)$$

$$\omega = 2\pi f \quad (4.3)$$



Obrázek 5-1 - Schéma dvouhmotového systému

Schéma na obr. 5-1 znázorňuje dvouhmotový systém, který se skládá z hmoty (Mass), pružiny (String), tlumiče (Damper), Step, který udává systém do pohybu, Scope, díky které mu se znázorňují grafy, ideálním pohybovým senzorem a ideálním silovým

senzorem. Pro snadnější představu, jak dvou hmotový systém vypadá je schéma na obr. 3-3.

Ideální silový senzor



Obrázek 5-2 - Značka ideálního silového senzoru [39]

- Představuje zařízení, které převádí proměnnou procházející senzorem na řídicí signál úměrný síle.
- Jedná se o silový senzor v mechanicky pohybovém systému.
- Připojení R a C jsou mechanické porty šetřící translaci. Připojte tento snímač do série s blokem, kde chcete měřit sílu, protože síla je proměnná Through (pro mechanickou translační doménu). Senzor omezuje porty R a C, aby mezi nimi nedocházelo k žádnému pohybu, proto paralelní připojení senzoru může ovlivnit výsledky simulace.
- Připojení F je fyzický signální port, který udává výsledek měření. Kladný směr bloku je z portu R do portu C. To znamená, že kladná síla aplikovaná na port R (kladná sonda snímače) generuje kladný výstupní signál. (viz obr. 5-2) [39, 41]

Ideální pohybový senzor

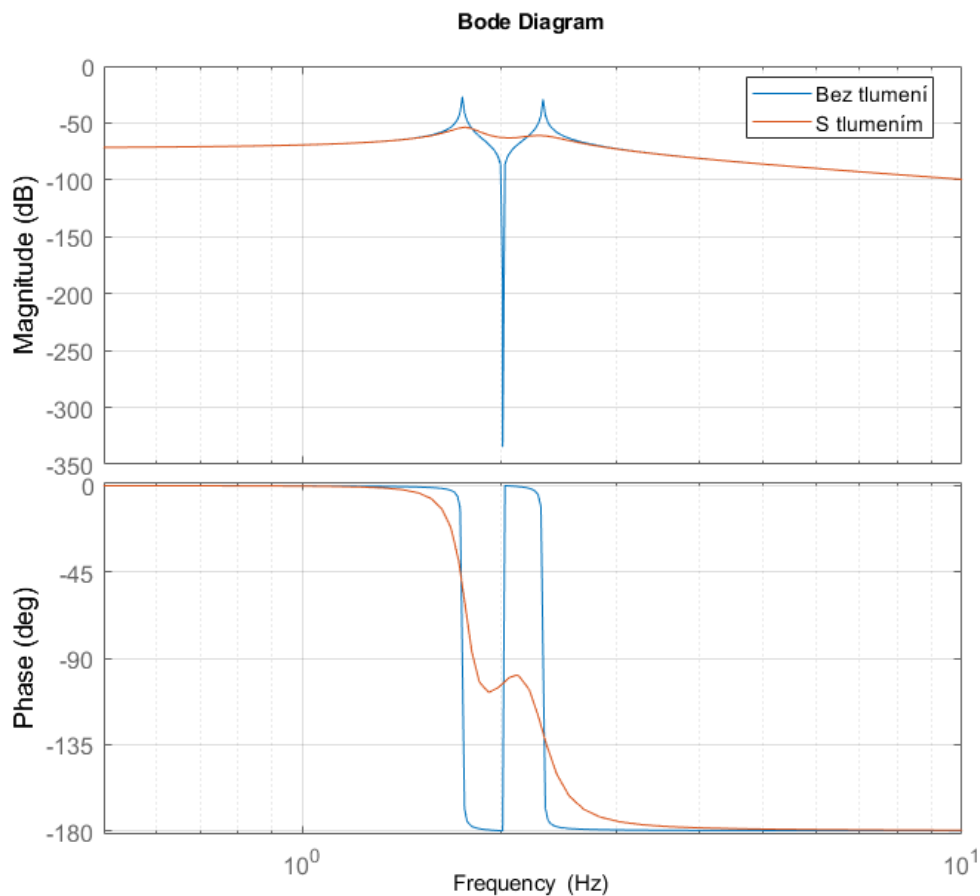


Obrázek 5-3 - Značka ideálního pohybového senzoru [40]

- Představuje zařízení, které převádí napříč měřenou proměnnou mezi dvěma mechanickými translačními uzly na řídicí signál úměrný rychlosti, nebo poloze. Počáteční polohu (offset) můžete zadat jako parametr bloku.

- Jedná se o pohybový senzor v mechanicky pohybovém systému.
- Spojení R a C jsou mechanické translační šetřící porty, které spojují blok s uzly, jejichž pohyb je monitorován. Spojení V a P jsou fyzické výstupní porty signálu pro rychlost a polohu.
- Kladný směr bloku je z portu R do portu C. To znamená, že rychlost je měřena jako $v = v_R - v_C$, kde v_R , v_C jsou absolutní rychlosti na portech R a C. (viz obr. 5-3) [40, 41]

Graf na obr. 5-4 nastiňuje dva výstupy. Modře zaznačený průběh, je schéma do kterého bylo uhozeno modálním kladivem a je zde použit hltič s vyřazeným tlumičem. Naproti tomu struktura, která má červený průběh, ukazuje zahlazení maximálních výchylek struktury s modelem hltiče vybaveného tlumičem.



Obrázek 5-4 - Graf výchylky a fáze dvoumotového systému

Tabulka 5-1 - Nastavení dvouhmotového systému

Struktura 1			
Hmotnost [kg]	Vlastní frekvence [Hz]	Tuhost pružiny [N/m]	Koef. Tlumení [N*s/m]
25	2,013	4000	2
Struktura 2			
Hmotnost [kg]	Vlastní frekvence [Hz]	Tuhost pružiny [N/m]	Koef. Tlumení [N*s/m]
2	2,013	320	6

Model je znázorněn na obr. 5-1. Struktura 1 je definována pomocí hmotnosti, tuhosti pružiny a koeficientu tlumení. Z těchto parametrů je následně určena vlastní frekvence struktury 1 pomocí rovnice (4.1). Pro strukturu 2 byly dány hodnoty hmotnosti, vlastní frekvence a koeficientu tlumení. Z těchto dat byla následně vypočtena dle rovnice (4.1) tuhost mechanické pružiny, kterou musí mít, aby docházelo k požadovanému hlčení vibrací (viz tabulka 5-1).

5.1 Simulace v programu Comsol Multiphysics

Po seznámení se s principem hlčení, bude vytvořen model podle návrhu řešení č. 3. V první části této studie bude zkoumáno magnetické pole hltiče a jakým způsobem na sebe magnety vůbec působí. Následně budou ohledány průběhy silových účinků v závislosti na vychýlení magnetů.

Hmotnosti jednotlivých prvků jsou:

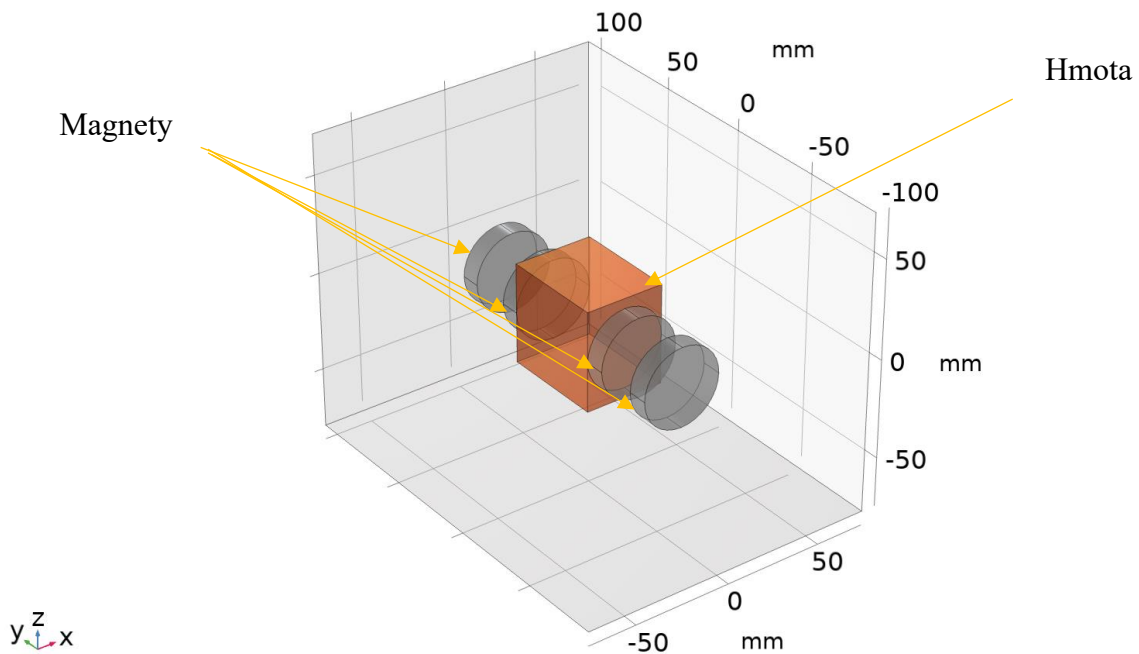
- Hmota – $m = 0,93$ kg
- Magnet – $m = 0,093$ kg

5.1.1 Nastavení geometrie a materiálu

Na začátku simulace je nutné definovat rozměry geometrie modelu, které odpovídají vybranému 3D modelu č. 3. Vzduchová mezera na obou stranách mezi magnety je 20 mm. Vytvořená geometrie musí být umístěna do prostoru obdélníkovitého tvaru, později zdefinovaného jako vzduch (viz obr. 5-5).

Konkrétní rozměry:

- Hmota – 40 x 50 x 50 mm
- Magnety – 40 x 10 mm



Obrázek 5-5 - Model s vyznačenou geometrií

Z důvodu zmenšení působení magnetických polí magnetů umístěných na hmotě vůči sobě byl zvolen materiál hmoty měď. Ta je definována v programu s hustotou $\rho = 8960 \frac{kg}{m^3}$ a relativní permeabilitou $\mu_r = 1$.

U magnetů byl zvolen materiál neodymového magnetu N50, který je jedním z nejsilnějších paramagnetů vůbec. Hustota tohoto materiálu je $\rho = 7600 \frac{kg}{m^3}$. Konkrétně tento typ magnetu je znám svou špatnou tepelnou odolností a tím, že při zvýšení pracovní teploty ztrácí sílu svého magnetického pole. Maximální teplota, při které magnet N50 neztrácí svou sílu je $T = 90^\circ C$. Další podstatná vlastnost charakterizující magnet je remanence, ta má zde velikost $Br = 1400 mT$.

5.1.2 Nastavení magnetického pole

Definovány jsou dvě dvojice magnetů, neboť oba magnety z oné dvojice mají souhlasně orientované magnetické pole.

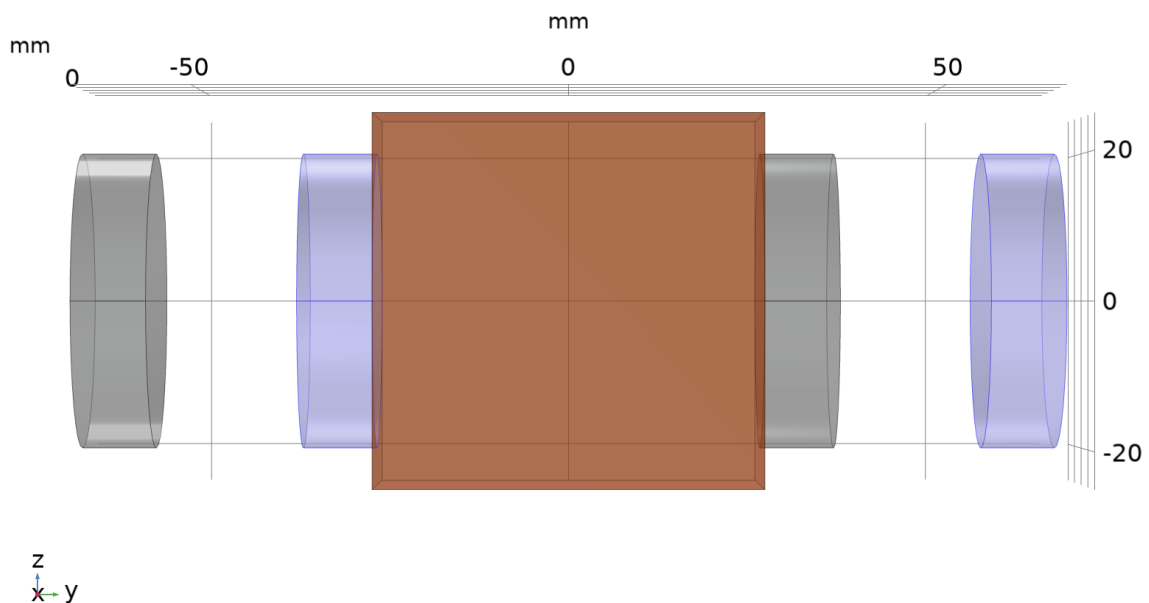
První dvojice magnetů, označené modře, je zadefinována pomocí remanence, kdy vektor remanence do směru y je $e_y = -1$. Ostatní charakteristické parametry jsou brány podle hodnot nadefinované materiálem v knihovně programu Comsol Multiphysics.

Druhá dvojice magnetů označená šedě, má definovaný rozměr vektoru remanence jako $e_y = 1$. Ostatní parametry jsou nastaveny dle knihovny materiálů (viz obr. 5-6).

Samotné magnetické pole je popsáno dle těchto rovnic:

$$B = \mu_0 * \mu_r * H + Br \quad (4.4)$$

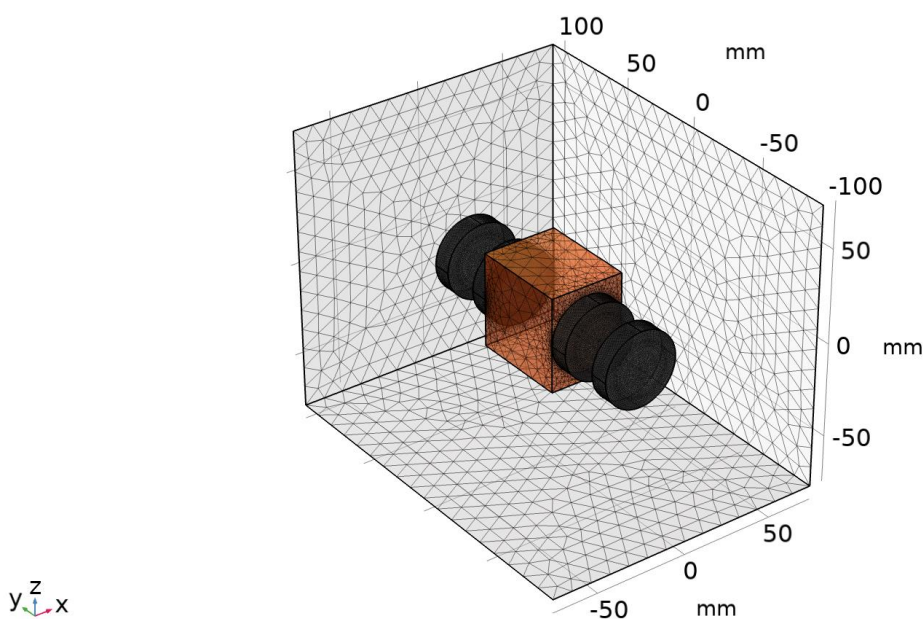
$$Br = \|Br\| * \frac{e}{\|e\|} \quad (4.5)$$



Obrázek 5-6 - Model s definováním magnetů

5.1.3 Nastavení jemnosti sítě

V této části studie je nutné nadefinovat jemnost sítě. Pro každou jednotlivou geometrii, která je vytvořena. Definice sítě ploch geometrie se rozděluje podle dvou parametrů: na geometrie, které nejsou pro následné výpočty důležité a na geometrie, které jsou stěžejní pro další výpočty. Toto kritérium se zvolilo, neboť výpočty jsou dosti složité a není žádoucí, aby simulace trvaly příliš dlouho (viz obr. 5-7).



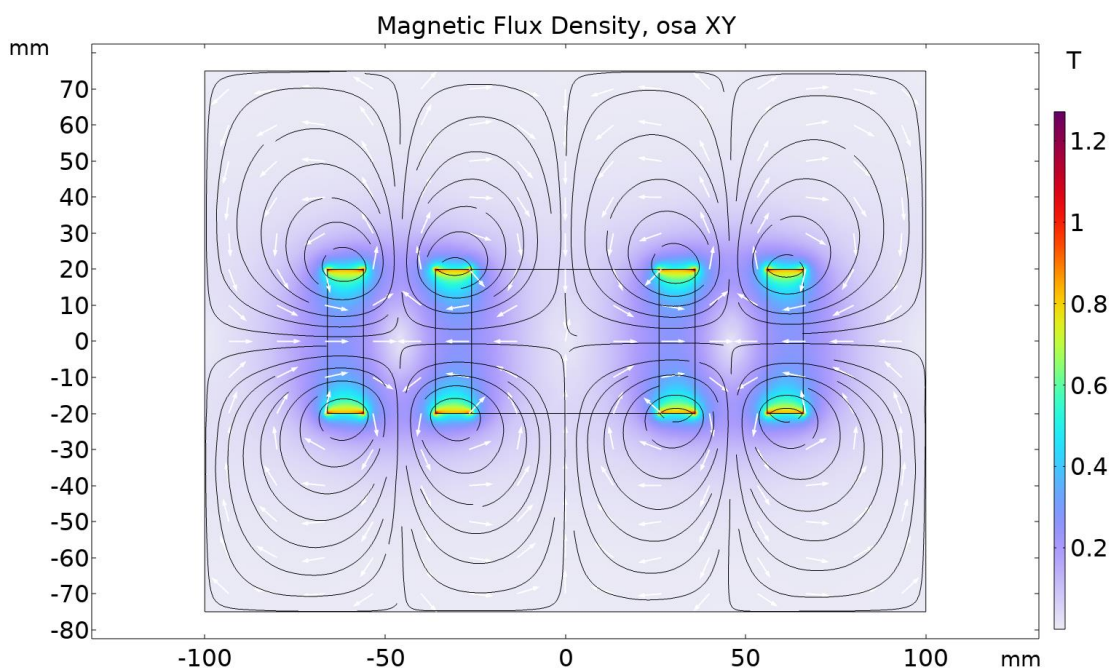
Obrázek 5-7 - Model jemnosti sítě

5.1.4 Parametrické definování rozměrů

Pro následné výpočty jsou nastaveny dvě parametrické hodnoty. První je vzdálenost hmoty mezi magnety pomocí parametru dy_para , který udává posun hmoty k jednomu z magnetů od 0 do 19 mm, kdy celková vzduchová mezera je 20 mm. Druhý parametr h_max , který definuje jemnost sítě, je aplikován s krokem po 1 mm od 4 až po 1 mm velikosti dílku. Ten je zavedený z důvodu provedení studie jemnosti sítě na výsledku.

5.1.5 Hustota magnetického toku

Pro prvotní demonstraci, že magnety na sebe působí odpuzivými silami a nepřitahují se, je použit model hustoty magnetického toku.

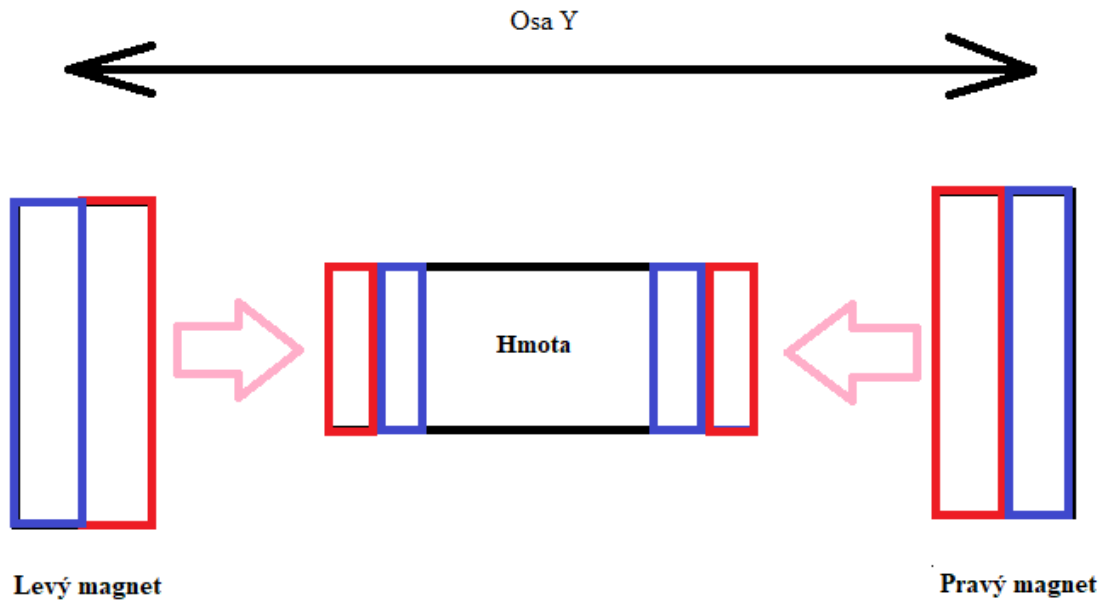


Obrázek 5-8 - Graf hustoty magnetického toku

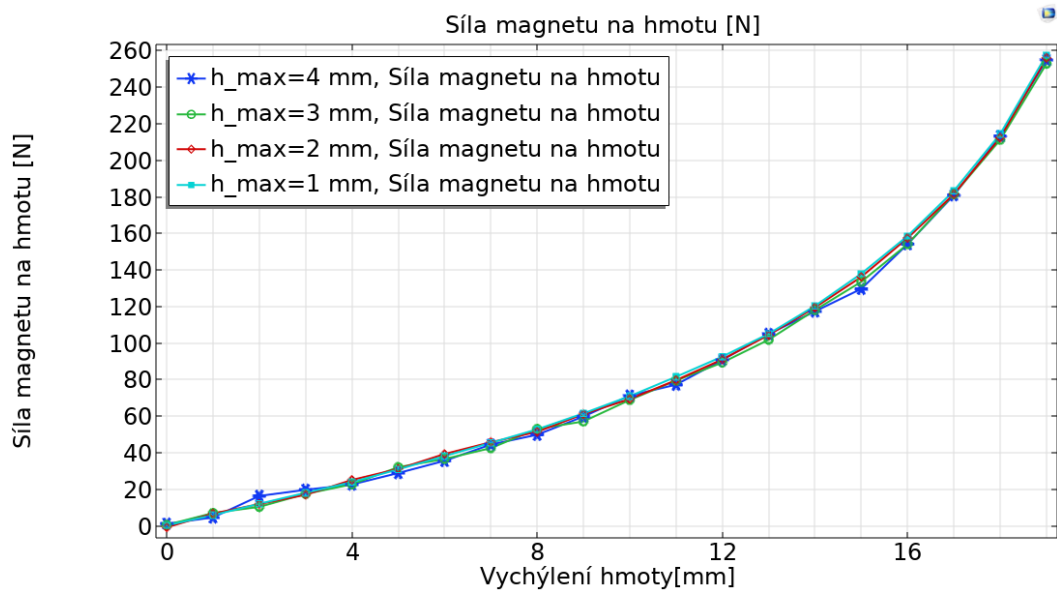
Na obr. 5-8 je vidět graf konkrétního působení všech 4 magnetů vůči sobě, kdy je hmota v ustálené poloze, tedy vzdálenost na obě strany mezi magnety je 20 mm. Potvrzuje se, že magnety jsou správně nadefinované a odpuzují se. Jelikož se jedná o řez, tak největší magnetická indukce je po okrajích magnetů. Kdy maximální naměřená hodnota byla $B = 1,169 T$ (viz obr. 5-8).

5.1.6 Závislost síly na vzdálenosti magnetu

Jde o závislost, kde při snižující se vzduchové mezeře roste síla mezi dvěma sousedícími magnety a dále při zvětšující se vzduchové mezeře síla klesá. Tento jev má funkci magnetické pružiny. Níže na obr. 5-9 je vidět základní schéma, kdy červeně zobrazené obdélníky zobrazují souhlasné póly magnetů, které se navzájem odpuzují. Dále pak modré obdélníky zobrazují opačné póly magnetů. Pohyb se zde uskutečňuje v ose Y, kde se pohybuje hltící hmota.

*Obrázek 5-9 - Schéma hmoty a magnetů*

Simulována je změna síly působící na plochu hltící hmoty. Tato síla se odvíjí od vzdálenosti mezi dvěma magnety. Pokud se hmota z počáteční polohy 0 mm pohybuje směrem k levému magnetu, vychýlení hmoty se zvětšuje a tím roste síla levého magnetu působícího na hmotu, jedná se tedy o sílu poloviny mechanismu. Zajímavé je také sledovat závislost změny jemnosti sítě na přesnosti velikosti sil v daném vychýlení. Jak je možné vidět z obr. 5-10, tak závislost síly na vychýlení není lineární závislost, jak je tomu u mechanické pružiny a křivku popisuje polynom.

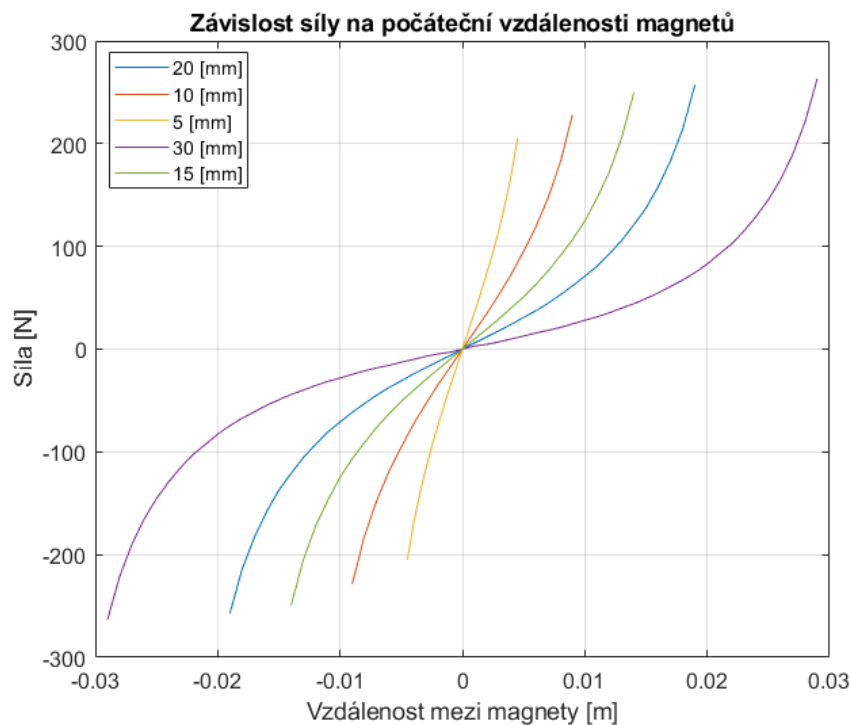


Obrázek 5-10 - Graf síly magnetu na hmotu s počáteční mezerou mezi magnety 20 mm

Na obr. 5-10 jsou vidět rozdíly velikosti sil v daných výchylkách v závislosti na nastavení jemnosti sítě. Pro ukázkou jsou zde uvedeny procentuální absolutní odchylky jemnosti sítě v závislosti na nastavené nejjemnější $h_{\max} = 1$ mm. Popisují, o kolik procent se síly v jednotlivých výchylkách průměrně liší od $h_{\max} = 1$ mm.

- $h_{\max} = 4$ mm \rightarrow 5,87 %
- $h_{\max} = 3$ mm \rightarrow 4,44 %
- $h_{\max} = 2$ mm \rightarrow 2,28 %

Při výpočtu těchto hodnot byly vyřazeny odchylky velikosti sil v nulovém vychýlení hmoty, protože odchylky zde vycházely v řádu desítek až stovek procent jinak. Pro sílu v nulovém vychýlení byla síla stanovena jako 0, neboť by to dále mohlo nepříznivě ovlivňovat hlacení vlastních frekvencí.

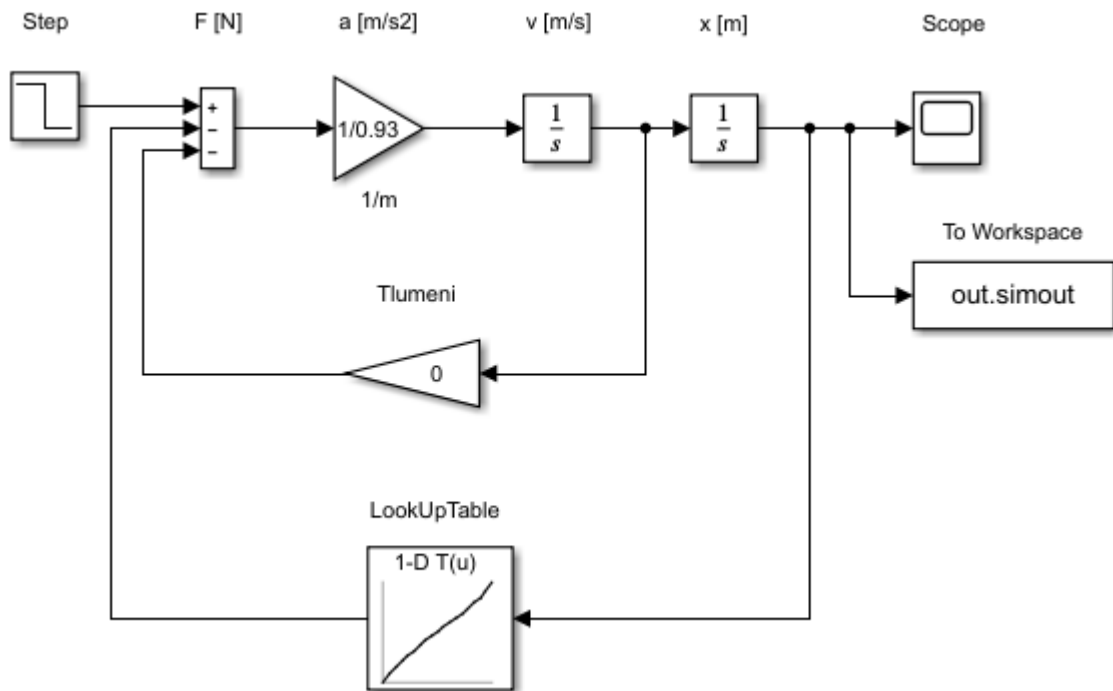


Obrázek 5-11 - Graf závislosti síly na počáteční vzdálenosti magnetů

Na obr. 5-11 je vidět, jak se mění charakteristika síly v závislosti na změnách polohy magnetů vůči sobě pro různé počáteční vzduchové mezery. Jelikož pro nastavené vzduchové mezery nevycházely maximální silové účinky stejně, bylo nutné tato data vyšetřit a nasimulovat každé nastavení zvlášť.

5.2 Matematický model

Na obr. 5-12 je vyobrazeno schéma pro simulaci vlastních frekvencí struktury. Hmota o hmotnosti $m = 0,93$ kg je rozpořbována pomocí bloku Step silou $F = 10$ N. Blok LookUpTable aproximuje vložená data, kdy pro konkrétní hodnoty síly v závislosti na poloze spočítá sílu působících magnetů na pohyblivou hmotu. Z bloku To Workspace následně kód v Matlabu vybírá data pro frekvenční charakteristiku.



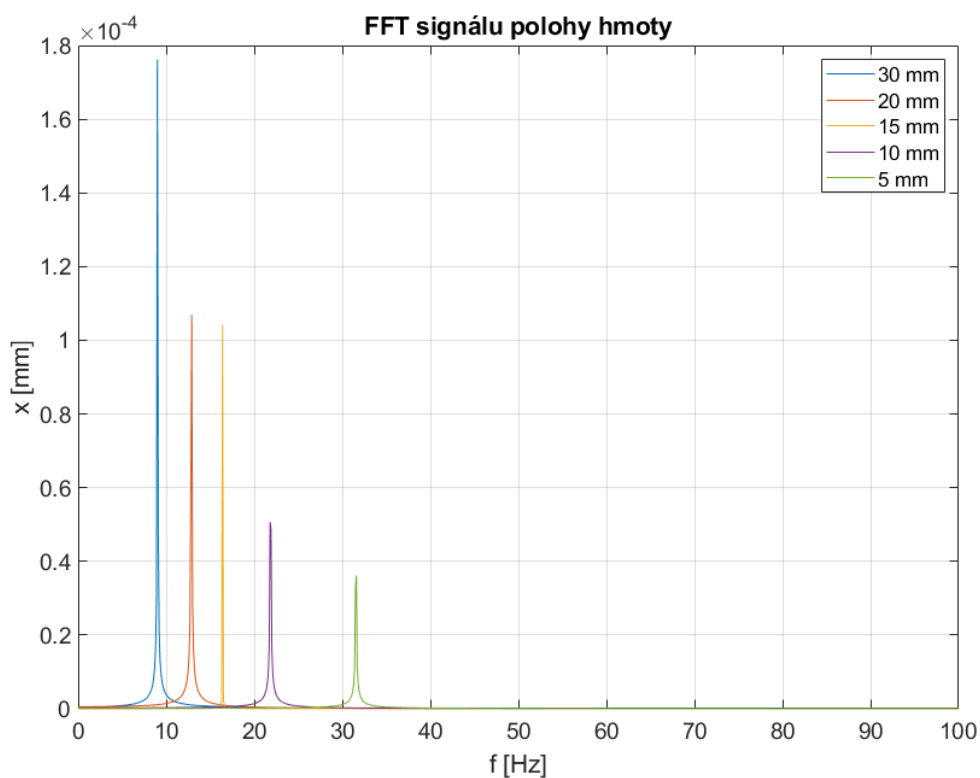
Obrázek 5-12 - Schéma FFT Simulink

V této části jsou zkoumány frekvenční charakteristiky kmitů, vyvolané impulzem síly. Na následných grafech lze vidět změny vlastních frekvencí v závislosti na změně velikosti vzduchové mezery mezi magnety. Vzhledem k tomu, že síla magnetů má charakter nelineární funkce, byly simulace prováděny v časové oblasti. Odečtené vlastní frekvence z průběhů kmitání jsou znázorněny pro různé počáteční vzduchové mezery v tabulce 5-2.

Tabulka 5-2 - Výstupy frekvenčních charakteristik

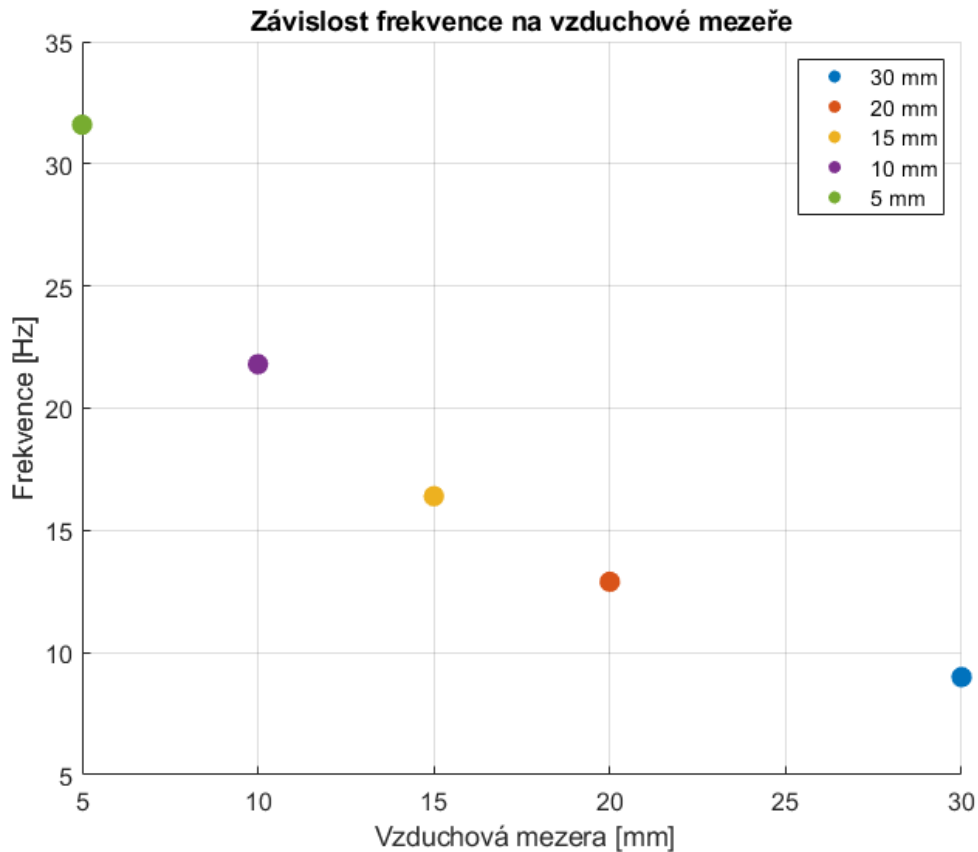
Vzduchová mezera mezi magnety [mm]	Amplituda frekvence [Hz]
5	31,59
10	21,79
15	16,39
20	12,89
30	8,99

Na obr. 5-13 jsou vidět frekvenční charakteristiky pro jednotlivé vzdálenosti. Tyto hodnoty byly získány pomocí FFT signálu polohy. Největší naměřená frekvence 31,59 Hz byla pro vzduchovou mezeru mezi magnety 5 mm.



Obrázek 5-13 - Graf frekvenčních charakteristik

V grafu na obr. 5-14 jsou vidět body amplitud frekvencí pro jednotlivé nastavení vzduchové mezery.



Obrázek 5-14 - Graf závislosti frekvence na vzduchové mezeře

Dále lze proložit body polynom, který by popisoval vlastní frekvence hltiče v závislosti na vzduchové mezeře. Nabízela by se pak možnost využití polynomu pro experiment, kdy by bylo možné pomocí polynomu vypočítat velikost vzduchové mezery pro danou frekvenci hlcené struktury. Při úvaze jednoduchého nosníku, který by bylo možné přeladovat změnou volné délky nosníku, lze jeho frekvenční vlastnosti velmi přesně identifikovat. Následně lze pro vlastní frekvence nosníku nalézt odpovídající velikost vzduchové mezery hltiče a aplikovat jej na nosník. Při znalosti přeladění struktury by bylo možné proces naladění pasivního dynamického hltiče s magnety i automatizovat pomocí aktuátoru, nebo krokového motoru.

6 Závěr

V úvodní části práce je představena rešerše, která mapuje rozdělení hltičů vibrací, využití magnetů jakožto pružných prvků a izolace od vibrací okolí. Každá z těchto částí poslouží, jako ucelený zdroj informací o zařízeních a přístupech, které využívají magnety jako pružné elementy pro praktickou část.

Zpracované téma základního rozdělení hltičů ujasňuje rozdíly mezi třemi základními druhy hltičů: aktivními, semi-aktivními a pasivními. Následně byly podrobně zdokumentovány pasivní druhy tlumení vibrací. Tato část měla mnoho zástupců, jako například impact damper, magnetický tlumič, anebo také třecí tlumič. Každé toto zařízení je jedinečné svým způsobem přeladění a silovými reakcemi, díky kterým dochází k disipaci energie.

Následně v další části rešerše jsou sledovány aplikace magnetů, kdy jsou magnety využity jakožto pružné prvky. Konkrétně u nízkofrekvenčního harvestoru energie jsou magnety využity nejen jako prvek pružiny, ale také po uspořádání pólů magnetů konkrétními směry, vytvoří Hallbachovo pole a zintenzivňují tak magnetické pole na jedné straně magnetů. Neméně zajímavou aplikací magnetů jsou magnetická ložiska, či robotického chapadla s magnety, kde díky nadefinované síle magnetů nedochází při pevném dorazu chapadel na povrch tělesa k jeho poškození.

U izolace od vibrací okolí jsou popsány způsoby, jakými se dá tato problematika řešit. Zde využité magnety už nejsou pouze neodymové, ale v různých aplikacích jsou využité i supravodivé magnety (HTS). U mnohých z těchto výzkumů byly prováděny simulace a konkrétně, když se jednalo o izolaci základu budov od vibrací, byly ve značné míře použity konkrétní naměřené hodnoty zemětřesení, které se opravdu staly.

Návrh modelu č.1 je, co se týče konstrukce, složitým a velice důmyslným. Pohyb magnetů je zajištěn pomocí vodící tyče a pohybové tyče, na které jsou umístěny nerovnoramenné lichoběžníkové závity. Hlticí hmota se skládá ze tří menších hmot, jednak z důvodu úspory materiálu, ale také z důvodu vyplnění, co největšího prostoru uvnitř krabice.

U návrhu modelu č. 2 je zvolen trochu netradiční způsob přenastavení vlastní frekvence. Přeladění frekvence zde spočívá nikoliv ve změně vzdálenosti mezi hmotou a magnety, ale ve změně působící plochy mezi hmotou a magnety. Vzdálenost mezi magnetem a hmotou je dána 5 mm. Byla zde také vynaložena maximální snaha pro zaplnění vnitřního prostoru hltiče.

Návrh modelu č.3 byl po pečlivém uvážení, zvolen jako nejvýhodnější varianta z vytvořených 3D modelů. Struktura, která zde stojí za vyzdvihnutí je způsob uchycení hmoty a jeho vedení. Posun hmoty je zajištěn pomocí lineárního vedení, které díky svým vlastnostem má téměř nulový odpor vůči pohybu hmoty. Dále přenastavení vlastní frekvence je provedeno pomocí jedné závitové tyče, která představuje polohu jednoho magnetu. Díky lineárnímu vedení se při každé úpravě polohy magnetu hmota mezi magnety vystředí.

Na úvodu do simulace hlčení frekvencí byl použit program Matlab Simulink, kde je popsán princip nastavení koeficientu tlumení a tuhosti pružiny. Dále jsou zde vypočítány vlastní frekvence struktury, aby se z ní pak mohly určit nastavení mechanické pružiny na konkrétní frekvenci.

Následná část simulace pasivního dynamického hltiče pokračovala v programu Comsol Multiphysics. Simulována struktura odpovídá vybranému návrhu č. 3. Na počátku bylo nutné nadefinovat všechny důležité prvky, jako jsou například: geometrie, materiál, jemnost sítě na povrchu a zavazbení působení magnetů vůči sobě.

Výsledky, které byly výstupem ze simulace, jsou více než uspokojivé. Potvrdily se odpudivé účinky magnetů pro velikosti vzduchových mezer 5, 10, 15, 20 a 30 mm.

V závěrečné části je simulován model v programu Simulink pomocí dat ze simulace v programu Comsol Multiphysics. Vycházejí zde amplitudy frekvenčních charakteristik, ale hlavně vlastní frekvence hltiče pro jednotlivé nastavení vzduchové mezery. Dále byl vytvořen graf, který jasně ukazuje závislost mezi vlastní frekvencí struktury a velikostí nastavené vzduchové mezery.

Výstupy bakalářské práce dávají prostor pro další vyšetřování hlčení vibrací pomocí magnetické pružiny.

Seznam použité literatury

- [1] INFO@SABRE.CZ, Sabre, www.sabre.cz, e-mail: Cesty ke zvýšení efektivnosti navrhování obráběcích strojů (4) | Technický týdeník [online]. nedatováno [vid. 2022-01-20]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/serialy/ze-zivota-vyzkumneho-centra/cesty-ke-zvyseni-efektivnosti-navrhovani-obrabecich-stroju-4_33637.html
- [2] LOURENCO, Richard. Design, Construction and Testing of an Adaptive Pendulum Tuned Mass Damper. nedatováno, 125.
- [3] homework and exercises - What are the forces acting on a Pendulum Tuned Mass Damper? *Physics Stack Exchange* [online]. [vid. 2021-12-04]. Dostupné z: <https://physics.stackexchange.com/questions/149747/what-are-the-forces-acting-on-a-pendulum-tuned-mass-damper>
- [4] Fig. 3. Schematic of a tuned-mass damper installed on a structure. *ResearchGate* [online]. [vid. 2021-12-04]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-a-tuned-mass-damper-installed-on-a-structure_fig2_286128139
- [5] ŠIKA, Zbyněk. *Aktivní a poloaktivní snižování mechanického kmitání strojů*. Praha, 2004. Habilitační práce. České vysoké učení technické.
- [6] *Vibration damping: What's the difference between passive and active?* [online]. [vid. 2021-11-03]. Dostupné z: <https://www.motioncontroltips.com/vibration-damping-whats-the-difference-between-passive-and-active-methods/>
- [7] SLAVÍK, Jaromír, Vladimír STEJSKAL a Vladimír ZEMAN. *Základy dynamiky strojů*. Praha: České vysoké učení technické, 1997. ISBN isbn80-01-01622-6.
- [8] SODANO, Henry A., Daniel J. INMAN a W. Keith BELVIN. Development of a New Passive-Active Magnetic Damper for Vibration Suppression. *Journal of Vibration and Acoustics* [online]. 2005, **128**(3), 318–327. ISSN 1048-9002. Dostupné z: doi:10.1115/1.2172258
- [9] *Viscous Damper - an overview | ScienceDirect Topics* [online]. [vid. 2022-01-20]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/viscous-damper>
- [10] HRŮŠOVÁ, Eva. *Vliv vnějších faktorů na biomechanické vlastnosti biologických materiálů* [online]. Hradec Králové, 2011. Diplomová práce. Univerzita Karlova v Praze Farmaceutická fakulta v Hradci Králové. Dostupné z: https://dspace.cuni.cz/bitstream/handle/20.500.11956/33549/DPTX_2009_1__0_296172_0_80818.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [11] *Friction dampers from SUSPA* [online]. [vid. 2021-11-20]. Dostupné z: <https://www.suspa.com/cz/produkty/treci-tlumice>

- [12] SHAO, Dihong, Avtar PALL a Bharat SOLI. FRICTION DAMPERS FOR SEISMIC UPGRADE OF A 14-STORY PATIENT TOWER WITH A 36-FOOT TALL SOFT-STORY. nedatováno, 10.
- [13] Figure 2: Mechanism of the friction damper device. *ResearchGate* [online]. [vid. 2022-01-20]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Mechanism-of-the-friction-damper-device_fig1_253029875
- [14] OLTMANN, J., T. HARTWICH a D. KRAUSE. Optimizing lightweight structures with particle damping using frequency based substructuring. *Design Science* [online]. 2020, **6** [vid. 2021-11-20]. ISSN 2053-4701. Dostupné z: doi:10.1017/dsj.2020.13
- [15] SIMONIAN, Stepan. *New Particle Damping Applications* [online]. 2004. ISBN 978-1-62410-079-6. Dostupné z: doi:10.2514/6.2004-1906
- [16] ZAHRAI, S M a A F ROD. Effect of impact damper on SDOF system vibrations under harmonic and impulsive excitations. *Journal of Physics: Conference Series* [online]. 2009, **181**, 012066. ISSN 1742-6596. Dostupné z: doi:10.1088/1742-6596/181/1/012066
- [17] Figure 1. Model for impact damper. *ResearchGate* [online]. [vid. 2021-12-04]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Model-for-impact-damper_fig1_329150551
- [18] HAGOOD, N. W. a A. VON FLOTOW. Damping of structural vibrations with piezoelectric materials and passive electrical networks. *Journal of Sound and Vibration* [online]. 1991, **146**(2), 243–268. ISSN 0022-460X. Dostupné z: doi:10.1016/0022-460X(91)90762-9
- [19] KOUKOLÍK, Václav. Využití piezoelektrického jevu v praxi. 2013, 77.
- [20] Figure 1. Actuated cantilever plate. A multimode piezoelectric passive... *ResearchGate* [online]. [vid. 2021-12-04]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Actuated-cantilever-plate-A-multimode-piezoelectric-passive-damper-can-be-obtained-by_fig1_233382083
- [21] *Co je magnetické pole? (článek) | Khan Academy* [online]. [vid. 2021-12-15]. Dostupné z: https://cs.khanacademy.org/_render
- [22] SEDLÁK, Bedřich a Ivan ŠTOLL. *Elektrina a magnetismus*. Vyd. 2., opr. a rozš. Praha: Academia, 2002. ISBN 80-200-0172-7
- [23] SALAUDDIN, M., M. A. HALIM a J. Y. PARK. A magnetic-spring-based, low-frequency-vibration energy harvester comprising a dual Halbach array. *Smart Materials and Structures* [online]. 2016, **25**(9), 095017. ISSN 0964-1726. Dostupné z: doi:10.1088/0964-1726/25/9/095017

- [24] SHIMIZU, Tori, Kenjiro TADAKUMA, Masahiro WATANABE, Eri TAKANE, Masashi KONYO a Satoshi TADOKORO. Internally-Balanced Magnetic Mechanisms Using a Magnetic Spring for Producing a Large Amplified Clamping Force. In: *2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA): 2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* [online]. 2020, s. 1840–1846. ISSN 2577-087X. Dostupné z: doi:10.1109/ICRA40945.2020.9197151
- [25] LEE, Hyung-Woo, Ki-Chan KIM a Ju LEE. Review of maglev train technologies. *IEEE Transactions on Magnetics* [online]. 2006, **42**(7), 1917–1925. ISSN 1941-0069. Dostupné z: doi:10.1109/TMAG.2006.875842
- [26] STROSKI, Pedro Ney. Maglev: How does it work? *Electrical e-Library.com* [online]. 29. leden 2021 [vid. 2022-01-15]. Dostupné z: <https://www.electricalibrary.com/en/2021/01/29/maglev-how-does-it-work/>
- [27] RODRÍGUEZ LEÓN, Jhon, Ilse CERVANTES, Eduardo CASTILLO CASTANEDA, Giuseppe CARBONE a Daniele CAFOLLA. Design and Preliminary Testing of a Magnetic Spring as an Energy-Storing System for Reduced Power Consumption of a Humanoid Arm. *Actuators* [online]. 2021, **10**, 136. Dostupné z: doi:10.3390/act10060136
- [28] RADU OLARU, CAMELIA PETRESCU, ALEXANDRU ARCIRE. *DESIGN OF A MAGNETIC SPRING FOR VARIABLE STIFFNESS ACTUATORS*. Romania, 2021. Článek. Technical University of Iasi, Faculty of Electrical Engineering.
- [29] Magnetic Bearings. *COMSOL* [online]. [vid. 2022-01-15]. Dostupné z: <https://www.comsol.com/blogs/magnetic-bearings/>
- [30] JAYAWANT, B. V. Electromagnetic suspension and levitation. *Reports on Progress in Physics* [online]. 1981, **44**(4), 411–477. ISSN 0034-4885. Dostupné z: doi:10.1088/0034-4885/44/4/002
- [31] MUKHOPADHYAY, S. C., J. DONALDSON, G. SENGUPTA, S. YAMADA, C. CHAKRABORTY a D. KACPRZAK. Fabrication of a Repulsive-Type Magnetic Bearing Using a Novel Arrangement of Permanent Magnets for Vertical-Rotor Suspension. *IEEE Transactions on Magnetics* [online]. 2003, **39**(5 II), 3220–3222. ISSN 0018-9464. Dostupné z: doi:10.1109/TMAG.2003.816727
- [32] YONNET, Jean-Paul. Permanent magnet bearing and coupling. *Magnetics, IEEE Transactions on* [online]. 1981, **17**, 1169–1173. Dostupné z: doi:10.1109/TMAG.1981.1061166
- [33] SNAMINA, Jacek a Piotr HABEL. Magnetic spring as the element of vibration reduction system. *Mechanics and Control*. 2010, **29**, 40–44.
- [34] MUNOA, Jokin, Alex IGLESIAS, Aitor OLARRA, Zoltan DOMBOVARI, Mikel ZATARAIN a Gabor STEPAN. Design of self-tuneable mass damper for modular

- fixturing systems. *CIRP Annals* [online]. 2016, **65**(1), 389–392. ISSN 0007-8506. Dostupné z: doi:10.1016/j.cirp.2016.04.112
- [35] WU, Qiong, Wei ZHAO, Weiguo ZHU, Rencheng ZHENG a Xilu ZHAO. A Tuned Mass Damper with Nonlinear Magnetic Force for Vibration Suppression with Wide Frequency Range of Offshore Platform under Earthquake Loads. *Shock and Vibration* [online]. 2018, **2018**, e1505061. ISSN 1070-9622. Dostupné z: doi:10.1155/2018/1505061
- [36] MIYAMOTO, Yuji, Takaharu NAKANO, Atsushi SHIMAMURA a Kentaro SHO. Seismic Response of Magnetically Levitated House. *Open Journal of Earthquake Research* [online]. 2022, **11**(1), 1–17. Dostupné z: doi:10.4236/ojer.2022.111001
- [37] TSUDA, M., T. KOJIMA, T. YAGAI a T. HAMAJIMA. Vibration Characteristics in Magnetic Levitation Type Seismic Isolation Device Composed of Multiple HTS Bulks and Permanent Magnets. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* [online]. 2007, **17**(2), 2059–2062. ISSN 1558-2515. Dostupné z: doi:10.1109/TASC.2007.901502
- [38] OMATA, K, Toshiharu ARAKAWA a Y MEZAKI. Long Stroke Magnetic Damper for a Seismic Isolation Device for Machines. nedatováno, 11.
- [39] *Force sensor in mechanical translational systems - MATLAB - MathWorks Switzerland* [online]. [vid. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://ch.mathworks.com/help/phymod/simscape/ref/idealforcesensor.html>
- [40] *Motion sensor in mechanical translational systems - MATLAB - MathWorks Switzerland* [online]. [vid. 2022-05-19]. Dostupné z: https://ch.mathworks.com/help/phymod/simscape/ref/idealtranslationalmotion_sensor.html
- [41] DAS, Shuvra. *Modeling and Simulation of Mechatronic Systems using Simscape*. B.m.: Morgan and Claypool publishers, 2020. ISBN 978-1-68173-735-5.

Seznam použitých obrázků

Obrázek 3-1 - Schéma hltiče [3].....	14
Obrázek 3-2 – Model pružiny.....	14
Obrázek 3-3 - Model pasivního hltiče [4].....	15
Obrázek 3-4 - Model aktivního hltiče [6]	16
Obrázek 3-5 - Průchod desky skrz magnetické pole [8].....	18
Obrázek 3-6 - Magnet tlumící vibrace [8]	18
Obrázek 3-7 - Viskózní tlumič [9]	18
Obrázek 3-8 - Viskoelastický materiál [10].....	19
Obrázek 3-9 - Hysterezní smyčka [10].....	19
Obrázek 3-10 - Princip třecího tlumiče [13].....	20
Obrázek 3-11 - Třecí tlumič [12].....	20
Obrázek 3-12 - Částicový tlumič [14].....	20
Obrázek 3-13 - Impact damper [17].....	21
Obrázek 3-14 - Piezoelektrický tlumič [20].....	21
Obrázek 3-15 - Popis pomoci siločar [21].....	22
Obrázek 3-16 - Popis pomocí vektorů [21].....	22
Obrázek 3-17 - Nízkofrekvenční harvestor energie [23]	23
Obrázek 3-18 - Způsob úchopu hlavice [24]	24
Obrázek 3-19 - Robotické chapadlo s magnetickou pružinou [24]	25
Obrázek 3-20 - MAGLEV EMS [26].....	26
Obrázek 3-21 - MAGLEV EDS [26].....	26
Obrázek 3-22 - Schéma humanoidní paže s magnety [27]	27
Obrázek 3-23 - Schéma cívek s magnety [28]	28
Obrázek 3-24 - Axiální magnetické ložisko [29].....	29
Obrázek 3-25 - Radiální magnetické ložisko	29
Obrázek 3-26 - Schéma magnetické pružiny [33]	30
Obrázek 3-27 - 4 sepnuté cívky [33].....	31
Obrázek 3-28 - 1 sepnutá cívka [33].....	31
Obrázek 3-29 - Schéma hmotnostního tlumiče [34]	31
Obrázek 3-30 - Grafy popisující optimální tlumení [34]	32

Obrázek 3-31 - Schéma pobřežní plošiny [35].....	33
Obrázek 3-32 - Schéma hmoty a magnetů [35]	33
Obrázek 3-33 - Graf závislosti změny polohy na čase [35].....	34
Obrázek 3-34 - Schéma levitujícího domu [36].....	34
Obrázek 3-35 - Graf seismické izolace [36]	35
Obrázek 3-36 - Schéma sestavení HTS bloků [37].....	36
Obrázek 3-37 - Graf frekvence závislé na počáteční vzduchové mezeře [37]....	37
Obrázek 3-38 - Schéma magnetický tlumiče [38]	38
Obrázek 3-39 - Graf popisující nastavení hltiče [38].....	38
Obrázek 4-1 - Řez 3D modelem č. 1.....	41
Obrázek 4-2 – Pohled na 3D modelem č. 1	41
Obrázek 4-3 - 3D model č. 2.....	44
Obrázek 4-4 - Řez 3D modelem č. 2.....	45
Obrázek 4-5 - 3D model č. 3.....	48
Obrázek 4-6 - Řez 3D modelu č. 3.....	49
Obrázek 5-1 - Schéma dvoumotového systému.....	53
Obrázek 5-2 - Značka ideálního silového senzoru [39]	54
Obrázek 5-3 - Značka ideálního pohybového senzoru [40].....	54
Obrázek 5-4 - Graf výchylky a fáze dvoumotového systému.....	55
Obrázek 5-5 - Model s vyznačenou geometrií	57
Obrázek 5-6 - Model s definováním magnetů	58
Obrázek 5-7 - Model jemnosti sítě.....	59
Obrázek 5-8 - Graf hustoty magnetického toku.....	60
Obrázek 5-9 - Schéma hmoty a magnetů	61
Obrázek 5-10 - Graf síly magnetu na hmotu s počáteční mezerou mezi magnety 20 mm	62
Obrázek 5-11 - Graf závislosti síly na počáteční vzdálenosti magnetů	63
Obrázek 5-12 - Schéma FFT Simulink	64
Obrázek 5-13 - Graf frekvenčních charakteristik	65
Obrázek 5-14 - Graf závislosti frekvence na vzduchové mezeře.....	66

Seznam použitého softwaru

- Autodesk Inventor Professional 2022
- Matlab R2020b
- Comsol Multiphysics 6.0
- Microsoft Office 365

Seznam příloh

Výkresová dokumentace

- BP_0280-0001 – Výkres sestavy modelu č. 1
- BP_0280-0001-01 – Výrobní výkres spodní krabice
- BP_0280-0001-02 – Výrobní výkres horní krabice
- BP_0280-0001-10 – Výrobní výkres hmota vnější
- BP_0280-0001-12 – Výrobní výkres hmota střední
- BP_0280-0003 – Výkres sestavy modelu č. 3

Elektronická příloha

- Kód v programu Matlab
- Modely simulací v programu Simulink
- 3D modely hltičů
- Model simulace magnetů v programu Comsol Multiphysics