



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**  
**ÚSTAV MECHANIKY TĚLES MECHATRONIKY A**  
**BIOMECHANIKY**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND  
BIOMECHANICS

# **NÁVRH MECHATRONICKÉ SOUSTAVY S ELEKTROMAGNETICKÝM TLUMENÍM PRO PREZENTACI KMITÁNÍ**

DESIGN OF MECHATRONIC SYSTEM WITH ELECTROMAGNETIC DAMPER FOR  
PRESENTATION OF OSCILLATION

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**  
BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

**DUŠAN BOREK**

**VEDOUCÍ PRÁCE**  
SUPERVISOR

**Ing. ZDENĚK HADAŠ, Ph.D.**

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky  
Akademický rok: 2012/2013

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

student(ka): Dušan Borek

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Mechatronika (3906R001)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

### **Návrh mechatronické soustavy s elektromagnetickým tlumením pro prezentaci kmitání**

v anglickém jazyce:

### **Design of mechatronic system with electromagnetic damper for presentation of oscillation**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem práce je vytvořit výukovou mechatronickou soustavu, která bude názorně prezentovat tlumené kmitání, např. v předmětu dynamika.

Tato soustava se skládá s kmitajícího členu uloženého k tuhému rámu přes poddajný prvek. Tato soustava je buzena vnější silou a kmitání je ovlivněno tlumičem. Cílem je navrhnout parametry celé mechatronické soustavy, navrhnout řízení jednotlivých částí a prezentovat výsledky.

Cíle bakalářské práce:

1. Návrh koncepce výukové pomůcky jako mechatronické soustavy a studie jednotlivých prvků.
2. Návrh vlastního elektromagnetického tlumiče.
3. Virtuální prototyp celé soustavy.
4. Řízení buzení a tlumení pro prezentaci kmitání.

Seznam odborné literatury:

Guglielmino a kol.: Semi-active Suspension Control, Springer, 2008.

Rajamani, R.: Vehicle Dynamics and Control, Springer, 2006.

Janocha, H.: Adaptronics and Smart Structures, Springer, 1999.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/2013.

V Brně, dne 18.11.2012

L.S.

---

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.  
Ředitel ústavu

---

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.  
Děkan fakulty

## **Abstrakt**

Tato práce se zabývá návrhem a sestavením mechatronické soustavy s elektromagnetickým tlumičem pro tlumení oscilátoru s jedním stupněm volnosti. Výsledná soustava by měla názorně prezentovat okamžité účinky buzení a tlumení na základní dynamické soustavy.

## **Abstract**

This thesis deals with design of mechatronic system with electromagnetic damping to control the oscillator with single degree of freedom. Final system should present the immediate effects of the excitation and damping of the basic dynamic system.

## **Klíčová slova**

Tlumič, Tlumení, Kmitání, Oscilátor, Buzení

## **Keywords**

Shock absorber, Damping, Oscillation, The oscillator, Excitation

## **Bibliografická citace**

BOREK D. Návrh mechatronické soustavy s elektromagnetickým tlumením pro prezentaci kmitání. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 32 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D..

## **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Návrh mechatronické soustavy s elektromagnetickým tlumením pro prezentaci kmitání“ vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

24. května 2013

.....  
Dušan Borek

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu svojí bakalářské práce Ing. Zdeňku Hadašovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky při vypracování bakalářské práce.

# Obsah

<b>1</b>	<b>ÚVOD .....</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>CÍL PRÁCE .....</b>	<b>8</b>
<b>3</b>	<b>KMITÁNÍ S JEDNÍM STUPNĚM VOLNOSTI .....</b>	<b>9</b>
3.1	Poddajné uložení tělesa .....	9
3.2	Nucené kmitání .....	9
3.2.1	Harmonické buzení .....	10
3.2.2	Buzení nevyváhou .....	10
3.2.3	Kinematické buzení .....	10
3.3	Tlumené kmitání .....	11
3.4	Elektromagnetické tlumení .....	11
<b>4</b>	<b>NÁVRH MODELU SOUSTAVY .....</b>	<b>13</b>
4.1	Stojan s plošinou .....	13
4.2	Oscilátor .....	13
4.3	Elektromagnetický tlumič .....	14
4.3.1	Magnetický obvod a měření magnetické indukce .....	15
4.3.2	Cívka .....	16
4.3.3	Uchycení magnetu na konci páky .....	16
4.3.4	Rám cívky .....	17
4.3.5	Montáž .....	17
<b>5</b>	<b>SIMULACE MODELU SOUSTAVY .....</b>	<b>18</b>
5.1	Fyzikální model .....	18
5.2	Model tlumiče .....	18
5.3	Buzení nevyváhou .....	19
5.4	Buzení elektromagnetem .....	20
<b>6</b>	<b>REALIZACE TLUMIČE .....</b>	<b>22</b>
6.1	Magnetický obvod a uchycení na konci páky .....	22

6.2	Cívka, kostra cívky a uchycení k soustavě.....	22
7	ŘÍZENÍ MODELU SOUSTAVY .....	24
7.1	Řízení tlumení.....	24
7.2	Řízení buzení.....	24
8	POROVNÁNÍ SIMULACE MODELU S REÁLNOU SOUSTAVOU .....	25
8.1	Odezva na počáteční výchylku 1 cm.....	25
8.2	Indukované napětí při počáteční výchylce 1 cm.....	27
9	BUZENÍ MOTORU .....	29
10	ZÁVĚR .....	30
11	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....	31
12	SEZNAM PŘÍLOH .....	32

# 1 ÚVOD

S mechanickým kmitáním a vibracemi je dnes společnost provázaná na každém kroku. Ať již při používání různých dopravních prostředků, přes využití různých strojů a zařízení pro produkci výrobků a výstavby budov, až po chvění zemské kůry. Avšak jejich přílišné množství může mít nepříjemné následky, proto se čím dál častěji hledají řešení s cílem jejich maximálního omezení.

V současné době se světový průmysl zaměřuje na celkové zlevnění a zefektivnění výrobních procesů. V tomto směru hraje významnou roli právě snižování negativních vibrací. Odstranění vibrací, případně jejich regulace může mít také příznivý vliv na zdraví lidí, pracovní podmínky i životní prostředí. Vzhledem k této potřebě je důležité vibrace a všechny jevy s tím spojené, zejména tlumení, co nejvíce poznat a studovat s maximálním využitím dostupných technologií.

Rozeznává se několik druhů tlumičů: Deformační, třecí, kapalinové, olejopneumatické, pneumatické tlumiče a pro tuto práci podstatné elektromagnetické tlumiče [6].

Pro zjednodušení problému je vhodné použití názorných pomůcek pro maximální pochopení dané problematiky a případné využití těchto poznatků v praxi.

## 2 CÍL PRÁCE

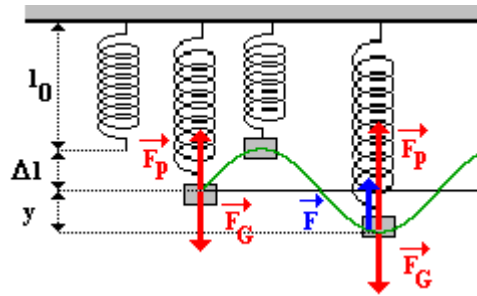
Hlavním cílem této práce je navržení elektromagnetického tlumení k funkčnímu modelu oscilátoru s jedním stupněm volnosti a zejména následná konstrukce funkčního regulovatelného tlumiče. Výsledná soustava bude sloužit jako učební pomůcka v odborných předmětech, zejména zaměřených na dynamiku těles.

Má bakalářská práce vychází z již obhájené bakalářské práce s názvem Oscilátor s jedním stupněm volnosti, jejíž autor je Michal Deďo [2]. Původní sestava se jeví jako vhodná volba pro prezentaci kmitání, zejména díky své relativně nízké hmotnosti a malým rozměrům, což zjednodušuje přesun zařízení, a také jednoduchou ovladatelností. Navrhovaný tlumič by měl napodobovat parametry oscilátoru tak, aby byly tyto vlastnosti zachovány. Výsledná sestava by tak měla podávat ideální představu o celém problému.

### 3 KMITÁNÍ S JEDNÍM STUPNĚM VOLNOSTI

#### 3.1 Poddajné uložení tělesa

Jedná se o mechanický oscilátor, jenž je tvořen například tělesem zavěšeným na pružině, jehož vlastnosti jsou dány jeho hmotností  $m$  a tuhostí pružiny  $k$ . V případě působení vnější síly na těleso vznikne síla pružnosti  $F_p$ , která působí vždy proti prodloužení pružiny, tedy se snaží vrátit pružinu do nedeformovaného stavu, jak lze vidět na Obrázek 1 [4]. Z toho vyplývá, že síla pružnosti je přímo úměrná velikosti výchylky tělesa od rovnovážné polohy.



Obrázek 1 – Kmitání tělesa na pružině [4]

$F_g$  je vnější síla.

$F_p$  je síla pružnosti.

#### 3.2 Nucené kmitání

Nucené kmitání je způsobeno buzením. V celé kapitole bylo čerpáno ze studijních opor z dynamiky [5]. Buzení je možné pozorovat v pohybové rovnici v případě, kdy je pravá strana nenulová:

$$m\ddot{x} + b\dot{x} + kx = Q(t) \quad (3.1)$$

Kde  $m$  je hmotnost soustavy,  $b$  je tlumení,  $k$  je tuhost a  $F(t)$  je působící síla na soustavu.

Dalším řešením pohybové diferenciální rovnice a nutným úpravám se dostanou hlavní charakteristiky kmitání s jedním stupněm volnosti.

Vlastní úhlová frekvence kmitání:

$$\Omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \text{ [rad} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (3.2)$$

Koeficient dozívání:

$$\delta = \frac{b}{2 \cdot m} \text{ [rad} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (3.3)$$

Poměrný útlum:

$$b_p = \frac{\delta}{\Omega_0} \quad (3.4)$$

Hlavní charakteristiky udávají základní představu o budoucím chování dané kmitající dynamické soustavy.

Rozeznávají se tři způsoby buzení:

### 3.2.1 Harmonické buzení

Jedná se o nejčastější typ buzení. Má pohybovou rovnici ve tvaru [5]:

$$m\ddot{x} + b\dot{x} + kx = Q_0 e^{i\omega t} \quad (3.5)$$

Amplituda je zde komplexní.

Na základě reálné i imaginární část lze z pohybové rovnice odvodit vztah pro amplitudu kmitání:

$$x_A = \frac{Q_0}{m\sqrt{(\Omega^2 - \omega^2)^2 + (2\omega\delta)^2}} \quad (3.6)$$

Na základě znalosti amplitudy a fáze lze sestavit amplitudovou a fázovou charakteristiku. Poté se rozeznávají tři možné stavy. Nadrezonanční, dále pak rezonanční a podrezonanční. Vzhledem k bezpečnosti je nejvhodnější stav podrezonanční.

### 3.2.2 Buzení nevývahou

Jedná se o buzení odstředivou silou. Má pohybovou rovnici ve tvaru [5]:

$$m\ddot{x} + b\dot{x} + kx = m_n e \omega^2 \sin(\omega t) \quad (3.7)$$

Kde  $m_n e$  je nevývaha, a  $m_n e \omega^2$  je odstředivá síla. Řešení je pouze v reálném oboru, z čehož vyplývá, že odezva bude mít harmonický průběh s frekvencí, která je rovna budící frekvenci.

Pro amplitudu kmitání platí:

$$x_A = \frac{m_n e \frac{\omega^2}{\Omega^2}}{m \sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\Omega^2}\right)^2 + \left(2b_p \frac{\omega}{\Omega}\right)^2}} \quad (3.8)$$

### 3.2.3 Kinematické buzení

Také známe jako buzení od základu. Pohybová rovnice je (za předpokladu harmonického pohybu od základu) [5]:

$$m\ddot{x} + b\dot{x} + kx = (i\omega b + k)x_{z0} e^{i\omega t} \quad (3.9)$$

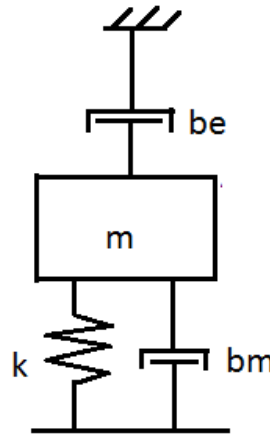
Pro amplitudu kmitání platí:

$$x_A = \frac{x_{z0} \sqrt{1 + \left(2b_p \frac{\omega}{\Omega}\right)^2}}{m \sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\Omega^2}\right)^2 + \left(2b_p \frac{\omega}{\Omega}\right)^2}} \quad (3.10)$$

### 3.3 Tlumené kmitání

Tlumení soustavy je dáno součtem mechanického tlumení (vlastní tlumení oscilátoru, vlivy okolí, tření, odpor vzduchu) a tlumením mnou navrhovaného tlumiče, jak lze vidět na Obrázek 2. Pohybová rovnice v tomto případě má vztah:

$$m\ddot{x} + (b_m + b_e)\dot{x} + kx = F_o(t) \quad (3.11)$$



Obrázek 2 – Schéma soustavy

### 3.4 Elektromagnetické tlumení

Elektromagnetické tlumení je dáno elektro-mechanickou přeměnou energie. Elektrická část je složena z cívky zatížené odporem. Magnetická část je dána permanentními magnety umístěnými ve vhodné pozici naproti sobě. Magnety jsou připevněny ke kmitající části oscilátoru, a mezi nimi je umístěna nepohybující se cívka. V této kapitole bylo čerpáno z dizertační práce [1]. Vlivem vzájemného pohybu permanentních magnetů a cívky se na cívce indukují napětí. Napětí indukované na cívce je obecně dáno vztahem:

$$u_i = \oint_C (\vec{v} \times \vec{B}) d\vec{r} \quad (3.12)$$

Kde  $\vec{v}$  je vektor rychlosti pohybu vodiče, a  $\vec{B}$  je vektor magnetické indukce v prostředí, ve kterém se vodič pohybuje.

Zjednodušeně lze výsledné elektromagnetické napětí zapsat tímto způsobem:

$$u_i = lBN\dot{x} \quad (3.13)$$

Kde  $l$  je délka aktivní části působení permanentních magnetů,  $B$  je jejich magnetická indukce kolmá ke směru pohybu,  $N$  je počet závitů cívky a  $\dot{x}$  je rychlost kmitání oscilátoru.

Tlumení tlumiče lze nyní vyjádřit z rovnice rovnosti výkonů:

$$p_d = p_e \quad (3.14)$$

Kde  $p_e$  je celkový generovaný výkon a  $p_d$  je disipativní výkon odebraný v totožné chvíli ze soustavy. Disipativní výkon je závislý na rychlosti relativního pohybu magnetického obvodu  $\dot{x}$  a na elektromagnetickém tlumení zatíženého tlumiče  $b_e$ . Generovaný výkon si můžeme dále vyjádřit jako součin napětí a proudu, a dosazením do Ohmova zákona vyjde vztah:

$$p_e = \frac{u_i^2}{R_v + R_z} \quad (3. 15)$$

Kde  $R_v$  je vnitřní odpor cívky a  $R_z$  je připojený zátěžný moment. Dosazením do rovnice (3. 14) dostaneme následující rovnice výkonů:

$$b_e \cdot \dot{x} = \frac{lBN\dot{x}}{R_v + R_z} \quad (3. 16)$$

Ze které vyjádříme tlumení tlumiče:

$$b_e = \frac{lBN}{R_v + R_z} \quad (3. 17)$$

Výše uvedené rovnice (3. 16) a (3. 17) jsou následně využity v kapitole 5 - Simulace modelu soustavy.

## 4 NÁVRH MODELU SOUSTAVY

Výsledný model soustavy se bude skládat z 3 částí:

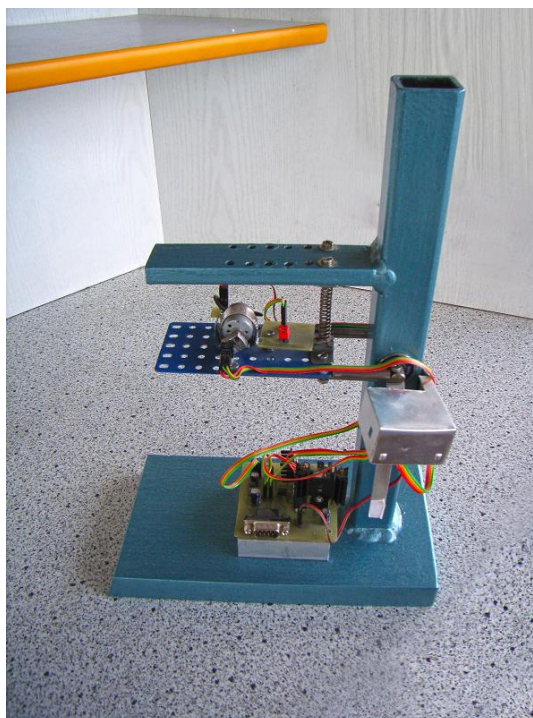
1. Stojan s plošinou
2. Oscilátor
3. Elektromagnetický tlumič

### 4.1 Stojan s plošinou

Stojan a základna jsou součástí již vytvořeného modelu Oscilátoru s jedním stupněm volnosti.[2] Je tvořen podložkou a profilem z litiny, dvěma ocelovými tyčemi a plošinou ze stavebnice Merkur. Profil a základna jsou svařené. V profilu je vytvořena rotační vazba, ke které jsou přimontované dvě ocelové tyčky, ke kterým je následně přišroubována podložka ze stavebnice Merkur. Vzhledem k použitému materiálu má výsledná soustava značnou hmotnost  $m = 20$  kg, z čehož vyplývá poměrně dobrá výsledná stabilita. Podložka ze stavebnice Merkur je velmi vhodná k jakékoliv montáži.

### 4.2 Oscilátor

Oscilátor je součástí již vytvořeného modelu Oscilátoru s jedním stupněm volnosti.[2] Kmity jsou vytvářeny motorem s nevývahou, který byl původně součástí servomotoru. Motor by měl být schopen zvládnout napětí 10V a protékající proud 800mA. Další součástí oscilátoru je deska plošných spojů (DPS), ke které je přivedeno napětí 12V, a snímače na měření polohy a rychlosti kmitání. Komunikaci mezi PC a modelem zajišťuje I/O karta MF624, kterou lze pozorovat na Obrázek 3. Nejpodstatnější část, která je nezbytná pro princip oscilátoru je síla pružnosti, kterou zajistí pružina o délce 10 cm a změřené tuhosti 6,3 kN/m. Poměrný útlum a vlastní frekvence oscilátoru byly experimentálně změřeny. Poměrný útlum je  $b_{po} = 0.0101$  a vlastní frekvence  $\Omega_{00} = 102$  rad/s.

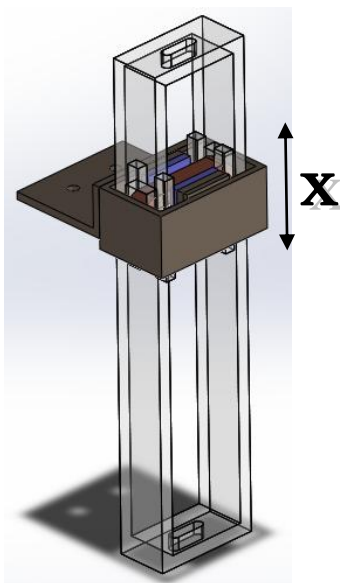


Obrázek 3 – Oscilátor s jedním stupněm volnosti

### 4.3 Elektromagnetický tlumič

Elektromagnetický tlumič se skládá z několika částí:

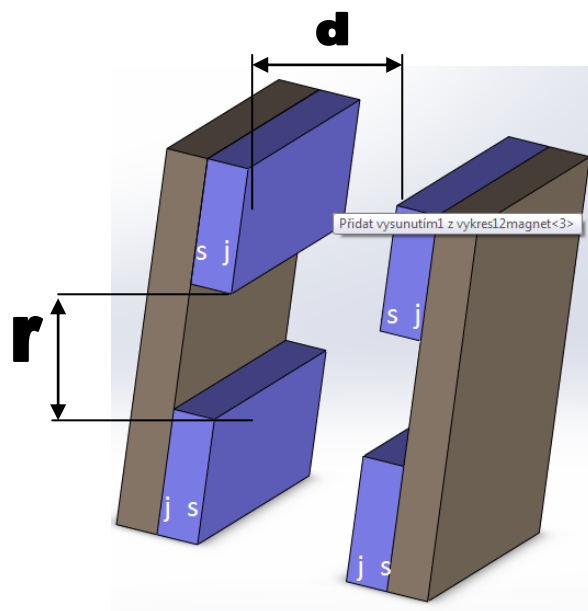
1. Magnetický obvod
2. Cívka
3. Páka
4. Rám cívky



Obrázek 4- Elektromagnetický tlumič

### 4.3.1 Magnetický obvod a měření magnetické indukce

Je tvořen čtveřicí permanentních magnetů umístěných dle Obrázek 5. Rozměry, materiál a vzdálenost magnetů jsou velmi důležité pro výslednou velikost indukovaného napětí na cívce a tím i tlumicího efektu. Navržené rozměry magnetů jsou 20x10x9 mm. Vzdálenost mezi magnety je 11 mm a jejich rozteč je 9 mm. Rozměry magnetů a jejich vzdálenosti byly navrženy dle měření magnetické indukce a tloušťky navrhované cívky.



Obrázek 5 – Magnetický obvod

Měření probíhalo v laboratoři Fakulty elektrotechniky a komunikačních technologií VUT Brno. Magnetická indukce byla měřena Halloovou sondou. K dispozici byly 2 druhy magnetů ze vzácných zemin NdFeB a byl zkoumán vliv vzdálenosti magnetů  $d$  a vliv jejich rozteče  $r$ . Rozteč neměla na měření žádný vliv, proto je již v následujících tabulkách zanedbána.

#### Rozměr: 20x10x9 mm

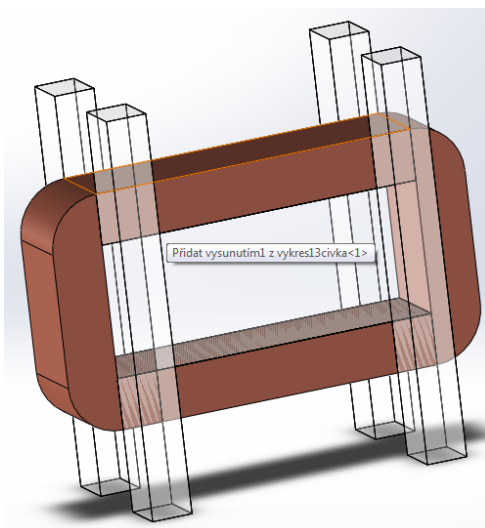
Vzdálenost $d$ [mm]	8	10	12
Magnetická indukce $B$ [mT]	395	320	250

#### Rozměr: 20x6x2,3 mm

Vzdálenost $d$ [mm]	8	10	12
Magnetická indukce $B$ [mT]	320	255	195

### 4.3.2 Cívka

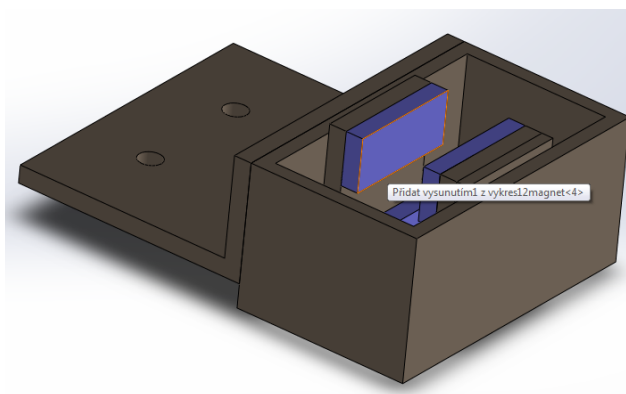
Velikost indukovaného napětí je také dána vhodnými rozměry cívky a délkou vodiče. Vhodnou kombinací délky vodiče, tloušťky vinutého drátu a průřezem lze ovlivnit výsledný počet závitů cívky a také její vnitřní odpor, což v konečném důsledku ovlivňuje velikost tlumení (3. 17). Cívka může být vinuta strojově nebo ručně. V případě ručního vinutí cívky je koeficient plnění 0,5. Jako nejvhodnější se jeví samonosná obdélníková cívka z tenkého drátu (viz. Obrázek 6 – Cívka. Při zvolené tloušťce drátu  $d = 0,28 \text{ mm}$ , průřezu cívky  $l = 40 \text{ mm}^2$ , navrženým rozměrů a koeficientu plnění 0,5 je spočtený počet závitů cívky  $N = 325$  a vnitřní odpor cívky  $R_v = 9,8 \Omega$ .



Obrázek 6 – Cívka

### 4.3.3 Uchycení magnetu na konci páky

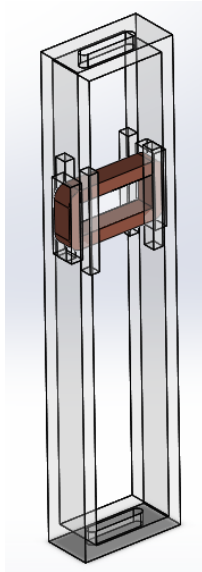
Navržená konstrukce je přizpůsobena co nejjednoduššímu připevnění v plošině oscilátoru. Zároveň je také zachována vůle vzhledem k plošině, což umožňuje dodatečně nastavit výšku páky od základny dle potřeby.



Obrázek 7 – Uchycení magnetů na konci páky

#### 4.3.4 Rám cívky

Rám cívky je navržen s ohledem na jednoduchost montáže. Je také možnost horizontálního posunu ve dvou osách, pro případnou eliminaci nepřesností, které by mohly vzniknout během procesu montáže.

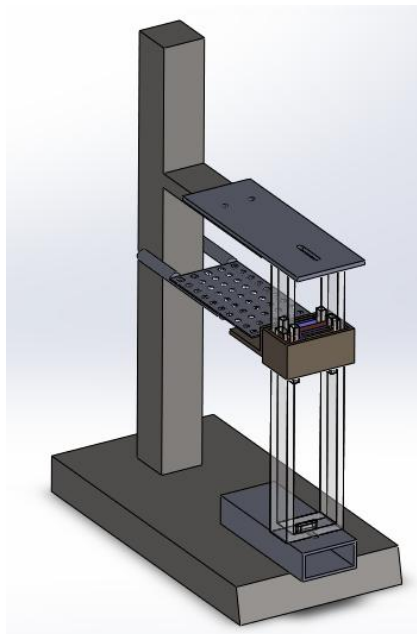


Obrázek 8 – Rám na uchycení cívky

#### 4.3.5 Montáž

Pro připevnění modelu k již stávající soustavě oscilátoru jsou navrženy dva hliníkové úchyty. Model bude připevněn kombinovaně šrouby a epoxidovým lepidlem.

Výsledný model soustavy po montáži by měl vypadat následovně:



Obrázek 9 – Výsledná podoba modelu tlumiče

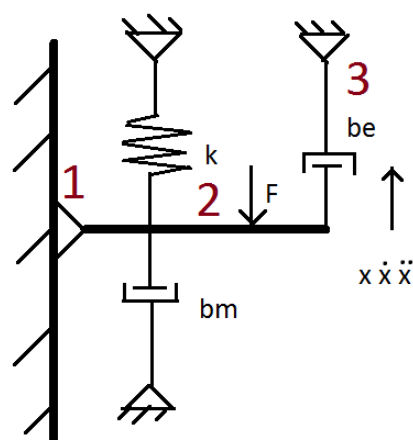
## 5 SIMULACE MODELU SOUSTAVY

Pro lepší představu fungování tlumiče ve skutečnosti je nejlepším řešením vytvoření simulačního modelu. Pro tvorbu modelu je použito programové prostředí softwaru Matlab a simulačního software Simulink.

### 5.1 Fyzikální model

Před vytvořením simulace modelu je však nutné vytvořit fyzikální (topologický) model soustavy pro upřesnění všech prvků a vazeb mezi nimi.

Vstupní parametr je silové působení oscilátoru. Jako výstupní parametry jsou sledovány výchylka kmitů, rychlost kmitů. Nejdůležitější je výchylka kmitání, která v porovnání tlumené a netlumené fáze kmitání vypovídá nejvíce o efektivnosti tlumiče.



Obrázek 10 – Fyzikální model soustavy

### 5.2 Model tlumiče

Konstantní hodnoty modelu:

$F = 0,05 \text{ N}$  - amplituda budící síly

$I = 0,0035 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$  - moment setrvačnosti soustavy v ose otáčení

$D = 0,00028 \text{ mm}$  - průměr drátu cívky

$N = 325$  - počet zavitů cívky

$l_{ma} = 0,02 \text{ m}$  - délka permanentního magnetu

$B = 0,29 \text{ T}$  - indukce mezi magnety

$R_z = (0, 2500) \Omega$  - zátěžný odpor potenciometru

$R_v = 9,8 \Omega$  - vnitřní odpor

$k_p = 6300 \text{ N/m}$  - tuhost pružiny

$b_p = 0,0043$  - poměrný útlum oscilátoru s tlumičem bez aktivního tlumení

$\Omega_0 = 53 \text{ rad/s}$  - vlastní frekvence oscilátoru s tlumičem

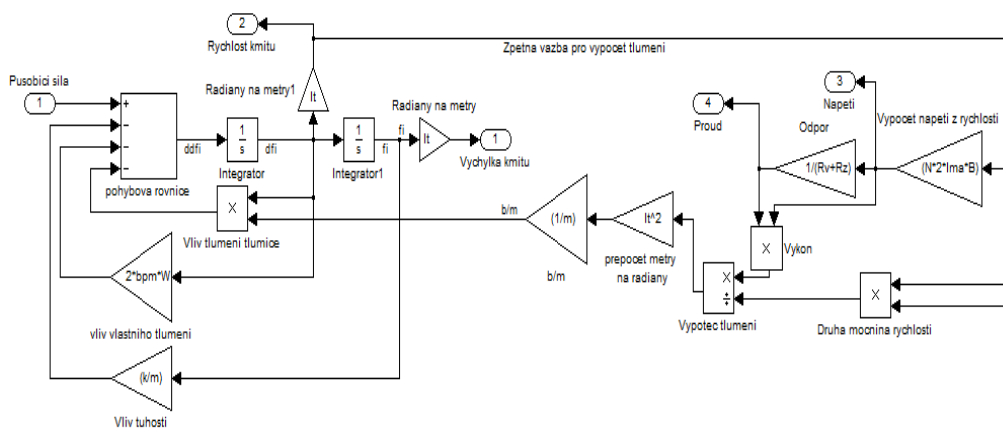
V levé polovině modelu lze pozorovat řešení pohybové diferenciální rovnice ve tvaru:

$$\ddot{\varphi} + \frac{(b_m + b_e)}{m} \dot{\varphi} + \frac{k}{m} \varphi = \frac{F_0 \cdot \sin(\omega_0 t)}{m} \quad (5.18)$$

Vstupem do rovnice je síla, která budí kmitání na oscilátoru. Dále jsou přivedeny tři záporné zpětné vazby. Tuhost pružiny, vlastní kmitání oscilátoru a nakonec tlumení samotného tlumiče. Na pravé straně modelu se nachází vyjádření tlumení tlumiče  $b_e$  z rychlosti kmitání oscilátoru podle rovnice (3.16).

$$b_e \cdot \dot{x} = \frac{l \cdot B \cdot N \cdot \dot{x}}{R_v + R_z}$$

Spolu se zadanými hodnotami by měl model udávat podobu kmitů srovnatelnou s reálným kmitáním.



Obrázek 11 – Model Tlumiče

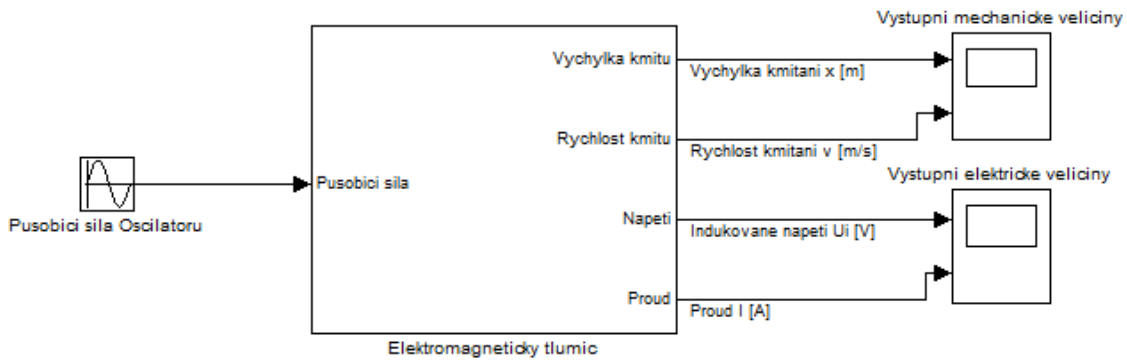
### 5.3 Buzení nevývahou

Buzení nevývahou bylo již podrobně popsáno v kapitole 3.2.2.

Pohybová rovnice buzení nevývahou je (3.7) [5]:

$$m\ddot{x} + b\dot{x} + kx = m_n e \omega^2 \sin(\omega t)$$

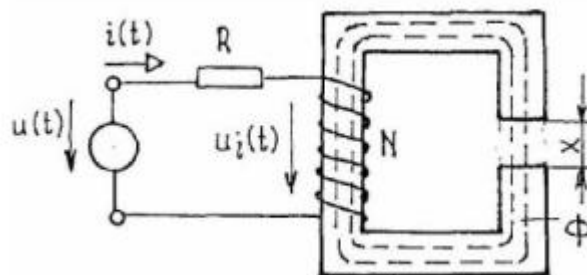
Vzhledem k tomu, že motor nemá žádné označení, a také nejsou žádné údaje v práci, z níž jsem čerpal, bylo v simulaci použito pouze síly sinusového průběhu, kde amplituda i fáze byly zjištěny experimentálně až po sestavení a připojení tlumiče k soustavě.



Obrázek 12 – Schéma buzení neváhou

### 5.4 Buzení elektromagnetem

V rámci práce je také navržen alternativní způsob buzení kmitů, a to pomocí střídavého elektromagnetu. Oproti buzení motorem s neváhou může skýtat několik výhod. Jedná se zejména o snadnější nastavení velikosti amplitudy a frekvence. V návrhu jsem čerpal z bakalářské práce zabývající se návrhem elektromagnetu [3].



Obrázek 13 – Elektromagnet [3]

Vstupní veličinou je střídavý elektrický proud  $i(t)$ . Následně je použit vztah pro výpočet celkového magnetického toku:

$$\Phi = \frac{N \cdot i}{R_m} \tag{5.19}$$

Kde  $i$  je vstupní elektrický proud,  $N$  je počet závitů cívky elektromagnetu, a  $R_m$  je celkový odpor elektromagnetu složený z odporu kotvy, jádra a vzduchové mezery.

Poté se vypočte magnetická indukce:

$$B = \frac{\Phi}{S} \tag{5.20}$$

Kde  $S$  je průřez jádra elektromagnetu.

A nakonec je z následujícího vzorce vyjádřena síla elektromagnetu působící na soustavu:

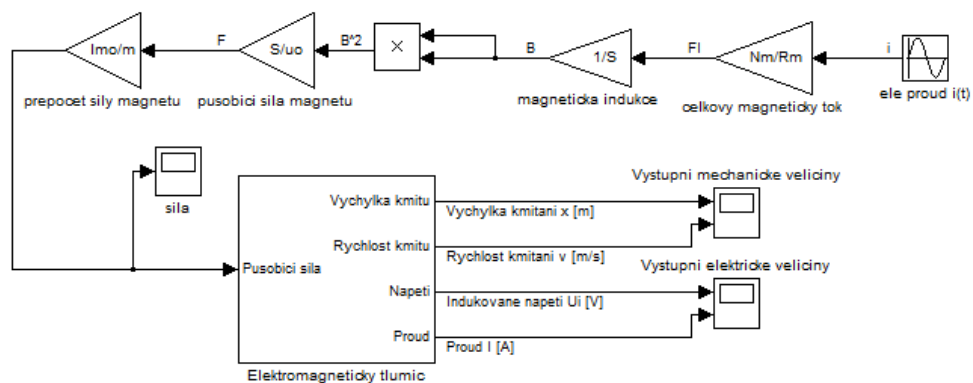
$$F_m = \frac{B^2 \cdot S}{\mu_0} \quad (5.21)$$

Kde  $\mu_0$  je relativní permeabilita vákua.

Pohybová rovnice buzení elektromagnetem tedy je:

$$\ddot{\varphi} + \frac{(b_m + b_e)}{m} \dot{\varphi} + \frac{k}{m} \varphi = \frac{F_m \cdot \sin(\omega_0 t)}{m} \quad (5.22)$$

Výsledný model elektromagnetu působícího na soustavu:



Obrázek 14 – Schéma buzení elektromagnetem

Je však důležité si uvědomit následující návaznosti. Oproti oscilátoru tvořeného motorkem, elektromagnetická síla působí pouze v jednom směru vertikály a nikoli oběma. Z toho vyplývá podmínka poloviční frekvence střídavého elektrického proudu oproti frekvenci kmitání soustavy.

Po důkladném zvážení jsem se rozhodl ponechat buzení stávajícím způsobem pomocí motorku s nevyváhou, kvůli již zabudovanému sensorickému systému výchylky a akcelerometru a zejména nižší hmotnosti celé soustavy, která má sloužit jako přenosná učební pomůcka.

## 6 REALIZACE TLUMIČE

### 6.1 Magnetický obvod a uchycení na konci páky

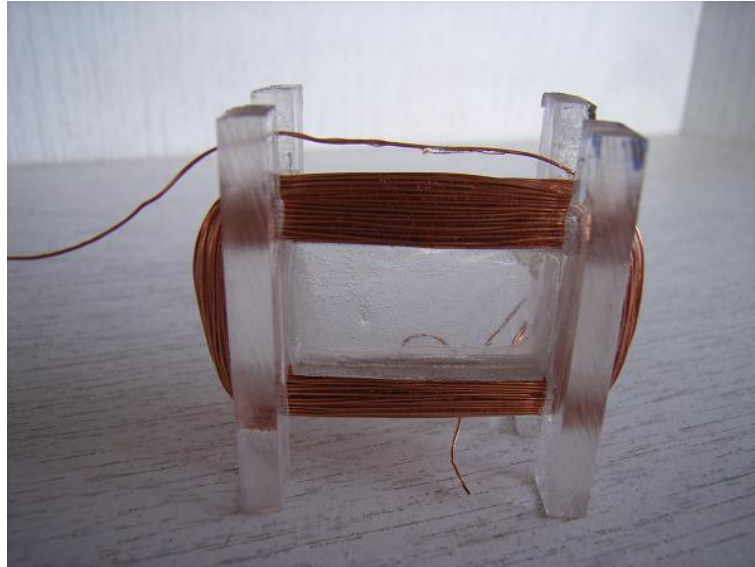
Magnetický obvod byl sestaven dle návrhu na Obrázek 7. Jak již bylo předestřeno v kapitole 4.3.1, permanentní magnety jsou neodymové (NdFeB), čili nejsilnější, které jsou na trhu. Vzduchová mezera mezi oběma dvojicemi činí  $r = 11 \text{ mm}$ , Obrázek 5. Magnety jsou po dvou kusech nalepeny na feromagnetický základ, pro vytvoření magnetického obvodu, jak lze vidět na Obrázek 15. Ty jsou poté připevněny ke kostře tvořené z hliníkového profilu, ke kterému je připevněn hliníkový úchyt pro namontování k plošině oscilátoru. Páka byla oproti původnímu návrhu odlehčena o hliníkový plech, který vyvažoval výšku umístění kostry, místo kterého jsou umístěny 4 podložky pod šroub, což umožňuje efektivnější nastavení magnetů vůči cívce. Veškeré spoje kovových součástí tvoří epoxidové lepidlo na kov. Celý díl je připevněn k základní konstrukci pomocí dvou šroubů se dvěma pérovými podložkami. Ty jsou důležité zejména proto, aby spoj při kmitavém pohybu nepovolil.



Obrázek 15 – Magnety na feromagnetickém základu

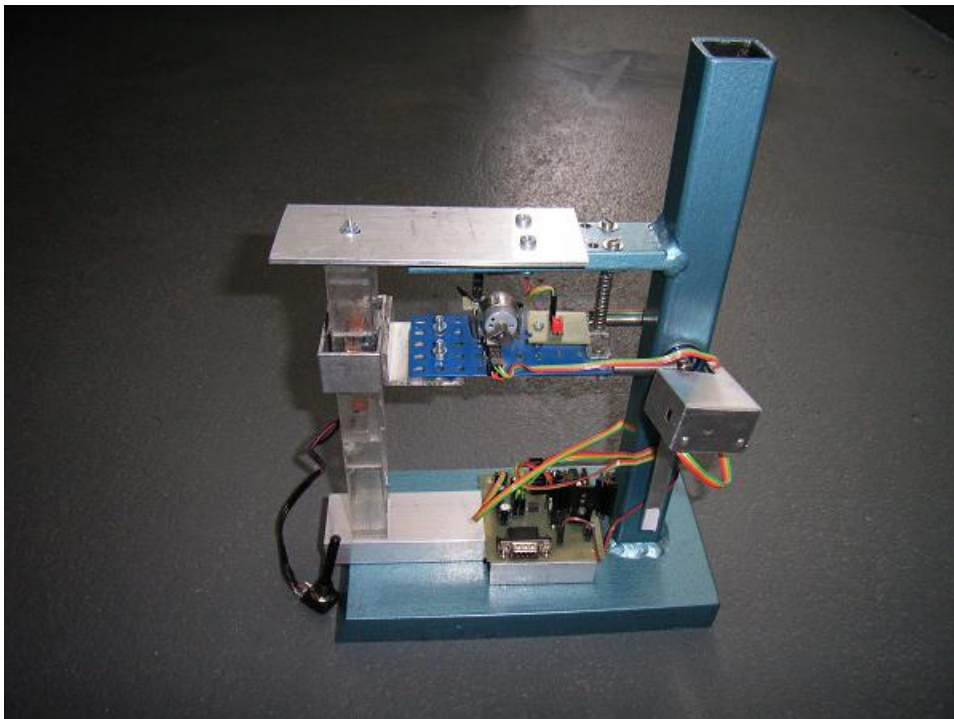
### 6.2 Cívka, kostra cívky a uchycení k soustavě

Cívka i veškeré díly pro připevnění byly sestaveny dle návrhu, který je na Obrázek 8. Cívka obdélníkového tvaru je samonosná a je navinuta z měděného drátu tloušťky 0,28 mm. Je tvořena 210 závitů a namotána na kostru z PVC, jak je možno vidět na Obrázek 16. Kostra s cívkou je uchycena v rámu vyřezaným a slepeným taktéž z PVC, který byl oproti návrhu vyztužen tak, aby se zabránilo jeho rozpadnutí v případě velkého namáhání cívky magnetickou silou. Veškeré spoje tvoří epoxidové lepidlo na plast.



Obrázek 16 – Cívka namotaná na kostře z PVC

Uchycení rámu cívky v dolní části je realizováno hliníkovým profilem. V horní části pak hliníkovou deskou dle návrhu. Spojení je šroubové a nechybí ani péřové podložky. Jakl je k litinové podložce přilepen epoxidovým lepidlem na kov a hliníková deska je připevněna k litinovému stojanu šrouby. Oproti CAD návrhu je však rám vychýlen o 4 mm na stranu, což je způsobeno již nepřesným umístěním otočného spoje podložky oscilátoru k litinovému základu.

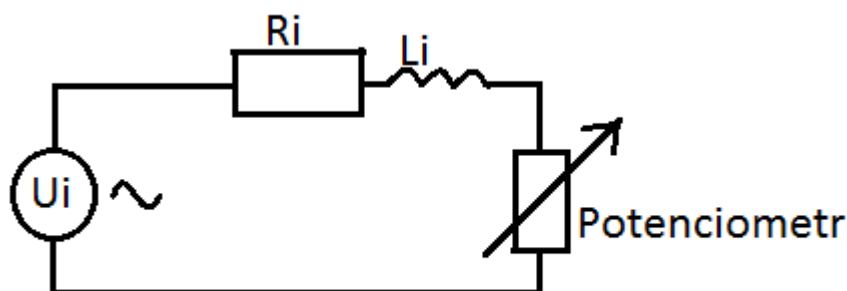


Obrázek 17 – Tlumič přimontovaný k sestavě

## 7 ŘÍZENÍ MODELU SOUSTAVY

### 7.1 Řízení tlumení

Řízení tlumení je realizováno pomocí proměnného odporu, ke kterému jsou připojeny oba konce cívky. Proměnný odpor tvoří potenciometr o maximálním odporu  $R = 2,5\text{ k}\Omega$ , který je názorně zapojen na Obrázek 18. V případě nastavení maximálního odporu bude tlumící efekt tlumiče minimální. Naproti tomu při odstranění zátěže ( $R = 0\ \Omega$ ) dosahuje výsledné tlumení maximálních hodnot. Potenciometr se ukázal jako nejlepší varianta řízení zejména díky snadné ovladatelnosti, což je v kombinaci s nízkou hmotností a příznivým rozměrům ideální způsob pro výslednou prezentaci jakožto výukové pomůcky.



Obrázek 18 – Řízení tlumení potenciometrem

### 7.2 Řízení buzení

Soustava je buzena motorem s nevyváhou vyjmutého ze servomotoru., který je součástí již zmíněného modelu bakalářské práce Oscilátor s jedním stupněm volnosti[2], zmíněné v kapitole 4.2. Motor je řízen pomocí Real-Time Toolboxu simulačního software Simulink. Vstupem do soustavy je v tomto případě signál PWM, jenž určuje otáčky. Blok Repeating semence určuje šířku impulzu proudu. Motor je propojen s DPS, která je připojena ke kartě I/O MF624 (), jenž zprostředkovává komunikaci s programem Simulink v reálném čase. Výsledné zrychlení kmitavého pohybu lze monitorovat pomocí akcelerometru, připevněnému k modelu, jenž komunikuje taktéž s Real-Time Toolboxem programu Simulink pomocí již zmíněné karty I/O MF624.



Obrázek 19 – Karta I/O MF624

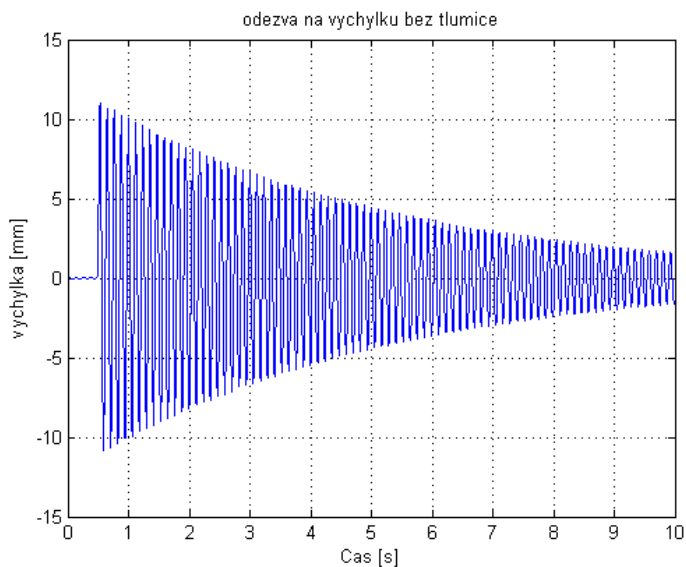
## 8 POROVNÁNÍ SIMULACE MODELU S REÁLNOU SOUSTAVOU

Po vytvoření modelu soustavy a jeho následné konstrukci a realizaci řízení je vhodné zjistit, nakolik reálná konstrukce splnila očekávání.

### 8.1 Odezva na počáteční výchylku 1 cm

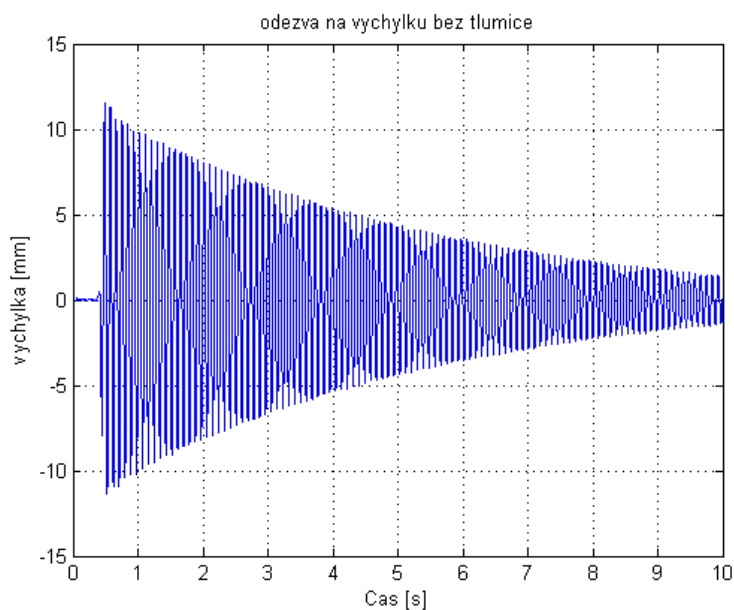
V následujícím grafem je možno porovnat odezvu na počáteční výchylku 1 cm bez tlumiče.

Simulace:



Obrázek 20 – Simulace - odezva na počáteční výchylku 1 cm bez tlumiče

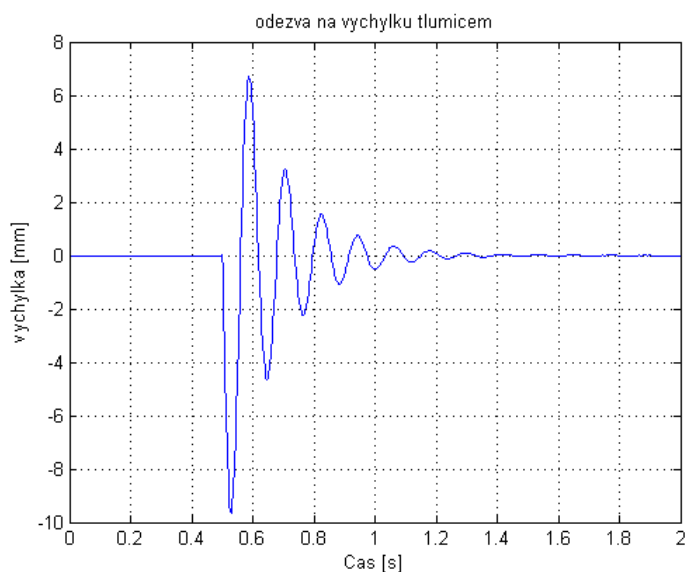
Reálná soustava:



Obrázek 21 – Reálná soustava - odezva na počáteční výchylku 1 cm bez tlumiče

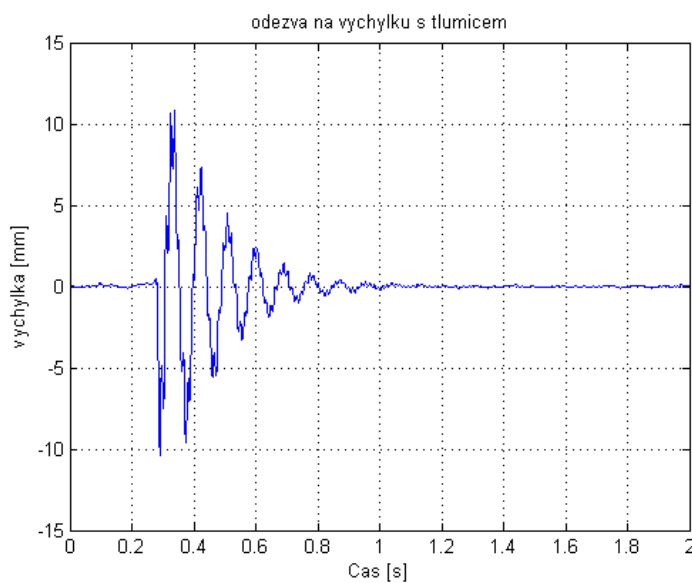
V následujícím grafem je možno porovnat odezvu na počáteční výchylku 1 cm s tlumičem:

Simulace:



Obrázek 22 - Simulace - odezva na počáteční výchylku 1 cm s tlumičem

Reálná soustava:



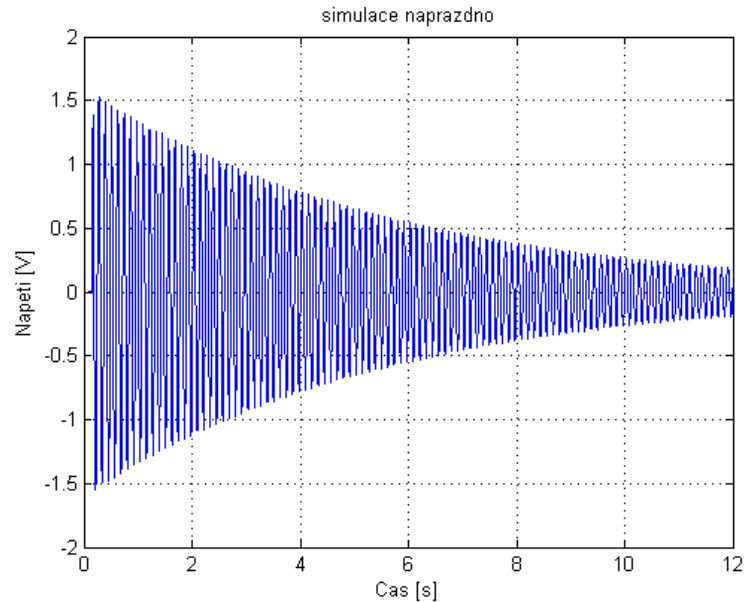
Obrázek 23 - Reálná soustava - odezva na počáteční výchylku 1 cm s tlumičem

Z grafů je možno vypořadovat, že tlumič je ve výsledku stejně efektivní, jako byl předpoklad modelu.

## 8.2 Indukované napětí při počáteční výchylce 1 cm

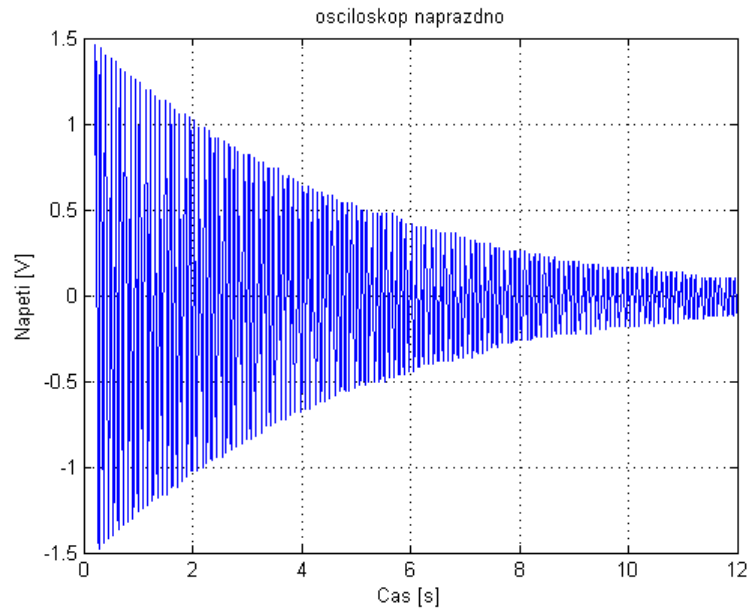
V následujících grafem je možno porovnat indukované napětí na cívce při počáteční výchylce 1 cm naprázdno:

Simulace:



Obrázek 24 – Simulace - indukované napětí na cívce naprázdno při počáteční výchylce 1cm

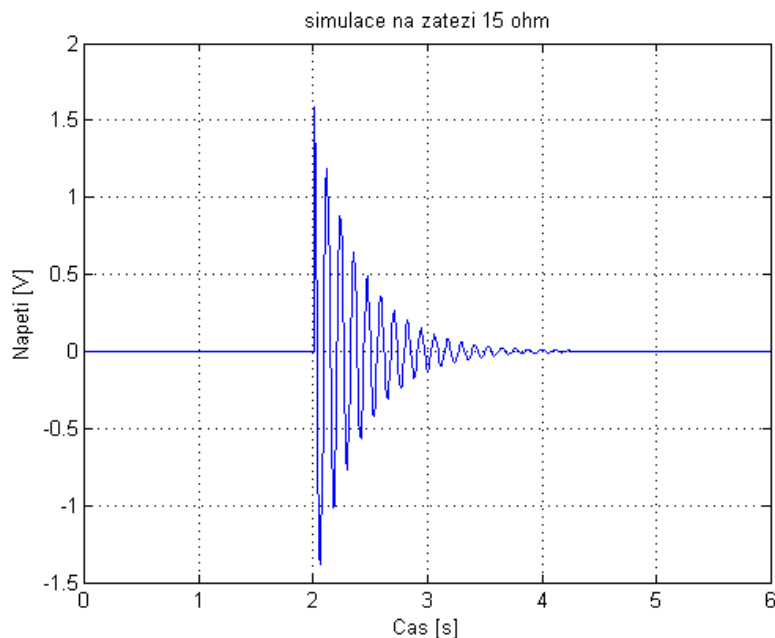
Reálná soustava:



Obrázek 25 – Reálná soustava - indukované napětí na cívce naprázdno při počáteční výchylce 1cm

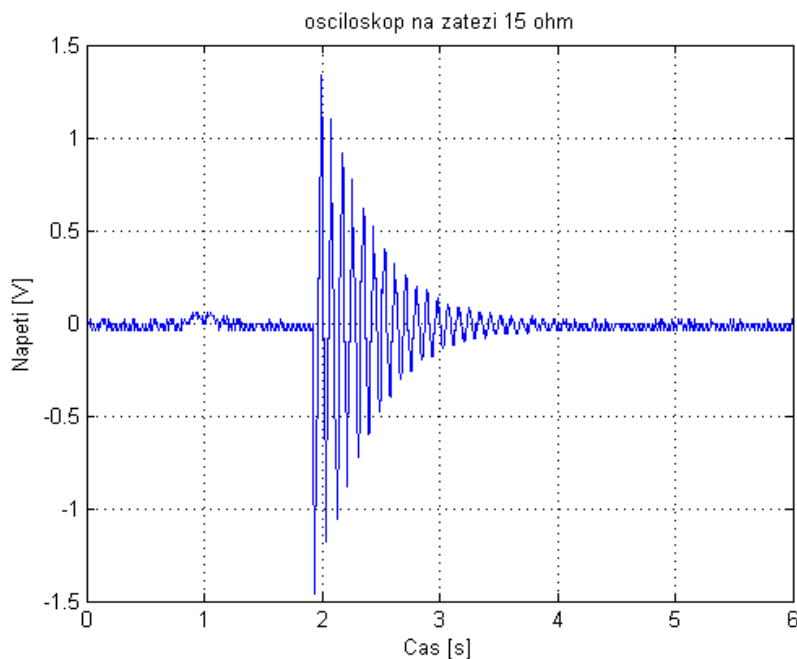
V následujících grafem je možno porovnat indukované napětí na cívce při výchylce 1 cm na zátěži 15  $\Omega$ :

Simulace:



Obrázek 26 - Simulace - indukované napětí na cívce při zátěži 15  $\Omega$  při počáteční výchylce 1cm

Reálná soustava:



Obrázek 27 – Reálná soustava -indukované napětí na cívce při zátěži 15  $\Omega$  při počáteční výchylce 1cm

Z grafů je zřejmé, že indukované napětí v simulaci je totožné s napětím indukovaným na reálném modelu, ať již v případě zátěže na prázdko nebo při zátěži 15  $\Omega$ .

## 9 BUZENÍ MOTORU

Cílem práce bylo také otestovat tlumič na soustavě s buzením motorem s nevývahou.

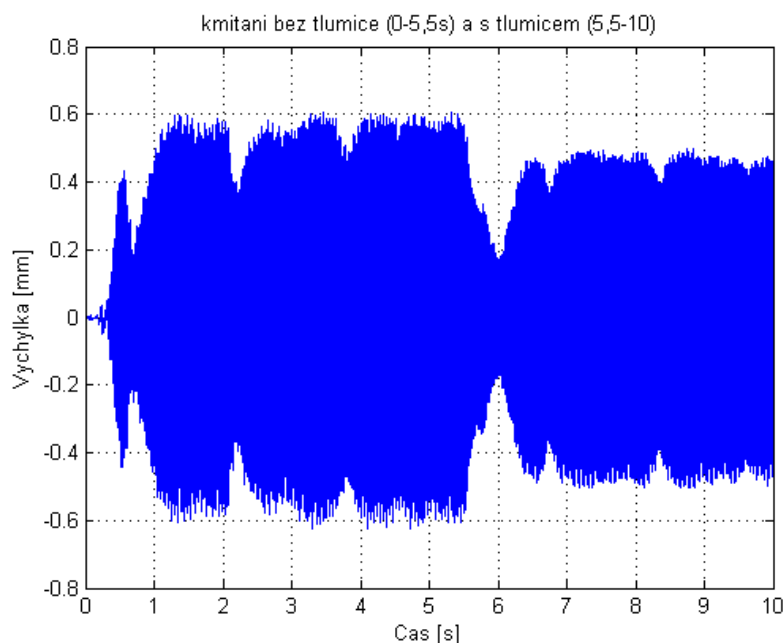
Úhlová frekvence buzení motorem:

$$\Omega = 390 \text{ rad/s} - \text{budící frekvence}$$

$$\Omega_0 = 54 \text{ rad/s} - \text{vlastní frekvence soustavy}$$

Z parametrů vyplývá, že buzení je nadrezonanční. Budící frekvence je poměrně vysoká, což se bohužel podepisuje na malé amplitudě výchylky. Je však výrazná změna vlastní úhlové frekvence sestavy po montáži tlumiče, která činí přes 50%. V kapitole 4.2 byla změřena vlastní frekvence soustavy bez tlumiče  $\Omega_{0o} = 102 \text{ rad/s}$ .

Reálná soustava:



Obrázek 28 - Graf buzení motoru s nevývahou a následného zapojení tlumiče v čase 5,5s

Z grafu je patrné, že tlumení kmitů buzených motorem je 17%. Zrakem je však změna téměř nepostřehnutelná díky malé amplitudě kmitů. Při prezentaci kmitání je tedy nutné použít akcelerometr. Dále lze pozorovat negativní vlivy při buzení motorkem, což může být způsobeno parazitickými frekvencemi okolí a také špatnou funkčností motoru vlivem opotřebení, které se při práci s ním vyskytlo.

## 10 ZÁVĚR

Cílem mojí práce bylo navržení a sestrojení elektromagnetického tlumiče, jakožto výukové pomůcky pro prezentaci kmitání a tlumení, zejména v předmětu Dynamika. Návrh a realizace fyzické části práce dopadla úspěšně. Občas se ukázalo nešťastným řešením při montáži použití epoxidových lepidel místo pevnějších spojů, avšak konstrukce je jen minimálně zatěžována a pro cíle práce se to ukázalo jako nejlevnější varianta.

Řízení buzení motorem bylo převzato z bakalářské práce Oscilátor s jedním stupněm volnosti [2]. Řízení tlumení je realizováno potenciometrem, a funguje bez problému.

Při porovnání modelu a tlumiče se neukázaly žádné výrazné odchylky při odezvě na počáteční výchylku, ať již při použití tlumiče či bez něj. Také indukované napětí na cívce má v simulaci stejný průběh jako na reálné soustavě. Při měření s počáteční výchylkou se tlumič ukázal jako dostatečně výkonný, jak plyne z porovnání obrázků Obrázek 21a Obrázek 23. Při buzení motorem s nevyváhou je tlumení patrné pouze při zapojeném akcelerometru, z čehož plyne, že tlumič je dostatečně účinný pouze při velkých výchylkách. Tato skutečnost může být odstraněna změnou parametrů cívky, zejména snížením průměru drátu vinutí na cívce, případně změnou rozměrů permanentních magnetů a jejich vzdálenosti nebo snížením hmotnosti celého tlumiče. Dalším řešením by mohla být změna buzení, a to na buzení elektromagnetem, jak je uvedeno v kapitole Buzení elektromagnetem 5.4. V tomto případě by bylo možné snížení budící úhlové frekvence, což by vedlo ke zvýšení amplitudy kmitání, a tlumení by bylo výraznější.

## 11 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] HADAŠ, Z. *Mikrogenerátor jako mikromechanická soustava*. Brno, 2007. Dizertační práce, FSI VUT.
- [2] DEĎO, M. *Návrh a realizácia výukového modelu „oscilátor s jedným stupňom voľnosti“*. Brno, 2009. Bakalářská práce, FSI VUT.
- [3] MACEK, P. *Návrh a analýza elektromagnetu*. Brno, 2011. Bakalářská práce, FSI VUT.
- [4] Reichl, J. *Encyklopedie fyziky* [online]. 2006 [cit.2013-26-04]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/182-kmitani-zpusobene-silou-pruznosti>
- [5] MALENOVSKÝ, E. *Studijní opory z dynamiky* [online]. 2005 [cit.2013-05-21]. Dostupné z: [http://www.umtold.fme.vutbr.cz/~pkrejci/opory/dynamika/kapitola\\_7.html](http://www.umtold.fme.vutbr.cz/~pkrejci/opory/dynamika/kapitola_7.html)
- [6] Wikipedia. *Tlumič kmitů* [online]. 2013 [cit.2013-05-15]. Dostupné z: [http://cs.wikipedia.org/wiki/Tlumi%C4%8D\\_kmit%C5%AF](http://cs.wikipedia.org/wiki/Tlumi%C4%8D_kmit%C5%AF)

## **12 SEZNAM PŘÍLOH**

- Příloha\_1:   - Výkresová dokumentace tlumiče  
              - Simulační model sestavy  
              - Vlastní text práce

\* přílohy jsou uloženy na přiloženém CD