



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A
BIOMECHANIKY**

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

**ÚPRAVA KONSTRUKCE MECHATRONICKÉ SOUSTAVY
PRO PREZENTACI TLUMENÉHO KMITÁNÍ**

REDESIGN OF MECHATRONIC SYSTEM FOR PRESENTATION OF DAMPED OSCILLATION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Rostislav Hanuška

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D.

BRNO 2016

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student: **Rostislav Hanuška**
Studijní program: Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor: Mechatronika
Vedoucí práce: **doc. Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D.**
Akademický rok: 2015/16

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:

Úprava konstrukce mechatronické soustavy pro prezentaci tlumeného kmitání

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Úkolem práce je upravit konstrukci elektromagnetického tlumiče pro výukovou pomůcku, která bude názorně prezentovat tlumené kmitání, např. v předmětu dynamika a technická mechanika. Tato soustava se skládá z kmitajícího členu uloženého k tuhému rámu přes poddajný prvek. Tato soustava je buzena vnější silou a kmitání je ovlivněno elektromagnetickým tlumičem.

Cíle bakalářské práce:

1. Rešerše možností aktivního a pasivního tlumení
2. Návrh soustavy pro prezentaci tlumeného kmitání založený na modelu
3. Konstrukce a oživení soustavy pro prezentaci tlumeného kmitání

Seznam literatury:

Sirota T.: Mechatronická soustava pro prezentaci kmitání a tlumení, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. Diplomová práce.

Brepta, R., Půst, L., Turek, F.: Mechanické kmitání, Sobotáles, Praha, 1994.

Karban P.: Výpočty a simulace v programech Matlab a Simulink, Computer Press, Brno, 2006.

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

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

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku
2015/16

V Brně, dne

L.S

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá konstrukcí mechatronické soustavy pro prezentaci kmitání s elektromagnetickým tlumením za účelem jejího praktického využití ve výuce. Součástí je úvod do problematiky související s kmitáním a tlumením těles. Je vytvořen simulační model v programu MATLAB/Simulink, kde se zvolí potřebné parametry elektromagnetického tlumiče, a také je zhotoven návrh celé soustavy. Na závěr se provede srovnání odezvy na počáteční vychýlení s již reálně zhotovenou konstrukcí.

Abstract

This thesis deals with mechatronic system design intended for demonstration of oscillation with electromagnetic damping for the purpose of its practical use in classes. A part of this thesis is also introduction to issues related to solids vibration and damping. Then a simulation model will be created in MATLAB/Simulink where required parameters of the damper will be selected, and also there is a design of the whole system. Finally, a comparison of response to initial deflection to real fabricated construction.

Klíčová slova

elektromagnetický tlumič, elektromagnetická indukce, vynucené kmitání, aktivní a pasivní režim tlumení kmitání

Keywords

electromagnetic shock absorber, electromagnetic induction, forced oscillation, active and passive modes of vibration damping

Bibliografická citace

HANUŠKA, R. *Úprava konstrukce mechatronické soustavy pro prezentaci tlumeného kmitání*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 45 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně podle pokynů vedoucího bakalářské práce a že jsem uvedl všechny použité zdroje a literaturu.

V Brně dne

.....
Rostislav Hanuška

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat především vedoucímu práce doc. Ing. Zděnkovi Hadašovi, Ph.D. za cenné rady a odborné vedení. Rád bych ocenil svoji rodinu a přátele za podporu během celého studia i při psaní této práce a hlavně bych rád poděkoval svému otci za pomoc při sestrojování vlastní konstrukce.

OBSAH

1	Úvod	10
2	Formulování problémů a cíle řešení	11
3	Kmitající soustava s jedním stupněm volnosti.....	12
3.1	Poddajné těleso a dynamika kmitání	12
3.2	Vynucené kmitání	13
3.2.1	Harmonické buzení	13
3.2.2	Buzení nevývahou.....	14
3.2.3	Kinematické buzení.....	15
3.3	Elektromagnetické tlumení	15
3.4	Aktivní a pasivní tlumení soustavy	16
3.4.1	Elektromagnetický pasivní tlumič.....	17
3.4.2	EM aktivní tlumič	18
4	Návrh soustavy s EM tlumičem.....	19
5	Návrh konstrukce EM tlumiče a celé soustavy	21
5.1	Stator	21
5.2	Běžec	22
5.2.1	Magnety	22
5.2.2	Oddělovače.....	23
5.2.3	Nosná tyč.....	23
5.2.4	Nástavce	23
5.3	Vedení	23
5.4	CAD model celé soustavy	24
6	Parametry elektromagnetického tlumiče	25
6.1	Reálné parametry cívky.....	25
6.2	Magnetická indukce v tlumiči	25
7	Vlastní konstrukce soustavy	27
8	Hmotnost přidaného závaží a tuhost pružin	29
9	Ovládání tlumení	30
10	Analýza kompletní soustavy na prezentaci kmitání.....	31
10.1	Odezva na počáteční vychýlení bez EM tlumení	31
10.2	Odezva na počáteční vychýlení s EM tlumením	32

10.3	Odezva indukovaného napětí na počáteční vychýlení	34
10.4	Stanovení poměrného útlumu	35
11	Experimentální měření při buzení elektromagnetem	36
12	Závěr	39
13	Seznam použitých zdrojů	40
14	Seznam použitých symbolů a zkratk.....	41
15	Seznam obrázků a tabulek.....	43
16	Seznam příloh	45

1 Úvod

V současné době se setkáváme s mechanickým kmitáním a vibracemi téměř na každém kroku. Ve většině průmyslových odvětví je kladen důraz právě na vlivy vibrací a jejich možnosti tlumení, případně hledání jejich využitelnosti.

Snahou je co nejvíce zefektivnit a zároveň i zlevnit výrobní procesy, což vede ke spokojenosti zaměstnavatelů i zaměstnanců, neboť odstranění vibrací má příznivý vliv na zdraví lidí, celkové pracovní podmínky i životní prostředí. Proto bychom měli vibrace i všechny jevy s nimi spojené studovat a poznávat je pomocí všech dostupných technologií, zejména pak věnovat pozornost jejich tlumení, o čemž vlastně bude tato práce pojednávat. Konkrétněji bude rozebrán princip elektromagnetického tlumení, kde výsledkem bude mechatronická soustava s elektromagnetickým tlumičem pro prezentování tlumeného kmitání v předmětech Dynamiky a Technické mechaniky.

Princip takového tlumiče spočívá v jeho pohybu, kdy energie není přímo disipována ve formě tepla do okolí vlivem protékajícího oleje přes tlumící kanály, jako tomu je u kapalinového tlumiče, ale díky vinutým cívkám pohybujících se v magnetickém poli sám generuje energii.

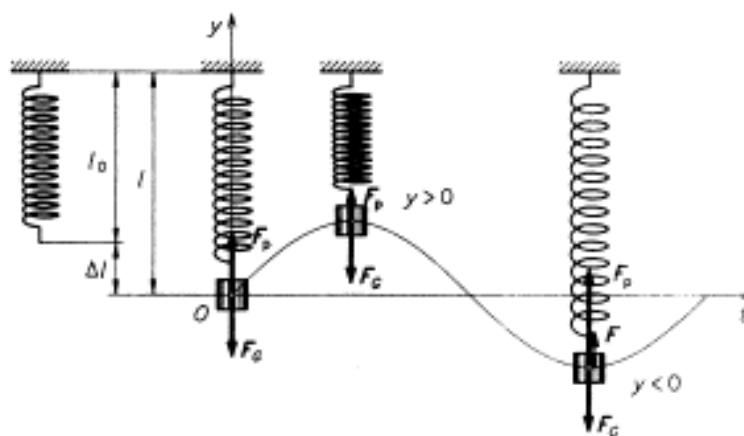
2 Formulování problémů a cíle řešení

Tato bakalářská práce je zaměřena na úpravu konstrukce mechatronické soustavy. Soustava je složena z kmitajícího členu uloženého k tuhému rámu přes poddajný prvek. Bude buzena vnější silou a výsledné kmitání je ovlivněno elektromagnetickým tlumičem. Výsledná soustava by měla podávat ideální představu o celém problému, být rozměrově malá a relativně lehká, čili snadno přemístitelná a proto bude používána jako učební pomůcka v hodinách výuky předmětů Dynamiky a Technické mechaniky. Na začátku této práce bude provedena rešerše týkající se dané problematiky a možností aktivního a pasivního tlumení. Podíváme se na návrh soustavy založený na modelu, jenž vytvoříme v programu MATLAB/Simulink a prozkoumáme všechny potřebné parametry. Po doladění simulačního modelu přejdeme ke konstrukčnímu návrhu a poté k oživení celé soustavy, u které pak provedeme několik měření na ověření funkčnosti elektromagnetického tlumení.

3 Kmitající soustava s jedním stupněm volnosti

3.1 Poddajné těleso a dynamika kmitání

Mechanický oscilátor nám reprezentuje poddajné uložení tělesa, jedná se například o těleso zavěšené na pružině. Jeho parametry jsou hmotnost m a tuhost pružiny k . Poddajné těleso se vlivem působících sil mění, dochází k napětí a deformaci v libovolném bodě tělesa. V případě působení vnější síly na těleso oscilátoru vznikne síla, která vždy působí proti prodloužení pružiny a nazývá se síla pružnosti F_p . Její snahou je vrátit pružinu do stavu před deformací, což znázorňuje obrázek 1.



Obrázek 1 - Kmitání tělesa na pružině [2]

Pružina o délce l_0 se se zavěšeným tělesem bez působení dalších vlivů celkově prodlouží o Δl a těleso se ustálí v rovnovážné poloze, kde působí jen síla tíhová F_g a síla pružnosti F_p . Platí tedy následující vztah (1), (2):

$$F_p = F_g \quad (1)$$

$$k \cdot \Delta l = m \cdot g. \quad (2)$$

Rozkmitáme-li oscilátor, je příčinou tohoto kmitavého pohybu proměnlivá síla (3) o velikosti

$$F = -k \cdot y, \quad (3)$$

která neustále směřuje do rovnovážné polohy. Vycházíme z rovnice (4)

$$F = F_p - F_g = k \cdot (\Delta l - y) - m \cdot g = -k \cdot y, \quad (4)$$

kde velikost tíhové síly je konstantní, ale mění se velikost síly pružnosti v závislosti na změně výchylky tělesa zavěšeného na pružině.

Neznámá $y(t)$ se nalezne řešením pohybové rovnice (5)

$$m\ddot{y} = -b\dot{y} - ky + mg + F(t), \quad (5)$$

odvozené z Newtonova zákona síly pro $y(t)$ jako obecnou souřadnici. Jde o obyčejnou lineární diferenciální rovnici druhého řádu s konstantními koeficienty s rušivou složkou na pravé straně ve formě tíhy a budící síly. V celé této podkapitole bylo čerpáno ze zdrojů [2], [3], [4].

3.2 Vynucené kmitání

Vynucené kmitání vzniká i při nulových počátečních podmínkách. Hlavní roli v něm hraje buzení. Veškeré informace byly čerpány ze zdrojů [3], [5], [6]. Buzení je možné pozorovat v pohybové rovnici, kdy její pravá strana je nenulová. Příkladem takové situace může být rovnice (6) kmitající soustavy s tlumením:

$$m\ddot{q} + b\dot{q} + kq = F(t), \quad (6)$$

kde m je hmotnost soustavy, b je tlumení úměrné rychlosti $\dot{q}(t)$, k je tuhost a $F(t)$ je budící síla. Člen $b\dot{q}$, který označuje tlumící sílu, vystihuje s dostatečnou přesností tlumící účinek vazkého oleje v olejovém (viskózním) tlumiči [3]. Existuje ještě několik dalších typů tlumení, ale většinu z nich nelze analyticky vyjádřit v pohybové rovnici jako lineární člen.

Dalším řešením a potřebnými úpravami získáme z pohybové diferenciální rovnice (6), která je v nehomogenním tvaru, hlavní charakteristiky kmitání s jedním stupněm volnosti.

Vlastní úhlová frekvence (7):

$$\Omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} [\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (7)$$

Koeficient dozívání (8):

$$\delta = \frac{b}{2 \cdot m} [\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (8)$$

Poměrný útlum (9):

$$b_p = \frac{\delta}{\Omega_0} \quad (9)$$

Tyto charakteristiky dostaneme z její homogenní části řešení. Jejich zásluhou získáme představu o tom, jak se daná kmitající dynamická soustava bude chovat.

Druhá část analýzy (ustálená složka kmitání) spočívá z hlediska matematiky v řešení partikulárního integrálu, který má tvar podle toho, jaké buzení působí na soustavu. Rozlišujeme několik způsobů buzení.

3.2.1 Harmonické buzení

V následujících třech podkapitolách bylo čerpáno ze studijních opor dynamiky [6]. V technické praxi nejčastěji narazíme na harmonické buzení, kdy tvar pohybové rovnice (10) vypadá takto:

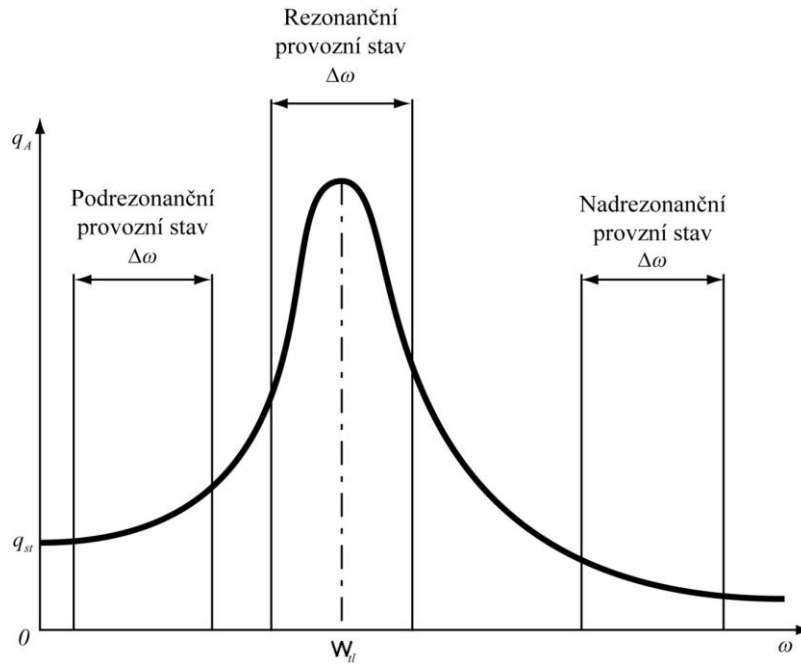
$$m\ddot{q} + b\dot{q} + kq = Q_0 e^{i\omega t} \quad (10)$$

Amplituda kmitání je zde komplexní. Vztah pro amplitudu (11), ale i fázi (12) obdržíme z reálné a imaginární části pohybové rovnice (10).

$$q_A = \frac{Q_0}{m\sqrt{(\Omega^2 - \omega^2) + (2\omega\delta)^2}} \quad (11)$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{2b_p \frac{\omega}{\Omega}}{1 - \frac{\omega^2}{\Omega^2}} \quad (12)$$

Známe-li amplitudu a fázi můžeme sestavit jejich charakteristiky, kde pak rozlišujeme tři možné stavy. Nadrezonanční, rezonanční a podrezonanční viz obrázek 2, z nichž nejvhodnější vzhledem k provozní bezpečnosti je právě poslední zmiňovaný.



Obrázek 2 - Amplitudo-frekvenční charakteristika [6]

3.2.2 Buzení nevývahou

Dalším případem vyskytujícím se v technické praxi je buzení nevývahou. Jedná se v podstatě o buzení odstředivou silou. Tvar pohybové rovnice (13) je:

$$m\ddot{q} + b\dot{q} + kq = m_n e \omega^2 \sin(\omega t), \quad (13)$$

kde člen $m_n e$ [$kg \cdot m$] se nazývá nevývaha a $m_n e \omega^2$ [N] je odstředivá síla. Narozdíl od předchozího případu je řešení pouze v reálném oboru. Odezva tedy bude mít harmonický průběh s frekvencí rovnou budící.

Pro amplitudu kmitání platí vztah (14):

$$q_A = \frac{m_n e \frac{\omega^2}{\Omega^2}}{m \sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\Omega^2}\right)^2 + \left(2b_p \frac{\omega}{\Omega}\right)^2}} \quad (14)$$

3.2.3 Kinematické buzení

V technické praxi se ještě setkáváme s posledním analyzovaným případem buzení. Jedná se o buzení kinematické nebo také známé jako buzení od základu. Příkladem tohoto buzení jsou zemětřesení. Tvar pohybové rovnice (15) je za předpokladu harmonického pohybu základu:

$$m\ddot{q} + b\dot{q} + kq = (i\omega b + k)x_{z0}e^{i\omega t} \quad (15)$$

Pro amplitudu kmitání platí (16):

$$q_A = \frac{x_{z0}\sqrt{1 + \left(2b_p \frac{\omega}{\Omega}\right)^2}}{m\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\Omega^2}\right)^2 + \left(2b_p \frac{\omega}{\Omega}\right)^2}} \quad (16)$$

3.3 Elektromagnetické tlumení

Tlumení způsobuje, že amplituda reálného oscilátoru nekmitá neomezeně dlouhou dobu, ale postupně se zmenšuje a volné kmitání tedy zaniká. Děje se to proto, že se mechanická energie oscilátoru přeměňuje v jinou formu energie. Jelikož nelze zabránit ztrátám energie oscilátoru, tak vzniká tlumené kmitání, jehož nejčastější příčinou je odporová síla (například odpor vzduchu) [7]. Rozlišujeme několik druhů tlumení. V této práci se ale zaměříme na tlumení elektromagnetické, které budeme potřebovat pro pochopení principu elektromagnetického tlumiče.

Elektromagnetické tlumení vychází z elektromagnetické indukce. Při časové změně magnetického indukčního toku se na statoru, cívice indukuje elektromotorické napětí u_i , které vychází z Faradayova zákona a je obecně dáno vztahem (17):

$$u_i = \oint_C (\vec{v} \times \vec{B}) d\vec{r}, \quad (17)$$

kde \vec{v} je vektor rychlosti pohybu vodiče, a \vec{B} je vektor magnetické indukce v prostředí, kde se vodič pohybuje [8]. Pro zjednodušení si vztah upravíme na tento tvar (18):

$$u_i = l \cdot B \cdot N \cdot \dot{q}, \quad (18)$$

kde l je délka, kde aktivně působí permanentní magnety, B je jejich magnetická indukce kolmá ke směru pohybu, N je počet závitů cívky a \dot{q} je rychlost pohybu kotvy vůči statoru [8].

Ke vztahu pro tlumení elektromagnetického tlumiče dojdeme z rovnice rovnosti výkonů (19):

$$p_d = p_e, \quad (19)$$

kde p_d je odebíraný výkon ze soustavy, který je závislý na rychlosti relativního pohybu magnetického obvodu \dot{q} a na elektromagnetickém tlumení b_e , p_e je celkový generovaný výkon způsobující tlumící sílu [8].

Správným dosazením veličin do obou výkonů dostaneme rovnici (20), ze které snadno vyjádříme tlumení elektromagnetického tlumiče:

$$b_e \cdot \dot{q} = \frac{(B \cdot l \cdot N)^2}{R_c + R_z} \cdot \dot{q}, \quad (20)$$

kde celkový generovaný výkon vychází z vyjádření součinu napětí a proudu a následným dosazením do Ohmova zákona. R_c představuje vnitřní odpor cívky a R_z je zátěžný odpor [8].

Výsledkem tedy je rovnice (21) pro tlumení našeho elektromagnetického tlumiče, kterou budeme potřebovat pro sestavení simulačního modelu v Simulinku:

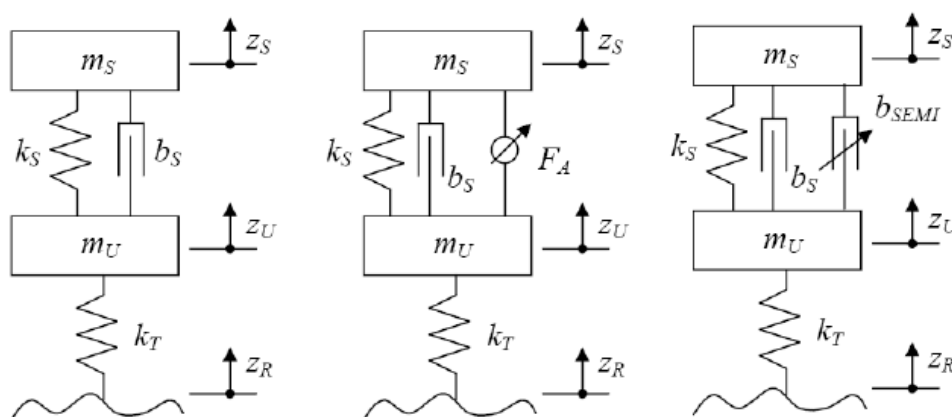
$$b_e = \frac{(B \cdot l \cdot N)^2}{R_c + R_z} \quad (21)$$

Z uvedeného vztahu lze vyčíst, že vliv na tlumení má navrhnutá cívka, magnetická indukce ve vzduchové mezeře a zátěžný odpor.

Jelikož v práci na tlumiči použijeme permanentní magnety, bude magnetická indukce pevně dána a nemůžeme ji měnit. Cívky jsou také pevně dané a proto tedy, když budeme chtít nějakým způsobem ovlivňovat vlastnosti tlumiče, zbývá nám pouze možnost měnit zátěžný odpor.

3.4 Aktivní a pasivní tlumení soustavy

Pro lepší pochopení si danou problematiku ukažme na příkladě, jenž bude vycházet ze svislého kmitání vozidel, kde si ukážeme model čtvrtiny vozidla pro pasivní, aktivní, ale i semiaktivní odpružení viz obrázek 3 [9]. Poté se spíše zaměříme na návrh elektromagnetického tlumiče a jeho pasivní a aktivní tlumení.



Obrázek 3 - Pasivní, aktivní, semiaktivní tlumič modelu čtvrtiny vozidla [9]

Hlavním rozdílem mezi těmito způsoby tlumení je forma energie vstupující do systému. Tradiční pasivní tlumič mění svou energii na teplo, které odvádí do okolí. U semiaktivních tlumičů se využívá externí zdroj energie, kterým se tlumič nastaví, popřípadě změni své vlastnosti. Množství této energie je však menší, než množství energie v tlumiči mařeně. Aktivní způsob spočívá v tom, že do aktuátoru, který působí proti směru pohybu, přivádíme energii srovnatelnou s energií kmitajícího vozidla. I když se zdá model čtvrtiny vozidla relativně jednoduchý, přináší značné množství informací, které je potřeba znát. Pro komplexnější studie už je pak potřeba pracovat se složitějšími modely, které již uvažují model celého vozidla zahrnujícího např. kinematiku podvozku, model pohonu nebo třeba i modely chování řidiče. Příkladem takového systému je ADAMS/Car [9].

3.4.1 Elektromagnetický pasivní tlumič

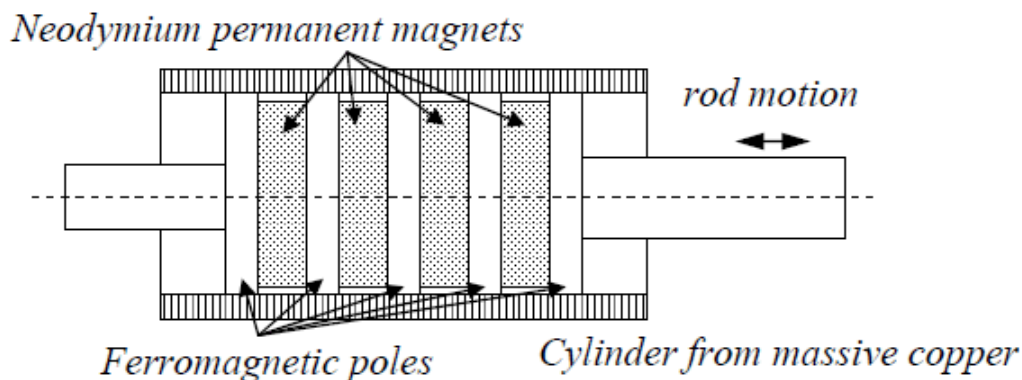
Složení elektromagnetického pasivního tlumiče:

- pohyblivá část s permanentními magnety - běžec
- stojící část tvořena masivním tubusem z mědi nebo vinutím z cívek - stator

Obrázek 4 znázorňuje příklad takového tlumiče a obrázek 5 jeho schéma:



Obrázek 4 - Fotografie testovacího vzorku EM tlumiče [9]

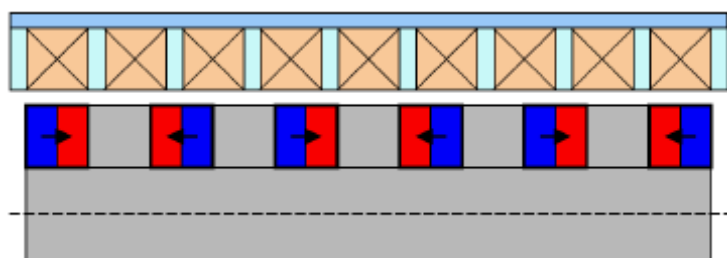


Obrázek 5 - Schéma EM pasivního tlumiče [9]

Tlumení zde vyvolávají vířivé proudy vytvářející se v měděném tubusu při pohybu. Parametry pro návrh tlumiče jsou veličiny jako materiál, rozměry jednotlivých složek (permanentních magnetů, pólů, tubusu z mědi), velikost vzduchové mezery, apod. [9]. Hlavním znakem tohoto elektromagnetického tlumiče s permanentními magnety je jeho válcový tvar, díky němuž je využití magnetického toku efektivnější a dosáhneme tak vyšší tlumící síly. Axiálně zmagnetizované magnety mají větší tlumící sílu než radiálně zmagnetizované. Zde jsou použity prstencové neodymové magnety s feromagnetickými oddělovači uchycené na neferomagnetické tyči. V pasivním režimu u EM tlumiče s vinutím je maximální tlumící síla závislá na pohybu běžce vůči statoru a cívky jsou buď zkratované, nebo mohou mít nastavený zátěžný odpor na doladění tlumící síly. Tento odpor můžeme měnit v závislosti na velikosti požadované tlumící síly v daný okamžik další řídicí elektronikou, zde již ale hovoříme o poloaktivním režimu [10].

3.4.2 EM aktivní tlumič

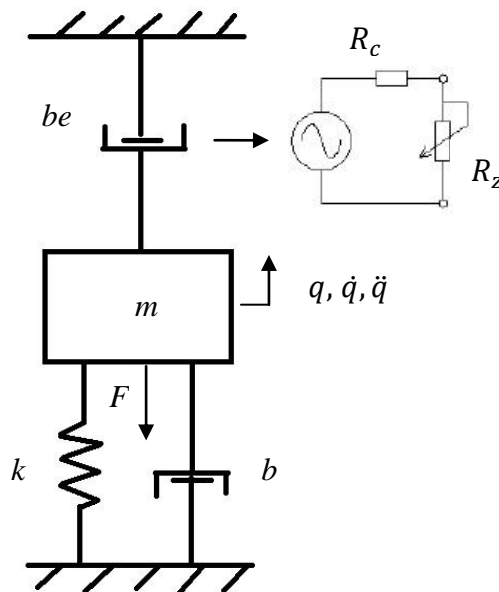
Měděný tubus z obrázku 4 můžeme nahradit vinutím, jak je vidět na obrázku 6 a díky němu jsme pak schopni tlumič nastavovat, měnit v jistém rozsahu jeho tlumící charakteristiku tím, že budeme do cívek statoru pouštět proud v opačném směru, jako ho vyvolává samotné indukované napětí vlivem pohybu soustavy [10]. Takovéto řešení má velkou výhodu v tom, že jsme schopni dosáhnout daleko vyšší tlumící síly v porovnání s předcházejícím pasivním a semiaktivním řešením. Je tu i možnost využití tlumiče jako generátoru, kde místo obvyklé přeměny energie na teplo a jejího následného zmaření, dokáže tuto energii přeměnit na užitečnou elektrickou [9].



Obrázek 6 - Aktivní EM tlumič [9]

4 Návrh soustavy s EM tlumičem

Než přejdeme k návrhu samotného tlumiče, tak se ještě podíváme na celkový matematický model kmitající soustavy s EM způsobem tlumení.



Obrázek 7 - Model soustavy s elektromagnetickým tlumičem

Zařazením elektromagnetického tlumení do pohybové rovnice (6) kmitající soustavy s jedním stupněm volnosti, kde vstupem je síla budící kmitání, dostaneme model dle obrázku 7 a rovnice celé soustavy nabude tvaru (22):

$$m\ddot{q} + (b + be)\dot{q} + kq = F(t) \quad (22)$$

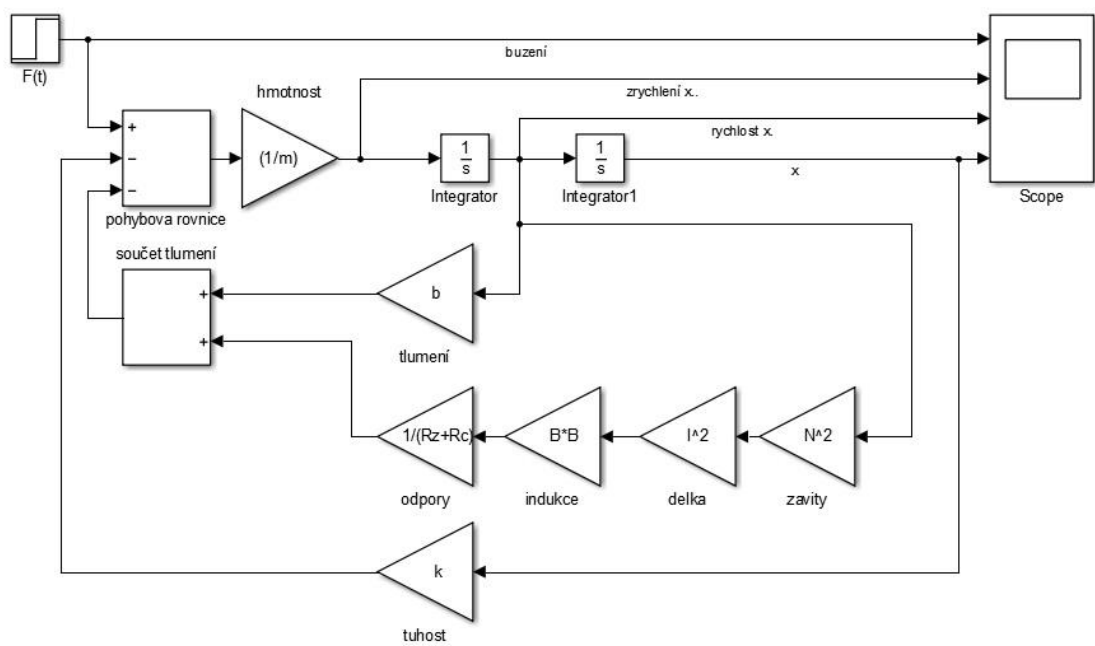
Princip elektromagnetického tlumení jsme si popsali v kapitole 3.3. Můžeme tedy rovnou přejít k dosažení rovnice (21) do rovnice (22) a dostaneme vztah (23):

$$m\ddot{q} + b\dot{q} + \frac{(B \cdot l \cdot N)^2}{R_c + R_z} \dot{q} + kq = F(t) \quad (23)$$

Rovnici (23) si upravíme do explicitního tvaru, abychom mohli sestavit virtuální model v programu MATLAB/Simulink a tím zjistili, jak se bude celá soustava s elektromagnetickým tlumičem chovat ještě před jejím zhotovením. Tímto způsobem lze zabránit nežádoucím problémům při testování reálného prototypu. Po úpravě vypadá rovnice (24) takto:

$$\ddot{q} = -\frac{b}{m}\dot{q} - \frac{(B \cdot l \cdot N)^2}{(R_c + R_z) \cdot m} \dot{q} - \frac{k}{m}q + \frac{F(t)}{m} \quad (24)$$

Jednoduchý simulační model vytvořený na základě tohoto vztahu pomocí bloků v Simulinku vidíme na obrázku 8 a po zvolení vhodných veličin pak můžeme sledovat odezvu na budící signál.



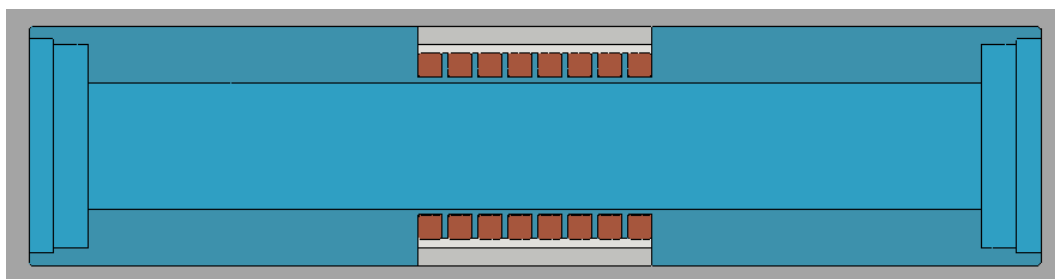
Obrázek 8 - Simulační model soustavy

5 Návrh konstrukce EM tlumiče a celé soustavy

Nejprve si rozdělíme elektromagnetický tlumič na jednotlivé části, na které se postupně zaměříme a poté se podíváme na celkový návrh tlumicí soustavy. Následně prozkoumáme potřebné parametry pro řešení simulačního modelu. Při návrhu budeme vycházet z již hotové konstrukce statoru Tomáše Siroty [1].

5.1 Stator

Tělo statoru je ponecháno, tak jak jej navrhnul a sestrojil ve své práci Tomáš Sirota [1]. Obrázek 9 znázorňuje CAD model a obrázek 10 je zhotovená konstrukce.



Obrázek 9 - CAD model statoru



Obrázek 10 - Zkonstruovaný stator [1]

Konstrukce statoru je s 8-fázovým vinutím, kde cívky, kvůli jejich navinutí, jsou odděleny 1 mm drážkami. Vnitřní a vnější průměr vinutí cívek je stanoven na 23 a 31 mm a výška na 4 mm. Díra pro uložení běžce, tyče s magnety, má průměr 21 mm a byla vyvrtána zpětně až po navinutí cívek. Vodič, který byl nakonec použit, má průměr 0,16 mm. Pro zajištění spojitosti všech cívek s nosičem jako jednoho celku se využil polyuretanový lak. Konce cívek jsou připájkované na obou koncích nosiče ve vytvořených drážkách. Magneticky vodivý plášť, který slouží na uzavření magnetického pole vyvolaného pohybem magnetů vůči cívkám, má vnější průměr 40 mm, ale průměr nosiče má vnější průměr 41,2 mm. To zapříčinilo nesnadné stanovení přesné vzájemné polohy a tak se plášť oblepil lepicí páskou na shodný průměr s nosičem a poté se už jen všechny části vzájemně jednoduše nastavily. Celá konstrukce byla nakonec ještě zpevněna epoxidovým lepidlem, aby držela jako jeden celek.

5.2 Běžec

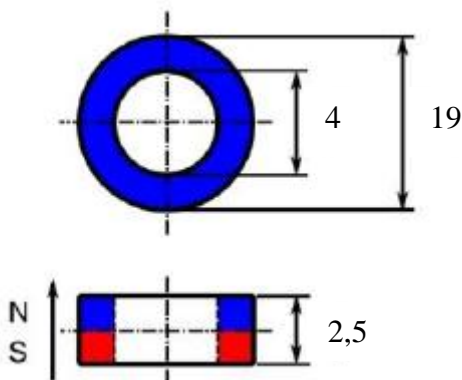
Běžec tvoří pohyblivou část konstrukce a bude složen z hliníkové tyče s prstencovými axiálními magnety otočenými proti sobě stejnými póly, které jsou vzájemně oddělené oddělovači z feromagnetického materiálu. Tento způsob uložení magnetů vytváří ve vzduchové mezeře silný radiální magnetický tok, který je podporován ocelovým pláštěm, přes který se tento tok pro každý magnet uzavírá. Ve vzduchové mezeře mezi magnety a pláštěm jsou na statoru navinuté měděné cívky a vzájemným pohybem cívek a magnetického pole se v nich indukují elektromotorické napětí viz kapitola 3.3. Toto napětí vyvolá elektrický proud, který následně vytvoří tzv. Lorentzovu sílu působící proti vzájemnému pohybu [1]. Návrh běžce v 3D CAD modelu ve tříčtvrtinovém řezu vidíme na obrázku 11.



Obrázek 11 - Návrh běžce v řezu

5.2.1 Magnety

Pro sestavení běžce použijeme prstencové neodymové permanentní magnety $19 \times 4 \times 2,5$ mm dle obrázku 12. Magnety byly předem zakoupené a je jich celkem 8 s tím, že spojením každých dvou klesne jejich počet na 4 a rozměr se změní na $19 \times 4 \times 5$ mm. Velikost remanentní magnetické indukce každého magnetu dosahuje hodnot 1320 - 1380 mT s teplotní odolností do 150 °C.



Obrázek 12 - NdFeB magnet [10]

5.2.2 Oddělovače

Jako oddělovače se použijí kroužky o rozměru 19×4×5 mm z feromagnetického materiálu. Feromagnetické látky mají relativní permeabilitu mnohem větší než 1. Již slabým magnetickým polem u nich lze vyvolat takové uspořádání atomů, že se magnetické pole zesílí a dojde tak k magnetování látky [11]. U feromagnetických látek magnetické pole zůstává i po zaniknutí vnějšího pole, avšak pro každou feromagnetickou látku existuje určitá teplota (tzv. Curierova teplota), při jejímž překročení dojde ke ztrátě feromagnetických vlastností a látka se stane látkou paramagnetickou. Mezi tyto materiály patří například železo, nikl, kobalt nebo některé slitiny. V našem případě bude pro oddělovače použita ocel.

5.2.3 Nosná tyč

Jak již bylo uvedeno, bude nosná tyč vyrobena z hliníku. Hliník se řadí mezi neferomagnetické látky s hodnotou relativní permeability 1. Magnetické siločáry by se v případě feromagnetického materiálu uzavíraly skrze tyč a ve vzduchové mezeře by pak nebylo prakticky žádné magnetické pole. To by zapříčinilo minimální hodnotu magnetické indukce a nedocházelo by k účinnému tlumení soustavy [1]. Použitím hliníkové tyče, nebo tyče z jakéhokoliv nemagnetického materiálu, si zajistíme rovnoměrné rozložení magnetického pole ve vzduchové mezeře, což přispívá ke zvýšení hodnoty magnetické indukce a tak tedy dosáhneme větší účinnosti tlumení.

Tyč bude mít průměr 4 mm a na každé její straně budou závitky pro spojení s nástavci.

5.2.4 Nástavce

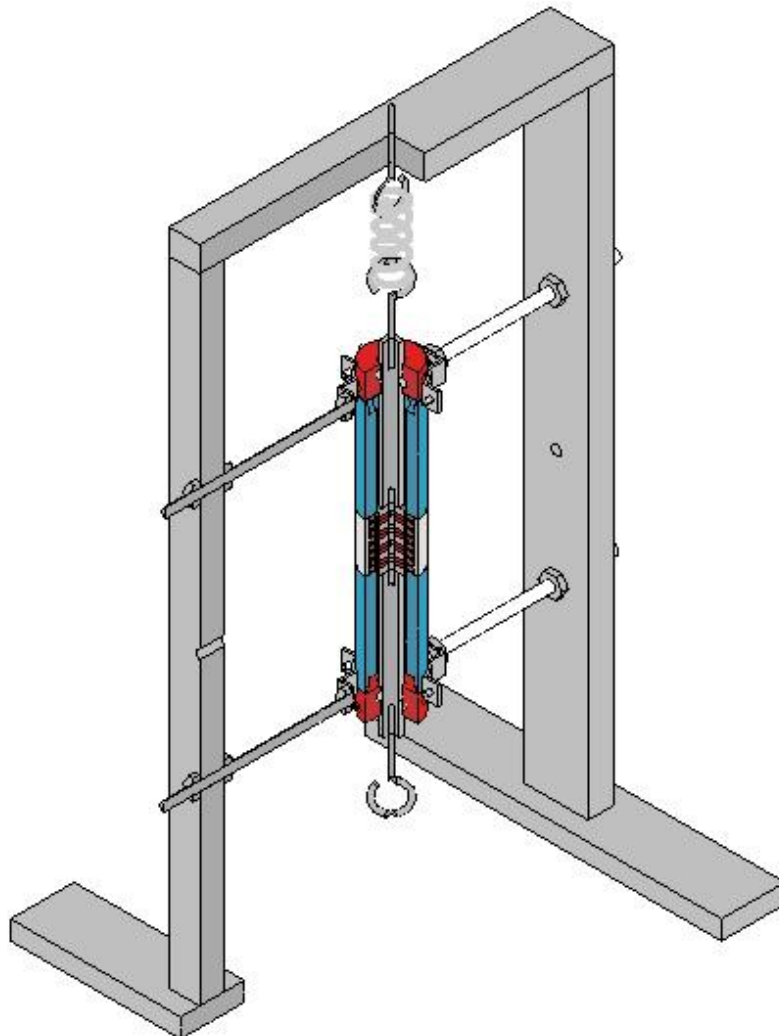
Na obou koncích hliníkové tyče s magnety bude připevněna hliníková čtvercová tyč o průřezu 10×10 mm. Celou navrhnutou konstrukci pohyblivé části jsme si mohli prohlédnout na obrázku 11. Nástavce mají na svých koncích závěsná oka pro uchycení pružiny a případného závaží. Hlavní účel použití čtvercové tyče je zamezení protáčení běžce a zajištění pohybu ve vedení pouze v jedné ose.

5.3 Vedení

Vedení bude sestrojeno tak, aby nástavce při rozkmitání běžce klouzaly po materiálu s nízkým koeficientem tření a nedocházelo tak k tlumení právě vlivem třecí síly. Příkladem takového materiálu může být nylatron, teflon apod. Vedení je také důležité proto, aby se magnety vlivem magnetické síly nepřitahovaly k ocelovému plášti, zůstaly ve středu v jedné rovině a nedrhnuly o stěnu v díře statoru. Na obrázku 13 si můžeme prohlédnout CADový návrh, kde je vedení vyznačeno červenou barvou. Uvnitř něj jsou vloženy krátké válcové tyče tak, aby tvořily mřížky ve tvaru čtverce o rozměrech 10×10 mm, ve kterých se budou pohybovat nástavce.

5.4 CAD model celé soustavy

Navrhovaný celkový model soustavy a elektromagnetického tlumiče si můžeme prohlédnout na obrázku 13 s tím, že konečná konstrukce se může z důvodu maximální redukce času a nákladů na výrobu odlišovat.



Obrázek 13 – Model soustavy s elektromagnetickým tlumičem zobrazen v řezu

Nyní již můžeme přejít k vlastní konstrukci, ale ještě před tím se podíváme na některé parametry tlumiče, potřebné k určení chování celé soustavy.

6 Parametry elektromagnetického tlumiče

6.1 Reálné parametry cívky

Parametr, který nás nejvíce zajímá je činný odpor vinutí cívek. Na základě jeho znalosti si vypočítáme z rovnice (25) délku vinutí každé cívky a odtud jejich počet závitů. Hodnoty činných odporů jsou opět převzaté z práce Tomáše Siroty [1] a jsou shrnuté v tabulce 1.

$$R_c = \frac{\sigma_{Cu} \cdot l_v}{S_v} \quad (25)$$

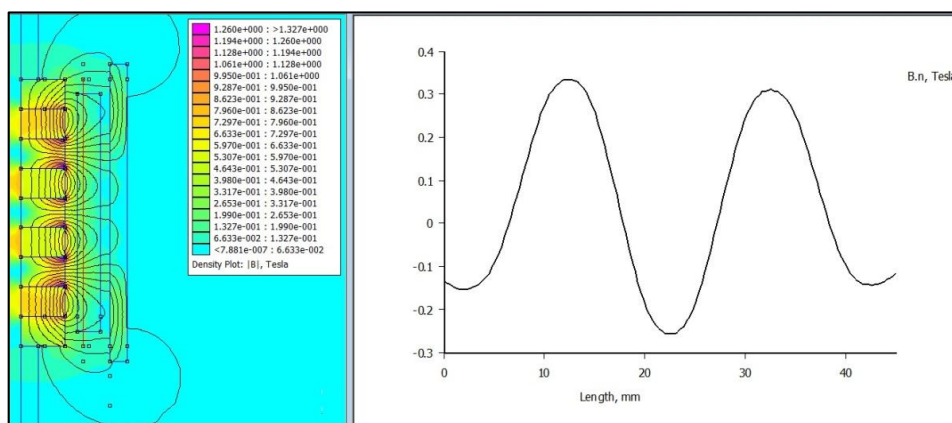
Tabulka 1 – Hodnoty reálných parametrů cívek

Cívka	1	2	3	4	5	6	7	8
Činný odpor [Ω]	47,6	47,8	46,86	45,67	34,6	37	33,9	35,2
Průměr vodiče [mm]	0,16							
Měrný odpor mědi [$\mu\Omega \cdot m^2/m$]	0,0178							
Délka vinutí [m]	53,77	53,99	52,93	51,59	39,08	41,79	38,29	39,76

Cívky byly vinuty ručně, a proto jsou v tabulce rozděleny do čtveřic. Menší hodnoty v druhé čtveřici nemají nijak zásadní vliv na funkci tlumiče, znamená to pouze to, že se na kratším vodiči naindukuje menší hodnota napětí a proud procházející tímto vodičem vytvoří slabší sílu na tlumení [1].

6.2 Magnetická indukce v tlumiči

Pomocí známých rozměrů tyče s magnety a oddělovači, průměrů cívek a ocelového pláště můžeme přejít ke zjištění průběhu magnetické indukce ve vzduchové mezeře. K této analýze byl použit volně dostupný program FEMM, který slouží k řešení problému z elektrostatiky a elektromagnetismu za pomoci metody konečných prvků ve 2D. V tomto programu jsme si tedy vykreslili jeho poloviční 2D řez tlumiče a zjistili tak hledaný průběh magnetické indukce. Vše je zobrazeno na obrázku 14.



Obrázek 14 - Průběh magnetické indukce ve vzduchové mezeře blízky reálným hodnotám

Z uvedeného průběhu je vidět, že velikost magnetické indukce je na okrajích pole magnetů poloviční ve srovnání s maximální hodnotou, která mírně převyšuje 0,3 T. Jednoduchý model kmitání z kapitoly 4 je tedy nutné upravit, protože jak vidíme na obrázku 14, tak magnetický obvod nevytváří ve vzduchové mezeře homogenní magnetické pole, ale vlivem pohybu se mění, a proto rovnice (18) nabude tvaru rovnice (26):

$$u_i = l \cdot B(q) \cdot N \cdot \dot{q}, \quad (26)$$

kteřou si dále pro zjednodušení upravíme do tvaru rovnice (27):

$$u_i = B(q) \cdot l_v \cdot \dot{q}, \quad (27)$$

neboť známe parametr l_v , což je celková délka vinutí pro každou naši cívku, známá z tabulky 1 a tudíž nemusíme hodnoty přepočítávat na závity. Dále víme, že indukované napětí vyvolává proud (28) protékající vodičem:

$$I = \frac{u_i}{R_c + R_z} \quad (28)$$

a jeho kombinace s magnetickým polem vytvoří elektromagnetickou sílu, která působí proti pohybu vodiče [1], což vyjadřuje rovnice (29):

$$F_{be} = I \cdot l_v \cdot B(q) \cdot \dot{q} \quad (29)$$

Výsledné elektromagnetické tlumení tak můžeme vyjádřit zkombinováním rovnic (25), (26), (27), (28), (29) a dostaneme tak sílu působící na vodič ve tvaru (30):

$$F = \frac{B(q) \cdot l_v \cdot \dot{q}}{R_c + R_z} \cdot B \cdot l_v = \frac{B(q)^2 \cdot l_v^2 \cdot \dot{q}}{R_c + R_z} \quad (30)$$

a za předpokladu, že platí obecný vztah (31):

$$F = b \cdot \dot{q}, \quad (31)$$

můžeme rovnou dosadit do obecného tvaru rovnice kmitání a dojdeme tak ke stejné rovnici (23) jako v kapitole 4 s mírnou úpravou viz vztah (32).

$$m\ddot{q} + b\dot{q} + \frac{(B(q) \cdot l_v)^2}{R_c + R_z} \dot{q} + kq = F(t) \quad (32)$$

Pro přesnější simulaci chování tak do soustavy zahrneme proměnlivé hodnoty magnetické indukce získané z programu FEMM, které si uložíme a použijeme v programu MATLAB/Simulink.

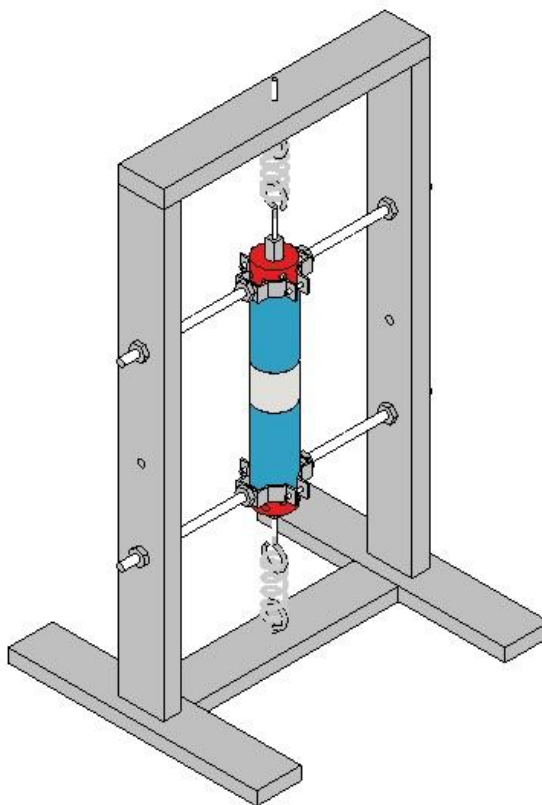
Na konci práce pak provedeme srovnání simulační a reálné odezvy na počáteční vychýlení běžce EM tlumiče.

7 Vlastní konstrukce soustavy

Nyní máme vše vyjasněno a můžeme přejít k reálné konstrukci soustavy. Prvním krokem bude sestavení pohybové části tlumiče. Uchycení magnetů a oddělovačů je realizováno dle návrhu v kapitole 5.2 s tím, že k zajištění celistvosti běžce je použito epoxidové lepidlo. Po další rozvaze se došlo k závěru, že běžec uchytíme k rámu pružinami z obou stran a to pomocí zakoupených oček s M4 závitem, na který se případně může připevnit další hmotnostní zátěž. CAD modelový obrázek 16 tak zobrazuje konečný návrh se dvěma pružinami. Obrázek 15 pak ukazuje fotografii reálně zhotoveného běžce o celkové délce bez závěsných ok 270 mm a celkové hmotnosti se závěsnými oky 173 gramů.



Obrázek 15 - Reálná konstrukce běžce



Obrázek 16 - CAD model soustavy se dvěma pružinami

Dalším krokem je zhotovení rámové konstrukce pro uložení satorové části a zavěšení obou pružin. S přihlédnutím k celkové délce běžce, závěsných ok a délek pružin, se zvolila výška rámu 600 mm. Šířku rámu jsme stanovili na základě dostupných příchytů, délek šroubů a průměru satoru na 180 mm. Na konstrukci rámu byly použity L-profilové tyče ze železa, které se nařezaly a svařily do výsledného stavu, jako to vidíme na obrázku 18.

Zbývá vyřešit problém se zajištěním pohybu v jedné ose s co možná nejmenším třením. K tomuto účelu se ze čtvercové tyče sestrojila dvě vedení dle obrázku 17, do kterých jsme vložili nařezané kousky teflonové tyče. Teflon výrazně snižuje koeficient tření a po vyleštění stykových ploch běžcové části leštící pastou jsme ještě aplikovali několik vrstev teflonového spreje, díky čemuž se dosáhla opravdu nízká hodnota tření. Obě vedení se nasunula na nástavce běžce, který byl vložen do těla statoru, vzájemně se vycentrovala a zafixovala tak, aby se magnety nedotýkaly stěny v díře statoru. Poté se celá statorová část EM tlumiče pro zpevnění zafoukala stahovací gumou. Výsledná soustava prezentující tlumení je vidět na obrázku 19.



**Obrázek 17 - Vedení
pro zajištění kmitání
v jedné ose**



**Obrázek 18 - Zhotovená
rámová konstrukce**



**Obrázek 19 - Reálná soustava
s elektromagnetickým
tlumičem**

8 Hmotnost přidaného závaží a tuhost pružin

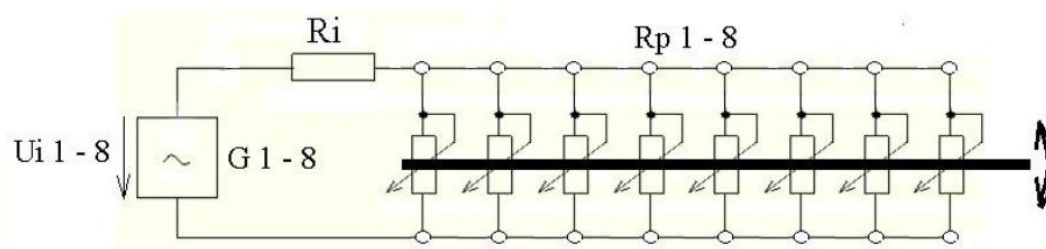
Průběh magnetické indukce ve vzduchové mezeře a parametry cívek již známe. Další důležitou složkou pro nás bude hmotnost přidaného závaží a tuhost obou našich závěsných pružin. Závaží se nechalo vyrobit na míru tak, abychom byli schopni ho připevnit na závěsné oko na běžci. Potom se jednoduše zvažilo a zjistilo, že jeho hmotnost je 820 g. Výsledná hmotnost celé běžcové části tedy bude 0,993 kg.

Na prezentaci kmitání máme k dispozici dvě pružiny o tuhosti 4512 N/m a další dvě o tuhosti 626,75 N/m. Tuhost těchto pružin se zjistila na základě vztahu (2). Pružiny jsou zavěšeny k rámu shora a zdola, z čehož vyplývá, že obě změní délku o stejnou hodnotu (jedna se zkrátí, druhá prodlouží), ale síly, které působí na těleso, mají stejný směr. Celková síla tedy je $F = F_1 + F_2$ a po dosazení obdržíme vztah $kq = k_1q + k_2q$, kde již vidíme, že jejich tuhosti se sečtou. Jedná se o nelineární typ zapojení.

Díky tomu, že známe hmotnost kmitající části a tuhost pružin, můžeme na základě rovnice (7) jednoduše zjistit hodnotu vlastní úhlové frekvence.

9 Ovládání tlumení

Ovládání tlumení je realizováno na základě změny zátěžného odporu na potenciometru, k němuž jsou připojeny konce všech cívek. Potenciometr má osm oddělených odporových drah připojených na jeden hřídel, kterým je možno otáčet a nastavovat tak velikost elektromagnetického tlumení. Maximální možná velikost proměnného odporu je $R = 500 \Omega$. V případě, kdy odpor nastavíme na tuto hodnotu, bude tlumicí efekt EM tlumiče minimální. Naproti tomu při odstranění zátěže ($R = 0 \Omega$) dosáhneme maximálního možného tlumení. Schematické znázornění je vidět na obrázku 20, kde blok G 1-8 jsou cívky, na které je následně připojený osmivrstvý potenciometr.



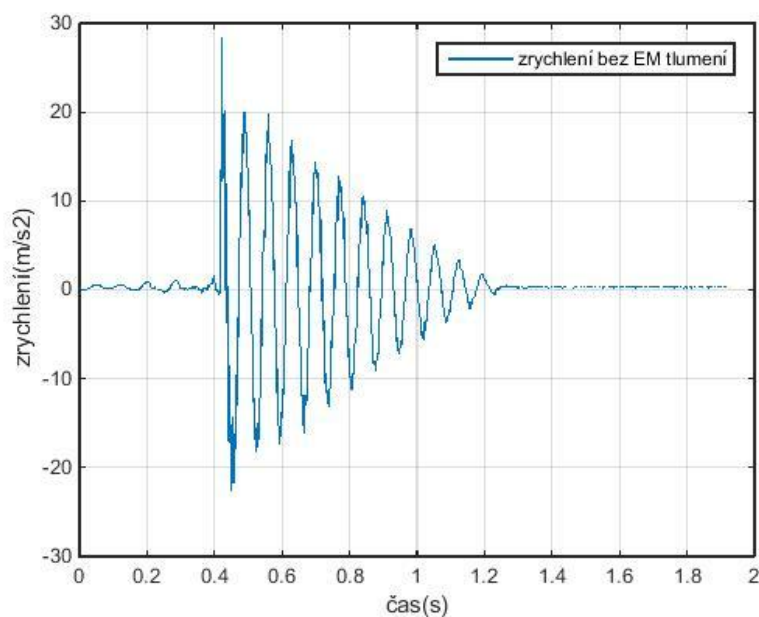
Obrázek 20 - Schéma řízení za pomoci potenciometru [1]

10 Analýza kompletní soustavy na prezentaci kmitání

Po zkompletování celé soustavy s EM tlumičem, zahrnutím některých jeho reálných parametrů do simulace můžeme přejít k ověření jeho chování. K tomuto účelu nám poslouží akcelerometr připojený na přidaném závaží. Budeme pozorovat soustavu a její odezvu na počáteční vychýlení. Po zjištění průběhu zrychlení vychýlené soustavy budeme moci na základě simulace zjistit vliv dalších parametrů na soustavu. První podstatný vliv bude mít magnetická síla působící mezi magnety a ocelovým pláštěm, neboť po vychýlení běžce z rovnovážné polohy se ho bude snažit vrátit zpět do této polohy. Lze si to zjednodušeně představit jako by na soustavu působila jakási magnetická pružina. Dalším krokem bude odhad třecí síly a stanovení velikosti elektromagnetického poměrného útlumu.

10.1 Odezva na počáteční vychýlení bez EM tlumení

Na grafu 21 vidíme reálnou odezvu soustavy o hmotnosti 0,993 kg a tuhosti pružin 4512 N/m bez zapojení elektromagnetického tlumiče, čímž se docílilo toho, že na soustavu působila pouze magnetická a třecí síla.

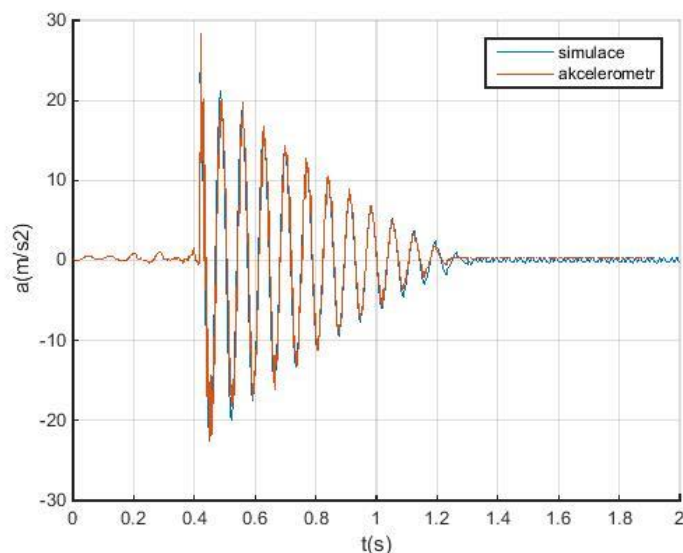


Obrázek 21 - Graf závislosti zrychlení na čase při reálném měření bez EM tlumení

Vlastní úhlová frekvence zde dosahuje přibližně hodnoty $\omega = 88,62$ rad/s. Hodnota vlastní úhlové frekvence na základě výpočtu o známé tuhosti a hmotnosti je však $\omega = 95,32$ rad/s. Příčinou tohoto rozdílu je právě již zmiňovaná magnetická síla a díky grafu 21 jsme schopni odhadnout, jak velký bude její vliv na soustavu. Celková tuhost pružin se rovná $k = 9024$ N/m a abychom dosáhli stejné frekvence jako při reálném měření, je potřeba od této hodnoty k odečíst hodnotu $k_m = 1225$ N/m, což představuje působení hledané magnetické tuhosti. Magnetická síla reálně nemá konstantní průběh, ale pro zjednodušení v simulaci je pro nás tento způsob adekvátní. Dále jsme se zaměřili na určení třecí síly s tím, že velikost poměrného útlumu mechanické části tlumiče byla stanovena na $b_p = 0,01$. Odhad třecí síly se provedl pomocí simulace v programu MATLAB/Simulink při uplatnění pohybové rovnice (33).

$$\ddot{q} = -\frac{b}{m}\dot{q} - \frac{(B(q) \cdot l_v)^2}{(R_c + R_z) \cdot m}\dot{q} - \frac{k}{m}q - \frac{F_t \cdot \text{sign}}{m}\dot{q} \quad (33)$$

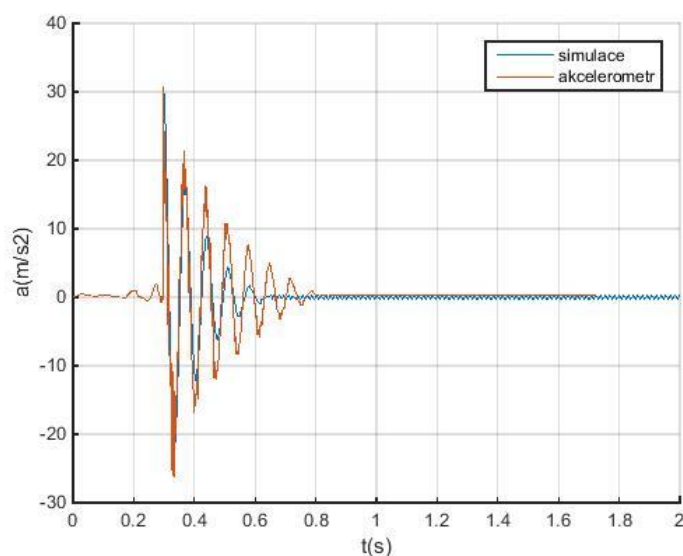
Po několika spuštěných simulacích a jejich srovnáváním s reálným průběhem se nakonec dospělo k hodnotě třecí síly $F_t = 0,302$ N. Srovnání reálné a simulační odezvy pak vidíme na grafu 22.



Obrázek 22 - Srovnání závislostí zrychlení na čase při simulaci a reálném měření

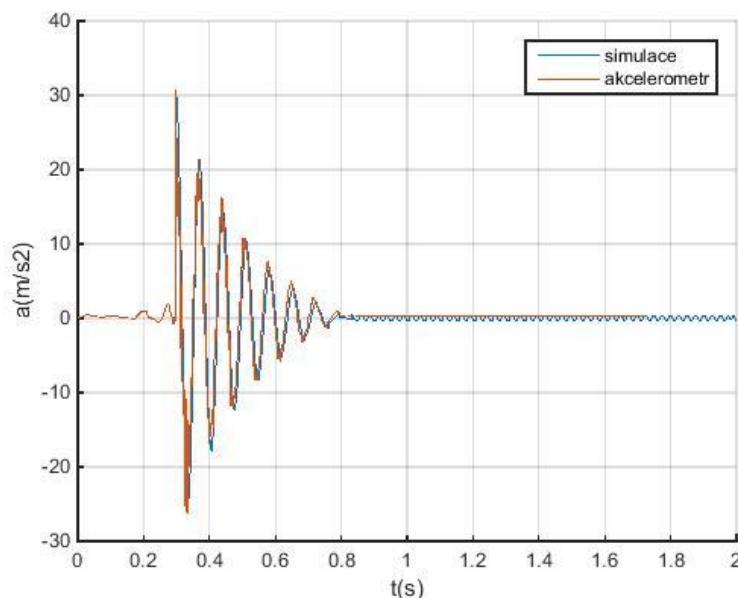
10.2 Odezva na počáteční vychýlení s EM tlumením

Se známou hodnotou magnetické síly, třecí síly a poměrného útlumu můžeme přejít k odezvě na vychýlení z počáteční polohy při zapojeném vlivu elektromagnetického tlumení. Měření se provedlo při nastavené hodnotě zátěžného odporu $R_z = 0 \Omega$ a $R_z = 500 \Omega$, kde se měřilo zrychlení a také indukované napětí na jedné z cívek. Simulační i reálnou odezvu pak znázorňují jednotlivé grafy.



Obrázek 23 - Závislost zrychlení na čase s EM tlumením při $R_z = 0 \Omega$

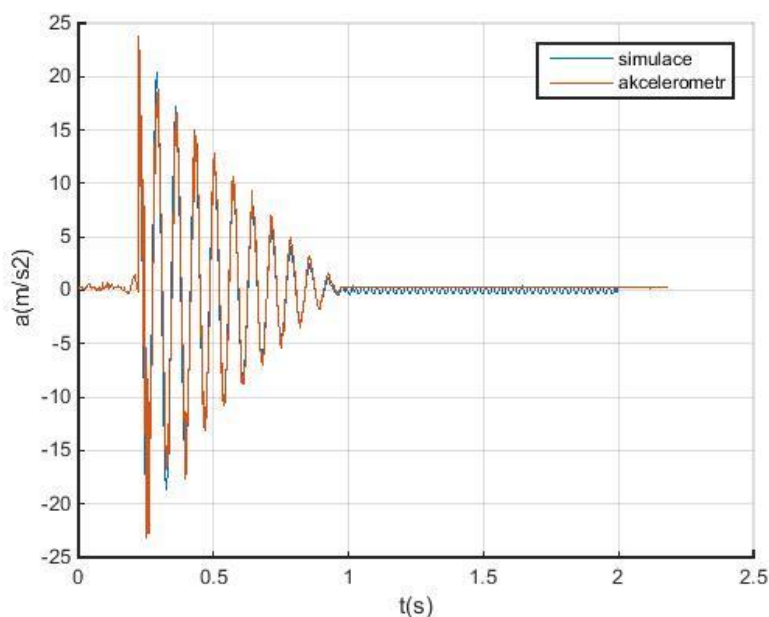
Z grafu 23 je vidět, že hodnota simulačního chování při $R_z = 0 \Omega$ neodpovídá reálné odezvě, proto jsme v simulaci postupně zvyšovali zátěžný odpor, tak aby se průběh co nejvíce podobal skutečnému signálu z měření a došli až k hodnotě $R_z = 50 \Omega$. Při této hodnotě odporu se odezvy na počáteční vychýlení soustavy přibližně shodují, jak je vidět na následujícím grafu 24.



Obrázek 24 - Závislost zrychlení na čase s EM tlumením při $R_z = 50 \Omega$

Nejedná se však o chybu, pouze jsme zjistili, že minimální možný nastavitelný odpor na potenciometru je zhruba $R_z = 50 \Omega$ a zároveň jsme se z grafu 23 dozvěděli, jak by vypadal průběh při $R_z = 0 \Omega$.

Dalším krokem je závislost zrychlení na čase při maximálním odporu $R_z = 500 \Omega$.

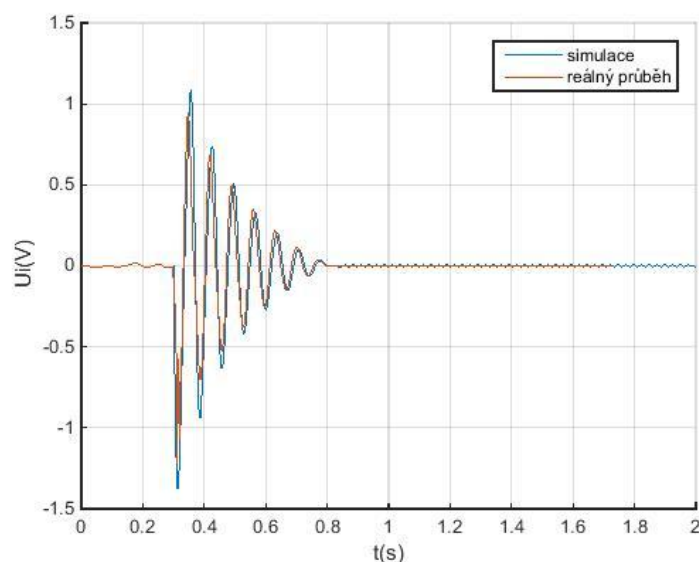


Obrázek 25 - Závislost zrychlení na čase s EM tlumením při $R_z = 500 \Omega$

Simulace na grafu 25 odpovídá skutečnosti a můžeme tedy říci, že námi zvolené parametry relativně odpovídají chování reálné soustavy.

10.3 Odezva indukovaného napětí na počáteční vychýlení

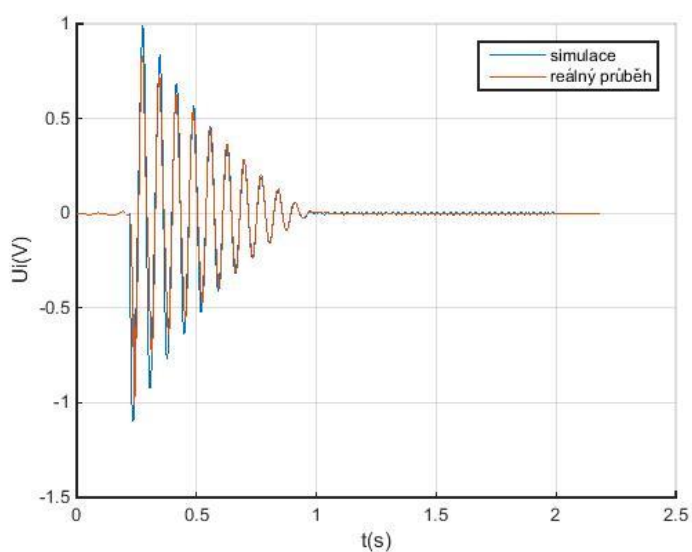
Při měření jsme také pozorovali odezvu indukovaného napětí na jedné z cívek pro nastavené hodnoty $R_z = 0 \, \Omega$ a $R_z = 500 \, \Omega$. Jelikož jsme ale zjistili, že na potenciometru lze nastavit minimální hodnotu pouze na $R_z = 50 \, \Omega$, provedli jsme simulaci s nastavením tohoto odporu. Výsledkem je opět porovnání simulace a naměřeného průběhu.



Obrázek 26 - Závislost indukovaného napětí na čase při $R_z = 50 \, \Omega$

Problémem bylo odhadnutí vzájemné polohy magnetů vůči cívkám, a proto byla v simulaci vybrána ta cívka, jejíž signál nejlépe odpovídal skutečnosti, což znázorňuje graf 26, i když se zde dle simulace naindukovalo nepatrně větší napětí.

Posledním srovnáním byl průběh indukovaného napětí při maximálním odporu zátěže. Na grafu 27 je znovu vidět, že v simulačním modelu jsme dosáhli nepatrně vyšší hodnoty naindukovaného napětí.



Obrázek 27 - Závislost indukovaného napětí na čase při $R_z = 500 \, \Omega$

10.4 Stanovení poměrného útlumu

Na základě známých průběhů v simulaci jsme schopni určit elektromagnetický poměrný útlum tlumiče, který jsme si pro jednotlivé zátěžné odpory vypsali do tabulky 2, včetně hodnoty b_{ep} pro $R_z = 0 \Omega$. První dva sloupce představují odezvy na počáteční vychýlení o 3,8 mm a třetí o 3 mm.

Tabulka 2 - Elektromagnetický poměrný útlum soustavy s $k_{1,2} = 4512 \text{ N/m}$

$R_z [\Omega]$	0	50	500
$b_{ep} [-]$	0,07	0,035	0,006

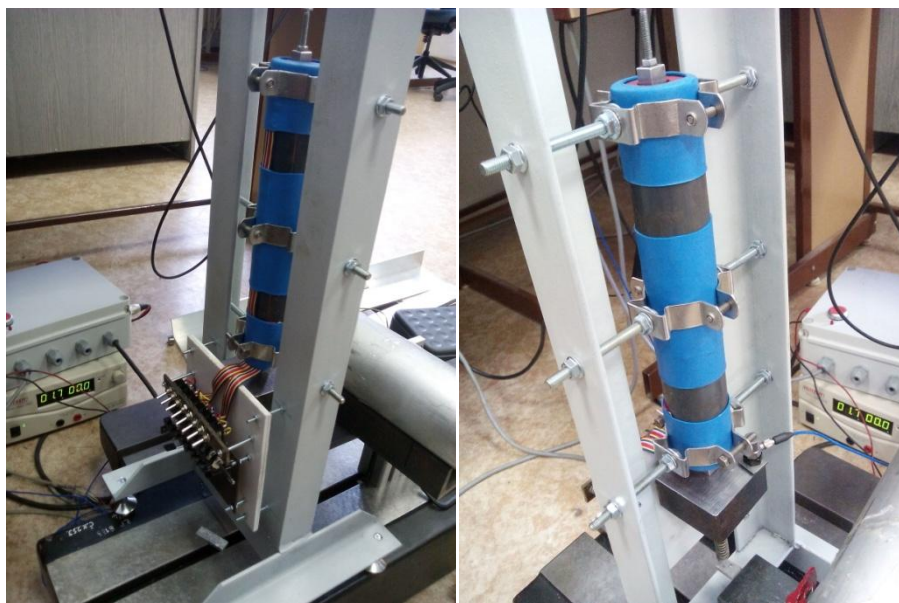
Stejným principem jako v kapitole 10.1 jsme došli k hodnotám elektromagnetického poměrného útlumu i pro pružiny o tuhosti 626,75 N/m se zachováním hmotnosti přidaného závaží. Jednotlivé hodnoty pro různé zátěžné odpory jsme si opět zobrazili v tabulce 3. Po záměně pružin se mírně odlišovala hodnota třecí síly, která mírně vzrostla na $F_t = 0,322 \text{ N}$. Počáteční vychýlení zde odpovídalo 10 mm.

Tabulka 3 - Elektromagnetický poměrný útlum soustavy s $k_{1,2} = 626,75 \text{ N/m}$

$R_z [\Omega]$	0	50	500
$b_{ep} [-]$	0,16	0,09	0,02

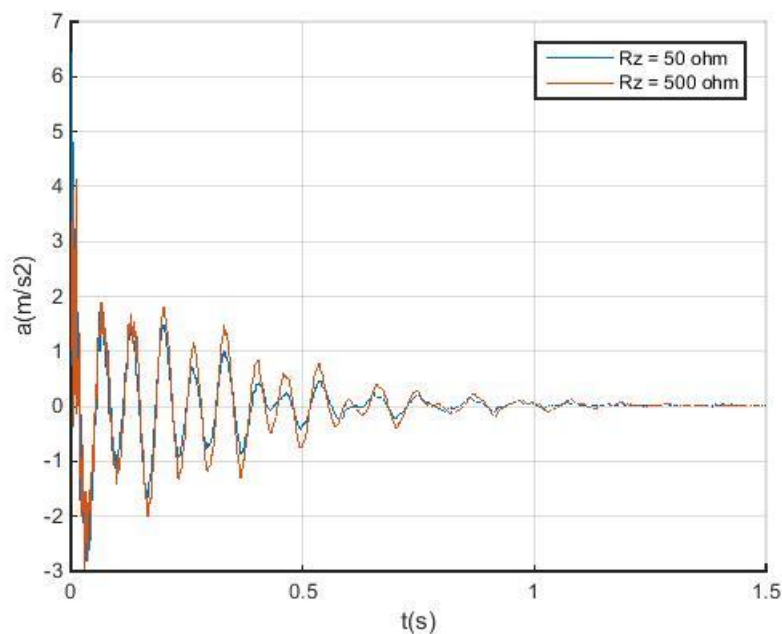
11 Experimentální měření při buzení elektromagnetem

V rámci práce jsme se také podívali na alternativní způsob buzení kmitů a to pomocí elektromagnetu. Soustava s tlumičem se pomocí jedné z pružin o tuhosti $k_I = 4512 \text{ N/m}$ napojila na vetknutý zatížený nosník, jak je vidět na obrázku 28, který vibruje právě vlivem působící síly elektromagnetu.



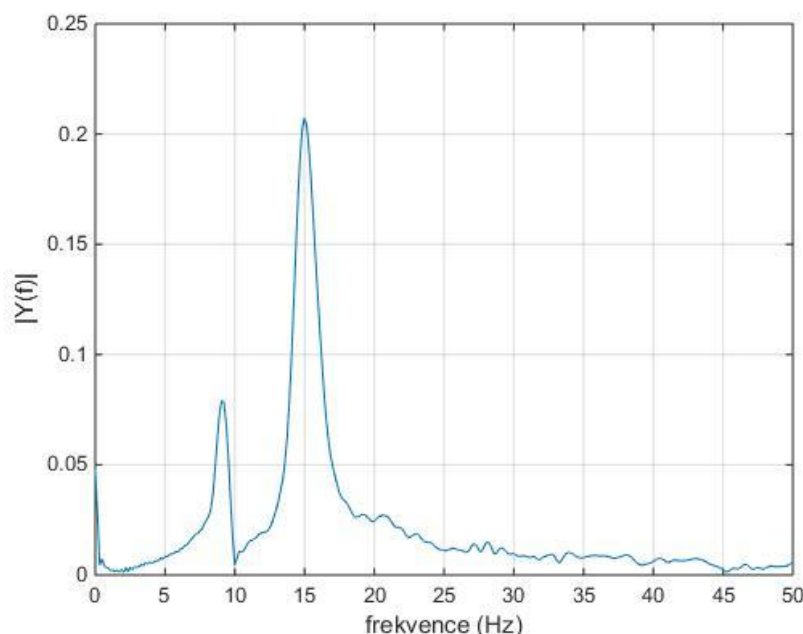
Obrázek 28 - Soustava s EM tlumičem připojená pružinou k nosníku

Nejprve se sledovala odezva běžce spojeného s vetknutým nosníkem bez buzení elektromagnetu. Pouze se vychýlil z počáteční polohy s minimálním a poté i maximálním R_z . Jednotlivé průběhy jsou vykresleny na grafu 29.



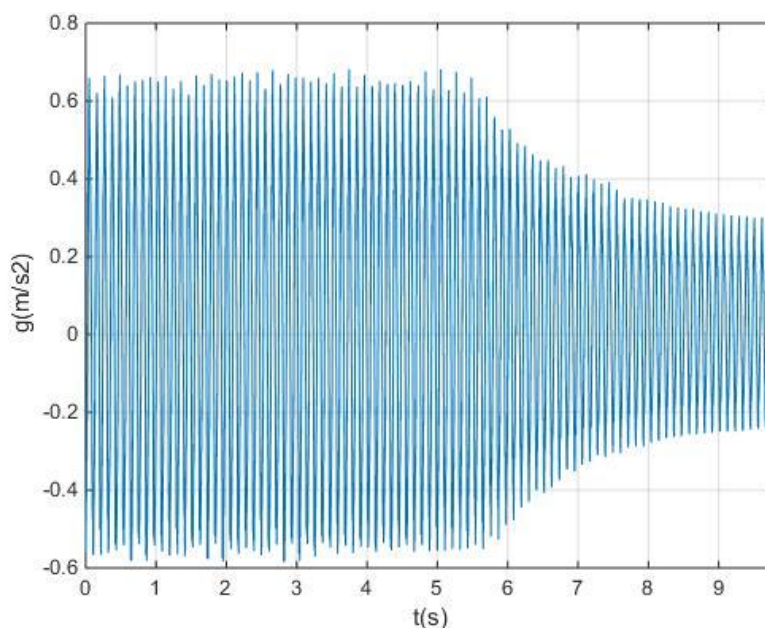
Obrázek 29 - Odezva na počáteční vychýlení soustavy s vetknutým nosníkem

Pomocí FFT jsme si převedli signál z časové do frekvenční oblasti. Ta nám říká, nakolik jsou jednotlivé frekvence zastoupeny v signálu a s jakou amplitudou a frekvencí. Na grafu 30 níže vidíme, že se vyskytují dvě výrazné hodnoty frekvencí a to $f_1 = 9,2 \text{ Hz}$ a $f_2 = 15 \text{ Hz}$. První představuje vetknutý zatížený nosník a druhá běžec se závažím.

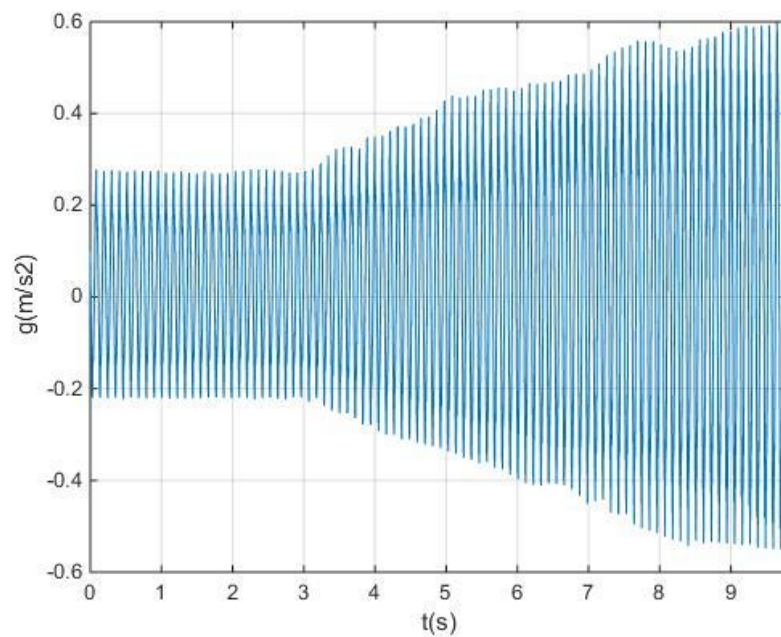


Obrázek 30 - FFT při $R_z = 500 \Omega$

Poté jsme konečně mohli přikročit k buzení pomocí elektromagnetu, kdy jsme nastavovali hodnotu budící frekvence tak, abychom se přiblížili hodnotě vlastní frekvence nosníku a dosáhli tak rezonance, kdy nosník kmital s nejvyšší možnou amplitudou. EM tlumič při změně zátěžného odporu na potenciometru ovlivňuje výsledné kmitání dle následujících grafů 31, 32.



Obrázek 31 - Odezva soustavy při změně odporu potenciometru z $R_z = 500 \Omega$ na $R_z = 50 \Omega$



Obrázek 32 - Odezva soustavy při změně odporu potenciometru z $R_z = 50 \Omega$ na $R_z = 500 \Omega$

12 Závěr

Cílem práce bylo upravit konstrukční řešení soustavy pro prezentaci kmitání, jejíž hlavní částí je elektromagnetický tlumič. Z tohoto důvodu byla v úvodu provedena rešeršní studie základních poznatků o kmitání těles a elektromagnetickém způsobu tlumení. Získali jsme znalosti potřebné k pochopení principu fungování elektromagnetického tlumiče i jeho možnostech pasivního, semiaktivního, či aktivního způsobu řízení.

Po rešeršní části jsme přistoupili k vytvoření matematického modelu celé soustavy a vlastnímu návrhu reálné konstrukce. Z diplomové práce [1] jsme se rozhodli zachovat pouze statorovou část tlumiče, jejíž parametry jsou nám známy, a dále se více zaměřit na návrh konstrukce běžce a celé soustavy. Dospěli jsme k závěru, že bude použita rámová konstrukce se závěsnou pružinou k uchycení pohyblivé části a na základě výpočtů v programu FEMM se zjistila nejvhodnější varianta uspořádání a materiálu běžce, kde je použito osm prstencových neodymových permanentních magnetů o rozměrech $19 \times 4 \times 2,5$ mm, pět ocelových oddělovačů o rozměrech $19 \times 4 \times 5$ mm, hliníková nosná tyč a hliníkové nástavce se závěsnými oky.

Při realizaci rámové konstrukce se dospělo k rozhodnutí uchycení běžce pomocí pružin z obou stran a pro zajištění jeho pohybu v jedné ose byla vyrobena dvě vedení s teflonovým povrchem, která se napevno připevnila ke statoru.

K dispozici jsme měli pružiny po dvou o různých tuhostech a bylo potřeba přidat závaží pro lepší pozorovatelnost kmitání. Konečná hmotnost celé kmitající části je tak rovna 0,993 kg.

Po smontování všech komponent jsme přešli k analýze soustavy pomocí reálných dat získaných z akcelerometru a simulační odezvy na počáteční vychýlení z rovnovážné polohy. Zjistili jsme, že na soustavu má značný vliv magnetická a třecí síla, a díky simulaci jsme odhadnuli jejich velikosti. Z vykreslených průběhů je vidět, že při měření nedošlo k přetlumení soustavy, ale vždy došlo k překmitu kolem rovnovážné polohy.

V poslední části práce bylo provedeno experimentální měření, kdy soustava byla buzena elektromagnetem přes vetknutý nosník a pozorovala se odezva na zjištění tlumící funkce EM tlumiče.

Konečným výsledkem této bakalářské práce je soustava prezentující kmitání s jedním stupněm volnosti, jejíž hodnota vlastní frekvence je přibližně 14,1 Hz pro pružiny s tuhostí 4512 N/m a 5,4 Hz pro pružiny s tuhostí 626,75 N/m při zachování stejné hmotnosti. Maximální elektromagnetický poměrný útlum jakého může reálná soustava dosáhnout je pro jednotlivé varianty s pružinami $b_{ep} = (0,035 \text{ a } 0,09)$. Díky změně předřadného odporu na potenciometru ho lze snížit až k hodnotám $b_{ep} = (0,006 \text{ a } 0,02)$. Kdyby bylo možné nastavit na potenciometru $R_z = 0 \Omega$, dosahovaly by hodnoty útlumu $b_{ep} = (0,07 \text{ a } 0,16)$.

Jako dalším krokem bychom se v práci mohli zaměřit na úpravu ovládání soustavy tak, abychom byli schopni dosáhnout zkratu na tlumiči, čímž bychom dosáhli maximálně možného tlumení. Také by se mohlo uvažovat o konstrukční změně těla statoru tak, aby se vzájemně pohybovaly magnety i ocelový plášť, což by odstranilo vliv magnetické síly.

13 Seznam použitých zdrojů

- [1] SIROTA, Tomáš. *Mechatronická soustava pro prezentaci kmitání a tlumení*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2015.
- [2] Kmitavý pohyb. *Neoficiální internetová fakulta všeho možného* [online]. 2000 [cit. 2015-12-11]. Dostupné z: <http://radek.jandora.sweb.cz/f10.htm#dynam>
- [3] BREPTA, Rudolf, Ladislav PŮST a František TUREK. *Mechanické kmitání*. Vyd. 1. Praha: Sobotáles, 1994, 589 s.
- [4] REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. Dynamika kmitavého pohybu. *Encyklopedie fyziky* [online]. 2006 [cit. 2015-12-11]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/160-dynamika-kmitaveho-pohybu>
- [5] Vynucené kmitání soustav s jedním stupněm volnosti. *Katedra mechaniky* [online]. 2015 [cit. 2016-01-17]. Dostupné z: <http://www.kme.zcu.cz/download/predmety/293-fst8.pdf>
- [6] Základy lineární teorie kmitání s jedním stupněm volnosti. *Mechanika těles - Dynamika* [online]. 2006 [cit. 2016-02-02]. Dostupné z: <http://www.umt.fme.vutbr.cz/~pkrejci/opory/dynamika/>
- [7] LEPIL, Oldřich. *Mechanické kmitání a vlnění: studijní modul* [online]. 1. vyd. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2012, 83 s. [cit. 2016-02-06].
- [8] BOREK, Dušan. *Návrh mechatronické soustavy s elektromagnetickým tlumením pro prezentaci kmitání*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2013.
- [9] NÁVRH ELEKTROMAGNETICKÉHO TLUMIČE S VYUŽITÍM COMSOL MULTIPHYSICS A MATLAB. *Humusoft* [online]. 1991 [cit. 2016-02-20]. Dostupné z: http://www2.humusoft.cz/www/papers/tcb2014/018_Cermak.pdf
- [10] SIROTA, Tomáš. *Návrh koncepce elektromagnetického tlumiče*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2013.
- [11] Encyklopedie fyziky. *Magnetické vlastnosti látek* [online]. 2006 [cit. 2016-02-27]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/295-magneticke-vlastnosti-latek>

14 Seznam použitých symbolů a zkratek

Symbol	Rozměr	Veličina
F_p	[N]	síla pružnosti
F_g	[N]	síla tíhová
l_0	[m]	počáteční délka
Δl	[m]	prodloužení
k	[N/m]	tuhost
m	[kg]	hmotnost
F	[N]	síla
y, \dot{y}, \ddot{y}	[m], [m/s], [m/s ²]	okamžitá výchylka, rychlost, zrychlení
b	[N·s/m]	tlumení
Ω_0	[rad/s]	vlastní úhlová frekvence
δ	[rad/s]	koeficient dozívání
b_p	[-]	poměrný útlum
q, \dot{q}, \ddot{q}	[m], [m/s], [m/s ²]	okamžitá výchylka, rychlost, zrychlení
Q_0	[-]	počáteční amplituda
q_A	[-]	amplituda kmitání
φ	[rad]	fáze kmitavého pohybu
ω	[rad/s]	úhlová frekvence
$m_n e$	[kg·m]	nevývaha
$m_n e \omega^2$	[N]	odstředivá síla
x_{z0}	[-]	počáteční amplituda
x_A	[-]	amplituda kmitání
u_i	[V]	indukované napětí
\vec{v}	[m/s]	vektor rychlosti pohybu vodiče
\vec{B}	[T]	vektor magnetické indukce v prostředí
B	[T]	homogenní magnetická indukce
p_d	[W]	disipativní výkon

p_e	[W]	celkový generovaný výkon
b_e	[N·s/m]	elektromagnetické tlumení
R_c	[Ω]	činný odpor vinutí cívek
R_z	[Ω]	zátěžný, předřadný odpor cívek
l	[m]	délka
σ_{Cu}	[μΩ·m ² /m]	měrný odpor mědi
l_v	[m]	délka vinutí cívek
S_v	[m ²]	průřez vinutí cívek
I	[A]	proud protékající vodičem
F_{be}	[N]	elektromagnetická síla
$B(q)$	[T]	proměnlivá magnetická indukce
F_t	[N]	třecí síla
b_{ep}	[-]	elektromagnetický poměrný útlum

15 Seznam obrázků a tabulek

Obrázek 1 - Kmitání tělesa na pružině [2]	12
Obrázek 2 - Amplitudo-frekvenční charakteristika [6]	14
Obrázek 3 - Pasivní, aktivní, semiaktivní tlumič modelu čtvrtiny vozidla [9]	16
Obrázek 4 - Fotografie testovacího vzorku EM tlumiče [9]	17
Obrázek 5 - Schéma EM pasivního tlumiče [9]	17
Obrázek 6 - Aktivní EM tlumič [9]	18
Obrázek 7 - Model soustavy s elektromagnetickým tlumičem	19
Obrázek 8 - Simulační model soustavy	20
Obrázek 9 - CAD model statoru	21
Obrázek 10 - Zkonstruovaný stator [1]	21
Obrázek 11 - Návrh běžce v řezu	22
Obrázek 12 - NdFeB magnet [10]	22
Obrázek 13 – Model soustavy s elektromagnetickým tlumičem zobrazen v řezu	24
Obrázek 14 - Průběh magnetické indukce ve vzduchové mezeře blízky reálným hodnotám	25
Obrázek 15 - Reálná konstrukce běžce	27
Obrázek 16 - CAD model soustavy se dvěma pružinami	27
Obrázek 17 - Vedení pro zajištění kmitání v jedné ose	28
Obrázek 18 - Zhotovená rámová konstrukce	28
Obrázek 19 - Reálná soustava s elektromagnetickým tlumičem	28
Obrázek 20 - Schéma řízení za pomoci potenciometru [1]	30
Obrázek 21 - Graf závislosti zrychlení na čase při reálném měření bez EM tlumení	31
Obrázek 22 - Srovnání závislostí zrychlení na čase při simulaci a reálném měření	32
Obrázek 23 - Závislost zrychlení na čase s EM tlumením při $R_z = 0 \Omega$	32
Obrázek 24 - Závislost zrychlení na čase s EM tlumením při $R_z = 50 \Omega$	33
Obrázek 25 - Závislost zrychlení na čase s EM tlumením při $R_z = 500 \Omega$	33
Obrázek 26 - Závislost indukovaného napětí na čase při $R_z = 50 \Omega$	34
Obrázek 27 - Závislost indukovaného napětí na čase při $R_z = 500 \Omega$	34
Obrázek 28 - Soustava s EM tlumičem připojená pružinou k nosníku	36
Obrázek 29 - Odezva na počáteční vychýlení soustavy s vetknutým nosníkem	36
Obrázek 30 - FFT při $R_z = 500 \Omega$	37
Obrázek 31 - Odezva soustavy při změně odporu potenciometru z $R_z = 500 \Omega$ na $R_z = 50 \Omega$	37

Obrázek 32 - Odezva soustavy při změně odporu potenciometru z $R_z = 50 \, \Omega$ na $R_z = 500 \, \Omega$	38
---	----

Tabulka 1 – Hodnoty reálných parametrů cívek.....	25
---	----

Tabulka 2 - Elektromagnetický poměrný útlum soustavy s $k_{1,2} = 4512 \, \text{N/m}$	35
---	----

Tabulka 3 - Elektromagnetický poměrný útlum soustavy s $k_{1,2} = 626,75 \, \text{N/m}$	35
---	----

16 Seznam příloh

CD disk

Rostislav_Hanuška_BP2016.pdf

Bakalářská práce v elektronické podobě

CAD_model

Složka obsahující CAD model soustavy s EM tlumičem

Simulace

Složka obsahující simulační model chování soustavy v programu MATLAB/Simulink

Video

Složka obsahující video při elektromagnetickém buzení soustavy