



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 KONCEPCE ELEKTOMAGNETICKÉHO TLMIČA

PROPOSAL AND DESIGN OF ELECTROMAGNETIC SHOCK ABSORBER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

TOMÁŠ SIROTA

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

ING. ZDENĚNEK HADAŠ Ph. D.

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav mechaniky teles, mechatroniky a biomechaniky

Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ BAKALÁRSKÉ PRÁCE

student(ka): Tomáš Sirota

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

obor: **Mechatronika (3906R001)**

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

Návrh koncepce elektromagnetického tlumiče

v anglickém jazyce:

Proposal and Design of Electromagnetic Shock Absorber

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Náplní práce je zhodnotit dostupné konstrukce aktivních a semi-aktivních tlumičů pro dopravní prostředky. Cílem práce je navrhnout koncepci a parametry celého elektromagnetického tlumiče jako mechatronické soustavy a vytvořit simulační model této mechatronické soustavy.

Cíle bakalářské práce:

1. Rešerše dostupných konstrukčních řešení tlumičů a jejich zhodnocení.
2. Volba koncepce a návrh parametru modelu zvolené konstrukce elektromagnetického tlumice.
3. Návrh elektroniky k ovládání tlumících vlastností zařízení.
4. Simulační model celé mechatronické soustavy.

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. Zdenek 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. Jindrich Petruška, CSc.
Ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Táto práca sa zaoberá problematikou elektromagnetických tlmičov a ich návrhu. Porovnáva niekoľko rôznych technických riešení. Je spracovaná základná štruktúra tlmiča a prvotný návrh jednotlivých parametrov vychádzajúci z nutnosti použiteľnosti pri reálnej jazde v teréne a simulácia modelu tejto mechatronickej sústavy v programe MATLAB/Simulink a následná úprava a ladenie jednotlivých parametrov konkrétne zvoleného technického riešenia. Ďalej sa práca zaoberá možnosťami riadenia elektromagnetického tlmiča manuálnym nastavením, alebo s použitím regulátora.

ABSTRACT

This paper deals with the problem of electromagnetic dampers and their design. Compares several different technical solutions. It prepared the basic structure of the shock and the initial draft of the parameters based on the need for usability in real off-road model and simulation of mechatronic systems in the program MATLAB / Simulink and subsequent modification and tuning of parameters specific technical solution chosen. Furthermore, the work deals with management options electromagnetic damper settings manually, or using a controller.

KĽÚČOVÉ SLOVÁ

tlmenie, lineárny motor, elektromagnetický tlmič, elektromagnetická indukcia,

KEYWORDS

damping, linear motor, electromagnetic shock absorber, electromagnetic induction

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

SIROTA, T. Návrh koncepcie elektromagnetického tlmiča. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 37 s. Vedúci bakalárske práce Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D.

PREHLÁSENIE O AUTORSTVE

Prehlasujem, že som túto bakalársku prácu vypracoval samostatne, s pomocou
vedúceho práce a s použitím literatúry a ďalších uvedených zdrojov

v Brně dňa

.....podpis

POĎAKOVANIE

Týmto by som chcel poďakovať vedúcemu svojej bakalárskej práce Ing. Zdeňku Hadašovi, Ph. D. za jeho ochotu, čas a potrebné rady a informácie, ktoré mi poskytol v priebehu písania tejto práce.

OBSAH

1	ÚVOD.....	9
2	FORMULÁCIA PROBLÉMU A CIELE RIEŠENIA	10
3	REŠERŠ DOSTUPNÝCH TECHNICKÝCH RIEŠENÍ	11
3.1	TLMIČ VÍRIVÝCH PRÚDOV	11
3.2	LINEÁRNY TLMIČ SO ŠRÓBOVITÝM PREVODOM	11
3.3	LINEÁRNY TLMIČ S PERMANENTNÝMI MAGNETMI S KVÁZI-HALBACHOVOU MAGNETIZÁCIOU	12
3.4	LINEÁRNY TLMIČ S PERMANENTNÝMI MAGNETMI	15
4	NÁVRH KONŠTRUKCIE TLMIČA	16
4.1	ZÁKLADNÝ PRINCÍP TLMIČA	16
4.2	NÁVRH KONŠTRUKCIE KOTVY A JADRA STATORA.....	17
4.3	KONŠTRUKCIA CIEVKY A JEJ ELEKTRICKÝ OBVOD.....	20
4.4	VÝPOČET ELEKTROMAGNETICKÉHO TLMENIA	21
5	MODEL SÚSTAVY A SIMULÁCIA	23
5.1	VYTVORENIE MODELU SÚSTAVY	23
5.2	NÁVRH JEDNOTLIVÝCH PARAMETROV A SIMULÁCIA	24
5.3	SIMULÁCIA SÚSTAVY S RÔZNYMI DRUHMI BUDENIA.....	26
5.4	SIMULÁCIA S UVAŽOVANÍM VPLYVU FEROMAGNETICKÉHO JADRA CIEVKY	28
5.5	SIMULÁCIA PO ZMENE PARAMETROV SÚSTAVY	29
6	NÁVRH OVLÁDANIA VEĽKOSTI TLMIACEJ SILY	32
6.1	KONKRÉTNE TECHNICKÉ RIEŠENIA	32
6.2	RIADENIE V AKTÍVNOM REŽIME.....	34
7	ZÁVER.....	35
8	ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV	36
9	ZOZNAM OBRÁZKOV	37

1 ÚVOD

V dnešnej dobe idú technológie dopredu míľovými krokmi a takmer každý deň sa objaví niečo nové, čo pritiahne pozornosť ľudí a neskôr sa aj osvedčí v reálnom živote. Hlavným dôvodom týchto pokrokov je zvyšovanie nárokov na efektívnosť všetkých strojov, ktoré na vykonávanie svojej činnosti spotrebúvajú nejakú energiu.

Ďalším a nie menej dôležitým znakom dnešnej spoločnosti je komfort. Hlavne komfort pri jazde na nejakom dopravnom prostriedku. Väčšina týchto vozidiel stále používa ako prvok tlmenia nárazov klasické kvapalinové tlmiče, ktoré sú v niektorých prípadoch vybavené špeciálnou magnetoreologickou tekutinou a ich vlastnosti je možné meniť pomocou elektromagnetického poľa. Všetky tieto systémy na svoju činnosť ale potrebujú energiu, ktorú im musíme dodať.

Jedným z možných riešení je použitie elektromagnetického tlmiča ako tlmiaceho prvku namiesto klasických kvapalinových, alebo magnetoreologických tlmičov. Použitie takéhoto typu tlmiča má obrovskú výhodu v tom, že do systému nie je potrebné dodávať žiadnu energiu, ale stačí len vhodne riadiť spotrebu elektrickej energie, ktorá je v takomto type tlmiča vygenerovaná.

Veľkým prínosom pri použití takéhoto tlmiča je to, že riadenie spotreby vygenerovanej energie je veľmi jednoduché a je možné ho využiť veľmi jednoducho na riadenie vlastností tlmenia pri prejazde cez nerovnosti.

2 FORMULÁCIA PROBLÉMU A CIELE RIEŠENIA

Táto práca sa zaoberá problémom tlmenia a možnosti jeho riadenia pri použití elektromagnetického tlmiča. Je zameraná na návrh konštrukcie elektromagnetického tlmiča, ktorý by svojimi rozmermi a vlastnosťami zodpovedal podmienkam pre využitie na horských bicykloch.

Na začiatku tejto práce bude prevedená rešerš rôznych dostupných konštrukčných riešení elektromagnetických tlmičov, zhodnotenie ich vlastností a možnosti využitia daného typu tlmiča na horskom bicykli a následné vzájomné porovnanie všetkých vybraných tlmičov a výber toho najvhodnejšieho technického riešenia.

Vybraná konštrukcia tlmiča sa mierne upraví, aby spĺňovala podmienky, ktoré sú určené nami tak, aby výsledné navrhnuté konštrukčné riešenie bolo vhodné pre použitie na horskom bicykli.

Následne sa pristúpi k vytvoreniu modelu celého mechatronického systému v systéme MATLAB/Simulink a následnému preskúmaniu dynamických vlastností tlmiča a doladeniu, alebo zmene potrebných parametrov, tak aby bola tlmiaca sila, ktorú dokáže tlmič vyvinúť, čo najvyššia a zároveň aby tlmič spĺňal naše požiadavky na efektivitu, účinnosť a dostatočne malé rozmery.

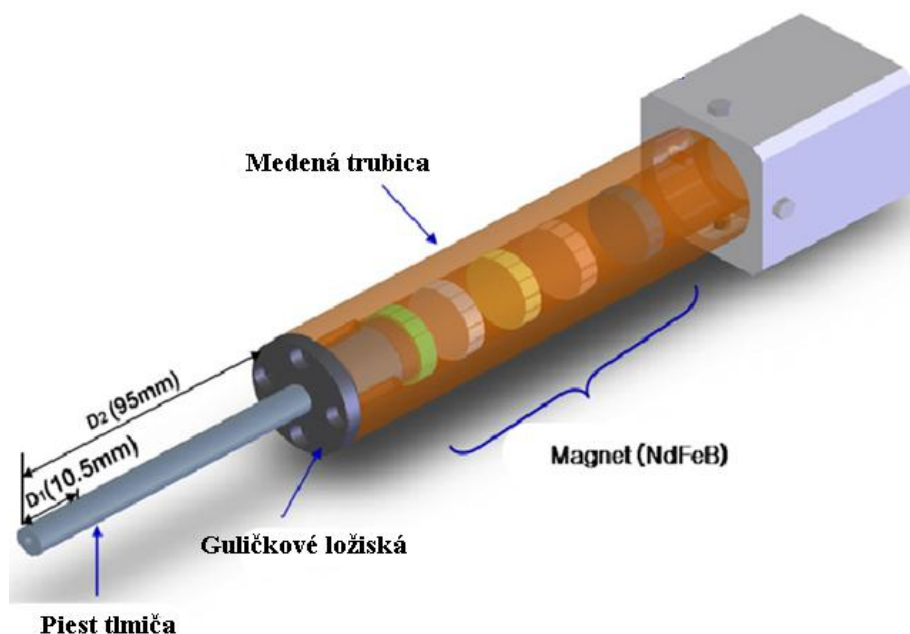
Po doladení simulačného modelu sa ešte navrhne niekoľko možných zapojení pomocou ktorých by bolo možné riadiť spotrebu vygenerovanej elektrickej energie v tlmiči a tým aj ovládať jeho tlmiace vlastnosti.

3 REŠERŠ DOSTUPNÝCH TECHNICKÝCH RIEŠENÍ

Z dôvodu zoznámenia sa s problematikou lineárnych motorov a možností ich využitia ako tlmičov v dopravných prostriedkoch sú v tejto kapitole preštudované nasledovné typy lineárnych motorov.

3.1 TLMIČ VÍRIVÝCH PRÚDOV

Kwag vo svojej publikácii[1] navrhol a vyvinul koncept tlmiča vírivých prúdov s permanentnými magnetmi tak ako to môžeme vidieť na *obrázku 3.1*. Elektromagnetický tlmič vyvinutý v CSA Engineering Inc. je podobný konceptu Kwaga, ale ich model nevyžaduje žiadne použitie akýchkoľvek vinutých pružín, ale využíva iba odpudivú silu medzi magnetmi. V tomto modeli sa permanentné magnety pohybujú v medenej trubici podľa *obrázku 3.1* a vírivé prúdy sa indukujú do nej. Tento model efektívne využíva radiálny magnetický tok, ktorý je takmer kolmý k povrchu trubice. Práve preto sa tento koncept tlmiča môže použiť bez akýchkoľvek pružín.



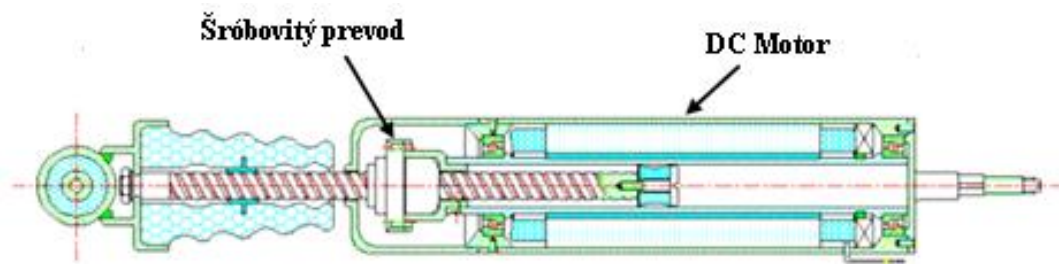
Obrázok 3.1 Tlmič vírivých prúdov (prevzaté z [1])

Z *obrázku 3.1* je vidieť, že takýto typ elektromagnetického tlmiča je možné používať iba ako pasívny tlmič a nijak nie je možné riadiť jeho vlastnosti behom prevádzky.

3.2 LINEÁRNY TLMIČ SO ŠRÓBOVITÝM PREVODOM

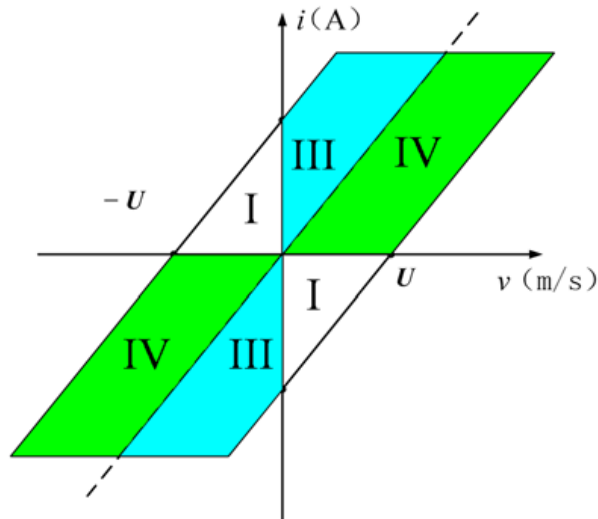
V článku [2] je uvedené, že tento lineárny motor je zložený z bezkartáčového jednosmerného motora s permanentnými magnetmi a šróbovitého gulíkového prevodu ako je znázornené na *obrázku 3.2*. V tomto type tlmiča je lineárny pohyb vyvolaný prejazdom cez nerovnosti prevedený na rotačný pohyb jednosmerného motora, v ktorom sa vďaka jeho rotoru s permanentnými magnetmi vytvorí indukované napätie na cievkach statora, ktoré je priamoúmerné uhlovej rýchlosti rotora motora a tým sa vyvolá prúd pretekajúci týmito cievkami a pripojenou záťažou, alebo spotrebičom. Veľkosť použitej záťaže môžeme meniť a tým ovládať prúd pretekajúci motorom. Vytvorený prúd ale v motore vyvolá opačné elektromagnetické pole a tým opačný

moment, ktorý bude brzdiť motor a tento moment sa pomocou vodiaceho mechanizmu zase premení na vertikálnu silu, ktorá utlmí vyvolaný náraz.



Obrázok 3.2 Tlmič s prevodom lineárneho pohybu na rotačný (prevzaté z [2])

Tento typ elektromagnetického tlmiča vďaka dobrému ovládaniu elektrických veličín v obvode môže pracovať v dvoch módoch. A to v poloaktívnom, kedy len riadime spotrebu vytvorenej energie, alebo v plne aktívnom, kedy nielen, že riadime veľkosť prúdu pri pohlcovaní nárazu, ale pri spätnom chode tlmiča dodávame elektrickú energiu do motora a tým dosahujeme lepšie vlastnosti pri prejazde nerovnosťami. Stavy toku energie pri takomto používaní tlmiča zodpovedajú rôznym zónam, ktoré sú prehľadne znázornené v obrázku 3.3 V zóne I motor tlmiča pracuje ako normálny elektromotor, prúd tečie z batérie do kladného pólu motora a energia je spotrebovaná. V zóne III motor funguje ako generátor, ale generovaná energia nie je dostatočná na potrebnú tlmiacu silu a tak je potrebné priviesť na záporný pól motora prúd z batérie. Iba v zóne IV je v motore vyvolané napätie takej polarít, ktoré dobíja batériu a motor pracuje ako generátor elektrickej energie.

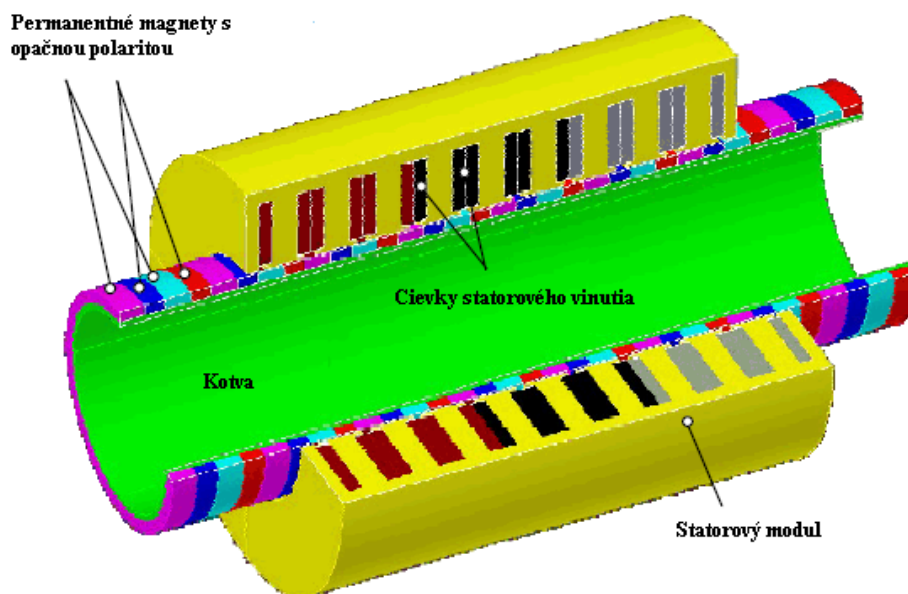


Obrázok 3.3 Pracovné kvadranty tlmiča (prevzaté z [2])

3.3 LINEÁRNY TLMIČ S PERMANENTNÝMI MAGNETMI S KVÁZI-HALBACHOVOU MAGNETIZÁCIOU

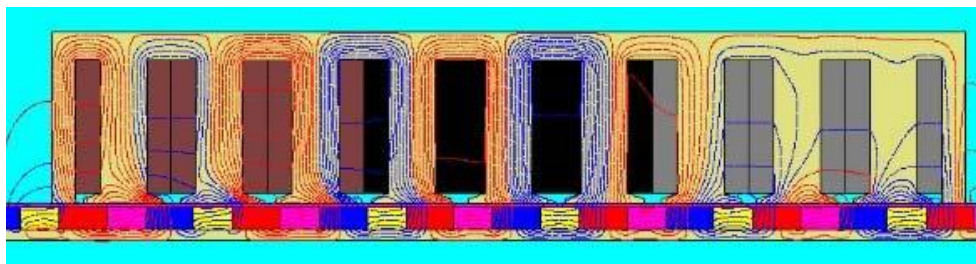
V článku [3] je popísaná konštrukcia lineárneho tlmiča s permanentnými magnetmi s kvázi-Halbachovou konštrukciou. Tento elektromagnetický tlmič je založený na princípe pohybujúcich sa permanentných magnetov v zostavení s kvázi-Halbachovou magnetizáciou. Takéto zostavenie permanentných magnetov s modulárnou konfiguráciou vinutia je obzvlášť atraktívne, vďaka svojej možnosti

dosiahnuť veľké tlmiace sily a možnosti jednoduchšej výroby. V jadre statoru sú umiestnené vinutia fázových cievok. Každá fáza tlmiča je zostavená s rovnakého počtu cievok, ktoré na seba priliehajú. To má za následok vysoký činiteľ vinutia a malý počet drážok statoru na počet pólov. Tým pádom môže byť sila na statorovú drážku veľmi malá a bez vychýlenia s priameho smeru. *Obrázok 3.4* ukazuje 9-drážkový, 10-pólový elektromagnetický tlmič s kvázi-Halbachovou magnetizáciou a modulárnou konfiguráciou vinutia. Každý pól kotvy sa skladá z jedného radiálne a jedného axiálne magnetizovaného prstencového permanentného magnetu.



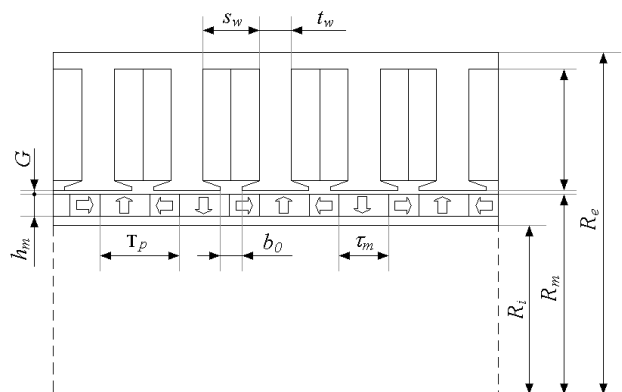
Obrázok 3.4 Konštrukcia tlmiča s kvázi-Halbachovou magnetizáciou (prevzaté z [3])

Charakteristickým znakom tlmiča s kvázi-Halbachovou magnetizáciou je, že axiálne magnetizované kruhové magnety poskytujú uzavretú cestu pre radiálny magnetický tok na kotve, ktorý je vďaka tomu vo vnútornej časti kotvy pomerne malý, tak ako to môžeme vidieť na *obrázku 3.5*. Vďaka tomu môžeme na materiál kotvy použiť veľmi tenkú feromagnetickú trubku, alebo dokonca aj trubku z nemagnetického materiálu, na ktorú budú pripevnené magnety a takto nijak neovplyvniť tlmiacu silu. Rovnako to vedie k zníženiu neodpruženej váhy a tým pádom k lepším dynamickým vlastnostiam celého elektromagnetického tlmiča. Použitie radiálne magnetizovaných magnetov však prináša jeden obrovský ekonomický problém, lebo tieto magnety vyžadujú na svoju výrobu špeciálne magnetizačné zariadenie a tým pádom je ich výroba veľmi nákladná a sú veľmi drahé.



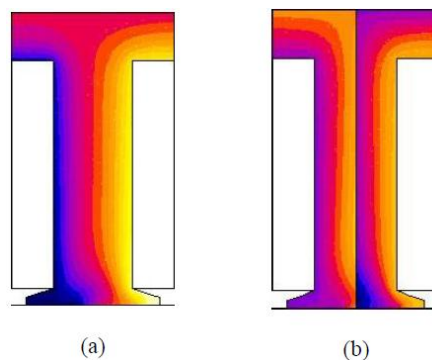
Obrázok 3.5 Uzatvorenie magnetického toku v statore tlmiča (prevzaté z [3])

Konštrukcia tlmiča s pohybujúcou sa kotvou s kvázi-Halbachovou magnetizáciou môže byť optimalizovaná len s rešpektovaním troch hlavných rozmerových pomerov, ako je ukázané na *obrázku 3.6*. Tieto tri hlavné pomery sú pomer vonkajšieho rádiusu kotvy R_m k vonkajšiemu rádiusu statora R_e , pomer axiálnej dĺžky radiálne zmagnetizovaného magnetu τ_m k pólovému rozstupu T_p a pomer pólového rozstupu k vonkajšiemu rádiusu statora R_e .



Obrázok 3.6 Základné rozmery statora tlmiča (prevzaté z [3])

Pre jadro statora je vhodné kvôli redukcii výrobných nákladov použiť pevné teleso z kremíkovej ocele namiesto vrstvenia plechov z kremíkovej ocele avšak ako bude uvedené ďalej, tak takáto konštrukcia zvyšuje straty vírivými prúdmi. *Obrázok 3.7* porovnáva rozloženie vírivých prúdov s statore. V časti (a) má statorové jadro tvar T, pričom celý stator je vyrobený z jedného kusa. V tejto konfigurácii však vírivé prúdy majú fázový posun 180° a prúd tečúci z jednej strany na druhú kvôli tomuto fázovému posunu spôsobuje relatívne veľké straty. Časť (b) má stator tvorený z polovičných T článkov a preto sa vírivé prúdy rozdelia na polovicu a znižujú tak straty.



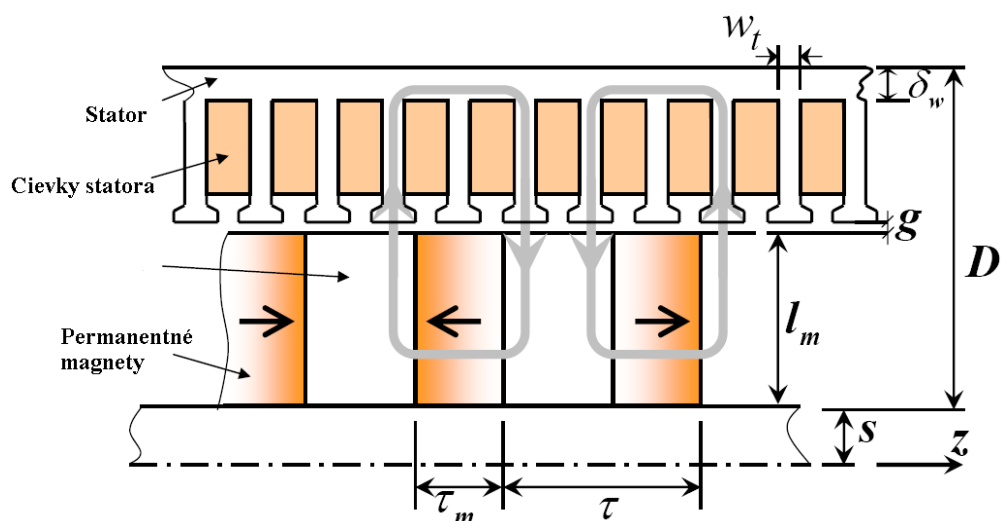
Obrázok 3.7 Rozloženie vírivých prúdov v statore tvaru T a plovicného T (prevzaté z [3])

Elektromagnetický tlmič s takouto konštrukciou a s použitím permanentných magnetov a cievok statora môže fungovať v troch módoch: ako pasívny, kedy je v obvode cievky na pevno zaradený odpor a tlmiaca sila je závislá len na rýchlosti kotvy a naindukovaného napätia, ako poloaktívny, kedy odpor v obvode cievky je možné vhodným spôsobom meniť a tak riadiť veľkosť prúdu cievkou, ktorý ovláda veľkosť tlmiacej sily a v plne aktívnom režime, kedy vo vhodných intervaloch cyklu tlmenia dodávame energiu do tlmiča a tak zvyšujeme tlmiacu silu na hodnoty, ktoré sa u pasívneho a poloaktívneho používania tlmiča nedajú dosiahnuť.

Špeciálnym módom v ktorom sa takýto tlmič dá prevádzkovať je generátorický režim, ktorý je možné dosiahnuť pri pasívnom a poloaktívnom prevádzkovaní tlmiča, kedy na riadiaci odpor v obvode cievky môžeme pripojiť ďalšiu usmerňovaciu elektroniku a využiť toto usmernené a stabilizované napätie na ďalšie účely, alebo aj ako akýsi nie plne aktívny mód kedy vyrobenú energiu v nejakej forme uložíme a v potrebných okamihoch použijeme k zlepšeniu dynamických vlastností tlmiča.

3.4 LINEÁRNY TLMÍČ S PERMANENTNÝMI MAGNETMI

Ako je uvedené v článku [4] tento elektromagnetický tlmič dokáže pracovať v troch pracovných režimoch: pasívnom, poloaktívnom a aktívnom. Dokáže premieňať mechanickú energiu nárazov pri tlmení na užitočnú elektrickú energiu. Rovnako je veľmi efektívny na výrobu, keďže je zložený z niekoľkých permanentných magnetov v kombinácii s elektromagnetmi. Veľkou výhodou tohto tlmiča je, že účinky Hallovo javu je možné jednoducho využiť na snímanie polohy, čo eliminuje potrebu ďalších snímačov pri používaní tlmiča v aktívnom, alebo poloaktívnom režime. Ako môžeme vidieť na *obrázku 3.8* hlavným rysom tohto tlmiča je, že používa rúrovitý tvar, pri ktorom je využívanie magnetického toku oveľa efektívnejšie a vedie to k dosiahnutiu vyššej tlmiacej sily. Axiálne zmagnetizované permanentné magnety v kotve vyvíjajú vyššiu tlmiacu silu ako sú schopné vyvinúť radiálne zmagnetizované magnety. Namiesto konvenčných diskových magnetov sú použité a na neferomagnetickú tyč tlmiča uchytené prstencové permanentné magnety oddelené feromagnetickými prstencami, ktoré dokážu efektívne znižovať vzduchovú medzeru.



Obrázok 3.8 Konštrukcia tlmiča s permanentnými magnetmi (prevzaté z [4])

V pasívnom režime je maximálna tlmiaca sila závislá iba na rýchlosti relatívneho pohybu kotvy oproti statoru a cievky statora sú buď skratované, alebo pre zmenšenie a doladenie tlmiacej sily môže byť do ich obvodu pridaný odpor. V poloaktívnom režime sa tento odpor mení v závislosti na požadovanej veľkosti tlmiacej sily v daný okamih ďalšou riadiacou elektronikou. V aktívnom režime sa do cievok statora púšťa prúd a týmto spôsobom je možné dosiahnuť vyššiu tlmiacu silu ako v pasívnom, alebo poloaktívnom režime. Použitie tohto tlmiča ako generátoru elektrickej energie je možné v každom s týchto režimov, ale s rôznymi výkonmi, ktoré závisia na jednotlivých režimoch.

4 NÁVRH KONŠTRUKCIE TLMIČA

4.1 ZÁKLADNÝ PRINCÍP TLMIČA

Fungovanie celého elektromagnetického tlmiča je založené na princípe elektromagnetickej indukcie, pri ktorej sa do cievky statora pri časovej zmene magnetického toku indukuje elektromotorické napätie. Toto indukované elektromotorické napätie U_i na cievke je závislé na veľkosti elektromagnetickej indukcie B , dĺžke vinutia cievky l a na rýchlosti v , ktorou sa pohybuje kotva voči statoru a je vyjadrené vzťahom:

$$U_i = B \cdot l \cdot v \left[V; T, m, \frac{m}{s} \right] \quad (4.1)$$

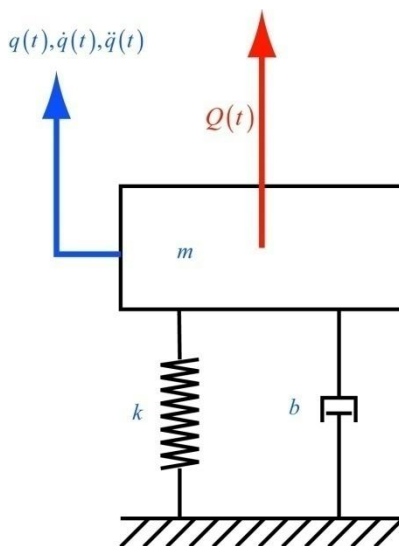
Toto indukované napätie vyvolá v cievke elektrický prúd I , ktorý je závislý na celkovom odpore obvodu cievky aj s riadiacim odporom R a podľa Ohmovho zákona je úmerný veľkosti indukovaného napätia podľa vzťahu:

$$I = \frac{U_i}{R} ; [A; V, \Omega] \quad (4.2)$$

Tento prúd pretekajúci cievkou vyvolá magnetické pole, ktoré má opačnú polaritu než pole, ktoré vytvorilo indukované napätie a tak na vodič cievky pôsobí takzvaná Lorentzova sila F , ktorá je určená vzťahom:

$$F = I \cdot l \cdot B ; [N; A, m, T] \quad (4.3)$$

Táto sila pôsobí proti smeru pohybu ako tlmiaca sila a tlmí tak silu nárazu. Vďaka tomu môžeme takéto správanie elektromagnetického tlmiča prirovnať k správaniu klasického kvapalinového tlmiča a tým pádom môžeme na popis správania tlmiča použiť jednoduché dynamické rovnice, ktoré popisujú kmitanie sústavy telies s jedným stupňom voľnosti tak ako to je zobrazené na obrázku 4.1.



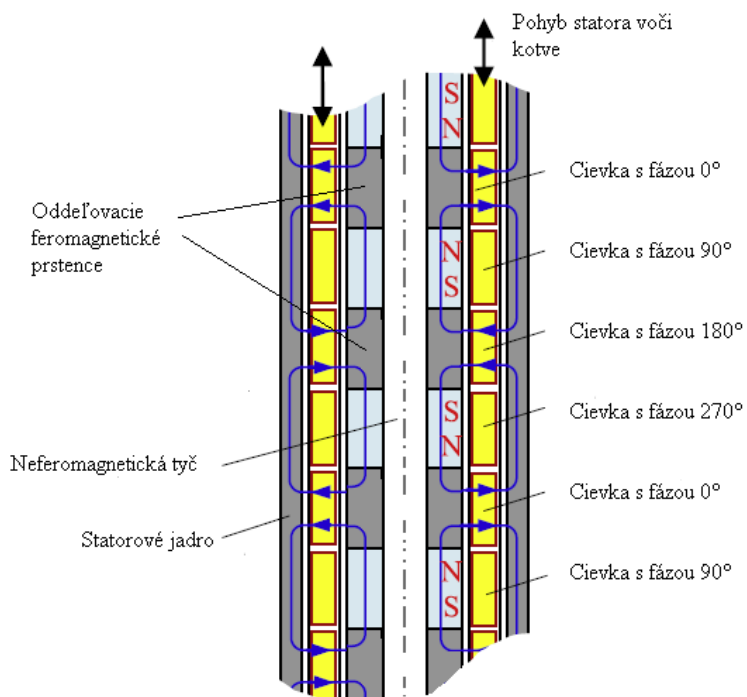
Obrázok 4.1 Kmitanie s jedným stupňom voľnosti (prevzaté z [5])

$$m \cdot \ddot{q} + b \cdot \dot{q} + k \cdot q = Q \quad (4.4)$$

4.2 NÁVRH KONŠTRUKCIE KOTVY A JADRA STATORA

Na konštrukciu kotvy a jadra statora je podľa spracovanej rešerše najvýhodnejšie použiť variantu číslo 4 [4], kde je kotva zložená iba z prstencových axiálne magnetizovaných magnetov, ktoré sú oddelené feromagnetickými prstencami a celé to je pripevnené na tyči z neferomagnetického materiálu pretože takáto konštrukcia je veľmi jednoduchá na výrobu aj na financie.

Na jadro statora je najlepšie použiť prstence z transformátorových plechov, ktoré sú nalakované a tak od seba odizolované čím znížia veľkosť plochy, ktorou prechádza magnetický tok a tak efektívne znížia aj straty vírivými prúdmi v železe. Šírku pólů jednotlivých cievok mierne upravíme, tak aby bola rovnaká ako šírka oddelovacieho feromagnetického prstenca, tak ako je to zobrazené na *obrázku 4.2*.

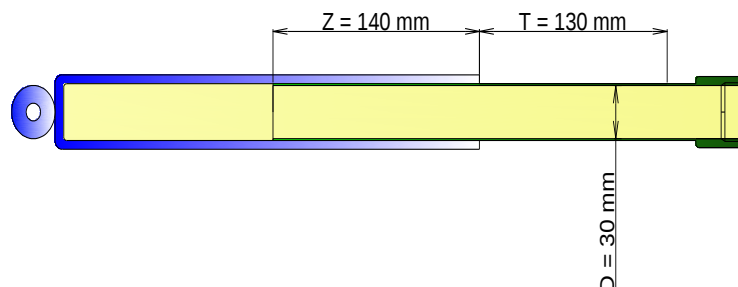


Obrázok 4.2 Základná konštrukcia elektromagnetického tlmiča (prevzaté z [6])

Takouto konštrukciou si zjednodušíme matematický popis veľkosti magnetického poľa vo vzduchovej medzere, ktorý bude spracovaný v ďalšej časti tohto dokumentu.

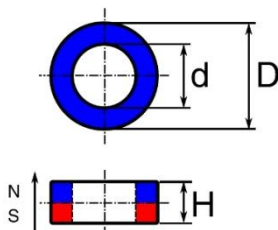
Celá táto konštrukcia je však obmedzená veľkosťou vonkajšieho priemeru statoru z dôvodu implementácie takéhoto elektromagnetického tlmiča do už existujúceho tlmiča, pričom celá táto konštrukcia musí nahradiť klasické kvapalinové, alebo elastomerové tlmenie v tlmiči, takže všetky navrhované rozmery budú vychádzať z vnútorného rozmeru konkrétne použitého tlmiča.

Pri tomto konkrétnom riešení sme ako smerodajné rozmery zvolili maximálny vonkajší priemer statora $D = 30 \text{ mm}$, zdvih tľmiča $T = 130 \text{ mm}$ a zanorenie pohyblivej časti tľmiča v statickej $Z = 140 \text{ mm}$, tak ako to vyplýva z *obrázku 4.3*.



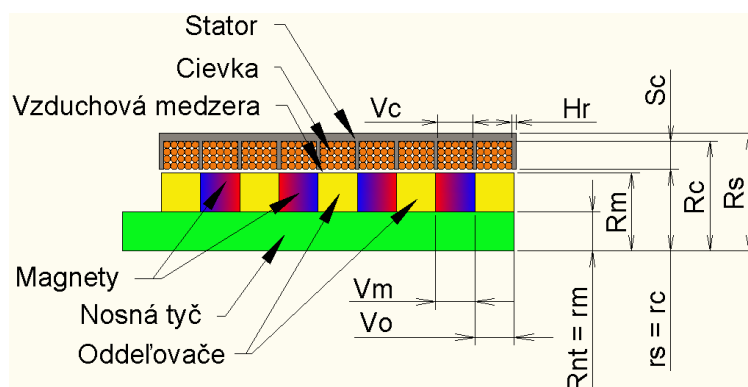
Obrázok 4.3 Smerodajné rozmery tľmiča

Rozmery kotvy sme odvodili s použitých magnetov, ktoré sme vyhľadali v katalógoch predajcov. Ako najvýhodnejšie riešenie sme použili magnety triedy kvality N35 [7], ktoré dosahujú veľkosť remanentnej magnetickej indukcie $1,17 - 1,22 \text{ T}$ pri rozmere vonkajšieho priemeru magnetu $D_m = 20 \text{ mm}$, vnútorného priemeru $d_m = 10 \text{ mm}$ a výšky magnetu $H = 5 \text{ mm}$.



Obrázok 4.4 Znázornené rozmery magnetov (prevzaté z [7])

Po zvolení a zistení všetkých týchto potrebných rozmerov sme mohli pristúpiť k návrhu všetkých ostatných rozmerov celého elektromagnetického tlmiča, tak ako je to uvedené na *obrázku 4.5*:



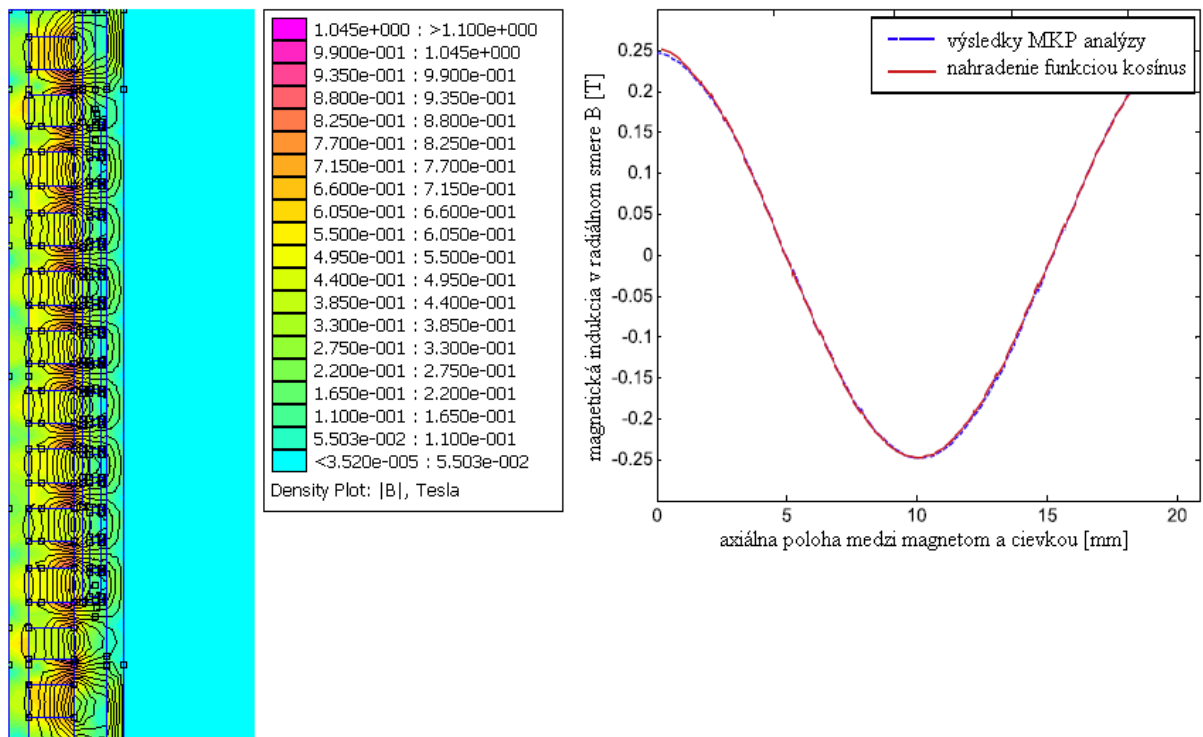
Obrázok 4.5 Konkrétne rozmery tlmiča

Tabuľka 1 Konkrétne rozmery tlmiča

Vm	výška magnetu	5	[mm]
Vo	výška oddelovača	5	
Rnt	polomer nosnej tyče	5	
rm	vnútorný polomer magnetu / oddelovača	5	
Rm	vonkajší polomer magnetu / oddelovača	10	
rc	vnútorný polomer cievky	10,4	
rs	vnútorný polomer statora	10,4	
Rc	vonkajší polomer cievky	14	
Rs	vonkajší polomer statora	14	
Sc	šírka cievky	3,6	
Vc	výška cievky	4,5	
Hr	hrúbka rebra statora	0,5	

Po vypočítaní všetkých potrebných rozmerov môžeme pristúpiť k výpočtu veľkosti magnetickej indukcie vo vzduchovej medzere pomocou programu ANSYS, kde je takýto výpočet veľmi jednoduchý. Pri výpočte sme za materiál statora zvolili transformátorové plechy a hliníkovú nosnú tyč, aby sme eliminovali veľkosť magnetického toku vnútom tlmiča a obmedzili tak straty. Z výpočtu vyplýva, že maximálna hodnota magnetickej indukcie vo vzduchovej medzere je 0,25 T a jej veľkosť vzhľadom k axiálnej pozícii voči magnetu je možné nahradiť funkciou kosínus a tak dostať veľmi jednoduchý matematický popis magnetickej indukcie, ktorý ďalej použijeme v simulácii:

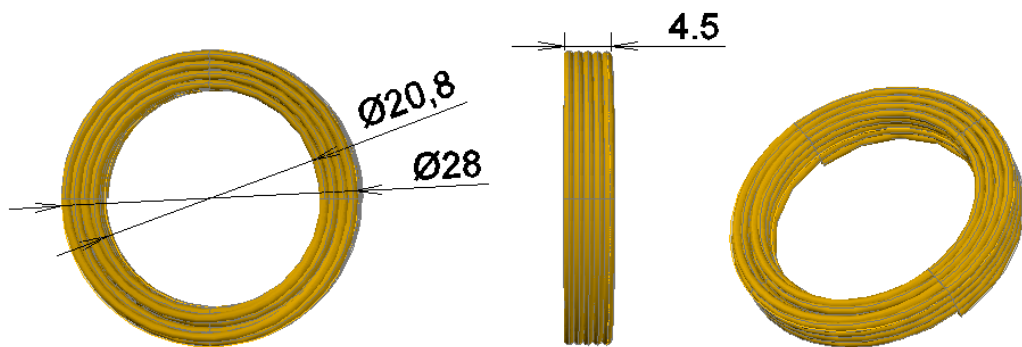
$$B = B_0 \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot q}{V_m + V_o}\right) \quad (4.5)$$



Obrázok 4.6 Výsledky MKP analýzy magnetického obvodu (prevzaté z [6])

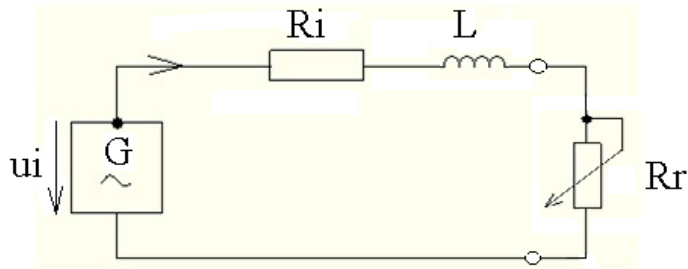
4.3 KONŠTRUKCIA CIEVKY A JEJ ELEKTRICKÝ OBVOD

Cievka statora má veľmi jednoduchú konštrukciu a je navinutá z drôtu s okrúhlym prierezom do viacerých vrstiev tak, aby mala rozmery, ktoré sú uvedené na *obrázku 4.7*:



Obrázok 4.7 Model jedného pólu cievky elektromagnetického tlmiča

Aby sme mohli ďalej pokračovať v simuláciách, je potrebné zostaviť náhradný obvod cievky, ktorý je veľmi jednoduchý a skladá sa zo štyroch základných súčiastok: zdroja napätia u , odporu zaradeného do obvodu cievky na riadenie veľkosti prúdu prechádzajúceho cievkou R_r , vlastným ohmickým odporom cievky R_i a jej indukčnosťou L .



Obrázok 4.8 Náhradný obvod cievky s pripojenou záťažou

Takýto obvod dokážeme jednoducho popísať diferenciálnou rovnicou prvého rádu, ktorá popisuje priebeh prúdu na cievke, pri známom budení a známych hodnotách riadiaceho odporu, činného odporu cievky a indukčnosti L . Veľkosť riadiaceho odporu je možné riadiť, ale pri prvých simuláciách ju zvolíme nulovú, aby sme videli, čo sa deje v obvode, ktorý nie je ničím ovplyvnený. Veľkosť činného odporu R_i cievky závisí na mernom odpore vodiča σ_{Cu} , dĺžke vinutia cievky l_v a na ploche prierezu použitého vodiča S_v , z ktorého je cievka navinutá. Indukčnosť cievky je závislá na počte závitov cievky N , relatívnej permeabilite jej jadra μ_r , priereze cievky S_c a jej dĺžke l_c . Všetky potrebné veličiny potrebné na výpočet obvodu cievky sa vypočítajú podľa nasledujúcich rovníc:

$$u = (R_r + R_i) \cdot i + L \frac{di}{dt} \quad (4.6)$$

$$R_i = \frac{\sigma_{Cu} \cdot l_v}{S_v} \quad (4.7)$$

$$L = \frac{N^2 \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot S_c}{l_c} \quad (4.8)$$

4.4 VÝPOČET ELEKTROMAGNETICKÉHO TLMENIA

Doposiaľ boli uvedené iba základné vzťahy popisujúce každú časť elektromagnetického tlmiča osobitne. Najdôležitejšou veličinou, ktorá nás však zaujíma je elektromagnetické tlmienie, ktoré odvodíme pomocou nasledujúcich rovníc:

$$U_i = B \cdot l \cdot v \quad [V] \quad (4.9)$$

$$I = \frac{U_i}{R} = \frac{B \cdot l \cdot v}{R_r + R_i} \quad [A] \quad (4.10)$$

$$F_{em} = I \cdot l \cdot B = \frac{B^2 \cdot l^2 \cdot v}{R_r + R_i} \quad [N] \quad (4.11)$$

$$F_v = b_v \cdot v \quad [N] \quad (4.12)$$

$$F_{em} = F_v \quad (4.13)$$

$$\frac{B^2 \cdot l^2 \cdot v}{R_r + R_i} = b \cdot v \quad (4.14)$$

$$b_v = b_{em} = \frac{B^2 \cdot l^2}{R_r + R_i} [Ns/m] \quad (4.15)$$

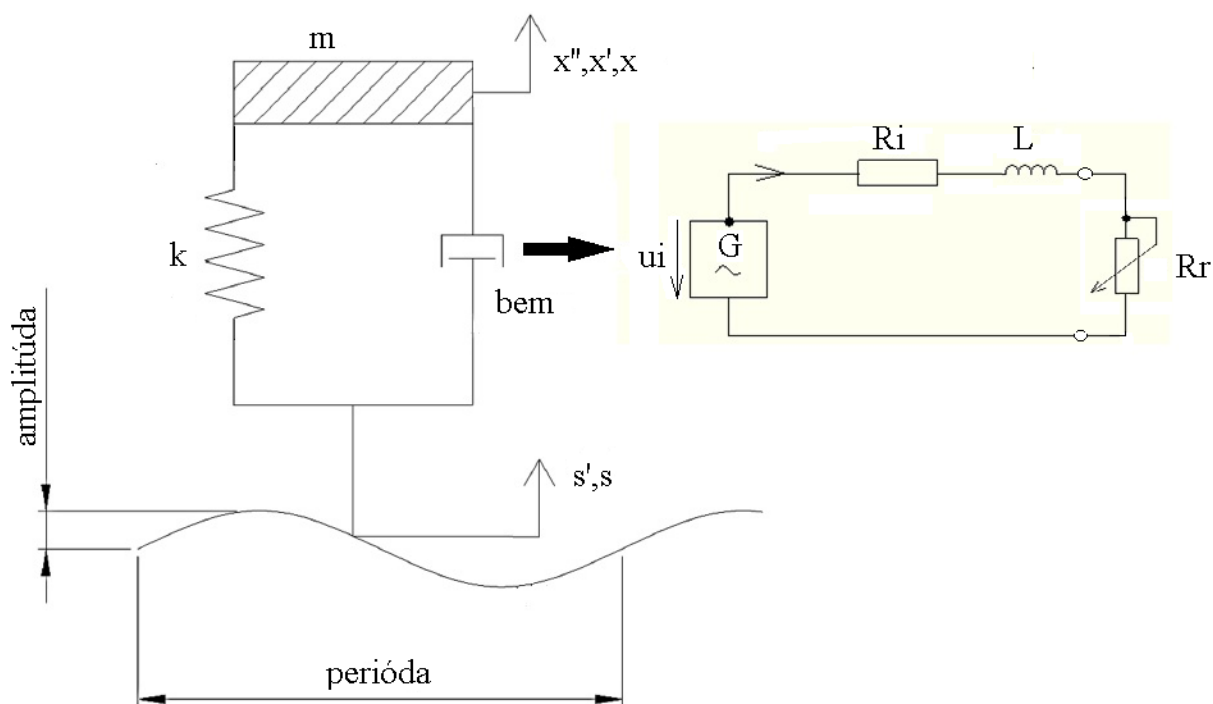
Ako môžeme vidieť, výsledná hodnota elektromagnetického tlmenia b_{em} je priamoúmerne závislá na druhej mocnine magnetickej indukcie B a druhej mocnine dĺžky vinutia cievky l a nepriamoúmerná veľkosti celkového odporu v obvode cievky. Tým, že veľkosť magnetickej indukcie a rovnako aj parametre cievky sú pevne dané geometriou, jediným členom toho vzťahu, ktorý je možné jednoducho meniť je veľkosť riadiaceho odporu v obvode cievky. Zmenou tohto odporu je možné veľmi jednoducho riadiť veľkosť elektromagnetického tlmenia.

5 MODEL SÚSTAVY A SIMULÁCIA

Po zvolení a navrhnutí všetkých potrebných parametrov sústavy je veľmi dôležitým krokom vytvorenie virtuálneho modelu daného elektromagnetického tlmiča a simulácia jeho chovania v programe MATLAB/Simulink. Tým je možné zistiť, ako sa bude model správať a popřípade zmeniť, alebo doladiť niektoré konštrukčné parametre tlmiča ešte skôr než by bol vytvorený jeho reálny prototyp a tak predísť nežiaducim problémom pri testovaní reálneho výrobku.

5.1 VYTVORENIE MODELU SÚSTAVY

Pre prvotné simulácie je použitý jednoduchý štvrtinový model automobilu bez pneumatík v spojení s modelom cievky. Vďaka tomuto modelu je možné veľmi jednoducho sledovať chovanie elektromagnetického tlmiča a všetky deje ktoré sa v celej sústave odohrávajú.



Obrázok 5.1 Štvrtinový model automobilu bez pneumatík s elektromagnetickým tlmením [8]

Takýto model sa dá veľmi jednoducho popísať sústavou dvoch diferenciálnych rovníc, pričom pohyb hmotnosti je popísaný diferenciálnou rovnicou druhého rádu a priebeh prúdu na cievke diferenciálnou rovnicou prvého rádu.

$$m \cdot \ddot{x} + \frac{B^2 \cdot l^2}{R_r + R_i} \cdot (\dot{x} - \dot{s}) + k \cdot (x - s) = 0 \quad (5.1)$$

$$B \cdot l \cdot (\dot{x} - \dot{s}) = (R_r + R_i) \cdot i + L \frac{di}{dt} \quad (5.2)$$

Následnou úpravou týchto rovníc dostaneme explicitný tvar, ktorý je vhodný pre následné zapísanie rovníc modelu do Simulinku.

$$\ddot{x} = -\frac{B^2 \cdot l^2 \cdot (\dot{x} - \dot{s})}{(R_r + R_i) \cdot m} - \frac{k \cdot (x - s)}{m} \quad (5.3)$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{B \cdot l \cdot (\dot{x} - \dot{s}) - (R_r + R_i) \cdot i}{L} \quad (5.4)$$

Po zápise sústavy takto upravených rovníc pomocou blokov do Simulinku dostaneme model sústavy a po zvolení vhodných veličín jednotlivých parametrov môžeme sledovať odozvu sústavy na budenie

5.2 NÁVRH JEDNOTLIVÝCH PARAMETROV A SIMULÁCIA

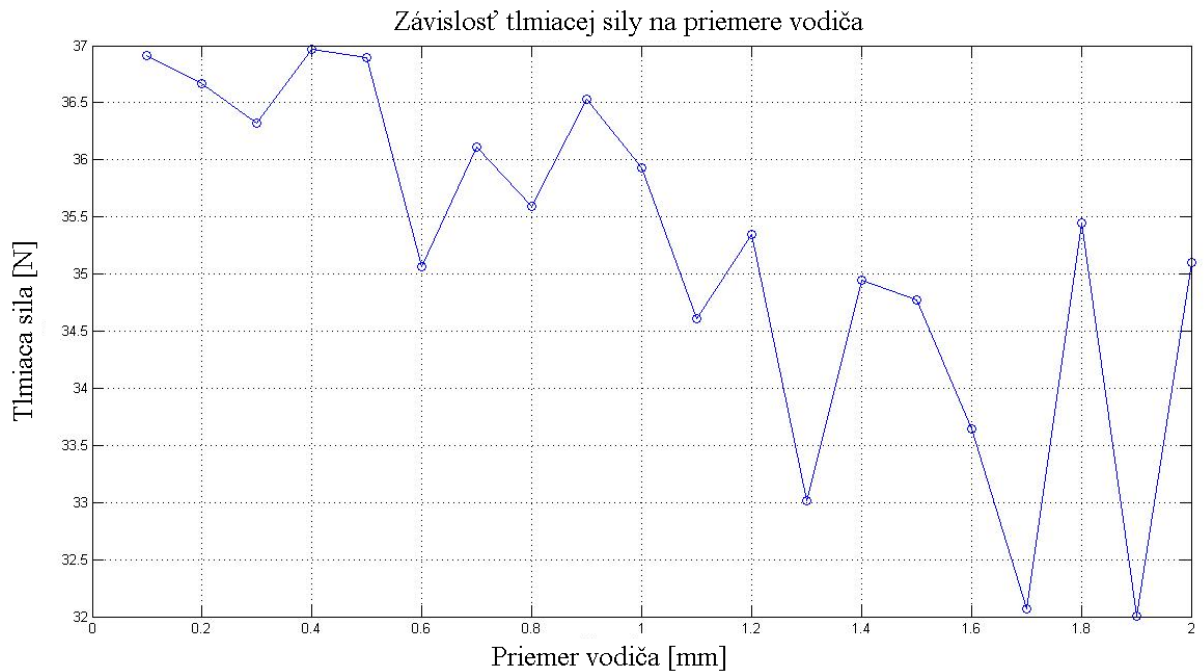
Ako už bolo naznačené v úvode, čiastočným cieľom je overenie funkčnosti elektromagnetického tlmiča pri použití na bicykli. Preto budú všetky hodnoty veličín vychádzať z konkrétne zvolenej geometrie a požiadaviek na vidlicu bicykla. Cieľom počiatočných simulácií bolo zistiť základné parametre cievky, ako sú: dĺžka vinutia cievky, vnútorný odpor cievky a indukčnosť cievky. V tejto fáze návrhu sme uvažovali cievku bez jadra. Zároveň však bolo potrebné dodržať prúdovú hustotu vodičom, ktorej maximálna hodnota bola zvolená 3 A/mm². V tabuľke 2 sú zvolené hodnoty jednotlivých veličín.

Tabuľka 2 Konkrétne parametre sústavy

hmotnosť jazdca na predné koleso	m	35	Kg
tuhosť pružiny	k	14000	N/m
maximálna magnetická indukcia	B0	0,25	T

V nasledujúcej tabuľke môžeme vidieť závislosť tlmiacej sily na priemere vodiča pri budení sústavy jednotkovým skokom, pričom prúdová hustota vodičom bola obmedzená riadiacim odporom na 3A/mm² aby nedošlo k zničeniu vinutia cievky vplyvom strát na činnom odpore cievky. Keďže priemer drôtu cievky výrazne ovplyvňuje jej rozmery, tak v simulácií budú uvažované všetky jej vlastnosti, ako je jej indukčnosť L , vnútorný odpor R_i a hlavne dĺžka vinutia cievky. Pre rozsiahlosť týchto výpočtov však budú v tejto práci uvedené iba hodnoty týkajúce sa zvoleného priemeru vodiča vinutia cievky, ktorý bude ďalej použitý na ďalšie simulácie.

Z grafu na *obrázku 5.2* vyplýva, že tlmič dosahuje najväčšiu hodnotu tlmiacej sily na priemere vodiča cievky 0,4 mm. Tento výsledok je ďalej použitý v nasledujúcich simuláciách, kde sú vlastnosti tlmiča podrobnejšie preskúvané.



Obrázok 5.2 Závislosť tlmiacej sily na priemere drôtu

Po zistení všetkých parametrov tlmiča môžeme pristúpiť k podrobnejšiemu skúmaniu vlastností tlmiča. Hlavným znakom, ktorý nám dáva informácie o vlastnostiach tlmiča je jeho pomerný útlm, ktorý vypočítame pomocou nasledujúcich vzťahov.

$$F = b_{em} \cdot v \rightarrow b_{em} = \frac{F}{v}; [Ns/m; N, m/s] \quad (5.5)$$

$$b_{em} = \frac{37}{1,98} = 18,68 \text{ Ns/m}$$

$$\Omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}; [rad/s; N/m, kg] \quad (5.6)$$

$$\Omega_0 = \sqrt{\frac{14000}{35}} = 20 \text{ rad/s}$$

$$b_p = \frac{b}{2 \cdot m \cdot \omega_0}; [-; Ns/m, kg, rad/s] \quad (5.7)$$

$$b_p = \frac{17,89}{2 \cdot 35 \cdot 20} = 0,0133$$

Veľkosť elektromagnetického tlmenia a teda aj pomerného útlmu je teda veľmi malá a to znamená, že sústava bude tlmená veľmi málo.

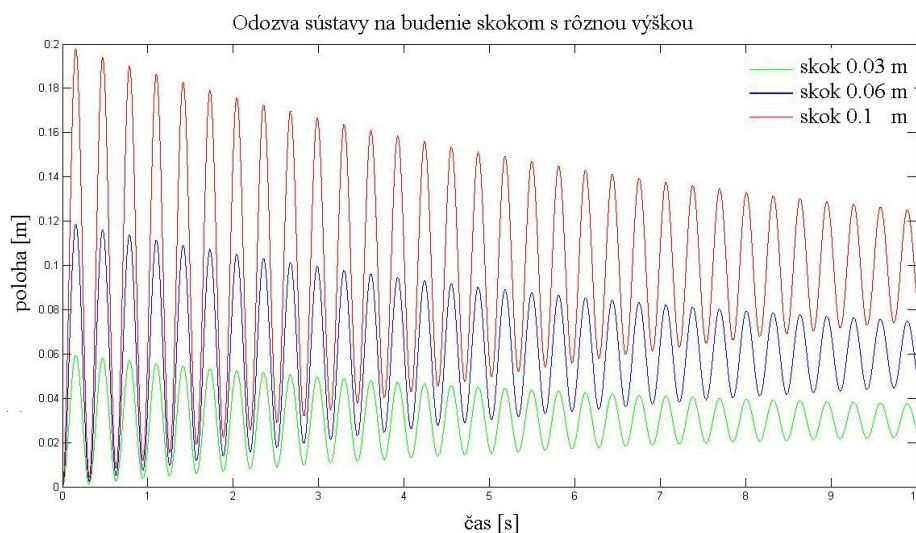
5.3 SIMULÁCIA SÚSTAVY S RÔZNYMI DRUHMI BUDENIA

Pred začatím ďalších simulácií je však potrebné ďalej určiť chýbajúce veličiny, ktoré popisujú najdôležitejšiu časť elektromagnetického tlmiča, ktorou je cievka. Po zvolení priemeru vodiča cievky podľa predchádzajúcej simulácie na 0,4 mm vypočítame jej základné veličiny ovplyvňujúce elektrické vlastnosti cievky.

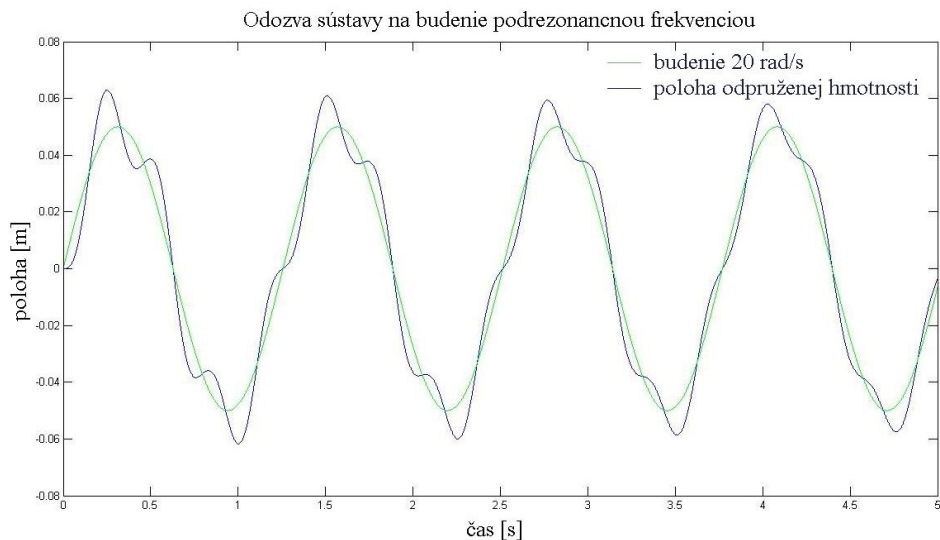
Tabuľka 3 Konkrétne parametre cievky

priemer vodiča cievky	d_v	0,4	mm
dĺžka vinutia cievky	l_v	7,9	m
počet závitov cievky	N	103	-
činný odpor cievky	R_i	1,0995	Ω
indukčnosť cievky	L	2,9	mH

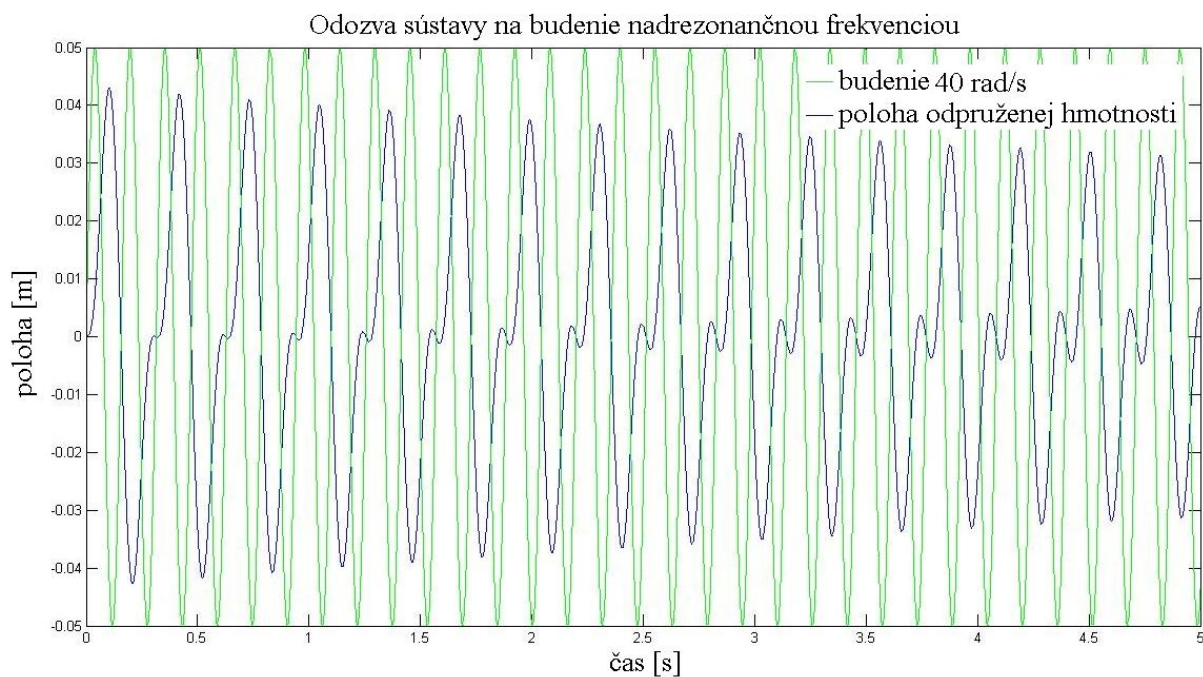
Po vypočítaní všetkých potrebných hodnôt môžeme konečne pristúpiť k jednotlivým simuláciám a zistiť tak, ako sa tlmič pri jednotlivých druhoch budenia správa.



Obrázok 5.3 Odozva sústavy na budenie skokom s rôznou veľkosťou



Obrázok 5.4 Odozva sústavy na budenie sínusovým signálom s pod rezonančnou frekvenciou



Obrázok 5.5 Odozva sústavy na budenie sínusovým signálom s nad rezonančnou frekvenciou

Na *obrázku 5.3* môžeme vidieť priebeh odozvy sústavy na budenie skokom. Je očividné, že výchylka je tým väčšia, čím väčší je budiaci skok. Z priebehu polohy je však zreteľné aj to, že elektromagnetické tlmenie je veľmi slabé a sústavu by dostalo do ustáleného stavu za veľmi dlhý čas.

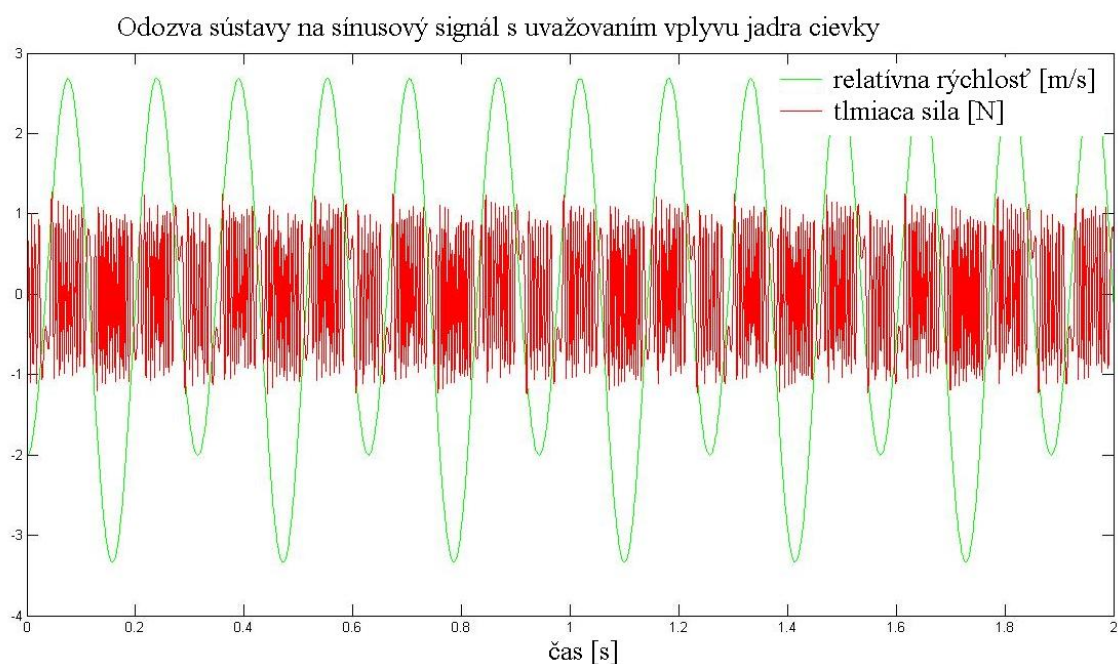
Odozva na pod rezonančné budenie s frekvenciou 5 rad/s a amplitúdou 5 cm je vykreslená na *obrázku 5.4*. Z tohto priebehu je viditeľné, že pri nízkych frekvenciách elektromagnetické tlmenie vôbec neplní svoju funkciu a na sínusový priebeh budenia ešte nasuperponovalo vyššiu frekvenciu. Z tohto priebehu môžeme teda usúdiť, že takáto konštrukcia elektromagnetického tlmenia je pre nízke budiace frekvencie úplne nepoužiteľná. Takéto vlastnosti môžu vyplývať z toho, že relatívna rýchlosť magnetov

kotvy voči cievke statora je veľmi nízka a tak je indukované napätie veľmi malé, čo má za dôsledok veľmi malý prúd a tým pádom minimálnu veľkosť tlmiacej sily.

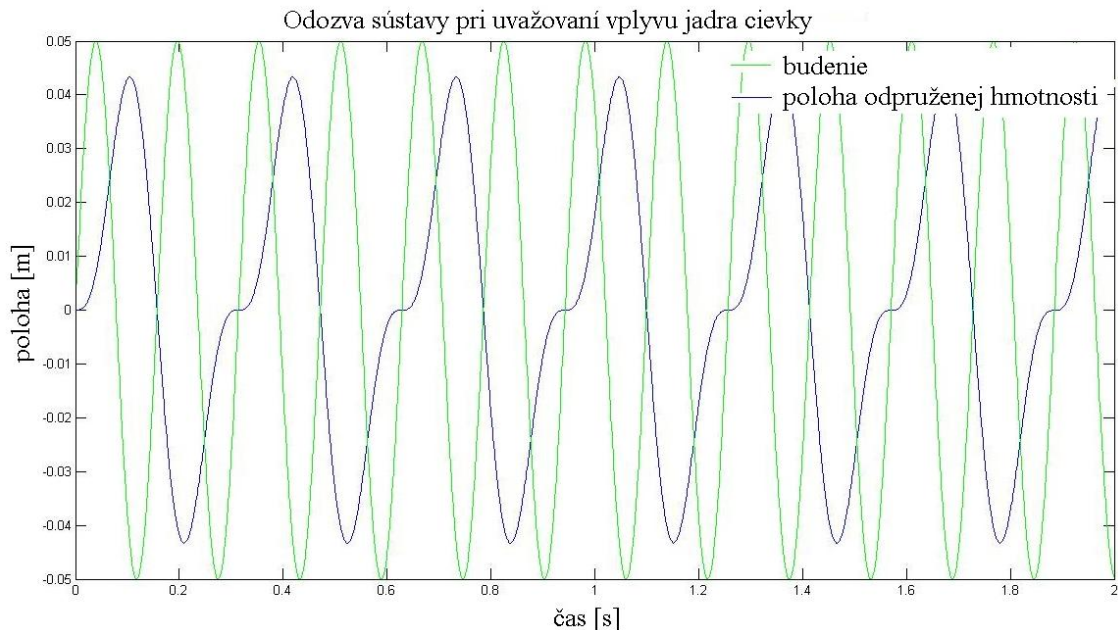
Odozva sústavy vykreslená na *obrázku 5.5* ukazuje, že pri vyšších frekvenciách, konkrétne pri použitej nad rezonančnej frekvencii 40 rad/s s amplitúdou 5 cm je výchylka odpruženej hmotnosti menšia než výchylka budenia a postupne sa znižuje a dostáva do ustáleného stavu. Z toho môžeme usúdiť, že použitá konštrukcia je vhodná skôr pre vyššie frekvencie, kedy je relatívna rýchlosť kotvy a statora natoľko vysoká, že indukované napätie vyvolá pozitívny tlmiaci efekt, avšak stále nie tak výrazný, aby bolo možné takéto tlmič reálne použiť.

5.4 SIMULÁCIA S UVAŽOVANÍM VPLYVU FEROMAGNETICKÉHO JADRA CIEVKY

V doteraz prevedených simuláciách bola uvažovaná cievka bez jadra. Aby sme zistili ako na tlmič budú vplývať pohybujúce sa magnety s oddeľovačmi, použili sme pri výpočte cievky relatívnu permeabilitu magnetov, ktorá je približne rovnaká ako permeabilita vzduchu a relatívnu permeabilitu oddeľovačov sme zvolili 200, čo zodpovedá použitiu železných plechov. Toto však má za následok zvýšenie indukčnosti cievky, čo spôsobí, že sa zväčší fázový posun medzi napätím a prúdom na cievke a to má za následok to, že tlmiaca sila nepôsobí iba proti relatívnej rýchlosti, ale kmitá okolo nuly a tak chvíľu tlmi a chvíľu podporuje kmitanie, tak ako to je znázornené na *obrázku 5.6*. To má za následok úplné znefunkčnenie tlmiacej činnosti a sústava vôbec nie je tlmená, ako to môžeme vidieť na *obrázku 5.7*.



Obrázok 5.6 Priebeh rýchlosti a tlmiacej sily pri uvažovaní vplyvu jadra cievky



Obrázok 5.7 Odozva sústavy na budenie sínusovým signálom pri uvažovaní vplyvu jadra cievky

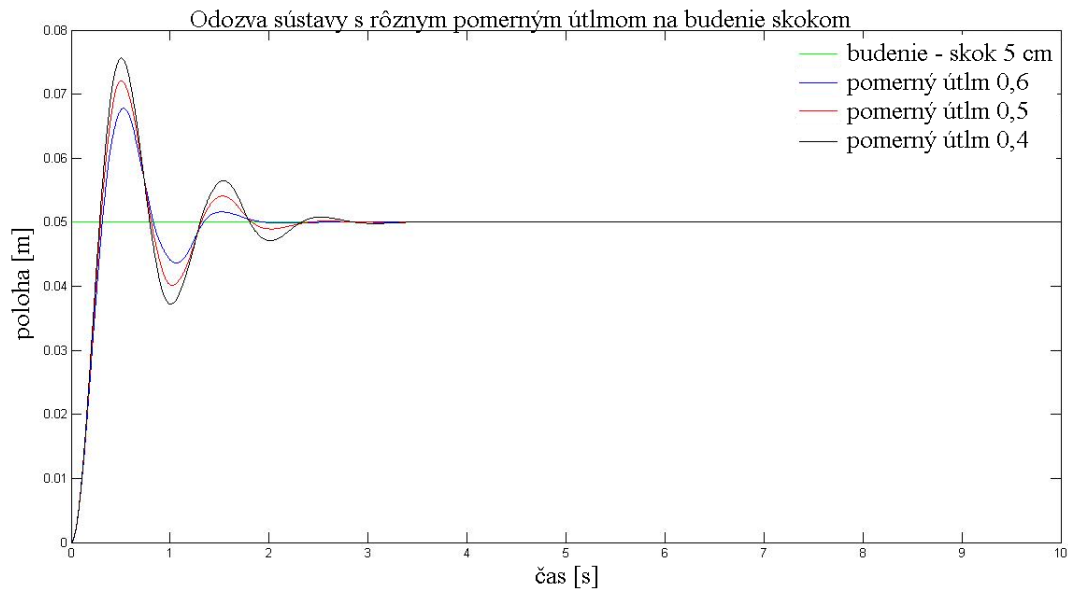
Vplyv nežiadúceho fázového posunu je možné odstrániť tak, že zvýšime hodnotu radiaceho odporu v obvode cievky. Tým by sme však obmedzili veľkosť tlmiacej sily a to je nežiadúce. Keďže rozmery cievky sú pevne stanovené, tak ďalšou možnosťou ako eliminovať fázový posun, je znížiť indukčnosť cievky. To sa dá dosiahnuť použitím oddeľovačov, ktoré majú malú relatívnu permeabilitu. Bežné železné, alebo feritové materiály majú permeabilitu v rozmedzí od 2 do niekoľkých stoviek (železo), alebo desať tisícov (ferity). Preto ak zvolíme relatívnu permeabilitu oddeľovača 2, tak účinne eliminujeme vplyv fázového posunu prúdu voči napätiu na cievke a účinne zvýšime veľkosť tlmiacej sily a dosiahneme aj to, aby pôsobila vždy proti smeru relatívnej rýchlosti kotvy a statora.

5.5 SIMULÁCIA PO ZMENE PARAMETROV SÚSTAVY

Ako je možné vidieť na výsledku predchádzajúcich simulácií, elektromagnetický tlmič svoju funkciu plní len minimálne, alebo vôbec a sústavu so zvolenými parametrami vôbec nedokáže utlmiť pri akomkoľvek type budenia. Keďže je pomerný útlm iba 1,33% tak je vhodné nájsť také parametre sústavy, kedy by táto hodnota bola aspoň niekoľko desiatok percent. Preto pre ďalšie simulácie použije zvolenú konštrukciu elektromagnetického tlmiča a použijeme také hodnoty hmotnosti a tuhosti pružiny aby bola hodnota pomerného útlmu približne rovná hodnote 0,6. Tejto požiadavke zodpovedá hmotnosť 10 kilogramov a tuhosť pružiny 400 N/m. Na nasledujúcom *obrázku 5.8* je možné vidieť odozvu takejto sústavy na budenie skokom o výške 5 cm a porovnať odozvy sústavy pri rôznych hodnotách pomerného útlmu. Z vykreslených priebehov odozvy pri rôznych hodnotách pomerného útlmu je zreteľné, že tlmič plní svoju funkciu celkom dobre.

Vlastná frekvencia upravenej sústavy má teraz hodnotu vypočítanú podľa vzťahu 20:

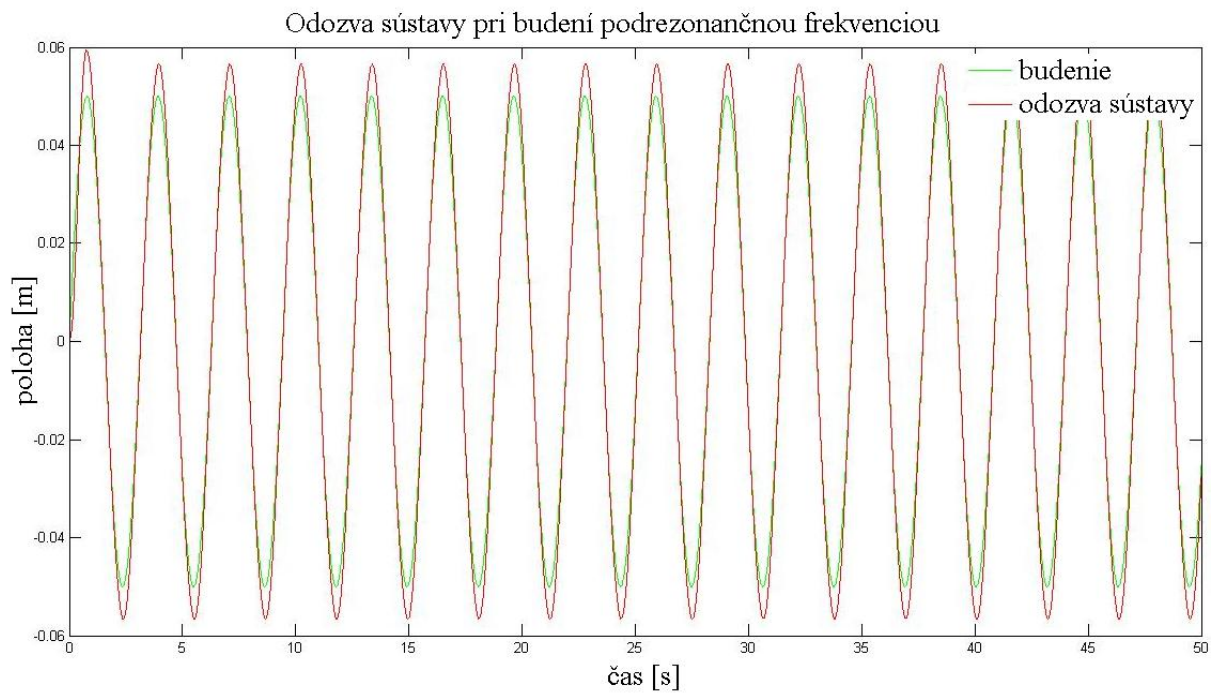
$$\Omega_0 = \sqrt{\frac{400}{10}} = 6,32 \text{ rad/s} \quad (5.8)$$



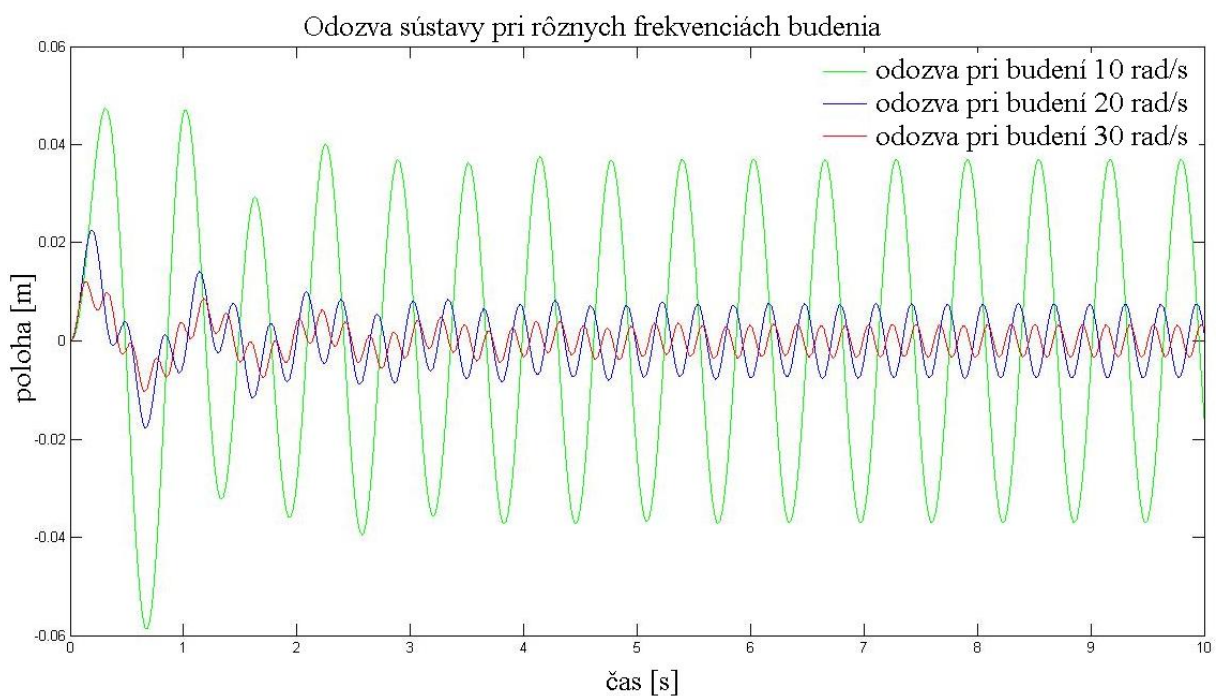
Obrázok 5.8 Odozva sústavy na budenie skokom s rôznou výškou

Po zistení odozvy sústavy na skok je vhodné ďalej preskúmať odozvu sústavy na budenie sínusovým signálom. Na obrázku 5.9 je vykreslená odozva sústavy na budenie frekvenciou nižšou, než je vlastná frekvencia sústavy a je vidieť, že v takýchto nízkych frekvenciách tlmič vôbec nepracuje.

Naopak pri budení s vyššou frekvenciou než je vlastná frekvencia sústavy tlmič plní svoju funkciu veľmi dobre a po odznení prechodových dejov sa výchylka sústavy ustáli v podstatne menšom intervale, než má budenie. Takúto odozvu sústavy môžeme sledovať na obrázku 5.10, z ktorého je tiež viditeľné, že tlmič pracuje lepšie vo vyšších frekvenciách. Vo všetkých troch prípadoch však musel byť obmedzený prúd pretekajúci cievkou tak, aby nebola prekročená prúdová hustota 3 A/mm^2 .



Obrázok 5.9 Odozva sústavy na budenie pod rezonančnou frekvenciou



Obrázok 5.10 Odozva sústavy na budenie rôznymi nad rezonančnými frekvenciami

Z prevedených simulácií je teda zreteľne vidieť, že použitá konštrukcia elektromagnetického tlmiča pri veľmi nízkych frekvenciách nespĺňa svoj účel, avšak pri frekvenciách v rádoch desiatok radiánov takáto konštrukcia funguje veľmi dobre.

6 NÁVRH OVLÁDANIA VEĽKOSTI TLMIACEJ SILY

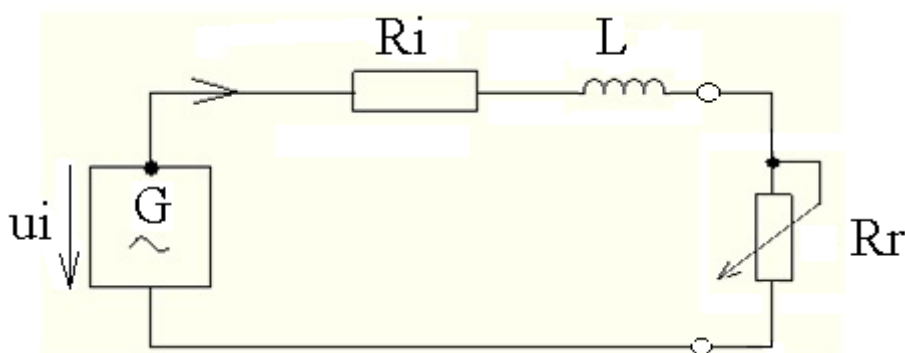
Vďaka tomu, že hlavnou časťou elektromagnetického tlmiča je cievka, dokážeme veľmi jednoducho ovládať veľkosť prúdu, ktorý cievkou preteká pomocou odporu zaradeného v obvode cievky. Keďže je týmto spôsobom ovládanie tlmiacej sily veľmi jednoduché je vhodné sa zaoberať aj touto témou a v nasledujúcich častiach budú popísané tri možné technické riešenia, s ktorými by takéto riadenie bolo možné.

Najlepšie by samozrejme riadenie takejto sústavy fungovalo v prípade, že by sme poznali tvar budenia ešte skôr než by pôsobilo na sústavu a na základe toho dokázali ešte pred jeho vplyvom nastaviť parametre tlmenia tak, aby bola výsledná odozva sústavy čo najhladšia. Takéto riadenie by však už vyžadovalo použitie snímačov a akcelerometrov a nejaký mikroprocesor, ktorý by tieto údaje dokázal vyhodnotiť a nastaviť tlmenie v dostatočne krátkom časovom intervale.

6.1 KONKRÉTNE TECHNICKÉ RIEŠENIA

6.1.1 POTENCIOMETER V OBVODE CIEVKY

Ako prvá sa naskytá možnosť ovládať veľkosť tlmiacej sily manuálne pomocou trimra, alebo potenciometra zaradeného v obvode cievky tak ako je to znázornené na *obrázku 6.1*. Takéto jednoduché riešenie by sa dalo veľmi ľahko konštrukčne vytvoriť a tlmič by bol jednoducho nastaviteľný.



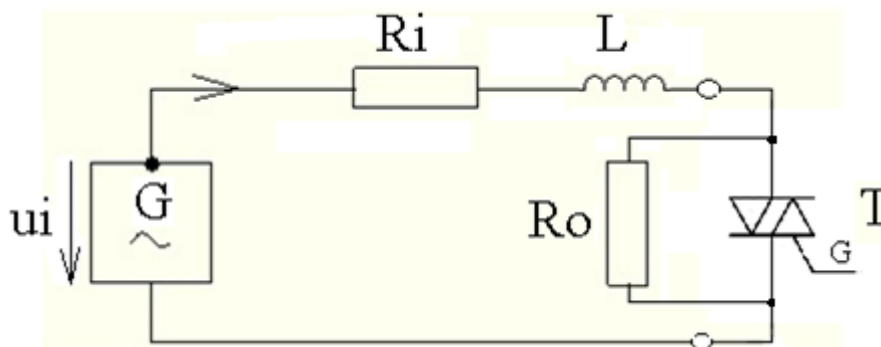
Obrázok 6.1 Príklad riadenia prúdu cievkou pomocou potenciometra

Veľkosť tlmiacej sily je závislá na veľkosti prúdu, ktorý cievkou preteká a ten je podľa schémy na *obrázku 6.1* určený nasledujúcou rovnicou.

$$i = \frac{u_i - L \frac{di}{dt}}{R_r + R_i}; [A] \quad (6.1)$$

Nevýhoda takejto konštrukcie je však v tom, že po nastavení odporu na vhodnú hodnotu, tak aby bola sústava dostatočne tlmená by bol pomerný útlm nastavený na pevnú hodnotu a nevyužili by sme tak potenciál, ktorý elektromagnetický tlmič ponúka v oblasti riadenia veľkosti tlmiacej sily.

6.1.2 RIADENIE POMOCOУ PWM

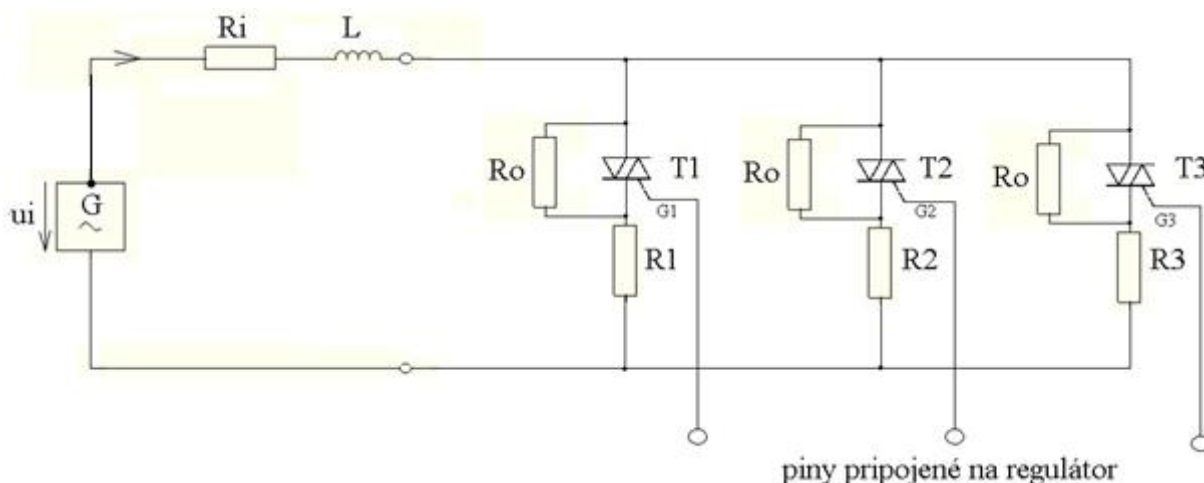


Obrázok 6.2 Príklad zapojenia cievky pre riadenie prúdu pomocou triaku riadeného PWM signálom

Pretože prúd pretekajúci cievkou nie je jednosmerný, ale striedavý musíme na riadenie použiť triak, ktorý dokáže spínať striedavé prúdy a zapojíme ho tak ako je uvedené na *obrázku 6.2*. Na riadenie veľkosti prúdu cievkou pomocou PWM by už musel byť použitý regulátor, ktorý by snímal veľkosť prúdu cievkou a podľa pri prekročení povolené prúdu cievkou by pomocou hradla G na triaku by tento triak ovládal a zopínal buď do plne otvorenej, alebo úplne zavretej polohy podľa signálu PWM. Pri zavretí triaku by však napätie na cievke mohlo dosiahnuť veľmi vysoké hodnoty, ktoré by PN prechody v triaku nemuseli vydržať a triak by sa zničil. Na ochranu proti nežiaducemu zničeniu triaku je paralelne s ním vložený do obvodu odpor R_o , ktorý má tak veľkú hodnotu odporu, aby pri zopnutom triaku nijak neovplyvňoval veľkosť prúdu cievkou, ale pri zatvorení triaku aby mohol prúd tiecť cez tento odpor a nezničil tak triak.

Regulátor použitý na riadenie by sledoval polohu odpruženej hmotnosti a budenia a určoval by ideálnu veľkosť tlmiacej sily, čomu by následne prispôbil striedu PWM signálu, ktorým je triak riadený.

6.1.3 RIADENIE POMOCOУ ODPOROVEJ DEKÁDY



Obrázok 6.3 Príklad riadenia prúdu cievkou pomocou paralelne zapojených odporov a triakov

Rovnako ako pri riadení veľkosti tlmiacej sily pomocou PWM, aj v prípade použitia odporovej dekády na *obrázku 6.3* sú použité kvôli spínaniu striedavých

signálov triaky, ktoré sú chránené voči zničeniu prepätím pomocou odporov R_o . Hradlá triakov sú pripojené na regulátor, ktorý funguje rovnako ako pri regulácii pomocou PWM. Regulátor spína vždy vhodný triak a tak zaraďuje do obvodu cievky odpor, ktorý je zapojený v sérii s týmto triakom. Veľkou výhodou tohto zapojenia je, že prúd pretekajúci cievkou pri prepínaní triakov tečie ním a ostatné teda majú čas sa ochladiť a obvod nieje tak namáhaný. Druhou výhodou je, že pri zopnutí dvoch, alebo viacerých triakov naraz je výsledný odpor v obvode cievky určený ich paralelnou kombináciou podľa nasledujúceho vzťahu, ktorý hovorí, že prevrátená hodnota výsledného odporu sa rovná súčtu prevrátených hodnôt všetkých odporov zaradených v obvode cievky.

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} ; [\Omega] \quad (6.2)$$

Výhoda takéhoto zapojenia je aj vtom, že pri vhodne zvolených veľkostiach odporov dokážeme pri vhodnom zopnutí triakov do obvodu postupne zapájať väčší výsledný odpor a tak riadiť veľkosť prúdu celkom presne.

V takomto zapojení je samozrejme možné ovládať triaky pomocou PWM signálu a tak ešte viac spresniť reguláciu.

6.2 RIADENIE V AKTÍVNOM REŽIME

Najlepším spôsobom riadenia tlmiacej sily samozrejme je riadenie tlmiča v aktívnom režime, kedy neriadime len spotrebu vygenerovanej energie, ale vo vhodných okamihoch dodávame energiu do tlmiča. Podrobnejší rozbor takéhoto druhu riadenia však nieje účelom tejto práce a preto sa s tým ďalej nebudeme zaoberať a len uvedieme takúto možnosť riadenia elektromagnetického tlmiča ako jednu z variant.

7 ZÁVER

Cieľom mojej práce bolo zhodnotiť niektoré technické riešenia vybraných elektromagnetických tlmičov a navrhnuť konštrukciu elektromagnetického tlmiča, ktorá sa by sa dala použiť ako tlmiaci prvok vo vidlici horského bicykla. Takže ako prvá bola spracovaná rešerš v ktorej boli zhodnotené všetky výhody a nevýhody jednotlivých typov elektromagnetických tlmičov.

Po prevedení rešeršnej štúdie bola za najvhodnejšiu konštrukciu elektromagnetického tlmiča vybraná konštrukcia popisovaná vo štvrtej časti rešerše, ktorá používa axiálne magnetizované permanentné magnety. Táto konštrukcia bola z dôvodu zjednodušenia tvaru magnetickej indukcie upravená z trojfázovej sústavy na štvorfázovú, čím sme dostali priebeh magnetickej indukcie pri pohybe cievky okolo magnetov, ktorý sa dá popísať funkciou kosínus.

Prvotné simulácie boli prevedené na reálnej sústave bicykla s jazdcem a ako prvý bol navrhnutý priemer vodiča cievky, tak aby tlmič dosiahol čo najväčšiu tlmiacu silu. Následne boli tieto získané informácie zahrnuté do modelu a pristúpilo sa k skúmaniu odozvy sústavy na rôzne druhy budenia, pričom sústavu reprezentoval štvrtinový model automobilu bez pneumatík. Bohužiaľ simulácie ukázali, že takto zvolená konštrukcia elektromagnetického tlmiča nedokáže vyprodukovať takú tlmiacu silu, aby utlmila pohyb odpruženej hmotnosti, pretože maximálny dosiahnutý pomerný útlm nebol ani 2 %.

Po tomto zistení boli teda parametre sústavy upravené tak, aby pomerný útlm dosahoval niekoľko desiatok percent a celú simuláciu sme opakovali. Výsledkom je, že tlmič v takejto konfigurácii sústavy funguje a plní svoju funkciu hlavne pri vyšších frekvenciách ako je vlastná frekvencia sústavy. Nevýhodou však je, že simulovaná sústava má veľmi malú hmotnosť a tuhosť, čo sa v praxi vyskytuje len málo.

Výsledkom teda je, že takáto konštrukcia elektromagnetického tlmiča je použiteľná len pre sústavy s nízkou hmotnosťou a tuhosťou, ktoré kmitajú pomerne rýchlo.

Dalej boli uvedené niektoré možnosti riadenia spotreby vygenerovanej elektrickej energie a ich konkrétne zapojenia.

Na záver je teda vhodné načrtnúť možnosti ďalšej práce na skúmaní takejto konštrukcie tlmiča, hlavne čo sa týka vzniku vírivých prúdov v železe statora, ktoré vznikajú relatívnym pohybom magnetov voči statoru a dôkladnejšiemu preskúmaniu vlastností magnetickej pol'a a permeability magnetov s oddel'ovačmi, lebo v tejto práci boli tieto hodnoty spriemerované a uvažovaná bola konštantná hodnota permeability jadra cievky.

8 ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

- [1] Jae-Sung Bae, Jai-Hyuk Hwang, Jin-Ho Roh, Jong-Hyuk Kim, Mi-Seon Yi, Jae Hyuk Lim, Vibration suppression of a cantilever beam using magnetically tuned-mass-damper, *Journal of Sound and Vibration*, Volume 331, Issue 26, 17 December 2012, Pages 5669-5684, ISSN 0022-460X, 10.1016/j.jsv.2012.07.020.
URL <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022460X12005469>>
- [2] Huang K.; Yu F.; Zhang Y.; Active controller design for an electromagnetic energy-regenerative suspension, *International Journal of Automotive Technology* Volume 12, Issue 6 , 1 December 2011, Pages 877-885, ISSN 1976-3832, 10.1007/s12239-011-0100-2.
URL <<http://dx.doi.org/10.1007/s12239-011-0100-2>>
- [3] Jiabin Wang; Weiya Wang; Atallah, K.; Howe, D., "Design of a linear permanent magnet motor for active vehicle suspension," *Electric Machines and Drives Conference, 2009. IEMDC '09. IEEE International* , vol., no., pp.585,591, 3-6 May 2009
doi:10.1109/IEMDC.2009.5075265
URL
<<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5075265&isnumber=5075166>>
- [4] Ebrahimi, B.; Khamesee, M.B.; Golnaraghi, M.F., "Feasibility study of an electromagnetic shock absorber with position sensing capability," *Industrial Electronics, 2008. IECON 2008. 34th Annual Conference of IEEE* , vol., no., pp.2988,2991, 10-13 Nov. 2008 doi:10.1109/IECON.2008.4758436
URL
<<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4758436&isnumber=4757911>>
- [5] Malenovský E.; Skripta, Mechanika těles –Dynamika, Vysoké učení technické v Brně, 2005
URL <http://www.umat.fme.vutbr.cz/~pkrejci/opory/dynamika/kapitola_7.html>
- [6] Zuo L.; "Design and characterization of an electromagnetic energy harvester for vehicle suspensions, " *Smart Materials and Structures*, Volume 19, Issue 4, 4 April 2010, doi:10.1088/0964-1726/19/4/045003
URL <<http://iopscience.iop.org/0964-1726/19/4/045003>>
- [7] Webstránka SELOS Group
URL <<http://www.magnety.sk/neodym-toroid-anizotrop/>>
- [8] MAŤAŠ, M. Tlumič jako zdroj elektrické energie. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles mechatroniky a biomechaniky,
2011. Vedoucí bakalářské práce Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D.

9 ZOZNAM OBRÁZKOV

Obrázok 3.1 Tlmič vírivých prúdov (prevzaté z [1])	11
Obrázok 3.2 Tlmič s prevodom lineárneho pohybu na rotačný (prevzaté z [2])	12
Obrázok 3.3 Pracovné kvadranty tlmiča (prevzaté z [2])	12
Obrázok 3.4 Konštrukcia tlmiča s kvázi-Halbachovou magnetizáciou (prevzaté z [3])	13
Obrázok 3.5 Uzatvorenie magnetického toku v statore tlmiča (prevzaté z [3])	13
Obrázok 3.6 Základné rozmery statora tlmiča (prevzaté z [3])	14
Obrázok 3.7 Rozloženie vírivých prúdov v statore tvaru T a plovického T (prevzaté z [3])	14
Obrázok 3.8 Konštrukcia tlmiča s permanentnými magnetmi (prevzaté z [4])	15
Obrázok 4.1 Kmitanie s jedným stupňom voľnosti (prevzaté z [5])	16
Obrázok 4.2 Základná konštrukcia elektromagnetického tlmiča (prevzaté z [6])	17
Obrázok 4.3 Smerodajné rozmery tlmiča	18
Obrázok 4.4 Znáznorné rozmery magnetov (prevzaté z [7])	18
Obrázok 4.5 Konkrétne rozmery tlmiča	19
Obrázok 4.6 Výsledky MKP analýzy magnetického obvodu (prevzaté z [6])	20
Obrázok 4.7 Model jedného pólu cievky elektromagnetického tlmiča	20
Obrázok 4.8 Náhradný obvod cievky s pripojenou záťažou	21
Obrázok 5.1 Štvrtinový model automobilu bez pneumatík s elektromagnetickým tlmením [8]	23
Obrázok 5.2 Závislosť tlmiacej sily na priemere drôtu	25
Obrázok 5.3 Odozva sústavy na budenie skokom s rôznou veľkosťou	26
Obrázok 5.4 Odozva sústavy na budenie sínusovým signálom s pod rezonančnou frekvenciou	27
Obrázok 5.5 Odozva sústavy na budenie sínusovým signálom s nad rezonančnou frekvenciou	27
Obrázok 5.6 Priebeh rýchlosti a tlmiacej sily pri uvažovaní vplyvu jadra cievky	28
Obrázok 5.7 Odozva sústavy na budenie sínusovým signálom pri uvažovaní vplyvu jadra cievky	29
Obrázok 5.8 Odozva sústavy na budenie skokom s rôznou výškou	30
Obrázok 5.9 Odozva sústavy na budenie pod rezonančnou frekvenciou	31
Obrázok 5.10 Odozva sústavy na budenie rôznymi nad rezonančnými frekvenciami ...	31
Obrázok 6.1 Príklad riadenia prúdu cievkou pomocou potenciometra	32
Obrázok 6.2 Príklad zapojenia cievky pre riadenie prúdu pomocou triaku riadeného PWM signálom	33
Obrázok 6.3 Príklad riadenia prúdu cievkou pomocou paralelne zapojených odporov a triakov	33