



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

VIRTUÁLNÍ PROTOTYP ELECTRO-MAGNETICKÉHO AKTUÁTORU PRO TLUMENÍ VIBRACÍ

VIRTUAL PROTOTYPE OF ELECTRO-MAGNETIC ACTUATOR FOR VIBRATIONS DAMPING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

BORIS GARAMI

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. ZDENĚK HADAŠ, Ph.D.

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Boris Garami

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

obor: **Mechatronika (3906R001)**

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

Virtuální prototyp electro-magnetického aktuátoru pro tlumení vibrací

v anglickém jazyce:

Virtual prototype of electro-magnetic actuator for vibrations damping

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Tato práce je založena na vytvoření virtuálního prototypu mechatronické soustavy v prostředích ADAMS a SIMULINK. Mechatronická soustava electro-magnetického aktuátoru pro tlumení vibrací slouží k redukci vibrací rámců strojních soustav a vyvstal zde požadavek na redukci těchto vibrací.

Cíle bakalářské práce:

1. Rešerše elektro-magnetických principů potlačení vibrací.
2. Vytvoření modelu elektro-mechanického aktuátoru a poddajné soustavy těles.
3. Vytvoření co-simulačního propojení této soustavy a simulace jejího chování.

Seznam odborné literatury:

Edward J Haug: Computer Aided Kinematics and Dynamics of Mechanical Systems, Allyn and Bacon, 1989.

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

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

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/2014.

V Brně, dne 20. 11. 2013

L.S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
Ředitel ústavu

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

Abstrakt

Táto práca sa zaoberá návrhom a vytvorením virtuálneho prototypu elektromagnetického aktuátora na tlmenie vibrácií. V prostredí programu FEMM bola vykonaná elektromagnetická analýza, z ktorej sa získali parametre elektromagnetu pre ďalšie simulácie. Následne bol vytvorený model mechatronickej sústavy elektromagnetického aktuátora v programe MATLAB/Simulink a model poddajného telesa v programe MSC ADAMS. V ďalšej časti tejto práce bolo vytvorené prepojenie týchto dvoch programov a následne v co-simulácii bolo zistené, nakoľko efektívne dokáže daný elektromagnetický aktuátor tlmiť vibrácie.

Abstract

This thesis deals with the design and construction of a virtual prototype of an electromagnetic actuator for vibration damping. By using FEMM, an electromagnetic analysis was performed to obtain critical parameters for future simulations. Furthermore, a MATLAB/Simulink-based mechatronic model was designed and a flexible body model was created by using MSC ADAMS. In the next part of this work a connection between these two software was established and afterwards this co-simulation showed, how effective is the damping of vibrations when using this electromagnetic actuator.

Kľúčové slová

elektromagnetický aktuátor, pasívne tlmenie vibrácií, elektromagnetická analýza, poddajné teleso, co-simulácia

Keywords

electromagnetic actuator, passive vibration damping, electromagnetic analysis, flexible body, co-simulation

Bibliografická citace

GARAMI, B. Virtuální prototyp electro-magnetického aktuátoru pro tlumení vibrací. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 50 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D..

Čestné prehlásenie

Prehlasujem, že som bakalársku prácu na tému „Virtuální prototyp electro-magnetického aktuátoru pro tlumení vibrací“ vypracoval samostatne s použitím odbornej literatúry a prameňov uvedených v zozname, ktorý tvorí prílohu tejto práce.

27.5. 2014

.....
Boris Garami

Pod'akovanie

Na tomto mieste by som rád vyjadril svoje pod'akovanie vedúcemu mojej bakalárskej práce Ing. Zdeňku Hadašovi, Ph.D. za všetku jeho ochotu, čas, seriózny prístup a cenné rady, ktoré mi poskytol počas vypracovania tejto práce.

Obsah

1	Úvod	9
2	Motivácia a cieľ práce	10
3	Princípy tlmenia vibrácií	11
3.1	Piezoelektrické tlmiče	11
3.2	Dielektrické elektroaktívne polyméry	12
3.3	Reologické tlmiče	14
4	Elektro-magnetické princípy tlmenia	16
4.1	Elektromagnetická teória	16
4.2	Tlmič vírivých prúdov	18
4.3	Reaction Mass Actuator (RMA)	19
4.4	Elektromagnetický lineárny tlmič so skrutkovým prevodom	21
4.5	Lineárny tlmič s permanentnými magnetmi	21
5	Voľba koncepcie tlmiča	26
6	Návrh elektromagnetického aktuátora (EMA)	28
6.1	Elektromagnetická analýza	28
6.2	Model mechatronickej sústavy s EMA	32
6.3	Modálna a pevnostná analýza nosníkov	35
6.4	Analýza použitia mechatronického tlmiča pre potreby tlmenia mechanickej štruktúry	37
6.5	Modelovanie poddajného telesa v MSC ADAMS	38
7	Co-simulácia a výsledky simulácií	41
7.1	Stabilizácia modelu poddajného telesa po spustení co-simulácie	41
7.2	Tlmené a netlmené kmitanie modelu poddajného telesa	42
8	Možnosti ďalšieho rozvoja	46
9	Záver	47
10	Zoznam použitých zdrojov	48
	Zoznam obrázkov	50

1 Úvod

Pravdepodobne nik nebude pochybovať o tom, nakoľko dôležitou súčasťou dnešných strojov a zariadení sa stali zariadenia slúžiace na detekciu a následné tlmenie vibrácií. Je nám známe, aké nebezpečné následky môžu byť zapríčinené nedostatočným, resp. žiadnym tlmením otrasov. Pri návrhu a realizácii moderných inžinierskych projektov sa kladie mimoriadny ohľad na to, aby sa pracovné body zariadenia pohybovali čo najďalej od stavov, kedy nastane rezonancia, ktorá vedie k následnému poškodeniu prípadne deštrukcii zariadenia. Ďalšou dôležitou úlohou je aj redukovanie a minimalizovanie vibrácií, prípadne ich úplne utlmenie.

Dnešné technológie, predovšetkým vysoko vyspelé možnosti modelovania a analýzy zariadení pomocou softwaru, nám umožnili určovanie týchto kritických stavov – rezonancií ešte pred samotným testom zariadení v ich fyzickej realizácii. Istotne by ste súhlasili s tvrdením, že sa v podstate každý moderný mechatronický mechanizmus navrhuje najprv pomocou 3D programov. Ich 3D virtuálne geometrie sme následne schopní importovať a analyzovať pomocou komplexných metód, ktoré nám dnešné Multibody systémy poskytujú. Či sa jedná už o statickú alebo dynamickú analýzu, niet hraníc pre naše potreby. Rovnako dôležitou časťou sú aj komplexné metódy regulácie a vytvorenia elektro-mechanických modelov popisujúcich daný dynamický systém. Nesmieme zabudnúť ani na možnosti modálnych analýz, simulácie deformácií, rezonančných tvarov geometrie, tepelné dilatácie...

Všetky tieto postupy nám umožňujú dôkladné prešetrenie mechatronických systémov bez ohľadu na ich komplexnosť, či veľkosť. Naše postupy sme schopní aplikovať od miniatúrnych realizácií, ako je tlmenie vibrácií čítacej hlavy mechanického pevného disku, až po obrovské mechanizmy, ako sú rakety, ktoré transportujú citlivé zariadenia do vesmíru. Ich ochrana pred otrasmi pri štarte a počas cesty je kritickou úlohou tlmičov. V neposlednom rade, použitie týchto technológií nám môže spríjemniť aj komfort pri jazde motorovým vozidlom, zvýšiť bezpečnosť proti šmyku a celkovej schopnosti koordinácie zariadenia.

V tejto práci sa budem spočiatku venovať teoretickej analýze moderných metód tlmenia vibrácií, popisu jednotlivých princípov. Nosnou časťou teoretickej časti tejto práce budú predovšetkým možnosti elektromagnetického tlmenia vibrácií.

Jadro tejto práce spočíva vo vytvorení virtuálneho prototypu mechatronickej sústavy použitím moderných programov. Vhodná voľba parametrov elektromagnetu je kritická na to, aby sa dosiahlo čo najlepšieho tlmenia vibrácií. V dôsledku toho sa vykoná elektromagnetická analýza, z ktorej sa získajú dôležité vstupné parametre pre ďalšie modelovanie mechatronickej sústavy. Následne prepojením modelu elektromagnetu (MATLAB/Simulink) s modelom tlmeného poddajného telesa (MSC ADAMS) sa analyzuje efektívnosť tlmenia pomocou daného elektromagnetického aktuátora.

2 Motivácia a cieľ práce

V tejto práci sa budem venovať návrhu a analýze vlastností elektromagnetického aktuátora. Zistiť, či je možné tlmiť vibrácie prídržným elektromagnetom s permanentným magnetom a zároveň zistiť, nakoľko účinne bude daný mechatronický systém vibrácie tlmiť.

Cieľom práce je modelovanie elektromagnetického aktuátora ako mechatronického systému pomocou moderných postupov v rozličných softwaroch. Správna voľba výsledných parametrov daného tlmiča bude závisieť od výsledkov týchto simulácií, z ktorých získame všetky potrebné údaje na vytvorenie simulácie tlmenia vibrácií.

Program FEMM nám umožní získať údaje popisujúce elektromagnetické vlastnosti aktuátora. Simulácia tlmenia vibrácií bude realizovaná v prostredí MATLAB SIMULINK, ktorá bude nakoniec prepojená v co-simulácii s programom ADAMS, v ktorom budeme modelovať model tlmeného poddajného telesa. Na určenie parametrov tlmeného systému sa vykoná aj modálna a statická štrukturálna analýza v programe ANSYS Workbench.

Záver práce bude tvorený zhodnotením výsledkov co-simulácie, z ktorej budeme schopný vyhodnotiť účinnosť tlmenia vibrácií a celkovú vhodnosť daného elektromagnetického aktuátora ako tlmiča.

3 Princípy tlmenia vibrácií

Konvenčné metódy tlmenia vibrácií sú pre dnešné moderné aplikácie nie vždy plne vyhovujúce. Aplikácie typu hltičov vibrácií alebo ladených tlmivých vibrácií sú zväčša limitované na určitú hodnotu frekvencie, ktorá je pre daný tlmivý systém kritická. Nedokážeme nimi tmiť rozličné frekvencie – nemáme priamu aktívnu kontrolu nad ich správaním. Dôsledkom týchto nevýhod sa postupne vyvinuli riešenia, ktoré sú na tlmenie vibrácií viac či menej lepšie.

Medzi dnešnú kategóriu „SMART“ tlmivých môžeme zaradiť niekoľko metód. Využitie piezomateriálov za účelom tlmenia vibrácií sa javí ako veľmi úspešné riešenie pre dnešné potreby. Základným princípom fungovania piezoelektrických materiálov spočíva v ich deformácii a natáhaní v dôsledku pôsobenia elektrického poľa. K dispozícii máme riešenia vo forme piezoelektrických aktuátorov, prípadne vo forme piezostackov.

Dielektrické elektroaktívne polyméry „DEAP“ [1] sa taktiež radia do kategórie SMART materiálov. Táto technológia je relatívne nová a jej princíp je založený na stimulácii elastomérového filmu vysokým napätím, čo vyvolá jeho deformáciu. Vhodnou konštrukciou tohto DEAP dokážeme skonštruovať aktuátory, ktoré sú schopné tlmenia vibrácií. Zároveň, DEAP vieme použiť aj v generátorickom režime.

Hydraulické tlmivce sú taktiež limitované konštantným koeficientom útlmu, resp. pneumatické tlmivce s ventilmi majú obmedzenú možnosť regulácie tlmenia aj to zväčša do frekvencie okolo 5 Hz. Veľmi dobrým a sofistikovaným riešením tlmivca na podobnom princípe sú elektoreologické alebo magnetoreologické tlmivce, u ktorých sme schopný aktívne regulovať viskozitu kvapaliny či už elektrickým alebo magnetickým poľom. Tlmivce založené na už spomenutom princípe sa aktívne začali používať v moderných dopravných prostriedkoch.

Veľká skupina zariadení na tlmenie vibrácií je založená na princípe elektromagnetizmu. Tieto zariadenia dokážu pracovať v aktívnom i poloaktívnom režime, mnohé z nich sú konštruované tak, aby mohli dodávať do systému spätnú energiu. Princíp elektromagnetického tlmenia môže byť realizovaný mnohými metódami za použitia rozličných konštrukcií a komponentov. Tejto časti tlmenia je venovaná celá 4. kapitola, kde sa budem podrobnejšie venovať jednotlivým princípom i konkrétnym realizáciám.

3.1 Piezoelektrické tlmivce

Bežne používané pohony/aktuátory môžu dosiahnuť predĺženie až do 0,2% [2]. Toto natiahnutie je primárne funkciou intenzity elektrického poľa E a dĺžky L aktuátora. Vlastnosti piezoelektrického materiálu popisujeme piezoelektrickými napäťovými koeficientami d_{ij} – tento parameter popisuje závislosť medzi veľkosťou aplikovaného elektrického poľa a vzniknutým mechanickým napätím.

Zmena dĺžky ΔL [m] nezaťaženej jednovrstvovej piezoelektrického aktuátora sa dá vyjadriť vzťahom:

$$\Delta L = S L_0 = \pm E d_{ij} L_0 \quad (1)$$

kde, L_0 [m] je dĺžka keramiky, S [–] je relatívne predĺženie, E [V/m] je intenzita elektrického poľa a d_{ij} [m/V] je piezoelektrický koeficient materiálu.

Maximálna sila F_{max} [N] [3], ktorú piezoelektrický aktuátor dokáže vyvinúť, je daná približne vzťahom:

$$F_{max} \approx k_T * \Delta L_0 \quad (2)$$

kde k_T [N/m] je tuhosť piezo-aktuátora a ΔL_0 [m] je maximálne predĺženie bez vonkajšieho zaťaženia.

Rýchlosť expandovania piezoelektrického aktuátora je významnou výhodou oproti iným aplikáciám. Rýchla zmena riadiaceho napätia spôsobí rýchlo zmenu pozície daného aktuátora. Táto vlastnosť je veľmi dôležitá predovšetkým na tlmenie vibrácií.

Piezoelektrický aktuátor dokáže nadobudnúť nominálnu hodnotu predĺženia za približne 1/3 periódy rezonančnej frekvencie [4] (v prípade, že riadiaca jednotka dokáže dodávať potrebný elektrický prúd).

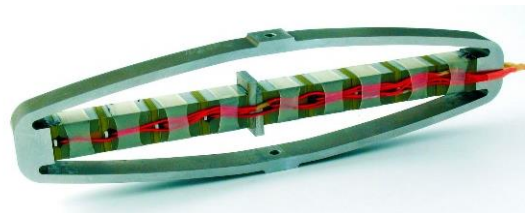
$$T_{min} \approx \frac{1}{3f_0} \quad (3)$$

Príklad: Piezoaktuátor, ktorý má hodnotu rezonančnej frekvencie 10 kHz vie dosiahnuť nominálnu zmenu dĺžky za 30 μ s.

Rozličné realizácie piezoelektrických zariadení, s ktorými sme schopný tlmiť vibrácie, môžeme vidieť na obr. 3.1 a obr. 3.2. Na obr. 3.1 je piezoelektrický aktuátor výrobcom určený aj na tlmenie vibrácií [5]. Piest je schopný kmitania dostatočne vysokou frekvenciou a dostatočne veľkou silou na to, aby sme ho mohli využiť ako aktívny tlmič. Ďalším riešením je aktívny piezoaktuátor špeciálneho tvaru, ktorý je na obr. 3.2 [6]. Vo vnútri eliptického rámu je umiestnený piezostack, na ktorý je privedené napätie. Tento aktuátor/tlmič je výhodný predovšetkým kvôli vysokej životnosti a oveľa vyššiemu rozťahnutiu oproti konvenčným piezoelektrickým aktuátorom.



Obrázok 3.1: Lineárny piezoelektrický motor (prevzaté z [5])



Obrázok 3.2: Zosilňovaný piezoelektrický aktuátor (prevzaté z [6])

3.2 Dielektrické elektroaktívne polyméry

DEAP [1] sa v dnešnej praxi označujú často ako „smart“ materiály. Tieto materiály prešli významným vývojom za posledné roky a tak isto sa rozšírilo ich komerčné využitie.

DEAP môže byť využitý v dvoch režimoch. V režime „aktuácie“ nastáva elektrické stimulovanie vysokým napätím, ktoré vyvolá deformáciu elastomerového filmu – dôjde ku kompresii hrúbky a plošnej expanzii. V režime senzoru dochádza k mechanickej deformácii DEAP z externého zdroja, pričom dochádza k zmene kapacity, čo môžeme prisúdiť vyvolanému napätiu. V režime generátoru je natiahnuté DEAP zariadenie

nabité na vysoké napätie medzi elektródami, pričom pri postupnom uvoľnení zariadenia dochádza k nárastu napätia. Pri opakovaní tohto cyklu funguje ako generátor.

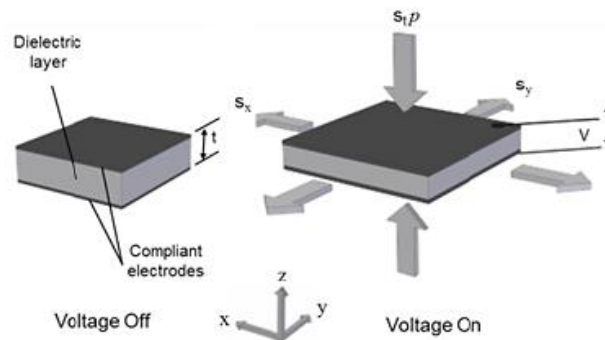
Princíp funkcie je jednoduchý – mechanické napätie je vyvolané ako následok pôsobenia elektrického poľa (vysokého napätia U [V] medzi elektródami). Toto mechanické napätie je všeobecne nazývané ako Maxwellovo napätie. Názorné zobrazenie fungovania je na obr. 3.3. V podstate sa DEAP správajú ako kondenzátory, kde tenký dielektrický film má obe opačné plochy obalené elektródami.

DEAP Materiály sú popísané dvoma základnými fyzikálnymi princípmi:

1. Vyvolaný tlak sa riadi Maxwellovou teóriou tlaku v súvislosti s pôsobiacim elektrostatickým poľom (E), permitivitou vákua ϵ_0 a dielektrickou konštantou (ϵ_r). Hodnota generovaného tlaku (p) pozdĺž DEAP filmu s hrúbkou (t) je daná vzťahom:

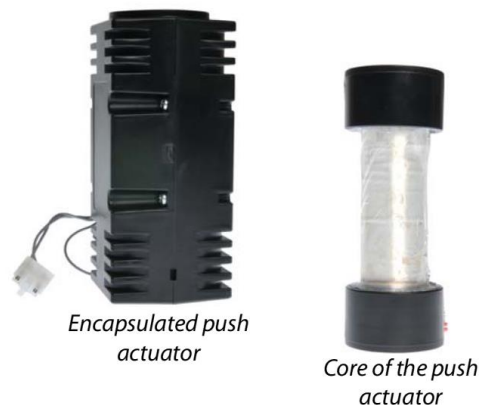
$$p = \epsilon_0 \epsilon_r E^2 = \epsilon_0 \epsilon_r \left(\frac{U}{t}\right)^2 \quad [Pa; Fm^{-1}, -, Vm^{-1}; Fm^{-1}, -, V, m] \quad (4)$$

2. Deformácia hrúbky je riadená napät'ovo-deformačnou teóriou mechaniky.



Obrázok 3.3: Princíp fungovania DEAP technológie firmy DANFOSS (prevzaté z [1])

Ako konkrétnu aplikáciu DEAP technológie uvediem InLastor Push element (obr. 3.4) [7]. Tento aktuátor pracuje vo výtlačnom režime. Pôsobením elektrického napätia dôjde k zväčšeniu celkovej dĺžky jadra aktuátora, prípadne vzniku tlačnej sily vo veľkosti 6,5 N. Daný aktuátor bol úspešne použitý v experimente, kde vhodným riadením elektrického poľa bol schopný utlmiť vibrácie od vibračnej plošiny.



Obrázok 3.4: Aktuátor pracujúci na princípe DEAP technológie (prevzaté z [7])

3.3 Reologické tlmiče

V oblasti semi-aktívnych sa čoraz viac stretávame so zariadeniami pracujúcimi na princípe ne-newtonovských kvapalín. Tieto zariadenia, ktoré sú konštruované na tlmenie označujeme ako reologické tlmiče. Globálne rozdeľujeme tieto tlmiče na dve veľké skupiny – elektroreologické alebo magnetoreologické tlmiče.

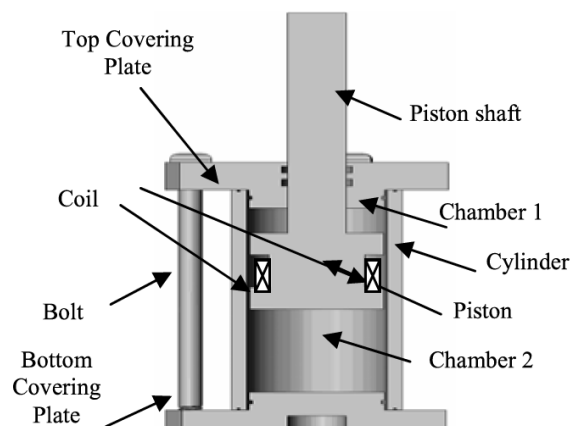
3.3.1 Magnetoreologické tlmiče

Posledné štúdie popisujú kombinované vlastnosti týchto zariadení – implementáciou „pružných kvapalín“ získame zariadenie značené ako CMRFD-LS („Compressible magneto-rheological fluid damper – liquid spring“). Vnútorňý tlak v oboch komorách okolo piestu vytvára už spomínanú pružnú silu, pričom rozdielny tlak pozdĺž piestu pôsobí tlmivým účinkom (pri toku MR tekutiny vo vnútri piestu) [8].

MR kvapalina sa skladá zo suspenzie mikroskopických magnetizovateľných častíc v nemagnetickom médiu (najčastejšie syntetický olej). Vytvorením magnetického poľa v okolí MR kvapaliny dôjde k stavu, že sa kvapalina začne správať ne-newtonovským charakterom – mikroskopické častice rozpustené v médiu začnú vytvárať uniformne orientované reťazce okolo siločiar magnetického poľa. Táto vnútorná zmena sa prejaví vo zmene reologických vlastností kvapaliny. V prípade, keď nastane tok MR kvapaliny v smere kolmom na siločiar MP, odpor mikročasticových reťazcov spôsobí vznik napätia na medzi sklzu. Ak však magnetické pole pôsobí na kvapalinu tečúcu v úzkom páse, siločiar MP preklenú medzeru a tekutina sa začne správať ako ne-newtonovská kvapalina – Bingham plastic [9].

Semi-aktívny systém odpruženia obvykle pozostáva z pružiny a tlmiča s nastaviteľnou hodnotou tlmenia. V našom prípade, ako bolo už spomenuté vyššie, pružnú charakteristiku získame silikónovým olejom, ktorý za vhodných podmienok je stlačiteľný a tým nahrádza funkciu klasickej pružiny v danom systéme.

Konštrukciu CMRFD-LS môžeme vidieť na obr. 3.5. Jeho konštrukcia je navonok podobná klasickej hydraulickému tlmiču, až na to, že v hlave piestu sa nachádza vinutie a namiesto hydraulickej kvapaliny sa používa MR kvapalina stlačiteľného charakteru. Pri pohybe piestu nastáva tok MR kvapaliny, čo spôsobí zmenu tlaku MR kvapaliny jednotlivých komorách tlmiča. Rozdiel a zmena tlaku je závislá na viskozite MR kvapaliny. Silové charakteristiky tlmiča priamo závisia na vnútornom tlaku a na geometrii hlavy piestu [8].



Obrázok 3.5: Vnútorňá konštrukcia magnetoreologického tlmiča (prevzaté z [8])

Dnes sa tieto MR tlmiče bežne používajú, najznámejšie použitie je práve v automobilovom priemysle. Pri použití modernej elektroniky, regulácie a riadenia, sme schopný regulovať viskozitu MR kvapaliny na úrovni niekoľkých *ns*.

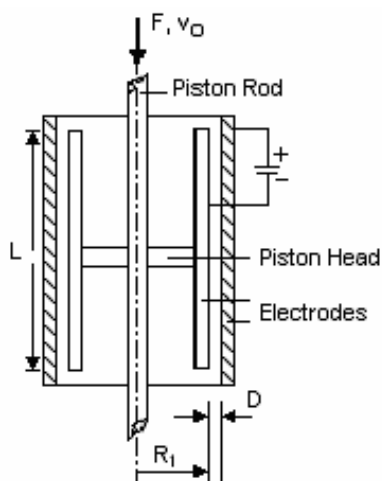
3.3.2 Elektoreologické tlmiče

Elektoreologické tlmiče sú založené na veľmi podobnom princípe tlmenia ako magnetoreologické – v zmene viskozity kvapaliny a tým aj koeficientu útlmu. Ich zásadný rozdiel spočíva v tom, že ER kvapaliny menia svoju viskozitu vplyvom externého elektrického poľa, nie magnetického.

ER kvapaliny obsahujú polarizovateľné pevné častice disperzované v nevodivom oleji. V prípade aktivovania elektrického poľa dochádza k polarizácii týchto rozpustených častíc – nastane formovanie reťazových štruktúr pozdĺž elektrického poľa. Tieto štruktúry zapríčinia zmenu reologických vlastností danej kvapaliny, to jest prechod z kvapalného charakteru na tuhý. ER kvapaliny sú významné predovšetkým veľmi rýchlou zmenou týchto vlastností, čo znamená takmer okamžitú reakciu na zmenu v intenzite pôsobiaceho elektrického poľa.

Konštrukcia ER tlmiča je znázornená na obr. 3.6– koncentrický valec a piest majú zároveň aj funkciu elektród. Pôsobením externej sily na piest sa začne piest pohybovať oproti valcu a poklesu tlaku medzi jednotlivými komorami piestu. V dôsledku daného poklesu tlaku nastane tok ER kvapaliny medzi komorami cez priestor medzi piestom a valcom. Rýchlosť toku je možné takmer okamžite regulovať intenzitou elektrického poľa vzniknutého medzi elektródami a tým v podstate ovládať tlmenie daného zariadenia [10].

Kvôli vyššie spomenutým výhodám a predovšetkým extrémne rýchlym reakciám ER kvapaliny na zmeny elektrického poľa sa tieto tlmiče stali veľmi významným riešením v oblasti semi-aktívneho a predovšetkým aktívneho tlmenia. Konkrétnu realizáciu elektoreologického tlmiča s aktívnym riadením môžeme vidieť na obr. 3.7. Daný tlmič má v sebe zakomponovaný senzor RheCon®, ktorý posiela signál do ovládača DampCon®, kde je spracovaný a následne pomocou integrovaného zosilňovača je následne menený fyzikálny charakter ER kvapaliny tak, aby bolo dosiahnuté očakávaného účelu [11].



Obrázok 3.6: Vnútorú konštrukcia elektoreologického tlmiča (prevzaté z [10])



Obrázok 3.7: Elektoreologický tlmič FLUDICON RheDamp® (prevzaté z [11])

4 Elektro-magnetické princípy tlmenia

Implementácia elektromagnetizmu v tlmení vibrácií prináša so sebou mnoho výhod a predovšetkým obrovské množstvo realizácií, pomocou ktorých vieme vhodne redukovať vibrácie dynamických systémov. Veľkou výhodou týchto riešení spočíva aj vo viacerých možnostiach riadenia daných tlmičov. V prípade aktívneho riadenia elektromagnetického tlmiča aktívne dodávame elektrickú energiu do systému; poloaktívne riadenie môže byť realizované riadením istého parametru (napr. odporu) a tým ovplyvňovať priebeh inej veličiny systému. V neposlednom rade, pasívnym riadením môžeme dosiahnuť to, aby sa daný mechatronický systém utlmil vhodným spôsobom sám. V poslednej dobe sa často navrhujú systémy na tzv. „energy harvesting“, kedy dochádza k premene energie z mechanických vibrácií na elektrickú energiu, ktorú môžeme využiť na rozličné účely (napr. napájanie svietidiel z vibrácií mostu).

4.1 Elektromagnetická teória

Prv než sa začneme venovať jednotlivým typom a realizáciám tlmičov založených na elektromagnetických princípoch, je potrebné, aby sme si vysvetlili základné zákonitosti a metódy, na základe ktorých dané systémy fungujú.

Hodnota indukovaného elektromotorického napätia vo vodivej slučke je rovná rýchlosti zmeny magnetického indukčného toku Φ_B prechádzajúceho touto slučkou [12]:

$$\varepsilon = - \frac{d\Phi_B}{dt} \quad [V; Wb] \quad (5)$$

Zároveň uvažujeme, že magnetický indukčný tok plochou S je daný

$$\Phi_B = \int_S \mathbf{B} d\mathbf{S} \quad [Wb; T]$$

Po úprave týchto vzťahov dostaneme rovnicu pre hodnotu indukovaného elektromotorického napätia pohybujúceho sa vodiča dĺžky l rýchlosťou v v magnetickom poli

$$\varepsilon = B l v \quad [V; T, m, ms^{-1}] \quad (6)$$

Resp. pre N závitov platí

$$U_i = \oint_l (\vec{v} \times \vec{B}) dl = v B_x l N \quad [V; T, m, ms^{-1}, -] \quad (7)$$

Smer indukovaného prúdu je daný Lenzovým zákonom: Indukovaný prúd má taký smer, že magnetické pole týmto prúdom vyvolané pôsobí proti zmene magnetického poľa, ktorá prúd indukovala. Jeho veľkosť určíme pomocou Kirchoffovho zákona pre napätie pozdĺž slučky

$$I = \frac{B L v}{R} \quad [A; \frac{T, m, ms^{-1}}{\Omega}] \quad (8)$$

Na každú časť vodivej pohybujúcej sa slučky v magnetickom poli pôsobí sila

$$\mathbf{F} = I \mathbf{L} \times \mathbf{B} [N; A, m, B] \quad (9)$$

Výkon potrebný pre vytiahnutie slučky z magnetického poľa je daný vzťahom

$$P = v F = \frac{B^2 L^2 v^2}{R} [W, m s^{-1}, N; \frac{T, m, m s^{-1}}{\Omega}] \quad (10)$$

Pre popis magnetického poľa v okolí vodiča, ktorým tečie elektrický prúd používame Biotov-Savartov zákon – veľkosť magnetickej indukcie $d\mathbf{B}$ vytvorené v ľubovoľnom bode P prúdovým elementom $I d\mathbf{s}$ [13]:

$$d\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\mathbf{s} \times \mathbf{r}}{r^3} \quad (11)$$

Kde μ_0 [Hm^{-1}] je permeabilita vákua, \mathbf{r} [m] je polohový vektor smerujúci od prúdového elementu k bodu P .

Daný zákon vieme aplikovať pre naše potreby a popísať vektor magnetickej indukcie v okolí vodičov, ktorými preteká elektrický prúd:

- Pre magnetické pole priameho dlhého vodiča platí

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi R} \quad (12)$$

- Pre magnetické pole kruhového oblúku platí

$$B = \frac{\mu_0 I ds}{4\pi R^2} \quad (13)$$

Následne, aplikáciou Ampérového zákona sme schopný odvodiť magnetické polia solenoidu a toroidu – vzťah medzi elektrickým prúdom a magneticou indukciou je daný rovnicou:

$$\oint \mathbf{B} d\mathbf{s} = \mu_0 I_c \quad (14)$$

- Pre magnetické pole vo vnútri solenoidu, ktorým preteká prúd I , je v bodoch vzdialených od koncov solenoidu veľkosť magnetickej indukcie rovná

$$B = \mu_0 I n \quad (15)$$

kde n je počet závitov pripadajúcich na jednotku dĺžky solenoidu.

- Pre magnetické pole vo vnútri toroidu s N závitmi je veľkosť magnetickej indukcie daná vzťahom

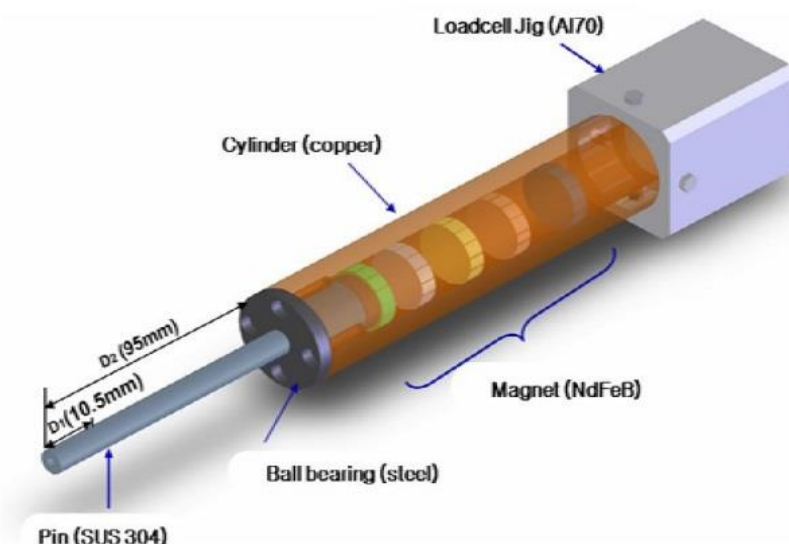
$$B = \frac{\mu_0 I N}{2\pi r} \quad (16)$$

kde r je vzdialenosť medzi stredom toroidu a bodom, v ktorom indukciu určujeme. Vo vnútri toroidu je $B = 0$.

4.2 Tlmič vírivých prúdov

Vírivé prúdy vznikajú, keď pohybujúci sa nemagnetický vodič pretne stacionárne magnetické pole (resp. je umiestnený do časovo premenného magnetického poľa), prípadne naopak. Relatívny pohyb medzi vodičom a magnetickým poľom indukuje cirkuláciu vírivých prúdov vo vodiči. Cirkulujúci vírivý prúd indukuje svoje vlastné magnetické pole opačnej polarity ako má pole, ktoré ho vyvolalo – tým vznikne odporová sila. V dôsledku elektrického odporu však tieto prúdy postupne zaniknú, čím zanikne aj už spomenutá odporová sila – za následok to má disipáciu energie kmitavého systému. Keďže indukovaná odporová sila vírivými prúdmi je priamo úmerná relatívnej rýchlosti, vodič s magnetom môžu teoreticky fungovať ako istá forma viskózneho tlmiča.

Návrh aj realizáciu tlmiča pracujúcom na princípe vírivých prúdov môžeme vidieť na obr. 4.1. Konštrukcia daného tlmiča je realizovaná pomocou permanentných magnetov, ktoré sa pohybujú v medenej trubici. Magnety sú navzájom otočené takým spôsobom, aby sa navzájom odpudzovali – týmto sme celý tlmič úplne zbavili potreby využitia pružiny, keďže už spomenutá odpudivá sila medzi magnetmi jeho funkciu kompletne nahradila. Zároveň, využitím radiálneho magnetického toku, ktorý je takmer kolmý na plochu medenej trubice, vznikajú už spomenuté vírivé prúdy [14].



Obrázok 4.1: Tlmič vírivých prúdov (prevzaté z [14])

4.3 Reaction Mass Actuator (RMA)

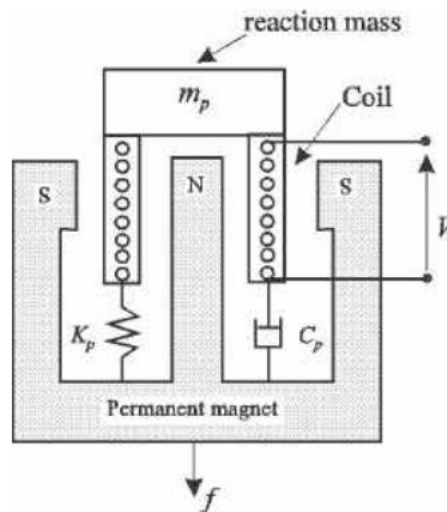
RMA aktuátory/tlmiče sú konštrukčne podobné TMD tlmičom (Tuned mass damper) v tom, že tiež pracujú na princípe pohybujúcej sa hmoty okolo pevnej základne (vhodne pripevnenej a umiestnenej na tlmenom systéme). Výhodou RMA je však to, že dokážu aktívne kontrolovať/riadiť pohybujúcu sa masu voči tlmenému systému. Táto schopnosť aktívneho ovládania tlmiacej hmoty je zväčša realizovaná aktuátorom na báze kmitavej cievky s permanentným magnetom.

Pre prípad aktívneho tlmenia sa v systéme vždy nachádza akcelerometer umiestnený v blízkosti základne RMA. Využíva sa na spätnoväzbovú reguláciu, čím získame minimálnu fázu frekvenčnej odozvy na frekvenciách nad rezonanciou RMA systému.

Základné parametre RMA aktuátora/tlmiča sú zdvih aktuátora a tak isto veľkosť sily, ktorú daná cievka dokáže vyvinúť. Limitujúcim faktorom RMA tlmiča je predovšetkým veľkosť zdvihu, ktorý je limitovaný rezonančnou frekvenciou samotného RMA. Rezanančná frekvencia RMA sa zväčša pohybuje dostatočne pod hodnotou tlmenej vlastnej frekvencie (zjednodušenie návrhu regulácie), prípadne sa pohybuje presne na úrovni danej vlastnej frekvencie (zníženie potrebnej elektrickej energie na tlmenie).

Pomocou obrázka 4.2 si vieme detailne popísať princíp fungovania RMA. Urýchlením telesa m_p nastane reakcia vo forme silového pôsobenia na tlmené teleso [15]. „Reakčné“ teleso je pripevnené k základnému telesu dvojitým charakterom:

1. Pružný charakter popísaný tuhosťou pružiny K_p ,
2. Tlmiaci charakter popísaný koeficientom tlmenia C_p (b)



Obrázok 4.2: Princíp fungovania RMA (prevzaté z [15])

Prenosová funkcia popisujúca súvis vyvinutej sily elektromagnetickým aktuátorom F_a a výchylkou „reakčnej“ hmoty je daná vzťahom:

$$\frac{X}{F_a} = \frac{1}{m_p s^2 + C_p s + K_p} = \frac{1}{m_s (s^2 + 2\xi_p \omega_p s + \omega_p^2)} \quad (17)$$

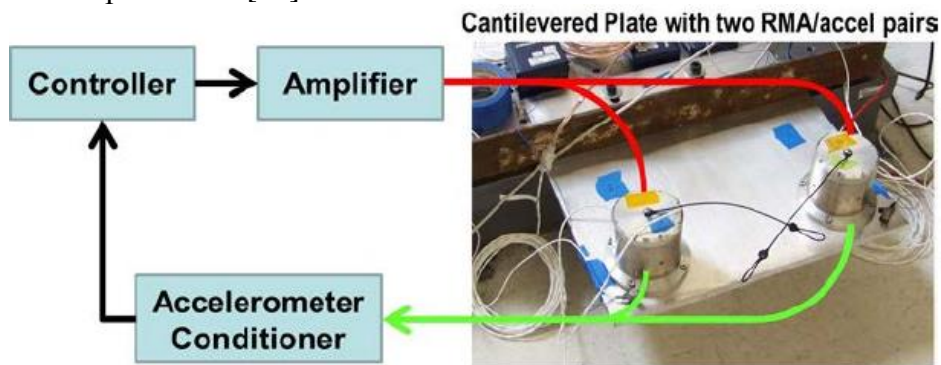
Zároveň, zrýchlením „reakčného“ telesa je sila F pôsobiaca na tlmené teleso daná vzťahom:

$$F = -m_p \ddot{x} \quad (18)$$

Prenosová funkcia medzi F_a a F je daná vzťahom:

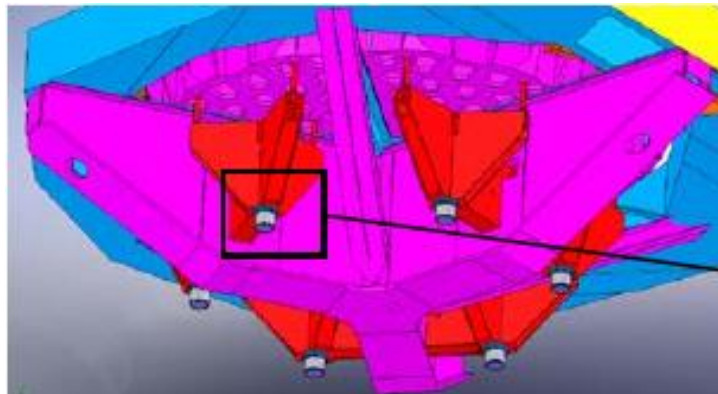
$$\frac{F}{F_a} = \frac{-s^2}{s^2 + 2\xi_p \omega_p s + \omega_p^2} \quad (19)$$

Väčšina praktických aplikácií aktívneho tlmenia vibrácií požaduje využitie viacerých aktuátorov na to, aby sme dosiahli požadovanú hodnotu tlmenia. Využitie viacerých menších RMA na optimalizovaných miestach nám prinesie lepšie výsledky, ako keby sme použili jeden veľký RMA – predovšetkým v systémoch, kde je kinetická energia súvisiaca s danou vlastnou frekvenciou koncentrovaná na viacerých miestach. Na obr. 4.3 môžeme vidieť skúšobnú verziu jednoduchého 2x2 „Multiple Input Multiple Output“ MIMO systému. Táto zostava bola použitá ako skúšobný systém pre tlmenie vibrácií teleskopu SOFIA [16].



Obrázok 4.3: Skúšobný systém tlmenia vibrácií v realizácii 2x2 MIMO (prevzaté z [16])

Konkrétne umiestnenie RMA môžeme vidieť na obr. 4.4. Presné pozície umiestnenia boli určené na základe modálnych analýz celej zostavy SOFIA teleskopu.

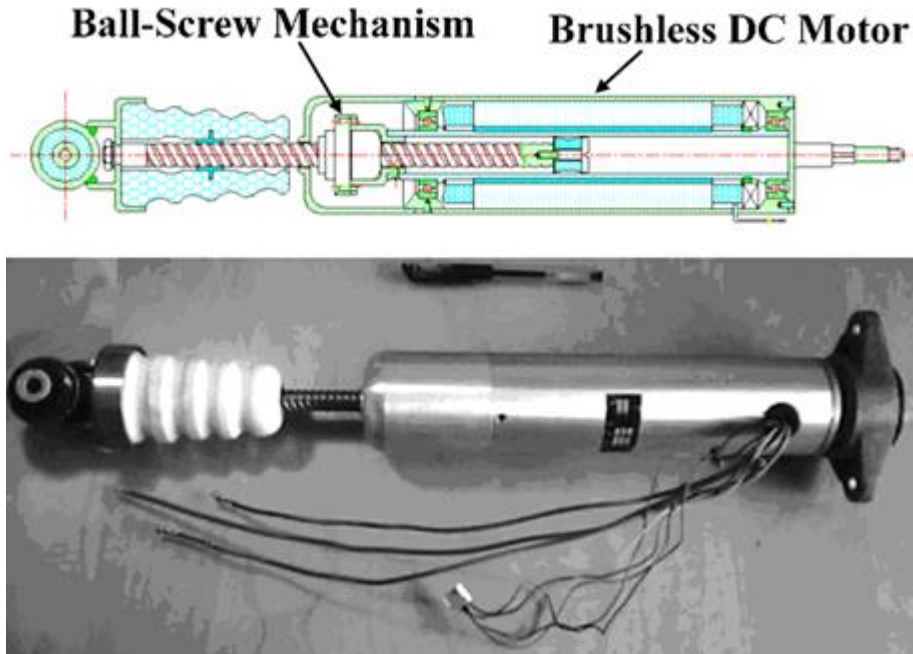


Obrázok 4.4: Model umiestnenia RMA tmičov na teleskope SOFIA (prevzaté z [16])

Realizácia elektromagnetického tmiča v mojej práci by mohla byť implementovaná aj pre takýto účel. Vhodnou voľbou parametrov elektromagnetu a tak isto jeho umiestnením by sme mohli tlmiť vibrácie i takého citlivého zariadenia, ako je teleskop.

4.4 Elektromagnetický lineárny tlmič so skrutkovým prevodom

Základnými stavebnými jednotkami daného riešenia aktívneho tlmiča sú bezkartáčový DC motor s permanentnými magnetmi a skrutkový prevod (obr. 4.5), ktorý slúži ako prevod medzi lineárnym pohybom od vibrácií a točivým momentom DC motora [17].



Obrázok 4.5: Schematický prierez elektromagnetickým tlmičom so skrutkovým prevodom a jeho konkrétna realizácia (prevzaté z [17])

Prechodom po prekážkach/nerovnostiach terénu dôjde k otáčaniu rotora a tým aj k vzniku indukovaného napätia priamo úmerného otáčkam rotora v poli permanentných magnetov. Veľkosť elektrického prúdu tečúci motorom môžeme regulovať pripojenou záťažou do systému. Následne, daný elektrický prúd však v motore vyvolá elektromagnetické pole opačného charakteru/smeru a tým aj opačný moment, ktorý má za následok tlmenie daného lineárneho posuvu tlmiča.

Táto realizácia tlmiča je schopná pracovať v dvoch režimoch:

1. Semi-aktívny režim – riadime hodnotu indukovaného prúdu veľkosťou záťaže v systéme,
2. Aktívny – okrem riadenia zaradenej záťaže dochádza aj k dodávaniu energie do motora, čím vieme zabezpečiť ešte lepšiu kontrolu nad celkovým tmením.

Veľkou výhodou tohto riešenia je predovšetkým to, že daný systém dokáže pracovať aj v generátorickom režime a tým spätne dodávať energiu do systému.

4.5 Lineárny tlmič s permanentnými magnetmi

Topológia tlmiča opísaná v kapitole 4.4 nesie v sebe jednu veľkú a závažnú nevýhodu – straty v mechanickom prevode medzi lineárnym posuvom a rotáciou hriadeľa a tak isto nízka životnosť a zvýšená poruchovosť daného systému. Riešením týchto nedostatkov je paralelná aplikácia bezkartáčového tubulárneho motora s permanentnými magnetmi s mechanickou pružinou. Táto realizácia má vysokú účinnosť, perfektné vlastnosti lineárneho posuvu – jedná sa o aktuátor. Keďže sa v systéme nachádza mechanická

pružina podporujúca tlmenú hmotu, nie je potrebný neustály prívod elektrickej energie. Celkový koncept nám zaručí ako tlmenie vibrácií, tak aj aktívnu kontrolu nad polohou aktuátora.

K dispozícii máme niekoľko topológií lineárneho motora, ale najvhodnejšie sa javia dve z nich, pričom obe konštrukcie sú realizované lineárnym synchronným aktuátorom s permanentnými magnetmi. Usporiadanie magnetizácie hrá dôležitú úlohu na veľkosť vyvinutej sily. V nasledujúcich dvoch podkapitolách si rozoberieme konštrukciu s axiálne magnetizovaným severným a južným pólom so železnými pólmi a kvázi-halbachovým zoradením.

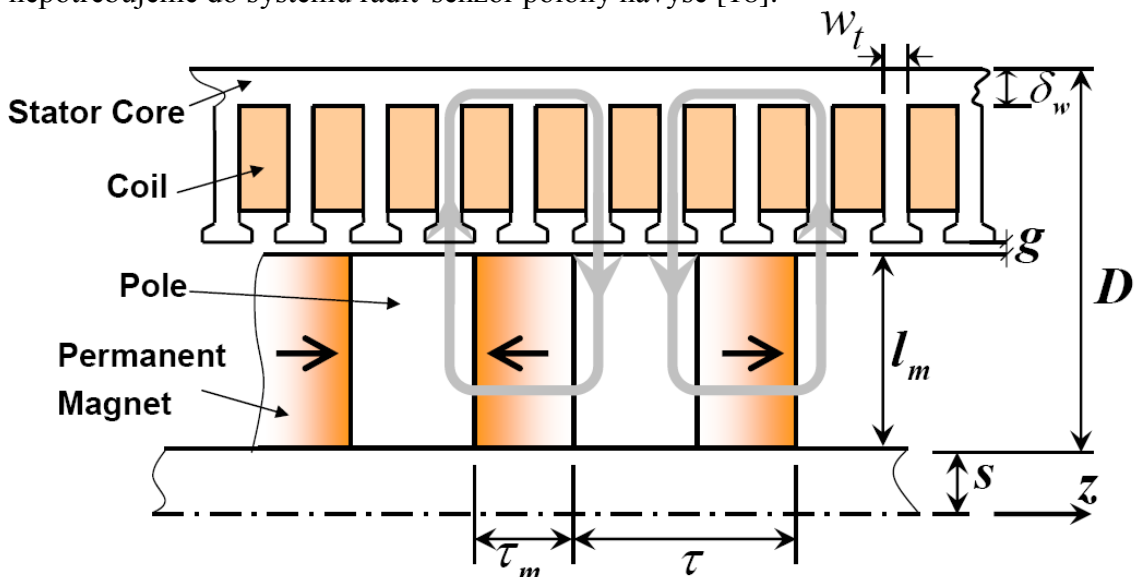
4.5.1 Lineárny tlmič s permanentnými magnetmi s axiálne magnetizovaným severným a južným pólom so železnými pólmi

Základ konštrukcie tomto typu EM tlmiča môžeme vidieť na obr. 4.6. Kotva je tvorená permanentnými magnetmi zmagnetizovanými axiálne, čím sme schopný vyvinúť vyššiu silu ako pri konfigurácii s radiálnou magnetizáciou. Medzi prstencovými magnetmi sa nachádzajú feromagnetické prstence, ktoré znižujú veľkosť vzduchovej medzere. Stator je tvorený navinutými cievkami.

Tlmič dokáže pracovať v troch režimoch:

1. pasívny režim – obvod s cievkami je skratovaný, resp. je do obvodu pevne zaradený odpor. Veľkosť tlmiacej sily je tým väčšia, čím je rýchlosť pohybu magnetov voči cievke väčšia,
2. semi-aktívny režim – elektrický obvod je skonštruovaný tak, aby sme mohli priamo meniť veľkosť zaradeného odporu a tým ovplyvniť aj veľkosť tlmiacej sily,
3. aktívny režim – okrem možnosti regulácie odporu aktívne púšťame do cievok prúd, čím sme schopný vyvinúť ešte väčšiu tlmiacu silu.

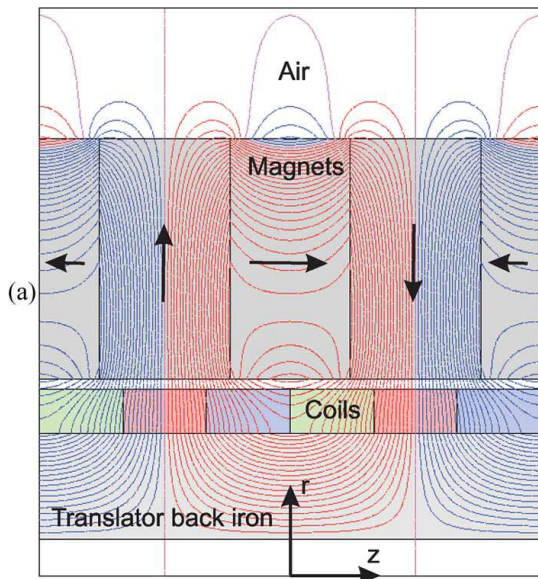
Zariadenie je schopné pracovať ako generátor vo všetkých troch režimoch. Ďalšou výhodou tejto realizácie je možnosť využitia hallovho javu na snímanie polohy, čím nepotrebujeme do systému radiť senzor polohy navyše [18].



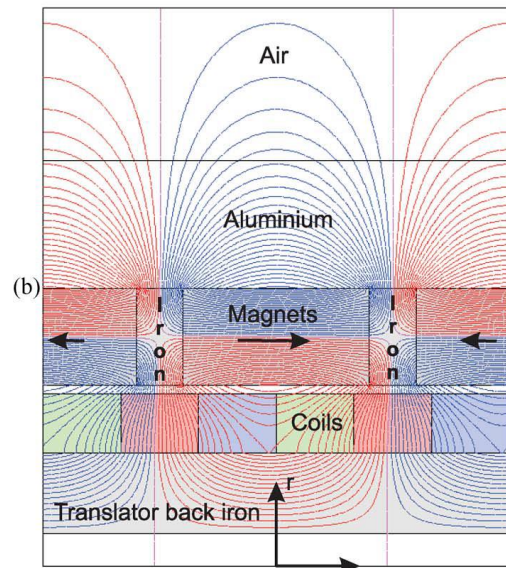
Obrázok 4.6: Schematický prierez lineárneho tlmiča s axiálnou magnetizáciou pólom (prevzaté z [18])

4.5.2 Lineárny elektromagnetický tlmič s permanentnými magnetmi s kvázi-halbachovou magnetizáciou

Druhá realizácia je zložená na konštrukcii s permanentnými magnetmi s kvázi-halbachovou magnetizáciou. Stator je tvorený 3-fázovým vinutím. Jeden pár radiálneho a axiálne zmagnetizovaného prstencového magnetu tvorí práve jeden pól kotvy. Na základe štúdií je možné jednoznačne vyvodiť záver, že táto konfigurácia dokáže vyvinúť najväčšiu silu. Výhodou tejto štruktúry je predovšetkým zníženie magnetického toku na vnútornej časti kotvy oproti axiálnej magnetizácii. Zároveň táto konfigurácia umožňuje radiálnemu magnetickému toku na kotve tiecť po uzavretej ceste (obr. 4.8). Možnou nevýhodou kvázi-halbachovej magnetizácie spočíva v nákladnosti výroby radiálne zmagnetizovaných magnetov [19].

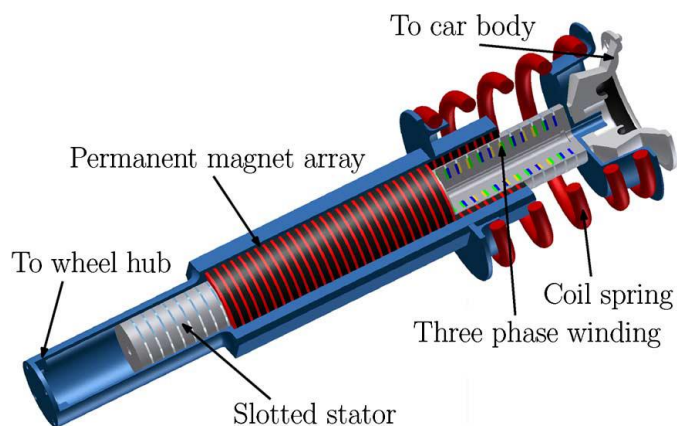


Obrázok 4.7: Magnetický indukčný tok kvázi-halbachovej štruktúry (prevzaté z [19])



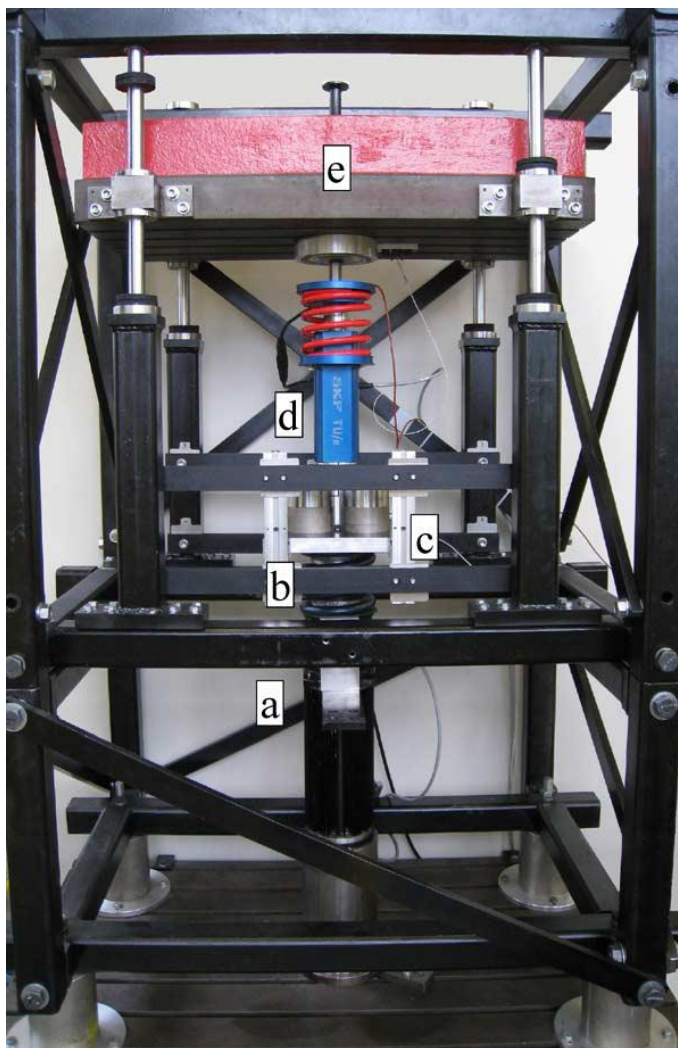
Obrázok 4.8: Magnetický indukčný tok axiálnej štruktúry (prevzaté z [19])

V článku [19], kde sa riešila konkrétna realizácia tohto tlmiča je popísaná a vyriešená konštrukcia – ktorá časť tlmiča bude obsahovať vinutie a ktorá permanentné magnety. Na základe FEM analýzy dospeli k záveru, že v prípade umiestnenia permanentných magnetov na vonkajšej časti tlmiča a vinutia statoru na vnútornej časti tlmiča (obr. 4.9) dôjde k zníženiu strát vo vinutí a tak isto k zníženiu celkovej teploty vnútra tlmiča oproti opačnej konfigurácii.



Obrázok 4.9: Konštrukcia lineárneho elektromagnetického tmiča s kvázi-hlabachovou magnetizáciou (prevzaté z [20])

Na obr. 4.10 môžeme pozorovať testovaciu aparatúru „štvrtinového modelu auta“, ktorý sa skladá z regulovateľného vibrátoru, testovaného EM tmiča a závažia predstavujúceho štvrtinovú hmotnosť BMW 530i. Výsledky testov sú veľmi pozitívne, došlo ku výraznému zvýšeniu komfortu pri jazde vozidlom a zároveň došlo k výraznému zlepšeniu manévrovateľnosti auta vďaka aktívnemu riadeniu daných tmičov [20].



Obrázok 4.10: Testovacia aparatúra tmiča pre BMW 530i (prevzaté z [20])

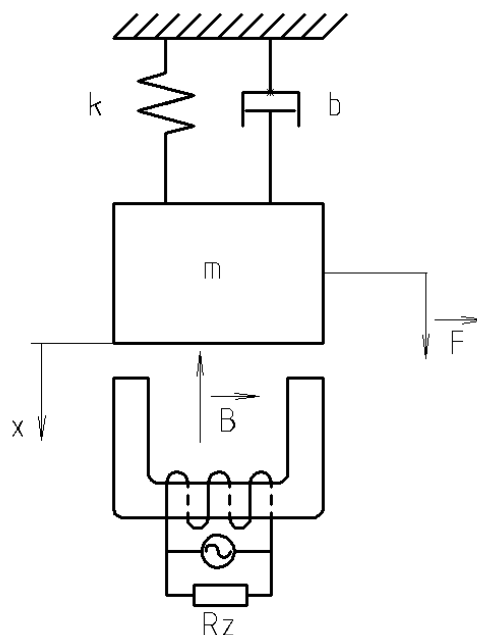
Režimy pracovania tohto tlmiča sú identické s režimami, ktoré boli opísané v kapitole 4.5.1.

Aplikáciu lineárneho elektromagnetického motoru využila firma BOSE ako náhradu za konvenčné typy odpruženia náprav automobilov. Štúdie vykazujú, že realizácie tlmenia podvozku pomocou pneumaticko-pružinových tlmičov pruženia alebo hydraulickým tlmením nie sú ani z ďaleka tak efektívne ako už spomínané lineárne elektromagnetické motory (LEM). Firma BOSE vyvinula kompletný systém tvorený kombináciou LEM, výkonových zosilňovačov a riadiacej jednotky, ktorá pomocou zložitých algoritmov dokáže daný systém ovládať. Automobil je vybavený senzormi, ktoré v reálnom čase snímajú povrch vozovky. Údaje sa následne vyhodnotia a riadiaca jednotka v správnom okamihu reaguje na povrch vozovky sťahovaním alebo roztáhovaním daných LEM.

5 Voľba koncepcie tmiča

Základná myšlienka elektromagnetického tmiča spočíva v tlení vibrácií modelu pomocou permanentného magnetu s cievkou. Kmitajúci model nad elektromagnetom spôsobí časovú zmenu spriahnutého indukčného toku, čo spôsobí indukované napätie. Toto časovo premenné napätie spôsobí zosilnenie resp. zoslabenie magnetického poľa permanentného magnetu. V konečnom dôsledku dôjde k tleniu kmitajúceho modelu.

V článku „*Damping of machine frame vibrations by an electro-magnetic actuator*“ od pána Ing. Juraja Steina, PhD bol predstavený koncept a návrh elektromagnetického tmiča, v ktorom bol použitý pridrzný elektromagnet s permanentným magnetom ako tmič. Tento koncept mechatronickej sústavy je zobrazený na obr. 5.1 a zároveň tvorí základnú myšlienku modelu tejto práce.



Obrázok 5.1: Schéma konceptu mechatronickej sústavy

Cieľom mojej práce je optimálny konštrukčný návrh jednotlivých parametrov mechatronickeho tmiča a tak isto určenie optimálnych rozmerov tlmenej sústavy, ktorú budeme schopný daným elektromagnetom tmiť s čo najvyššou efektivitou.

Celý princíp funkcie mechatronickej sústavy tmiča je založený na týchto modeloch:

- Pohybová rovnica pre mechanické kmitanie s jedným stupňom voľnosti:

$$\ddot{x} + 2b_p\Omega_0\dot{x} + \Omega_0^2x = \frac{F_m}{m} \quad (20)$$

kde \ddot{x} [ms^{-2}] je zrýchlenie, b_p [-] je pomerný útlm, Ω_0 [Hz] je vlastná frekvencia, \dot{x} [ms^{-1}] je rýchlosť, x [m] je výchylka, F_m [N] je sila od elektromagnetu a m [kg] je hmotnosť.

- Faradayov zákon elektromagnetickej indukcie

$$u_i(t) = -\frac{d\Phi_B}{dt} \quad (21)$$

- Model elektromagnetickej sily

$$\mathbf{F}_m = \int \mathbf{J} \times \mathbf{B} dV \quad (22)$$

kde \mathbf{J} [Am^{-2}] je prúdová hustota.

- Model elektroniky (Kirchoffove zákony)

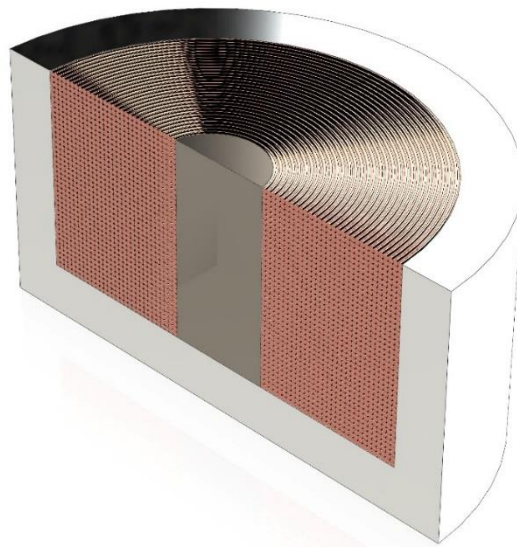
$$\frac{d\Psi_B}{dt} = R_L i + R_Z i \quad (23)$$

kde R_L [Ω] je odpor vinutia a R_Z [Ω] je odpor záťaže.

Tieto rovnice nám následne umožnia prepojiť celý mechanický a elektromagnetický systém pomocou použitia modelovania v prostredí MATLAB SIMULINK.

6 Návrh elektromagnetického aktuátora (EMA)

Koncept a návrh rozmerov elektromagnetického je kľúčový v celej mechatronickej sústave tlmiča a bol motivovaný konštrukciou pridržného elektromagnetu s permanentným magnetom. Názorný pohľad na konštrukciu môžeme vidieť na obr. č. 6.1. Vonkajší plášť tlmiča je vyrobený z ocele, pričom stena nádoby má $t = 5 \text{ mm}$. V strede EMA sa nachádza tyčový permanentný magnet. Priestor medzi stenou oceľového obalu a permanentným magnetom je tvorený vinutím. Nad daným EMA je umiestnený valcový oceľový kryt, ktorý sa nachádza v určitej vzdialenosti od EMA, pričom z vrchnej strany je pripevnený k nosníku, ktorý je následne tlmený.



Obrázok 6.1: Model elektromagnetického aktuátora s permanentným magnetom

6.1 Elektromagnetická analýza

Popis vlastností EMA potrebných pre simuláciu v prostredí programu MATLAB SIMULINK získame zo simulácií v programe FEMM. Do prostredia SIMULINK-u budeme potrebovať popis odozvy elektromagnetu na vstupné signály. Jedná sa o hodnotu spriahnutého magnetického toku ako funkciu veľkosti vzduchovej medzery a veľkosti elektrického prúdu tečúceho vo vinutí elektromagnetu.

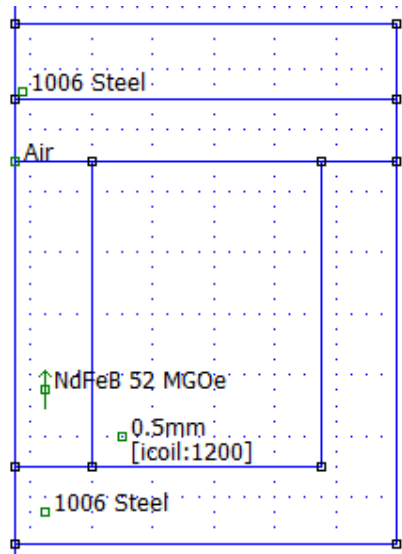
Ďalšia vlastnosť elektromagnetu je veľkosť magnetickej sily pôsobiacej na oceľový kryt ako funkciu závislú na rovnakých parametroch ako pri spriahnutom magnetickom toku.

V programe FEMM simulujeme odozvu cievky elektromagnetu na elektrický prúd ňou tečúci a na vzdialenosť krytu.

6.1.1 Generovanie FEMM modelu z prostredia MATLAB

Veľkou výhodou programu FEMM je možnosť prepojenia na prostredie programu MATLAB. Pomocou jednoduchých príkazov sa dá kompletne vytvoriť celá simulácia, od geometrie až po výslednú simuláciu a export výsledkov. Na zjednodušenie manipulácie so simuláciou sa vytvorilo grafické užívateľské prostredie, ktoré umožňuje jednoduchý zápis všetkých vstupných parametrov do simulácie a tak isto, po dokončení simulácie nám všetky údaje zobrazí v príslušných 2D, resp. 3D grafoch. Všetky dôležité výstupné parametre sú automaticky uložené ako dátové súbory *.MAT*.

Prostredie programu FEMM nám umožní riešiť nízko-frekvenčné magnetostatické problémy – v našom prípade sa jedná o statickú úlohu s nulovou frekvenciou. Zároveň, geometria nášho EMA má osovo symetrický charakter, preto považujeme aj fyzikálne deje charakterizujúce náš problém za osovo symetrické – úlohu riešime ako osovo symetrický 2D problém. Skript z programu MATLAB nám vytvorí nový model, nastaví všetky parametre, charakter úlohy a následne vytvorí geometriu EMA. Jednotlivé bloky – zóny – sú charakterizované materiálom, prostredím, resp. vinutím. Názorný pohľad vytvorenej úlohy môžeme vidieť na obrázku č. 6.2. Okolité vzduch je ohraňované okrajovou podmienkou „Air“; vzduchový priestor okolo EMA je dostatočne veľký, aby nedošlo k žiadnemu negatívnemu ovplyvneniu simulácie.



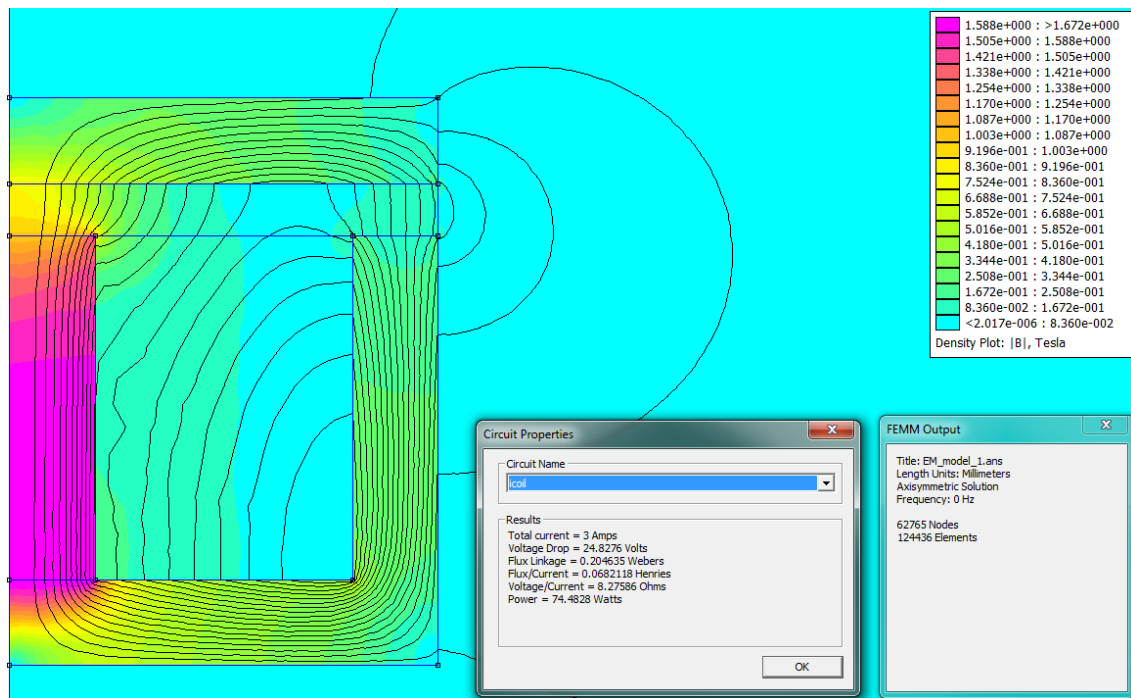
Obrázok 6.2: Model osovo symetrickej úlohy v prostredí FEMM

Keďže vlastnosti elektromagnetu Ψ_B a F_m sú závislé na dvoch parametroch – veľkosti vzduchovej medzery a prúdom tečúcim vinutím – je potrebné vykonať niekoľko simulácií na tom, aby sme získali hodnoty veličín pre všetky kombinácie parametrov. Ručne vykonávať takéto množstvo meraní by bolo časovo príliš náročné a komplikované. Pomocou riadiaceho skriptu však dokážeme plne automatizovať celý proces analýzy. Využijú sa dva *for* cykly, pričom v jednom cykle sa mení veľkosť vzduchovej medzery a v druhom cykle sa mení hodnota prúdu. Tieto všetky vstupné parametre sa zadávajú priamo do prostredia GUI. Počas jednotlivých analýz sa všetky údaje zo simulácií zapisujú do matíc, ktoré následne použijeme ako na vykreslenie 3D grafov, tak na výstup pre LUT tabuľky. Hodnota spriahnutého magnetického toku sa získa ako tretí parameter príkazu `mo_getcircuitproperties('icoil')`, kde parameter `'icoil'` definuje vinutie/zónu, z ktorej hodnotu získava. Druhú hodnotu – silu pôsobiacu na nosník získame príkazom `mo_blockintegral(19)`, ktorý vypočíta plošný integrál na bloku nosníka – z zložku sily pôsobiacu na nosník.

6.1.2 Výsledky simulácie a voľba parametrov EMA

Jednou z úloh je taktiež voľba parametrov EMA, tak aby sme získali čo najvhodnejšie vlastnosti pre tlmenie nosníka. Parametre sa navrhli na priemer závitov vinutia a počet závitov, keďže geometriu oceľového plášťa a permanentného magnetu považujeme za pevne dané. Pomocou plne automatizovaného výpočtu (MATLAB + FEMM) sa vypočítalo niekoľko závislostí pre rozličné parametre vinutia.

Počas kmitania nosníka spolu s oceľovým krytom sa mení veľkosť vzduchovej medzery Δ_z , dochádza k časovej zmene spriahnutého magnetického toku $\frac{d\Psi_B}{dt}$ a ku vzniku indukovaného napätia. Keďže zmena Δ_z nastáva v oboch smeroch, dochádza k indukovaniu kladného aj záporného elektrického napätia u_i , resp. elektrického prúdu. Fakt, že obvodom tečie elektrický prúd spôsobí, vytvorenie magnetického poľa, ktoré zosilňuje, resp. zoslabuje magnetické pole permanentného magnetu a tým aj celkovú silu pôsobiacu na nosník. Na obr. 6.3 môžeme vidieť jednu z elektromagnetických analýz, vykreslenie priebehu magnetickej indukcie v celej zóne EMA aj jeho okolí a priebeh magnetických indukčných čiar. Zo simulácie je badateľné, ako sa magnetické siločiaru uzatvárajú cez telo oceľového krytu.



Obrázok 6.3: Výsledok elektromagnetickej analýzy a priebeh magnetickej indukcie

Cieľom tejto časti práce bolo navrhnúť parametre vinutia tak, aby bola veľkosť/rozsah spriahnutého magnetického toku čo najväčšia a aby sme získali čo najväčší rozsah pôsobiacej sily na nosník od EMA. Výsledky jednotlivých simulácií môžeme vidieť v tabuľke č. 6.1. V závislosti od zväčšujúceho sa priemeru drôtu, zvyšoval sa aj rozsah prúdu, ktorý vinutím prúdil. Tento prúdový rozsah je oveľa väčší, než sa v našej situácii môže indukovať, ale pre potreby mechatronického modelu v prostredí MATLAB SIMULINK sme daný rozsah simulovali. Tak isto, tento rozsah je užitočný pre prípad, keby EMA riadime aktívne, nielen skratovaním vinutia cievky. Preto, v našom prípade sa jedná o pasívne riadenie EMA, celý kmitajúci systém sa v podstate reguluje sám. Hodnota vzduchovej medzery pre všetky simulácie sa pohybovala v rozmedzí od 0,2 mm do 9,7 mm.

Priemer drôtu	Počet závitov vinutia	Prúd cievkou (rozsah)	Minimálna hodnota spriahnutého magnetického toku $\Delta_z = 0,2 \text{ mm}$	Maximálna hodnota spriahnutého magnetického toku $\Delta_z = 0,2 \text{ mm}$	Minimálna hodnota sily $\Delta_z = 0,2 \text{ mm}$	Maximálna hodnota sily $\Delta_z = 0,2 \text{ mm}$
Φ_d [mm]	n [-]	I [A]	$\Psi_B \text{ min}$ [Wb]	$\Psi_B \text{ max}$ [Wb]	$F_m \text{ min}$ [N]	$F_m \text{ max}$ [N]
0,5	1200	-3 až 3	0,0428	0,2326	41,2738	103,8848
1	300	-4 až 4	0,0265	0,0423	51,0190	71,8957
2	70	-5 až 5	0,0075	0,0086	57,1402	63,2294

Tabuľka 6.1: Prehľad výsledkov simulácií FEMM

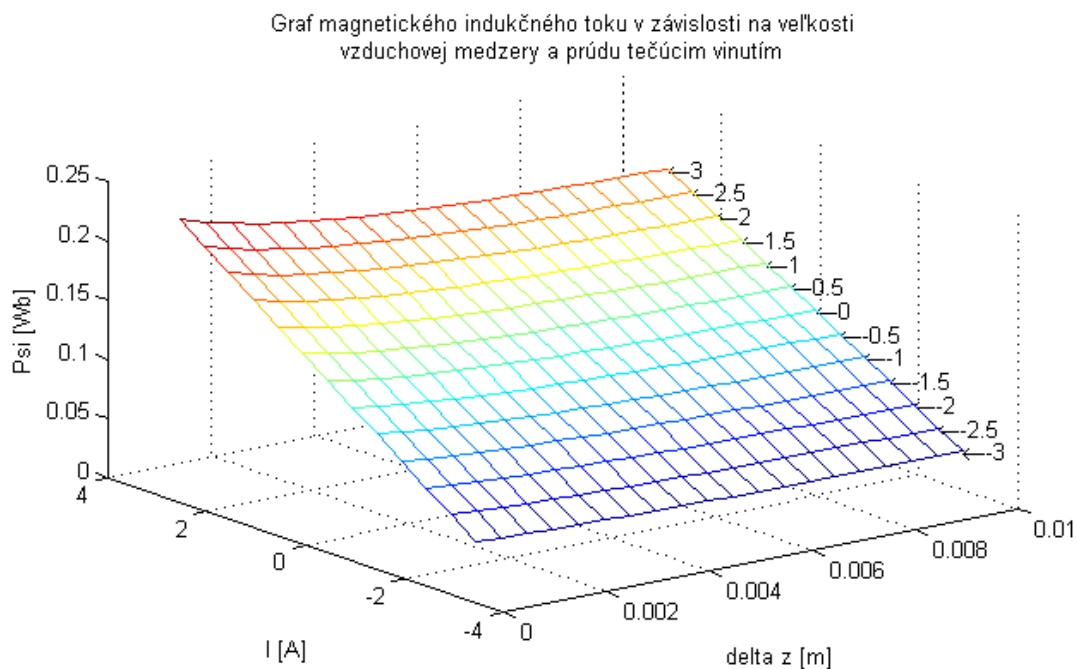
Z analýzy jednoznačne vyplýva, že najvhodnejšie výsledky sme získali pre nasledujúce parametre vinutia:

$$\Phi_d = 0,5 \text{ mm}$$

$$n = 1200$$

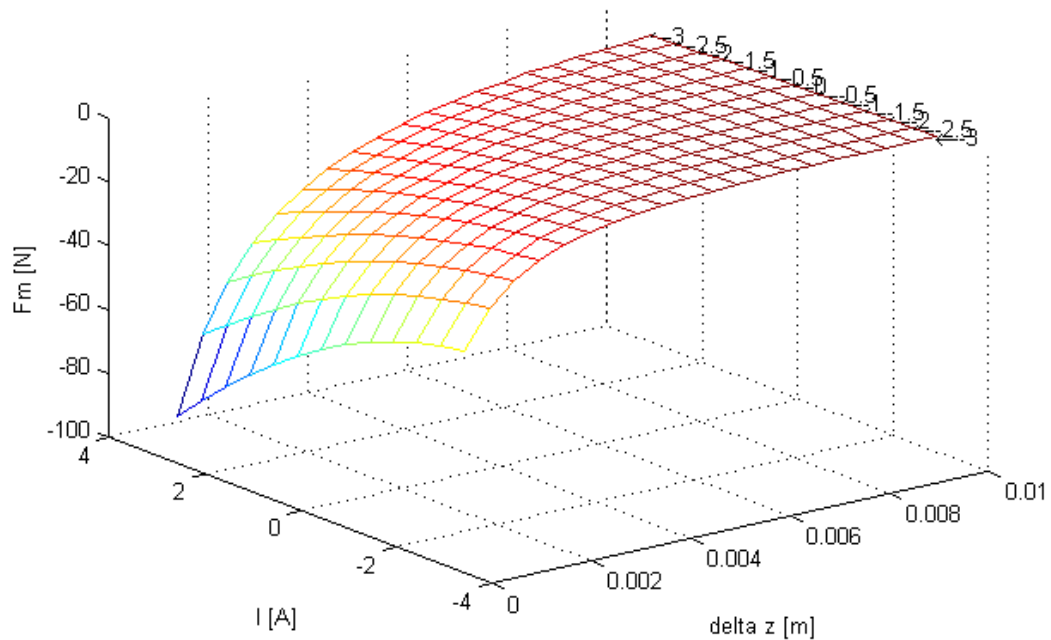
$$R_L = 8,2759 \Omega$$

Zároveň, po dôslednom porovnaní jednotlivých grafických priebehov môžeme skonštatovať, že pre vyššie uvedené parametre sledujeme pri danej hodnote Δ_z najväčšiu zmenu Ψ_B s meniacim sa prúdom – obr. č. 6.4; pri danej hodnote Δ_z najväčšiu zmenu F_m s meniacim sa prúdom – obr. č. 6.5.



Obrázok 6.4: Grafické vykreslenie hodnôt Ψ_B

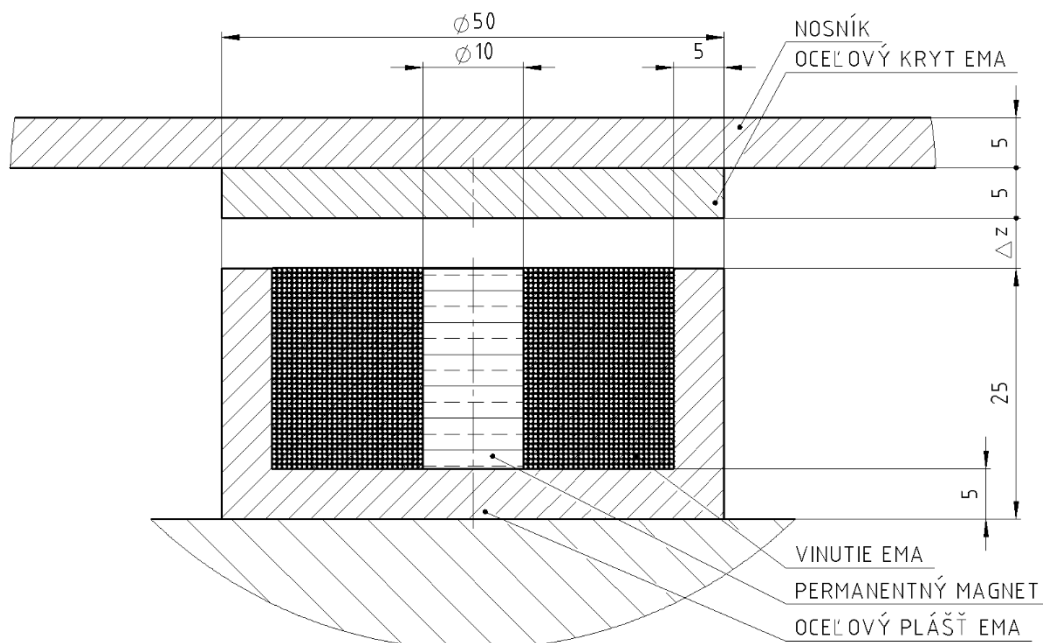
Graf závislosti zložky sily pôsobiacu na nosník v závislosti na veľkosti vzduchovej medzery a prúdu tečúcim vinutím



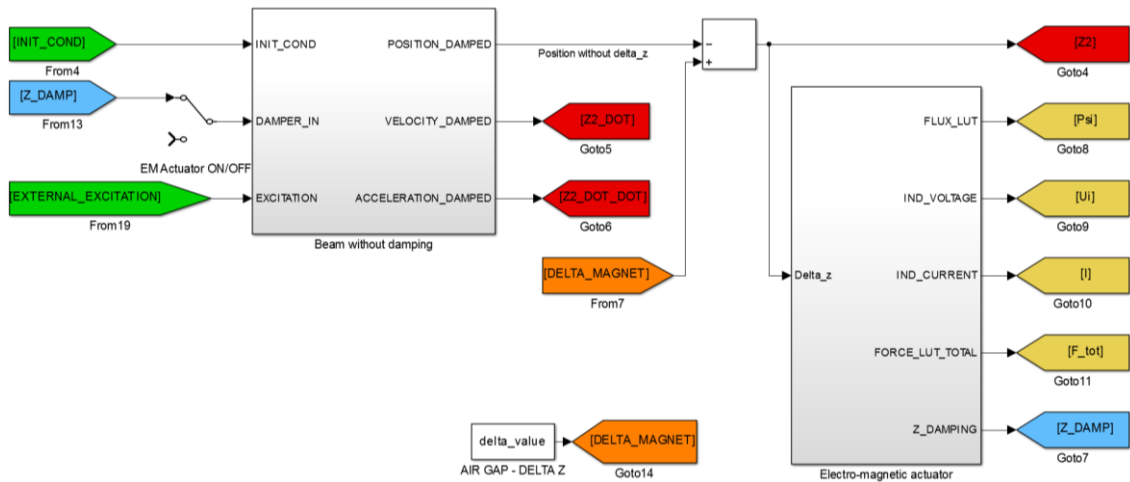
Obrázok 6.5: Grafické vykreslenie hodnôt F_m

6.2 Model mechatronickej sústavy s EMA

V prostredí programu MATLAB simulink bol vytvorený model ako mechanickej, tak elektromagnetickej časti EMA (zostava mechatronickej sústavy aj s parametrami geometrie a jednotlivými komponentmi je zobrazená na obr. 6.7). Tieto dva systémy sú vzájomne prepojené. Vstupné parametre do systému sú definované pomocou m-file. Náзорný pohľad na prepojený systém môžno vidieť na obr. 6.6. Zároveň, mechanický aj elektromagnetický model sú umiestnené do subsystémov.



Obrázok 6.6: Zostava mechatronickej sústavy s parametrami geometrie



Obrázok 6.7: Model mechatronickej sústavy v programe SIMULINK

6.2.1 Model mechanickej časti

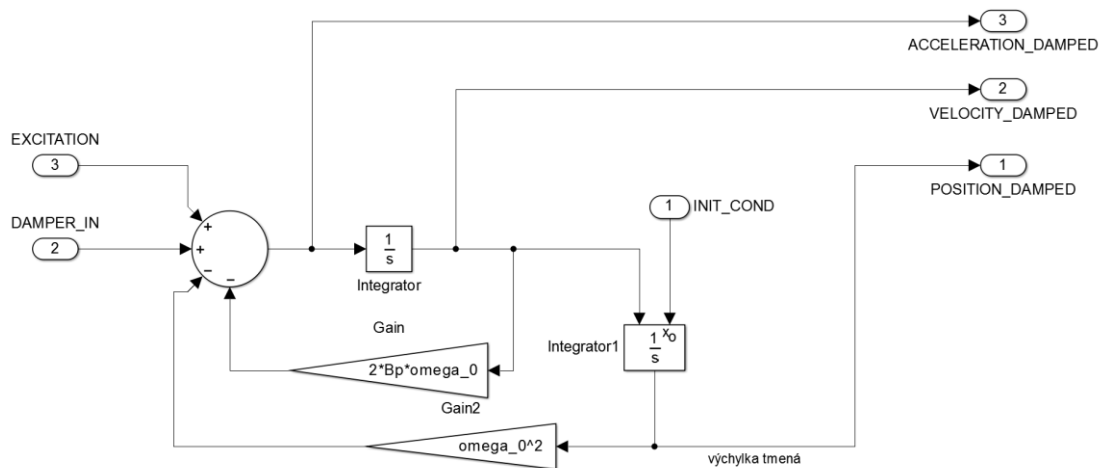
Mechanický subsystem (obr. 6.8) označený ako „Beam without damping“ (obr. 6.7) je modelovaný ako kmitanie s jedným stupňom voľnosti a je popísaný touto rovnicou:

$$\ddot{x} + 2b_p\Omega_0\dot{x} + \Omega_0^2x = \frac{F_m}{m} \quad (24)$$

Vstupnými parametrami tejto rovnice sú pomerný útlm b_p , tuhosť $k \left[\frac{N}{m} \right]$ a hmotnosť m . Hodnotu pomerného útlme získame na základe výstupných parametrov modelu z programu MSC Adams. Hodnotu vlastnej netlmenej frekvencie určíme podľa vzťahu:

$$\Omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (25)$$

Kmitanie hmotného bodu s jedným stupňom voľnosti je možné nahradiť MKP modelom poddajnej sústavy telies, ktorá bude tlmená navrhnutým elektromagnetom. V programe ANSYS táto úloha môže predstavovať napríklad model votknutého nosníka, ktorý je budený vonkajšou silou a tlmený elektromagnetickým aktuátorom.



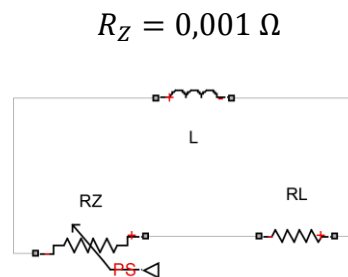
Obrázok 6.8: Model mechanickej časti

6.2.2 Model elektromagnetu EMA

Elektromagnetický subsystem (obr. 6.11) označený ako „Electro-magnetic actuator“ (obr. 6.7) je modelovaný na základe Faradayovho zákona elektromagnetickej indukcie, podľa ktorého sa veľkosť indukovaného napätia vo vodivej slučke rovná rýchlosti zmeny spriahnutého magnetického toku prechádzajúcu touto slučkou:

$$u_i(t) = - \frac{d\Psi_B}{dt}$$

Elektrický obvod EMA môžeme vidieť na obrázku 6.9, kde vinutie cievky EMA je charakterizované svojou indukčnosťou L a odporom vinutia R_L . Hodnotu odporu vinutia a indukčnosti získame ako výstupný parameter z analýzy FEMM. Odpor záťaže berieme za nulový, resp. minimálny, keďže v našom prípade sa jedná o skratovanie obvodu. Tým dosiahneme čo najväčšiu hodnotu elektrického prúdu tečúceho závitmi elektromagnetického aktuátora, resp. najväčšie pôsobenie na magnetické pole v okolí permanentného magnetu.

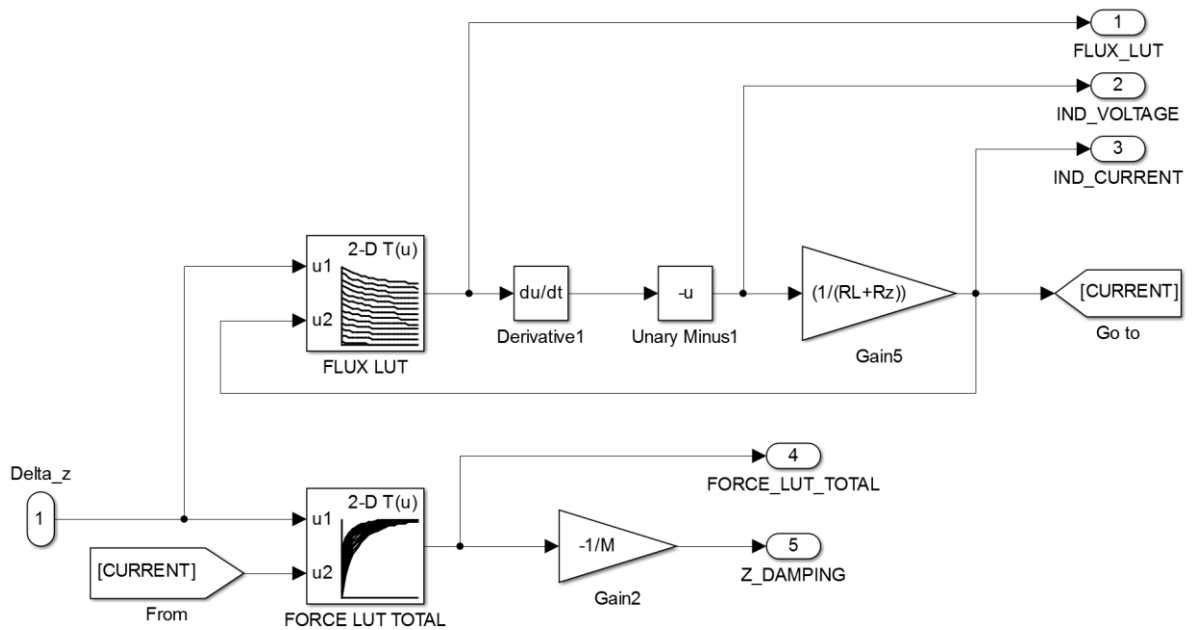


Obrázok 6.9: Schéma elektrického obvodu EMA

Výsledky z elektromagnetickej analýzy FEMM použijeme ako vstupné parametre pre mechatronické modely v SIMULINK – reprezentované interpoláciou jednotlivých simulácií v Look up table, viz obr. 6.10. V dôsledku časovej zmeny výchylky nosníka s ocelovým krytom EMA, dochádza k zmene spriahnutého magnetického toku. Na základe tohto javu simulujeme priebeh indukovaného napätia a prúdu. Keďže teraz už máme informácie o elektrickom prúde tečúcim cievkou aj o veľkosti vzduchovej medzery, použijeme model „FORCE LUT LOTAL“, z ktorého získame silu do mechanického modelu, ktorou pôsobí EMA na ocelový kryt, resp. nosník.

Ohybová tuhosť modelu votknutého nosníka je vypočítaná na základe statickej štruktúrálnej analýzy v programe ANSYS. Tomu zodpovedá aj hmotnosť podľa príslušnej vlastnej frekvencie.

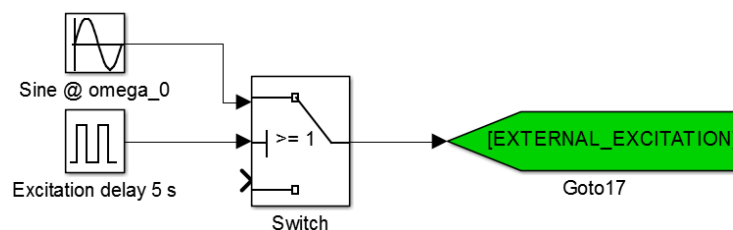
$$M = \frac{k}{\Omega_0^2}$$



Obrázok 6.10: Model elektromagnetickej časti

6.2.3 Budenie sústavy

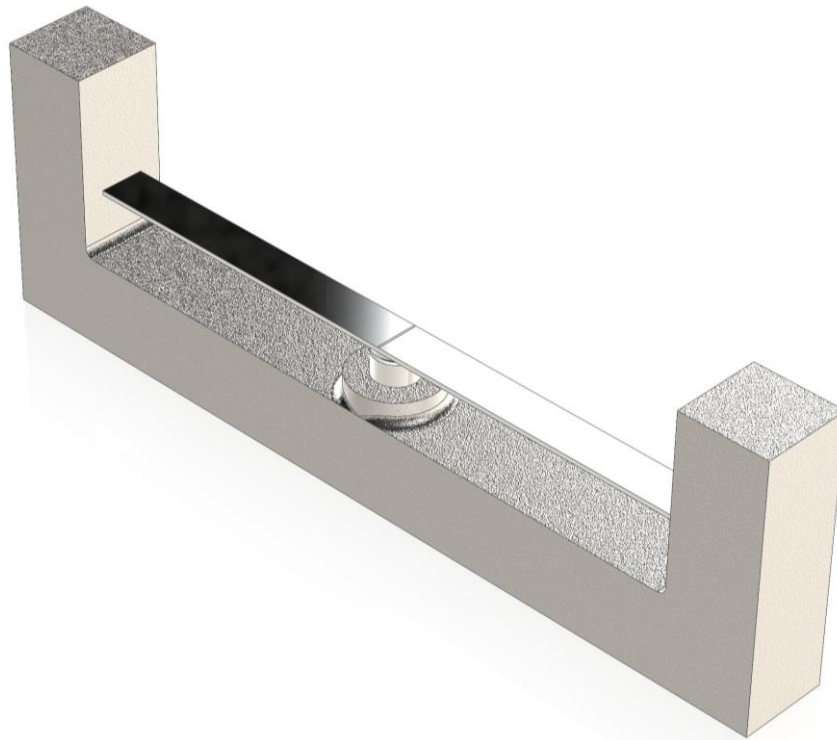
Na to, aby sme mohli sledovať tlmiace schopnosti EMA, mechanickú sústavu nosníka budíme silou sínusového signálu amplitúdy 1 na hodnote prvej vlastnej frekvencii sústavy. Blokovaná schéma budenia aj s možnosťou oneskorenia signálu je zobrazená na obr. 6.11. Oneskorenie signálu je potrebné pri co-simulácii s prostredím ADAMS (podrobnejšie v kapitole 7)



Obrázok 6.11: Model budenia mechatronickej sústavy

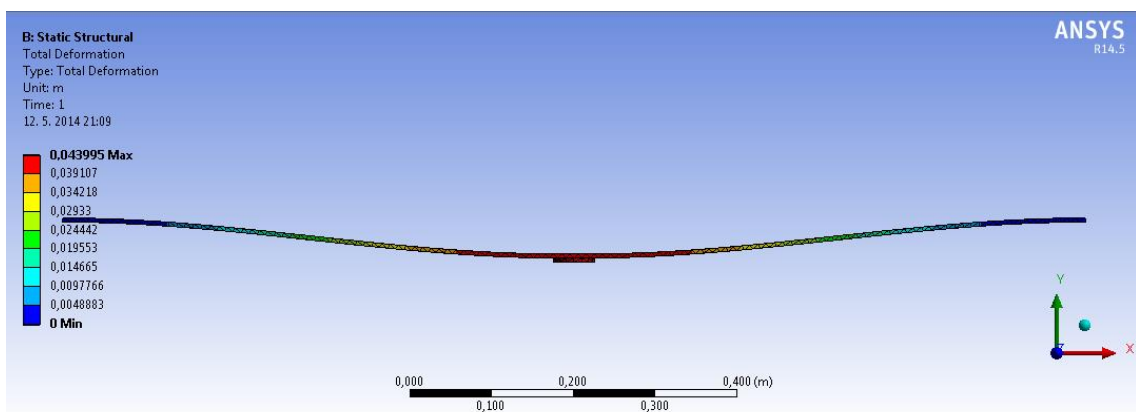
6.3 Modálna a pevnostná analýza nosníkov

V programe Solidworks sa vytvorilo niekoľko modelov, ktorých geometria sa následne exportovala do programu ANSYS na potrebnú modálnu a statickú analýzu. Tieto modely boli vstupom pre analýzu navrhnutého tlmča. Možný koncept testovacej zostavy s masívnym rámom je na obr. 6.12.



Obrázok 6.12: Koncept testovacej zostavy pre tlmenie nosníka pomocou EMA

Prostredie programu ANSYS Workbench nám poslúžil na vytvorenie modálnej analýzy rozličných nosníkov vytvorených v programe Solidworks. Po nastavení všetkých potrebných parametrov pre simuláciu, predpísaním vhodných okrajových podmienok, vytvorením siete sme získali hodnoty vlastných frekvencií (tab. 6.2). V našom prípade sme použili pre každý nosník prvú vlastnú frekvenciu f_1 . Pre ďalšie rozšírenie analýzy by sa mohli následné simulácie vykonať aj pre ostatné hodnoty vlastných frekvencií.



Obrázok 6.13: Simulácia priehybu nosníka

Okrem modálnej analýzy bola vykonaná aj statická štruktúrna analýza (obr. 6.13) za účelom výpočtu ohybovej tuhosti nosníka. Nosník bol zaťažený statickou silou F ; zistili sme priehyb nosníka x , pričom tuhosť nosníka určíme ako:

$$k = \frac{F}{x}$$

V niektorých prípadoch bola simulácia vykonaná s nižšou hodnotou sily, keďže sa simulácia dostala do nelineárnej oblasti.

NO	ROZMERY NOSNÍKA [mm]	f_1 [Hz]	f_2 [Hz]	f_3 [Hz]	f_4 [Hz]	f_5 [Hz]	F [N]	x [m]	k [Nm ⁻¹]
1	2,5x50x500	48,65	144,42	288	294,76	468,18	500	0,0186	26881,7
2	5x50x500	102,69	288,81	590,67	593,87	909,84	500	0,0025	200000,0
3	2,5x50x750	21,88	64,062	126,96	195,47	207,65	500	0,0693	7212,1
4	5x50x750	45,62	128,06	256,41	395,67	415,01	500	0,0090	55745,1
5	2,5x50x1000	12,42	35,98	70,578	116,62	148,17	250	0,0863	2896,2
6	5x50x1000	25,69	71,925	142,79	233,09	245,42	500	0,0221	22593,8
7	2,5x50x1250	8,00	23,003	44,929	74,556	111,84	150	0,1042	1439,7
8	5x50x1250	16,46	45,986	90,898	149,03	159,24	500	0,0443	11290,8

Tabuľka 6.2: Výsledky modálnej a statickej štruktúrálnej analýzy

6.4 Analýza použitia mechatronického tlmiča pre potreby tlmenia mechanickej štruktúry

Výsledky simulácií z kapitoly 6.3 boli použité v modeli sústavy v programe z SIMULINK vytvoreného v kapitole 6.2.1. Cieľom bolo porovnať výchylky nosníka na frekvencii f_1 v tlmenom (EMA aktívne pôsobiaci) a netlmenom stave (EMA nie je súčasťou simulovanej mechanickej sústavy). Výsledky simulácií sú uvedené v tabuľke č. 6.3. Počas simulácií bola zvolená hodnota pomerného útlmu $b_p = 0,01$. Túto hodnotu neskôr upresníme parametrom z programu MSC ADAMS.

Ako je patrné z výsledkov, pomocou EMA dosahuje významnú mieru utlmenia kmitajúceho nosníku na jeho prvej rezonančnej frekvencii. Pri niektorých nosníkoch bolo potrebné zväčšiť veľkosť vzduchovej medzery, keďže kmitajúci nosník prechádzal do oblastí až príliš mimo hodnoty LUT tabuliek, čo už fyzikálne znamenalo narazenie o geometriu EMA. Zároveň bola narušená stabilita celého výpočtu, čo spôsobilo jeho celkový kolaps.

NO	ROZMERY NOSNÍKA [mm]	Δ_z [mm]	Rozdiel amplitúd netlmených kmitov [mm]	Rozdiel amplitúd tlmených kmitov [mm]	Kmity utlmené o hodnotu [%]
1	2,5x50x500	3	1,04	0,08	92,31
2	5x50x500	3	0,26	0,16	38,46
3	2,5x50x750	5	5,28	0,2	96,21
4	5x50x750	3	1,216	0,21	82,73
5	2,5x50x1000	8	16	0,9	94,38
6	5x50x1000	3	3,8	0,2	94,74
7	2,5x50x1250	3	39,6	3,5	91,16
8	5x50x1250	4,1	15,37	0,34	97,79

Tabuľka 6.3 Výsledky efektivity tlmenia nosníka pomocou EMA

Pre ďalší postup vo výpočte a simuláciách sa zvolil nosník nasledovných parametrov:

- Materiál: oceľ DIN 1.0037 (S235JR)
- Polotovár: P5-50x1250 ČSN EN 10029
- Hmotnosť: 2,4375 kg
- Rezonančná frekvencia: $f_1 = 16,46$ Hz
- Tuhosť nosníku: $k = 11290,8 \text{ Nm}^{-1}$
- Vzduchová medzera (počiatočná) $\Delta_z = 4,1 \text{ mm}$

6.5 Modelovanie poddajného telesa v MSC ADAMS

K vytvoreniu mechatronického modelu tlmiča na tlmenie poddajných telies je potrebné vytvoriť model poddajného telesa v programe MSC ADAMS, ktorý co-simuluje s programom MATLAB SIMULINK, kde máme vytvorený model elektromagnetu.

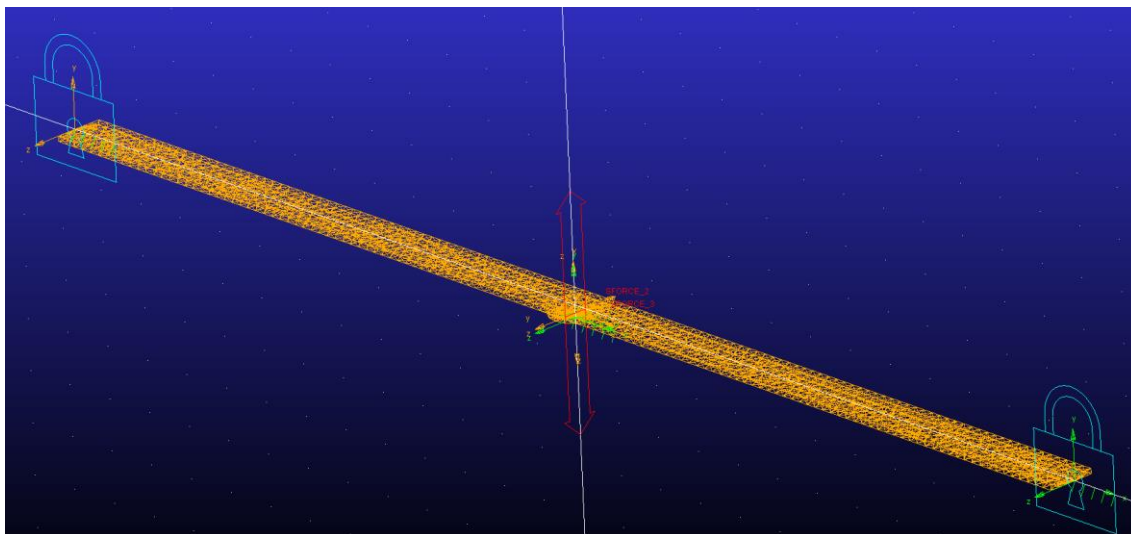
6.5.1 Export poddajného modelu do MSC ADAMS

CAD model nosníka s vytvorenou sieťou z prostredia ANSYS Workbench presunieme ako input file do programu ANSYS Mechanical APDL, ktorý nám umožní vytvorenie väzbových bodov pre potreby simulácie v MSC ADAMS. Tieto body v priestore sú dôležité pre prostredie MSC ADAMS, keďže sú to body – MARKER, na ktoré sa umiestňujú jednotlivé okrajové podmienky, resp. zaťaženia... Prepojenie každého väzbového bodu ku zvolenej časti siete je dôležité na správnu interpretáciu okrajových podmienok. Pomocou ANSYS Mechanical APDL následne exportujeme model pre spracovanie v programe MSC ADAMS.

6.5.2 Poddajné teleso v MSC ADAMS

Do prostredia MSC ADAMS vložíme FLEX BODY použitím údajov z kapitoly 6.4. Teleso umiestnime v priestore, zadefinujeme okrajové podmienky a tak isto aj sily, ktoré nám budú na nosník pôsobiť (obr. 6.14). Sily pôsobiace na nosník sú však parametrizované tak, aby bolo možné ich prepojenie s prostredím MATLAB SIMULINK. Vytvorením meracieho senzoru medzi spodnou časťou oceleového krytu EMA a MARKERom v priestore (povrch EMA) sme schopný merať veľkosť vzduchovej medzery. Co-simulácia s prostredím SIMULINK bude mať nasledovné parametre:

- Vstupné parametre (do prostredia MSC ADAMS):
 - SFORCE_1 – silové pôsobenie EMA
 - SFORCE_2 – silové pôsobenie od budiacej sily
- Výstupné parametre(z prostredia MSC ADAMS):
 - FUNCTION_MEA_1 – veľkosť vzduchovej medzery



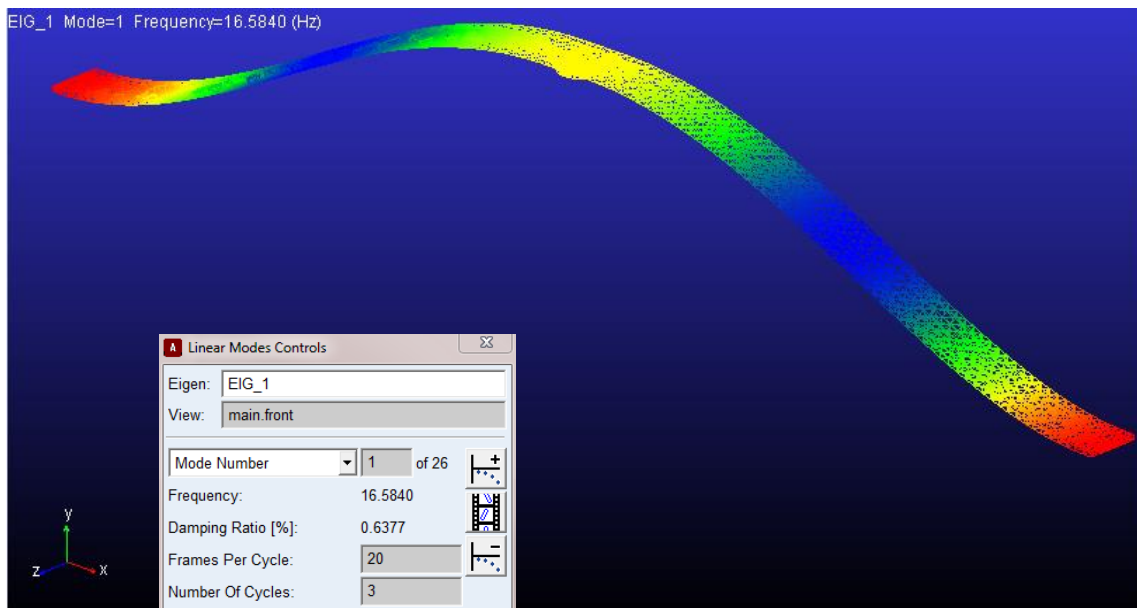
Obrázok 6.14: Flexibilné teleso v prostredí programu MSC ADAMS

Proces prenosu geometrie nosníku (siete) z programu ANSYS do MSC ADAMS bol vykonaný niekoľkokrát. Kým modálna analýza v prostredí ANSYS Workbench bola takmer nezávislá od siete (hodnoty vlastných frekvencií sa odlišovali minimálne), sieť modelu v MSC ADAMS mala vplyv na výsledky modálnej analýzy (obr. 6.15). Najväčšie odchýlky sa vyskytovali v prípade, kedy sa sieť neskladala z približne rovnakých elementov. Sieť, ktorá bola nakoniec použitá v oboch programoch je zložená z elementov rovnakej dĺžky; neobsahuje žiadne lokálne zjemnenia. Výsledná hodnota prvej rezonančnej frekvencie je:

$$f_1(\text{ANSYS Workbench}) = 16,946 \text{ Hz}$$

$$f_1(\text{MSC ADAMS}) = 16,5840 \text{ Hz}$$

Pre simuláciu v prostredí SIMULINK sa použije hodnota rezonančnej frekvencie podľa MSC ADAMS (v dôsledku co-simulácie). Zároveň pomerne hrubá sieť je výhodná pre celkovú rýchlosť výpočtu počas co-simulácie. Model s výrazne jemnou sieťou bol na výpočet mimoriadne časovo náročný.



Obrázok 6.15: Modálna analýza v programe MSC ADAMS

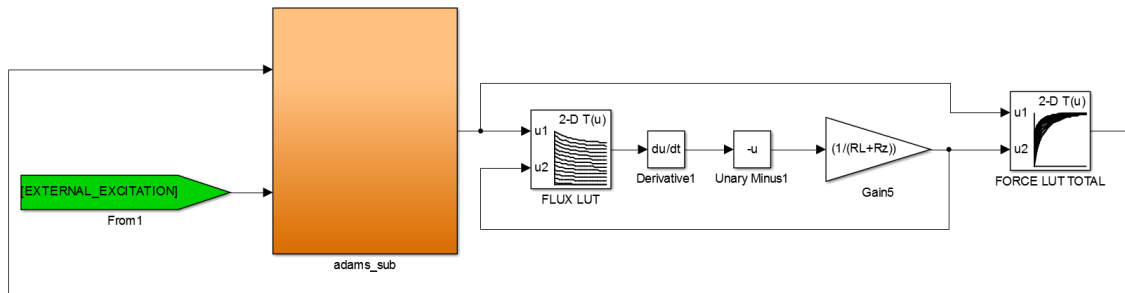
MSC ADAMS nám zároveň poskytuje aj presnú hodnotu pomerného útlmu pre danú prvú rezonančnú frekvenciu (obr. 6.16):

$$b_p = 0,006377$$

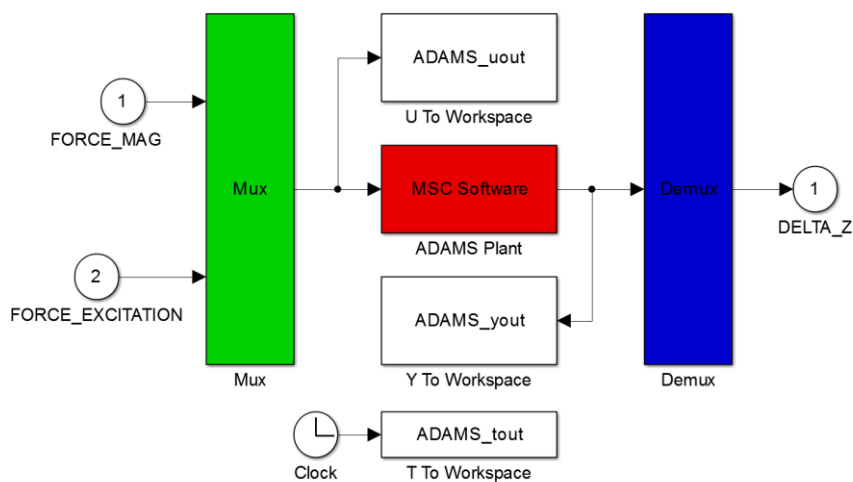
V tomto štádiu máme pripravené všetky potrebné parametre na spustenie co-simulácie.

7 Co-simulácia a výsledky simulácií

Výsledný model je prepojený s MSC ADAMS ako „nonlinear“ (obr. 7.1 a 7.2). Počas co-simulácie sme porovnávali kmitanie netlmeného a tlmeného poddajného telesa.



Obrázok 7.1: Model co-simulácie

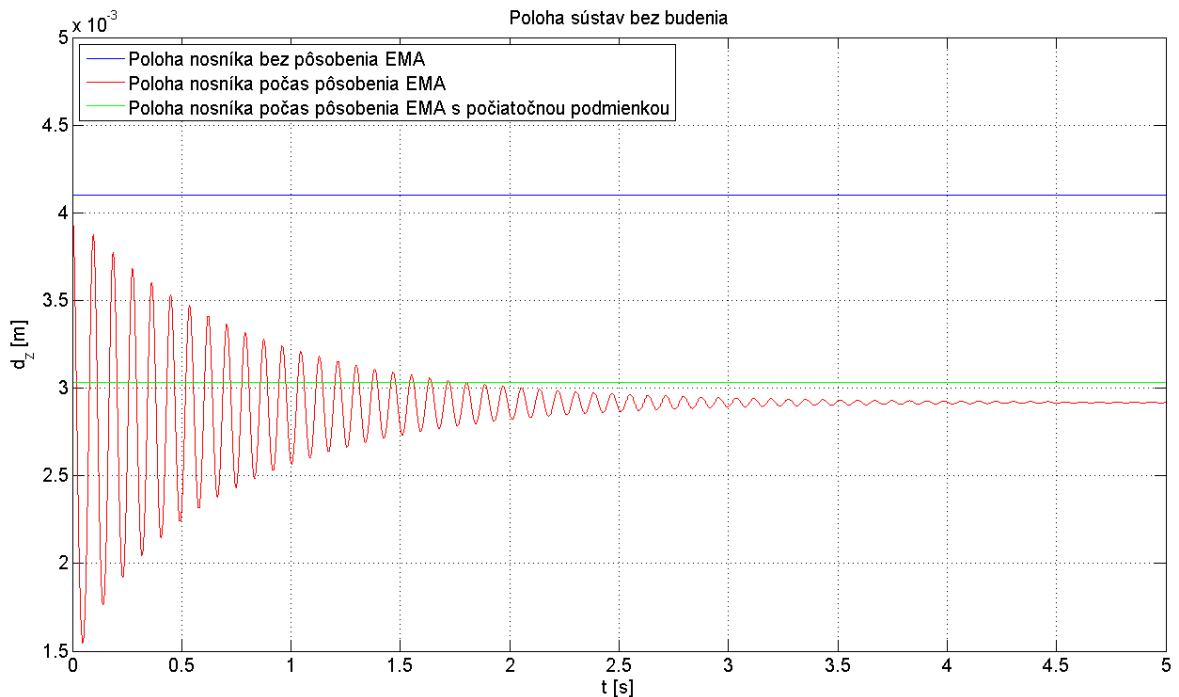


Obrázok 7.2: Exportovaný nonlinear model z programu MSC ADAMS

7.1 Stabilizácia modelu poddajného telesa po spustení co-simulácie

Počiatočnú veľkosť vzduchovej medzery pre tri prípady mechatronickej sústavy môžeme vidieť na obr. 7.3. Jedná sa o nasledovné tri prípady:

- Nosník v pôvodnej polohe bez EMA nám zobrazuje modrý signál.
- Model ustabilizovaného nosníka s EMA modelovaný v prostredí programu SIMULINK je zobrazený zeleným signálom. Tento model je v tejto polohe už pritiažený k EMA v dôsledku stáleho magnetického poľa permanentného magnetu. Stabilnú polohu tohto modelu od počiatku simulácie sme dosiahli počiatočnou podmienkou vstupujúcou do integrátora pod názvom „INIT_COND“ na obr. 6.8.
- Na model poddajného telesa (MSC ADAMS) začne v okamihu spustenia simulácie pôsobiť model EMA (SIMULINK). Rovnako, ako v predošlom prípade, dôjde k pôsobeniu EMA a sústava sa postupne ustabilizuje – červený signál.



Obrázok 7.3: Veľkosť vzduchovej medzery pre jednotlivé modely bez budenia

Z obrázku č. 6.9 je patrný rozdiel medzi stabilizovanou polohou modelu nosníka (SIMULINK) a modelom poddajného telesa (MSC ADAMS). Samozrejme, modelovanie poddajného telesa nám poskytuje presnejšiu hodnotu ustáleného stavu sústavy. Simuláciu by sme mohli ďalej vylepšovať zjemnením siete modelu, ale z dôsledku časovej náročnosti simulácie sme ďalšie zjemnenie siete nevykonali.

7.2 Tlmené a netlmené kmitanie modelu poddajného telesa

Externé budenie je oneskorené o $t_{delay} = 5$ s (čas potrebný na ustabilizovanie modelu, podrobne v kapitole 7.1); následne sa spustí sínusové budenie silou na hodnote rezonančnej frekvencie nosníka amplitúdy $F = 1N$.

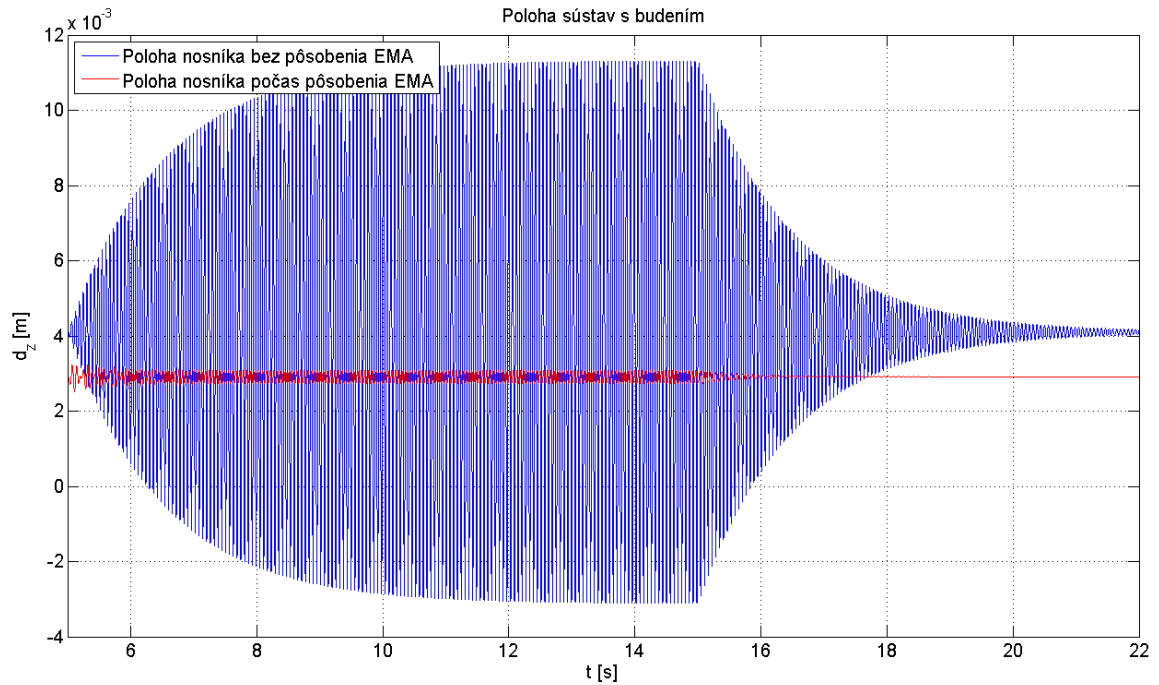
7.2.1 Výsledky tlmenia mechatronickej sústavy

Netlmený nosník (modrý signál) sa veľmi rýchlo rozkmitá dosahujúc pomerne veľký rozkmit okolo rovnovážnej polohy (obr. 7.4, obr. 7.5), kým tlmené kmity dosahujú útlm hodnoty 97,57% (červený signál):

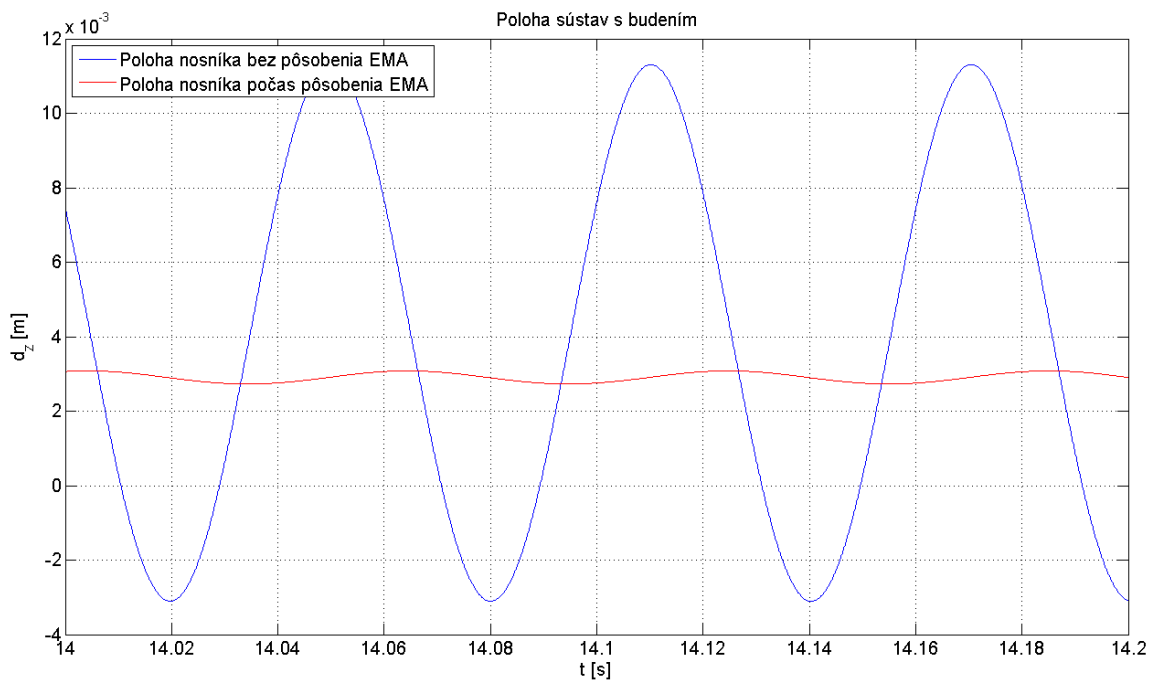
- Maximálna amplitúda netlmených kmitov: $\Delta_{z\ max} = 11,3$ mm
- Minimálna amplitúda netlmených kmitov: $\Delta_{z\ min} = -3,1$ mm
- Maximálna amplitúda tlmených kmitov: $\Delta_{z\ max} = 3,08$ mm
- Minimálna amplitúda tlmených kmitov: $\Delta_{z\ min} = 2,73$ mm

Za povšimnutie stojí aj to, ako rýchlo EMA ustabilizuje model poddajného telesa po vypnutí externého budenia:

- Čas potrebný na ustálenie na stabilnej polohe bez EMA: $t_{eq} = 10 \text{ s}$
- Čas potrebný na ustálenie na stabilnej polohe s EMA: $t_{eq} = 2,5 \text{ s}$



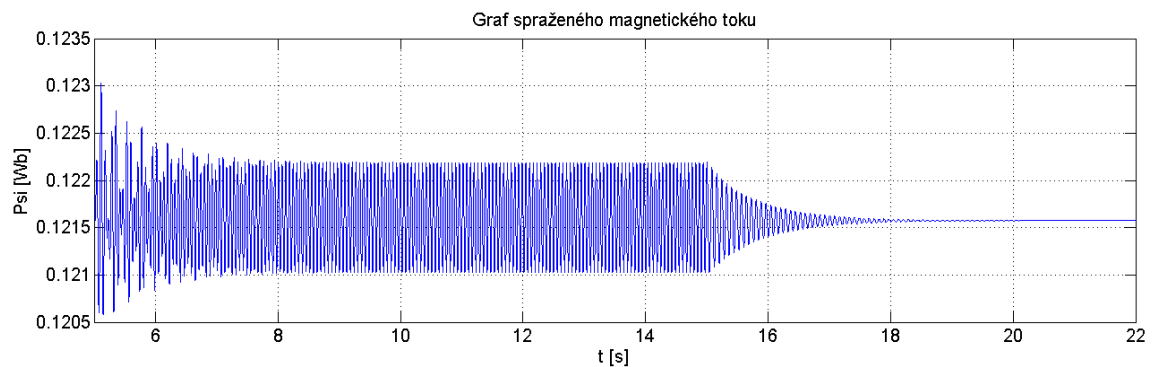
Obrázok 7.4: Budenie tlmeného a netlmeného modelu



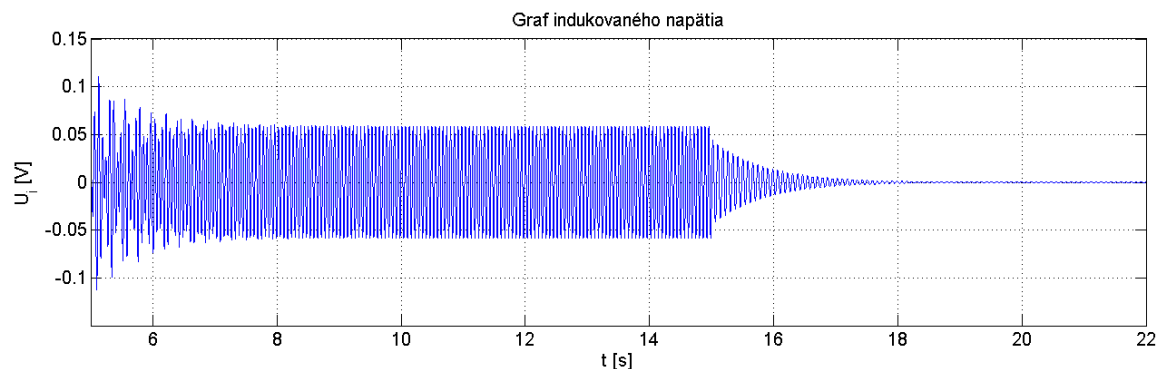
Obrázok 7.5: Budenie tlmeného a netlmeného modelu (detail)

7.2.2 Výsledky priebehu elektrických veličín a silového pôsobenia

Dôležité je tak isto zhodnotiť priebehy elektrických veličín v modeli EMA. Časový priebeh spriahnutého magnetického toku je zobrazený na obr. 7.6. Na obr. 7.7 sú vykreslené hodnoty indukovaného elektromotorického napätia v dôsledku časovej zmeny spriahnutého magnetického toku; resp. na obr. 7.8, priebeh elektrického prúdu. Obvodom cievky elektromagnetu tečie veľmi malý prúd, neblížime sa ani z ďaleka k hodnotám, ktoré by mohli spôsobiť poškodenie vinutia. Zároveň, i takto nízke hodnoty sú dostatočné na to, aby celá mechatronická sústava pasívne regulovala pôsobiacu silu na kmitajúci nosník. Výsledná sila pôsobiaca na kmitajúci nosník a jej priebeh sú zobrazené na obr. 7.9.

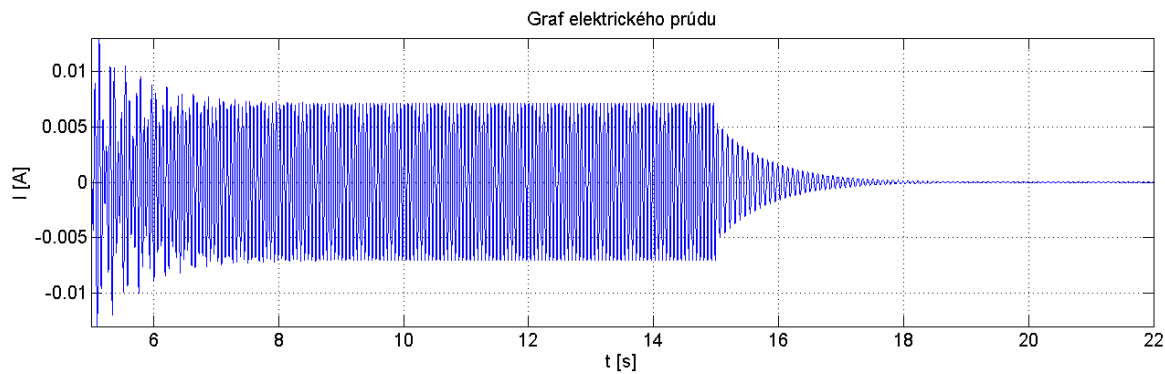


Obrázok 7.6: Priebeh spriahnutého magnetického toku



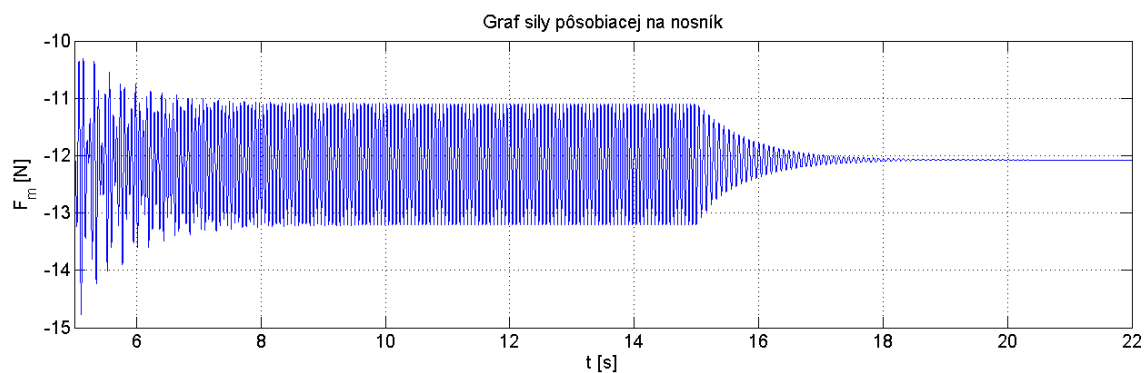
Obrázok 7.7: Priebeh indukovaného napätia

- Maximálna hodnota indukovaného napätia: $U_{i \max} = 0,11 \text{ V}$
- Minimálna hodnota indukovaného napätia: $U_{i \min} = -0,11 \text{ V}$



Obrázok 7.8: Priebeh elektrického prúdu

- Maximálna hodnota elektrického prúdu: $I_{max} = 0,0133 \text{ A}$
- Minimálna hodnota elektrického prúdu: $I_{min} = -0,0136 \text{ A}$



Obrázok 7.9: Priebeh celkovej sily pôsobiacej na nosník

8 Možnosti ďalšieho rozvoja

Doterajšie výsledky simulácií nám poskytli dostatočné výsledky na to, aby sme mohli skonštatovať, že daný model prídružného elektromagnetu s permanentným magnetom by mohol byť vhodne aplikovaný ako tlmič vibrácií. Samozrejme, rozsah tejto bakalárskej práce nie je dostatočný na to, aby boli modelované ďalšie možnosti tlmenia sústav a predovšetkým, aby sme simulovali schopnosť tlmenia EMA na iných frekvenciách.

Z kapitoly 7 jednoznačne vyplýva, že veľkosť indukovaného napätia dosahuje veľmi nízke hodnoty. Zároveň, ak berieme do úvahy fakt, že veľkosť indukovaného napätia závisí od časovej zmeny spriahnutého magnetického toku, tak čím rýchlejšie bude tlmená sústava kmitať, tým väčšia bude časová zmena danej veličiny – bude narastať hodnota indukovaného napätia a tým viac budeme schopný regulovať veľkosť magnetického poľa pôsobiaceho na tlmennú sústavu. Okrem zvyšovania frekvencie budiacej sily a tým aj frekvencie kmitania modelu môžeme zvyšovať aj veľkosť amplitúdy budiacej sily.

Model mechatronickej sústavy doteraz pracoval v pasívnom režime – cievka EMA bola skratovaná. V prípade, že by sa tlmila sústava kmitajúca na vyšších frekvenciách a došlo by k výraznejšiemu indukovanému napätia, vhodný by bol polo-aktívny režim regulácie prúdu tečúci cievkou – namiesto skratovania obvodu cievky by sme do obvodu zaradili premenlivý odpor – potenciometer – ktorý by sme riadili vhodným regulátorom.

Aktívny režim by však mohol byť najlepším riešením, keby došlo k aktívnemu napájaniu cievky elektromagnetu striedavým prúdom. Vhodným návrhom regulátora prúdu by sme mohli výrazne ovplyvniť veľkosť magnetického poľa pôsobiaceho na tlmennú sústavu a tým dosiahnuť ešte lepšie výsledky tlmenia vibrácií.

9 Záver

Hlavným cieľom bakalárskej práce bolo vytvorenie virtuálneho modelu mechatronickej sústavy elektromagnetického aktuátora na tlmenie vibrácií. Počas práce som sa riadil vytýčenou otázkou, či je možné použiť prídržný elektromagnet s permanentným magnetom ako tlmič vibrácií mechanickej sústavy a ak áno, ako efektívne.

Z rešeršnej štúdie vykonanej v prvej polovici tejto práce jednoznačne vyplýva, nakoľko široké je využitie a implementácia elektromagnetických princípov použitých na tlmenie vibrácií. Elektromagnetické princípy môžu byť aplikované veľkou škálou konštrukčných riešení. Tlmiče pracujúce na tomto princípe môžu byť ľubovoľne škálovateľné podľa veľkosti tlmenej sústavy a v neposlednom rade, tieto tlmiče môžu byť riadené rozličnými spôsobmi, či už pasívnym, polo-aktívnym alebo plne aktívnym spôsobom. „Energy harvesting“ je tiež dôležitým kladným faktorom, ktorý využitie týchto tlmičov len rozširuje.

V prvej časti tejto práce sa vykonala elektromagnetická analýza elektromagnetu v prostredí programu FEMM, z ktorej sme získali dôležité parametre pre ďalšie simulácie. Sledovali sme zmenu vlastností daného elektromagnetu v dôsledku zmien parametrov vinutia. Vhodné parametre sme volili na základe najlepších výsledkov z týchto simulácií.

Na základe voľby parametrov z elektromagnetickej analýzy sme vytvorili mechatronický model EMA v prostredí programu MATLAB/Simulink. Analýzu tlmenia sme vykonali na modeli obojstranne votknutého nosníka, ktorého geometria bola zvolená na základe simulácie s najlepšou efektívnosťou tlmenia pomocou daného EMA. Mechanické vlastnosti modelu nosníka sme získali z modálnej a statickej štruktúrálnej analýzy programu ANSYS Workbench.

Model nosníka sme následne modelovali ako poddajné teleso v programe MSC ADAMS, ktorý sme prepojili v co-simulácii s modelom EMA v programe MATLAB/Simulink. Z tejto simulácie sme získali všetky potrebné údaje na to, aby sme zistili, nakoľko efektívne dokážeme daným EMA budený nosník tlmiť.

Z výsledkov co-simulácie jednoznačne vyplýva vhodnosť a vysoká efektívnosť daného elektromagnetického aktuátora ako tlmiča vibrácií. Zároveň hodnoty indukovaného elektrického napätia a elektrického prúdu sa pohybovali v bezpečných hodnotách s veľkou rezervou pre vyššie hodnoty týchto veličín.

V neposlednom rade v 8. kapitole boli načrtnuté široké možnosti ďalšieho rozvoja daného EMA. Veľký potenciál tejto mechatronickej sústavy sa s najväčšou pravdepodobnosťou skrýva v realizácii s aktívnym regulovaním prúdu dodávaného do obvodu cievky, kedy vieme s najväčšou mierou ovplyvniť veľkosť magnetického poľa permanentného magnetu.

10 Zoznam použitých zdrojov

- [1] W. Paper, “PolyPower ® DEAP material,” no. updated 2011, pp. 1–23.
- [2] “Piezo Motion Tutorial: Precision Nano Positioning Mechanics: Fundamentals of Piezomechanic.” [Online]. Dostupné z: <http://www.physikinstrumente.com/en/products/prdetail.php?sortnr=400600.20>. [cit. 4.2.2014].
- [3] “Tutorial: High Precision Motion Control, Piezo NanoPositioning Mechanics: Fundamentals of Piezoelectric Actuators.” [Online]. Dostupné z: <http://www.physikinstrumente.com/en/products/prdetail.php?sortnr=400600.40>. [cit. 1.2.2014].
- [4] “Tutorial: High Precision Motion Control, NanoPositioning, Piezo-Mechanik: Dynamic Operation Fundamentals.” [Online]. Dostupné z: <http://www.physikinstrumente.com/en/products/prdetail.php?sortnr=400600.60>. [cit. 12.2.2014].
- [5] “N111 Ultra-High-Precision Piezo Motor, OEM Linear Actuator, Nano-Positioning, Long Travel, Piezo Walk® Motor Principle.” [Online]. Dostupné z: <http://www.physikinstrumente.com/en/products/prdetail.php?sortnr=1000740>. [cit. 12.2.2014].
- [6] “CEDRAT TECHNOLOGIES: APA®.” [Online]. Dostupné z: <http://www.cedrat-technologies.com/en/mechatronic-products/actuators/apa.html>. [cit. 13.2.2014].
- [7] “PolyPower DEAP Evaluation Samples,” pp. 1–15.
- [8] P. Raja, X. Wang, and F. Gordaninejad, “A high-force controllable MR fluid damper–liquid spring suspension system,” *Smart Mater. Struct.*, vol. 23, no. 1, p. 015021, Jan. 2014.
- [9] D. Case, B. Taheri, and E. Richer, “Multiphysics modeling of magnetorheological dampers,” *Int. J. Multiphys.*, vol. 7, no. 1, pp. 61–76, Mar. 2013.
- [10] N. Abdullah, N. Mohamed, M. Jailani, M. Nor, and R. Z. Mukhlis, “Compromising vehicle handling and passenger ride comfort,” vol. 4, no. 4, pp. 50–54, 2005.
- [11] “Electrorheological fluid damper - RheDamp® - Fludicon GmbH.” [Online]. Dostupné z: <http://www.directindustry.com/prod/fludicon-gmbh/electrorheological-fluid-dampers-54863-362468.html>. [cit. 5.3.2014].
- [12] D. HALLIDAY, R. RESNICK, and J. WALKER, “Elektromagnetická indukce,” in *FYZIKA Vysokoškolská učebnice fyziky*, Vysoké učení technické v Brně - Nakladatelství VUTIUM a PROMETHEUS Praha, 2000, pp. 788–832.

- [13] D. HALLIDAY, R. RESNICK, and J. WALKER, “Magnetické pole elektrického proudu,” in *FYZIKA Vysokoškolská učebnice fyziky*, Vysoké učení technické v Brně - Nakladatelství VUTIUM a PROMETHEUS Praha, 2000, pp. 773–797.
- [14] J.-S. Bae, J.-H. Hwang, J.-S. Park, and D.-G. Kwag, “Modeling and experiments on eddy current damping caused by a permanent magnet in a conductive tube,” *J. Mech. Sci. Technol.*, vol. 23, no. 11, pp. 3024–3035, Jan. 2010.
- [15] “Micromega Dynamics - Active Damping Devices And Inertial Actuators.”
- [16] H. Roeser, M. Wiedemann, J. Wolf, M. Stop, S. Daof, P. O. B. Edwards, and S. Science, “Active Damping of the SOFIA Telescope Assembly.”
- [17] K. Huang, F. Yu, and Y. Zhang, “ACTIVE CONTROLLER DESIGN FOR AN ELECTROMAGNETIC ENERGY-REGENERATIVE SUSPENSION,” vol. 12, no. 6, pp. 877–885, 2011.
- [18] B. Ebrahimi, M. B. Khamesee, and M. F. Golnaraghi, “Feasibility study of an electromagnetic shock absorber with position sensing capability,” *2008 34th Annu. Conf. IEEE Ind. Electron.*, pp. 2988–2991, Nov. 2008.
- [19] B. L. J. Gysen, S. Member, J. L. G. Janssen, J. J. H. Paulides, E. A. Lomonova, and S. Member, “Design Aspects of an Active Electromagnetic Suspension System for Automotive Applications,” vol. 45, no. 5, pp. 1589–1597, 2009.
- [20] B. L. J. Gysen, T. P. J. van der Sande, J. J. H. Paulides, and E. a Lomonova, “Efficiency of a Regenerative Direct-Drive Electromagnetic Active Suspension,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 60, no. 4, pp. 1384–1393, May 2011.

Zoznam obrázkov

Obrázok 3.1: Lineárny piezoelektrický motor (prevzaté z [5])	12
Obrázok 3.2: Zosilňovaný piezoelektrický aktuátor (prevzaté z [6])	12
Obrázok 3.3: Princíp fungovania DEAP technológie firmy DANFOSS (prevzaté z [1])	13
Obrázok 3.4: Aktuátor pracujúci na princípe DEAP technológie (prevzaté z [7])	13
Obrázok 3.5: Vnútorňá konštrukciu magnetoreologického tlmiča (prevzaté z [8])	14
Obrázok 3.6: Vnútorňú konštrukcia elektoreologického tlmiča (prevzaté z [10])	15
Obrázok 3.7: Elektoreologický tlmič FLUDICON RheDamp® (prevzaté z [11])	15
Obrázok 4.1: Tlmič vírivých prúdov (prevzaté z [14])	18
Obrázok 4.2: Princíp fungovania RMA (prevzaté z [15])	19
Obrázok 4.3: Skúšobný systém tlmenia vibrácií v realizácii 2x2 MIMO (prevzaté z [16])	20
Obrázok 4.4: Model umiestnenia RMA tlmičov na teleskope SOFIA (prevzaté z [16])	20
Obrázok 4.5: Schematický prierez elektromagnetickým tlmičom so skrutkovým prevodom a jeho konkrétna realizácia (prevzaté z [17])	21
Obrázok 4.6: Schematický prierez lineárneho tlmiča s axiálnou magnetizáciou pólov (prevzaté z [18])	22
Obrázok 4.7: Magnetický indukčný tok kvázi-halbachovej štruktúry (prevzaté z [19])	23
Obrázok 4.8: Magnetický indukčný tok axiálnej štruktúry (prevzaté z [19])	23
Obrázok 4.9: Konštrukcia lineárneho elektromagnetického tlmiča s kvázi-hlabachovou magnetizáciou (prevzaté z [20])	24
Obrázok 4.10: Testovacia aparátúra tlmiča pre BMW 530i (prevzaté z [20])	24
Obrázok 5.1: Schéma konceptu mechatronickej sústavy	26
Obrázok 6.1: Model elektromagnetického aktuátora s permanentným magnetom	28
Obrázok 6.2: Model osovo symetrickej úlohy v prostredí FEMM	29
Obrázok 6.3: Výsledok elektromagnetickej analýzy a priebeh magnetickej indukcie ...	30
Obrázok 6.4: Grafické vykreslenie hodnôt ΨB	31
Obrázok 6.5: Grafické vykreslenie hodnôt Fm	32
Obrázok 6.6: Zostava mechatronickej sústavy s parametrami geometrie	32
Obrázok 6.7: Model mechatronickej sústavy v programe SIMULINK	33
Obrázok 6.8: Model mechanickej časti	33
Obrázok 6.9: Schéma elektrického obvodu EMA	34
Obrázok 6.10: Model elektromagnetickej časti	35
Obrázok 6.11: Model budenia mechatronickej sústavy	35
Obrázok 6.12: Koncept testovacej zostavy pre tlmenie nosníka pomocou EMA	36
Obrázok 6.13: Simulácia priehybu nosníka	36
Obrázok 6.14: Flexibilné teleso v prostredí programu MSC ADAMS	39
Obrázok 6.15: Modálna analýza v programe MSC ADAMS	40
Obrázok 7.1: Model co-simulácie	41
Obrázok 7.2: Exportovaný nonlinear model z programu MSC ADAMS	41
Obrázok 7.3: Veľkosť vzduchovej medzery pre jednotlivé modely bez budenia	42
Obrázok 7.4: Budenie tlmeného a netlmeného modelu	43
Obrázok 7.5: Budenie tlmeného a netlmeného modelu (detail)	43
Obrázok 7.6: Priebeh spriahnutého magnetickeho toku	44
Obrázok 7.7: Priebeh indukovaného napätia	44
Obrázok 7.8: Priebeh elektrického prúdu	45
Obrázok 7.9: Priebeh celkovej sily pôsobiacej na nosník	45