



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

KONSTRUKČNÍ NÁVRH EXPERIMENTÁLNÍHO MR TLUMIČE PRO VELKÉ RÁZY

DESIGN OF AN EXPERIMENTAL MR DAMPER FOR LARGE IMPACTS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Radoslav Bajza

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Milan Klapka, Ph.D.

BRNO 2025

Zadání diplomové práce

| | |
|-------------------|--------------------------------------|
| Ústav: | Ústav konstruování |
| Student: | Bc. Radoslav Bajza |
| Studijní program: | Konstrukční inženýrství |
| Studijní obor: | bez specializace |
| Vedoucí práce: | doc. Ing. Milan Klapka, Ph.D. |
| Akademický rok: | 2024/25 |

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 diplomové práce:

Konstrukční návrh experimentálního MR tlumiče pro velké rázy

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Při tlumení silných a krátkých rázů dochází k rychlému stlačení pístu MR tlumiče. MR kapalina proudící šterbinou v pístu je namáhána velkým smykovým spádem což klade specifické požadavky na konstrukci elektromagnetického obvodu tlumiče i jeho mechanických částí. V současnosti není vyvinutý řízený MR tlumič, který by účinně pracoval v oblasti vysokých pístových rychlostí. Konstrukční návrh takového typu tlumiče povede k ověření potenciálu tlumení rychlých a silných rázů.

Typ práce: vývojová – konstrukční

Výstup práce: : aplikovaný výsledek (Fužit, Fprum, Gprot, Gfunk, R)

Projekt: European Defence Agency

Cíle diplomové práce:

Hlavním cílem práce je zkonstruovat rychlý MR tlumič pro vysoké pístové rychlosti s těmito parametry: minimální konstrukční pístová rychlost 5 m/s, maximální tlumicí síla v aktivovaném stavu nejméně 5 kN, zdvih minimálně 150 mm, vzdálenost upínacích bodů max. 1 m.

Dílčí cíle diplomové práce:

- návrh rychlého elektromagnetického obvodu,
- návrh zabudování senzorky pro řízení tlumiče,
- pevnostní ověření klíčových částí tlumiče,
- realizace funkčního vzorku a ověření funkce navrženého tlumiče.

Požadované výstupy: průvodní zpráva, výkresy součástí, výkres sestavení.

Rozsah práce: cca 72 000 znaků (40 – 50 stran textu bez obrázků).

Časový plán, struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

<https://www.ustavkonstruovani.cz/texty/magisterske-studium-ukonceni/>

Seznam doporučené literatury:

J. Goldasz, B. Sapiński, Insight into magnetorheological shock absorbers, 2015.
<https://doi.org/10.1007/978-3-319-13233-4>

M. Kubík, J. Válek, J. Žáček, F. Jeniš, D. Borin, Z. Strecker, I. Mazůrek, Transient response of magnetorheological fluid on rapid change of magnetic field in shear mode, Sci. Rep. 12 (2022) 10612.

M. Ahmadian, J. A. Norris, Experimental analysis of magnetorheological dampers when subjected to impact and shock loading, Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, Volume 13, Issue 9, 2008, Pages 1978-1985, ISSN 1007-5704,
<https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2007.03.028>.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2024/25

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

V súčasnosti dochádza k rozvoju smart technológií, ktorých súčasťou sú aj tlmiče s meniteľnou charakteristikou. K jej dosiahnutiu využívajú magnetoreologické kvapaliny, ktoré na základe intenzity magnetického poľa dokážu meniť svoje vlastnosti. Ich využitie má potenciál aj vo vysokorýchlostných aplikáciách, avšak poznatky o ich správaní pri rázovom zaťažovaní sú limitované.

Cieľom tejto práce je vývoj, výroba a otestovanie magnetoreologického tlmiča, ktorý je určený na výskum správania sa magnetoreologických kvapalín pri vysokých šmykových spádoch. Navrhnutý tlmič je jednoduchej konštrukcie s obojstrannou piestovou tyčou s magnetickým obvodom v pieste. Návrh tlmiča prebiehal pomocou magnetostatickej analýzy a analytického modelu. Tlmič bol po následnom pevnostnom overení súčastí vyrobený, zložený a otestovaný.

Výsledkom tejto práce je tak funkčná vzorka magnetoreologického tlmiča, ktorý bude slúžiť na výskum využiteľnosti magnetoreologických technológií pri veľkých rázoch.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

Magnetoreologický tlmič, MR technológie, MR kvapalina, vysoký šmykový spád, veľký ráz

ABSTRACT

Currently, there is a growing development of smart technologies, which include dampers with variable characteristics. These characteristics are achieved using magnetorheological fluids, which can change their properties based on the intensity of a magnetic field. Their use has potential in high-speed applications, however, knowledge about their behavior under impact loading is limited.

The aim of this work is to develop, manufacture, and test a magnetorheological damper designed for research into the behavior of MR fluids under high shear rates. The proposed damper features a simple design with a double-ended piston rod and a magnetic circuit in the piston. The design process involved magnetostatic analysis and an analytical model. After conducting a structural strength verification of its components, the damper was manufactured, assembled, and tested.

The result of this work is a functional prototype of a magnetorheological damper, which will be used to study the applicability of MR technologies under high-impact conditions.

UNCLASSIFIED

Based on Foreground Information under EDA Contract No No B.PRJ.RT.980 covering the Ad Hoc Project entitled “COMMON LINK – Computational modelling for long inter-sectoral advanced knowledge on Non-Newtonian fluids (NNF)”.

KEYWORDS

Magnetorheological damper, MR technologies, MR fluid, high shear rate, high impact

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

BAJZA, Radoslav. *Konstrukční návrh experimentálního MR tlumiče pro velké rázy*. Online, diplomová práce. Milan KLAPKA (vedoucí práce). Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2025. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/165712>. [cit. 2025-05-23].

POĎAKOVANIE

Na tomto mieste by som sa rád poďakoval doc. Ing. Milanovi Klapkovi PhD. za odborné vedenie, cenné rady a za čas, ktorý mi venoval pri vypracovávaní tejto práce. Tiež by som sa rád poďakoval doc. Ing. Michalovi Kubíkovi PhD. za jeho odborné rady a pomoc pri vývoji, výrobe a zostavovaní funkčného vzorku.

PREHLÁSENIE AUTORA O PÔVODNOSTI PRÁCE

Prehlasujem, že diplomovú prácu som vypracoval samostatne, pod odborným vedením doc. Ing. Milana Klapku, Ph.D. Súčasne prehlasujem, že všetky zdroje obrazových a textových informácií, z ktorých som čerpal, sú riadne citované v zozname použitých zdrojov.

.....

Podpis autora

OBSAH

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | ÚVOD | 14 |
| 2 | PREHLAD SÚČASNÉHO STAVU POZNANIA | 15 |
| 2.1 | Rešeršné metódy | 15 |
| 2.2 | Úvod do problematiky magnetoreologických kvapalín | 17 |
| 2.3 | Typy magnetoreologických tlmičov | 19 |
| 2.3.1 | Jednoplášťový MR tlmič s jednostrannou piestnicou | 20 |
| 2.3.2 | Jednoplášťový MR tlmič s priechodnou piestnicou | 21 |
| 2.3.3 | Dvojplášťový MR tlmič s jednostrannou piestnicou | 21 |
| 2.4 | Modelovanie správania sa MR tlmičov | 22 |
| 2.4.1 | Pasívna zložka sily tlmiča | 23 |
| 2.4.2 | Aktívna zložka sily tlmiča | 24 |
| 2.4.3 | Doplnenie modelu | 24 |
| 2.4.4 | Celková sila MR tlmiča | 25 |
| 2.5 | Tranzientné správanie sa MR kvapalín | 26 |
| 2.6 | Magnetoreologické tlmiče pre rýchle rázy a ich testovanie | 28 |
| 2.6.1 | Metódy testovania | 28 |
| 2.6.2 | Testované MR tlmiče | 30 |
| 2.7 | Zhrnutie hlavných poznatkov | 34 |
| 3 | ANALÝZA PROBLÉMU A CIEĽ PRÁCE | 35 |
| 3.1 | Vymedzenie problému | 35 |
| 3.1.1 | Názov a klasifikácia produktu | 36 |
| 3.1.2 | Zákazník | 36 |
| 3.1.3 | Spotrebiteľ | 36 |
| 3.1.4 | Ciele vývoja | 36 |
| 4 | KONCEPČNÉ RIEŠENIA | 37 |
| 4.1 | Analýza cieľov a špecifikácie obmedzení | 37 |
| 4.2 | Technická funkčná analýza | 38 |
| 4.3 | Návrh alternatívnych riešení | 39 |
| 4.3.1 | Koncepty typu tlmiča | 39 |
| 4.3.2 | Koncepty piestu | 40 |
| 4.3.3 | Alternatívne riešenia | 42 |
| 4.4 | Analýza alternatívnych riešení a výber najlepšieho | 43 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 5 | PREDBEŽNÝ NÁVRH | 45 |
| 5.1 | Matematický model prvého variantu piestu | 45 |
| 5.1.1 | Magnetostatická analýza | 45 |
| 5.1.2 | Analytický model | 48 |
| 5.1.3 | Návrh prvého variantu piestu | 50 |
| 5.2 | Určenie tvarov, rozmerov a materiálov | 51 |
| 5.3 | Testovanie prvého variantu tlmiča | 53 |
| 5.4 | Návrh druhého variantu piestu tlmiča | 54 |
| 5.4.1 | Magnetostatická analýza | 54 |
| 5.4.2 | Analytický model | 56 |
| 5.4.3 | Druhý variant piestu | 57 |
| 6 | DETAILNÝ NÁVRH | 59 |
| 6.1 | Valec | 59 |
| 6.2 | Piest | 61 |
| 6.3 | Piestové tyče | 63 |
| 6.4 | Veká tlmiča | 65 |
| 6.5 | Krycí valec | 67 |
| 6.6 | Odpruženie tlmiča | 68 |
| 6.7 | Expanzná komora | 70 |
| 6.8 | Senzorika | 71 |
| 6.8.1 | Silomer | 71 |
| 6.8.2 | Senzor polohy | 71 |
| 6.8.3 | Senzor polohy | 72 |
| 6.9 | Testovanie tlmiča | 73 |
| 6.9.1 | Meranie na pulzátore | 73 |
| 6.9.2 | Testovanie tlmiča rázom | 74 |
| 6.10 | Hodnotenie kľúčových parametrov | 76 |
| 7 | ZÁVER | 79 |
| 8 | VÝSLEDOK VÝSKUMU PODĽA RIV | 81 |
| 8.1 | Druh výsledku | 81 |
| 8.2 | Názov výsledku | 81 |
| 8.3 | Autori | 81 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 8.4 | Technický popis | 81 |
| 8.5 | Miesto uloženia výsledku | 81 |
| 9 | ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV | 82 |
| 10 | ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK, SYMBOLOV A VELIČÍN | 85 |
| 11 | ZOZNAM OBRÁZKOV A GRAFOV | 87 |
| 12 | ZOZNAM TABULIEK | 91 |
| 13 | ZOZNAM PRÍLOH | 92 |

1 ÚVOD

V poslednom čase zaznamenali magnetoreologické technológie veľký rozvoj. Vďaka svojej všestranosti a jednoduchosti sa využívajú v podvozkoch cestných vozidiel v stavebníctve na ochranu budov pred otrasmi, v robotike na presné ovládanie pohybu mechanizmov či v priemysle na tlmenie vibrácií výrobných strojov. Potenciál ich využitia sa ukazuje aj vo vysokorýchlostných aplikáciách kde dochádza k rýchlym rázom, ktoré je treba brzdiť a tmiť. Príkladom takejto oblasti je vojenstvo, kde môžu byť magnetoreologické technológie prínosom pri brzdení záklzu diel či ochrane posádky vozidiel pred následkami výbuchov, alebo letectvo, kde sú kladené veľké nároky na tlmenie rázov pri pristávaní. V týchto aplikáciách sa bežne využívajú pasívne tlmiče zložitých konštrukcií, ktoré by sa dali nahradiť magnetoreologickými, ktoré svojou jednoduchosťou a absenciou pohyblivých súčastí môžu zvýšiť spoľahlivosť a znížiť hmotnosť daného zariadenia.

Problémom magnetoreologických technológií je ich biele miesto pri vysokorýchlostných aplikáciách. Väčšina súčasných MR tlmičov, bŕzd a iných zariadení pracuje pri rýchlostiach do 2 m/s. A modely, pomocou ktorých sa navrhujú sú odvodené len pre nízke rýchlosti a mnoho faktorov, ktoré sa prejavujú pri vyšších rýchlostiach nezahŕnjú. Preto je potrebné rozšíriť poznanie o využiteľnosti magnetoreologických technológiách pri vyšších rýchlostiach.

To je cieľom aj výskumnej skupiny z Odboru technickej diagnostiky na Ústave konštruovania na Fakulte strojného inžinierstva Vysokého učení technického v Brne. Cieľom ich výskumu je popísať správanie magnetoreologických kvapalín pri vysokých šmykových spádoch. Majú k tomu k dispozícii novo postavené zariadenie simulujúce rázové zaťaženie pomocou pádu bremena, ktoré dokážu urýchliť až na rýchlosť 6 m/s. Problémom však je absencia vhodného tlmiča, ktorý by bol za takých rýchlostí schopný fungovať. Preto je cieľom tejto práce navrhnuť taký magnetoreologický tlmič, ktorý dokáže pracovať pri rýchlych rázoch a zároveň umožňuje zaznamenávať svoje funkčné parametre, ktoré budú slúžiť ako vstup do výskumu využitia MR technológií pri vysokých rýchlostiach.

2 PREHĽAD SÚČASNÉHO STAVU POZNANIA

Táto rešerš bola vytvorená s cieľom popísať súčasný vývoj v oblasti magnetoreologických tlmičov. Je rozdelená do niekoľkých častí: prvá popisuje postup pri tvorení systematickej rešerš, druhá sa zaoberá predstavením magnetoreologických technológií, tretia predstavuje konkrétny spôsob využitia MR technológií, teda tlmiče, štvrtá a piata popisuje modelovanie ich správanie, šiesta nazerá na súčasné konštrukcie, ktoré sa využívajú na tlmenie rýchlych rázov.

2.1 Rešeršné metódy

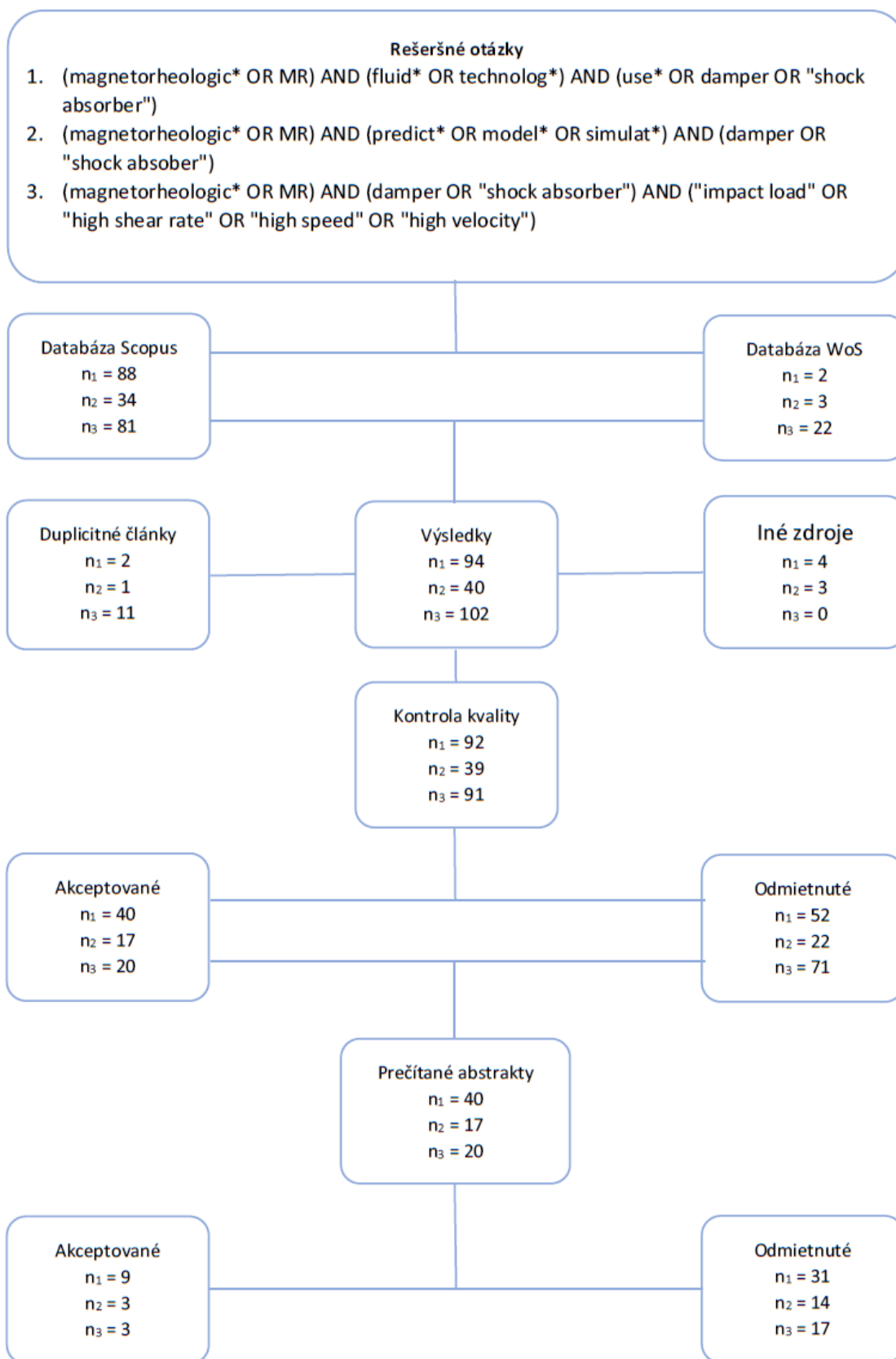
Pre rešeršnú časť práce boli vytvorené rešeršné otázky, na základe ktorých boli z databáz Scopus, Web of Science a Google Scholar získané literárne zdroje. Tie boli následne roztriedené podľa jednotlivých kritérií:

- Relevancia témy.
- Scientometrické údaje, teda h – index autora, počet citácií článku a Impact Factor periodika.
- Abstrakt.

Použité rešeršné otázky sú:

- 1. Čo sú to magnetoreologické technológie a aké majú využitie?**
(magnetorheologic* OR MR) AND (fluid* OR technolog*) AND (use* OR damper OR "shock absorber")
- 2. Ako sa modeluje a predikuje tok MR kvapaliny v MR tlmičoch?**
(magnetorheologic* OR MR) AND (predict* OR model* OR simulat*) AND (damper OR "shock absorber")
- 3. Aké sú konštrukcie MR tlmičov, ktoré pracujú pri vysokých šmykových spádoch?**
(magnetorheologic* OR MR) AND (damper OR "shock absorber") AND ("impact load" OR "high shear rate" OR "high speed" OR "high velocity")

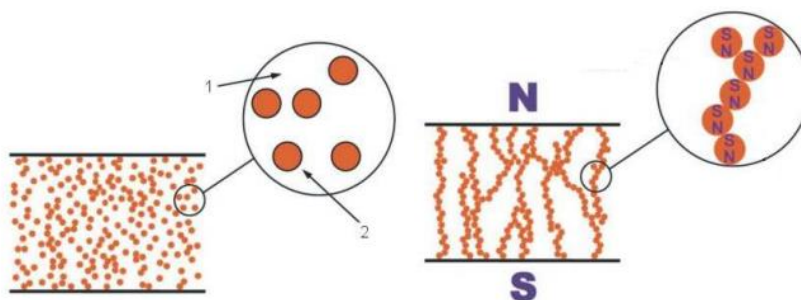
Okrem článkov nájdených pomocou vyššie uvedených vyhľadávačov vstupovali do rešerše aj externé zdroje, odporúčené vedúcim práce alebo použité pri vypracovávaní bakalárskej práce. Na nasledujúcej stránke je zobrazený PRISMA diagram, znázorňujúci výber a triedenie publikácií.



Obr. 2-1 PRISMA diagram selekcie literárnych zdrojov.

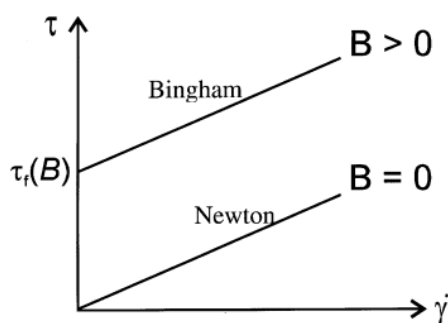
2.2 Úvod do problematiky magnetoreologických kvapalín

Magnetoreologické (MR) kvapaliny sú suspenzie mikroskopických feromagnetických častíc (najčastejšou skupinou materiálov sú karbonyly železa) rozptýlených v nosnej kvapaline, ktorou môže byť syntetický či minerálny olej alebo etylénglykol [1]. Okrem pevných častíc a disperzného média, teda nosnej kvapaliny obsahujú MR kvapaliny ešte aditíva, ktoré predovšetkým zabraňujú usádzaniu rozptýlených častíc. Za normálnych podmienok sa tieto kvapaliny správajú ako iné suspenzie, pričom ich správanie je bežne pripodobňované Newtonským kvapalinám. Pri aplikácii kvapaliny do magnetického poľa dochádza k vytvoreniu dipólového momentu u rozptýlených častíc. Vplyvom magnetického poľa sa tieto dipóly začnú orientovať v smere magnetického poľa. Postupne sa magnetické častice začnú zhlukovať za sebou a tvoriť reťazce v smere magnetických indukčných čiar. Na obrázku 2-2 je zobrazená schéma, ktorá ukazuje voľne rozptýlené častice v kvapaline, keď nie je aplikované magnetické poľa ako aj ich zreťazenie, keď sa do magnetického poľa častice dostanú.



Obr. 2-2 Schéma MR kvapaliny v nezmagnetizovanom stave (vľavo) a v zmagnetizovanom stave (vpravo) [1].

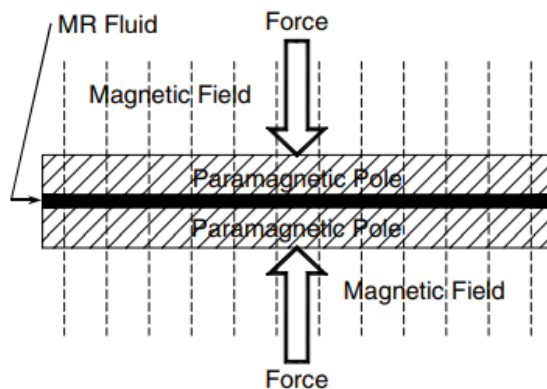
Takto zreťazené častice bránia toku kvapaliny v smere kolmom na tieto reťazce. Týmto sa v oblasti magnetizácie častíc v kvapaline vytvorí medza toku, ktorá sa prejavuje ako zdanlivo zvýšená viskozita. Bežne sa takéto správanie aktivovanej MR kvapaliny reprezentuje Binghamovým modelom. Na obrázku 2-3 je diagram porovnávajúci Binghamov model správania sa kvapaliny s Newtonovským modelom.



Obr. 2-3 Porovnanie závislosti šmykového napätia na šmykovom spáde pre Binghamov a Newtonov model [2].

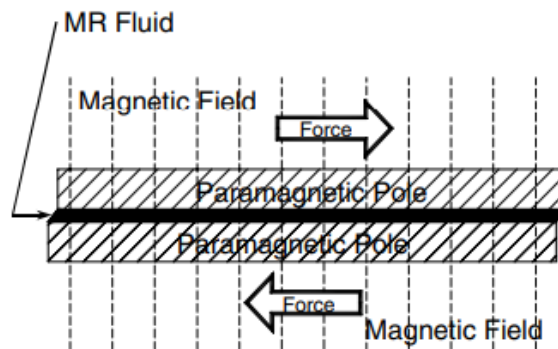
Dôležitou vlastnosťou magnetoreologických kvapalín je to, že sily väzieb v reťazcoch častíc sú závislé na intenzite magnetického poľa [3]. Zmenou intenzity poľa je teda možné meniť veľkosť síl, ktoré držia pohromade reťazce častíc, čím je možné meniť celkovú medzu toku MR kvapaliny. Medzu toku však nejde zvyšovať donekonečna. Pri určitej maximálnej hodnote intenzity magnetického poľa dôjde k saturácii zreťazených častíc magnetickým poľom. v tomto okamihu dosahujú väzby svoju maximálnu silu a medza toku sa už nezvyšuje. U bežných MR kvapalín je hodnotou magnetickej intenzity, pri ktorej sa kvapalina nasýti 300 kA/m, avšak už v polovici tejto hodnoty sa strmosť závislosti medze toku kvapaliny na intenzite znižuje, čím sa efektívnosť riadenia medze toku kvapaliny znižuje [2]. Keďže zmena intenzity magnetického poľa je jednoduchá a je možné ju docieľiť použitím elektromagnetu, na ktorom sa dá sila jeho magnetického poľa meniť jednoduchou zmenou veľkosti elektrického prúdu, využíva sa v mnohých aplikáciách. Príkladom využitia môžu byť lineárne aj rotačné tlmiče, ktoré sa využívajú v aplikáciách od automobilového priemyslu, kde sú súčasťou adaptívnych podvozkov vozidiel, cez staviteľstvo kde slúžia na semiaktívne tlmenie otrasov zeme, čím sú chránené budovy pred zemetrasením až po tlmenie vibrácií bubnov pračiek. Okrem tlmičov sa používajú aj v lineárnych a rotačných brzdách a spojkách, v magnetoreologických ventiloch i v elastoméroch s meniteľnou tuhosťou.

Tieto zariadenia môžu využívať MR kvapalinu v troch spôsobmi. Prvým je tzv. vytlačací mód (squeeze mode), kedy je kvapalina vytláčaná spomedzi dvoch paralelných dosiek, ktoré sa vzájomne k sebe približujú. Využitie tohto módu je obmedzené, najčastejšie sa vyskytuje práve pri magnetoreologických brzdách a spojkách [4]. Na obrázku 2-4 je schéma znázorňujúca fungovanie squeeze módu.



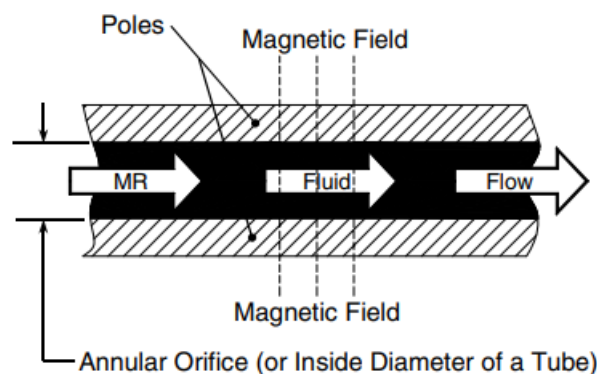
Obr. 2-4 Schéma namáhania MR kvapaliny v squeeze móde [4].

Ďalším spôsobom využívania MR kvapalín je šmykový (shear) mód. V tomto prípade je kvapalina tiež medzi dvoma paralelnými doskami, ktoré sa však voči sebe pohybujú paralelne a namáhajú MR kvapalinu na strih. Tento spôsob použitia je vhodný len pri zariadeniach, ktoré generujú malú silu, väčšinou sa jedná o rotačné tlmiče a brzdy, prípadne spojky [4]. Na obrázku 2-5 je fungovanie tohto módu graficky znázornené.



Obr. 2-5 Schéma namáhania MR kvapaliny v shear móde [4].

Tretím spôsobom je využitia MR kvapaliny je ventilový (flow) mód. Tu sú paralelné dosky nehybné a kvapalina prúdi medzi nimi. Toto je najčastejší spôsob využitia MR kvapalín a využíva sa práve u zariadení, ktoré dosahujú vysoké hodnoty svojich odporových síl. Príkladom sú práve lineárne tlmiče či elektromagnetické ventily [4]. Na nasledujúcom obrázku číslo 2-6 je znázornená funkcia tohto módu zaťažovania MR kvapaliny.



Obr. 2-6 Schéma namáhania MR kvapaliny vo flow móde [4].

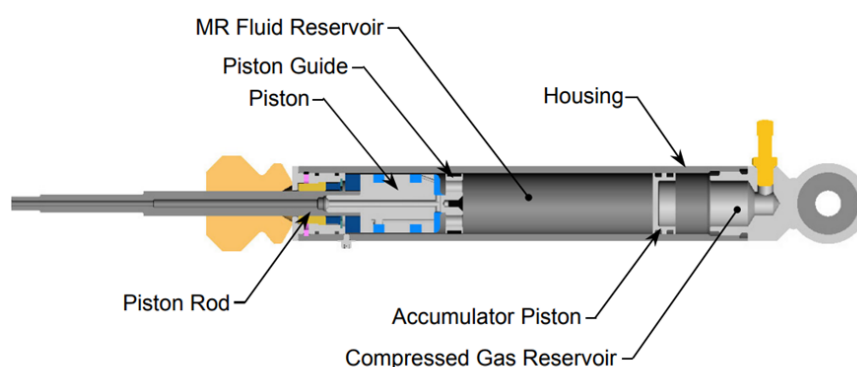
2.3 Typy magnetoreologických tlmičov

Tlmiče sú zariadenia, ktoré počas svojho pohybu generujú silu, ktorá mieri proti smeru pohybu a tým ho brzdí. Ich najdôležitejším parametrom je tlmiaca konštanta b , ktorá u lineárnych tlmičov udáva závislosť tlmiacej sily na rýchlosti ich pohybu. V prípade nelineárnych tlmičov ich závislosť na rýchlosti pohybu udáva ich silová, alebo aj F - v charakteristika. Magnetoreologické tlmiče sú v tomto ohľade výnimočné, pretože ich silová charakteristika sa dá meniť práve zmenou elektrického prúdu, ktorý ich napája. Väčšina tlmičov pracuje na princípe využívania pasívnych odporov, ktoré vznikajú pri prietoku pracovnej kvapaliny škrtiacimi drážkami. Väčšina súčasných MR tlmičov pracuje

na podobnom princípe, avšak v samotných škrtiacich drážkach dochádza ešte k aktivácii MR kvapaliny magnetickým poľom, ktoré je budené pomocou cievky. Väčšina tlmičov tak pracuje vo ventilovom móde, ale u niektorých typov môže byť využívaný kombinovaný mód flow – shear. Najrozšírenejšie typy MR tlmičov sú uvedené v nasledujúcich podkapitolách.

2.3.1 Jednoplášťový MR tlmič s jednostrannou piestnicou

Jedná sa o najrozšírenejší magnetoreologický tlmič vychádzajúci z bežných pasívnych tlmičov. Jeho najväčšou prednosťou je jeho jednoduchosť a relatívne nízka náročnosť na zástavbu [5]. Prierez modelom takéhoto tlmiča je zobrazený na obrázku 2-7.



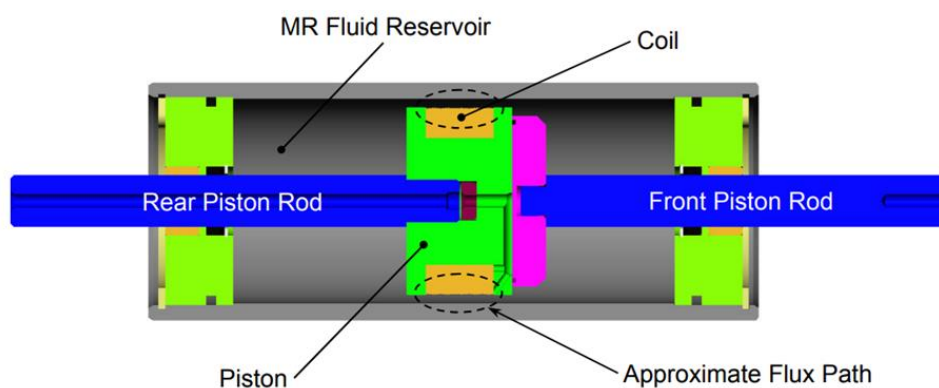
Obr. 2-7 Prierez modelom jednoplášťového MR tlmiča s jednostrannou piestnicou [4].

Je tvorený jedným plášťom s pracovným priestorom rozdeleným plávajúcym piestom. Plávajúci piest od seba oddeľuje rezervoár MR kvapaliny a plynovú komoru. V rezervoári tlmiča sa pohybuje piest, ktorý rezervoár delí na kompresnú a odskokovú komoru. V pieste sú umiestnené škrtiace drážky, cez ktoré počas zdvihu prúdi kvapalina a generuje tlakový rozdiel na čelách piestu. Tým sa generuje tlmiaca sila tlmiča. Na rozdiel od svojich pasívnych náprotivkov obsahuje piest cievku, ktorej os je zhodná s osou piestu. Pri napájaní cievky dochádza k budeniu magnetického poľa, ktoré prechádza dvoma pólmi cez štrbinu, kde aktivuje MR kvapalinu. Magnetický obvod je potom uzavretý buď vonkajším plášťom piestu, ktorý býva bežne tvorený jednoduchou trubkou, alebo samotným plášťom tlmiča, ktorý ale musí byť pre to vyrobený z materiálu s vhodnými magnetickými vlastnosťami. v druhom spomínanom prípade škrtiacu štrbinu tvorí vôľa medzi piestom a plášťom tlmiča a kvapalina je tu využívaná v kombinovanom flow – shear móde. Alternatívne, môže byť v pieste umiestnených viacero cievok a tým je teda navýšený aj počet aktívnych zón, kde sa môže MR kvapalina magnetizovať. Napájanie cievky alebo sústavy cievok je zabezpečené káblom vedeným dutou piestovou tyčou. Piestnica prenáša zaťaženie a tlmiacu silu. Pri pracovnom zdvihu vniká do rezervoáru tlmiča a zaberá priestor, ktorý pôvodne obsahoval magnetoreologickú kvapalinu. Na kompenzáciu objemu vnikajúcej piestnice slúži práve

plynová komora oddelená od rezervoáru plávajúcim piestom. Plynová komora je natlakovaná a slúži ako pneumatická pružina, ktorá je stláčaná MR kvapalinou. Takýto typ tlmiča je rozšírený najmä v automobilovom priemysle. Jeho nevýhodou je však sklon ku kavitácii v MR kvapaline pri veľmi rýchlom posuve piestu [5]. Toto riziko je spôsobené rýchlym stlačením plynovej komory MR kvapalinou, ktorú vytlačí piest. V odskokovej komore poklesne tlak natoľko, že nosná kvapalina začne kavitovať.

2.3.2 Jednoplášťový MR tlmič s prechodovou piestnicou

Tento typ tlmiča má podobne ako predošlý typ jednoduchý jeden plášť a piest s cievkou vnútri, kde v drážkach dochádza ku generovaniu tlmičacej sily a magnetizácii MR kvapaliny. Na rozdiel od ostatných typov má však piestovú tyč prechádzajúcu na obidve strany tlmiča. Pri pracovnom zdvihu je tak objem vnikajúcej piestnice rovný objemu vychádzajúcej piestnice na druhom konci tlmiča. Tento typ teda nepotrebuje plynovú komoru ani žiaden iný mechanizmus na kompenzáciu objemu piestnice. Vďaka tomu sa jedná o jednoduchú a robustnú konštrukciu, potenciálne vhodnú aj na vysokorýchlostné aplikácie, keďže vďaka absencii plynovej komory u neho nie je riziko vzniku kavitácie v nosnej kvapaline. Takisto zaťaženie u neho prenáša piestnice, ktorá môže mať plný prierez, čím znesie väčšie zaťaženie. Prívod vedenia do cievky v pieste môže byť riešený cez druhú piestnicu, ktorá neprenáša zaťaženie. Na oboch stranách vychádzajúca piestová tyč však so sebou nesie aj nevýhody, najmä to, že tlmič je oproti jednostrannému náprotivku je náročnejší na zástavbu. Na obrázku 2-8 je zobrazený prierez takýmto tlmičom.

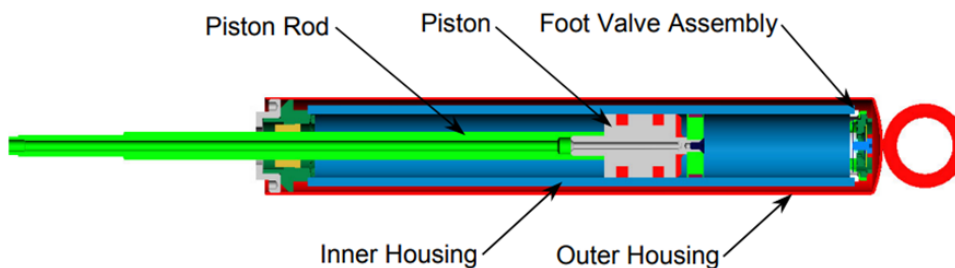


Obr. 2-8 Prierez schémou MR tlmiča s prechádzajúcou piestovou tyčou [4].

2.3.3 Dvojplášťový MR tlmič s jednostrannou piestnicou

Na rozdiel od vyššie spomenutých typov má tento typ tlmiča až dva plášte, vnútorný a vonkajší. Vo vnútornom plášti sa nachádza rezervoár, v ktorom sa pohybuje piest. Ten tiež obsahuje škrtiace drážky a cievku a funguje rovnako, ako piest popísaný u jednoplášťového

tlmiča s jednostrannou piestovou tyčou. Zaťaženie ako u prvého spomenutého typu prenáša piestnica, ktorá musí byť dutá, aby bol cez ňu vedený kábel napájania cievky. Napriek tomu, že má tento tlmič na jednu stranu vyvedenú piestnu tyč, tak nepotrebuje na kompenzáciu jej objemu pri jej vnikaní do rezervoáru plynovú komoru. Jeho funkciu nahrádza práve druhý plášť a komora, ktorá je tvorená voľným priestorom medzi vonkajším a vnútorným plášťom. Pri pracovnom zdvihu objem vnikajúcej piestnice vytláča MR kvapalinu cez ventil na opačnom konci, cez ktorý kvapalina prechádza do priestoru medzi plášťami. Plášte sa voči sebe pohybujú, čím vytvárajú priestor pre vnikajúcu kvapalinu. Takýto tlmič je výhodný na zástavbový priestor, keďže je možné, aby bol ešte kratší než jeho náprotivok s plynovou komorou. Mechanicky je však najzložitejší z uvedených typov a je u neho väčšie riziko úniku pracovnej kvapaliny z dôvodu potreby utesniť vonkajší plášť voči vnútornému plášťu [5]. Na obrázku 2-9 je rez schémou tohto tlmiča.



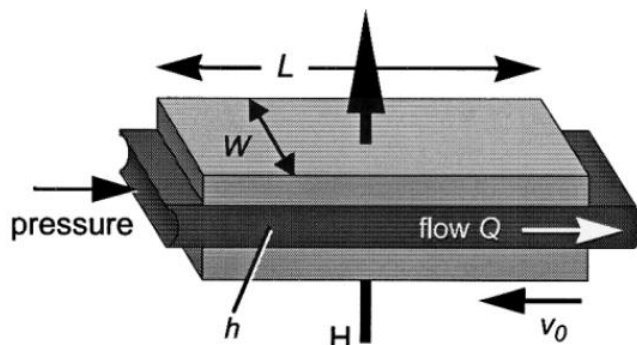
Obr. 2-9 Prierez schémou dvojplášťového MR tlmiča s jednostrannou piestovou tyčou [4].

2.4 Modelovanie správania sa MR tlmičov

Za účelom správneho návrhu tlmičov pracujúcich s magnetoreologickou kvapalinou je nutné ich správanie namodelovať. Pre nízko rýchlostné aplikácie častokrát vystačí jednoduchý Binghamov model, ktorý je spomenutý vyššie. Tento model pracuje s medzou toku MR kvapaliny, ktorá je závislá na intenzite magnetického poľa. Ďalej je u tohoto modelu nutné poznať dynamickú viskozitu kvapaliny a rýchlosť šmyku. So znalosťou týchto veličín je možné určiť šmykové napätie v kvapaline pri prúde. Problémom tohoto modelu je výrazné zjednodušenie správania sa MR kvapalín voči realite. Počíta s okamžitým vytvorením medze toku a uvažuje, že priebeh šmykového napätia s narastajúcou rýchlosťou šmyku stúpa lineárne.

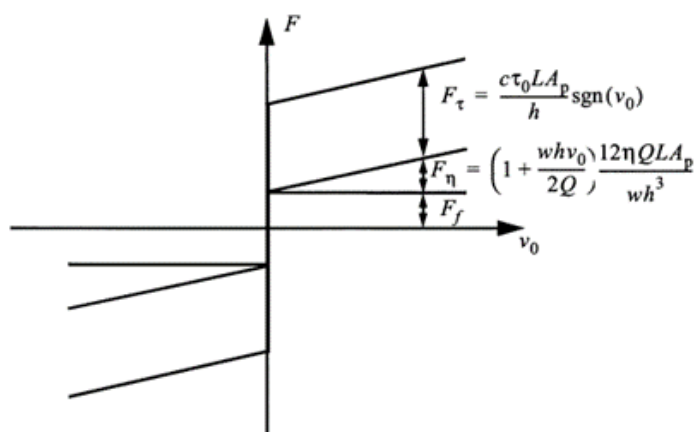
Yang, Spencer a spol. [6] preto navrhli model správania sa MR kvapaliny pri toku medzi dvoma paralelnými doskami pričom ho odvodili na základe Navier – Stokesových rovníc. Tento model je možné využiť aj na modelovanie MR kvapaliny, ktorá prúdi kruhovou drážkou. Podľa autorov rozdiel medzi týmto modelom a zložitejším axisymetrickým dosahuje do 2 % [6]. Pre určenie správania sa kruhovej drážky sa stredná kružnica rozvinie

a použije sa jej obvod ako šírka drážky. Na obrázku 2-10 je zobrazená schéma drážky, ktorá je predmetom tohto matematického modelu. Sú na nej vyznačené dôležité parametre, ktoré vstupujú do výpočtu.



Obr. 2-10 Schéma toku MR kvapaliny dvoma paralelnými drážkami [6].

Matematický model je rozdelený do niekoľkých zložiek, ktoré v súčte tvoria výslednú silu tlmiča F_0 . Týmito zložkami sú pasívna sila (ďalej rozdelená na viskóznou pasívnu silu a treciu silu) a aktívna sila. Súčet týchto zložiek je znázornený na schéme na obrázku 2-11.



Obr. 2-11 Schéma znázorňujúca súčet zložiek sily magnetoreologického tlmiča [6].

2.4.1 Pasívna zložka sily tlmiča

Táto sila nie je ovládateľná magnetoreologickým efektom. Jej príčinou je samotná konštrukcia tlmiča. Skladá sa z niekoľkých častí:

- **Trecia sila F_T :** sila, ktorá pôsobí proti smeru pohybu a je spôsobená pasívnymi odporami vo vedení a tesnení piestovej tyče a piestu. Určiť sa dá iba empiricky.
- **Pasívna zložka sily spôsobená viskozitou kvapaliny F_η :** je spôsobená samotným odporom magnetoreologickej kvapaliny voči toku cez zúženú drážku vysokou rýchlosťou. Samotná sila je priamo úmerná tlakovému rozdielu medzi čelami tlmiča a je daná nasledujúcim vzťahom:

$$F_{\eta} = \Delta p_{\eta} \cdot A_p \quad (1)$$

kde Δp_{η} je tlaková zmena na pieste spôsobená pasívnym odporom kvapaliny a A_p je plocha čela piestu. Tlaková zmena je daná nasledujúcim vzťahom [6]:

$$\Delta p_{\eta} = \left(1 + \frac{whv_0}{2Q}\right) \frac{12\eta QL}{wh^3} \quad (2)$$

Veľkosť tlakovej zmeny je teda daná rozmermi drážky, kde L je jej dĺžka, w je jej šírka (v prípade kruhovej drážky je w obvod strednej kružnice drážky) a h je jej výška. Ďalej je tlaková zmena závislá na dynamickej viskozite použitej magnetoreologickej kvapaliny η , na objemovom prietoku drážkami Q a na rýchlosti piestu v_0 . Objemový prietok je daný piestovou rýchlosťou a plochou čela piestu.

2.4.2 Aktívna zložka sily tlmiča

Poslednou zložkou sily tlmiča, ktorú model popisuje je aktívna sila F_{τ} , ktorá je spôsobená aktiváciou magnetoreologickej kvapaliny v póloch piestu. Tá je daná nasledujúcim vzťahom:

$$F_{\tau} = \Delta p_{\tau} \cdot A_p \quad (3)$$

kde Δp_{τ} je tlaková zmena spôsobená vyvinutou medzou toku v MR kvapaline a je daná vzťahom [6]:

$$\Delta p_{\tau} = \left(2,07 + \frac{12Q\eta}{12Q\eta + 0,4wh^2\tau_0}\right) \cdot \frac{\tau_0 L_p}{h} \quad (4)$$

Do tejto rovnice vstupuje medza toku τ_0 , čo je vlastnosť danej magnetoreologickej kvapaliny a je závislá na intenzite magnetického poľa, ktoré na ňu pôsobí. Závislosť konkrétnej kvapaliny spravidla udáva výrobca. Ďalej je tu kritická súhrnná dĺžka pólov L_p , v ktorých dochádza k magnetizácii pracovnej kvapaliny. Táto dĺžka býva spravidla menšia, než je dĺžka celej drážky v pieste, pretože v priestore nad cievkou magnetické pole nemá smer kolmý na tok kvapaliny.

2.4.3 Doplnenie modelu

Vyššie uvedený model, ktorý vypracovali Yang, Spencer a spol. [6] je dostatočný pre modelovanie väčšiny magnetoreologických tlmičov, no nezahŕňa ešte ďalšie vplyvy, ktoré dokážu zvýšiť pasívnu silu tlmiča. Nasledujúce rozšírenia uviedli vo svojej práci Gołdasz a spol. [5].

Prvým rozšírením je vplyv miestnych strát tlaku na celkový tlakový rozdiel na pieste tlmiča. Miestne straty vznikajú, keď musí kvapaliny pri svojom toku prekonávať určité tvarové

prvky kanála, jeho zúženia, rozšírenia a iné. Miestne tlakové straty sa počítajú nasledujúcim vzťahom:

$$\Delta p_H = \frac{K_L \rho v^2}{2} \quad (5)$$

Do tohto vzťahu vstupuje hustota MR kvapaliny ρ a súčiniteľ miestnych strát K_L , ktorý je závislý na type tvarového prvku. Rýchlosť v je rýchlosť prúdenia kvapaliny v drážke. Sila F_H od miestnych strát sa potom určí vzťahom:

$$F_H = \Delta p_H \cdot A_p \quad (6)$$

Ďalším rozšírením modelu, ktorý Gołdasz a spol. [5] predstavili je tlakový rozdiel spôsobený zrýchlením kvapaliny v drážkach. Doteraz uvádzané modely uvažujú konštantný pohyb magnetoreologickej kvapaliny, avšak pri zrýchlení tlmiča dochádza aj k zrýchľovaniu kvapaliny v tlmiči, čo spôsobí nárast sily tlmiča nad hodnotu, ktorá je spôsobená vyššie popísanými zložkami sily, ktoré dané okamžitou rýchlosťou. Vzťah popisujúci silu F_a od tlakového rozdielu Δp_a na pieste spôsobenú zrýchľovaním kvapaliny je nasledovný [6]:

$$F_a = \rho \cdot L \cdot \dot{Q} \quad (7)$$

kde L je znovu dĺžka celej drážky a \dot{Q} je objemové zrýchlenie, získané deriváciou objemového prietoku podľa času. Pokiaľ je prierez drážky nemenný, tak objemové zrýchlenie je dané len deriváciou meniacej sa rýchlosti prúdenia MR kvapaliny drážkou.

2.4.4 Celková sila MR tlmiča

Pri započítaní týchto doplnkov k Yang – Spencerovmu modelu je celková pasívna sila F_{uc} daná súčtom:

$$F_{uc} = F_T + F_\eta + F_H + F_a \quad (8)$$

a celková sila tlmiča F zahrnujúca aj aj ovládateľnú zložku je daná:

$$F = F_{uc} + F_\tau \quad (9)$$

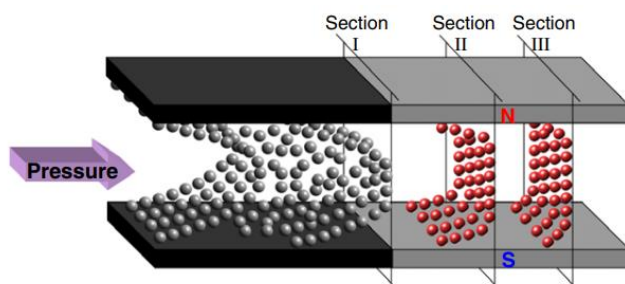
Zrovnáním celkovej sily tlmiča k sile pasívnej sa získa dôležitý ukazovateľ ovládateľnosti tlmiča, jeho dynamický rozsah D . Daný je vzťahom [6]:

$$D = \frac{F}{F_{uc}} \quad (10)$$

Čím je jeho hodnota vyššia, tým viac sila tlmiča jeho napájaním narastá oproti vypnutému stavu, kedy sa správa ako pasívny tlmič.

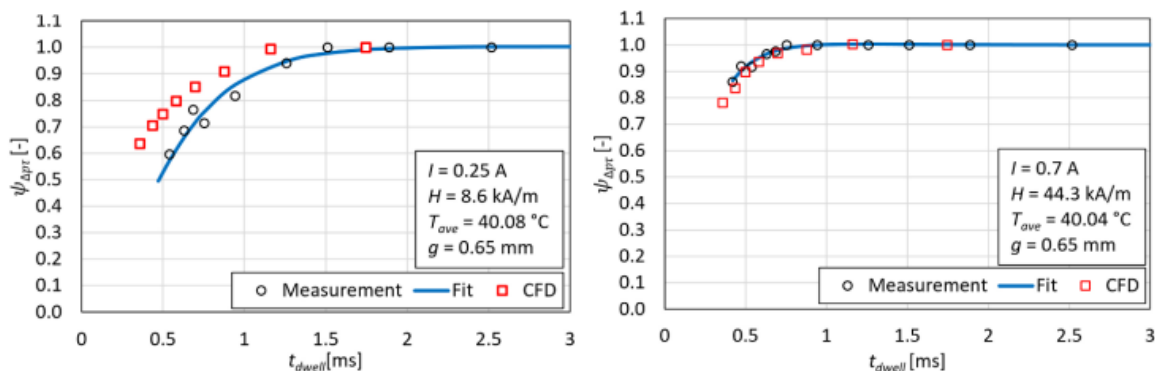
2.5 Tranzientné správanie sa MR kvapalín

Pri skokovej zmene napájania MR tlmíča nedôjde k okamžitej zmene medze toku magnetoreologickej kvapaliny. Je to spôsobené viacerými faktormi. Jedným z nich je zloženie samotnej kvapaliny. Po náhlej zmene intenzity magnetického poľa dochádza k preskupovaniu častíc do reťazcov, čo je jav, ktorý trvá určitú dobu. Vo svojej práci sa Kubík a spol. [7] venovali vplyvu času formovania medze toku na ovládateľnosť MR ventilu. Naznačili problém, ktorý môže vzniknúť nielen zmenou napájania tlmíča, ale aj samotným vstupom MR kvapaliny do aktívnej zóny drážky, kde sa začne magnetizovať. Na obrázku 2-12 je zobrazená schéma, približujúca daný problém.



Obr. 2-12 Grafické znázornenie prechodu MR kvapaliny z neaktívnej zóny kanála do aktívnej [8].

Keď MR kvapalina vstupuje do aktívnej zóny (na obrázku 2-12 začína sekciou I), začína na ňu pôsobiť magnetické pole. Avšak až v sekcii III dôjde k plnému vyvinutiu medze toku, v bode II ju má kvapalina len čiastočnú oproti hodnote, ktorá odpovedá intenzite magnetického poľa. Pokiaľ je však pól kratší, než je vzdialenosť medzi bodmi I a III, úplná medza toku sa nevyvinie a ovládateľná zložka tlmíča klesá. Kubík a spol. [7] pozorovali závislosť času (dwell time), ktorý kvapalina strávil v póle štrbinového reometra. Výsledok pozorovaní, závislosť pomeru skutočnej medze toku k očakávanej medzi toku na čase, ktorý kvapalina strávi v magnetickom poli, je uvedený na obrázku 2-13.



Obr. 2-13 Závislosť pomernej medze toku na čase, ktorý MR kvapalina strávi v magnetickom poli pre dve rôzne veľkosti prúdu napájajúceho elektromagnet reometra [7].

Reakčný čas kvapaliny, teda čas, za ktorý sa kvapalina plne zmagnetizuje je závislý na materiálových vlastnostiach kvapaliny, konkrétne na jej hustote a dynamickej viskozite ako aj na vlastnostiach aktívnej zóny kanála, ktorým prúdi. Tu reakčný čas ovplyvňuje výška štrbiny ako aj intenzita magnetického poľa. Vplyv intenzity je možné pozorovať práve v grafoch na obrázku 2-13, kde u napájania reometra vyšším prúdom viedlo k menšiemu reakčnému času. Pokiaľ je reakčný čas väčší, ako je čas, za ktorý MR kvapalina prejde aktívnou zónou tlmiča, klesá jeho ovládateľnosť a dynamický rozsah [7].

Reakčný čas je jednou z častí, ktorá ovplyvňuje časovú odozvu tlmiča. Pod časovou odozvou sa rozumie čas, za ktorý tlmič vyvinie potrebnú silu v reakcii na zmenu napájania. Ďalším faktorom, ktorý časovú odozvu ovplyvňuje je materiál, z ktorého pozostáva magnetický obvod. Vplyvu materiálov magnetického obvodu na časovú odozvu magnetoreologického tlmiča sa zaoberali Strecker a spol. [9]. V materiáloch magnetického obvodu sa vplyvom magnetického poľa indukujú vírivé prúdy, ktorých magnetické polia smerujú proti poľu cievky a oslabujú ho. Ďalej spôsobujú straty vo vodičoch, zahrievajú magnetický obvod, čím dissipujú energiu vo forme tepla. Pre nízku časovú odozvu je preto vhodné použiť na konštrukciu magnetického obvodu také materiály, ktoré majú vysokú relatívnu permeabilitu, ale zároveň nízku vodivosť a remanenciu. V nasledujúcej tabuľke 2-1 sú zhrnuté niektoré bežne používané materiály na výrobu súčastí magnetických obvodov.

Tab. 2-1 Vlastnosti vybraných materiálov súčastí magnetických obvodov – upravené [9].

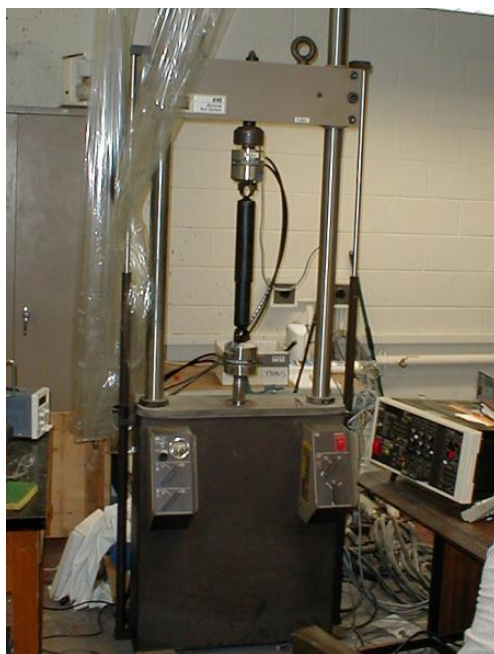
| Materiál | 11SMn30 | Ferit N87 | Sintex SMC | AISI 420A | SLM čisté železo | Vacoflux 50 |
|--|----------------|---------------|---------------|--------------|------------------------|----------------|
| Medza pevnosti (MPa) | 470 | 30 | 75 | 760 | 460 | 350 |
| Rezistivita ($10^{-6} \Omega \cdot m$) | 0,17 | 10 000 000 | 2800 | 0,6 | 0,13 | 0,42 |
| Saturácia (T) | 1,9 | 0,5 | 1,45 | 1,6 | 1,7 | 2,35 |
| Relatívna permeabilita | 1200 | 6400 | 430 | 950 | 1900 | 3850 |
| Obrábateľnosť | Zlá | Zlá | Dobrá | Dobrá | Dobrá | Dobrá |
| Cena | Veľmi nízka | Stredná | Vysoká | Nízka | Vysoká | Vysoká |

2.6 Magnetoreologické tlmiče pre rýchle rázy a ich testovanie

V súčasnosti nie je použitie magnetoreologických tlmičov v oblasti rýchlych rázov veľmi rozšírené, avšak kvôli výhodám, ktoré tieto tlmiče poskytujú voči svojim pasívnym náprotivkom je perspektíva ich využitia extenzívne skúmaná. Väčšina súčasných tlmičov pre rýchle rázy sú experimentálne zariadenia. Testované sú rôznymi metódami, ktorými sa vyvodzujú sily a rýchlosti, ktoré sa očakávajú pri rázovom zaťažení.

2.6.1 Metódy testovania

Prvou, najbežnejšou metódou je testovanie pomocou hydraulického pulzátora. Toto zariadenie využíva tlak hydraulickej kvapaliny na posuv piestu, ku ktorému je pripojený tlmič. Na druhom konci je tlmič upnutý do rámu. Zabudovaná sensorika v pulzátoroch umožňuje sledovať rýchlosť, zrýchlenie, zdvih piestu a celkovú silu tlmiča. Na obrázku 2-14 je zobrazený typický hydraulický pulzátor.

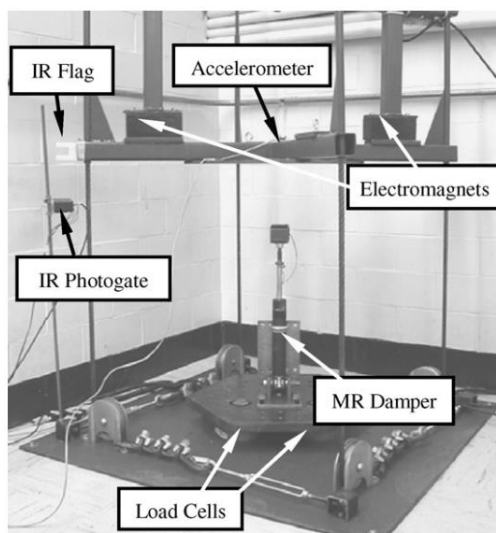


Obr. 2-14 Hydraulický pulzátor počas testu MR tlmiča [4].

Problémom týchto pulzátorov však často býva obmedzená rýchlosť a neschopnosť vyvinúť zrýchlenie, k akému dochádza pri aplikáciách s veľkými rázmi.

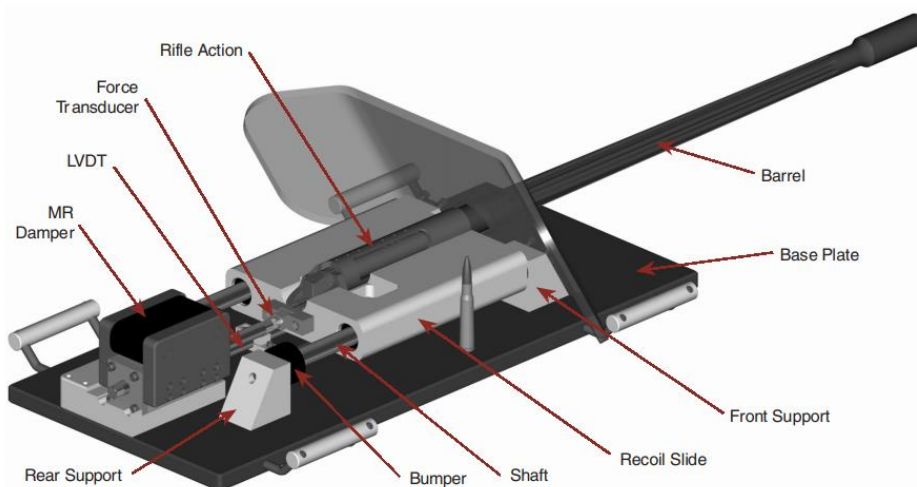
Preto je ďalšou možnosťou pádový test. Počas tohoto testu je skúmaný MR tlmič umiestnený do spodnej časti rámu pádového testovacieho zariadenia. Následne je z hornej časti zariadenia vypustené závažie, ktoré je v ráme vedené a dopadne na tlmič. Počas tohoto testu

sa senzorikou skúma odozva tlmiča na takýto ráz, teda sa skúma zrýchlenie piestu, ktoré bolo vyvolané dopadom závažia a veľkosť sily, ktorú tlmič dosahuje pri danej rýchlosti dopadu. U takýchto zariadení je vyvinutá rýchlosť daná rýchlosťou dopadajúceho závažia, ktorá sa dá nastaviť výškou, z ktorej je závažie vypustené. Na obrázku 2-15 je zobrazená spodná časť takéhoto zariadenia aj s upnutým magnetoreologickým tlmičom.



Obr. 2-15 Spodná časť pádového zariadenia s upnutým MR tlmičom [10].

Ďalšou, viac špecializovanou metódou testovania MR tlmičov rázovým zaťažením je testovanie s pomocou výbušnín. Takto sa testujú tlmiče, ktoré skúmajú využitie MR technológií vo vojenskej sfére. Pri takomto teste je tlmič upevnený do rámu, v ktorom je kľzne vedená hlaveň. Dá sa naplniť výbušninou a odpáli sa. Tlmič potom brzdí jej spätný ráz. V niektorých prípadoch sa na vývoj spätného rázu využívajú aj strelné zbrane, čoho príkladom je aj práca Poynora a spol. [4], kde pomocou svojho MR tlmiča brzdili záklz pušky kalibru 12,7 mm. Schéma testovacieho zariadenia je zobrazená na obrázku 2-16.

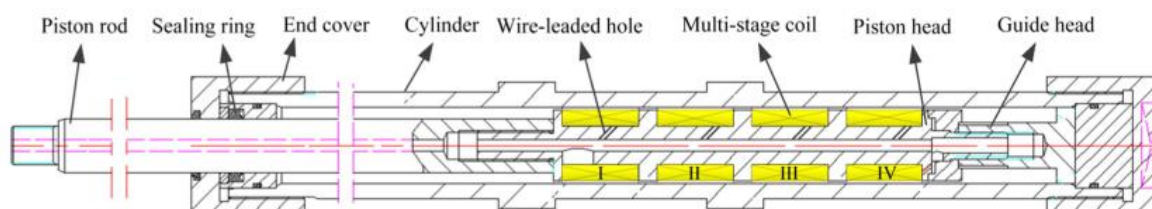


Obr. 2-16 Testovacia zostava s puškou kalibru 12,7 mm použitá na rázové testovanie MR tlmiča [4].

2.6.2 Testované MR tmiče

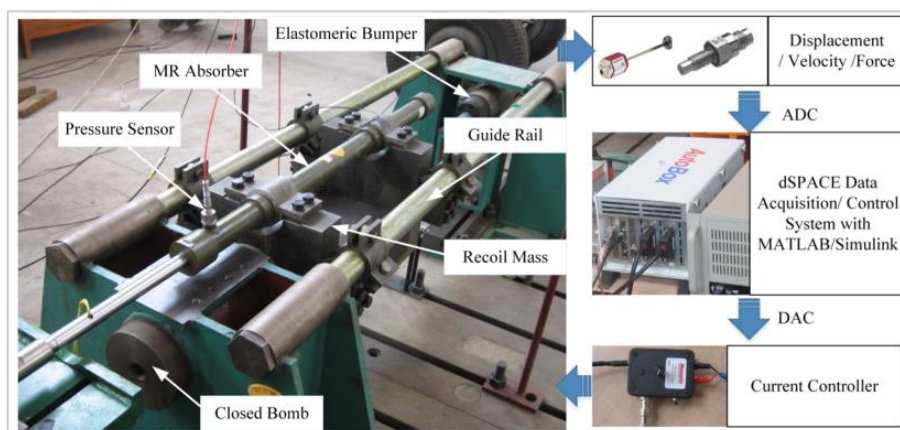
MR tmiče pre veľké a rýchle rázy sú experimentálne zariadenia rôznorodých konštrukcií. Vo väčšine prípadov však platí, že ich konštrukcie sú založené na troch typoch spomenutých v podkapitole 2.3 Typy magnetoreologických tmičov. V tejto podkapitole sú priblížené príklady takýchto tmičov.

Prvým príkladom, ktorý bol cieľený na výskum vojenskej aplikácie MR tmičov bol magnetoreologický tmič vyvinutý Ouyangom a spol. [11]. Jeho prierez je na obrázku 2-17.



Obr. 2-17 Rez MR tmičom [11].

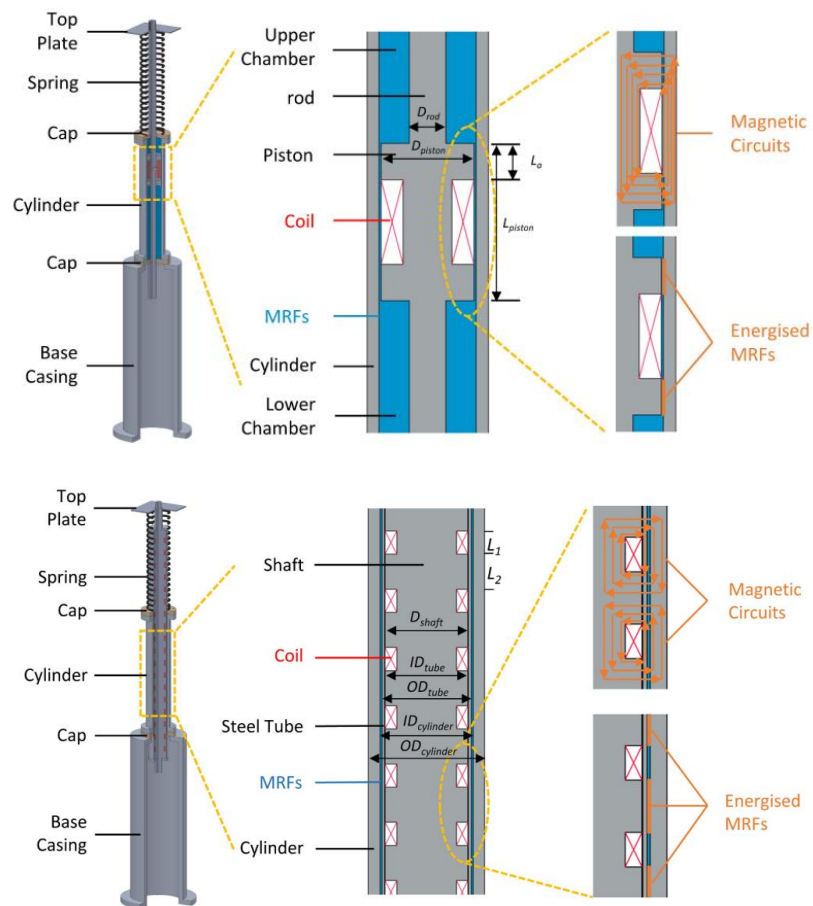
Jedná sa o jednoduchý jedнопlošťový magnetoreologický tmič s jednostrannou piestnicou a plynovou komorou. Jeho piest je nezvyčajne dlhý konštrukcie so štyrmi za sebou radenými cievkami, pričom ako štrbina tu slúži vôľa medzi piestom a valcom tmiča. Celkovo tu tmič má päť aktívnych zón v štrbine, kde dochádza k magnetizácii kvapaliny. Testovaný bol pomocou zariadenia s kĺzne vedenou komorou, v ktorej sa odpaľovala nálož pušného prachu. Tmič tak brzdil záklz tejto komory. Na obrázku 2-18 je fotografia tohoto zariadenia.



Obr. 2-18 Testovacie zariadenie s MR tmičom [11].

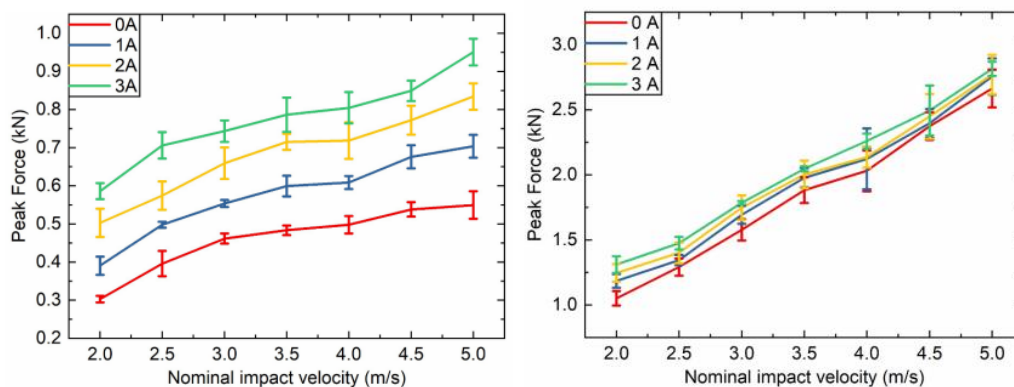
Počas testovania na tomto zariadení dosiahli rýchlosť záklz 3,5 m/s a tmič vyvinul brzdiacu silu o veľkosti 4,5 kN [11].

Ďalším konvenčným tmičom, ktorý bol testovaný veľkými rázmi bol tmič skonštruovaný Dengom L. a spol. [12]. Okrem toho vyvinul ešte variáciu svojho tmiča, kde je MR kvapalina namáhaná iba shear módom. Prierez obidvoma tmičmi je na nasledujúcom obrázku 2-19.



Obr. 2-19 Prierez dvoma MR tmičmi konštrukcie Denga L. a spol. [12].

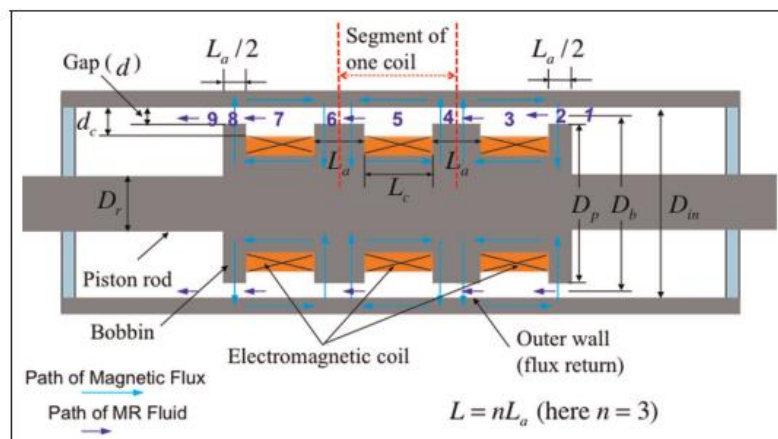
Prvý tmič je jednoduchý jednoplášťový tmič s priechodzu piestnou tyčou a vôľou medzi piestom a plášťom slúžiacou ako škrtiaca drážka. Druhý tmič však piestovú tyč a samotný piest zlúčil do jedného. Pozdĺž celého piestu/piestovej tyče sú umiestnené cievky, ktoré v poliach pozdĺž cele tyče budia magnetické pole. Segment tyče, ktorý sa práve nachádza vo vnútri plášťa tak magnetizuje MR kvapalinu v póloch po celej dĺžke. Oba tieto tmiče boli skúšané pádovým testom, kde bolo na nich spúšťané závažie o hmotnosti 20 kg rýchlosťou od 0,1 m/s do 5 m/s. Výsledky testov sú zobrazená na nasledujúcom grafe v obrázku 2-20.



Obr. 2-20 F-v charakteristiky nekonvenčného (vľavo) a konvenčného (vpravo) MR tmiča získané pomocou pádového testu [12].

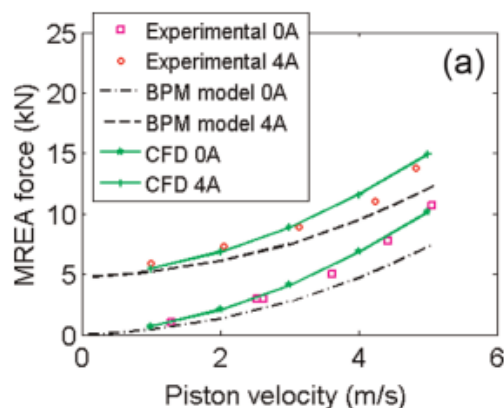
Ako vidieť z vývoja silových charakteristík tlmičov, tlmič pracujúci v shear móde si až do rýchlosti 5 m/s udržal veľký dynamický rozsah, avšak jeho maximálna sila oproti konvenčnému tlmiču prudko klesla.

Jednoplášťový tlmič s prechádzajúcou piestovou tyčou vyvinuli aj Mao M. a spol. [13]. Jeho tlmič obsahuje piest s tromi cievkami za sebou, takže MR kvapalina sa aktivuje až v štyroch zónach. na obrázku 2-21 je schematicky zobrazený rez týmto tlmičom.



Obr. 2-21 Jednoplášťový MR tlmič s obojstrannou piestnicou pre rýchle rázy [13].

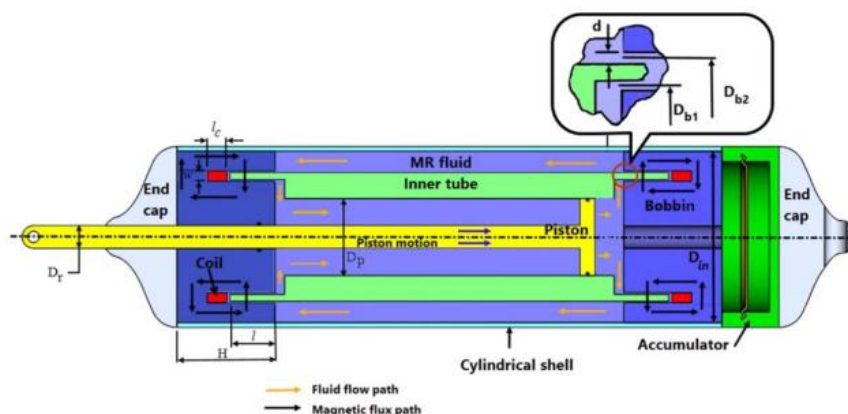
Tento tlmič bol skúšaný pádovým testom, pričom bremeno malo hmotnosť až 600 kg, čím sa zabezpečila konštantná rýchlosť piestu počas celého zdvíhu. Aby následne pod dopade nebol tlmič zničený, bol doraz závažia zabezpečený pomocou kovových voštín. Rýchlosť dopadu činila od 0 m/s do 5 m/s. Na nasledujúcom grafe na obrázku 2-22 je zobrazená F-v charakteristika tohto tlmiča, pričom je porovnaná aj s predpokladom, určeným pomocou Bingham – plastického modelu.



Obr. 2-22 F-v charakteristika MR tlmiča určená experimentálne, CFD analýzou a analytickým modelom [13].

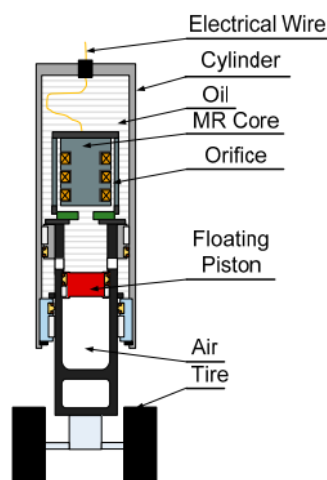
Inak pri návrhu MR tlmiča pre rýchle rázy postupovali Saleh M. a spol. [14]. Navrhli tlmič, ktorý má tmiť rázy v lyžinovom podvozku helikoptéry. Ich tlmič má dvojplášťovú konštrukciu, avšak dva plášte tu neslúžia na kompenzáciu objemu vnikajúcej piestovej tyče. Piest tohto tlmiča je jednoduchý, bez žiadnych škrtiacich drážok a slúži len na vytlačanie

MR kvapaliny MR ventilom, ktorý je vo dne tlmíča. V ňom kvapalina zmení smer svojho toku a pokračuje naspäť medzerou medzi vnútorným a vonkajším plášťom. Do odskokovej komory sa vracia ďalším MR ventilom umiestneným v opačnom dne. Tento tlmíč musí mať rovnako ako jedнопlášťový jednostranný tlmíč zabudovanú komoru s natlakovaným plynom, ktorá vyrovnáva objem vnikajúcej piestnice. Výhodou takejto konštrukcie je znížená dĺžka oproti bežným konštrukciám popísaným vyššie, avšak v MR ventiloch, kde je MR kvapalina nútená zmeniť svoj tok o 180° dochádza k veľkým pasívnym tlakovým stratám. Názov takéhoto typu tlmíča je bi-fold. Tento tlmíč bol tiež skúšaný pádovým testom s dopadovou rýchlosťou 5 m/s a sila, ktorú pri tom vyvinul dosiahla hodnoty 30 kN. Schéma tohto tlmíča je zobrazená na obrázku 2-23.



Obr. 2-23 Schéma bi-fold tlmíča [14].

Variáciou na bežný pádový test je práca, v ktorej sa LE, Q. a spol. [15] venovali návrhu a inteligentnej kontrole MR tlmíča, ktorý má slúžiť ako súčasť podvozku lietadla. v tomto prípade na tlmíč nespúšťali závažie, ale namiesto toho tlmíč zakomponovali do podvozovej nohy lietadla a tú celú spustili nadol v pádovom testovacom zariadení. Rýchlosť pádu dosahovala 3 m/s, pričom k nohe bolo pripojených ďalších 245 kg váhy. Tlmíč pri tejto rýchlosti vyvinul silu 1,7 kN. Schéma použitého tlmíča je zobrazená na obrázku 2-24 nižšie.



Obr. 2-24 Podvozková noha lietadla s MR tlmíčom [15].

Konštrukcia použitého tlmiča je atypická, keďže ako piestová tyč slúži samotná odskoková komora. Tá ma na spodnej strane plynovú komoru, ktorá slúži ako pneumatická pružina a zároveň kompenzuje objem vytlačenej MR kvapaliny pri pracovnom zdvihu. Na hornej strane pohyblivej časti s odskokovou komorou je MR ventil, podobný bežným piestom s MR budením.

2.7 Zhrnutie hlavných poznatkov

Pre tlmenie veľkých rýchlych rázov sa magnetoreologické tlmiče zatiaľ v praxi veľmi nepoužívajú, avšak kvôli svojmu potenciálu sú v súčasnosti skúmané ich možnosti vo vysokorýchlostných aplikáciách. Konštrukcie týchto rýchlych tlmičov prevažne vychádzajú z najviac rozšírených typov MR tlmičov. Z prehľadu súčasných experimentálnych konštrukcií vyplýva, že najväčší potenciál má jednoplášťový typ s obojstrannou prechádzajúcou piestovou tyčou, pričom magnetoreologická kvapalina je budená v škrtiacich drážkach piestu. Tieto tlmiče však bývajú problematické z hľadiska zástavbového priestoru, takže je dobré brať do úvahy aj potenciál tlmiča vybaveného plynovou komorou. Treba mať však u tohto tlmiča na zreteli riziko kavitácie nosnej kvapaliny. Na predikciu správania sa MR tlmičov existuje niekoľko modelov, pričom najviac používaný je práve Yangov – Spencerov model [6], ktorý zjednodušuje radiálnu drážku piestu na model MR kvapaliny tečúcej medzi dvoma paralelnými doskami. Ako ostatné modely, tak aj tento model je limitovaný iba na nízke rýchlosti do približne 2 m/s [6]. Prípady vyšších rýchlostí, kedy kvapalina prúdi rýchlejšie drážkami v pieste nepopisuje žiaden dostupný model. Je možné súčasné modely rozšíriť o vplyv miestnych tlakových strát a zrýchlenie MR kvapaliny v drážkach v pieste, avšak žiaden doterajší výskum nezaručuje, že aj takto rozšírený model bude platiť aj v rýchlostiach 5 m/s a viac. Doterajšie výskumy testovali MR tlmiče prevažne do rýchlostí práve o veľkosti 5 m/s a nad túto rýchlosť nešli. Jedným z rizík, ktoré môžu ohroziť využiteľnosť MR kvapalín pri vysokorýchlostných rázoch je odozva tlmiča. Tá je daná vlastnosťami MR kvapalín, geometriou magnetoreologického ventilu, ktorým pretekajú a tiež rýchlosťou, ktorou cezeň prúdia. Vplyvom rýchleho prúdenia sa môže odozva zhoršiť a tiež môže dynamický rozsah tlmiča poklesnúť. Aby sa tomu zabránilo, je nutné vhodne navrhnuť piest tlmiča a použiť kvapalinu s nižšou viskozitou. Ďalší vplyv na odozvu tlmiča má materiál komponentov, z ktorých je zložený magnetický obvod. Z rešerše materiálov vyplýva, že materiály s dobrými magnetickými vlastnosťami majú veľmi zlé mechanické vlastnosti. V tlmiči vo vysokorýchlostných aplikáciách sú však vystavené značnému zaťaženiu. Preto vhodnými materiálmi na konštrukciu magnetického obvodu sú rezná oceľ 11SMn30 a zliatina Vacoflux 50. Z týchto dvoch materiálov má lepšie mechanické vlastnosti rezná oceľ, lepšiu permeabilitu a rezistivitu má zase Vacoflux 50. Nákupná cena Vacofluxu je však výrazne vyššia, než cena reznej ocele.

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CIEĽ PRÁCE

3.1 Vymedzenie problému

Využitie magnetoreologických technológií má veľký potenciál vo vojenských aplikáciách, kde sa skúma možnosť ich využitia pri tlmení rázových dejov. Pre takýto spôsob využitia je však dôležité poznať správanie magnetoreologických kvapalín pri veľkých rýchlostiach prúdenia. V súčasnosti sú MR technológie používané predovšetkým pri nízkorýchlostných aplikáciách, napríklad v automobilových tlmičoch. Matematické modely, popisujúce ich správanie sú pri nízkych rýchlostiach dostatočné, pri vyšších rýchlostiach prúdenia sa ich presnosť znižuje. Preto je potrebné správanie MR kvapalín pri vyšších rýchlostiach preskúmať. Jednou z možností je vykonať rázový test s použitím magnetoreologického tlmiča.

Táto práca sa zaoberá vývojom takého tlmiča, pričom jej predpokladaným výstupom je funkčná vzorka, ktorá bude použitá na výskum správania sa MR kvapalín. Hlavným cieľom je vývoj, zostrojenie a experimentálne overenie magnetoreologického tlmiča, ktorý sa dá využiť na výskum MR kvapalín. Pri návrhu funkčnej vzorky sa vychádza zo stávajúcej konštrukcie automobilového MR tlmiča Hyundai, s ktorým zdieľa niekoľko konštrukčných parametrov. Navrhovaný tlmič musí byť schopný pracovať pri veľkom rázovom zaťažení. Ďalšie požadované parametre sú zhrnuté v nasledujúcej tabuľke:

| Charakteristika | C | O | F |
|---|----------|----------|----------|
| Schopnosť pracovať pod rázovým zaťažením | x | | |
| Využívanie magnetoreologického princípu | x | | |
| Krátka časová odozva pri vyšších rýchlostiach | x | | |
| Kompatibilita s laboratórnym pádovým testerom | x | x | |
| Kompatibilita s laboratórnym reometrom Inova | x | x | |
| Schopnosť aktívneho riadenia tlmiacej sily | x | | x |
| Jednoduchá a lacná výroba | x | | |
| Minimálna konštrukčná rýchlosť 5 m/s | | x | |
| Maximálna tlmiaca sila v aktivovanom stave aspoň 5 kN | | x | |
| Pracovný zdvih väčší ako 150 mm | | x | |
| Vzdialenosť upínacích bodov menšia ako 1 m | | x | |
| Zabudovaná senzorika na meranie tlaku, sily a zdvihu | | x | x |
| Disipácia energie rázu | | | x |

3.1.1 Názov a klasifikácia produktu

Vyvíjané zariadenie sa volá experimentálny MR tlmič pre veľké rázy. Jeho účelom je výskum vlastností magnetoreologických kvapalín pri vysokých šmykových spádoch.

3.1.2 Zákazník

Experimentálny tlmič je vyvíjaný pre laboratórium technickej diagnostiky Ústavu Konstruování, ktorý je súčasťou Fakulty strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brne.

3.1.3 Spotrebiteľ

Spotrebiteľom vyvíjaného zariadenia bude výskumný pracovník zaoberajúci sa výskumom magnetoreologických kvapalín pri vysokých šmykových spádoch. Keďže sa jedná o experimentálne zariadenie využívané v laboratórnych podmienkach, bude vyrobený iba jeden exemplár, ktorý bude využívať odbor technickej diagnostiky ÚK FSI.

3.1.4 Ciele vývoja

Hlavný cieľ vývojovej práce je konštrukcia magnetoreologického tlmiča pre veľké rýchlosti a silové zaťaženia. Tlmič musí byť kompatibilný s laboratórnymi zariadeniami určenými na simuláciu rázového zaťaženia. Tlmič musí mať robustnú konštrukciu a musí spĺňať nasledovné parametre: musí mať minimálnu konštrukčnú piestovú rýchlosť 5 m/s, musí dosahovať maximálnu silu v aktivovanom stave najmenej 5 kN, musí mať aspoň 150 mm pracovný zdvih a maximálnu vzdialenosť upínacích bodov 1 m. Zároveň musí umožňovať aktívne riadenie počas pracovného zdvihu a zabezpečovať sledovanie skúmaných veličín (tlaku pracovnej kvapaliny, sily tlmiča a zdvihu piestovej tyče) počas testu. Okrem hlavného cieľa práce je potrebné splniť aj nasledujúce čiastkové ciele.

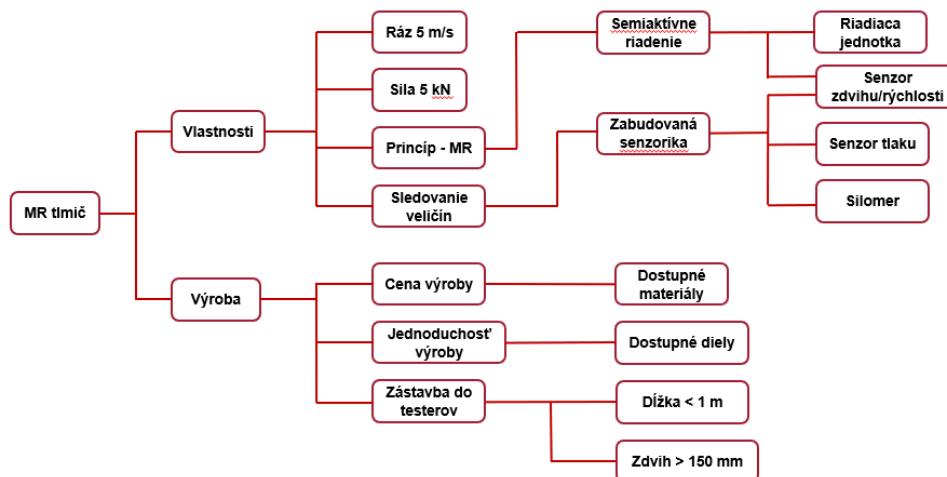
Čiastkové ciele práce sú:

- Návrh rýchleho elektromagnetického obvodu piestu tlmiča
- Návrh zabudovania senzoričky pre riadenie tlmiča
- Pevnostné overenie kľúčových častí tlmiča
- Realizácia funkčného vzorku a overenie funkcie navrhnutého tlmiča

4 KONCEPČNÉ RIEŠENIA

4.1 Analýza cieľov a špecifikácie obmedzení

Pre návrh MR tlmiča vhodného pre vysokorýchlostné aplikácie bola vytvorená hierarchická štruktúra cieľov a obmedzení (obrázok 4-1), ktoré udávajú hlavné požiadavky na vlastnosti, ktoré musí vyvíjaný produkt spĺňať ako aj požiadavky na jeho výrobu.



Obr. 4-1 Hierarchická štruktúra cieľov a obmedzení.

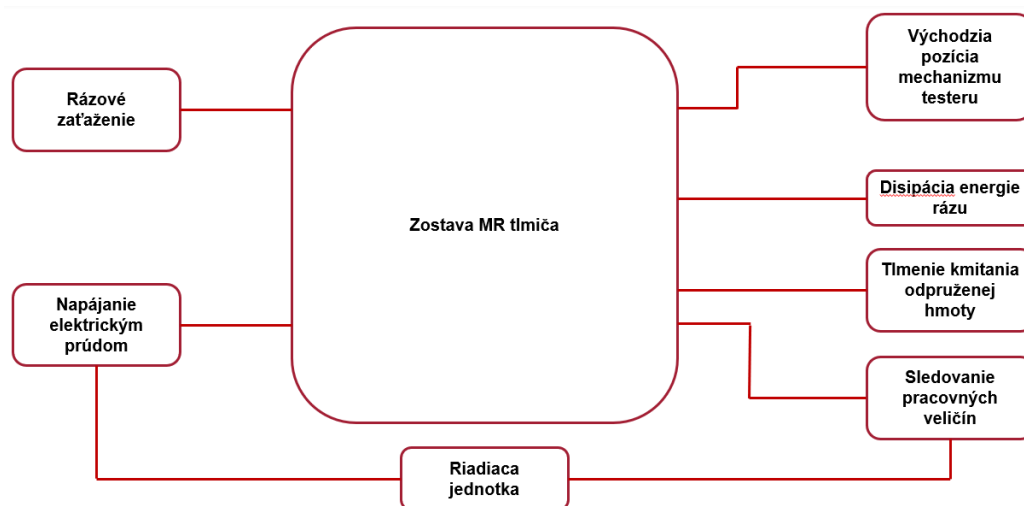
Základom pre vytvorenú schému boli vyššie určené ciele, funkcie a obmedzenia produktu. Z týchto požiadaviek boli vybrané najdôležitejšie, ktoré slúžili k posúdeniu navrhnutých koncepčných riešení. Ako hlavné funkčné požiadavky boli zvolené dva, schopnosť pracovať pri rýchlosti aspoň 5 m/s a dostatočný dynamický rozsah, vďaka ktorému si musí tlmič zachovať dostatočný magnetoreologický efekt aj pri takej vysokej rýchlosti. Z hľadiska výroby musí byť tlmič lacný a nenáročný na výrobu, teda jeho konštrukcia musí zahŕňať čo najviac dostupných dielov (konkrétne dielov z MR tlmiča pre automobil Hyundai, ktorý bol vytvorený v rámci predošlých projektov), čím sa zabezpečí nízka cena a nízky čas výroby. Zároveň musí vyvíjaný tlmič byť schopný umiestnenia do hydraulického pulzátoru Inova ako aj do súbežne vyvíjaného pádového testeru, ktorým je testovaná jeho odozva na rázové zaťaženie. V nasledujúcej tabuľke 4-1 sú zhrnuté požiadavky na jeho konštrukciu. Pri hodnotení jednotlivých koncepčných riešení bola jednotlivým požiadavkám priradená váha, na základe ktorých bol potom určený víťazný koncept.

Tab. 4-1 Parametre použité pre hodnotenie koncepčných návrhov.

| Cieľ | Ráz 5 m/s | Dynamický rozsah | Cena výroby | Jednoduchosť výroby | Zástavba do testeru |
|------|-----------|------------------|-------------|---------------------|---------------------|
|------|-----------|------------------|-------------|---------------------|---------------------|

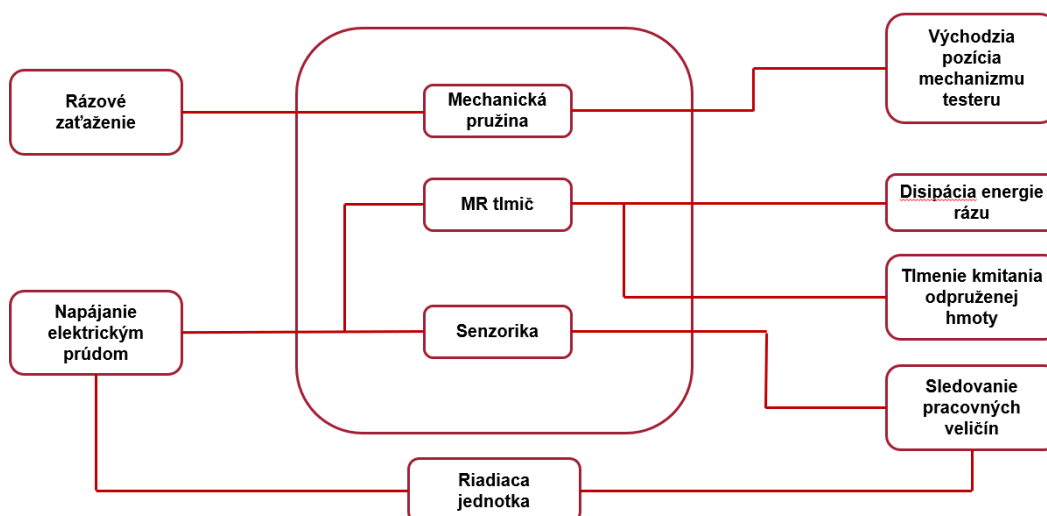
4.2 Technická funkčná analýza

Úlohou tlmiča je výskum správania sa MR kvapalín pri rýchlych rázoch. Musí energiu rázu efektívne disipovať, musí zabezpečiť udržanie mechanizmu pádového testeru vo východzej polohe pred samotným testom a musí zabezpečiť dokmitanie rázu aby nedošlo k poškodeniu testeru. Zároveň musí byť aktívne riaditeľný a musí umožňovať sledovanie jeho pracovných veličín počas testu. Schéma jeho funkcií je znázornená na obrázku 4-2.



Obr. 4-2 Black box zostavy MR tlmiča.

Na to, aby stanovené ciele dosiahol, musí jeho konštrukcia pozostávať z nasledujúcich častí: samotný MR tlmič, ktorý zabezpečí disipovanie energie rázu, mechanická pružina, ktorá zabezpečí jeho udržanie vo východzej pozícii a následný dokmit a zabudovaná sensorika, ktorá bude snímať následné veličiny: tlak v kompresnej komore tlmiča, celkovú silu zostavy tlmiča a polohu piestu tlmiča počas jeho zdvihu v čase, čím sa určí jeho rýchlosť. Schéma zostavy je zobrazená na obrázku 4-3.



Obr. 4-3 Glassbox zostavy MR tlmiča.

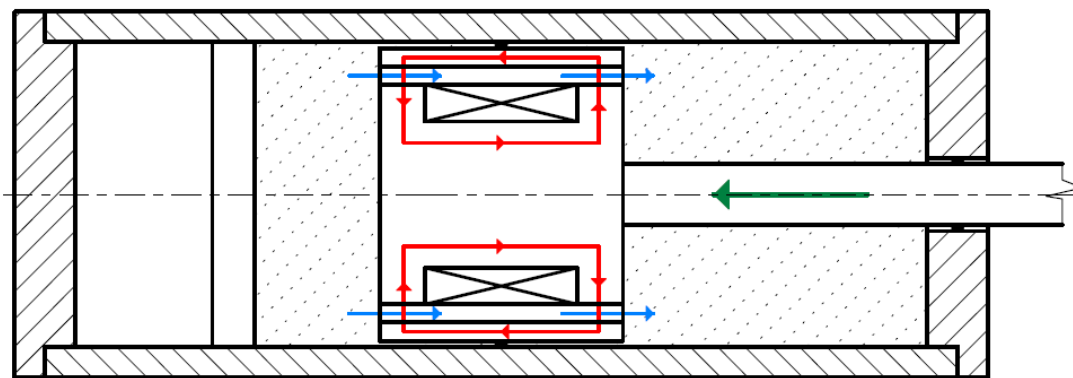
4.3 Návrh alternatívnych riešení

4.3.1 Koncepty typu tmiča

Ako prvý návrh je nutné vytvoriť koncepčný návrh samotného tmiča, teda určiť rozloženie jeho hlavných súčastí. Rešeršou predchádzajúcich tmičov boli určené dva koncepty.

Jednoplášťový tmič s plynovou komorou

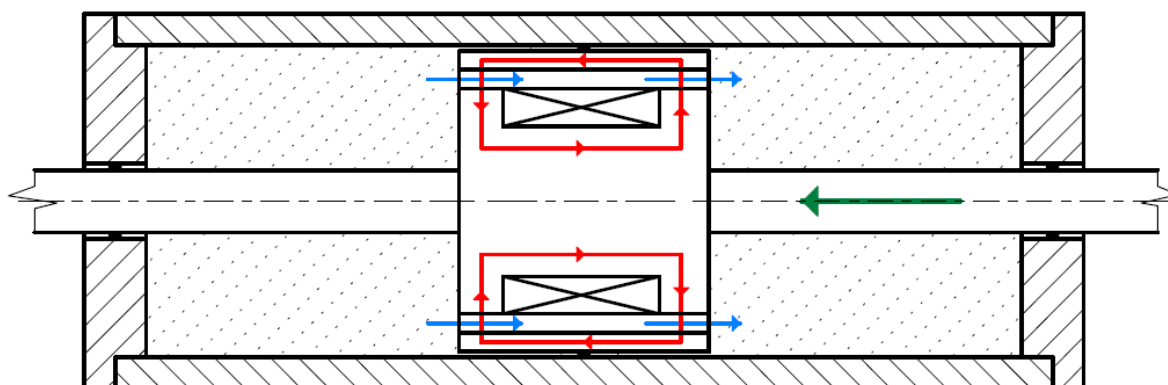
Tento typ tmiča je najbežnejšie používaná konštrukcia magnetoreologického tmiča v praxi. Funguje podobne ako jeho pasívny ekvivalent. V pieste tmiča sú umiestnené škrtiace drážky, ktorými prúdi pracovná kvapalina a jej odporom voči toku dochádza k vytvoreniu tlakového rozdielu pred a za piestom. V prípade MR tmiča je jeho piest vybavený cievkou, ktorou prechádzajúci elektrický prúd indukuje magnetické pole v drážkach tak, aby bolo kolmé na smer toku MR kvapaliny. Samotná piestová tyč je tak dutá, lebo je cez ňu potrebné viesť elektrický prúd k cievke cez vstavanú kabeláž. Vzhľadom k tomu, že počas pracovného zdvihu piestnica vniká do tmiča, je vzhľadom na malú stlačiteľnosť pracovnej kvapaliny nutné kompenzovať jej objem. To sa dosahuje použitím plynovej komory. Na konci kompresnej komory tmiča sa nachádza plávajúci piest, na ktorého druhej strane je plynová komora s natlakovaným vzduchom. Pri stláčaní tmiča tak dochádza aj k stlačeniu plynovej komory v dôsledku vnikania piestnice. Schéma tohto typu tmiča je znázornená na obrázku 4-4.



Obr. 4-4 Koncepčný návrh jednoduchého tmiča.

Jednoplášťový tmič s priechodnou piestnicou

Ďalším možným konceptom MR tmiča je typ s obojstrannou piestnicou. Tento typ sa využíva pri aplikáciách, kde je tmič vytavený vyšším zaťažieniam. Pracuje na rovnakom princípe ako vyššie uvedený koncept tmiča, avšak neobsahuje plynovú komoru. Namiesto toho je vybavený piestovou tyčou prechádzajúcou celým valcom tmiča. Objem vnikajúcej piestnice na jednej strane je tak počas zdvihu kompenzovaný objemom vychádzajúcej piestnice na druhej strane. Schéma tohto typu tmiča je znázornená na obrázku 4-5.



Obr. 4-5 Konceptný návrh tlmiča s priechodzou piestnicou.

Z obidvoch konceptov je tlmič s plynovou komorou menej náročný na zástavbový priestor. Naproti tomu je tlmič s priechodzou piestnicou vhodnejší na tlmenie rázu práve z dôvodu absentujúcej plynovej komory. Pri rýchlom ráze môže vplyvom jej stlačenia dôjsť k výraznému poklesu tlaku v rezervoári tlmiča, čo môže viesť až ku kavitácii pracovnej kvapaliny, čo môže výrazne negatívne ovplyvniť silu tlmiča. Okrem toho u tlmiča s obojstrannou piestnicou môže byť dutá piestnica pre vedenie elektrickej energie iba na jednej strane, zaťažovaná môže byť druhá strana, kde je piestnica plná.

4.3.2 Koncepty piestu

Hlavnou časťou tlmiča, zabezpečujúcou jeho funkciu je jeho piest, kde dochádza k vytváraniu tlmiacej. Preto je dôležité nepodceniť jeho návrh. Hlavné prvky, ktorými je nutné sa zaoberať sú konfigurácia cievok, materiál jadra a umiestnenie štrbín v pieste.

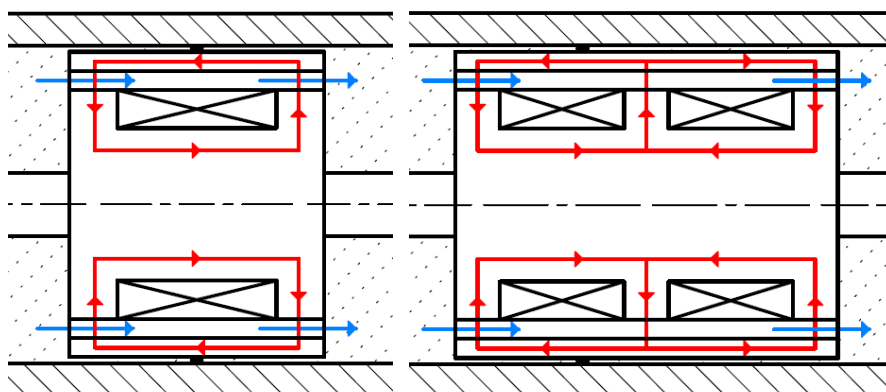
Materiál jadra

Na generáciu magnetického poľa, ktorého vplyvom dochádza k reťazeniu mikročastíc v MR kvapaline čím je zabezpečená funkcia tlmiča, sa používa elektromagnetický obvod s cievkami. Tie fungujú ako elektromagnet, pričom sú navinuté na jadre, ktoré usmerňuje magnetický tok tak, aby prechádzal drážkami piestu kolmo. Materiál jadra výrazne ovplyvňuje magnetický indukčný tok piestom ako aj jeho časovú odozvu. Vhodnou možnosťou pre jadro je preto špeciálny materiál Vacoflux 50, určený na výrobu jadier do elektromagnetických obvodov. Jeho hlavnou nevýhodou je vysoká nákupná cena. Ďalšou možnosťou je použitie bežnej reznej ocele 11SMn30. Jej magnetické vlastnosti sú horšie, než u vacofluxu, avšak jej cena je výrazne nižšia.

Konfigurácia cievok

Umiestnenie cievok a ich počet tiež výrazne udáva výsledné vlastnosti MR tlmiča. Je možné využiť piest s jednou cievkou a dvoma magnetickými pólmi, alebo piest s viacerými cievkami radenými za sebou. Piest s viacerými cievkami obsahuje v drážkach viac

magnetických pólov, kde dochádza k aktivácii MR kvapaliny. Na obrázku 4-6 je vľavo znázornený piest s jednou cievkou, vľavo je piest s viacerými cievkami. Modrou farbou je znázornený tok MR kvapaliny a červenou magnetický indukčný tok.

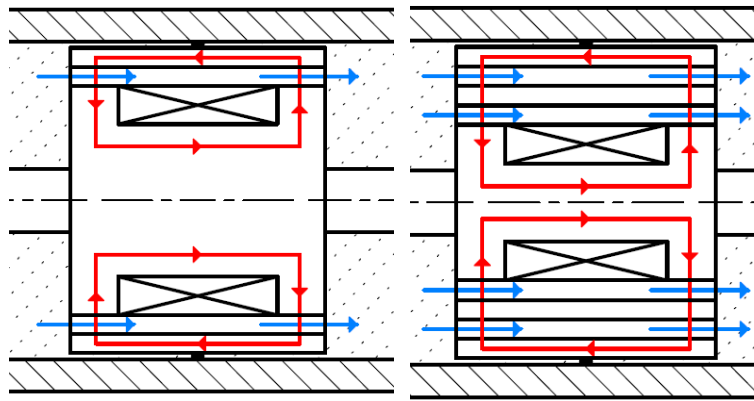


Obr. 4-6 Návrh piestu s jednou cievkou (vľavo) a s viacerými cievkami (vpravo).

Výhodou piestu s viacerými cievkami je vyvinutá vyššia sila tlmiča, keďže kanál, ktorým prúdi pracovná kvapalina je dlhší a má viac aktivačných zón. Zároveň v póloch medzi cievkami dochádza k zosilneniu magnetického poľa vplyvom magnetických indukčných tokov oboch susediacich cievok, takže na dosiahnutie požadovanej intenzity magnetického poľa. Naproti tomu piest s jedinou cievkou má len póly dva a k žiadnej amplifikácii magnetického poľa nedochádza. Výhodou piestu s jednou cievkou je vyšší možný dosiahnuteľný dynamický rozsah tlmiča, pretože drážka v takomto pieste má menšiu dĺžku a kvapalina tak čelí menšiemu pasívnemu odporu, než u viac-cievkovej varianty. Piest s jednou cievkou je menej náročný na zástavbový priestor a je menej náročný na výrobu a je cenovo dostupnejší.

Počet štrbín v pieste

Vzhľadom k tomu, že má byť tlmič používaný pri rýchlostiach až 5 m/s, je vhodné použiť viac štrbín v pieste. Týmto spôsobom sa zníži vplyv pasívneho odporu toku kvapaliny na dynamický rozsah tlmiča. Zvýšenie počtu štrbín sa dosiahne vložením striedajúcich sa prstencov z feromagnetického a diamagnetického materiálu do veľkej štrbiny vytvorenej medzi jadrom a plášťom tlmiča. Tým dôjde k zníženiu rýchlosti prúdenia pracovnej kvapaliny v drážkach, zatiaľ čo medza toku vzniknutá magnetoreologickým efektom zostane zachovaná. Úlohou vložených prstencov je vedenie magnetického indukčného toku. Takáto konštrukcia je však oproti jednej štrbine nevýhodná v náročnosti výroby. Takisto je nevýhodná v prípade obmedzeného priemeru valca tlmiča. Na obrázku 4-6 je vľavo znázornený piest s jednou štrbinou, vľavo je piest s viacerými štrbinami. Modrou farbou je znázornený tok MR kvapaliny a červenou magnetický indukčný tok.



Obr. 4-7 Koncept piestu MR tmiča s jednou štrbinou (vľavo) a s paralelnými štrbinami (vpravo).

4.3.3 Alternatívne riešenia

Na základe vyššie uvedených riešení podstatných konštrukčných uzlov bola vytvorená morfológická analýza koncepčných riešení. Celkovo osem návrhov riešenia konštrukčných uzlov boli zhrnuté do nasledujúcej tabuľky 4-2. Z tejto morfológickej matice boli zložené alternatívne riešenia tmiča tak, aby boli vo všetkých vytvorených konceptoch zahrnuté všetky konštrukčné uzly. Boli celkovo vytvorené štyri koncepčné riešenia, ktoré sú uvedené v tabuľke 4-3.

Tab. 4-2 Riešenia jednotlivých konštrukčných uzlov.

| Konštrukčné uzly | | | | |
|--------------------|--------------------------|----------------|--------|---------|
| | Typ tmiča | Materiál jadra | Cievky | Štrbiny |
| Prostriedky | | | | |
| | S | | | |
| 1 | jednostrannou piestnicou | 11SMn30 | Jedna | Jedna |
| 2 | S priechodzou piestnicou | Vacoflux 50 | Viac | Viac |

Tab. 4-3 Prehľad jednotlivých konceptov.

| Koncepty | | | | |
|-------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | Koncept 1 | Koncept 2 | Koncept 3 | Koncept 4 |
| Konštrukčné uzly | | | | |
| Typ tmiča | S jednostrannou piestnicou | S jednostrannou piestnicou | S priechodzou piestnicou | S priechodzou piestnicou |
| Materiál jadra | 11SMn30 | Vacoflux 50 | 11SMn30 | Vacoflux 50 |
| Cievky | Jedna | Viac | Jedna | Jedna |
| Štrbiny | Jedna | Viac | Jedna | Viac |

4.4 Analýza alternatívnych riešení a výber najlepšieho

Jednotlivé alternatívne riešenia boli porovnané na základe ich parametrov, ktorým boli priradené bodové hodnoty. Jednotlivým cieľom, ktoré musí konštrukcia tmiča spĺňať boli priradené váhy, ktoré reflektovali dôležitosť ich dosiahnutia. Následne boli pre jednotlivé koncepty vypočítané vážené priemery ich bodového hodnotenia. Hodnotenie konceptov je znázornené v tabuľke 4-4. Víťazné riešenie konštrukcie tmiča je koncept č. 3, teda riešenie s obojstrannou piestnicou, jednoduchým piestom s jednou cievkou a jednou drážkou a oceľovým jadrom. Ako druhý najvhodnejší variant bol vybraný koncept č. 1, ktorý však kvôli použitiu plynovej komory nevyhovuje pre použitie v aplikáciách, kde je nutné tlmiť rýchle rázy. Jeho jedinou výhodou oproti víťaznému konceptu spočíva v menších rozmeroch a teda v požiadavku na menší zástavbový priestor. Napriek tomu, že je koncept č. 4 najvhodnejší pre rázové aplikácie, nevyhovoval z dôvodu zvýšenej náročnosti výroby a ceny, keďže na výrobu jeho jadra musí byť použitý drahý materiál. Ako najhorší koncept sa javí riešenie č. 2, ktoré je nevhodné pre rázové aplikácie a je tiež náročné na výrobu.

Tab. 4-4 Hodnotenie alternatívnych riešení.

| Koncepty | Váha parametra | Koncept 1 | Koncept 2 | Koncept 3 | Koncept 4 |
|----------------------------|-----------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| Ciele | | | | | |
| Ráz 5 m/s | 15 | 25 | 50 | 75 | 100 |
| Dynamický rozsah | 10 | 50 | 75 | 50 | 100 |
| Cena výroby | 30 | 100 | 50 | 100 | 50 |
| Jednoduchosť výroby | 20 | 75 | 50 | 100 | 75 |
| Zástavba | 25 | 100 | 100 | 75 | 75 |
| Celkový počet bodov | | 78,75 | 65 | 85 | 73,75 |

5 PREDBEŽNÝ NÁVRH

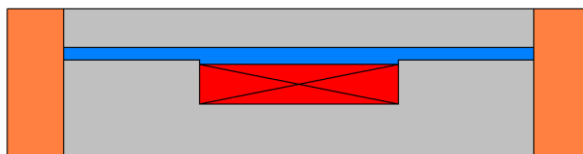
Táto kapitola predstavuje návrh magnetoreologického tlmiča pre veľké rázy. Tlmič bol navrhnutý tak, aby jeho konštrukcia odpovedala víťaznému konceptu z predošlej kapitoly. K jeho správne nadimenzovaniu bol vytvorený matematický model, ktorý pozostával z magnetostatickej analýzy a analytického modelu, predikujúceho jeho silovú charakteristiku. Takto navrhnutý tlmič bol následne zostavený a otestovaný, pričom sa zistilo, že vytvorený model jeho charakteristiku výrazne podhodnocuje. Preto bol jeho piest upravený, čomu sa venuje posledná časť tejto kapitoly.

5.1 Matematický model prvého variantu piestu

Aby bolo vôbec možné skonštruovať tlmič nadimenzovaný na rázové zaťaženie, musel byť vytvorený matematický model, ktorý predikuje jeho správanie pod rázovým zaťažením. Jeho hlavným cieľom je predikcia síl tlmiča v aktivovanom aj neaktivovanom stave. Predikcia síl následne poslúžila pre samotné dimenzovanie konštrukčných uzlov tlmiča. Samotný matematický model pozostáva z dvoch častí: magnetostatická MKP analýza a analytický model F – v charakteristiky tlmiča.

5.1.1 Magnetostatická analýza

Za účelom navrhnutia geometrie MR ventilu a tiež geometrie samotného piestu bola vytvorená 2D axisymetrická magnetostatická analýza MR ventilu. Analýza bola vykonaná s pomocou softwaru Ansys Maxwell. Vstupná geometria bola vytvorená na základe 2D prierezu piestu najlepšieho koncepčného riešenia, pričom sa jedná o zjednodušenú geometriu tohto piestu. Na obrázku 5-1 je znázornená geometria MR ventilu použitá pre MKP analýzu.



Obr. 5-1 Geometria MR ventilu piestu MR tlmiča použitá na magnetostatickú analýzu.

Červenou farbou je znázornená budiaca cievka, šedou farbou plášť a jadro piestu, oranžovou jeho veká a modrou je vyznačená magnetoreologická kvapalina v štrbine. Okrem geometrie

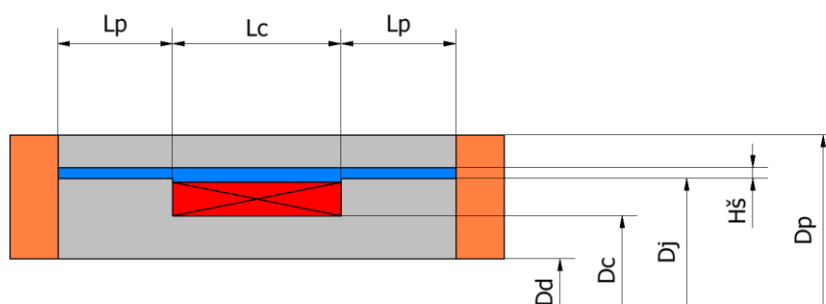
do analýzy vstupuje aj materiál, z ktorého sú jednotlivé súčasti vyrobené. Materiály boli použité z materiálovej knižnice samotného softwaru. Použité materiály sú zhrnuté v nasledujúcej tabuľke 5-1.

Tab. 5-1 Materiály pre magnetickú analýzu.

| | | | | | | |
|------------------|------------|------------|---------|---------|--------|--------------|
| Komponent | Horné veko | Dolné veko | Jadro | Plášť | Cievka | MR kvapalina |
| Materiál | CuSn8 | CuSn8 | 11SMn30 | 11SMn30 | Med' | MRF 122 EG |

Ako bolo vyššie spomenuté, analýza bola axisymetrická, preto stačil ako analyzovaná geometria 2D prierez MR ventilu. Od okolia bol izolovaný podmienkou baloon. Samotná cievka má 60 závitov, po dvadsať v troch radoch, pričom priemer jej drôtu je 0,85 mm. Maximálny napájací prúd je 7 A.

Pomocou iteratívneho prístupu k riešeniu magnetostatickej analýzy boli stanovené rozmery piestu tmiča. Určené rozmery sú znázornené na upravenej schéme piestu na obrázku 5-2, ich hodnoty sú zanesené do tabuľky 5-2.

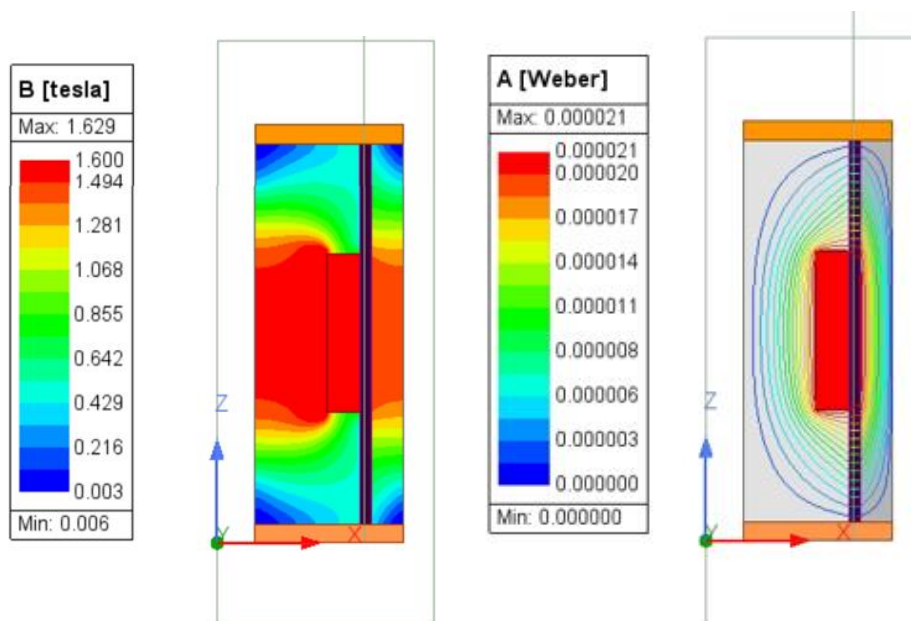


Obr. 5-2 Schéma zjednodušenej geometrie piestu s vyznačenými rozmermi.

Tab. 5-2 Hodnoty rozmerov piestu tmiča.

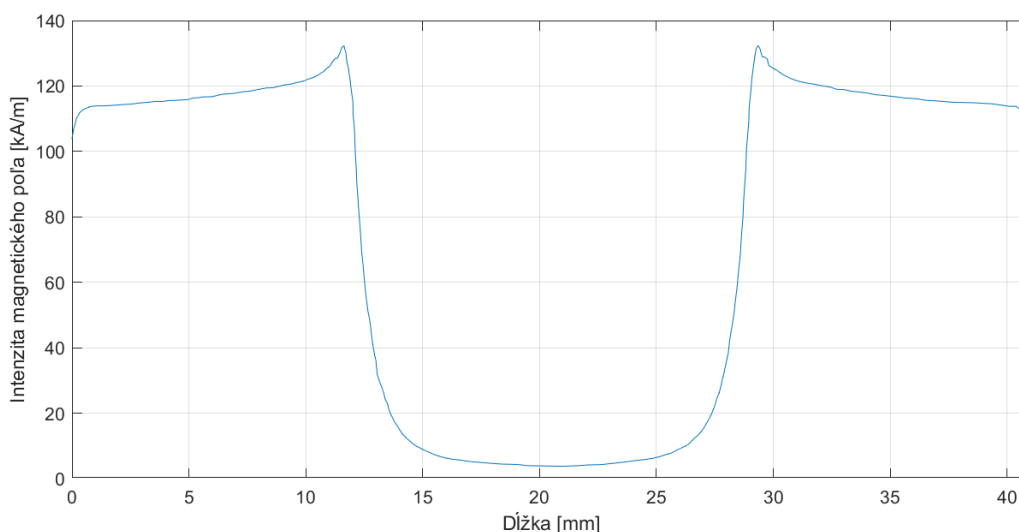
| | | | | | | | |
|-----------------|------------|--------------|----------------|----------------|---------------|---------------|----------------|
| Parameter | Lp | Lc | Dd | Dc | Dj | Hš | Dp |
| Názov parametra | Dĺžka pólu | Dĺžka cievky | Priemer dutiny | Priemer cievky | Priemer jadra | Výška štrbiny | Priemer piestu |
| Hodnota [mm] | 12 | 17 | 10 | 23 | 30,8 | 1,1 | 39,8 |

Pre tieto rozmery bolo magnetostatickou analýzou určené rozloženie magnetickej indukcie pri napájaní prúdom 7 A. Na obrázku 5-3 je zobrazené rozloženie magnetickej indukcie v jadre a v plášti piestu. Taktiež bol určený magnetický indukčný tok magnetickým obvodom piestu.



Obr. 5-3 Analýza magnetickej indukcie (vľavo) a magnetického indukčného toku magnetickým obvodom piestu (vpravo).

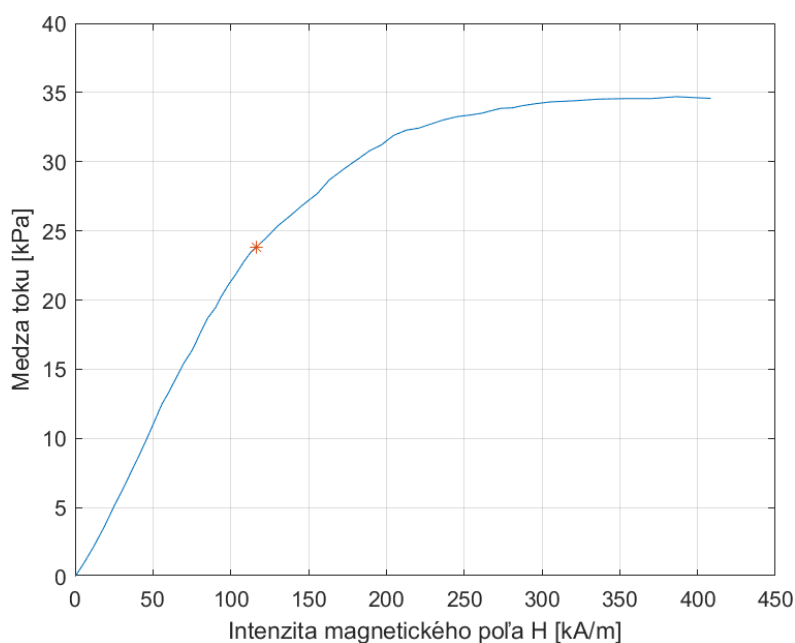
Výsledkom magnetostatickej analýzy bolo aj stanovenie intenzity magnetického poľa uprostred drážky v oblasti pólu magnetického obvodu. Na obrázku 5-4 je znázornený priebeh intenzity magnetického poľa pozdĺž celej drážky piestu pri napájaní cievky prúdom o veľkosti 7 A. Ako relevantná hodnota do návrhu geometrie piestu bola braná stredná hodnota zo stredu oblasti magnetického pólu. V tomto bode intenzita dosahuje 116,5 kA/m.



Obr. 5-4 Priebeh intenzity magnetického poľa pozdĺž drážky v pieste pri budení prúdom 7 A.

5.1.2 Analytický model

Rozmery magnetického obvodu piestu a maximálna intenzita magnetického poľa slúžili ako vstup do ďalšej časti matematického modelu, ktorou je analytický model správania sa tmiča. Pomocou určenej intenzity magnetického poľa bola určená hodnota medze toku použitej MR kvapaliny. Ako pracovná kvapalina bola použitá magnetoreologická kvapalina MRF 122 EG od spoločnosti LORD, z dôvodu svojej relatívne nízkej dynamickej viskozity. Hodnota medze toku pri intenzite magnetického poľa o hodnote 116,5 kA/m dosahuje 23,8 kPa. Na obrázku 5-5 je upravený výňatok z datasheetu spoločnosti LORD [16], popisujúci závislosť medze šmyku kvapaliny na veľkosti intenzity magnetického poľa, ktorým je aktivovaná. Červenou ja na nej vyznačený bod, ktorý dosiahne kvapalina pri aktivácii cievkou napájanou 7 A prúdom.



Obr. 5-5 Závislosť medze toku kvapaliny MRF 122 EG s vyznačeným pracovným bodom, ktorý dosiahne tmič pri napájaní 7 A prúdom - upravené [16].

Hodnota medze toku spolu s rozmermi piestu vstupujú do analytického modelu vytvoreného na základe modelu Yanga a Spencera [6]. Tento model udáva dve zložky sily tmiča sa radiálnou drážkou. Prvá zložka je pasívna sila F_η , spôsobená odporom voči toku úzkou štrbinou, daná je vzťahom:

$$F_\eta = \left(1 + \frac{whv_0}{2Q}\right) \cdot \frac{12\eta QLA_p}{wh^3} \quad (11)$$

kde w je obvod štrbiny, h je jej výška, v_0 je piestová rýchlosť, Q je prietok kvapaliny štrbinou, η je dynamická viskozita kvapaliny, L je dĺžka kanála, ktorým prúdi a A_p je plocha čela piestu, na ktorý pôsobí tlaková strata na štrbine. Ďalšou zložkou sily tmiča je aktívna sila

F_τ , teda regulovateľná sila, ktorá je zapríčinená magnetoreologickým efektom. Je daná vzťahom:

$$F_\tau = \left(2,07 + \frac{12Q\eta}{12Q\eta + 0,4wh^2\tau_0} \right) \cdot \frac{\tau_0 L A_p}{h} \quad (12)$$

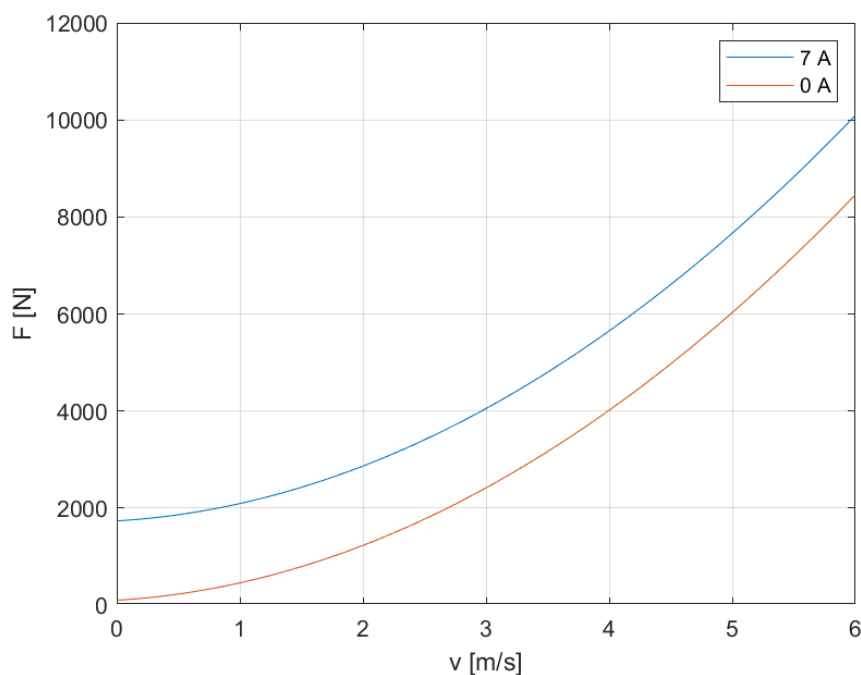
kde τ_0 je medza toku MR kvapaliny. Tento model bol následne rozšírený o treciu silu F_T stanovenú empiricky ako 150 N a silu spôsobenú miestnymi tlakovými hydraulickými stratami F_H . Sila od hydraulických strát je daná rovnicou:

$$F_H = \frac{K_L \rho v^2}{2} \cdot A_p \quad (13)$$

kde v je rýchlosť prúdenia kvapaliny štrbinou piestu, ρ je hustota MR kvapaliny a K_L je stratový súčiniteľ určený na základe výsledkov meraní $F - v$ charakteristiky predošlých MR tlmičov s podobnou geometriou. Jeho hodnota je 1,5. Výsledná sila tlmiča F sa následne určí súčtom:

$$F = F_\eta + F_\tau + F_T + F_H \quad (14)$$

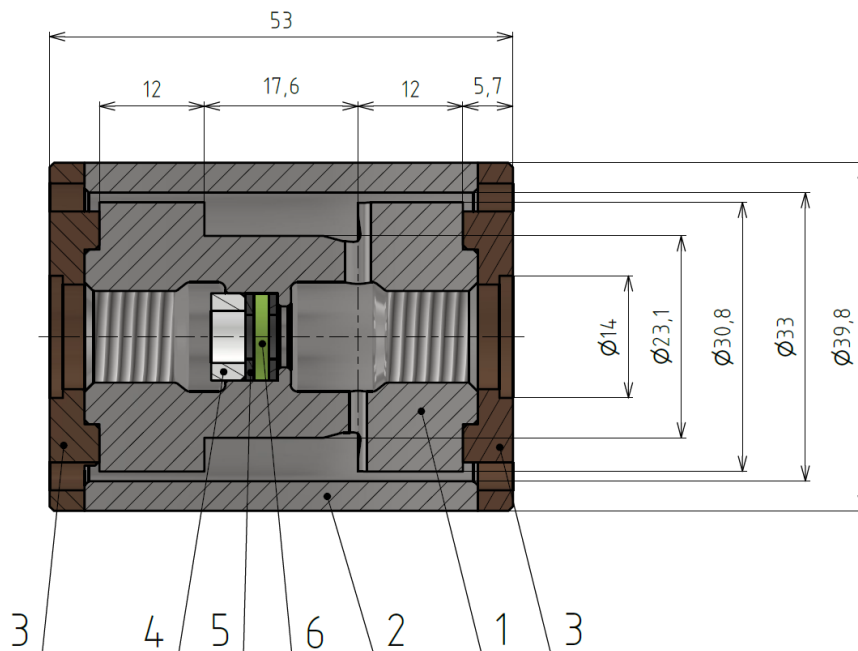
Pomocou tohto modelu bola stanovená $F - v$ charakteristika navrhovaného tlmiča pre nevybudený aj vybudený (7 A) stav v rozpätí piestovej rýchlosti od 0 m/s do 6 m/s. Pri nulovej rýchlosti dosahuje tlmič v nevybudenom stave 150 N (daných trením v tesneniach) a vo vybudenom stave je sila tlmiča 1 735 N. Pri rýchlosti 6 m/s je sila nevybudeného tlmiča 8 457 N, zatiaľ čo vybudený tlmič dosahuje 10 092 N. Na obrázku 5-6 je grafická závislosť sily tlmiča na rýchlosti pre nevybudený ako aj vybudený stav.



Obr. 5-6 Predpoklad $F - v$ charakteristiky navrhovaného MR tlmiča pre vybudený stav (modrá) a nevybudený stav (oranžová).

5.1.3 Návrh prvého variantu piestu

Na základe vykonanej magnetickej analýzy bol vytvorený návrh piestu MR tlmiča. Hlavným cieľom návrhu bolo previesť zjednodušenú geometriu, ktorá bola použitá na určenie základných rozmerov ako aj na stanovenie predpokladanej silovej charakteristiky, do výrobitelnej podoby.

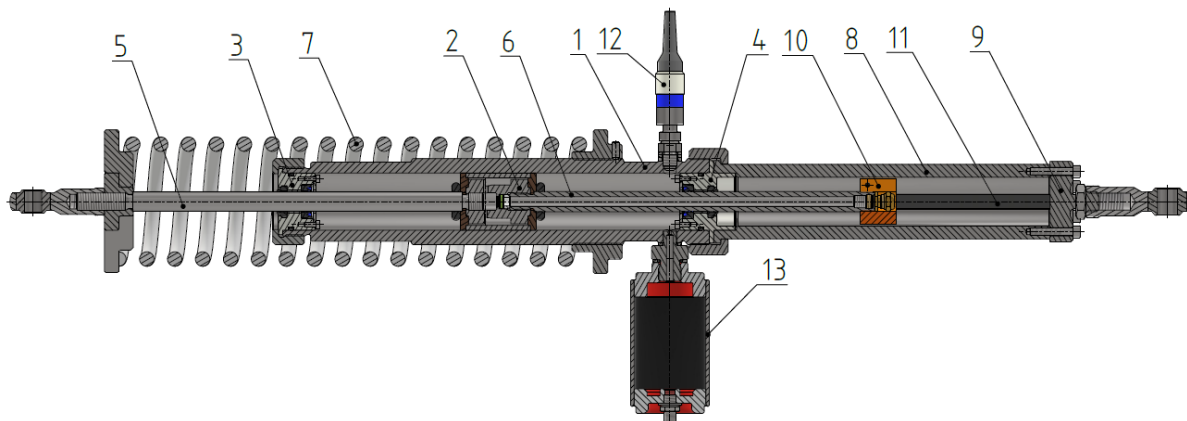


Obr. 5-7 Prierez prvým variantom piestu s vyznačenými rozmermi.

Ako je možné vidieť v reze piestom na obrázku 5-7, rozmery MR ventilov zostali zachované, avšak do jadra (1) boli pridané závitové tyče pre piestové tyče. Na viečka (3) boli pridané odstupňované čelá, do ktorých zapadá jadro a vonkajší plášť (2), ktorý uzatvára magnetický obvod. Na dnách závitov sú vyhlbené dutiny, ktoré slúžia na výbeh noža pri rezaní závitov. Okrem toho ešte slúžia ako priestor pre zvinutie prebytočného drôtu, z ktorého je navinutá cievka. Drôt z cievky, ktorá je navinutá na vonkajšej drážke jadra, prechádza dvoma proti sebe navrtanými dierami do dutiny v strede jadra. Tam prechádza do diery, ktorá spája obidve dutiny. Do tejto diery je zasadený malý plošný spoj (6), ktorý slúži na prepojenie drôtu cievky s káblom, ktorý vedie von z tlmiča. Tento plošný spoj je na oboch stranách utesnený krúžkom (5), ktorý je vystrihnutý z gumy o hrúbke 1 mm. Jeden z krúžkov sa opiera o čelo diery v pieste, druhý gumový krúžok je pritláčaný plastovým pritlačným krúžkom (4). Na ten tlačí dutá piestová tyč, ktorá je zasadená v ľavom závite. týmto spôsobom je zabezpečené utesnenie piestu a je zabránené MR kvapaline vytiecť von z tlmiča cez dutú piestnicu. Pre zvýšenie tesnosti je ešte pravá dutina, kde je zvinutý prebytočný drôt vyplnená dvojzložkovým silikónovým kaučukom Lukopren.

5.2 Určenie tvarov, rozmerov a materiálov

Prvý variant MR tlmiča vychádza z konceptu 3, teda z tlmiča s priechodnou piestnicou s budením magnetického poľa v pieste s jednou drážkou. Na obrázku 5-8 je zobrazený rez navrhnutým tlmičom.



Obr. 5-8 Prierez modelom MR tlmiča.

Jeho hlavné súčasti sú:

1. Valec (trubka): tvorí centrálnu časť tlmiča. Je vyrobený z hydraulickej trubky, ktorej vnútorné vrtanie je v tolerancii H8, čo umožňuje posuv piestu vo vývrte bez kolízií. Slúži ako základ tlmiča, ku ktorému sú pripojené ostatné súčasti tlmiča.
2. Piest: piest, obsahujúci jednoduchý MR ventil. Jeho bližší popis je predmetom predošlej podkapitoly. Jeho vonkajší priemer je o dve desatiny milimetra menší, než je vývrt valca, čím je zabezpečený jeho hladký priechod.
3. Spodné viečko: uzatvára spodný koniec tlmiča. Jeho úlohou je zabrániť úniku MR kvapaliny tlmiča a zároveň cez svoj stred viesť piestovú tyč. Preto je voči valcu utesnené o – krúžkami a v jeho diere je umiestnená sústava tesnení s klzným ložiskom, ktoré vedie piestnicu.
4. Horné viečko: plní rovnakú úlohu ako spodné viečko, navyše má však predĺženú vonkajšiu časť, ktorá tvorí dosadáciu a strediacu plochu pre krycí valec.
5. Plná piestová tyč: vychádza z tlmiča na spodnej strane. Pri pracovnom zdvihu prenáša tlmiacu silu z tlmiča. Na jej konci je na závite nasadené kĺbové ložisko, ktoré slúži na upínanie tlmiča. Nad ložiskom je nasadený tanier, na ktorý dosadá pružina tlmiča.
6. Dutá piestna tyč: jej hlavným účelom je kompenzovať objem vnikajúcej plnej piestovej tyče počas pracovného zdvihu. Vzhľadom k tomu, že neprenáša žiadne zaťaženie, môže byť odľahčená a mať v sebe diery. Táto diera potom slúži na vývod vedenia, ktoré privádza elektrický prúd k cievke v pieste.

7. Tlačná pružina: slúži na uchovanie energie rázu, ktorá sa nestihne dissipovať počas prvého pracovného zdvihu. Na spodnej strane tlmiča dosadá na tanier nasadený na piestnej tyči, na svojom hornom konci sa opiera o maticu, ktorá je nasadená na vonkajšom závite valca.
8. Krycí valec: tento valec chráni dutú piestnicu a zároveň prenáša zaťaženie. Na jeho strane je vyfrézovaná drážka, ktorou prechádza elektrické vedenie tlmiča.
9. Silomer: silomer Megatron s meracím rozsahom do 20 kN. Tento silomer je nasadený na hornom čele krycieho valca, teda prenáša zaťaženie z tlmiča. Je ním preto možné merať celkovú silu tlmiča a pružiny. Na jeho závite je nasadené ďalšie kĺbové ložisko, ktoré slúži ako druhý upínací bod.
10. Senzor polohy: jedná sa o digitálny snímač, ktorý určuje svoju polohu voči magnetickému pásiku. Je vlepovaný v plastovom držiaku, ktorý je nasadený na dutú piestnicu.
11. Magnetický pásik: je vlepovaný v dne drážky, ktorá je vyfrézovaná na vnútornej stene krycieho valca. Je nevyhnutný pre fungovanie snímača polohy.
12. Snímač tlaku: piezoelektrický snímač tlaku s meracím rozsahom do 200 bar. Slúži na snímanie tlaku v kompresnej komore tlmiča počas pracovného zdvihu. Je namontovaný do valca kolmo k jeho ose.
13. Expanzná komora: komora, ktorá slúži k vyrovnávaniu zmien objemu MR kvapaliny s meniacou sa teplotou. Je vsadená do valca kolmo k jeho ose, naproti snímaču tlaku. Bez jej použitia by mohlo v dôsledku zahriatia MR kvapaliny dochádzať k veľkému zvýšeniu tlaku vo valci, čo by mohlo mať za dôsledok únik kvapaliny, v krajnom prípade by mohlo dokonca dôjsť ku katastrofálnemu zlyhaniu konštrukcie.

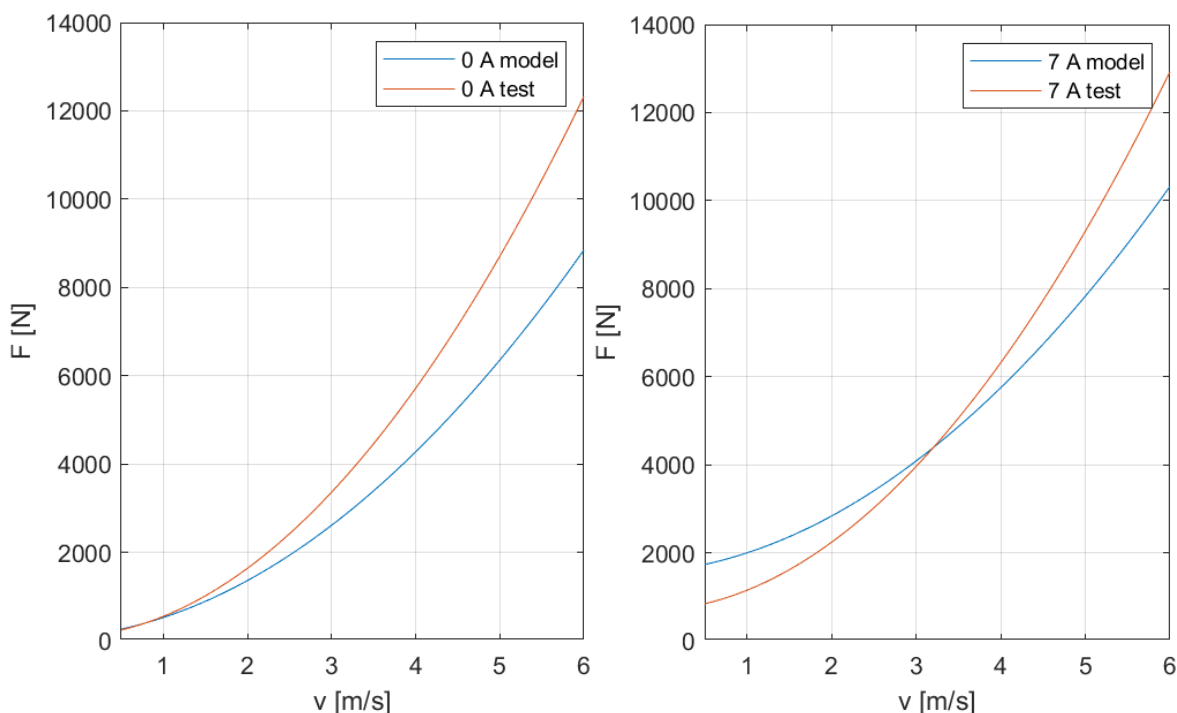
Väčšina súčastí tlmiča je vyrobená z automatovej ocele, keďže sa jedná o experimentálne zariadenie a jeho hmotnosť nie je obmedzená žiadnou požiadavkou. Jeho prázdna hmotnosť dosahuje 10,3 kg, V prípade naplnenia valca a expanznej komory (ktorých súhrnný objem dosahuje približne 0,31 l) magnetoreologickou kvapalinou MRF-122EG jeho hmotnosť ešte narastie o 0,738 kg. Maximálna dĺžka medzi jeho upínacími bodmi činí 887 mm, dĺžka zdvihu je 190 mm. Na nasledujúcom obrázku 5-9 sú zobrazené jednotlivé vyrobené súčasti tlmiča.



Obr. 5-9 Tlmič v rozloženom stave.

5.3 Testovanie prvého variantu tlmiča

Po zložení bol tlmič otestovaný. Jeho test prebiehal na hydraulickom pulzátore Inova. Tlmič bol do neho upnutý pomocou na mieru pripravených prípravkov. Počas testu bol pohyb piestu tlmiča ovládaný riadením posuvu pulzátora. Priebeh posuvu bol harmonický s konštantnou amplitúdou ± 70 mm (celkový zdvih bol teda 140 mm). Počas merania bola rovnomerne zvyšovaná frekvencia pohybu, až kým sa nedosiahla piestová rýchlosť 2,5 m/s. Senzorikou, zabudovanou v pulzátore bolo možné sledovať silu tlmiča, posuv a rýchlosť piestu. Testy boli vykonané s vypnutým tlmičom ako aj s plne zapnutým tlmičom napájaným maximálnym dovoleným prúdom 7 A. Výsledné hodnoty sily z merania boli následne extrapolované pomocou polynómu druhého stupňa. V prípade výsledkov z merania s vypnutým tlmičom dosahovala smerodajná odchýlka dát od preloženej krivky hodnotu 0,99 N. Výsledky testov práve pre 0 A a 7 A sú zobrazené na nasledujúcich grafoch na obrázku 5-10, kde sú zároveň porovnané s modelovým predpokladom. Okrem sledovania sily, posuvu a rýchlosti bola ešte snímaná aj teplota tlmiča. Účelom merania teploty bolo zabezpečenie nezávislosti výsledkov merania na teplote, ktorá znateľne ovplyvňuje dynamickú viskozitu kvapaliny. Pokiaľ teda teplota tlmiča začala presahovať 40 °C, bolo meranie prerušené a vyčkalo sa, kým tlmič ochladne späť na izbovú teplotu.



Obr. 5-10 Porovnanie modelovej a nameranej F - v charakteristiky tlmiča pri napájaní 0 A (vľavo) a 7 A (vpravo).

Vo vypnutom stave podľa modelu pri rýchlosti 5 m/s mal tlmič dosahovať silu 6 030 N a pri rýchlosti stláčania 6 m/s mala jeho sila dosiahnuť hodnotu 8 457 N. Na nameranom priebehu

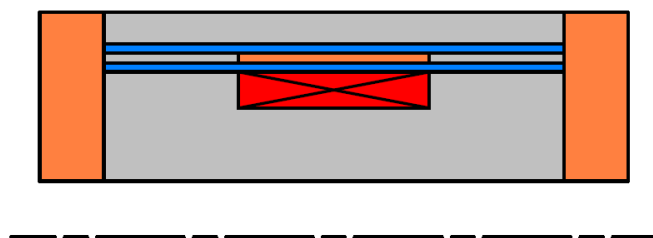
silovej charakteristiky bol však pozorovaný odklon nahor a pri extrapolácii je predpokladaná skutočná sila pri piestovej rýchlosti 5 m/s 8 706 N a pri rýchlosti 6 m/s až 12 327 N. Pri rýchlosti 6 m/s teda dochádza k nárastu sily voči modelu až o 146 %. Zároveň bola pri plnom zapnutí tlmiča na 7 A pozorovaná sila, spôsobená vyvinutím medze toku v MR kvapaline iba 840 N, čo je približne polovica očakávanej sily, ktorú model predpokladal o hodnote 1 735 N. Takýto výrazný nárast pasívnej zložky sily tlmiča a polovičný pokles medze toku bol neuspokojujúci a tak bolo pristúpené k rekonštrukcii piestu tlmiča.

5.4 Návrh druhého variantu piestu tlmiča

Upravený piest tlmiča vychádza z konceptu číslo 4, teda tlmiča s priechodovou piestnicou a viacerými paralelnými štrbinami umiestnenými v pieste. Pri návrhu nového piestu bol kladený dôraz na čo najväčšie využitie dielov z prvej verzie. Postup návrhu bol rovnaký, ako u prvej verzie.

5.4.1 Magnetostatická analýza

Ako u prvej verzie, tak aj u druhej začínal návrh magnetostatickou analýzou v programe Ansys Maxwell. Bola vytvorená zjednodušená geometria pre axisymetrickú analýzu, zobrazená je na obrázku 5-11.



Obr. 5-11 Geometria MR ventilu druhého variantu piestu MR tlmiča použitá na magnetostatickú analýzu.

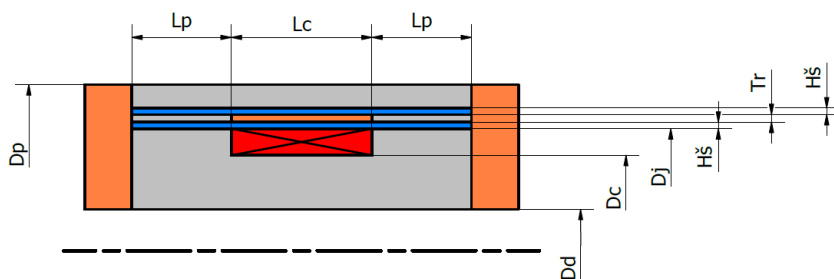
Šedou farbou sú zobrazené súčasti piestu, ktoré sú vyrobené z automatovej ocele, oranžovou sú zobrazené bronzové komponenty, červenou je zastúpená cievka a modrá zase znázorňuje MR kvapalinu. Oproti prvej variante sú však súčasťou MR ventilu aj tri prstence, dva z ocele a jeden z bronzu. Zoradené za sebou tvoria tenkostennú trubku, ktorá oddeľuje od seba dve drážky. Z týchto troch prstencov je prostredný ten bronzový. Tým sa zabráňuje rozptylu magnetického indukčného toku cez túto vloženú trubku. V tabuľke 5-3 sú rozpísané materiály jednotlivých komponentov.

Tab. 5-3 Materiály pre magnetickú analýzu druhého variantu.

| | | | | | | | | |
|------------------|---------------|---------------|---------|---------|--------|-----------------|----------------------|---------------------|
| Komponent | Horné veko | Dolné veko | Jadro | Plášť | Cievka | MR kvapalina | Okrajové prstence | Stredný prsteneč |
| Materiál | CuSn8 | CuSn8 | 11SMn30 | 11SMn30 | Meď | MRF 122 EG | 11SMn30 | CuSn8 |

V samotnej analýze bola geometria magnetického obvodu od okolia izolovaná podmienkou baloon. Vzhľadom k tomu, že je nový piest modifikáciou starého a obsahuje dve drážky namiesto pôvodnej jednej, musí dôjsť k zníženiu priemeru pólov jadra. To ale znemožňuje zachovanie pôvodnej cievky, keďže aj priestor pre jej závit je zmenšený. Preto bolo pristúpené k použitiu drôtu s menším priemerom 0,45 mm. To umožňuje navinúť na zmenšené jadro cievku až so 180 závitmi, so závitmi v piatich radoch. Použitie cievky so závitmi z tenšieho drôtu však kvôli vodivosti a indukčnosti cievky obmedzuje napájací prúd na maximálnu hodnotu 3 A.

Takto upravený model MR ventilu bol využitý na magnetostatickú analýzu. Iteratívnym spôsobom bola na základe výsledkov zvolená nasledujúca geometria, ktorá je zobrazená na obrázku 5-12 aj s vyznačenými rozmermi. Ich hodnoty sú zanesené v tabuľke 5-4.

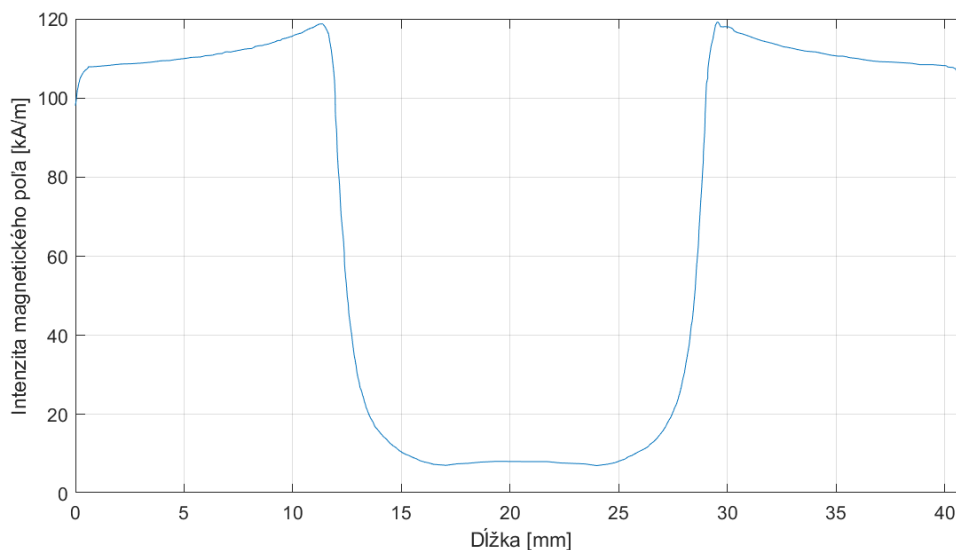


Obr. 5-12 Schéma zjednodušenej geometrie piestu s vyznačenými rozmermi.

Tab. 5-4 Hodnoty rozmerov piestu tlmiča.

| Parameter | Lp | Lc | Dd | Dc | Dj | Hš | Tr | Dp |
|-----------------|------------|--------------|----------------|----------------|---------------|---------------|--------------|----------------|
| Názov parametra | Dĺžka pólu | Dĺžka cievky | Priemer dutiny | Priemer cievky | Priemer jadra | Výška štrbiny | Hrúbka steny | Priemer piestu |
| Hodnota [mm] | 12 | 17 | 10 | 23 | 29,4 | 0,8 | 0,9 | 39,8 |

Počas analýzy bol sledovaný priebeh intenzity magnetického poľa po dĺžke drážok. Pre zvolenú geometriu s cievkou napájanou prúdom s veľkosťou 3 A bol priebeh nasledovný.

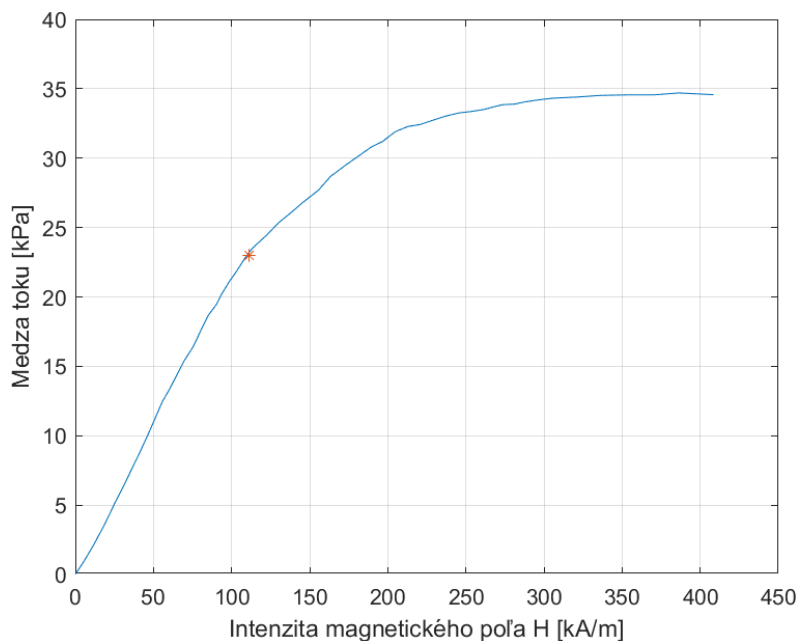


Obr. 5-12 Priebeh intenzity magnetického poľa pozdĺž drážky v pieste pri budení prúdom 3 A.

Z uvedeného priebehu bola získaná stredná hodnota intenzity magnetického poľa uprostred magnetického pólu. Dosahovala 111 kA/m, čo je porovnateľné s prvým variantom tmiča.

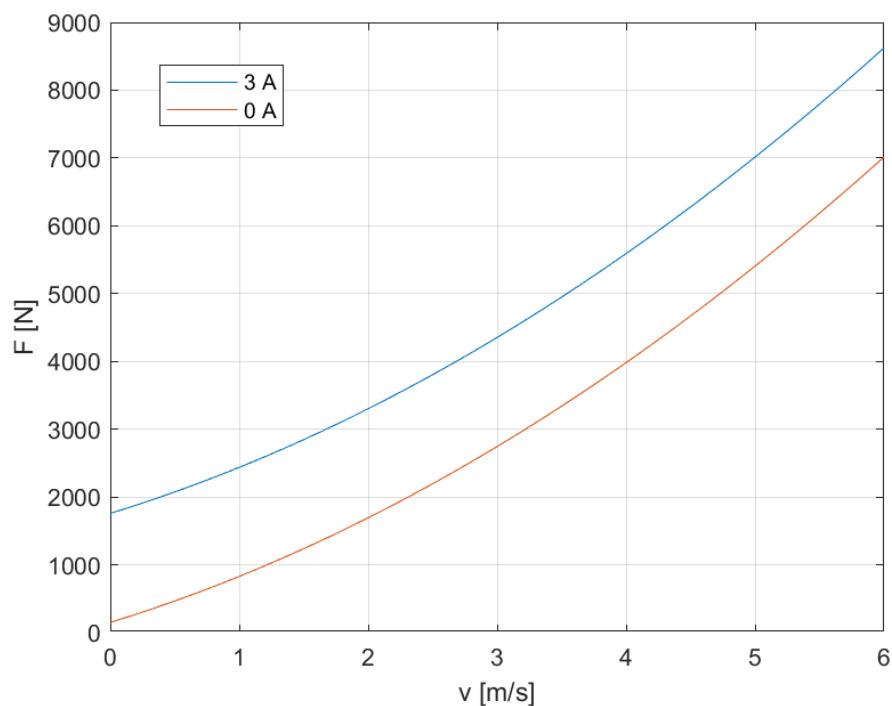
5.4.2 Analytický model

Získané rozmery a hodnota maximálnej intenzity magnetického poľa bola použitá na určenie F-v charakteristiky nového tmiča. Intenzite 111 kA/m podľa grafu z katalógu výrobcu MR kvapaliny MRF-122EG odpovedá medza toku 23 kPa. Na grafe na obrázku 5-13, ktorý je vyňatý z katalógu a upravený je odpovedajúci bod zobrazený červenou.



Obr. 5-13 Závislosť medze toku kvapaliny MRF 122 EG s vyznačeným pracovným bodom, ktorý dosiahne druhý variant tmiča pri napájaní 3 A prúdom - upravené [16].

Výpočet predikcie silovej charakteristiky prebiehal rovnakým spôsobom, ako u prvého variantu, teda s využitím Spencerovho Yangovho modelu [6]. Jediným rozdielom bol u tohto modelu prietok Q , ktorý v tomto prípade značil súhrnný prietok všetkými štrbinami. Keďže dve štrbiny nového piestu majú väčšiu plochu prierezu ako štrbina predošlej verzie piestu, je aj rýchlosť prúdenia MR kvapaliny nižšia. Tým sa znižujú pasívne odpory tlmiča. Na obrázku 5-14 sú znázornené priebehy MR charakteristiky pre vypnutý tlmič a pre tlmič napájaný prúdom o veľkosti 3 A.



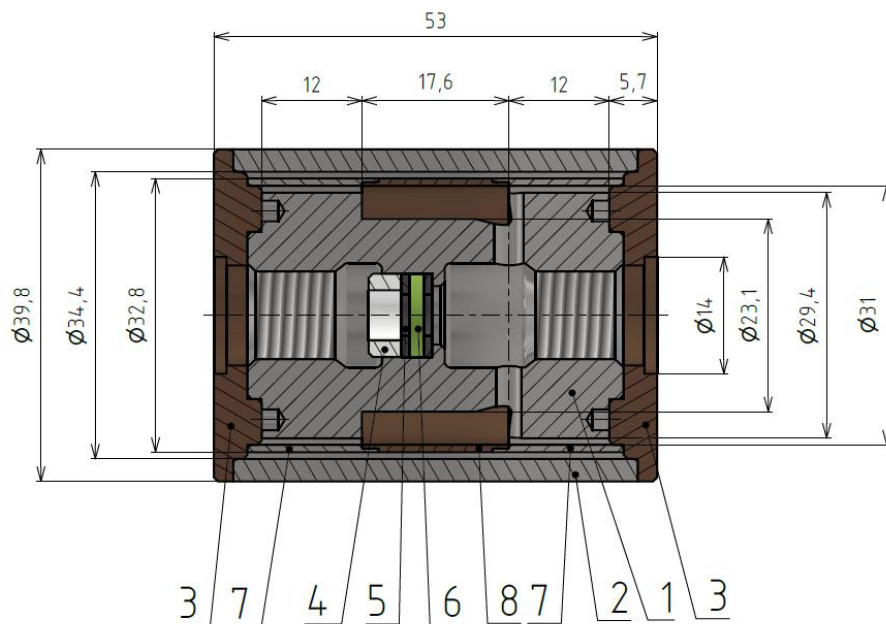
Obr. 5-14 Predpoklad $F - v$ charakteristiky navrhovaného MR tlmiča pre vybudený stav (modrá) a nevybudený stav (červená).

Pri nulovej rýchlosti je sila tlmiča 150 N, čo je spôsobené jeho pasívnymi odpormi, po vybudení cievky maximálnym dovoleným prúdom narastie jeho odpor voči pohybu na 1 760 N. Pri rýchlosti 5 m/s dosahuje sila vypnutého tlmiča 5 405 N a pri rýchlosti 6 m/s má jeho pasívna sila hodnotu 7 015 N. Pri vybudení sily narastú na 7 014 N pri 5 m/s a 8 623 N pri 6 m/s. Oproti predošlému variantu tlmiča zostáva zachovaná u nového modelu približne rovnaká medza toku, zatiaľ čo nárast jeho silových charakteristík je menej strmý.

5.4.3 Druhý variant piestu

Zvolená geometria prierezu piestu s MR ventilom bola navrhnutá tak, aby bolo možné využiť čo najväčšie množstvo dielov z prvej verzie piestu. Prierez novým piestom je zobrazený na obrázku 5-15. Jadro (1) ostalo zachované, iba jeho vonkajší priemer v oblasti magnetických pólov bol znížený z 30,8 mm na 29,4. Viečkam (3) bolo pridané ďalšie

odstupňované čelo, čím bolo umožnené do medzery medzi vonkajším plášťom (2) a jadrom vložiť trubku zloženú z prstencov (7 a 8), ktoré od seba oddeľujú dve štrbiny. Vďaka dvojitému odstupňovaniu však bolo nutné vyrobiť nový, dlhší plášť s menšou hrúbkou steny. Spôsob navinutia cievky a jej spojenie s vedením, ktoré je privádzané do piestu dutou piestnicou ostáva nezmenený.



Obr. 5-15 Prierez modelom druhého variantu piestu s dvoma štrbinami.

6 DETAILNÝ NÁVRH

Počas predbežného návrhu bolo určené rozloženie komponent a tvar samotného piestu, ktorý obsahuje magnetoreologický ventil. Táto kapitola bude zameraná na popis tvaru a funkcie jednotlivých komponentov. Súčasťou popisu bude aj kontrola kritických súčastí voči medzným stavom. Keďže z väčšiny týchto komponent bol zostavený aj prvý variant tlmiča, bude jeho F-v charakteristika slúžiť ako vstup do výpočtov.

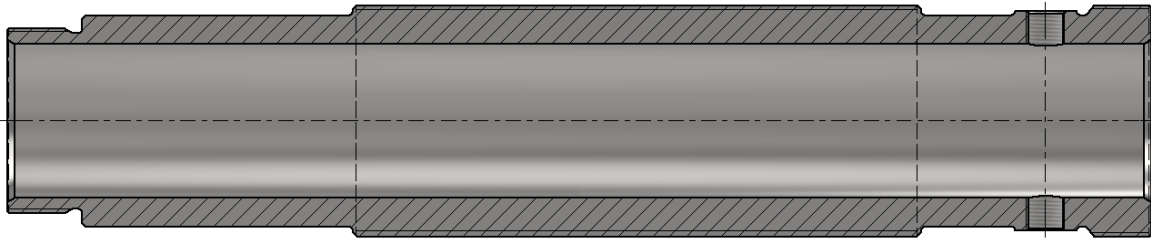
Pre vykonanie dôležitých analýz je najprv dôležité stanoviť veľkosť tlaku MR kvapaliny pri pracovnom zdvihu o rýchlosti 6 m/s. Aj keď je požiadavka na tlmič dosiahnuť aspoň rýchlosť 5 m/s, testovacie zariadenie na Odbore technickej diagnostiky je navrhnuté tak, aby u tlmiča dosiahlo piestovú rýchlosť 6 m/s. Na jeho výpočet bude použitá sila, ktorú dokáže tlmič vyvinúť počas zdvihu pri tejto rýchlosti, teda sila vybudeneho tlmiča. Tlak od piestu p_p je určený tlakovou stratou na pieste je určený celkovou silou tlmiča (bez trecích síl) pôsobiace na plochu čela piestu. Okrem toho je tlak v tlmiči ešte navýšený pôsobením expanznej komory, ktorá má za úlohu vyrovnávať zmenu objemu MR kvapaliny vplyvom zmeny teploty. Jej tlak p_e je braný ako konštantný a to z toho dôvodu, že je expanzná komora od kompresnej komory valca oddelená malou štrbinou, ktorá znemožňuje rýchle prúdenie MR kvapaliny z a do expanznej komory. Počas testov je expanzná komora natlakovaná na 15 bar. Výsledný tlak p_v sa tak určí vzťahom:

$$p_v = \frac{F - F_T}{A_p} + p_e \quad (15)$$

Tlak p_v pri rýchlosti posuvu 6 m/s a napájania maximálnym prúdom dosahuje 10,52 MPa. Táto hodnota bude použitá na výpočet bezpečnosti voči medznému stavu pružnosti niektorých komponentov.

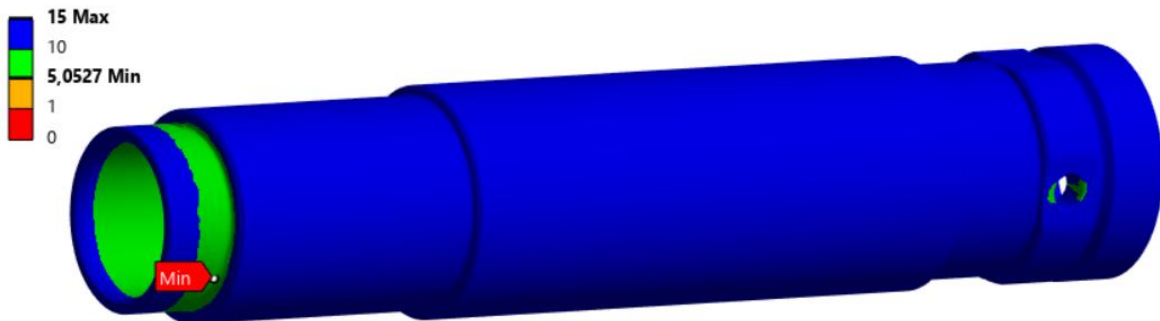
6.1 Valec

Pôvodne mal byť pre valec (plášť) MR tlmiča využitý valec z automobilového tlmiču Hyundai. Ten sa však ukázal ako nevyhovujúci z hľadiska zabezpečenia dostatočne dlhého zdvihu, tak bolo pristúpené k návrhu plášťa úplne nového. Pre jeho výrobu bola použitá bezošvá, valčekovaná hydraulická trubka zo sortimentu firmy Hydraulics s. r. o. Vnútorňý priemer tejto trubky je 40 mm s toleranciou H8, vonkajší dosahuje 60 mm. Materiál, z ktorého je vyrobená je oceľ E355SR. Na obrázku 6-1 je rez týmto valcom. Celková dĺžka plášťa dosahuje 298 mm. Na jeho vonkajšom povrchu je vyrezaný závit M60x2 s dĺžkou 148 mm. Na tomto závite je nasadená oporná matica pružiny. Napravo závitu sa nachádza valcová plocha so štyrmi vyfrézovanými plôškami, pričom do dvoch týchto plôch sú proti sebe vyvrtané závity M10x1, ktoré slúžia na inštaláciu tlakomeru a expanznej komory.



Obr. 6-1 Rez plášťom tlmiča.

Vnútorňý priemer trubky zostáva neobrobený, aby si zachoval svoju kvalitu povrchu. Jeho konce sú však skosené, aby sa uľahčilo vkladanie piestu a viečok pri montáži. Obidva konce plášťa sú po montáži uzavreté viečkami popísanými nižšie. Tieto viečka sú pritláčané pomocou matic nasadených na závitoch na oboch koncoch trubky. Na ľavej strane sa nachádza závit M48x1,5, na ktorý dosadá matica využitá z automobilového tlmiča Hyundai, na pravom konci je použitý závit väčšieho priemeru M60x1,5, na ktorý je nasadená nová matica. Pomocou MKP analýzy bola overená bezpečnosť plášťa voči medznému stavu pružnosti. Geometrii valca bol priradený materiál s mechanickými vlastnosťami odpovedajúcimi oceli E355SR [17]. Vonkajšie závit, na ktorých sú nasadené matice viečok, sú namáhané ťahom silou odpovedajúcou tlakovému pôsobeniu na viečka, čo odpovedá 11,6 kN. Takisto diery závitov M10x1 sú namáhané ťahom silou, odpovedajúcou pôsobeniu tlaku v tlmiči na plochu prierezu diery, ktorej veľkosť je 826 N. Vnútorňý povrch valca je zas vystavený pôsobeniu tlaku p_v . Na obrázku 6-2 je výsledok MKP analýzy, ktorý udáva bezpečnosť voči MSP o hodnote 5,05 v oblasti zúženia za závitom M48x1,5.



Obr. 6-2 MKP analýza plášťa tlmiča.

Okrem MKP analýzy bola vypočítaná bezpečnosť jednotlivých závitov voči MSP a bolo tiež skontrolované ich otláčenie. Pri kontrole voči MSP je potrebné poznať nominálne napätie σ pri zaťažení. To je dané vzťahom [18]:

$$\sigma = \frac{4F_z}{\pi d_3^2} \quad (16)$$

kde F_z je sila pôsobiaca na závit a d_3 je najmenší priemer závitu. Otláčenie závitu sa kontroluje tak, že sa vypočíta tlak na závit p_z a porovná sa s dovoleným tlakom. Tlak v závite je určený vzťahom [18]:

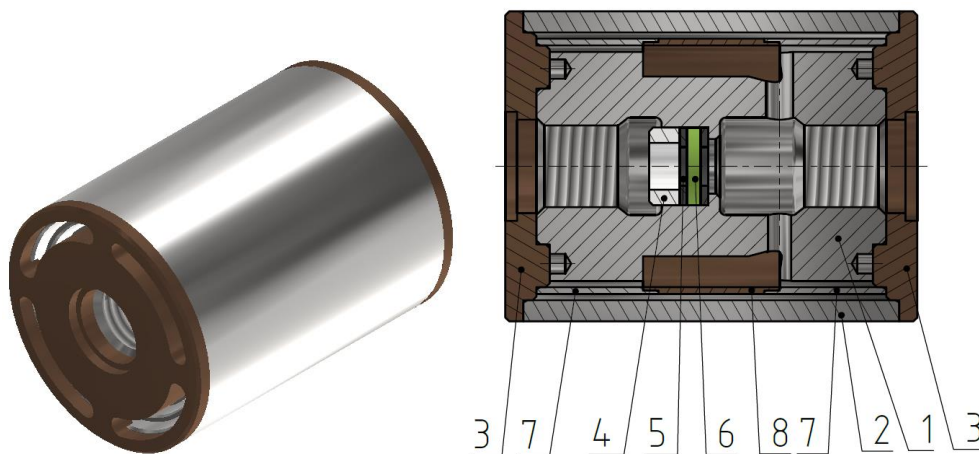
$$p_z = \frac{4F_z}{\pi(d^2 - D_1^2)n_z} \quad (17)$$

kde d je menovitý priemer závitů a D_1 je najmenší priemer závitov matice. Bezpečnosť voči otláčaniu sa potom určia ako pomer dovoleného a vypočítaného tlaku v závitoch. Vypočítané bezpečnosti jednotlivých závitov okrem M60x2 sú zhrnuté nižšie:

- Závit M48x1,5: bezpečnosť voči MSP $k_{MSP} = 16,9$ a bezpečnosť voči otláčaniu $k_O = 9,4$.
- Závit M60x1,5: bezpečnosť voči MSP $k_{MSP} = 33$ a bezpečnosť voči otláčaniu $k_O = 9,4$.
- Závit M10x1: bezpečnosť voči MSP $k_{MSP} = 19,8$ a bezpečnosť voči otláčaniu $k_O = 14$.

6.2 Piest

Geometria piestu bola uvedená na konci predošlej kapitoly, pričom sa viac zameriavala na rozmery a funkciu magnetoreologického ventilu v pieste. Táto časť sa bude venovať viac jeho konštrukcii a vyrobiteľnosti. Na obrázku 6-3 vľavo je pohľad na model zostavy piestu, vpravo je ňou prevedený rez.



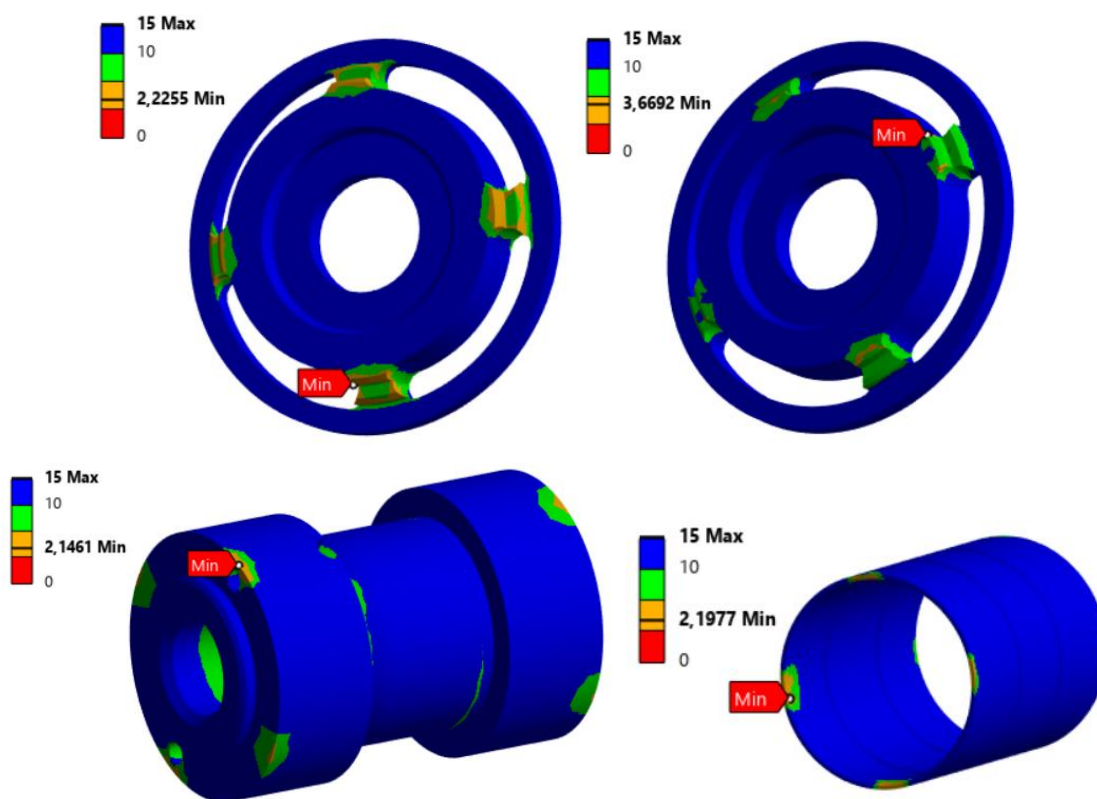
Obr. 6-3 Model piestu tmiča (vľavo), rez piestom tmiča (vpravo).

Konštrukcia piestu pozostáva z týchto súčastí: 1) jadro, 2) plášť (trubka), 3) 2 viečka, 4) prítlačný krúžok, 5) gumový krúžok, 6) plošný spoj, 7) 2 vonkajšie prstence a 8) vnútorný prstenec.

Jadro piestu (1), je vyrobené z ocele 11SMn30. Je valcového tvaru, pričom v strednej časti má vyhlbenú veľkú drážku, v ktorej je namotaná cievka. Drôt cievky prechádza kolmými dierami do dutiny v jadre. Tam je nadbytočná dĺžka zmotaná. Dutiny v pieste odpovedajú odporúčaným výbehom zo závitov M12x1,5, ktoré sú centrálné vyrezané v jadre. Drôt

cievky je následne vovedený do plošného spoja (6), kde je z druhej strany pripojený kábel zakončený konektorom pre pripojenie k riadiacej jednotke. Plošný spoj je z oboch strán utesnený gumovými krúžkami, čím sa utesní prechod medzi dutinami v jadre. Krúžky sú vyrobené z gumeny s hrúbkou 1 mm. Obidve dutiny sú vyplnené živicom Lukopren, aby bolo zabránené úniku MR kvapaliny. Na odstupňované čelá sú nasadené dve viečka z CuSn8 bronzu. Viečka majú v sebe štyri drážky so šírkou 3,2 mm, ktoré umožňujú MR kvapaline prejsť cez piest. Na okrajoch viečka je dvakrát odstupňované čelo, kde do vyššieho stupňa zapadá zostava prstencov a do nižšieho dosadá trubka piestu, ktorá uzatvára magnetický obvod. Trubka piestu je tiež vyrobená z reznej ocele 11SMn30. Zostava prstencov je vyrobená z dvoch okrajových prstencov (7) a jedného stredového (8). Okrajové prstence sú vyrobené z ocele 11SMn30, vnútorný zas z bronzu CuSn8, aby zamedzil rozptylu magnetického poľa. Hrúbka stien týchto prstencov je 0,9 mm, pričom do seba zapadajú skosenými odstupňovanými valcovými plochami s uložením s miernym presahom H7/k6. Pri zalisovaní do seba sú ešte poistené lepidlom na závitoch. Celá zostava piestu, teda jadro, trubka a súbor prstencov sú k sebe stlačené viečkami, ktoré sú z oboch strán pritláčané piestovými tyčami, zasadenými do závitov M12x1,5 v jadre.

Celá zostava piestu bola podrobená MKP analýze odpovedajúcej zaťaženiu pri posuve rýchlosťou 6 m/s. Jedna z dier so závitom bola uchytená pevnou väzbou, zatiaľ čo na čelo piestu na opačnej strane pôsobí tlak p_v . Na obrázku 6-4 je výsledok analýzy s určenou bezpečnosťou voči medznému stavu pružnosti u jednotlivých komponentov.



Obr. 6-4 MKP analýza určené súčinitele bezpečnosti jadra, viečok a zostavy prstencov.

Okrem určenia bezpečnosti voči medznému stavu pružnosti u kritických komponentov bola vykonaná kontrola na otláčenie závitú M12x1,5, ktorý sa nachádza v jadre a pripája sa naň piestna tyč. Použitý bol rovnaký vzťah číslo 17, ako u plášťa. Do výpočtu vstupovala maximálna sila z F-v charakteristiky o veľkosti 10 092 N. Výsledná bezpečnosť voči otláčaniu závitú činí 1,8.

6.3 Piestové tyče

Tlmič je vybavený dvoma piestovými tyčami, jednou plnou a jednou dutou. Plná je vyrobená z hladného polotovaru s priemerom 14 mm s toleranciou priemeru h6 od firmy Hydraulics s.r.o. Dutá piestnica je tiež vyrobená z takého hladného polotovaru, avšak ešte so 7 mm dierou v strede. Obidve piestnice sú vyrobené z ocele CK55. Na obrázku 6-5 sú zobrazené modely oboch piestových tyčí.



Obr. 6-5 Dutá piestová tyč (hore) a plná piestová tyč (dole).

Obidve piestové tyče sú na jednom konci zakončené závitom M12x1,5, ktorým sa zasadzujú do jadra. Za závitom majú malú čelnú plochu, ktorou sa opierajú o viečka piestu, čím stláčajú celý piest k sebe. Plná piestnica má na druhom konci závit M12x1,75 o dĺžke až 35 mm. Na tento závit je nasadená kĺbová hlavica s 12 mm otvorom a závitovou dierou M12x1,75 s nosnosťou 22 kN. Pred hlavicom je na závite ešte nasadená matica, ktorá slúži na dosadenie tanieru pružiny aj ako kontramatica pre kĺbovú hlavicu.



Obr. 6-6 Koniec plnej piestnice s nasadenou kĺbovou hlavicom a maticou.

Dutá piestová tyč je zas zakončená odstupňovanou valcovou plochou s priemerom 13 mm s dvoma plôškami so vzájomnou vzdialenosťou 12 mm, tak aby sa dala piestnica uchopiť 12 mm kľúčom. V diere dutej piestnice je na konci vyvrtaný závit M10x1,5. Do tohto závitú je zasadená priechodka HSK Mini M10x1,5. Cez túto priechodku je z piestovej tyče vyvedený kábel, privádzajúci elektrický prúd do piestu. Kábel je v nej utiahnutý, čo zabraňuje vytrhnutiu kábla z piestu, ak by bolo zaň silno zatahnuté. Zároveň priechodka chráni kábel pred poškodením pri ohnutí cez kovovú hranu piestnice. Na nasledujúcom obrázku je pohľad na koniec dutej piestnice s nasadenou priechodkou.



Obr. 6-7 Koniec dutej piestovej tyče s priechodkou.

Dutá piestnica nebola kontrolovaná na medzné stavy, pretože jej úlohou je len kompenzácia objemu vnikajúcej piestnice, takže neprenáša žiadne zaťaženie. Plná piestnica zas prenáša plné zaťaženie, takže je kontrolovaná na bezpečnosť voči medznému stavu pružnosti, voči strate vzpernej stability a u jej závitov je overené bezpečnosť voči MSP ako aj voči otláčeniu. Kritickým miestom pre MSP je výbeh závitú M12x1,75, kde je priemer tyče zúžený na 9,4 mm so zaoblením o polomere 0,8 mm. Dochádza tu ku koncentrácii napätia so súčiniteľom α o hodnote 1,9 [18]. Napätie v kritickom bode je dané vzťahom:

$$\sigma = \alpha \frac{4F}{\pi d_{pú}^2} \quad (18)$$

kde $d_{pú}$ je priemer piestnice v zúženom mieste. Sila, ktorá tu vstupuje do výpočtu je celková sila tlmiča pri plnom vybudení. Výsledné napätie v kritickom bode má veľkosť 276 MPa, bezpečnosť voči MSP je tu teda 1,96, keďže medza pružnosti materiálu dosahuje hodnotu 540 MPa [19]. Ďalším rizikom je u tejto piestovej tyče strata vzpernej stability. Na jej overenie je potrebné určiť Eulerovu kritickú silu F_{cr} [18] a porovnať ju so zaťažením piestnice. Kritická sila sa určí vzťahom:

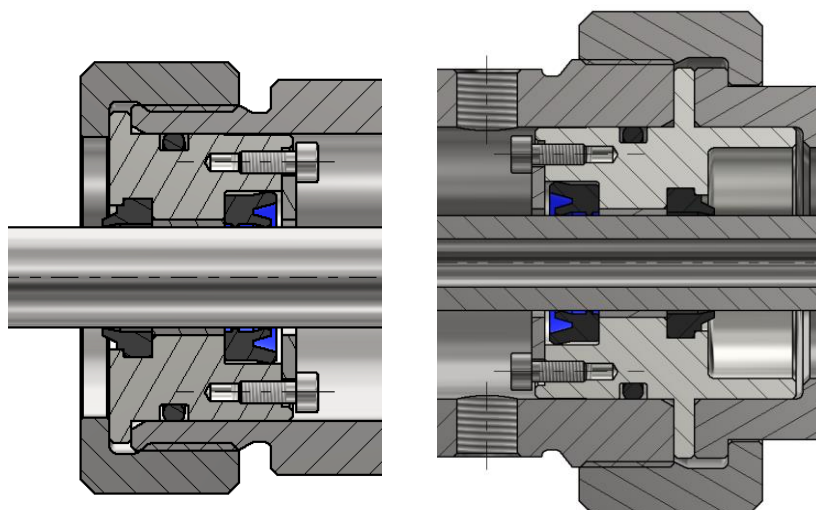
$$F_{cr} = \frac{C\pi^2 EJ}{l^2} \quad (19)$$

kde E je modul pružnosti materiálu, J je kvadratický moment prierezu piestovej tyče, l je jej voľná, nepodopretá dĺžka a C je súčiniteľ vplyvu uloženia piestnice. Pre plnú piestnicu platí C rovné 2 [18], pretože v tlmiči je piestová tyč vedená klzným ložiskom a na voľnom konci je uchytená do testeru pomocou kĺbovej hlavice. Výsledná kritická sila F_{cr} pre 14 mm piestnicu s voľnou dĺžkou 266 mm dosahuje 110 476 N. Bezpečnosť plnej piestovej tyče voči strate vzpernej stability je 10,9. Bezpečnosť závitov voči MSP aj voči otláčaniu boli vypočítané pomocou vzťahov 16 a 17. V nasledujúcich bodoch sú jednotlivé závitov a ich vypočítané súčinitele bezpečnosti:

- Závit M12x1,5: bezpečnosť voči MSP $k_{MSP} = 4,3$ a bezpečnosť voči otláčaniu $k_O = 1,8$.
- Závit M12x1,75: bezpečnosť voči MSP $k_{MSP} = 4,1$ a bezpečnosť voči otláčaniu $k_O = 2,5$.

6.4 Veká tlmiča

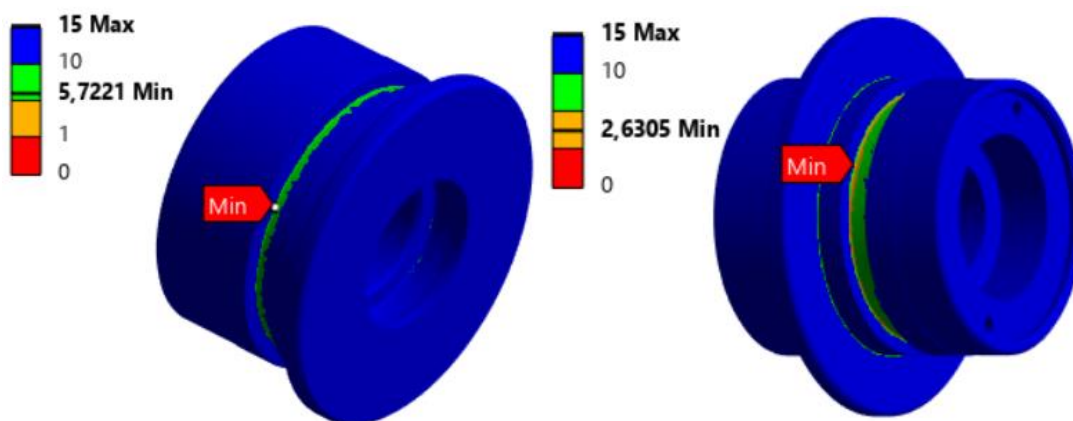
Plášť tlmiča je na oboch koncoch uzavretý vekami, ktoré sú pritlačené maticami. Tieto veká jednak uzatvárajú vnútornú komoru tlmiča, teda zabráňujú úniku magnetoreologickej kvapaliny von z valca a tiež svojím stredom vedú piestové tyče. Na obrázku 6-8 je zobrazený rez obidvoma vekami.



Obr. 6-8 Rez spodným (vľavo) a horným (vpravo) vekom.

Spodné veko je diel vyrobený z ocele 11SMn30 valcového tvaru s prírubou. Príruba mu zabráňuje zújsť hlbšie do valca, než je potrebné. Vonkajšia valcová plocha má rozmer 40 mm a vo valci je uložená s vôľou H8/f7. Uprostred vonkajšej valcovej plochy je zahĺbená drážka pre 40 mm gumený tesniaci o-krúžok. Vo vnútri veka sú tri valcové plochy. V pohľade na obrázku ľavá vnútorná valcová plocha obsahuje stierajúci krúžok HENNLICH A34, ktorý

zabezpečuje, že sa spolu s piestnicou dovnútra valca nedostanú nečistoty. Na pravej strane je väčšia drážka pre piestnicové tesnenie HENNLICH S605 14x24x8. Toto tesnenie zabráňuje úniku MR kvapaliny z tlmiča. Funguje tak, že jeho drážka v tvare písmena V sa vplyvom tlaku kvapaliny rozťahuje a pritláča ostria tesnenia k piestnici a k valcovej ploche vo veku. Keďže je montáž tohto tesnenia do diery menšej než jeho vonkajší priemer veľmi náročná, bola jeho drážka navrhnutá s otvorenou stranou. Aby však odtiaľ toto tesnenie nevyšlo naspäť, je jeho pohyb zamedzený kruhovým plechovým viečkom pripevneným dvoma skrutkami s valcovou hlavou DIN 912 M3x8. Medzi týmito tesneniami je v diere s priemerom 16 mm H7 umiestnené klzné puzdro KU 1410 s vnútorným povrchom povlakovaným PTFE, ktoré vedie lineárny pohyb piestnice. Spodné veko je k plášťu pritlačené maticou so závitom M48x1,5, ktorá je použitá z automobilového tlmiča Hyundai. Bezpečnosť závit M48x1,5 je určená v podkapitole 6.1 Valec. Horné veko má valcovú časť, ktorá sa zasúva do valca a rozloženie tesnení a klzného vedenia rovnaké, ako spodné veko. líši sa od neho ale svojou prírubou a vonkajšou časťou. Horné veko má širšiu prírubu s polomerom až 57,5 mm a von z trubky tlmiča vystupuje jeho vonkajší valcový povrch s priemerom 40 mm. Na obrubu veka dosadá svojím čelom krycí valec, pričom je stredný práve spomenutou vonkajšou valcovou plochou s uložením s vôľou H8/e8. Spolu sú krycí valec, horné veko a plášť k sebe stlačené maticou so závitom M60x1,5. Bezpečnosť tohto závit je tiež určená v podkapitole 6.1 Valec. Tieto viečka sú namáhané tlakom MR kvapaliny, preto bola metódou konečných prvkov preskúmaná ich bezpečnosť voči medznému stavu pružnosti. Modely jednotlivých viek boli prichytené pevnou väzbou v oblasti, kde sú maticou alebo krycím valcom pritlačené k plášťu tlmiča, na ich dná vystavené MR kvapaline bol zadaný tlak p_v . Na obrázku 6-9 sú znázornené súčinitele bezpečnosti pre jednotlivé veká zistené metódou konečných prvkov.

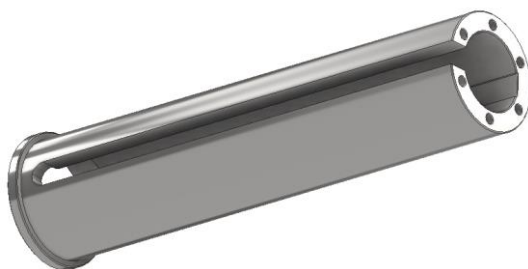


Obr. 6-9 MKP analýzou určené súčinitele bezpečnosti voči MSP pre veká tlmiča.

Najkritickejším miestom obidvoch viečok je zaoblenie drážky pre o-krúžok, pretože je tu zmenšená plocha prierezu a ešte tu vplyvom drážky dochádza ku koncentrácii napätia.

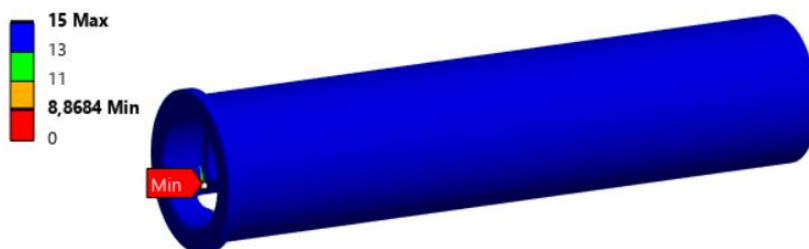
6.5 Krycí valec

V predošlej podkapitole bol spomenutý krycí valec, ktorý dosadá na horné veko aj je spolu s ním pritlačený maticou k plášťu tlmiča. Tento valec má za úlohu chrániť dutú piestnicu a prenášať zaťaženie tlmiča. Na obrázku 6-10 je zobrazený jeho model.



Obr. 6-10 Model krycieho valca.

Jedná sa o jednoduchú valcovú súčasť vyrobenú z materiálu 11SMn30. Takmer po celej svojej dĺžke má priemer 52 mm, iba na spodnej strane je rozšírená príruha, o ktorú sa opiera matica so závitom M60x1,5. Vo vnútri má vyhlbenú dieru o priemere 34 mm H13. Na spodnej strane je diera rozšírená a valec je pomocou nej stredený voči hornému veku uložením 40 mm H8/e8. takmer po celej svojej dĺžke má valec vyfrézovanú drážku so šírkou 10,5 mm H13. Touto drážkou je von z tlmiča vyvedená kabeláž. Na opčnej strane tejto štrbiny je vyfrézovaná plytká drážka rovnakej šírky. Do nej je vlepý magnetický pás, voči ktorému určuje svoju polohu snímač polohy. Na hornej strane krycieho valca je rovná čelná plocha so šesticou dier so závitom M5x0,8 s dĺžkou zahĺbenia 16 mm. Na toto čelo dosadá tenzometrický silomer. Vzhľadom k tomu, že je valec takmer po celej svojej dĺžke rozdelený drážkou pre kabeláž bola vykonaná MKP analýza jeho bezpečnosti voči medznému stavu pružnosti. Model valca bol uchytený pevnou väzbou tak, aby to odpovedalo jeho uchyteniu maticou k hornému veku. Na jeho horné čelo bola zadaná pôsobiaca sila daná maximálnou silou F-v charakteristiky vo vybudenom stave. Na obrázku 6-11 je výsledok MKP analýzy s vyznačeným najmenším súčiniteľom bezpečnosti v kritickej oblasti valca.

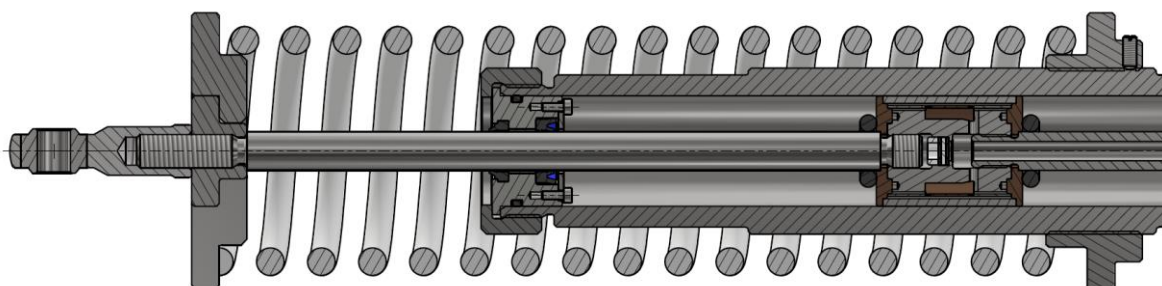


Obr. 6-11 MKP analýza bezpečnosti valca voči MSP.

Najväčšie napätie v materiáli valca vzniká v bode, kde sa stretá koncové zaoblenie drážky so zaoblením rozšírenej diery. Práve vplyvom zmeny prierezov to dochádza ku koncentrácii napätia.

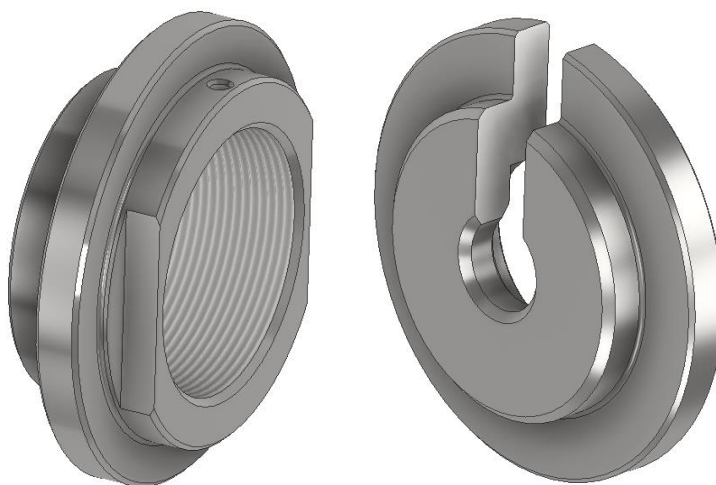
6.6 Odpruženie tlmíča

Vzhľadom k tomu, že podmienky pádového testu tlmíča vyžadujú disipáciu energie rázu, je k tlmíču paralelne zaradená pružina. Na základe dynamickej analýzy pádového testeru (ktorá nie je súčasťou tejto práce) je požadované, aby bola k tlmíču paralelne radená pružina od výrobcu Sodemann [20] s tuhosťou 13,32 N/mm. Táto pružina má voľnú dĺžku 370 mm, vnútorný priemer 70 mm, je vyrobená z nerezového pružinového drôtu s priemerom 10 mm, jej maximálne stlačenie dosahuje 203 mm a pri tomto stlačení pružina vyvinie silu 2 703 N. Vnútorný priemer pružiny je dostatočne veľký, aby mohla byť umiestnená okolo plášťa tlmíča, tak ako je to znázornené na obrázku 6-12.



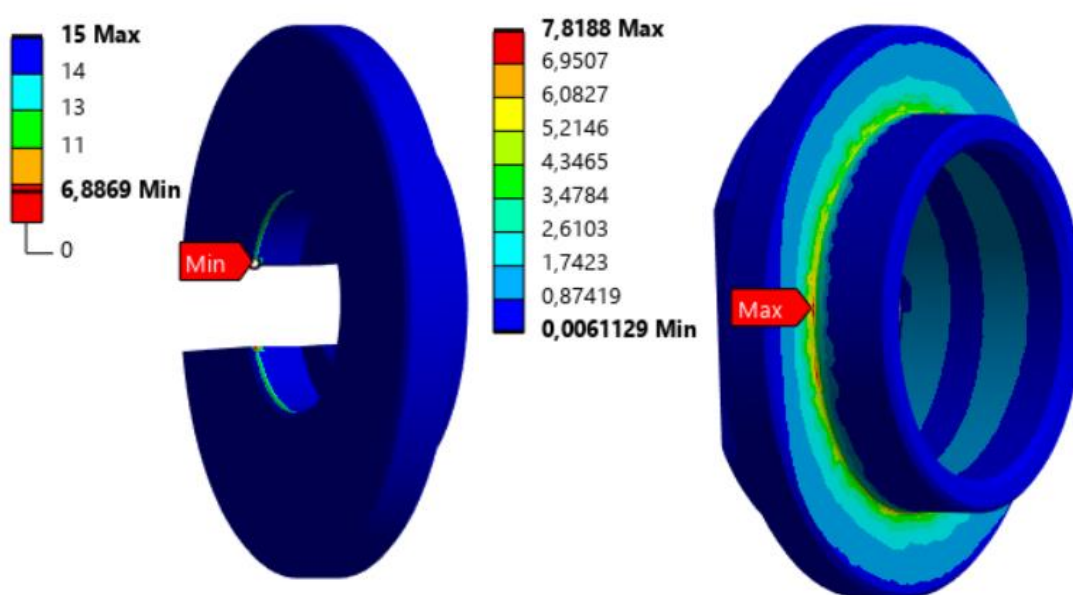
Obr. 6-12 Rez spodnou časťou tlmíča.

Preto sa na vonkajšom povrchu plášťa nachádza závit M60x2. Na tomto závite je nasadená oporná matica (alebo aj horný oporný tanier) s obrubou hrubou 10 mm, na ktorú dosadá požadovaná pružina. Matica pružinu aj stredí zvnútra pomocou svojej valcovej plochy s priemerom 69,5 mm. Za obrubou je na matici vytvorená valcová plocha s dvoma rovnými plochami so vzájomnou vzdialenosťou 66 mm, ktorými je možné maticou manipulovať a predopínať ňou pružinu. Vo valcovej ploche je kolmo k osi matice vyvrtaná závitová diera M5x0,8, v ktorej je vsadená staviaca skrutka DIN 914. Ňou je matica poistená proti samovoľnému otáčaniu. Na obrázku 6-13 vľavo je zobrazený model tejto opornej matice.



Obr. 6-13 Model opornej matice (vľavo) a oporného taniera (vpravo).

Na druhom konci sa pružina opiera o tanier nasadený na obrube matice, ktorá je utiahnutá na koncovom závite M12x1,75 na plnej piestovej tyči. Na tejto matici sedí s uložením s priemerom 40 mm H8/e8. Oporný tanier pružiny má rovnaké rozmery oporných plôch ako oporná matica, teda hrúbku obruby 10 mm a strediacu valcovú plochu s priemerom 69,5 mm. Ako je viditeľné aj na obrázku 6-13, z jeho stredu až k vonkajšiemu priemeru vedie výrez so šírkou 15 mm. Pomocou tohto výrezu je možné pružinu a tanier nasadiť na tlmič aj v prípade, že už je zložený. Keďže maximálna sila pružiny nie je malá, bola aj u opornej matici a opornom tanieri preskúmaná bezpečnosť voči medznému stavu pružnosti. Keďže obidva diely sú vyrobené z reznej ocele 11SMn30, bol im priradený materiál s vlastnosťami odpovedajúcimi tejto oceli. Matica bola uchytená pevnou väzbou v oblasti závitu, tanier zas na ploche, ktorou dosadá na obrubu strediacej matice. Na ich obruby, kde dosadá pružina bola zadaná maximálna sila pružiny. Na obrázku 6-14 je výsledok MKP analýzy.



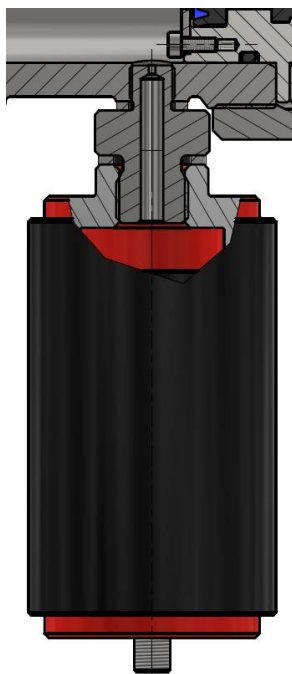
Obr. 6-14 MKP analýza bezpečnosti voči MSP oporného taniera pružiny (vľavo) a redukovaného napätia (jednotkou je MPa) u opornej matice (vpravo).

V analýze taniera bolo pozorované, že v oblasti pri výseku pružina stláča nadol obrubu taniera a tlačí tak na strediacu maticu, kde v dôsledku ich kontaktu mierne narastá napätie. Pri opornej matici je rozloženie napätia rovnomerné okolo celého obvodu, pretože matica výrez nemá. Pružina sa snaží ohnúť obrubu vzad, čoho dôsledkom je zvýšené napätie v rádiuse obruby, kde dochádza k vzniku koncentrácie napätia. Bezpečnosť voči MSP tu dosahuje hodnotu 34,5.

Okrem MKP analýzy bolo ešte potrebné vykonať aj skúšku závitu M60x2 na otláčenie. Bol k tomu použitý vzťah 17, predstavený v podkapitole 6.1 Valec. Výsledná bezpečnosť závitu voči otláčaniu tak činí až 97.

6.7 Expanzná komora

Na vyrovnávanie objemovej rozťažnosti MR kvapaliny s meniacou sa teplotou bolo nutné do návrhu tlmiča zakomponovať aj expanznú komoru. Bola využitá až existujúca komora používaná na iných MR tlmičoch, ktoré má Odbor technickej diagnostiky k dispozícii. Konštrukcia tejto komory pozostáva z ocelového valca, dvoch hliníkových viečok a plávajúceho piestu. Plávajúci piest sa nachádza uprostred valca, je utesnený gumeným okružkom a oddeľuje od seba rezervoár MR kvapaliny od tlakovej komory. Tlaková komora je zhora uzavretá hliníkovým viečkom s ventilom z automobilovej pneumatiky, cez ktorý je plnená stlačeným vzduchom. rezervoár je uzavretý hliníkovým viečkom so závitom M16x1,5. V tomto závite je umiestnené šróbenie, ktoré spája expanznú komoru s pracovným priestorom tlmiča. Na nasledujúcom obrázku 6-15 je zobrazená expanzná komora pripojená k valcu tlmiča pomocou šróbenia so škrtiacim kanálikom.



Obr. 6-15 Model expanznej komory spojenej s tlmičom pomocou šróbenia.

Šróbenie spájajúce expanznú komoru s tlmičom je vyrobené automatovej ocele 11SMn30. Do tlmiča je vsadené závitom M10x1 v plášti, ktorým ústi do kompresnej komory hneď pod horným vekom. Stredom šróbenia je vyvrtaný kanálik s priemerom 5 mm, ktorý sa na posledných 3 mm svojej dĺžky zužuje na dieru s priemerom 1,5 mm. Takýto úzky kanál spôsobuje pri rýchlom prúdení kvapaliny v tlmiči dostatočne veľký odpor voči tečeniu, aby do neho pri zdvihu tlmiča nebola vytlačaná MR kvapalina. Umožňuje tak iba pomalé prúdenie MR kvapaliny, čím sa vyrovnáva objemová rozťažnosť kvapaliny. Šróbenie je voči plášti aj expanznej komore utesnená pomocou USIT krúžkov. Závit je tiež utesnený teflónovou páskou. Na vonkajšej strane má šróbenie vyfrézovaný šesťhran s rozmerom 22 mm, vďaka ktorému je umožnené šróbenie doťahovať otvoreným kľúčom.

6.8 Senzorika

Tlmič je za účelom zberu dát o jeho pracovných parametroch, ktoré slúžia k výskumu ako aj k jeho riadeniu vybavený silomerom, senzorom zdvihu a senzorom tlaku.

6.8.1 Silomer

Pre skúmanie silovej charakteristiky je tlmič vybavený silomerom Megatron MEG40. Tento silomer je nasadený na čelnej ploche krycieho valca a je k nej prichytený šiestimi skrutkami s valcovou hlavou DIN 912 M5x30. Rozsah tohto silomera je od 0 N do 20 kN v ťahu aj v tlaku. Na hornej strane silomeru sa nachádza vonkajší závit M14x2, na ktorý je nasadená kĺbová hlavica s 12 mm otvorom a závitovou dierou M14x2 s nosnosťou 33 kN. Hlavica je na závite poistená nízkou kontramaticou ČSN EN ISO 4035 M14. Na obrázku 6-16 je vľavo fotografia uvedeného silomeru a napravo je jeho model pripevnený na tlmič.

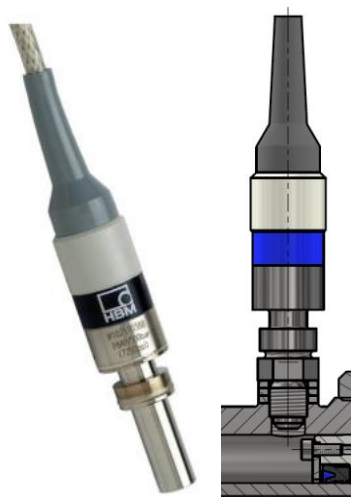


Obr. 6-16 Silomer Megatron MEG40 [21] (vľavo), model silomeru pripevnený k tlmiču s nasadenou kĺbovou hlavicom.

Vzhľadom k relatívne krátkej dĺžke závitú na silomere bola vykonaná kontrola bezpečnosti závitú voči MSP a na otláčenie závitú. Použité boli vzťahy 16 a 17. Bezpečnosť závitú na silomere voči MSP dosiahla hodnotu 2,8 a tlak v závitoch bol 1,8 násobne menší, než dovolený tlak.

6.8.2 Senzor polohy

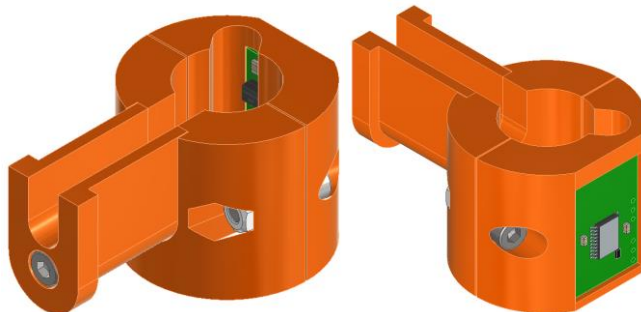
Tlmič umožňuje aj snímanie tlaku v kompresnej komore pomocou zabudovaného snímača HBM P8AP, ktorý meria absolútny tlak s rozsahom do 200 bar. Tento snímač je vsadený do závitú M10x1 v plášti tlmiča priamo naproti expanznej komore. Na obrázku 6-17, je zobrazený tento typ snímača tlaku. Senzor tlaku je voči valcu tlmiča utesnený tromi USIT krúžkami postavenými na sebe z dôvodu príliš dlhého závitú. Závit je navyše utesnený pomocou teflónovej pásky.



Obr. 6-17 Tlakomer HBM P8AP [22] (vľavo), model tlakomeru vsadeného do závitu v plášti tlmiča (vpravo).

6.8.3 Senzor polohy

Tlmič je za účelom sledovania polohy, ktoré je nevyhnutné na sledovanie F-v charakteristiky ako aj na jeho riadenie vybavený digitálnym senzorom polohy MHL200, ktorý sníma svoju polohu voči magnetickému pásiku nalepenému v plytkej drážke vo vnútri krycieho valca. K dutej piestovej tyči je uchytený pomocou špeciálneho plastového držiaku. Na obrázku 6-18 je zobrazený pohľad na jeho prednú aj zadnú stranu.



Obr. 6-18 Predný (vľavo) a zadný (vpravo) pohľad na držiak so senzorom polohy.

Držiak je zložený z troch častí, vyrobených 3D FDM tlačou z PETG. Dve v tvare polvalca tvoria telo držiaku pričom sú k sebe zovreté dvojicou skrutiek s valcovou hlavou DIN 912 M3x12, ktoré ťahajú za M3 matice v šesťhranných vybraniach. Pomocou týchto dvoch skrutiek je držiak pripevnený aj na dutú piestnicu, keďže na nej drží svorným spojom. V zadnej časti je v obdĺžnikovom vybraní vložený senzor polohy tak, aby si pri pohybe piestnice udržiaval vzdialenosť nad magnetickým pásikom do 1 mm. Proti pohybuje senzor poistený kyanoakrylátovým lepidlom. Na opačnej strane než je umiestnený senzor je k držiaku pomocou skrutky s valcovou hlavou DIN 912 M3x25 pripevnený jazdec, ktorý sa pohybuje v drážke krycieho valca. Tým zabraňuje pootočeniu držiaku a odvráteniu senzoru od magnetického pásu. V jazdci je umiestnená drážka 6 mm široká a 11 mm vysoká, v ktorej

je vložená kabeláž, teda vedenie napájajúce piest ako aj vedenie senzora polohy a je poistená sťahovacou páskou proti vypadnutiu. Tým sú káble chránené pred trením o hrany drážky v ocelovom krycom valci, ktoré by ich poškodilo.

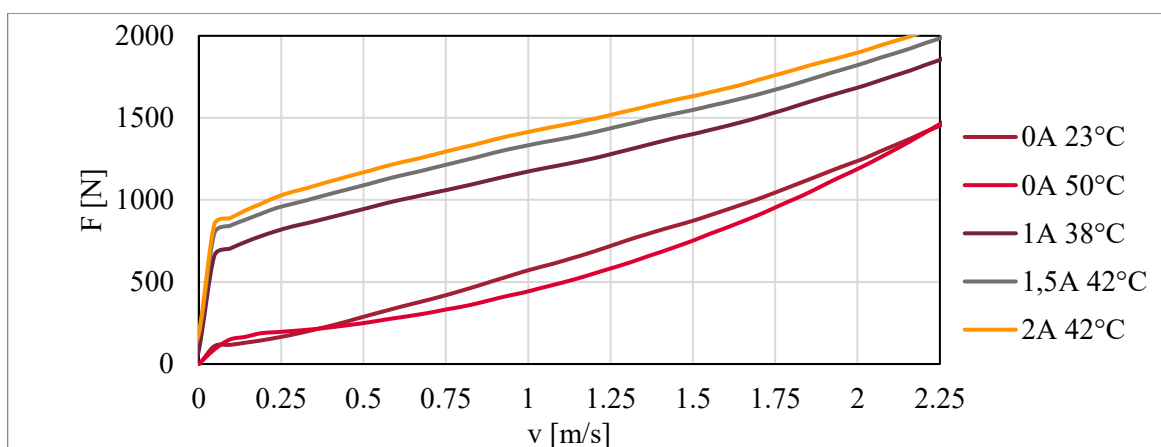
6.9 Testovanie tlmiča

6.9.1 Meranie na pulzátore



Obr. 6-19 Skonstruovaný MR tlmič počas testu na pulzátore.

Po zostavení druhého variantu tlmiča prebehlo jeho predbežné testovanie na pulzátore. Ako aj u prvého bol test riadený posuvom pulzátora v rozmedzí ± 70 mm, pričom sa počas neho postupne zvyšovala frekvencia kmitov až bola dosiahnutá rýchlosť 2,25 m/s. Tlmič bol testovaný vypnutý, s 1 A napájaním a 2 A napájaním. Namerané F-v charakteristiky sú zanesené do grafu na obrázku 6-20.



Obr. 6-20 F-v charakteristiky tlmiča získané meraním na pulzátore.

Ako je vidieť aj v popise grafu, počas merania dochádzalo k veľkému ohrievaniu tlmiča, keďže dĺžka testov trvala niekedy aj viac než minútu. Keďže hustota MR kvapalín je výrazne závislá na teplote, sú tieto charakteristiky mierne skreslené smerom nadol. Príklad toho je možné vidieť na rozdieli F-v charakteristiky pre vypnutý tlmič testovaný pri 23°C a 50°C. Počas testu sa však potvrdilo, že expanzná komora je počas pracovného posuvu piestu izolovaná od kompresnej komory tlmiča, MR kvapaliny teda do nej pri podmienkach vyvinutých počas testu nevstupovala ani z nej nevystupovala.

6.9.2 Testovanie tlmiča rázom



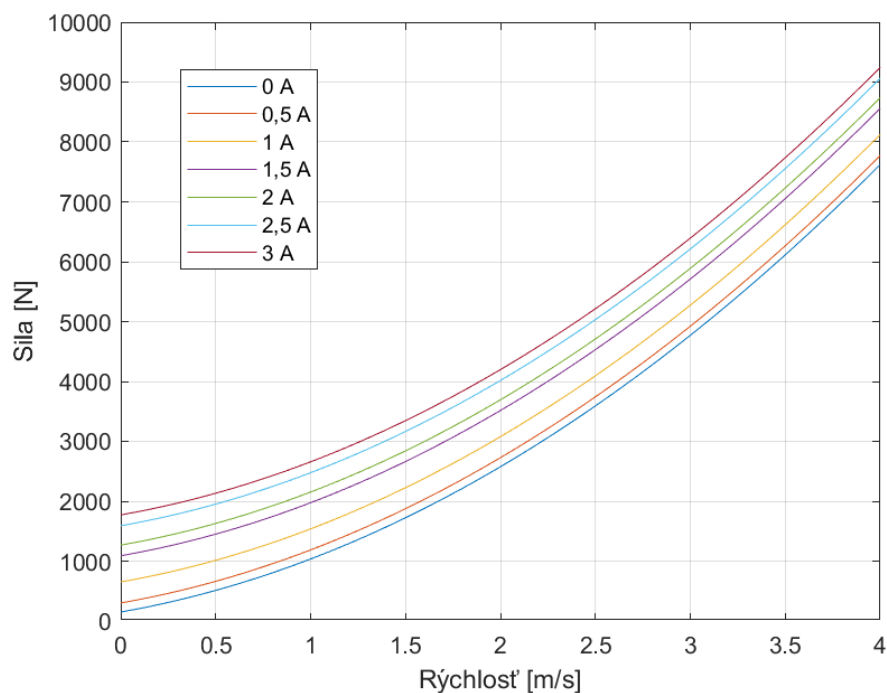
Obr. 6-21 Tlmič upnutý v pádovom testeri po dopade (vľavo), model testeru s tlmičom (vpravo).

Po vykonaní predbežných testov na pulzátore bol tlmič upnutý do pádového testeru vlastnej konštrukcie, ktorý má Odbor technickej diagnostiky k dispozícii. Tento tester využíva padajúce závažie s hmotnosťou od 30 kg do 50 kg. Závažie môže byť pri teste vypúšťané až z výšky 1,9 m čím umožňuje dosiahnuť dopadovú rýchlosť vyššiu než 6 m/s. Tlmič je upnutý na vonkajšej strane rámu testeru mimo oblasť dopadu, zaťaženie od dopadajúceho závažia je naň prenášané pákovým mechanizmom s Wattovým priamovodom. Prepákovanie je tu

využitie z dvoch dôvodov. Je možné vďaka nemu mať dlhú dráhu dopadu aj pri malej výške rámu a ďalej páka ponúka variabilitu pákového pomeru pre prenos zaťaženia na tlmič. Po dopade dochádza k spojeniu závažia s pákovým mechanizmom, takže sa celá zostava správa ako mechanizmus s tlmeným kmitaním odpruženého závažia.

S využitím skonštruovaného MR tlmiča bez pružiny bola metóda testovania s pádom závažia odladená. Na základe predbežných testov bolo zistené, že pri zaťažovaní rázom dochádza k prúdeniu MR kvapaliny do a z expanznej nádoby, čo sa prejavovalo veľkými osciláciami na zázname priebehu sily počas dopadu závažia. Tento problém bol vyriešený odstránením expanznej komory. Normálne u magnetoreologického tlmiča bez expanznej komory hrozí vznik vysokého tlaku vo vnútri pracovného priestoru vplyvom tepelnej rozťažnosti kvapaliny. Merania na pádovom testeri však trvajú v rádoch desiatín sekundy, kedy je tlmič namáhaný rázom. Po vykonaní experimentu musí byť zariadenie znovu pripravené k ďalšiemu testu, čo je bežne proces zaberajúci niekoľko minút. Počas používania tak nedochádza k žiadnemu významnému zahrievaniu kvapaliny v tlmiči a je možné expanznú komoru nahradiť jednoduchou zátkou.

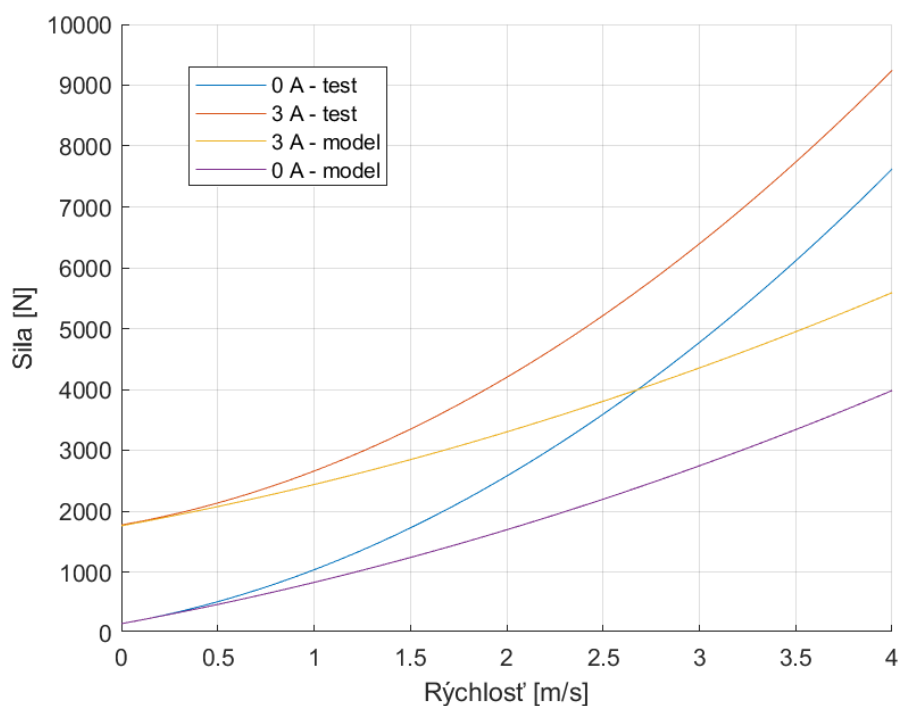
Prvé testy tlmiča pri páde závažia z plnej výšky rýchlosťou 6 m/s prebehli bez pružiny s využitím najmenšieho pákového pomeru, ktorý dopadovú rýchlosť 6 m/s preniesol na piestovú rýchlosť o veľkosti 4 m/s. Počas testu bolo vykonaných mnoho meraní pre výšky pádu 220 mm, 470 mm, 750 mm, 1 210 mm a 1 840 mm, ktoré odpovedajú dopadovým rýchlostiam 2,1 m/s, 3 m/s, 3,9 m/s, 4,9 m/s a 6 m/s. Pri každej výške pádu boli merania opakované pre napájanie piestu prúdom o hodnotách 0 A, 0,5 A, 1 A, 1,5 A, 2 A, 2,5 A a 3 A. Jedinou výnimkou bolo nevykonané meranie s vypnutým tlmičom pri výške pádu 1 840 mm, kedy hrozilo poškodenie tlmiča, kedy by piest narazil veľkou rýchlosťou do hornej úvrate.



Obr. 6-22 F-v charakteristika MR tlmiča zistená pomocou rázových testov.

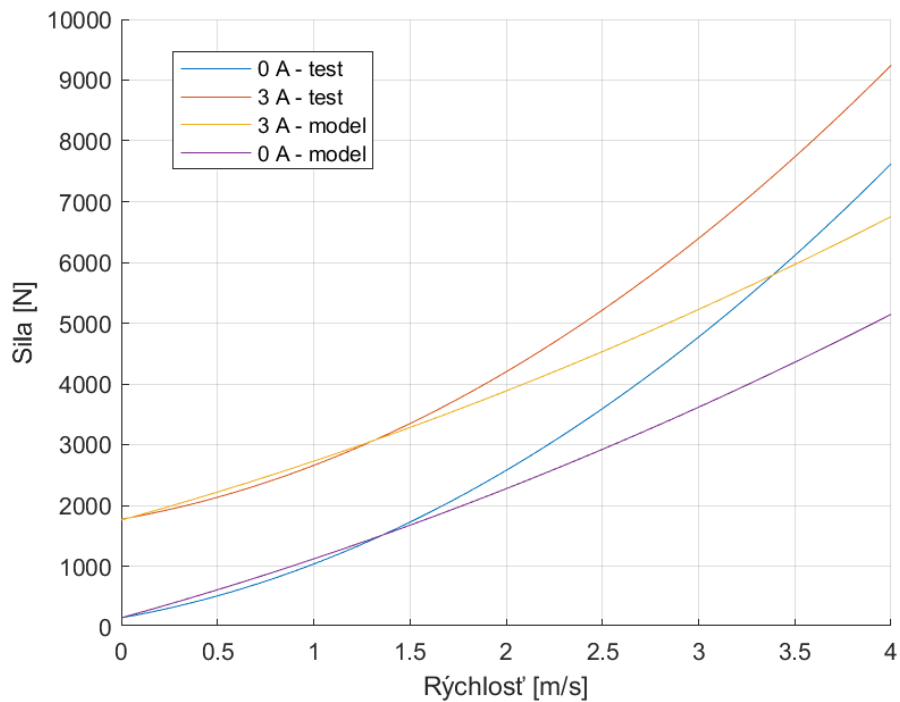
Počas testov boli sledované sila tlmiča, zdvih piestu, jeho rýchlosť a jeho zrýchlenie v čase. Vyhodnotením nameraných silových charakteristík a ich preložením funkciou založenou na modeli použitom k predikcii charakteristík rozšíreným o vplyv zrýchlenia boli vytvorené F-v charakteristiky tlmiča do rýchlosti 4 m/s. Zanesené sú do grafu na obrázku 6-22. Sila spôsobená medzou toku pri napájaní tu dosiahla 1 773 N, pri 4 m/s a pri napájaní 0 A tlmič dosiahol 7 550 N, pri vybudení prúdom 3 A bola maximálna sila 9 228 N.

6.10 Hodnotenie kľúčových parametrov



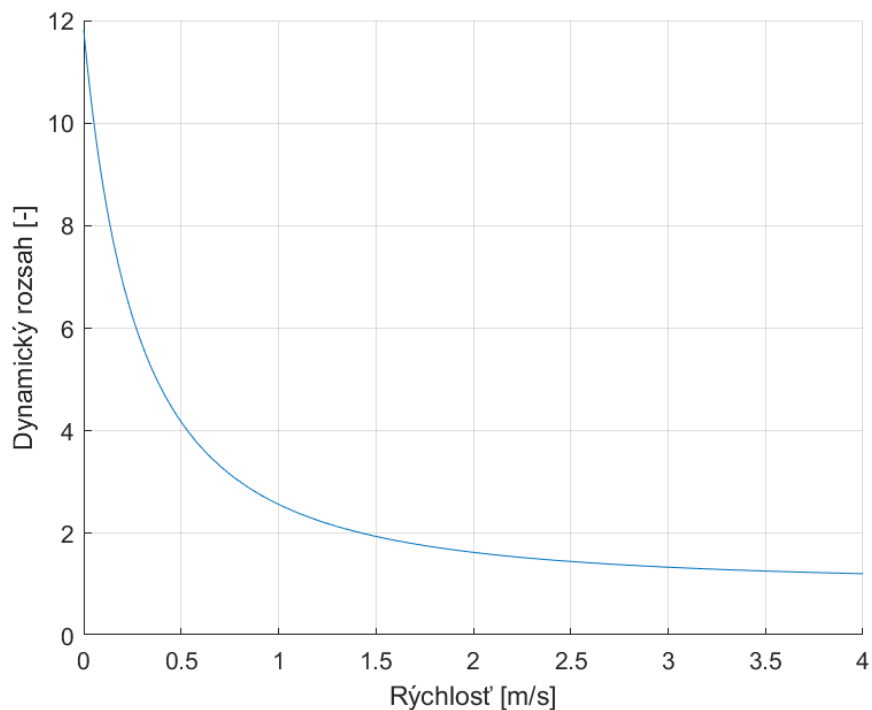
Obr. 6-23 Porovnanie F-v charakteristík predpokladaných modelom s charakteristikami určenými rázovým testom.

Porovnaním zistenej F-v charakteristiky s modelom, použitým na návrh tlmiča je zřejmé, že pri vysokých rázoch významne narastá sila tlmiča nad rámec predpokladu. Jedným z vplyvov, prečo sa tak deje, je zrýchlenie kvapaliny, ktoré pri pádovom teste o rýchlosti 6 m/s dosiahlo až $1\,757\text{ m/s}^2$. Počas testov bolo pozorované, že zrýchlenie piestu pri dopade závažia nebolo závislé na stave vybudenia tlmiča a rástlo lineárne s rýchlosťou dopadu. Preto bola lineárna funkcia zahrňujúca vplyv zrýchlenia pridaná do výpočtového modelu dvojštrbinového magnetoreologického tlmiča. Výsledné porovnanie rozšíreného modelu s dátami získanými meraním je zobrazené v grafe na obrázku 6-24. Pri rýchlosti 4 m/s upravený model udáva silu nevybudeného tlmiča 5 145 N a pri napájaní 3 A sila dosahuje 6 753 N. V prípade nevybudeného tlmiča je tak reálna F-v charakteristika 1,47 - násobná oproti modelu so zahrnutým zrýchlením, pri napájaní 3 A je reálna charakteristika 1,38 – násobná voči modelu.



Obr. 6-24 Porovnanie F-v charakteristík predpokladaných modelom rozšíreným o vplyv zrýchlenia MR kvapaliny s charakteristikami určenými rázovým testom.

Tento rozdiel medzi charakteristikami je podobný nezhode u prvého variantu tlmiča s piestom s jednou drážkou. ten tlmič bol však testovaný len do rýchlosti 2,5 m/s a jeho charakteristika bola extrapolovaná. Keďže už samotný model jednoštrbinového piestu predpovedal strmšie rastúcu charakteristiku než model dvojštrbinového, dá sa predpokladať, že testy s jednoštrbinovým piestom pri rýchlosti 4 m/s by priniesli výrazne vyššie sily.



Obr. 6-25 Závislosť dynamického rozsahu MR tlmiča na piestovej rýchlosti.

Pozitívnym výsledkom je, že si aj pri rýchlosti 4 m/s tlmič uchoval dostatočne rozsiahle ovládateľné pásmo, teda pásmo silových charakteristík dosiahnuteľných napájaním tlmiča v rozsahu 0 A – 3 A. Aj keď je na silových charakteristikách určených experimentom zreteľné zúženie tohto pásma, dá sa predpokladať, že tlmič bude možné ovládať zmenou napájania pri rýchlosti 5 m/s a viac. Dynamický rozsah tlmiča, grafický znázornený na obrázku 6-25 sa s narastajúcou rýchlosťou dramaticky znížil, no taký vývoj je očakávaný a je bežný aj u konštrukcií popisovaných v rešeršnej časti práce. Je to spôsobené narastajúcim podielom pasívnej zložky sily tlmiča, pretože tá závisí práve na rýchlosti prúdenia.

Napriek nezhodám medzi predikciou a výsledkom meraní je možné konštrukciu magnetoreologického tlmiča považovať za úspešnú. Navrhnutý tlmič je dostatočne robustný na to, aby vydržal zaťaženie spôsobené rýchlymi rázmi aj pri rýchlostiach nad 5 m/s. Pri vysokých piestových rýchlostiach je tlmič stále ovládateľný, spĺňa všetky rozmerové požiadavky, ktoré boli naň kladené, takže je možné ho nainštalovať do dostupných testovacích zariadení. Jeho konštrukcia bola cieľená na čo najväčšiu jednoduchosť výroby aj za cenu vyššej hmotnosti niektorých súčastí. Napriek tomu je s hmotnosťou približne 10,5 kg stále ľahko prenosný a jeho náročnosť na manipuláciu nie je vysoká. Súčasťou jeho konštrukcie je niekoľko súčastí, ktoré pochádzajú z predošlých tlmičov testovaných na Odbore technickej diagnostiky, čo ešte viac znížilo jeho nároky na cenu a výrobu. Na základe experimentov bolo zistené, že pri rázových testoch tlmič nepotrebuje pre svoju funkciu expanznú komoru, ktorú bolo vďaka jednoduchosti konštrukcie možné jednoducho odstrániť bez toho, aby funkcia tlmiča ostala negatívne ovplyvnená. Síce táto práca splnila väčšinu požiadaviek a cieľov, práca s tlmičom ešte nie je dokončená. Je potrebné vykonať merania s piestovou rýchlosťou 5 m/s a viac, aby sa overila perspektíva využiteľnosti magnetoreologických tlmičov pri tlení veľkých rázov. Tieto merania bude potrebné vykonať už so zabudovanou pružinou a riadiacou jednotkou s naprogramovaným chytrým algoritmom na ovládanie tlmiča.

7 ZÁVER

Táto práca sa zaoberala návrhom, výrobou a testovaním nového experimentálneho magnetoreologického tlmiča pre veľké rázy. Tento tlmič bol navrhovaný s ohľadom na zástavbu do testovacích zariadení zákazníka, ktorý ho bude využívať na výskum správania sa magnetoreologických kvapalín pri vysokých šmykových spádoch. Požiadavky na rýchlosť, pri ktorej dosiahnutí musí tlmič bezproblémovo fungovať a minimálnu silu, ktorú musí byť schopný vyvinúť vychádzajú z vlastností testera, vyvolávajúceho ráz pomocou pádu bremena.

Prvým krokom k návrhu tlmiča bol prieskum súčasných konštrukcií magnetoreologických tlmičov využívaných na tlmenie veľkých rázov. Boli analyzované ich prednosti aj nedostatky a limity ich testovania. Na základe analýzy jednotlivých riešení vysokorýchlostných tlmičov boli navrhnuté štyri koncepčné riešenia, ktoré sa líšili rozvrhnutím komponentov a materiálmi, z ktorých boli vytvorené.

Pomocou morfolologickej analýzy bol vybraný víťazný koncept číslo 3, ktorý pozostával z jednoplášťového magnetoreologického tlmiča s obojstrannou piestnicou a s piestom s jednou škrtiacou drážkou s magnetickým obvodom vytvoreným z reznej ocele 11SMn30 kvôli nenáročnej výrobe a nízkej cene. Na základe výstupov z rešerše modelovania magnetoreologických zariadení bol vytvorený analytický model navrhovaného tlmiča, do ktorého vstupovala geometria magnetoreologického ventilu piestu určená na základe magnetostatickej analýzy. Výsledkom analytického modelu bola predikcia F-v charakteristiky navrhovaného tlmiča, ktorá slúžila na dimenzovanie ostatných súčastí tlmiča. Tlmič bol následne zostavený a otestovaný pomocou hydraulického pulzátoru. Počas testu bolo zistené, že silová charakteristika voči predpokladu výrazne narastá, pričom tlmič pri napájaní maximálnym dovoleným prúdom dosahuje iba polovičnú medzu toku oproti predpokladu.

Bolo preto pristúpené k rekonštrukcii piestu tlmiča podľa konceptu číslo 4. Geometria piestu u tohto konceptu obsahovala dve paralelné drážky, ktorých použitím sa zníži rýchlosť prúdenia magnetoreologickej kvapaliny a obmedzia sa tak pasívne tlakové straty na pieste. Aby bolo možné do piestu inkorporovať až dve drážky, museli byť niektoré diely z predošlého variantu tlmiča upravené. To viedlo na zmenu vlastností magnetického obvodu, ktorý musel byť nanovo navrhnutý pomocou magnetostatickej analýzy, ktorej výstup bol použitý na návrh novej F-v charakteristiky tlmiča. Po určení finálnej geometrie boli nové diely piestu vyrobené, tlmič bol opäť zostavený a otestovaný na pulzátore. Výsledky meraní, ktoré prebehli až do piestovej rýchlosti 2,25 m/s ukázali schopnosť tlmiča vyvinúť v magnetoreologickej kvapaline medzu toku odpovedajúcu predpovedi a takisto silová charakteristika mala miernejší priebeh, než u predošlého variantu.

Ďalším krokom bolo testovanie tlmiča pomocou pádového testeru. Experimenty s týmto novým zariadením boli náročnejšie, pretože pomocou navrhnutého MR tlmiča bolo potrebné odladiť samotný tester a odstrániť jeho nedostatky. Počas testov bolo zistené, že expanzná komora, ktorá je tiež súčasťou konštrukcie tlmiča a zabezpečuje kompenzáciu objemovej rozťažnosti kvapaliny s teplotou negatívne ovplyvňuje silovú charakteristiku, zatiaľ čo jej prínos je pri experimentoch s pádovým testerom zanedbateľný, keďže tam nedochádza k výraznému ohrevu tlmiča. Preto bola zo zostavy tlmiča vypustená. Po jej odstránení boli vykonané testy tlmiča až do rýchlosti 4 m/s pri napájaní tlmiča rozpätím prúdov od 0 A do 3 A, čo je u dvojdrážkovej verzie piestu dovolené maximum. Okrem F-v charakteristiky bolo počas testu skúmané aj zrýchlenie MR kvapaliny v drážkach piestu. O vplyv nameraného zrýchlenia bol potom matematický model tlmiča rozšírený a porovnaný s experimentálne získanou charakteristikou. Nameraná charakteristika pri piestovej rýchlosti 4 m/s dosahovala v nevybudenom stave 47 % nárast sily oproti upravenému modelu a vo vybudenom stave 38 % navýšenie maximálnej sily oproti predpokladu. Napriek tomuto navýšeniu si tlmič uchoval ovládateľné pásmo silových charakteristík aj pri rýchlosti 4 m/s a predpokladá sa, že ovládateľnosť spôsobená magnetoreologickým efektom zostane zachovaná aj pri cieľovej rýchlosti 5 m/s, či ešte vyššej.

Na návrh magnetoreologického tlmiča, ktorým sa zaoberala táto práca budú nadväzovať testy tlmiča pri ešte vyšších rýchlostiach s chytrým ovládaním, ktoré pomôžu ozrejmiť možnosti využitia magnetoreologických technológií vo vysokorýchlostných aplikáciách.

8 VÝSLEDOK VÝSKUMU PODĽA RIV

Výsledkom je funkčná vzorka magnetoreologického tlmiča pre veľké rázy, určeného k výskumu správania sa MR kvapalín pri vysokých šmykových spádoch.

8.1 Druh výsledku

G – funkčná vzorka

8.2 Názov výsledku

Semiaktívne riadený magnetoreologický tlmič pre veľké rázy

8.3 Autori

Bc. Bajza R., doc. Ing. Klapka M. Ph.D., doc. Ing. Kubík M. Ph.D.

8.4 Technický popis

Magnetoreologický tlmič pre veľké rázy využíva semiaktívne riadenie na zmenu svojej charakteristiky. Je určený na zástavbu do pádového testovacieho zariadenia na tlmiče. Tlmič je napájaný elektrickým prúdom o veľkosti 0 A až 3 A s napätím 30 V. Vzdialenosť upínacích bodov je 887 mm, jeho zdvih je 190 mm. Súčasťou tlmiča je aj zabudovaná senzorika: snímač zdvihu, silomer a snímač tlaku.

8.5 Miesto uloženia výsledku

B1/111

9 ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

- [1] KCIUK, M., TURCZYN, R. Properties and application of magnetorheological fluids. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 2006, roč. 14, č. 18, s. 127–130 [cit. 2023-11-26]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/42107402_Properties_and_application_of_magnetorheological_fluids
- [2] ZIPSER, L., RICHTER, L., LANGE, U., *Magnetorheologic fluids for actuators*. In FRENCH, J. P. (ed.), *Sensors and actuators*, 1. vyd. Kodaň: Elsevier, 2001, s. 318–325. [cit. 2023-11-26]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/222587936_Magnetorheologic_fluids_for_actuators
- [3] BHISE, A. R, DESAI, R., YERRAWAR, N. R., MITRA, A., ARAKERIMATH, R. R. Comparison Between Passive And Semi-Active Suspension System Using Matlab/Simulink. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*. 2016, roč. 13, č. 4, s. 6 [cit. 2025-4-15]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/306019560_Comparison_Between_Passive_And_Semi-Active_Suspension_System_Using_MatlabSimulink
- [4] POYNOR, J.C., *Innovative Designs for Magneto-Rheological Dampers*. Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2001.
- [5] GOLDASZ, J., SAPIŃSKI, S., *Insight into Magnetorheological Shock Absorbers*. Switzerland: Springer International Publishing, 2015. ISBN 978-3-319-13233-7.
- [6] YANG, G., SPENCER, B.F., CARLSON, J.D., SAIN, M.K. Large-scale MR fluid dampers: modeling and dynamic performance considerations. *Engineering structures* [online]. 2002, 309-323 [cit. 2024-03-05]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029601000979>
- [7] KUBÍK, M. et al. Hydrodynamic response time of magnetorheological fluid in valve mode: model and experimental verification. *Smart materials and structures* [online]. 2021, [cit. 2024-04-29]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/355744277_Hydrodynamic_response_time_of_magnetorheological_fluid_in_valve_mode_model_and_experimental_verification
- [8] GONCALVES, F. D., AHMADIAN, M., CARLSON, J. D. Investigating the magnetorheological effect at high flow velocities. *Smart materials and structures* [online]. 2006, [cit. 2024-04-29]. Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0964-1726/15/1/036>
- [9] STRECKER, Z., JENIŠ, F., KUBÍK, M., MACHÁČEK, O., CHOI, S., Novel Approaches to the Design of an Ultra-Fast Magnetorheological Valve for Semi-Active Control. *Materials*. 2021, roč. 14, č. 10, s. 2500. ISSN 1996-1944.

- [10] AHMADIAN, M., NORRIS, J. A., Experimental analysis of magnetorheological dampers when subjected to impact and shock loading. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation* [online]. 2008, [cit. 2024-04-29]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1007570407000585>
- [11] OUYANG, Q., ZHENG, J., LI, Z., HU, M., WANG, J. Controllability analysis and testing of a novel magnetorheological absorber for field gun recoil. *Smart Materials and Structures* [online]. 2016, [cit. 2024-04-29]. Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0964-1726/25/11/115041>
- [12] DENG, L., SHUAISHUAI, S., SHIDA, J., ZHIXIONG, L., HAIPING, D., SHIWU, Z., WEIHUA, L., Development of a new magnetorheological impact damper with low velocity sensitivity. *Smart Materials and Structures* [online]. 2022, [cit. 2024-04-29]. Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-665X/ac864d>
- [13] MAO, M., HU, W., CHOI, Y., WERELEY, N., BROWNE, A., ULICNY, J., Experimental validation of a magnetorheological energy absorber design analysis. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2014, roč. 25, č. 3, s. 352 – 363.
- [14] SALEH, M., SEDAGHATI, R., BHAT, R., Design optimization of a bi-fold MR energy absorber subjected to impact loading for skid landing gear applications. *Smart Materials and Structures* [online]. 2019, [cit. 2024-04-29]. Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-665X/aadb33>
- [15] LE, Q., PARK, H., PHAM, H., HWANG, J., LUONG, Q., An Intelligent Control and a Model Predictive Control for a Single Landing Gear Equipped with a Magnetorheological Damper. *Aerospace* [online]. 2023, [cit. 2024-04-29]. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2226-4310/10/11/951>
- [16] MRF-122DG Magneto – Rheological Fluid. In: *Parker LORD* [online]. North Carolina, USA: Parker Hannifin Corp, 2024 [cit. 2025-03-05]. Dostupné z: [https://www.parker.com/content/dam/Parker-com/Literature/Assembly---Protection-Solutions-Division/Technical-Datasheets-\(TDS\)/Datasheet---MRF-122EG_MRFluid_DS7027.pdf](https://www.parker.com/content/dam/Parker-com/Literature/Assembly---Protection-Solutions-Division/Technical-Datasheets-(TDS)/Datasheet---MRF-122EG_MRFluid_DS7027.pdf)
- [17] Přesné trubky pro hydraulické válce. In: *Hydraulics* [online]. Slopné, Česká republika: Hydraulics s.r.o., 2025 [cit. 2025-05-05]. Dostupné z: <https://www.hydraulics.cz/24927-presne-trubky>
- [18] BUDYNAS, R. G., NISBETT, J. K., Shigleyho konstruování strojních součástí. Vysoké učení technické v Brně – Nakladatelství VUTIUM, 2023. ISBN 978-80-214-5471-2

- [19] SIQUAL 1203 Steel. *In: Sij Group*. 2023 [online]. Ravne na Koroskem, Slovinsko, SIJ Metal Ravne [cit. 2025-05-05]. Dostupné z: <https://steelselector.sij.si/steels/CK55.html>
- [20] Pružina 24810. *In: Sodemann*. 2025 [online]. Hinnerup, Dánsko, Sodemann Industrifjedre A/S. [cit. 2025-05-05]. Dostupné z: <https://www.sodemann-pruziny.cz/24810>
- [21] MEG40, *In: Megatron*. 2025 [online]. Praha, Česká republika, Megatron s.r.o. [cit. 2025-05-05]. Dostupné z: <https://www.megatron.cz/meg40>
- [22] P8AP, *In: HBM*, 2025 [online]. Praha, Česká republika, HBP měřicí technika s.r.o. [cit. 2025-05-05]. Dostupné z: <https://www.hbm.cz/produkty/kategorie/p8ap/>

10 ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK, SYMBOLOV A VELIČÍN

| Skratka | Význam |
|----------------|----------------------------|
| MR | Magnetoreologický |
| MKP | Metóda konečných prvkov |
| CAD | Computer aided design |
| FDM | Fused deposition modelling |
| MSP | Medzný stav pružnosti |

| Symbol / Označenie | Význam | Jednotka |
|---------------------------|---------------------|-----------------|
| F | Sila | N |
| v | Rýchlosť piestu | m/s |
| A | Plocha prierezu | mm ² |
| τ | Šmykové napätie | MPa |
| η | Dynamická viskozita | Pa·s |
| γ | Rýchlosť šmyku | 1/s |
| Δp | Tlakový rozdiel | Pa |
| I | Elektrický prúd | A |
| U | Napätie | V |
| σ | Napätie | MPa |
| d | Priemer | mm |
| l | Dĺžka | mm |
| k | Tuhosť pružiny | N/mm |

| | | |
|---------|----------------------|----------------|
| m | Hmotnosť | kg |
| a | Zrýchlenie | m/s^2 |
| μ_0 | Permeabilita vákua | H/m |
| B | Magnetická indukcia | T |
| H | Intenzita mag. poľa | kA/m |
| N | Počet závitov cievky | - |

11 ZOZNAM OBRÁZKOV A GRAFOV

| | |
|---|----|
| Obr. 2-1 PRISMA diagram selekcie literárnych zdrojov..... | 16 |
| Obr. 2-2 Schéma MR kvapaliny v nezmagnetizovanom stave (vľavo) a v zmagnetizovanom stave (vpravo) [1]..... | 17 |
| Obr. 2-3 Porovnanie závislosti šmykového napätia na šmykovom spáde pre Binghamov a Newtonov model [2]..... | 17 |
| Obr. 2-4 Schéma namáhania MR kvapaliny v squeeze móde [4]..... | 18 |
| Obr. 2-5 Schéma namáhania MR kvapaliny v shear móde [4]..... | 19 |
| Obr. 2-6 Schéma namáhania MR kvapaliny vo flow móde [4]..... | 19 |
| Obr. 2-7 Prierez modelom jednoplášťového MR tlmiča s jednostrannou piestnicou [4]..... | 20 |
| Obr. 2-8 Prierez schémou MR tlmiča s prechádzajúcou piestovou tyčou [4]..... | 21 |
| Obr. 2-9 Prierez schémou dvojplášťového MR tlmiča s jednostrannou piestovou tyčou [4]. | 22 |
| Obr. 2-10 Schéma toku MR kvapaliny dvoma paralelnými drážkami [6]..... | 23 |
| Obr. 2-11 Schéma znázorňujúca súčet zložiek sily magnetoreologického tlmiča [6]..... | 23 |
| Obr. 2-12 Grafické znázornenie prechodu MR kvapaliny z neaktívnej zóny kanála do aktívnej [8]..... | 26 |
| Obr. 2-13 Závislosť pomernej medze toku na čase, ktorý MR kvapalina strávi v magnetickom poli pre dve rôzne veľkosti prúdu napájajúceho elektromagnet reometra [7]..... | 26 |
| Obr. 2-14 Hydraulický pulzátor počas testu MR tlmiča [4]..... | 28 |
| Obr. 2-15 Spodná časť pádového zariadenia s upnutým MR tlmičom [10]..... | 29 |
| Obr. 2-16 Testovacia zostava s puškou kalibru 12,7 mm použitá na rázové testovanie MR tlmiča [4]..... | 29 |
| Obr. 2-17 Rez MR tlmičom [11]..... | 30 |
| Obr. 2-18 Testovacie zariadenie s MR tlmičom [11]..... | 30 |
| Obr. 2-19 Prierez dvoma MR tlmičmi konštrukcie Denga L. a spol. [12]..... | 31 |

| | |
|--|----|
| Obr. 2-20 F-v charakteristiky nekonvenčného (vľavo) a konvenčného (vpravo) MR tlmiča získané pomocou pádového testu [12]..... | 31 |
| Obr. 2-21 Jednoplášťový MR tlmič s obojstrannou piestnicou pre rýchle rázy [13]..... | 32 |
| Obr. 2-22 F-v charakteristika MR tlmiča určená experimentálne, CFD analýzou a analytickým modelom [13]..... | 32 |
| Obr. 2-23 Schéma bi-fold tlmiča [14]..... | 33 |
| Obr. 2-24 Podvozková noha lietadla s MR tlmičom [15]..... | 33 |
| Obr. 4-1 Hierarchická štruktúra cieľov a obmedzení..... | 37 |
| Obr. 4-2 Black box zostavy MR tlmiča..... | 38 |
| Obr. 4-3 Glassbox zostavy MR tlmiča..... | 38 |
| Obr. 4-4 Konceptný návrh jednoduchého tlmiča..... | 39 |
| Obr. 4-5 Konceptný návrh tlmiča s priechodnou piestnicou..... | 41 |
| Obr. 4-6 Návrh piestu s jednou cievkou (vľavo) a s viacerými cievkami (vpravo)..... | 42 |
| Obr. 4-7 Koncept piestu MR tlmiča s jednou štrbinou (vľavo) a s paralelnými štrbinami (vpravo)..... | 43 |
| Obr. 5-1 Geometria MR ventilu piestu MR tlmiča použitá na magnetostatickú analýzu..... | 45 |
| Obr. 5-2 Schéma zjednodušenej geometrie piestu s vyznačenými rozmermi..... | 46 |
| Obr. 5-3 Analýza magnetickej indukcie (vľavo) a magnetického indukčného toku magnetickým obvodom piestu (vpravo)..... | 47 |
| Obr. 5-4 Priebeh intenzity magnetického poľa pozdĺž drážky v pieste pri budení prúdom 7 A..... | 47 |
| Obr. 5-5 Závislosť medze toku kvapaliny MRF 122 EG s vyznačeným pracovným bodom, ktorý dosiahne tlmič pri napájaní 7 A prúdom - upravené [16]..... | 48 |
| Obr. 5-6 Predpoklad F – v charakteristiky navrhovaného MR tlmiča pre vybudovaný stav (modrá) a nevybudovaný stav (oranžová)..... | 49 |
| Obr. 5-7 Prierez prvým variantom piestu s vyznačenými rozmermi..... | 50 |
| Obr. 5-8 Prierez modelom MR tlmiča..... | 51 |

| | |
|--|----|
| Obr. 5-9 Tlmič v rozloženom stave..... | 52 |
| Obr. 5-10 Porovnanie modelovej a nameranej $F - v$ charakteristiky tlmiča pri napájaní 0 A (vľavo) a 7 A (vpravo)..... | 53 |
| Obr. 5-11 Geometria MR ventilu druhého variantu piestu MR tlmiča použitá na magnetostatickú analýzu..... | 54 |
| Obr. 5-12 Schéma zjednodušenej geometrie piestu s vyznačenými rozmermi..... | 55 |
| Obr. 5-12 Priebeh intenzity magnetického poľa pozdĺž drážky v pieste pri budení prúdom 3 A..... | 56 |
| Obr. 5-13 Závislosť medze toku kvapaliny MRF 122 EG s vyznačeným pracovným bodom, ktorý dosiahne druhý variant tlmiča pri napájaní 3 A prúdom - upravené [16]..... | 56 |
| Obr. 5-14 Predpoklad $F - v$ charakteristiky navrhovaného MR tlmiča pre vybudený stav (modrá) a nevybudený stav (červená)..... | 57 |
| Obr. 5-15 Prierez modelom druhého variantu piestu s dvoma štrbinami..... | 58 |
| Obr. 6-1 Rez plášťom tlmiča..... | 60 |
| Obr. 6-2 MKP analýza plášťa tlmiča..... | 60 |
| Obr. 6-3 Model piestu tlmiča (vľavo), rez piestom tlmiča (vpravo)..... | 61 |
| Obr. 6-4 MKP analýzou určené súčinitele bezpečnosti jadra, viečok a zostavy prstencov.... | 62 |
| Obr. 6-5 Dutá piestová tyč (hore) a plná piestová tyč (dole)..... | 63 |
| Obr. 6-6 Koniec plnej piestnice s nasadenou kĺbovou hlavicou a maticou..... | 63 |
| Obr. 6-7 Koniec dutej piestovej tyče s priechodkou..... | 64 |
| Obr. 6-8 Rez spodným (vľavo) a horným (vpravo) vekom..... | 65 |
| Obr. 6-9 MKP analýzou určené súčinitele bezpečnosti voči MSP pre veká tlmiča..... | 66 |
| Obr. 6-10 Model krycieho valca..... | 67 |
| Obr. 6-11 MKP analýza bezpečnosti valca voči MSP..... | 67 |
| Obr. 6-12 Rez spodnou časťou tlmiča..... | 68 |
| Obr. 6-13 Model opornej matice (vľavo) a oporného taniera (vpravo)..... | 68 |

| | |
|---|----|
| Obr. 6-14 MKP analýza bezpečnosti voči MSP oporného taniera pružiny (vľavo) a redukovaného napätia (jednotkou je MPa) u opornej matice (vpravo)..... | 69 |
| Obr. 6-15 Model expanznej komory spojenej s tlmičom pomocou šróbenia..... | 70 |
| Obr. 6-16 Silomer Megatron MEG40 [21] (vľavo), model silomeru pripevnený k tlmiču s nasadenou kĺbovou hlavicou..... | 71 |
| Obr. 6-17 Tlakomer HBM P8AP [22] (vľavo), model tlakomeru vsadeného do závitu v plášti tlmiča (vpravo)..... | 72 |
| Obr. 6-18 Predný (vľavo) a zadný (vpravo) pohľad na držiak so senzorom polohy..... | 72 |
| Obr. 6-19 Skonštruovaný MR tlmič počas testu na pulzátore..... | 73 |
| Obr. 6-20 F-v charakteristiky tlmiča získané meraním na pulzátore..... | 73 |
| Obr. 6-21 Tlmič upnutý v pádovom testeri po dopade (vľavo), model testeru s tlmičom (vpravo)..... | 74 |
| Obr. 6-22 F-v charakteristika MR tlmiča zistená pomocou rázových testov..... | 75 |
| Obr. 6-23 Porovnanie F-v charakteristík predpokladaných modelom s charakteristikami určenými rázovým testom..... | 76 |
| Obr. 6-24 Porovnanie F-v charakteristík predpokladaných modelom rozšíreným o vplyv zrýchlenia MR kvapaliny s charakteristikami určenými rázovým testom..... | 77 |
| Obr. 6-25 Závislosť dynamického rozsahu MR tlmiča na piestovej rýchlosti..... | 77 |

12 ZOZNAM TABULIEK

| | |
|---|----|
| Tab. 2-1 Vlastnosti vybraných materiálov súčastí magnetických obvodov – upravené [9]... | 27 |
| Tab. 3-1 Tabuľka cieľov, obmedzení a funkcií..... | 35 |
| Tab. 4-1 Parametre použité pre hodnotenie koncepčných návrhov..... | 37 |
| Tab. 4-2 Riešenia jednotlivých konštrukčných uzlov..... | 42 |
| Tab. 4-3 Prehľad jednotlivých konceptov..... | 43 |
| Tab. 4-4 Hodnotenie alternatívnych riešení..... | 44 |
| Tab. 5-1 Materiály pre magnetickú analýzu..... | 46 |
| Tab. 5-2 Hodnoty rozmerov piestu tmiča..... | 46 |
| Tab. 5-3 Materiály pre magnetickú analýzu druhého variantu..... | 55 |
| Tab. 5-4 Hodnoty rozmerov piestu tmiča..... | 55 |

13 ZOZNAM PRÍLOH

Príloha 1: Model F-v charakteristiky tlmiča

Príloha 2: Výkresová dokumentácia