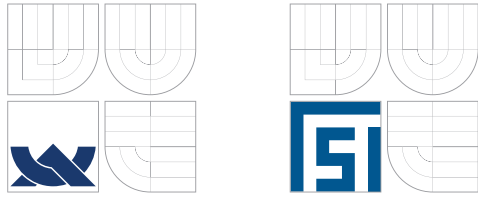


# Vysoké učení technické v Brně

Brno University of Technology



Fakulta strojního inženýrství

Ústav konstruování / Odbor konstruování strojů

Faculty of Mechanical Engineering

Institute of Machine and Industrial Design / Department of Machine Design

## Vývoj magnetoreologického tlumiče odpružení pro kosmonautiku

[Pojednání k státní doktorské zkoušce]

[Thesis Type]

Autor práce: **Ing. Michal Kubík**

Author

Vedoucí práce: **doc. Ing. Ivan Mazůrek, CSc.**

Supervisor

## **OBSAH**

---

<b>Obsah</b>	<b>1</b>
<b>1 Úvod</b>	<b>2</b>
<b>2 Vymezení řešené problematiky a předběžné cíle dizertační práce</b>	<b>5</b>
<b>3 Shrnutí současného stavu poznání</b>	<b>6</b>
3.1 Konstrukce odpružení užitečného nákladu v kosmickém nosiči	6
3.2 Limity MR technologie při konstrukci MR tlumiče	11
3.3 Simulační modely pro návrh MR ventilu	22
<b>4 Analýza, interpretace a zhodnocení poznatků získaných na základě rešerše</b>	<b>30</b>
<b>5 Vymezení cíle dizertační práce a návrh způsobu jejího řešení</b>	<b>33</b>
5.1 Cíle dizertační práce	33
5.2 Vědecká otázka	33
5.3 Pracovní hypotéza	33
5.4 Návrh způsobu řešení	34
5.5 Projekty	35
<b>6 Současný stav řešení dizertační práce</b>	<b>36</b>
<b>7 Závěr</b>	<b>39</b>
<b>8 Literatura</b>	<b>40</b>
<b>Seznam obrázků</b>	<b>42</b>

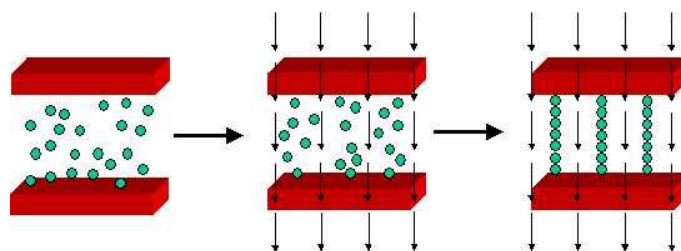
## 1 ÚVOD

Moderní systémy odpružení jsou dnes nedílnou součástí osobních automobilů, výškových budov či kosmických nosičů. Poskytují „pohodlí“ odpruženého nákladu či pasažérů a také podstatně zvyšují bezpečnost při kritických situacích. Tyto systémy lze rozdělit na:

- pasivní,
- semi-aktivní a
- aktivní.

Pasivní systémy jsou málo efektivní při tlumení vibrací a rázů. Nicméně tyto systémy jsou spolehlivé a nezávislé na dodávce energie [1]. Aktivní varianta naopak poskytuje podstatné zvýšení kvality odpružení proti variantě pasivní. Její nevýhoda spočívá ve vysokých nárocích na dodávku energie a hrozí zde nebezpečí destabilizace systému. Nejvhodnější se proto ukazuje kompromis mezi aktivním a pasivním systémem. Jedná se o variantu semi-aktivní. Tento systém kombinuje výhody obou variant. Poskytuje podstatné zvýšení efektivity systému odpružení a má malé nároky na dodávanou energii. Stejně jako pasivní systém funguje na principu disipování energie, avšak díky senzorům a vhodně zvolenému algoritmu řízení je možné jeho efektivitu mnohonásobně zvýšit díky velice rychlé změně koeficientu tlumení. Při výpadku proudu či poruše tento systém pracuje jako systém pasivní, což značně zvyšuje spolehlivost.

Progresivní semi-aktivní systém odpružení je realizován za pomoci magnetoreologické (MR) technologie. Tento systém využívá výjimečných vlastností MR kapaliny. MR kapalina je suspenze složená z nosné kapaliny (olej, voda atd.), železných částic nejčastěji o velikosti 1 až 5  $\mu\text{m}$  a adativ. Hmotnostní podíl částic je rozdílný podle typu MR kapaliny, ale pohybuje se okolo 70%. Tato kapalina vykazuje viskoplastické chování, kde pomocí magnetického pole lze měnit mez toku této kapaliny. To je způsobeno tím, že částice v MR kapalině se zřetězí ve směru magnetického pole (Obr. 1). Toto chování je často nazýváno magnetoviskozním jevem či MR efektem [2].

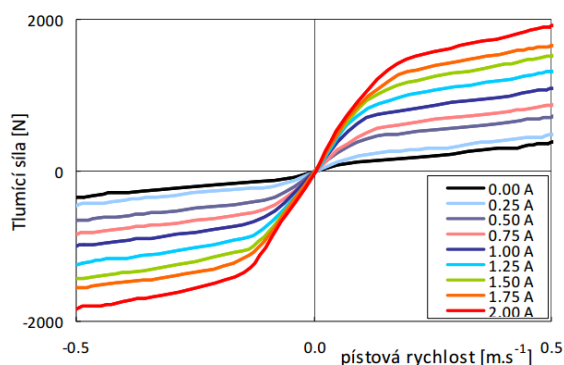


Obr. 1 MR efekt [3]

Tohoto jevu se využívá například při změně velikosti disipované energie ze systému v závislosti na intenzitě magnetického pole. Tento jev je konstrukčně realizován v magnetoreologických tlumičích či ventilech.

MR tlumič či ventil je složen z magnetického obvodu, cívky a MR kapaliny. Rozdíl mezi tlumičem a ventilem spočívá ve způsobu vyvození proudění MR kapaliny přes štěrby. Zásadní výhodou MR ventilu oproti jiným semi-aktivním tlumícím zařízením je jeho jednoduchost a z toho vyplývající vysoká spolehlivost. MR ventil navíc neobsahuje žádné pohyblivé díly, což zvyšuje i jeho životnost oproti jiným semi-aktivním zařízením [1]. Jedinečnost MR tlumiče spočívá v možnosti

změny tlumicí charakteristiky v závislosti na změně přivedeného proudu do cívek (Obr. 2).



Obr. 2 F-v charakteristika MR tlumiče (Audi TT) [3]

Z historického hlediska lze vývoj MR technologie a zařízení rozdělit do několika sekcí:

### 1. Objevení a počáteční vývoj MR kapaliny

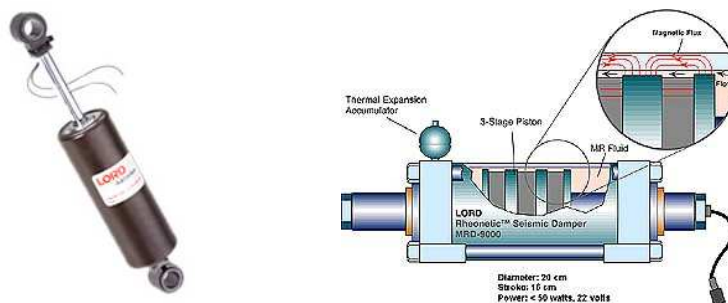
MR kapalina byla vyvinuta v 50. letech 20. století Rabinowem a Winslowem [4]. Zajímavostí je, že i v této době měla poměrně vysokou mez toku a dobrou sedimentační stabilitu a nic nebránilo rozvoji této technologie.

### 2. Znovuobjevení a komercializace MR kapalin

Až do 90. let 20. století byl vývoj MR technologie značně omezen. Začátkem 90. let 20. století se začaly intenzivně vyvíjet nové generace MR kapalin a MR zařízení [5], [6]. V tomto období výzkumné týmy řešily množství problémů související s životností MR kapaliny, sedimentační stabilitou či rychlostí regulace.

### 3. Vývoj progresivnějších adaptivních MR zařízení

Na přelomu 20. a 21. století se začala objevovat celá řada aplikací MR kapaliny v různorodých technických zařízeních. Například firma LORD vyvinula MR tlumiče pro odpružení sedadel nákladních vozů či autobusů [7]. Automobilky Cadillac či Ferrari začali nabízet MR tlumiče jako nadstandardní výbavu [3]. MR tlumiče se začali například používat i ve stavebnictví pro tlumení seizmické aktivity budov Obr. 3 vpravo [1] či lan mostů [8].



Obr. 3 MR zařízení [7], [1]

Nicméně schopnosti rychlé odezvy MR kapaliny [9] daleko převyšují schopnosti regulace tehdejších MR zařízení. Proto se výhradně používaly v adaptivním či pomalém semi-aktivním režimu.

#### **4. Snižování časové odezvy MR zařízení**

Problémem snižováním časové odezvy se začalo začátkem 21. století zabývat velké množství výzkumných týmů [10], [11]. V počátcích se hlavní vliv na celkovou časovou odezvu MR zařízení připisoval MR kapalině. Experimentálně bylo však ověřeno, že časová odezva samotné MR kapalina tvoří nepatrnou část celkové časové odezvy MR zařízení [9]. Postupem času se zjistily hlavní faktory, které limitují časovou odezvu MR zařízení. Významně k snížení časové odezvy přispěl Strecker [12]. Strecker v roce 2014 ve své práci [12] navrhl, že vhodnou volbou materiálu magnetického obvodu spolu s vhodným proudovým regulátorem lze podstatně snížit časovou odezvu MR zařízení na jednotky milisekund. S touto časovou odezvou je možné použít MR zařízení spolu se semi-aktivními algoritmy (řízení). To otevírá nové možnosti použití MR tlumičů pro širší spektrum aplikací, ale ovšem to také přináší určitá konstrukční a funkční omezení.

## **2 VYMEZENÍ ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY A PŘEDBĚŽNÉ CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE**

Předběžným cílem dizertační práce je vývoj magnetoreologického tlumiče odpružení pro kosmonautiku. Nové poznatky v oblasti regulace a volby materiálů magnetických obvodů v MR zařízeních umožňují použití MR tlumiče spolu se semi-aktivním řízením. Tyto poznatky a specifické požadavky na zařízení pro kosmický průmysl značně ovlivňují konstrukci MR tlumiče.

Předběžné dílčí cíle dizertační práce byly definovány následovně:

- sestavení konstrukčních limitů plynoucích při použití MR technologie,
- vytvoření návrhové metodiky složitého multidisciplinárního komponentu,
- vývoj simulačních modelů MR tlumiče (magnetický, reologický, dynamický či hydraulický),
- vývoj experimentálního zařízení (MR tlumiče),
- experimentální ověření sestavených simulačních modelů,
- experimentální ověření efektivity MR ventilu při tlumení vibrací a rázů.

### 3 SHRUTÍ SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

Rešeršní část pojednání k dizertační práci je rozdělena do čtyř tematických okruhů:

#### **Konstrukce odpružení užitečného nákladu v kosmickém nosiči**

Konstrukce odpružení pro kosmický průmysl má své specifické konstrukční a technologické požadavky. V této části rešerše budou rozebrány dosavadní konstrukční a materiálové řešení.

#### **Limity MR technologie při konstrukci MR tlumiče**

V této části pojednání budou prezentovány a diskutovány konstrukční a fyzikální limity při použití MR technologie, které je nutné respektovat v návrhové fázi MR tlumiče či ventilu. Tato kapitola vychází především z článků publikovaných prof. Carlsonem (h-index 25 dle Scopus).

#### **Simulační modely MR tlumiče**

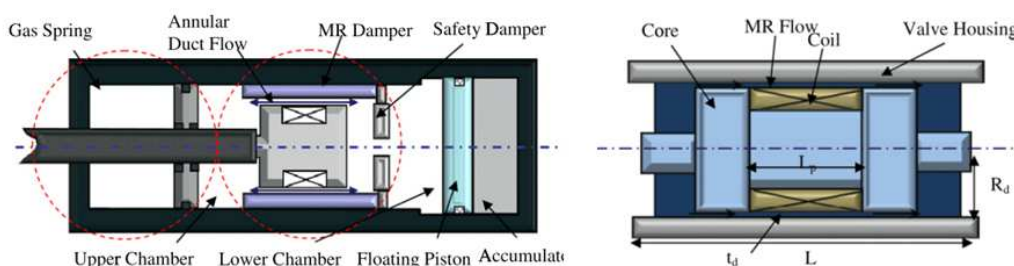
Při konstrukčním návrhu MR tlumiče je nutné brát v úvahu magnetické i hydraulické vlastnosti navrhované konstrukce. V této části shrnutí současného stavu poznání bude rozebráno, jak jednotliví autoři přistoupili k tvorbě modelů a jakých metod či algoritmů využili.

### 3.1 Konstrukce odpružení užitečného nákladu v kosmickém nosiči

[7] HA, Sung Hoon, Min-Sang SEONG a Seung-Bok CHOI. Design and vibration control of military vehicle suspension system using magnetorheological damper and disc spring [Impact factor časopisu: 2,44 ]

[19] ARIANE SPACE. Ariane 5 user's manual: Issue 5 revision 1

Jedno z často publikovaného konstrukčního uspořádání MR vzpěry pro použití v automobilním průmyslu je na obrázku Obr. 4. Vzpěra je složena z pružiny (vzduchové nebo vinuté) a MR tlumiče. Pro kompenzaci objemu MR kapaliny vlivem objemu pístnice je v tlumiči použit plavoucí píst. MR tlumič je složen z cívky, která je navinutá na píst, magnetického obvodu (nejčastěji z nízkouhlíkové oceli) a vhodné MR kapaliny. MR kapalina je od okolního prostředí oddělena pomocí pístnicových manžet. Zdvih automobilní vzpěry je řádově v desítkách milimetrů.



Obr. 4 Konstrukční uspořádání MR tlumiče [7]

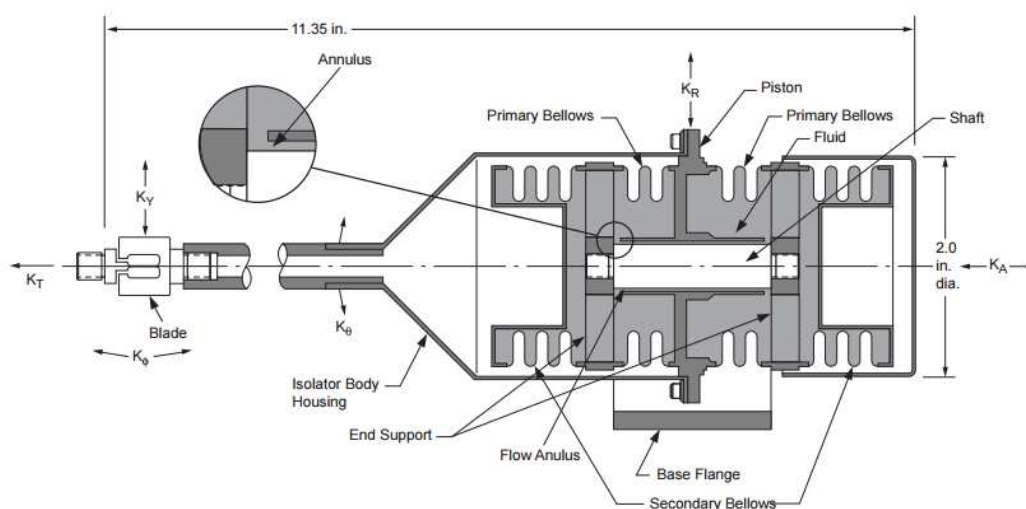
V manuálu [19] ke kosmickému nosiči Ariane 5 lze nalézt obecné požadavky na konstrukci, materiály či bezpečnost pro tento nosič. Prvním požadavkem je zajištění dokonalého utěsnění provozních kapalin od zbytku kosmického nosiče. V manuálu se uvádí, že teplota v kosmickém nosiči před startem je  $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ . Během letu může poklesnout, v závislosti na mnoha faktorech, až na  $11^{\circ}\text{C}$ . Během letu se také mění tlak v nosiči z hodnoty 1 bar na 0,05 baru po 90 sekundách letu. Z hlediska dimenzování se uvádí minimální bezpečnost vůči mezi kluzu 1,25 (pro vybrané komponenty z nosiče je bezpečnost různá). Zdvihy vzpěr jsou závislé na mnoha faktorech, ale pohybují se řadově v jednotkách milimetrů.

### Zhodnocení:

- Komerčně dostupné MR tlumiče mají MR kapalinu nejčastěji oddělenou od okolí pomocí pístnicových manžet. Tento typ utěsnění není vhodný pro použití pro kosmické aplikace, protože pro tyto zařízení je požadavek na hermetické utěsnění provozních kapalin. Pomocí manžet tento požadavek nelze splnit.
- MR tlumiče pro automobilní účely mají podstatně větší pracovní zdvihy a jsou dimenzovány na větší bezpečnost než je žádoucí pro kosmické aplikace.
- Tlumič je nutné navrhovat se zřetelem na teplotu a tlak okolí (v kosmickém nosiči) a také na dynamiku těchto dějů.

[14] CUNNINGHAM, David a John HARRELL. 1994. Advanced 1.5 Hz passive viscous isolation system. South Carolina: AIAA 35th SDM Conference

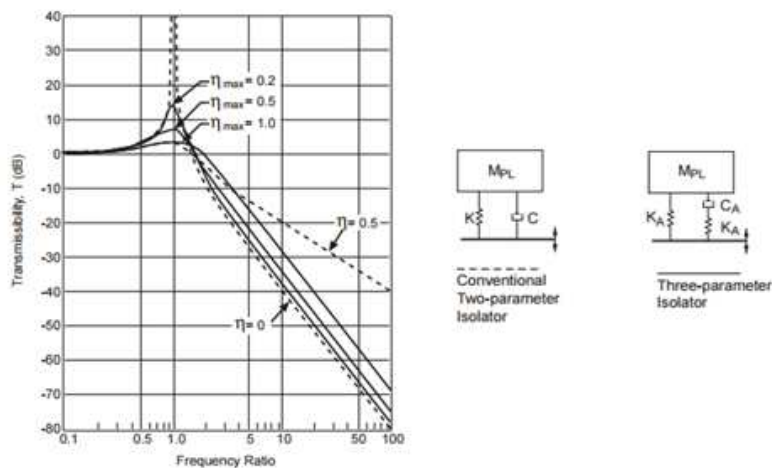
Článek pojednává o konstrukci pasivního viskozního tří-parametrického izolačního systému. Pojednává především o popisu konstrukce vzpěry do izolační plošiny HM-1800 RW firmy Honeywell.



Obr. 5 Pasivní viskozní tří-parametrická vzpěra [14]

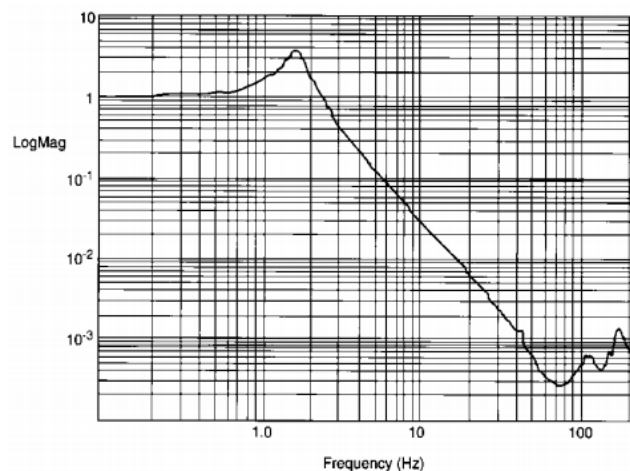
Systém je složen ze dvou vlnovců (bellows) a definované štěrbin (annulus) přes kterou proudí hydraulický olej. Vlnovce byly navrhovány na co největší radiální tuhost se zřetelem na stanovenou axiální tuhost. Proudění kapaliny přes štěrbin způsobí vznik tlumící síly vzpěry. Příruba (base flange) je připevněna k části

kosmického nosiče a píst je připojen adaptéru vynášeného nákladu. Navrhovaný izolační systém má snížit přenos vibračních sil a momentů na náklad v rozsahu od 2 do 300 Hz. Autoři diskutují fakt, že je nutné zabezpečit hermetické utěsnění oleje, aby nemohlo dojít ke kontaminaci zbytku nosiče. Pro utěsnění vlnovců bylo použito konstrukční expoxidové lepidlo. Autoři v článku poznamenávají, že: „*The most critical part of isolator is the damper...*“. Izolační systém byl vyroben z hliníkové slitiny 6061, niklových vlnovců a pístu z titanu. Vzpěra je naplněna silikonovým olejem. Celá hmotnost vzpěry byla 279 gramů. Velkou část článku autoři věnují tří-parametrickému systému, který je použit ve vzpěře. Jedná se paralelní zapojení pružiny k seriově zapojenému tlumiči a pružině (Obr. 6). Tuhost pružiny pod tlumičem  $k_A$  (objemová tuhost vlnovců) je mnohonásobně vyšší než tuhost pružiny  $k_B$  (axiální tuhost vlnovců). Výhodou tohoto systému oproti dvou-parametrickému (čárkovaná) je především v izolačních frekvencích (za rezonanční frekvencí). Dojde k výraznému odizolování vibrací při stejné velikosti tlumení (Obr. 6).



Obr. 6 Tří-parametrický izolační systém [14]

Autoři fyzicky realizovali a testovali pět kusů této vzpěry. Vzpěry byly testovány pomocí elektrického vibračního systému, který vytvářel sweep signál v rozsahu od 0.1 do 240 Hz. Výsledky z těchto experimentů na Obr. 7.



Obr. 7 Přenosová charakteristika navrhuté vzpěry [14]

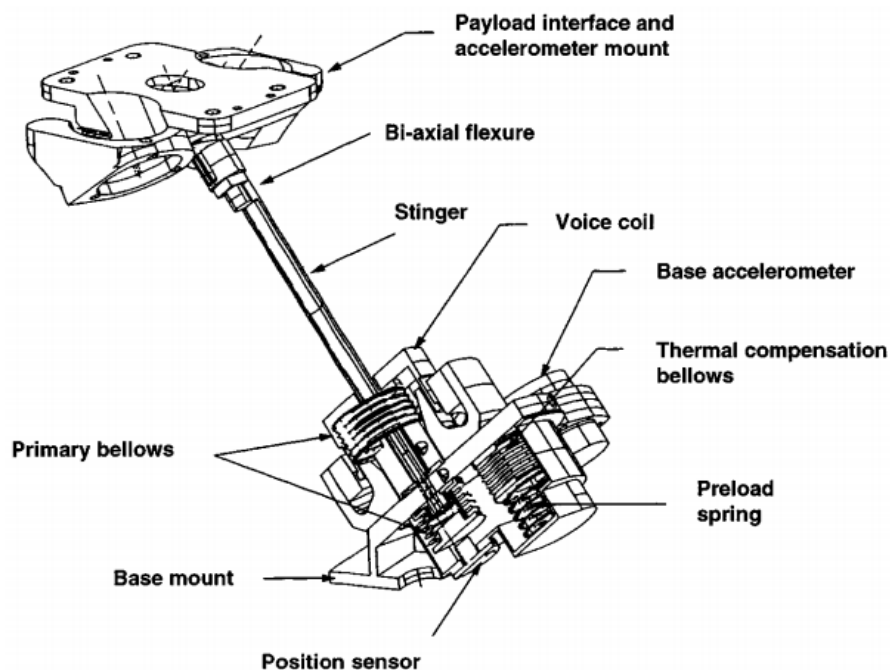
V závěru autoři konstatovali, že navrhnutá konstrukce zlepšuje izolační vlastnosti systému oproti známým variantám. Maximální redukce vibrací okolo 50 Hz byla 60 dB. Předchozí varianta dosahovala redukce pouze 30 dB. Zvýšení přenosu ve frekvencích vyšších než 100 Hz autoři připisují vlivu tuhosti vlnovců a samotné tlumicí kapaliny (mass effect). Během experimentů se autoři setkali s problémem tuhostí vlnovců. Tuhost vlnovců byla větší, než autoři predikovali a také vykazovala významné nelineární chování.

#### **Zhodnocení:**

- Velká část článku je věnována tři-parametrickému izolačnímu systému. Dle autorů tento systém podstatně zvýší efektivnost v izolačních frekvencích oproti dvou-parametrickému uspořádání. Dle experimentů je přínos na 50 Hz až 30 dB při stejné velikosti tlumení.
- Davis a Harrell uvádějí, že nekritičtější části při návrhu izolačního systému je vhodný návrh tlumiče.
- Autoři diskutují, že je nutné zajistit hermetické utěsnění tlumicí kapaliny, aby nemohlo dojít ke kontaminaci nákladu. Vlnovce byly hermeticky utěsněny pomocí konstrukčního epoxidového lepidla.
- Pro výrobu vzpěry bylo použito především hliníkové slitiny 6061 a titanu.

**[15] COBB, Richard G, Jeanne M SULLIVAN, Alok DAS, L Porter DAVIS, T Tupper HYDE, Torey DAVIS, Zahidul H RAHMAN a John T SPANOS.**  
Vibration isolation and suppression system for precision payloads in space

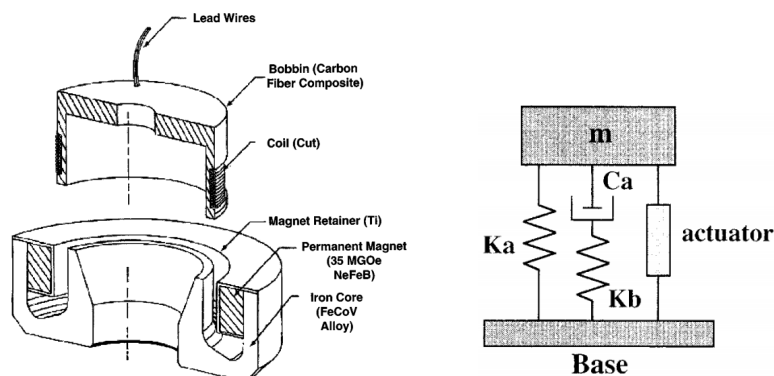
Článek navazuje a rozšiřuje poznatky z [14]. Jedná se o konstrukci tří-parametrické pasivní vzpěry, která je doplněna cívkovým aktuátorem (aktivní varianta). Autoři v úvodu článku diskutují, že bez vhodného izolačního systému může dojít k poškození citlivých senzorů či optiky vynášeného nákladu. Výhoda pasivního tří-parametrického systému je v izolačních frekvencích, ale v rezonační frekvenci stále dochází k značnému přenosu. Autoři se rozhodli tento problém řešit a to pomocí paralelního zapojení cívkového aktuátoru k publikovanému tří-parametrickému systému (Obr. 7). Vhodným řízením by mělo dojít k podstatnému snížení přenosu v oblasti rezonanční frekvence.



Obr. 8 Vzpěra s aktuátorem [15]

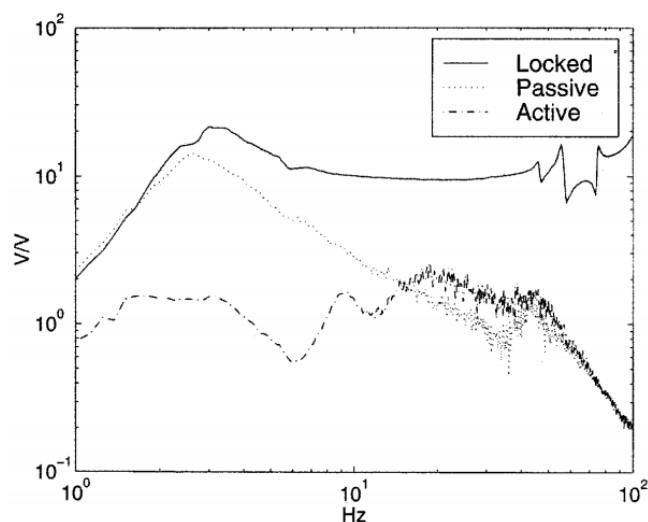
Konstrukce vzpěry je obdobná jak v [14], ale je doplněna o další vlnovec, který plní funkci kompenzatoru objemu kapaliny při zvýšení teploty. Sériově k vlnovci je připojena pružina, která způsobí vznik přetlaku v hydraulickém systému. Tímto způsobem se zabrání vzniku kavitace a pění oleje v systému.

Cívkový aktuátor pracuje na principu vzniku Lorentzovy síly. Je složen z jádra, na kterém je navinutá cívka a nosiče, ve kterém je umístěn neodymový magnet (Obr. 9). Jedná se tedy o aktivní systém. Pro řízení tohoto členu je nutné mít data o aktuálním zrychlení a pozici nosiče a nákladu.



Obr. 9 Cívkový aktuátor [15]

Autoři uvádějí, že vzpěra byla fyzicky realizována a testována. Výsledky testů (Obr. 10) pro variantu, kdy byl náklad připojen přímo k nosiči (plná čára), kdy byl použit pasivní systém (tečkovaná) a kdy byl použit aktivní systém (čerchovaná).



Obr. 10 Porovnání režimů [15]

Autoři v článku uvádějí, že použitím aktivního systému dojde k podstatnému snížení přenosu ve frekvencích nižších než 10 Hz a k malému zhoršení v oblasti do 100 Hz oproti pasivní variantě.

#### Zhodnocení:

- Cobb a kolektiv publikovali článek, který koncepčně navazuje na práci Davise [14]. Jedná se o koncepci, kde využili pro vyvození proudění přes tlumící šterbinu dva vlnovce. Cobb vzpěru doplnil o další vlnovec, který je stlačován pružinou. Jedná se o ekvivalent expanzní nádoby a pružina vytváří přetlak v hydraulickém systému. Autoři v článku ovšem neuvádějí, jakým způsobem „expanzní nádobku“ oddělili o tlakových pulzací, protože malá tuhost pružiny pod vlnovcem by zásadně ovlivnila funkci tlumiče.
- Pro snížení přenosu v rezonanční frekvenci autoři navrhli systém založený na cívkovém aktuátoru. V článku není diskutováno do jakých frekvencí je možné cívkový aktuátor použít (časová odezva magnetického pole na řídicí proud).

### 3.2 Limity MR technologie při konstrukci MR tlumiče

3.2

[17] CARLSON, J.David a Mark R JOLLY. MR fluid, foam and elastomer device. [Impact factor časopisu: 1,82 ]

Článek se zabývá obecným popisem reologických a magnetických vlastností magnetoreologických kapalin, gelů či elastomerů. Je však převážně zaměřen na MR kapaliny. Z reologického pohledu je uvedeno, že MR kapalina mimo magnetické pole vykazuje chování podobné Newtonovské kapalině. Chování MR kapaliny v magnetickém poli lze popsat Binghamovým model s nastavitelnou mezí toku.

$$\tau = \tau_y(H) \cdot \text{sgn}(\dot{\gamma}) + \eta \cdot \dot{\gamma}$$

V článku jsou publikovány typické reologické a magnetické parametry MR kapalin.

Property	Typical value
Maximum yield strength, $\tau_{y(\text{field})}$	50–100 kPa
Maximum field	~ 250 kA/m
Plastic viscosity, $\eta_p$	0.1–1.0 Pa s
Operable temperature range	–40 to 150°C (limited by carrier fluid)
Contaminants	unaffected by most impurities
Response time	< milliseconds
Density	3–4 g/cm <sup>3</sup>
$\eta_p/\tau_{y(\text{field})}^2$	$10^{-10}$ – $10^{-11}$ s/Pa
Maximum energy density	0.1 J/cm <sup>3</sup>
Power supply (typical)	2–25 V @ 1–2 A (2–50 watts)

Obr. 11 Reologické a magnetické vlastnosti MR kapalin [17]

V článku [17] je uvedeno, že vlastnosti MR kapalin jsou málo citlivé na kontaminaci cizími částicemi, které mohou vzniknout během provozu či montáži. Z tabulky lze vyčíst, že MR kapaliny mohou pracovat jen v omezeném rozmezí teplot od -40°C do 150°C a je to především limitováno typem nosné kapaliny. Nosná kapalina je volena na základě požadovaných reologických, tribologických vlastností a teplotní stability. Typicky se používá minerální, silikonový či syntetický olej nebo voda. Autoři uvádějí, že viskozita MR kapaliny mimo magnetické pole se pohybuje v rozmezí 0,1 až 1 Pa.s při 25°C. Carlson a kol. uvádějí, že z magnetického hlediska MR kapalina má 5 až 9 krát vyšší relativní permeabilitu než vakuum. Testované MR kapaliny vykazují malé až zanedbatelné magnetické hysterezní chování.

Autoři publikovali, že při návrhu MR zařízení je nutné respektovat minimální objem MR kapaliny v magnetickém poli, aby bylo možné dosáhnout požadovaného dynamického rozsahu (podíl síly v aktivovaném a neaktivovaném stavu).

$$V \geq \kappa \left( \frac{\eta_p}{\tau_{y(\text{field})}^2} \right) \left( \frac{F_{\text{on}}}{F_{\text{off}}} \right) F_{\text{on}} \cdot S$$

Tento objem je závislý na konstantě zahrnující vliv pracovního módu  $\chi = 1$  (smykový mód) a módu  $\chi = 2$  (ventilový mód),  $\eta_p$  viskozitě mimo magnetické pole [Pa.s],  $\tau_y$  dynamické mezi toku [Pa],  $F_{\text{off}}$  síla v neaktivovaném stavu [N],  $F_{\text{on}}$  síla v aktivovaném stavu [N] a  $S$  rychlost proudění [m/s].

#### Zhodnocení:

- Autoři uvádějí, že MR kapalina mimo magnetické pole vykazuje reologické chování podobné Newtonovské kapalině. Toto tvrzení autoři bohužel nemají nějakým způsobem citováno či experimentálně stanoveno.
- Podle článku vlastnosti MR kapalin nejsou výrazně ovlivněny příměsemi, které mohou vzniknout během provozu či montáži.
- Použití MR kapaliny je limitováno rozmezím pracovních teplot. Autoři uvádějí rozmezí od -40°C do 150°C. Toto rozmezí je především dáno vlastnostmi nosné kapaliny.
- MR kapalina podle Carlsona a kol. vykazuje zanedbatelné magnetické hysterezní chování. Toto tvrzení nemají v článku podloženo citací či experimentem.
- V článku je publikováno, že existuje konstrukční limit v podobě minimálního objemu MR kapaliny v magnetickém poli (velikosti magnetické štěrbin). Minimální objem je dán především způsobem zatěžování, reologickými

vlastnostmi, rychlostí proudění MR kapaliny a velikostí tlumících sil (aktivovaný a neaktivovaný stav).

[2] JOLLY, M. R., J. W. BENDER a J. D. CARLSON. Properties and Applications of Commercial Magnetorheological Fluids [Impact factor časopisu: 2,17 ]

Článek popisuje vlastnosti a aplikaci komerčně dostupných MR kapalin (především od americké firmy LORD). Úvod článku reflektuje data, která byla prezentována v předchozím článku (Bingham model, teplotní limit, minimální objem MR kapaliny). Autoři avšak rozšiřují poznatky o minimálním množství MR kapaliny v magnetickém poli pro ventilový mód. Je zde definována minimální tloušťka štěrby, která vychází ze vztahu uvedeného v článku [17]:

$$g = \sqrt{\frac{12}{c \cdot w} \cdot \left(\frac{\eta}{\tau}\right) \cdot \lambda \cdot Q}$$

kde  $\lambda$  je dynamický rozsah [1],  $\eta$  viskozita v neaktivovaném stavu [Pa.s],  $\tau$  mez toku [Pa],  $Q$  objemový průtok [m<sup>3</sup>],  $w$  je střední průměr štěrby [m],  $c$  je funkce rychlostního profilu a nabývá hodnot od 2 do 3.

Autoři v článku zavádějí mechanickou a elektrickou energetickou hustotu v MR kapalině.

$$\widehat{W}_m = \tau \cdot \frac{S}{g} \qquad \widehat{W}_e = \frac{B \cdot H}{2 \cdot t_c}$$

kde  $\widehat{W}_m$  je mechanická energetická hustota a  $\widehat{W}_e$  je elektrická energetická hustota.  $S$  je rychlost proudění MR kapaliny v magnetickém poli [m/s],  $g$  velikost štěrby [m],  $B$  magnetická indukce [T],  $H$  intenzita magnetického pole [A/m] a  $t_c$  je čas pro naběhnutí magnetického pole ve štěrbině [s]. Na základě energetických hustot autoři definovali efektivnost kapaliny.

$$\alpha = \frac{\widehat{W}_m}{\widehat{W}_e} = 2 \cdot \left( t_c \cdot \frac{S}{g} \right) \cdot \frac{\tau}{B \cdot H}$$

Na základě uvedených vztahů autoři v článku uvedli vztahy pro volbu typu MR kapaliny pro různé aplikace.

### Maximalizování dynamického rozsahu zařízení

Maximalizováním vypočtené hodnoty ze vztahu se maximalizuje dynamický rozsah a minimalizuje velikost MR zařízení ve kterém bude tento typ kapaliny použit.

$$F_1 = \frac{\tau^2}{\eta}$$

**Minimalizování hmotnosti**

Vychází z předchozího vztahu a je penalizován hustotou použité MR kapaliny.

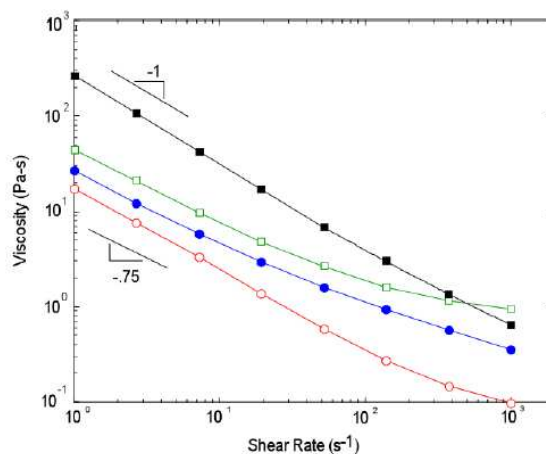
$$F_2 = \frac{\tau^2}{\eta \cdot \rho}$$

**Minimalizování energetické náročnosti**

Při maximalizování uvedeného vztahu se snižuje energetická náročnost při stejném mechanickém výkonu.

$$F_3 = \frac{\tau}{B \cdot H}$$

Z reologického hlediska se ukazuje, že MR kapalina vykazuje smykově řídnoucí chování s power law exponentem v rozmezí od  $-0,75$  do  $-1$  (Obr. 12). Ukazuje se, že smykové řídnutí je dáno především vlastnostmi nosné kapaliny a přísad upravují některé vlastnosti MR kapalin (sedimentaci či kluzné vlastnosti).



Obr. 12 Reologické vlastnosti MR kapalin [2]

Dalším důležitým parametrem je abrazivní chování MR kapaliny. Jak je v článku uvedeno tak kritické jsou kluzné části přímo vystavené MR kapalině. Součinitel tření pro různé MR kapaliny pro třecí dvojice nylon-ocel se pohybuje v rozmezí od 0,04 do 0,11. Dalším prezentovaným problémem je životnost těsnících manžet u MR zařízení. Klíčem k dlouhé životnosti je podle autorů vhodná volba materiálů těsnících manžet (nejvhodnější se ukazují materiály nitrile ruber NBR a Fluoroelastomery FKM, zcela nevhodné jsou silikonové materiály) a zvolení vhodných přísad do MR kapaliny (především přísady snižující opotřebení). Autoři uvádějí, že lze dosáhnout 5 až 10 milionů cyklů bez poruchy těsnění.

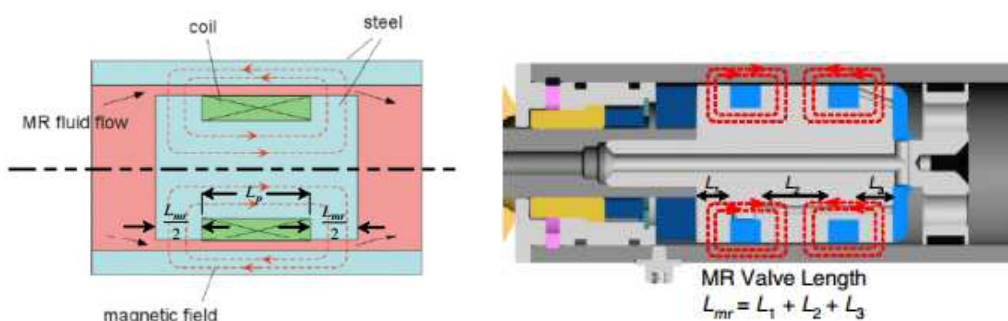
V práci je uvedeno, že limitujícím parametrem je také sedimentační stabilita MR kapaliny. Sedimentační stabilita MR kapaliny je pro některé aplikace významná. Je dána především viskozitou nosné kapaliny (čím vyšší viskozita tím kapalina sedimentuje pomaleji) a přísadami.

**Zhodnocení:**

- Autoři rozšiřují znalosti uvedené v předchozím článku o minimálním objemu kapaliny a zavádějí pojem minimální velikosti magnetické štěrby. Minimální objem štěrby je závislý na viskozitě kapaliny v neaktivovaném stavu. Tato viskozita je závislá na teplotě. Autoři bohužel neuvádějí pro jakou teplotu MR kapaliny se má stanovit viskozita a tedy i minimální objem MR kapaliny. Nejvyšší pracovní či průměrnou? Rozdíl může být významný.
- Jolly a kol. v článku definovali pojem efektivnost MR kapaliny. Na základě uvedených rovnic definovali vztahy pro volbu MR kapaliny maximalizující dynamický rozsah, minimalizující hmotnost či minimalizují energetickou náročnost.
- Autoři uvádějí, že některé MR kapaliny vykazují smykové řídnutí s power law exponentem od -0,75 do -1.
- MR kapalina vykazuje abrazivní chování. V článku je uveden součinitel tření pro různé materiálové dvojice, když MR kapalina byla jako mazivo. Autoři uvádějí součinitel tření v rozsahu od 0,04 do 0,11.
- Jolly a kol. uvádějí, že vhodný materiál těsnící manžety v MR tlumičích je Nitrile rubber (NBR) nebo Fluoroelastomery (FKM). Nevhodné je použití silikonových materiálů.
- V článku je popsáno, že lze dosáhnout 5 až 10 milionů cyklů bez poruchy těsnění. Bohužel neuvádějí metodiku testování (například zdvih či teplotu). V článku není uveden žádný odkaz na článek, který by toto tvrzení potvrdil či rozšiřoval.

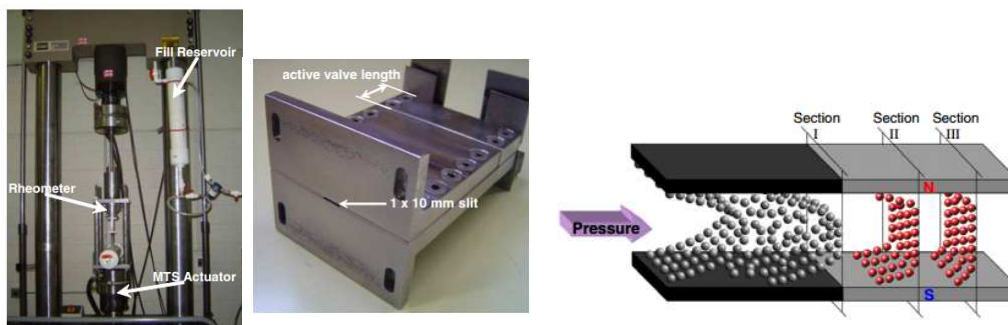
[9] GONCALVES, Fernando D, Mehdi AHMADIAN a J D CARLSON. Investigating the magnetorheological effect at high flow velocities. [Impact factor časopisu: 2,45 ]

Popisovaný článek se zabývá výzkumem chování MR kapalin při vysokých rychlostech proudění. V úvodní části článku autoři popisují, které parametry je nutné uvažovat při návrhu MR ventilu. Autoři uvádějí, že dominantní efekt na sílu v neaktivovaném stavu má velikost magnetické štěrby. Aktivovaný stav je podstatně méně závislý na velikosti štěrby. Goncalves v článku uvádí: „*The gap size often becomes a key design element.*“. Zvětšením velikosti magnetické štěrby poklesne síla v neaktivovaném stavu a také síla v aktivovaném stavu. Pokles síly v aktivovaném stavu se dá podle Goncalvese redukovat použitím více magnetických sekcí (Obr. 13 vpravo).



Obr. 13 Různé koncepce MR ventilu [9]

Autoři v článku popisují vývoj reometru založeného na principu MR ventilu, který je schopen podrobit kapalinu vysokému smykovému zatížení (štěrbina 1x10 mm). Konstrukce reometru byla uzpůsobena pro dvě délky MR ventilu (6,35 a 25,4 mm). Maximální dosažený smykový spád byl  $2,5 \cdot 10^5 \text{ s}^{-1}$ . V článku je zaveden pojem „fluid dwell time“. Je definovaný jako čas, který částice MR kapaliny stráví v magnetickém poli. Autoři pracovali s hypotézou, že částicím zabere určitý čas, než proběhne změna rychlostního profilu v magnetickém poli (než se zcela projeví vliv mez toku MR kapaliny).



Obr. 14 Reologické a magnetické vlastnosti MR kapalin [9]

K experimentům byla použita MR kapalina MRF-132LD od firmy LORD. Z experimentů je patrné, že mez toku MR kapaliny je závislá na čase stráveném v magnetickém poli. Autoři definovali časovou odezvu MR kapaliny jako čas potřebný k dosažení 63,2 % očekávané hodnoty meze toku. Na Obr. 15 je možné sledovat výrazný pokles meze kluzu při době průtoku menší než 2ms.

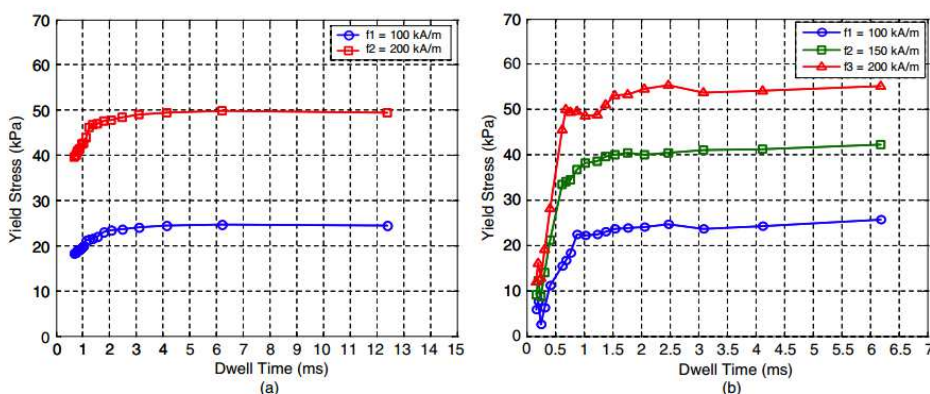


Figure 15. Yield stress as a function of dwell time: (a) 25.4 mm MR valve; (b) 6.35 mm MR valve.

Obr. 15 Mez kluzu v závislosti na dwell time [9]

Goncalves a kol. odhadli, že časová odezva MR kapaliny se pohybuje v rozmezí od 0,45 do 0,6 ms.

### Zhodnocení:

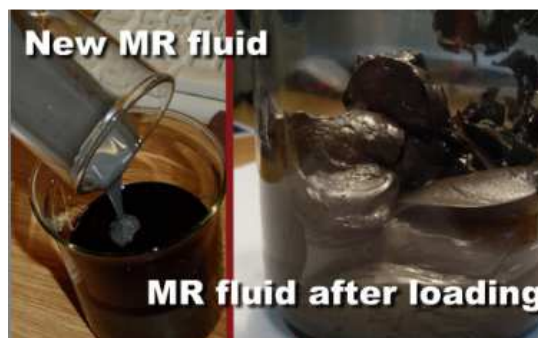
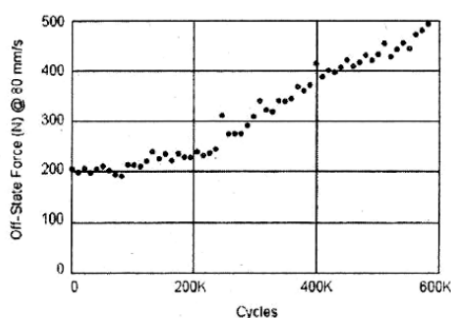
- V článku autoři uvedli, že dominantní efekt na konstrukci MR tlumiče má volba velikosti magnetické štěrby.
- Z článku je patrné, že pro správnou funkci MR ventilu je nutné, aby částice strávila minimálně 0,45 až 0,6 ms v magnetickém poli (časová odezva MR

kapaliny). V opačném případě nedojde k požadovanému navýšení meze toku. Bohužel v článku není uvedeno, jaký vliv má typ MR kapaliny (hmotnostní podíl železných částic) na časovou odezvu MR kapaliny. Popřípadě jaký vliv má velikost částic.

[25] CARLSON, J. D. What Makes a Good MR Fluid? [Impact factor časopisu: 2,17]

[26] ROUPEC, J.; MAZŮREK, I.: Stability of magnetorheological effect during long term operation [Impact factor časopisu: 1,82]

V člancích je zmíněn problém MR kapalin nazvaný „*In-use-thickening*“. V MR zařízeních dochází k navyšování síly v neaktivovaném stavu s počtem zatěžovacích cyklů (Obr. 16). Carlson uvedl, že vlivem interakce částic při proudění MR kapaliny se z oxidické vrstvy odlupují vrstvy nanočástic. Tyto částice způsobí změnu konzistence a MR kapalina „*zhoustne*“. Roupec uvádí, že „*zhoustnutí*“ je způsobeno navýšením počáteční meze toku ne viskozity.



Obr. 16 Provozní houstnutí [25,26]

Roupec uvedl, že vlivem oxidace částic dochází k degradaci magnetických vlastností a poté MR efektu. Dojde k navýšení koerzivního pole a magnetické remanence. Nicméně pokles MR efektu má zanedbatelný vliv oproti provoznímu houstnutí. Roupec dále uvedl, že teplota MR kapaliny má vliv na viskozitu, ale nemá výrazný vliv na mez toku MR kapaliny. Carlson v článku uvedl vztah pro životnost MR kapaliny, která vychází z efektu *In-use-thickening*. Zavedl pojem LDE (lifetime dissipation energy). LDE je celková mechanická energie přeměněná na teplo k jednotce objemu MR kapaliny za dobu provozu. Z tohoto vztahu je možné vidět, že při konstrukci MR zařízení je nutné brát v úvahu i množství kapaliny.

$$LDE = \frac{1}{V} \cdot \int_0^{life} P \cdot dt$$

Ve vztahu  $V$  je objem kapaliny v MR zařízení [ $m^3$ ],  $P$  je mechanický výkon [ $W$ ], který je přeměněn na teplo. Dle Carlsonových experimentů, dnešní MR kapaliny dosahují životnosti okolo  $LDE = 10^7 \text{ J/cm}^3$ .

Carlson rovněž uvádí, že pro napájení cívek MR tlumiče je nutné použít stabilizovaný zdroj proudu nikoli stabilizovaný zdroj napětí. Vlivem teploty se mění odpor cívky a došlo by k poklesu velikosti magnetického pole.

**Zhodnocení:**

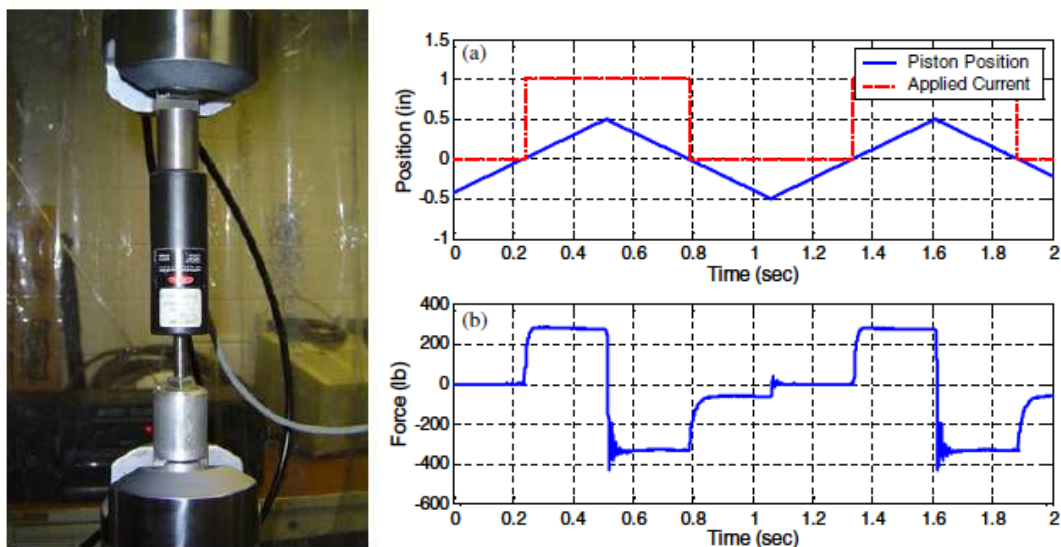
- Z článku je patrné, že MR kapalina má omezenou životnost, protože vykazuje zvyšování konzistence s počtem zatěžování. To způsobuje snížení efektivity MR zařízení. Carlson zavedl pojem LDE, kde významnou roli hraje objem MR kapaliny. Tedy při konstrukci MR zařízení je nutné respektovat minimální objem MR kapaliny. Bohužel v parametru LDE není zahrnuta teplota, která z největší pravděpodobností bude mít také vliv na degradaci MRF.
- Roupec uvádí, že degradace MR efektu (magnetických vlastností) během provozu má zanedbatelný vliv oproti provoznímu houstnutí.
- Teplota MR kapaliny nemá výrazný vliv na mez toku MR kapaliny. Tuto skutečnost potvrzuje Roupec i Carlson.
- Carlson rovněž uvádí, že cívky MR ventilů je nutné napájet stabilizovaným zdrojem proudu nikoli napětí.

**[10] KOO, Jeong-Hoi, Fernando D GONCALVES a Mehdi AHMADIAN.** A comprehensive analysis of the response time of MR dampers [Impact factor časopisu: 2,45]

**[12] STRECKER, Z., I. MAZŮREK, J. ROUPEC, M. KUBÍK a O. MACHÁČEK.** The design of magnetorheological damper with short time response. [Impact factor časopisu: 1,82]

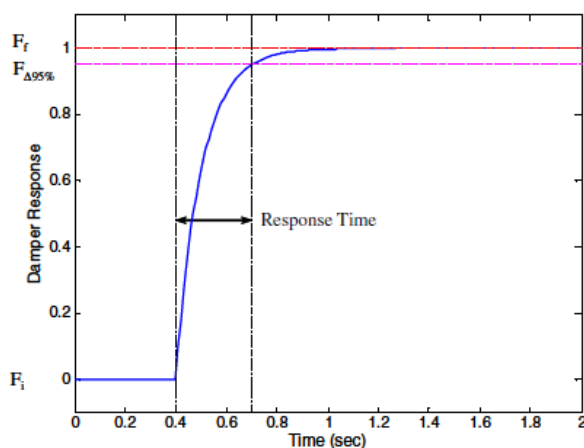
**[11] GUAN, Xinchun, Pengfei GUO a Jinping OU.** In: Second International Conference on Smart Materials and Nanotechnology in Engineering

Články se zabývají stanovením časové odezvy a nalezením vlivů, které časovou odezvu MR tlumiče zásadně ovlivňují. Koo a kol. v článku uvádí, že experimenty byly provedeny na komerčně dostupném MR tlumiči Motion Master od firmy LORD. Tento tlumič byl upnut do pulzátoru od firmy MTS. Na tomto zařízení byla měřena tlumící síla a zdvih s vzorkovací frekvencí 5000 Hz, protože časová odezva se pohybuje v hodnotách milisekund. MR tlumič byl excitován trojúhelníkovým signálem, aby byla zajištěna konstantní rychlost proudění přes štěrby. V nulové pozici pístu došlo k sepnutí proudu v cívkách (Obr. 17).



Obr. 17 Sepnutí proudu v cívkách MR tlumiče [10]

Koo a kol. sledovali jak dlouhá doba je potřebná k naběhnutí 95% předpokládané konečné hodnoty tlumící síly. Tento čas je v článku uvažován, jako časová odezva MR tlumiče.

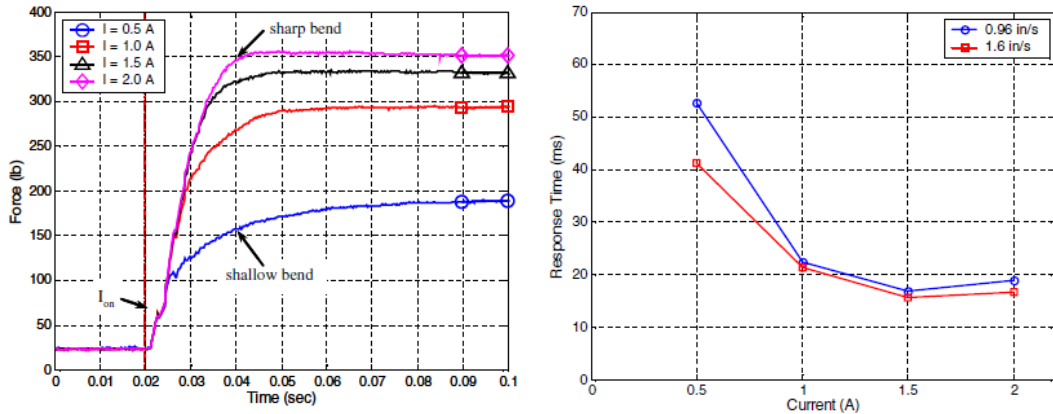


Obr. 18 Náběh síly MR tlumiče [10]

Koo a kol. zkoumali jaký vliv má velikost proudu, řídicí elektronika a pružné uchycení MR ventilu v testovací stoličce.

### Vliv velikosti proudu

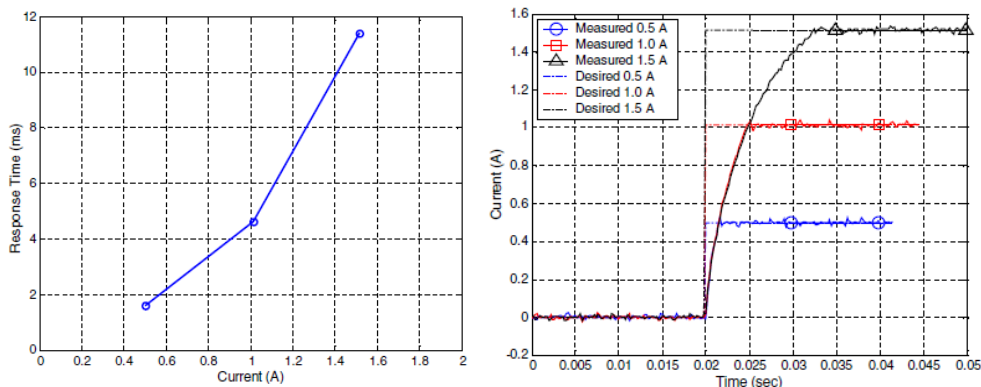
Autoři měřili vliv excitačního proudu na cívkách (0,5 - 2 A) na časovou odezvu MR tlumiče. Z grafu (Obr. 19) je možné vidět, že pro nízké proudy je náběh síly pozvolný a není zde výrazné koleno. Časová odezva je podstatně nižší pro větší proudy (2A) než pro proudy nižší (0,5A).



Obr. 19 Náběh síly v závislosti na velikosti proudu [10]

### Vliv řídicí elektroniky a indukčnosti cívky

Řídicí elektronika hraje významnou roli z hlediska časové odezvy MR tlumiče. Autoři navrhli použít proudový regulátor oproti běžně používanému napěťovému. Koo a kol. sestavili pro experimenty vlastní proudový regulátor. Z experimentů s proudovým regulátorem je patrné, že čím větší proud tím je větší časová odezva řídicí elektroniky (Obr. 20).



Obr. 20 Vliv řídicí elektroniky a indukčnosti cívky [10]

Strecker a kol. v závislosti na poznátcích od Koo a kol. uvádějí, že lze nalézt tři základní zdroje časové odezvy:

- časová odezva MR kapaliny,
- indukčnost cívky MR tlumiče,
- vířivé proudy potlačující magnetické pole ve šterbině.

Časová odezva MR kapaliny byla diskutována již v článku od Goncalvese [9] a pohybuje se v rozmezí od 0,45 do 0,6 sec.

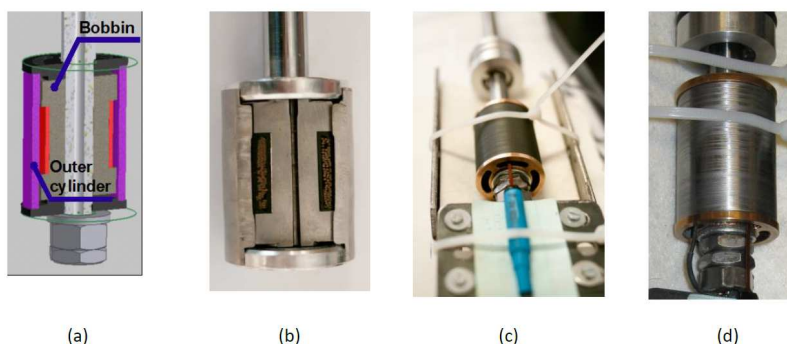
### Indukčnost cívky MR tlumiče

Indukčnost cívky způsobí nenulovou časovou odezvu proudu na napětí připojené k cívce. Strecker navrhl stejně jak Koo proudový regulátor pro snížení časové odezvy. V článku [12] je uvedeno, že časovou odezvu lze redukovat zvýšením napětí na cívce, dokud není dosaženo daného proudu. Autoři článku vyvinuli proudový

regulátor, který může připojit až 60V. Takto může být dosaženo plné hodnoty proudu již za 0,4 ms.

### Vliv vířivých proudů

Bylo zjištěno, že průběh elektrického proudu a průběh síly vykazuje určité zpoždění. Guan a kol. se domnívají, že je to výsledkem vířivých proudů indukovaných v magnetickém obvodu. Strecker navrhl vyrobit magnetický obvod MR tlumiče z magneticky vodivého a elektricky nevodivého materiálu. Tímto způsobem se zamezí vzniku vířivých proudů v materiálu. Výhodné se jeví použití feritových materiálů.



Obr. 21 Materiálové uspořádání [27]

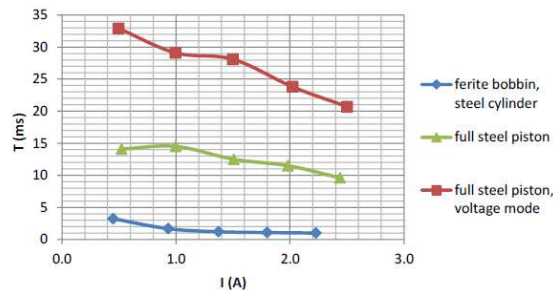
V článku byl upraven komerčně dostupný MR tlumič od firmy Delphi. Tlumič je složen z cívky, jádra a vnějšího pláště (Obr. 21). Autoři navrhli a testovali tři různé materiálové dvojce pro jádro a vnější plášť a to:

- jádro z oceli, vnější válec z oceli (dvojce 1, Obr. 21 b),
- jádro z feritu, vnější válec z oceli (dvojce 2, Obr. 21d),
- jádro z feritu, vnější válec z feritu (dvojce 3, Obr. 21 c).

Výsledky z měření jsou uvedeny v tabulce níže.

Dvojice	Časová odezva růst	Rychlost pístu	Remanence	Max. mag. indukce
1	24 ms	$0,2 \frac{m}{s}$	20 mT	176 mT
2	11 ms	$0,2 \frac{m}{s}$	9 mT	164 mT
3	1,5 ms	$0,2 \frac{m}{s}$	3 mT	135 mT

Z tabulky je možné vypořádat, že volba materiálu magnetického obvodu v MR tlumiči je vždy kompromis mezi hodnotou maximální magnetické indukce a časovou odezvou. Z tohoto hlediska Strecker uvádí, že výhodné je zvolit dvojici 2. V této variantě dojde k podstatnému snížení časové odezvy při malé redukci magnetické indukce ve štěrbině. Z grafů na Obr. 22 je patrné, že časová odezva dvojice 1 je závislá na proudu. Tohle tvrzení potvrzuje i Koo a kol..



Obr. 22 Časová odezva MR tlumiče v závislosti na proudu, dvojice 1 (zelená), dvojice 2 (modrá) [27]

Strecker také uvádí, že je nutné brát v úvahu, že feritové materiály jsou křehké a mají podstatně horší mechanické vlastnosti než ocel. Z toho plynou určitá konstrukční omezení pro MR tlumiče.

### Zhodnocení:

- Indukčnosti cívky a řídicí elektroniky Koo a kol. připisují největší vliv na celkovou časovou odezvu MR tlumiče.
- Koo a kol. uvádějí, že testy proběhly v rozmezí proudů od 0,5A do 2A. V grafu na Obr. 20 jsou výsledky vykresleny pouze do hodnoty 1,5A. Pokud by se aproximací vykreslila křivka pro 2A, tak časová odezva by byla aproximací okolo 20 ms (2A). Tato hodnota je 4/5 celkové časové odezvy MR tlumiče (25 ms, 2A).
- Strecker uvádí, že vliv indukčnosti cívky a řídicí elektroniky lze významně redukovat použitím proudového regulátoru, který dokáže dodat do systému větší napětí (až 60V).
- Významný vliv na časovou odezvu mají také podle Guan a kol. vířivé proudy indukované v magnetickém obvodu. Strecker navrhl, že je výhodné magnetický obvod vyrobit z feritových materiálů. Avšak feritové materiály mají nižší mez nasycení, proto se jeví vhodná kombinace feritového materiálu a oceli. Strecker otestoval kombinaci feritového materiálu a oceli s navrhnutým proudovým regulátorem a časová odezva MR ventilu se pohybovalo okolo 11 ms.
- Výhodou feritových materiálů je také, že dochází k snížení remanentního magnetismu v obvodu. To se projevuje snížením tlumící síly neaktivovaném stavu a nárůstem dynamického rozsahu.

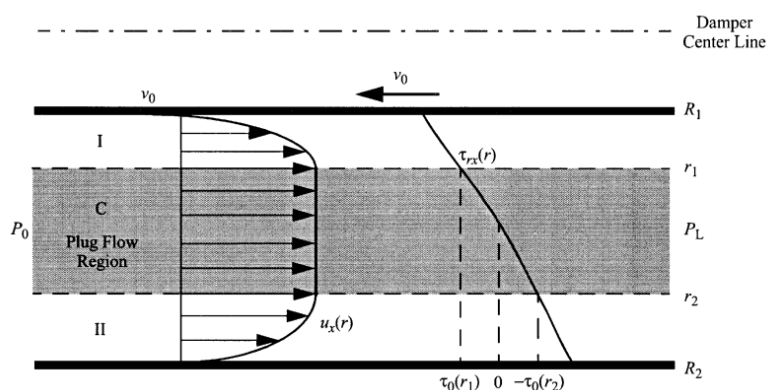
## 3.3 Simulační modely pro návrh MR ventilu

[1] YANG, G., B.F. SPENCER, J.D. CARLSON a M.K. SAIN. Large-scale MR fluid dampers: modeling and dynamic performance considerations [Impact factor časopisu: 1,77 ]

Jedná se o článek, který v oblasti MR technologií patří k nejvíce citovaným (více jak 350 citací). Článek popisuje návrh seizmického MR tlumiče, hydraulické modely a řízení. V úvodní pasáži článku je uvedeno, že MR kapalinu lze popsat pomocí Herschel-Bulkley reologického modelu, který zahrnuje i vliv smykového řídnutí. Nicméně pro konstrukční účely je výhodnější použít Binghamova reologického modelu, protože je velice efektivní pro návrhovou fázi MR zařízení. Yang a kol.

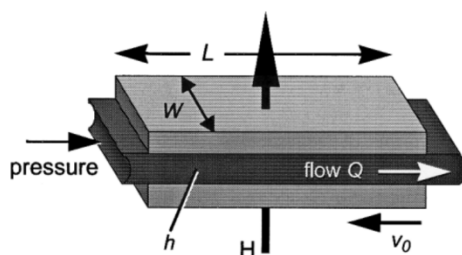
doslovná uvádí: „*Bingham model is still very effective, especially in the damper design phase.*“.

Autoři v článku popsali proudění MR kapaliny v magnetickém poli. Při sestavování modelu uvažovali, že se tlumič pohybuje konstantní rychlostí (konstantní rychlost proudění MR kapaliny), MR kapalina má plně vyvinutý rychlostní profil a Binghamův model může být použit pro popis chování MR kapaliny. Autoři problém popsali pomocí axisymetrického hydraulického modelu Obr. 23.



Obr. 23 Rychlostí profil MR kapaliny v magnetickém poli [1]

Hydraulický model je postaven na Navier-Stokesově rovnici, kde se předpokládá ustálené proudění a zanedbává se tíhové zrychlení. Rychlostní profil v magnetické štěrbině je nutné rozdělit na dvě části (popřípadě tři části). Na oblast kde smykové napětí v kapalině je menší než mez toku. Tato oblast je nazývána oblastí pístového toku (ucpávka). Na oblast kde smykové napětí je větší než mez toku. Tady se předpokládá rychlostní profil podobný jak pro Newtonovskou kapalinu. Pro konstrukční účely je tento model komplikovaný proto se často nahrazuje zjednodušeným modelem dvou paralelních desek. Autoři uvedli, že chyba mezi modely je menší než 2% a je závislá na poměru velikosti štěrbiny a středního průměru štěrbiny.



Obr. 24 Paralelní desky [1]

Na základě hydraulického modelu dvou desek autoři uvedli jednoduché vztahy pro konstrukční návrh geometrie štěrbin MR ventilu. V článku popsali vliv nekontrolované  $F_{un}$  (třecí  $F_f$  a viskózní  $F_\eta$ ) a kontrolované síly  $F_\tau$  při různých rychlostech. Třecí síla vychází především z tření ucpávek. Viskózní síla popisuje hydraulické ztráty v tlumiči bez magnetického pole.

$$F_{un} = F_f + F_\eta = F_f + \left(1 + \frac{w \cdot h \cdot v_0}{2 \cdot Q}\right) \cdot \frac{12 \cdot \eta \cdot Q \cdot L \cdot A_p}{w \cdot h^3}$$

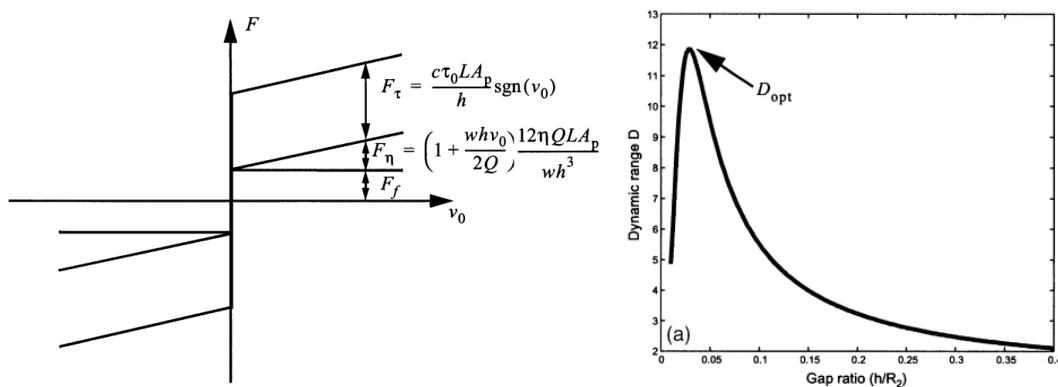
Kontrolovaná síla je závislá především mezi toku MR kapaliny a velikost lze měnit pomocí magnetického pole.

$$F_\tau = \text{sgn}(v_0) \cdot \frac{c \cdot \tau_0 \cdot L \cdot A_p}{h}$$

Proměnné použité ve vztazích uvedeny na Obr. 24. Autoři na základě kontrolované a nekontrolované síly zavedli pojem dynamický rozsah. Je to podíl kontrolované + nekontrolované síly a nekontrolované síly.

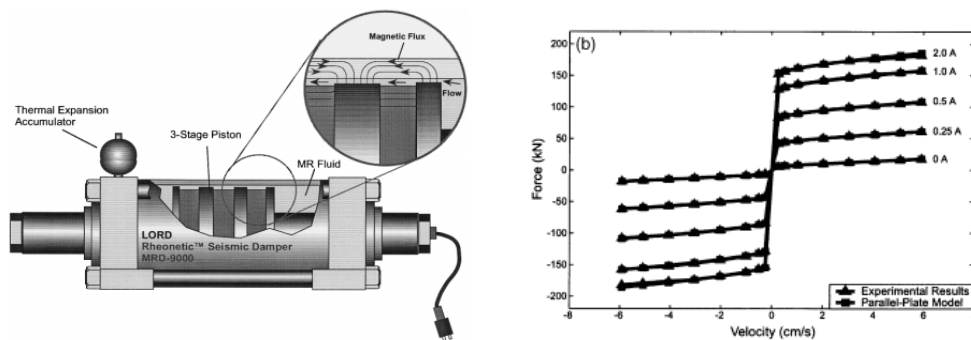
$$D = \frac{F_\tau + F_{un}}{F_{un}} = 1 + \frac{F_\tau}{F_{un}} = 1 + \frac{F_\tau}{F_f + F_\eta}$$

Pro efektivní semi-aktivní řízení je výhodné mít dynamický rozsah co největší. Yang a kol. uvádějí, že zmenšováním štěrbin se zvyšuje efektivnost MR tlumiče. Nicméně zmenšování štěrbin výrazně snižuje dynamický rozsah. Z toho vyplývá, že musí existovat optimální dynamický rozsah. Optimální dynamický rozsah je možné nalézt v grafu závislosti dynamického rozsahu na poměru velikosti štěrbin a středního poloměru štěrbin.



Obr. 25 Dynamický rozsah [1]

Navrhované hydraulické modely byly verifikovaný pomocí experimentů. Yang a kol. navrhli seizmický MR tlumič, který dosahuje maximální tlumící síly 200 kN. Na tomto zařízení provedli experimenty a maximální chyba modelu oproti experimentům byla stanovena menší než 2,5%.



Obr. 26 Seismický MR tlumič [1]

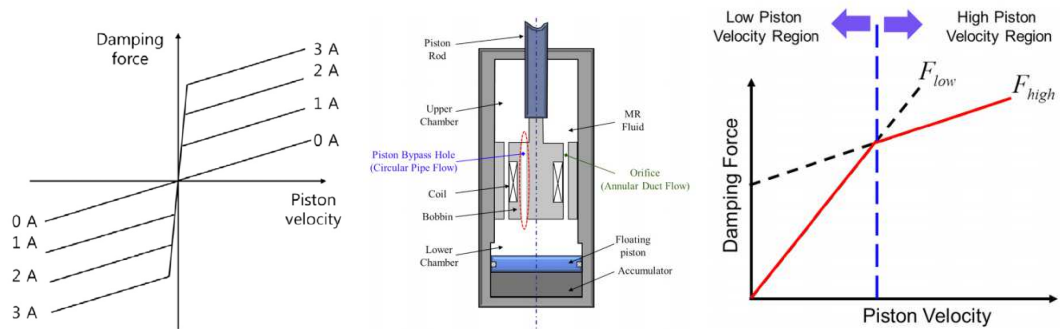
Yang a kol. v článku také diskutují vliv časové odezvy MR tlumiče na efektivní regulaci. Nicméně stejné poznatky byly diskutovány v předchozí části současného stavu poznání [12], [10].

### Zhodnocení:

- Yang v článku uvádí, že pro návrhovou fázi MR ventilu je výhodné pro popis reologického chování MR kapaliny použít Binghamův model.
- Rychlostí profil MR kapaliny v magnetickém poli vykazuje region s pístovým tokem. Tato oblast je, když smykové napětí v MR kapalině nepřesáhne mez toku MR kapaliny. V hydraulickém modelu je nutné s tímto faktem počítat.
- Autoři uvádějí, že s malou chybou lze (okolo 2%) mezikruhovou geometrii štěrbin nahradit modelem dvou rovnoběžných desek. Tento postup podstatně zjednoduší tvorbu hydraulického modelu.
- Yang a kol. rozdělili tlumící síly tlumiče na kontrolované a nekontrolované. O nekontrolovaných silách se autoři zmiňují pouze okrajově. Uvádějí pouze, že vliv mají třecí ztráty ucpávek a hydraulické odpory v neaktivovaném stavu.
- Autoři definovali pojem Dynamický rozsah MR tlumiče, což je podíl tlumící síly v aktivovaném a neaktivovaném stavu. Pro regulační efektivnost MR tlumiče je důležité maximalizovat dynamický rozsah. Autoři v článku nenavrhují, žádný metodický přístup jak maximalizovat dynamický rozsah.

[16] SOHN, Jung Woo, Jong-Seok OH a Seung-Bok CHOI. Design and novel type of a magnetorheological damper featuring piston bypass hole. [Impact factor časopisu: 2,45]

Článek popisuje vliv obtokové štěrbin (nemagnetická štěrba) na F-v charakteristiku MR tlumiče. Sohn a kol. uvádí, že u publikovaných variant konstrukce MR tlumiče je v nízkých rychlostech generovaná vysoká tlumící síla (Obr. 27 dole vlevo). Dá se říci, že MR tlumič funguje podobně jak tlumič třecí. Tento nežádoucí skok tlumící síly způsobuje nepohodlí pasažérů v automobilových aplikacích. Z toho důvodu autoři navrhli paralelně zapojenou štěrbinu ke štěrbině, kde protéká MR kapalina přes magnetické pole (Obr. 27 dole střed). Tato štěrba způsobí sklopení F-v charakteristiky v nízkých rychlostech (Obr. 27 dole vpravo). Sohn rozděluje F-v charakteristiku na oblast nízkých a vysokých rychlostí. V článku autoři prezentují simulační model obtokové štěrbin a srovnávají ho s experimenty.



Obr. 27 Vliv obtokové šterbiny [16]

Autoři při sestavování modelu vycházeli z Eulerovi rovnice. Předpokládali nestlačitelnou kapalinu, nedochází k tepelným ztrátám během proudění a laminární proudění. Pro tyto předpoklady sestavili rovnice, které popisují velikost tlumící síly obtokové šterbiny

$$F_{viscous} = (A_p - A_r) \cdot \rho \cdot g \cdot h_{vis},$$

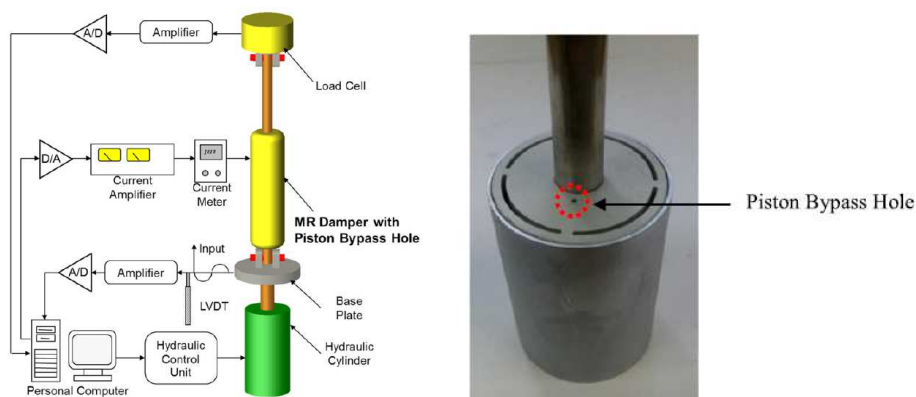
kde  $A_p$  je plocha pístu [ $m^2$ ],  $A_r$  plocha pístnice [ $m^2$ ],  $\rho$  hustota MR kapaliny [ $kg/m^3$ ],  $g$  gravitační zrychlení [ $m/s^2$ ] a  $h_{vis}$  výšková ztráta třením [m]. Výšková ztráta třením je pro kruhový otvor definovaná

$$h_{vis} = f_{vis} \cdot \frac{L \cdot v^2}{D \cdot 2 \cdot g},$$

kde  $f_{vis}$  odporový součinitel [-],  $L$  délka obtoku [m],  $D$  průměr obtoku [m] a  $v$  rychlost proudění MR kapaliny [m/s]. Odporový součinitel lze pro laminární proudění definovat:

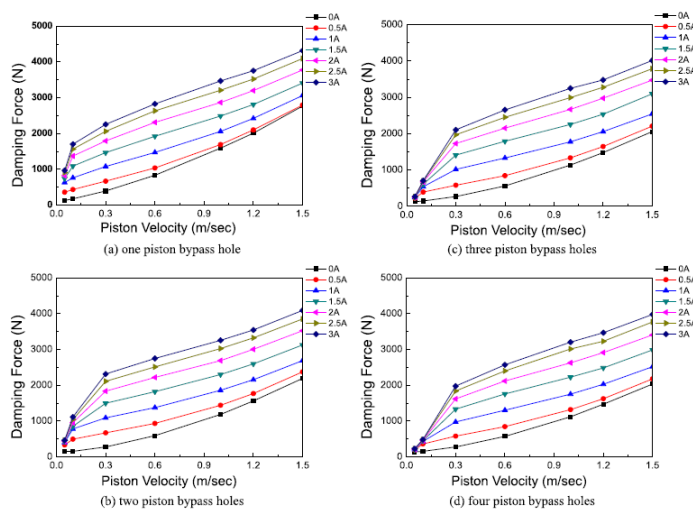
$$f_{vis} = \frac{64}{Re} = \frac{64 \cdot \mu}{\rho \cdot v \cdot D}$$

Sohm a kol. sestavili experimentální zařízení a provedli několik měření. Uspořádání experimentu na Obr. 28. Autoři excitovali tlumič pomocí sinusového signálu s amplitudou 20 mm. Měření probíhalo pro různé průměry obtokových šterbin a to 0.6, 0.7, 0.8, 1.6, 1.9 a 2.2 mm. Dále byl testován vliv počtu obtokových šterbin.



Obr. 28 Experimentální řetězec [16]

Vliv počtu štěrbin popsán v grafu na Obr. 29. Z průběhu je patrné, že dochází ke sklápění F-v charakteristiky v nízkých rychlostech. Stejný efekt má i zvětšování průměru obtokové štěrbin.



Obr. 29 Vliv počtu štěrbin na F-v charakteristiku [16]

V závěru autoři konstatovali, že F-v charakteristika v nízkých rychlostech má lineární průběh.

### Zhodnocení

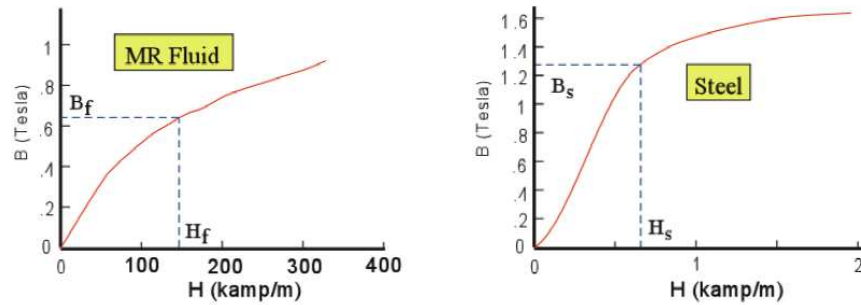
- Autoři navrhli paralelní zapojení nemagnetické štěrbiny k štěrbině, kde MR kapalina prochází magnetickým polem. Tato úprava má zvýšit komfort pasažérů v automobilových aplikacích.
- Autoři navrhli jednoduchý hydraulický model obtoku, který posléze experimentálně verifikovali.
- Snižováním hydraulického odporu, tedy zvětšováním průměru či počtu štěrbin, dochází ke sklápění F-v charakteristiky v nízkých rychlostech.
- V článku autoři konstatovali, že F-v charakteristika v nízkých rychlostech má lineární průběh. Domnívám se, že toto tvrzení není podložené, protože v nízkých rychlostech autoři naměřili pouze dva body. Dalším problémem, který vidím je, že v článku není uvedeno s jakou MR kapalinou byly experimenty provedeny.

[21] **LORD Corporation.** Magnetic Circuit Design (1999) Engineering Note

[30] **Jinglin J.,** Magnetic circuit design for magneto-rheological damper

V dokumentu Magnetic Circuit design publikovaném firmou LORD je uveden analytický postup návrhu magnetického obvodu MR ventilu.

1. V první fázi se vybere pracovní bod ( $H_f, B_f$ ) pro požadovanou mez toku MR kapaliny. Na základě magnetické indukce  $B_f$  a efektivní oblasti pólu  $A_f$  se vypočte magnetický tok  $\Phi = B_f \cdot A_f$ .



Obr. 30 B-H křivky [21]

- Užitím principu kontinuity magnetického toku  $\Phi_{fluid} = \Phi_{steel1} = \Phi_{steel2}$  se určí pracovní bod v oceli. Pro známý průřez a magnetický tok se vypočte magnetická indukce v oceli  $B_s = \frac{\Phi_{steel1}}{A_s}$ . Z B-H křivky oceli se dle magnetické indukce určí intenzita magnetického pole  $H_s$ .
- Za použití Kirchoffových zákonů pro magnetický okruh lze vypočítat potřebnou velikost cívky (počet závitů  $N$  a proud  $I$ ).

$$N \cdot I = \sum H_i \cdot l_i$$

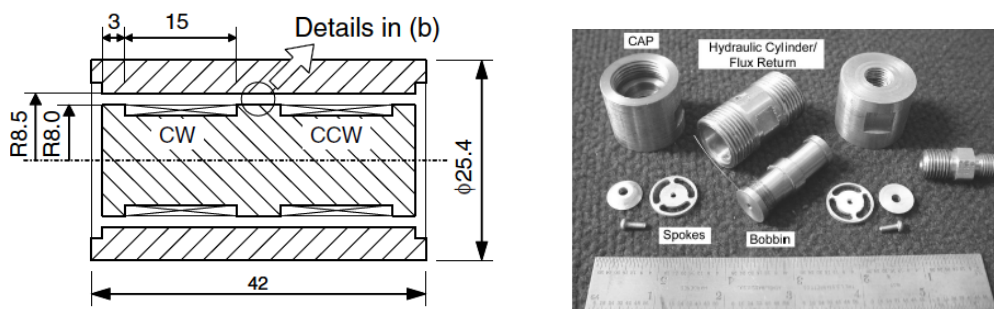
Autoři v článku doporučují pro komplikovanější geometrie použít MKP systém. Konkrétně firma LORD využívá MKP systém Ansys Maxwell. Presentovaný postup je popsán i v článku od Jinglin [30]. Jinglin uvádí, že magnetický obvod by měl být vyroben z materiálu s co nejvyšší permeabilitou a délka magnetického obvodu by měla být co nejmenší. Pokud bude magnetický obvod vyroben z oceli Jinglin [30] doporučuje zvolit ocel s obsahem uhlíku menším než 0,15%.

#### Zhodnocení:

- Autoři v článku prezentovali metodiku návrhu geometrie magnetického obvodu analytickým způsobem. Autoři ovšem uvádějí, že pro komplikovanější geometrii je vhodné použít konečnoprvkový výpočetní systém.
- Magnetický obvod MR ventilu by měl být vyroben z materiálu s co nejvyšší relativní permeabilitou.

[31] **Yoo Jin-Hyeong**, Design of a High-efficiency Magnetorheological Valve [Impact factor časopisu: 2,17 ]

Autoři se v článku zaměřují na maximalizování meze toku MR kapaliny při zachování stejných rozměrů magnetického obvodu. Yoo uvádí, že většina magnetických obvodů v MR zařízeních je vyrobena z nízkouhlíkové oceli. Pro konstrukci prezentovaného MR ventilu byly vybrány materiály Permalloy (slitina niklu 80% a železa 20%, relativní permeabilita okolo 100 000,  $B_{max} = 0,8$  T) a Hiperco (Cobalt 50%, Vanadium 2% a 47% železo, relativní permeabilita 12 000,  $B_{max} = 2,4$ T). Z těchto dvou materiálů byly v článku vyrobeny MR ventily. Magnetická štěrbina byla volena 0,5 mm. Ostatní rozměry dle Obr. 31. Hydraulický návrh MR ventilu vycházel ze vztahu prezentovaných Carlsonem.



Obr. 31 Geometrie MR ventilu [31]

Pro návrh magnetického obvodu byl použit MKP systém Ansys/Emag 2D. Byla použita MR kapalina MRF-132LD od firmy LORD. Autoři popsali, že z pohledu dimenzování magnetického obvodu je nejdůležitější vhodná volba průměru jádra. V závěrečné části článku Hyeong a kol. konstatovali, že pro redukci velikosti MR ventilu je nutné použít materiál s vysokou relativní permeabilitou.

#### Zhodnocení:

- Hyeong uvádí, že pro návrh geometrie magnetického obvodu je nejdůležitější vhodná volba velikosti a materiálu jádra.
- Velikost MR ventilu lze redukovat použitím materiálu magnetického obvodu s co nejvyšší relativní permeabilitou.

## 4 ANALÝZA, INTERPRETACE A ZHODNOCENÍ POZNATKŮ ZÍSKANÝCH NA ZÁKLADĚ REŠERŠE

V první části rešerše byly rozebrány konstrukce izolačních systémů pro kosmické nosiče. Důležitými limity pro konstrukci vzpěry pro použití v kosmickém nosiči jsou:

- **Hermetické utěsnění provozních kapalin**

V [19] je uveden požadavek na hermetické utěsnění pracovních kapalin, což přináší použití vzpěry bez těsnění pohyblivých dílů (těsnících manžet). Proto Davis [14] a Cobb [15] navrhli variantu, že pro vyvození proudění přes tlumič se použije vlnovců, které poskytují hermetické utěsnění tlumící kapaliny. Z těchto důvodů nelze použít konstrukční variantu MR tlumiče například používanou pro automobilový průmysl.

- **Nízké pasivní tření**

Pro efektivní funkci tlumícího systému je nutné eliminovat pasivní třecí odpory. Použitím vlnovců se eliminují třecí ztráty způsobené těsníci manžetami jak na pístnici, tak pístu. Vlnovce vykazují také malé strukturální tlumení [14].

- **Teplota a tlak okolí**

Vzpěry musejí být navrhovány vzhledem k možným nízkým i vysokým teplotám. Jedním ze vstupů do regulačního algoritmu by měla být teplota MR kapaliny v hydraulickém systému. Vzpěry musí být opatřeny expanzní nádobkou. Cobb a kol. pro tento účel využili zapojení třetího vlnovce do hydraulického systému, který slouží jako expanzní nádobka. Tato nádobka je stlačována pružinou čímž se vyvodí přetlak v hydraulickém systému.

- **Objemová tuhost tlumícího systému**

Objemová tuhost vlnovců je konečná. Nevhodné dimenzování tuhosti vlnovců může způsobit až potlačení funkce tlumiče. Při malé tuhosti by docházelo k „nafukování“ měchu a kapalina by se neprotlačovala přes tlumič. Davis [14] uvádí, že pro izolační frekvence je výhodné použít tří-parametrický systém. Jedná se o paralelní zapojení pružiny A k sériově zapojenému tlumiči a pružině B. Tuhost pružiny B je tuhost tlumícího systému. Vhodně zvolenou objemovou tuhostí je možné podstatně snížit přenos v izolačních frekvencích.

Druhá část rešerše se zabývala nalezením konstrukčních limitů při použití MR technologie. Konstrukční limity při použití MR technologie dle rešerše jsou:

- **Maximální a minimální provozní teplota MR kapaliny**

Teplotní omezení MR kapaliny plyne především z vlastností nosné kapaliny. Carlson [17] uvedl, že teplotní limit komerčně dostupných MR kapalin je v rozsahu od  $-40^{\circ}\text{C}$  do  $150^{\circ}\text{C}$ . Tato oblast vzhledem k návrhové fázi MR zařízení je dostatečně popsána.

- **Minimální velikost magnetické štěrbin (minimální objem)**  
Jolly a kol. v článku [2] uvedli, že je potřebný minimální objem MR kapaliny v magnetickém poli, aby se dosáhlo požadované meze toku (tlumící síly). Tento objem je závislý na geometrii a reologických vlastnostech MR kapaliny. Ve vztahu vystupuje i dynamická viskozita kapaliny v neaktivovaném stavu. Pro vhodnou volbu minimálního objemu MR kapaliny (pro pracovní teplotu MR zařízení) je tedy potřeba znát závislost dynamické viskozity na teplotě. Oblast minimálního objemu kapaliny je v literatuře dostatečně popsána.
- **Teplotní závislost viskozity MR kapaliny v neaktivovaném stavu**  
Dynamická viskozita MR kapaliny v neaktivovaném stavu je výrazně závislá na teplotě a složení MR kapaliny. Výrobci MR kapalin v datasheetech [24] uvádí B-H křivku,  $\tau$ -H křivku a dynamickou viskozitu v neaktivovaném stavu při 40°C. Znalost závislosti dynamické viskozity na teplotě je důležitým parametrem pro návrhovou fázi. Dle Carlsona [17] je dynamická viskozita závislá také na velikosti smykového spádu. Tato oblast pro komerčně dostupné MR kapaliny **není** v odborných člancích **dostatečně popsána**. Tohle tvrzení potvrzuje i Sahin [23] :“ *The research related to temperature effect on fluid properties of MRGs and MR fluids has not been well established.*“.
- **Volba materiálu a třecí ztráty těsnících manžet**  
Jolly a kol. v článku [2] uvádějí, že pro těsnící manžety v MR tlumičích je možné použít materiál NBR a FKM. Nedoporučuje se použití silikonových materiálů. V žádné dostupné literatuře však není popsáno, jak velké třecí síly manžety způsobují v MR kapalině. Jedná se o významný parametr hlavně z pohledu dynamického rozsahu (efektivnosti regulace). I malé snížení třecí síly má významný vliv na dynamický rozsah. Vhodná volba geometrie, popřípadě materiálu manžet na třecí síly **není** v literatuře **dostatečně popsána**.
- **Dwell time**  
Goncalves ve svém článku [9] popsal, že pro správnou funkci MR tlumiče je nutné, aby částice MR kapaliny strávila v magnetickém poli minimálně 0,45 až 0,6 ms (dwell time). V opačném případě by nedošlo k dostatečnému navýšení meze toku a tím i tlumící síly. Pro návrhovou fázi ventilu je tento problém dostatečně popsán.
- **Provozní houstnutí MR kapaliny**  
Carlson [25] a Roupec [26] se ve svých pracích zabývali provozním houstnutím MR kapaliny. V MR zařízeních dochází k navyšování konzistence MR kapaliny s počtem zatěžovacích cyklů. Autoři definovali životnost MR kapaliny pomocí parametru LDE, kde významnou roli hraje objem MR kapaliny v tlumiči. Životnost MR tlumiče je tedy dána i množstvím MR kapaliny. Tato oblast pro návrhovou fázi je v literatuře dostatečně popsána.

- **Časová odezva řídicí elektroniky**  
Strecker [27] i Koo [10] se ve svých pracích zabývali časovou odezvou MR tlumiče. Významnou část časové odezvy MR tlumiče dle autorů způsobuje časová odezva řídicí elektroniky a indukčnost cívky tlumiče. Strecker navrhl a patentoval proudový regulátor, který sníží časovou odezvu řídicí elektroniky až k hodnotě okolo 0,4 ms. V článkách dostatečně popsáno.
- **Časová odezva magnetického pole**  
Guan ve svém článku [11] popsal, že průběh elektrického proudu a tlumící síly vykazuje určité zpoždění. Tento jev připisoval vlivu vířivých proudů. Strecker [27] navrhl, že pro snížení časové odezvy magnetického pole na řídicí signál lze použít materiál magnetického obvodu elektricky nevodivý a magnetický vodivý (feritové materiály). Tímto způsobem se podstatně sníží časová odezva a eliminuje se remanence v magnetickém obvodu. Tato oblast je dostatečně popsána.

V třetí části rešerše byly popsány simulační modely, které jsou nutné pro návrh MR tlumiče. Jedná se především o hydraulický a magnetický model MR tlumiče.

#### **Hydraulický model MR tlumiče:**

- **Hydraulický odpor magnetické štěrbin**  
Yang ve své práci [1] publikoval hydraulický model MR tlumiče. Tento model obsahuje vztahy pro výpočet tlakové ztráty v aktivovaném i neaktivovaném stavu pouze pro magnetickou štěrbinu. Vztah pro výpočet tlakové ztráty v aktivovaném stavu obsahuje konstantu  $c$ , která je v rozmezí 2 až 3. V dostupné literatuře nebyl nalezen žádný vztah či strategie jak volit konstantu  $c$ . Pouze je uvedeno, že je funkcí rychlostního profilu. Volba této konstanty má významný vliv na velikost tlakové ztráty. Tento problém **není** v dostupné literatuře **dostatečně popsán**.
- **Velikost magnetické štěrbin**  
Yang a kol. uvádějí [1], že zmenšováním štěrbin se zvyšuje efektivnost MR tlumiče. Nicméně zmenšování štěrbin výrazně snižuje dynamický rozsah tohoto zařízení. Volba velikosti magnetické štěrbin je tedy závislá na konkrétních požadavcích pro danou aplikaci. V literatuře dostatečně popsáno.
- **Hydraulický odpor obtokové viskózní štěrbin**  
Sohn ve své práci [16] publikoval vliv paralelního zapojení viskózní obtokové štěrbin k magnetické štěrbině. Tímto způsobem snížil tlakovou ztrátu při malých rychlostech. Sohn v závěru popsal, že se jedná o lineární závislost tlakové ztráty na rychlosti v nízkých rychlostech pohybu pístu tlumiče. V literatuře **nedostatečně popsáno**.

#### **Magnetický model MR tlumiče**

Analytický i numerický MKP výpočet pro návrh magnetického obvodu je v literatuře popsán dostatečně. Nicméně magnetické materiálové charakteristiky dostupných materiálu pro simulace (B-H křivky) jsou **nedostatečně popsány**.

## 5 VYMEZENÍ CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE A NÁVRH ZPŮSOBU JEJÍHO ŘEŠENÍ 5

---

Předběžný název dizertační práce byl: „*Vývoj magnetoreologického tlumiče odpružení pro kosmonautiku*“. Z poznatků získaných z rešeršní části lze konstatovat, že zásadní prvkem při konstrukci izolačního systému pro kosmický nosič je tlumič. Tento fakt potvrzuje i Davis a kolektiv v publikaci [14]: “*The most critical part of isolator is the damper,...*”. MR tlumič má velké množství konstrukčních a fyzikálních limitů. Některé limity jsou v literatuře nedostatečně popsány. Strategie a limity návrhu MR tlumiče jsou také dány požadavky na konkrétní aplikaci (minimální hmotnost, rychlost, malé požadavky na napájení či vysoká spolehlivost). V této chvíli existuje jen malé množství prací zabývajících se metodikou návrhu MR tlumiče [28], [29] a neexistuje ucelená metodika návrhu rychlého semi-aktivního MR tlumiče. Je to dáno především nedávno publikovanými poznatky v této oblasti. Z tohoto důvodu se jeví výhodné téma dizertační práce pozměnit a definovat nový cíl a to sestavení metodiky návrhu rychlého semi-aktivního MR ventilu.

### 5.1 Cíle dizertační práce

5.1

---

Základní podstatou dizertační práce je sestavení metodiky návrhu rychlého semi-aktivního magnetoreologického ventilu. MR ventil se využívá především v adaptivním režimu, kde nehraje důležitou roli dynamika celého systému. Při semi-aktivním řízení je dynamika systému zásadní a určuje efektivnost celého zařízení. Strategie metodiky se tedy zaměřuje na minimalizaci časové odezvy celého tlumícího systému.

Díličními cíli jsou:

- stanovení limitujících parametrů při návrhu rychlého semi-aktivního magnetoreologického tlumiče,
- doplnění metodiky o reologické vlastnosti komerčně dostupných MR kapalin,
- sestavení univerzálních simulačních modelů (magnetický, reologický či hydraulický; ustálená či přechodová analýza),
- návrh a realizace experimentálního zařízení,
- experimenty s cílem verifikovat navrhované simulační modely,
- ověření efektivnosti MR ventilu na zařízení pro tlumení vibrací a rázů.

### 5.2 Vědecká otázka

5.2

---

*Je možné zkonstruovat semi-aktivní magnetoreologický tlumič, který by výrazně snížil přenos vibrací v exponovaném frekvenčním pásmu do 50 Hz?*

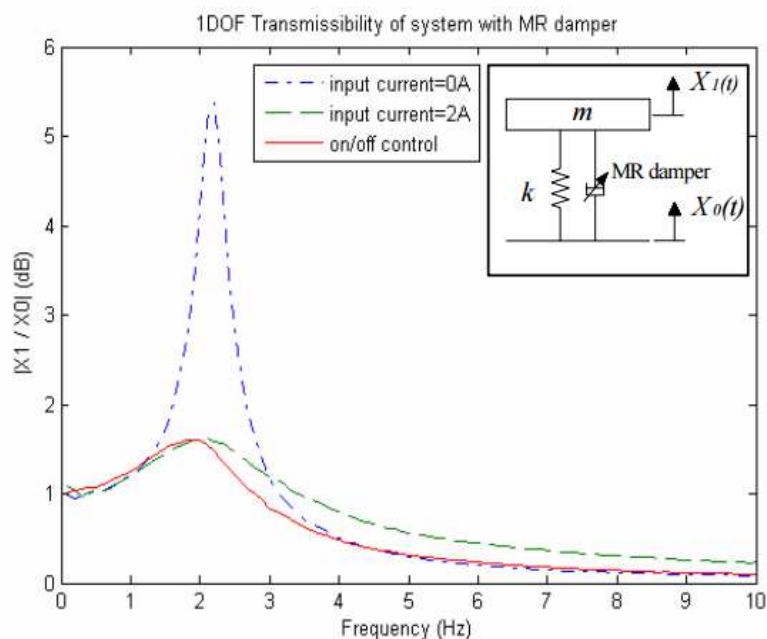
### 5.3 Pracovní hypotéza

5.3

---

Pracovní hypotéza vychází z poznatku, že pro efektivní regulaci je nutné mít časovou odezvu systému 10x větší než je maximální regulovaná frekvence [12]. V případě 50 Hz se jedná o časovou odezvu 2 ms. Použitím feritového magnetického obvodu v MR tlumiči spolu s proudovým regulátorem lze dosáhnout časové odezvy 1,5 ms [12]. V práci Memeta [18] je popsán matematický model dvou-parametrického systému s MR tlumičem. Dle výsledků za pomoci vhodně řízeného MR tlumiče (v

práci [18] on/off) se sníží rezonanční překmit a dojde k malému zhoršení přenosu v izolačních frekvencích.



Obr. 32 Přenosová charakteristika v pasivní a semi-aktivní variantě [18]

## 5.4 Návrh způsobu řešení

### Virtuální návrh a modely experimentálního zařízení

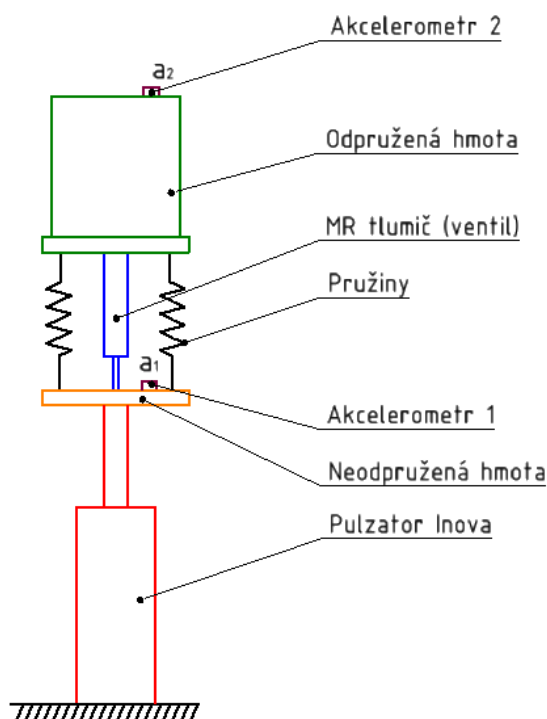
Na základě dat získaných z rešeršní části bude nutné namodelovat v MKP systému Maxwell časovou odezvu magnetického pole MR ventilu s feritovým magnetickým obvodem. Pokud se ověří předpoklad o časové odezvě okolo 2 ms, tak bude přikročeno na základě analyticko-syntetického poznávacího postupu k návrhu experimentálního zařízení. Návrh tlumící síly MR tlumiče musí vycházet z požadavků pro zařízení, kde budou ověřovány vibroizolační schopnosti tohoto návrhu. Pro návrh tlumící síly bude nutné sestavit hydraulický model MR ventilu, který bude respektovat ne-newtonovské chování MR kapaliny.

### Realizace a zjištění časových konstant experimentálního zařízení

Navrhnuté experimentální zařízení bude fyzicky realizováno s ocelovým a posléze feritovým magnetickým obvodem. Na tomto zařízení budou experimentálně verifikovány navrhované hydraulické a magnetické modely a také stanovena časová odezva tlumícího systému.

### Experimentální aparatura

Vyvinuté experimentální zařízení bude vloženo do vibroizolačního testeru (dostupný na VUT FSI UK), který bude excitován pomocí servoválce Inova AH 40/63 od 5 do 100 Hz s konstantní amplitudou zrychlení 1g. Pomocí akcelerometrů bude snímáno zrychlení neodpružené ( $a_1$ ) a odpružené hmoty ( $a_2$ ). Bude testována pasivní a semi-aktivní varianta s různými regulačními algoritmy. Induktivní metodou se vyhodnotí přínos semi-aktivního tlumení oproti variantě pasivní.



Obr. 33 Experimentální aparatura

### Doplnění metodiky o reologické vlastnosti komerčně dostupných MR kapalin

Měření MR kapalin bude probíhat na rotačním reometru Haake RotoVisco 1 dostupném na ústavu Konstruování. MR kapaliny budou testovány v širokém rozsahu teplot a to od záporných teplot po 100°C. Na základě těchto dat bude sestavena teplotní závislost viskozity MR kapaliny na teplotě. Tato závislost je důležitá pro návrhovou fázi.

### Sestavení metodiky

Po ověření efektivnosti této technologie při tlumení vibrací a rázů bude přikročeno k sestavení metodiky. V metodiky budou použity experimentálně ověřené magnetické a hydraulické modely. Metodika bude také doplněna o reologické vlastnosti komerčně dostupných MR kapalin. Na základě této metodiky bude možné návrh rychlého semi-aktivního ventilu (tlumiče) významně zrychlit a zefektivnit.

## 5.5 Projekty

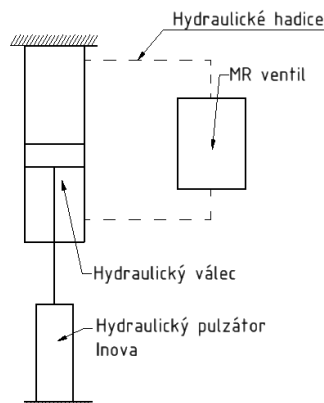
Řešení dizertační práce probíhá v úzké návaznosti a je částečně financováno z:

1. vibroizolační systém užitečného nákladu kosmických nosičů (FSI-S-14-2329),
2. mezifakultního projektu vývoj semi-aktivního magnetoreologického ventilu (FEKT/FSI-J-15-2777),
3. semi-aktivní tlumičící systém (FLPP3) ve spolupráci s firmou Honeywell a Evropskou kosmickou agenturou.

## 6 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÍ DIZERTAČNÍ PRÁCE

### Experimentální zařízení

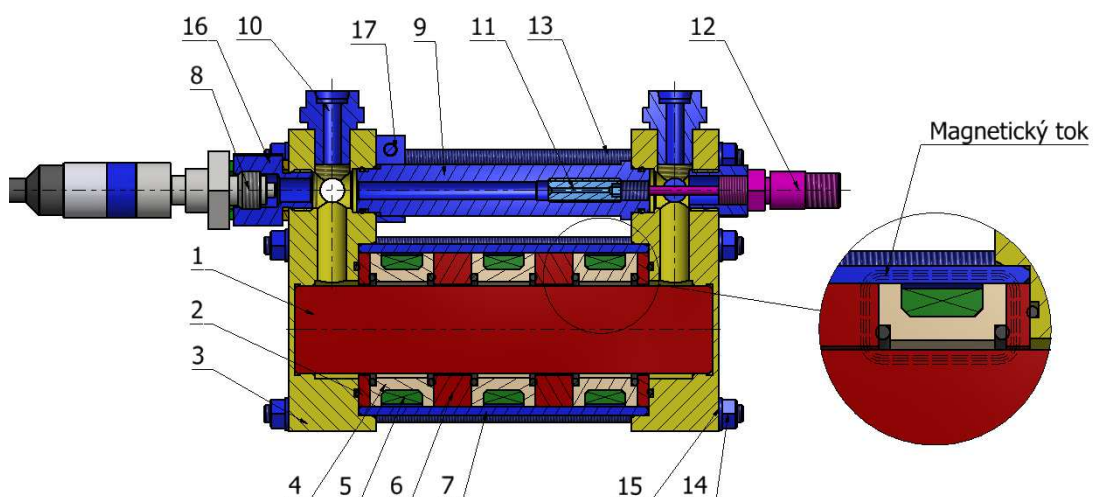
Experimentální tlumicí zařízení bylo navrhováno v koncepci zapojení komerčně dostupného hydraulického válce pomocí hydraulických hadic do MR ventilu. Pohybem pístnice hydraulického válce se vyvodí proudění MR kapaliny přes MR ventil a tím vznik tlumicí síly.



Obr. 34 Schéma zapojení tlumicí jednotky

Experimentální MR ventil byl navrhován s ohledem na možnost testování různých počtů či délek magnetických štěrbin a různých geometrií trysek (požadavek rychlé a snadné výměny trysky). Magnetický obvod v MR ventilu bude vyroben z feritového materiálu, který vykazuje křehké chování. Tyto faktory bylo nutné respektovat při návrhu.

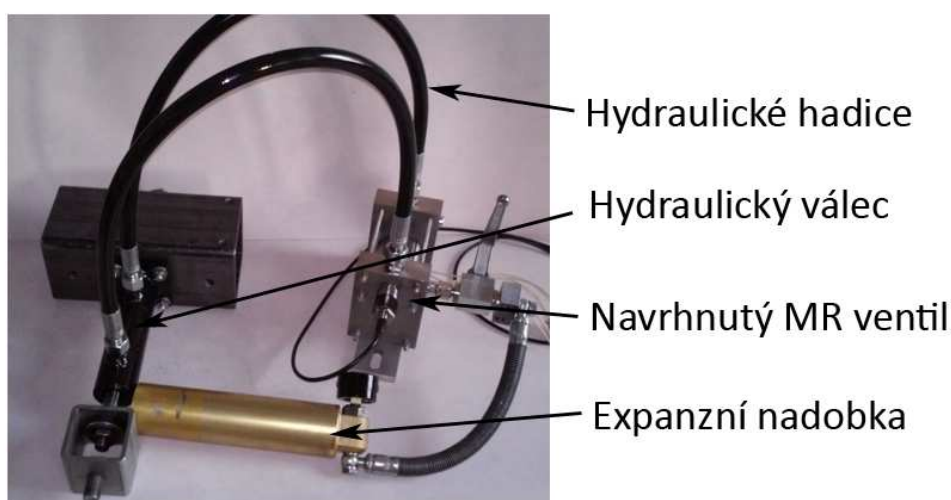
Rež navrhnutým experimentálním ventilem na Obr. 35. Tento ventil je složen z několika konstrukčních celků. Z celku magnetické štěrbiny (1,2,4,5,6,7), obtokové štěrbin (11,9,17) a nosné části (3,8,10,16,12). Ventil umožňuje měření teploty a tlaku MR kapaliny v hydraulickém systému.



Obr. 35 MR ventil, feritový materiál (červená), nízkouhlíková ocel (modrá), nerezová ocel (žlutá)

Pomocí změny velikosti proudu v cívkách (5) lze měnit tlakové ztráty MR tlumiče. Na tomto zařízení budou probíhat verifikace navrhovaných hydraulických a magnetických modelů.

MR ventil byl fyzicky realizován ve formě, kdy magnetický obvod v MR ventilu je vyroben z nízkouhlíkové oceli. Byly provedeny úvodní experimenty s tlumičovým olejem v hydraulickém systému. Experimenty naznačují, že tření ucpávek má významný vliv na efektivnost tlumícího systému, především v nízkých rychlostech proudění kapaliny a při vysokém přetlaku. Dalším významným faktorem se ukázala tuhost tlumícího systému. Při malých zdvizích dochází k „nafukování“ hadic a k omezení průtoku MR kapaliny přes ventil. Z těchto důvodů bylo přikročeno k návrhu jednotky, která za pomoci vlnovců vyvede proudění MR kapaliny přes ventil.



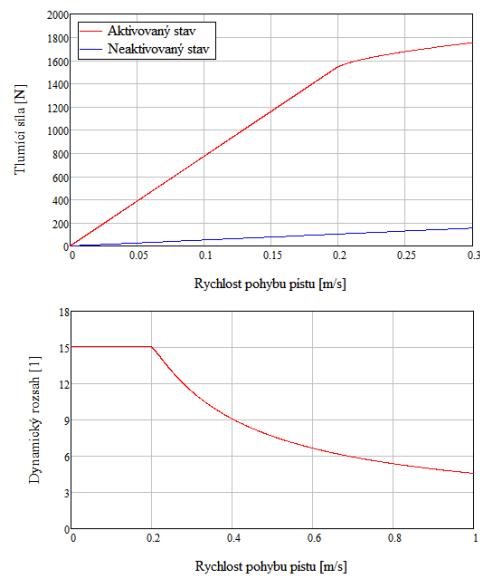
Obr. 36 Tlumicí jednotka

### Univerzální simulační modely

Hydraulický model MR ventilu je složen z paralelního zapojení hydraulického odporu viskózní obtokové a magnetické štěrbin. Pro hydraulický model magnetické štěrbin byl použit zjednodušený model paralelní desek. MR kapalina v aktivovaném stavu vykazuje nenewtonovské chování, které je v modelu popsáno pomocí Binghamova modelu. V neaktivovaném stavu se předpokládá newtonovské chování. Model je realizován v softwaru MathCad. Vstupem do hydraulického modelu jsou reologické a geometrické vlastnosti MR ventilu. Na základě těchto dat je vypočtena p-v či F-v charakteristika MR ventilu, dynamický rozsah, dwell time a minimální objem MR kapaliny v aktivní zóně. V dalším průběhu řešení dizertační práce bude model upraven o vtokové a výtokové ztráty především v obtokové štěrbině. Maska programu a vypočtená F-v charakteristika navrhnutého ventilu na Obr. 37.

**Výpočtový model proudění MR ventilu**

<b>Vlastnosti MR kapaliny:</b>	$\eta_1 := 0.112 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ Při teplotě 40°C
Dynamická viskozita:	
Hustota MRF:	$\rho_1 := 3.6 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$
<b>Hydraulický válec:</b>	
Plocha pístu hydraulického válce: (bez pístnice)	$S_5 := 550 \text{ mm}^2$
Pracovní zdvih:	$z_1 := 50 \text{ mm}$
<b>Magnetická část:</b>	
Velikost magnetické štěrbiny:	$g_3 := 0.6 \text{ mm}$
Celková délka magnetických štěrbin:	$L_3 := 34 \text{ mm}$
Mez toku MR kapaliny:	$\tau_{y3} := 30 \text{ kPa}$
Střední průměr štěrbiny:	$d_5 := 30.6 \text{ mm}$
Plocha štěrbiny:	$S_4 := 3.14 \cdot d_5 \cdot g_3 = 57.65 \cdot \text{mm}^2$
<b>Obtok:</b>	
Délka obtoku:	$L_4 := 30 \text{ mm}$
Průměr obtoku:	$d_6 := 1.45 \text{ mm}$
Mez toku MR kapaliny v neaktivovaném stavu:	$\tau_{y4} := 0 \text{ kPa}$
Plocha štěrbiny obtoku:	$S_6 := 3.14 \cdot \frac{d_6^2}{4} = 1.65 \cdot \text{mm}^2$



Obr. 37 Hydraulický model, F-v charakteristika navrhnutého MR ventilu

Magnetický model MR ventilu je realizován v MKP systému Ansys Maxwell. Byly sestaveny dvě analýzy a to magnetostatická a přechodová. Model umožňuje změnu rozměrů či materiálů pro uspořádání magnetického obvodu v koncepci MR ventilu. Program v závislosti na velikosti magnetického pole v magnetických štěrbinách určí mez toku pro zvolenou MR kapalinu.

### Experimentální stanovení reologických vlastností MR kapalin

Během první fáze experimentů byly odměřeny tokové a viskozní křivky pro MR kapalinu od LORD MRF 122, LORD MRF 132 a LORD MRF 140 pro různé teploty. Jelikož metodika návrhu MR tlumiče by měla počítat, že tlumič bude možné provozovat i za snížených či vysokých teplot, byly experimenty provedeny v širokém rozsahu teplot. Konkrétně od -5°C do 100°C. Během experimentů se vyskytly problémy při měření viskozity při nízkých teplotách (vysokých viskozitách). Vlivem rotace měřícího elementu došlo s největší pravděpodobností k významnému ohřevu měřené kapaliny, což způsobilo významné snížení naměřené viskozity. Tento problém je předmětem dalšího výzkumu.

## 7 ZÁVĚR

Toto pojednání k dizertační práci shrnuje poznatky z oblasti konstrukce hydraulického vibroizolačního systému pro kosmické nosiče a MR technologie. V přehledu současného stavu poznání jsou z velké části popsány a diskutovány limity konstrukce odpružení užitečného nákladu, limity MR technologie vztahující ke konstrukci MR tlumičů či ventilů a simulační modely MR ventilu.

V práci byly identifikovány limity použití MR technologie při konstrukci MR ventilu. Jedná se o:

- minimální objem MR kapaliny,
- provozní houstnutí MR kapaliny,
- dwell time,
- teplotní závislost viskozity komerčně dostupných MR kapalin,
- provozní teplota MR kapaliny,
- časová odezva řídicí elektroniky,
- časová odezva magnetického pole,
- materiál těsnících manžet.

Byly identifikovány limity, které nejsou v odborné literatuře dostatečně popsány. Jedná se o teplotní závislost viskozity komerčně dostupných MR kapalin a vhodný materiál či typ těsnících manžet. Dále bylo identifikováno, že neexistuje vhodný hydraulický model MR ventilu.

Na základě shrnutí současného stavu poznání lze konstatovat, že neexistuje vhodná metodika návrhu rychlého semi-aktivního MR ventilu, která by zahrnovala jednotlivé limity MR technologie.

Na základě těchto dat byly upraveny cíle dizertační práce. V poslední části pojednání je shrnut aktuální stav řešení dizertační práce. Jak z této části vyplývá, podařilo se částečně splnit některé dílčí cíle a byl tak položen základ pro úspěšné splnění dizertační práce.

## 8 LITERATURA

- [1] YANG, G., B.F. SPENCER, J.D. CARLSON a M.K. SAIN. Large-scale MR fluid dampers: modeling and dynamic performance considerations. *Engineering Structures* [online]. 2002, vol. 24, issue 3, s. 309-323 [cit. 2015-05-03]. DOI: 10.1016/s0141-0296(01)00097-9.
- [2] JOLLY, M. R., J. W. BENDER a J. D. CARLSON. Properties and Applications of Commercial Magnetorheological Fluids. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* [online]. 1999, vol. 10, issue 1, s. 5-13 [cit. 2015-05-03]. DOI: 10.1177/1045389x9901000102.
- [3] ROUPEC, J. Mezní a degradační procesy magnetoreologických tlumičů odpružení. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojíního inženýrství, 2011. 140 s. Vedoucí disertační práce Doc. Ing. Ivan Mazůrek, CSc
- [4] RABINOW, J., The magnetic fluid clutch, *AIEE Trans.*, 1948, vol. 67, p. 1308.
- [5] KORDONSKY, W.I. Magnetorheological effect as a base of new devices and technologies. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* [online]. 1993, vol. 122, 1-3, s. 395-398 [cit. 2015-05-03]. DOI: 10.1016/0304-8853(93)91117-p.
- [6] CARLSON, J.D., D.M. CATANZARITE, K.A. St. CLAIR a J. DAVID CARLSON. Commercial magneto-rheological fluid devices. *International Journal of Modern Physics B*. 1996, vol. 10, 23n24, s. 621-628. DOI: 10.1142/9789812793607\_0071.
- [7] HA, Sung Hoon, Min-Sang SEONG a Seung-Bok CHOI. Design and vibration control of military vehicle suspension system using magnetorheological damper and disc spring. *Smart Materials and Structures* [online]. 2013, vol. 22, issue 6 [cit. 2015-05-24]. DOI: 10.1088/0964-1726/22/6/065006.
- [8] CHRISTENSON, J.D., D.M. SPENCER, K.A. St. CLAIR a J. DAVID CARLSON. Experimental Verification of Smart Cable Damping. *Journal of Engineering Mechanics*. 2006, vol. 132, issue 3, s. 621-628. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9399(2006)132:3(268).
- [9] GONCALVES, Fernando D, Mehdi AHMADIAN a J D CARLSON. Investigating the magnetorheological effect at high flow velocities. *Smart Materials and Structures* [online]. 2005, vol. 15, issue 1, s. 75-85
- [10] KOO, Jeong-Hoi, Fernando D GONCALVES a Mehdi AHMADIAN. A comprehensive analysis of the response time of MR dampers. *Smart Materials and Structures*. 2006-04-01, vol. 15, issue 2, s. 351-358.
- [11] GUAN, Xinchun, Pengfei GUO a Jinping OU. . In: Second International Conference on Smart Materials and Nanotechnology in Engineering.

- [12] STRECKER, Z. Optimalizace regulačního algoritmu MR tlumiče Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 114 s. Vedoucí disertační práce Doc. Ing. Ivan Mazůrek, CSc
- [13] JOHNSON. SoftRide Vibration and Shock Isolation Systems that Protect Spacecraft from Launch Dynamic Environments. In: *Proceedings of the 38<sup>th</sup> Aerospace Mechanisms Symposium*, Langley Research Center, 2006, s. 89-102.
- [14] DAVIS, Porter, Dave CUNNINGHAM a John HARRELL. Advanced 1.5 Hz passive viscous isolation system. In: *35<sup>th</sup> Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference* [online]. 1994 [cit. 2015-05-28]. DOI: 10.2514/6.1994-1651.
- [15] COBB, Richard G, Jeanne M SULLIVAN, Alok DAS, L Porter DAVIS, T Tupper HYDE, Torey DAVIS, Zahidul H RAHMAN a John T SPANOS. Vibration isolation and suppression system for precision payloads in space. *Smart Materials and Structures* [online]. 1999, vol. 8, issue 6, s. 798-812 [cit. 2015-05-08]. DOI: 10.1088/0964-1726/8/6/309.
- [16] SOHN, Jung Woo, Jong-Seok OH a Seung-Bok CHOI. Design and novel type of a magnetorheological damper featuring piston bypass hole. *Smart Materials and Structures* [online]. 2015, vol. 24, issue 3
- [17] CARLSON, J.David a Mark R JOLLY. MR fluid, foam and elastomer devices. *Mechatronics* [online]. 2000, vol. 10, 4-5, s. 555-569 [cit. 2015-05-28]. DOI: 10.1016/s0957-4158(99)00064-1.
- [18] MEMET, Unsal. Vibration Control of Parallel Platforms based on Magnetorheological Damping. In: Florida, 2006, s. 6.
- [19] ARIANE SPACE. Ariane 5 user's manual: Issue 5 revision 1 [online]. July 2001. [cit. 2015-05-24]. Dostupné z: [www.arianespace.com](http://www.arianespace.com)
- [20] DIXON, John C. The Shock Absorber Handbook. 1. vyd. Warrendale: SAE Society of automotive Engineers, 1999, 495 s. ISBN 07-680-0050-5.
- [21] Magnetic Circuit Design (1999) Engineering Note – Lord Corporation
- [22] LUO, Jinglin, Baukon YANG a Longlei DONG. Magnetic circuit design for magneto-rheological damper. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*. Amsterdam: IOS Pres, 2010, (33). DOI: 10.3233/JAE-2010-1190. ISSN 1383-5416.
- [23] SAHIN, Huseyin, Faramarz GORDANINEJAD, Xiaoije WANG a Alan FUCHS. . In: *Active and Passive Smart Structures and Integrated Systems 2007* [online]. 2007 [cit. 2015-05-27]. DOI: 10.1117/12.717714.
- [24] LORD, LORD technical data [online]. In: . [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: [www.lord.com](http://www.lord.com)

- [25] CARLSON, J. D. What Makes a Good MR Fluid?. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* [online]. 2002, vol. 13, 7-8, s. 431-435
- [26] ROUPEC, J.; MAZŮREK, I.: Stability of magnetorheological effect during long term operation, *Mechatronics*, pp.561-567, ISBN 978-3-642-23243-5, (2011), Springer-Verlag
- [27] STRECKER, Z., I. MAZŮREK, J. ROUPEC, M. KUBÍK a O. MACHÁČEK. The design of magnetorheological damper with short time response.
- [28] NGUYEN, Quoc-Hung, Young-Min HAN, Seung-Bok CHOI a Norman M WERELEY. Geometry optimization of MR valves constrained in a specific volume using the finite element method. *Smart Materials and Structures*[online]. 2007, 16(6): 2242-2252 [cit. 2015-06-13]. DOI: 10.1088/0964-1726/16/6/027.
- [29] LIAO, C R, D X ZHAO, L XIE a Q LIU. A design methodology for a magnetorheological fluid damper based on a multi-stage radial flow mode. *Smart Materials and Structures* [online]. 2012, 21(8) [cit. 2015-06-13]. DOI: 10.1088/0964-1726/21/8/085005.
- [30] JINGLING, Luo, Yang BAUKON a Dong LONGLEI. Magnetic circuit design for magneto-rheological damper. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics* [online]. Amsterdam: IOS Pres, 2010 [cit. 2015-06-17]. ISSN 1383-5416.
- [31] YOO, Jin-Hyeong a Norman M. WERELEY. Design of a High-Efficiency Magnetorheological Valve. *Journal of Intelligent Materials Systems and Structures* [online]. 2002, 13(10): 679-685 [cit. 2015-06-17]. DOI: 10.1177/1045389x02013010012.

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 MR efekt [3] .....	2
Obr. 2 F-v charakteristika MR tlumiče (Audi TT) [3].....	3
Obr. 3 MR zařízení [7], [1] .....	3
Obr. 4 Konstrukční uspořádání MR tlumiče [7] .....	6
Obr. 5 Pasivní viskózní tří-parametrická vzpěra [14].....	7
Obr. 6 Tří-parametrický izolační systém [14] .....	8
Obr. 7 Přenosová charakteristika navrhnuté vzpěry [14] .....	8
Obr. 8 Vzpěra s aktuátorem [15] .....	10
Obr. 9 Cívkový aktuátor [15].....	10
Obr. 10 Porovnání režimů [15] .....	11
Obr. 11 Reologické a magnetické vlastnosti MR kapalin [17].....	12
Obr. 12 Reologické vlastnosti MR kapalin [2] .....	14
Obr. 13 Různé koncepce MR ventilu [9].....	15
Obr. 14 Reologické a magnetické vlastnosti MR kapalin [9].....	16
Obr. 15 Mez kluzu v závislosti na dwell time [9].....	16
Obr. 16 Provozní houstnutí [25,26] .....	17
Obr. 17 Sepnutí proudu v cívkách MR tlumiče [10] .....	19

---

Obr. 18 Náběh síly MR tlumiče [10].....	19
Obr. 19 Náběh síly v závislosti na velikosti proudu [10].....	20
Obr. 20 Vliv řídicí elektroniky a indukčnosti cívky [10] .....	20
Obr. 21 Materiálové uspořádání [27] .....	21
Obr. 22 Časová odezva MR tlumiče v závislosti na proudu, dvojice 1 (zelená), dvojice 2 (modrá) [27] .....	22
Obr. 23 Rychlostí profil MR kapaliny v magnetickém poli [1] .....	23
Obr. 24 Paralelní desky [1].....	23
Obr. 25 Dynamický rozsah [1] .....	24
Obr. 26 Seizmický MR tlumič [1].....	25
Obr. 27 Vliv obtokové štěrbin [16] .....	26
Obr. 28 Experimentální řetězec [16] .....	26
Obr. 29 Vliv počtu štěrbin na F-v charakteristiku [16] .....	27
Obr. 30 B-H křivky [21].....	28
Obr. 31 Geometrie MR ventilu [31] .....	29
Obr. 32 Přenosová charakteristika v pasivní a semi-aktivní variantě [18].....	34
Obr. 33 Experimentální aparatura .....	35
Obr. 34 Schéma zapojení tlumící jednotky .....	36
Obr. 35 MR ventil, feritový materiál (červená), nízkouhlíková ocel (modrá), nerezová ocel (žlutá).....	36
Obr. 36 Tlumící jednotka .....	37
Obr. 37 Hydraulický model, F-v charakteristika navrhnutého MR ventilu.....	38