



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

## MAGNETOREOLOGICKÝ TLUMIČ KMITÁNÍ

MEGNETORHEOLOGICAL SHOCKABSORBER

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. JAROSLAV LAZAR

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. IVAN MAZŮREK, CSc.

BRNO 2011



Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav konstruování

Akademický rok: 2010/2011

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Jaroslav Lazar

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Konstrukční inženýrství (2301T037)**

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:

### **Magnetoreologický tlumič kmitání**

v anglickém jazyce:

### **Magnetorheological shockabsorber**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem diplomové práce je konstrukční návrh pístového hydraulického tlumiče s kombinovanou olejovou náplní (MR kapalina/běžný olej). MR jev bude využit pouze jako pomocný v tlakové části charakteristiky.

Cíle diplomové práce:

Diplomová práce musí obsahovat:

1. Úvod
2. Přehled současného stavu poznání
3. Formulaci řešeného problému a jeho technickou a vývojovou analýzu
4. Vymezení cílů práce
5. Návrh metodického přístupu k řešení
6. Návrh variant řešení a výběr optimální varianty
7. Konstrukční řešení
8. Závěr (Konstrukční, technologický a ekonomický rozbor řešení)

Forma diplomové práce: průvodní zpráva, technická dokumentace

Typ práce: konstrukční

Účel práce: pro V-V a tvůrčí činnost ÚK

Seznam odborné literatury:

ROUPEC, J. Mezní a degradační procesy magnetoreologických tlumičů odpružení, pojednání k SDZ, VUT v Brně, 2009

VLK, F. Podvozky motorových vozidel, Vlk Brno, 2000

ŠIKA, Z. Aktivní a poloaktivní snižování mechanického kmitání strojů, habilitační práce, ČVUT Praha, 2004

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

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/2011.

V Brně, dne 26.11.2010

L.S.

---

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

---

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.  
Děkan fakulty

### **ABSTRAKT**

Diplomová práce se zabývá konstrukčním návrhem externí expanzní nádoby k pístovému hydraulickému tlumiči, kde je kombinována náplň oleje a MR kapaliny. V první části práce je shrnut přehled existujících konstrukčních variant MR tlumičů a vlastností MR kapaliny. Dále práce popisuje návrh první experimentální varianty externí nádoby a ověření její funkčnosti na prototypu. Poslední část popisuje optimalizovanou konstrukci nádoby.

### **KLÍČOVÁ SLOVA**

Magnetoreologický tlumič, MR tlumič, magnetoreologická kapalina, externí expanzní nádoba

### **ABSTRACT**

This master's thesis deals with an engineering design of an external reservoir for hydraulic shock absorbers with combined filling of oil and magnetorheological fluid. The first part describes existing designs of magnetorheological shock absorbers and characteristics of magnetorheological fluid. Next part describes a design of an experimental external reservoir and a test of its functionality on a prototype. This is followed by an optimized engineering design of the experimental external reservoir.

### **KEYWORDS**

Magnetorheological shock absorber, MR damper, Magnetorheological fluid, external reservoir

### **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

LAZAR, J. *Magnetoreologický tlumič kmitání*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 57 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Ivan Mazůrek, CSc.

---



**ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně s pomocí vedoucího doc. Ing. Ivana Mazúrka, CSc. a v seznamu uvedl všechny použité literární i jiné zdroje.

.....

Datum

.....

Podpis

---





**PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji tímto doc. Ing. Ivanu Mazůrkovi, CSc. za cenné připomínky a rady při vypracování této práce.

---



**OBSAH**

<b>Úvod</b>	<b>13</b>
<b>1 Přehled současného stavu poznání</b>	<b>14</b>
1.1 Magnetoreologický tlumič	14
1.2 MR kapalina	15
1.2.1 Magnetoreologický efekt	15
1.2.2 Módy MR kapaliny	15
1.2.3 Aditiva	17
1.2.4 Částice MR kapalin	17
1.3 Přehled článků zabývajících se popisem MR tlumičů	17
1.3.1 Innovative Designs for Magneto-Rheological Dampers [9]	17
1.3.2 A unified modelling and model updating procedure for electrorheological and magnetorheological vibration dampers [10]	19
1.3.3 Development on 2DOF-type and Rotary-type shock absorber damper using MRF and their efficiencies [11]	21
1.3.4 Designing with MR Fluids [12]	21
1.4 Popis funkce tlumiče s externím rezervoárem	23
1.4.1 Popis funkce tlumiče	23
1.4.2 Nastavení charakteristiky tlumiče	25
1.4.3 Popis výhod a nevýhod jednotlivých komponent tlumičů	28
1.4.4 Tlaková bilance v tlumiči	29
1.5 Přehled základních vzorců pro návrh tlumiče	30
1.6 Matlab	31
1.6.1 Návrhu modelu	31
1.6.2 Popis jednotlivých bloků	32
<b>2 Formulace řešeného problému a jeho technická a vývojová analýza</b>	<b>35</b>
2.1 Formulace řešeného problému	35
2.2 Technická analýza	35
2.3 Vývojová analýza	36
<b>3 Vymezení cílů práce</b>	<b>37</b>
<b>4 Návrh metodického přístupu k řešení</b>	<b>38</b>
<b>5 Návrh variant řešení a výběr optimální varianty</b>	<b>39</b>
5.1 Varianta 1	39
5.1.1 Měření rovnoměrného rozložení elektromagnetického pole	40
5.1.2 Měření rychlostní charakteristiky	42
5.2 Varianta 2	44
<b>6 Konstrukční řešení</b>	<b>45</b>
6.1 Popis konstrukčního řešení	45
6.1.1 Šroubový spoj	46
6.1.2 Návrh magnetického obvodu	47
6.1.3 Navržení průtokové štěrbin	48
6.1.4 Výpočet tlaku a objemu plynu v nádobce.	50
<b>7 Závěr</b>	<b>51</b>
<b>8 Seznam použité literatury</b>	<b>52</b>
<b>9 Seznam použitých zkratk, symbolů a veličin</b>	<b>54</b>
<b>10 Seznam obrázků a grafů</b>	<b>55</b>

**11 Seznam tabulek**

**57**

### ÚVOD

Na jízdní vlastnosti automobilu má vliv velké množství pasivních prvků, mezi které patří závěs kola, systém řízení, brzdová soustava, rám, příčné stabilizátory, torzní tyče, pneumatiky, karoserie, těžiště vozu, atd., největší vliv však mají prvky odpružení a tlumení. Pokud ale nejsou všechny prvky správně implementovány do systému, odpružení a tlumení není plně efektivní.

Vzhledem k tomuto faktu je vývoj a výroba tlumičů velice rozšířeným odvětvím.

Také řidiči vozidel mají na jízdní vlastnosti mnohem větší nároky, je požadován vysoký komfort jízdy při maximální možné bezpečnosti, tohoto může být dosaženo zvolením vhodného tlumiče a jeho správným nastavením.

Tlumiče se dělí do tří skupin, pasivních, adaptivních a aktivních systémů. Pasivní systémy jsou nejjednodušší, nevyžadují vstupní energii pro regulaci a jsou nastavitelné pouze mechanicky, když je vozidlo v klidu. Zde můžeme zařadit klasický jednoplášťový hydraulický tlumič.

Adaptivní systém již vyžadují senzory a energii pro regulaci tlumiče pomocí například magnetoreologických či piezoelektrických ventilů. Tlumiče řadící se do této skupiny mívají zpravidla dvoustavové nastavení, jedno pro větší stabilitu vozidla, druhé pro větší komfort. Řadí se zde magnetoreologické tlumiče.

Poslední skupina jsou aktivní systémy, ty vyžadují velké množství energie i sensoriky. Tyto komplexní systémy mohou nastavovat světlou výšku vozidla, různou tuhost jednotlivých tlumičů a to vše během jízdy vozidla. Aktivní systémy odpružení vozidel jsou však velice drahé.

Práce má za úkol konstrukční návrh magnetoreologického tlumiče, ten se bude skládat z tlumiče libovolného výrobce a navržené externí expanzní nádoby, ve které bude kombinovaná náplň oleje a magnetoreologické kapaliny. Externí nádoba bude pomáhat v regulaci tuhosti tlumiče v tlakové části rychlostní charakteristiky pomocí aplikace magnetoreologického efektu. Tuhost bude možno regulovat i za jízdy vozidla pomocí potenciometru umístěného na palubní desce.

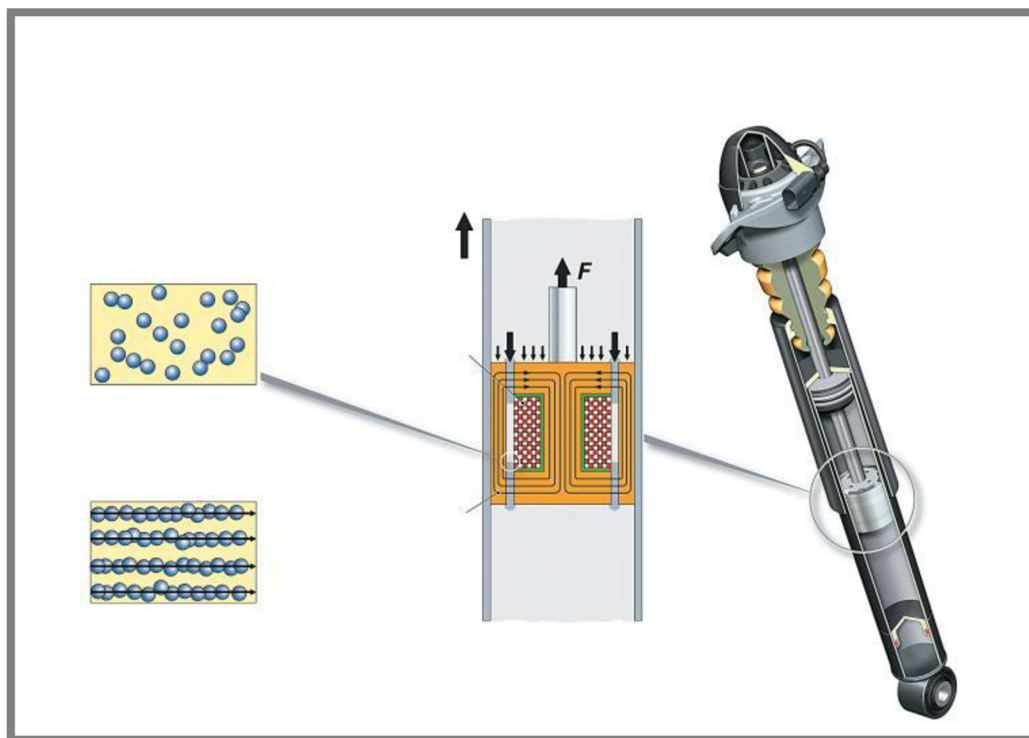
## 1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

Tlumič je zařízení, které slouží k tlumení nežádoucích kmitů a představuje dominantní prvek závěsu kola. Kinetickou energii transformuje pomocí smykového či viskózního tření na teplo, které odevzdává do okolí. Tlumič automobilu nemůže pracovat s lineární charakteristikou tlumicí síly, ale pracuje s nelineární charakteristikou v závislosti na rychlosti zdvihu kola.

Důvodem je rozdílná intenzita tlumení při zdvihu a poklesu kola, protože tlumič nesmí bránit stlačení pružiny při nájezdu na nerovnost, ale následně musí co nejlépe utlumit kmity způsobené tímto rozkmitáním. Tlumič udržuje pneumatiku v neustálém kontaktu s vozovkou a zvyšuje tím jak bezpečnost, tak jízdní komfort. V závěsech automobilu se nejvíce osvědčil teleskopický hydraulický tlumič, který k tlumení využívá vlastnosti spojené s viskózním třením. [1], [2]

### 1.1 Magnetoreologický tlumič

MR tlumiče různých typů a konstrukcí jsou vhodnou metodou, jak řešit tlumení rázů v konstrukcích. Jejich největší rozšíření je v automobilovém průmyslu. Jeho funkci lze popsat na lineárním jednoplášťovém MR tlumiči jež vychází z konstrukce klasického tlumiče. Tento model se skládá z pláště, pístu s cívkou, pístnice, magnetoreologické kapaliny, plovoucího pístu a stlačeného plynu. Tlumič je rozdělen pístem na dvě komory, které jsou zcela vyplněny MR kapalinou. Během pracovního pohybu protéká MR kapalina otvorem v pístu ve kterém působí elektromagnetické pole (obr. 1-1). To je tvořeno cívkou a jeho siločáry mají kolmý směr na pohyb pístu. Působí-li toto pole na MR kapalinu, nastává tzv. magnetoreologický efekt, zvýší se viskozita kapaliny a tím odporová síla. Tuto sílu lze regulovat velikostí magnetického pole, respektive velikostí proudu přiváděného na cívku. [2], [3], [4]



Obr. 1-1 Magnetoreologický tlumič [5]

## 1.2 MR kapalina

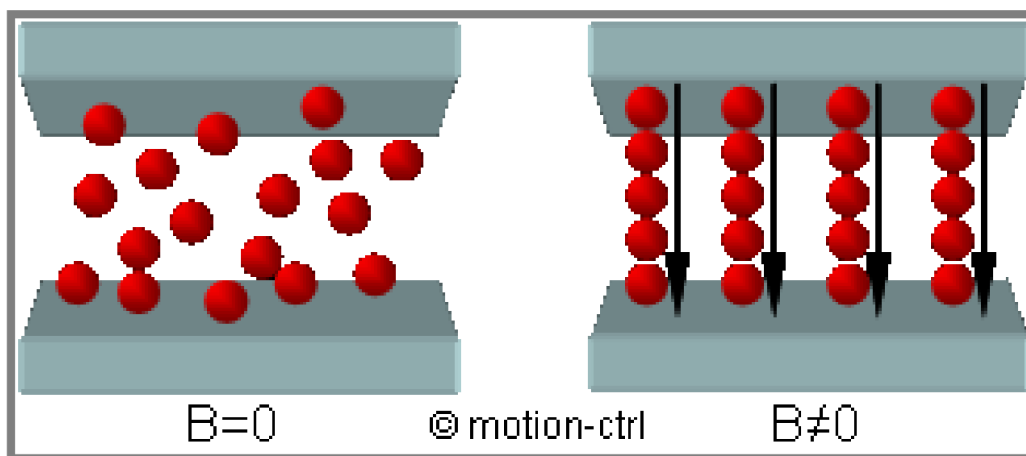
MR kapalina je suspenze složená z nosné kapaliny, železných částic a aditiv. Nosnou kapalinou bývá většinou olej či voda. Voda je nejlevnější nosnou kapalinou a má dobrý viskozitní index, ale způsobuje oxidaci a korozi železných částic, čímž zkracuje životnost MR kapaliny. Navíc nízký bod varu znemožňuje její použití ve většině aplikací.

Částice jsou z měkkého železa, mají velikost od 3 do 8  $\mu\text{m}$  a tvoří 20 – 40 % kapaliny. Mají většinou tvar kuliček. Aditiva slouží podobně jako u tlumičových olejů ke zlepšení vlastností kapaliny. U MR kapalin navíc zabráňují sedimentaci železných částic a zlepšují jejich mísivost. [2], [3], [4]

### 1.2.1 Magnetoreologický efekt

Magnetoreologický efekt (obr. 1-2) nastává v MR kapalině po jejím vystavení magnetickému poli. Vlivem působení homogenního magnetického pole se původně rovnoměrně rozptýlené mikročástice stanou magnetickým dipólem a začnou se shlukovat do řetězců ve směru magnetických siločar magnetického pole. Tento jev se také projeví změnou některých fyzikálních vlastností jako je viskozita nebo mez kluzu. Kapalina se tedy chová jako viskoplastická látka.

Když přestane magnetická síla působit, proces se obrátí a částice v řetězcích se zase volně rozptýlí po kapalině a ta získává původní vlastnosti. Kapalina se poté dá opět popsat jako Newtonovská. [2], [3], [4]



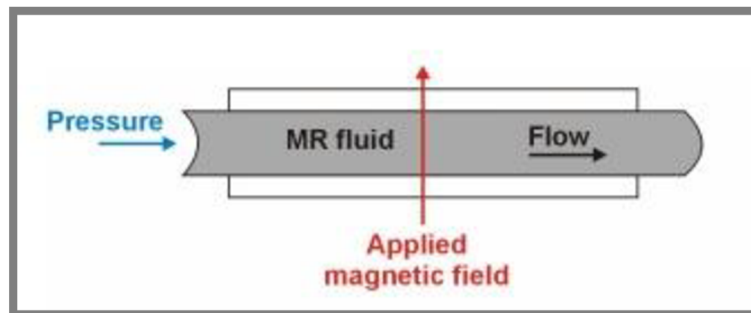
Obr. 1-2 Magnetoreologický efekt [6]

### 1.2.2 Módy MR kapaliny

Magnetoreologická kapalina operuje v několika módech, které se od sebe liší a jsou používány v různých aplikacích.

- **Ventilový mód**

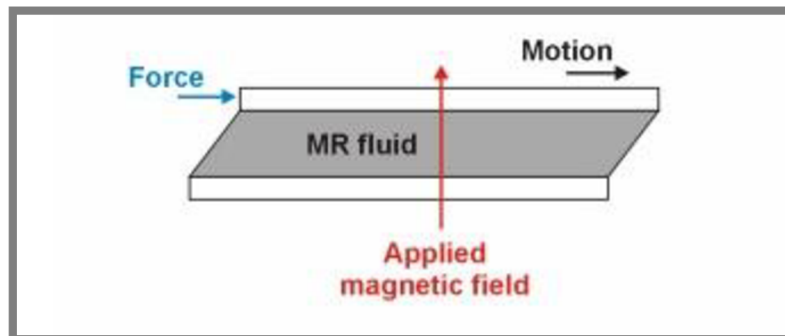
Ve ventilovém módu, který je znázorněn na Obr. 1-3 se kapalina nachází v prostoru mezi dvěma nehybnými póly. Odpor prodění kapaliny je řízen změnou magnetického pole mezi těmito póly, které je kolmé na směr proudu. Mezi zařízení která tento mód využívají patří ventily, MR tlumiče a aktuátory. [3], [7]



Obr. 1-3 Ventilový mód MR kapaliny [7]

- **Smykový mód**

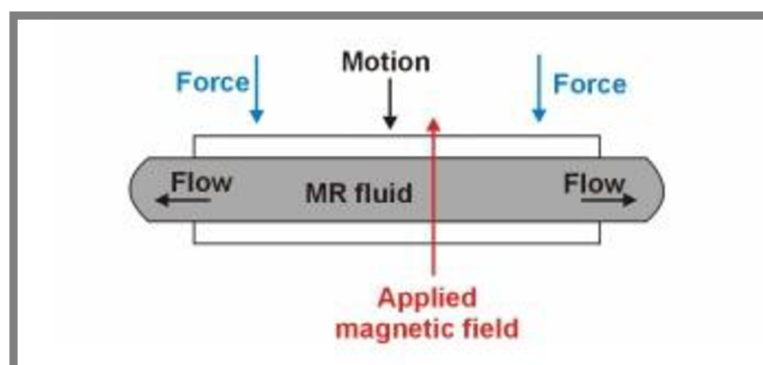
V tomto módu (obr. 1-4) je kapalina v klidu v prostoru mezi dvěma póly, které vykonávají vzájemný translační nebo rotační pohyb ve směru kolmém na magnetické siločáry. Odporová síla kapaliny je kontrolována pomocí magnetického pole. Tento mód využívají zařízení jako jsou tlumiče, brzdy a spojky. [3], [7]



Obr. 1-4 Smykový mód MR kapaliny [7]

- **Tlakový mód**

V tlakovém módu vyobrazeném na obr. 1-5 je kapalina mezi dvěma pohybujícími se póly, relativní pohyb rovnoběžný se směrem magnetických siločar. Komprimační síla působící na kapalinu se periodicky mění. Odporová síla je jako u předešlých módů kontrolována velikostí magnetického pole, ale pohyby pólů jsou zde velice malé. [3], [7]



Obr. 1-5 Tlakový mód MR kapaliny [7]



### 1.2.3 Aditiva

1.2.3

---

Aditiva látky zlepšující vlastnosti kapalin, mezi nejpoužívanější v magnetoreologických kapalinách se řadí detergenty, antioxidanty a diverzanty. Detergenty jsou aditiva s povrchovým účinkem, zamezují usazování nečistot na površích, případné již vytvořené nečistoty rozpouštějí. Díky detergentům kapalina lépe přilne k povrchům ploch. Antioxidanty omezují chemickou degradaci kapaliny, ke které dochází především za vyšších teplot a likvidací oxidačních činidel zamezují vzniku nežádoucích chemických sloučenin, které zkracují životnost kapaliny. Degradací kapalina tmavne a dochází ke změně její viskozity, což je velice nežádoucí. Disperzanty jsou látky pomáhající rozptýlení částic do celého objemu. [3], [8]

### 1.2.4 Částice MR kapalin

1.2.4

---

Částice MR kapalin se vyskytují v mnoha různých formách. Liší se velikostí, materiálem i strukturou. Požadované vlastnosti částic jsou následující:

- vhodná reakce na aplikované vnější magnetické pole
- nízká remanentní magnetizace (velikost magnetizace, která částici zůstane po odstranění magnetického pole)
- vysoká magnetická susceptibilita (veličina, která charakterizuje chování materiálu ve vnějším magnetickém poli)
- vysoká magnetická permeabilita. (fyzikální veličina, udávající míru magnetizace při působícím magnetickém poli)
- nízká koercivita (intenzita magnetického pole, která vyruší remanentní magnetizaci)
- chemická stabilita částic (oxidace, reaktivnost s aditivou)
- levná a snadná výroba

Mezi používané částice patří práškové železo, magnetit  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , nikl a vyvíjí se také kompozity, které mají dobré vlastnosti i bez aditiv a předchází problémům s oxidací, korozi a sedimentací. [3], [8]

## 1.3 Přehled článků zabývajících se popisem MR tlumičů

1.3

---

### 1.3.1 Innovative Designs for Magneto-Rheological Dampers [9]

1.3.1

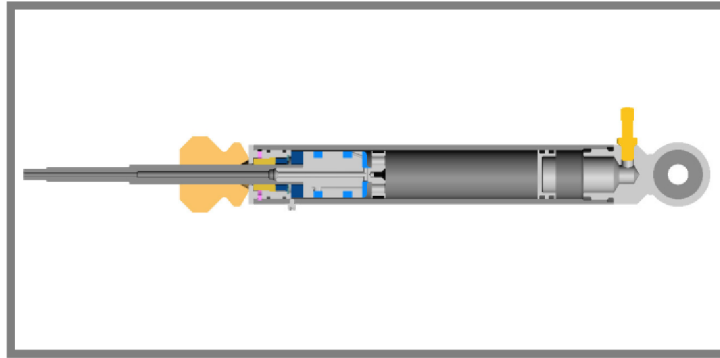
---

Práce obsahuje popis aplikací kde se používají MR tlumiče. Jsou zde zmíněny tlumiče sedadel, tlumiče automobilů, tlumiče budov pro ochranu před zemětřesením, tlumič zpětného rázu děla a tlumiče protéz dolních končetin. Práce dále obsahuje jednoduchý popis MR kapaliny a jejich 3 módů, přehled zdrojových článků a jednoduchý popis jednotlivých variant MR tlumičů. [9]

Typy magnetoreologických tlumičů jsou popsány níže:

- **jednoplášťový tlumič**

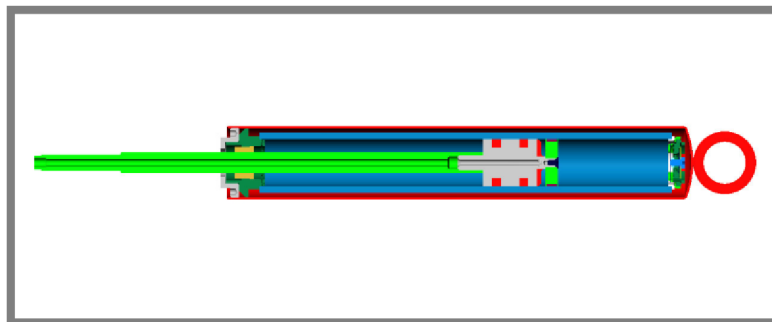
V jednom plášti se nachází MR kapalina, píst s cívkou i akumulátor, který slouží k vyrovnávání objemu kapaliny při zasouvání pístnice. Jako akumulátor slouží stlačený plyn oddělený od kapaliny plovoucím pístem. [9]



Obr. 1-6 Jednoplášťový MR tlumič [9]

- **dvouplášťový tlumič**

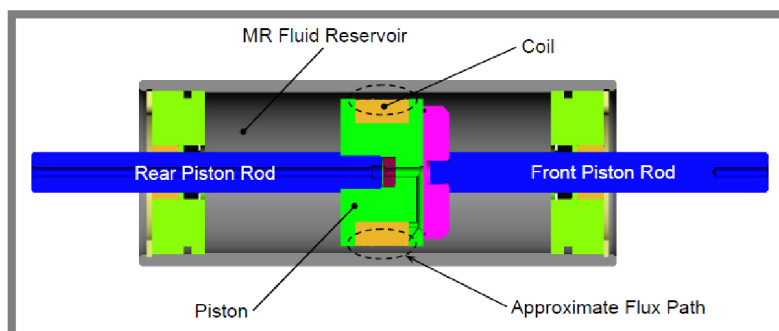
Dvouplášťový MR tlumič se skládá ze z vnitřního a vnějšího pláště, vnitřní plášť s pístem a pístnicí je shodný s jednoplášťovým tlumičem. Vnitřní prostor je od vnějšího oddělen spodním ventilem teleskopického tlumiče. Vnější prostor tlumiče slouží jako zásobník magnetoreologické kapaliny. [9]



Obr. 1-7 Dvouplášťový MR tlumič [9]

- **oboustranný tlumič**

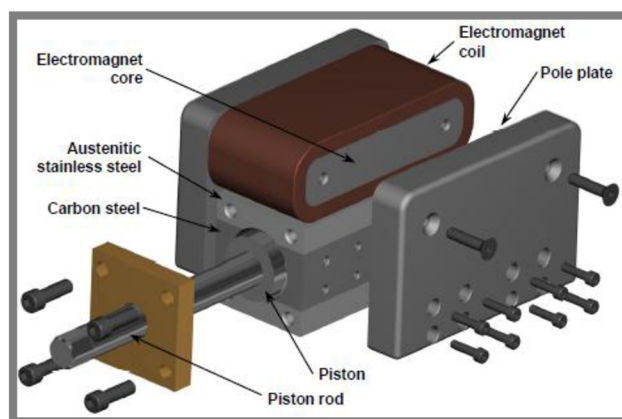
Oboustranný MR tlumič má konstrukci odlišnou od předešlých typů. Tělo tlumiče tvoří jako u předešlých trubka, ale pístnice má vyvedené na obě strany. Pomocí této konstrukce nevzniká v kapalině přetlak vsouváním pístnice do tlumiče, jelikož objem pístnice, který se vsune na jedné straně, se na druhé straně vysune a není třeba vzduchových akumulátorů energie, jako je tomu u předešlých konstrukcí. Oboustranný MR tlumič se využívá pro tlumení zpětného rázu u zbraní, snižování chvění budov při zemětřesení a snižování chvění mostů při nárazech větru. [9]



Obr. 1-8 Oboustranný MR tlumič [9]

- **tlumič zpětného rázu první generace**

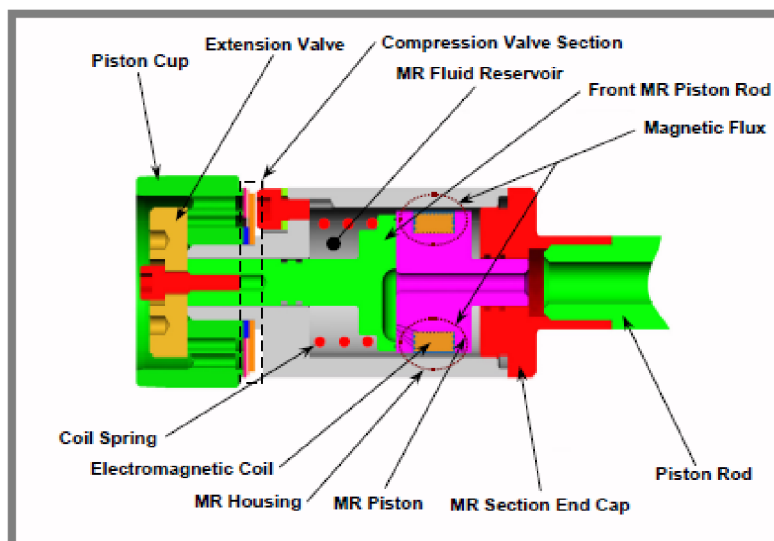
Tlumič je ze dvou typů oceli, nemagnetické austenitické a magnetické uhlíkové, aby nedocházelo k nesprávnému rozložení magnetických siločar. Na rozdíl od jiných MR tlumičů v tomto případě působí elektromagnetické pole na celý tlumič a MR efekt tak nastává v celém objemu kapaliny. Tyto tlumiče se používají k tlumení zpětného rázu děl. [9]



Obr. 1-9 MR tlumič zpětného rázu první generace[9]

- **hybridní MR tlumič**

Jedná se o upravený hydraulický tlumič od firmy KONI, typ Special D 88 1417. Místo pístu se škrtkovými ventily je zde zkonstruován miniaturní MR tlumič, pomocí kterého se reguluje průtok kapaliny ventily v pístu. [9]



Obr. 1-10 Hybridní MR tlumič[9]

### 1.3.2 A unified modelling and model updating procedure for electrorheological and magnetorheological vibration dampers [10]

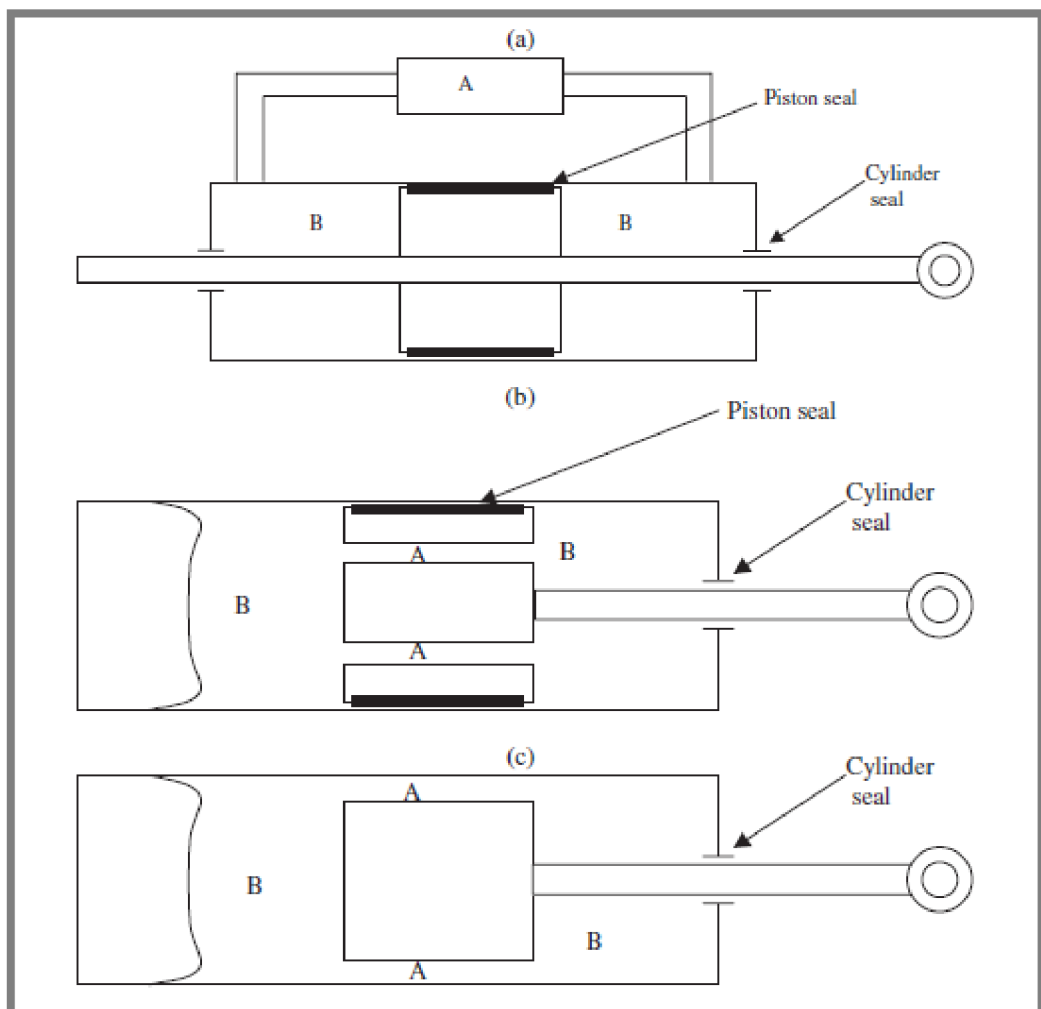
1.3.2

V článku jsou zde uvedeny tři konstrukční varianty MR tlumičů.

- Tlumič s bypassem je znázorněn na obr. 1-11 a). Magnetoreologický efekt probíhá v tomto případě mimo tělo tlumiče v části vyznačené písmenem A.

Výhodou této varianty je možnost zvolení libovolné velikosti cívky. MR kapalina prochází tenkým kanálkem v bypassu a využívá se zde její ventilový mód. [10]

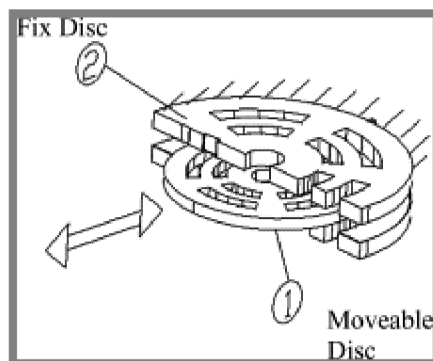
- Varianta zobrazená na obr. 1-11 b) využívá ventilový mód a MR kapalina je ovlivňována ve štěrbinách v pístu tlumiče v místě označeném písmenem A. V prostorách B je kapalina neovlivněná. Tento typ tlumiče musí mít plynový akumulátor energie, který kompenzuje změny objemu zasunuté pístnice do tlumiče. Nevýhodou je omezená velikost cívky, protože se musí vlézt do pístu tlumiče. [10]
- V poslední variantě vyobrazené na obr. 1-11 c) se využívá průtoku kapaliny v mezeře mezi pístem a pláštěm tlumiče. V tomto případě se v kapalině kombinuje ventilový mód způsobený průtokem kapaliny štěrbinou a smykový mód způsobený posunem pístu. Nevýhoda je stejná jako u předešlé varianty v omezené velikosti cívky. [10]



Obr. 1-11 Konstrukční varianty MR tlumičů [10]

### 1.3.3 Development on 2DOF-type and Rotary-type shock absorber damper using MRF and their efficiencies [11]

Článek popisuje rotační magnetoreologický tlumič, který byl vyvinut na základě potřeby zvýšení bezpečnosti a komfortu pacientů na lůžkách v sanitkách. Na obr. 1-12 je zobrazen princip tlumení, využívá se zde smykového módu. Vnitřní disk může rotovat, na rozdíl od vnějšího, který je fixován. Aby mohl vnitřní disk reagovat na lineární pohyb, rotační pohyb hřídele je přeměněn na pohyb lineární pomocí převodů. V porovnání s lineárním tlumičem má rotační tlumič větší tlumicí účinek, ale potřebuje mnohem větší objem MR kapaliny. [11]



Obr. 1-12 Disk rotačního MR tlumiče [11]

### 1.3.4 Designing with MR Fluids [12]

Článek popisuje postup při navrhování magnetoreologických zařízení jako jsou tlumiče a spojky. Uvedené vzorce vychází z předpokladu chování magnetoreologické kapaliny podle Binghamského modelu kapaliny

$$\tau = \tau_y (H) + \eta \dot{\gamma}, \quad \tau \geq \tau_y \quad (1)$$

kde:

$\tau$	Pa	celkové smykové napětí
$H$	$\text{Am}^{-1}$	intenzita magnetického pole
$\tau_y$	Pa	mez kluzu při aplikovaném magnetickém poli
$\dot{\gamma}$	$\text{s}^{-1}$	smyková rychlost kapaliny
$\eta$	$\text{Nsm}^{-2}$	viskozita v neaktivovaném stavu (tj. viskozita při $H=0$ )

Pod mezí kluzu se materiál chová viskoelasticky:

$$\tau = G \gamma, \quad \tau < \tau_y \quad (2)$$

kde:

$G$	Pa	komplexní materiálový modul
-----	----	-----------------------------

Skutečné chování MR kapaliny se od modelu liší, nejvýznamněji bez působení magnetického pole. Při působení magnetického pole jsou zde popsány dva módy, ventilový a smykový.

- tlakově řízený mód

$$\Delta P = \Delta P_{\eta} + \Delta P_{\tau} = \frac{12\eta QL}{g^3 w} + \frac{c\tau_y L}{g} \quad (3)$$

kde:

$\Delta P$	Pa	tlakový spád
$\Delta P_{\eta}$	Pa	viskózní část tlakového spádu
$\Delta P_{\tau}$	Pa	část meze kluzu indukovaná magnetickým polem
L	m	délka
g	m	výška
w	m	šířka tokového kanálku mezi pevnými deskami
Q	m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup>	objemový průtok
$\eta$	Nsm <sup>-2</sup>	viskozita kapaliny bez aplikovaného pole
c		konstanta (v rozmezí 2-3)

- smykový mód

$$F = F_{\eta} + F_{\tau} = \frac{\eta S A}{g} + \tau_y A \quad (4)$$

kde:

F	N	síla
$F_{\eta}$	N	viskózní část síly
$F_{\tau}$	N	část síly meze kluzu
S	m.s <sup>-1</sup>	relativní rychlost povrchu
A = L.w		smyková plocha desky.

### Aktivní objem kapaliny a charakteristický poměr zařízení

Často používané rovnice při návrhu regulovatelného MR zařízení neposkytují vhodný náhled na významnost proměnných parametrů. Proto je zaváděn minimální aktivní objem kapaliny V. To je objem kapaliny vystavené magnetickému poli, jenž je zodpovědný za zajištění požadovaného MR efektu.

$$V = k \left( \frac{\eta}{\tau_y^2} \right) \lambda W_m \quad (5)$$

kde :

k		konstanta
V=L.w.g		minimální nutný objem aktivní kapaliny
$\lambda$		řídící poměr
$W_m$	W	mechanický výkon

Pro tlakově řízený tok platí:

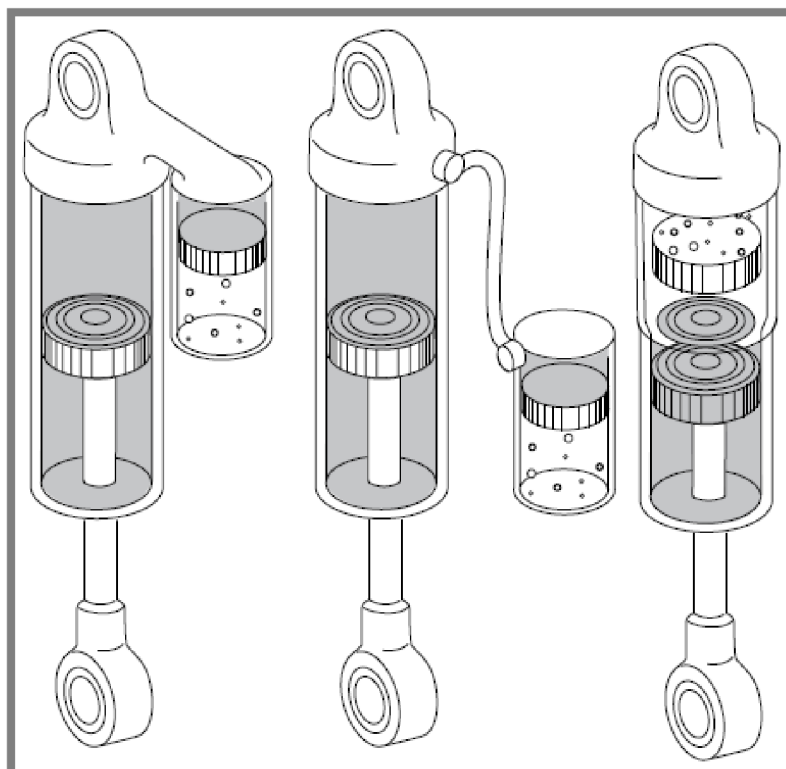
$$k=12/c^2 \quad \lambda = \Delta P_{\tau} / \Delta P_{\eta} \quad W_m = Q \cdot \Delta P_{\tau}$$

Pro smykový mód:

$$k=1 \quad \lambda = F_{\tau} / F_{\eta} \quad W_m = F_{\tau} \cdot S$$

### 1.4 Popis funkce tlumiče s externím rezervoárem

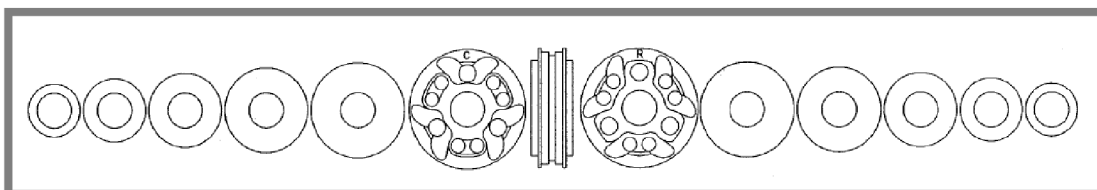
Jsou to jednoblašťové, většinou vysokotlaké tlumiče, ke kterým je připojena externí nádoba se zásobou kapaliny a stlačeným plynem. Podle typu připojení rezervoáru se dělí na tzv. „piggyback“ tlumiče – rezervoár je pevně připojen k vrchu tlumiče a na tlumiče s rezervoárem připojeným pomocí vysokotlaké hydraulické hadice. Do této skupiny tlumičů můžeme také zařadit poslední typ, kdy je rezervoár připojen přímo na plášti tlumiče a je od tlumiče oddělen základní deskou, na které jsou umístěny škrťací a zpětné ventily. Tyto typy tlumičů jsou znázorněny na obrázku 1-13. [14], [15]



Obr. 1-13 Typy tlumičů s externím rezervoárem [15]

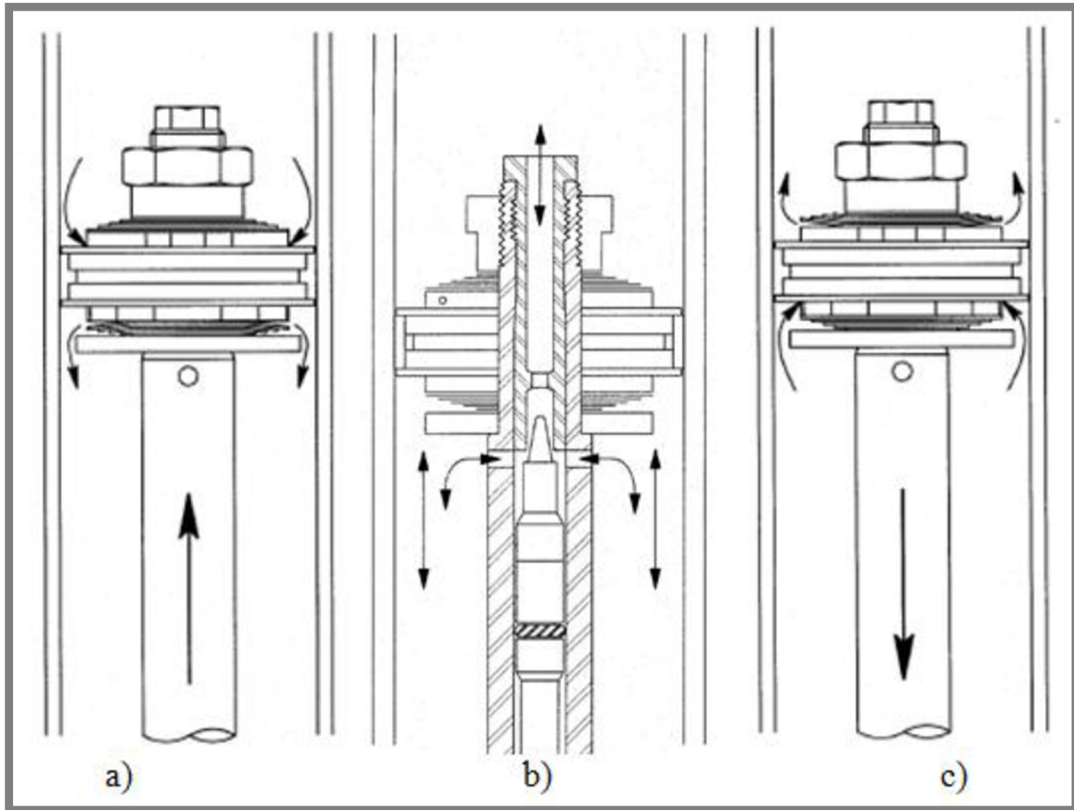
#### 1.4.1 Popis funkce tlumiče

Funkce tlumiče s externím rezervoárem bude popsána na třicetném tlumiči PENSKE řady 8760. Při stlačování tlumiče se do pracovního válce zasouvá pístnice a pohybuje pístem. Skrze škrťací ventily v pístu se olej přelévá z prostoru nad pístem do prostoru pod píst. Píst (obr. 1-14) se skládá z hliníkového válce s určitým počtem otvorů a dvou sad planžet. [13], [16]



Obr. 1-14 Píst se sadami planžet [16]

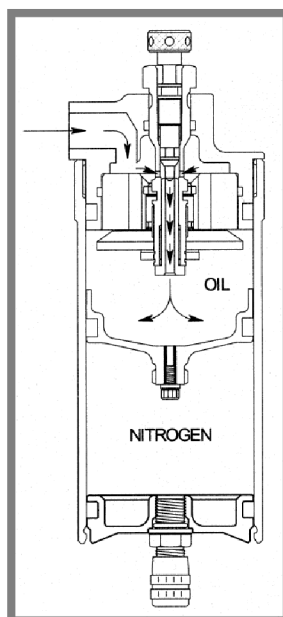
Při pomalých pístových rychlostech proudí olej pouze přes štěrbinu v pístnici, která je regulovatelná pomocí posouvání jehly viz obr. 1-15 b. Při vyšších rychlostech se tlak na kompresní straně tlumiče zvýší, až dosáhne velikosti, kdy se odkloní kompresní sada planžet a umožní průtok oleje i otvory v pístu viz obr. 1-15 a. Sada planžet pro odskok tlumiče zůstává v této fázi uzavřená. [13], [16]



Obr. 1-15 Průtok oleje přes štěrbinu v pístu [16]

Nadbytečný objem kapaliny, který vznikl zasunutím pístnice do pracovního válce je vytlačován do externího rezervoáru přes systém škrťících ventilů (obr. 1-16), kde je možná další regulace průtoku kapaliny. System je podobný jako na pístu, při malých pístních rychlostech olej protéká tryskou, jejíž průtok je regulován pohybem jehly, která se pomocí otočného kolečka zasouvá nebo vysouvá z trysky. Při vysokých rychlostech se zvětší tlak a olej začne protékat také kolem odtlačených planžet. V rezervoáru způsobuje přilévající olej pohyb plovoucího pístu, kterým je od kapaliny oddělen stlačený plyn, nejčastěji dusík. Při roztahování tlumiče je olej z rezervoáru tlačěn zpět do těla tlumiče přes zpětné ventily. Tlak plynu pomáhá tlačít olej zpět a zabraňuje tím případnému vzniku kavitace. Průtok oleje přes píst při roztahování tlumiče je podobný jako při jeho stlačování, při malých rychlostech olej protéká tryskou a při vysokých se otevře škrťící ventil tvořený soustavou děr v pístu a planžet. [13], [16]





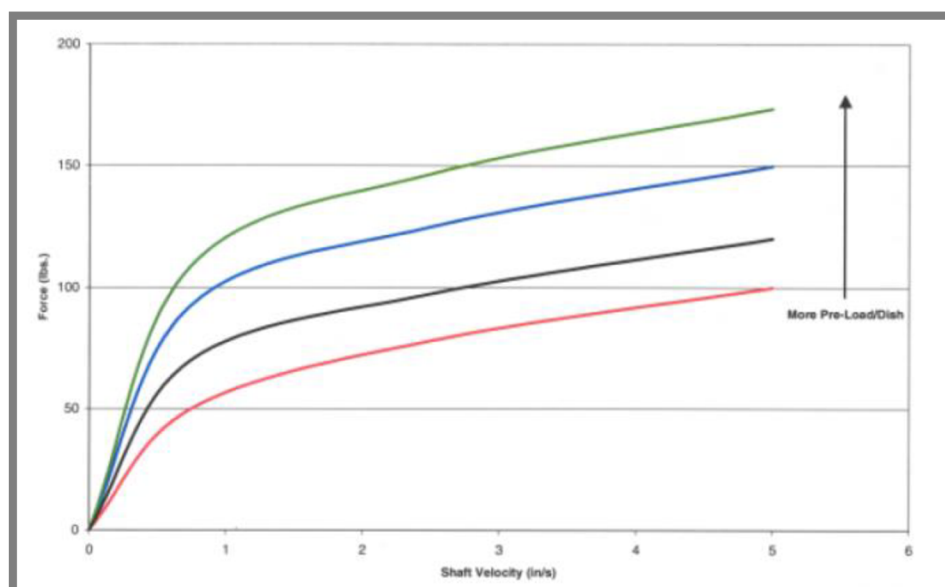
Obr. 1-16 Externí nádoba [16]

## 1.4.2 Nastavení charakteristiky tlumiče

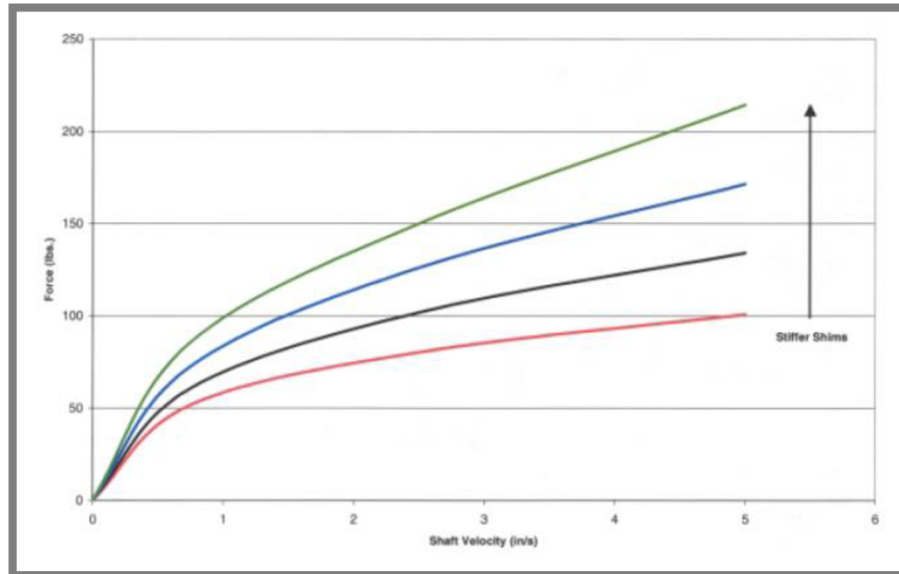
1.4.2

### Kompresní tlumení

Nastavení charakteristiky tlumiče při kompresním tlumení závisí na mnoha aspektech. Základním prvkem je píst s průchozími dírami a planžetami. Pomocí různých velikostí a tvarů děr spolu s předpětím a druhem planžet vytvoří základní tvar charakteristiky. V následujícím grafu rychlostní charakteristiky na obrázku 1-17 je naznačen vliv předpětí planžet. Čím je větší předpětí, tím více roste tlumící síla v závislosti na pístové rychlosti. V grafu na obr. 1-18 je znázorněn vliv tloušťky planžet. Při použití silnějších planžet se charakteristika stává strmější. Tyto úpravy charakteristik se vše provádí pouze při výrobě tlumiče, nebo při jeho demontáži a rozebrání, čili lze toho nastavení považovat za velice obtížné a časově náročné. [13], [16]



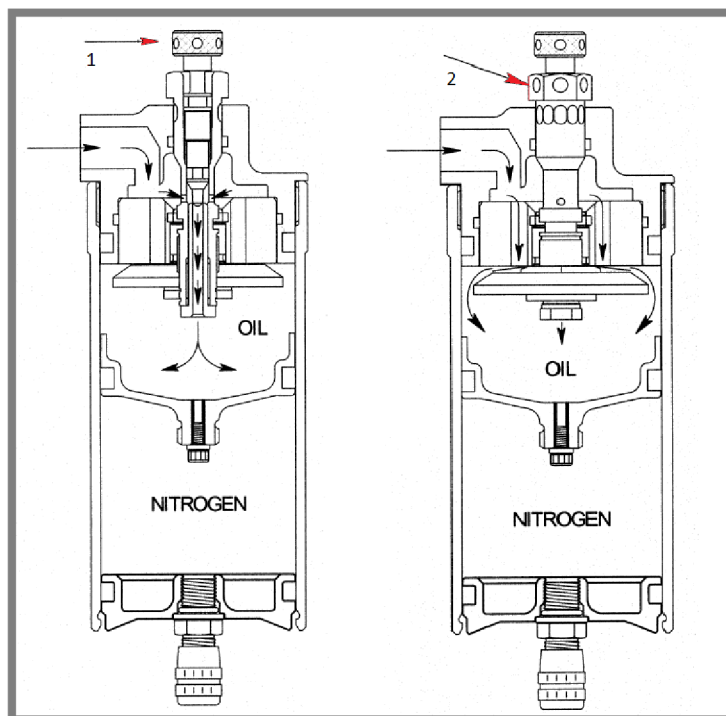
Obr. 1-17 Závislost rychlostní charakteristiky na předpětí planžet [16]



Obr. 1-18 Závislost rychlostní charakteristiky na tloušťce planžet [16]

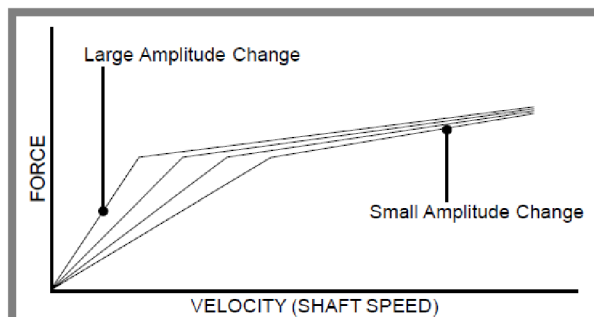
Jednoduché nastavování tlakové části rychlostní charakteristiky se provádí na externím rezervoáru. Jsou zde dvě nastavovací kolečka (obr. 1-19), jedno pro nastavování charakteristiky pro nízké rychlosti. Tím se upravuje zasouvání jehly do trysky, čímž se řídí průtok kapaliny.

Při vyšších rychlostech pístu, kdy kapalina nestačí protékat tryskou, odklopí se planžety a kapalina začne protékat kolem nich. Předpětí těchto planžet je regulovatelné druhým kolečkem na externím rezervoáru. [16]



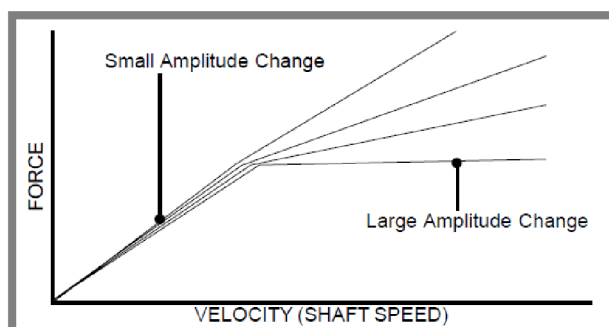
Obr. 1-19 Nastavovací kolečka externího rezervoáru [16]

Na obrázku 1-20 je znázorněna změna rychlostní charakteristiky při nastavování průtoku pomocí prvního ovládacího kolečka. Charakteristika se převážně mění v části pro malé posuvné rychlosti, s postupným uzavíráním trysky se graf napřimuje. [16]



**Obr. 1-20** Změna tlakové části rychlostní charakteristiky při změně průtoku kapaliny [16]

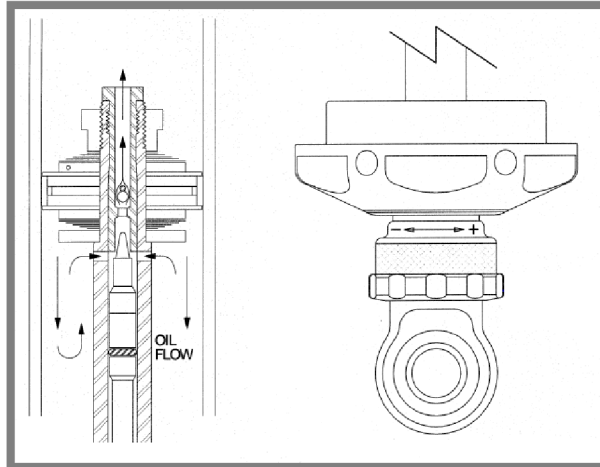
Na grafu 1-21 je vliv nastavení druhého kolečka na tuto charakteristiku. Je patrné, že se převážně mění sklon křivky při vysokých rychlostech. Čím větší předpětí se na planžetách nastaví, tím více je tlumič tužší. [16]



**Obr. 1-21** Změna tlakové části rychlostní charakteristiky při změně předpětí na planžetách [16]

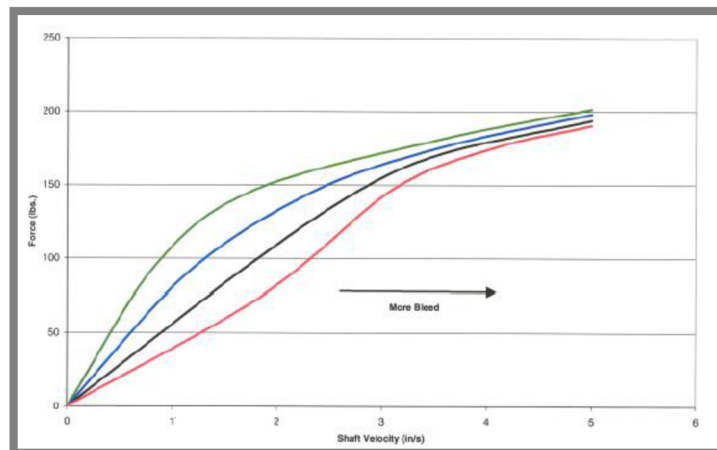
### Tlumení odskoku

Nastavení základní charakteristiky tlumiče pro tahovou část se provádí stejně jako u tlakové části výběrem pístu s dírami, poskládáním sady planžet a nastavením jejich předpětí. Toto nastavení se provádí při výrobě nebo rozmontování tlumiče. Nastavení bez demontáže tlumiče se provádí pomocí kolečka u úchytu tlumiče na pístnici (obr. 1-22). Pomocí kolečka se nastavuje zasunutí jehly do trysky a tím nastavuje průtok kapaliny. Při nízkých rychlostech prochází olej pouze touto cestou, při vyšších rychlostech touto cestou nestačí procházet, zvýší se tlak v tažné části tlumiče na takovou hodnotu, která otevře planžety a kapalina začne proudit i kolem planžet. Toto nastavení se projevuje především v části rychlostní charakteristiky pro pomalé rychlosti viz obr. 1-23. [16]



Obr. 1-22 Nastavovací kolečko tlumení odskoku [16]

Nastavování průtoku tryskou v pístu tlumiče má vliv jak na tlakovou, tak tažnou část rychlostní charakteristik a to v poměru 90% tažnou a 10% tlačnou část. [16]



Obr. 1-23 Změna tahové části rychlostní charakteristiky při změně průtoku [16]

### 1.4.3 Popis výhod a nevýhod jednotlivých komponent tlumičů

Konstrukce jednoplášťového tlumiče je vhodnější oproti dvouplášťovému díky použití pístu s větším průměrem, ten je citlivější při malých posuvech a umožňuje tak přesnější regulaci. [13], [16]

Mezi další výhody těchto tlumičů patří jednoduchá konstrukce a velká možnost nastavení charakteristiky tlumení. Další výhodou je, že stlačený plyn udržuje tlak v systému a tím předchází vzniku kavitace při rychlých posuvech pístu. Rezervoáry přispívají k většímu odvodu tepla, tím lepšímu chlazení kapaliny. Tlumiče mají sice více olejové náplně, ale to také napomáhá k jeho menšímu zahřívání. Všechny tyto výhody prodlužují životnost jak kapaliny, tak i jednotlivých komponent tlumiče.

Připojení externí nádržky přes vysokou hadici má řadu výhod, umožňuje její libovolné umístění, čímž šetří místo na tlumič u kola automobilu. Může být vyvedena na místo s dobrým přístupem, kde se bude tlumič jednodušeji nastavovat. K nevýhodám patří rozpínání hadice, což může ovlivňovat charakteristiku tlumiče.

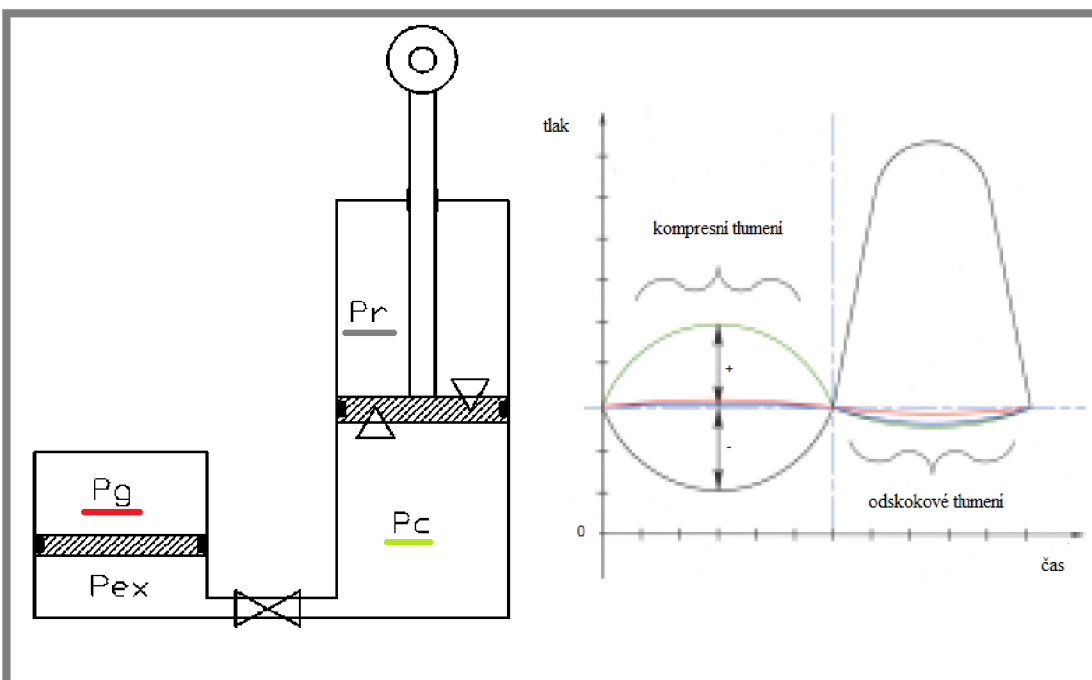
Taky hrozí poškození či přetržení vysokotlaké hadice při nevhodném umístění externí nádržky. [13], [16]

Plovoucí píst má oproti membráně výhody i nevýhody. Mezi nevýhody patří, že mezi vnitřní stěnou rezervoáru a pístem vzniká tření, které je třeba překonat, při opotřebení těsnění může dojít k promísení kapaliny s plynem a již při mírném poškození těla rezervoáru může být zastaven pohyb pístu a tím zamezena jeho funkce. U membrány hrozí její náhlé protržení, což by mělo za následek smíchání plynu s kapalinou a tlumič by přestal správně pracovat. Toto u plovoucího pístu nehrozí. Výhodou plovoucího pístu je mnohem snadnější odvzdušňování tlumiče díky možnosti přidání odvzdušňovacího šroubku do pístu. Dále plovoucí píst lépe přenáší výkon, díky kterému můžeme použít menší píst než membránu a tím minimalizovat velikost externího rezervoáru. [13], [16]

Zpětné ventily v externí nádržce slouží k regulaci tlumiče, pomocí jejich nastavení se mění průtok kapaliny z nádržky i do ní, čímž se upravuje jak tlumicí charakteristika, tak charakteristika při roztažení tlumiče. Mezi největší výhody použití zpětných ventilů při kompresním tlumení patří, že omezují rychlost toku kapaliny do externí nádržky, což brání vzniku kavitace v prostoru nad pístem. Také díky tomuto ventilu není třeba používat vysoké tlaky jako u jednoplášťových tlumičů bez externí nádržky. [13], [16]

#### 1.4.4 Tlaková bilance v tlumiči

Na obrázku 1-24 je znázorněno ideální rozložení tlaků v tlumiči při jednom cyklu stlačení a roztažení. Při zasouvání nejvíce naroste tlak  $P_c$  v kompresní komoře, který je na obrázku vyznačen zeleně, naopak tlak v odskokové komoře  $P_r$ , zobrazený šedě, dosahuje minima. Obráceně je tomu při roztažování tlumiče, tehdy značně naroste tlak  $P_r$  a  $P_c$  klesá. Tlak plynu  $P_g$  znázorněný červenou křivkou se chová podobně jako  $P_c$ , při zasouvání stoupá, při roztažování klesá. Důležité je nastavení počátečního tlaku tlumiče tak, aby ani při nejvyšších poklesech tlaku nedocházelo ke kavitaci. [17]



Obr. 1-24 Tlaková bilance v tlumiči [17]

## 1.5 Přehled základních vzorců pro návrh tlumiče

Minimální objem plynu v rezervoáru

$$V_{\min} = S_r \cdot x_{\max} \quad (6)$$

kde:

$V_{\min}$	$\text{m}^3$	minimální objem plynu
$x_{\max}$	$\text{m}$	maximální délka zasunuté pístnice v pístu
$S_r$	$\text{m}^2$	plocha pístnice

Minimální tlak plynu v rezervoáru aby nedošlo ke kavitaci

$$p_{\min} = \frac{F_{\max}}{S_p - S_r} \cdot k \quad (7)$$

kde:

$p_{\min}$	$\text{Pa}$	minimální tlak
$F_{\max}$	$\text{N}$	maximální tlumící síla
$S_p$	$\text{m}^2$	plocha pístu
$S_r$	$\text{m}^2$	plocha pístnice
$k$		bezpečnostní koeficient

Tlakový spád při průtoku štěrbinou

$$\Delta p = \frac{12 \cdot \eta \cdot Q \cdot l}{h^3 b} \quad (8)$$

kde:

$\Delta p$	$\text{Pa}$	tlakový spád
$\eta$	$\text{Nsm}^{-2}$	dynamická viskozita
$Q$	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	průtok
$l$	$\text{m}$	délka štěrbiny
$h$	$\text{m}$	tloušťka štěrbiny
$b$	$\text{m}$	šířka štěrbiny

Tlumící síla působící v kompresní části tlumiče

$$F_k = \Delta p \cdot S_p \quad (9)$$

$F_k$	$\text{N}$	tlumící síla v kompresní části
$\Delta p$	$\text{Pa}$	tlakový spád
$S_p$	$\text{m}^2$	plocha pístu

Tlumící síla působící v odskokové části

$$F_r = \Delta p \cdot (S_p - S_r) \quad (10)$$

$F_r$	$\text{N}$	tlumící síla v odskokové části
$\Delta p$	$\text{Pa}$	tlakový spád
$S_p$	$\text{m}^2$	plocha pístu
$S_r$	$\text{m}^2$	plocha pístnice

[1], [13]

## 1.6 Matlab

Software Matlab je programové prostředí sloužící k numerickým výpočtům, virtuálnímu modelování, navrhování algoritmů, simulacím, analýze a vizualizaci dat. Je to interaktivní systém, jehož základním prvkem je bezrozměrná matice. Umožňuje rychlé řešení i složitých úloh, aniž by bylo nutné znát veškerou matematickou podstatu těchto problémů. Matlab má jednoduché programování, které se podobá matematickému zápisu. [18]

### Simulink

Simulink je nadstavbové prostředí Matlabu, které slouží k modelování a simulaci dynamických systémů. Využívá k tomu algoritmy Matlabu pro numerické řešení nelineárních diferenciálních rovnic. Pomocí jeho grafického editoru lze vytvářet modely lineárních i nelineárních systémů pouhým vkládáním funkčních bloků. Hierarchická struktura modelů umožňuje vytvářet i velice složité systémy do přehledné soustavy subsystémů prakticky bez omezení počtu bloků. Simulink má rozsáhlou knihovnu těchto bloků a tato knihovna může být rozšířena přidavnými toolboxy, nebo si uživatel může vytvořit vlastní bloky podle potřeby. Každý blok má určitý počet parametrů, které musí uživatel specifikovat. Parametry jednotlivých bloků se zadávají přímo jako číselné konstanty, nebo jako proměnné, které mohou být definovány v základním prostředí Matlabu. [19]

### Simscape

Toolbox Simscape rozšiřuje Simulink o modelování a simulování mechanických, elektrických a hydraulických komponent, či jejich kombinaci. Model systému se zde tvoří podobně jako při skládání fyzického modelu. Jednotlivé bloky, které zastupují určité součástky, se skládají ve správném pořadí za sebe a propojují se. Simscape automaticky vytvoří rovnice, které popisují chování tohoto systému, vloží parametry zadané uživatelem v jednotlivých blocích a pomocí zvoleného řešiče problém vyřeší. [19]

### SimHydraulics

Další toolbox rozšiřující knihovnu Simulinku o bloky pro modelování hydraulických systémů. Obsahuje více než 45 modelů hydraulických a mechanických komponent, včetně modelů pro hydrogenerátory, hydromotory, akumulátory, ventily a hydraulické vedení. Tyto bloky je možné dále kombinovat, vložit do subsystémů, parametrizovat a vytvořit tím bloky vlastní. [19]

#### 1.6.1 Návrhu modelu

Modelovat tlumič v programu Matlab lze pomocí matematických rovnic a fyzikálních vztahů mezi jednotlivými komponentami tlumiče, či pomocí blokových schémat v nadstavbě Simulink. V této práci je popsán jednoduchý postup vytváření modelu v nadstavbě Simulink. Výhodou vytváření modelu v tomto prostředí je jednoduchost a rychlost. Do nového okna prostřední Simulink se vkládají bloky jednotlivých knihoven dle potřeby. Nejsnadnější metodou vytváření modelu systému

je postupné vkládání bloků a okamžitá definice jejich parametrů. Tím se zamezí možnému opomenutí předefinování některých parametrů bloku z výchozího nastavení. Každý blok má předem nastaveny výchozí hodnoty, které se mohou značně lišit od požadovaných hodnot a tím zcela změnit výsledky simulace. [19]

### 1.6.2 Popis jednotlivých bloků

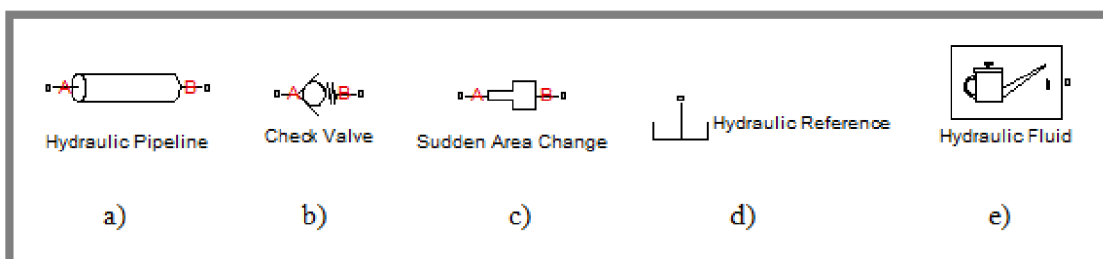
Hydraulic pipeline (obr. 1-25 a) modeluje hydraulické potrubí s kruhovým či jiným průřezem. Je určen k výpočtům třecích ztrát prouděním kapaliny v potrubí a pro kompresibilitu kapaliny. Blok nemodeluje setrvačnost kapaliny. Mezi zadávané parametry patří tvar příčného průřezu, vnitřní průměr, délka, drsnost vnitřního povrchu, ekvivalentní délka místních ztrát, hranice mezi turbulentním a laminárním prouděním a součinitel teplotní roztažnosti. [19]

Blok Check Valve (obr. 1-25 b) modeluje zpětný ventil, propouští tok kapaliny v jednom směru a blokuje průtok ve směru opačném. Ventil zůstává uzavřen, dokud tlak kapaliny nedosáhne nastavené hodnoty. Po dosažení kritické hodnoty se při dalším zvyšování tlaku ventil dále otevírá až po dosažení maximálního otevření. Zadávané parametry jsou maximální průtoková plocha, tlak potřebný pro otevření ventilu, maximální otevírací tlak, koeficient průtoku kapaliny, kritické Reynoldsovo číslo a plocha úniku kapaliny. [19]

Blok Sudden Area Change (obr. 1-25 c) reprezentuje lokální hydraulický odpor náhlou změnou velikosti průměru příčného průřezu. Odpor je charakterizován jako náhlé zvětšení či zmenšení průtoku kapaliny. Sudden Area Change nabízí dvě metody specifikace problému, pomocí semi-empirických vztahů, či pomocí zadání tabulkových hodnot místních ztrát v závislosti na velikosti Reynoldsova čísla. Parametry bloku jsou malý průměr, velký průměr, upravující koeficient a kritické Reynoldsovo číslo. [19]

Blok Hydraulic Reference (obr. 1-25 d) slouží jako propojení s atmosférou a jako zásobník kapaliny. Nežadávají se zde žádné parametry

Blok Hydraulic Fluid (obr. 1-25 e) reprezentuje vlastnosti kapaliny v hydraulickém okruhu, ke kterému je připojen. Každý oddělený hydraulický okruh musí mít vlastní definované vlastnosti. Jsou zde dva bloky, jeden s předdefinovanými kapalinami, u kterých se nastaví pouze teplota a relativní množství obsaženého vzduchu a druhý, kde je možno vytvořit kapalinu vlastní, zde jsou zadávané parametry hustota, kinematická viskozita, modul pružnosti a relativní množství obsaženého vzduchu v kapalině. [19]



Obr. 1-25 Vybrané bloky programu Matlab Simulink [19]



Blok Sine Wave (obr. 1-26 a) generuje sinusovou vlnu. Může sloužit jako bezrozměrný vstup pro ideální zdroj průtoku či ideální zdroj tlaku. Zadávanými parametry jsou amplituda, frekvence, počáteční fáze, čas a konstanta určující posunutí po ose y. [19]

Solver Configuration (obr. 1-26 b) je prvek definující výpočetní zařízení nastavené pro simulaci. K tomuto prvku je třeba dále nastavit konfigurační parametry výpočtu. Patří mezi ně řešič, typ a velikosti jednotlivých kroků, čas simulace, tolerance výpočtů a další. Přehled řešičů je v následující tabulce (Tab. 1-1). [19]

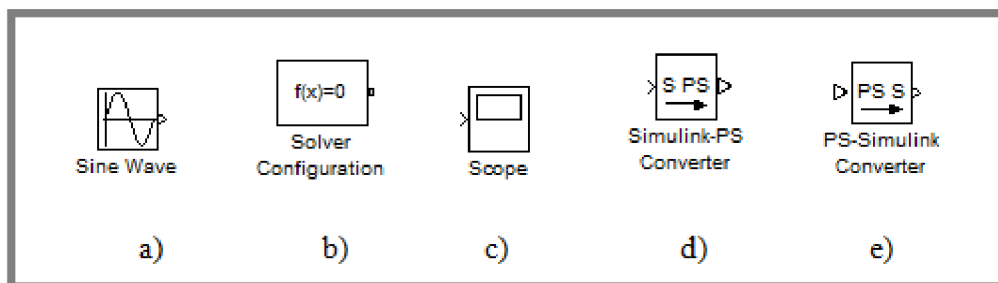
Tab. 1-1 Přehled řešičů [19]

Řešitel (solver)	Třída problémů	Metoda
ode45 (Dormand-Prince)	non-stiff	explicitní Runge-Kutta (implementace Dormand-Prince)
ode23 (Bogacki-Shampine)	non-stiff	explicitní Runge-Kutta (implementace Bogacki-Shampine)
ode113 (Adams)	non-stiff	Adams-Bashforth-Moultonova
ode15s (stiff/NDF)	stiff	NDFs (BDFs)
ode23s (stiff/Mod. Rosenbrock)	stiff	Rosenbrockova
ode23t (Mod. stiff/trapezoidal)	moderately stiff	lichoběžníkové pravidlo
ode23th (stiff/TR-BDF2)	stiff	implicitní Runge-Kutta (implementace TR-BDF2)

Scope (obr. 1-26 c) zobrazuje graf přivedené veličiny v závislosti na čase simulace. Je zde možné nastavit měřítko, rozsahy os, počet os, jejich popisy a další. Tento blok umožňuje také převedení zobrazovaného parametru do prostředí Matlabu, kde se s ním může dále pracovat. [19]

Simulink-PS Converter (obr. 1-26 e) je převaděč bezrozměrného signálu na fyzikální signál, jednotka parametru se přidělí fyzikálnímu signálu.

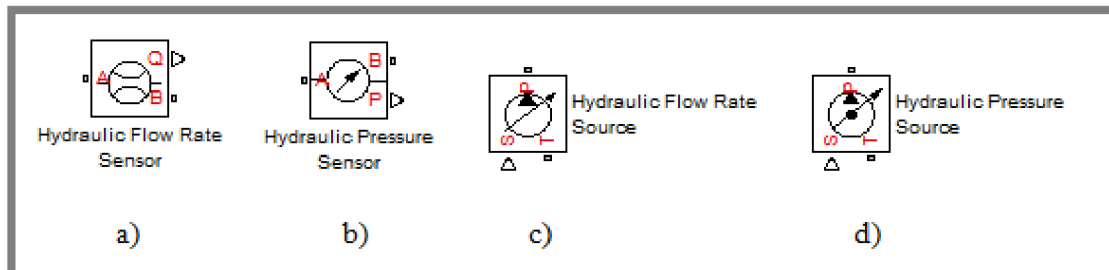
PS-Simulink Converter (obr. 1-26 f) je převaděč fyzikálního signálu na bezrozměrný signál. Jednotka parametru musí odpovídat vstupnímu signálu.



Obr. 1-26 Vybrané bloky programu Matlab Simulink 2 [19]

Bloky reprezentující ideální senzory průtoku a tlaku Hydraulic Flow Rate Sensor a Hydraulic Pressure Sensor (obr. 1-27 a, b). Přeměňují hodnoty naměřené mezi dvěma výstupy na fyzikální signál. V těchto blocích se nezadávají žádné parametry.

Hydraulic Flow Rate Source a Hydraulic Pressure Source (obr. 1-27 c, d) jsou bloky reprezentující ideální zdroje průtoku a tlaku. Slouží jako náhrada hydrogenerátoru. Hodnoty jejich výstupů mohou být dány konstantou, proměnou či grafem. V těchto blocích se nezadávají žádné parametry. [19]



Obr. 1-27 Vybrané bloky programu Matlab Simulink 2 [19]

## 2 FORMULACE ŘEŠENÉHO PROBLÉMU A JEHO TECHNICKÁ A VÝVOJOVÁ ANALÝZA

**2**

### 2.1 Formulace řešeného problému

2.1

Práce je zaměřena na konstrukční návrh externí expanzní nádoby s nastavitelným MR ventilem a s možností připojení této nádoby k libovolnému tlumiči s externím rezervoárem. Externí nádoba bude připojena k tlumiči přes vysokotlakou hydraulickou hadici. Tlumič bude nastavitelný v tlakové části rychlostní charakteristiky pomocí MR efektu v MR ventilu externí nádoby. Pro účely experimentu ověření funkčnosti nádoby bude použit tlumič blíže nespecifikovaného výrobce se známými parametry.

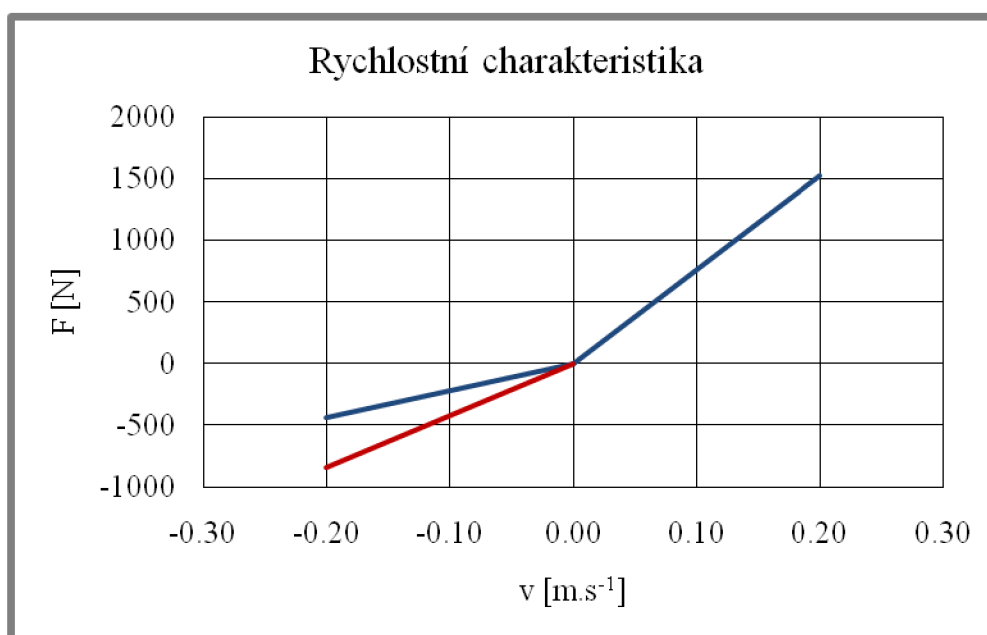
### 2.2 Technická analýza

2.2

Parametry tlumiče s externí expanzní nádobkou:

- maximální zdvih samotného tlumiče 50mm
- olej Mogul VG 15
- MR kapalina MRF-140CG

Tlumič je určen pro montáž s přepákováním, proto je rychlostní charakteristika v rozsahu pouze do 0,2 m/s. Rychlostní charakteristika tlumiče bez MR ventilu je známá a je znázorněna na obr. 2-1 modrou křivkou. Tlumič musí být regulovatelný pomocí MR ventilu v tlakové části rychlostní charakteristiky. Červená křivka na obr. 2-1 znázorňuje minimální požadované navýšení tlumicí síly při úplné aktivaci elektromagnetického pole. Při neaktivním elektromagnetickém poli je hodnota tlumicí síly 400 N při rychlosti pístnice 0,2 m/s. Při maximální velikosti elektromagnetického pole musí být hodnota tlumicí síly minimálně 800 N při rychlosti pístnice 0,2 m/s.



Obr. 2-1 Rychlostní charakteristika tlumiče s externí nádobkou

### **2.3 Vývojová analýza**

Na základě poznatků získaných z rešeršní části se vytvoří první varianta externí nádoby. Na prototypu této varianty bude ověřena správnost konstrukce, výpočtů, rovnoměrné rozložení magnetického pole a správný tvar rychlostní charakteristiky. Po vyhodnocení výsledků bude vytvořen návrh optimální varianty externí nádoby.

### 3 VYMEZENÍ CÍLŮ PRÁCE

**3**

---

Cílem diplomové práce je konstrukční návrh externí expanzní nádoby k pístovému hydraulickému tlumiči, kde je kombinována náplň oleje a magnetoreologické kapaliny. Pomocí magnetoreologického efektu se bude regulovat tuhost tlumiče v tlakové části charakteristiky. Nádobku bude možno připojit k libovolnému tlumiči vhodného typu pomocí vysokotlaké hadice.

Dílčí cíle:

- seznámení se s existujícími konstrukčními variantami
- návrh první konstrukční varianty
- ověření funkčnosti konstrukce
- návrh optimální varianty

## 4 NÁVRH METODICKÉHO PŘÍSTUPU K ŘEŠENÍ

Jednotlivé části postupu řešení jsou chronologicky popsány níže.

- Shromáždění informací o konstrukci tlumičů, vlastnostech magnetoreologické kapaliny a existujících variantách MR tlumičů.
- Výběr první varianty konstrukce externí expanzní nádoby.
- Konstrukce, výroba a měření požadovaných vlastností první varianty nádoby.
- Srovnání naměřených hodnot s vypočítanými.
- Konstrukce optimální varianty nádoby.
- Zhodnocení práce.

## 5 NÁVRH VARIANT ŘEŠENÍ A VÝBĚR OPTIMÁLNÍ VARIANTY

5

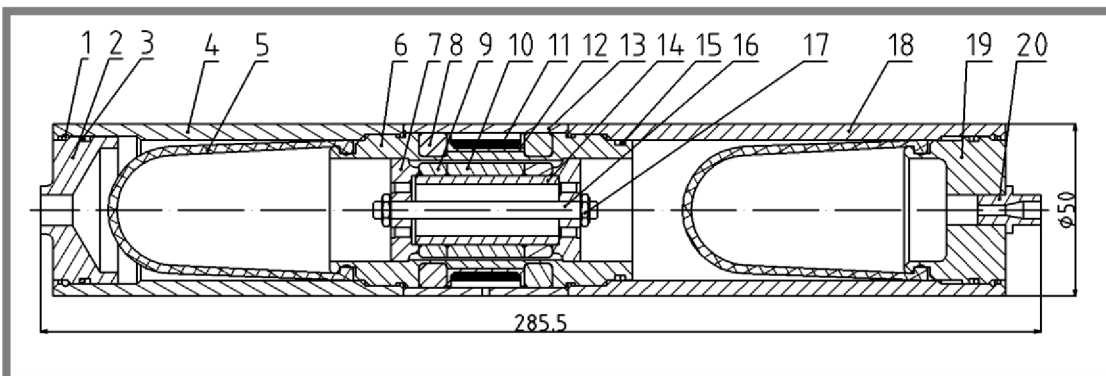
### 5.1 Varianta 1

5.1

První konstrukční varianta externí nádržky vychází z konstrukce magnetoreologického tlumiče firmy Delphi, kdy je v pístu tlumiče umístěna cívka s jádrem. V jádru je štěrbina kudy prochází MR kapalina a v místech kde je elektromagnetické pole kolmé na směr jejího prodějí ji ovlivňuje MR efektem.

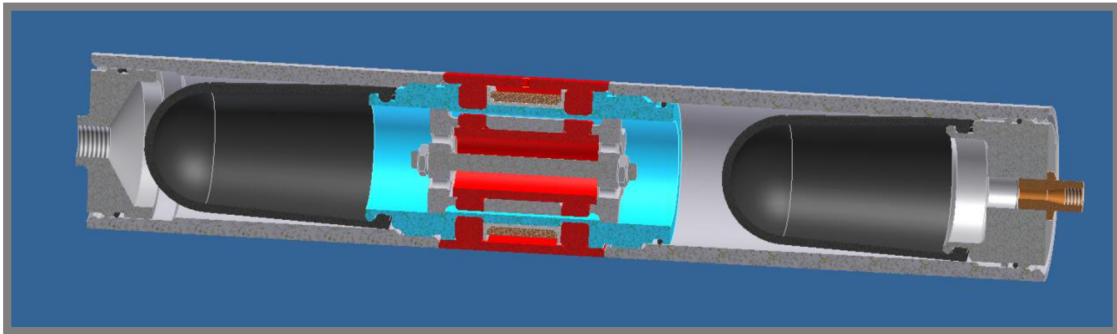
Externí nádobka znázorněná na obr. 5-1 se skládá z dvou duralových trubek 4 a 18. Ty jsou našroubovány na válec 6 pomocí závitu M44x1. Konec trubky 4 uzavírá čelo 2, které jsou utěsněné o-kroužky a do kterého se přes závit M10x1 našroubuje vysokotlaká hadice spojující nádobu s tlumičem. Na konci trubky 18 je čelo 19, které je také utěsněno o-kroužkem a je na něm nasazen gumový vak. Čelo 19 má do sebe našroubovaný ventilek 20, kterým se nafukuje tlumič plynem.

Střed nádoby tvoří válec 6, na kterém je nasazena cívka 11 s částí jádra. Zbytek jádra je umístěn uvnitř válce. Jádro se skládá z krytu 13, který je sevřený mezi trubkami, dále ze čtyř polokroužků 8, nasazených na válci pod krytem. Vnitřní část jádra oddělená štěrbinou a válcem se skládá ze dvou kroužků 9 vymezených duralovým válečkem 10 a nasazených na vedení 14. Všechny části jádra cívky jsou z materiálu 11 500 a jsou znázorněny na obr. 5-2 červenou barvou. Vnitřek jádra svírají dvě duralové hvězdy 7, které jsou sešroubovány tyčinkou 16. Na válci je také nasazen druhý gumový vak 5 oddělující olej od magnetoreologické kapaliny. Vodiče z cívky 11 jsou vyvedeny mimo tělo nádoby dírou v krytu 13 a napojeny na banánové konektory.



Obr. 5-1 První varianta externí nádržky – náčrtek sestavy

Tato varianta byla navržena jako laboratorní, poměrně lehce rozebíratelná, určená k ověření potřebných vlastností a změření vypočtených veličin. Byla na ní provedena měření rovnoměrnosti rozložení elektromagnetického pole po obvodu štěrbiny a rychlostních charakteristik.



Obr. 5-2 První varianta externí nádoby - průřez 3D modelem

### 5.1.1 Měření rovnoměrného rozložení elektromagnetického pole

Měření magnetické indukce ve šterbině probíhalo z důvodu ověření rovnoměrného rozložení elektromagnetického pole po jejím obvodu a pro srovnání vypočítané velikosti indukce. Měřená cívka měla 124 závitů a průměr jednoho drátu 0,6 mm.

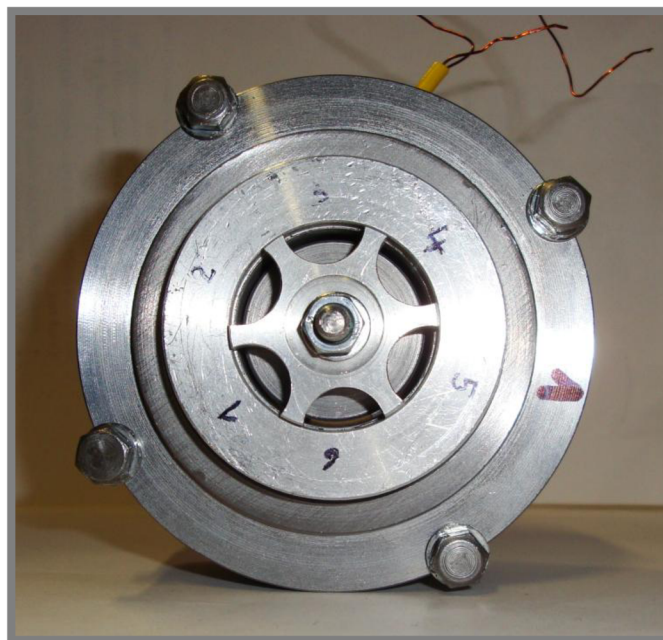
Pro měření byly použity následující přístroje:

- Magnometr 5180, F.W BELL
- ultratenká transverzální sonda STB 1X – 0201, F.W. BELL
- zdroj stejnosměrného napětí Manson SDP 2603
- zdroj střídavého napětí HP 33120A
- zesilovač LV 102

Před samotným měřením bylo zapotřebí odmagnetovat jádro cívky od případné zbytkové magnetické indukce. Při prvním odmagnetování byl použit zdroj střídavého napětí HP 33120A nastaven na frekvenci 50 HZ společně se zesilovačem LV 102. Na zdroji byl postupně snižován proud z 10A do 0A. Odmagnetování však bylo nedostatečné, byla naměřena zbytková magnetická indukce 1,7 mT. Další odmagnetování proběhlo za použití zdroje stejnosměrného napětí Manson SDP 2603 při postupném snižování proudu o 1A z 10A na 0A. Při každém snížení proudu byla změněna polarita zdroje. Po odmagnetování byla naměřena zbytková magnetická indukce 0,2 mT.

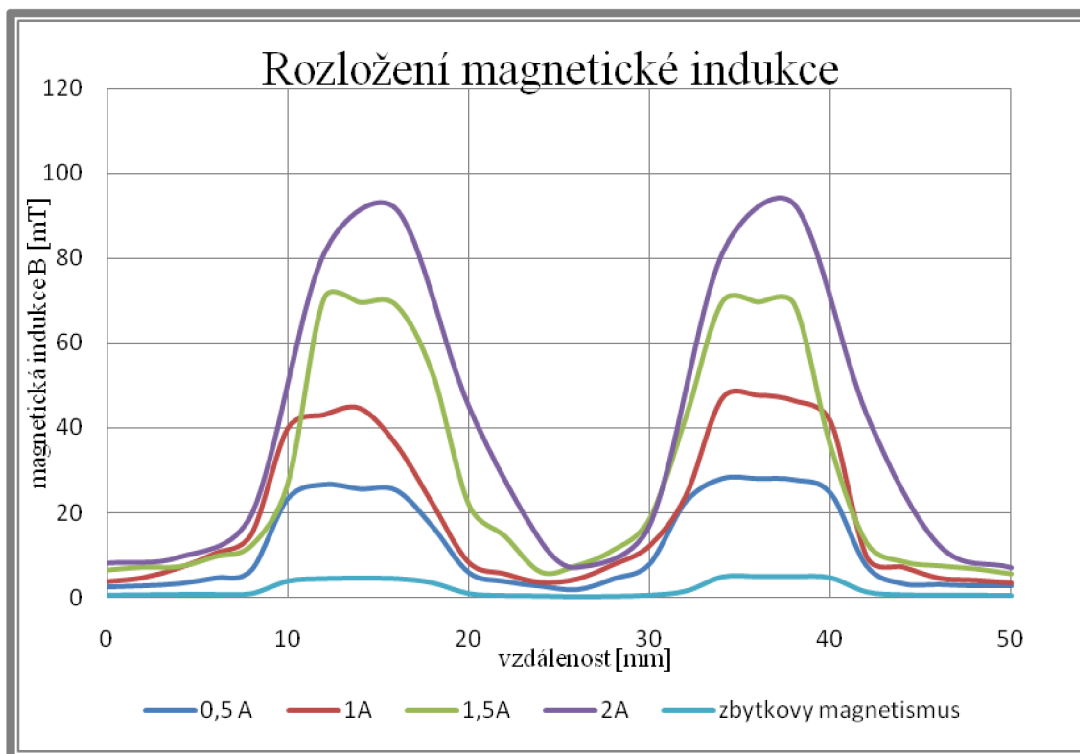
Po odmagnetování jádra cívky probíhalo měření magnetické indukce při konstantních proudech 0,5A, 1A, 1,5A, 2A. Nakonec byl změřen i zbytkový magnetismus jádra cívky, který zůstane v cívce a bude ovlivňovat MR kapalinu i bez přívodu napětí do cívky. Měření ultratenkou sondou bylo nutné provádět z obou stran, jelikož sonda nemá dostatečnou délku. Z každé strany jádra cívky byla indukce měřena postupně v šesti místech po obvodu viz. obr. 5-3.





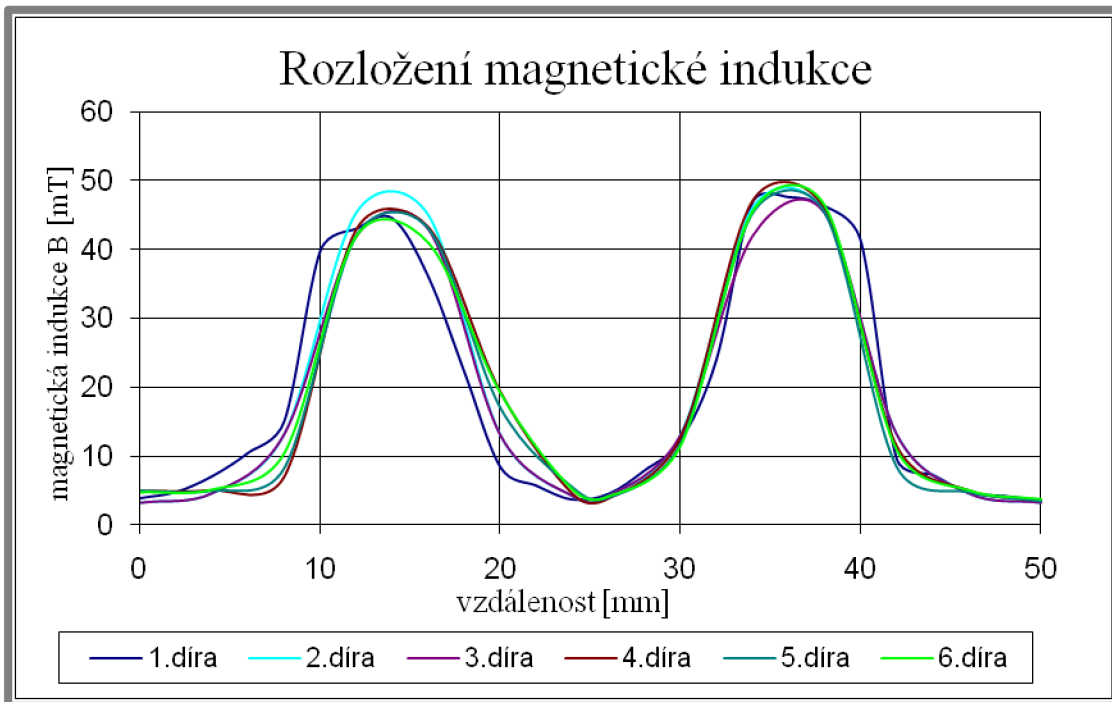
Obr. 5-3 Jádru cívky při měření magnetické indukce

Na obr. 5-4 je znázorněn graf velikosti magnetické indukce v jedné šterbině při různých proudech v cívce. Je z něj patrné že čím větší je proud v cívce, tím větší je magnetická indukce ve šterbině.



Obr. 5-4 Magnetická indukce v závislosti na délce MR ventilu a magnetizačního proudu

Na obr. 5-5 je graf závislosti magnetické indukce na vzdálenosti v MR ventilu v jedné šterbině při konstantní hodnotě proudu 1 A. Měřením bylo zjištěno rovnoměrné rozložení magnetického pole po obvodu jádra cívky.



Obr. 5-5 Magnetická indukce v závislosti na délce MR ventilu měřená ve všech šterbinách jádra cívky

### 5.1.2 Měření rychlostní charakteristiky

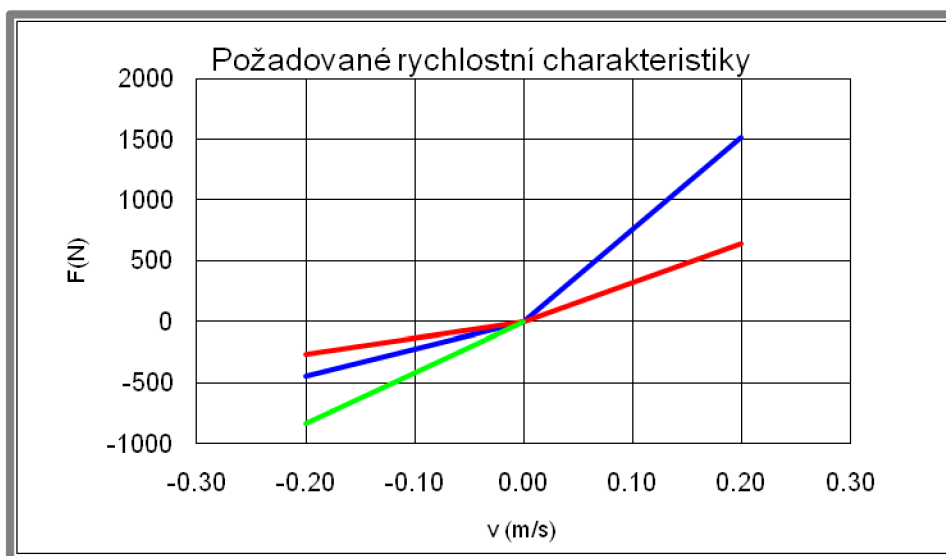
Na tlumiči neznámého výrobce s prototypem první varianty nádoby (obr. 5-6) bylo provedeno měření rychlostní charakteristiky k ověření správné funkce nádoby.



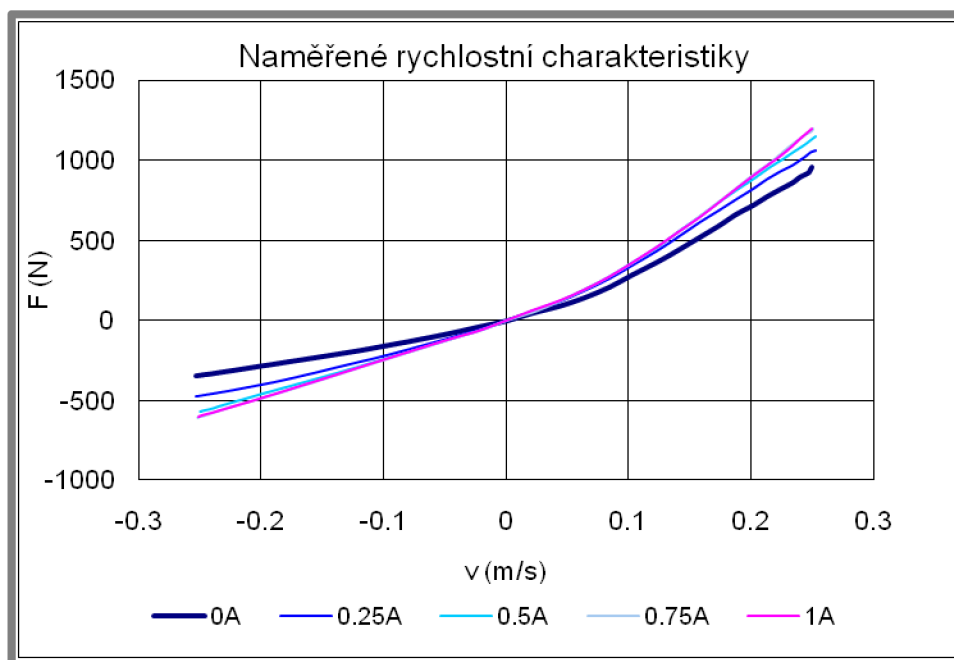
Obr. 5-6 Prototyp externí nádoby na tlumiči

Měření bylo prováděno na testeru tlumičů Gillop 1.4 v laboratořích Ústavu konstruování. Naměřené hodnoty byly vyhodnoceny v programu LabView. Pro napájení cívky byl použit zdroj stejnosměrného napětí. Měření bylo prováděno při proudech 0A, 0,5A, 1A, 1,5A, a 2A. Zdvih testeru byl nastaven na 50 mm při maximální rychlosti 0,25m/s.

Na obr. 5-7 jsou znázorněny požadované rychlostní charakteristiky, červená a modrá křivka reprezentují charakteristiky, které je možno nastavit pomocí mechanického nastavení na tlumiči. Zelená křivka znázorňuje minimální požadovaný rozsah charakteristiky v tlakové části při aplikaci magnetizačního proudu 2A.



Obr. 5-7 Požadovaná rychlostní charakteristika

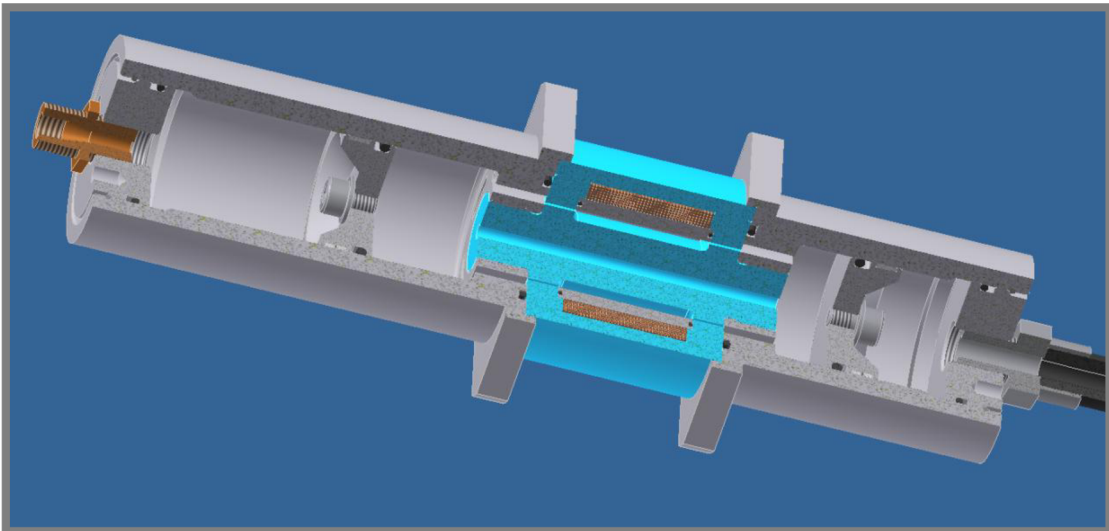


Obr. 5-8 Naměřené rychlostní charakteristiky

Při měření rychlostních charakteristik (obr. 5-8) bylo zjištěno, že při zvyšování magnetizačního proudu nad 0,75A se již tlumící síla v tlakové části charakteristiky nezvyšovala. Z grafů na obr. 5-7 a obr. 5-8 je patrné, že nebylo dosaženo požadovaného minimálního navýšení tlumící síly. Místo požadovaných 800 N síla vzrostla pouze na 490N. Tento jev byl způsoben nasycením jádra cívky již při proudu 0,75A, proto se musí konstrukce jádra přepracovat.

## 5.2 Varianta 2

Na základě výsledků získaných z měření provedeného na první variantě externí nádoby byla navržena varianta druhá (obr. 5-9). Oproti první variantě došlo ke značnému zmenšení, z původních 285,5 mm je celková délka zmenšená na 176 mm. Vnější průměr trubek se zmenšil z 50 mm na 40 mm, byla pozměněna konstrukce jádra cívky a místo gumových měchů byly na oddělení kapalin použity plovoucí písky. Detailnější popis konstrukce je popsán v následující kapitole.



Obr. 5-9 Druhá varianta externí nádoby

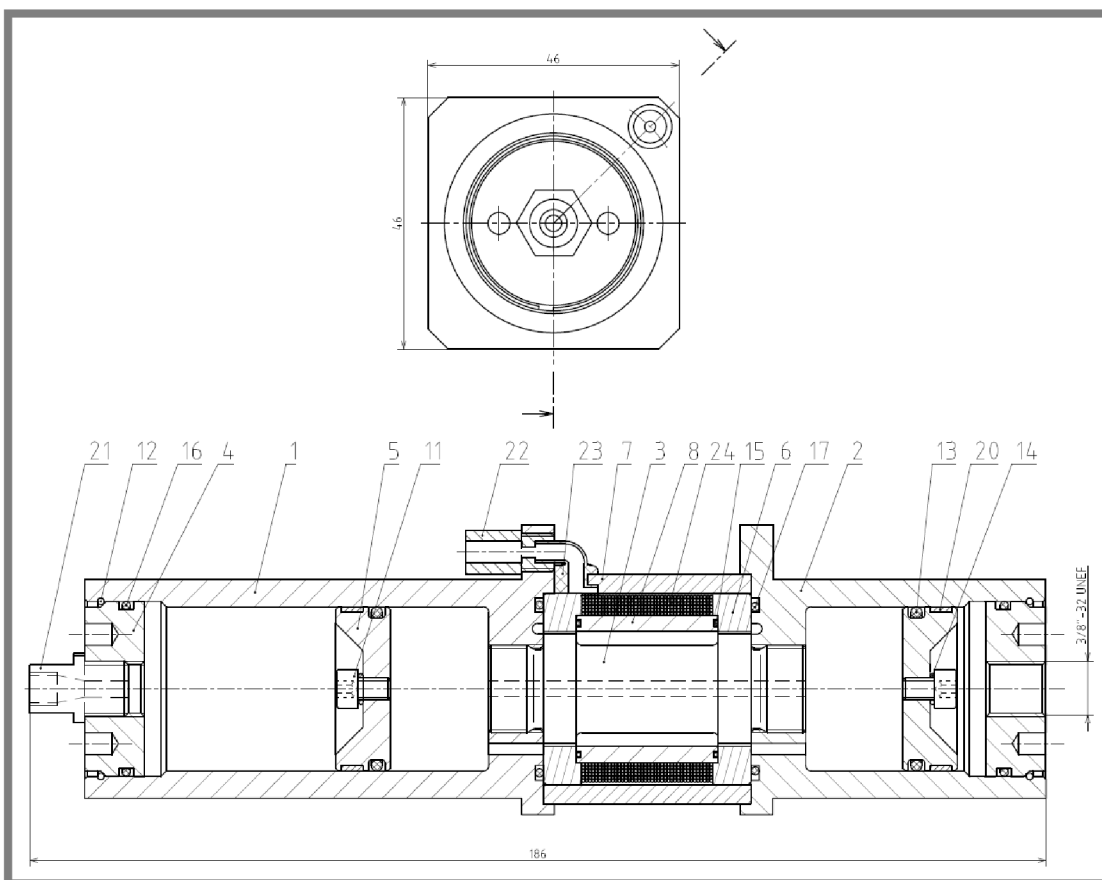
## 6 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

6

### 6.1 Popis konstrukčního řešení

6.1

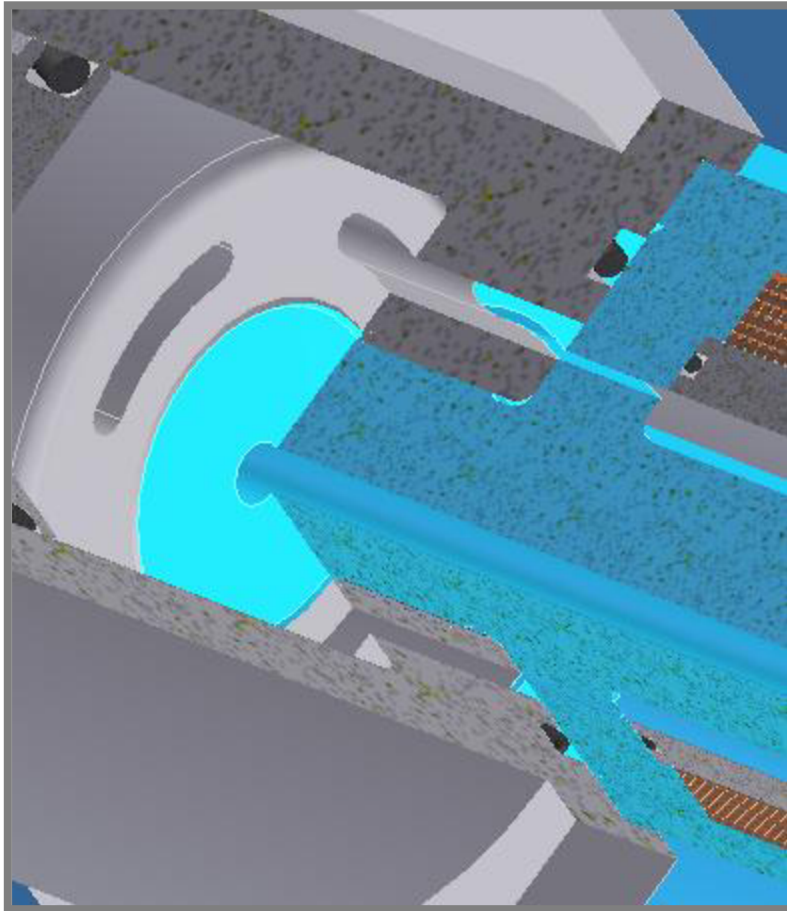
Druhá konstrukční varianta (obr. 6-1) se skládá ze dvou duralových trubek 1 a 2 našroubovaných na středu jádra cívky 3 pomocí závitu M16x1. Konec trubky 1 zaslepuje čelo 4, které je zajištěno pojistným drátěným kroužkem 12 a je utěsněno o-kroužkem 16. Do čela je našroubován ventil Schrader 21 sloužící k tlakování tlumiče plynem. Na konci trubky 2 je stejné čelo zajištěno stejným způsobem s vnitřním závitem 3/8-32 UNEF určeným pro přišroubování vysokotlaké hydraulické hadice. Dvě díry v čele slouží pro speciální klíč na utažení šroubového spojení s hadicí či vzduchovým ventilem. Prostřední část nádoby tvoří již zmíněný střed jádra 4 a poté dva kroužky 6 a kryt 7. Všechny části jádra jsou z materiálu 11 500. Cívka 24 je navinutá na duralové základně cívky 8 a její vodiče jsou vyvedeny gumovým těsněním 23 do vodotěsného dvou-pinového konektoru. Konektor je přišroubován k přírubě trubky 1. Uvnitř trubky 1 je umístěn plovoucí píst oddělující natlakovaný plyn od MR kapaliny a v trubce 2 odděluje MR kapalinu od tlumičového oleje. Na plovoucím pístu je teflonová objímka 20 usnadňující pohyb pístu a těsnící o-kroužek 13. Uprostřed plovoucího pístu je umístěn odvzdušňovací šroub s válcovou hlavou a vnitřním šestihranem.



Obr. 6-1 Druhá konstrukční varianta

### 6.1.1 Šroubový spoj

Šroubový spoj mezi trubkami a středem jádra znázorněný na obr. 6-2 byl zvolen se závitem o velikosti M16x1.



Obr. 6-2 Šroubový spoj

Návrh rozměrů závitu určíme z pevnostní podmínky v tahu. Jedná se o spoj s předpětím zatížený střídavě. Mez kluzu materiálu trubky EN AW 6082 je  $R_e = 240$  MPa, mez pevnosti  $R_m$  295 MPa. Maximální tlak je  $p_1 = 2$  MPa a dovolený tlak v závitu  $p_D = 20$  MPa. [20]

maximální síla působící na střed jádra:

$$F_0 = p_1 \cdot S_z = p_1 \cdot \pi \cdot \frac{D_1^2 - d_{ns}^2}{4} = 2 \cdot 10^6 \cdot \pi \cdot \frac{14,917^2 - 2,9^2}{4} = 583,7 \text{ N}$$

počet závitů vyjádřený ze vzorce na otláčení závitu [20] :

$$z = \frac{4F_0}{p_D \cdot \pi(d^2 - D_1^2)} = \frac{4 \cdot 583,7}{20 \cdot 10^6 \pi((16 \cdot 10^3)^2 - (14,917 \cdot 10^3)^2)} = 1,117$$

zvolen počet závitů  $z = 2$ , dosazeno do rovnice pro výpočet minimální výšky matice:

$$m = z \cdot p + p = 2 \cdot 1 + 1 = 3 \text{ mm}$$

Minimální délka závitů pro závit M16x1 se skosením je 3mm, závit délky 10 mm u trubky tuto podmínku splňuje.

Utahovací moment šroubu potřebný k dosaženému předpětí v tlumiči se při zvolené síle předpětí  $F_i = 600 \text{ N}$  vypočítá následovně:

$$M = F_i \cdot K_m \cdot D_1 = 1,343 \cdot 10^3 \text{ N} \cdot \text{m}$$

kde:

M	Nm	utahovací moment
$K_m$		koeficient
$F_i$	N	síla předpětí
$D_1$	m	malý průměr závitu matice

### 6.1.2 Návrh magnetického obvodu

6.1.2

Při návrhu magnetického obvodu se vychází z předpokladu použití rozměrů průtokových štěrbin spočítaných pro průchod kapaliny v klidovém stavu. Při průchodu MR kapaliny štěrbinami musí vytvářet MR ventil odporovou sílu o velikosti minimálně 400N při proudu 2A.

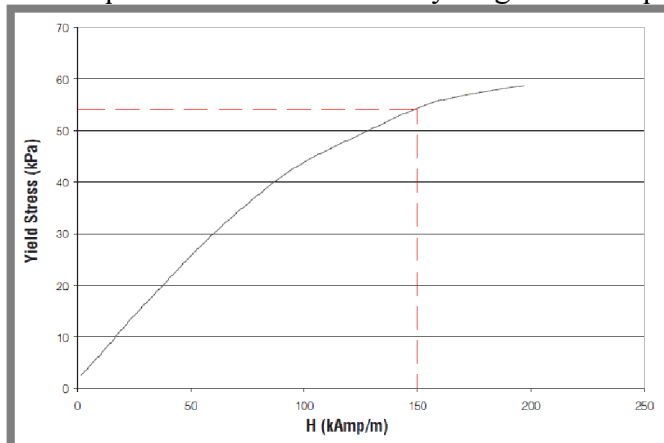
Z rovnice (3) byla vyjádřena rovnice pro výpočet potřebné meze kluzu MR kapaliny při aplikovaném magnetickém poli:

$$\tau_y = \frac{Fg}{2SL} = 54 \text{ kPa}$$

kde je:

$\Delta P$	tlakový spád
$\tau_y$	mez kluzu při aplikovaném magnetickém poli
L	délka
g	výška
F	síla
S	plocha, na kterou působí síla

Po dosazení vyjde požadovaná mez kluzu MR kapaliny  $\tau_y = 54 \text{ kPa}$ , pomocí této hodnoty se z grafu závislosti meze kluzu MR kapaliny na intenzitě magnetického pole (obr 6-3) se odečte potřebná hodnota intenzity magnetického pole.

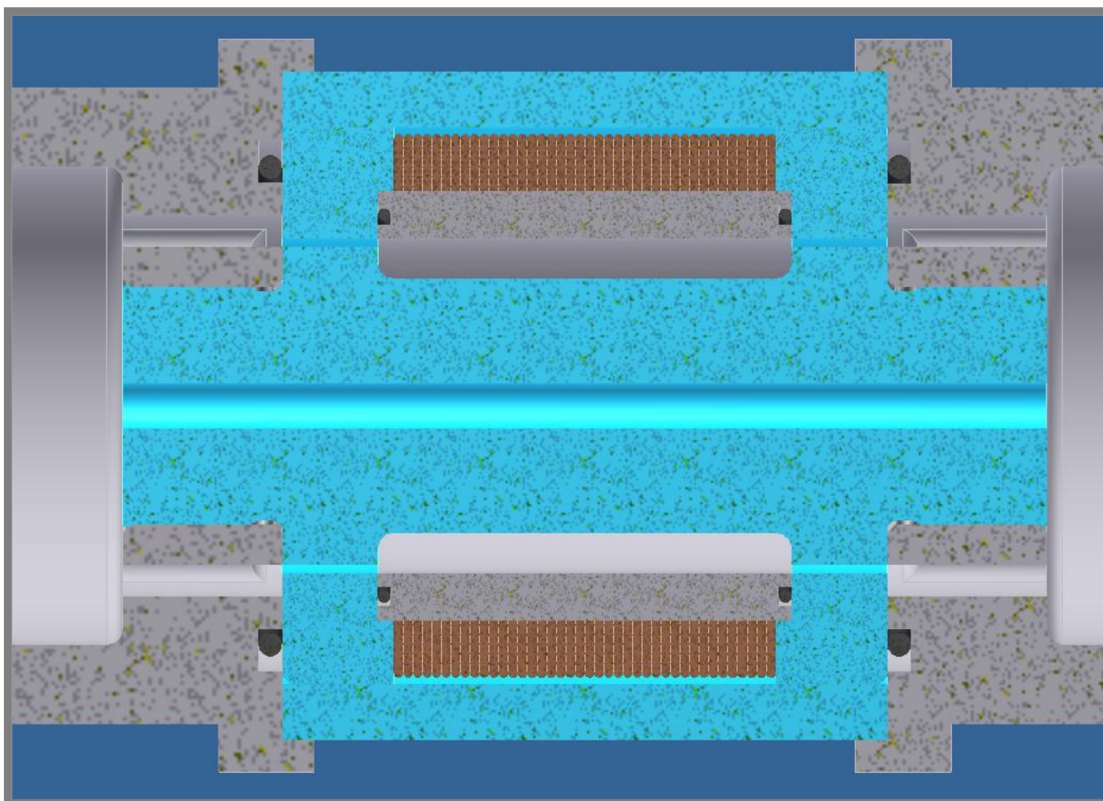


Obr. 6-3 Mez kluzu v závislosti na intenzitě magnetického pole [12]

Z grafu byla odečtena potřebná intenzita magnetického pole v magnetoreologické kapalině  $H = 150 \text{ kA/m}$ . Byla navržena cívka s 250 závitů a průměrem drátu 0,6 mm.

### 6.1.3 Navržení průtokové štěrbině

Při měření rychlostních charakteristik tlumiče s první variantou nádoby byl zjištěn vznik kavitace při roztahování tlumiče. Po konstrukční úpravě a nainstalování zpětného ventilu do středu MR ventilu neovlivněného magnetickým polem byla zjištěna jejich nesprávná funkčnost. Částice MR kapaliny se ve ventilech usadili a ventily tak přestávali fungovat. Proto bylo nutné přistoupit k jinému konstrukčnímu řešení. Takovým řešením se ukázalo použití štěrbin. Štěrba (obr. 6-4) musí být navržena tak, aby při kompresním tlumení dostatečně omezovala průtok neovlivněné MR kapaliny, aby správně fungoval MR ventil. Na druhou stranu musí štěrba při roztahování tlumiče propustit dostatečné množství MR kapaliny aby nedocházelo ke vzniku kavitace. Matematický výpočet tohoto problému je příliš složitý, proto byl pro jeho řešení použit software Matlab s nadstavbami Simulink a SimHydraulics.

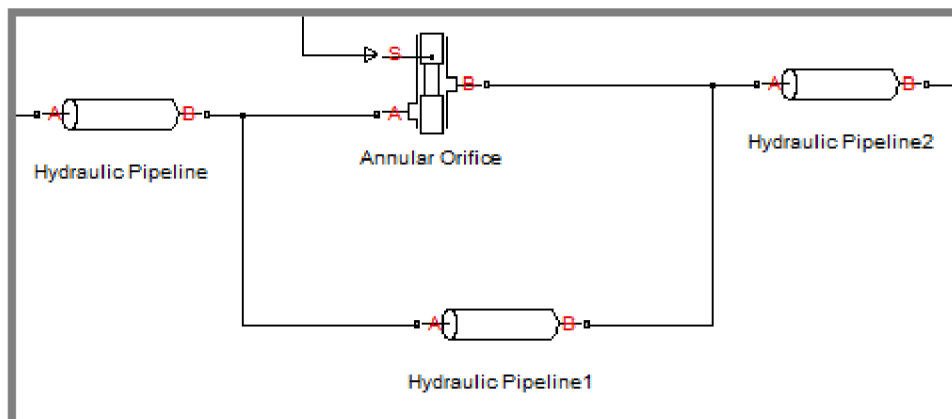


Obr. 6-4 Štěrba v jádře MR ventilu

### Popis tvorby blokového schématu

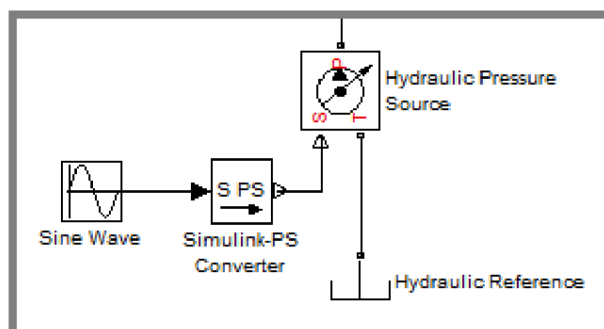
Jako první se vytvoří model MR ventilu s průchozí štěrbinou (obr. 6-5). MR ventil představuje blok Annular Office, průtokovou štěrbinu Hydraulic Pipeline1, ostatní prvky představují trubku externí nádoby.





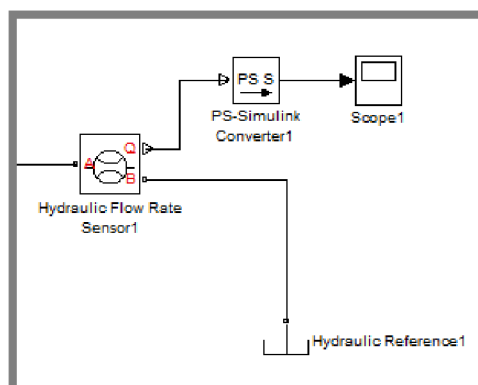
Obr. 6-5 Model MR ventilu

V dalším kroku (obr. 6-6) se přidá ideální zdroj tlaku, jehož velikost je dána sinusovkou tvořenou generátorem sinusové vlny, který je zde připojen přes převodník bezrozměrného signálu na signál fyzikální. K ideálnímu zdroji musí být také připojen blok zastupující rezervoár kapaliny.



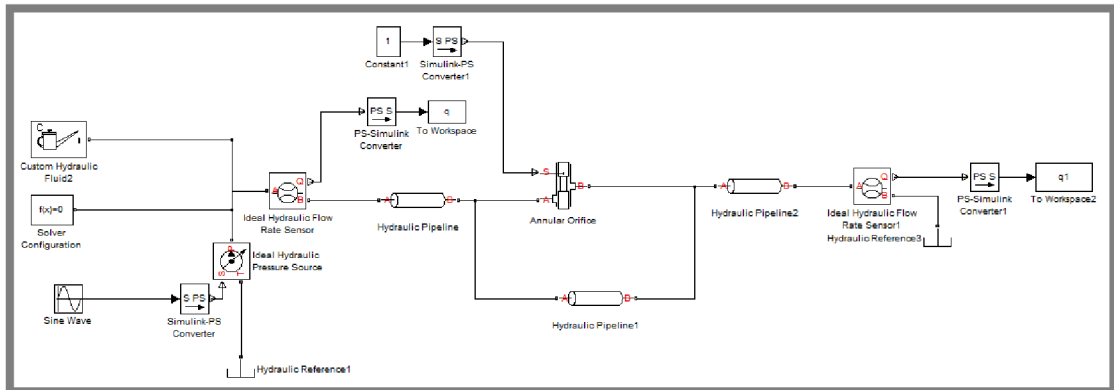
Obr. 6-6 Zdroj tlaku

Následujícím krokem se do modelu doplní snímače průtoku kapaliny, které jsou opět přes převodník signálu napojeny na blok pro vykreslení grafu. Snímač který leží na konci modelu se připojí k rezervoáru kapaliny. V blocích pro vykreslení grafu se rovněž nastaví převedení měřené veličiny do prostředí Matlabu (obr. 6-7).



Obr. 6-7 Snímač průtoku

K dokončení modelu zbývá doplnit blok definující vlastnosti kapaliny a přidat a nastavit řešič.(obr. 6-8)



Obr. 6-8 Blokové schéma modelu

Jako zvolený parametr štěrbinu byla její délka 58 mm. Průměr průchozí štěrbinu MR ventilu získaný z modelování průtoku na tomto modelu je 2,9 mm.

#### 6.1.4 Výpočet tlaku a objemu plynu v nádobce.

Minimální tlak plynu v rezervoáru aby nedošlo ke kavitaci při rychlosti 0,2 m/s se vypočítá ze vzorce (7).

$$p_{\min} = \frac{F_{\max}}{S_p - S_r} \cdot k = \frac{1500}{1,66 \cdot 10^{-3} - 1,54 \cdot 10^{-4}} \cdot 1,4 = 1,39 \text{ MPa}$$

kde:

$p_{\min}$	Pa	minimální tlak
$F_{\max}$	N	maximální tlumící síla
$S_p$	$\text{m}^2$	plocha pístu
$S_r$	$\text{m}^2$	plocha pístnice
$k$		bezpečnostní koeficient

Minimální objem plynu v rezervoáru se vypočte ze vzorce (6)

$$V_{\min} = S_r \cdot x_{\max} = 50 \cdot 10^{-3} \cdot 1,54 \cdot 10^{-4} = 7,7 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$$

kde:

$V_{\min}$	$\text{m}^3$	minimální objem plynu
$x_{\max}$	m	maximální délka zasunuté pístnice v pístu
$S_r$	$\text{m}^2$	plocha pístnice

## 7 ZÁVĚR

Hlavním cílem diplomové práce byl konstrukční návrh externí expanzní nádoby k pístovému hydraulickému tlumiči, kde je kombinována olejová náplň s magnetoreologickou kapalinou.

Byla navržena první konstrukční varianta a vyroben její prototyp. Na prototypu bylo provedeno měření elektromagnetické indukce ve štěrbině jádra cívky. Jádro cívky bylo skládané z více částí, proto bylo nutno ověřit rovnoměrnost rozložení magnetické indukce po obvodu štěrbině, aby nedocházelo k rozdílnému ovlivňování magnetoreologické kapaliny. Měřením bylo zjištěno rovnoměrné rozložení magnetické indukce po obvodu štěrbině. Dále proběhlo měření rychlostní charakteristiky tlumiče s navrženou nádobkou při různém ovlivňování MR kapaliny. Měřením bylo zjištěno nedostatečné navýšení tlumící síly v tlakové části rychlostní charakteristiky. Místo požadované minimální tlumící síly 800 N při magnetizačním proudu v cívce 2 A bylo naměřeno pouze 490 N a to již při proudu 0,75 A. Při dalším navyšování proudu již tlumící síla dále nerostla. Příčinou bylo nasycení jádra cívky. Při měření charakteristik byla také zjištěna přítomnost vzniku kavitace při odskokové části tlumení, proto byly použity různé druhy zpětných ventilů v neovlivněné části MR ventilu. Ty se však prokázaly jako nefunkční a muselo být navrženo jiné řešení.

Po srovnání naměřených a vypočítaných výsledků byla navržena finální varianta externí nádoby. Tělo nádoby je podobné jako u první varianty, dvě duralové trubky jsou našroubovány na magnetoreologický ventil, který je tvořen jádrem s cívkou. Jádro cívky bylo zjednodušeno a byla zvětšena jeho tloušťka všech jeho částí, aby opět nedošlo k jeho nasycení. Také byla značně zmenšena průtoková štěrbina, kde probíhá MR efekt. Uprostřed MR ventilu byla vytvořena průtoková štěrbina, která není ovlivňována magnetickým polem. Neovlivněná průtoková štěrbina byla zkonstruována jako náhrada za zpětné ventily, které v MR kapalině nepracovali správně. Pro tuto štěrbinu musel být navržen přesný průměr, aby při kompresním tlumení dostatečně tlumila průtok MR kapaliny a při odskokovém tlumení povolila dostatečný průtok kapaliny, aby nedocházelo ke kavitaci. Konce trubek jsou zaslepeny duralovými čely zajištěnými drátěnými pojistnými kroužky a utěsněny o-kroužky. Oproti první variantě došlo ke zmenšení konstrukce díky použití plovoucích pístů místo gumových měchů sloužících k oddělení kapalin. Díky snížení velikostí došlo ke zmenšení objemu potřebné MR kapaliny, čímž se značně snížila cena nádoby.

Navrhované 3D modely byly vytvořeny v programu Autodesk Inventor 2010, výkresová dokumentace v programu AutoCAD 2010 a výpočty neovlivněné průtokové štěrbině prováděny v softwaru Matlab R2010a.

Výhodou konstrukce externí expanzní nádržky s magnetoreologickým ventilem je její univerzální použití na jakémkoli tlumiči požadovaného typu.

Jako téma pro další diplomovou práci může sloužit porovnání rozdílu mezi užitím plovoucích pístů a gumových měchů k oddělení kapalin tlumiče či návrh speciálních zpětných ventilů pro MR kapalinu.

---

## 8 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Vlk, F. *Podvozky motorových vozidel*. Brno : Prof.Ing.František Vlk, DrSc, 2006. 464 s. ISBN 80-239-6464
- [2] KALA, P. *Hydraulický tlumič v aktivním závěsu kola*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 34 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Ivan Mazůrek, CSc.
- [3] ROUPEC, J. *Mezní a degradační procesy magnetoreologických tlumičů odpružení*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009.
- [4] LORD Corporation. *Magneto-Rheological (MR.)* [online]. [cit. 2010-10-05]. Dostupné z WWW: <<http://www.lord.com/Products-and-Solutions/Magneto-Rheological-%28MR%29.xml>>.
- [5] *Autoreview* [online]. [cit. 2011-01-10]. Dostupné z WWW: <<http://www.autoreview.ru/archive/2006/13-14/auditt/>>.
- [6] *Actuators based on Magnetorheological Fluids (MRF)* [online]. 2010. [cit. 2011-01-26]. Dostupné z WWW: <[http://www.hs-owl.de/fb5/labor/rt/en/mrf\\_aktorik\\_en.html](http://www.hs-owl.de/fb5/labor/rt/en/mrf_aktorik_en.html)>.
- [7] *Active structures laboratory : Working modes of magnetorheological fluids* [online]. 2008. [cit. 2011-01-26]. Dostupné z WWW: <[http://www.ulb.ac.be/scmero/documents/Research/MR/MR\\_modes.html](http://www.ulb.ac.be/scmero/documents/Research/MR/MR_modes.html)>.
- [8] NOVÁČEK, V. *Technologie výroby Magnetoreologických kapalin*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 40 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jakub Roupec.
- [9] POYNOR, J. *Innovative Designs for Magneto-Rheological Dampers*. Blacksburg, MS., Virginia Polytechnic Institute and State University. 2007. 96 s. Dostupné z WWW: <[http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-08142001-101447/unrestricted/Thesis\\_James\\_Poynor.pdf](http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-08142001-101447/unrestricted/Thesis_James_Poynor.pdf)>.
- [10] SIMS, N. D; HOLMES, N. J; STANWAY, R. *A unified modelling and model updating procedure for electrorheological and magnetorheological vibration dampers*. SMART MATERIALS AND STRUCTURES [online]. 2003, 13, [cit. 2011-01-24]. Dostupný z WWW: <[http://iopscience.iop.org/0964-1726/13/1/012/pdf/sms4\\_1\\_012.pdf](http://iopscience.iop.org/0964-1726/13/1/012/pdf/sms4_1_012.pdf)>.
- [11] PRANOTO, T., NAGAYA, K., *Development on 2DOF-type and Rotary-type shock absorber damper using MRF and their efficiencies*, Journal of Material Processing Technology, 2005, vol.161, no. 1-2, s. 146-150

- [12] Lord Corporation [online]. [cit. 2010-09-12]. Dostupné z WWW: <<http://www.lord.com>>.
- [13] DIXON, John C. *The Shock Absorber Handbook*. 2nd Edition. Chichester : John Wiley and Sons Ltd, 2007. 432 s. ISBN 978-0-470-51020-9.
- [14] *Owners manual :WCJ, MCJ, STJ, Öhlins shock absorber*. [online]. 2006. [cit. 2011-01-25]. Dostupné z WWW: <[http://www.zupin.de/uploads/tx\\_userzupindownloads/07412-01.pdf](http://www.zupin.de/uploads/tx_userzupindownloads/07412-01.pdf)>.
- [15] *Owners manual :Basic information Öhlins shock absorber*. [online]. 2006. [cit. 2011-01-25]. Dostupné z WWW: <[http://www.ohlins.com/Products/OwnersManuals/OM\\_07241-02.pdf](http://www.ohlins.com/Products/OwnersManuals/OM_07241-02.pdf)>.
- [16] *Penske racing shocks engineering : Technical manual adjustable shocks (8100, 8660, 8760 Series)*. [online]. 2006. [cit. 2011-01-28]. Dostupné z WWW: <<http://www.penskeshocks.co.uk/downloads/7000SeriesTechManual.pdf>>.
- [17] *Penske racing shocks engineering : Pressure balancing of shock absorbers*. [online]. 2004. [cit. 2011-01-28]. Dostupné z WWW: <<http://www.roehrigengineering.com/Technical%20Information/Pressure%20Balancing.pdf>>.
- [18] *The MathWorks Inc.: Getting Started Guide*. [Uživatelská příručka online]. 2010. [cit. 2010-10-28]. Dostupné z WWW: <[http://www.mathworks.com/help/pdf\\_doc/matlab/getstart.pdf](http://www.mathworks.com/help/pdf_doc/matlab/getstart.pdf)>.
- [19] *The MathWorks Inc : Matlab and Simulink for Technical computing*. [online]. 2010. [cit. 2010-10-28]. Dostupné z WWW: <<http://www.mathworks.com>>.
- [20] LEINVEBER, Jan; VÁVRA, Pavel. *Strojnické tabulky : Pomocná učebnice pro školy technického zaměření*. Čtvrté doplněné vydání. Úvaly : ALBRA, 2008. 916 s. ISBN 978-80-7361-051-7.

## 9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

A	[m <sup>2</sup> ]	smyková plocha desky.
b	[m]	šířka štěrbin
c	[-]	konstanta (v rozmezí 2-3)
D <sub>1</sub>	[m]	malý průměr závitu matice
ΔP	[Pa]	tlakový spád
ΔP <sub>h</sub>	[Pa]	viskózní část tlakového spádu
ΔP <sub>t</sub>	[Pa]	část meze kluzu indukovaná magnetickým polem
F	[N]	síla
F <sub>h</sub>	[N]	viskózní část síly
F <sub>k</sub>	[N]	tlumící síla v kompresní části
F <sub>max</sub>	[N]	maximální tlumící síla
F <sub>r</sub>	[N]	tlumící síla v odskokové části
F <sub>t</sub>	[N]	část síly meze kluzu
g	[m]	výška
G	[Pa]	komplexní materiálový modul
g <sup>?</sup>	[s <sup>-1</sup> ]	smyková rychlost kapaliny
h	[m]	tloušťka štěrbin
H	[Am <sup>-1</sup> ]	intenzita magnetického pole
h	[Nsm <sup>-2</sup> ]	viskozita v neaktivovaném stavu (tj. viskozita při H=0)
k	[-]	koeficient
L	[m]	délka
l	[m]	délka štěrbin
MR		magnetoreologický
p <sub>min</sub>	[Pa]	minimální tlak
Q	[m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]	objemový průtok
S	[m <sup>2</sup> ]	plocha na kterou působí síla
S	[m.s <sup>-1</sup> ]	relativní rychlost povrchu
S <sub>p</sub>	[m <sup>2</sup> ]	plocha pístu
S <sub>r</sub>	[m <sup>2</sup> ]	plocha pístnice
t	[Pa]	celkové smykové napětí
t <sub>y</sub>	[Pa]	mez kluzu při aplikovaném magnetickém poli
V	[m <sup>3</sup> ]	minimální nutný objem aktivní kapaliny
V <sub>min</sub>	[m <sup>3</sup> ]	minimální objem plynu
w	[m]	šířka tokového kanálku mezi pevnými deskami
W <sub>m</sub>	[W]	mechanický výkon
x <sub>max</sub>	[m]	maximální délka zasunuté pístnice v pístu
Δp	[Pa]	tlakový spád
Δp <sub>1</sub>	[Pa]	tlakový spád na pístnici
Δp <sub>2</sub>	[Pa]	tlakový spád ve štěrbině
η	[Nsm <sup>-2</sup> ]	dynamická viskozita

## 10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

<b>Obr. 1-1</b> Magnetoreologický tlumič [5]	14
<b>Obr. 1-2</b> Magnetoreologický efekt [6]	15
<b>Obr. 1-3</b> Ventilový mód MR kapaliny [7]	16
<b>Obr. 1-4</b> Smykový mód MR kapaliny [7]	16
<b>Obr. 1-5</b> Tlakový mód MR kapaliny [7]	16
<b>Obr. 1-6</b> Jednoplášťový MR tlumič [9]	18
<b>Obr. 1-7</b> Dvouplášťový MR tlumič [9]	18
<b>Obr. 1-8</b> Oboustranný MR tlumič [9]	18
<b>Obr. 1-9</b> MR tlumič zpětného rázu první generace[9]	19
<b>Obr. 1-10</b> Hybridní MR tlumič[9]	19
<b>Obr. 1-11</b> Konstrukční varianty MR tlumičů [10]	20
<b>Obr. 1-12</b> Disk rotačního MR tlumiče [11]	21
<b>Obr. 1-13</b> Typy tlumičů s externím rezervoárem [15]	23
<b>Obr. 1-14</b> Píst se sadami planžet [16]	23
<b>Obr. 1-15</b> Průtok oleje přes štěrbinu v pístu [16]	24
<b>Obr. 1-17</b> Závislost rychlostní charakteristiky na předpětí planžet [16]	25
<b>Obr. 1-16</b> Externí nádoba [16]	25
<b>Obr. 1-18</b> Závislost rychlostní charakteristiky na tloušťce planžet [16]	26
<b>Obr. 1-19</b> Nastavovací kolečka externího rezervoáru [16]	26
<b>Obr. 1-20</b> Změna tlakové části rychlostní charakteristiky při změně průtoku kapaliny [16]	27
<b>Obr. 1-21</b> Změna tlakové části rychlostní charakteristiky při změně předpětí na planžetách [16]	27
<b>Obr. 1-22</b> Nastavovací kolečko tlumení odskoku [16]	28
<b>Obr. 1-23</b> Změna tahové části rychlostní charakteristiky při změně průtoku [16]	28
<b>Obr. 1-24</b> Tlaková bilance v tlumiči [17]	29
<b>Obr. 1-25</b> Vybrané bloky programu Matlab Simulink [19]	32
<b>Obr. 1-26</b> Vybrané bloky programu Matlab Simulink 2 [19]	33
<b>Obr. 1-27</b> Vybrané bloky programu Matlab Simulink 2 [19]	34
<b>Obr. 2-1</b> Rychlostní charakteristika tlumiče s externí nádobkou	35
<b>Obr. 5-1</b> První varianta externí nádoby – nákres sestavy	39
<b>Obr. 5-2</b> První varianta externí nádoby - průřez 3D modelem	40
<b>Obr. 5-4</b> Magnetická indukce v závislosti na délce MR ventilu a magnetizačního proudu	41
<b>Obr. 5-3</b> Jádru cívky při měření magnetické indukce	41
<b>Obr. 5-5</b> Magnetická indukce v závislosti na délce MR ventilu měřená ve všech štěrbinách jádra cívky	42
<b>Obr. 5-6</b> Prototyp externí nádoby na tlumiči	42
<b>Obr. 5-7</b> Požadovaná rychlostní charakteristika	43
<b>Obr. 5-8</b> Naměřené rychlostní charakteristiky	43
<b>Obr. 5-9</b> Druhá varianta externí nádoby	44
<b>Obr. 6-1</b> Druhá konstrukční varianta	45
<b>Obr. 6-2</b> Šroubový spoj	46
<b>Obr. 6-3</b> Mez kluzu v závislosti na intenzitě magnetického pole [12]	47
<b>Obr. 6-4</b> Štěrbinu v jádru MR ventilu	48
<b>Obr. 6-5</b> Model MR ventilu	49

<b>Obr. 6-6</b> Zdroj tlaku	49
<b>Obr. 6-7</b> Snímač průtoku	49
<b>Obr. 6-8</b> Blokové schéma modelu	50



**11 SEZNAM TABULEK**

**Tab. 1-1** Přehled řešičů [19]

33