



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

**REKONSTRUKCE NEDEMONTOVATELNÉHO MR
TLUMIČE LORD**

RECONSTRUCTION OF UNDETACHABLE LORD MR DAMPER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Vít Lochman

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Ivan Mazůrek, CSc.

BRNO 2018

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: **Vít Lochman**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **doc. Ing. Ivan Mazůrek, CSc.**
Akademický rok: 2017/18

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

Rekonstrukce nedemontovatelného MR tlumiče LORD

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Nejdůležitější součástí vibroizolačních zařízení jsou tlumiče pérování. Poslední vývojovou generaci představují počítačem řízené hydraulické tlumiče využívající působení magnetického pole na kapalinu obsahující železné mikročástice. Na ÚK je k dispozici nerozebiratelný tlumič Lord, který v průběhu času získal netypickou Fv charakteristiku (pravděpodobně únik plynové náplně).

Typ práce: vývojová – konstrukční

Cíle bakalářské práce:

Cílem je konstrukční návrh a realizace úpravy nedemontovatelného magnetoreologického tlumiče LORD.

Dílčí cíle bakalářské práce:

- plán demontáže tlumiče s co nejmenším poškozením dílů,
- návrh rekonstrukce stávajících dílů tlumiče,
- konstrukce nezbytných nových dílů,
- v případě úspěšného projektu zajistit realizaci.

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

Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 – 20 stran textu bez obrázků).

Struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2018.pdf

Seznam doporučené literatury:

DIXON, John C. The Shock Absorber Handbook. 2. Chichester: John Wiley, 2007. ISBN 0-7680-00-0-5.

SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R. MISCHKE a Richard G. BUDYNAS, VLK, Miloš, ed. Konstruování strojních součástí. V Brně: VUT IUM, 2010. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-2629-0.

KALA, Pavel. Hydraulický tlumič v aktivním závěsu kola. Brno, 2008. Bakalářská práce. FSI VUT v Brně. Vedoucí práce Ivan Mazůrek.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

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

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá konstrukčním návrhem a realizací úpravy nedemontovatelného magnetoreologického tlumiče LORD, který časem získal netypickou F_v charakteristiku. V úvodní části je popsáno fungování magnetoreologické kapaliny a dále je pojednáno o různých konstrukčních variantách magnetoreologických tlumičů. Praktická část práce je věnována reverznímu inženýrství a samotnému konstrukčnímu návrhu úpravy tlumiče. Součástí práce je kompletní výkresová dokumentace původního i upraveného tlumiče.

KLÍČOVÁ SLOVA

magnetoreologická kapalina, magnetoreologický tlumič, tlumič kmitů, LORD

ABSTRACT

The bachelor's thesis deals with the design and the realization of the modification of the non-demountable magnetorheological damper LORD, which has gained an atypical F_v characteristic in the course of time. The first part of the thesis deals with the operation of the magnetorheological liquid and the various design variants of the magnetorheological dampers. The practical part is devoted to the reverse engineering and the design of the damper modification itself. The complete drawing documentation of the original and the modified damper is included in this work.

KEY WORDS

magnetorheological fluid, magnetorheological damper, shock absorber, LORD

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

LOCHMAN, V. *Rekonstrukce nedemontovatelného MR tlumiče LORD*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 53 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Ivan Mazůrek, CSc..

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat doc. Ing. Ivanu Mazůrkovi, CSc. za ochotu a cenné rady při vedení této práce. Dále bych chtěl poděkovat své přítelkyni a rodině za neutuchající podporu během studia.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Rekonstrukce nedemontovatelného tlumiče LORD vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Ivana Mazůrka, CSc. a s použitím odborné literatury uvedené na seznamu, jenž tvoří přílohu této práce.

V Brně dne 18. května 2018

Vít Lochman

OBSAH

1	Úvod	12
2	Přehled současného stavu poznání	13
2.1	Magnetoreologická kapalina	13
2.2	Magnetoreologický tlumič	15
2.3	Přehled konstrukčních řešení magnetoreologických tlumičů	15
2.3.1	Jednoplášťový magnetoreologický tlumič	15
2.3.2	Dvouplášťový magnetoreologický tlumič	15
2.3.3	Tlumič s pístnicí vyvedenou z obou stran	16
2.4	Přehled konstrukčních řešení šterbin MR tlumičů uvnitř tělesa pístu	17
2.4.1	Konstrukce pístu s obtokovými kanálky	18
2.4.2	Konstrukce pístu s prstencovými a radiálními kanálky	18
2.4.3	Konstrukce pístu s dvoustupňovým tokem	19
2.4.4	Konstrukce pístu s meandrovým prouděním	20
2.5	Přehled konstrukčních řešení šterbin MR tlumičů vně pístu	20
2.5.1	Konstrukce s vnějším obtokovým kanálem	20
2.5.2	Konstrukce s cívkami a obtokovým kanálem v plášti tlumiče	21
2.6	Přehled konstrukčních řešení uzávěrů jednoplášťových tlumičů	22
2.7	Oddělení tlakové komory od pracovní u jednoplášťových tlumičů	23
2.8	Magnetoreologický tlumič LORD RD-1005-3	24
3	Analýza problému a cíl práce	26
4	Koncepční řešení	27
4.1	Popis tlumiče	29
4.2	Měření charakteristik tlumiče a výpočet velikosti tlakové komory	31
4.3	Měření magnetické indukce	34
4.4	Analýza kapaliny	36
4.5	Součásti tlumiče a jejich použití při rekonstrukci	36
5	Konstrukční řešení	37
5.1	Demontáž tlumiče	37
5.2	Popis zrekonstruovaného tlumiče	39
5.3	Popis jednotlivých dílů upraveného tlumiče	41
5.3.1	Spodní uzávěr	41
5.3.2	Vrchní uzávěr	42
5.3.3	Plášť	44
5.3.4	Doraz	44

5.4	Základní parametry původního a upraveného tlumiče	44
6	Diskuze	45
7	Závěr	47
8	Bibliografie	48
9	Seznam použitých zkratek, symbolů a veličin	50
10	Seznam obrázků a grafů	51
11	Seznam tabulek	52
12	Seznam příloh	53

1 Úvod

Tlumič kmitů je technické zařízení, jehož účelem je tlumit kmity a nárazy, činí tak přeměnou kinetické energie na energii tepelnou. U typických tlumičů kmitů probíhá tlumení při pohybu pístu v hydraulické kapalině. Charakteristiky těchto konvenčních tlumičů jsou buď pevné nebo je nelze měnit rychle a efektivně v závislosti na aktuálních podmínkách. Na vlastnosti tlumičů jsou přitom zpravidla kladeny vysoké požadavky, a to zejména v automobilovém průmyslu, kde mají tlumiče kmitů důležitou roli v otázce bezpečnosti a komfortu. Magnetoreologická technologie umožňuje eliminovat restrikce běžných tlumičů a vytvořit tak zařízení, které je schopné rychle přizpůsobit svoje vlastnosti v reakci na změny v zatěžování.

Tato práce se zabývá reverzním inženýrstvím, konstrukčním návrhem úpravy a realizací úpravy nedemontovatelného magnetoreologického tlumiče, který časem získal netypickou F_v charakteristiku. [1] [2] [3]

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

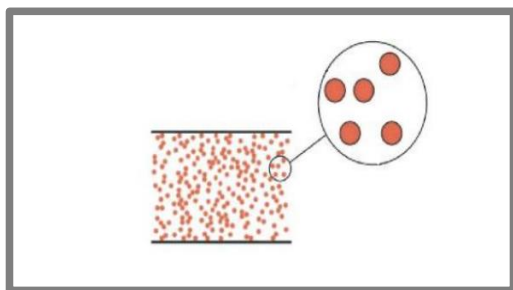
2

2.1 Magnetoreologická kapalina

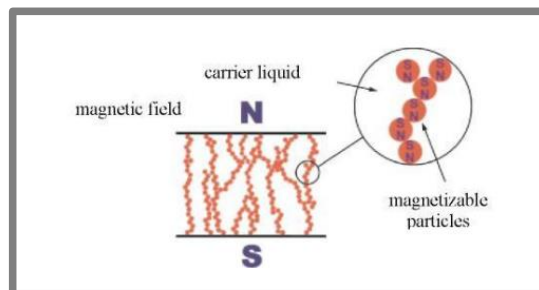
2.1

Magnetoreologická kapalina je jedním z moderních smart materiálů, který je schopen měnit své vlastnosti v reakci na změnu ve svém okolí, konkrétně změna magnetického pole vyvolá změnu zdánlivé viskozity kapaliny. Typické magnetoreologické kapaliny jsou suspenze feromagnetických mikročástic železa v nosné nemagnetické kapalině, ty v přítomnosti magnetického pole mají tendenci vytvářet řetězce, měnící mez toku kapaliny viz Obr. 2-1 a Obr. 2-2. Částice jsou nejčastěji vyrobeny z karbonylového železa, a aby se zamezilo jejich sedimentaci, přidávají se do MR kapalin aditiva.

Pokud není kapalina ovlivněna magnetickým polem, chová se jako newtonovská kapalina podobná například motorovému oleji. Když se kapalina nachází v magnetickém poli dojde k zřetězení částic a tím i k nárůstu meze toku kapaliny. Kapalina se pak projevuje jako nenewtonská Binghamská kapalina. Velikost meze toku je ve všech případech závislá na velikosti intenzity magnetického pole. [4]



Obr. 2-1 MR kapalina mimo magnetické pole [2]

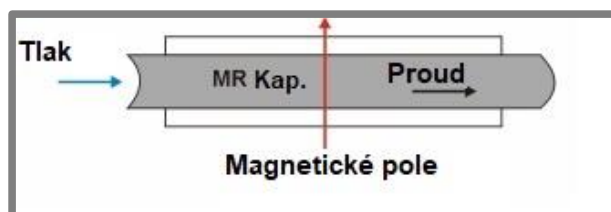


Obr. 2-2 MR kapalina v magnetickém poli [2]

V praxi může magnetoreologická kapalina operovat ve třech zatěžovacích módech viz Obr. 2-3, Obr. 2-4 a Obr. 2-5. Každý z těchto módů má jiné možnosti použití. Obecně může být způsob zatěžování MR kapaliny v tlumičích určen buď jedním módem nebo kombinací některých z pracovních módů. Například tlumič, u kterého dochází ke škrcení kapaliny mezi pístem a vnitřním válcem, kombinuje ventilový a smykový mód. Odporová síla je ve všech případech regulována intenzitou magnetického pole. [4] [5]

Ventilový mód

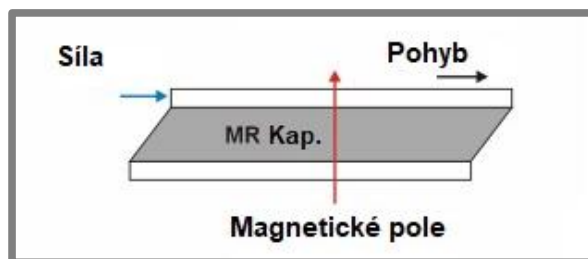
Ventilový mód je nejpoužívanější ze všech módů. Používá se v magnetoreologických tlumičích a ventilech. Magnetoreologická kapalina je v tomto případě nucena projít skrze štěrbinu mezi dvěma vzájemně se nepohybujícími deskami. Magnetické pole prochází skrz desky a jeho siločáry jsou kolmé na směr proudění kapaliny, jak je vidět na Obr.2-3. Vzniklé řetězce tak brání průchodu kapaliny. Tento mód lze popsat Poiseuilleovou rovnicí. [4] [5]



Obr. 2-3 Ventilový mód [5]

Smykový mód

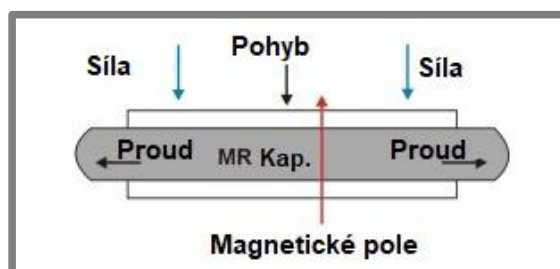
Magnetoreologická kapalina se nachází mezi dvěma deskami, které se vůči sobě pohybují buď rotačním nebo translačním pohybem. Magnetické pole prochází kolmo k oběma deskám, jak je patrné na Obr. 2-4. Tento mód je nejvíce využíván v rotačních zařízeních, obzvláště ve spojkách a brzdách. Je možné jej ale využít i u tlumičů, kde jedna z desek koná translační pohyb. [4] [5]



Obr. 2-4 Smykový mód [5]

Tahovo-tlakový mód

Je nejméně používaným módem. Kapalina se opět nachází mezi dvěma deskami, z nichž jedna se pohybuje ve směru nebo proti směru siločár magnetického pole (Obr. 2-5), což je vhodné zejména k tlumení vibrací s malou amplitudou. [4] [5]



Obr. 2-5 Tahovo-tlakový mód [5]

2.2 Magnetoreologický tlumič

2.2

Magnetoreologické tlumiče nejsou svou konstrukcí příliš rozdílné od těch hydraulických. Hlavní změnou je přítomnost cívky, vytvářející magnetické pole, a magnetoreologické kapaliny, která slouží jako pracovní náplň tlumiče. Změnou vstupního proudu do cívky můžeme plynule měnit mechanický odpor tlumiče, a to bez jakýchkoliv pohyblivých součástí jako jsou ventily nebo proměnná geometrie štěrbin. [6]

2.3 Přehled konstrukčních řešení magnetoreologických tlumičů

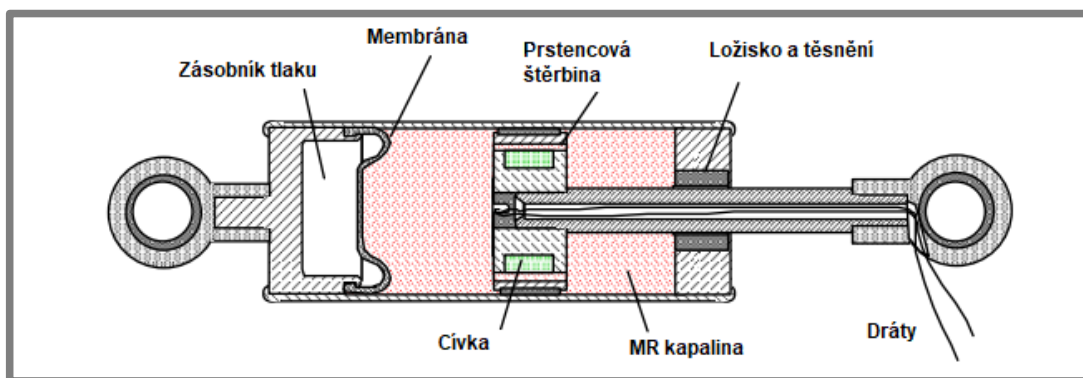
2.3

Existují dvě hlavní konstrukční řešení magnetoreologických tlumičů. Tlumiče s pístnicí vyvedenou z obou stran a tlumiče s pístnicí vyvedenou z jedné strany. U těch druhých dochází zasouváním pístnice ke změně objemu pracovního válce, z tohoto důvodu jsou zpravidla vybaveny kompenzátozem objemu. Tyto tlumiče se dále dělí dle konstrukce kompenzátoru objemu na jednoplášťové a dvouplášťové. [7]

2.3.1 Jednoplášťový magnetoreologický tlumič

2.3.1

Nejpoužívanějším typem je jednoplášťový tlumič, a sice zejména kvůli jeho kompaktním rozměrům a možnosti být namontován v libovolné orientaci. Jednoplášťový tlumič (Obr. 2-6) má pouze jednu komoru pro magnetoreologickou kapalinu, v níž se pohybuje píst, a jednu pro stlačený plyn (obvykle dusík), která kompenzuje změnu objemu. Tyto prostory jsou odděleny buď plovoucím pístem nebo membránou. Cívka je umístěna v pístu tlumiče. Tato konstrukční varianta tlumiče se využívá například v automobilovém průmyslu, v lokomotivách, protetice nebo v domácích spotřebičích. [7]



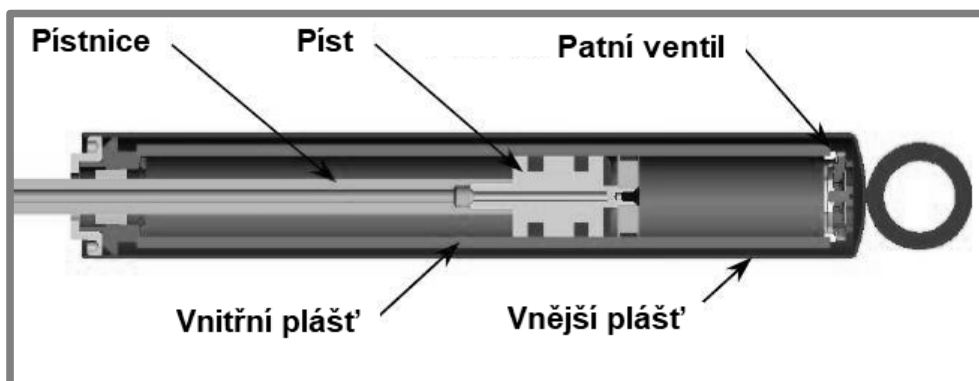
Obr. 2-6 Jednoplášťový MR tlumič [2]

2.3.2 Dvouplášťový magnetoreologický tlumič

2.3.2

Dvouplášťový magnetoreologický tlumič má dvě komory pro kapalinu, jednu je umístěnou ve druhé, jak je patrné na Obr 2-7. Tato konfigurace sestává z vnějšího a vnitřního pláště. Ve vnitřním plášti je umístěn píst a magnetoreologická kapalina, podobně jako v jednoplášťovém tlumiči, avšak bez komory pro stlačený plyn. Pístnicí vytlačovaný objem kapaliny pak proudí přes patní ventil do vnější komory umístěné mezi vnitřním a vnějším pláštěm, která je neustále částečně naplněna kapalinou

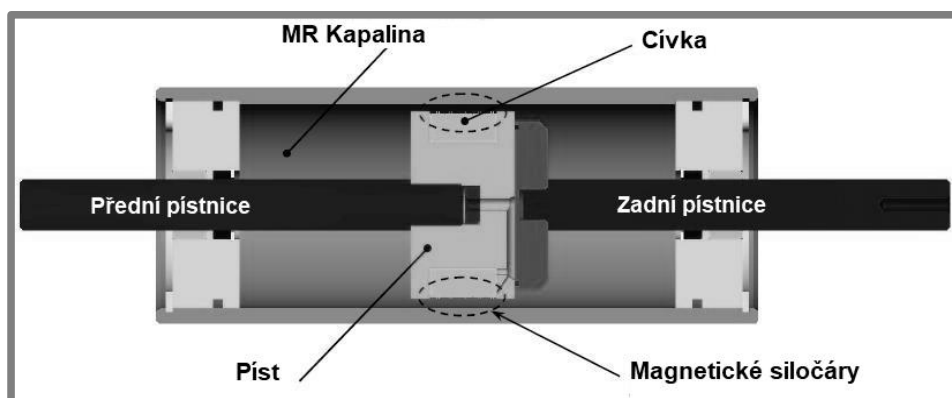
a částečně vzduchem. Běžné patní ventily hydraulických tlumičů nefungují s magnetoreologickou kapalinou dostatečně rychle, proto jsou u MR tlumičů využity patní ventily se speciální konstrukcí. Výhodou dvouplášťových tlumičů oproti jednoplášťovým je kratší konstrukční délka při zachování zdvihu. [8]



Obr. 2-7 Dvouplášťový MR tlumič [8]

2.3.3 Tlumič s pístnicí vyvedenou z obou stran

Vzhledem k tomu, že pístnice mají na obou stranách stejný průměr, nevzniká u tlumiče změna objemu v pracovním válci, tudíž není potřeba žádných kompenzátorů objemu (Obr. 2-8). Takovéto tlumiče našly svoje využití například v odpružených jízdních kolech nebo ve stavebnictví, kde jsou používány k seismické izolaci. [8]



Obr. 2-8 Tlumič s pístnicí vyvedenou z obou stran [8]

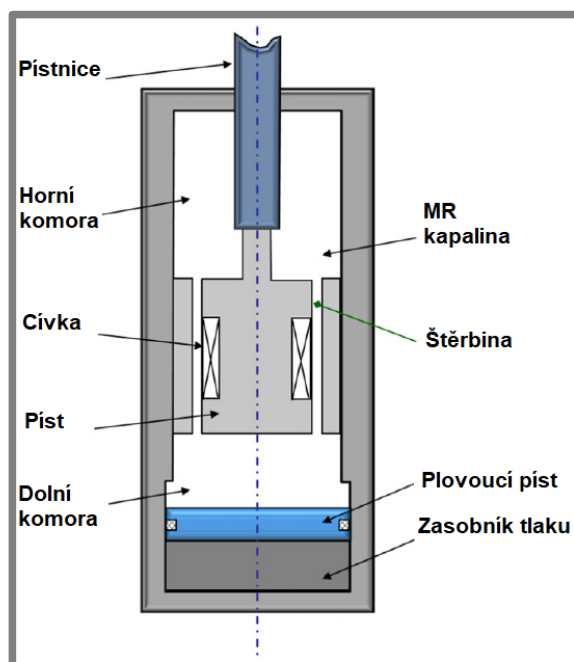
2.4 Přehled konstrukčních řešení šterbin MR tlumičů uvnitř tělesa pístu

2.4

Šterbiny v magnetoreologických tlumičích zásadně ovlivňují charakteristiku tlumiče. Jejich správná konfigurace ve vztahu s magnetickým polem dokáže eliminovat určité restriktce magnetoreologických tlumičů a zároveň nadefinovat tlumiči optimální charakteristiku pro jeho správnou funkci v rámci stroje. Konstrukční řešení šterbin bychom mohli rozdělit na dvě skupiny: šterbiny uvnitř tělesa pístu a šterbiny vně pístu.

V triviálním magnetoreologickém tlumiči (Obr. 2-9) může kapalina protékat pouze prstencovou šterbinou v pístu při jeho pohybu ve válci. Vytvořením magnetického pole ve šterbině je zvýšena mez toku kapaliny, která omezuje průtok šterbinou. To vyvolává rozdíl tlaků mezi horní a dolní částí válce a tím i tlumící sílu působící proti pohybu pístu. Tímto způsobem však může šterbinou kapalina protékat pouze při překročení limitního napětí v kapalině, respektive když je tlak proudu kapaliny silnější než mez toku kapaliny. Avšak v situaci, kdy není limitní napětí překročeno, nedochází k průtoku kapaliny šterbinou, neboť mez toku kapaliny je větší než tlak proudu.

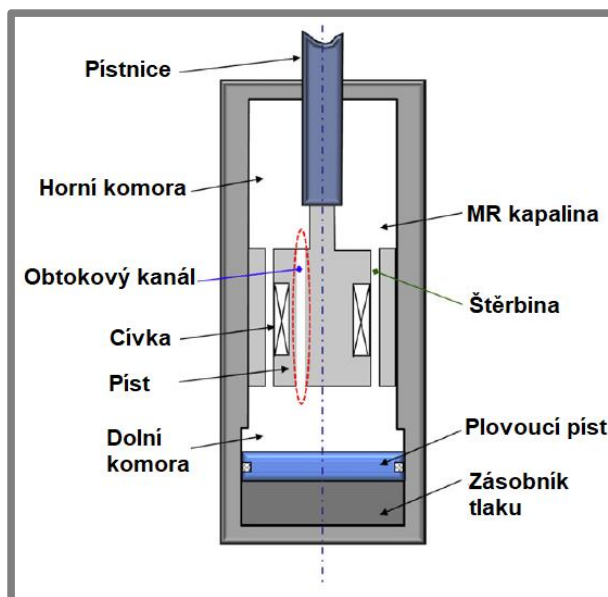
Správná funkčnost tlumiče je tedy zajištěna pouze při překročení limitního napětí v kapalině. Charakteristiky triviálních magnetoreologických tlumičů se tak mohou v určitém smyslu podobat charakteristikám tlumičů třecích. Tento nežádoucí efekt je v praxi eliminován různými způsoby, jejichž společným jmenovatelem jsou šterbiny neovlivněné magnetickým polem. [9]



Obr. 2-9 Triviální MR tlumič [9]

2.4.1 Konstrukce pístu s obtokovými kanálky

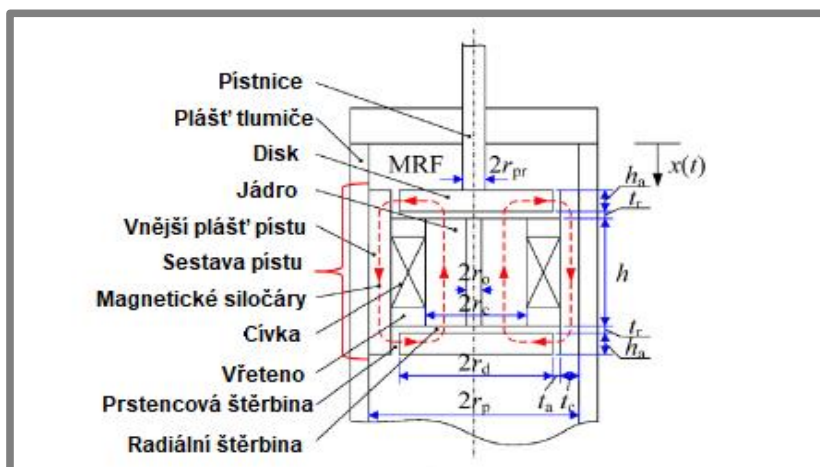
V této konstrukční variantě jsou nežádoucí efekty triviálního magnetoreologického tlumiče eliminovány pomocí pístu s obtokovými kanálky, jak je patrné na Obr. 2-10. Tyto obtokové kanálky nejsou ovlivněny magnetickým polem cívky, může jimi tedy kapalina volně protékat i při vysokém napětí v kapalině a nízkých rychlostech pístu. [9]



Obr. 2-10 Píst s obtokovými kanálky [9]

2.4.2 Konstrukce pístu s prstencovými a radiálními kanálky

V této variantě konstrukčního řešení (Obr. 2-11) je píst složen z jádra cívky s kanálkem, dvou disků, samotné cívky a vnějšího pláště pístu. Když dojde ke stlačení pístu, magnetoreologická kapalina proudí z dolní prstencové štěrbině do dolního radiálního kanálku, dále centrálním kanálkem v jádře cívky pokračuje do horního radiálního kanálku a následně ven z pístu horní prstencovou štěrbinou. [10]



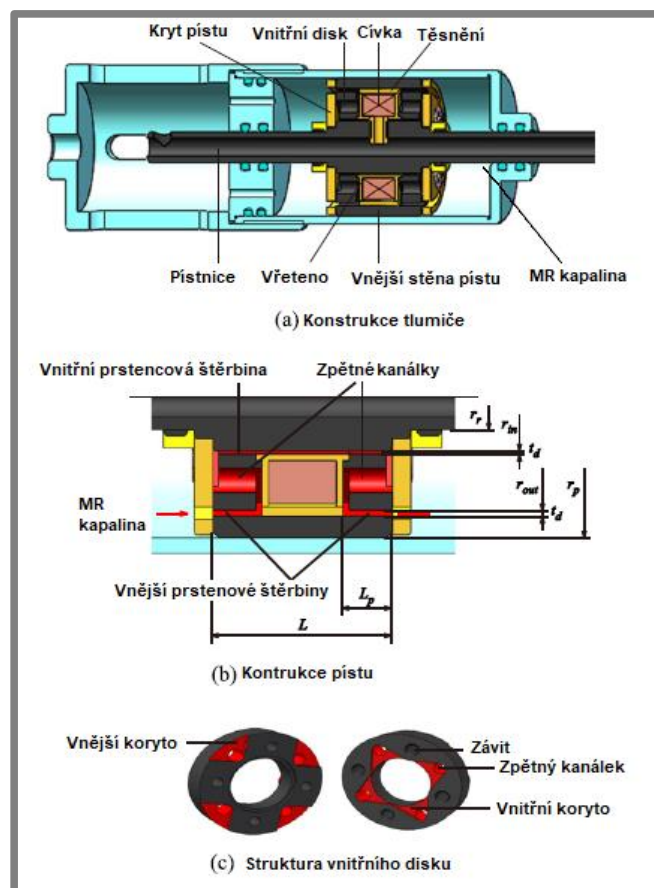
Obr. 2-11 Píst s prstencovými a radiálními kanálky [10]

Magnetické pole prostupuje jádrem cívky, radiálním kanálkem, diskem, prstencovým otvorem, dále přes vnější plášť pístu druhým prstencovým otvorem, diskem a radiálním kanálkem, kde uzavírá smyčku. Pro správnou funkčnost ventilového zatěžovacího módu magnetoreologické kapaliny musí být magnetické siločáry kolmé na tok kapaliny, a proto magnetoreologický jev probíhá v prstencových štěrbinách a v radiálních kanálcích ale nikoliv v centrálním kanálku. Tato konstrukce pístu zaručuje plynulejší regulaci tlumicí síly v závislosti na proudu přivedeném na cívku. [10]

2.4.3 Konstrukce pístu s dvoustupňovým tokem

2.4.3

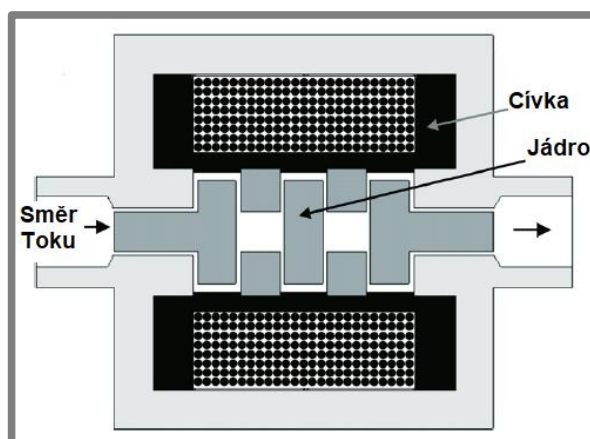
Tento typ (Obr. 2-12a) se skládá z vnějšího pístu, vnitřního pístu, dvou vnitřních disků se zpětnými kanálky, samotné cívky a dvou krytů pístu. Uvnitř pístu jsou dvě prstencové štěrbiny (vnitřní a vnější). Ve vnitřních discích jsou čtyři kruhové zpětné kanálky a každý z nich je propojen s vnitřní a vnější prstencovou štěrbinou dvěma koryty (vnitřním a vnějším), jak je patrné z Obr. 2-12c. Při pohybu pístu protéká magnetoreologická kapalina z dolní vnější štěrbinu do dolního zpětného kanálku, následně do vnitřní štěrbinu a dále přes horní zpětný otvor do horní vnější štěrbinu, jak lze vidět na Obr. 2-12b. Magnetický tok generovaný cívkou prochází z dolního disku přes dolní vnější štěrbinu, po vnější stěně pístu do horní vnější štěrbinu a dále skrz horní disk do vnitřní štěrbinu, kde uzavírá smyčku. Prostor zpětného kanálku tedy není ovlivněn magnetickým polem, neboť většina magnetického toku proudí okolo. Výsledkem toho je plynulejší regulace tlumicí síly změnou proudu v cívce. [11]



Obr. 2-12 Tlumič s dvoustupňovým tokem [11]

2.4.4 Konstrukce pístu s meandrovým prouděním

Výhodou tohoto typu konstrukce (Obr. 2-13) je vysoký výkon tlumení. Zatímco výše popsané typy tlumičů mohou dosáhnout rozdílu tlaku mezi prostorem nad pístem a pod pístem do 2,5 MPa, tato varianta, spočívající v kombinované konstrukci několika prstencových a radiálních kanálků za sebou, dosahuje rozdílů vyšších. Podstatou tohoto návrhu je meandrová trajektorie proudu, která maximalizuje efektivní zónu magnetického pole při zachování kompaktních rozměrů pístu, respektive tlumiče. Meandrový proud umožňuje magnetoreologické kapalině podstoupit magnetizaci několikrát na krátkých úsecích uvnitř pístu, tím je konečný rozdíl tlaku znatelně větší než u konvenčních pístů. Meandrová trajektorie navíc prodlužuje cestu kapaliny pístem, a tak zvyšuje šance na její zmagnetizování. [12]

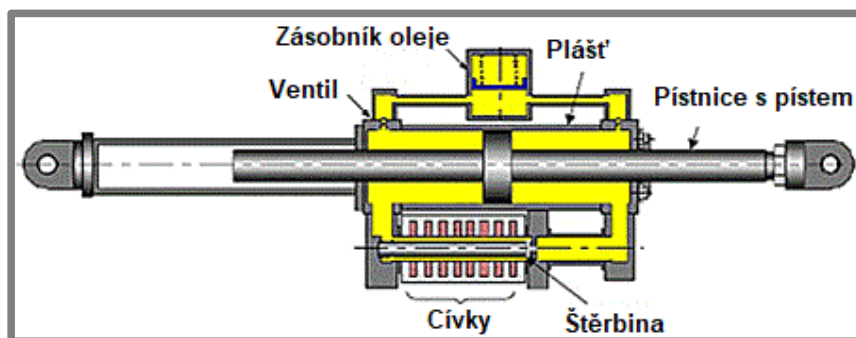


Obr. 2-13 Píst s meandrovým prouděním [12]

2.5 Přehled konstrukčních řešení šterbin MR tlumičů vně pístu

2.5.1 Konstrukce s vnějším obtokovým kanálem

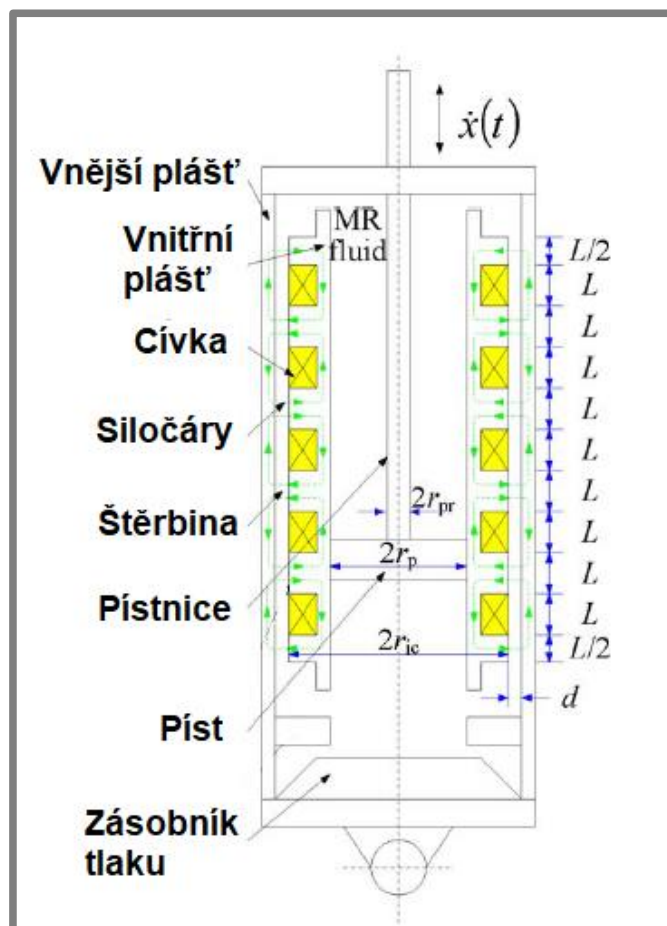
Jedním z příkladů konstrukčního řešení šterbin umístěných mimo píst může být tlumič s vnějším obtokovým kanálem (Obr. 2-14), který jednoduše řeší problém s ovládáním tuhosti při vysokých napětích v kapalině a nízkých rychlostech pístu. Obtokový kanál ovšem markantně zvětšuje rozměry tlumiče, a proto je pro některé aplikace nevhodný.



Obr. 2-14 MR tlumič s vnějším obtokovým kanálkem [19]

2.5.2 Konstrukce s cívkami a obtokovým kanálem v plášti tlumiče

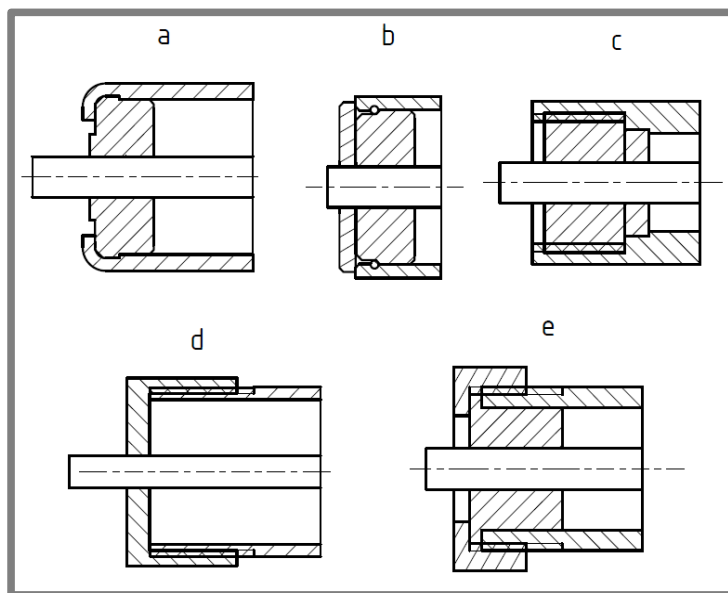
Tyto tlumiče (Obr. 2-15) mají velký dynamický rozsah, což je poměr mezi tlumící silou při zapnutém a vypnutém magnetickém poli. Cívky se v tomto případě nenachází v pístu, nýbrž v plášti tlumiče, který zároveň poskytuje prostor pro prstencový obtokový kanál. Magnetické pole tedy nezasahuje do tělesa pístu, ale koná svou práci mimo něj. [13]



Obr. 2-15 Tlumič s cívkami a obtokovým kanálem v plášti tlumiče [13]

2.6 Přehled konstrukčních řešení uzávěrů jednoplášťových tlumičů

O uzávěrech tlumičů toho nebylo zatím příliš napsáno. V učebnicích a vědeckých pracích se tato problematika vyskytuje spíše sporadicky. V žádné práci se však nevyskytuje komplexní pojednání o všech možných variantách. Následující řádky tedy shrnují informace nalezené z rozličných zdrojů, především od samotných výrobců. Obrázky k jednotlivým variantám bohužel nebyly k dispozici v odpovídající kvalitě, a tak byly nahrazeny schémata.



Obr. 2-16 Uzávěry tlumičů

Nejběžnějším a nejlevnějším způsobem, jak uzavřít tlumič je zaválcování (Obr. 2-16a). Touto cestou se vydala i společnost LORD při uzavírání tlumiče LORD RD-1005-3, který je předmětem této práce. Největší nevýhodou tohoto uzávěru je nedemontovatelnost a komplikovanější tlakování vzduchové komory při výrobě.

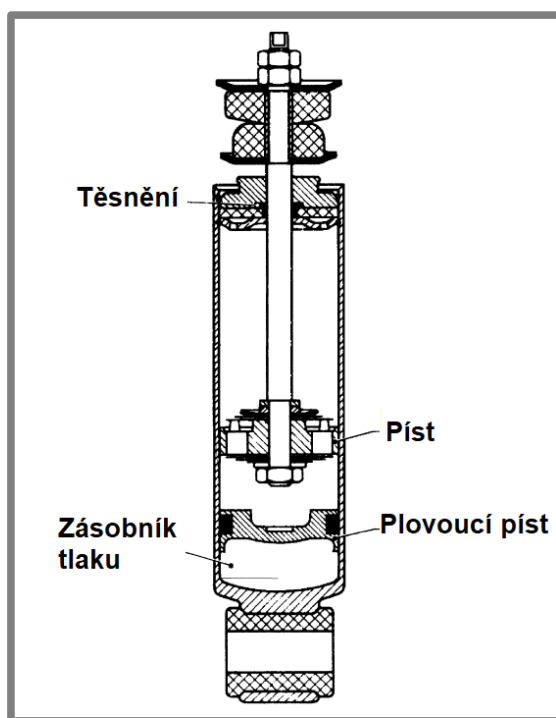
Nejběžnější demontovatelnou variantou je uzávěr zajištěný pojistným kroužkem (Obr. 2-16b). Nevýhodou je, že pojistný kroužek brání uzávěru v pohybu pouze na jednu stranu. Na stranu druhou musí být aplikováno ještě sekundární zajištění, a to buď na samotném tlumiči nebo na jiném místě v systému. Sekundární zajištění může být provedeno pomocí kruhové desky, která je v tlumiči naražena nebo našroubována na závit, či na šroubech.

Dalším typem uzávěru je uzávěr s vnitřním závitem v plášti (Obr. 2-16c). Jistá úskalí tohoto druhu uzávěru jsou ve středění, které nemůže být provedeno samotným závitem, nýbrž válcovou nebo kuželovou plochou umístěnou před závitem.

Dále ještě zmíním uzávěr, který je připevněn vnějším závitem vyřezaným na povrchu pláště (Obr. 2-16d). A také uzávěr, který se skládá ze zátky, jíž drží převlečná matice našroubovaná na vnější závit vyřezaný na povrchu pláště (Obr. 2-16e).

2.7 Oddělení tlakové komory od pracovní u jednoplášťových tlumičů

2.7



Obr. 2-17 DeCarbonův teleskopický tlumič [3]

Jednoplášťové tlumiče kmitů mají obvykle dvě komory. Jedna komora je naplněna olejem a slouží jako pracovní komora pro píst tlumiče a druhá je naplněna plynem o vysokém tlaku (cca 20 bar). Důležitým konstrukčním prvkem je oddělení těchto dvou komor. Nejpoužívanějším řešením je oddělení plynové komory od pracovní plovoucím pístem. Jako příklad může posloužit DeCarbonův teleskopický tlumič (Obr. 2-17), jehož dvě komory odděluje plovoucí píst. Ten musí mít volný pohyb ve směru osy tlumiče, aby mohl kompenzovat změnu objemu vyvolanou zasouváním pístnice a teplotní roztažností oleje. U plovoucích pístů jsou kladeny vysoké nároky na obvodové těsnění, které je vystaveno vysokému tlaku a musí za všech provozních podmínek oddělit plyn od oleje, to vyžaduje také vysoké požadavky na přesnost výroby. Při některých aplikacích tohoto typu tlumiče (off road), může být nevýhodou i to, že je náchylný k poškození, neboť jakékoliv odchýlení od výrobní válcovitosti pláště může znamenat omezení volného pohybu plovoucího pístu, popřípadě netěsnost.

Oddělení pracovní komory od tlakové komory s plynem je možno provést i membránou. Toto konstrukční řešení lze nalézt například v malých magnetoreologických tlumičích, používaných u semi-aktivního odpružení sedadel nákladních automobilů (Obr. 2-6). Jednou z hlavních výhod tohoto řešení jsou menší náklady na výrobu a menší velikost. Dalšími způsoby, jak kompenzovat změny objemu u jednoplášťového tlumiče jsou například plovoucí píst na mechanické pružině nebo stlačitelná tuhá pěna s uzavřenou strukturou buněk. [3] [14]

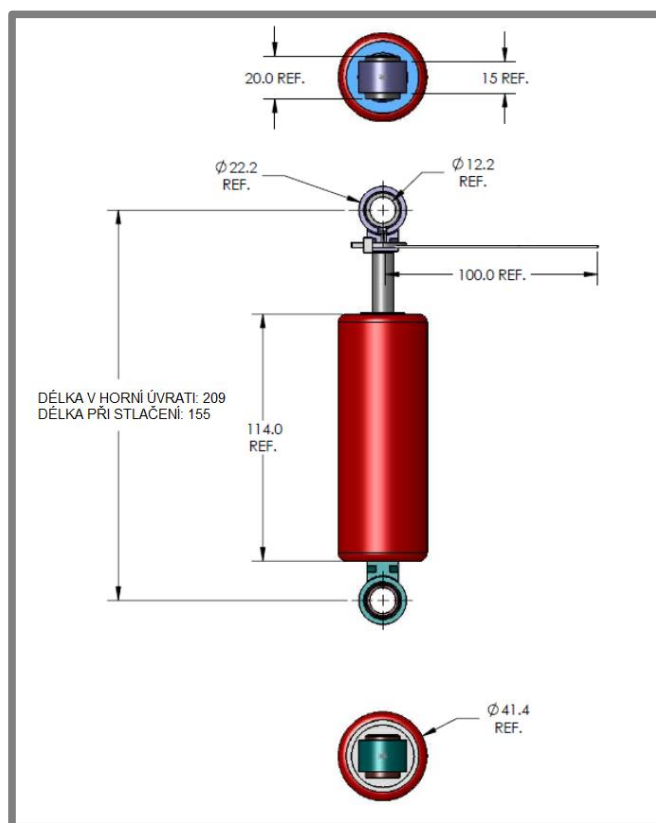
2.8 Magnetoreologický tlumič LORD RD-1005-3

Tato kapitola shrnuje všechny informace o tlumiči LORD RD-1005-3, které byly známy před měřením a demontáží tlumiče. [15]

Tab. 1 Poznámky ke komerční specifikaci MR tlumiče LORD RD-1005-3 [15]

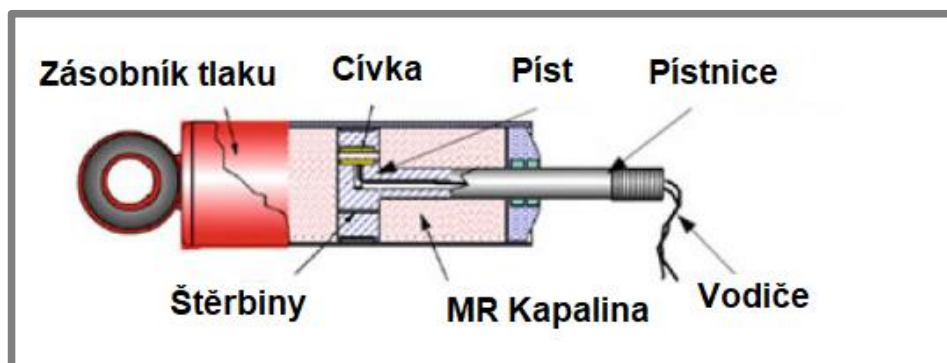
Vstupní proud	Maximálně 1 A nepřetržitě Maximálně 2 A krátkodobě
Vstupní napětí	12 V DC
Odpor	5 Ω při pokojové teplotě 7 Ω při 71°C
Teplota skladování	Od -40°C do 100°C
Poznámka	Rozsah zdvihu musí být omezen minimálně o 6 mm, jinak hrozí poškození tlumiče.

Dále bylo známo z datasheetu výrobce schéma znázorňující základní rozměry (Obr. 2-18).



Obr. 2-18 Rozměrové schéma MR tlumiče LORD RD-1005-3 [15]

A konečně schéma zobrazující přibližně konstrukci tlumiče LORD typu RD-1005-3 (Obr. 2-19) V tomto zdroji se mimo jiné konstatuje, že tlumič LORD RD-1005-3 je jednoplášťový. [16]



Obr. 2-19 Konstrukce MR tlumiče LORD RD-1005-3 [16]

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

Cílem této práce je konstrukční návrh a realizace úpravy nedemontovatelného MR tlumiče LORD, který v průběhu času získal netypickou Fv charakteristiku. Praktická část práce se skládá ze dvou oddílů. Tím prvním je reverzní inženýrství, obsažené v kapitole Koncepční řešení a druhým je samotné konstrukční řešení.

Nejdříve bude provedeno samotné měření Fv charakteristiky a měření tlaku plynu v zásobníku. Následně, na základě schémat zaslaných výrobcem a rešerše (kapitola Přehled současného stavu poznání), bude provedena nedestruktivní analýza, která umožní naplánovat a provést demontáž s co nejmenším počtem poškozených dílů. Při demontáži musí být brán zřetel na možné poškození, či nestandardní umístění jednotlivých dílů, aby bylo možné zjistit příčinu netypické Fv charakteristiky.

Dále budou splněny dílčí cíle jako vypracování výkresové dokumentace všech dílů stávajícího tlumiče, zjištění typu MR kapaliny, a v neposlední řadě naměření magnetické indukce v pístu tlumiče.

Následuje navržení rekonstrukce, při níž má být použito co nejvíce stávajících dílů. Upravený tlumič bude vyvinut s ohledem na cíl práce, jenž požaduje upravit tlumič tak, aby byl kompletně demontovatelný, a mohl tak sloužit k experimentálním účelům nebo jako pomůcka při studiu. Zařízení má být dále vybaveno ventilkem pro natlakování tlakové komory, aby se mohlo použít k experimentům, zkoumajícím různé chování tlumiče při různých hodnotách tlaku v tlakové komoře.

Na závěr bude úprava tlumiče realizována, zařízení se smontuje a podrobí novému testu Fv charakteristik, po němž bude moci být diagnostikována příčina netypické Fv charakteristiky v původním tlumiči.

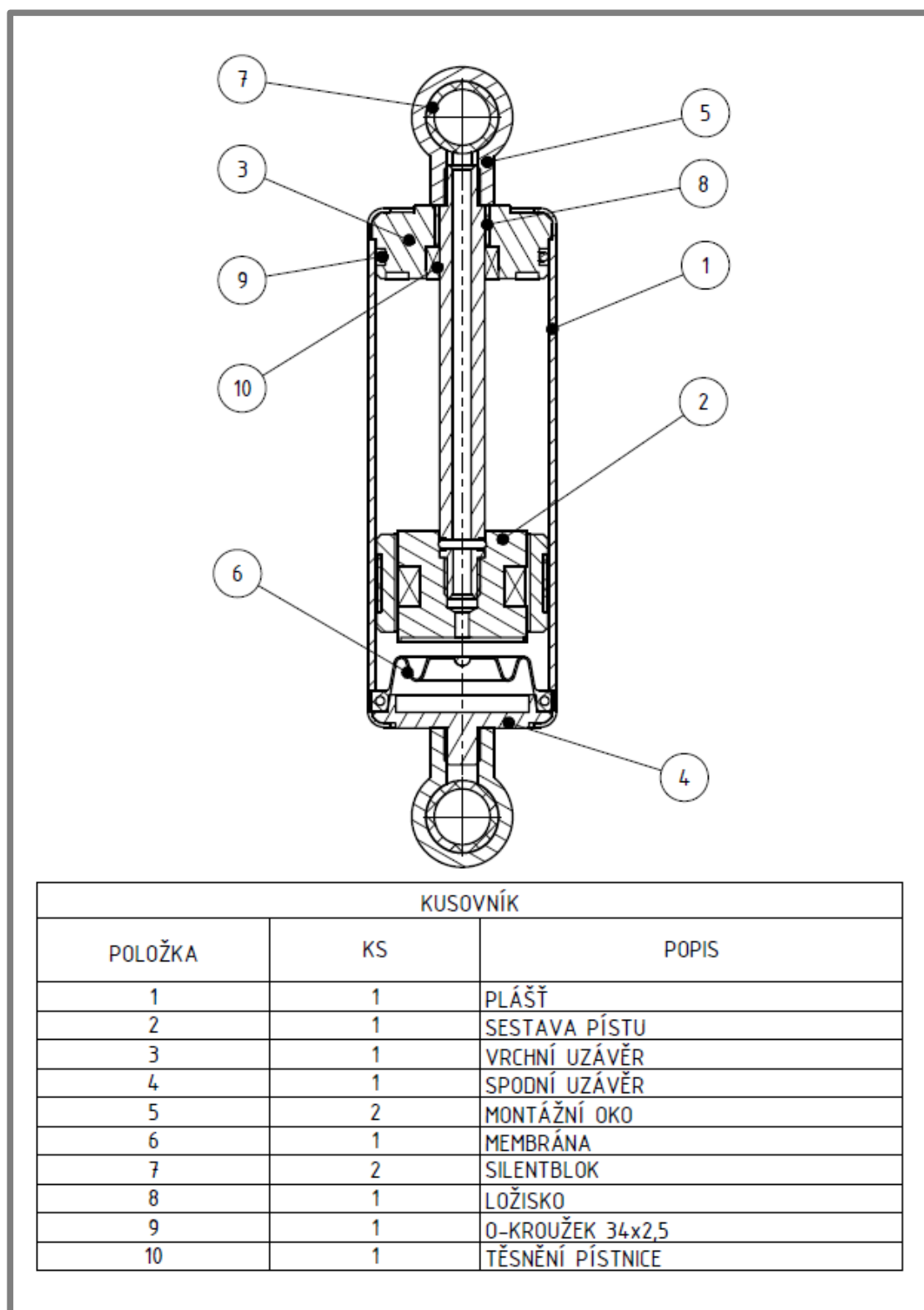
4 KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ

4

Tato kapitola si klade za cíl shrnout výsledky reverzního inženýrství. V první kapitole bude popsáno jak původní tlumič LORD RD-1005-3 (Obr. 4-1) fungoval a z jakých částí se skládá. Další kapitoly se věnují jednotlivým měřením a jejich výsledkům.



Obr. 4-1 MR tlumič LORD RD-1005-3 před demontáží



Obr. 4-2 Výkres MR tlumiče LORD RD-1005-3

4.1 Popis tlumiče

Tlumič LORD RD-1005-3 je malý magnetoreologický jednoplášťový tlumič, který našel svoje uplatnění jako součást semi-aktivního sekundárního odpružení nákladních automobilů.

Je to zařízení jednoduché konstrukce. Skládá se z hlavního pláště (Obr. 4-6), spodního uzávěru (Obr. 4-5), který doléhá na membránu (Obr. 4-4) a tím zajišťuje těsnost jak MR kapaliny v pracovním válci, tak plynu v zásobníku tlaku. Dále vrchního uzávěru (Obr. 4-7) těsnícího o-kroužkem, nímž prochází pístnice, tudíž má pro ni uzpůsobené těsnění a ložisko. Nedílnou součástí je samotný píst (Obr. 4-3), skládající se z vnitřní a vnější části, cívky a pístního kroužku. Na píst je připevněná pístnice, níž procházejí vodiče od cívky. Dále je součástí tlumiče membrána, oddělující pracovní komoru od plynové komory, a nakonec dvě montážní oka, připevněná na obou uzávěrech na závit M8 x 1.

Štěrbina v pístu má tvar obyčejného prstence, který odděluje vnější a vnitřní část pístu, ty jsou spojeny svařováním (Obr. 4-3), což je velmi nestandardní technologický proces spoje ve štěrbině MR tlumiče, z tohoto důvodu se stal předmětem zájmu v kapitole 4.3.



Obr. 4-3 Píst MR tlumiče LORD RD-1005-3

Hlavní plášť tlumiče je na obou koncích zakončen lemy, držícími uzávěry tlumiče v krajních polohách a uzavírajícími tak plášť. Tyto lemy vznikly nejspíše při zaválcování. Uzavření pláště tímto technologickým postupem neumožňuje opětovnou rozebíratelnost a tlumič je tímto klasifikován jako nedemontovatelný.

Samotné natlakování tlakové komory nejspíše proběhlo buď tak, že bylo při montáži do prostoru komory dáno určité množství tekutého dusíku, jež posléze expandovalo ve smontovaném tlumiči, nebo byl tlak v komoře vytvořen mechanicky stlačením spodního dílu dlouhou trubicí, která byla potom upíchnuta a zaválcována.

Celá koncepce tlumiče je vytvořena tak, aby byla jeho výroba co nejlevnější a zařízení tak mohlo být použito ke komerčním účelům. S tím souvisí i zaválcování bránící opětovné demontáži zařízení.



Obr. 4-4 Membrána



Obr. 4-5 Spodní uzávěr tlumiče



Obr. 4-6 Plášť s upíchnutým lemem

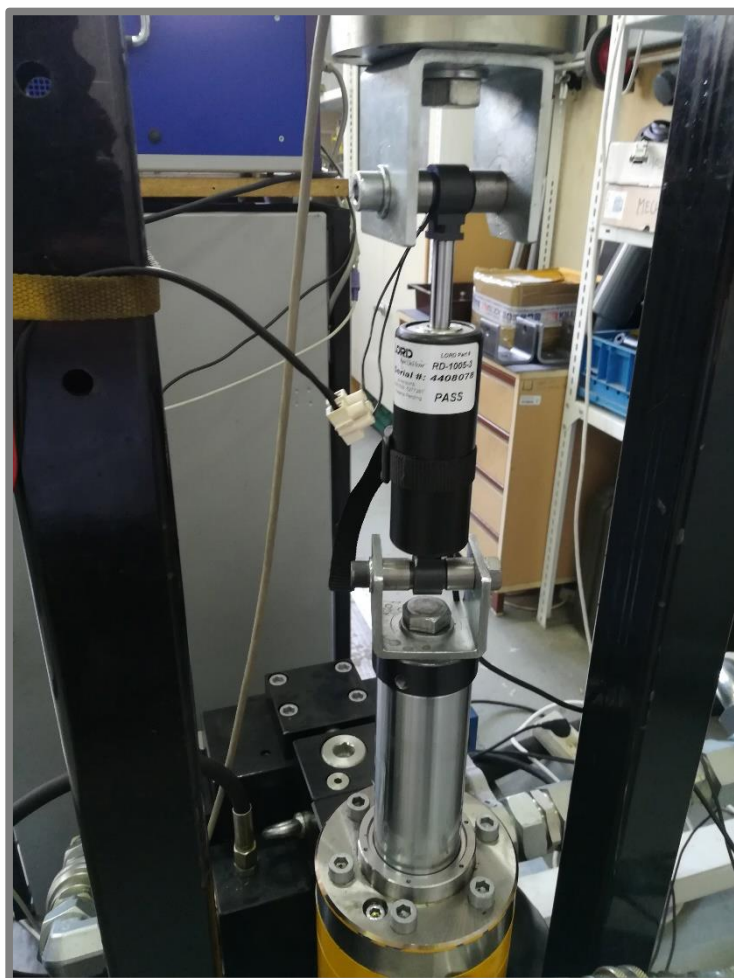


Obr. 4-7 Vrchní uzávěr s demontovaným těsněním pístnice

4.2 Měření charakteristik tlumiče a výpočet velikosti tlakové komory

4.2

První ze základních charakteristik tlumiče je rychlostní charakteristika (F_v), vyjadřuje závislost tlumicí síly na rychlosti pohybu pístu tlumiče. Druhou základní charakteristikou je zdvihová (F_z), která vyjadřuje závislost tlumicí síly na dráze pístu. Měření obou charakteristik se provádí na dynamometru, na kterém je tlumič rozkmitáván, přičemž jsou měřeny jeho reakční síly. Tlumicí práci za jeden dvojzdvih určuje plocha pod křivkou F_z charakteristiky. Součástí této kapitoly je i výpočet velikosti tlakové komory, který je důležitý pro následnou demontáž tlumiče. [17]



Obr. 4-8 Měření rychlostních a zdvihových charakteristik na dynamometru

Popis měření:

Nejprve byl tlumič upnut do zkušebního přístroje nacházejícího se v laboratoři ÚK Obr. 4-8. Zkušební přístroj bylo nutné nastavit na požadovanou výšku a zdvih. Následně bylo provedeno měření pro kalibraci siloměru. Na siloměru byla naměřena hodnota 43 N bez upnutého tlumiče a 51 N s upnutým tlumičem. Potom bylo provedeno měření zdvihu. Tlumič byl upnutý do přístroje, ale nedotažený. Takto bylo zjištěno, že spodní doraz se nachází v 2,5 mm a horní v 57 mm, což bylo důležité pro stanovení referenčního bodu měření. Poté byla změřena síla, kterou vyvíjí tlumič na siloměr ve třech různých bodech zdvihu, naměřené hodnoty jsou v tabulce Tab. 1.

S ohledem na konstrukci tlumiče, přesněji řečeno na jeho pracovní zdvih 54,5 mm, byl nastaven referenční bod v 28 mm a amplituda kmitu 15 mm. Měření probíhalo přes funkci sinus při frekvenci 0,5 Hz. Na počátku měření byla teplota tlumiče 26°C. Při měření se však tlumič silně zahříval, proto bylo nutné zajistit chlazení pomocí větráku a opatřit tlumič snímačem teploty. Pomocí softwaru DEWEsoft byly zaznamenávány veličiny F , v , z , I , N a Obr. 4-9 lze vidět základní Fv charakteristiky pro jednotlivé proudy. V příloze této práce jsou výsledné grafy všech provedených měření Fv a Fz charakteristik pro proudy 0A; 0,5A; 1A; 1,5A; 2A.

Výpočet velikosti tlakové komory:

Tab. 2 Hodnoty síly při různých hodnotách zdvihu

Zdvih [mm]	Síla [N]
0	44
28	55
56	125

Na základě těchto hodnot může být vypočítán tlak plynu v tlakové komoře a jeho objem.

Nejdříve je potřeba spočítat plochu průřezu pístnice (S_p) z jejího průměru (D_p).

$$S_p = \frac{\pi \cdot D_p^2}{4} = \frac{\pi \cdot (0,01 \text{ m})^2}{4} = 7,85 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$$

Dále můžeme spočítat tlak v tlakové komoře při nestlačené (p_0) a stlačené (p_1) pístnici.

$$p_0 = \frac{F_0}{S_p} = \frac{44 \text{ N}}{7,85 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2} = 0,56 \text{ MPa}$$

$$p_1 = \frac{F_1}{S_p} = \frac{125 \text{ N}}{7,85 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2} = 1,59 \text{ MPa}$$

Pro výpočet objemu tlakové komory je nutné nejdříve spočítat změnu objemu pracovního válce vyvolanou zasunutím pístnice (z je zdvih tlumiče).

$$V_z = S_p \cdot z = 7,85 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot 0,056 \text{ m} = 4,40 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$$

To znamená, že objem tlakové komory při stlačené pístnici (V_1) se rovná rozdílu objemu tlakové komory při nestlačené pístnici (V_0) a změny objemu válce při zasunutí pístnice (V_z).

$$V_1 = V_0 - V_z$$

$$V_1 = V_0 - 4,40 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$$

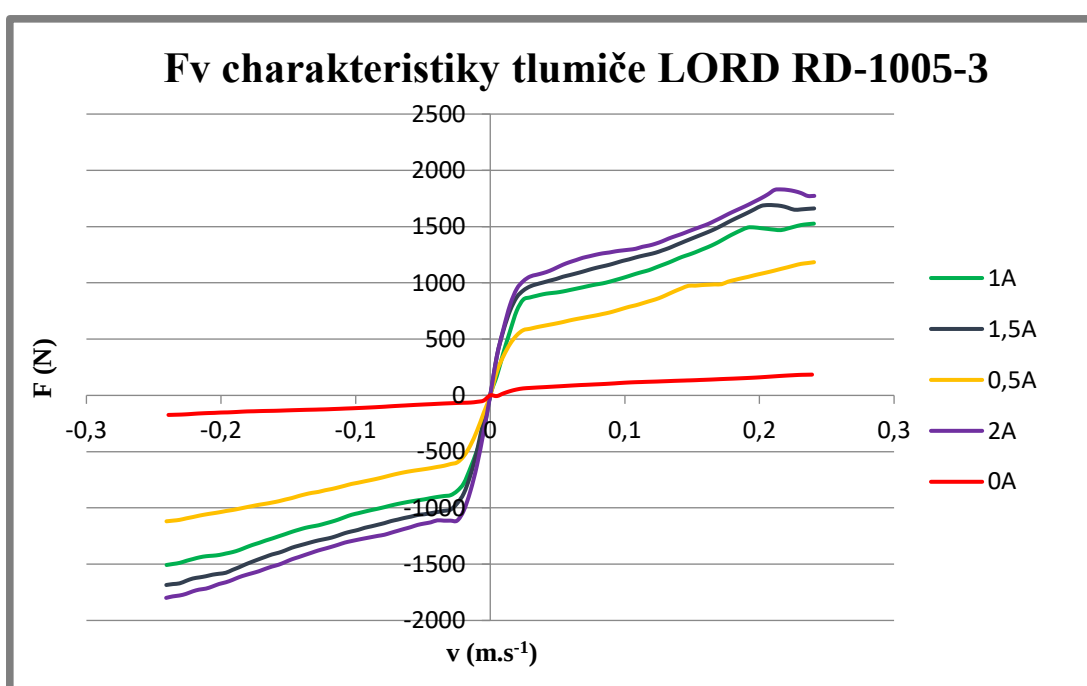
Dále budeme ve výpočtech předpokládat, že stlačování pístnice probíhá tak rychle, že se nestihne uskutečnit výměna tepla mezi tlumičem a okolím, abychom mohli děj popsat adiabatickou rovnicí. Také předpokládáme, že pracovním plynem je dusík, jehož Poissonova konstanta je $\kappa = 1,4$.

$$p_0 \cdot V_0^\kappa = p_1 \cdot V_1^\kappa$$

$$0,56 \cdot 10^6 \text{ Pa} \cdot V_0^{1,4} = 1,59 \cdot 10^6 \text{ Pa} \cdot (V_0 - 4,40 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3)^{1,4}$$

$$V_0 = 8,368 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$$

Objem tlakové komory při nestlačené pístnice je tedy 8368 mm^3 . Kdybychom dále předpokládali, že je komora tvaru válce o průměru 30 mm, bude jeho výška 11,84 mm.



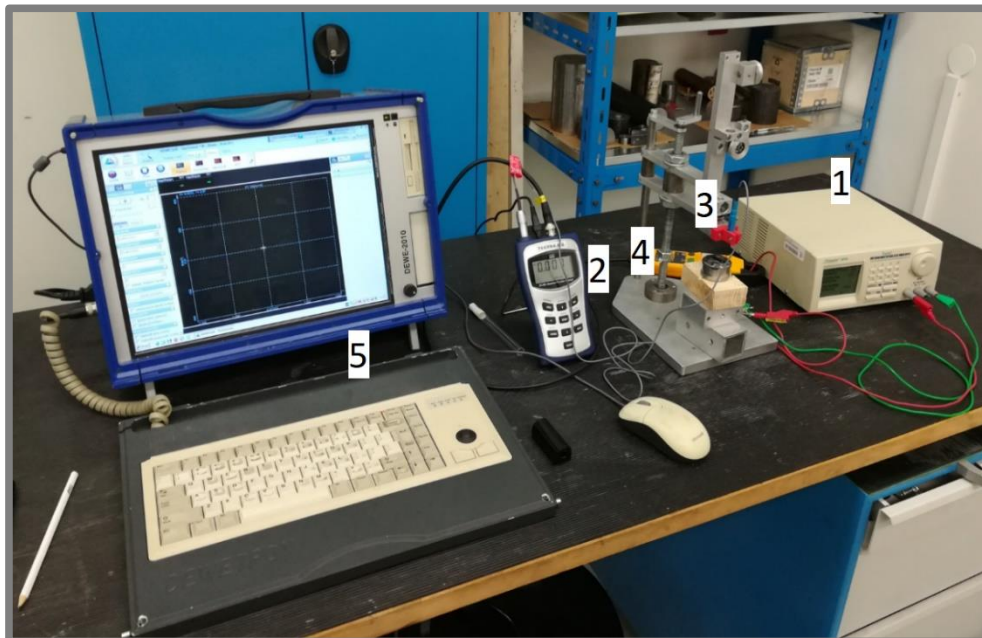
Obr. 4-9 Výsledky měření Fv charakteristiky tlumiče LORD RD-1005-3

Závěr měření

Na základě síly byl vypočten objem tlakové komory, což je informace, která bude potřeba při volbě vhodného místa k uvolnění tlaku během demontáže. Na grafech Fv charakteristik jsou vidět v horních částech jednotlivých křivek neobvyklá zalomení křivek. Příčinu této netypické Fv charakteristiky je třeba diagnostikovat.

4.3 Měření magnetické indukce

Měření magnetické indukce proběhlo v laboratoři ÚK 15. 1. 2018. Magnetická indukce byla naměřena pomocí níže popsané aparatury.



Obr. 4-10 Měřicí aparatura pro měření magnetické indukce

Popis měřicí aparatury:

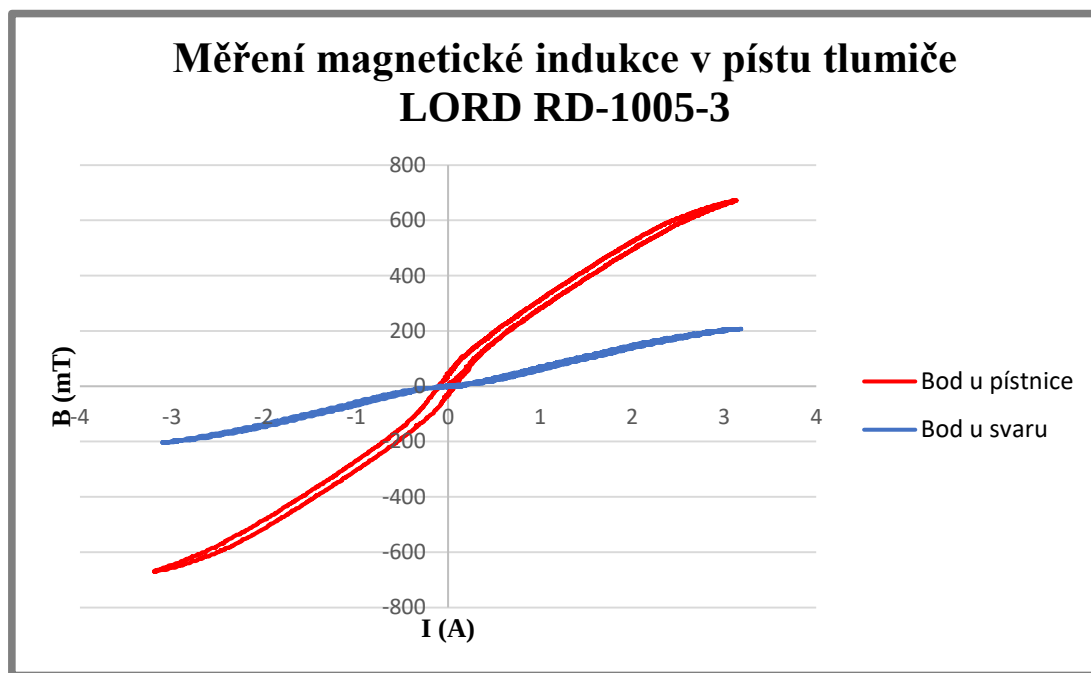
- 1) Laboratorní zdroj Manson SDP 2603
- 2) Magnetometr BELL 5180
- 3) Ultratenká Hallova sonda FW BELL
- 4) Proudové kleště FLUKE i30
- 5) Počítač DEWE 2010

Tab. 3 Nastavení aparatury pro měření magnetické indukce

Kanál	8	9
	Magnetometr	Proudové kleště
	0 V = 0 mT	0 V = 0 A
	1 V = 1000 mT	1 V = 10 A
Rozsah	1 V	
Filtr DP	10 Hz	
Rozsah	Nejvyšší	
Vzorkovací frekvence	100 vzorků/s	

Popis měření:

Bylo provedeno měření magnetické indukce ve štěrbině pístu MR tlumiče LORD RD-1005-3. Před každým měřením byl odsmagnetováním eliminován zbytkový magnetismus v pístu. Magnetická indukce před odsmagnetováním se pohybovala kolem 25 až 30 mT a po odsmagnetování kolem 8 mT. V blízkosti svarů nebylo odsmagnetování potřeba, neboť zbytkový magnetismus nepřekročil hranici 7 mT. Na Obr. 4-11 vidíme rozdíl dvou měření u pístnice a u svaru. Všechny výsledky měření jsou v příloze této práce.



Obr. 4-11 Výsledky měření magnetické indukce tlumiče LORD RD-1005-3

Závěr měření:

Na základě měření bylo zjištěno že magnetická indukce v blízkosti svarů je nižší než v ostatních částech štěrby. To bylo potvrzeno i absencí zbytkového magnetismu u svarů při odpojení obvodu. Je tedy zřejmé, že magnetický obvod je v místech svarů zkratovaný. I přesto dokáže tlumič správně fungovat, neboť svary se rychle magneticky nasytí a dál už magnetické pole nestahují.

4.4 Analýza kapaliny

Kapalina byla měřena v odměrné nádobě ve tvaru válce o průměru $D_N = 47$ mm, výška hladiny dosahovala $h_N = 36$ mm. Objem kapaliny je tedy:

$$V_{MR} = \frac{\pi \cdot D_N^2}{4} \cdot h_N = \frac{\pi \cdot (47 \cdot 10^{-3} \text{ m})^2}{4} \cdot 38 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 6,59 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$$

Hmotnost kapaliny byla změřena $m_{MR} = 0,19$ Kg, tudíž hustota kapaliny je:

$$\rho_{MR} = \frac{m_{MR}}{V_{MR}} = \frac{0,19 \text{ Kg}}{6,59 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3} = 2883,16 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

Což je hodnota nejbližší kapalině LORD MRF-132DG, která má hustotu 2950 Kg/m³ až 3150 Kg/m³

4.5 Součásti tlumiče a jejich použití při rekonstrukci

Cílem práce je rekonstruovat tlumič tak, aby se jeho koncepce příliš nelišila od té původní. Jediným parametrem, který je potřeba změnit je demontovatelnost. Dle toho byl sestaven i seznam dílů, které je potřeba upravit nebo naopak zachovat v původní podobě. Nejdražší část tlumiče, která musí být bez výhrad zachována je magnetoreologická kapalina. Plán demontáže proto bude sestaven tak, aby nemohlo dojít k jakémukoliv jejímu úniku.

Hlavní plášť tlumiče musí být kvůli zaválcovaným lemům upíchnut. Aby však mohl být opět využit v rekonstruovaném tlumiči, bude cílem demontáže poškodit co nejmenší část pláště, respektive zachovat co nejvíce z jeho délky, kvůli případné nutnosti zkrácení zdvihu. Dále bude využit vrchní uzávěr, avšak v mírně modifikované verzi. Ze spodního uzávěru se naopak využije jen malá část, a to prstencový kroužek, držící tvar membrány. Sestava pístu, membrána a montážní oka budou použita bez jakýchkoliv úprav.

5 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

5

5.1 Demontáž tlumiče

5.1

Aby mohla být demontáž provedena bez ztráty magnetoreologické kapaliny, bylo třeba zajistit uvolnění tlaku ze zásobníku. K tomu bylo nutné odhadnout, kde je zásobník tlaku v rámci tlumiče umístěn. Ze zdroje [18], který mimo jiné konstatuje že je tlumič Lord RD-1005-3 jednoplášťový, byl získán schematický obrázek znázorňující řez tlumičem, na základě něj bylo dospěno k předpokladu, že je zásobník tlaku ve spodní části tlumiče. Při výpočtech v kapitole 4.2 bylo zjištěno, jaká je přibližně velikost tlakové komory. Na základě všech těchto informací byl nakonec tlak uvolněn po demontáži montážního oka přes díru o průměru 2 mm navrtnou ve spodním uzávěru přímo v ose tlumiče.



Obr. 5-1 Díra pro uvolnění tlaku

Po uvolnění tlaku se mohl upíchnout na soustruhu zaválcovaný vrchní lem pláště tlumiče. Následně byl vrchní uzávěr vylišován ven, vytáhnout píst a bylo odebráno 65,9 ml magnetoreologické kapaliny, která vykazovala známky značné sedimentace, a to i po intenzivním používání tlumiče při měření rychlostních charakteristik. Všechny díly byly následně vyčištěny technickým benzínem a naměřeny pro výkresovou dokumentaci. Dále bylo nezbytné otevřít tlumič i ze spodní strany, kvůli tvorbě výkresové dokumentace. Bylo tedy opět nutné upíchnout lem pláště tlumiče a vylišovat spodní uzávěr i s membránou.



Obr. 5-2 Demontovaný tlumič LORD RD-1005-3



Obr. 5-3 Sedimentace MR kapaliny při demontáži tlumiče

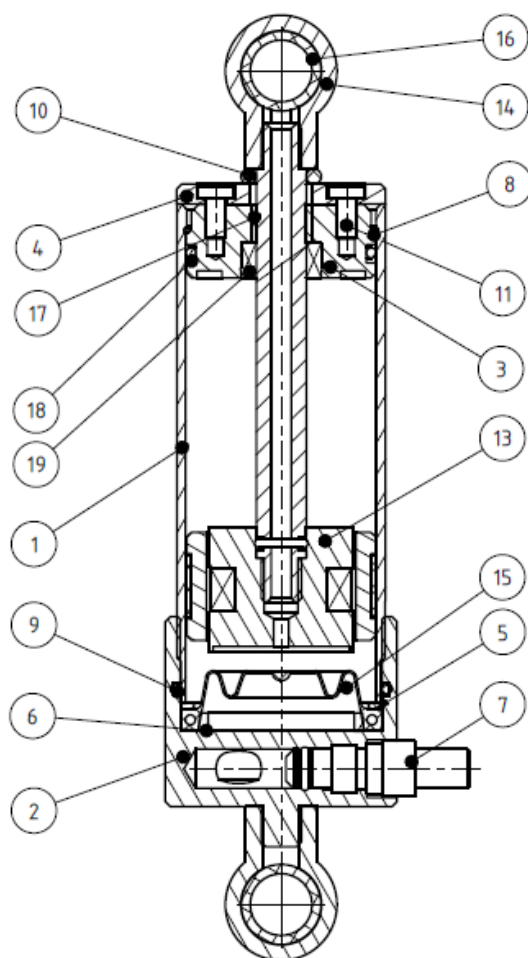
5.2 Popis zrekonstruovaného tlumiče

Výsledná koncepce rekonstrukce kombinuje výhody dvou odlišných přístupů uzavírání tlumičů. Na jedné straně je spodní uzávěr, který je uchycen k původnímu plášti na závit vyřezaný na vnějším povrchu pláště. Na straně druhé je vrchní uzávěr, zajištěný proti axiálnímu posuvu ve směru z tlumiče pomocí pojistného kroužku, pro nějž byla vysoustružena drážka na vnitřní straně pláště. Aby nedocházelo vlivem snížení tlaku při pohybu pístu dolů k axiálnímu posuvu uzávěru tímž směrem, je na uzávěr uchycena pomocí dvou šroubů deska, opírající se o stěnu pláště.

Plášť a vrchní uzávěr vznikly úpravou původních dílů. Spodní uzávěr musel být vyroben nový, neboť na něj bylo kladeno příliš mnoho požadavků, které původní spodní díl nemohl splnit – demontovatelnost, těsnost, prostor pro ventilek, dokonalá opora membrány a uchycení montážního oka. Dále byla vyrobena podložka, která je vložena mezi hranou pláště a membránou a slouží k rozložení tlaku hrany pláště na membránu. Nakonec byl tlumič vybaven dorazem, který zajišťuje kompenzaci úbytku zdvihu.



Obr. 5-4 Upravený tlumič



KUSOVNÍK					
POLOŽKA	KS	SOUČÁSTI NOVÉ / UPRAVENÉ	POLOŽKA	KS	SOUČÁSTI PŮVODNÍ
1	1	PLÁŠŤ	13	1	SESTAVA PÍSTU
2	1	SPODNÍ UZÁVĚR	14	2	MONTÁŽNÍ OKO
3	1	VRCHNÍ UZÁVĚR	15	1	MEMBRÁNA
4	1	OPĚRNÁ DESKA	16	2	SILENTBLOK
5	1	PODLOŽKA MEMBRÁNY	17	1	LOŽISKO
6	1	KROUŽEK MEMBRÁNY	18	1	O-KROUŽEK 34x2,5
7	1	VENTILEK	19	1	TĚSNĚNÍ PÍSTNICE
8	1	POJISTNÝ KROUŽEK			
9	1	O-KROUŽEK 40x2			
10	1	DORAZ - O-KROUŽEK 10x3			
11	3	ŠROUB M4			
12	1	TĚSNÍČÍ PODLOŽKA 4,3			

Obr. 5-5 Výkres upraveného tlumiče

5.3 Popis jednotlivých dílů upraveného tlumiče

5.3

Při řešení rekonstrukce tlumiče bylo potřeba uvažovat nad rozličnými konstrukčními detaily, které zajišťují správnou funkčnost zařízení. V následující kapitole bude popsáno detailní konstrukční řešení jednotlivých dílů.

5.3.1 Spodní uzávěr

5.3.1

Spodní uzávěr (2) má hned několik funkcí, demontovatelně uzavírá tlumič, poskytuje prostor pro ventilek a membránu, s níž společně tvoří plynovou komoru a v neposlední řadě je na něj připevněno montážní oko, jímž je tlumič montován do systému. Každá z těchto funkcí, kterou musí spodní uzávěr splňovat má určité požadavky na jeho tvar a rozměry. To je také důvodem, proč nemohla být použita úprava stávajícího dílu, a bylo nezbytné vyrobit díl nový.



Obr. 5-6 Spodní uzávěr s ventilkem namontovaný na plášti tlumiče

Spodní uzávěr uzavírá plášť tlumiče (1), je k němu připevněn pomocí závitu M 41,3 x 1, vyhotoveného na vnějším povrchu pláště tlumiče. Ještě před závitem je na plášti vysoustružená 8,4 mm dlouhá válcová plocha o průměru 39,9 mm, která svým průměrem lícuje na vnitřní průměr spodního uzávěru, v němž je vyhotovena drážka pro o-kroužek (9). Tato část dvou lícujících válcových ploch a o-kroužku je důležitým prvkem pro utěsnění MR kapaliny.

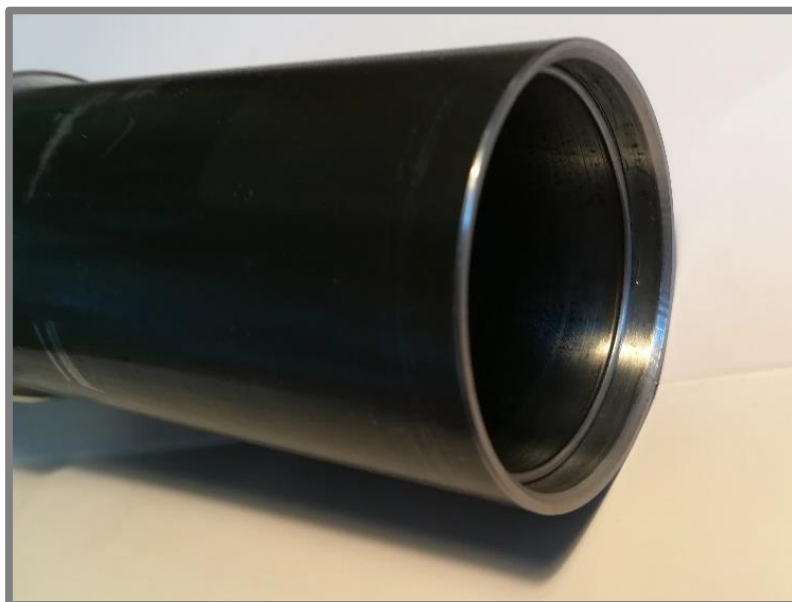
Do spodního uzávěru je dále zasazena membrána (15) s vnitřním kroužkem membrány (6), který je klíčový pro správné držení jejího tvaru při změnách tlaku ve válci. Tento vnitřní kroužek tvaru prstencovitého komolého kužele byl vyroben z původního spodního uzávěru. Těleso spodního uzávěru muselo být navrženo tak, aby přesně obepínalo základní kruh membrány. Při přitažení spodního uzávěru na plášť se základní kruh membrány zmáčkne a vznikne tak určité předpětí, nezbytné pro utěsnění jak vzduchu, tak MR kapaliny.

Pro lepší rozložení tlaku hrany pláště na membránu při utažení byla mezi membránu a válec v místě dotyku umístěna podložka (5), aby bylo zabráněno případné netěsnosti. Tato inovace byla provedena po vizuální kontrole hrany membrány, při níž bylo zjištěno opotřebení, z důvodu nedostatečného rozložení tlaku v předchozí konfiguraci. Vnitřní hrany této podložky jsou sraženy kvůli možnému poškození membrány. Ve stěně tlakové komory, uvnitř spodního uzávěru byly vyvrtány čtyři díry o průměru 11 mm a hloubce 13 mm tak, aby zvětšily celkový objem komory, zároveň umožnily přístup vzduchu z ventilku a v neposlední řadě snížily hmotnost spodního dílu. Větší objem tlakové komory je výhodný zejména z hlediska snížení změny tlaku při používání tlumiče.

Ve spodním uzávěru je umístěn také ventilek (7), který je přimontován na závit UNEF 3/8" – 32 2B a je utěsněn prostřednictvím vlastního o-kroužku. Na závěr je spodní uzávěr zakončen závitem M8 x 1 pro uchycení původního montážního oka. Tato konstrukce spodního dílu nezkracuje ze spodní strany zdvih tlumiče, ačkoliv byla z pláště odstraněna jeho tenkostěnná část, membrána má vůči němu stále stejnou pozici.

5.3.2 Vrchní uzávěr

Vrchní uzávěr (3) vznikl úpravou původního dílu. Konkrétně byl zmenšen jeho největší průměr, aby mohl být vsunut do vnitřního průměru tlustostěnné části pláště. Díky tomu mohlo být zajištěno co nejmenší zkrácení zdvihu, které bylo, vzhledem ke konstrukci pláště a poškození pláště po upíchnutí zaválcované hrany, nezbytné.



Obr. 5-7 Pojistný kroužek zasazený do drážky v plášti

Po této úpravě bylo nutné vrchní uzávěr zajistit vůči axiálnímu posuvu. To bylo provedeno dvěma konstrukčními opatřeními; pro každý směr jedním. Pohybu ve směru ven z tlumiče je zabráněno pomocí pojistného kroužku pro náboj (8). Pojistný kroužek není standardizovaný, ale navržený právě pro aplikace na uzávěrech tlumičů,

kde zajišťuje správnou funkčnost v malých prostorech. Tento pojistný kroužek sestává v podstatě z pružinového drátu, který je zakružený do průměru drážky, vysoustružené na vnitřní straně válce, jak je vidět na obrázku Obr. 5-7.

Aby nedocházelo vlivem snížení tlaku nad pístem při pohybu pístu dolů k axiálnímu posuvu uzávěru dovnitř tlumiče, jsou do něj vyvrtány dvě díry se závitem M4 pro šrouby (11), na nichž je uchycena opěrná deska (4), která se opírá o stěnu pláště (Obr. 5-9). Tato deska je kruhového tvaru tloušťky 4 mm, se dvěma dírami pro dva šrouby M4 x 8 se zápusťnou hlavou, které jsou do ní zapuštěny, a středovým otvorem pro pístnici. Tímto je uzávěr zajištěn proti axiálnímu posuvu do obou stran. Při konstrukci vrchního uzávěru bylo velmi důležité dbát na sražení jeho hrany tak, aby bylo možné aplikovat pojistný kroužek.

Na závěr bylo myšleno i na samotnou kompletaci tlumiče a s ní související odvzdušnění pracovní komory s MR kapalinou, které muselo být vykonáno prostřednictvím vrchního uzávěru, neboť ten má být montován jako poslední (Obr. 5-8). Pro tento účel je ve vrchním uzávěru vyvrtána díra se závitem M4 pro odvzdušňovací šroub se zápusťnou hlavou (11), která je zapuštěna ve válcovém zahloubení v samotném tělese uzávěru tak, aby nijak nevystupovala ven z horní roviny vrchního dílu, což je nezbytné pro správné usazení opěrné desky. Pod hlavou odvzdušňovacího šroubu byla ještě umístěna těsnící podložka (12).



Obr. 5-8 Montáž vrchního uzávěru do pláště tlumiče



Obr. 5-9 Namontovaná opěrná deska

5.3.3 Plášť

Válcový plášť (1) byl upraven tak, by korespondoval s vrchním a spodním uzávěrem, jak bylo výše zmíněno. Pro nevyužitelnost byly upíchnuty oba tenkostěnné konce, kterými byl plášť zaválcován a využita byla pouze jeho tlustostěnná část. Na vrchní straně byla sražena vnitřní hrana, pro správné usazení pojistného kroužku. Dále byla za tímto sražením obrobena drážka pro pojistný kroužek, jejíž hrana je ze spodní strany zaoblená, aby se při montáži vrchního dílu nepoškodil o-kroužek. Ze spodní strany je vnější povrch pláště vysoustružen na průměr 39,9 mm po délce 8,4 mm pro správné utěsnění o-kroužku spodního dílu, načež plášť pokračuje závitem M41,3 x 1 dlouhým 12 mm pro uchycení spodního dílu.

5.3.4 Doraz

Kvůli kompenzaci úbytku zdvihu musel být tlumič vybaven ještě dorazem (10), který byl umístěn na pístnici, aby bylo zabráněno kolizi pístu s membránou při dolní úvrati. Tento doraz je realizován o-kroužkem 10x3. Jeho tloušťka 3 mm je hodnota, která přesně kompenzuje ztráty vzniklé při úpravách tlumiče.

5.4 Základní parametry původního a upraveného tlumiče

Tab. 4 Základní parametry původního tlumiče LORD RD-1005-3

Zdvih	54 mm
Rozteč montážních ok (horní úvrat'/dolní úvrat')	209 mm / 155 mm
Objem MR kapaliny	65,9 ml
Objem tlakové komory	6 ml

Tab. 5 Základní parametry upraveného tlumiče

Zdvih	49,6 mm
Rozteč montážních ok (horní úvrat'/dolní úvrat')	215,2 mm / 165,6 mm
Objem MR kapaliny	62 ml
Objem tlakové komory	11,5 ml

6 DISKUZE

6

V úvodních kapitolách této práce bylo pojednáno o magnetoreologické kapalině a konstrukčních variantách magnetoreologických tlumičů. Dále následovaly kapitoly o šterbinách, uzávěrech a tlakových komorách magnetoreologických tlumičů. Tato úvodní rešerše byla důležitá zejména pro nedestruktivní analýzu zařízení a následnou konstrukci nových dílů. V další kapitole byl definován problém, byly stanoveny požadavky na zrekonstruovaný tlumič a dílčí cíle práce.

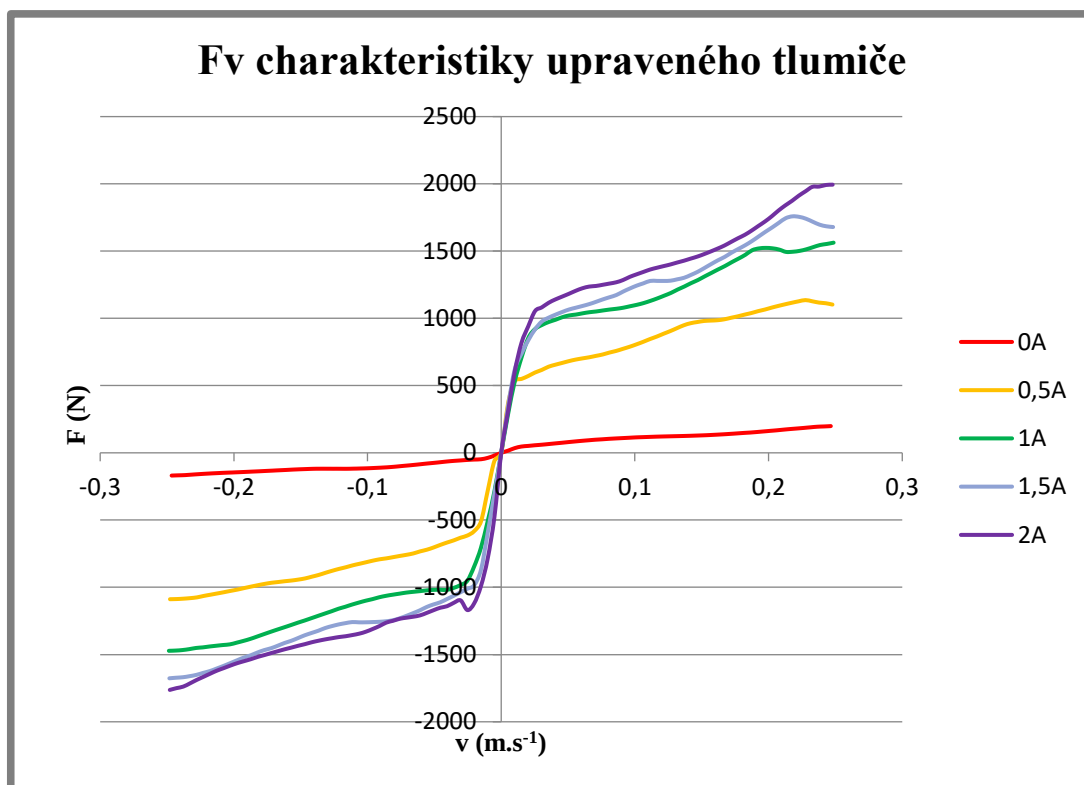
Následující kapitola Koncepční řešení popisuje reverzní inženýrství, které zahrnuje měření rychlostních a zdvihových charakteristik. Dále obsahuje nedestruktivní analýzu, která byla provedena na základě schémat, zaslaných výrobcem a úvodní rešerše. Ta umožnila naplánovat a provést demontáž s co nejmenším počtem poškozených dílů. Při demontáži byl brán zřetel na možné poškození, či nestandardní umístění jednotlivých dílů, aby bylo možné zjistit příčinu netypické Fv charakteristiky. Nejprve se jako nejpravděpodobnější důvod tohoto nestandardního chování jevila sedimentace MR kapaliny, která vytvořila na povrchu membrány sedlinu, jež nebyla narušena ani intenzivním užíváním tlumiče při měření rychlostních a zdvihových charakteristik.

Dále byla v rámci reverzního inženýrství vypracována výkresová dokumentace všech dílů stávajícího tlumiče. Byl zjištěn typ MR kapaliny. A v neposlední řadě byla naměřena magnetická indukce ve šterbině pístu tlumiče, kde byl objasněn problém zkratu magnetického obvodu ve svarech.

V kapitole Konstrukční řešení byla navržena rekonstrukce, při níž bylo použito co nejvíce stávajících dílů. Vzhledem k tomu, že cílem práce bylo upravit tlumič tak, aby byl demontovatelný, a mohl sloužit k experimentálním účelům a jako demonstrační pomůcka při studiu, bylo nutné vytvořit i úplně nové díly.

Rekonstruovaný tlumič je možné kompletně demontovat, může být tedy využit pro studijní účely, navíc je možné při delším nepoužívání promíchat MR kapalinu v pracovním válci a tím vyřešit možné budoucí problémy se sedimentací. Zařízení je dále vybaveno ventilkem pro natlakování plynové komory, tudíž je možno je použít k experimentům, zkoumajícím například chování tlumiče při různých hodnotách tlaku v tlakové komoře.

Na závěr byla úprava tlumiče realizována a zařízení tak mohlo být podrobeno novému testu Fv charakteristik. Výsledky měření upraveného tlumiče jsou velmi podobné výsledkům tlumiče původního. Zlomy v horních částech křivek zůstaly téměř nezměněny. Vzhledem k tomu, že tlumič byl měřen s čerstvě rozmíchanou MR kapalinou, byla tím vyvrácena teorie, že za netypickou Fv charakteristiku může sedimentace MR kapaliny. Nejpravděpodobnější příčinou tohoto jevu je to, že mikročástice proletí šterbinou pístu při této pístové rychlosti tak rychle, že se na ní neprojeví působení magnetického pole v dostatečné míře. [18]



Obr. 6-1 Výsledky měření Fv charakteristik upraveného tlumiče

7 ZÁVĚR

7

Cílem této bakalářské práce bylo navrhnout a realizovat úpravu nedemontovatelného magnetoreologického tlumiče LORD RD-1005-3, který v průběhu času získal netypickou Fv charakteristiku. Tlumič měl být kompletně demontovatelný, aby mohl sloužit ke studijním a experimentálním účelům. Přitom mělo být použito co nejvíce původních dílů a zařízení si mělo zachovat podobné rozměry. V neposlední řadě měla být zjištěna příčina netypické Fv charakteristiky.

Na základě znalostí plynoucích z úvodní rešerše byl tlumič demontován, načež bylo provedeno reverzní inženýrství. Byly naměřeny rychlostní a zdvihové charakteristiky, přičemž bylo ukázáno v čem jsou jejich výsledky netypické. Dále bylo provedeno měření magnetické indukce ve šterbině pístu tlumiče, při němž bylo objasněno zkratování magnetického obvodu ve svarech. Potom byla vypracována výkresová dokumentace původního zařízení. V závěrečné části práce pak byla navržena a realizována rekonstrukce tlumiče a zařízení tak mohlo být znovu podrobeno testu Fv charakteristik, jehož výsledky byly podobné jako před úpravou. Na základě tohoto měření mohla být vznesena teorie příčiny netypické Fv charakteristiky.

Cíle této bakalářské práce byly splněny. Výstupem je kompletní výkresová dokumentace původního i upraveného tlumiče, konstrukční zpráva, výsledky měření a samotný upravený tlumič.

8 BIBLIOGRAFIE

- [1] REIF, Konrad a Karl-Heinz DIETSCHE. *Automotive handbook: Bosch - invented for life*. 8th ed., revised and extended. Chichester: John Wiley & Sons, 2011. ISBN 978-1-119-97556-4.
- [2] DABADE, Mr. Vinayak D., Prof. Y. R. PATIL, Prof.M.V. KHARADE a Prof. P.R. PATIL. Smart Material: Magneto Rheological Fluid. *IOSR Journal of Mechanical Engineering* [online]. 2013, **4**(40), 48-52 [cit. 2018-03-26]. ISSN 2278-1684. Dostupné z: [http://www.iosrjournals.org/iosr-jmce/papers/sicete\(mech\)-volume4/40.pdf](http://www.iosrjournals.org/iosr-jmce/papers/sicete(mech)-volume4/40.pdf)
- [3] DIXON, John C. *The shock absorber handbook*. 2nd ed. Chichester, England: John Wiley, 2007. ISBN 047051700X.
- [4] CARLSON, David J. a Mark R. JOLLY. MR fluid, foam and elastomer devices. *Mechatronics* [online]. 2000, **10**(4-5), 555-569 [cit. 2018-03-26]. ISSN 0957-4158. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957415899000641>
- [5] *Working models of magnetorheological fluids* [online]. Active structures laboratory, 2011 [cit. 2018-04-03]. Dostupné z: http://scmero.ulb.ac.be/project.php?id=9&page=MR_modes.html
- [6] GUGLIELMINO, Emanuele. *Semi-active suspension control: improved vehicle ride and road friendliness*. London: Springer, 2008. ISBN 9781848002319.
- [7] BAJAJ, HARSHAL M., GAGANDEEP SINGH BIRDI a BHUSHAN A. UGALE. Application of magneto rheological (MR) fluid damper and its social impact. *International Journal of Mechanical And Production Engineering* [online]. 2014, **2**(2), 41-45 [cit. 2018-03-26]. ISSN 2320-2092. Dostupné z: http://www.ijraj.in/journal/journal_file/journal_pdf/2-40-139486518941-45.pdf
- [8] ASHFAK, A., A. SAHEED, K. K. ABDUL RASHEED a J. Abdul JALEEL. Design, Fabrication and Evaluation of MR Damper. *International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering* [online]. 2009, **3**(5), 530-535 [cit. 2018-03-26]. ISSN 2077-124X. Dostupné z: <http://waset.org/publications/10225/design-fabrication-and-evaluation-of-mr-damper>
- [9] 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, **24**(3), 1-13 [cit. 2018-03-26]. DOI: 10.1088/0964-1726/24/3/035013. ISSN 1361-665X. Dostupné z: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0964-1726/24/3/035013/meta>

- [10] BAI, Xian-Xu, Dai-Hua WANG a Hang FU. Principle, modeling, and testing of an annular-radial-ductmagnetorheological damper. *Sensors and Actuators A: Physical* [online]. 2013, **201**, 302-309 [cit. 2018-03-26]. ISSN 0924-4247. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924424713003531>
- [11] KIM, Kyongsol, Zhaobo CHEN, Dong YU a Changhyon RIM. Design and experiments of a novel magnetorheological damper featuring bifold flow mode. *Smart Materials and Structures* [online]. 2016, **25**(7), 1-10 [cit. 2018-03-26]. DOI: 10.1088/0964-1726/25/7/075004. ISSN 1361-665X. Dostupné z: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0964-1726/25/7/075004/meta>
- [12] IMADUDDIN, Fitrian, Saiful Amri MAZLAN, Mohd Azizi Abdul RAHMAN, Hairi ZAMZURI UBAIDILLAH a Burhanuddin ICHWAN. A high performance magnetorheological valve with a meandering flow path. *Smart Materials and Structures* [online]. 2014, **23**(6), 1-11 [cit. 2018-03-26]. DOI: 10.1088/0964-1726/23/6/065017. Dostupné z: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0964-1726/23/6/065017/meta>
- [13] BAI, Xian-Xu, Wei HU a Norman M. WERELEY. Magnetorheological Damper Utilizing an Inner Bypass for Ground Vehicle Suspensions. *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS* [online]. 2013, **47**(7), 3422-3425 [cit. 2018-03-26]. ISSN 0018-9464. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6558942/>
- [14] JOLLY, Mark R., Jonathan W. BENDER a J. David CARLSON. Properties and Applications of Commercial Magnetorheological Fluids. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* [online]. 1999, **10**(1), 5-13 [cit. 2018-03-26]. Dostupné z: <http://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/1045389X9901000102>
- [15] S. H., LAND. *MR damper assembly commercial specifications: RD-1005-3*. Cary, North Carolina, United states of America, 2006.
- [16] *Lord Corporation product bulletin: Rheonetic RD-1005-3 MR damper*. 2001.
- [17] SAPIŇSKI, Bogdan. *Návrh regulátoru pro mr tlumič sedadla řidiče automobilu*. Ostrava, 2007. Oborová práce. Technická univerzita Ostrava.
- [18] KUBÍK, Michal. *Magnetorheological suspension damper for space application*. Brno, 2017. PhD thesis. University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Institute of Machine and Industrial Design. Vedoucí práce Doc. Ing. Ivan Mazůrek, CSc.
- [19] Structure of MR dampers. In: *Sanwa tekki corporation* [online]. Japonsko, b.r. [cit. 2018-05-01]. Dostupné z: https://www.tekki.co.jp/en/products/list/dampers/product_building04/

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

Použité zkratky

Obr.	-	obrázek
Tab.	-	tabulka
MR	-	magnetoreologický
Fv	-	závislost síly na rychlosti
Fz	-	závislost síly na zdvihu
ÚK	-	Ústav konstruování
DC	-	stejnosměrný proud

Symbole a veličiny

D_P	[m]	průměr pístnice
D_N	[m]	průměr odměrné nádoby
F_1	[N]	síla působící na pístnici v horní poloze
F_2	[N]	síla působící na pístnici v dolní poloze
h_N	[m]	výška kapaliny v nádobě
κ	[-]	Poissonova konstanta
m_{MR}	[Kg]	hmotnost MR kapaliny
p_0	[MPa]	tlak v zásobníku plynu při nestlačeném tlumiči
p_1	[MPa]	tlak v zásobníku plynu při stlačeném tlumiči
ρ_{MR}	[Kg. m ⁻³]	hustota MR kapaliny
S_P	[m ²]	plocha průřezu pístnice
V_{MR}	[m ³]	objem MR kapaliny v tlumiči
V_0	[m ³]	objem zásobníku plynu při nestlačené pístnici
V_1	[m ³]	objem zásobníku plynu při stlačené pístnici
V_z	[m ³]	změna objemu pracovního válce při zasunutí pístnice
z	[m]	zdvih tlumiče

10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ**10**

Obr. 2-1 MR kapalina mimo magnetické pole [2]	13
Obr. 2-2 MR kapalina v magnetickém poli [2]	13
Obr. 2-3 Ventilový mód [5]	14
Obr. 2-4 Smykový mód [5]	14
Obr. 2-5 Tahovo-tlakový mód [5]	14
Obr. 2-6 Jednoplášťový MR tlumič [2]	15
Obr. 2-7 Dvoupplášťový MR tlumič [8]	16
Obr. 2-8 Tlumič s pístnicí vyvedenou z obou stran [8]	16
Obr. 2-9 Triviální MR tlumič [9]	17
Obr. 2-10 Píst s obtokovými kanálky [9]	18
Obr. 2-11 Píst s prstencovými a radiálními kanálky [10]	18
Obr. 2-12 Tlumič s dvoustupňovým tokem [11]	19
Obr. 2-13 Píst s meandrovým prouděním [12]	20
Obr. 2-14 MR tlumič s vnějším obtokovým kanálkem [19]	20
Obr. 2-15 Tlumič s cívkami a obtokovým kanálem v plášti tlumiče [13]	21
Obr. 2-16 Uzávěry tlumičů	22
Obr. 2-17 DeCarbonův teleskopický tlumič [3]	23
Obr. 2-18 Rozměrové schéma MR tlumiče LORD RD-1005-3 [15]	24
Obr. 2-19 Konstrukce MR tlumiče LORD RD-1005-3 [16]	25
Obr. 4-1 MR tlumič LORD RD-1005-3 před demontáží	27
Obr. 4-2 Výkres MR tlumiče LORD RD-1005-3	28
Obr. 4-3 Píst MR tlumiče LORD RD-1005-3	29
Obr. 4-4 Membrána	30
Obr. 4-5 Spodní uzávěr tlumiče	30
Obr. 4-6 Plášť s upíchnutým lemem	30
Obr. 4-7 Vrchní uzávěr s demontovaným těsněním pístnice	30
Obr. 4-8 Měření rychlostních a zdvihových charakteristik na dynamometru	31
Obr. 4-9 Výsledky měření Fv charakteristiky tlumiče LORD RD-1005-3	33
Obr. 4-10 Měřicí aparatura pro měření magnetické indukce	34
Obr. 4-11 Výsledky měření magnetické indukce tlumiče LORD RD-1005-3	35
Obr. 5-1 Díra pro uvolnění tlaku	37
Obr. 5-2 Demontovaný tlumič LORD RD-1005-3	38
Obr. 5-3 Sedimentace MR kapaliny při demontáži tlumiče	38
Obr. 5-4 Upravený tlumič	39
Obr. 5-5 Výkres upraveného tlumiče	40
Obr. 5-6 Spodní uzávěr s ventilkem namontovaný na plášti tlumiče	41
Obr. 5-7 Pojistný kroužek zasazený do drážky v plášti	42
Obr. 5-8 Montáž vrchního uzávěru do pláště tlumiče	43
Obr. 5-9 Namontovaná opěrná deska	43
Obr. 6-1 Výsledky měření Fv charakteristik upraveného tlumiče	46

11 SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Poznámky ke komerční specifikaci MR tlumiče LORD RD-1005-3 [16]	24
Tab. 2 Hodnoty síly při různých hodnotách zdvihu	32
Tab. 3 Nastavení aparatury pro měření magnetické indukce	34
Tab. 4 Základní parametry původního tlumiče LORD RD-1005-3	44
Tab. 5 Základní parametry upraveného tlumiče	44

12 SEZNAM PŘÍLOH**12**

Příloha 01: Výkresy původního tlumiče:

01-A2-00-00	MR TLUMIČ LORD RD-1005-3
01-A3-01-00	PLÁŠŤ
01-A3-02-00	SESTAVA PÍSTU
01-A3-02-01	VRCHNÍ UZÁVĚR
01-A4-02-02	PÍSTNICE
01-A4-02-03	SPODNÍ UZÁVĚR
01-A4-02-04	PÍSTNÍ KROUŽEK
01-A3-03-00	VNITŘNÍ ČÁST PÍSTU
01-A3-04-00	VNĚJŠÍ ČÁST PÍSTU
01-A4-05-00	PÍSTNÍ KROUŽEK
01-A4-06-00	MEMBRÁNA
01-A4-07-00	SILENTBLOK

Příloha 02: Výkresy upraveného tlumiče:

02-A2-00-00	UPRAVENÝ TLUMIČ
02-A3-01-00	SPODNÍ UZÁVĚR
02-A2-02-00	PLÁŠŤ
02-A3-03-00	VRCHNÍ UZÁVĚR
02-A3-04-00	OPĚRNÁ DESKA
02-A4-05-00	PODLOŽKA MEMBRÁNY
02-A4-06-00	KROUŽEK MEMBRÁNY

**Příloha 03: Výsledky měření rychlostních a zdvihových charakteristik
původního MR tlumiče LORD RD-1005-3****Příloha 04: Výsledky měření rychlostních a zdvihových charakteristik
upraveného tlumiče****Příloha 05: Výsledky měření magnetické indukce ve šterbině pístu MR tlumiče
LORD RD-1005-3**