



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

**KONSTRUKCE NÍZKOTLAKÉHO
MAGNETOREOLOGICKÉHO TLUMIČE**

DESIGN OF LOW-PRESSURE MAGNETORHEOLOGICAL DAMPER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jan Mareš

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Michal Kubík, Ph.D.

BRNO 2022

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: **Jan Mareš**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Michal Kubík, Ph.D.**
Akademický rok: 2021/22

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:

Konstrukce nízkotlakého magnetoreologického tlumiče

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Konstrukce magnetoreologického tlumiče je většinou v jednopláštovém provedení, kde je nutný vysoký tlak plynové náplně. To má negativní vliv na životnost těsnění. Konstrukcí nízkotlakého tlumiče by se dalo výrazně zvýšit efektivnost a životnost těchto tlumičů.

Typ práce: vývojová – konstrukční

Cíle bakalářské práce:

Hlavním cílem práce je konstrukční řešení nízkotlakého magnetoreologického tlumiče.

Dílní cíle bakalářské práce:

- rešerše současných konstrukcí nízkotlakých MR tlumičů a zpětných ventilů,
- koncepční řešení konstrukce,
- zpracování modelu a výkresové dokumentace.

Požadované výstupy: průvodní zpráva, výkresy součástí, výkres sestavení, návrhový výkres, digitální data.

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

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

<http://www.ustavkonstruovani.cz/texty/bakalarske-studium-ukonceni/>

Seznam doporučené literatury:

POYNOR, James. Innovative Designs for Magneto-Rheological Dampers. USA, 2002. Diplomová práce. Virginia Polytechnic Institute and State University.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

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

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

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá problematikou omezené životnosti těsnících prvků ve stávajících vysokotlakých magnetoreologických tlumičích. Životnost těsnění by bylo možné prodloužit konstrukcí MR tlumiče, který by pracoval za nižších tlaků, což je i cílem této práce.

Navržený tlumič dosahuje nízkého tlaku díky vložení patního MR ventilu mezi tlumící píst a plovoucí píst plynové komory. Součástí ventilu je zpětný ventil. Z hlediska jednoduchosti a snížení výrobních nákladů na testovací prototyp, byl tlumič zkonstruován úpravou stávajícího vysokotlakého jednoplášťového tlumiče dostupného na FSI VUT.

Přínosem této práce je experimentální ověření funkce zpětného ventilu v MR kapalině. Ventil vykazuje asymetrickou charakteristiku, a rychle se zavírá. Hlavním výsledkem je konstrukční návrh nízkotlakého jednoplášťového MR tlumiče. Předpokládá se, že provozem MR tlumiče za nižších tlaků se zvýší životnost těsnění což může vést k jejich širší implementaci.

KLÍČOVÁ SLOVA

Magnetoreologický, nízkotlaký tlumič, zpětný ventil, asymetrická charakteristika

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the problem of the limited lifetime of sealing elements inside high-pressure magnetorheological dampers. The lifetime could be extended by the low-pressure damper design, which is also the aim of this thesis.

The proposed design achieves low-pressure operation thanks to the MR foot valve inserted between the damping piston and floating piston of the air chamber. This foot valve also contains a blow-off check valve. For simplicity and to reduce the upfront costs of the testing prototype, the damper was designed by modifying an existing single-tube high-pressure MR damper available at FSI VUT.

The contribution of this thesis is the experimental evaluation of check valve function in MR fluid. Valve exhibits asymmetrical behaviour and closes rapidly. The main outcome is the design of a low-pressure single-tube MR damper. It is expected that operation at lower pressures will extend the lifetime of sealing elements which may lead to broader implementation of MR dampers.

KEYWORDS

Magnetorheological, low-pressure damper, check valve, asymmetrical characteristic

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MAREŠ, Jan. *Konstrukce nízkotlakého magnetoreologického tlumiče* [online]. Brno, 2022. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/140295>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí práce Michal Kubík.

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji Ing. Michalovi Kubíkovi Ph.D. za odborné vedení při vypracování této bakalářské práce. Také děkuji celé své rodině, která mě podporovala během mého studia na VUT.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, pod odborným vedením Ing. Michala Kubíka Ph.D. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů.

.....

Podpis autora

OBSAH

1	ÚVOD	13
2	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	14
2.1	Konstrukce olejových hydraulických tlumičů	14
2.2	Konstrukce magnetoreologických tlumičů	16
2.2.1	Magnetoreologická kapalina	16
2.2.2	Jednoplášťové MR tlumiče	18
2.2.3	Dvouplášťové MR tlumiče	21
2.3	Problematika zpětných ventilů v MR kapalině	29
3	ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	32
3.1	Analýza problému	32
3.2	Cíl práce	33
4	KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ	34
4.1	Měření tlumiče se zpětným ventilem	34
4.2	Koncept A	36
4.3	Koncept B	37
4.4	Koncept C	38
4.5	Koncept D	39
4.6	Zhodnocení jednotlivých konceptů	40
5	KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ	42
5.1	Konstrukce vybrané varianty	42
5.1.1	Funkce patního MR ventilu	45
5.1.2	Velikost plynové komory	45
5.2	Hydraulický návrh	46
5.2.1	Analytické určení výsledné F-v charakteristiky	46
5.3	Návrh magnetického obvodu	50
5.4	Vyhodnocení	52
6	DISKUZE	53
7	ZÁVĚR	55

8	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	56
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	58
9.1	Použité zkratky	58
9.2	Použité fyzikální veličiny	58
10	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	61
11	SEZNAM TABULEK	62
12	SEZNAM PŘÍLOH	63

1 ÚVOD

I když si to mnozí neuvědomí, tlumiče jsou velmi významnou součástí našich životů. Každá fyzická věc, ať už je to automobil, stroj, most, budova nebo okénko autobusu, má svoji specifickou rezonanční frekvenci, při které dochází k nadměrnému rozkmitání celé soustavy a v krajních případech i k jejímu nevratnému poškození. Funkcí tlumičů je snížení velikosti těchto kmitů a jejich postupné potlačení. Toho je dosaženo pomocí disipace energie akumulované v pružinách, která se nejčastěji uvolňuje ve formě tepla.

Bezpečná a pohodlná jízda v automobilu vyžaduje velmi kvalitní odpružení. Tlumiče musí během jízdy potlačit kmitání vzniklé přejezdem nerovností na vozovce, přední a zadní náklon vozidla způsobený akcelerací nebo bržděním, ale také boční náklon při zatáčení a různé kombinace těchto pohybů. Oproti dřívějším dobám vzrostla kvalita vozovek, ale moderní automobily jsou provozovány za vyšších rychlostí a díky výkonnějším motorům a brzdám dosahují vyšší dynamiky. To sebou nese zvýšené nároky na tlumiče, které musí pokrýt širokou škálu provozních podmínek. Toho však nelze dosáhnout pomocí běžných pasivních tlumičů, protože mají z výroby danou charakteristiku, kterou nelze během jízdy měnit. Novým trendem posledních let je proto použití adaptivních nebo semi-aktivních tlumičů, které mají schopnost měnit svoji charakteristiku. Nejlepších výsledků bylo dosaženo pomocí aktivních systémů, které využívají lineární elektromagnetické motory (Bose 2004, [1]). Tyto tlumiče se však pro svoji vysokou pořizovací cenu, hmotnost a energetickou náročnost (cca od 500 W do 3 kW na tlumič) u automobilů neujali. Proto se momentálně soustředí vývoj právě na tlumiče adaptivní, a to zejména na rychlé semi-aktivní, které umožňují změnu tlumení v řádech milisekund. Toho lze dosáhnout použitím magnetoreologické kapaliny.

Magnetoreologická kapalina obsahuje železné mikročástice, které jsou rozptýleny v nosném oleji. V blízkosti magnetického pole dochází ke zřetězení těchto částic, což způsobí změnu zdánlivé viskozity MR kapaliny. Magnetické pole je generováno pomocí cívky, kterou protéká elektrický proud. Síla vzniklého pole je pak závislá na velikosti protékajícího proudu. Díky tomu lze pomocí velikosti vpouštěného proudu do cívky měnit zdánlivou viskozitu oleje a tím ovládat odpor tlumiče.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

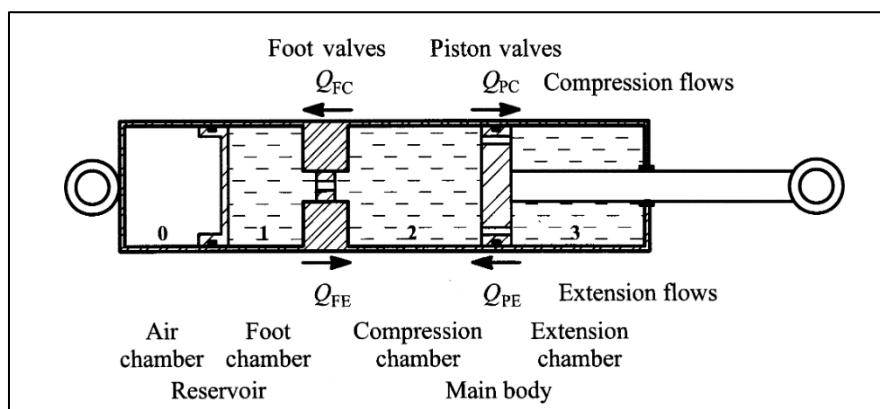
Hlavním úkolem tlumiče je, jak už název napovídá, útlum vibrací. To znamená, že například po vychýlení kola vozidla tlumič zajistí to, že nebude stále kmitat, ale po nějakém čase se kmitání zastaví. Toho tlumič dosahuje pomocí disipace energie, která se uvolňuje ve formě tepla, což má za následek zahřívání tlumiče a jeho částí. Energie se může disipovat třením mezi jednotlivými součástmi, samotnou viskozitou oleje, ale i turbulentním prouděním.

V první části práce je vysvětlen základní princip MR tlumičů, na což navazuje rešerše různých stávajících konstrukčních řešení. Následně je provedena analýza této rešerše na jejíž základě budou stanoveny cíle práce.

2.1 Konstrukce olejových hydraulických tlumičů

Na obrázku (Obr. 2-1 Schéma základní konstrukce tlumiče. je základní schéma hydraulického olejového tlumiče. Tlumič se skládá z několika komor. Komora (0) obsahuje stlačený plyn, nejčastěji dusík, protože je inertní a stálý. Komory (0) a (1) jsou od sebe odděleny plovoucím pístem, který se může pohybovat. Komory (1,2 a 3) obsahují tlumící olej. Komora (2) je nazývána kompresní komora (vysoký tlak při kompresi) a komora (3) se nazývá odskoková (vysoký tlak při odskoku).

Pokud o nějakou vzdálenost vsuneme píst, tedy stlačíme tlumič, dojde k tomu, že začne proudit určitá část kapaliny z kompresní komory (2) do odskokové (3) a to skrz kompresní ventil v pístu. Je zde však problém, protože při vsouvání pístu se vsune i část pístnice, a tuto změnu objemu musíme nějak kompenzovat. Z toho důvodu bude zbylá část kapaliny, jejíž objem bude přímo úměrný objemu vnořené pístnice, proudit do vzduchové komory (1) skrz patní ventil. Ke kompenzaci objemu pak dojde právě ve vzduchové komoře (1), která díky plovoucímu pístu a stlačitelnosti plynu může měnit svoji velikost [2].

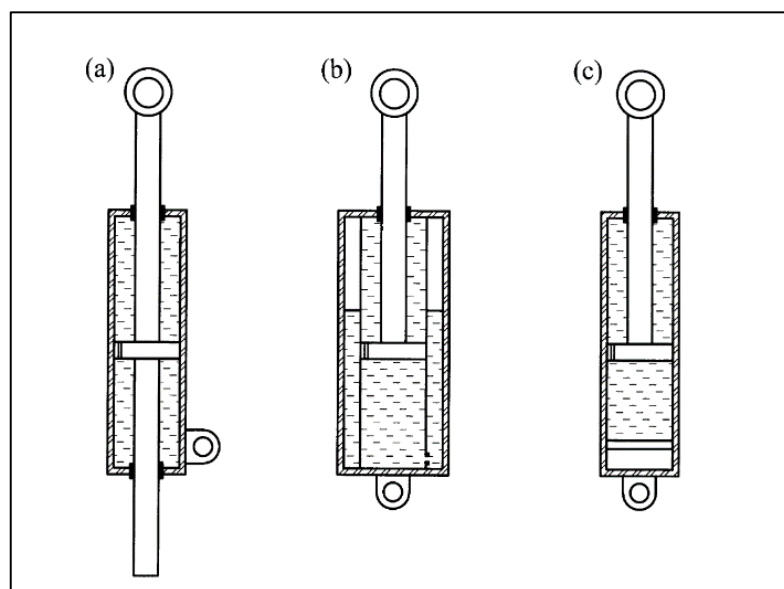


Obr. 2-1 Schéma základní konstrukce tlumiče. [2, s. 41]

Existují tři základní typy konstrukcí:

- jednoplášťová
- dvouplášťová
- verze s pístnicí skrz

Tlumič s pístnicí skrz (a) na rozdíl od jednoplášťového nepotřebuje kompenzovat změnu objemu, protože objem vnořené pístnice je stále stejný a jedná se tak o poměrně jednoduché řešení. Problémem však je, že i tato konstrukce musí kompenzovat změnu objemu kapaliny způsobenou termální expanzí. To se většinou řeší pomocí expanzních pryžových váčků. Výhodou je fakt, že může být instalován v jakékoliv orientaci. Zástavbová délka tohoto tlumiče je bohužel poměrně dlouhá. Pro svoje vlastnosti se pak nejvíce používá ve stavebnictví. [3]



Obr. 2-2 Základní typy tlumičů: a) s pístnicí skrz; b) dvouplášťový; c) jednoplášťový [2].

Dvouplášťový tlumič (b) je vlastně jednoplášťový tlumič, který je celý zabalený do jednoho většího pláště. Tok mezi plášti je zprostředkován patním ventilem v jeho spodní části. Na rozdíl od jednoplášťové verze je zde kompenzace objemu zprostředkována ve vnějším plášti, který je naplněn z části olejem a z části plynem, tak aby se plyn nikdy nedostal do vnitřních komor. Nevýhodou je, že tento typ tlumiče musí být instalován vždy „na stojato“, protože je plyn od oleje oddělen pouze gravitací. Existují však konstrukce, které tento problém řeší za pomoci pryžových měchů nebo externích nádob s plovoucím pístem, které jsou napojeny na vnější plášť. Konstrukce tohoto tlumiče umožňuje chod i za nižších tlaků, což snižuje nároky na těsnění pístnice. Je zřejmé, že tato konstrukce bude oproti předchozím vynikat v délce zdvihu, protože zde není zdvih omezen plovoucím pístem. Vnější plášť však přináší i nevýhody, konkrétně zhoršuje odvod tepla, které se v extrémních podmínkách, zejména při provozu za vysokých teplot, může hromadit. [2], [3]

Jednoplášťová verze (c) (Obr. 2-1) kompenzuje změnu objemu způsobenou vnořením pístnice nebo teplotní roztažností oleje pomocí vzduchové komory, která je oddělena od oleje za pomoci plovoucího pístu nebo měchu. Výhodou tohoto řešení je jednoduchost konstrukce a relativně dobrý odvod tepla. Nevýhodou tohoto řešení je fakt, že hlavní pístnicové **těsnění je vystaveno vysokému tlaku**, což vede k **vysokému tření a rychlému opotřebování**. U této verze je nutné dostatečně natlakovat vzduchovou komoru (běžně i 3 MPa) a to z toho důvodu, abychom potlačili riziko vzniku kavitace. Vzhledem k tomu, že je vzduchová komora a píst v jedné ose, zástavbová délka tohoto tlumiče je poměrně velká, takže se nehodí do omezených prostor. Tento problém lze vyřešit vytažením vzduchové komory do externí expanzní nádoby. Tato konstrukce je pak typická pro motocykly. [2]

2.2 Konstrukce magnetoreologických tlumičů

2.2.1 Magnetoreologická kapalina

MRF (magnetorheological fluid) je smart kapalina, která je suspenzí minerálního nebo silikonového oleje s nízkou viskozitou a feromagnetických částic. Tato kapalina je označovaná jako chytrá, z toho důvodu, že pomocí magnetického pole můžeme ovládat její viskozitu. Ovládat ale můžeme pouze zdánlivou viskozitu, protože skutečná viskozita je určena nosným olejem. Změna zdánlivé viskozity je způsobena zřetěžením feromagnetických částic, ke kterému dochází v přítomnosti magnetického pole.

Feromagnetické částice mají pro MR kapaliny obvykle velikost 3-10 μm . Jednotlivé částice mají slupkovitou strukturu a jsou tvrdé na povrchu, což jim dává částečnou odolnost vůči korozi. MR kapaliny mají odlišné vlastnosti podle velikosti částic a jejich poměru vůči nosnému oleji. Běžně vyráběné MR kapaliny obsahují 75-85 % hmotnostních procent částic. Přítomné částice tedy značně ovlivňují hustotu a viskozitu celé kapaliny [2].

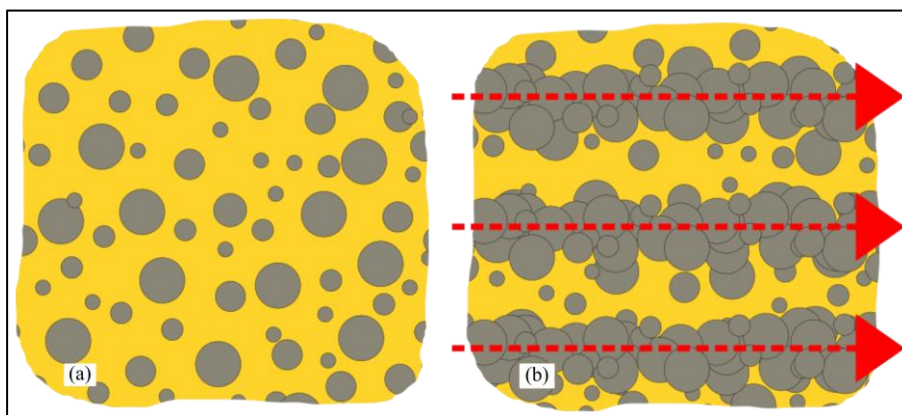
Jako částice se dříve používal Fe_3O_4 , avšak měl problém se sedimentací a nízkou magnetickou saturací. Fe_3O_4 byl tedy nahrazen karbonylovým železem (CI), což je železný prášek s velmi vysokou čistotou (až 99 %). Velkou výhodou CI je že má vysokou magnetickou saturaci, převyšující 2 T. CI je magneticky měkký materiál, což znamená, že lze relativně snadno magnetizovat a odmagnetizovat. Díky jeho kulovitému tvaru vykazuje relativně dobré magnetoreologické a tribologické vlastnosti.

Problémem MR kapalin je sedimentace a zahušťování. Částice mají tendenci sedimentovat, protože mají větší hustotu než nosný olej. Tomu se předchází přidáním různých aditiv a povlaků. Zpomalení sedimentace lze dosáhnout snížením rozdílu hustot nebo přítomností emulzifikátoru. Částice se buď povlakuji lehčím materiálem nebo se naopak do oleje aplikuje přísada, která zvýší jeho hustotu. Některé povlaky snižují tendenci částic tvořit shluky [4].

V průběhu chodu tlumiče dochází k otěru částic, protože jsou magnetickým polem tlačeny k sobě a proudící kapalina na ně naopak působí v podélném směru. „Povrchová vrstva částic je bohatá na železné oxidy, karbidy a nitrity, takže je poměrně křehká.“ [2, s. 323] Z toho důvodu se z povrchu částic odlupují nanočástice, které zvyšují základní viskozitu MR kapaliny. Tento jev je nežádoucí, protože vysoká základní viskozita snižuje dynamický rozsah tlumení (dynamický rozsah se dá spočítat jako podíl maximální a minimální tlumící síly). Zahušťování se dá předejít buď změkčením povrchu částic tak, aby nedocházelo ke křehkému lámání, nebo povlakováním, které sníží tření mezi částicemi.

„Bylo zjištěno, že životnost MR kapaliny lze modelovat pomocí (celkového) množství disipované energie na jednotku objemu. Běžný automobilový tlumič má za normálních provozních podmínek průměrnou disipaci energie mezi 5-10 W. Pokud bereme v úvahu ujetou vzdálenost 160 000 km a průměrnou rychlost 20 m/s, pak celková délka provozu je 80 000 000 s. Při úvaze 10 W je pak celková energie disipovaná tlumičem 80 MJ. Objem MR kapaliny je běžně 100 cm³. Z přepočtu tedy získáme 0,8 MJ/cm³ což se rovná 0,800 TJ/m³. Tato hodnota spadá do praktické životnosti současných MR kapalin, u nichž bylo prokázáno, že jsou dobré až do více než 2 TJ/m³“ [2, s. 323] Z toho tedy plyne, že konstrukce tlumičů, které využívají méně MR kapaliny budou mít kratší životnost a kapalina se bude muset častěji měnit.

Pokud není MR kapalina aktivovaná, vykazuje chování podobné Newtonovskému. Pokud je vystavena magnetickému poli, železné částice se zřetězí ve směru magnetického pole a MR kapalina se chová jako Binghamská kapalina. [2], [3].



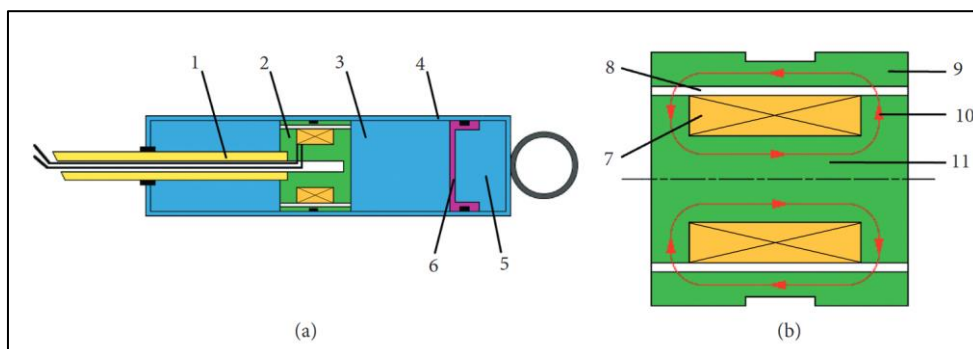
Obr. 2-3 Magnetoreologická kapalina: (a) neaktivovaný stav; (b) aktivovaný stav (červené šipky znázorňují magnetické siločáry).

Vhodným přirovnáním je, že se jedná o malé korálky navlečené na nitce. Přičemž velmi tenké nitky jsou jednotlivé magnetické siločáry a kulaté korálky jsou železné částice. Tyto nitky pak běží od kladného k zápornému pólu, kolmo k ploše pólů. Nitky s korálky jsou velmi blízko u sebe, podobně jako štětiny kartáčku. Takto uspořádané částice se pak brání přesunutí z jejich původních magnetických siločar, takže působí jako bariéra. [3]

2.2.2 Jednoplášťové MR tlumiče

U MR tlumičů je magnetické pole generováno axiální cívkou, která je připojená ke zdroji pomocí vodičů jdoucích skrz otvor v pístnici. Cívka je navinutá v drážkách pístu a zalitá pryskyřicí. Magnetický obvod by měl mít nízkou reluktanci. Reluktance je odpor magnetického toku obdobně jako je rezistivita odporem elektrického proudu. Pro elektromagnet se vzduchovou mezerou platí, že vzduchová mezera má mnohem větší odpor než kovové tělo a je tedy relativně snadné usměrnit tok do požadované cesty. V MR tlumiči je mezera vyplněna MR kapalinou, která má oproti vzduchu vyšší permeabilitu. Mohlo by se tedy snadněji stát, že magnetické pole poteče jinou cestou, proto je důležité obvod pečlivě navrhnout. Jádro a další magnetické komponenty jsou z magneticky měkkých materiálů s vysokou permeabilitou a magnetickou saturací tak, aby byl tok usměrněn do požadované cesty a většina siločar proudila aktivačními regiony. V těchto regionech pak dochází k řetězení MR částic a tlumícímu efektu. Nevýhodou této konstrukce je, že tlumící kanály jsou kolmé k magnetickým siločarám a viskozita je ovlivněna jen ve velmi krátkém úseku (někdy i v řádech milimetrů). [2], [4]

Aby MR tlumič dosáhl požadovaných parametrů, musí být oproti konvenčním hydraulickým pístům o něco delší a širší z důvodu implementace magnetického obvodu. [2]



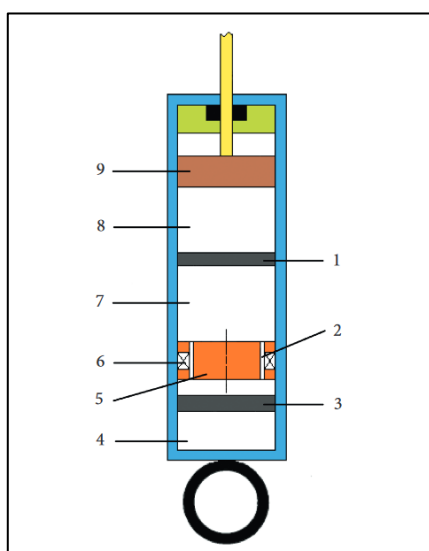
Obr. 2-4 (a) Základní schéma jednoplášťového MR tlumiče; (b) elektromagnetická část MR tlumiče;
1- pístnice; 2- píst; 3- kompresní komora s MR kapalinou (za pístem je odskoková komora);
4- plášť; 5- vzduchová komora; 6- plovoucí píst; 7- vinutí cívky; 8- průchozí kanál;
9- pouzdro; 10- tok magnetického pole; 11- jádro [4, s. 3].

Problémem MR tlumičů je riziko kavitace. Ta nastane, pokud tlak sytých par oleje překročí lokální statický tlak. Z hlediska provozních teplot a používaným MR kapalinám to v praxi znamená, že bychom se měli vyhnout podtlaku. U jednoplášťových tlumičů probíhá kavitace v odskokové komoře během velmi rychlé komprese, když je pokles tlaku v pístu vyšší než tlak v kompresní komoře. To vnáší limit pro maximální rychlost komprese a maximální kompresní sílu. Pokud tedy chceme dosáhnout vysoké síly, je potřeba vysokého tlaku vzduchové komory.

Aby nedošlo ke kavitaci u dvouplášťových tlumičů, musí být pokles tlaku v patním ventilu větší než pokles tlaku ve ventilu pístu. To znamená, že tlumící kanály patního ventilu musí být velmi úzké, protože na rozdíl od pístních ventilů protéká patním ventilem pouze kapalina vytlačená vnořenou pístnicí. [2]

Konstrukce s dvěma hydraulickými systémy

Možným konceptem je MR tlumič využívající část s MR kapalinou a část s konvenčním hydraulickým tlumením (Obr. 2-5). Hydraulická část (8), je oddělena od části s MR kapalinou plovoucím pístem (1). Část s MR kapalinou obsahuje zafixovaný patní ventil (5) s cívkou (6), který zároveň zprostředkovává tlumení. Změna objemu je pak kompenzována plovoucím pístem (3), jenž odděluje MR kapalinu od plynu v komoře (4). Výhodou tohoto tlumiče je redukce pořizovací ceny, protože bude potřeba menší objem MR kapaliny. V porovnání s čistě hydraulickým tlumičem, bude tento tlumič díky MR části dosahovat vyšších tlumících sil.



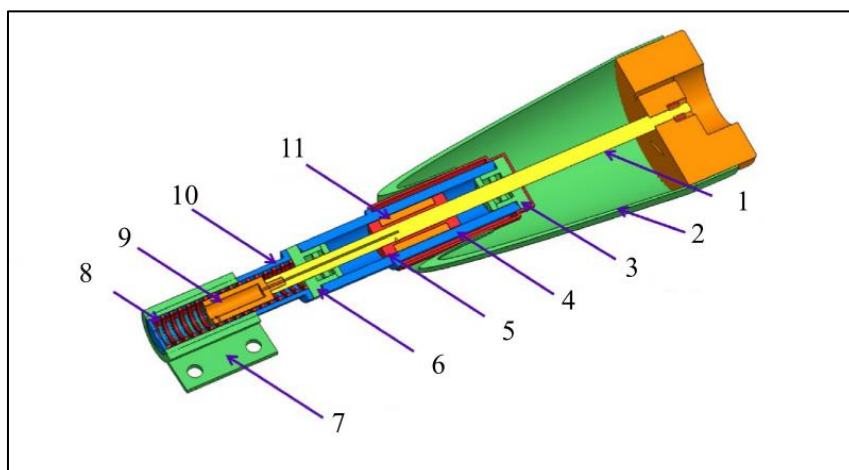
Obr. 2-5 Pohled na podélný průřez MR tlumičem; 1- první plovoucí píst; 2- tlumící kanály; 3- druhý plovoucí píst; 4- třetí komora; 5- MR patní ventil; 6- cívka; 7- druhá komora; 8- první komora; 9- píst [4].

Poměrně krátká cesta MR kapaliny zajistí rychlou odezvu a bude snižovat přepínací čas pro tlumící sílu. Nevýhodou je, že průtokové kanály hydraulické části nemohou být nijak měněny, takže tlumící sílu lze ovládat pouze pomocí MR části. Lepších vlastností by mohlo být dosaženo, kdyby byla MR kapalina použita pro ovládání velikosti průtokových kanálů hydraulického oleje. [4]

Řešení s pístnicí skrz

Následující řešení na Obr. 2-6) používá typ MR tlumiče s pístnicí skrz. Konkrétně se jedná o automobilový tlumič s detekcí zdvihu nazývaný SMRAD (self-sensing MR automobile damper), což zaručuje jeho velmi rychlou odezvu.

Tlumení je zprostředkováno pomocí MR části, ve které se nachází píst (5) s cívkou (11). U tohoto tlumiče s pístnicí skrz nedochází k dynamické změně objemu způsobené vnořováním pístnice, avšak je potřeba počítat s tepelnou roztažností MR kapaliny. Rychlost této změny není tak dynamická, a proto postačí nízké tlaky vzduchové komory. Vzduchová pružina (2) má vhodné nelineární chování, což efektivně snižuje velikost amplitudy vibrací vozidla a minimalizuje jejich dopad na řidiče. Aktuální zdvih tlumiče je vyhodnocován na základě vzájemného pohybu měděné elektrody (9) v PTFE pouzdru (8), při kterém vzniká elektrický proud. [5]

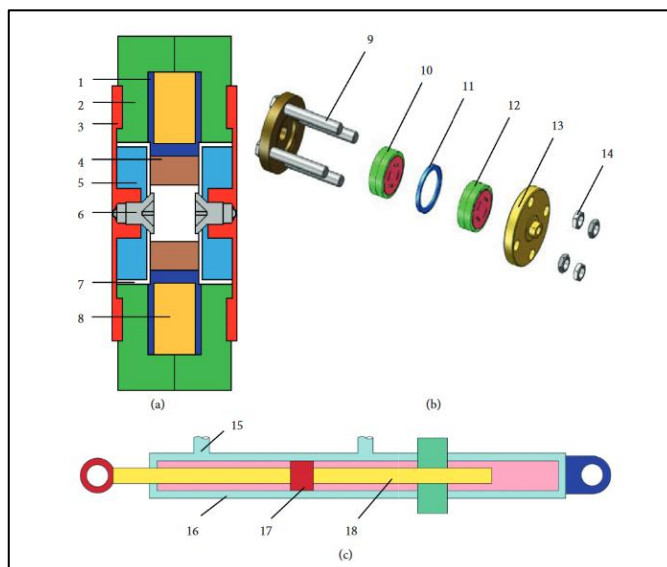


Obr. 2-6 Konstrukce tlumiče SMRAD; 1- pístnice; 2- vzduchová pružina; 3- horní kryt; 4- plášť tlumiče; 5- píst; 6- spodní kryt; 7- pevná základna; 8- PTFE pouzdro; 9- měděná elektroda; 10- kryt pístnice; 11- cívka [5, s. 3].

Další řešení na obrázku (Obr. 2-7) je opět s pístnicí skrz. Toto řešení využívá modulární stavebnicový MR ventil, který může být instalován několikrát za sebou dle potřeby. Tím je možné navýšit dosažitelnou tlakovou ztrátu tlumiče bez potřeby použít větší cívku, s čímž je spojená potřeba většího zástavbového prostoru. Společným zašroubováním hliníkového víčka (13) a jeho protikusů se šrouby (9) se mezi nimi ukotví jednotlivé moduly (10, 12). Oba kryty modulu (2) jsou vyrobené z oceli 4140 a kostra cívky (1) z hliníku. Diskové jádra jsou upevněna do diskových držáků za pomoci šroubků 2 mm (6). Jádro disku (5) i jádro s hlavním otvorem (4) jsou z oceli 4140 a společně s kryty modulu (2) vytváří magnetický obvod ventilu.

Do ventilů proudí MR kapalina skrz kruhový otvor ve víčku, následně pokračuje jednotlivými otvory v držáku disku (3). Dále proudí mezi jádrem disku (5) a pouzdrům ventilu (2), které dohromady tvoří mezikruhový prostor. Následně teče MR kapalina radiálním směrem k sobě, úzkou válcovou částí, až se dostane do nejširšího místa, které je tvořeno středem disku (4). Následně tok kapaliny pokračuje obdobně až opět proudí otvorem ve víčku nebo pokračuje dalšími moduly.

Testy bylo ověřeno, že s přidáváním dalších modulů roste tlumicí síla téměř lineárně. Oproti předpokládané velikosti byla však tlumicí síla menší. To mohlo být způsobeno tím, že se mezi moduly kromě vložky (11) přidalo ještě další těsnění, aby se zabránilo únikům kapaliny. Toto těsnění vytvořilo vzduchovou mezeru, což nejspíš vedlo ke zvýšení magnetického odporu a výslednému snížení intenzity magnetického pole. [4], [6]



Obr. 2-7 (a) Průřezový pohled na modulárním MR ventilu; (b) rozpadový pohled; (c) MR tlumič s pístnicí skrz; 1- kostra cívky; 2- kryt ventilu; 3- držák disku; 4- hlavní otvor (jádro); 5- diskové jádro; 6- šroub 2 mm; 7- kapalinová mezera; 8- cívka; 9- šroub 6 mm; 10- první stupeň modulu; 11- vložka; 12- druhý modulový stupeň; 13- víčko; 14- matice; 15- dvojitý vstupní otvor; 16- plášť; 17- píst; 18- pístnice [4].

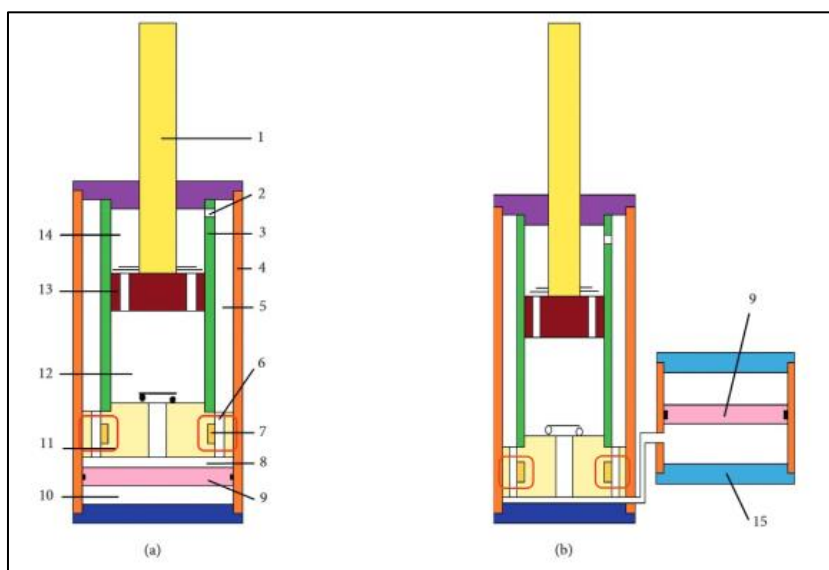
2.2.3 Dvouplášťové MR tlumiče

Jak již bylo zmíněno v kapitole 2.1 dvouplášťový tlumič má oproti jednoplášťovému své výhody a nevýhody. Jednou z nich je, že samotná konstrukce tlumiče umožňuje provoz za nižšího tlaku. K tomu je však zapotřebí zpětných ventilů, které v MR kapalině nemusí fungovat zcela správně. Vzhledem k tomu, že tento jev není zcela prozkoumán a není jisté, jak se ventily v MR kapalině chovají, zde budou uvedeny i varianty, které zpětné ventily používají.

Řešení se zpětnými ventily

Další koncept nízkotlakého tlumiče ukazuje je uveden na obrázku (Obr. 2-8). Tento tlumič používá zpětné ventily jak na pístu, tak na patním ventilu, díky čemuž může využívat jednosměrného proudění. Při odskoku se jednosměrný ventil v pístu (13) uzavře a kapalina bude proudit otvorem (2) do vnějšího pláště (5). Z něj bude pokračovat tlumícími kanály (6) ve spodní části, kde je cívka, a nakonec skrz jednosměrný patní ventil do kompresní komory (12). Naopak při kompresi bude patní ventil uzavřený, ventil v pístu uzavřený a směr proudění kapaliny zůstane stejný jako při kompresi.

Vnořený objem pístnice vytlačí stejný objem kapaliny z odskokové komory do vnějšího pláště. Tam bude proudit skrz tlumící kanály do spodní komory (8), kde bude objemová změna kompenzována pomocí plovoucího pístu. Nízký tlak v plynové komoře bude klást menší nároky na těsnění a ucpávky.



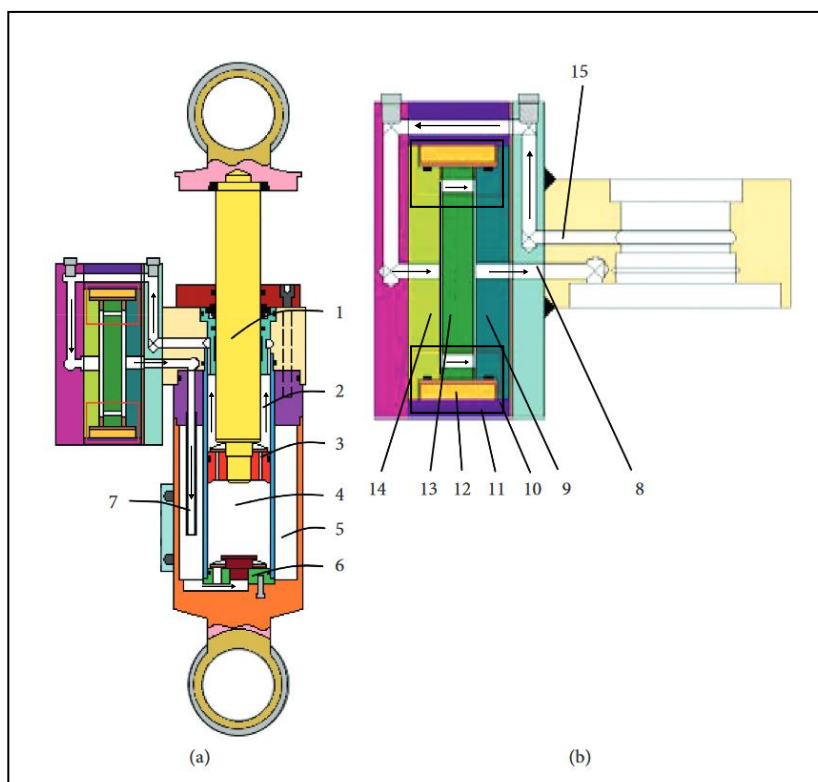
Obr. 2-8 Schématický pohled na dvouplášťový MR tlumič: (a) varianta s plynovou komorou v ose; (b) varianta s externí plynovou komorou; 1- pístnice; 2- otvor; 3- vnitřní plášť; 4- vnější plášť; 5- vnější komora; 6- tlumící kanály; 7- cívka; 8- spodní komora; 9- plovoucí píst; 10- plynová komora; 11- patní ventil; 12- kompresní komora; 13- píst; 14- odskoková komora; 15- vnější plynová nádrž [4].

Díky jednosměrné cirkulaci MR kapaliny dojde k potlačení sedimentace MR kapaliny, a tedy i rychlejší odezvě tlumiče. Na obrázku (2-8) jsou dvě podobné varianty. První varianta (a) má plynovou komoru s plovoucím pístem umístěnou v ose pístnice a naopak varianta (b) mimo osu. Plovoucí píst v ose zkracuje zdvih tlumiče, avšak na rozdíl od externí plynové komory nerozšiřuje zástavbu. Obě varianty mají tedy své pro a proti a lze je s výhodou použít pro specifické aplikace.

Další řešení je vyobrazeno na obrázku (Obr. 2-9). Jedná se o tlumič, který byl navržen pro podélné tlumení kolejových vozidel. Mezi hlavní požadavky při konstrukci patřili vysoký dynamický rozsah tlumení, fail-safe chování, symetrie tlumící síly, a co nejdelší zdvih pro danou délku tlumiče. Z těchto důvodů byl u tohoto tlumiče použit externí obtokový MR ventil. Vnitřní plášť tlumiče je rozdělen pístem na kompresní (4) a odskokovou komoru (2). Vtok obtokového MR ventilu (15) je spojen s odskokovou komorou. Odtok (8) je naopak spojen s vnější komorou (5) pomocí spojovací trubičky (7), díky které nedochází k roztřiknutí kapaliny do přítomného plynu. Komory i externí ventil jsou zcela naplněny MR kapalinou, výjimkou je vnější komora, která obsahuje stlačený plyn.

Při odskoku je zpětný ventil kvůli směru pohybu uzavřen a kapalina je tak nucena proudit z odskokové komory do externího MR ventilu, kde dochází ke tlumení. Dále proudí skrz spojovací trubičku do vnějšího pláště. Zvedající se píst tvoří v kompresní komoře podtlak, díky čemuž se otevře patní ventil, kam následně teče MR kapalina z vnějšího pláště. Naopak při kompresi dojde k uzavření patního ventilu a otevření ventilu v pístu. Díky tomu může kapalina proudit z kompresní komory do odskokové. Kapalina rovna objemu vnořené pístnice pak opět proudí do externího MR ventilu a následně do vnějšího pláště, kde je změna objemu kompenzována přítomným plynem.

Důležitým prvkem tlumiče je externí MR ventil, kde dochází ke tlumení. Kapalina nejdříve proteče v axiálním směru středem prvního disku (14), a následně proudí radiálním směrem mezerou mezi diskem (14) a (13). Po průchodu axiálním kanálem v disku (13), který má otvor mezikruží opět teče radiálně, nyní se však soustřeďuje do středového otvoru druhého disku (9) a následně proudí výtakovým kanálem (8). Během většiny své cesty je MR kapalina kolmá k magnetickým siločárám, díky čemuž je možné dosáhnout velkých tlumících sil. Výhodou tohoto provedení je lepší disipace tepla, oproti cívce v pístu, snadnější servis a zjednodušení výroby, protože není třeba vrtat otvor do pístnice pro napájení cívky.

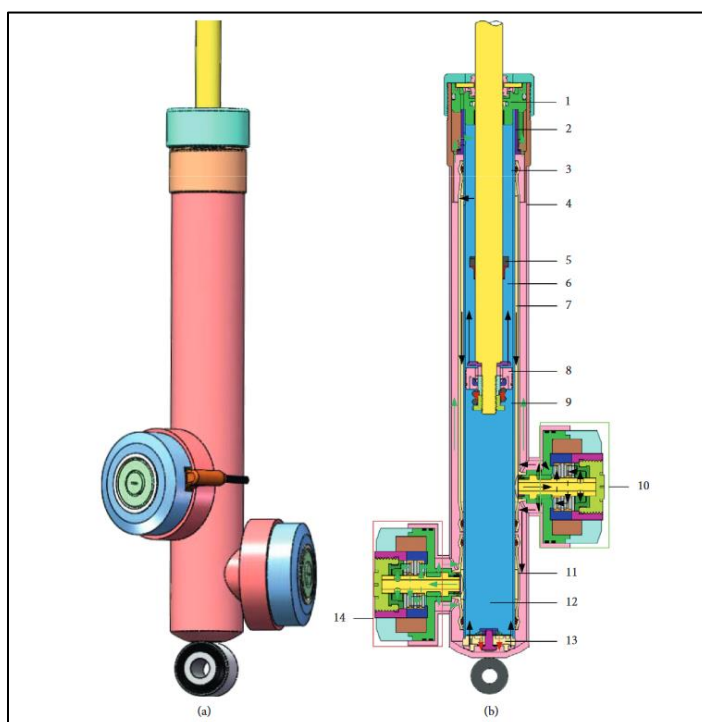


Obr. 2-9 (a) Schématický nákres dvouplášťového MR tlumiče; (b) externí obtokový ventil; 1- pístnice; 2- odskoková komora; 3- ventil pístu; 4- kompresní komora; 5- vnější komora obsahující plyn a olej; 6- patní ventil; 7- spojovací trubička; 8- výtok; 9- první magnetická vodící deska; 10- magnetické siločáry; 11- magnetický vodící válec; 12- cívka; 13- jádro; 14- druhá magnetická vodící deska; 15- vtok [4].

Testy bylo zjištěno, že po 6 dnech nečinnosti tlumiče došlo k významné sedimentaci MR kapaliny. Avšak díky jednosměrnému toku, který zajišťuje dobré promíchání, bylo opětovné funkce dosaženo relativně rychle během několika period. Autor si myslí, že nedochází k významnému shlukování MR částic ve zpětných ventilech, protože byli navrženy dostatečně velké. Symetrie tlumení bylo dosaženo pomocí výpočtů, kde bylo zjištěno, že plocha pístnice musí být poloviční oproti ploše pístu. Dle autora je časová odezva 300 ms, která byla zjištěná pomocí zátěžových testů tlumiče, z velké části způsobena kompresibilitou MR kapaliny. [7]

Další konstrukční řešení tlumiče na obrázku (Obr. 2-10) obsahuje tři pláště. Jako u většiny tlumičů je vnitřní komora rozdělena pístem na horní odskokovou komoru a spodní kompresní komoru. Tyto komory jsou, respektive napojeny na svoji horní mezikomoru a na dolní mezikomoru. Obě mezikomory mají svůj vlastní externí MR ventil. Ventily jsou pak napojeny na vnější komoru, kde se nachází vzduch pro kompenzaci objemové změny vnořováním pístnice, a ta je spojena s vnitřní kompresní komorou pomocí patního ventilu. Píst i patní ventil obsahují jednosměrné talířové ventily.

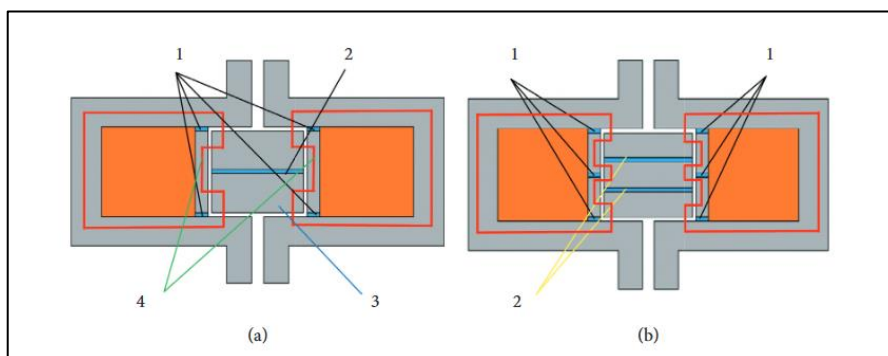
Při odskoku se uzavře ventil pístu a kapalina v odskokové komoře proudí do horní střední komory a následně se přes MR ventil, vnější komoru a patní ventil vrací do kompresní komory. Při kompresi proudí kapalina z kompresní komory do spodní střední komory, následně skrz MR ventil, vnější komoru, odskokovou komoru, a nakonec skrz ventil ve vodící sestavě pístu. [4]



Obr. 2-10 Průřezový pohled na MR tlumič s nezávislým tlumením komprese a odskoku. 1- sestava vedení; 2- sestava zpětného ventilu; 3- pístnice; 4- vnější plášť; 5- doraz; 6- odskoková komora; 7- horní střední plášť; 8- sestava pístu; 9- vnitřní plášť; 10- první ventil odskoku; 11- spodní střední plášť; 12- kompresní komora; 13- patní ventil; 14- druhý ventil pro kompresi [4]

Externí MR ventily na obrázku (Obr. 2-11) mají serpentinovou dráhu toku. Kapalina proudí do ventilu axiálně kruhovým průřezem. Následně teče radiálně směrem od sebe, kolmo na prvotní směr toku. Poté proudí mezikruhovým průřezem a za ním teče opět radiálně směrem k sobě a odtéká z ventilu axiálním směrem. Přidáním magneticky izolačních prvků (1) lze proud usměrnit do serpentinového tvaru, díky čemuž získáme více aktivačních regionů. Nevýhodou je limitace dalšího zvyšování tlumicí síly kvůli dlouhé cestě magnetických siločar při přidávání dalších magneticky izolačních částí, s čímž poroste i tloušťka celého ventilu. Dalším problémem by mohla být složitější výroba, s čímž se pojí vyšší cena. Proto by při navrhování tohoto typu ventilu měl být na tyto věci brán potaz. [4]

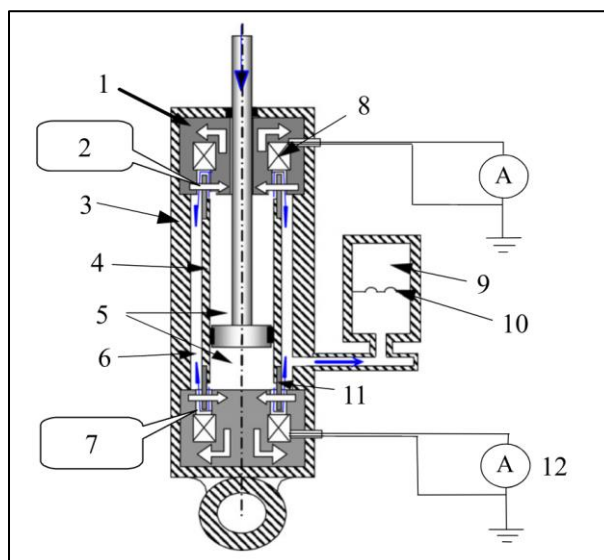
Výhodou tohoto řešení je, že odšroubováním lze ventily relativně snadno vyměňovat, a měnit tak charakteristiku tlumiče. Díky tomu, že odskok a komprese mají vlastní ventil je možné dosáhnout různě vysoké asymetrie tlumení. Externí ventily a dlouhý plášť povedou k dobré disipaci tepla.



Obr. 2-11 MR ventil se serpentinovým magnetickým tokem; (a) jednostupňový serpentinový tok; (b) dvoustupňový serpentinový tok; 1- nemagnetický kroužek; 2- nemagnetický disk; 3- jádro; 4- oddělovač cívky [4].

Zpětné ventily v patním ventilu nahrazeny cívkou

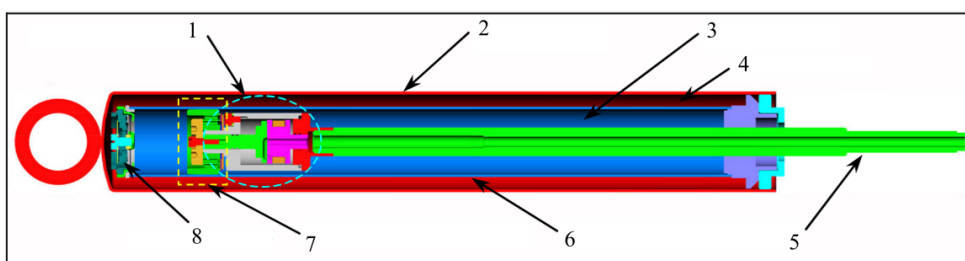
Instalace cívky v axiálním směru je poměrně složitá, zejména u dvouplášťových tlumičů. Proto byla u tlumiče na obrázku (Obr. 2-12) cívka z pístu přesunuta do spodní a horní části tlumiče. Při použití dvou MR ventilů máme 4 aktivační regiony, a je tedy možné dosáhnout vyšších tlumících sil. Při stlačení pístu proudí MR kapalina z kompresní komory skrz patní MR ventil do vnějšího pláště, kde je kompenzována změna objemu vnořováním pístnice pomocí vzduchové komory s plovoucím pístem. Kapalina pak proudí přes horní ventil s tlumícími kanály a zpět do odskokové komory. Výhodou je, že toto řešení nepotřebuje zpětné ventily v podobě planžetových podložek. [8]



Obr. 2-12 Dvouplášťový MR tlumič s dvěma cívkami jako patní ventily; 1- konstrukce ventilu; 2- magnetické pole; 3- vnější plášť; 4- vnitřní plášť; 5- MR kapalina; 6- prstencový kanál; 7- tok MR kapaliny; 8- cívka; 9- plynová komora; 10- membrána; 11- střední pól; 12- zdroj proudu [8].

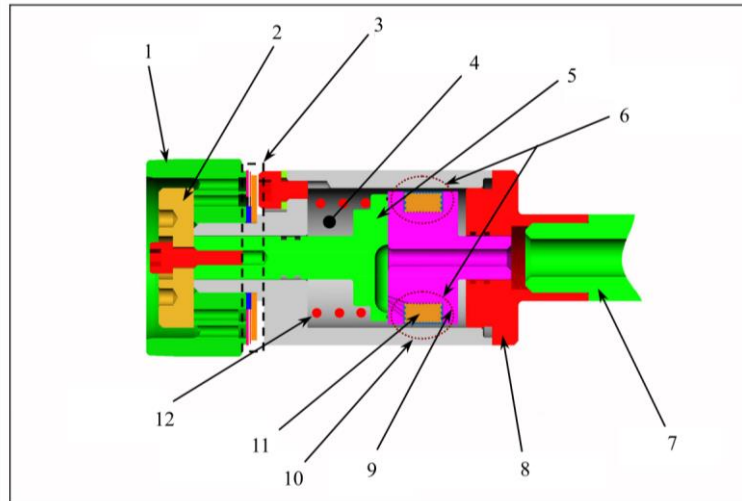
Řešení s dvěma hydraulickými systémy

Toto řešení využívá miniaturní MR tlumič pro kontrolu hydraulického ventilu (Obr. 2-13). Je zde opět kombinace MR části a části s hydraulickým olejem. Při kompresi bude tlumení zprostředkováno čistě pomocí podložkového ventilu, jak je vidět na detailnějším obrázku (Obr. 2-14).



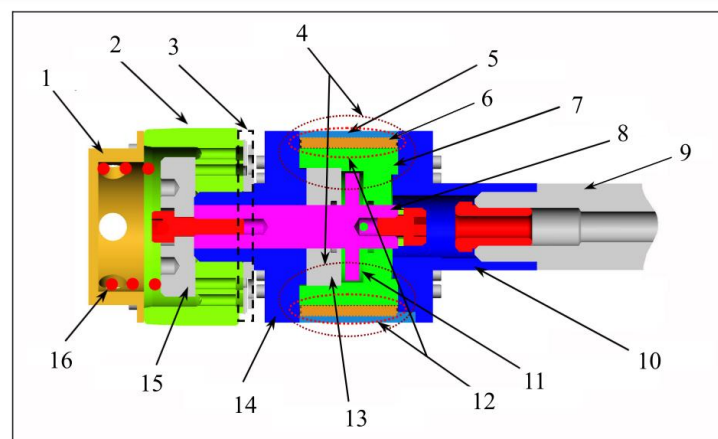
Obr. 2-13 Hybridní dvouplášťový tlumič. 1- sekce MR tlumiče; 2- vnější plášť; 3- vnitřní komora; 4- vnější komora; 5- pístnice; 6- vnitřní plášť; 7- sekce s hydraulickým ventilem; 8- sestava patního ventilu [3, s. 73]

Pružina v MR sekci tvoří předpětí tak, aby byl ventil zavřený. Při odskoku by měl MR tlumič bránit otevření ventilu silou, která je úměrná proudu v cívce. Pro správné fungování tohoto konceptu, musí být při vysokých proudech na konci každého zdvihu proud vypnut, aby se mohl ventil vrátit do uzavřené polohy. Aby tlumič fungoval dobře, bylo by potřeba kontrolovat proud zdrojem, který má zpětnou odezvu na rychlost pístu. Kvůli konstrukci je obtížné plnění tlumiče, protože zvolená pružina brání vtokovému kanálu. Musela být použita menší, která však způsobovala moc malé předpětí. Řešením by bylo použít silnější pružinu nebo zmenšit mezeru v MR sekci.



Obr. 2-14 Detailní pohled první varianty pístové sestavy hybridního tlumiče. 1- víčko pístu; 2- roztahovací ventil; 3- sekce kompresního ventilu; 4- zásobník MR kapaliny; 5- přední pístnice MR pístu; 6- magnetické siločáry; 7- pístnice; 8- koncový uzávěr MR sekce; 9- MR píst; 10- MR pouzdro; 11- cívka; 12- vinutá pružina [3]

Jednou z dalších možností je nahradit MR sekci předepjatou pružinou operující ve ventilovém módu MR sekci, která operuje ve střihovém módu, jak je vidět na Obrázku (Obr. 2-15). Zde je však problém, protože magnetický tok neteče skrz zamýšlenou cestu. Pro správnou funkčnost řešení by tedy bylo potřeba upravit design magnetického obvodu tak, aby tok magnetických siločar proudil zamýšlenou cestou. [3] Problém těchto tlumičů je fakt, že kompresní fáze není kontrolována MR sekci. Dále je zde málo MR kapaliny, takže bude potřeba jí často měnit. To z hlediska zástavby a složitosti tlumiče bude zdolouhavé a nákladné na servis. [3]

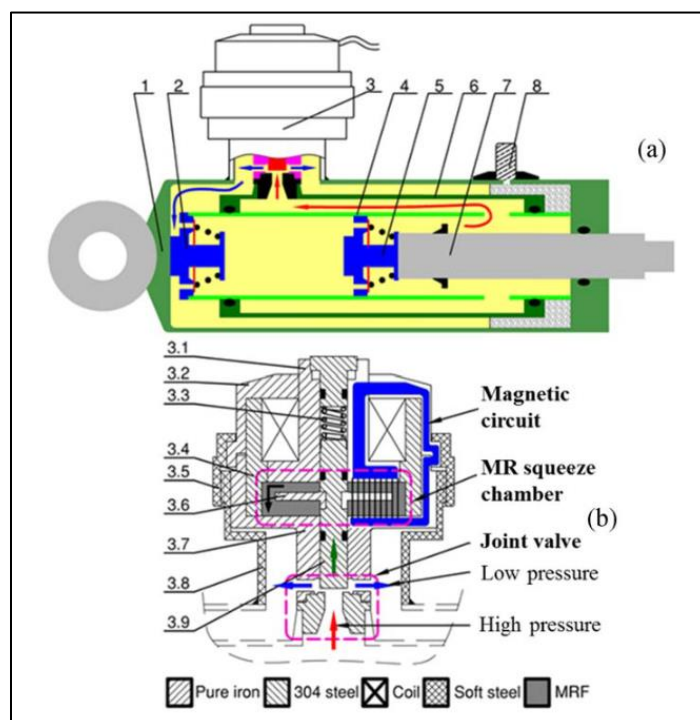


Obr. 2-15 Druhá varianta pístové sestavy hybridního tlumiče; 1- koncové víčko; 2- píst; 3- hydraulický kompresní ventil; 4- zamýšlená dráha magnetického toku; 5- vrstva epoxidu; 6- cívka; 7- pouzdro MR sekce; 8- pístnice MR sekce; 9- pístnice; 10- zadní adaptér; 11- zásobní MR kapaliny; 12- skutečná dráha magnetického toku; 13- koncové víčko MR pouzdra; 14- přední adaptér; 15- roztahovací ventil; 16- vinutá pružina [3]

Následující MR tlumič na Obrázku (Obr. 2-16) využívá externí ventil operující ve stlačovacím módu, autory označen jako (MRVD). Byl speciálně navržen pro odpružení minibusu. Maximální poměr tlumících sil je 3,95/2,20 (odskok/komprese). Díky konstrukci byly sníženy náklady, hmotnost a tlumič pro svoji funkci potřebuje pouze 3 W a 6,1 ml MR kapaliny.

Samotný čerpací hydraulický tlumič obsahuje 3 pláště. Ty tvoří vnitřní komoru (4), prostřední a vnější komoru, přičemž na stěně vnějšího pláště (1) je nainstalován stlačovací MR ventil (3). Mezi vnitřní a prostřední komorou je kanál s vysokým tlakem. Jednosměrné talířové ventily na pístu a v patním ventilu zajišťují jednosměrný tok oleje z vnitřního pláště do vnějšího skrz MR ventil, jak při kompresi, tak při odskoku. Ve vnější komoře je umístěna plynová komora s plovoucím pístem, obsahující N₂ o tlaku 0,3 MPa, která kompenzuje změnu objemu vnořováním pístnice a zabraňuje vzniku kavitace.

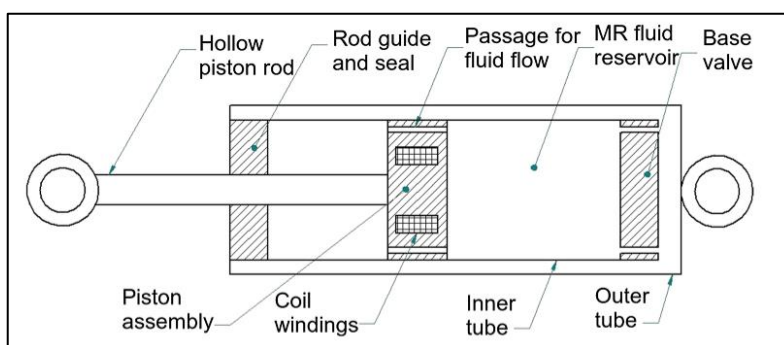
Při kompresi je uzavřen patní ventil (2) a ventil v pístu (5) je otevřený, při odskoku tomu je naopak ale kapalina vždy proudí z vnitřní komory do střední a následně skrz MR ventil do vnější. Tlumení je zajištěno tím způsobem, že kapalina musí vyvinout dostatek síly, aby otevřela MR ventil, následkem čehož dojde k poklesu tlaku za ventilem. Potřebná síla je pak určena charakteristikou samotného MR ventilu a aktuálním proudem. Aby se MR ventil vracel do své původní polohy, obsahuje zpětnou pružinku (3.3). Charakteristiku tlumiče za nulového proudu určuje samotný hydraulický tlumič a MR ventil, konkrétněji síla použité pružinky. [9]



Obr. 2-16 (a) Schéma tlumiče s MR ventilem; (b) Stlačovací MR ventil. 1- vnější plášť; 2- patní ventil; 3- stlačovací MR ventil; 4- vnitřní komora; 5- pístní talířový ventil; 6- střední plášť; 7- pístnice; 8- Schrader ventil; 3.1- horní tělo; 3.2- víčko; 3.3- vratná pružinka; 3.4- magnetická izolace; 3.5- šroubovací víčko; 3.6- píst; 3.7- spodní tělo; 3.8- sedlo; 3.9- pístnice [9]

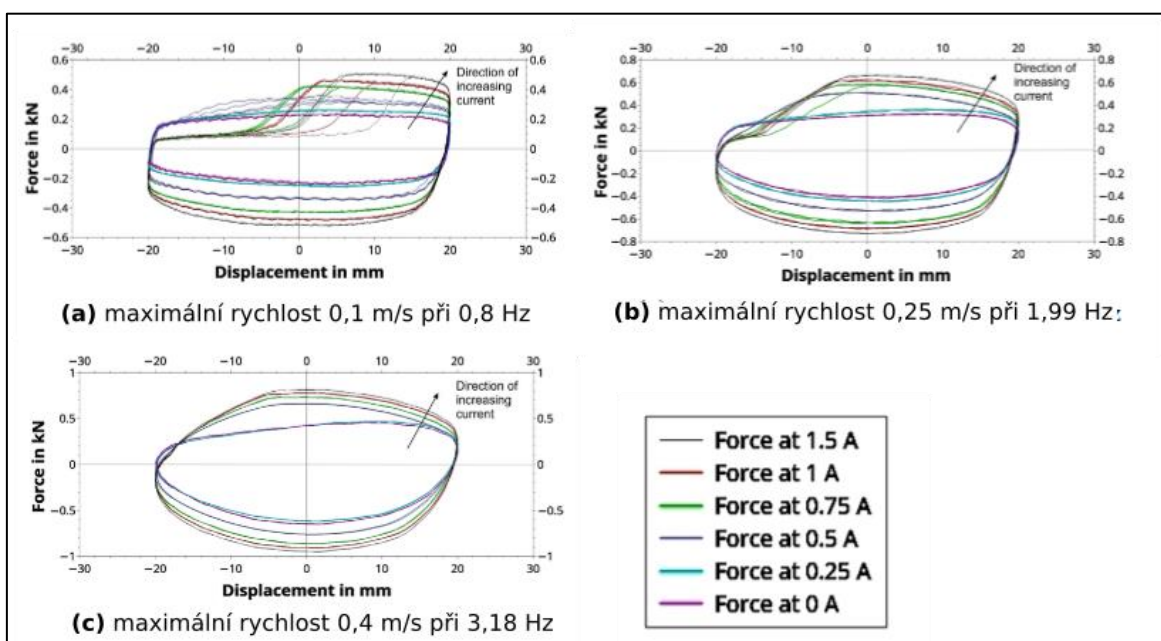
2.3 Problematika zpětných ventilů v MR kapalině

Zpětné ventily byly experimentálně měřeny u dvouplášťového MR tlumiče pro dodávkové vozidlo (Obr. 2-17). Pro usnadnění výroby MR tlumiče byl použit již starší pasivní hydraulický tlumič, který byl upraven. Tlumič byl naplněn MR kapalinou 132DG od firmy Lord Corporation. Síla patního ventilu byla nastavena tak, aby při nulovém proudu dosahoval 50 % síly pasivního hydraulického tlumiče a při maximálním proudu pak více než 1,5x větší tak, jak je tomu běžné u MR tlumičů pro automotive. Při experimentu byla zvolena fixní amplituda sinusového zatěžovacího cyklu 20 mm a maximální rychlost tlumiče byla omezena na 0.5 m/s.



Obr. 2-17 Schéma měřeného dvouplášťového MR tlumiče se zpětnými ventily v patě [10]

Při nízkých frekvencích 0,4-1,6 Hz a proudech vyšších než 0,5 A docházelo k výraznému poklesu tlumicí síly na začátku komprese (Obr. 2-18). Tento efekt však při vyšších frekvencích postupně vymizel. Nejspíše se nejedná o kavitaci, protože při zvyšujících se rychlostech by se pokles tlumicí síly zvětšoval.

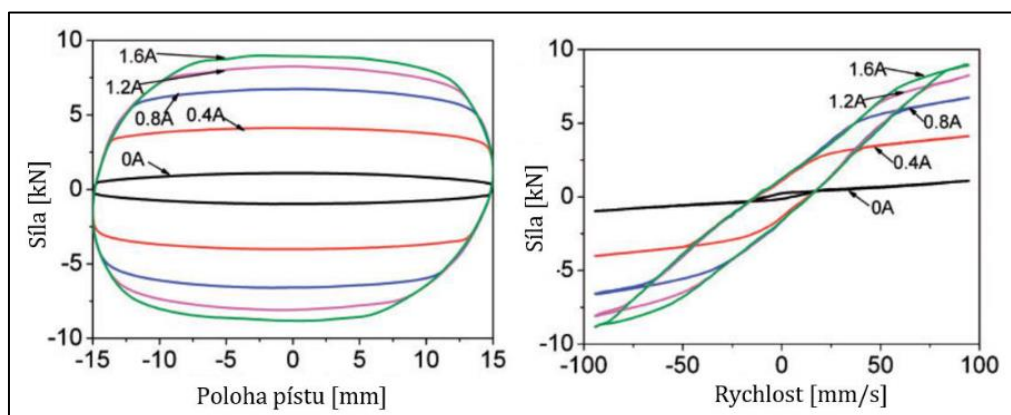


Obr. 2-18 F-z charakteristiky dvouplášťového MR tlumiče se zpětnými ventily [10]

Možným vysvětlením výrazného poklesu síly je, že vzduchová komora nebyla dostatečně natlakovaná. Od určitého proudu tedy došlo dočasně k ucpání tlumících kanálů, poté se MR kapalina musela přesunout do vnějšího pláště do doby, než byl ve vzduchové komoře vytvořen dostatečný tlak na průřez tlumících kanálů. Výstupem práce je konstatování, že upravený dvouplášťový MR tlumič je vhodný pro použití jako náhrada za původní pasivní. [10]

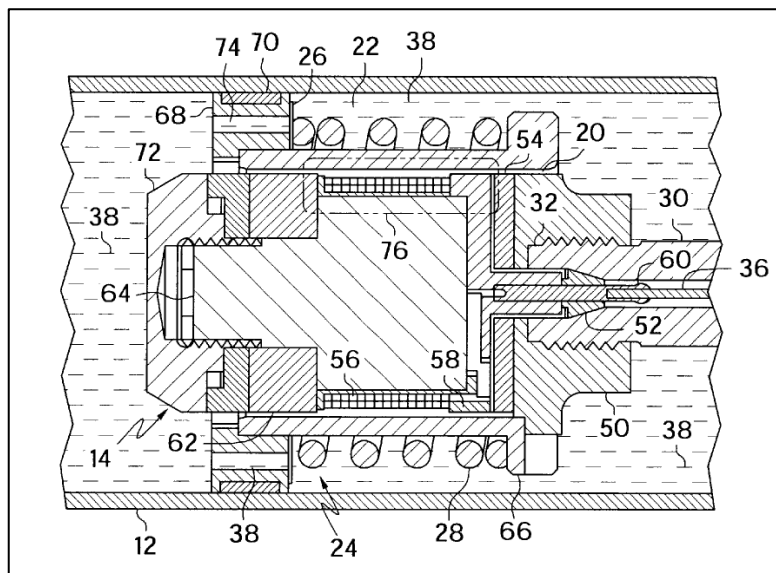
Zpětné ventily byly také použity a experimentálně naměřeny u železničního tlumiče, který byl již vyobrazen v kapitole 2 (**Error! Reference source not found.**). Použitá MR kapalina měla 30 % objemový podíl karbonylových železných částic průměru 6 μm se silikonovým olejem s přísadou stearové kyseliny k potlačení sedimentace. Na pulzátoru byly naměřeny F-v a F-z charakteristiky při různých proudech pro sinusový zatěžovací cyklus o frekvenci 1 Hz a amplitudách o velikosti 15 a 25 mm.

Stlačitelnost MR kapaliny způsobuje mírné zešikmení F-z charakteristiky. Tlumič byl navržen s požadavkem symetrie sil a „failsafe“ chování (tlumení i za nulového proudu). Z naměřených grafů je patrné, že následujících požadavků bylo dosaženo. Pro amplitudu 15 mm je maximální síla při nulovém proudu 1 kN a při maximálním 1,6 A pak 9 kN. Zpětné ventily byly navrženy s dostatečně velkou plochou, tak aby nedocházelo ke shlukování MR částic. [7]



Obr. 2-19 Charakteristiky MR tlumiče pro amplitudu 15 mm (a) F-z charakteristika; (b) F-v charakteristika [11]

Zpětným ventil byl také použit u následujícího tlumiče obrázku (Obr. 2-20), jehož návrh byl patentován. Jedná se o jednoplášťový tlumič, který vykazuje asymetrickou silovou charakteristiku. Oproti běžným MR tlumičům totiž obsahuje nemagnetickou část, kde je umístěný zpětný ventil. Při odskoku ventil brání toku kapaliny, a naopak při kompresi se po dosažení určitého tlaku otevře. Tento ventil tedy umožňuje proudění kapaliny závislé na tlaku, tedy zpoždění otevření ventilu, dokud není dosaženo minimálního tlaku. Plné otevření pro maximální tlak a částečné pro tlak mezi tím. Díky tomu je možné dosáhnout jemně nastavitelného tlumení. Tlumič je vhodný pro automobily, ale i letadla, sportovní vybavení nebo budovy. Výsledky experimentálního měření tohoto tlumiče, však nebylo možné dohledat. [12]



Obr. 2-20 Schéma MR tlumiče s bypass ventilem. 12- plášť; 14-MR píst; 20- MR tlumicí kanál; 22- tlumicí kanál; 26- zpětný ventil; 28- pružina; 30- pístnice; 32- první konec pístnice; 36- elektroda; 38- MR kapalina; 50- adaptér pístu; 52- těsnění; 54- magnetické jádro; 56- cívka; 58- kostra; 60- kontakt; 62- pól; 64- výplň; 66- schránka pístu; 68- koncový support pístu; 70- pístní pásek; 74- otvory; 76- magnetické pole [12]

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

3.1 Analýza problému

Výhodou jednoplášťových řešení je jednoduchost konstrukce a dobrý odvod tepla. Při použití jednoplášťové verze s MR kapalinou by bylo možné dosáhnout dobré ovladatelnosti tlumiče, což u hydraulických nelze. Avšak problém je, že běžné koncepce jednoplášťových tlumičů potřebují pro svoji správnou funkci vysoký tlak ve vzduchové komoře. Tento vysoký tlak ve spojení s MR částicemi nese velmi vysoké požadavky na těsnění a ucpávky, a přinejmenším vede k jejich rychlejšímu opotřebování. Jedním z potenciálních řešení by mohlo být použití hybridní verze s olejem i MR kapalinou. To přímo nevede k operaci za nižšího tlaku, ale ucpávky a zpětné ventily už by nemusely být v takové míře vystaveny působení abrazivních MR částic.

Tlumiče s pístnicí skrz jsou schopny chodu za nízkých tlaků i bez zpětných ventilů. To je zapříčiněno tím, že změna objemu kapaliny je způsobena pouze teplotní roztažností, což není tak dynamický jev jako tomu je v případě vnořování pístnice u jednoplášťových a dvouplášťových tlumičů. Jako další přidaná hodnota může být modulárnost řešení v podobě stavebnicového MR ventilu nebo měření aktuálního zdvihu, díky čemuž můžeme získat zpětnou vazbu [4], [5]. Značným problémem je krátká efektivní délka zdvihu, díky čemuž by se tlumič nemusel vejít do omezeného zástavbového prostoru automobilu. Z toho důvodu se toto řešení u automobilů používá poměrně zřídka.

U dvouplášťových řešení je chod za nízkých tlaků nejčastěji umožněn díky zpětným ventilům v patě tlumiče. Samotná konstrukce si sebou však nese značné nevýhody v podobě horšího odvodu tepla a širší radiální zástavby. Existuje nespočet variací základního řešení, obsahující zpětné ventily, kde je většinou tendence vylepšovat vlastnosti samotného tlumiče, jako je dynamický rozsah, rozšiřování aktivačních regionů, fail-safe chování a další. Existuje postupná tendence používat takzvaný jednosměrný mód. V tomto módu proudí MR kapalina tlumícími kanály vždy ve stejném směru (čerpádlový typ tlumiče), což zlepšuje promísení MR kapaliny a částečně řeší problém sedimentace. V nejnovějších návrzích se aktivní MR části umísťují většinou vně tlumiče, čímž se zajistí snadnější servisovatelnost a lepší disipace tepla. V důsledku toho, ale roste složitost dílů, což se nepříznivě odráží na výrobních nákladech.

Existují i dvouplášťové tlumiče, kde jsou zpětné ventily nahrazeny tlumícími kanály s cívkou. Jedno řešení v rešerši používá MR část namísto patního ventilu a další používá MR část jak v dolní, tak v horní části tlumiče. Řešení s dvěma cívkami potřebuje dva zdroje, což nese nároky na další vedení a komplikuje se řízení samotného tlumiče. Obdobně jak je tomu u zpětných ventilů i zde by mohlo v omezené míře docházet k ucpání a je třeba danou problematiku více prozkoumat.

Jedny z posledních řešení dvouplášťových tlumičů se snaží využívat MR část v podobě ventilu pro regulaci toku hydraulického oleje [9]. Tím se výrazně sníží přidaná hmotnost a cena tlumiče, protože je možné použít jen malé množství MR kapaliny. To se děje za pomoci interních nebo externích MR ventilů často operujících ve stlačovacím módu. Jak bylo však zmíněno dříve, MR kapalina má omezenou životnost na jednotku objemu. Pokud tedy použijeme velmi malé množství bude potřeba častější servis. To je případ i posledního řešení, které obsahuje pouze 6,1 ml MR kapaliny. Pokud bereme v úvahu hrubý výpočet z kapitoly 2.2.1. [2, s. 323], kde použijeme za energii, kterou je MR kapalina schopna absorbovat 1 TJ/m^3 , pak odhadovaná životnost za normálních provozních podmínek automobilu bude pouze 12 200 km. Tento nedostatek by částečně mohla kompenzovat relativně snadná dostupnost externího ventilu umožňující snadný servis. Je otázkou, jestli a jak je tento přístup v běžné praxi použitelný. Navíc externí MR ventil obsahuje řadu přesných dílů jejichž výroba by mohla být poměrně nákladná. Navíc je otázkou, jestli použití externího MR ventilu bude výhodnější oproti levnějším elektronickým ventilům.

Běžné jednoplášťové MR tlumiče musejí mít pro svůj správný chod vysoký tlak v plynové komoře. Ve spojení s abrazivními železnými částicemi, které obsahuje magnetoreologická kapalina, dochází k velmi nepříznivému dopadu na namáhání a životnost těsnění. Proto je zde snaha vymýšlet nová konstrukční řešení MR tlumičů operujících za nízkého tlaku. Konstrukcí nízkotlakého tlumiče by bylo možné snížit nároky na těsnění a prodloužit životnost a servisní intervaly tlumičů. U většiny konstrukcí je chod za nízkých tlaků umožněn díky zpětným ventilům, kde je potencionální riziko zasekávání částic, což by vedlo ke ztrátě funkčnosti. Z nalezených měření zpětných ventilů v MR kapalině se zdá, že k výraznému zasekávání částic nedochází. Avšak chování zpětných ventilů v MR kapalině nebylo nikde podrobně popsáno a jedná se tedy o málo probádanou oblast. Bylo by tedy potřeba provést výzkum a najít optimální parametry zpětných ventilů pro minimalizaci rizika shlukování částic či jiných anomálií. Možnou alternativou je vymyslet efektivní nízkotlakou konstrukci bez použití ventilů.

3.2 Cíl práce

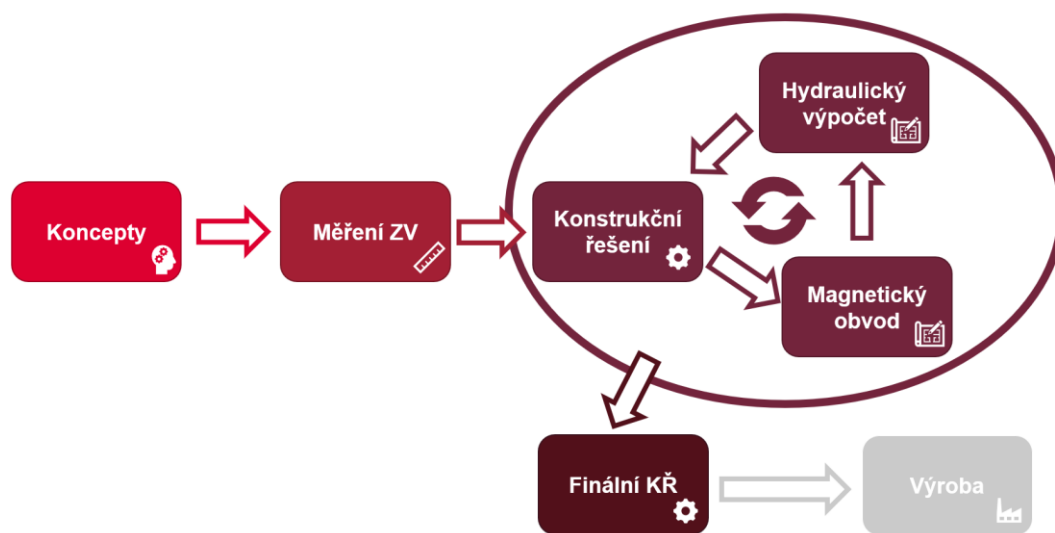
Hlavním cílem práce je konstrukční řešení magnetoreologického tlumiče operujícího za nízkého tlaku (jednotky bar) v kompenzační komoře. Geometrie tlumiče bude vycházet z konstrukce jednoplášťového MR tlumiče dostupného na FSI VUT.

Dílicí cíle:

- Experimentální ověření funkce zpětných ventilů v MR kapalině
- Koncepční návrhy nízkotlakého MR tlumiče
- Konstrukční řešení doplněné potřebnými výpočty
- Výkresová dokumentace

4 KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ

Kapitola koncepčních řešení je rozdělena na několik dílčích částí vyplývajících ze stanovených cílů. Prvním bodem je experimentální měření tlumiče se zpětným ventilem. Následně budou uvedeny a vysvětleny jednotlivé koncepční návrhy, které jsou v posledním bodě zhodnoceny.

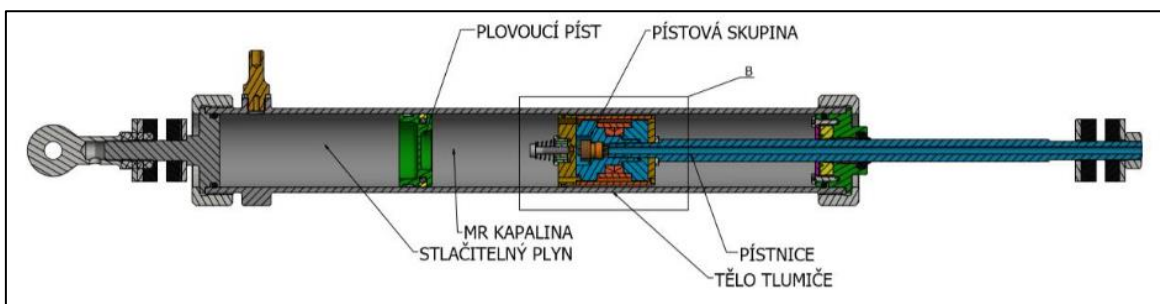


Obr. 4-1 Schéma postupu řešení praktické části bakalářské práce

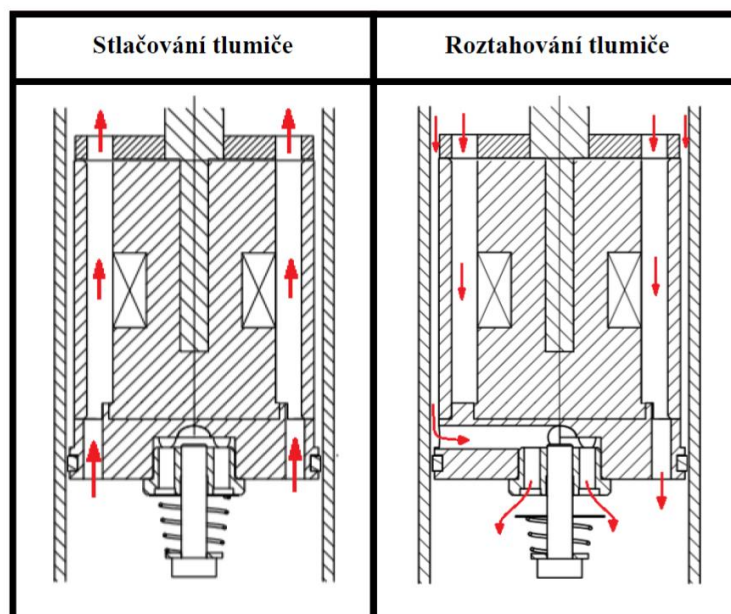
4.1 Měření tlumiče se zpětným ventilem

Ze samotné rešerše vyplývá, že veliké množství MR tlumičů operujících za nízkého tlaku využívá zpětných ventilů. Jak už bylo dříve zmíněno, ty by mohli být potencionálním problémem, protože se jedná o překážku, o kterou by se mohly částice zasekávat. Také je otázkou, jestli bude uzavírání zpětného ventilu v patě tlumiče probíhat tak, jak má. MR částice by mohly způsobit jeho částečné nedovření, a tedy nežádoucí vliv na charakteristiku.

Z toho důvodu bylo provedeno experimentální měření asymetrického MR tlumiče se zpětným ventilem. Tento tlumič byl již dříve zkonstruován v rámci bakalářské práce [13] a jeho konstrukční řešení je uvedené na obrázku (Obr. 4-2). Díky asymetrii dosahuje tlumič vyšších tlumících sil při odskoku než při kompresi. Taková charakteristika se hodí například pro tlumiče aut nebo motorek. Při stlačení tlumiče proudí kapalina tlumícími kanály MR tlumiče. Po překročení určité síly při odskoku se otevře zpětný ventil a dojde ke snížení tlumící síly. Velikost potřebné síly pro otevření zpětného ventilu je pak dána silou použité pružiny.



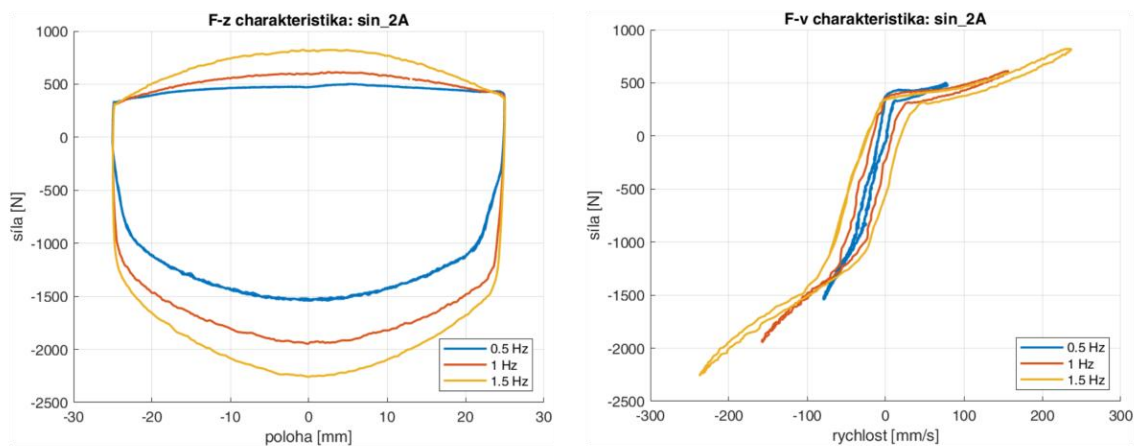
Obr. 4-2 Konstrukční řešení tlumiče se zpětným ventilem (Válek, Josef 2020) [13]



Obr. 4-3 Náskres funkce asymetrického MR tlumiče se zpětným ventilem [13]

Samotné měření bylo provedeno na odboru Diagnostiky ÚK pomocí hydraulického pulzátoru INOVA. Vyhodnocením dat z měření jsme získali F-v a F-z charakteristiky, které jsou potřebné pro vyhodnocení správné funkce tlumiče. Správně fungující tlumič vykazuje oválný tvar F-z charakteristiky bez výraznějších ostrých změn. Případná vada by se projevila výrazným poklesem nebo nárůstem tlumicí síly, od oválného tvaru [14].

Na obrázku (Obr. 4-4) je vyobrazena F-v a F-z charakteristika dílčího měření. Průběh zatěžování je ve směru hodinových ručiček, kde pro F-z charakteristiku kladné tlumicí síly vyjadřují kompresi tlumiče a záporné hodnoty odskok. U F-v vyjadřuje nulová rychlost maximální výchylku a maximální rychlost naopak nulovou výchylku (střední polohu). Ke stlačování tlumiče tedy dochází v prvním a čtvrtém kvadrantu a k odskoku v druhém a třetím. Z grafů je patrné, že se zvyšující se budící frekvencí roste tlumicí síla. Ve čtvrtém kvadrantu F-z charakteristiky je při nízké frekvenci patrné, že nebylo okamžitě dosaženo vyšší tlumicí síly. To by mohla být časová prodleva v uzavření zpětného ventilu, ale v tomto měřítku se jedná o poměrně běžný úkaz i u hydraulických tlumičů. Samotná F-v charakteristika pak u vyšších rychlostí vykazuje progresivitu tlumicí síly, což je žádoucí jev.

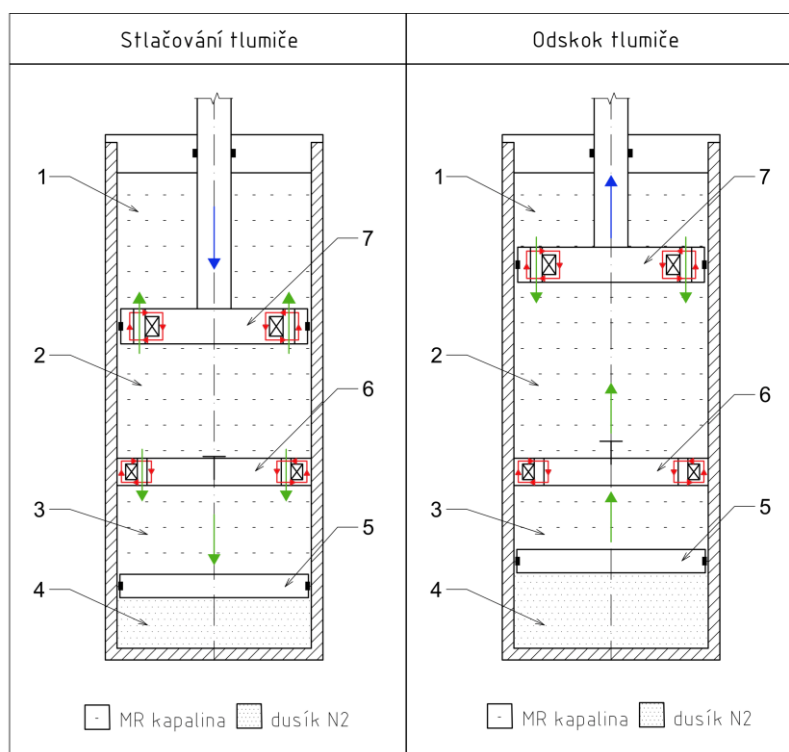


Obr. 4-4 F-z a F-v charakteristika při zatěžování funkcí sinus (různé frekvence)

Z výsledků měření vyplývá, že zpětný ventil v MR kapalině vykazuje asymetrickou charakteristiku a rychle se zavírá. **Lze tedy konstatovat, že je možné uvedenou konstrukci zpětného ventilu využívat při konstrukci MR tlumičů.** Otázkou však je, jak se bude ventil chovat při semiaktivním řízení. Podrobnější informace o experimentu naleznete v Příloze 1 (viz. 12 Seznam příloh).

4.2 Koncept A

První varianta dosahuje chodu za nízkého tlaku díky pevně umístěnému patnímu ventilu, který se nachází mezi pístem a plovoucím pístem vzduchové komory. Při stlačení tlumiče se uzavře zpětný ventil v patním ventilu (6) a ke tlumení dochází jak v aktivačních regionech pístu (7), tak i v aktivačních regionech patního ventilu (6). Naopak při odskoku tlumiče dojde k otevření zpětného ventilu v patním ventilu (6). MR kapalina tak bude proudit z velké části zpětným ventilem a tlumení bude zprostředkováno v aktivačních regionech pístu (7). Nevýhodou je, že zde bude potencionální problém interakce MR kapaliny se zpětným ventilem. Kvůli tomuto uspořádání v jedné ose dojde k významnému zkrácení zdvihu, což může vést ke snížení jízdního komfortu. Dále je u tohoto návrhu potřeba zavedení kabeláže k patnímu ventilu, což bude potřeba provést z vnějšku pláště, přičemž celý systém bude muset být krytován od okolí. Dva MR obvody mohou při správném nastavení poskytnout vyšší kontrolu tlumení, ale bude těžké obvody spolu synchronizovat.

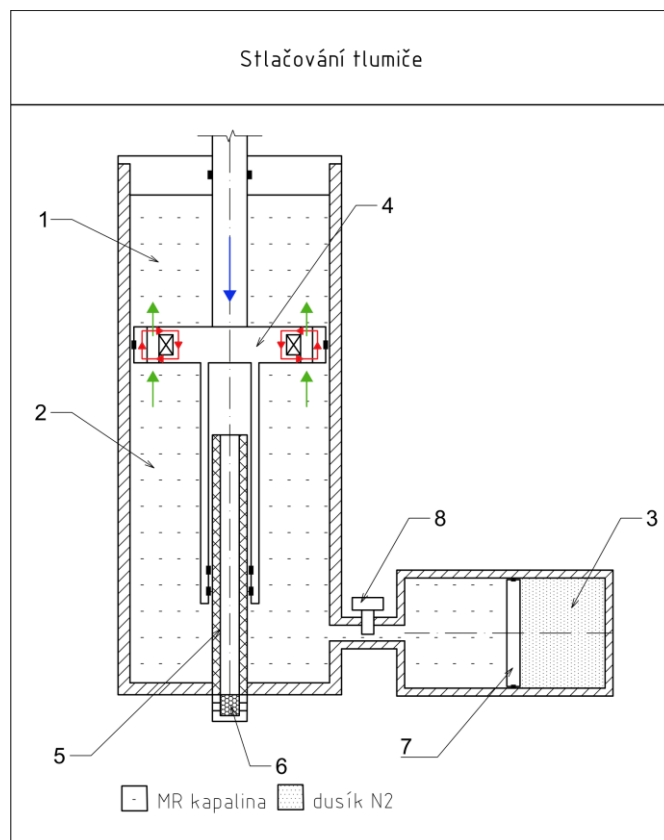


Obr. 4-5 Koncept tlumiče A; 1- Odskoková komora; 2- kompresní komora; 3- patní komora; 4- plynová komora; 5- plovoucí píst; 6- přidavný pevně ukotvený MR ventil.

4.3 Koncept B

Následující koncept byl inspirován tlumičem s pístnicí skrz. Chodu za nízkého tlaku je tedy dosaženo tak, že nedochází k velkým objemovým změnám vnořováním pístnice. Při stlačování i odskoku je tlumení zprostředkováno v tlumících regionech pístu (4). V případě odskoku je směr toku kapaliny opačný oproti naznačenému směru při stlačování. Teplotní roztažnost a částečná stlačitelnost kapaliny je pak kompenzována plynovou komorou (3) o nízkém tlaku, kterého je dosaženo pomocí umístění škrťacího ventilu (8). Pro specifické účely by bylo možné nahradit komoru s plovoucím pístem pryžovou membránou.

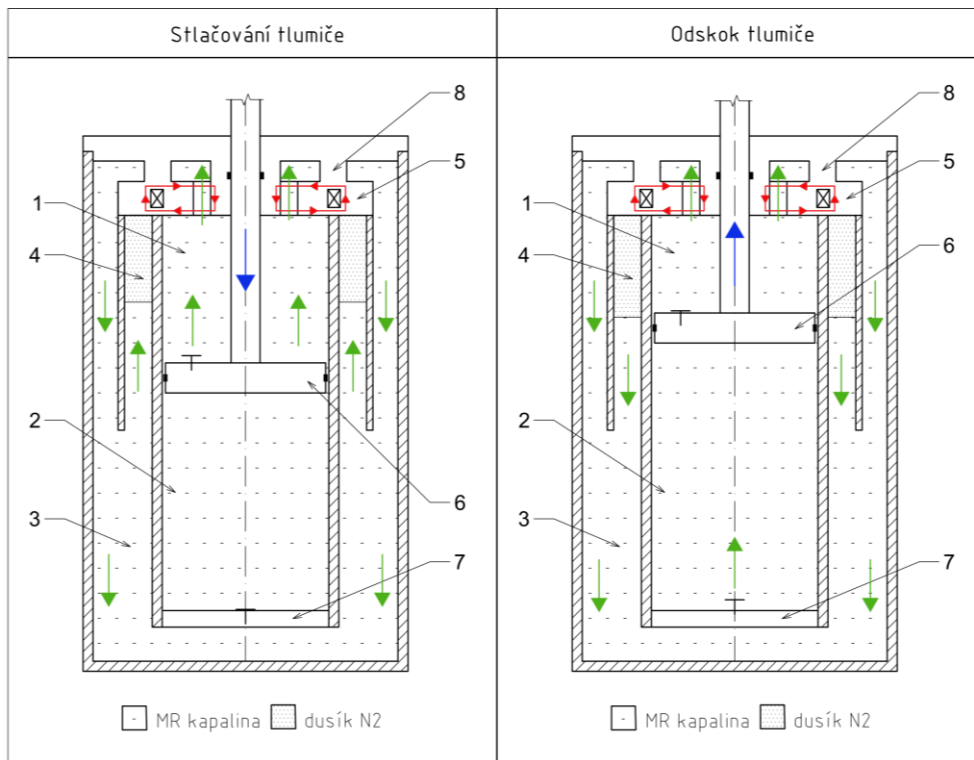
Problém se změnou objemu uvnitř pístnice byl vyřešen tak, že trubička (5) je dutá a přes vzduchový filtr (6) je spojená s atmosférickým tlakem. Zde by mohlo dojít k potenciálnímu problému reakce kovu s atmosférou, a proto by bylo potřeba povrchy ošetřit odolnými povlaky. Velkou nevýhodou tlumiče je fakt, že fukční zdvih je oproti celkové délce tlumiče poměrně krátký. Výhodou této konstrukce je, snadná implementace senzoru zdvihu, obdobně jako tomu je u tlumiče na obrázku (Obr. 2-6).



Obr. 4-6 Koncept B; 1- odskoková komora; 2- kompresní komora; 3- vzduchová komora; 4- píst; 5- vodící trubička; 6- filtr vzduchu; 7- plovoucí píst; 8- škrťací ventil.

4.4 Koncept C

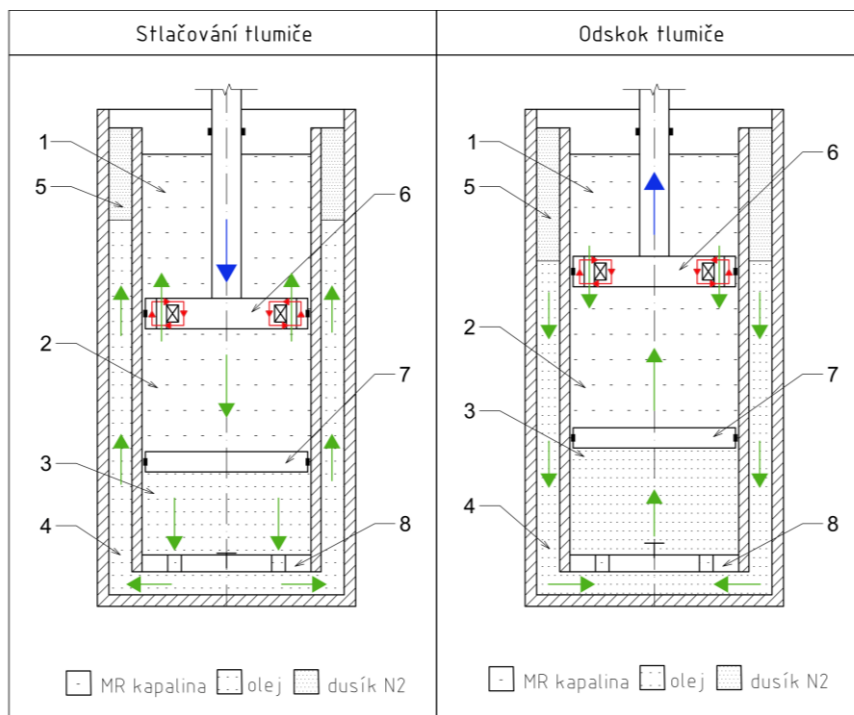
Toto řešení dosahuje nízkého tlaku opět pomocí dvouplášťové konstrukce s patním ventilem. Oproti běžným tlumičům nejsou cívky umístěny v pístu, ale v horní části. Jedná se o tlumič s cirkulačním tokem kapaliny. Při kompresi i odskokou proudí kapalina z odskokové komory (1) přes horní tlumící část do vnější komory (3). V případě odskoku pak kapalina navíc proudí z vnější komory (3) patním ventilem (7) do kompresní komory. Tlumič tedy operuje v takzvaném cirkulačním toku, který zaručí rychlejší odezvu. Při cirkulačním toku totiž dochází k lepšímu promíchání MR kapaliny, což omezuje její sedimentaci. V případě dlouhého intervalu bez provozu dojde k relativně rychlému promíchání a tlumič získá svojí plnou funkčnost už po několika stlačení. Můstky (8) slouží k vedení kabelů k cívкам a nezaplňují celý obvod tak, aby kolem nich mohla proudit kapalina. Změna objemu je kompenzována plynem v komoře (4). Je zřejmé, že z důvodu nepoužití plovoucího pístu musí být tento tlumič instalován pouze na stojato, případně ve velmi mírném náklonu. V případě potřeby by bylo možné využít pryžových blan, abychom se tohoto negativního jevu zbavili.



Obr. 4-7 Koncept C; 1- odskoková komora; 2- kompresní komora; 3- vnější komora; 4- plyn; 5- tlumící MR část; 6- píst; 7- plovací ventil; 8- můstky.

4.5 Koncept D

Toto řešení využívá hybridního systému, MR části a části s běžným hydraulickým olejem. Nízkého tlaku je dosaženo díky dvouplášťové verzi s plovacím ventilem. Odskoková komora (1) a kompresní (2) obsahují MR kapalinu. Při kompresi proudí MR kapalina z kompresní komory do odskokové skrz tlumící kanály v pístu (6). Vnoření pístnice způsobí posun plovacího pístu (7) směrem dolů. Hydraulický olej o objemu vnořené pístnice pak bude proudit z kompresní olejové komory (3) skrz škrťací ventil v patě tlumiče (6) do vnějšího pláště (4), kde bude objemová změna kompenzována stlačeným plynem (4). Při odskoku pak bude kapalina proudit opačným směrem, s tím rozdílem, že v patě tlumiče bude proudit bezodporovým zpětným ventilem, namísto škrťacích ventilů při kompresi. Výhodou řešení je fakt, že zde nemáme zpětné ventily a těsnění v MR kapalině, které by mohli být potencionálním problémem. Vyjímkou je pouze jedno těsnění na rozhraní dvou olejů. Tento koncept však kvůli plovacímu pístu ztrácí běžnou výhodu dvouplášťových tlumičů v podobě dlouhého efektivního zdvihu a nese sebou typické nevýhody dvouplášťových konstrukcí jako je zhoršený odvod tepla.



Obr. 4-8 Koncept D; 1- odskoková komora; 2- kompresní komora; 3- sekundární kompresní komora (olej); 4- vnější komora; 5- plyn; 6- píst; 7- plovoucí píst; 8- patní ventil.

4.6 Zhodnocení jednotlivých konceptů

Nejvíce je oceňována jednoduchost, nízký tlak náplně a délka zdvihu. Díky jednoduchosti tlumiče bude jeho výroba relativně snadná a rychlá, což povede ke snížení výrobních nákladů.

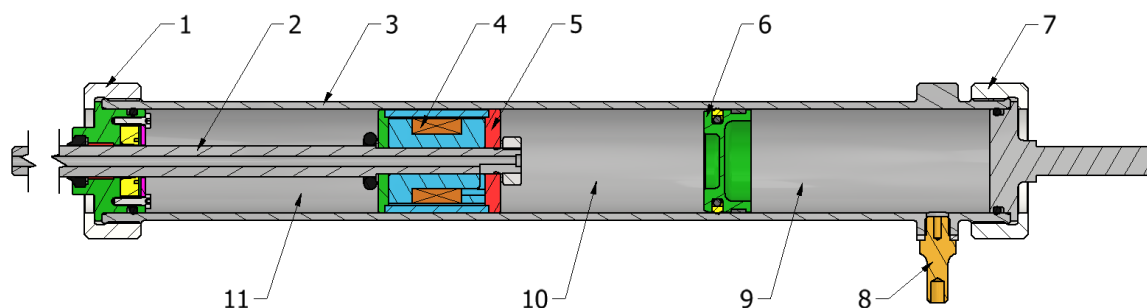
Varianta C je konstrukčně složitější a navíc pro svůj chod potřebuje dva zpětné ventily. Experimentem jsme sice zjistili, že zpětné ventily v MR kapalině fungují, ale každý další ventil v tlumiči sebou nese jisté problémy v podobě správného nastavení, opotřebení ventilu a další. Dvouplášťové provedení navíc zhoršuje odvod tepla. Z těchto důvodů nebude varianta C dále brána v úvahu. Naopak žádné ventily nepoužívá koncept B. Další výhodou varianty B je jednoduchá implementace senzoru zdvihu. Při konstrukci je však potřeba zajistit velmi dobrou sousost kluzných trubek, což zvyšuje nároky na přesnost a výroba se tím komplikuje. Nevýhodou je také omezený zdvih, ale tlumič by mohl být zajímavý pro aplikace, kde zdvih není hlavním požadavkem. K omezení délky zdvihu dochází i u varianty D využívající hybridní systém. Výhodou této varianty je, že využívá pouze jeden zpětný ventil v hydraulickém oleji. Z konstrukčního hlediska je však potřeba zajistit dobré těsnění pístu, který odděluje MR část od části s konvenčním olejem. V případě netěsnosti by totiž mohlo docházet k znečišťování oleje MR kapalinou. Z důvodu použití tohoto systému navíc roste náročnost plnění tlumiče při jeho sestavování. Dvouplášťové provedení varianty D navíc zhoršuje odvod tepla.

Z výše uvedených důvodů se tedy zdá jako nejvhodnější zbývajícím koncept A. Ten používá pouze jeden zpětný ventil. Jednoplášťové provedení poskytuje dobrý odvod tepla a zkrácení zdvihu vložení patního ventilu se zdá jako ještě přijatelné. Výhodou je, že varianta A je konstrukčně jednoduchá a prototyp na testování půjde vyrobit úpravou stávajícího jednoplášťového MR tlumiče dostupného na VUT FSI. Navíc by bylo možné konstrukci promyslet tak, aby byla modulární, což je další přidaná hodnota. Bude tedy potřeba provést konstrukční řešení přídatného tlumícího dílu, který využívá MR kanály a zpětný ventil.

5 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

5.1 Konstrukce vybrané varianty

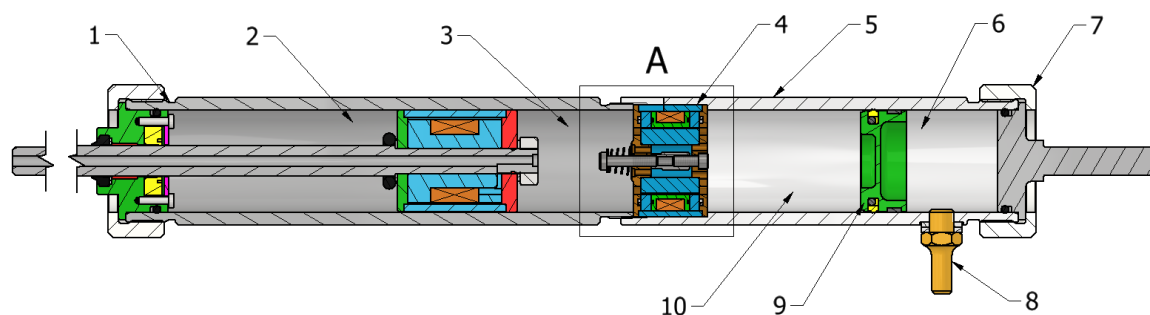
Na základě analýzy rešerše, stanovených cílů a vyhodnocení konceptů bylo rozhodnuto, že pro konstrukci nízkotlakého tlumiče bude použita varianta A. Konstrukční řešení spočívá v úpravě stávajícího vysokotlakého jednoplášťového tlumiče dostupného na ústavu ÚK, který je vidět na obrázku (Obr. 5-1). To bude provedeno vložením patní MR ventilu, který se bude nacházet v kompresní komoře (10) a to konkrétně mezi pístem (5) a plovoucím pístem (6).



Obr. 5-1 Schématický řez stávajícím vysokotlakým tlumičem. 1- horní víčko; 2- pístnice; 3- vnější plášť; 4- cívka; 5- píst; 6- plovoucí píst; 7- spodní víčko; 8- vzduchový ventil; 9- vysokotlaká plynová komora; 10- kompresní komora; 11- odskoková komora

Jako nejjednodušší a nejlevnější varianta se zdá použití dalšího hydraulického válce o stejném vnitřním průměru jako je vnitřní průměr pláště stávajícího tlumiče (ten má vnitřní průměr 40 mm a vnější 45,8 mm). Bude tedy možné znovu použít stávající plovoucí píst a další přidružené komponenty. Na obou válcích bude vyroben závit tak, aby se daly sešroubovat. Patní MR ventil válcového tvaru pak bude díky této konstrukci zafixován v zahlužení nové hydraulické trubky. Vzhledem k potřebným parametrům, ceně a dostupnosti byla pro tento účel zvolena tažená bežešvá hydraulická trubka s válečkovaným vnitřním průměrem, z katalogu firmy Hydraulics, o rozměrech 40 H8/50 mm [15]. Z důvodu atypického rozměru a úzké stěny stávajícího pláště byl pro spojení trubek zvolen jemný závit M45x1. Výhodou trubky s válečkovaným vnitřním průměrem je, že na rozdíl od honované verze nemá na povrchu spirálové rýhy, díky čemuž je zaručena vyšší životnost těsnění. Povrch je při válečkování navíc zhutněn, což je rovněž přínosem v otěruvzdornosti. [15]

Stávající tlumič bude muset být zkrácen o část s plynovou komorou a plovoucím pístem, která bude součástí nového hydraulického válce. S ohledem na zachování zdvihu tlumiče o délce 100 mm. Výhodou tohoto řešení je fakt, že k tlumiči mohou být namontovány hydraulické trubky o různých délkách. V případě potřeby bude možné nahradit vložený patní ventil kroužkem o vnitřním průměru 40 mm a po zajištění těsnosti lze tlumič konvertovat zpět na vysokotlaký jednoplášťový. Případné varianty by ale bylo nutné nejdříve experimentálně otestovat.

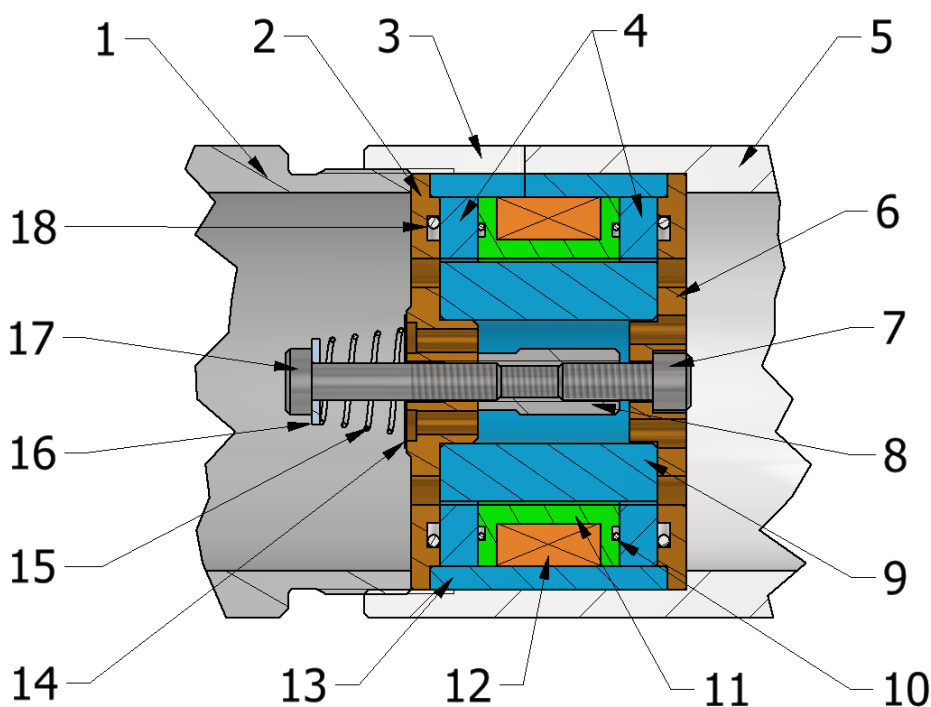


Obr. 5-2 Schématický řez upraveným nízkotlakým tlumičem. 1- původní část tlumiče; 2- odskoková komora; 3- kompresní komora; 4- sestava patního MR ventilu; 5- hydraulická trubka; 6- vzduchová komora; 7- spodní víčko tlumiče; 8- ventil; 9- plovoucí píst; 10- patní mezikomora

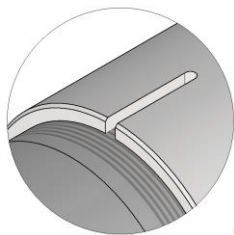
Sestava patního ventilu je vyobrazena na obrázku (Obr. 5-3). Hlavní součástí magnetického obvodu je kostra (10), na které je navinutá měděná cívka (11). Kostra cívky je vyrobená ze slitiny hliníku EN AW 7075, která má velmi nízkou permeabilitu a přijatelnou korozní odolnost. Díky tomu dojde k usměrnění toku magnetického pole. Samotné magnetické siločáry pak proudí skrz magnetický obvod (vyznačeno modře), který se skládá z vnějšího pláště (12), dvou pólů (4) a jádra (9). Magnetický obvod je vyroben z automatové oceli 11SMn30 s obsahem uhlíku pod 0,1 %. Tento materiál byl zvolen, protože vykazuje dobré magnetické vlastnosti. Mezi další výhody patří snadná obrobitelnost a dobrá drsnost povrchu po obrobení. Z vnějších stran je magnetické pole usměrněno pomocí bronzových víček, které zároveň zprostředkovávají vystředění jednotlivých dílů, čímž se přesně vymezí tlumicí štěrbin. Dosedací plochy mezi bronzovými víčky a pláštěm tlumiče jsou těsněny pomocí motorkářského tmelu či případně měděnými vyžíhanými kroužky. Samotný ventil je těsněn pomocí O-kroužků z katalogu firmy Rubena [16]. Použité kroužky Rubena PN 02 9281.2 NBR80 32 x 1 a 32 x 1,8 vydrží teploty mezi (- 40°C až + 125°C), což jsou i teploty, na které jsou dimenzovány automobilové tlumiče.

Výkresová dokumentace byla vypracována za pomoci zdrojů [17] a [18]. V příloze číslo 3 byla provedena kontrola otlačení bronzových víček. [19]

Ventil bude sestaven tak, že se do horního víčka (2) vloží podsestava se zpětným ventilem (14-17) a vymezí se předpětí kuželové pružiny (15). Ventil se z opačné strany utáhne pomocí matice (8). Na tuto podsestavu se následně nalisuje jádro (9). Dále se přiloží pól (4), kostra (10) s navinutou cívkou (11), druhý pól a celý magnetický obvod se následně vymezí pomocí pláště (12), který zapadne do drážky v bronzovém víčku (2). Plášť ventilu i tlumiče byl opatřen drážkou tak, aby bylo možné vést drát k cívce (Obr. 5-4). Sestava se dokončí přiložením spodního bronzového víčka (6), které se utáhne pomocí imbusového šroubu M3 do vnitřní matice (8). Utažením šroubu se stlačí o-kroužky a dojde k utěsnění požadovaných ploch. Nakonec se celá sestava ventilu vloží do hydraulické trubky (5) a utáhne se pomocí původního pláště (1).



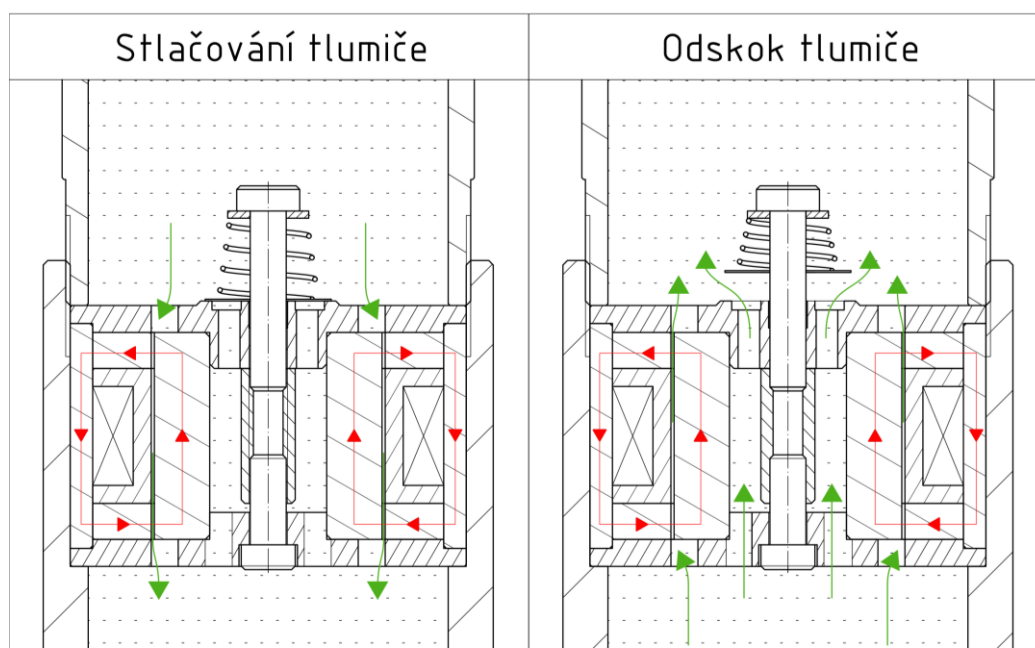
Obr. 5-3 Detailní pohled A sestavy patního MR ventilu. 1- původní plášť; 2- horní bronzové víčko; 3- štěrбина pro zavedení drátu; 4- póly magnetického obvodu; 5- hydraulická trubka; 6- spodní bronzové víčko; 7- imbusový šroub M3; 8- matice; 9- jádro; 10- těsnící o-kroužek; 11- kostra cívk; 12- cívka; 13- plášť magnetického obvodu; 14- planžeta; 15- kuželová pružinka; 16- podložka; 17- imbusový šroub M4; 18- těsnící o-kroužek



Obr. 5-4 Detailní pohled na plášť tlumiče, který je opatřen drážkou pro vedení drátu cívk.

5.1.1 Funkce patního MR ventilu

Při stlačování tlumiče proudí část MR kapaliny aktivačními regiony v pístu. Druhá část kapaliny, která se rovná vnořenému objemu pístnice pak bude proudit nově zkonstruovaným patním MR ventilem. Pro zachování správné funkce nízkotlakého tlumiče je nutné, aby tlaková ztráta v patním MR ventilu převyšovala tlakovou ztrátu na pístu. V samotném MR ventilu proudí kapalina úzkou štěrbinou. Jak je naznačeno na obrázku (Obr. 5-5) štěrbinou prochází magnetické siločáry, které tvoří aktivační regiony. V těch dochází k řetězení částic a při odskoku tlumiče bude kapalina proudit opačným směrem do té doby, než bude vyvinut dostatečný tlak pro stlačení pružinky a otevření zpětného ventilu. To bude mít za následek pokles tlumicí síly a zmenšení sklonu F-v charakteristiky.



Obr. 5-5 Nákres funkce přidavného MR ventilu (zelená barva značí tok MR kapaliny a červená magnetické siločáry)

5.1.2 Velikost plynové komory

Na základě zkušeností mi vedoucí bakalářské práce doporučil, aby plynová komora dvouplášťového tlumiče byla dimenzována tak, že rozdíl tlaků při maximálním roztáhnutí a stlačení nepřevyšuje 15 % z čehož plyne, že $p_2 = 1,15p_1$. Velikost změny objemu plynové komory ΔV bude rovna vnořenému objemu pístnice. Ten se vyjádří jako součin uvažovaného maximálního zdvihu tlumiče $l = 100$ mm a průřezu pístnice. Plynovou náplň je vzduch. Ten na rozdíl od dusíku není inertním plynem. Pro výpočet bude uvažován děj adiabatický s exponentem $\kappa = 1,4$ (vzduch), čímž je zajištěno, že se budeme nacházet na konzervativní straně. Výsledná délka l_{min} je minimální délka plynové komory pro dodržení rozdílu tlaků do 15%.

$$\Delta V = \frac{\pi D_2^2}{4} \cdot l = 11,31 \cdot 10^{-6} m^3$$

$$p_1 V_1^\kappa = p_2 V_2^\kappa$$

$$p_1 \cdot V_1^\kappa = 1,15 \cdot p_1 (V_1 - \Delta V)^\kappa$$

$$\frac{V_1}{V_1 - \Delta V} = 1,15^{\frac{1}{\kappa}}$$

$$V_1 = \frac{-1,15^{\frac{1}{\kappa}} \Delta V}{1 - 1,15^{\frac{1}{\kappa}}} = 0,11904 \cdot 10^{-3} m^3$$

$$l_{min} = \frac{4V_1}{\pi D_1^2} = 94,729 \text{ mm}$$

5.2 Hydraulický návrh

Pro výpočet hydraulického návrhu budeme uvažovat maximální rychlost 0,5 m/s, na kterou jsou dimenzovány běžné osobní automobily. Touto rychlostí v_2 se bude pohybovat píst s pístnicí. Do vzorců pro určení jednotlivých průřezů byl dosazen průměr pístu $D_1 = 40$ mm a pístnice $D_2 = 12$ mm. Plocha S_3 značí plochu průřezu mezikruží tlumícího kanálu a v_3 rychlost kapaliny v tlumící štěrbině.

$$S_1 = \frac{\pi \cdot D_1^2}{4} = 1256,637 \text{ mm}^2$$

$$S_2 = \frac{\pi \cdot D_2^2}{4} = 113,097 \text{ mm}^2$$

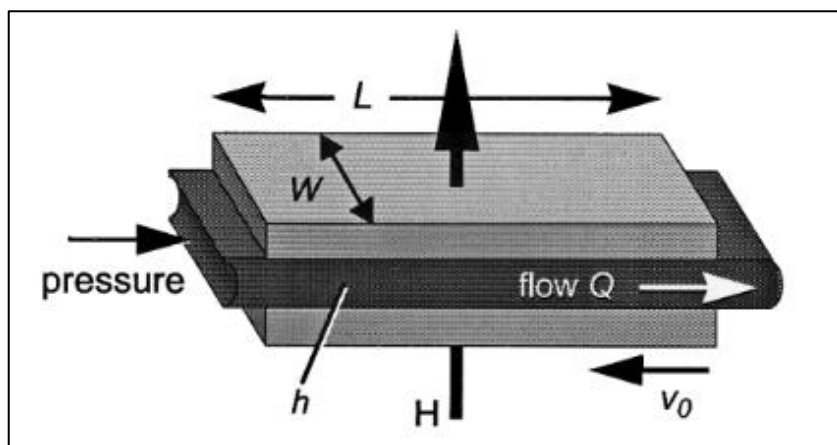
$$S_3 = \frac{\pi \cdot (d_2^2 - d_1^2)}{4} = 41,62 \text{ mm}^2$$

$$Q_2 = Q_3$$

$$v_3 = \frac{S_2 \cdot v_2}{S_3} = 1,35 \text{ m/s}$$

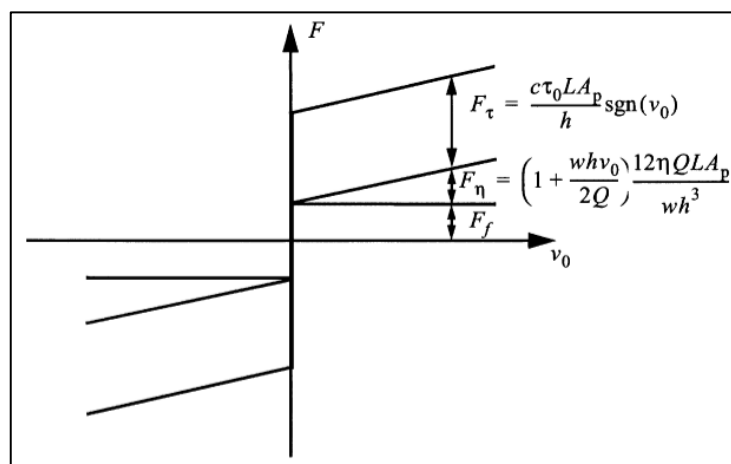
5.2.1 Analytické určení výsledné F-v charakteristiky

Pro modelování charakteristiky MR ventilu byl použit model paralelních desek. Ten využívá skutečnosti, že velikost štěrbin je oproti průměru pístu řádově menší. Díky tomu je možné nahradit axisymetrický tok v tlumiči za tok mezi paralelními deskami (válcovitý tvar tlumiče se rozvine do roviny), díky čemuž dojde ke značnému zjednodušení. Výpočtový model, který uvažuje axisymetrický tok je sice přesnější, ale odchylka modelu paralelních desek je maximálně do 2%, což pro orientační hydraulický návrh postačuje. [20]



Obr. 5-6 Tok MR kapaliny mezi paralelními deskami; W značí obvodovou délku štěrbin; h sířku štěrbin; L délkou štěrbin. [20]

Výslednou sílu tlumiče lze rozložit na kontrolovatelnou složku F_τ (velikostí proudu jsme schopni ovlivnit mez kluzu τ_0) a nekontrolovatelnou složku F_{uc} , která se skládá z třecí složky F_f a viskózní složky F_η . Třecí složku F_f vyvozuje pohyb pístu ve válci. Vzhledem k tomu, že se MR ventil nepohybuje, lze pro výpočet MR ventilu považovat třecí složku F_f za nulovou.

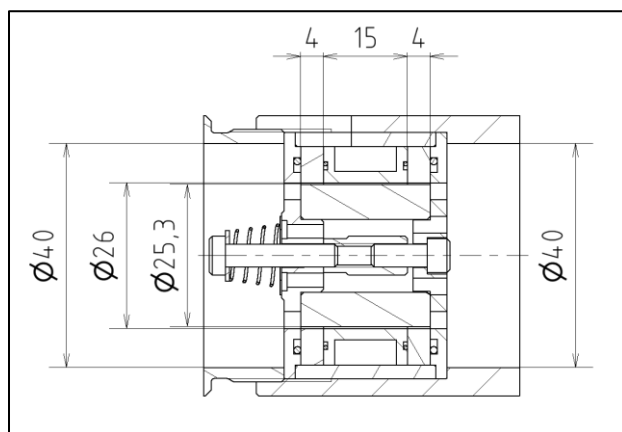


Obr. 5-7 Graf jednotlivých složek celkové odporové síly MR tlumiče [20].

Na základě modelu paralelních desek jsou pro sílu F_τ a F_η odvozeny následující rovnice.

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

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



Obr. 5-8 Geometrie MR ventilu.

Tab. 1 Geometrické parametry vloženého MR ventilu

D_1	průměr pístu	40 mm
D_2	průměr pístnice	12 mm
d_1	malý průměr štěrbin	25,3 mm
d_2	velký průměr štěrbin	26 mm
l_p	délka aktivních pólů	2x4 mm
l_c	délka cívky	15 mm

Aby byla zaručená správná funkce tlumiče, je nutné, aby tlaková ztráta v MR ventilu byla větší než tlaková ztráta tlumiče. Pokud uvedené síly vydělíme plochou dostaneme složky tlakových ztrát v MR ventilu. Tyto složky budou spočítány podél pólů a cívky. Následně se sečtou a výsledná tlaková ztráta se porovná s výstupem měření na pulzátoru původního vysokotlakého MR tlumiče. Místní tlakové ztráty na vstupu a výstupu do štěrbin se pohybují okolo 1% celkové ztráty a proto byly pro orientační výpočet zanedbány.

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

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

$$\Delta P = \Delta P_\eta + \Delta P_\tau$$

Pro výpočet obvodové délky štěrbiny w je potřeba použít střední průměr štěrbiny:

$$w = \frac{\pi}{2}(d_1 + d_2)$$

Dále je potřeba vypočítat objemový průtok štěrbinou Q_3 . Do MR ventilu proudí objem kapaliny, který je roven vnořenému objemu pístnice (ΔV). Celkový průtok štěrbinou lze tedy vypočítat jako rychlost pohybu pístu (pístnice) v_2 vynásobeného plochou průřezu pístnice S_2 . Na základě rovnice kontinuity, lze dopočítat rychlost ve štěrbině v_3 .

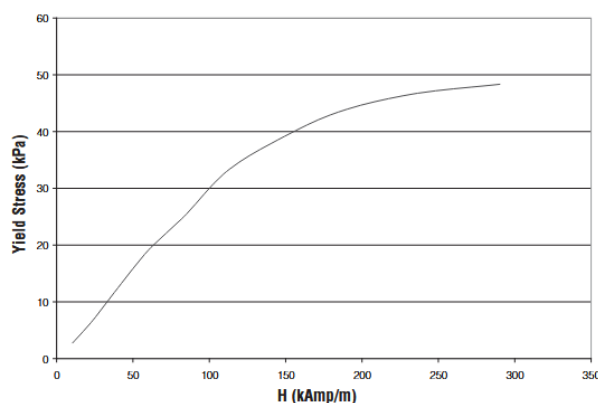
$$Q_2 = S_2 v_2 = \frac{\pi D_2^2}{4} \cdot v_2$$

$$Q_2 = Q_3$$

$$S_2 v_2 = S_3 v_3$$

$$v_3 = v_2 \frac{S_2}{S_3}$$

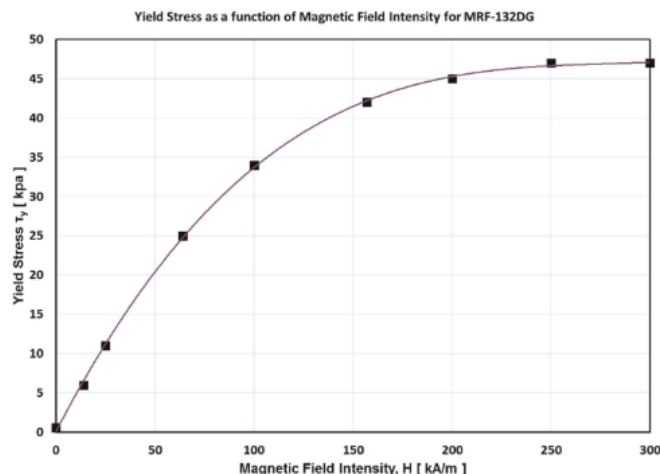
Mez kluzu kapaliny τ_0 závisí jak na druhu kapaliny, tak na velikosti intenzity magnetického pole v aktivačních regionech (na pólech). Upravený tlumič bude plněn stejnou kapalinou jako ten původní, tedy MRF132-DG od firmy Lord Corporation.



Obr. 5-9 Graf závislosti velikosti intenzity magnetického pole na mezi kluzu kapaliny MRF132-DG z katalogu Lord Corporation. [21]

Pro analytický výpočet byla závislost intenzity magnetického pole na mezi kluzu pro kapalinu MRF132-DG aproximována pomocí křivky s níže uvedenou kubickou rovnicí (Nguyen and Choi, 2012). Rovnice aproximuje chování kapaliny do hodnoty $H \approx 300 \text{ kA/m}$. Dosazovaná velikost intenzity magnetického pole H je výstupem z výpočtu magnetického obvodu, který je uveden v následující kapitole. Pro $H \approx 280 \text{ kA/m}$ dochází k saturaci MR kapaliny, tedy mez kluzu $\tau_0 = 47 \text{ kPa}$ se již s dalším nárůstem H výrazně nezvyšuje. [22]

$$\tau_0 = 0,0726 + 0,4782H - 17 \cdot 10^{-4}H^2 + 2 \cdot 10^{-6}H^3$$



Obr. 5-10 Graf vyobrazující aproximaci závislosti $\tau_0(H)$ na základě naměřených bodů pro kapalinu MRF132-DG. [22]

Posledním parametrem potřebným do výpočtu tlakových ztrát je dynamická viskozita MR kapaliny. Základní dynamická viskozita MRF132-DG uvedená v katalogu firmy Lord Corporation je $\eta(T = 40^\circ C) = 0,112 \pm 0,02 Pa \cdot s^{-1}$. Viskozita je ale silnou funkcí teploty, a proto je potřeba jí popsat pomocí křivky. To je možné provést pomocí exponenciálního Reynoldsova modelu (kde e je eulerovo číslo a teplota T je ve stupních Celsia).

$$\eta(T) = Ae^{\left(\frac{b}{T+273,15}\right)}$$

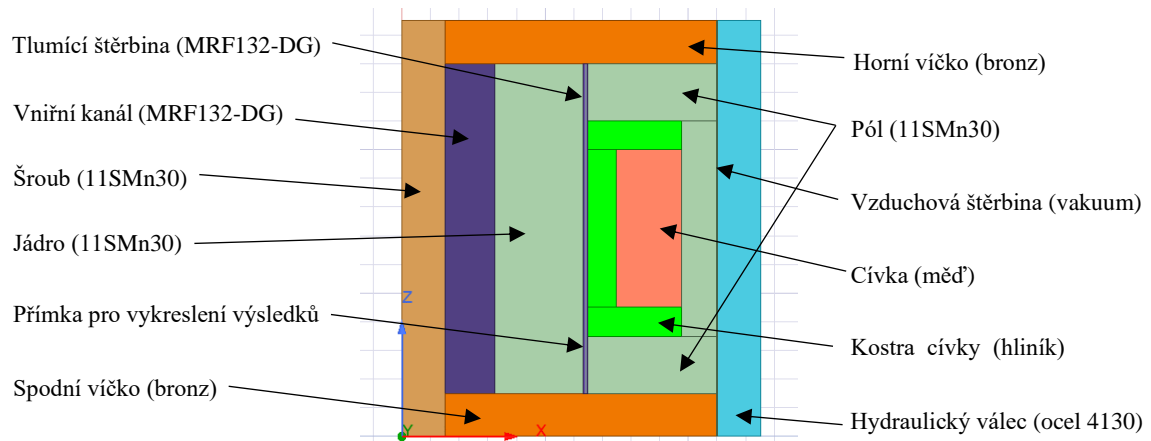
Potřebné konstanty lze získat pomocí experimentálního měření a po jejich dosazení pak rovnice vypadá následovně.

$$\eta(T) = 4,65 \cdot 10^{-7} \cdot e^{\left(\frac{3879}{T+273,15}\right)}$$

5.3 Návrh magnetického obvodu

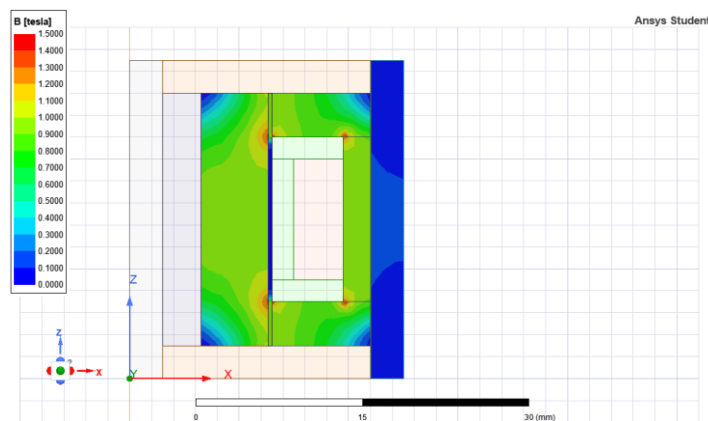
Abychom zjistili intenzitu magnetického pole dosazovanou při hydraulickém výpočtu, bylo nutné jí vypočítat. K tomuto účelu byla využita studentská verze softwaru Ansys Maxwell. Pro modelování byla použita Magnetostatická úloha ve válcovém souřadném systému kolem osy z. Díky tomu bylo možné modelovat pouze polovinu průřezu tlumiče a výpočet se tím značně zjednodušil. Na obrázku (Obr. 5-11) je definovaná geometrie MR ventilu. Podrobnější nastavení simulace v Příloze 2 (viz. 12 Seznam příloh).

Vzduchová štěrbina (vakuum)

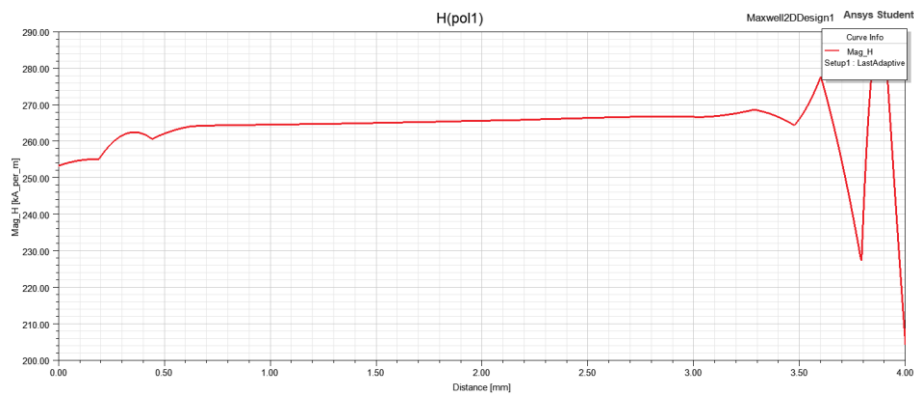


Obr. 5-11 Definová geometrie tlumiče magnetostatické úlohy ve válcovém souřadném systému.

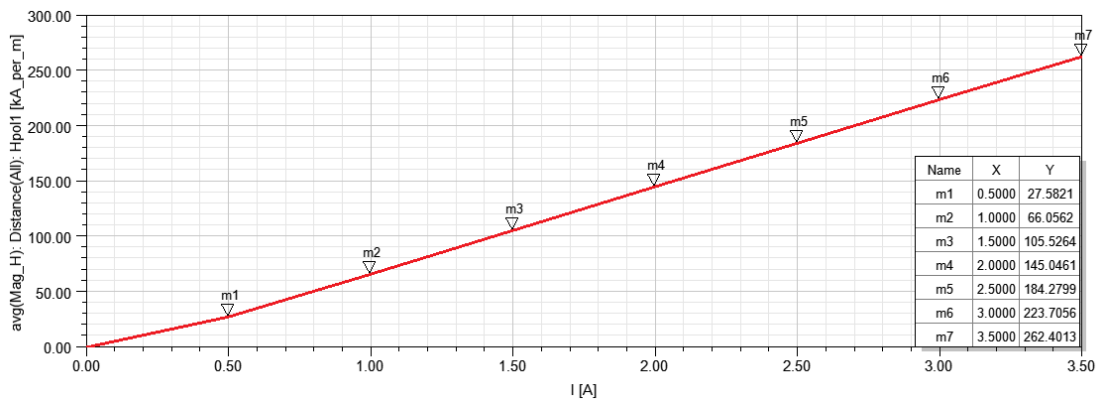
Výstupem ze simulace je velikost magnetické indukce (Obr. 5-12) v navrhovaném magnetickém obvodu a intenzita magnetického pole (Obr. 5-13). Podél délky pólu byla vyhodnocena velikost intenzity magnetického pole pro maximální proud 3,5 A. Zprůměrováním této hodnoty pomocí funkce avg. byla získána mez toku (260 kA/m) potřebná pro hydraulický výpočet.



Obr. 5-12 Velikost magnetické indukce při maximálním proudu 3,5 A.



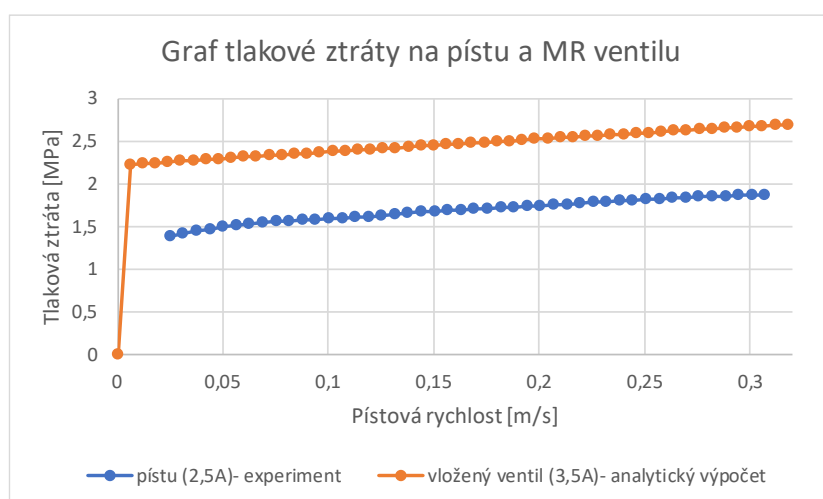
Obr. 5-13 Graf vyobrazující velikost intenzity magnetického pole podél pólu ve štěrbině při maximálním proudu 3,5 A.



Obr. 5-14 Graf vyobrazující intenzitu magnetického pole (Y) podél pólu pro různé proudy na cívce (X).

5.4 Vyhodnocení

Následující graf (Obr. 5-15) porovnává tlakovou ztrátu na pístu tlumiče a na MR ventilu. Tlaková ztráta na pístu byla experimentálně změřena na pulzátoru. Parametry měření jsou použita kapalina MRF-132DG, maximální proud 2,5A při teplotě 48,9°C. Tlaková ztráta na MR ventilu byla vyhodnocena na základě analytického výpočtu pro maximální proud 3,5A při stejné teplotě 48,9°C. Tlaková ztráta na vloženém ventilu musí být nepatrně vyšší než tlaková ztráta na pístu tak, aby za pístem nedocházelo k poklesu tlaku pod tlak atmosférický. To by mohlo vést ke kavitaci, což je nežádoucí jev. Proto byla ztráta na ventilu navržena bezpečně vyšší a s podobným sklonem vzhledem ke ztrátě na pístu. Požadovaná velikost rozdílu tlakových ztrát se bude regulovat pomocí velikosti proudu na cívce vloženého ventilu.



Obr. 5-15 Graf porovnávající tlakovou ztrátu na pístu tlumiče s tlakovou ztrátou na nově zkonstruovaném MR ventilu.

6 DISKUZE

Cílem této práce byla konstrukce nízkotlakého magnetoreologického tlumiče. Na základě rešerše byly zjištěny nedostatky dosavadních návrhů nízkotlakých konstrukcí. S ohledem na tyto nedostatky pak bylo vytvořeno několik koncepčních návrhů. Pro navazující konstrukční návrh byl zvolen koncept A. Oproti ostatním totiž vykazoval poměrně malé zkrácení zdvihu (celková délka vloženého ventilu je 42,9 mm), dobrý odvod tepla z důvodu jednoplášťové konstrukce a jednoduchost provedení. Výhodou také je, že lze vyrobit úpravou stávajícího řešení, díky čemuž dojde ke snížení výrobních nákladů.

Stávající plášť byl rozdělen na dva díly, které se dají vzájemně zašroubovat do sebe. Tím se mezi nimi napevno ustaví nový patní MR ventil. Tento ventil obsahuje tlumící kanály a vlastní cívku, s jejíž pomocí lze měnit odpor kanálů v aktivačních regionech. Součástí ventilu je také zpětný ventil složený z kuželové pružiny a planžety. Ten se v případě odskoku otevře, způsobí pokles tlumící síly, čímž získáme nesymetrickou tlumící charakteristiku. Vzhledem k částicovému charakteru MR kapaliny byla vystavěna hypotéza, že zpětný ventil z důvodu zasekávání částic nemusí v MR kapalině vykazovat takové funkční vlastnosti jako v oleji. Z toho důvodu bylo provedeno experimentální měření, stávajícího tlumiče se zpětným ventilem, který vznikl v rámci jiné bakalářské práce [13]. Výsledná silová charakteristika tlumiče vykazuje asymetrii sil, což je zamýšlený efekt zpětného ventilu. Přejížděcí oblasti mezi odskokem a kompresí vykazují ostrý nárůst a pokles síly, což znamená, že ventil se velmi rychle zavírá a otevírá bez větších potíží. Na základě výsledků měření byla tedy prvotní hypotéza vyvrácena a lze tedy říci, že zpětné ventily lze v MR kapalině použít. Funkčnost navrženého konstrukčního řešení byla ověřena pomocí Magnetického a Hydraulického modelu tlumiče.

Pro návrh optimálních parametrů magnetického obvodu byl použit software Ansys Maxwell. Magnetický obvod byl zjednodušen na Magnetostatický 2D model s rotační válcovou symetrií. Nedostatkem zvoleného postupu je fakt, že skutečný provoz tlumiče je naopak děj dynamický a pro zcela korektní výsledky je potřeba počítat i se změnou teploty jednotlivých dílů a MR kapaliny. K optimálnímu rozměru magnetického obvodu bylo potřeba dojít několika iteracemi. Aby bylo možné geometrii MR ventilu parametrizovat, bylo třeba provést zjednodušení a některé geometrické detaily tedy nebyly zahrnuty do výpočtu. K dosažení co možná nejpřesnějších výsledků je potřeba mít co možná nejhustší síť, a to zejména v místě aktivačních regionů. Zde však bylo omezení maximálního počtu uzlů ve studentské verzi výpočtového programu.

Pro výpočet magnetického obvodu bylo nutné zadat materiálové charakteristiky v podobě B-H křivek. Zejména u prvků samotného obvodu z oceli 11SMn30 by mohlo docházet k tomu, že zadaná charakteristika nebude odpovídat realitě. B-H křivka je totiž silně závislá na výrobním procesu jednotlivých dílů.

Získané parametry z magnetického modelu byly vstupem pro hydraulický výpočet. Ten byl proveden pomocí modelu paralelních desek. Tento model zjednodušuje axisymetrický tok tlumiče na tok mezi dvěma rovnoběžnými deskami. Avšak podle studie [20] dosahuje odchylka modelu paralelních desek a přesnějšího axisymetrického modelu 2%, což je přijatelná hodnota. Vzhledem k obtížnému určení přesné hodnoty součinitele odporu byly místní tlakové ztráty v hydraulickém výpočtu zanedbány.

Díky snížení tlaku v tlumiči dojde k poklesu tlakové fluktuace, které je vystaveno těsnění pístnice. Zároveň s tím také dojde ke snížení abrazivního efektu částic v MR kapalině. Díky tomu by mohlo dojít k širší implementaci tlumičů. Avšak existují zde další limitující faktory jako jsou omezená objemová životnost MR kapaliny a její vysoká cena. Tato problematika však již není obsahem této práce.

7 ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo vytvořit konstrukční návrh nízkotlakého MR tlumiče. Stávající vysokotlaké tlumiče vyráběné firmou BWI (Magneride) kladou vysoké nároky na těsnící prvky. Díky provozu s nízkým tlakem plynové komory by klesly požadavky na těsnění a zvýšila se jejich životnost.

Na základě rešeršní části byly zjištěny nedostatky stávajících návrhů nízkotlakých konstrukcí. Mezi ně patří velké zástavbové prostory u typu tlumiče s pístnicí skrz, zhoršení odvodu tepla u dvouplášťového tlumiče, problém s omezenou životností MR kapaliny a samotná složitost většiny konstrukcí. Na základě toho byly vypracovány jednotlivé myšlenkové koncepty. Vzhledem k jednoduchosti, dobrému odvodu tepla, a relativně malému zkrácení zdvihu byl pro navazující konstrukční zpracování vybrán koncept A. Jeho výhodou je i fakt, že lze vyrobit úpravou stávajícího vysokotlakého MR tlumiče dostupného na FSI VUT. Tím značně poklesnou pořizovací náklady na testovací prototyp.

Jedná se o jednoplášťovou verzi tlumiče, která dosahuje nízkého tlaku vloženému patnímu MR ventilu. Ten se nachází mezi tlumícím pístem a plovoucím pístem plynové komory. Vložený ventil se skládá z další MR regulovatelné části a zpětného ventilu ve formě planžety s kuželovou pružinou. Díky tomu, že byl plášť rozdělen na dva díly, jejichž vzájemným zašroubováním se ustaví vložený ventil, získal tlumič modulárnost. V případě potřeby, lze měnit délky obou částí pláště. Dále je možné mezi pláště vložit ventil s jinými parametry, nebo ventil nahradit trubkou a konvertovat nízkotlaký tlumič na vysokotlaký. Avšak ve všech případech variancí by bylo nutné provést nezbytné výpočty a experimentálně ověřit funkčnost tlumiče.

Funkce tlumiče byla ověřena na základě porovnání tlakové ztráty na pístu a vloženém ventilu. Potřebný výpočet magnetického obvodu byl proveden v softwaru Ansys Maxwell a pro hydraulický výpočet byl použit zjednodušený model paralelních desek a proudění Binghamské kapaliny. Nad rámec této práce pak bylo provedeno experimentální měření zpětných ventilů. Zde se ukázalo, že zpětný ventil vykazuje v MR kapalině předpokládanou asymetrickou charakteristiku a dochází k jeho rychlému zavírání. Tím bylo zjištěno, že při konstrukci MR tlumičů lze zpětné ventily použít.

Hlavním výsledkem je tedy konstrukční návrh nízkotlakého jednoplášťového MR tlumiče doplněný o potřebné výpočty. Předpokládá se, že provozem MR tlumiče za nižších tlaků se zvýší životnost těsnění, což může vést k jejich širší implementaci.

Možnou návazností této bakalářské práce je provést experimentální ověření funkčnosti navrženého tlumiče. Dále je potřeba vyřešit samotnou problematiku řízení, protože navržený tlumič obsahuje dva proudem regulovatelné tlumící kanály, a to v pístu a ve vloženém patním ventilu. Touto problematikou by se mohla zabývat navazující akademická práce.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] HOWARD, Bill. *Bose Sells Off Its Revolutionary Electromagnetic Suspension*. In: EXTREME TECH [online]. USA: Ziff Davis, 2001 [cit. 2022-05-11]. Dostupné z: <https://www.extremetech.com/extreme/259042-bose-sells-off-revolutionary-electromagnetic-suspension>
- [2] DIXON, John C. *The Shock Absorber Handbook*. Second edition. Chichester: Wiley, 2007. Professional engineering publishing series (Wiley). ISBN 978-0-470-51020-9.
- [3] POYNOR, James. *Innovative Designs for Magneto-Rheological Dampers*. 2001.
- [4] YUAN, Xianju, Tianyu TIAN, Hongtao LING, Tianyu QIU a Huanli HE. *A Review on Structural Development of Magnetorheological Fluid Damper*. **Shock and Vibration** [online]. 2019, 2019(1498962), 33 [cit. 2021-11-24]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1155/2019/1498962>
- [5] DENG, Huaxia et al. Self-sensing automotive magnetorheological dampers for low frequency vibration. *Smart Materials and Structures* [online]. **2021**, 2021(3011), 11 [cit. 2022-01-26]. Dostupné z: doi:10.1088/1361-665X/ac2c5f
- [6] B., Ichwan. Development of a modular MR valve using meandering flow path structure. *Smart Materials and Structures* [online]. 2016, 2016(25), 13 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: doi:10.1088/0964-1726/25/3/037001
- [7] GONG, Xinglong, Chao PENG, Chaoyang GUO, Xinglong GONG a Shouhu XUAN. *Twin-tube- and bypass-containing magneto-rheological damper for use in railway vehicles*. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit* [online]. 2013, **2015**(2291), 48-57 [cit. 2021-12-04]. Dostupné z: doi:10.1177/0954409713497199
- [8] QUOC-HUNG, Nguyen a Choi SEUNG-BOK. Optimal design of a vehicle magnetorheological damper considering the damping force and dynamic range. *Smart Materials and Structures* [online]. 2008, 2009(18) [cit. 2022-05-17]. Dostupné z: doi:http://dx.doi.org/10.1088/0964-1726/18/1/015013
- [9] ZHANG, Xinjie, Yi YANG, Konghui GUO, Shengli SUN, Guanjie HE a Zhihua LI. Methodology on a novel magnetorheological valve controlled damper synthesis design. *Smart Materials and Structures* [online]. 2020, 2020(294), 1010881361-665729 [cit. 2021-12-05]. Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-665X/ab72e9>
- [10] DESAI, R.M., *Jamadar M.E.H.* a Kumar H. Design and experimental characterization of a twin-tube MR damper for a passenger van. *The Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* [online]. 2019, 2019(41332) [cit. 2022-01-28]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1007/s40430-019-1833-5>
- [11] PŘIKRYL, Matěj. *Hydrodynamické tlumiče na principu magnetické kapaliny*. Brno, 2019. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vedoucí práce Petr Hejtmánek.

- [12] LESLIE OLIVER, Michael, *William CHARLES KRUCKEMEYER a Eric LEE JENSEN*. Magnetorheological damper with piston bypass. United States. US6419057B1. Uděleno 16.7.2002.
- [13] VÁLEK, Josef. *Konstrukce magnetoreologického tlumiče s nesymetrickou rychlostní charakteristikou*. Brno, 2020. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí práce Ing. Michal Kubík, Ph.D.
- [14] Damper dyno graphs explained. In: *Suspension Secrets [online]*. Marthall, Cheshire: Suspension Secrets, 2021 [cit. 2022-02-02]. Dostupné z: <https://suspensionsecrets.co.uk/damper-dyno-graphs-explained/>
- [15] Přesné trubky pro *hydraulické válce*. In: *Hydraulics [online]*. Slopné: HYDRAULICS, 2017 [cit. 2022-02-21]. Dostupné z: <https://www.hydraulics.cz/24927-presne-trubky>
- [16] Tesnící prvky- Rubena. In: *Rubena [online]*. Hradec Králové: ČESKÁ GUMÁRENSKÁ SPOLEČNOST, 2021 [cit. 2022-04-17]. Dostupné z: https://eshop.rubena.cz/Files/flash/rubena-old/Tesnici-prvky_2015_CZ.pdf
- [17] SVOBODA, Pavel a Jan BRANDEJS. *Výběry z norem: pro konstrukční cvičení*. Vydání šesté, přepracované a doplněné. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2019, 236 stran : *ilustrace* (černobílé). ISBN 978-80-7623-010-1.
- [18] SVOBODA, Pavel a Jan BRANDEJS. *Základy konstruování*. Vydání sedmé, přepracované a doplněné. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2019, 243 stran : *ilustrace* ; 25 cm. ISBN 978-80-7623-009-5.
- [19] SHIGLEY, Joseph Edward, *Charles R. MISCHKE, Richard G.* (Richard Gordon) BUDYNAS, Martin HARTL a Miloš VLK. *Konstruování strojních součástí*. 1. vyd. V Brně: VUTIUM, 2010, xxv, 1159 s. : il. ; 26 cm. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [20] YANG, G., *J.D. CARLSON, M.K. SAIN* a B.F. SPENCER JR. Large-scale MR fluid dampers: modeling and dynamic performance considerations. *Engineering structures* [online]. 2002, **2002**(24), 309-323 [cit. 2022-02-21]. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(01\)00097-9](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(01)00097-9)
- [21] Magneto Rheological (MR) *Fluid*. In: *Parker LORD [online]*. North Carolina, USA: Parker Hannifin Corp, 2020 [cit. 2022-04-05]. Dostupné z: https://lordfulfillment.com/pdf/44/DS7015_MRF-132DGMRFfluid.pdf
- [22] ABOUBAIA, Ehab, *Rama BHAT a Ramin SEDAGHATI*. Development of a new torsional vibration damper incorporating conventional centrifugal pendulum absorber and magnetorheological damper. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* [online]. 2016, **27**(7), 980-992 [cit. 2022-04-04]. ISSN 1045-389X. Dostupné z: [doi:10.1177/1045389X15590275](https://doi.org/10.1177/1045389X15590275)

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

9.1 Použité zkratky

BWI	Beijing West Industries
CI	Pentakarbonyl železa (Carbonyl Iron)
FSI	Fakulta strojního inženýrství
MR	Magnetoreologický
MRF	Magnetoreologická kapalina
MRVD	Tlumič s magnetoreologickým ventilem (MR valve damper)
PTFE	Polytetrafluorethylen (teflon)
ÚK	Ústav konstruování
VUT	Vysoké učení technické
SMRAD	Samočinný magnetoreologický automobilový tlumič (Self-sensing magnetorheological automobile damper)

9.2 Použité fyzikální veličiny

F_{uc}	nekontrolovatelná složka síly
F_{τ}	smyková složka síly (kontrolovatelná)
F_{η}	viskózní složka síly
F_f	třecí složka síly
κ	poissonova konstanta (vzduch)
D_1	průměr pístu
D_2	průměr pístnice
d_1	malý průměr štěrbin
d_2	velký průměr štěrbin

H	velikost intenzity magnetického pole
h	šířka štěrbin
L	délka štěrbin
l	uvažovaný maximální zdvih tlumiče
l_{min}	minimální délka plynové komory
l_p	délka pólů (aktivovaná část)
l_c	délka cívky (neaktivovaná část)
p_1	tlak plynové komory při maximální expanzi
p_2	tlak plynové komory při maximální kompresi
ΔP	celková tlaková ztráta na ventilu
ΔP_η	tlaková ztráta od viskózní složky síly
ΔP_τ	tlaková ztráta od smykové složky síly
Q_2	objemový průtok vyvolaný pohybem pístnice
Q_3	objemový průtok štěrbinou
S_1	plocha průřezu pístu
S_2	plocha průřezu pístnice
S_3	plocha průřezu štěrbin
ΔV	změna objemu způsobená vnořením pístnice
V_1	objem plynové komory při maximální expanzi
V_2	objem plynové komory při maximálním stlačení
v_2	rychlost pohybu pístu (pístnice)
v_3	rychlost proudění kapaliny ve štěrbině
τ_0	mez kluzu
η	dynamická viskozita
w	obvodová délka štěrbin

10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 2-1 Schéma základní konstrukce tlumiče. [2, s. 41]	14
Obr. 2-2 Základní typy tlumičů: a) s pístnicí skrz; b) dvouplášťový; c) jednoplášťový [2].	15
Obr. 2-3 Magnetoreologická kapalina: (a) neaktivovaný stav; (b) aktivovaný stav (červené šipky znázorňují magnetické siločáry).	17
Obr. 2-4 (a) Základní schéma jednoplášťového MR tlumiče; (b) elektromagnetická část MR tlumiče [4, s. 3].	18
Obr. 2-5 Pohled na podélný průřez MR tlumičem; [4].	19
Obr. 2-6 Konstrukce tlumiče SMRAD; [5, s. 3].	20
Obr. 2-7 (a) Průřezový pohled na modulárním MR ventilém; (b) rozpadový pohled; (c) MR tlumič s pístnicí skrz; [4].	21
Obr. 2-8 Schématický pohled na dvouplášťový MR tlumič: (a) varianta s plynovou komorou v ose; (b) varianta s externí plynovou komorou; [4].	22
Obr. 2-9 (a) Schématický nákres dvouplášťového MR tlumiče; (b) externí obtokový ventil; 1- pístnice; [4].	23
Obr. 2-10 Průřezový pohled na MR tlumič s nezávislým tlumením komprese a odskoku.[4]	24
Obr. 2-11 MR ventil se serpentinovým magnetickým tokem; (a) jednostupňový serpentinový tok; (b) dvoustupňový serpentinový tok;[4].	25
Obr. 2-12 Dvouplášťový MR tlumič s dvěma cívkami jako patní ventily; [8].	26
Obr. 2-13 Hybridní dvouplášťový tlumič. [3, s. 73]	26
Obr. 2-14 Detailní pohled první varianty pístové sestavy hybridního tlumiče. [3]	27
Obr. 2-15 Druhá varianta pístové sestavy hybridního tlumiče; [3].	27
Obr. 2-16 (a) Schéma tlumiče s MR ventilém; (b) Stlačovací MR ventil. [9]	28
Obr. 2-17 Schéma měřeného dvouplášťového MR tlumiče se zpětnými ventily v patě [10]	29
Obr. 2-18 F-z charakteristiky dvouplášťového MR tlumiče se zpětnými ventily [10]	29
Obr. 2-20 Charakteristiky MR tlumiče pro amplitudu 15 mm (a) F-z charakteristika; (b) F-v charakteristika [11].	30
Obr. 2-21 Schéma MR tlumiče s bypass ventilem. [12]	31
Obr. 5-1 Schématický řez stávajícím vysokotlakým tlumičem.	42

Obr. 5-2 Schématický řez upraveným nízkotlakým tlumičem.	43
Obr. 5-3 Detailní pohled A sestavy patního MR ventilu.	44
Obr. 5-4 Detailní pohled na plášť tlumiče, který je opatřen drážkou	44
Obr. 5-5 Nákres funkce přidavného MR ventilu	45
Obr. 5-6 Tok MR kapaliny mezi paralelními deskami. [20]	47
Obr. 5-7 Graf jednotlivých složek celkové odporové síly MR tlumiče [20].	47
Obr. 5-8 Geometrie MR ventilu.	48
Obr. 5-9 Graf závislosti velikosti intenzity magnetického pole na mezi kluzu kapaliny MRF132-DG z katalogu Lord Corporation. [21]	49
Obr. 5-10 Graf vyobrazující aproximaci závislosti $\tau_0(H)$ na základě naměřených bodů pro kapalinu MRF132-DG. [22]	50
Obr. 5-11 Definová geometrie tlumiče magnetostatické úlohy ve válcovém souřadném systému.	51
Obr. 5-12 Velikost magnetické indukce při maximálním proudu 3,5 A.	51
Obr. 5-13 Graf vyobrazující velikost intenzity magnetického pole podél pólu ve štěrbině při maximálním proudu 3,5 A.	51
Obr. 5-14 Graf vyobrazující intenzitu magnetického pole (Y) podél pólu pro různé proudy na cívce (X).	52
Obr. 5-15 Graf porovnávající tlakovou ztrátu na pístu tlumiče s tlakovou ztrátou na nově zkonstruovaném MR ventilu.	52

11 SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Geometrické parametry vloženého MR ventilu.....	48
--	----

12 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1: Experimentální měření MR tlumiče se zpětným ventilem a jeho vyhodnocení

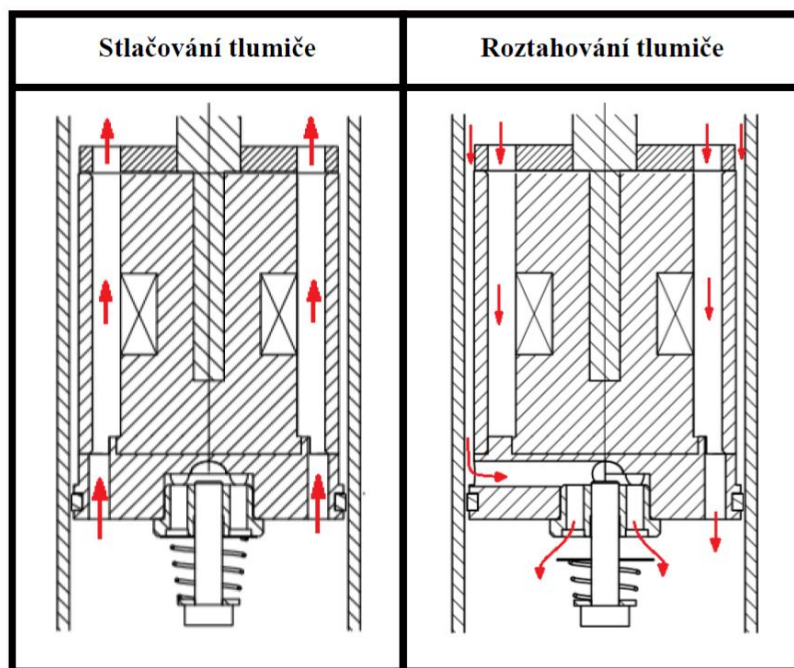
Příloha 2: Simulace magnetického obvodu

Příloha 3: Kontrolní výpočet otláčení víčka

Příloha 4: Výkresová dokumentace

Příloha 1- experimentální měření MR tlumiče se zpětným ventilem

K měření byl použit MR tlumič na Obr. (13-1) s asymetrickým tlumením, kterého bylo dosaženo použitím obtokového kanálu se zpětným ventilem, jenž je umístěn v pístu tlumiče. Díky asymetrii dosahuje tlumič vyšších tlumících sil při odskoku než při kompresi. Taková charakteristika se hodí například pro tlumiče aut nebo motorek. Při stlačení tlumiče proudí MR kapalina tlumícími kanály MR tlumiče. Po překročení určité síly při odskoku se otevře zpětný ventil a dojde k snížení tlumící síly. Velikost síly pro otevření zpětného ventilu je pak dána tuhostí použité pružiny. Protože MR kapalina po dlouhé nečinnosti sedimentovala, bylo nutné jí důkladně promíchat, aby v ní byly částice rovnoměrně rozptýleny. Po sestavení MR tlumiče byla pomocí upravené tlakové nádoby natlakována vzduchová komora na 30 bar.

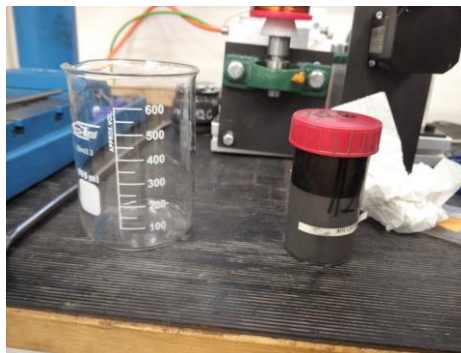


Obr. 12-1 Nákres funkce měřeného MR tlumiče [13]

Měření a vyhodnocení dat bylo provedeno na odboru Diagnostiky ÚK. K měření byl použit hydraulický pulzátor INOVA a naměřená data byla vyhodnocena dostupným softwarem. Měření byly získány F-v a F-z charakteristiky tlumiče pro několik druhů zatěžování. Zatěžování bylo prováděno nejdříve při proudu 2 A sinusovým cyklem pro různé frekvence, nejdříve s výchylkou 1 mm a následně 5 mm. Dále bylo provedeno měření opět při proudu 2 A nejdříve pro sino cyklus a poté pro trojúhelníkový a to pro frekvence 0,5; 1 a 1,5 Hz.



Obr. 12-2 Jednotlivé díly MR tlumiče



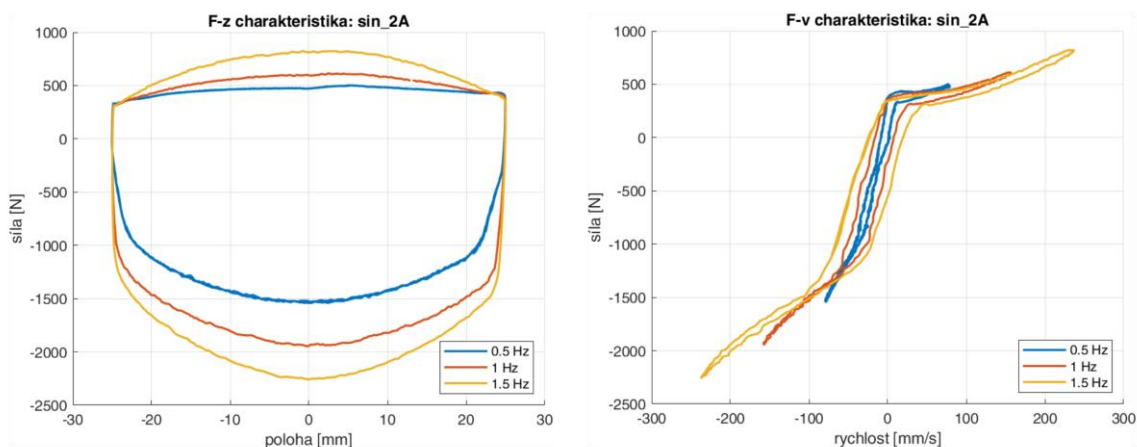
Obr. 12-3 MR kapalin MRF-126LF od firmy Lord Corporation



Obr. 12-4 Pulzátor INOVA s měřeným tlumičem

Příloha 1- vyhodnocení měření

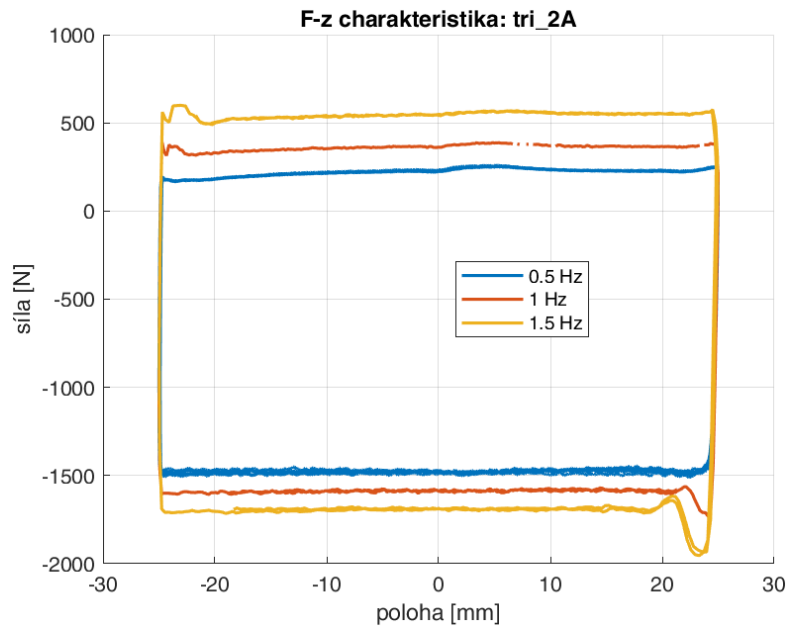
Získaná data byla vyhodnocena v softwaru Matlab a Excel. Průběh zatěžování je ve smyslu hodinových ručiček. Na grafu F-z charakteristiky (Obr. 12-5) druhý kvadrant (horní levý) znázorňuje zrychlování při kompresi a první kvadrant (horní pravý) potom zpomalování. Dále čtvrtý kvadrant vyjadřuje zrychlení při odskoku a třetí zpomalení. Obdobně je tomu i pro F-v charakteristiku, ale je zde třeba brát zřetel na fázový posuv. Tedy to, že při nulových rychlostech se nacházíme na maximálních výchylkách od rovnovážné polohy.



Obr. 12-5 F-z a F-v charakteristika při zatěžování funkcí sinus (různé frekvence)

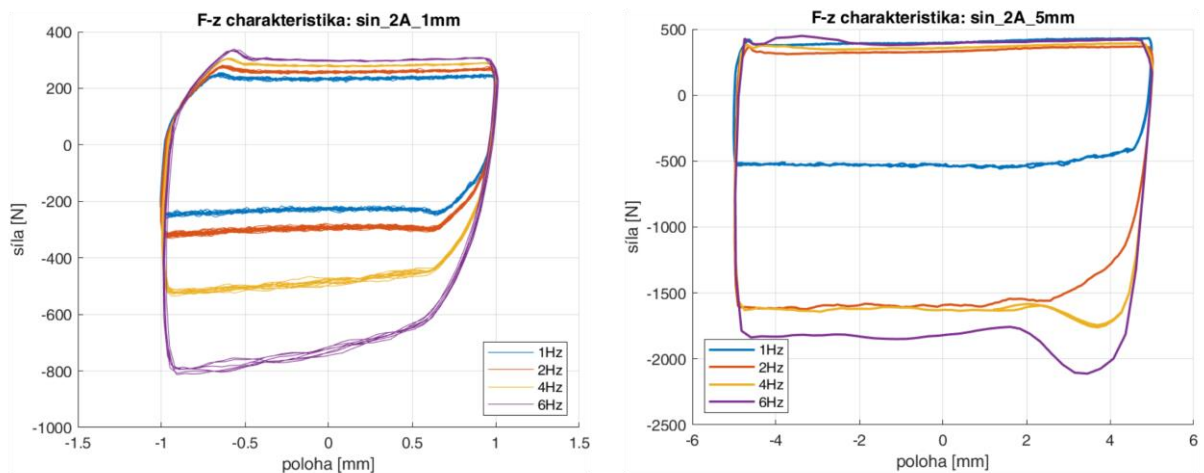
Oba grafy jsou asymetrické, tj. při odskoku je dosaženo vyšší tlumící síly. Toho bylo dosaženo záměrně užitím obtokového kanálu se zpětným ventilem. Samotný graf F-z je pak symetrický v ose x oválného tvaru bez výrazných ostrých změn. Pokles tlumící síly v podobě zářezů v grafu by mohl indikovat nedokonalé odvodušnění oleje při sestavování tlumiče, kavitaci nebo netěsnosti ucpávek. Naopak náhlý nárůst síly v podobě ostré špičky může být způsoben ohnutou pístnicí. [14] Ve čtvrtém kvadrantu F-z charakteristiky je při nízké frekvenci patrné, že nebylo okamžitě dosaženo vyšší tlumící síly. To by mohla být časová prodleva v uzavření zpětného ventilu, ale v tomto měřítku se jedná o poměrně běžný úkaz i u hydraulických tlumičů.

Na obrázku (Obr. 12-6) je vidět F-z charakteristika při trojúhelníkovém zatěžování. Zde je konstantní zrychlení a proro má graf tvar obdélníku. Je patrné, že na začátku odskoku ve čtvrtém kvadrantu dochází k mírnému rozkmitání.



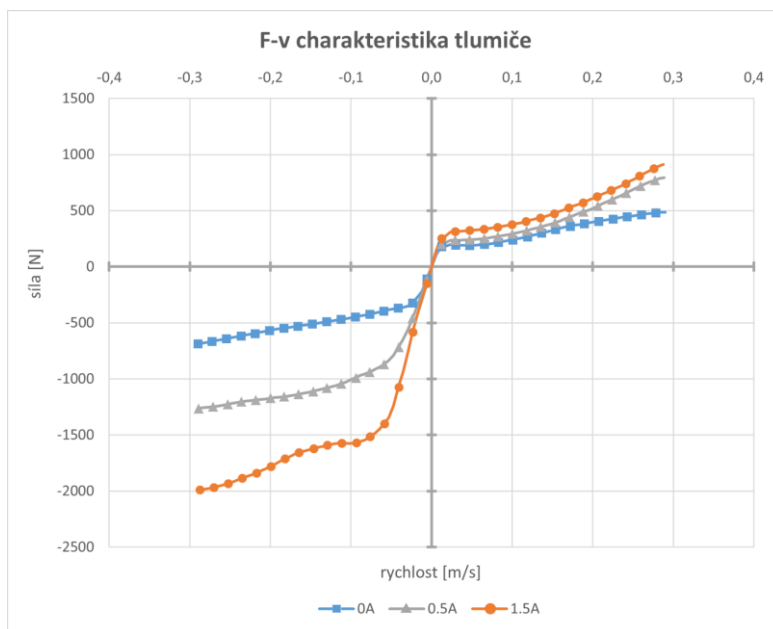
Obr. 12-6 F-z charakteristika při trojúhelníkovém zatěžování (konstantní rychlost)

Na následujícím obrázku (Obr. 12-7) je znázorněné porovnání sinusového zatěžování s výchylkou 1 a 5 mm. Tvar F-z charakteristik připomíná spíše obdélník, což je běžné právě pro nižší výchylky, protože zde převládá tlumení v podobě Coulombova tření. Ve čtvrtých kvadrantech obou grafů je opět vidět nepatrné zpoždění při uzavírání zpětného ventilu. U výchylky 5 mm je navíc patrné, že uvnitř tlumiče došlo k jemnému rozkmitání, které mohlo být způsobeno různými nepřesnostmi.



Obr. 12-7 Porovnání F-z charakteristiky pro zatěžování funkcí sinus s výchylkou 1 a 5 mm

Následující graf (Obr. 12-8) vyobrazuje F-v charakteristiku při zatěžování funkcí sweep. Hysterezní smyčka byla vykreslena jako souvislá křivka, aby se v ní dalo lépe orientovat. Tlumící síly při proudu 1 A, byly z důvodu chyby měření z grafu vyřazeny. S rostoucím proudem roste tlumící síla progresivně, což je žádoucí jev. Také je patrné, že při nízké rychlosti komprese a odskoku roste tlumící síla rychleji než při vyšších rychlostech. Tento jev je taktéž žádoucí a je blízký zjištěné optimální charakteristice pro tlumič auta. [2, s. 131]



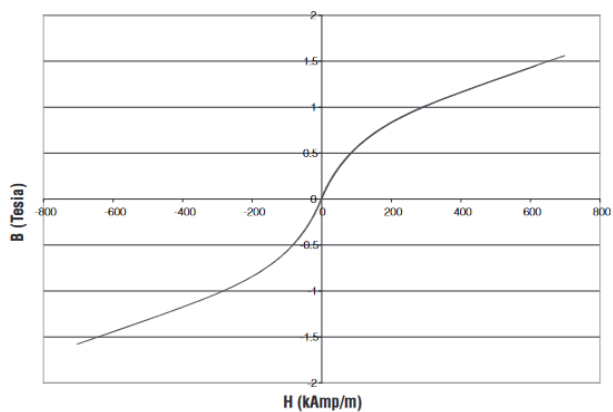
Obr. 12-8 F-v charakteristika tlumiče při zatěžování funkcí sweep

Z výsledných F-v a F-z charakteristik vyplývá, že zpětný ventil v MR kapalině vykazuje asymetrickou charakteristiku a rychle se zavírá. V grafech se zároveň neobjevují výrazné výchylky, které by značili kavitaci nebo jiné nežádoucí jevy. **Lze tedy konstatovat, že použitou konstrukci zpětného ventilu lze využívat při stavbě MR tlumičů.**

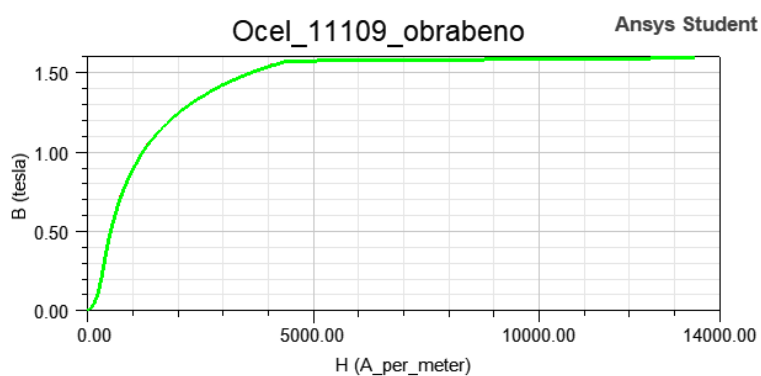
Příloha 2- Simulace magnetického obvodu

Dalším provedeným krokem byla parametrizace geometrie. To umožňuje měnit rozměry jednotlivých součástí bez potřeby opětovné definice geometrie. Díky tomu je možné pouze změnit parametry geometrie a jednoduše opakovat výpočet. Z důvodu složitosti parametrizace a samotné definice geometrie v použitém softwaru byla geometrie zjednodušena.

Jednotlivým částem bylo nutné přiřadit materiálové charakteristiky. Pro měděnou cívku, bronzová víčka a hliníkovou kostru cívky byly použity materiálové charakteristiky dostupné v knihovně programu Ansys Maxwell. MR kapalina MRF132-DG, díly magnetického obvodu z materiálu 11SMn30 a vnější hydraulická trubka mají proměnlivou permeabilitu. Z toho důvodu bylo potřeba do softwaru nahrát jejich specifické B-H křivky, které jejich permeabilitu popisují. Potřebná data mi byla poskytnuta vedoucím práce.

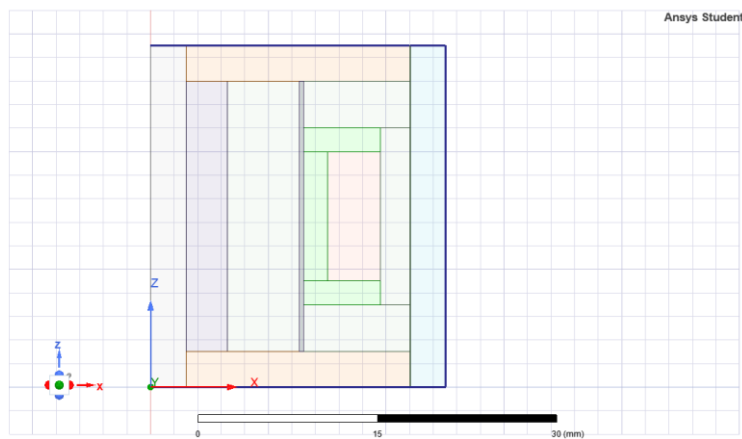


Obr. 12-9 Graf vyobrazující B-H křivku kapaliny MRF132-DG (z katalogu Lord Corporation) [21].



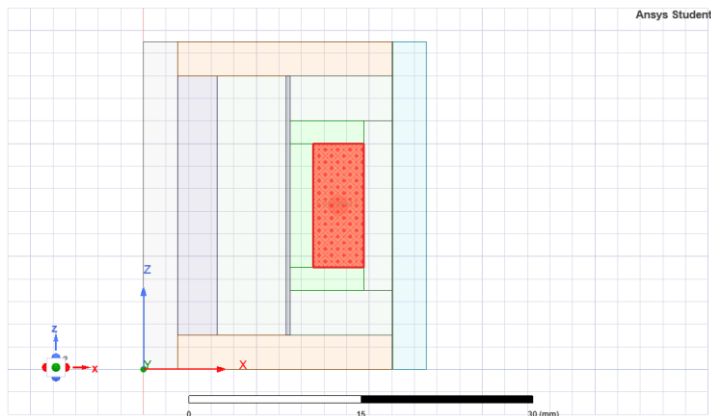
Obr. 12-10 B-H křivka oceli 11SMn30 použité v magnetickém obvodu.

Aby bylo možné úlohu vyřešit, je potřeba zadat, okrajové podmínky. To bylo provedeno pomocí funkce Baloon, Na modrých přímkách na vnější části geometrie byla zadána okrajová podmínka vakua.

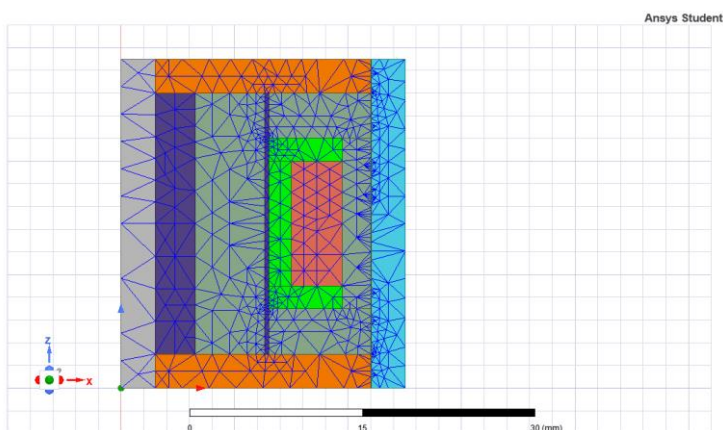


Obr. 12-11 Okrajové podmínky.

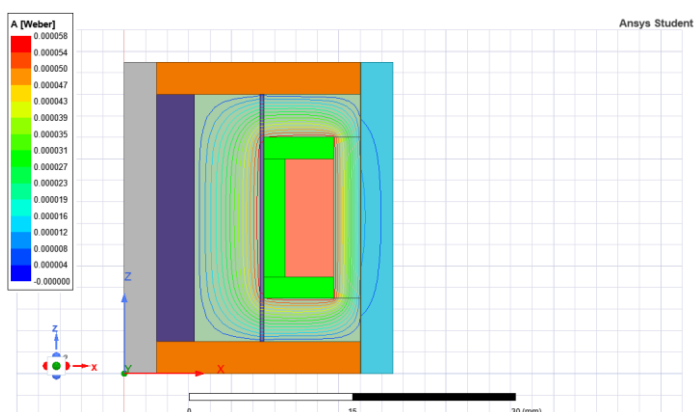
V dalším kroku bylo potřeba definovat proud na cívce. Na cívku byl použit magnetický drát o průměru 0,6 mm (s izolací celkem 0,65 mm). Maximální proud pro tento drát, z hlediska teplotního zatížení izolace a hustoty proudu je 3,5A (doporučeno vedoucím). Proud je potřeba zadat v ampéřzávitěch. Bylo tedy nutné vypočítat, kolik se do prostoru v cívce vejde závitů. Vzhledem k naší geometrii bylo zvoleno 70 závitů.



Obr. 12-12 Specifikace elektrických parametrů na cívce.



Obr. 12-13 Síť použitá pro výpočet



Obr. 12-14 Tok magnetických siločar.

Příloha 3- Kontrolní výpočet otláčení víčka

Automobilové tlumiče se běžně dimenzují na maximální rychlost pohybu pístu 0,5 m/s. Pro tuto rychlost vychází, že tlaková ztráta na vloženém ventilu bude při maximálním proudu 3,5 A za teploty 20 °C činit $P_v = 4,3$ MPa. Budeme tedy uvažovat, že tlak působící na plochu ventilu ($D_v = 40$ mm) bude muset vyrovnat reakční tlak na ploše mezikruží ventilu a pláště (P_{mez}). Mezikruží je určeno celkovým vnějším průměrem ventilu ($D_{vv} = 43,8$ mm) a malým průměrem dosedací plochy hydraulického válce ($D_{hv} = 40$ mm). Dovolená hodnota tlaku ve stykových plochách je pro bronz $P_{dov} = 22,5$ MPa.

$$P_{mez} = P_v \cdot \frac{S_v}{S_{mez}} = P_v \cdot \frac{\pi \cdot D_v^2}{4} \cdot \frac{4}{\pi \cdot (D_{vv}^2 - D_{hv}^2)}$$

$$P_{mez} = 4,3 \cdot \frac{40^2}{(43,8^2 - 40^2)} = 21,6 \text{ MPa}$$

$$P_{mez} < P_{dov}$$