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 MAGNETOREOLOGICKÉHO TLUMIČE S NESYMETRICKOU RYCHLOSTNÍ CHARAKTERISTIKOU

DESIGN OF MAGNETORHEOLOGICAL DAMPER WITH ASYMMETRIC VELOCITY CHARACTERISTIC

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE — Josef Válek

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — Ing. Michal Kubík, Ph.D.

SUPERVISOR

BRNO 2020

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav konstruování
Student:	**Josef Válek**
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	**Ing. Michal Kubík, Ph.D.**
Akademický rok:	2019/20

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 magnetoreologického tlumiče s nesymetrickou rychlostní charakteristikou

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Hydraulické tlumiče pro automotive mají většinou nesymetrickou rychlostní charakteristiku. To znamená, že při stlačení a roztažení tlumiče vykazují rozdílné tlumení, což je zajištěno různými ventily v pístu a patě tlumiče. Tato vlastnost je zásadní pro stabilitu jízdy a pohodlí pasažérů. U magnetoreologického tlumiče je jeden magnetoreologický ventil umístěný v pístu, který vytváří tlumící efekt stejný pro stlačení a roztažení tlumiče. Cílem této práce nalézt nejvhodnější metodu, která umožní vytvoření nesymetrické rychlostní charakteristiky u MR tlumiče a posléze ji převést do konstrukčního řešení.

Typ práce: vývojová – konstrukční

Cíle bakalářské práce:

Hlavním cílem práce je konstrukce magnetoreologického tlumiče s nesymetrickou rychlostní charakteristikou.
Dílčí cíle bakalářské práce:
– rešerše možností vytvoření nesymetrické rychlostní charakteristiky v magnetoreologickém tlumiči,
– návrh koncepčních variant založených na různých metodách (magnetické, mechanické či hydraulické),
– konstrukční řešení pístové skupiny.

Požadované výstupy: průvodní zpráva, výkresy součástí, výkres sestavení, 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://ustavkonstruovani.cz/texty/bakalarske–studium–ukonceni/

Seznam doporučené literatury:

GOLDASZ, Janusz a Bogdan SAPINSKI. Insight into magnetorheological shock absorbers. 2014, New York: Springer. ISBN 978-3-319-13232-7.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

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

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

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se snaží nalézt optimální řešení magnetoreologického tlumiče s nesymetrickou rychlostní charakteristikou. Magnetoreologické tlumiče představují nadějný směr vývoje tlumičů vibrací, zejména díky své nastavitelné tlumivosti, závislé na velikosti elektrického proudu.

Nesymetrická rychlostní charakteristika znamená rozdílné chování při stlačování a roztahování tlumiče, čehož lze dosáhnout ventily. Ventily mohou být mechanické, hydraulické, magnetické a elektrické. V této bakalářské práci jsou zhodnoceny tyto čtyři základní způsoby, jak lze nesymetrické rychlostní charakteristiky dosáhnout a vypracována koncepční řešení jejich možné aplikace. Zároveň je podrobně rozpracována a realizována varianta považována nejvýhodnější. Vybráno bylo mechanické řešení s destičkou, jehož funkčnost je ověřena výpočtem a experimentem. Experimenty prokázaly použitelnost mechanického ventilu v magnetoreologických systémech.

KLÍČOVÁ SLOVA

Magnetoreologický tlumič, nesymetrická rychlostní charakteristika, konstrukce magnetoreologického tlumiče

ABSTRACT

This thesis aims to find optimal solution for magnetorheological damper with asymmetric force-velocity behaviour. Magnetorheological dampers represent a promising direction in the development of vibration dampers, mainly due to their adjustable damping, that depends on electric current.

The asymmetric force-velocity behaviour (characteristic) then means difference while compressing or expanding damper and can be achieved by valves. Valves can be solved in mechanical, hydraulic, magnetic, electric way. This bachelor´s thesis evaluates these four ways of solution and develops conceptual solutions for their possible application. One conceptual solution is then elaborated in detail. Chosen mechanical solution with movable plate was verified by calculations and experiment. Experiments confirmed the applicability of a mechanical valve in magnetorheological systems.

KEYWORDS

Magnetorheological damper, asymmetric force-velocity characteristic, design of magnetorheological damper

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

VÁLEK, Josef. *Konstrukce magnetoreologického tlumiče s nesymetrickou rychlostní charakteristikou.* Brno, 2020. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí práce Ing. Michal Kubík, Ph.D.

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval v první řadě vedoucímu této bakalářské práce, panu Ing. Michalovi Kubíkovi, Ph.D., za jeho odborný dozor a vedení. Dále své rodině za podporu při studiu, a všem pedagogům, které jsem během svého bakalářského studia na VUT FSI potkal.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že diplomovou 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	Magnetoreologické tlumiče	14
2.1.1	Rychlostní charakteristika MR tlumiče	16
2.2	Nesymetrická rychlostní charakteristika	17
2.2.1	Mechanické řešení	18
2.2.2	Magnetické řešení	23
2.2.3	Hydraulické řešení	24
2.2.4	Elektrické řešení	27
3	**ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE**	**28**
3.1	Analýza problému	28
3.2	Cíl práce	28
4	**KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ**	**30**
4.1	Současná konstrukce MR tlumiče	30
4.2	Koncepční řešení pístové skupiny	30
4.2.1	Varianta A	31
4.2.2	Varianta B	32
4.2.3	Varianta C	32
5	**KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ**	**34**
5.1	Popis konstrukce	34
5.2	Funkce a rychlostní charakteristika vybraného řešení	35
5.3	Hydraulický návrh	38
5.3.1	Výpočet průtokových ploch	38
5.3.2	Výpočet rychlostí proudění	39
5.3.3	Výpočet tlakové ztráty	40
5.3.4	Strukturální návrh	41
5.3.5	F/v charakteristika konstrukčního řešení	42
5.4	Výroba komponent	44
5.5	Experimentální ověření	45
5.5.1	Metodika měření	45
5.5.2	Výsledky experimentu	46

6 DISKUZE 48

7 ZÁVĚR 49

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ 50

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN 51

10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ 53

11 SEZNAM TABULEK 55

12 SEZNAM PŘÍLOH 56

1 ÚVOD

Tlumiče lze považovat za jednu z nejdůležitějších komponent nejen vozidel, ale obecně strojů. Tlumení vibrací a rázů u strojů zaručí tišší a bezpečnější chod. U vozidel ideální tlumič utlumí vibrace a rázy vzniklé např. nerovností vozovky, čímž může zvýšit komfort cestujících, nebo zlepšit styk kola s povrchem a tím pádem i bezpečnost. Jenom v evropském automobilovém průmyslu se ročně odhadem vyprodukuje 50–100 milionů kusů [1].

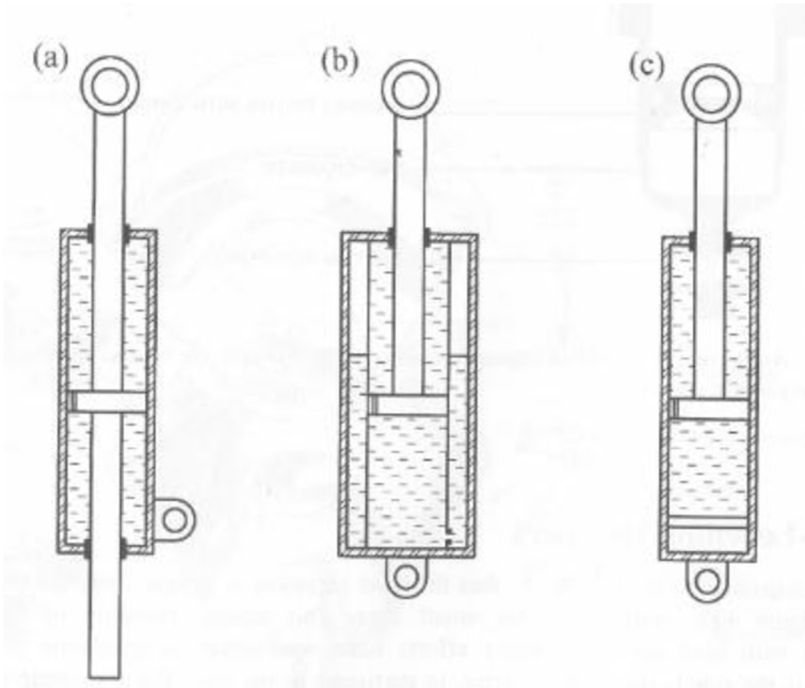
Tlumiče jsou velmi úzce spjaty s automobilovým průmyslem, tudíž svůj největší vývoj zažívají až na počátku 20. století. Od té doby vzniklo mnoho konstrukčních řešení fungujících na různých fyzikálních principech, a zároveň se změnily požadavky na jejich chování. Listové třecí pružiny místo tlumičů na počátku sice poskytovali dostatečné tlumení, ovšem pro použití na dnešních vozidlech a při vyšších rychlostech nestačí. Proto s postupem času vznikly tlumiče hydraulické. Ovšem až do 80. let minulého století bylo tlumení tlumičů dáno již při výrobě, a proto nenastavitelné tlumiče nazýváme pasivními. Se zvyšujícími se požadavky na komfort a lepší ovladatelnost se objevily tzv. adaptivní tlumiče, s možností nastavitelného tlumení podle potřeby, z čehož zkrácením doby potřebné ke změně tlumení vznikly tlumiče semi-aktivní. Velmi zajímavým a nadějným směrem vývoje tlumičů jsou tlumiče magnetoreologické, jež lze zařadit do adaptivních i semi-aktivních.

Tato práce se zabývá konstrukcí magnetoreologického tlumiče, který vykazuje rozdílné chování při jeho stlačování a roztahování. Této tzv. nesymetrické rychlostní charakteristiky je zde dosaženo pomocí konstrukčních úprav umožňujících různé proudění kapaliny v závislosti na pohybu tlumiče.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

Tlumiče jsou obecně zařízení sloužící k disipaci energie z dynamického systému, tedy k tlumení vibrací a rázu. Jejich dělení je možné v několika ohledech, např. podle fyzikální podstaty fungování se dělí na třecí, hydraulické a elektroreologické (magnetoreologické), nebo podle způsobu kompenzace pístnice na tlumiče s průchozí pístnicí (obr. 2-1, a)), dvouplášťové (b) a jednoplášťové (c). Zároveň je možné tlumiče rozdělit podle způsobu řízení na

- **pasivní**, jejichž tlumení je ovlivněno pouze pístovou rychlostí (je dáno konstrukcí),
- **adaptivní**, jejichž tlumení lze nastavit podle požadavku
- **semiaktivní**, jejichž tlumení je možné měnit velice rychle (jednotky milisekund)



obr. 2-1 Způsoby kompenzace objemu pístnice v tlumiči [1]

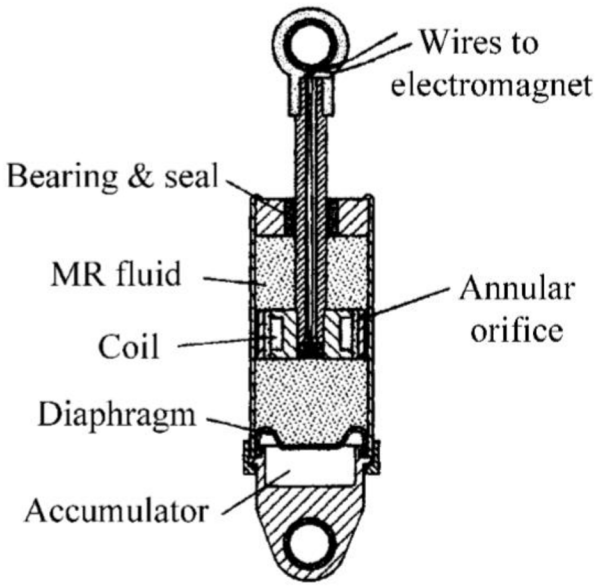
Velmi rozšířené jsou tlumiče hydraulické, které používají jako pracovní medium tlumičový olej (popřípadě jiné kapaliny). Speciálním případem jsou tzv. magnetoreologické tlumiče, které mají výhodu v možném nastavení tlumící charakteristiky tlumiče za provozu.

2.1 Magnetoreologické tlumiče

Magnetoreologické (dále jen MR) tlumiče jsou oproti dvouplášťovým hydraulickým tlumičům konstrukčně jednodušší. MR tlumiče mají schopnost přizpůsobit tlumení v krátkém časovém úseku (více v kapitole 2.1.1).

MR tlumič má základní části shodné s hydraulickým jednoplášťovým tlumičem. Skládá se z těla tlumiče, pístové skupiny a plovoucího pístu (obr. 2-2). V pístu na pístnici jsou průtokové kanálky umožňující proudění tlumícího média – kapaliny. MR tlumiče se ovšem zásadně liší ve stavbě pístu a složení kapaliny.

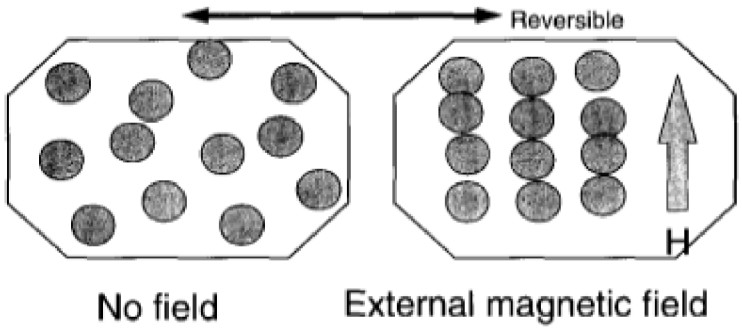
Píst tlumiče se skládá z elektromagnetické cívky, umístěné podél štěrbin a magnetického obvodu. K této cívce je zároveň potřeba dovést kabeláž pro vedení elektrického proudu, která je většinou k pístu vedena dutou pístnicí. Geometrie pístu může být dále upravena podle potřebné F/v charakteristiky (viz. kap. 2.2)



obr. 2-2 Hlavní části MR tlumiče[2]

Pravděpodobně nejdůležitější pro funkci MR tlumiče je magnetoreologická kapalina. Jedná se o tzv. chytrou kapalinu, která je složena z oleje a drobných částic čistého železa. Tyto částice v MR kapalině pro použití v tlumičích mají rozměry v řádech mikrometrů. MR kapalina vykazuje v magnetickém poli rapidní nárůst zdánlivé viskozity, který je dán zřetězením částic železa ve směru magnetického pole. Změna viskozity způsobí nárůst hydraulického odporu v pístu a následně tlumící síly. Chování částic železa v magnetickém poli je patrné na obr. 2-3. Jak již napovídá název, MR tlumiče využívají magnetoreologického efektu.

Síla soudržnosti částic tedy závisí hlavně na dodávaném proudu do cívky a počtu závitů cívky (velikosti magnetického pole). Vliv proudu je dobře patrný na F/v charakteristice tlumiče (viz. obr. 2-4).



obr. 2-3 Chování částic železa ve vnějším magnetickém poli[3]

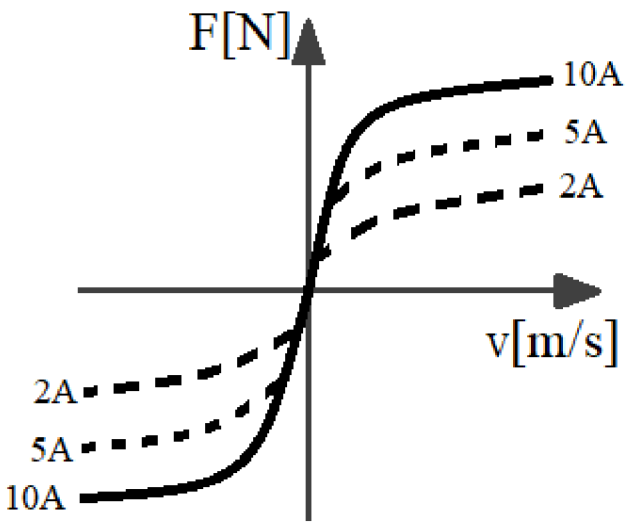
Další část, kterou ovšem MR tlumič nemusí obsahovat je plovoucí píst ve spodní části tlumiče rozdělující tělo na horní část s MR kapalinou a dolní s plynem, který svojí polohou kompenzuje objem pístnice uvnitř těla tlumiče. Objem pístnice v těle se mění podle stlačení tlumiče. Pokud je tlumič roztažený, je pístnice z velké části vně a kompenzace není potřeba, tj. plovoucí píst je ve své horní poloze. Pokud je tlumič stlačený, je pístnice uvnitř a plovoucí píst je natlačen do dolní polohy, přičemž stlačí plyn. Pokud tlumič neobsahuje plovoucí píst, je potřeba kompenzovat objem pístnice jiným způsobem (obr. 2-1).

2.1.1 Rychlostní charakteristika MR tlumiče

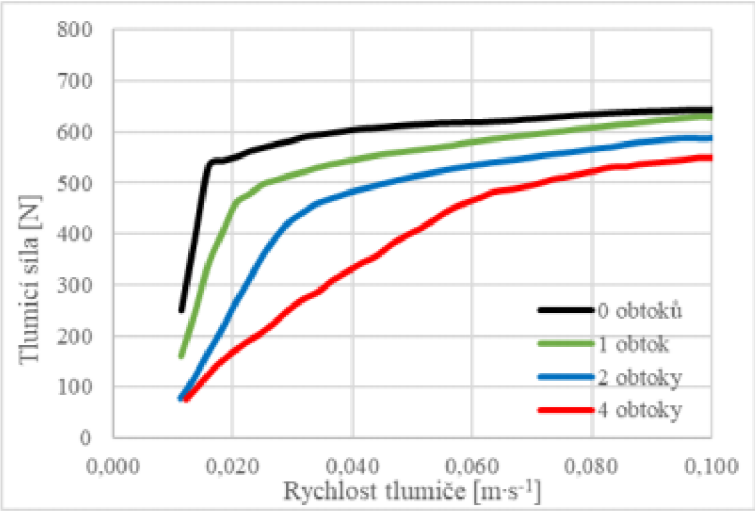
Důležitou vlastností pro popis fungování MR tlumiče je závislost síly na rychlosti pohybu pístu, dále pouze jako F/v charakteristika.

Základní průběh je zobrazen na obrázku obr. 2-4. Obrázek také ukazuje, jak tlumení závisí na dodávaném elektrickém proudu do cívek. Pro větší proud dostáváme menší rychlosti při stejné síle, tedy větší tlumení. Velmi důležitý parametr je také rozměr a počet kanálků (obtoků) v pístu. Tato závislost je zobrazena na obr. 2-5, z něhož je patrné, že obtoky ovlivňují úvodní sklon F/v charakteristiky.

F/v charakteristika MR tlumiče bývá symetrická, tj. stejný průběh pro roztahování a stlačování. Pro některé aplikace je ovšem žádoucí charakteristika nesymetrická.



obr. 2-4 Základní průběh F/v charakteristiky



obr. 2-5 Závislost F/v charakteristiky na počtu obtoků [4]

2.2 Nesymetrická rychlostní charakteristika

Často požadovaná vlastnost MR tlumičů hlavně v automobilovém průmyslu je tzv. nesymetrická rychlostní charakteristika. Jedná se o rozdílné chování při stlačování a roztahování tlumiče. MR tlumič bez ventilů a ostatních řešení zmíněných v této kapitole nesymetrickou rychlostní charakteristiku nemá.

Řešení mohou využívat mechanických částí, hydraulických, magnetických jevů, anebo elektrického řízení. Toto rozdělení není přesně definované a konstrukční řešení může často spadat do více kategorií. V následující části budou podrobněji probrání jednotlivé konstrukce.

V případě nákresu funkce značí červená šipka vždy tok MR kapaliny, a pokud není v této kapitole uvedeno jinak, jsou použity obrázky ze zdroje [5].

2.2.1 Mechanické řešení

Poměrně častá řešení jsou realizována pomocí mechanických komponent. K otevření či uzavření kanálů často slouží planžety či speciální pohyblivé komponenty, které moderují výslednou F/v charakteristiku především tím, že vytvoří tzv. hydraulický zkrat (MR kapalina neproudí pouze aktivní zónou tlumiče).

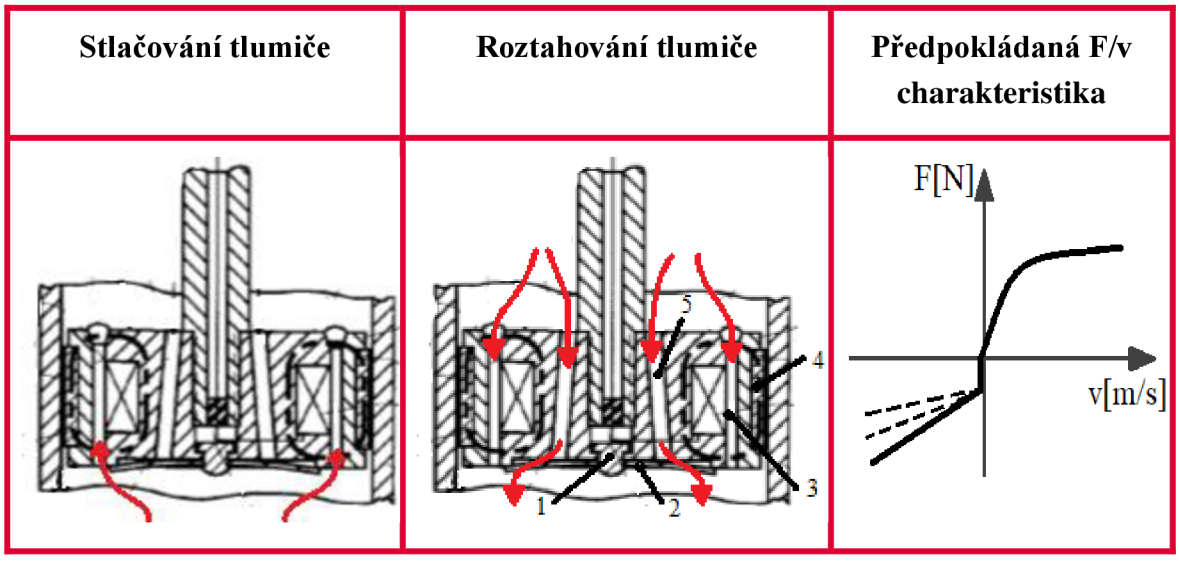
Tato řešení nemají přesně dané rozdělení, ale pro potřeby této práce byla roztříděna do následujících kategorií.

Planžetové a destičkové řešení ventilu

Jedním z mechanických řešení je řešení pomocí ohybné planžety (obr. 2-6 ,pozice 2). Ta je uchycena k pístu na spodní straně pomocí šroubu nebo čepu (obr. 2-6 , pozice 1). Planžeta zakrývá zkratové kanálky (pozice 5) umístěné blíže k ose tlumiče.

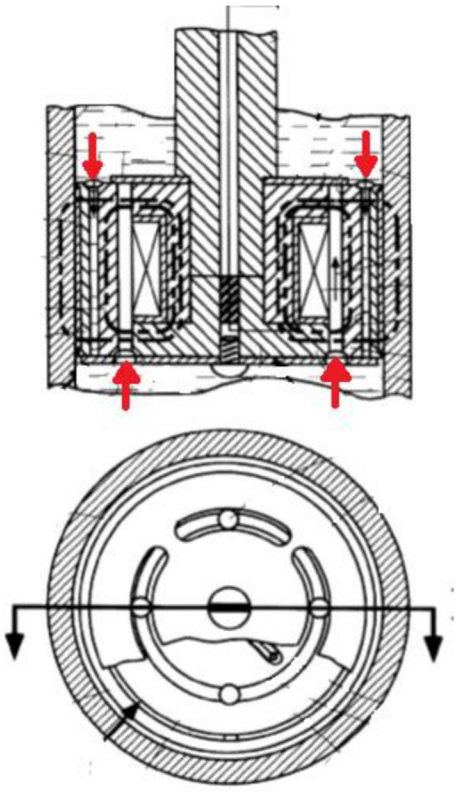
Pokud je tlumič roztahován, proudící kapalina planžetu ohýbá, tudíž jsou otevřeny všechny kanálky. Kapalina proudí i okolo cívek. V případě stlačování tlumiče je planžeta proudící kapalinou přitlačena ke spodní straně pístu, čímž dojde k uzavření zkratových kanálků. Kapalina poté proudí pouze okolo cívek, kde je ovlivněna magnetickým polem.

Jak ukazuje F/v charakteristika na obr. 2-6, v prvním kvadrantu (stlačování tlumiče) je průběh stejný jako u MR tlumiče bez zkratových kanálků. Důležitý je také odskok ve třetím kvadrantu, který je dán potřebnou silou pro odklopení planžety. Sklon křivky ve 3. kvadrantu je dán průtokem otevřenými kanálky. Přerušované čáry tedy značí průběh, pokud by měly kanálky větší průřez.



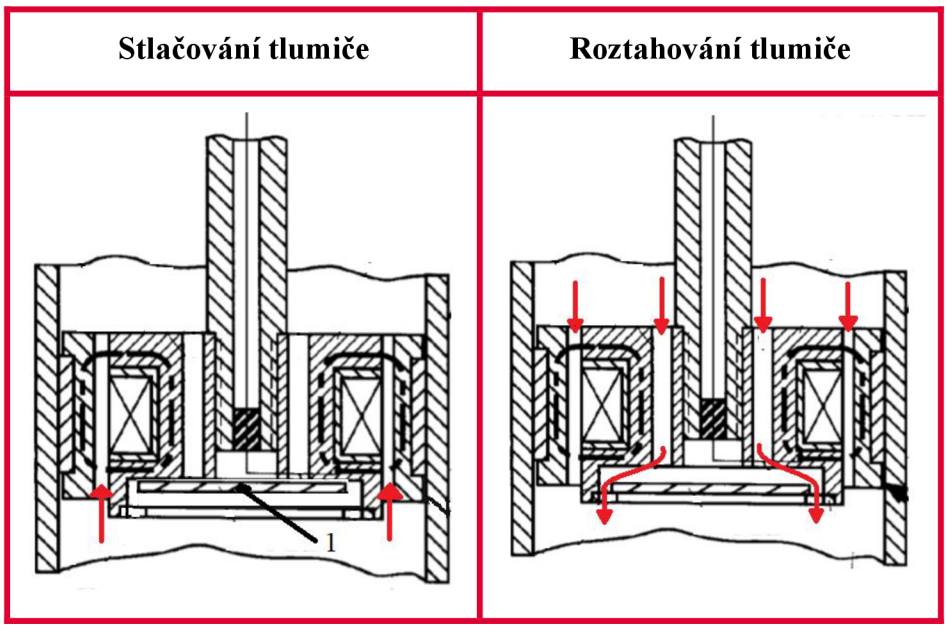
obr. 2-6 Nákres funkce MR tlumiče s planžetou a předpokládaná F/v charakteristika

Planžeta může být ovšem umístěna i na vrchní straně, poté dochází k obrácenému jevu u F/v charakteristiky, popřípadě na obou stranách, kdy zakrývá vždy jednu řadu kanálku s různými průměry (obr. 2-7).



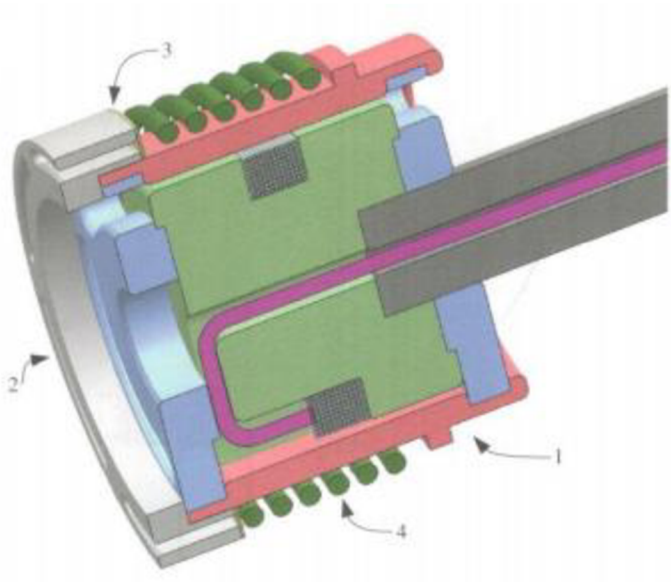
obr. 2-7 Konstrukce se dvěma planžetami

Obdobné je i řešení pomocí destičky (obr. 2-8, pozice 1). Ta se neohýbá, ale má vymezené 2 polohy. V jedné je přitlačená na vtoky zkratových kanálků a tím je uzavírá, v druhé poloze může kapalina destičku obtékat. Destičku je opět možné umístit do spodní i horní části pístu, podle požadované F/v charakteristiky.



obr. 2-8 MR tlumič využívající destičkovou klapku

Složitější konstrukce využívající destičku, ale s polohováním pružinou je na obr. 2-9. Tento obrázek zobrazuje pouze píst, nikoliv tělo tlumiče. Destička (obr. 2-9, pozice 3) je přitlačována pružinou (obr. 2-9, pozice 4) do pozice, kde uzavírá vtokové kanálky. Při stlačování tlumiče musí kapalina nejprve přetlačit pružinu s destičkou, a až poté může kapalina obtékat i těmito bočními kanálky (pozice 2). Na pozici 1 opět kapalina vytéká. Pokud je tlumič roztahován proudí kapalina pouze otvory podél cívek.

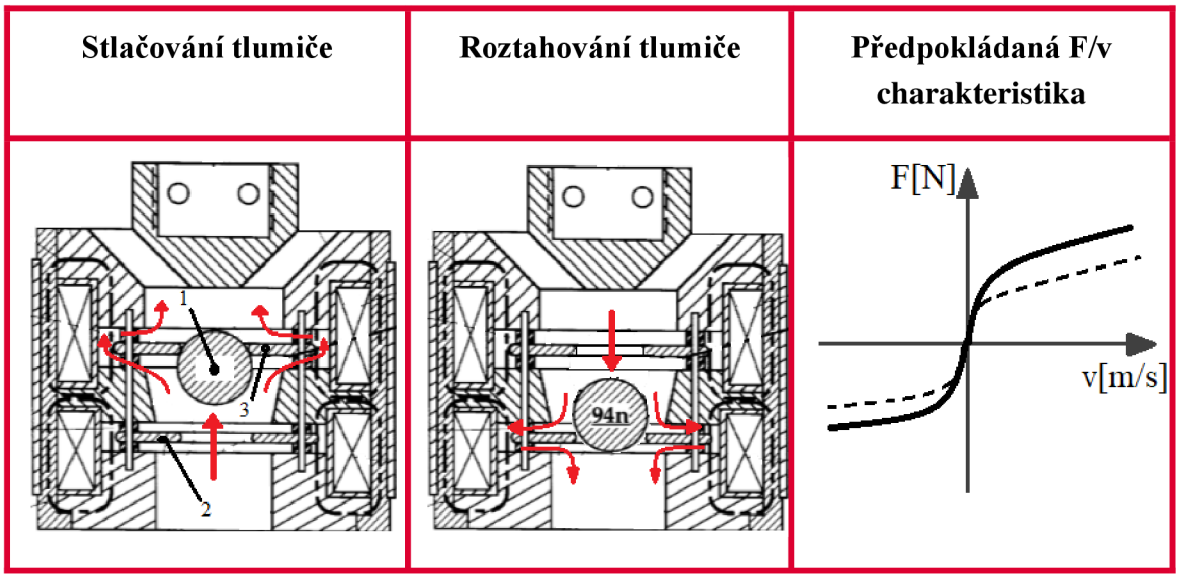


obr. 2-9 Píst s destičkou a pružinou [6]

Řešení pomocí kuličkového ventilu

Další řešení využívá tzv. kuličkové klapky. Ta spočívá v pohybující se kuličce (obr. 2-10, pozice 1), která má dvě vymezené polohy. Tyto polohy jsou určeny deskami (obr. 2-10, pozice 2 a 3), které umožňují průtok kapaliny otvorem uprostřed, ale kulička těmito otvory neprojde. V těchto polohách kulička vždy uzavírá průtok prostřední částí pístu, takže kapalina musí téci okolo cívek. V tomto případě je tedy za potřebí vždy dvojice cívek místo jedné a každá z nich může být napájena jiným proudem.

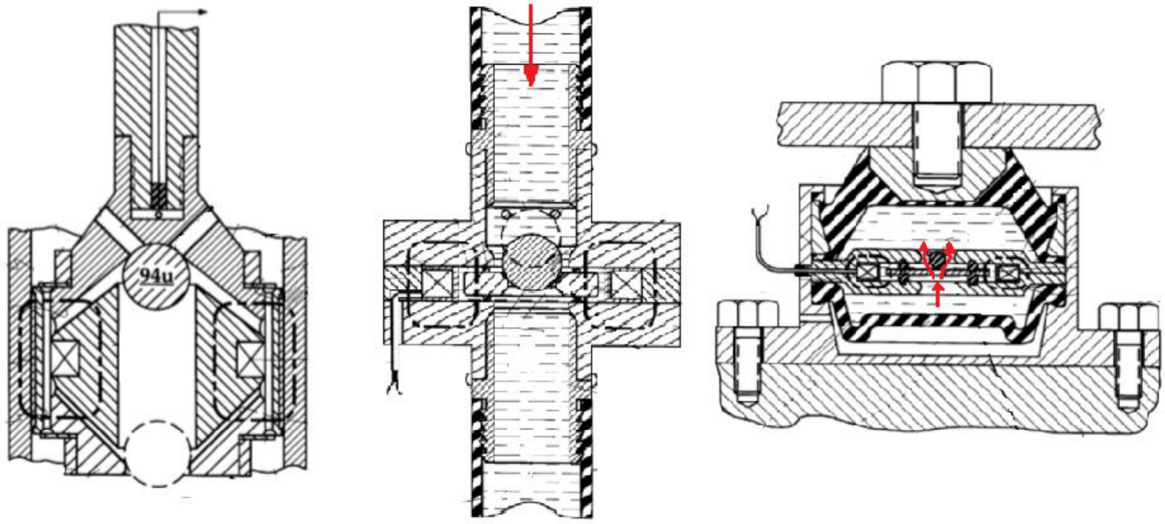
Jelikož jsou rozdílné šířky mezer u horních a dolních cívek, bude zde kapalina proudit jinou rychlostí a dochází tedy k rozdílnému magnetoreologickému efektu, jak je vidět na F/v charakteristice obr. 2-10. Při obtékání horní cívky (stlačování tlumiče) dochází k většímu tlumení. Čárkovaná čára naznačuje průběh pro nižší hodnoty proudu.



obr. 2-10 MR tlumič s kuličkovou klapkou

Kuličková klapka se dá využít v různých konstrukcích tlumiče, jak je ukázáno na obr. 2-11, kde je princip přemisťování kuličky stejný.

Důležité je si i povšimnout, že řešení v levé části obr. 2-11 by se dalo, díky rozdílným šířkám kanálků nahoře a dole, považovat za hydraulické řešení. Stejně tak využívá planžetu k oboustrannému uzavření přímých kanálků kolem aktivní zóny tlumiče.

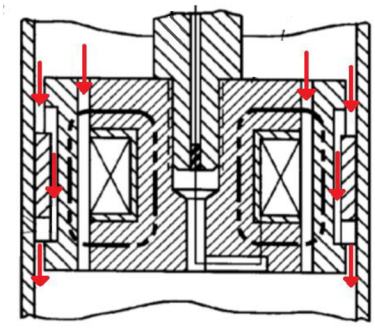
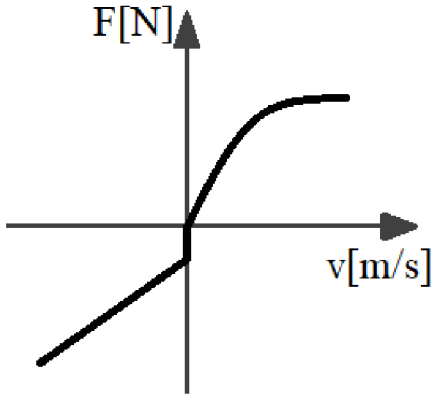


obr. 2-11 Další konstrukční využití kuličkové klapky

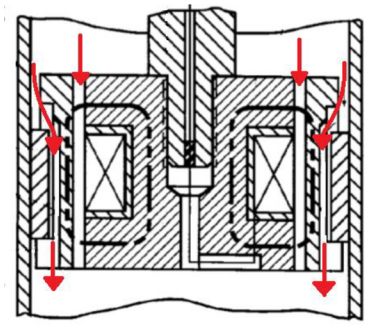
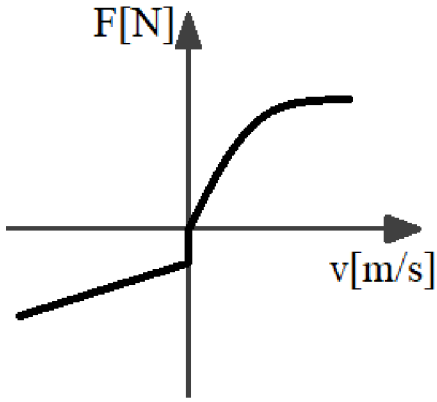
Řešení pomocí tvarově složitějších klapek

Tato řešení používají klapek různých tvarů, a mohou být i různě uchyceny. Ať už na pružině (obr. 2-14), nebo v případě prstencových ventilů nemusí být uchyceny vůbec, pouze mají definovanou trajektorii např. výřezem.

Důležitým parametrem těchto řešení je průřez otevřeného kanálku, který umožňuje zkrat a proudění kapaliny. Na obr. 2-12 a obr. 2-13 je na příslušných charakteristikách vidět vliv šířky otevřeného zkratového kanálku. Na obr. 2-12 proudí kapalina při rozpínání plochou, která je omezena potřebnou dosedací plochou klapky, zatímco na obr. 2-13 může kapalina proudit větší plochou, tudíž má větší průtok a křivka ve 3. kvadrantu větší sklon.

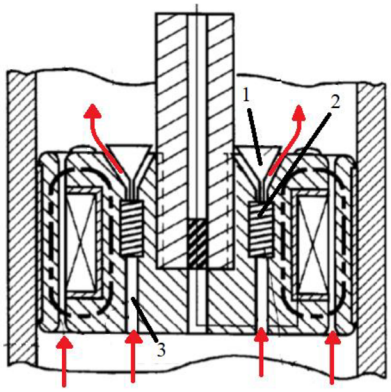
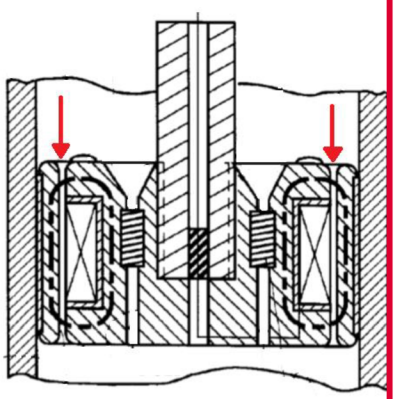
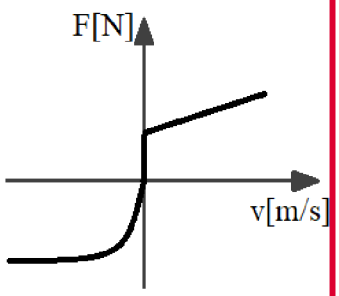
Rozpínání tlumiče	**Předpokládaná F/v charakteristika**
	

obr. 2-12 MR tlumič s prstencovým ventilem a menším průtokem

Rozpínání tlumiče	Předpokládaná F/v charakteristika
	

obr. 2-13 MR tlumič s prstencovým ventilem s větším průtokem

Neméně důležité je také u řešení s pružinou tuhost této pružiny (obr. 2-14, pozice 2), která ovlivňuje odskok od bodu [0,0] ve směru osy F. Tuhost určuje potřebnou sílu, aby došlo k hydraulickému zkratu aktivní zóny. Na pozici 1 obr. 2-14 nalezneme klapku uchycenou na výše zmíněné pružině, a pozice 3 označuje uzavíratelný zkratový kanálek.

Stlačování tlumiče	Roztahování tlumiče	Předpokládaná F/v charakteristika
		

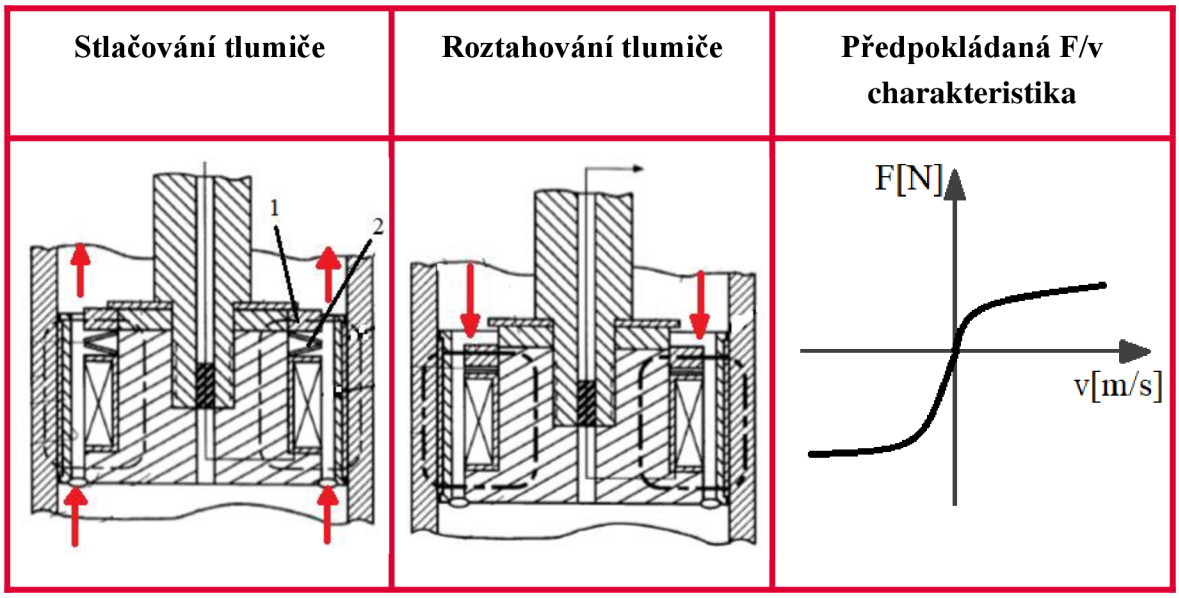
obr. 2-14 MR tlumič s klapkou na pružině

2.2.2 Magnetické řešení

Magnetická řešení využívají různých magnetických vlastností materiálů. Takové řešení je např. na obr. 2-15, kde je použita kostička (popř. prstenec) z materiálu s lepší magnetickou vodivostí, než mají materiály v pístu.

Kostka (pozice 1) je umístěna na pružině (pozice 2). Jelikož kostka může posílit magnetické pole v aktivní zóně, je magnetické pole slabší nachází-li se kostka v horní poloze, než když je kostka v poloze dolní. Proudí-li kapalina nahoru, je pružina napnuta a kostička v horní poloze. V případě proudění kapaliny dolů je pružina stlačena, čímž je kostka přesunuta do spodní polohy.

Vliv polohy kostky na magnetické pole je názorně vidět u F/v charakteristiky obr. 2-15, kde je průběh při rozpínání podobný, jako kdybychom do cívky pouštěli větší proud.

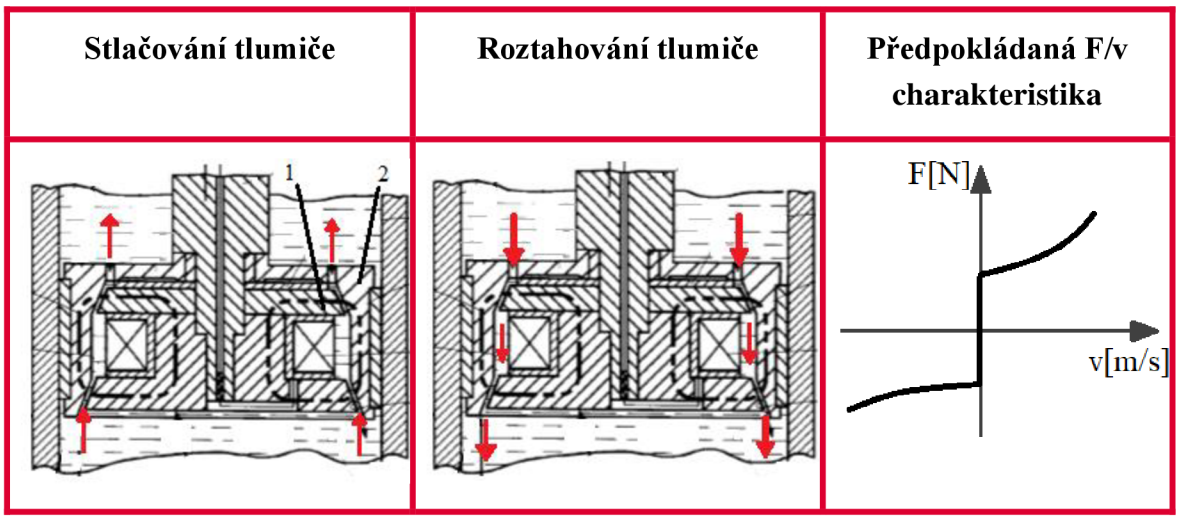


obr. 2-15 Magnetické řešení MR tlumiče

2.2.3 Hydraulické řešení

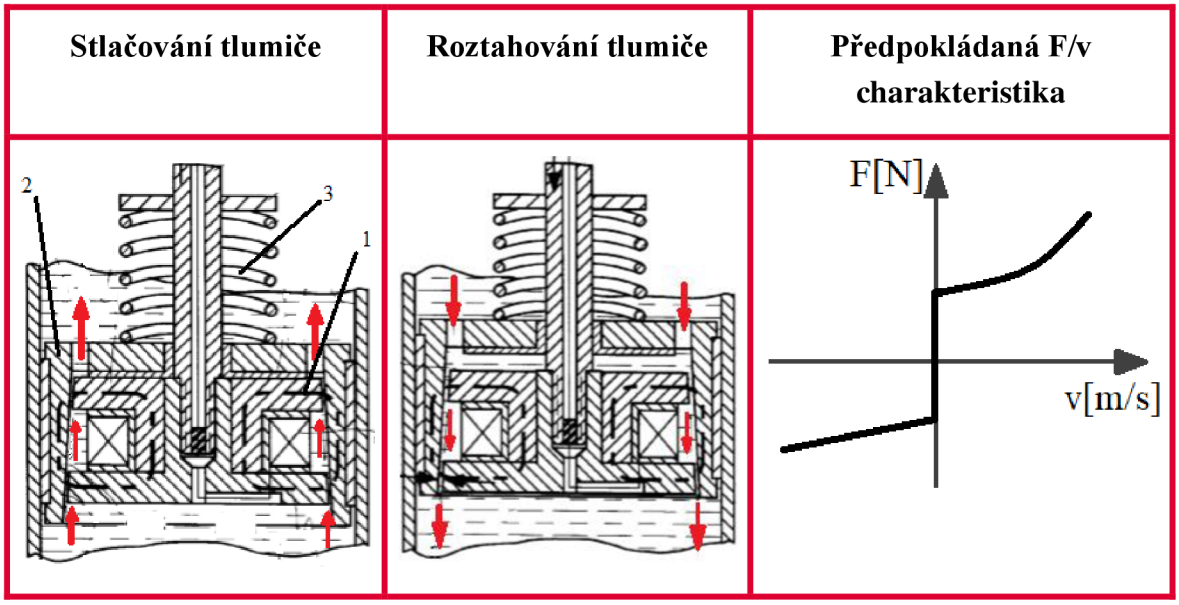
Hydraulická řešení využívají především vtokových a výtokových ztrát a různých rychlostí proudění kapaliny v různých průřezech. Ty nastávají, pokud je různě velká plocha průřezu kanálku. V menším průřezu proudí kapalina vyšší rychlostí než v kanálku s větším průřezem.

Například na obr. 2-16 můžeme vidět tlumič s pístem ze dvou částí, kde nahoře je mezi vnitřní (obr. 2-16, pozice 1) a vnější (obr. 2-16, pozice 2) částí pístu mezera větší. Poté u zešikmené stěny a ve spodní části je užší. Pro pohyb pístu dolů a nahoru vtéká vždy různé množství kapaliny do mezery, což vede k rozdílné odezvě tlumiče. Dochází tedy k vtokovým a výtokovým ztrátám a kapalina bude proudit různými rychlostmi, zejména u cívky pomaleji.



obr. 2-16 MR tlumič s vtokovými a výtokovými ztrátami

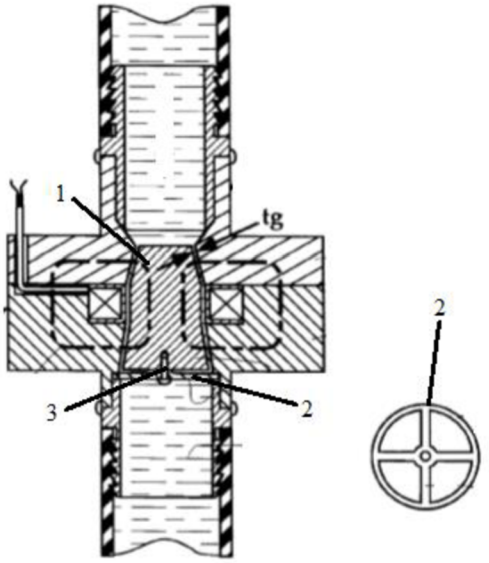
Modifikací řešení z obr. 2-16 můžeme účinnost jevů zvětšit, nebo podle potřeby pozměnit. Například přidáním pružiny (obr. 2-17, pozice 3) a vymezením vertikální volnosti vnitřní části pístu bude docházet k ještě většímu rozdílu v rozměru mezery vnitřní (obr. 2-17, pozice 1) a vnější části (obr. 2-17, pozice 2) pro stlačování a roztahování tlumiče.



obr. 2-17 Hydraulické řešení MR tlumiče s pružinou

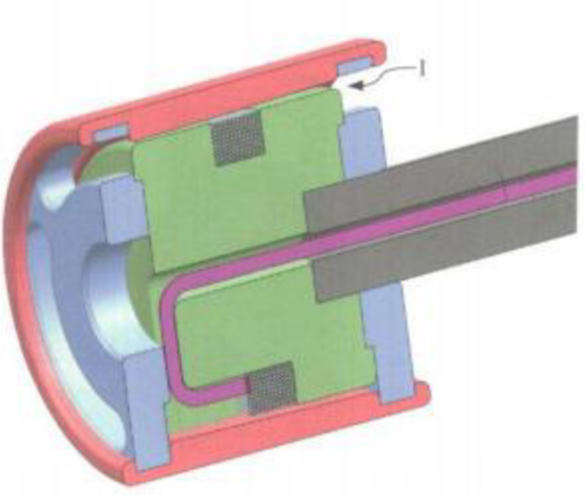
Velmi podobné řešení, ovšem již bez pružiny je zobrazeno na obr. 2-18. Klapka (obr. 2-18, pozice 1), jakožto vnitřní část tlumiče je uložena na mřížce (obr. 2-18, pozice 2) a tyto části jsou spojeny pomocí čepu (obr. 2-18, pozice 3). Jelikož se klapka může na čepu vertikálně pohybovat, je její poloha určena směrem toku kapaliny. Kapalina proudící nahoru klapku přizvedne, a to vede k zúžení bočních mezer.

Bohužel z patentu není zcela zřejmé, jestli je mezera mezi stěnou a klapkou po celé délce stejná, tzn. jestli také využívá vtokových a výtokových ztrát. Pokud je mezera po celé délce stejná, bude rozdílná rychlost proudící kapaliny nahoru a dolů v závislosti na poloze klapky.



obr. 2-18 MR tlumič s posuvnou klapkou

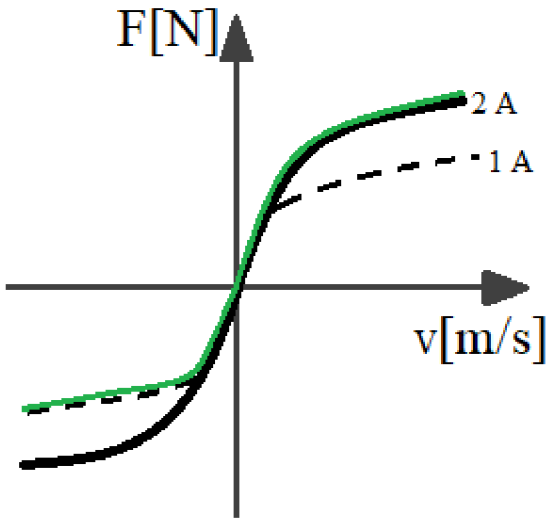
Využití hydraulických jevů je také dobře patrné u řešení na obr. 2-19, kde je na pozici 1 postupně se zužující kanálek.



obr. 2-19 Další příklad hydraulického řešení [6]

2.2.4 Elektrické řešení

Tato řešení spočívají pouze v rozdílném řízení při pohybu pístu nahoru a dolů. K tomu je zapotřebí snímač polohy pístu. Hodnota z tohoto snímače je poté vyhodnocována a po zjištění směru pohybu je zaktivován přepínač. Ten poté pouští různý proud do cívek pří stlačování a roztahování tlumiče, což se projeví na F/v charakteristice viz. obr. 2-20. Pokud plná čára značí průběh při proudu 2 A a čárkovaná pro 1 A, pak po zapojení přepínače by bylo možné získat zelenou křivku. Více informací o vlivu proudu na F/v charakteristiku je v kap. 2.1.1.



obr. 2-20 F/v charakteristika el. řešení

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

3.1 Analýza problému

Jelikož se v této práci snažíme nalézt řešení magnetoreologického tlumiče s nesymetrickou rychlostní charakteristikou, je potřeba přihlížet k řešení tohoto problému z více hledisek. Optimální řešení musí být zejména spolehlivé, lehce modifikovatelné pro různá použití, a také by nemělo být zbytečně konstrukčně složité, což by se mohlo podepsat především na ekonomické stránce výroby.

Přestože mechanická řešení lze považovat za spolehlivá, pravděpodobně levná a lehce modifikovatelná, jejich velikou nevýhodou je možnost hlučnosti chodu při dosedání mechanických komponent, prodlevě vznikající během pohybu komponent a životnosti. V případě řešení s kuličkou je nutné počítat i s rizikem nepřesného dosednutí do krajních poloh. Tyto nevýhody ovšem postrádá řešení s planžetou, jehož hlavní nevýhodou je komplikovaný výpočet a omezený průtok při hydraulickém zkratu.

Hydraulická řešení mají hlavní výhodu oproti mechanickému řešení v tichosti chodu, ale nevýhodná je potřeba přesnosti rozměrů pro správnou funkci a s tím související vyšší cena výroby.

Potřebu přesných rozměrů eliminuje řešení magnetické, které má jinou problematickou část, a to možnost modifikace F/v charakteristiky pouze změnou materiálu magnetické kostky (prstence).

Za velmi variabilní řešení lze považovat elektrické řešení. Přestože se může zdát jako ideální řešení při zanedbání ceny a spolehlivosti senzoru polohu pístu, narazíme na velký problém při rozhodování se o způsobu řízení. Jelikož na snímači polohy bude pravděpodobně docházet k jistému šumu, je potřeba nastavit „citlivost“ přepínače a odfiltrování šumu, tedy určit, při jaké změně směru pohybu musí dojít k přepnutí proudu. Tím dochází ke vzniku nežádoucí prodlevy funkce.

3.2 Cíl práce

Hlavním cílem práce je úprava stávající konstrukce magnetoreologického tlumiče vyvinutého na VUT FSI, aby bylo dosaženo nesymetrické rychlostní charakteristiky, a to s minimem změn na stávajících součástech, popř. minimální potřebou nahrazení dílů za konstrukčně jiné, s čímž souvisí minimální náklady na výrobu/úpravu.

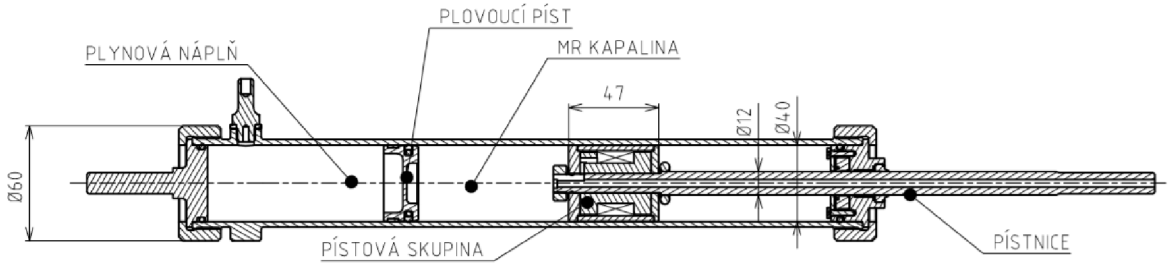
Toho je docíleno následujícím postupem:

- rešerše a zhodnocení možností vytvoření nesymetrické rychlostní charakteristiky v magnetoreologickém tlumiči,
- návrh koncepčních variant, které je možné použít na stávající konstrukci, založených na různých metodách (magnetické, mechanické či hydraulické),
- konkrétní konstrukční řešení pístové skupiny.

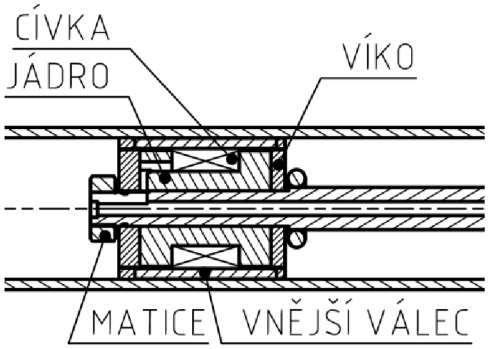
4 KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ

4.1 Současná konstrukce MR tlumiče

Současná konstrukce MR tlumiče navrhnutého na Ústavu konstruování je zobrazena na obr. 4-1. Tento tlumič vykazuje symetrickou rychlostní charakteristiku, a bude použit jako rozměrová předloha tlumiče s nesymetrickou rychlostní charakteristikou. Pístová skupina se zde skládá z vnitřního válce (jádra), do něhož je usazena cívka, vnějšího válce a dvou vík na začátku a konci pístové skupiny. Aktivní zóna tlumiče (průtokový kanálek MR kapaliny) je mezi vnějším válcem a jádrem. Pístnice prochází otvory ve víkách a vnitřním válci, přičemž na jednom konci je její poloha ustavena maticí a na druhém osazením.



obr. 4-1 Současná konstrukce MR tlumiče



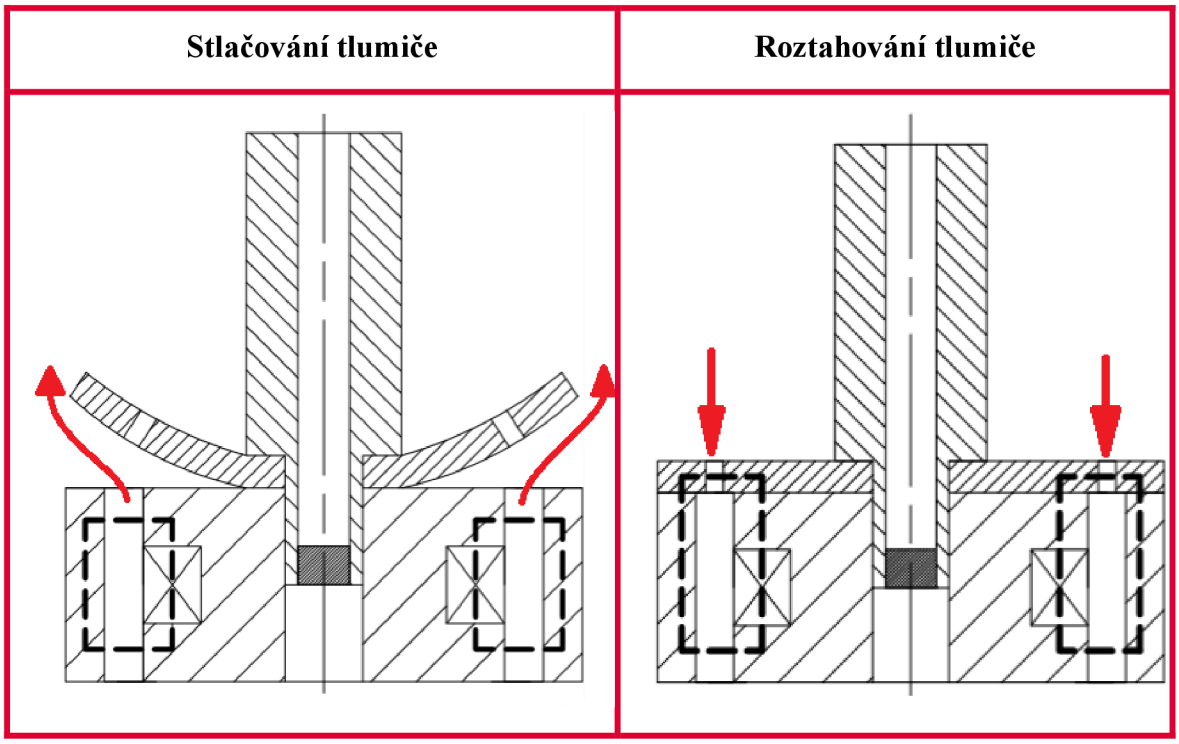
obr. 4-2 Detail současné pístové skupiny

4.2 Koncepční řešení pístové skupiny

V této části jsou představeny tři vybrané návrhy na řešení zadaného problému nesymetrické rychlostní charakteristiky. **Další navržená řešení jsou obsažena v příloze 1.** Na obrázcích s náčrtem funkce při roztahování a stlačování tlumiče značí červená čára tok MR kapaliny.

4.2.1 Varianta A

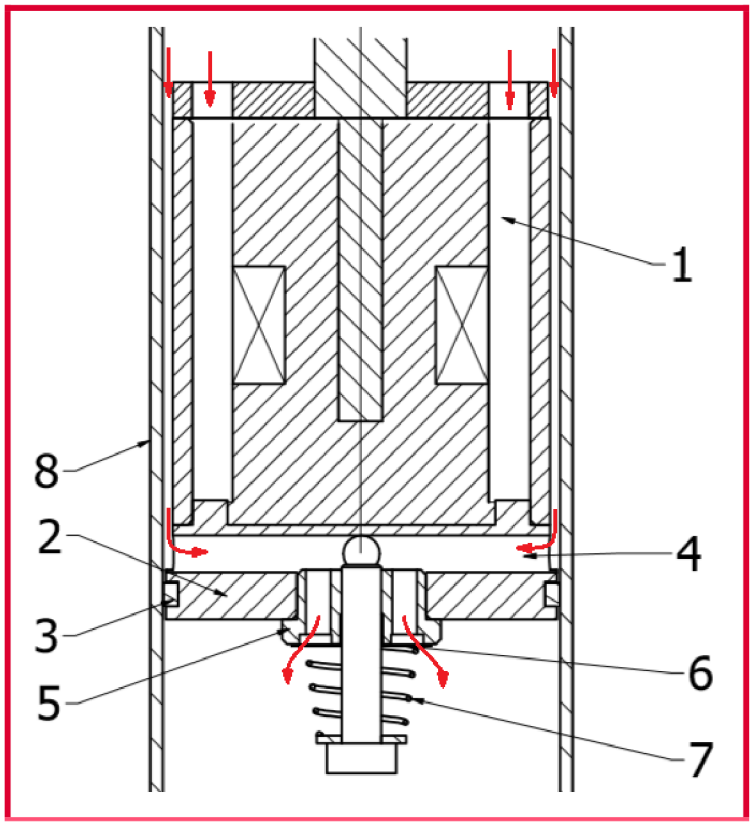
První varianta A využívá planžety z magnetického materiálu. Tím, dochází nejen k hydraulickému zkratu nadzvedáním planžety, ale zároveň se mění magnetické pole v aktivní zóně tlumiče. To je názorně vidět na obr. 4-3, kde tlustá čárkovaná čára značí magnetické pole a červená čára tok MR kapaliny. Při roztahování tlumiče prochází magnetické pole planžetou, tudíž dochází ke zvětšení aktivní zóny tlumiče (více shluků v MR kapalině, tudíž větší tlumení), zatímco při stlačování je planžeta ohnuta a magnetické pole prochází pouze pístem, čímž vzniká menší aktivní zóna.



obr. 4-3 Návrh řešení s planžetou

4.2.2 Varianta B

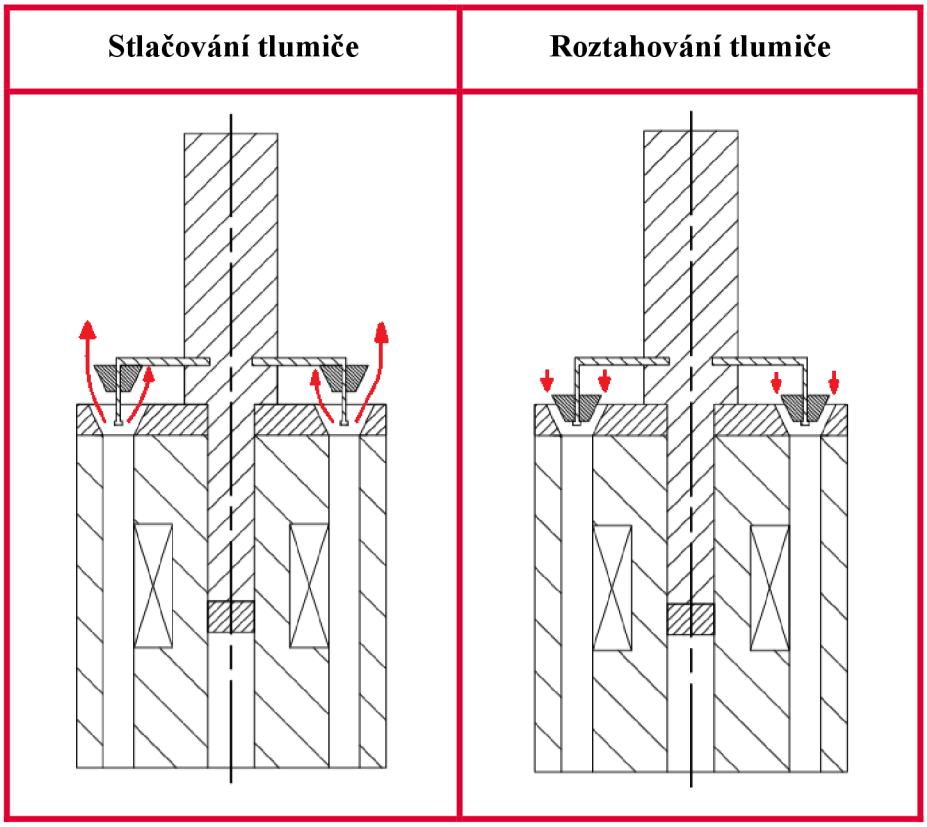
Druhé koncepční řešení je v podstatě řešení s destičkou, popř. planžetou (obr. 4-4, pozice 6), která je umístěna na pružině (7) zajišťující její polohu. Kapalina tedy v jednom směru pohybu pístu (stlačování) neprotéká zkratovými kanálky, ale pouze kanálky aktivní zóny (1), které v omezené míře pokračují i skrze spodní víko (2). Jelikož došlo ke zmenšení vnějšího průměru vnějšího válce, vznikl mezi ním a tělem tlumiče (8) prostor pro proudění kapaliny. V případě roztahování tlumiče tedy kapalina protéká podél zmíněného vnějšího průměru, a následně do spojovacích kanálků (4) umístěných ve spodním víku. Odtud poté pokračuje otvory pod planžetu, kterou nadzvedává (po stlačení pružiny) a dochází k hydraulickému zkratu.



obr. 4-4 Návrh řešení B

4.2.3 Varianta C

Navrhované řešení C lze považovat za hydraulické a mechanické řešení. Ventil je podobný jako na obr. 2-14, ovšem není zde potřeba pružiny. Ventily jsou zavěšeny na ramenech, která musí být dostatečně úzká, aby kolem mohla protékat MR kapalina, ale zároveň dostatečně tuhá. V těchto požadavcích tkví hlavní nevýhoda tohoto řešení, stejně tak jako v hlučnosti chodu podobně jako u jiných mechanických řešení.



obr. 4-5 Navrhované řešení s ventily na ramenech

5 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

Pro tuto bakalářskou práci jsem se rozhodl vybrat konstrukční řešení B. Má minimální požadavky na úpravy současného stavu tlumiče, a tudíž by se v případě výroby dala ověřit jeho funkčnost. Také je celý mechanismus pístové skupiny poměrně jednoduchý, založený na stlačování pružiny, tudíž je zde menší šance případné poruchy. Zároveň by toto řešení mělo poskytovat díky obtokovým (zkratovým) kanálkům dostatečný hydraulický zkrat k vytvoření nesymetrické rychlostní charakteristiky.

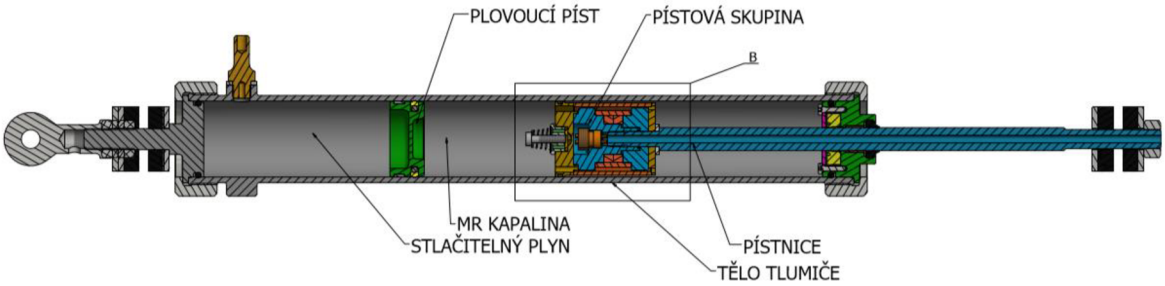
Cílem je tedy aplikovat konstrukci s destičkou do daného zástavbového prostoru se splněním požadavku na minimální tloušťku stěny 1 mm při zachování co nejlepších magnetických vlastností obvodu tlumiče.

5.1 Popis konstrukce

Vybrané konstrukční řešení spočívá v průtoku kapaliny po bocích vnějšího válce, která poté zatéká do otvorů (v radiálním směru) ve spodním víku (obr. 5-2, pozice 1) a pokračuje do dílu nazvaného ventil (6). MR kapalina poté proudí pod planžetu (5). Stlačení pružiny (4) a posunutí destičky způsobí hydraulický zkrat. Aby bylo možné vést MR kapalinu mezi vnějším válcem a tělem tlumiče, bylo zapotřebí použít vodící pásek (2) uložený v drážce na spodním víku, která vede pístovou skupinu s pístnicí a zároveň způsobuje, že MR kapalina vtéká pod planžetu.

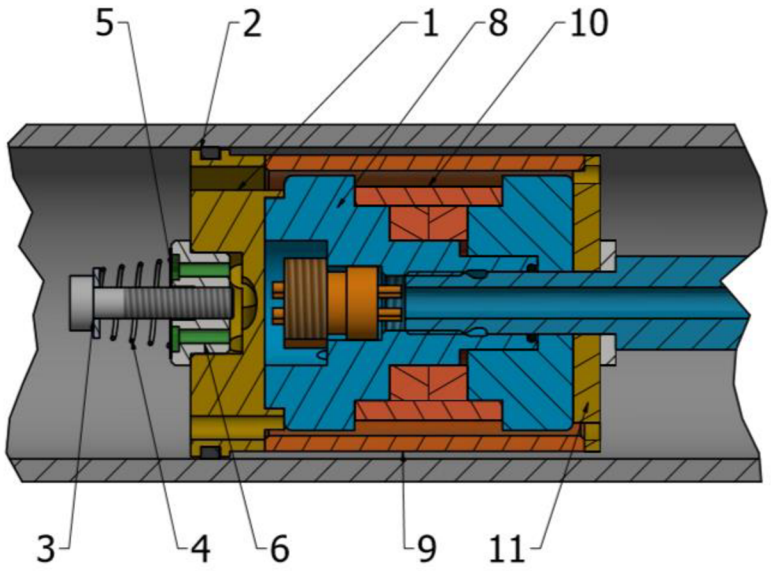
Konstrukce navrženého konstrukčního řešení má hlavní části shodné s MR tlumičem bez ventilu. Ve válcovém těle tlumiče je pístová skupina uložena na pístnici. Tlumič je rozdělen na 2 části pomocí plovoucího pístu, kde na jedné straně je MR kapalina a na druhé stlačitelný plyn pro kompenzaci objemu pístnice zasunuté v tlumiči.

Stejné materiály jsou na obr. 5-1 a obr. 5-2 vykresleny stejnou barvou.



obr. 5-1 Popis konstrukce navrženého řešení

Na detailním pohledu na pístovou skupinu (obr. 5-2) je již patrný rozdíl v konstrukci zejména spodní části pístové skupiny (spodní část se nachází v levé části obr. 5-2). Spodní víko (pozice 1) bylo zesíleno, aby bylo možné vést spojovací kanálky (v radiálním směru) hydraulického zkratu, a také zalisování ventilu (pozice 6). Zároveň je na spodním víku (1) z materiálu EN AW 7075 vytvořena drážka pro vodící pásek (pozice 2). Na ventilu je uložena planžeta o průměru 14 mm, s dírou Ø 4 mm a tloušťce 0,2mm (pozice 5), která je ve výchozí pozici přidržována kuželovou pružinou 0,5x8,5/11x9x3,75 [7] (pozice 4). Pružina se na svém užším konci opírá o šroub s podložkou (pozice 3). Vnější válec (pozice 9) má zmenšený vnější průměr, aby tímto prostorem mohla protékat MR kapalina. Horní víko (11), jádro tlumiče (8) a cívka (10) zůstaly nezměněny.

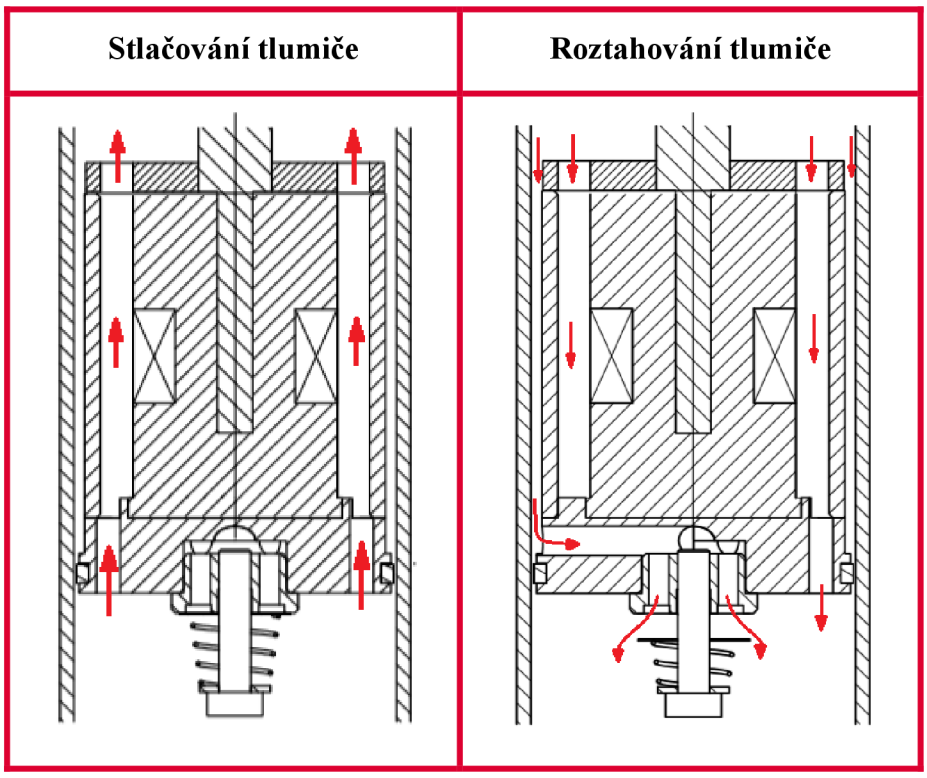


obr. 5-2 Detailní pohled B na pístovou skupinu

5.2 Funkce a rychlostní charakteristika vybraného řešení

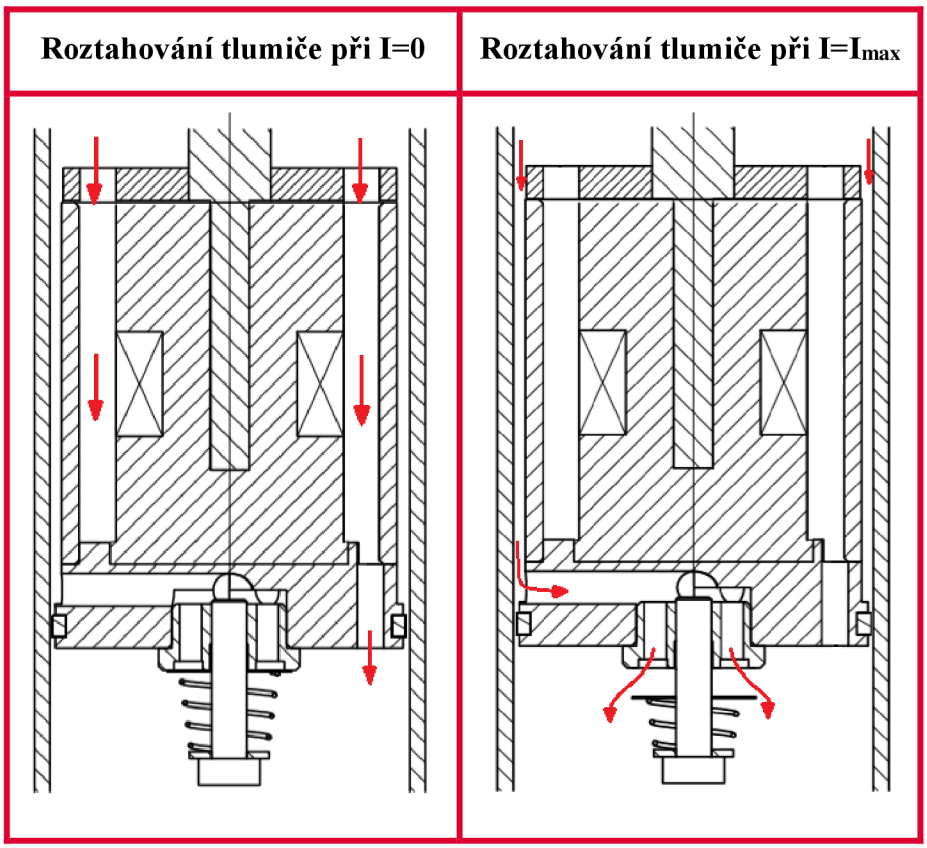
Magnetoreologická kapalina proudí při stlačování tlumiče pouze kanálkem podél aktivní zóny, kde je ovlivněna magnetickým polem, tedy v tomto směru pohybu nedojde navrženou úpravou ke změně chování tlumiče (obr. 5-3 a obr. 5-5) oproti současnému stavu konstrukce. Ovšem při roztahování proudí kapalina mezi vnějším válcem a tělem tlumiče, a to až do úrovně spodního víka, kde následně zatéká do spojovacích kanálků ve víku a pod planžetu. Následně je vlivem tlakového působení kapaliny na planžetu stlačena pružina a ventil je otevřen. Dochází tedy k hydraulickému zkratu a ovlivnění rychlostní charakteristiky (viz. obr. 5-5).

Pro lepší názornost je na obr. 5-3 pro případ roztahování tlumiče veden šikmý řez, aby bylo možné znázornit chování kapaliny v aktivní zóně, a také v cestě hydraulického zkratu.



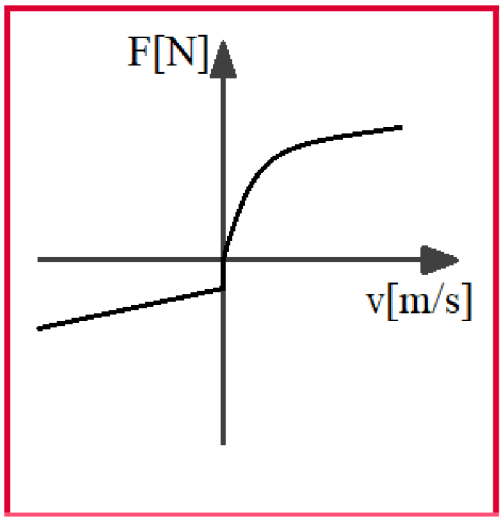
obr. 5-3 Nákres funkce vybraného konstrukčního řešení

Podstatný rozdíl fungování ventilu lze také pozorovat při roztahování v závislosti na dodávaném proudu (obr. 5-4). V krajních hodnotách dodávaného proudu *I* se totiž chování tlumiče bude výrazně lišit. Pokud nebude do cívky dodáván proud, bude kapalina převážně proudit nejjednodušší cestou, tj. aktivní zónou, a minimum kapaliny proudící cestou hydraulického zkratu (podél stěny vnějšího válce, spodním víkem, ventilem) pravděpodobně nebude stačit na stlačení pružiny a otevření ventilu. V opačném případě, při dodávání maximálního možného elektrického proudu, naopak nebude aktivní zónou protékat MR kapalina, a veškerý pohyb kapaliny bude omezen pouze na cestu hydraulického zkratu.



obr. 5-4 Závislost hydraulického zkratu na dodávaném proudu

Jelikož ventil propouští MR kapalinu pouze při roztahování tlumiče, je výsledná rychlostní charakteristika ovlivněna ve 3. kvadrantu, jak je patrné z obr. 5-5.

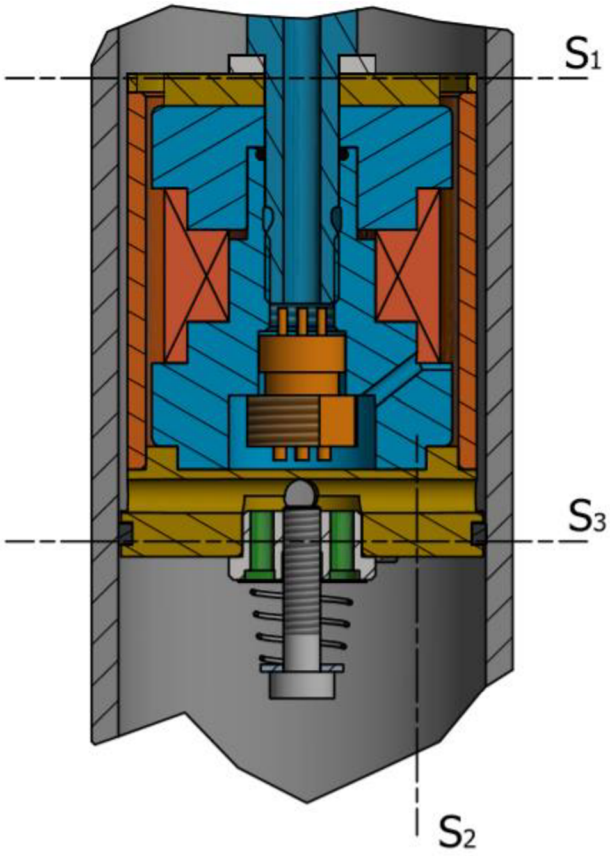


obr. 5-5 Předpokládaná F/v charakteristika řešení

5.3 Hydraulický návrh

Důležitým faktorem pro hydraulický zkrat je jeho hydraulický odpor. Čím větší bude hydraulický odpor, tím bude tlumič dosahovat větších tlumících sil ve 3. kvadrantu. Je tedy snaha navrhnout takovou cestu, aby měla co největší průřezy.

Kontrolované průřezy ve výpočtech jsou zobrazeny na obr. 5-6.



obr. 5-6 Řezy a kontrolní plochy hydraulického návrhu

Výpočty rychlosti proudění, tlakové ztráty, případně působících sil pro strukturální návrh, jsou závislé na rychlosti pohybu pístu. Proto jsou veškeré hodnoty vypočítány pro nejvyšší rychlost, které standardně píst dosahuje, tedy pro pístovou rychlost v_p=0,5 m/s. Zároveň uvažujeme maximální možný proud dodávaný do cívky, tedy že kapalina neproudí aktivní zónou, ale pouze zkratovými kanálky.

5.3.1 Výpočet průtokových ploch

Plochy jednotlivých průřezů jsou kruhové, popř. prstencové plochy. Plocha S_1 na vstupu do zkratového kanálku je vypočítána z vnitřního průměru těla tlumiče D_{out} =40 mm a vnějšího průměru horního víka D_{in} =38 mm.

Spojovací kanálky v dolním víku mají průměr D_2 =3,7 mm a otvory v zalisovaném ventilu D_3 =2,5 mm.

$$S_1 = \frac{\pi * (D_{out}^2 - D_{in}^2)}{4} = 122{,}5\ mm^2$$

$$S_2 = \frac{\pi * D_2^2}{4} = 10{,}8\ mm^2$$

$$S_3 = \frac{\pi * D_3^2}{4} = 4{,}9\ mm^2$$

Plocha celého pístu se určí z vnějšího průměru pístu D=40 mm:

$$S = \frac{\pi * D^2}{4} = 1256{,}6\ mm^2$$

Průměr pístnice $D_{pístnice}$ je roven 12 mm a obsah plochy řezu je tedy:

$$S_{pístnice} = \frac{\pi * D_{pístnice}^2}{4} = 113{,}1\ mm^2$$

Účinná plocha planžety je mezikruží o ploše S_p a je určena z průměrů ventilu, kde se ho planžeta dotýká tedy D_{Pout}=12,5 mm a D_{Pin}=6 mm:

$$S_p = \frac{\pi * (D_{Pout}^2 - D_{Pin}^2)}{4} = 94{,}5\ mm^2$$

Pro další výpočty je nezbytné znát délky těchto úseků. Ty byly naměřeny pomocí aplikace Inventor.

- Δz_1= 45.9 mm
- Δz_2= 8 mm
- Δz_3= 6,5 mm

5.3.2 Výpočet rychlostí proudění

Pro výpočet tlakové ztráty v jednotlivých kontrolovaných průřezech je potřeba určit rychlost proudění v_i v daném místě, kterou získáme postupným řešením rovnice kontinuity. Vycházíme z prostoru nad pístem, kde je při roztahování tlumiče rychlostí v_p průtok Q_0. Jelikož uvažujeme, že kapalina aktivní zónou neproudí, je celková plocha průtoku rovna prstencové ploše zkratového kanálku S_1.

$$Q_0 = Q_1$$

$$v_p * (S - S_{pístnice}) = v_1 * S_1$$

$$v_1 = \frac{v_p * (S - S_{pístnice})}{S_1} = 4{,}67\ m/s$$

I pro výpočet rychlostí proudění v dalších částech využijeme rovnice kontinuity a získáváme tedy následující rychlosti:

$$v_2 = \frac{v_p * \left(S - S_{pístnice}\right)}{4 * S_2} = 13{,}29\ m/s$$

$$v_3 = \frac{v_p * \left(S - S_{pístnice}\right)}{8 * S_3} = 14{,}56\ m/s$$

5.3.3 Výpočet tlakové ztráty

Nejprve určíme Reynoldsova čísla jednotlivých kontrolovaných průřezů, kde za D_H dosazujeme charakteristický rozměr (průměry kruhových průřezů, u prstencových rozdíl vnějšího a vnitřního průměru), za v_i rychlost v daném úseku, ρ značí hustotu pro námi uvažovanou magnetoreologickou kapalinu MRF 132-DG (ρ=3050 kg/m^3) a μ dynamická viskozita rovna hodnotě 0,150 Pa*s.

$$Re_i = \frac{\rho * v_i * D_H}{\mu}$$

Pokud známe rychlost proudění v daném úseku, můžeme vypočítat dílčí tlakovou ztrátu ΔP_1 pomocí Hagen Poissonovy rovnice pro prstencový průřez, kde Δz_i délku kontrolovaného úseku a f (třecí součinitel) určíme pomocí Reynoldsova čísla.

$$f_i = \frac{16}{Re_i}$$

$$\Delta P_1 = \frac{2 * f_1 * \rho * v_1^2}{D_{out} - D_{in}} * \Delta z_1 = \frac{2 * f_1 * \rho * \Delta z_1}{D_{out} - D_{in}} * \left(\frac{v_p * \left(S - S_{pístnice}\right)}{S_1}\right)^2 = 257\ kPa$$

Dosazením rychlosti do Hagen Poissonovy rovnice pro tok trubicí získáme celkovou tlakovou ztrátu na úseku 2 a 3:

$$\Delta P_2 = 4 * \frac{2 * f_2 * \rho * v_2^2}{D_2} * \Delta z_2 = 178{,}9\ kPa$$

$$\Delta P_3 = 8 * \frac{2 * f_3 * \rho * v_3^2}{D_3} * \Delta z_3 = 581{,}5\ kPa$$

Dále je potřeba určit tlakovou ztrátu na otevření ventilu. Je potřeba znát tuhost pružiny, kterou bohužel výrobce vybrané pružiny neuvádí. Z tohoto důvodu volím tuhost k=0,2 N/mm, což je hodnota pro válcovou pružinu se středním průměrem kuželové pružiny a s blízkým počtem závitů. Otevření ventilu uvažujeme při stlačení pružiny o Δx=0,5 mm a můžeme dopočítat sílu potřebnou k otevření ventilu F_o. Při známé síle a známé ploše planžety na kterou působí tlak lze vyjádřit tlakovou ztrátu při otevření ventilu ΔP_o.

$$F_o = k * \Delta x = 0{,}1\ N$$

$$\Delta P_o = \frac{F_o}{S_p} = 1058{,}8\ Pa$$

Celková tlaková ztráta ΔP je tedy dána součtem ztrát na dílčích průřezech a ztrátou vzniklou otevřením ventilu.

$$\Delta P = \Delta P_o + \sum_{i=1}^{3} P_i(v_p) = 1018{,}48\ kPa$$

5.3.4 Strukturální návrh

Pevnostní kontrola planžety

Jelikož cílem této bakalářské práce není strukturální kontrola navrženého řešení, je výpočet zjednodušen. Planžetu považujeme za prut kruhového průřezu na 2 podporách (místo dotyku planžety a vnějšího průměru ventilu). Tlak ΔP_o, což je tlak potřebný na otevření ventilu působí na celou plochu planžety, a tak získáme „náhradní“ sílu působící na prut.

$$F_p = \Delta P_o * S_{pC} = 129{,}9 * 10^{-3}\ N$$

Z momentové rovnováhy získáme ohybový moment působící na planžetu M_o, určíme průřezový modul v ohybu W_o (t značí tloušťku planžety 0,2 mm) a napětí:

$$M_o = \frac{1}{8} * F_p * D_{Pout} = 2{,}03 * 10^{-4}\ J$$

$$W_o = \frac{\pi * t^3}{32}$$

$$\sigma = \frac{M_o}{W_o} = 258{,}5\ MPa$$

Pevnostní kontrola šroubového spoje

Při kontrole šroubového spoje je důležité, na jakou plochu působí celková tlaková ztráta. Zde uvažujeme nejhorší možný případ, tedy že celková tlaková ztráta ΔP působí na celou plochu pístu S. Bezpečnost šroubového spoje poté získáme následujícími vztahy, kde R_m je mez pevnosti šroubu, A_s výpočtový průřez šroubu, a i počet šroubů (i=2).

$$F_S = \frac{\Delta P * S}{i} = 639{,}9\ N$$

$$\sigma = \frac{F_S}{A_s} = 127{,}2\ MPa$$

$$k_S = \frac{R_m}{\sigma} = 6{,}3$$

Uvažujeme tabulkové hodnoty pro šroub M3 pevnostní třídy 8.8:

$$A_s = 5{,}03\ mm^2 \qquad\qquad R_m = 800\ MPa$$

5.3.5 F/v charakteristika konstrukčního řešení

V této části se zabýváme rychlostní charakteristikou vybraného konstrukčního řešení. Průběh této charakteristiky lze určit pomocí následujících vztahů pro třecí a viskózní složku síly [8]:

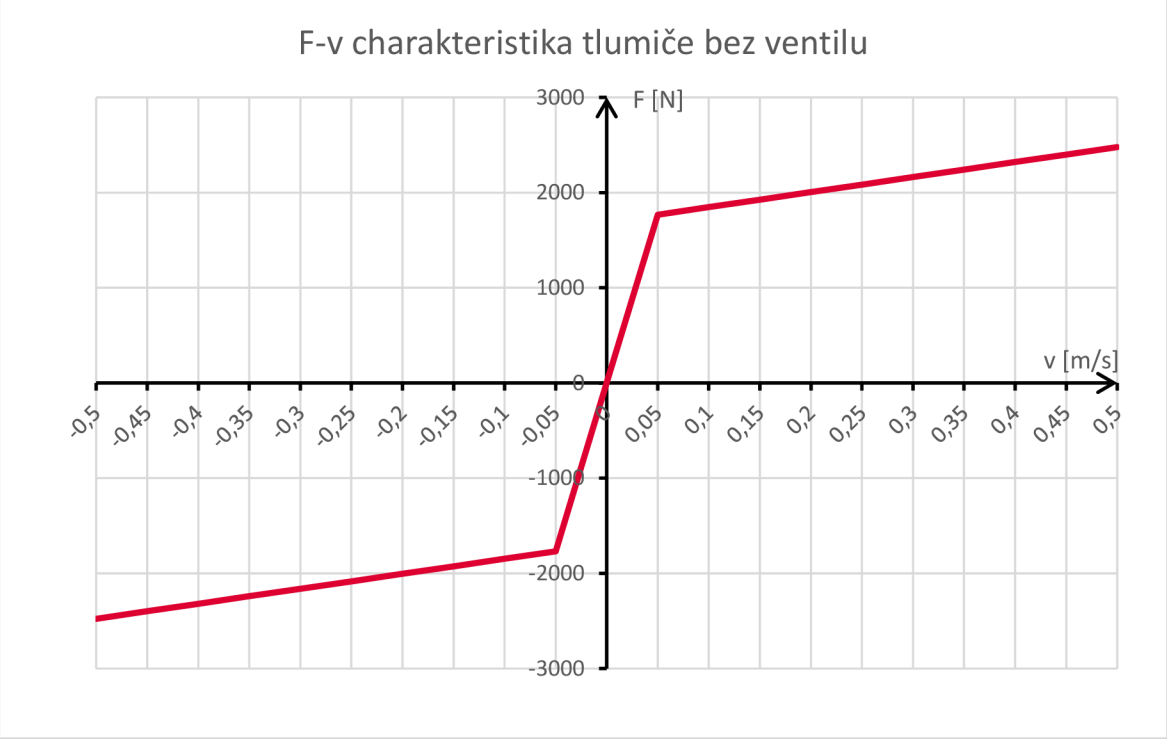
$$F_\eta = \left(1 + \frac{w * h * v_p}{2 * Q}\right) * \frac{12 * \eta * Q * L * A_p}{w * h^3}$$

$$F_\tau = c * \frac{\tau_0 * L * A_p}{h}$$

Je potřeba zvolit vhodný krok při dosazování rozdílných rychlostí v_p, abychom získali dostatečně přesný průběh. Hodnoty použitých veličin jsou uvedeny v příloze č. 2. Celková síla je poté dána jejich součtem:

$$F = F_\eta + F_\eta$$

U výsledné síly je zapotřebí zohlednit síly od pasivního tření. Toho docílíme jednoduše tím, že navýšíme hodnotu získané síly F o 50 N. Pokud nemá tlumič zkratové kanálky (původní řešení), vykazuje symetrickou rychlostní charakteristiku. Budou použity stejné vztahy pro kladné a záporné směry rychlostí.



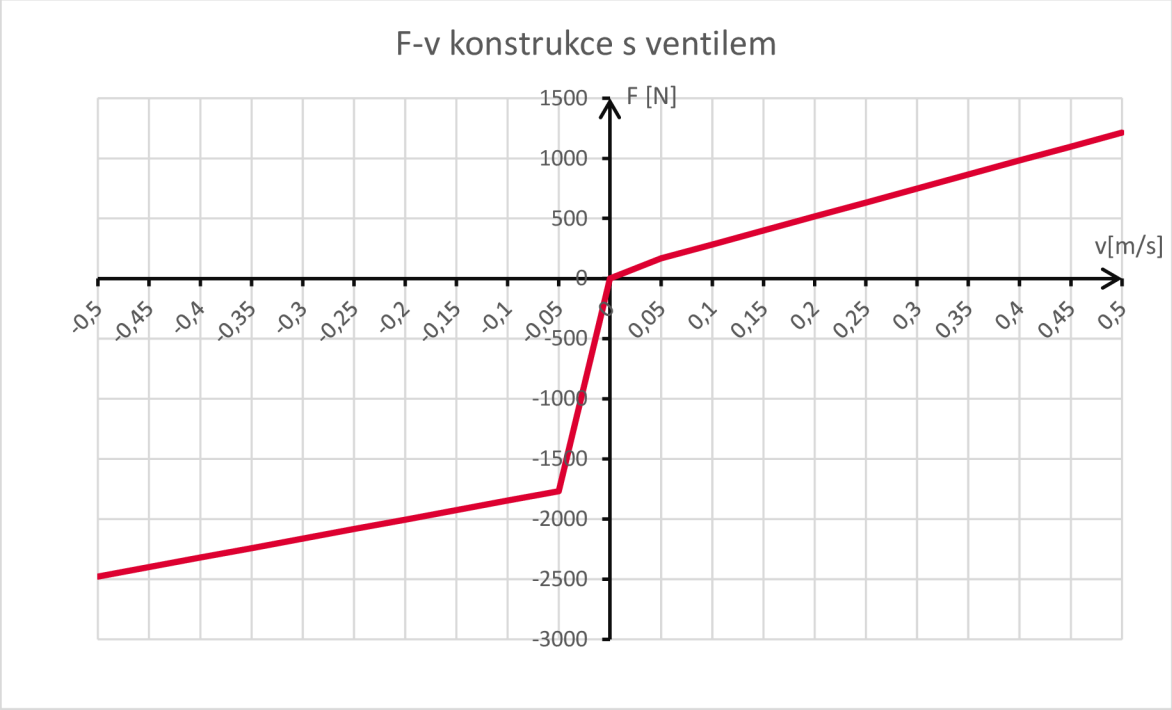
obr. 5-7 F/v charakteristika původního řešení

Pokud ovšem uvažujeme hydraulický zkrat, je potřeba vypočítat sílu při roztahování tlumiče. Je-li uvažován maximální proud dodávaný do cívek, proudí kapalina pouze kanálky hydraulického zkratu, a sílu zjistíme ze vztahu:

$$F_P = \Delta P * S$$

Zvolením vhodného kroku pro výpočet celkové tlakové ztráty získáme přibližný průběh pro rozpínání MR tlumiče.

Je důležité upozornit, že z důvodu lepšího porovnání s grafickým výstupem experimentu je roztahování tlumiče výjimečně umístěno v 1. kvadrantu, a stlačování ve 3. kvadrantu!



obr. 5-8 F/v charakteristika vybraného konstrukčního řešení

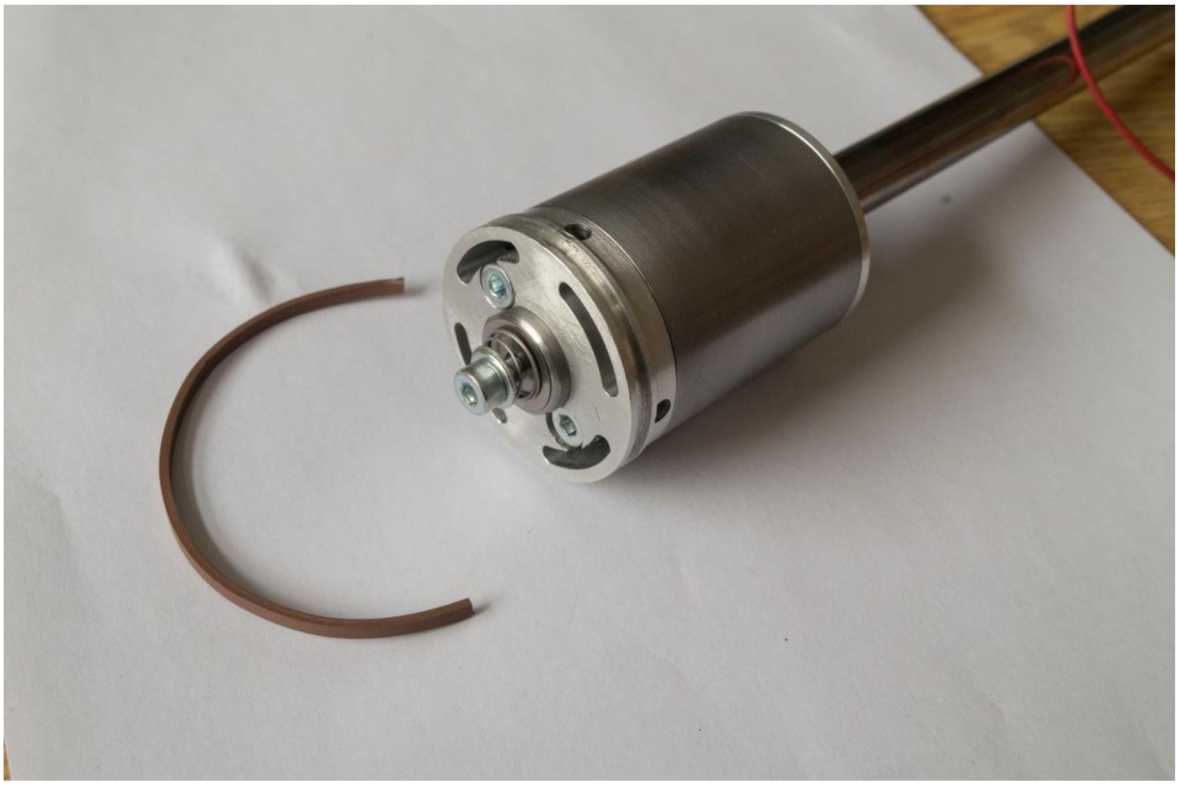
5.4 Výroba komponent

Tato kapitola se týká pouze ukázky reálných součástí vybraného konstrukčního řešení.

Na obr. 5-9 jsou vyfotografovány komponenty tlumiče v rozloženém stavu, které byly zkonstruovány v rámci této bakalářské práce a posléze vyrobeny. Normalizované části (pružina, šrouby a podložka), stejně tak neupravované komponenty na fotografii nejsou.

obr. 5-9 Vyrobené díly konečného konstrukčního řešení

obr. 5-10 již znázorňuje díly namontované na píst. Nejprve je ventil vlisován do spodního víka a vnější válec nasazen na jádro. Po zajištění spodního víka pomocí 2 šroubů byla uchycena planžeta přes pružinu a podložku šroubem. Celá tato část bude následně vložena do těla MR tlumiče, avšak nejprve bude nutné osadit vodicí pásek (na obrázku vlevo) do drážky ve spodním víku. Považuji za zajímavé také připomenout měřítko celého tlumiče, kdy např. šířka zmíněného vodícího pásku je 2,5 mm.



obr. 5-10 Díly namontované na pístu tlumiče a volně ležící vodící pásek

Tento celek je po opatrném vsazení vodícího pásku do drážky na spodním víku vsunut do těla tlumiče. Po naplnění tlumiče MR kapalinou a odvzdušnění je tlumič uzavřen.

5.5 Experimentální ověření

5.5.1 Metodika měření

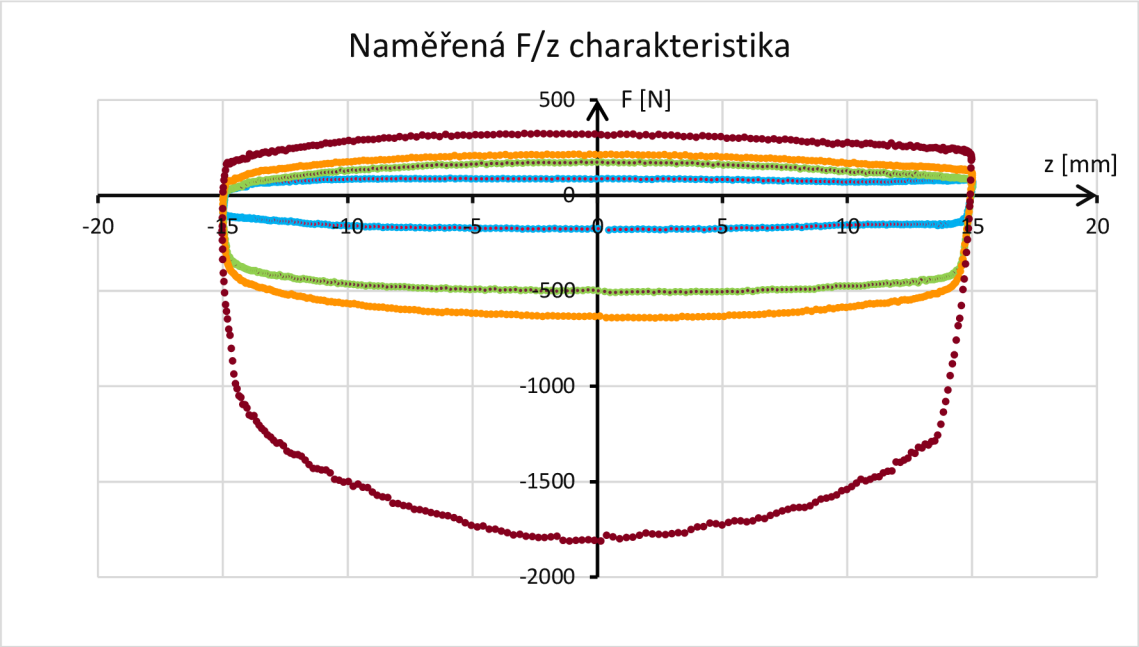
Po montáži pístu tlumiče byly naměřeny hodnoty F/v a F/z charakteristiky na hydraulickém pulsátoru od firmy Inova. Za pomocí siloměru 1730 ACK-50kN byla měřena tlumící síla, zdvih byl měřen odporovým senzorem zdvihu VLP15$A150 a teplota odporovým senzometrem PT32. Všechny tyto signály vstupovaly do měřící ústředny Dewe-800. Z kanálu zdvihu byla integrací získána rychlost. Tlumič byl měřen za pomocí logaritmického sweepu s konstantní amplitudou zdvihu 15 mm. Maximální měřená rychlost byla 0,2 m/s.

5.5.2 Výsledky experimentu

Následně získáme grafické závislosti síly F na stlačení z (obr. 5-11), a také závislost síly F na rychlosti pohybu pístu v (obr. 5-12). Různé barvy křivek značí různý proud dodávaný do cívky.

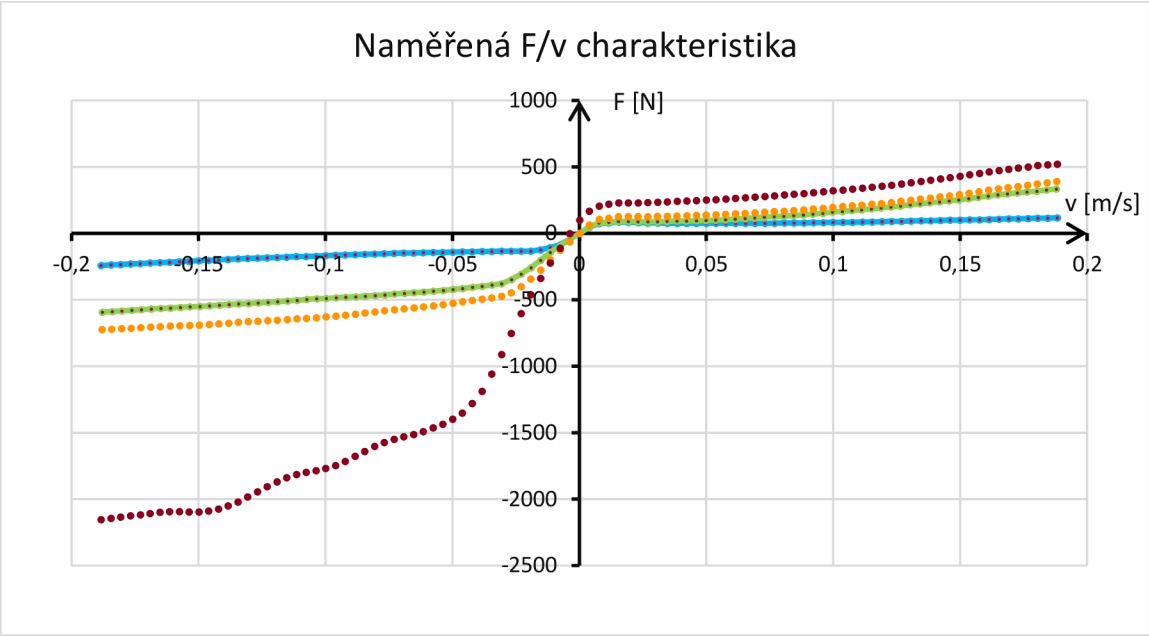
Na závislosti vyobrazené na obr. 5-11 je velmi dobře patrná nesymetričnost vybraného konstrukčního řešení, která velmi narůstá v závislosti na dodávaném proudu do cívek. Sytě červená křivka značí průběh při dodávaném proudu I= 1,5 A, který můžeme považovat za teoretický proud maximální tlakové ztráty I_{max} uváděny v kap. 5.2.

Opět upozorňuji na změnu kvadrantů pro roztahování v následujících grafických závislostech. Roztahování tlumiče je vyobrazeno v 1. a 2. kvadrantu.

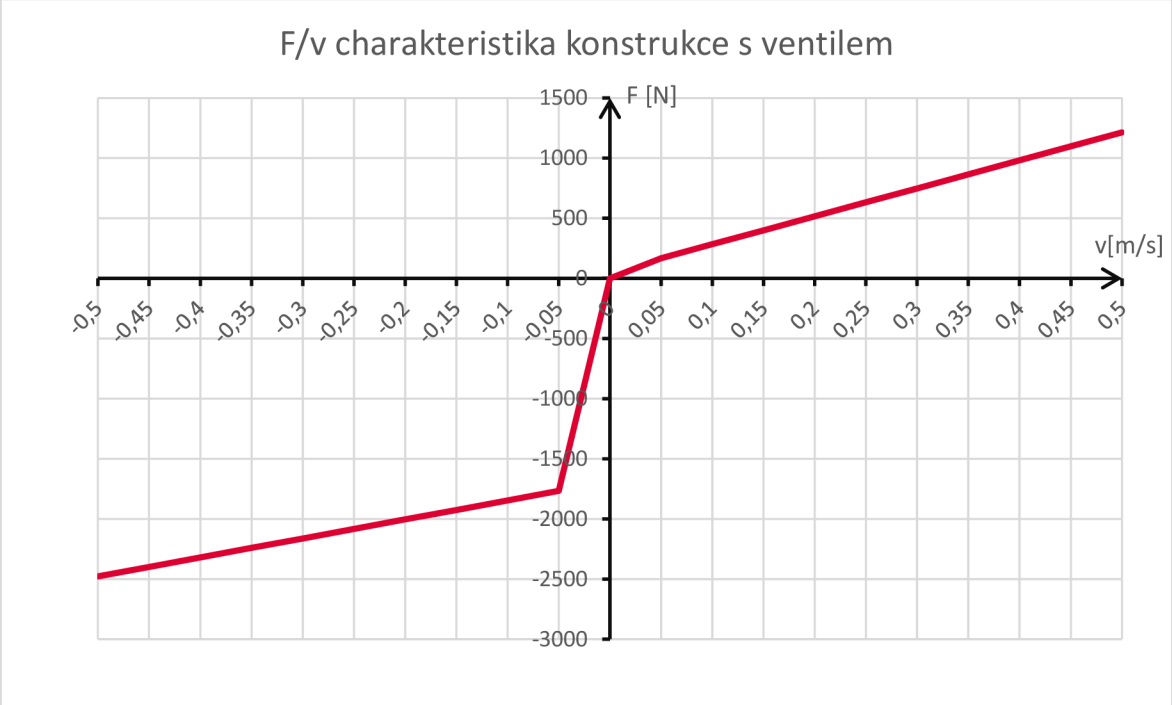


obr. 5-11 Experimentální F/z charakteristika

Jak je patrné na obr. 5-12 a obr. 5-13, F/v charakteristika získaná výpočtem se od té experimentální téměř neliší. Pokud si vyčteme hodnoty z grafu experimentálních hodnot při maximálním proudu a např. pro rychlost v=0,15 m/s, získáme hodnotu síly 430 N. Pokud stejně učiníme u teoretické grafické závislosti, je získaná síla rovna 400 N. Model velmi dobře popisuje experimentální data, nicméně průběh F/v při maximálním proudu je atypický a je nutné jeho ověření na základě dalších experimentů.



obr. 5-12 Experimentální F/v charakteristika



obr. 5-13 Teoretická F/v charakteristika

6 DISKUZE

V předchozí kapitole byla určena celková tlaková ztráta a bezpečnost šroubového spoje, který drží spodní víko tlumiče spojené s jeho jádrem. Byl uvažován nejhorší možný případ, a to hned z několika hledisek:

- Cívkami prochází maximální možný proud, tudíž kapalina neproudí aktivní zónou ale pouze zkratovými kanálky
- Celková tlaková ztráta působí na celou plochu pístu
- Vzniklé silové působení přenáší přímo šrouby

I přes tyto okolnosti vychází bezpečnost šroubového spoje 6,3, což lze považovat za dostatečně vysokou bezpečnost, a není tedy potřeba dalších konstrukčních zásahů pro jeho zlepšení. Pevnostní kontrolu planžety lze brát za nepřesné určení, neboť náhrada prutem je velká odlišnost. Přesto lze považovat získanou hodnotu napětí 258 MPa za dostatečně malou, obzvláště pokud je uvažována mez pevnosti planžety R_m= 1000 MPa. Přesnější určení napětí působícího v planžetě by bylo možné získat pomocí metody konečných prvků a vhodných výpočtových programů, což je možné pokračování této bakalářské práce.

V další kapitole byla nastíněna očekávaná rychlostní charakteristika vybraného konstrukčního řešení. Jak je velmi dobře patrné z grafu na obr. 5-8, toto konstrukční řešení splňuje požadavek na nesymetrickou rychlostní charakteristiku (původní řešení disponuje symetrickou rychlostní charakteristikou, viz. obr. 5-7). Naměřené charakteristiky experimentem v kap. 5.5 jsou svým průběhem a hodnotami s mírnou odchylkou podobné těm teoretickým. Lepších a přesnějších výsledků by bylo možné docílit více měřeními. Zajímavým bodem na obr. 5-11 je, že tlumící síla při „roztahování tlumiče“ je závislá na elektrickém proudu přivedeném na cívky (magnetickém poli). Čím větší proud na cívce, tím větší tlumící síla. Teoreticky by tento průběh neměl byt ovlivněn proudem přivedeným na cívky. Nicméně zdůvodnění je patrné z obr. 5-6 a uvedené plochy S1. Jelikož hydraulická trubka je vyrobena z feromagnetického materiálu, tak vlivem magnetického nasycení v dílu (obr. 5-2, pozice 9) prochází část magnetického toku i přes průřez S1 a zvětšuje jeho hydraulický odpor.

Průběh F/v charakteristiky a výsledné maximální síly při rozpínání tlumiče by bylo možné ovlivnit utažením nebo povolením šroubu ve středu víka. Tímto pohybem by se měnila přítlačná síla na planžetu. Tím pádem by byl potřebný větší tlak na otevření planžety.

7 ZÁVĚR

Tato bakalářská práce se zabývá konstrukčním řešením magnetoreologického tlumiče a jejím hlavním cílem je dosažení nesymetrické rychlostní charakteristiky s ohledem na minimum konstrukčních změn současného řešení.

Cíl byl naplněn pomocí rešerše současných možností docílení nesymetrické F/v charakteristiky a jejich zhodnocením. Poté byla vypracována 3 koncepční řešení. Koncepty aplikují současné možnosti na tlumič vyvinutý na ÚK VUT FSI. Z koncepčních řešení se jako nejvýhodnější jeví řešení s destičkou, jelikož je zapotřebí provést minimum změn na současném řešení (úprava 2 dílů, přidání 1 vyrobeného dílu a 5 normalizovaných součástí), s čímž úzce souvisí nízké náklady na výrobu. Výpočtem je určen průběh F/v charakteristiky tohoto řešení, který splňuje tento požadavek na nesymetrii. Výhodou tohoto řešení je také možnost upravit F/v charakteristiku (v omezeném rozsahu) předpínáním pružiny držící destičku (popř. změnou pružiny). U pevnostního ověření šroubového spoje byla určená dostatečně vysoká bezpečnost.

Účinnost tohoto řešení by bylo možné zvýšit především zvětšením ploch průtoku zkratových kanálků. To by pravděpodobně vyžadovalo zásah i do dalších dílů MR tlumiče, popřípadě použití technologie výroby a materiálů umožňujících bezpečně vrtat a frézovat při menší tloušťce stěny, než je 1 mm.

Nad rámec této bakalářské práce byly vyrobeny navržené díly. MR tlumič byl smontován a pomocí hydraulického pulsátoru v univerzitní laboratoři byly experimentálně ověřeny průběhy důležitých charakteristik (F/v, F/z).

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

[1] DIXON, John C. *The Shock Absorber Handbook*. 2nd ed. New York: John Wiley and Sons, Ltd., 2007. ISBN 978-0-470-51020-9.

[2] WANG, J. and G. MENG. Magnetorheological fluid devices: principles, characteristics and applications in mechanical engineering. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*. 2001, 165–174.

[3] PHULÉ, Pradeep P. Magnetorheological fluids: Princip and applications. *Smart Materials Bulletin*. 2001, 7–10.

[4] DLÁPAL, V. *Magnetoreologický tlumič pro Formuli student*. Brno, 2019. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. 93 s. Vedoucí diplomové práce Ivan Mazůrek.

[5] IVERS, Douglas E. Two-way magnetorheological fluid valve assembly and devices utilizing same. United States Patent US6158470. 2000. USA.

[6] GOLDASZ, Janusz P. and Bogdan SAPIŃSKI. *Insight into magnetorheological shock absorbers*. B.m.: Cham: Springer, 2015. ISBN 978-3-319-13232-7.

[7] *Pružiny Čermák, s.r.o.* [online]. [accessed. 2020-03-19]. Available at: http://www.webareal.cz/webareal-cz/eshop/17-1-Pruziny-tlacne-kuzelove/203-2-drat-0-5/5/12834-Pruzina-tlacna-kuzelova-0-5x8-5-11x9x3-75

[8] YANG, G., B. F. SPENCER, J .D. CARLSON and M. K. SAIN. *Large-scale MR fluid dampers: modeling and dynamic performance considerations* [online]. 2002. Available at: https://doi.org/10.1016/S0141-0296(01)00097-9

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

F	působící síla při pohybu pístu tlumiče
v, v_p	rychlost pohybu pístu (pístová rychlost)
I	proud dodávaný cívce v jádru pístu
I_{max}	maximální dodávaný proud cívce
S_1 , S_2 , S_3	plochy jednotlivých průřezů
D_{out}	vnitřní průměr těla tlumiče
D_{in}	vnější průměr horního víka
D_2, D_3	průměry kanálků v příslušných řezec
D, S	průměr a plocha celého pístu (včetně vodícího pásku)
$D_{pístnice}$, $S_{pístnice}$	průměr a plocha pístnice
D_{Pout}	vnější průměr mezikruhové plochy planžety
D_{Pin}	vnitřní průměr mezikruhové plochy planžety
S_p	plocha planžety, na kterou působí tlak
$\Delta z_1, \Delta z_2, \Delta z_3$	délky úseků, kde dochází k tlakovým ztrátám
Q_0, Q_1, Q_2, Q_3	průtoky MR kapaliny jednotlivými plochami
v_1, v_2, v_3	rychlosti proudění kapaliny v daných průřezech
Re_i	Reynoldsovo číslo definující proudění
ρ	hustota MR kapaliny (zde MRF 132-DG)
μ	dynamická viskozita MR kapaliny (zde MRF 132-DG)
D_H	charakteristický rozměr plochy, kterou kapalina proudí
$\Delta P_1, \Delta P_2, \Delta P_3$	dílčí tlakové ztráty
f_i	třecí součinitel za daných podmínek
k	tuhost pružiny
F_o	síla, potřebná k otevření ventilu

ΔP_o	tlaková ztráta při otevření ventilu
ΔP	celková tlaková ztráta
S_{pC}	plocha celé planžety
F_p	celková síla působící na planžetu
M_o	ohybový moment působící na planžetu
W_o	průřezový modul v ohybu planžety nahrazené prutem
t	tloušťka planžety, průměr náhradního prutu
σ	napětí vznikající v náhradním prutu
R_m	mez pevnosti šroubu
A_s	výpočtový průřez šroubu
i	počet šroubů
F_S	síla, působící na jeden šroub
k_S	bezpečnost šroubového spoje
F_η	viskózní síla
F_τ	třecí síla
w	střední obvod štěrbiny
h	šířka mezery
Q	průtok kapaliny v horní části tlumiče
L	vzdálenost cívky od konce jádra pístu
A_p	plocha pístu u horního víka
τ_0	smykové napětí kapaliny
c	výpočtová konstanta
$D_{střed}$	střední průměr štěrbiny

10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

obr. 2-1 Způsoby kompenzace objemu pístnice v tlumiči [1] 14

obr. 2-2 Hlavní části MR tlumiče[2] 15

obr. 2-3 Chování částic železa ve vnějším magnetickém poli[3] 16

obr. 2-4 Základní průběh F/v charakteristiky 17

obr. 2-5 Závislost F/v charakteristiky na počtu obtoků [4] 17

obr. 2-6 Nákres funkce MR tlumiče s planžetou a F/v charakteristika 18

obr. 2-7 Konstrukce se dvěma planžetami 19

obr. 2-8 MR tlumič využívající destičkovou klapku 20

obr. 2-9 Píst s destičkou a pružinou [6] 20

obr. 2-10 MR tlumič s kuličkovou klapkou 21

obr. 2-11 Další konstrukční využití kuličkové klapky 22

obr. 2-12 MR tlumič s prstencovým ventilem a menším průtokem 22

obr. 2-13 MR tlumič s prstencovým ventilem s větším průtokem 23

obr. 2-14 MR tlumič s klapkou na pružině 23

obr. 2-15 Magnetické řešení MR tlumiče 24

obr. 2-16 MR tlumič s vtokovými a výtokovými ztrátami 25

obr. 2-17 Hydraulické řešení MR tlumiče s pružinou 25

obr. 2-18 MR tlumič s posuvnou klapkou 26

obr. 2-19 Další příklad hydraulického řešení [6] 26

obr. 2-20 F/v charakteristika el. řešení 27

obr. 4-1 Současná konstrukce MR tlumiče 30

obr. 4-2 Detail současné pístové skupiny 30

obr. 4-3 Návrh řešení s planžetou 31

obr. 4-4 Návrh řešení B 32

obr. 4-5 Navrhované řešení s ventily na ramenech 33

obr. 5-1 Popis konstrukce navrženého řešení 34

obr. 5-2 Detailní pohled B na pístovou skupinu 35

obr. 5-3 Nákres funkce vybraného konstrukčního řešení 36

obr. 5-4 Závislost hydraulického zkratu na dodávaném proudu 37
obr. 5-5 Předpokládaná F/v charakteristika řešení 37
obr. 5-6 Řezy a kontrolní plochy hydraulického návrhu 38
obr. 5-7 F/v charakteristika původního řešení 42
obr. 5-8 F/v charakteristika vybraného konstrukčního řešení 43
obr. 5-9 Vyrobené díly konečného konstrukčního řešení 44
obr. 5-10 Díly namontované na pístu tlumiče a volně ležící vodící pásek 45
obr. 5-11 Experimentální F/z charakteristika 46
obr. 5-12 Experimentální F/v charakteristika 47
obr. 5-13 Teoretická F/v charakteristika 47

11 SEZNAM TABULEK

12 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1: Další koncepční řešení

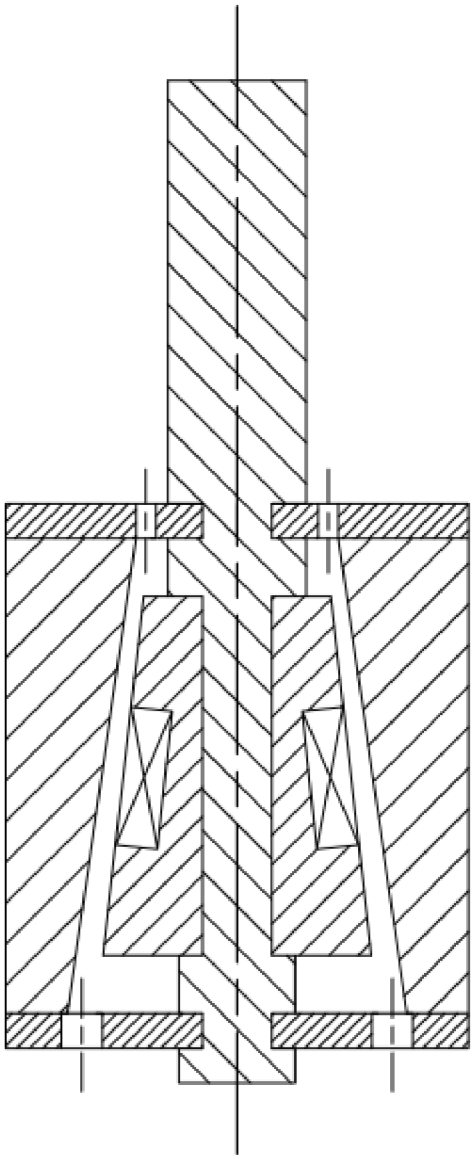
Příloha 2: Hodnoty veličin vystupujících ve vztazích při určení F/v charakteristiky

Příloha 3: Výkresová dokumentace a model

Příloha 1 – další koncepční řešení

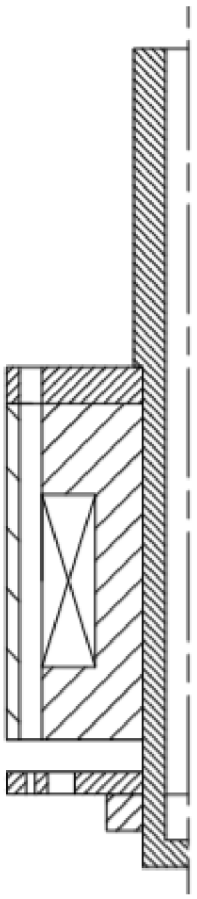
Varianta D

Další koncepční řešení využívá kuželového jádra tlumiče a vnějšího válce tlumiče. Vnější válec je také kuželový, ovšem s jiným vrcholovým úhlem. Zároveň je s pístnicí spojen planžetami ve své horní i spodní části, které mu umožňují dostatečný pohyb. Jelikož je vrcholový úhel kuželů rozdílný, dochází v závislosti na směru pohybu tlumiče k mírné změně polohy vnějšího válce vůči jádru, a tím ke změně mezery mezi nimi.



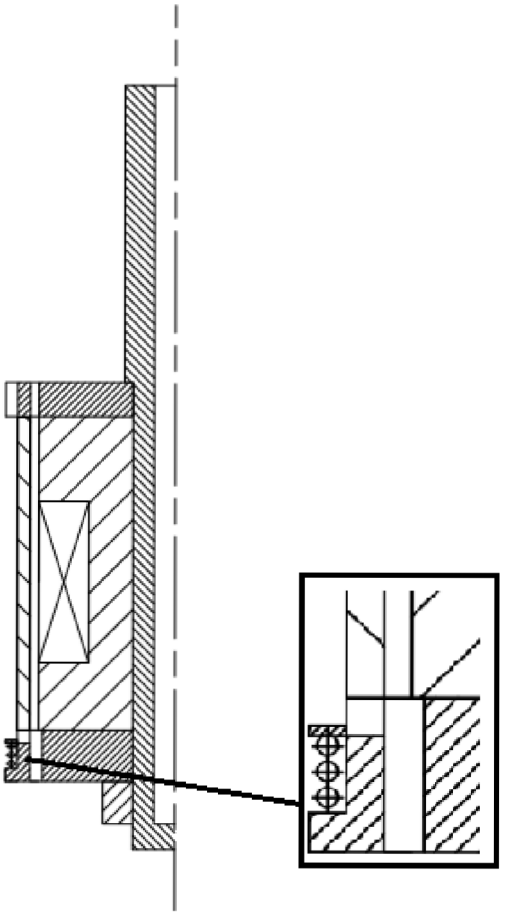
Varianta E

Následující řešení aplikuje destičku na současný tlumič z Ústavu konstruování. Spodní víko tlumiče je destičkou plně nahrazeno. Destička má dvě řady otvorů, z nichž jedna řada menších otvorů přiléhá ke kanálkům aktivní zóny, a druhá je blíže ke středu. V závislosti na směru pohybu pístu je destička polohována vlivem proudění kapaliny. Při stlačování tlumiče destička na jádro přiléhá a MR kapalina proudí pouze menšími otvory. Pří roztahování tlumiče je destička ve spodní poloze a MR kapalina může proudit i většími otvory.



Varianta F

Tato varianta úpravy využívá obdobně jako koncepční řešení B mezery vzniklé mezi vnějším válcem pístu a tělem tlumiče. Rozdíl je ovšem v tom, že ve spodní části je pružina s destičkou umístěna na vnějšku spodního víka, nikoliv uprostřed, a MR kapalina tedy při roztahování tlumiče vytéká u vstupů do aktivní zóny (viz detailní pohled).



Příloha č.2 – Hodnoty veličin vystupujících ve vztazích při určení F/v charakteristiky

Známé a tabulkové hodnoty:

$$D_{střed} = 32\ mm$$

$$h = 0{,}65\ mm$$

$$L = 18\ mm$$

$$c = 2{,}07$$

$$\tau_0 = 25\ kPa$$

Vypočítané hodnoty:

$$w = \pi * D_{střed} = 100{,}5\ mm$$

$$A_P = S - S_{pístnice} = 1143{,}54\ mm^2$$

$$Q = A_P * v_p$$