



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ**

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

**HYDRAULICKÉ TLUMIČE PODVOZKŮ KOLEJOVÝCH  
VOZIDEL**

HYDRAULIC SHOCK ABSORBERS OF TRAIN BOGIE

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

Lukáš Odehnal

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

Ing. Michal Kubík, Ph.D.

BRNO 2019





# Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav konstruování  
Student: **Lukáš Odehnal**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Základy strojního inženýrství  
Vedoucí práce: **Ing. Michal Kubík, Ph.D.**  
Akademický rok: 2018/19

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:

## Hydraulické tlumiče podvozků kolejových vozidel

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Na VUT v Brně se vyvíjí nový elektronicky říditelný tlumič podvozku vysokorychlostních kolejových vozidel. Pro srovnání této koncepce oproti konkurenci je nutné zjistit parametry, konstrukční provedení a výhody či nevýhody komerčně dostupných či vyvíjených hydraulických tlumičů podvozku kolejových vozidel.

Typ práce: rešeršně syntetická

### Cíle bakalářské práce:

Hlavním cílem práce je sestavení současného stavu poznání v oblasti hydraulických tlumičů podvozků kolejových vozidel.

Dílčí cíle bakalářské práce:

- nalezení konstrukcí pasivních a adaptivních tlumičů kolejových vozidel,
- zdvihové a rychlostní charakteristiky,
- porovnání jednotlivých konstrukcí tlumičů vzhledem k jejich dosažitelným tlumícím silám,
- nalezení způsobů testování vlastností a životnosti.

Požadované výstupy: průvodní zpráva, digitální data.

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

Struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

[http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP\\_DP/Zasady\\_VSKP\\_2019.pdf](http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2019.pdf)

**Seznam doporučené literatury:**

LAU, Y. K. a W. H. LIAO. Design and Analysis of Magnetorheological Dampers for Train Suspension. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. 2006, 219(4), 261-276.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

---

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

---

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

## ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá především konstrukčním řešením různých adaptivních tlumičů určených pro podvozky kolejových vozidel. Nejprve je sestaven obecný přehled informací týkajících se tohoto tématu. Následně jsou v hlavní části práce detailněji rozebrány současné konstrukce adaptivních tlumičů, které již byly testovány v praxi. Na závěr práce jsou konstrukce tlumičů včetně použitých parametrů porovnány za účelem získání dostatečně velkého statistického souboru, který by měl vést k usnadnění vývoje nového elektronicky říditelného tlumiče na VUT v Brně.

## KLÍČOVÁ SLOVA

železnice, podvozek, adaptivní tlumič, MR tlumič, MR kapalina

## ABSTRACT

This bachelor thesis mainly deals with design solutions of adaptive dampers used on railway vehicle bogies. The first part gives a general overview of the topic. The main part discusses current designs of adaptive dampers that have already been tested. Final part of the thesis compares the designs including their determining parameters in order to obtain a large enough sample to contribute to the development of a new, electronically controlled damper at the VUT in Brno.

## KEYWORDS

railway, bogie, adaptive damper, MR damper, MR fluid



## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ODEHNAL, L. *Hydraulické tlumiče podvozků kolejových vozidel*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2019. 73 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Michal Kubík, Ph.D..



## PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval Ing. Michalu Kubíkovi Ph.D. za jeho čas a odborné rady při vypracování této bakalářské práce. Dále mé rodině a kamarádům za veškerou podporu při studiu.

## 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

<b>1 ÚVOD</b>	<b>13</b>
<b>2 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE</b>	<b>14</b>
2.1 Analýza problému	14
2.2 Cíl práce	14
<b>3 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ</b>	<b>15</b>
3.1 Podvozky kolejových vozidel	15
3.1.1 Podvozky nízkorychlostních vlaků	16
3.1.2 Podvozky vysokorychlostních vlaků	19
3.2 Vypružení podvozků	20
3.2.1 Typy vypružení používaných u kolejových vozidel	21
3.3 Komerčně dostupné pasivní hydraulické tlumiče	23
3.3.1 KONI	23
3.3.2 Strojírna Oslavany	26
3.3.3 Hitachi	27
3.4 Adaptivní hydraulické tlumiče	28
3.4.1 Magnetoreologický tlumič	28
3.4.2 Tlumiče s elektromagnetickým ventilem	29
3.5 Konstrukce adaptivních tlumičů	30
3.5.1 Guo – Twin-tube and bypass-containing magneto-rheological damper for use in railway vehicle	30
3.5.2 Oh – Vibration control of a semi-active railway vehicle suspension with magneto-rheological dampers	36
3.5.3 Spelta – Smart-bogie: Semi-active lateral control of railway vehicles	38
3.5.4 Dan – A magneto rheological hybrid damper for railway vehicles suspension	40
3.5.5 Stribersky – Design and Evaluation of Semi-Active Damping System for Rail Vehicles	42
3.5.6 Imaduddin – Characterization and modeling of a new magnethoreological damper with meandering type valvee using neuro-fuzzy	46
3.5.7 Lau – Design and analysis of magnetorheological dampers for train suspension	49
3.5.8 Wang – Fluid formulae for damping changeability conceptual design of railway semi-active hydraulic dampers	52
3.5.9 Kim – A ride quality evaluation of a semi-active railway vehicle suspension system with MR damper: Railway field tests	54

<b>4 DISKUZE</b>	<b>57</b>
4.1 Zvolené typy konstrukcí	57
4.2 Charakteristiky tlumičů	59
4.3 Dynamický rozsah tlumičů	61
4.4 Časová odezva tlumičů	62
4.5 Šířka štěrbiny	62
4.6 Použitá MR kapalina	63
4.7 Způsoby testování tlumičů	63
4.7.1 Vlastnosti	63
4.7.2 Životnost	65
<b>5 ZÁVĚR</b>	<b>66</b>
<b>6 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ</b>	<b>67</b>
<b>7 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ</b>	<b>71</b>
<b>8 SEZNAM TABULEK</b>	<b>73</b>

# 1 ÚVOD

V současné době se výzkum a vývoj v oblasti železnice zaměřuje na oblast vysokorychlostních souprav. Tento fakt je způsoben ať už požadavkem na co nejrapidnější snižování času cestování, nebo možností ušetření různých energií. Zvyšování rychlostí kolejových vozidel, které jsou v dnešní době schopny dosahovat rychlosti téměř 600 km/h je samozřejmě doprovázeno určitými úskalími. I přes vysoké rychlosti jízdy musí být totiž pasažérům, či převáženému nákladu zaručena dostatečná bezpečnost jízdy doprovázená celkovým pocitem komfortu. V tento moment přichází do popředí kvalitní vypružení kolejových vozidel, které by mělo zamezit vzniklým problémům.

V této práci je blíže rozebráno a popsáno devět adaptivních tlumičů, které byly během několika posledních let vyvinuty různými vědeckými skupinami za účelem zvyšování jízdních vlastností vysokorychlostních vlaků. Jedná se o adaptivní tlumiče různých konstrukcí, které jsou vesměs součástí celkového semi-aktivního systému vypružení, které se již dnes vyskytuje prakticky u každého vysokorychlostního vozidla kolejové dopravy.

## 2 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

### 2.1 Analýza problému

V těchto letech se v oblasti železnice vývoj zaměřuje především na vysokorychlostní soupravy, které jsou schopny docílit vlastností, které jsou v dnešní době požadovány. VUT v Brně se do tohoto odvětví snaží přispět a vyvíjí nový elektronicky říditelný tlumič, který by měl nalézt své uplatnění na podvozcích vysokorychlostních kolejových vozidel. Na základě tohoto vývoje je nutné nejprve zjistit a srovnat konstrukční provedení a použité parametry komerčně dostupných či vyvíjených hydraulických tlumičů podvozků kolejových vozidel. V této bakalářské práci bude získán určitý souhrn informací či hodnot, které by následně měly usnadnit výběr vhodných parametrů a celkový vývoj nového elektronicky říditelného tlumiče.

### 2.2 Cíl práce

Hlavním cílem práce je sestavení současného stavu poznání v oblasti hydraulických tlumičů podvozků kolejových vozidel.

Dílčí cíle bakalářské práce:

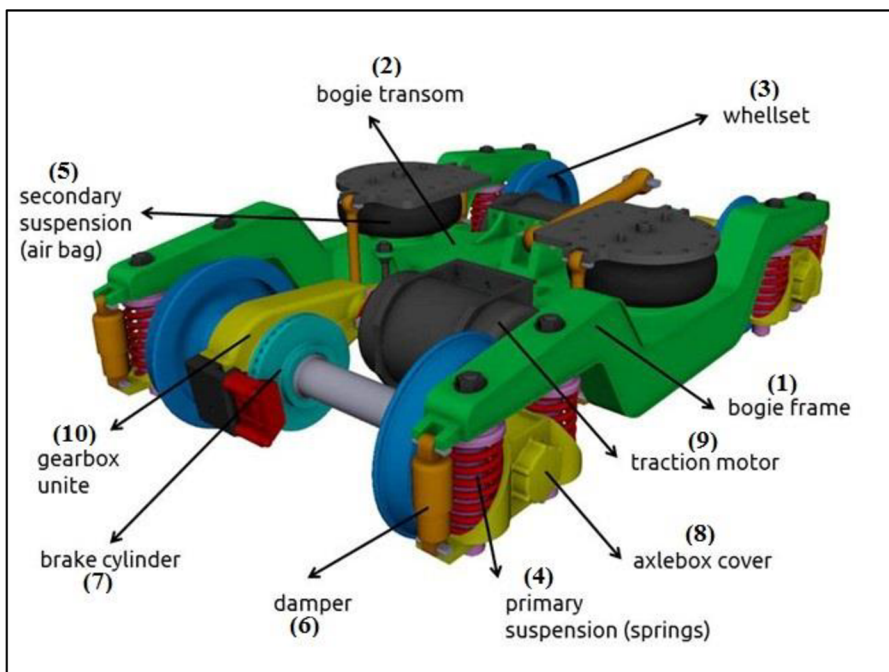
- nalezení konstrukcí pasivních a adaptivních tlumičů kolejových vozidel
- zdvihové a rychlostní charakteristiky
- porovnání jednotlivých konstrukcí tlumičů vzhledem k jejich dosažitelným tlumícím silám
- nalezení způsobů testování vlastností a životnosti

## 3 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

### 3.1 Podvozky kolejových vozidel

Cílem této kapitoly je rozdělit podvozky železničních vozidel, ať už podle jejich vlastností, či funkcí. Nejprve je nutné podvozky rozdělit na podvozky určené pro nízkorychlostní vlaky a na podvozky pro vysokorychlostní vlaky, protože se liší svou konstrukcí. Dalším rozdělením, které je nutné zmínit je na podvozky hnací, které jsou určeny pro provoz lokomotiv a na podvozky hnané, které naopak nesou skříně vagónů.

Podvozek zastává v celé konstrukci kolejového vozidla velice důležitou funkci. Typ podvozku rozhoduje například o tom, jakých rychlostí bude vlak dosahovat, jak bezpečný celý vlak bude nebo jakého komfortu bude při jízdě možno dosáhnout. Podvozek představuje komplikovaný systém, z velké části je složen z konstrukce, kterou tvoří rám (1) a příčný trám (2). K rámu jsou připojena dvojkolí (3), která mohou mít nezávislé pohyby se mohou volně otáčet kolem svých os, jsou připojeny k rámu přes primární vypružení (3). Sekundární vypružení (5) se poté nachází mezi skříní vozu a příčným trámem, ke kterému je připojen rám vozu. Pro správnou funkci jsou na podvozku dále tlumiče (6) a brzdové kotouče (7) a kryty nápravy (8). Pro případ, kdy podvozek slouží pro lokomotivy je na něm přidán navíc motor (9) a převodovka (10). Popisované uspořádání je znázorněno na obrázku 3.1.[1],[2]



Obrázek 3.1 Schéma podvozku kolejového vozidla [2] (Upraveno)

### 3.1.1 Podvozky nízkorychlostních vlaků

U nízkorychlostních vlaků rozlišujeme podvozky pro vlaky nákladní a osobní, které se liší především rozdílnou funkcí přepravy a mnohdy také stylem vypružení.

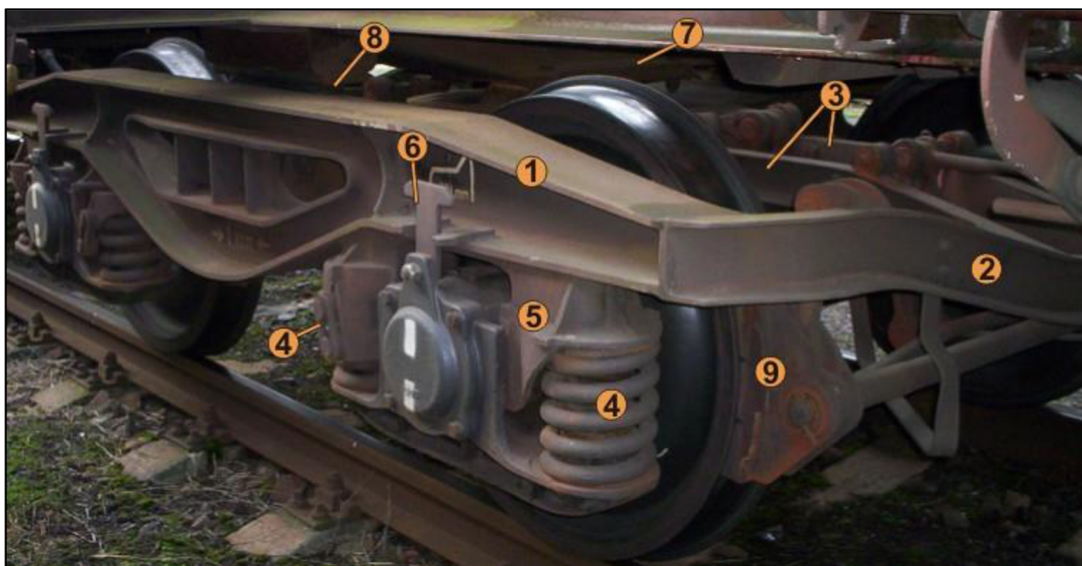
#### 3.1.1.1 Podvozky nákladních vozů

Tyto podvozky mají pouze jednoduché vypružení. Po celém světě se u těchto vozů upřednostňuje sekundární vypružení, až na Evropu, kde se převážně používá pouze primární vypružení. Pokud se jedná o vozy určených do vysokých rychlostí, aplikuje se i u nákladních vozů dvojitě vypružení pro zvýšení bezpečnosti.[3]

#### Podvozek typu Y

Jedním z často užívaných podvozků u těchto vozů jsou podvozky typu Y. Tyto podvozky se v kolejové dopravě používají dlouhá léta. Původně pochází z francouzské dílny, ale v dnešní době již mají mnoho modifikací a vyrábí se prakticky po celém světě. Podvozek je v základní podobě tvořen dvojkolím, nápravovou skříní, závěsným zařízením, rámem podvozku, základním brzdovým zařízením a zařízením poměrného zatížení. Tyto druhy podvozků využívají primárního vypružení, které je uskutečňováno šroubovitými pružinami, které jsou umístěny po stranách ložiskové skříně.[4]

Jako příklad bych uvedl podvozek Y25, který je znázorněn na obrázku 3.2. Rám tohoto podvozku se skládá z podélníku (1), čelníku (2) a podélné výztuhy (3). Vypružení je obstaráno pomocí pružiny prvotního vypružení (4). Uložení skříně na podvozek je realizováno pomocí kulové torny (7) a postranní kluznice (8).[5]



Obrázek 3.2 Podvozek Y25 [5]



### 3.1.1.2 Osobních vozů

Podvozky osobních vozů se vyrábějí jednonápravové a dvounápravové. Jednonápravové jsou ale již utlačovány do pozadí a používají se jen v případech, kdy si to konstrukce, či podmínky provozu vyžadují. Tyto podvozky mají jak primární, tak i sekundární vypružení, aby se docílilo co nejlepšího pohodlí pro pasažéry a zamezilo se možným vznikajícím nebezpečím, což jsou dva hlavní předpoklady.[3]

Jako příklad uvádím podvozek GP 200, který je použit i na několika vozech Českých drah. Jedná se o dvounápravový podvozek s dvojitým vypružením a využívá kolébkovou konstrukci. Jeho provozní rychlost je maximálně 120 km/h.[6]

Celkový rám tvoří spojení podélníku (1) a příčnicku (2), které také udávají finální tvar podvozku. Uložení skříně vozu na podvozek je provedeno pomocí silentbloku pro otočný čep (8), zároveň s postranní kluznicí (7). K vypružení podvozku GP 200 slouží v primárním vypružení pružina (4) a druhotné vypružení je tvořeno sestavou kolébky (9), pružiny (10), nosiče pružin (11) a táhla podélného vedení kolébky (12). Pro brzdění je užitá brzdová jednotka (14), brzdový kotouč (13).[6]



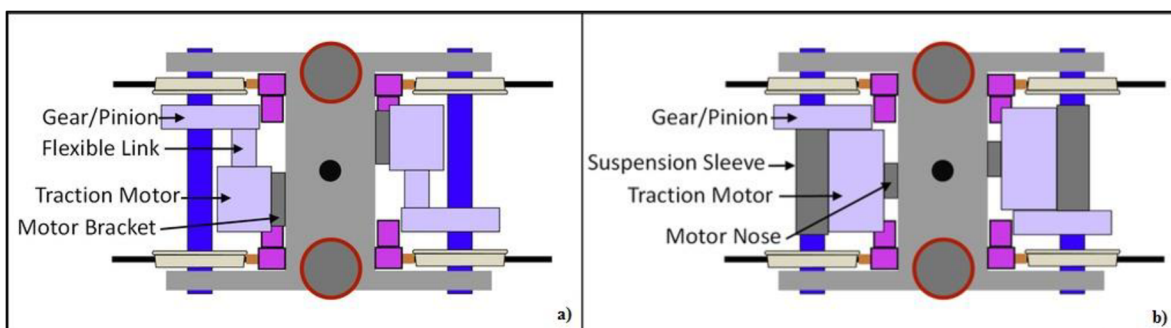
Obrázek 3.3 Podvozek GP 200 [6]

#### **Podvozek SF 300 firmy Siemens**

Podvozek, který je používán na některých osobních vlacích ve střední Evropě je určen pro maximální rychlost 200 km/h a pro zatížení nápravy do 16 tun. Podvozek je velice šetrný pro tratě i při vyšších rychlostech. V době své největší slávy si odnesl i cenu, jako jeden z nejlepších v tomto ohledu. Tohoto faktoru podvozek dosahuje díky přesnému vedení nápravy, které je zajištěno pomocí dvou vodících kolíků vtlačených do rámu podvozku a pomocí vodících pouzder náprav. Nosný rám je spojen se sekundárním vypružením, které se skládá ze čtyř ocelových pružin. Podle požadavku jsou možná kola se dvěma, či třemi brzdovými kotouči.[7]

### 3.1.1.3 Podvozky lokomotiv

Nejčastějšími motorovými podvozky jsou podvozky elektrických nebo naftových lokomotiv. Podvozky mohou být různých tvarů a velikostí. Oproti podvozkům pro vozy, musí tyto podvozky nést navíc součásti, které jsou použity pro hnaní celé soupravy. Tyto podvozky jsou vystaveny velkému namáhání a silným nárazům. Primární vypružení je obvykle obstaráváno pomocí dvou spirálovitých pružin, které se nacházejí u každého z kol. Tyto pružiny jsou zatíženy celou vahou podvozku, a i případným nákladem. Sekundární vypružení je ve většině případů realizováno pomocí gumových vzduchových měchů. Podvozky mají obvykle svůj motor pro každou nápravu. Podvozky mají několik různých konstrukčních provedení, kde každé má své výhody i nevýhody. Jako příklad uvedu dva typy, kde je rozdíl především v různém umístění motoru, jak je možné vidět na obrázku 3.4.[8]



**Obrázek 3.4** Podvozky H-typu se dvěma elektrickými motory: (a) 1. typ; (b) 2. typ [8] (Upraveno)

Oba podvozky na obrázku 3.4 jsou typem podvozku ve tvaru H se svařeným rámem. Oba podvozky se na první pohled mohou zdát totožné, ale hlavním rozdílem je, že u podvozku 1. typu (a) jsou dva elektrické motory přimontovány stylem „frame mounted“, kde velkou část tíhy motoru nese pouze podvozek. Naopak u podvozku 2. typu (b) je patrné, že dva elektrické motory jsou rozloženy na příčku podvozku a nápravu. Tento způsob uložení je nazýván „nose suspended“. U tohoto typu také tvoří sekundární vypružení vzduchové měchy, které jsou naplněny stlačeným vzduchem dodávaného z palubního kompresoru.[8]

#### **Podvozek SF 3 firmy Siemens**

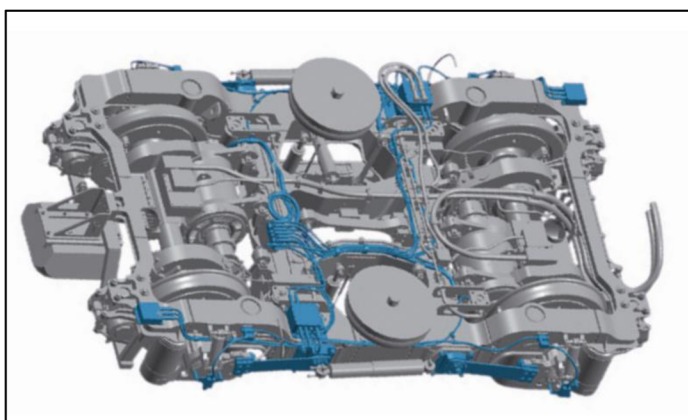
Tyto podvozky byly primárně vyvinuty pro Rakouské federální dráhy, kde jsou používány pod diesel – elektrickou lokomotivou. Podvozek lze použít jak pro nízkovýkonné, tak i vysokovýkonné lokomotivy a je určen pro maximální rychlost 160 km/h. Použití osvědčených součástí a vysoký stupeň standardizace dělá z těchto podvozků ekonomické a technicky bezpečné řešení. Celý rám podvozku je svařenec složený ze dvou postranních rámců, příčky a dvou trubkových nosníků. Skříň lokomotivy je na obou stranách podepřena napínacími pružinami. Pohyb mezi skříní podvozku a lokomotivou je tlumen jak horizontálně, tak vertikálně pomocí tlumičů.[7]



### 3.1.2 Podvozky vysokorychlostních vlaků

Vysokorychlostní vlaky byly vyvinuty, protože lidé chtěli v kolejové dopravě dosahovat vyšších rychlostí a různých úspor na energii. I přes to se také chtělo dosáhnout vyšší bezpečnosti a většího pohodlí pro cestující, což ale u vysokorychlostních vlaků vede k určitým úskalím. S prvním vysokorychlostním vlakem přišlo Japonsko v roce 1964, kdy uvedlo do provozu vlak Tokaido Shinkansen, který dosahoval rychlosti 210 km/h. Od této doby se ostatní země snaží vyvíjet své vlaky a dosahovat stále lepších výsledků. Mezi tyto země patří především Francie, Německo a Čína. Vysokorychlostní vlaky se dají členit do generací, podle toho, jakých rychlostí jsou schopny dosahovat. Dnes jsou už postaveny vlaky, které se dokážou blížit až rychlostem okolo 600 km/h. Vlaky jsou na těchto rychlostech již testovány, avšak tyto rychlosti v dnešní době nejsou možné uskutečňovat pro přepravu osob. Nejrychleji jezdící vlak přepravující osoby je nyní v Číně, kde na své trati dosahuje rychlosti až 350 km/h. Ostatní země, jako Francie, Španělsko atd., se ale těmto rychlostem moc nevzdalují a nabízejí na svých tratích rychlosti až 320 km/h. Podvozky vysokorychlostních vlaků jsou velmi namáhány a hrozí u nich nespočet nebezpečí na porušení, proto musí dosahovat nejlepších technologických parametrů a jsou velice přísně kontrolovány.[9]

**FLEXX Speed** – Jedná se o podvozky firmy Bombardier, které se používají na vlacích ZEFIRO v Itálii, na vlacích CRH1 v Číně a na vlacích Intercity-Express provozovaných v Německu a sousedních státech. Tato firma vyrábí podvozky, které jsou určeny pro různé aplikace a také do různých podmínek. Na svých podvozcích používají technologii aktivního postranního vypružení, díky kterému se dostavuje dostatečná bezpečnost a pohodlí cestování při vysokých rychlostech. U podvozků garantují excelentní jízdní vlastnosti do rychlostí až 330 km/h. Podvozek byl navržen tak, aby se co nejvíce eliminovala nucená údržba a aby se používalo co nejméně energie, což má velký vliv na celkovou životnost a cenu podvozku.[10] Pod vlaky CRH1 v Číně se používá podvozek FLEXX Link, který je znázorněn na obrázku 3.5[11].



Obrázek 3.5 Podvozek FLEXX Link používaný u CRH1 v Číně [11]

Pro vysokorychlostní lokomotivy nabízí tato firma podvozek FLEXX Power 350[11].



Obrázek 3.6 Podvozek FLEXX Power 350 [11]

**Podvozek Y237** je podvozek firmy Alstom a je používán na vlacích TGV. Jedná se o podvozek Jakobsonového typu. U těchto podvozků je speciální to, že nejsou pod jedním vozem, ale nacházejí se mezi dvěma vozy, což zmenšuje počet potřebných podvozků pro celý vlak se vzorcem  $n/2+1$ , kde  $n$  je počet potřebných normálních podvozků. Díky tomuto typu podvozku je snížena celá váha soupravy a zmenšuje se mezera mezi vozidly.[12] Primární vypružení tohoto podvozku je tvořeno spirálovitými pružinami a sekundární vypružení je realizováno pomocí pneumatického systému SR 10 [13].

## 3.2 Vypružení podvozků

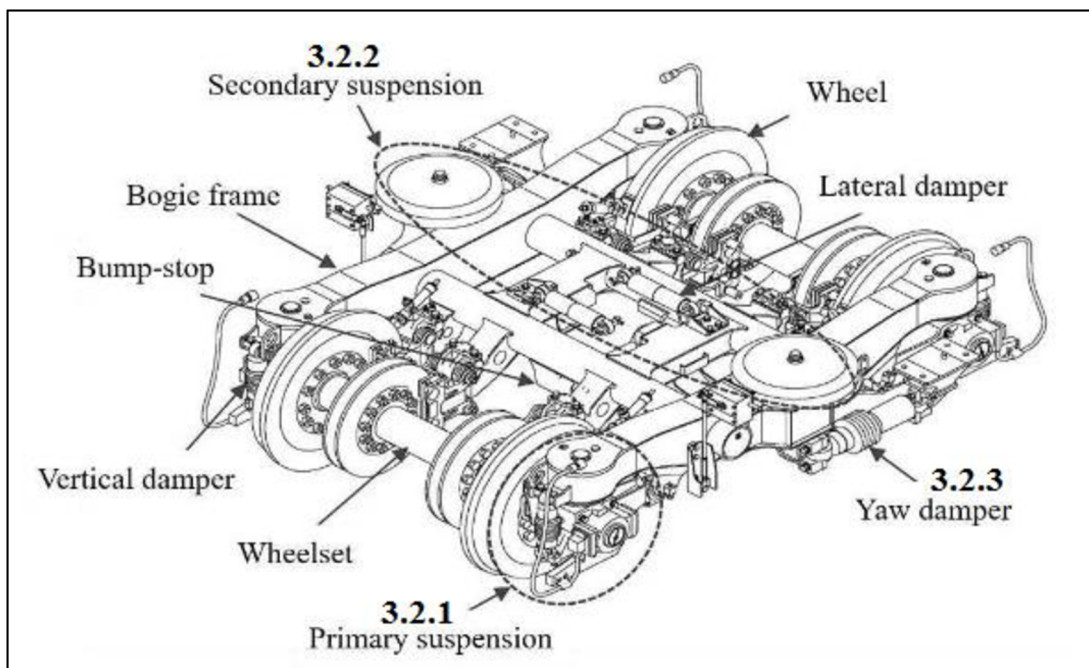
Pokud by se podvozky nízkorychlostních vlaků měly porovnat z hlediska stability jízdy a komfortu přepravy, tak hlavní slovo bude mít typ vypružení, které se na daném podvozku nachází. Vypružení má za úkol omezit dynamické účinky na vůz způsobené vodorovnými nerovnostmi, zajistit rovnoměrné zatížení všech kol při svislých nerovnostech na trati, což zaručí, že vlak nevykolejí a neustále jsme schopni přivést do práce všechny brzdy. Dalším úkolem je zajistit právě již zmiňovaný komfort pro cestující nebo zamezit znehodnocení nákladu. Dalším typem je vypružení mezi vozy soupravy, kde se snažíme zamezit vzniklým kmitům od sousedících vozů. Podvozky se dělí na dvě velké skupiny: podvozky s jednoduchým vypružením, u vozů, kde není potřeba dosáhnout úplného komfortu a dvojitým vypružením, kde se kombinací různých tlumících prvků dosahuje největší účinnosti. Podvozky s jednoduchým vypružením se používají především u nákladových vozů, kde nepotřebujeme dosáhnout nejlepších výsledků, ale i tak musíme dostatečně omezit rázy, abychom zamezili případnému poškození nákladu. Podvozky s dvojitým vypružením se používají především u vozů určených na přepravu osob, kde je díky plnohodnotného primárního i sekundárního vypružení ve vertikálním, svislém

i příčném směru zamezeno co nejvíce rázům způsobených jízdou, aby se přepravovaným osobám dostavilo co největšího komfortu a zamezilo jakémukoliv nebezpečí.[14]

Výrobci vlaků z různých krajín světa se předhánějí, kdo dokáže vytvořit ten nejvhodnější produkt pro pasažéry a tím si vytvoří jméno a získají své místo na trhu. Hlavními požadavky jsou především nejkratší čas jízdy a nejvyšší dosažený komfort pro cestující. Při zvyšování rychlostí se ovšem u komfortu dosahuje právě opačného výsledku, což musí být nějakým způsobem optimalizováno. V tento moment nastupuje celkové vypružení vlaku, které dopomáhá zvyšovat pohodlí cestujících. Vypružení můžeme dělit na pasivní, aktivně či semi-aktivně řízené. Pasivní vypružení je schopno reagovat pouze na pohyb vozidla a na základě toho napomáhat jízdám vlastnostem vozidla [15]. U aktivního vypružení jsme schopni za pomoci elektroniky monitorovat a následně ovlivňovat dané charakteristiky tlumičů reálném čase v závislosti na vzniklou situaci. U semi-aktivních nebo adaptivních systémů jsme schopni měnit tlumící charakteristiku v závislosti na přepínatelném nastavení. Tohoto jevu se dosahuje odebráním energie ze systému.[16]

### 3.2.1 Typy vypružení používaných u kolejových vozidel

V následujících podkapitolách práce je specifitější popis používaných tlumičů a celků, kterých jsou tlumiče součástí na kolejových vozidlech. Popisované typy jsou znázorněny podle čísla dané podkapitoly na obrázku 3.7.



Obrázek 3.7 Schéma podvozku kolejových vozidel [23] (Upraveno)

### 3.2.1.1 Primární vypružení

Skládá se z pružin a tlumičů a nachází se mezi nápravovou skříní a podvozkem. Je nutné pro všechny třídy kolejových, nicméně ve výrobě se vyskytuje mnoho různých typů primárního vypružení.[18]

Tlumič je součástí primárního vypružení, kde slouží ke snížení rázů mezi kolem a kolejnicí. Rozkládá vibrace mezi rámem podvozku a dvojkolím a snižuje opotřebení rámu podvozku.[19]

### 3.2.1.2 Sekundární vypružení

Nachází se mezi rámem podvozku a vozidlem. Používá se především pro vlaky, které jsou určeny pro přepravu osob. U mnohých nákladních vlaků chybí. Tlumiče, které jsou součástí sekundárního vypružení, které má za hlavní funkci zvyšování komfortu jízdy. Toho je dosahováno absorpcí rázů vzniklých z důvodu výškových a směrových nerovností na trati. Díky tlumení rázů nedochází k velkému přenosu těchto rázů ze skříně podvozku na skříň vozu.[20]

### 3.2.1.3 Tlumič vrtění

Tlumič eliminuje nadměrné kymácení ze strany na stranu, které vzniká například při průjezdu obloukem neboli zatáčkou. Tyto tlumiče také zvyšují bezpečnost při středních až vysokých rychlostech.[21]

Jedním z hlavních důvodů, proč se používá tlumič vrtění je vrtivý pohyb, který se u vlaků objevuje, když vůz ztrácí svou stabilitu, neboli když se rychlost vlaku blíží horní kritické rychlosti. Tato skutečnost velice ovlivňuje to, jak moc bude jízda vlaku bezpečná. Tento problém se řeší především v těchto letech, protože všichni výrobci vlaků se snaží dosahovat co nejvyšších provozních rychlostí, čemuž ale brání již zmiňovaný vrtivý pohyb.[22]

Vrtivý pohyb postihuje dvojkolí kolejových vozidel při pohybu nad kritickou rychlostí, jinak se tento vrtivý pohyb dá popsat jako samovolně buzená oscilace, kdy se dvojkolí na trati třepe, tato oscilace vzniká nekonzervativní kontaktní silou působící mezi koly a kolejnicí.[23]

### 3.3 Komerčně dostupné pasivní hydraulické tlumiče

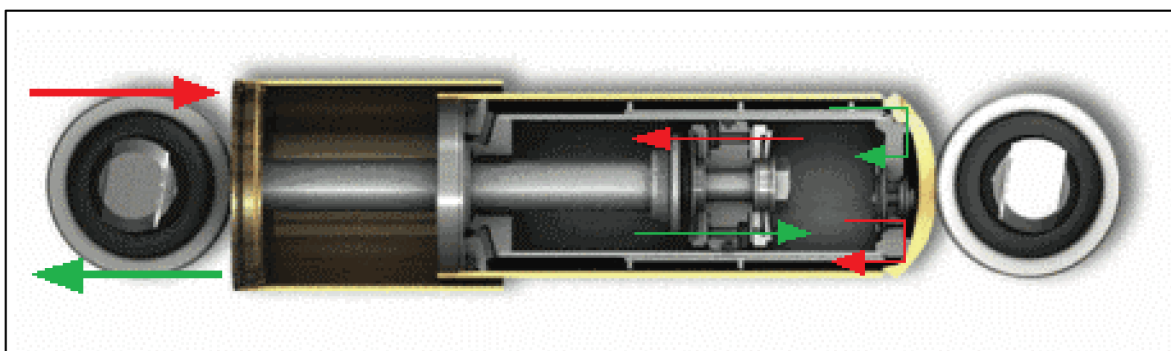
V této kapitole jsou uvedeny tlumiče, které se již dnes používají a jsou komerčně dostupné. Názorněji ukáží dané konstrukce tlumičů od firmy KONI, která patří mezi přední výrobce tlumičů kolejových vozidel. Dále zmíním některé produkty dalších výrobců, kteří se ucházejí o své místo na trhu.

#### 3.3.1 KONI

Tato firma specializující se na výrobu tlumičů pro kolejová vozidla nabízí své tlumiče ve třech kategoriích, do kterých jsou tlumiče rozděleny podle jejich základních charakteristik. Jsou to: výkonnostní třída, odolnostní třída a technologická třída.[24]

##### 3.3.1.1 Výkonnostní třída

Tyto tlumiče najdou své uplatnění jako primární a sekundární svislé tlumiče a sekundární vodorovné tlumiče. Tlumiče této třídy pracují na základě obousměrného průtoku oleje pístem. Během roztahování tlumiče je tlumení způsobeno skupinou ventilů, které jsou pod pístem, zatímco u stlačování vytváří skupina těchto ventilů na vrchu pístu požadované tlumící síly.[25]

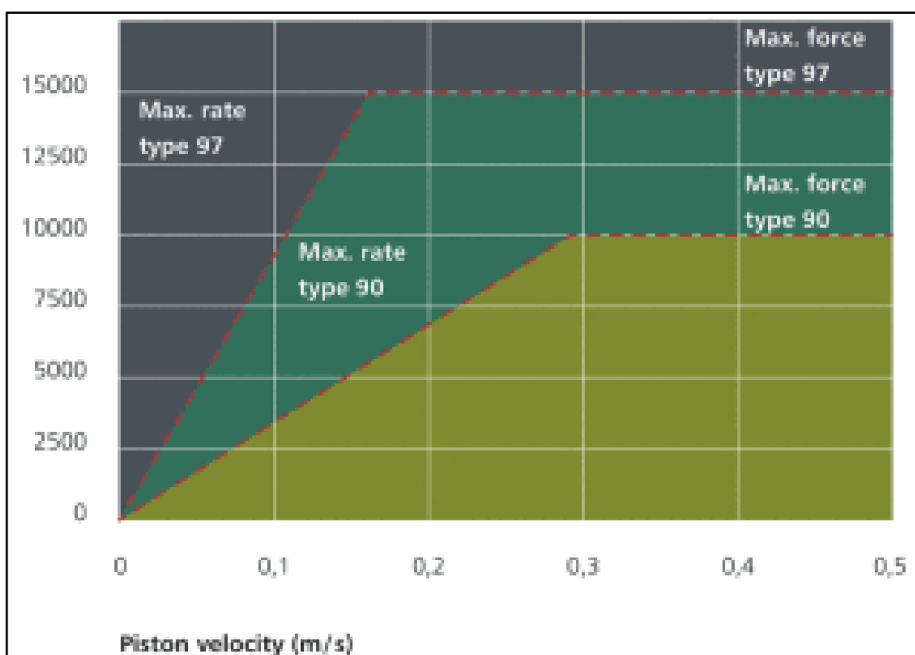


Obrázek 3.8 Řez tlumičem výkonnostní třídy se znázorněným průtokem kapaliny (KONI) [25] (Upraveno)

V této třídě jsou dostupné dva typy tlumičů: typ 97 a 90. Na obrázku 3.9 je znázorněna závislost jejich tlumících sil na rychlosti pohybu pístu.

- **Typ 97** - Tlumič je určen pro využití jako primární a sekundární svislý a sekundární příčný tlumič. Životnost tlumiče je uváděna na 1 200 000 km. Provozní teploty jsou od  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Maximální tlumící síla je 15 kN a maximální tlumící charakteristika je 100 kNs/m. Rozměr svrchního krytu je  $\text{Ø } 80\text{ mm}$  a průměr hydraulické trubky je  $\text{Ø } 70\text{ mm}$ . [26]
- **Typ 90** - Pro tento typ je definována maximální tlumící síla 10 kN a maximální tlumící charakteristika je 35 kNs/m. Průměr krytu je  $\text{Ø } 80\text{ mm}$  a průměr hydraulické trubky je  $\text{Ø } 70\text{ mm}$ . [25]

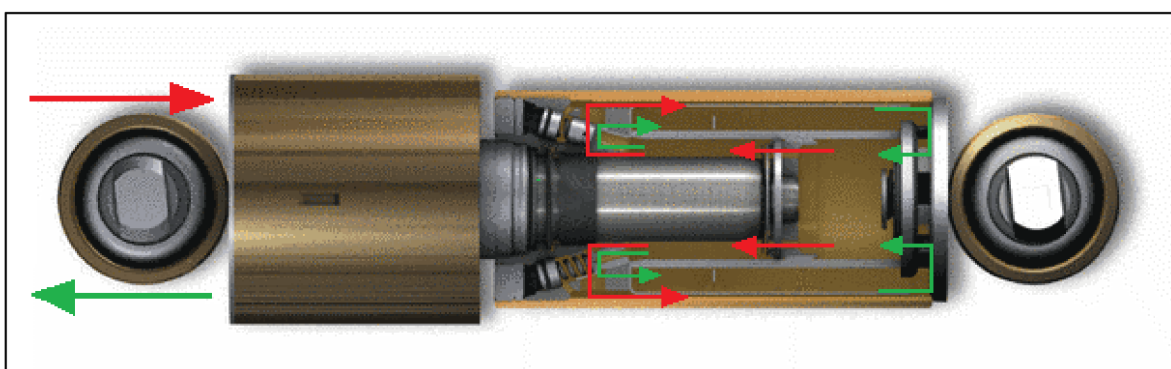




Obrázek 3.9 Graf výkonnostní třídy tlumičů KONI, závislost tlumící síly na rychlosti pístu [25]

### 3.3.1.2 Odolnostní třída

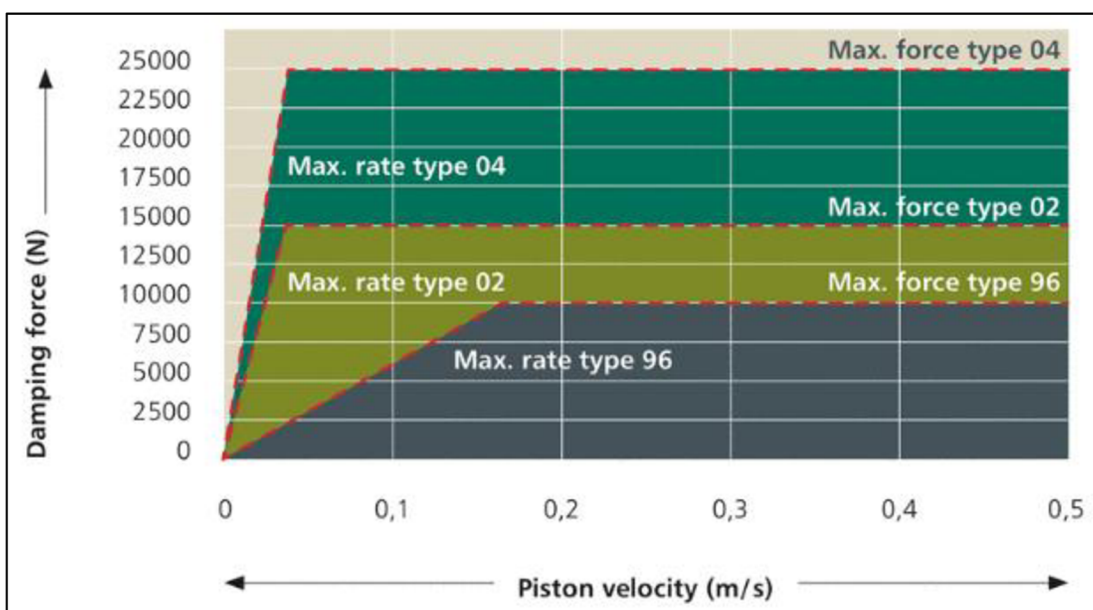
Tyto typy tlumičů jsou navrženy tak, aby vydržely nejméně 25 let provozu. Tyto velice robustní výrobky se velmi pomalu opotřebovávají a lze je snadno přizpůsobit novým podmínkám, což vede k prodloužení doby životnosti. Princip cirkulace oleje zaručuje symetrické tlumící síly a zajišťuje vynikající přenos tepla mezi tlumičem a okolním vzduchem, což umožňuje tlumičům pracovat v těch nejobtížnějších podmínkách. Tlumiče jsou navrženy tak, aby dosáhly co nejvyšší spolehlivosti a zároveň nebyly nutné často opravovat a vyměňovat. Tlumiče této třídy je možné využít na různých místech: primární svislý tlumič, sekundární svislý a příčný tlumič, tlumič vrtění.[27]



Obrázek 3.10 Řez tlumičem odolnostní třídy se znázorněným průtokem kapaliny (KONI) [27] (Upraveno)

Speciálním příkladem těchto tlumičů je tlumič vrtění. Tento tlumič je speciálně navržen pro ovládání sinusových rotačních pohybů podvozku s malou amplitudou, čímž umožňují provoz vlaku při vyšších rychlostech. Znakem těchto tlumičů je, že mají velký průměr pístnice, což omezuje tlak v uložení pístnice v důsledku bočních zatížení. Přímým výsledkem je snížení tření a dlouhá životnost vedení a těsnění pístnice. Tento typ tlumičů pracuje na principu cirkulujícího oleje. Olej je veden přes stejné ventilové systémy ve vedení, jak při stlačení, tak i prodlužování tlumiče. Při prodlužování je zpětný ventil v pístu uzavřen a olej nad pístem je vytlačován přes tlumící ventily. Současně kvůli zvýšenému objemu pod pístem je olej tlačěn přes zpětný patní ventil. Během stlačování je zpětný patní ventil uzavřen a díky pístu, který je stlačován dolů ve válci, olej protéká přes otevřený zpětný ventil v pístu. Olej přemístěn pístní tyčí je tlačěn přes tlumící ventily. V této skupině nabízí výrobce tlumiče typu 96, typu 02, typu 04 a na obrázku 3.11 je znázorněna závislost jejich tlumících sil na rychlosti pístu.[27]

- **Typ 96** – Použití jako primární a sekundární svislý tlumič nebo sekundární příčný tlumič. U tohoto tlumiče je uváděna doba životnosti větší než 1 200 000 km. Provozní teploty jsou od  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Maximální tlumící síla je 10 kN a maximální tlumící charakteristika je 60 kNs/m. Rozměr krytu je  $\text{Ø } 80\text{ mm}$  a rozměr hydraulické trubky je  $\text{Ø } 70\text{ mm}$ . [28]
- **Typ 02** - Má vlastnosti stejné jako typ 96, ale jeho maximální tlumící síla je 15 kN, maximální tlumící charakteristika je 600 kNs/m a rozměry jsou  $\text{Ø } 102\text{ mm}$  pro kryt a  $\text{Ø } 89\text{ mm}$  pro hydraulickou trubku. [29]
- **Typ 04** – Má opět podobné vlastnosti jako dva předchozí tlumiče. Maximální tlumící síla je 25 kN a maximální tlumící charakteristika je 1000 kNs/m. Rozměr krytu je  $\text{Ø } 120\text{ mm}$  a rozměr hydraulické trubky je  $\text{Ø } 108\text{ mm}$ . [30]



Obrázek 3.11 Graf odolnostní třídy tlumičů KONI, závislost tlumící síly na rychlosti pístu [27]

### 3.3.2 Strojírna Oslavany [31]

Jedná se o českou firmu, která se věnuje výrobě tlumičů pro kolejová vozidla, která najdou své uplatnění ve všech typech vypružení, kde pro danou aplikaci se vždy patřičně odlišují i ve zvolené konstrukci, aby co nejlépe vyhovovaly pro dané podmínky a využití.

Ve své základní nabídce nabízejí pět typů tlumičů, které ale mohou být dále přepracovány dle požadavku odběratele. U všech svých tlumičů uvádějí dovolenou operační teplotu v rozmezí od  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Na následujícím obrázku 3.12 je uveden řez tlumičem firmy Strojírna Oslavany, kdy přesněji se jedná o jejich řadu tlumičů P8.



Obrázek 3.12 Řez tlumičem řady P8 (Strojírna Oslavany) [31]

- **Řada tlumičů H8** – Jedná se o tlumiče, které se používají na sekundární příčné tlumení. Pracovní přepouštěcí systém je složen ze šoupátkových ventilů s vinutými pružinami. Největší vnější průměr tlumiče je 110 mm, maximální tlumicí síla je 25 kN a u tlumiče je možný rozsah zdvihů od 100 do 250 mm.
- **Řada tlumičů P8** – Tato řada tlumičů je určena pro sekundární tlumení ve svislém směru. Pracovní přepouštěcí systém se skládá z planžetových ventilů. Parametry této třídy tlumičů jsou následující. Největší vnější průměr tlumiče je 110 mm, tlumicí síla dosahuje hodnoty 25 kN a rozsah zdvihů je 100 až 250 mm.
- **Řada tlumičů P80** – V této řadě se jedná o tlumiče, které se používají v primárním vypružení a to ve svislém směru. Pro tuto řadu je specifická nízká hmotnost a malé zástavbové rozměry, protože maximální vnější průměr tlumiče je do 80 mm, dosahuje tlumicí síly rovné 14 kN a rozsah zdvihů je od 120 do 260 mm.



- **Řada tlumičů P110** – Výrobce tuto řadu tlumičů označuje jako hydraulickou náhradu třecích tlumičů, kde pracovní přepouštěcí systém se skládá z průtokových dýz a planžetových ventilů. Průměr tlumiče je do 110 mm, dosahuje tlumící síly 19 kN a rozsah zdvihů je 70-120 mm.
- **Řada tlumičů R110** – Jedná se o tlumiče vrtivých pohybů podvozku a kmitů skříně kolejového vozidla, kde pracovní propouštěcí systém se skládá z planžetových ventilů. Tlumič tlumí již při velmi malých rychlostech a to: 0,0026 m/s. Maximální průměr těchto tlumičů je 110 mm, dosahují tlumící síly rovné 25 kN a rozsah zdvihů je 70 až 560 mm.

Dále tato společnost nabízí speciální tlumiče a zařízení, které jsou určeny pro danou aplikaci. Ty jsou uvedeny v následujících bodech.

- **Rotační tlumiče** – Jedná se o tlumiče, které jsou určeny pro nízkopodlažní tramvaje, tedy vozidla s extrémně nízkou zástavbou, kde by za normálních okolností nebylo reálně využít klasických teleskopických tlumičů.
- **Tlumiče se senzorem polohy pístitnice** – Tlumiče na sobě nesou analogický nebo digitální senzor, který snímá polohu pístitnice. Pomocí řídicí jednotky je poté možné měnit výšku skříně, či úplně nouzové zastavení celé soupravy.
- **Hydraulické řídicí válce** – Díky těmto válcům dochází k menšímu opotřebení kolejí, protože usnadňují natočení podvozku do oblouku.

### 3.3.3 Hitachi [32]

V tomto případě se jedná o Japonského výrobce, který se zabývá vývojem různých součástí, které se týkají dopravy. Ve své nabídce nabízejí tlumiče pro využití jako tlumiče svislé a horizontální, tlumiče vrtění, tlumiče mezi vozy, tlumiče panrografů.

- **Svislé tlumiče** – Tyto tlumiče jsou použitelné jak v primárním, tak i sekundárním vypružení. V této sérii nabízejí 3 typy tlumičů, které se liší jak svou zástavbovou velikostí, tak i maximální dosažitelnou tlumící silou. Vnější průměry tlumičů jsou 83, 98 a 110 mm. Maximální tlumící síla v odpovídajícím pořadí je poté 5, 10 a 20 kN.
- **Příčné tlumiče** – V této kategorii jsou dva tlumiče, které mají vnější průměr 98 a 115 mm a tlumící síly jsou 12 a 15 kN.
- **Tlumiče vrtění** – Zde je nejširší škála nabízených tlumičů, kdy velikosti vnějších průměrů mohou být 106, 115, 127 a 144 mm a maximální dosažitelné tlumící síly jsou 12, 15, 18 a 20 kN.

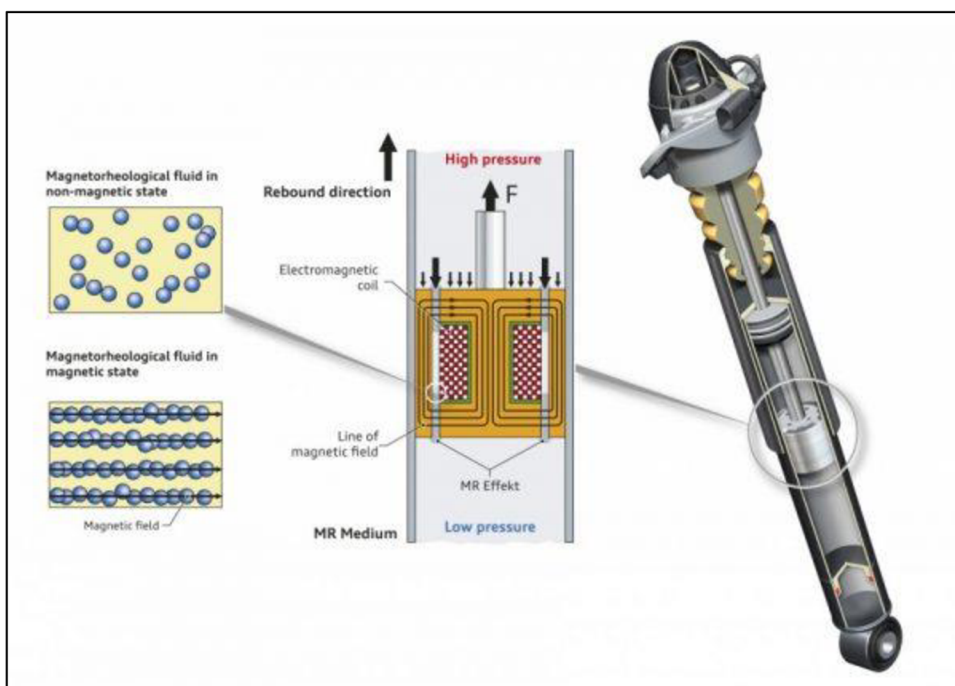
Následně je nutné minimálně zmínit některé z dalších výrobců tlumičů pro kolejová vozidla. Mezi tyto společnosti patří Suomen Vaimennin, Escorts, MSA, Knorr-Bremse.

## 3.4 Adaptivní hydraulické tlumiče

Adaptivní tlumiče lze rozdělit na dva hlavní typy, které se dnes v praxi používají. Prvním typem jsou magnetoreologické (dále jen MR) tlumiče a druhým jsou tlumiče využívající elektromagneticky řízený ventil. [33]

### 3.4.1 Magnetoreologický tlumič

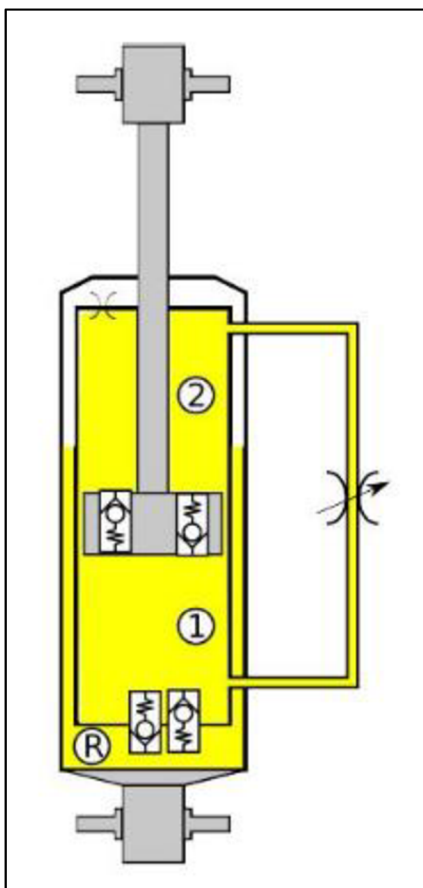
Jedná se o tlumič, který je naplněn MR kapalinou. Tato kapalina je speciální tím, že její viskozitu je možné ovlivňovat pomocí síly magnetického pole. Tato skutečnost je možná nazákladě obsažených kovových částic právě v MR kapalině. Magnetické pole je obvykle vytvářeno pomocí cívky, či cívek, do kterých je dodáván proud. Díky možnosti ovlivňování vstupního proudu na cívky je možné tyto tlumiče ovládat v reálném čase. Na obrázku 3.13 je znázorněn typický jednoplášťový MR tlumič. V levé části je znázorněn princip vlivu magnetického pole na kovové částice obsažené v MR kapalině, kde je ukázáno, že při působení magnetického pole jsou kovové částice soustředěny do membrán, které následně tvoří vnitřní odpor pro protékání kapaliny konstrukcí tlumiče. [33]



Obrázek 3.13 Adaptivní MR tlumič [34]

### 3.4.2 Tlumiče s elektromagnetickým ventilem

Jedná se o častější řešení adaptivních tlumičů. Jedná se o tlumič, ke kterému je připojen elektromagnetický ventil, jež je schopný ovládat průtok hydraulického média tlumičem. Tyto elektromagnetické ventily jsou napojeny na elektronickou kontrolní jednotku, která je schopna vysílat potřebné informace do ventilů na základě podnětů z kontrolního algoritmu, který je vytvářen na základě několika senzorů rozmístěných po celém vozidle. Na následujícím obrázku 3.14 je znázorněno schéma typického tlumiče tohoto druhu. [33]



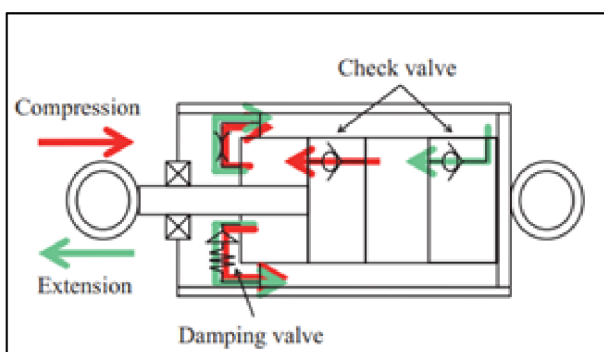
Obrázek 3.14 Adaptivní tlumič s elektromagnetickým ventilem [33]

## 3.5 Konstrukce adaptivních tlumičů

Na úvod této kapitoly je důležité zmínit, že adaptivní tlumiče blíže rozebírané v této práci jsou obvykle součástí semi-aktivně řízeného systému. Tyto systémy se následně dají členit dle dosažitelné odezvy při přepínání tlumících charakteristik tlumičů na systémy rychlé a pomalé.

### 3.5.1 Guo – Twin-tube and bypass-containing magneto-rheological damper for use in railway vehicles [35]

V tomto článku byl zkonstruován, vyroben a testován MR tlumič pro podvozek kolejového vozidla. Jedná se o konstrukci dvouplášťového tlumiče s vnějším obtokovým MR ventilem s radiálním průtokem. Tento typ konstrukce umožňuje větší zdvih než tlumič jednoplášťový při zachování stejné zástavbové délky. Díky speciálnímu průtoku kapaliny („single-flow“) jsou zlepšovány podmínky, které vedou ke snížení sedimentace MR kapaliny v tlumiči. Na následujícím obrázku 3.15 je znázorněno schéma funkce tlumiče, kde je pomocí červené barvy znázorněn průtok MR kapaliny při stlačení pístnice a zelenou barvu je znázorněn průtok při roztažení.

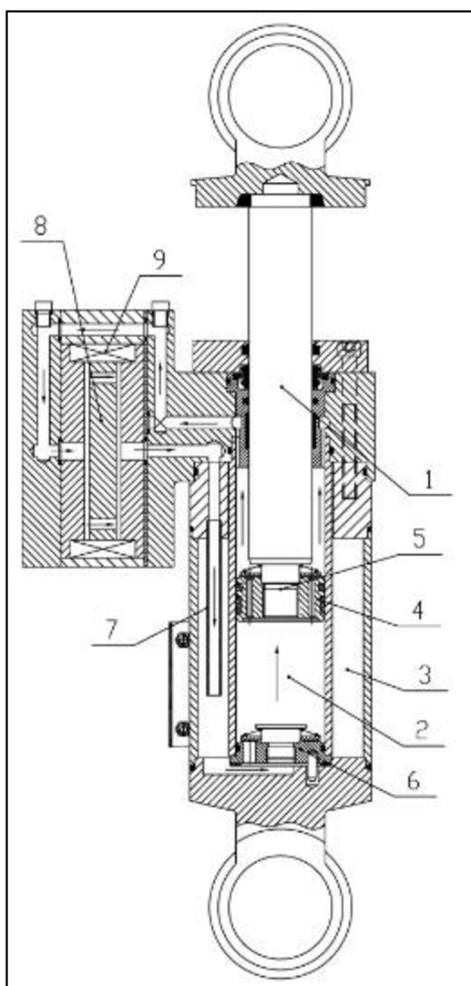


Obrázek 3.15 Schéma průtoku MR kapaliny: „single-flow“ [36] (Převzato)

U tlumiče je využíváno dvouplášťového provedení, kde je jedna hydraulická trubka uvnitř druhé, jak je možno vidět na obrázku 3.16. Většina komerčně dostupných pasivních hydraulických tlumičů využívá právě konstrukci s dvojitou hydraulickou trubkou. Nicméně pro MR tlumiče není tato dvouplášťová konstrukce hojně užívána. Problémový je zde patní ventil, který odděluje obě komory a je díky němu umožněn průtok MR kapaliny. Z důvodu možného usazení kovových částic obsažených v MR kapalině právě v patním ventilu může vést až ke znehodnocení funkce tlumiče z důvodu nedokonalého uzavření ventilu.

Při návrhu tlumiče musely být vzaty v potaz určité podmínky, které jsou nutné dodržet, aby byl tlumič vhodný pro danou aplikaci u kolejových vozidel. U tlumiče bylo potřeba dosáhnout dostatečně velkého rozsahu dynamické tlumící síly, aby bylo zaručeno dostatečného zabezpečení proti selhání, a kompresní a tahové síly by měly být symetrické.

Prostor k připevnění tlumiče je omezený, ale i přes to musí mít velký zdvih. Během výroby by se také mělo vyvarovat vrtání hlubokých děr do pístnice a tlumič by měl být lehký a opravitelný. Obtokový MR ventil vykazuje dobrou tepelnou odolnost a prezentuje se svou jednoduchou instalací a opravitelností. Z důvodu vytvoření vyššího MR odporu pro danou délku ventilu byl použit MR ventil s radiální průtokovou dráhou. Schéma tlumiče je možno vidět na Obrázku 3.16. U tohoto tlumiče jsou použity dvě hydraulické trubky (3,4). Obtokový MR ventil (8) je připojen k hydraulickému válci. Vnitřní hydraulická trubka (2) je rozdělena pomocí pístu (5) na dvě komory. Součástí pístu je také zpětný ventil, který má dvě pozice: otevřeno/zavřeno. Do MR ventilu je instalována cívka (9), která je určena k tvorbě magnetického pole. Spojovací trubice (7) zajišťuje, aby MR kapalina nepřetržitě proudila mezi vnitřní a vnější hydraulickou trubkou, kdy nezáleží na poloze tlumiče. Vnější hydraulická trubka je připojena ke kompresi komoře pomocí zpětného ventilu. Vnitřní hydraulická trubka a MR ventil jsou plně naplněny MR kapalinou, na rozdíl od vnější hydraulické trubky, ve které se nachází mimo MR kapalinu i určitý objem vzduchu.



**Obrázek 3.16** Schéma MR tlumiče (Guo): 1) pístnice; 2) vnitřní hydraulická trubka; 3) vnější hydraulická trubka; 4) pístní ventil; 5) píst; 6) zpětný ventil; 7) spojovací trubice; 8) MR ventil; 9) cívka [35]

U tlumiče mohou nastat dva stavy:

1. Při roztažené pístnici je ventil pístu zavřen a MR kapalina je tlačena do MR ventilu a následně do vnější hydraulické trubky přes spojovací trubici. Tlak ve vnější trubce je větší a zároveň je ve stlačovací komoře vytvářen podtlak. Zpětný ventil spojující stlačovací komoru a vnější trubku je otevřen, což umožňuje nasávání MR kapaliny z vnější trubky do stlačovací komory.
2. Při stlačené pístnici je zpětný ventil uzavřen a MR kapalina nemůže protékat mezi vnitřní a vnější trubkou. Při otevřeném písním ventilu MR kapalina teče ze stlačovací komory do odrazové komory, následně do MR ventilu, nakonec do vnější hydraulické trubky.

V následující tabulce jsou uvedeny technické parametry navrženého tlumiče. Pro tlumič byla požadována maximální tlumící síla 9 kN. Dalším požadavkem bylo vytvoření dostatečných viskózních tlumících sil, které by v případě porušení cívky zajistily požadovanou bezpečnost tlumiče.

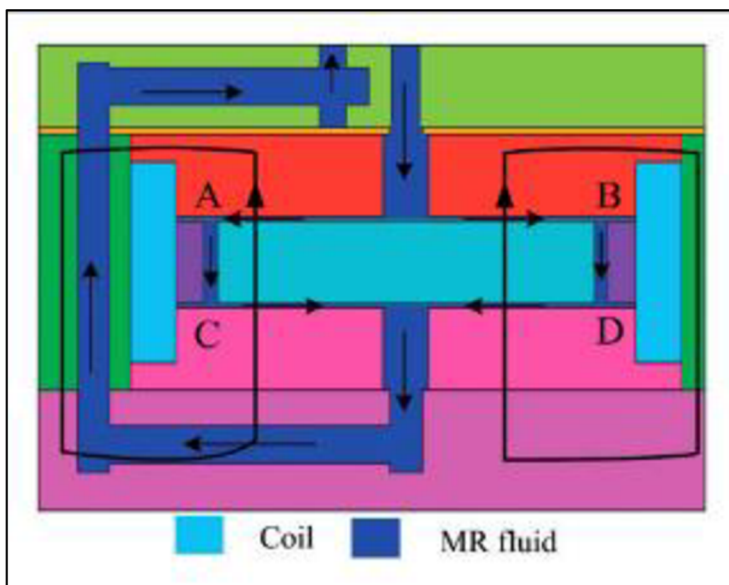
<b>Parametr</b>	<b>Hodnota</b>
Zdvih	114 mm
Průměr válce	101 mm
Délka válce	170 mm
Vnější průměr pláště	92 mm
Vnitřní průměr pláště	50 mm
Průměr pístnice	35,4 mm
MR ventil	145 x 130 x 85 mm
Průměr mezery	100 mm
Šířka štěrbin	0,8 mm
Cívka	450 závitů
Odpor cívky	10 $\Omega$

**Tabulka 3.1** Parametry MR tlumiče [35]

Hlavní součástí MR tlumiče je jeho MR ventil, protože právě zde se objevuje MR efekt. V MR ventilu je možné ovlivňovat výslednou tlumící sílu tlumiče pomocí změny magnetického pole vytvářeného cívkou, což má za výsledek změnu zdánlivé viskozity MR kapaliny. Při práci tlumiče MR kapalina proudí do MR ventilu. Zde je nainstalovaná překážka, která MR kapalinu rozdělí a dále protéká dvěma štěrbinami, které vedou skrz vytvořené magnetické pole. Následně se MR kapalina spojí a odtéká do vnější hydraulické trubky. Během tohoto procesu směr proudu MR kapaliny je vždy kolmý k magnetickému poli. Pro MR ventil je velice důležitý magnetický obvod a generovaná hustota magnetického toku musí být dostatečně velká, aby dodala potřebnou energii do MR kapaliny. Pro vytvoření 3D modelu MR ventilu a následnou analýzu magnetického pole byl použit software ANSYS 13.0. Na obrázku 3.17 je možno vidět řez modelem MR ventilu. Modrá oblast je

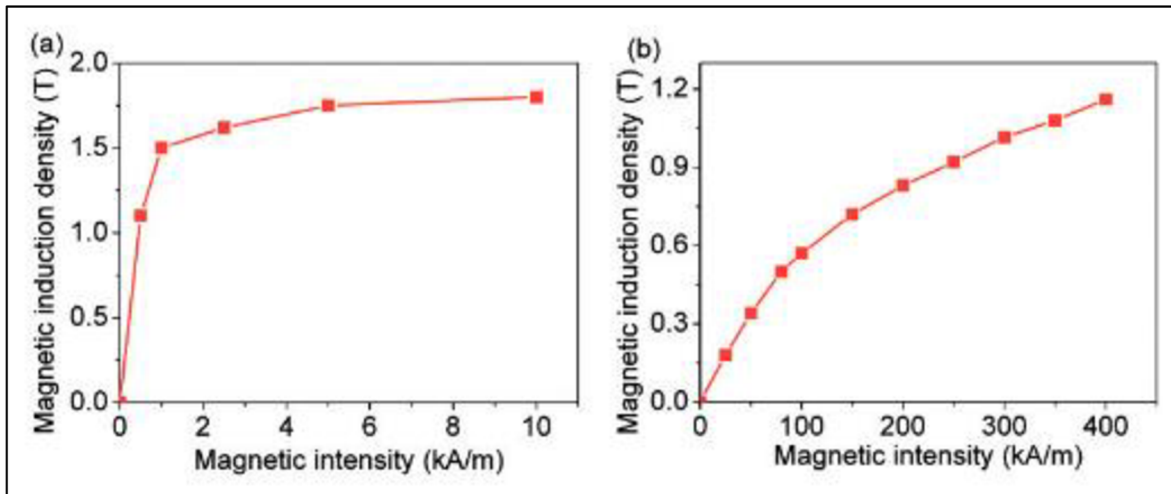


MR kapalina, tmavě modrá oblast je cívka a ostatní oblasti jsou elektricky čisté železo (#DT3).



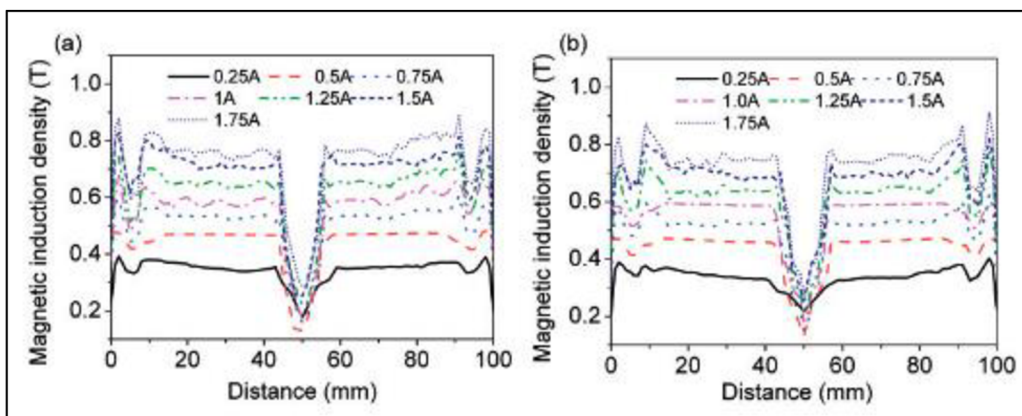
Obrázek 3.17 Řez modelem MR ventilu (šipky ukazují směr tečení) [35]

B-H křivky, které ukazují závislost mezi intenzitou magnetického pole a magnetickou indukcí jsou vykresleny v grafech na obrázku 3.18.



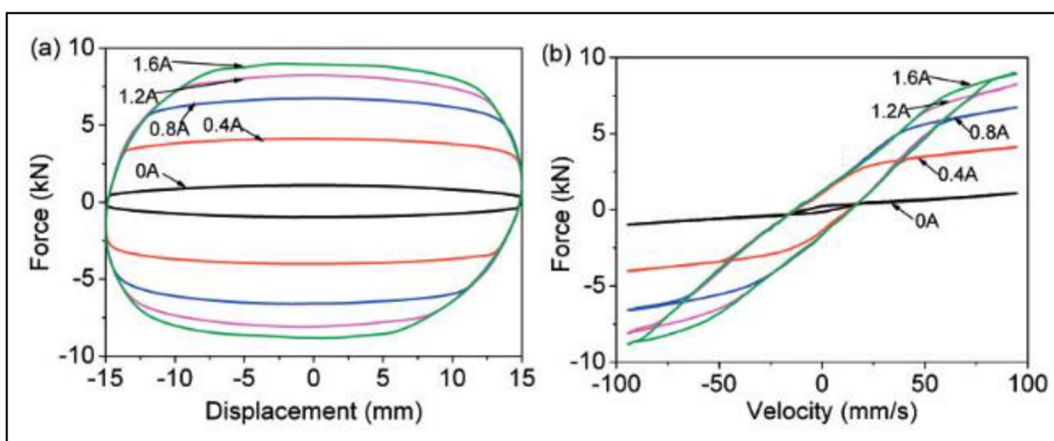
Obrázek 3.18 B-H křivky (a) MR kapalina; (b) elektricky čisté železo [35]

Následným zpracováním byly vytvořeny dvě smyčky AB a CD v zónách MR efektu dle obrázku 3.19.



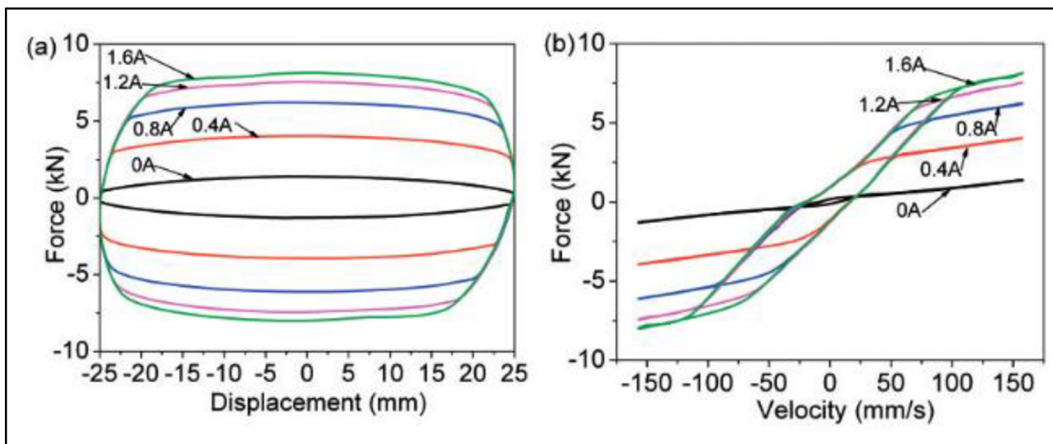
Obrázek 3.19 Distribuce hustoty magnetického toku: (a) smyčka CD; (b) smyčka AB pro různé proudy [35]

MR tlumič byl podroben testu s harmonickým buzením nejdříve s frekvencí 1 Hz a amplitudou 15 mm (obrázek 3.20) a poté s frekvencí 1 Hz a amplitudou 25 mm (obrázek 3.21). Test byl prováděn pro různé elektrické proudy v rozsahu od 0 A do 1,6 A. Na základě vykreslených závislostí lze vidět závislost mezi zvyšujícím se proudem a tlumící silou. Pokud není na cívku přiváděn proud, tlumící síly dosahují síly téměř 1 kN, naopak při vstupním proudu rovném 1,6 A dosahují tlumící síly hodnot 9 kN při rychlosti 80 mm/s. Za těchto podmínek je dynamický rozsah tlumící síly roven devíti. Při srovnání obou testů došli k výstupu, že pokud je vstupní proud roven nule, tak lepších výsledků dosahuje test s amplitudou 25 mm. Když byl ale přiveden proud na cívku, tak test s amplitudou 15 mm dosahoval vyšších tlumících sil, což je mimo jiné zřejmě hlavně způsobeno smykovým řídnutím MR kapaliny. V závislosti na rostoucím smyku se smykové napětí kapaliny snižuje a tím pádem se celková tlumící síla tlumiče také snižuje.



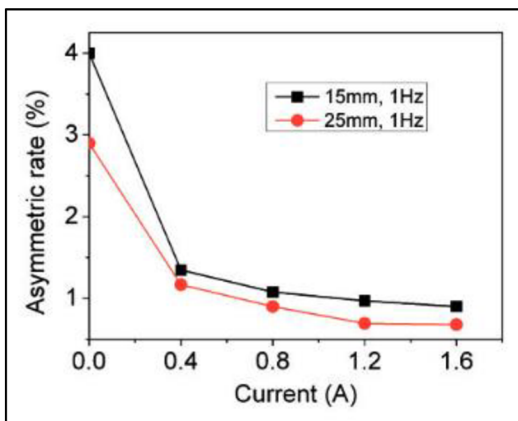
Obrázek 3.20 Tlumící charakteristiky pro amplitudu 15 mm [35]





Obrázek 3.21 Tlumící charakteristiky pro amplitudu 25 mm [35]

U tlumiče dochází k výskytu určitých asymetrií v tlumících silách. Tento jev se u tlumiče vyskytuje z důvodu rozdílných tlaků u stlačení a roztážení tlumiče. Rozdíl je způsoben rozdílným objemovým tokem. Pro nulový vstupní proud u amplitudy 15 mm je úroveň asymetrie až okolo 4 %, ale po přivedení proudu na cívku se hodnota asymetrie postupně blíží k 1 %.



Obrázek 3.22 Úroveň asymetrie u tlumících sil [35]

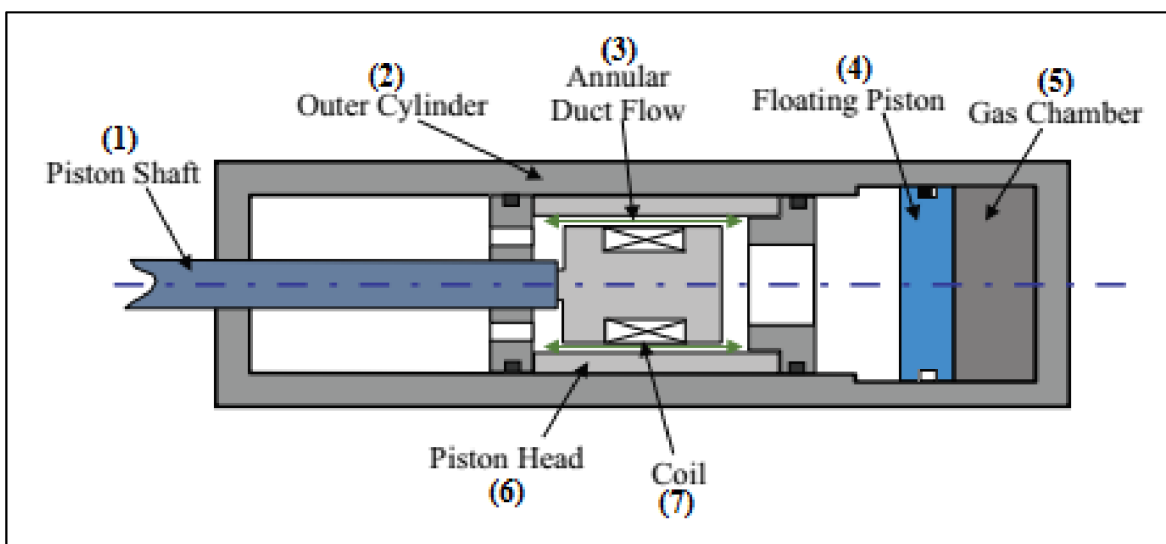
Se zvyšujícím se přiváděným proudem roste hustota magnetického toku a maximální hodnota magnetické indukce dosáhla hodnoty 0,8 T při proudu rovno 1,7 A. Za uvažovaného proudu je hustota magnetického toku konstantní ve všech částech, kromě míst, kde MR kapalina vtéká a vytéká z ventilů. Pro zvolený proud jsou hustoty magnetického toku přibližně stejné u obou disků. Tato skutečnost ukazuje na to, že magnetická konstrukce je efektivní a že tento magnetický obvod odpovídá požadavkům.

V této práci byl vyvinut MR tlumič, u kterého bylo na základě testů dokázáno, že je dostatečně vhodný pro použití u podvozků kolejových vozidel, kterého maximální tlumící síla je 9 kN a dynamický rozsah je roven devíti. Výhody konstrukce tlumiče je velký zdvih a jednoduchost výroby. Díky speciální konstrukci MR ventilu se ušetřilo zástavbové

místo. Speciální jednosměrná průtoková cesta zabráňuje sedimentaci v MR tlumiči. Analýza ukázala, že plocha pístnice musí být stejná jako plocha pístu, což vede k tomu, že tlumící síla je symetrická během zdvihů. Nesymetrická část síly vytvořená tlumičem byla určena na méně než 4 %. Reakční čas MR tlumiče byl určen na 0,3 s.

### 3.5.2 Oh – Vibration control of a semi-active railway vehicle suspension with magneto-rheological dampers [37]

První cílem bylo vytvoření matematického modelu železničního vozidla, na základě kterého se získaly potřebné parametry pro sestavení funkčního vzorku pro následné testování. Řešený tlumič je namontován mezi podvozek a skříň vozu. Na obrázku 3.23 je možné vidět schéma tlumiče.



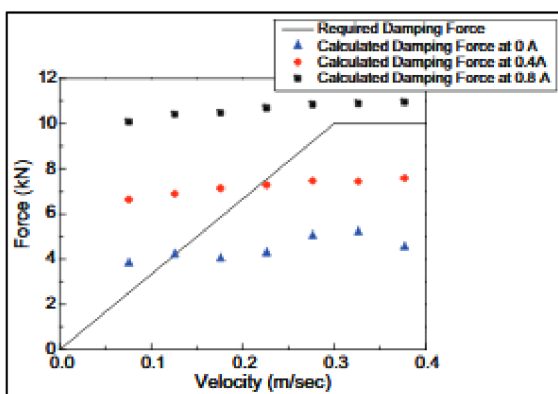
Obrázek 3.23 Schéma MR tlumiče (Oh) [37] (Upraveno)

Tlumič se skládá z pístnice (1), vnějšího válce (2), štěrbin, která realizuje prstencový průtok MR kapaliny tlumičem (3), plovoucího pístu (4), plynové komory (5), objímky pístu (6), cívky (7). Objímka pístu odděluje vnitřní prostor tlumiče na dvě části: horní a dolní komoru. Pro kompenzaci změny objemu způsobeného pohybu pístu je součástí tlumiče plynová komora a plovací píst. MR kapalině je konstrukcí tlumiče umožněno protékat skrze štěrbinu, která je vytvořena mezi cívkou a objímkou pístu. Během práce tlumiče je generovaná tlumící síla především výsledkem vnitřního tření MR kapaliny. Toto tření je definováno geometrií tlumiče, rychlostí a smykovým napětím MR kapaliny. Kde právě smykové napětí MR kapaliny může být měněno v závislosti na síle magnetického pole, které je tvořeno cívkou. Tlumící síly tlumiče lze rozdělit na čtyři komponenty. Jedná se o síly vzniklé vnitřním třením kapaliny, ovladatelné síly, sílu pružiny indukovanou pomocí plynové komory a mechanické třecí síly. Následně byl pro tlumič vyroben model pro určení tlumících sil. Tento model měl určité předpoklady. Prvním je fakt, že mechanická třecí síla

je považována za nulovou, dále použitá MR kapalina je nestlačitelná, MR kapalina je v ustáleném stavu a průtok kapaliny je laminární. Dále je také v modelu zanedbána teplotní ztráta.

Jelikož se jedná o tlumič, který by měl být použit u vysokorychlostních vlaků, je potřeba docílit vysoké tlumicí síly, se kterou se dostaví i patřičná bezpečnost při rychlé jízdě. Maximální tlumicí síla tlumiče je 10 kN a maximální míra tlumení je 60 kNs/m.

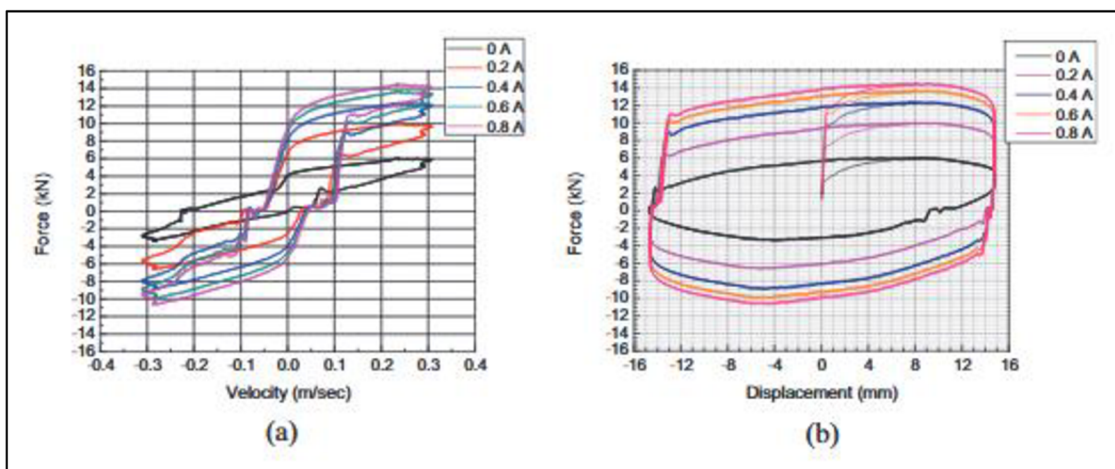
Na obrázku 3.24 je znázorněna závislost tlumicí síly na rychlosti, kde jsou vyznačené naměřené tlumicí síly (značky) získané z modelu a tlumicí síla, které tlumič potřebuje dosáhnout (čára), aby se jej dalo považovat za použitelný.



Obrázek 3.24 Vypočítaná tlumicí síla [37]

Tlumič v této práci byl tedy navržen s následujícími parametry. Poloměr MR ventilu je 28 mm. Délka magnetického pole je 34 mm a štěrbina je 1 mm.

Na základě vypočítaných a stanovených vstupních hodnot byl následně tlumič vyroben a dále byla testována jeho tlumicí charakteristika. Naměřené hodnoty během testů byly zaznamenány do grafů na obrázku 3.25.



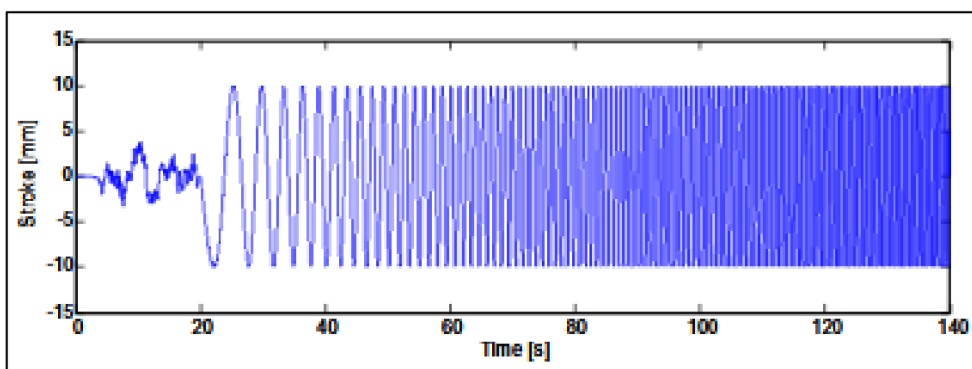
Obrázek 3.25 Naměřené tlumicí charakteristiky: (a) závislost tlumicí síly na rychlosti; (b) závislost zdvihu na tlumicí síle [37] (Upraveno)

### 3.5.3 Spelta – Smart-bogie: Semi-active lateral control of railway vehicles [38]

V tomto výzkumu se řešila konstrukce vypružení kolejového vozidla, kde bude jeho součástí semi-aktivní 4-úrovňový elektro-hydraulický tlumič. Jedná se o prototyp, který byl vyvinut firmou ISOCOMP S.p.A. (Marano sul Panaro (MO), Itálie) a byl speciálně upraven pro tuto aplikaci.

Tlumič je vybaven interní elektronickou řídicí jednotkou, která ovládá elektro-hydraulický ventil. Řídicí jednotka vozidla musí jednoduše poskytnout „žádost o úroveň tlumení“ pomocí sběrnice CAN na čtyřech úrovních. Díky své vestavěné elektronické řídicí jednotce se tento tlumič řadí mezi „chytré“ tlumiče. U tlumiče byly prováděny testy, které charakterizovaly jeho vlastnosti a případné možné využití. Aby se zanalyzovaly všechny čtyři tlumicí charakteristiky tlumiče (L0, L1, L2, L3), byl tlumič testován na zařízení, které vyvolává dlouhé harmonické signály, kdy je možné měnit frekvenci.

Budicí signál užitý při testech, který je znázorněn na obrázku 3.26 byl následně opakován u všech čtyřech tlumících charakteristik. Jedná se o harmonické buzení o amplitudě 10 mm. Testy byly prováděny na spektrum frekvence od hodnoty 0,1 Hz do 2 Hz. Na obrázku 3.26 lze vidět rozdílný tvar křivky v prvních 20 sekundách testu, což odpovídá času, ve kterém se musel tlumič předeřhát, aby naměřené hodnoty odpovídali jeho nominálním hodnotám, které jsou určovány při nominální teplotě tlumiče.

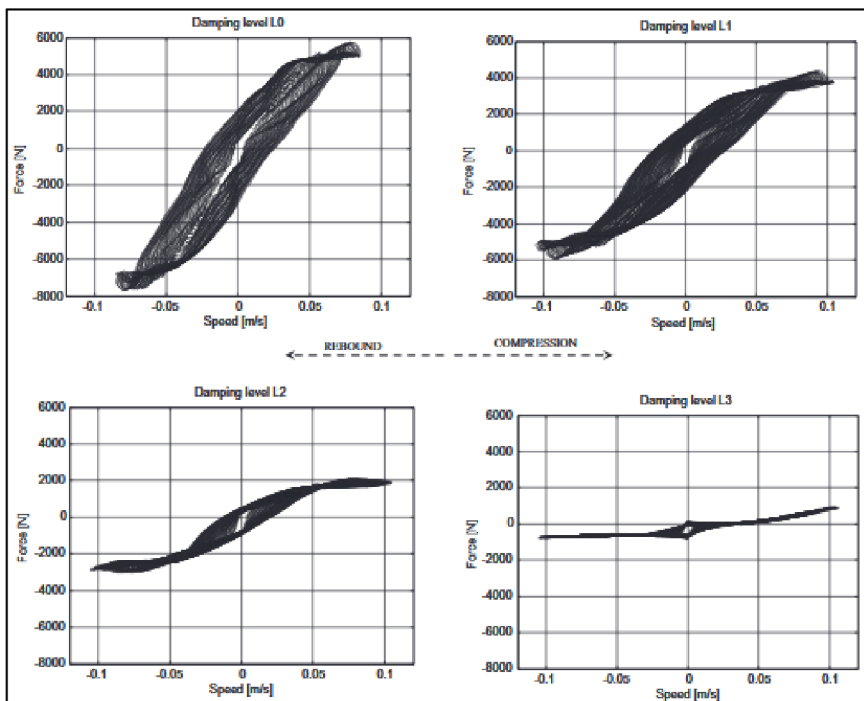


Obrázek 3.26 Budicí signál pro charakterizaci tlumiče [38]

Výsledné hodnoty získané z testů byly zaznamenány do grafů, které jsou znázorněny na obrázku 3.27. V grafech je vykreslena závislost tlumicí síly na rychlosti.

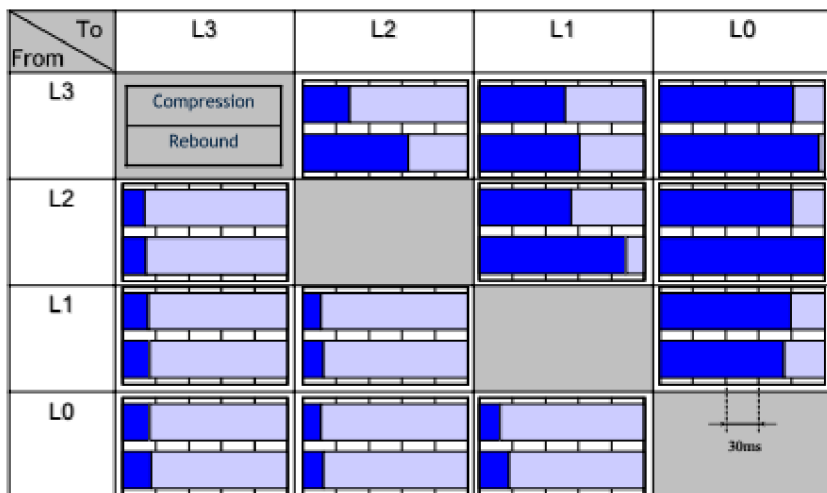
Prozkoumaný rychlostní rozsah je  $\pm 10$  cm/s. Odpovídající síla dodávaná tlumičem je v dosahu  $\pm 8$  kN pro křivku s maximálním tlumením. Kontrolovatelný tlumicí rozsah je velmi velký. Důležitou vlastností z konstrukčního hlediska je, že dosahuje poměru okolo 1:8 mezi dosaženou silou u tlumících úrovní L3 a L0. Z rychlostní charakteristiky lze také vidět, že chování tlumiče je silně nelineární a lze pozorovat, že se zvyšujícím se tlumícím poměrem se hysterezní chování stává více výrazným. Především na křivce L3

Ize také vysledovat určitou nesymetričnost, která je především způsobena malou plynovou pružinou umístěnou v tlumiči.



Obrázek 3.27 Závislost tlumicí síly na rychlosti vzniklé harmonickým buzením v rozmezí 0,1 – 2 Hz [38]

Další velice podstatnou částí je, jak rychle je u tlumiče možné měnit a přeskakovat z jedné tlumicí charakteristiky na druhou. Výsledky tohoto měření jsou následující. Doba přeměny není konstantní a pohybuje se od 20 ms do 150 ms. Měnicí časy jsou při obou stavech tlumiče přibližně stejné, nicméně pokud nastane rozdíl, u stlačovací fáze bývá čas trochu delší. Přeměna z vyšší úrovně na úroveň nižší je mnohokrát rychlejší než naopak. Časy přeměn u jednotlivých úrovní jsou znázorněny na obrázku 3.28.

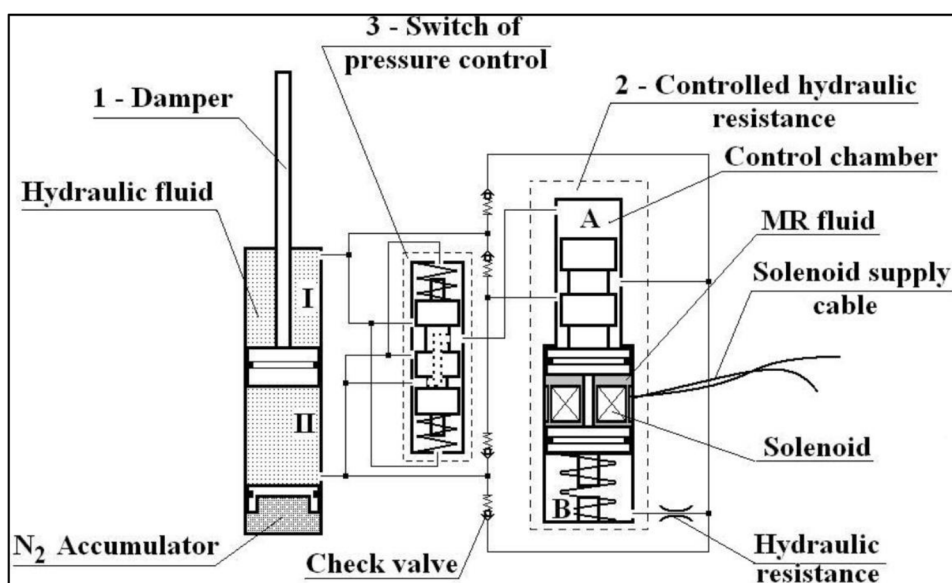


Obrázek 3.28 Měnicí rychlosti za konstantního zdvihu 0,05 m/s [38]



### 3.5.4 Dan – A magneto rheological hybrid damper for railway vehicles suspension [39]

Na základě požadavku, aby se zvýšila efektivita kolejového vozidla, byly nainstalovány a testovány čtyři MR ovladatelné tlumiče mezi podvozek a rám vozu. Jedná se o hybridní MR tlumiče, které jsou rozděleny na dvě hlavní části. První část je hydraulická a druhá část je magnetoreologická. V hydraulické části dochází k tvorbě tlumení a za pomoci MR části je možné toto vzniklé tlumení ovládat. Tento typ tlumiče má určité výhody, jako jsou např.: snížení ceny z důvodu použití menšího objemu kapaliny, také má sníženou hmotnost a celkově jsou svou stavbou podobné standardním pasivním tlumičům. Na obrázku 3.29 je možné vidět schéma hybridního MR tlumiče užitého v této práci.



Obrázek 3.29 Hybridní MR tlumič (Dan) [38]

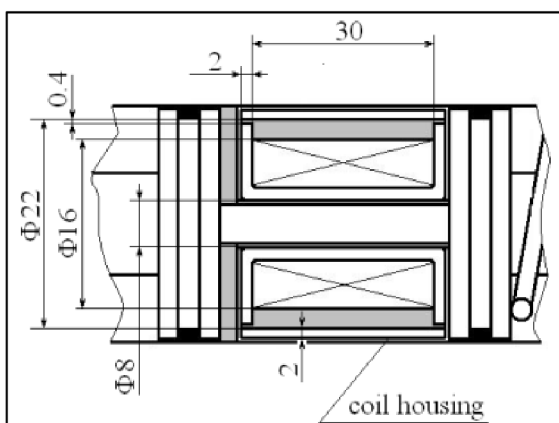
Tento tlumič pracuje na principu, kdy tlaky v komorách I a II jsou ovládány pomocí tlakového spínače MR zařízením (2 – Controlled hydraulic resistance). Pro ovládání tlumících sil jsou na vozidle nainstalovány rychlostní a pohybové senzory, které monitorují nastalý stav v reálném čase. Pokud nastane stav, kdy pohyb a rychlost jsou opačného znaménka, senzory vyšlou signál a následně je do elektromagnetického ventilu dodáván proud, což zahájí reakci v MR kapalině. Intenzita proudu je dodávána tak, aby síly vznikající v komoře B a síly získané odporem MR kapaliny dodaly potřebný tlak do komory A, díky kterého je pohybováno s pístem, a to do té doby, než průtok mezi komorami I a II zajistí dostatečný rozdíl tlaků, který vyprodukuje potřebnou tlumící sílu, která je požadována na základě kontrolního algoritmu. MR zařízení je řešeno jako píst s dvojitým koncem a pevným elektromagnetickým ventilem namontovaným ve válci. Takto připevněný elektromagnetický ventil zajistí, že jeho napájení se nemusí pohybovat, což vede k ulehčení konstrukce.

Pro testování tlumiče byly zvoleny následující vstupní hodnoty:

- Maximální rychlost pístu: 0,015 m/s
- Maximální zdvih: 5 mm
- Vnitřní průměr zařízení: 22 mm
- Průměr pístnice: 8 mm
- Pracovní teploty: -20 °C až 150 °C
- Typ MR kapaliny: MRF-132LD

Následně byly stanoveny další parametry na základě použité MR kapaliny:

- Smyková rychlost: 140 s<sup>-1</sup>
- Maximální intenzita magnetického pole: 250 kA/m
- Viskozita kapaliny: 0,25 Pa.s
- Mez kluzu: 44,1 kPa

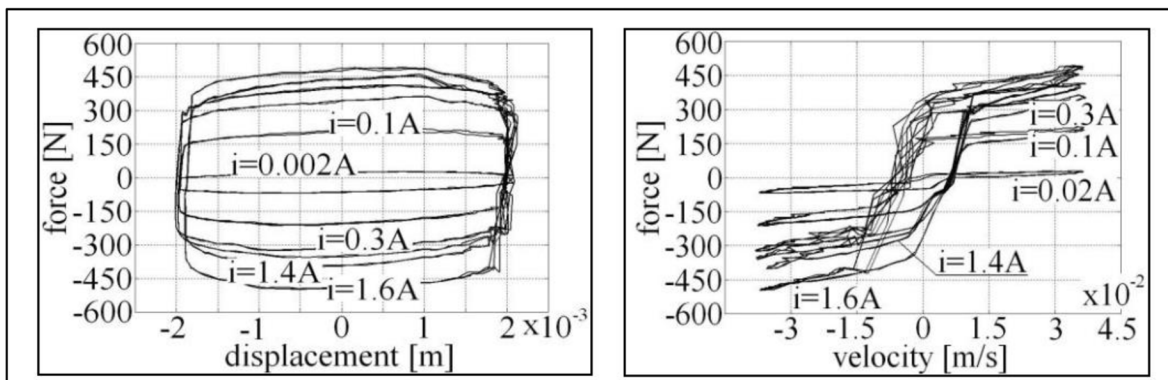


Obrázek 3.30 Elektromagnetický ventil [38]

Cílem je dosáhnout co nejlepší ovladatelnosti zařízení, čehož se má dosáhnout maximalizací koeficientu dynamického rozsahu a minimalizací objemu MR kapaliny. Na základě toho byla získána potřebná šířka štěrbiny mezi pístem a vnitřním průměrem válce. Dále byly vypočítány parametry MR zařízení za předpokládaného vstupního proudu 1,5 A. Vypočtené parametry MR zařízení jsou:

- Šířka štěrbiny: 0,4 mm
- Celková síla zařízení: 406,7 N
- Počet pólů: 2
- Šířka pólu: 2 mm
- Maximální průměr elektromagnetického ventilu: 16 mm
- Délka elektromagnetického ventilu: 30 mm
- Průměr drátu: 0,6 mm

Na základě zvolených a získaných parametrů byly provedeny experimenty, ze kterých vznikly diagramy uvedené na obrázku 3.31. Při testech byla použita maximální hodnota proudu 1,6 A což mimo jiné vedlo ke zvýšení síly působící na zařízení, než jaká byla očekávána.

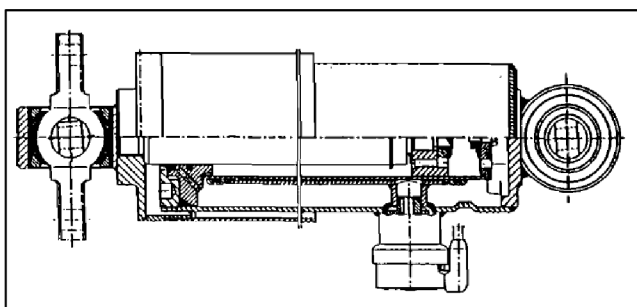


Obrázek 3.31 (1) Vlevo – Závislost zdvihu na síle; (2) Vpravo – Závislost rychlosti na síle [38]

Za účelem zvýšení bezpečnosti a pohodlí pro cestující v kolejových vozidlech autoři této práce navrhují nový typ adaptivního vypružení ovládaného pomocí zařízení, které obsahuje MR kapalinu. Navrhovaný systém by měl umožnit přeměnit každý hydraulický tlumič v tlumící systém se semi-aktivním ovládním.

### 3.5.5 Stribersky – Design and Evaluation of Semi-Active Damping System for Rail Vehicles [40]

Výzkumná práce se zabývá vývojem adaptivního tlumícího systému používaného na kolejových vozidlech. Pro dosažení lepších jízdních a bezpečnostních vlastností používají strategii ovládní „skyhook“<sup>1</sup>. Pro testy byl použit adaptivní tlumič od Fitchel & Sachs AG. Řez tlumičem je na obrázku 3.32.

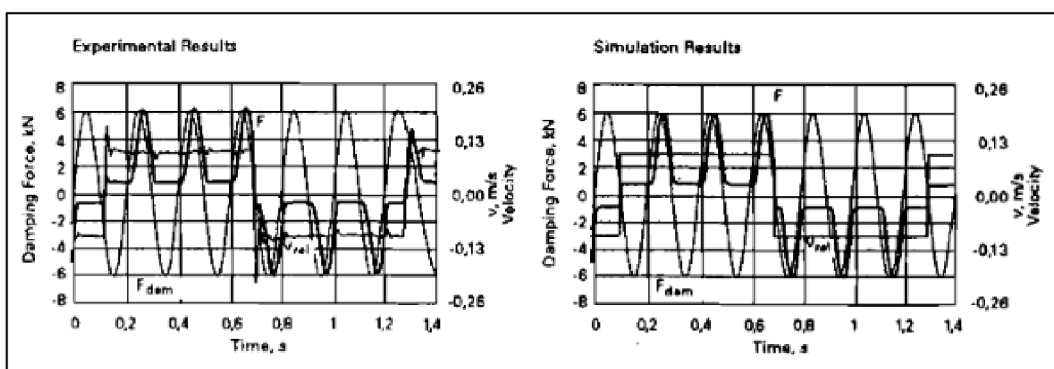


Obrázek 3.32 Řez tlumičem (Stribersky) [40]

<sup>1</sup> Jedná se o kontrolní algoritmus, který souvisí s vytvoření konstrukce aktivního vypružení podvozku tak, že podvozek je „připojen“ k nebi za účelem snížení chvění podvozku a nápravy kol ve svislém smyslu nezávisle na sobě. [46]



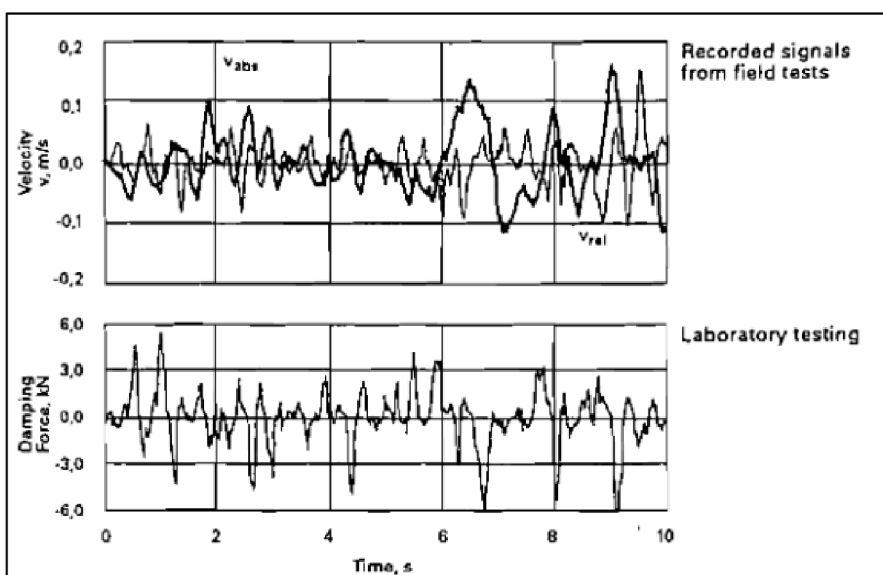
Za pomoci změny průtoku v rychločinném škrtkicím ventilu lze na tomto tlumiči ovládat v reálném čase tlumící sílu. Na tlumiči byl proveden silový test, aby se zjistilo, zda je tlumič schopen dodržet požadovaný silový signál, výsledné grafy jsou znázorněny na obrázku 3.33.



Obrázek 3.33 Silový test [40]

Na levém snímku je znázorněna naměřená tlumící síla, na základě které je možno pozorovat požadovaný silový signál o amplitudě 6 kN při frekvenci 5 Hz. Na základě znaménka u relativní rychlosti se tlumič mění mezi požadovaným silovým signálem a minimální tlumící rychlostí. Při uzavírání ventilu byla naměřena odezva o hodnotě 27 ms, než tlumič dosáhl požadované tlumící síly. Při opačném procesu, otevírání, tlumič dosahuje odezvy 15 ms.

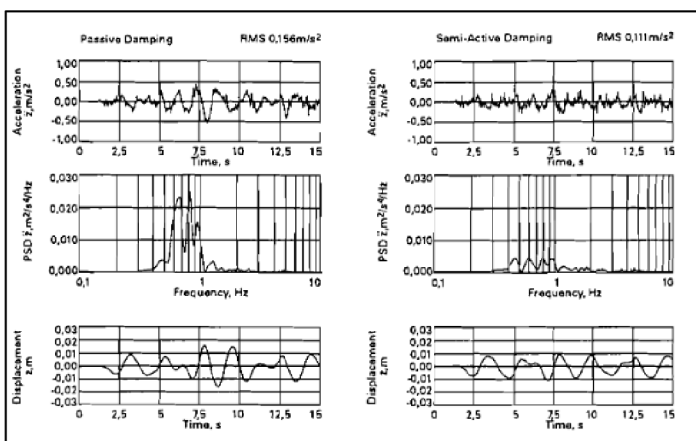
Při dalším testu byla zaznamenávána tlumící síla vozidla, které se pohybovalo po přímě trati s nerovnostmi. Signál relativní rychlosti zdvihu tlumiče a signál absolutní rychlosti byly zaznamenány v předešlém testování vozidla a následně byly použity při laboratorních testech. Časová závislost tlumící síly ukazuje velmi rychlý výkon adaptivního tlumiče.



Obrázek 3.34 Časová závislost tlumící síly [40]

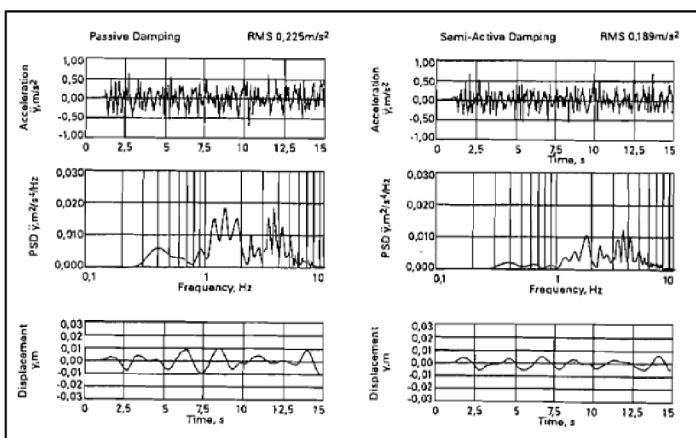
Když u tlumiče dojde ke stlačení, či roztažení dochází ke generování hydraulického průtoku skrz regulovatelný ventil. Tento ventil následně vytváří tlakový rozdíl mezi horní a dolní částí pístu v závislosti na vstupním proudu. Možnost měnit vstupní proud tedy dodává tlumiči vlastnost jej ovládat v reálném čase mezi tvrdým a měkkým nastavením. Vstupní proud závisí na absolutní rychlosti a aktuální relativní rychlosti tlumiče.

Na podvozku kolejového vozidla s aplikovaným semi-aktivním systémem byly provedeny dvě simulace. První pro změnu jízdních kvalit ve svislém směru, druhý pro změnu jízdních kvalit ve vodorovném směru. Tyto simulace byly provedeny za rychlosti vozidla rovné 250 km/h, kdy se pohybovalo po přímé trati. Pro porovnání byla zkoumána dvě vozidla, jedno s původním pasivním vypružením a druhé s novým semi-aktivním systémem. Z obrázku 3.35 lze vyčíst, že bez snížení vysokofrekvenčního výkonu lze snížit velikost rezonance. Díky systému také dochází ke snížení RMS zrychlení a skříň vozidla může být lépe stabilizována.



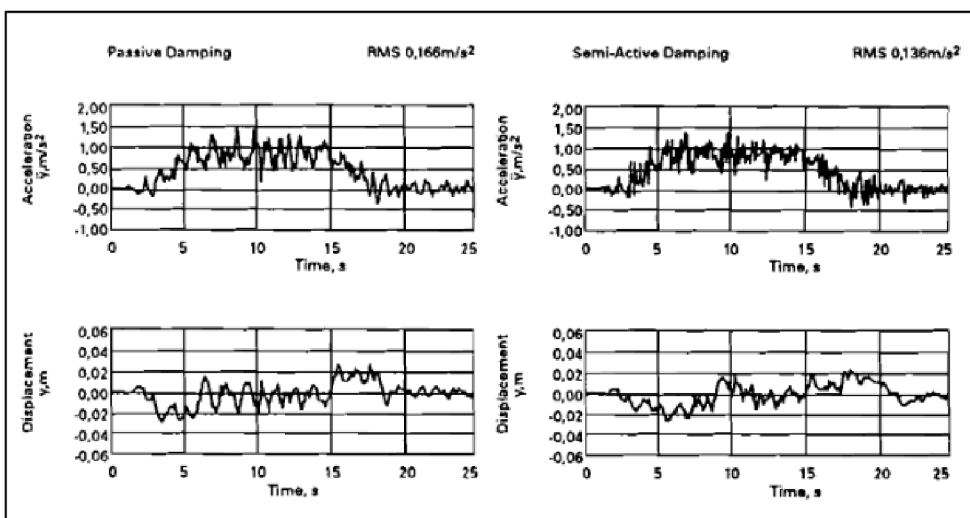
Obrázek 3.35 Jízdni vlastnosti ve svislém směru [40]

Jak je možno vidět na obrázku 3.36, tak i u vodorovného směru dochází k lepší stabilizaci u semi-aktivního systému, stejně jako dochází ke snížení RMS zrychlení.



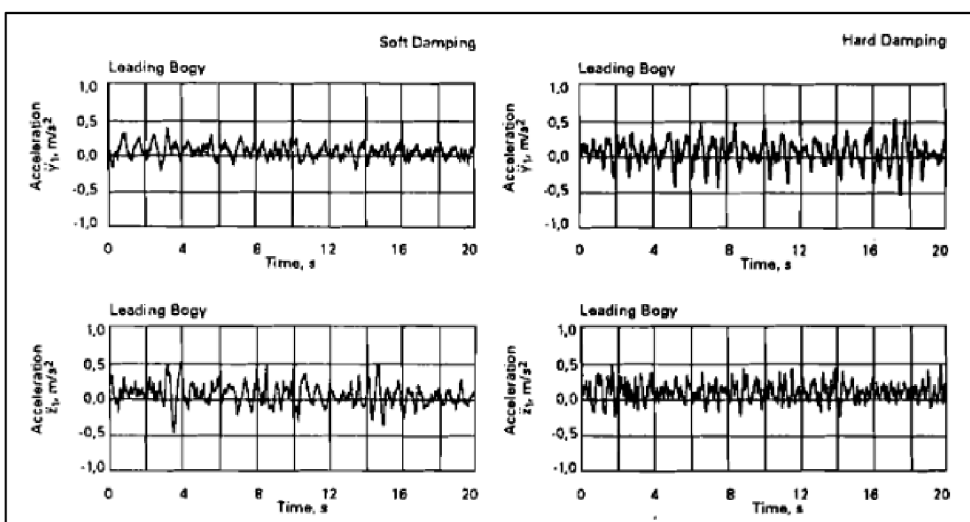
Obrázek 3.36 Jízdni vlastnosti ve vodorovném směru [40]

Na následujícím obrázku 3.37 jsou získané hodnoty ze simulace průjezdu vozidla zatáčkou. Vozidlo do zatáčky vjíždí rychlostí 154 km/h a zatáčka má poloměr 600 m. Při tomto manévru vzniká nekompensované boční zrychlení o hodnotě  $2 \text{ m/s}^2$  na úrovni kolejí. Při průjezdu zatáčkou na vozidlo působí určitá zrychlení, která pociťují cestující. Aby bylo možné hodnoty udržet na nízkých číslech, musí se do provozu zapojit i řídicí systémy pro aktivní naklápění vozu a boční posilovače vozu. U semi-aktivního systému dosahuje vozidlo opět lepších výsledků.



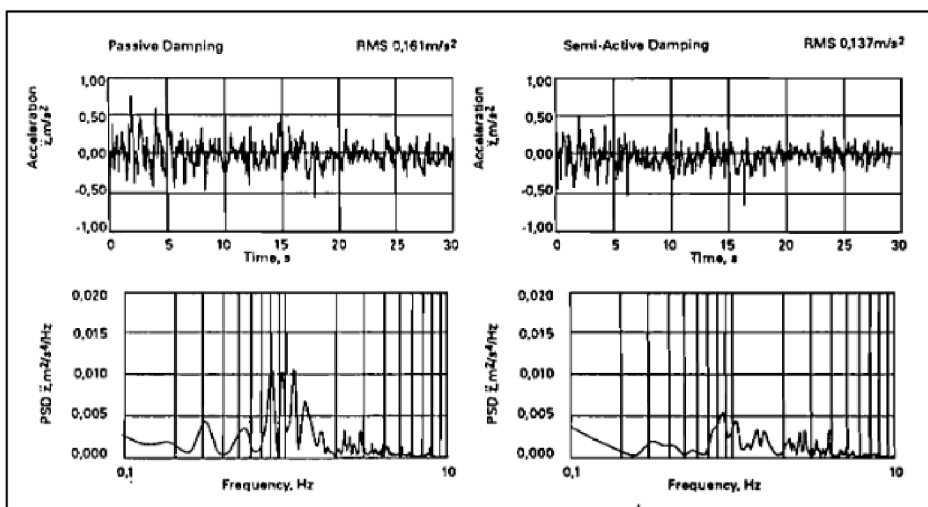
Obrázek 3.37 Simulace pro průjezd zatáčkou [40]

Následně byly u vozidla provedeny i reálně testy. Na obrázku 3.38 jsou výsledky pro vozidlo s namontovanými semi-aktivními tlumiči jak ve svislém, tak vodorovném směru. Pro porovnání jsou zde znázorněny charakteristiky pro měkké i tvrdé nastavení tlumení. Test byl prováděn při rychlosti 140 km/h na přímé trati.



Obrázek 3.38 Naměřené zrychlení vozu při různých tlumeních [40]

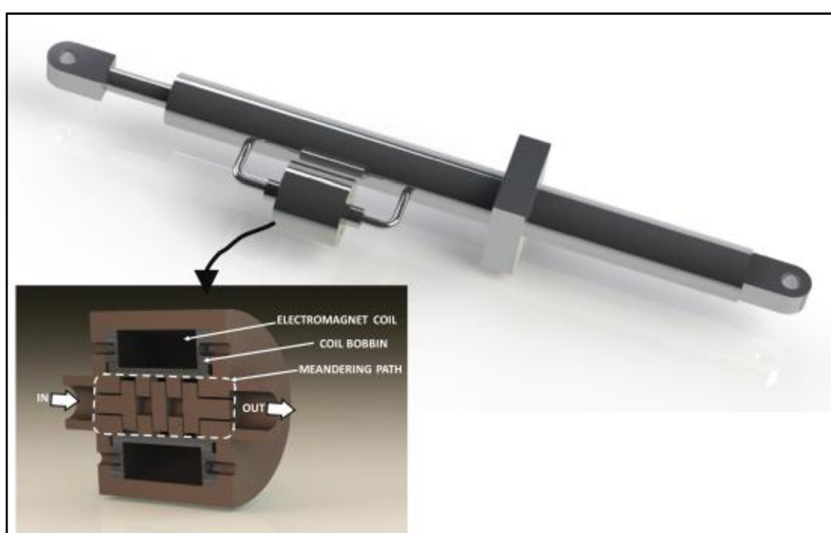
Výsledný získaný semi-aktivní systém, kterého je součástí popisovaný tlumič dosahuje při testech zlepšení v jízdních vlastnostech ve svislém směru o 15 %.



Obrázek 3.39 Experimentální výsledky pro jízdní vlastnosti ve svislém směru [40]

### 3.5.6 Imaduddin – Characterization and modeling of a new magnethoreological damper with meandering type valve using neuro-fuzzy [41]

V práci je řešen obtokový typ MR tlumiče s ventilem s klikatým uspořádáním. Na obrázku 3.40 je tlumič znázorněn.

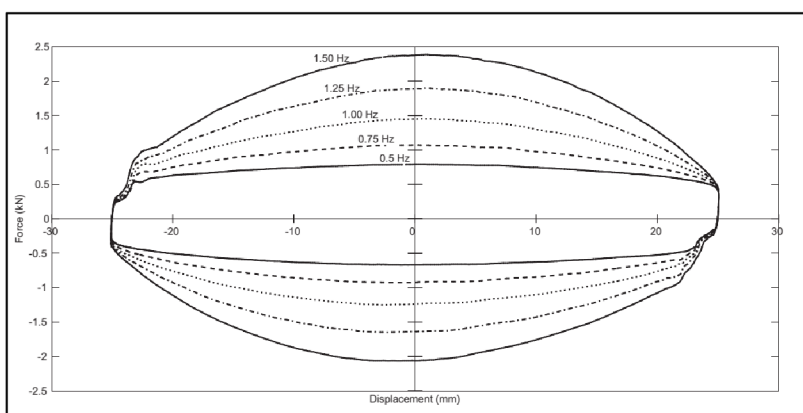


Obrázek 3.40 MR tlumič s ventilem s klikatým uspořádáním (Imaduddin) [41]

Tlumič lze rozdělit na dvě části, kdy první je složena z hlavního válce, pístu a pístnic. Druhá část, obtoková, je složena z vedení a ventilu. Při pohybu pístu je stlačena kapalina

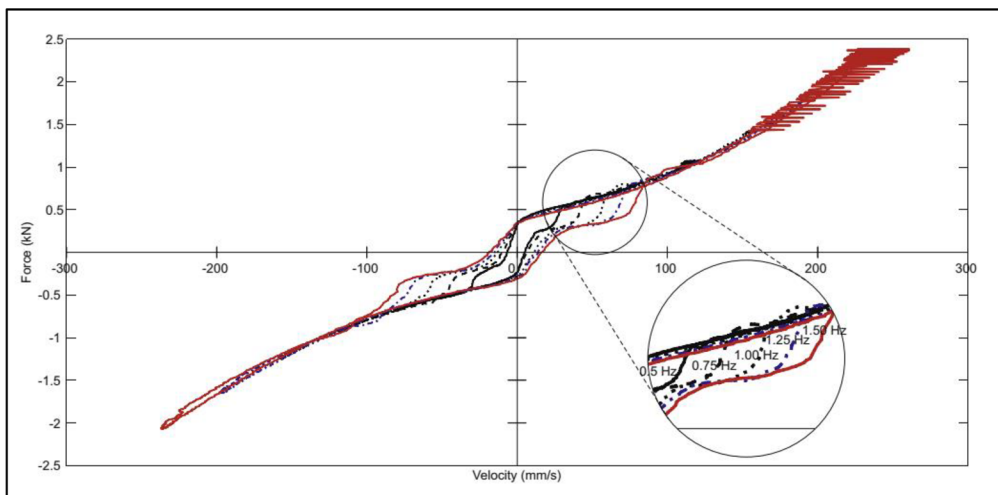
ve válci protlačena do dalších komor přes obtokovou část. Ventil v obtokové části brání volnému průtoku a vytváří tak tlakové rozdíly mezi těmito komorami, což vytváří potřebné tlumící síly. Změnou zaškrčení ventilu se ovlivňuje smykové napětí v protékající kapalině, tedy dosažení změny odporu, což vede k možnosti regulovat tlumící síly na základě požadavku v daný moment. Za výhodu tohoto typu tlumiče by se dala považovat právě obtoková část, která umožňuje různé variace a nezávislé změny na konstrukci tlumiče, který jinak omezuje ostatní části svou velikostí, či umístěním. Součástí obtokové sekce je elektromagnet, který je uzpůsoben, aby ovlivňoval protékající MR kapalinu a je ji schopen přeměnit z Newtonovské na Nenevtonovskou. Ovládním hustoty magnetického toku jsme schopni kapalinu řídit pomocí změny její meze kluzu, čímž vzniká rozdíl tlaků na vstupu a výstupu ventilu. Pro získání optimální efektivní oblasti tlumiče, čímž se označuje místo, kde může magnetický tok ovlivňovat kapalinu, se dá volit mezi prstencovým a radiálním průtokem kapaliny ventilem. Na základě výzkumu bylo zjištěno, že nejvhodnější je použití několika kombinací těchto uspořádání. Toto zjištění dalo za vznik ventilu s klikatým uspořádáním. Díky tomuto typu ventilu by mělo být dosaženo zmenšení pracovní plochy celého tlumiče, ale zároveň by se mělo docílit vyšší efektivnosti.

Testovaný tlumič byl navržen s následujícími parametry. Jedná se o obtokový MR tlumič tvořen dvojitém válcem s otvorem rovným 30 mm. Délka pístnice je 18 mm a zdvih je 70 mm. Ventil s klikatým uspořádáním má otvory prstencové, tak i radiální o velikosti 0,5 mm a je schopen dosáhnout maximálního tlakového poklesu rovného 6,8 MPa při vstupním proudu 1 A a okolo průtoku 40 ml/s. MR kapalina je použita od Lord Corporation a jedná se o MRF-132DG. Během testování byl tlumič buzen harmonickými vlnami, kdy byl zdvih zafixován na hodnoty od -25 mm do +25 mm s frekvencí pohybující se od 0,5 do 1,5 Hz. Což určuje velikosti rychlostí, které budou od 78,5 mm/s do 235,6 mm/s. Vstupní proud na elektromagnetu se bude pohybovat od 0 do 0,8 A. Pro zamezení chybných měření se každé měření provádí u 25 cyklů. Na obrázku 3.41 je znázorněna závislost síly na zdvihu při buzení různou hodnotou frekvence. Jak je vidět z obrázku, s rostoucí frekvencí roste i síla konstantně.



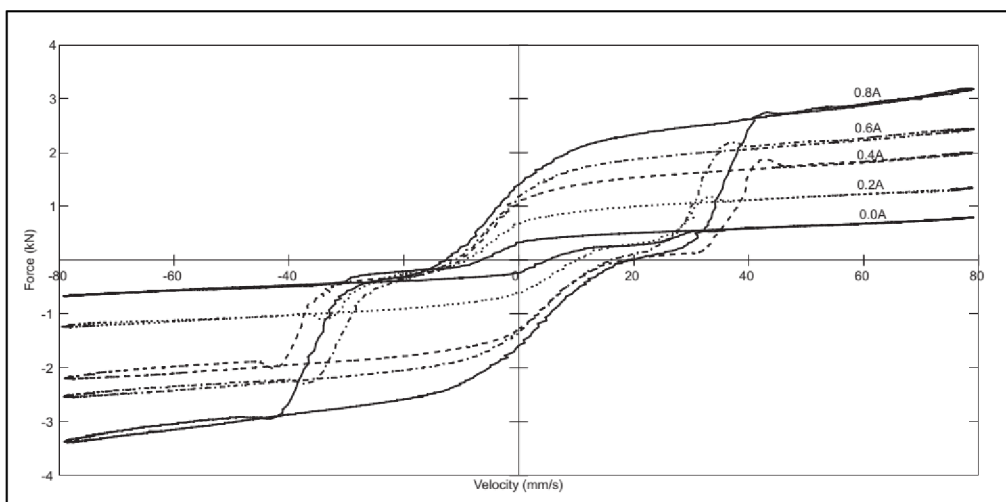
Obrázek 3.41 Závislost síly na zdvihu [41]

Pro lepší znázornění efektu, jak ovlivňuje frekvence síly v tlumiči se používá závislost síly na rychlosti. Tato závislost je znázorněna na obrázku 3.42 a je patrné, že při zvýšení frekvence se zvýší i maximální rychlost, a že šířka hystereze se také mění v závislosti na velikosti maximální rychlosti. V grafu lze také vidět určitou nelinearitu mezi silou a rychlostí, kdy se ztelněji objevuje při vyšších frekvencích.



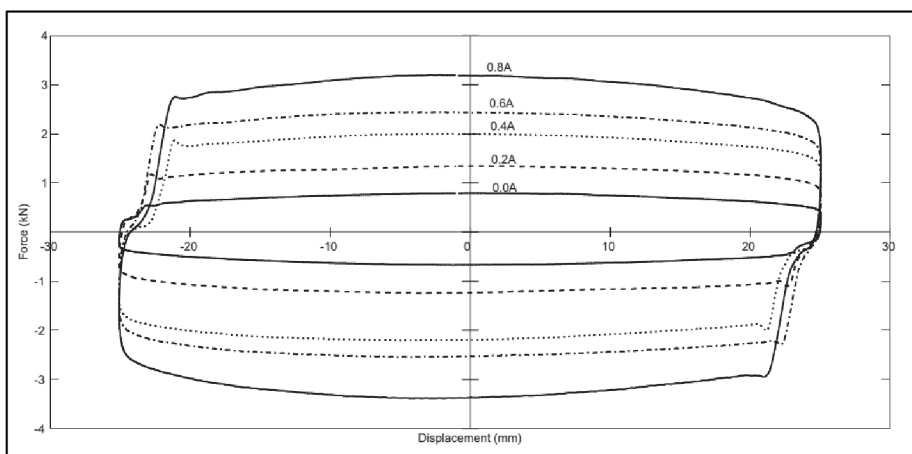
Obrázek 3.42 Závislost síly na rychlosti [41]

Na následujících obrázcích 3.43 a 3.44 jsou znázorněny již zmiňované závislosti, při frekvenci rovné 0,5 Hz, nyní však ovlivněné rozdílným vstupním proudem. Při zvyšování vstupního proudu lze pozorovat, že se tlumící síla zvětšuje, a to ve výsledku od tlakového propadu ve ventilu. Při této frekvenci bylo dosaženo maximální tlumící síly 3,2 kN a to při proudu 0,8 A a MR efektem okolo hodnoty 4,5. Na základě těchto grafů bylo vyvozeno, že tlumící síly odpovídající proudu 0,8 A a frekvenci 0,5 Hz dosahují lepších výsledků, než pro nulový proud při frekvenci 1,5 Hz.



Obrázek 3.43 Vliv proudu na závislost síla-rychlost při frekvenci 0,5 Hz [41]



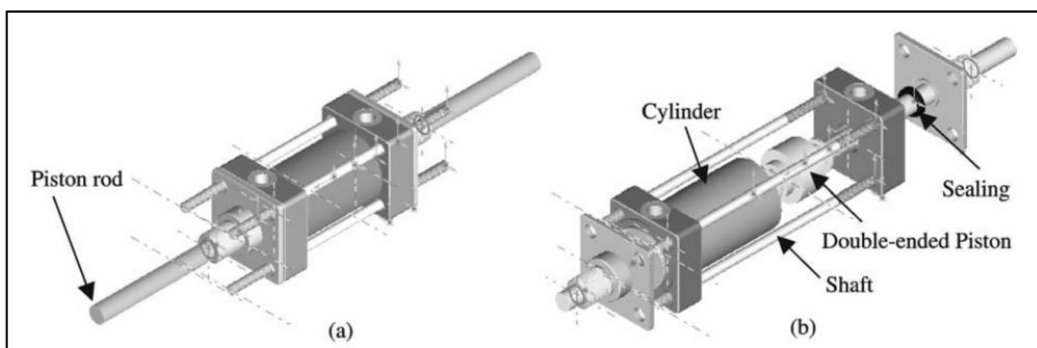


Obrázek 3.44 Vliv proudu na závislost síla-zdvih při frekvenci 0,5 Hz [41]

Výsledky této práce říkají, že v tomto typu tlumiče jsou dynamické závislosti tlumící síly a rychlosti nelineární a objevuje se u něj hystereze. Tato vlastnost tlumiče byla následně získávána pomocí hysterezního modelu „neuro-fuzzy“, při třech různých vstupech: zdvih, rychlost a proud, kdy tlumící rychlost je požadována jako výstup.

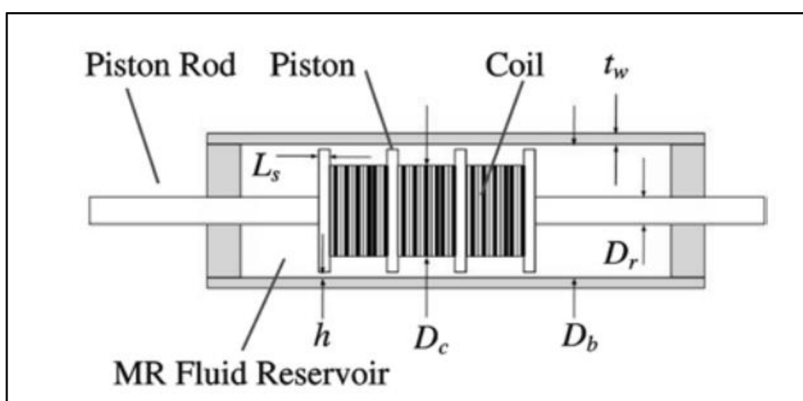
### 3.5.7 Lau – Design and analysis of magnetorheological dampers for train suspension [42]

V práci je navrhován tlumič, který je specifický ve své konstrukci. Jedná se o MR tlumič s průchozí pístnicí. Součástí tohoto tlumiče jsou pístnice, které mají stejný průměr a prochází skrz oba konce tlumiče. Během pohybu pístnic nedochází k žádným změnám objemu a z toho důvodu je možné některé součásti potřebné pro správnou funkci jiných konvenčních tlumičů vypustit. Jsou to vyrovnávač objemů, akumulátor aj.. Mimo jiné má i jednoduchou konstrukci, kde vnější kryt válce je zároveň součástí magnetického obvodu. Otvor pro průchod MR kapaliny je celý prstencový prostor mezi pístem a vnitřním průměrem krytu válce.



Obrázek 3.45 (a) MR tlumič; (b) schéma MR tlumiče (Lau) [42]

Jak je možno vidět na obrázku 3.46, magnetický obvod vytváří cívka neboli namotané kotouče z měděného drátu. Tok magnetického proudu teče axiálně přes kovové jádro, radiálně skrz póly pístu, dále skrz štěrbinu, která je v podstatě prstencová mezera vytvořená pístem a vnitřním průměrem válce. Na pístu jsou celkem tři kotouče namotaného drátu, což znamená, že při pohybu pístu vznikají uvnitř tlumiče čtyři aktivní oblasti. Mimo tento fakt jsou navíc součástí cívek neutralizační smyčky, což má za úkol minimalizovat vzájemnou indukčnost.



Obrázek 3.46 Schéma MR tlumiče [42]

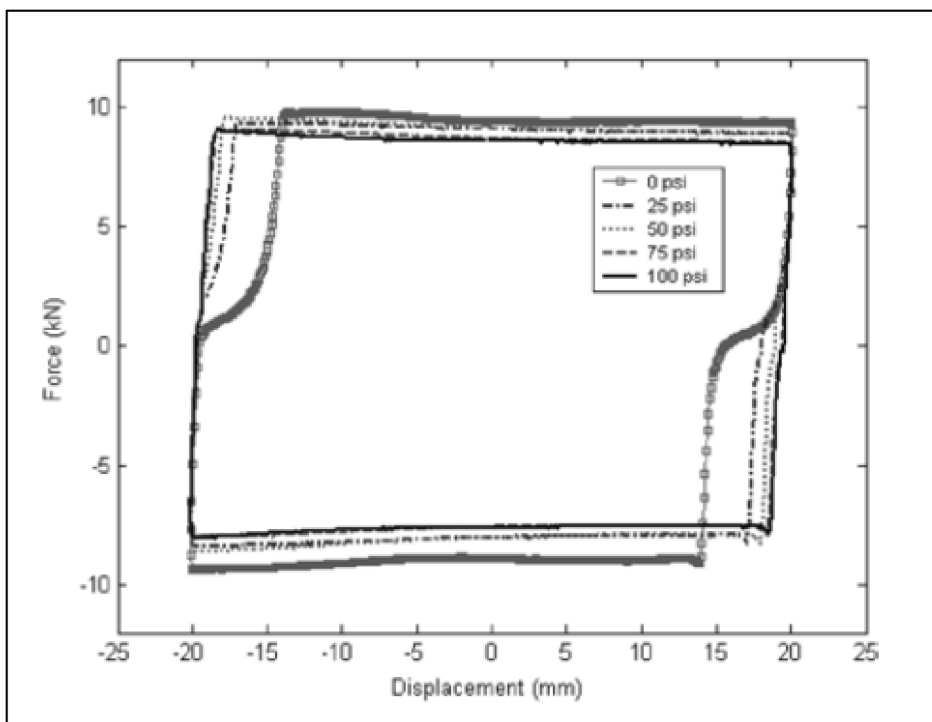
Na základě předešlých úvah a výpočtů byly pro konstrukci tohoto MR tlumiče zvoleny následující parametry.

Parametr	Hodnota
Vnitřní průměr válce	80 mm
Tloušťka stěny válce	4 mm
Průměr pístnice	25 mm
Průměr jádra pístu	40 mm
Celková délka pole	42 mm
Šířka štěrbin	0,8 mm
Délka válce	218 mm
Délka pístnice	616 mm
Zdvih	80 mm
Průměr drátu	0,91 mm

Tabulka 3.2 Parametry MR tlumiče [42]



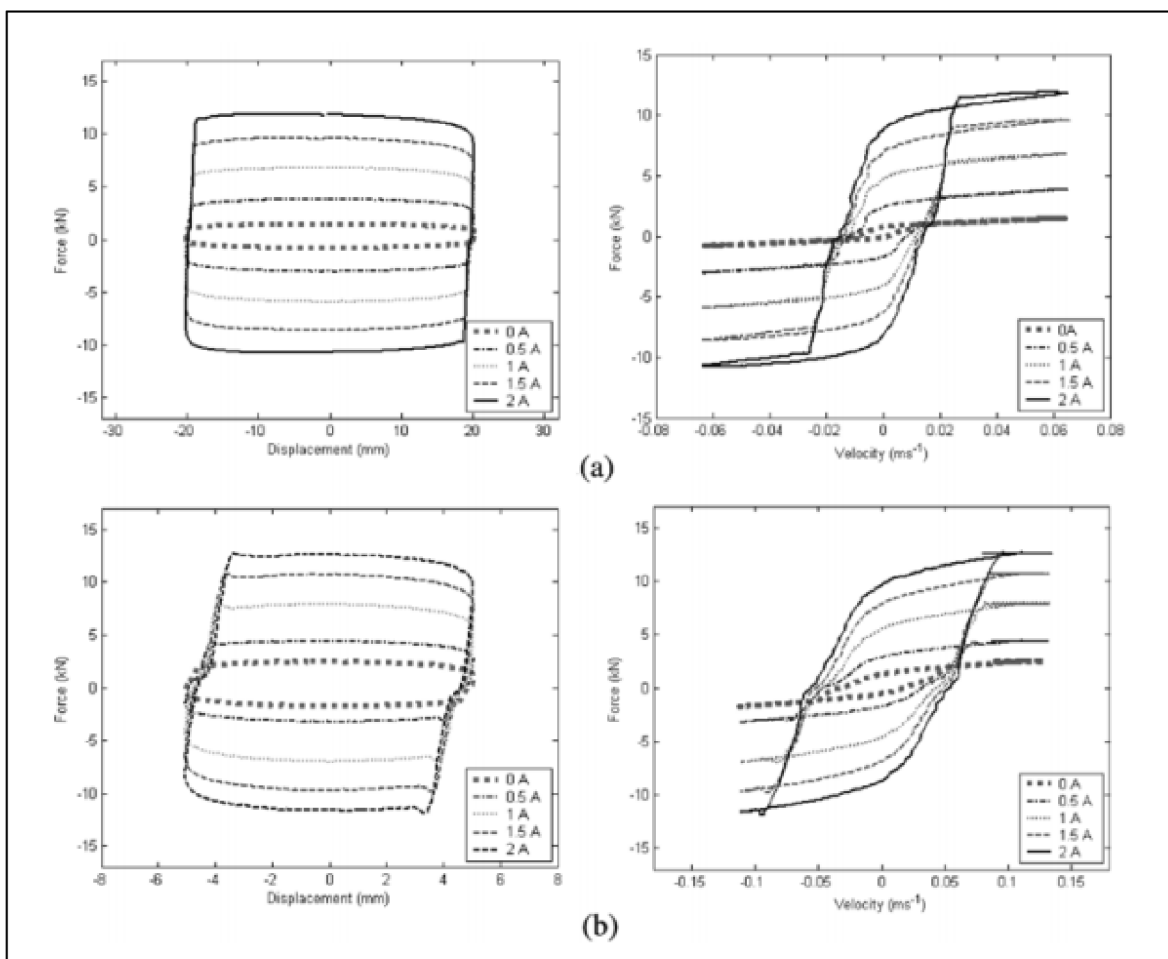
Tlumič byl experimentálně testován na buzení o amplitudě 20 mm a frekvenci 0,1 Hz a o vstupním proudu 1,5 A. Na následujícím obrázku 3.47 je znázorněna zdvihová charakteristika tlumiče s jasně viditelnou prodlevou síly. Tento jev se dá omezit, při zvyšování vnitřního tlaku. Jak lze vidět z obrázku 3.47, tak při vnitřním tlaku 100 psi, což odpovídá asi 0,7 kPa je tento efekt téměř eliminován a z toho důvodu bude tato hodnota použita při dalším testování.



Obrázek 3.47 Prodleva síly v závislosti na změně vnitřního tlaku [42]

Na obrázku 3.48(a) je znázorněno chování tlumiče pod harmonickým buzením o amplitudě 20 mm a frekvenci 0,5 Hz. Při nulovém vstupním proudu se tlumič chová jako viskózní, což znázorňuje eliptická závislost ve zdvihové charakteristice a lineární závislost u rychlostní charakteristiky. Pokud je na cívku dodán proud, závislosti se mění v hysterezní křivky. Na obrázku 3.48(b) je tlumič buzen kmitáním o amplitudě 5 mm a frekvenci 3,5 Hz. Jak je možné vidět, tak tlumící síla odpovídající nulovému proudu je v tomto případě vyšší z důvodu nárůstu viskózní síly v závislosti na vyšší rychlosti. Při dalším zvyšování proudu je jasné, že tlumící síly také dále narůstají. Z grafů lze vyčíst, že možné tlumící síly tlumiče se pohybují od 2 do 12 kN a jeho dynamický rozsah je tedy okolo 6.

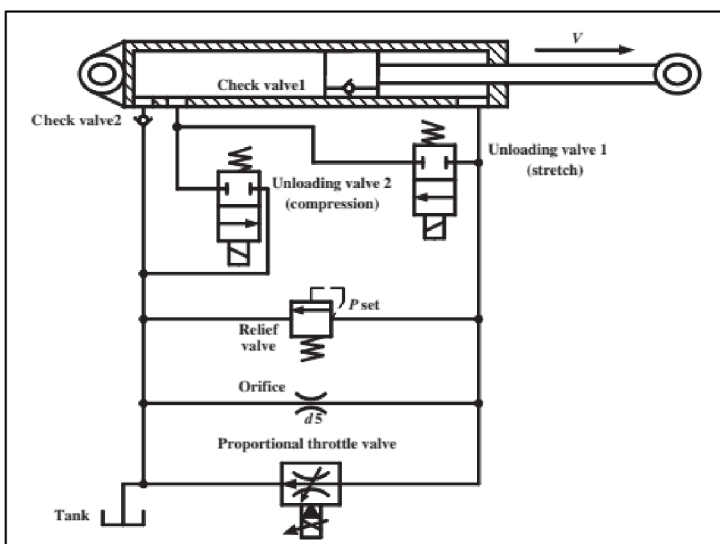
Na závěr byl semi-aktivní systém s vyvinutým tlumičem testován a porovnáván s několika pasivními tlumiči. Semi-aktivní systém vyšel ve všech porovnáních lépe a vývoj tlumiče lze tedy považovat za úspěšný.



**Obrázek 3.48** Tlumící charakteristiky (a) amplituda 20 mm, frekvence 0,5 Hz; (b) amplituda 5 mm, frekvence 3,5 Hz [42]

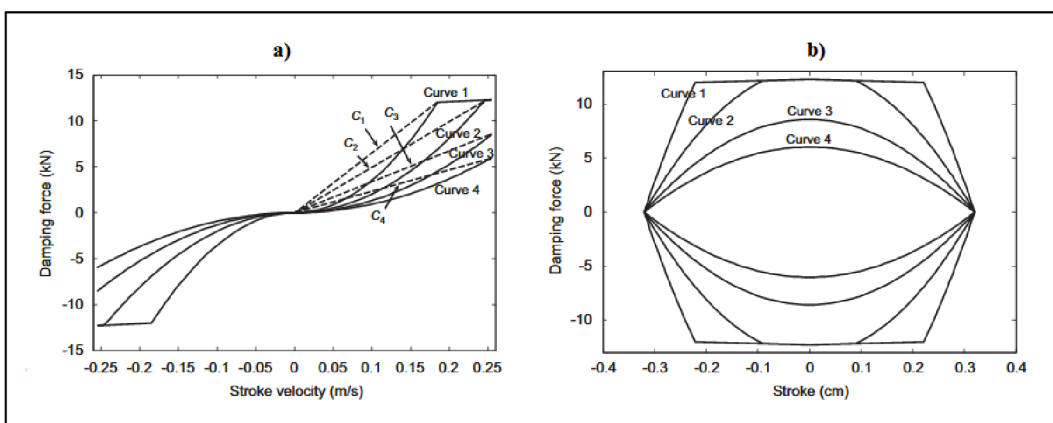
### 3.5.8 Wang – Fluid formulae for damping changeability conceptual design of railway semi-active hydraulic dampers [43]

V práci byla vytvořen koncepční konstrukce semi-aktivního hydraulického tlumiče, která vychází z analýz podobných tlumičů a cílem je vylepšení jejich vlastností. Hlavním cílem práce bylo vytvoření konstrukce, která překoná určité limitace v tlumících změnách tlumiče, který je nepřímo regulován pomocí proporcionálního pojistného ventilu. Při těchto vylepšeních bylo jedním z cílů setrvat na původní cenně tlumiče. V práci navrhli tlumič, který je regulován pomocí proporcionálního škrťacího ventilu se „Sky-hook“ ovládáním.



**Obrázek 3.49** Nově vyvinutý semi-aktivní hydraulický tlumič regulovaný pomocí proporcionální škrtící ventil (Wang) [43]

Tlumič byl při testech harmonicky buzen s amplitudou 3,2 mm a frekvencí 12,7 Hz a vstupní proud se pohybuje od 0,16 do 0,76 A. Jak je vidět na obrázku 3.50, u tlumiče se je možné pohybovat mezi křivkou 4 (nejměkčí nastavení) a křivkou 1 (nejtvrdší nastavení) v závislosti na vibračních podmínkách. V případě vypnutí, či dokonce selhání tlumiče nastane vyřazení proporcionálního škrtícího ventilu a také dvou odlehčovacích ventilů. V závislosti na tento stav se bude tlumič chovat jako klasický pasivní hydraulický tlumič, kde se o práci bude starat konstantní otvor v tlumiči a pojistný ventil. Tento stav je znázorněn na obrázku 3.50 jako křivka 2. Podle obrázku 3.50(b) lze také usoudit, že pro tvrdší nastavení dosahuje tlumič vyšších tlumících sil.



**Obrázek 3.50** (a) rychlostní charakteristika; (b) zdvihová charakteristika [43]

Z důvodu dosažení vysoké spolehlivosti a zároveň z důvodu nezvyšování ceny je tlumič malého průměru a je v něm použit na měnění stavů proporcionální škrtící ventil, který je méně citlivý na znečištění MR kapaliny. Z důvodu, že na vyvíjený tlumič může působit chvění o velikosti 15-20 Hz může být u tlumiče dosaženo funkční přepínací doby od 50 do 70 ms.

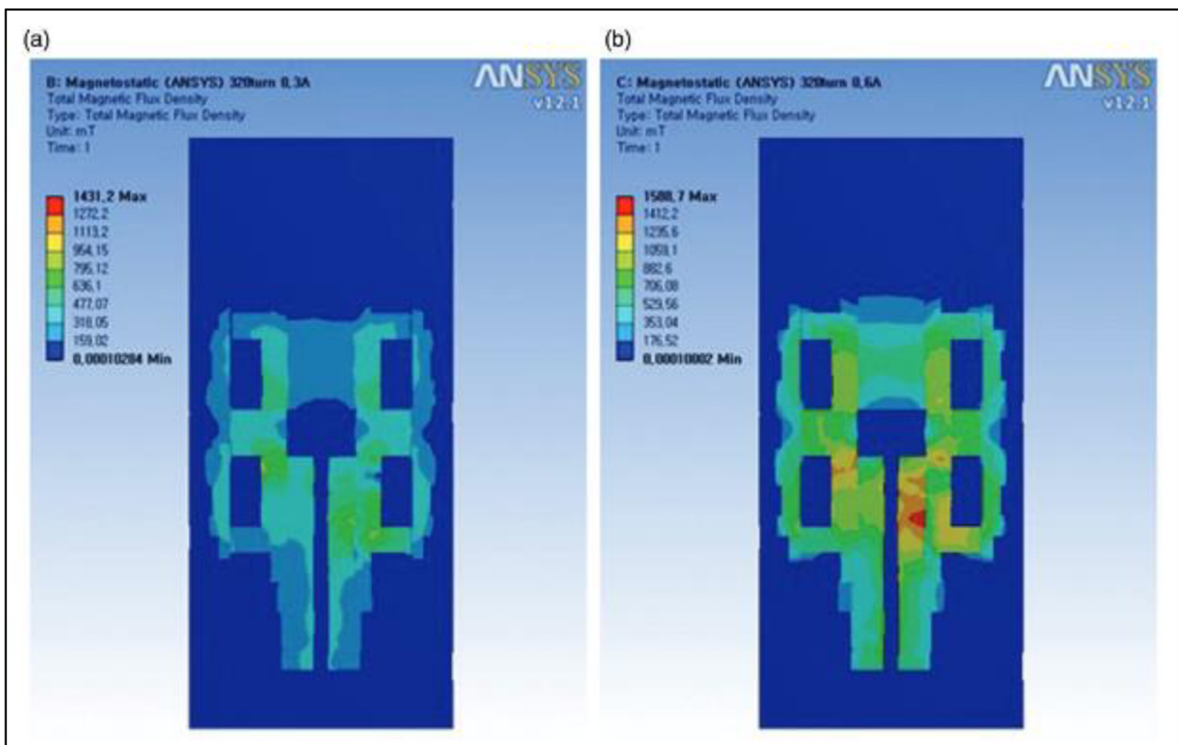
### 3.5.9 Kim – A ride quality evaluation of a semi-active railway vehicle suspension system with MR damper: Railway field tests [44]

V práci je testován MR tlumič, jenž je součástí semi-aktivního vypružení kolejového vozidla, které by mělo vylepšovat jeho jízdní vlastnosti ve vodorovném smyslu. Na úvod práce vědečtí pracovníci zkoumali konvenční pasivní tlumič, na základě kterého získali hodnoty, kterých se poté snažili docílit u svého koncepčního řešení, nebo je dokonce vylepšit. Jedná se o tlumič, který je namontován na podvozky vlaků „Mugungwha“, které jsou provozovány v Koreji. Přesněji se jedná o tlumič firmy KONI typu 96, který je detailněji popsán v kapitole 3.3.1.2. Požadavkem bylo dosáhnout stejných rozměrů tlumiče, tak i délky zdvihu. Tlumič v této práci byl navržen následovně. Maximální zdvih je 75 mm, vnější průměr válce je 80 mm a maximální tlumící síla je 15 kN se složkou ovladatelné síly rovné 10 kN. Na základě těchto hodnot tedy zbývá dalších 5 kN na síly neovladatelné, které tvoří síly viskózní a třecí. Této hodnoty tlumení by měl tlumič dosahovat ve vypnutém či poruchovém módu. Pro vytvoření dostatečně velkého magnetického pole pro správný chod tlumiče, a tedy vytvoření dostatečné meze kluzu MR kapaliny, je píst navržen s dvojitým jádrem. Pro tlumič byly udělány různé experimentální výpočty, které zahrnovaly i vlastnosti zvolené MR kapaliny, kdy se jedná o typ 500 CP od firmy RMS Corp.. Z těchto výpočtů a simulací byly pro tlumič zvoleny další rozměrové parametry, které jsou zaznamenány v následující tabulce.

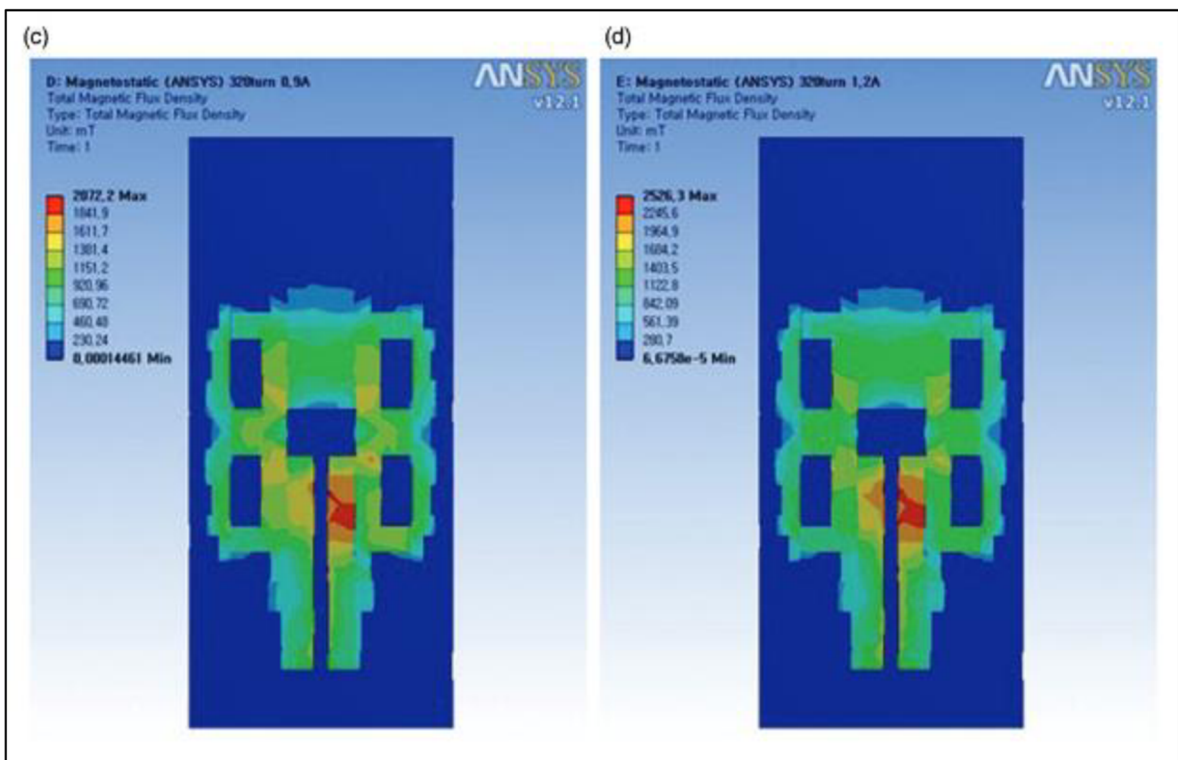
<b>Parametr</b>	<b>Hodnota</b>
Průměr válce	70 mm
Průměr pístní objímky	68 mm
Průměr pístnice	20 mm
Šířka štěrbin	1 mm
Délka štěrbin	140 mm
Aktivní délka	30 mm
Mez kluzu MR kapaliny	35 kPa
Viskozita MR kapaliny	0,5 Pa.s

**Tabulka 3.3** Parametry MR tlumiče [44]

Na základě simulace pomocí programu ANSYS R12.1 byla provedena analýza magnetického pole vytvářeného cívkou pro různé vstupní proudy. Test byl proveden pro hodnoty proudu rovny 0,3 A, 0,6 A, 0,9 A a 1,2 A. Odpovídající síla magnetického pole pro tyto proudy je postupně: 100 A/m, 150 A/m, 270 A/m a 380 A/m.



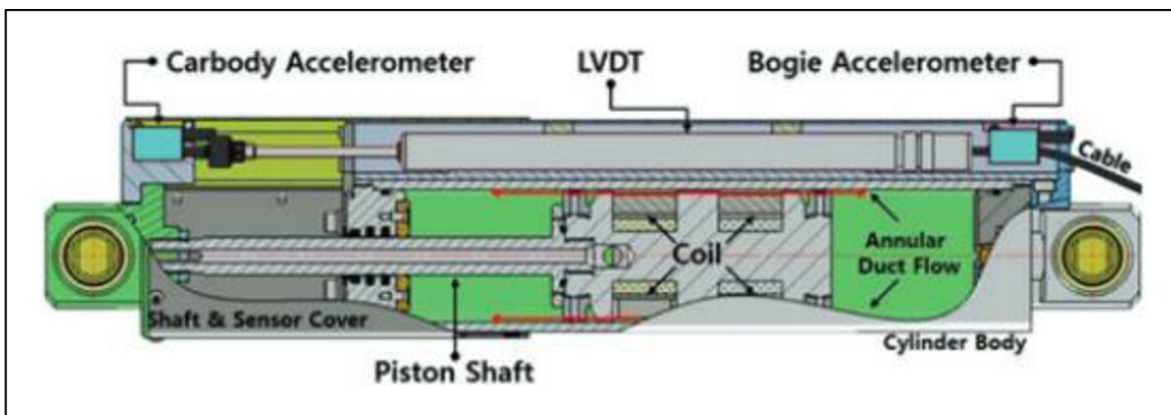
Obrázek 3.51 Hustota magnetického toku: (a) 0,3 A; (b) 0,6 A [44]



Obrázek 3.52 Hustota magnetického toku: (c) 0,9 A; (d) 1,2 A [44]



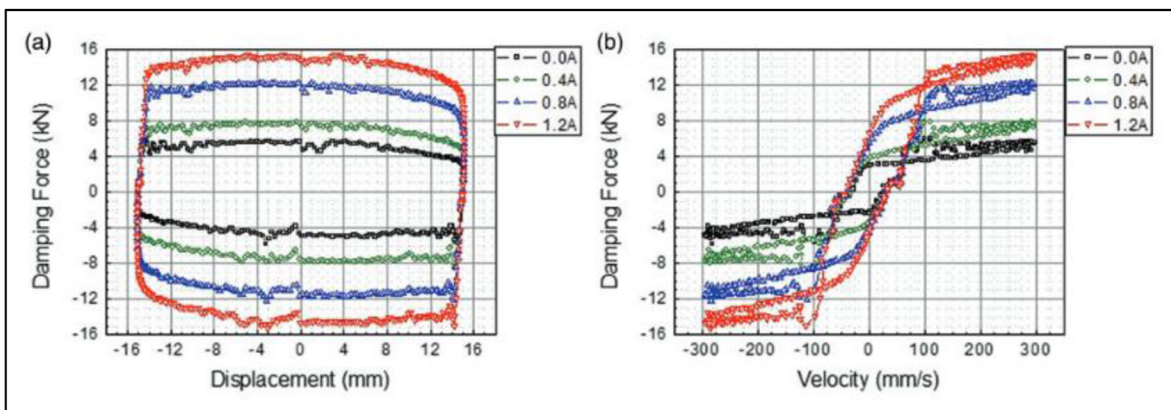
Na základě předešlých simulací je možné konstrukci provést tak, jak je znázorněna na následujícím obrázku 3.53.



Obrázek 3.53 Schéma konstrukce MR tlumiče (Kim) [44]

Maximální možný vstupní proud na cívku je 1,2 A a odpor cívky je  $5 \pm 0,5 \Omega$ . Zdvih tlumiče je navržen na  $\pm 75$  mm a maximální a minimální rozměr tlumiče je 600 a 450 mm.

Tlumicí síly tlumiče byly testovány při buzení o amplitudě 15 mm a frekvenci 300 mm/s. Maximální dosažená tlumicí síla je rovna 15,36 kN pro vstupní proud na cívku o hodnotě 1,2 A. Při nulovém vstupním proudu byla síla rovna 5,52 kN. Na základě těchto hodnot lze o tlumiči tvrdit, že dosáhl požadovaných hodnot.



Obrázek 3.54 a) Zdvihová charakteristika, b) rychlostní charakteristika [44]

Vědecká skupina v této práci navrhla MR tlumič, který dosahuje tlumících sil od 5 kN do 15 kN. Na základě provedených testů bylo určeno, že semi-aktivní vypružení, které obsahuje tento navržený tlumič vylepší jízdní vlastnosti o více než 29 % v porovnání s vypružením, kde je použit konvenční pasivní tlumič.

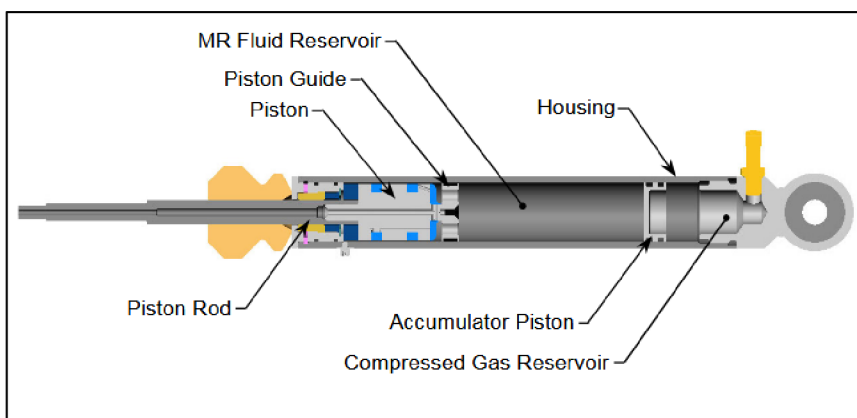
## 4 DISKUZE

V této kapitole se z velké části zaměřím na porovnání zvolených konstrukcí tlumičů a parametrů, které ovlivňují jejich vlastnosti. Vlastnosti tlumičů ovlivňuje více či méně několik dílčích parametrů. Po porovnání a popisu zvolených konstrukcí se tedy dále zaměřím na zdvihové a rychlostní charakteristiky tlumičů a dynamický koeficient tlumících sil, což jsou vlastnosti, které z velké části definují celkovou aplikovatelnost a funkčnost tlumiče a zároveň jsou součástí každého koncepčního řešení, které je v této práci detailněji rozebráno. Následně se zaměřím na další vlastnosti a parametry, které jsou dohledatelné alespoň u několika konstrukcí, abych dosáhl dostatečně velkého statistického souboru pro následné porovnání. Postupně bych se chtěl zaměřit na časovou odezvu tlumičů, šířku štěrbin, parametry použité při testování tlumičů.

### 4.1 Zvolené typy konstrukcí

Zvolené konstrukce tlumičů se v některých pracích razantně liší. Na základě získaných konstrukcí ze zkoumaných prací lze základní typy konstrukcí rozdělit do čtyř větších skupin, které mohou být dále upravovány a vylepšovány. V pracích se vyskytují MR tlumiče jednoplášťové, dvouplášťové a s průchozí pístnicí. Čtvrtou skupinou jsou tlumiče využívající elektromagnetický ventil. Jak již bylo zmíněno, u těchto základních typů se dále vyskytují různé přídatky a vylepšení, jako různá uspořádání MR ventilu, nebo dokonce vytažení MR ventilu mimo konstrukci tlumiče pro ušetření zástavbového prostoru a usnadnění uložení.

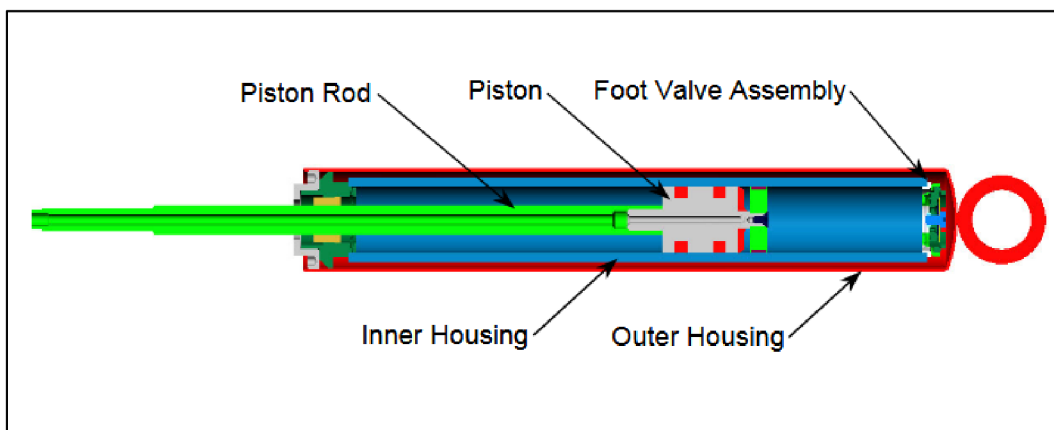
Nejčastěji používaným typem MR tlumičů je klasický jednoplášťový tlumič, a to z důvodu možnosti jeho montáže do jakékoliv pozice na vozidle a zároveň je kompaktní co do velikosti. [45]



Obrázek 4.1 Jednoplášťový MR tlumič [45]

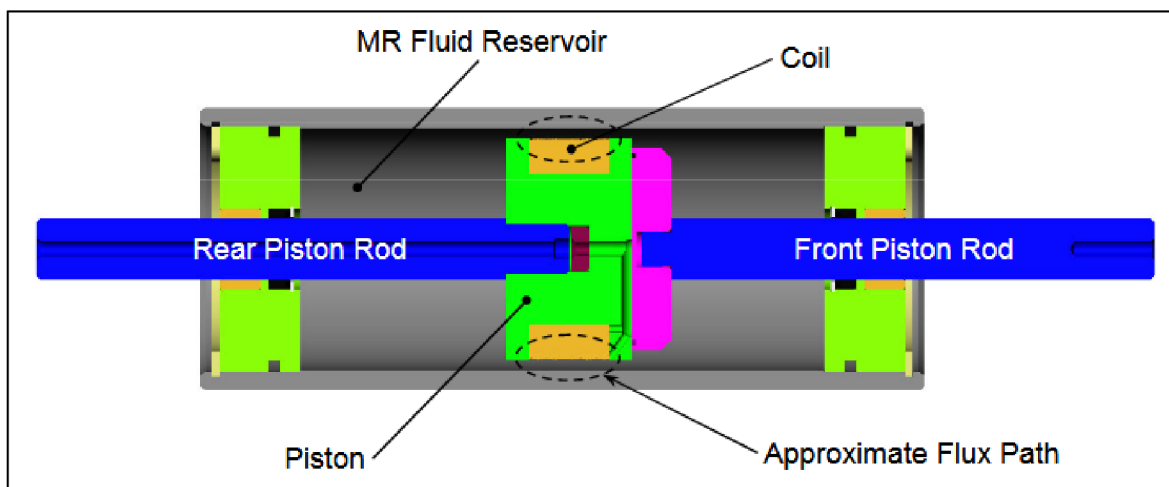


Dalším možným je tlumič s dvouplášťovým provedením, který je znázorněn na následujícím obrázku 4.2.



Obrázek 4.2 Dvouplášťový MR tlumič [45]

Poslední z používaných konstrukcí je MR tlumič s průchozí pístnicí. U tohoto typu tlumiče je zvláštní, že při pohybu pístnice nedochází k změně objemu vzhledem k celému tělu tlumiče a z toho důvodu není nutné do tlumiče zakomponovat akumulátor, což ušetří jak prostor, tak hmotnost.



Obrázek 4.3 MR tlumič s průchozí pístnicí [45]

U určitých prací lze jasně v jejich zvolené konstrukci vysledovat určitou snahu o zmenšení zástavbového prostoru či ulehčit způsob výroby a montáže. Například v práci (Guo [35]) je použit MR tlumič, ke kterému je externě připojen MR ventil. Toto uspořádání může vést k určitým výhodám, kdy MR ventil neomezuje tlumič vzhledem k velikosti a samotný tlumič poté zabírá méně prostoru. Jak je možné vidět z uvedených hodnot, samotný tlumič má délku 170 mm a průměr 101 mm, zatímco MR ventil má velikost dalších 145x130x85 mm. Tato konstrukce je spojena i s dalšími výhodami, jako je způsob průtoku kapaliny nebo možnost

výhodného chlazení. Na druhou stranu může být u tlumiče velice problémový patní ventil, který může v určitých případech velice ovlivňovat správnou funkci tlumiče.

Za další zmínku stojí tlumič v práci (Imaduddin [41]), kde je také použit obtokový ventil, ale můžeme zde pozorovat inovativní konstrukci právě MR ventilu. Vzhledem ke klikatému uspořádání a šířce štěrbin lze u tlumiče očekávat vznik silného hydraulického odporu v MR kapalině. Následně v práci (Lau [42]) je použit typ konstrukce tlumiče s průchozí pístnicí, kde můžeme pozorovat možnost vynechání určitých částí, jako je akumulátor, vzhledem k ostatním konstrukcím, což vede ke snížení hmotnosti a zmenšení rozměrů.

Zdroj	Typ konstrukce
Guo [35]	Dvouplášťový MR tlumič s vnějším obtokovým MR ventilem s radiálním průtokem MR kapaliny
Oh [37]	Jednoplášťový MR tlumič
Spelta [38]	Tlumič s elektro-hydraulickým ventilem
Dan [39]	Hybridní MR tlumič (hydraulický jednoplášťový tlumič + MR zařízení)
Stribersky [40]	Tlumič s rychločinným škrtícím ventilem
Imaduddin [41]	Jednoplášťový MR tlumič s obtokovým typem ventilu s klikatým uspořádáním
Lau [42]	MR tlumič s průchozí pístnicí
Wang [43]	Jednoplášťový MR tlumič s proporcionálním škrtícím ventilem
Kim [44]	Jednoplášťový MR tlumič

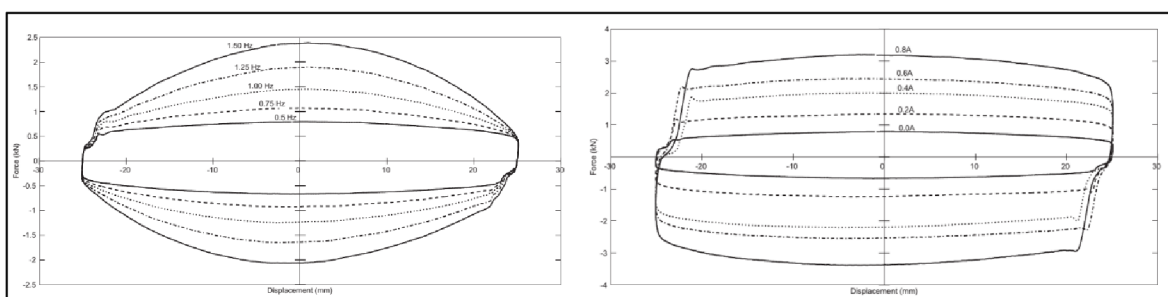
Tabulka 4.1 Použité typy konstrukcí

## 4.2 Charakteristiky tlumičů

U zdvihových a rychlostních charakteristik je důležité zmínit, že závisí na nastavení buzení použitého na tlumič během testování. U tlumičů jsou prováděny testy při harmonickém buzení, kdy ale různé vědecké skupiny použili kmitání různých amplitud a frekvencí. Z nalezených grafů lze jednoznačně usoudit, že tlumicí síly závisí na vstupním proudu přivedeném na cívku, kdy pro nulový vstupní proud, což odpovídá vypnutému či poruchovému stavu, se dá tlumič považovat za klasický pasivní tlumič a dosahuje tedy minimální tlumicí síly, která je potřebná pro zajištění dostatečné bezpečnosti v tento kritický moment. Při přivedení proudu na cívku a následném zvyšování, lze sledovat jasný nárůst tlumicí síly. Tato vlastnost je právě stěžejní schopností těchto tlumičů.

Nejdříve je potřeba zmínit, že v určitých pracích jsou pro testování použity reálné modely, jinde však mohou být použity jejich zmenšené repliky, například z důvodu ušetření financí. Jak již bylo zmíněno, tyto charakteristiky závisí na amplitudě a frekvenci kmitání užitého při testech. Naneštěstí se v různých pracích výzkumníci nesladili, a tudíž se tyto vstupní hodnoty liší. Dalším pohyblivým parametrem je zde vstupní proud, kdy by se dalo obecně říci, že všechny tlumiče byly prozkoumány při rozsahu vstupního proudu od 0 A do 0,8 A, ale v některých pracích je použit proud až 1,6 A, nebo dokonce 2 A. Na základě všech těchto

proměnných se dá očekávat, že dosažené výstupy mohou být poněkud zkreslené. Vliv frekvencí a proudů na tlumící charakteristiky může být demonstrován na následujících grafech.



**Obrázek 4.4** Vliv frekvence (vlevo) a vliv proudu (vpravo) na tlumící sílu [46] (Upraveno)

Z vykreslených zdvihových a rychlostních charakteristik do grafů lze následně lehce odečíst minimální tlumící síly, které odpovídají nulovému vstupnímu proudu nebo poruchovému stavu a maximální tlumící síly, které odpovídají křivkám při použití nejvyššího testovaného vstupního proudu. Tyto hodnoty jsou zaznamenány v následující tabulce.

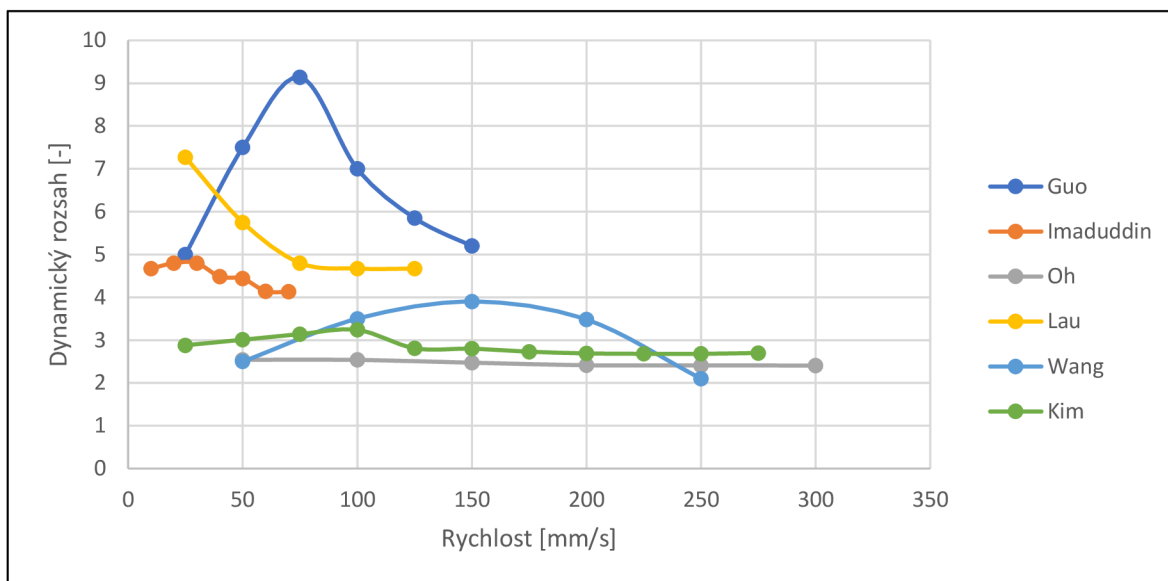
Zdroj	Min. tlumící síla	Max. tlumící síla
Guo [35]	1 kN	9 kN
Oh [37]	4 kN	10 kN
Spelta [38]	1 kN	8 kN
Dan [39]	0,05 kN	0,5 kN
Stribersky [40]	1 kN	6 kN
Imaduddin [41]	0,7 kN	3,2 kN
Lau [42]	2 kN	12 kN
Wang [43]	6 kN	12 kN
Kim [44]	5 kN	15 kN

**Tabulka 4.2** Rozsah tlumících sil

U všech prozkoumaných tlumičů lze vyzorovat, že se tlumící síly pohybují v jednotkách Kilonewtonů. Jistá odchylka lze sledovat v práci (Dan [39]), kde jsou tlumící síly pouze od 0,05 kN do 0,5 kN. Tato hodnota je poněkud rozdílná od ostatních, což bude způsobeno pravděpodobně použitím zmenšeného modelu tlumiče při testování a modelování, kdy tyto hodnoty už následně nebyly přepočítány podle měřítka. Ze získaných hodnot lze usoudit, že minimální tlumící síly zkoumaných tlumičů se pohybují okolo 1 kN a naopak maximální tlumící síly dosahují hodnot až 15 kN.

### 4.3 Dynamický rozsah tlumičů

Dynamický rozsah je poměr mezi nejvyšší a nejnižší možnou dosažitelnou tlumící silou. Při navrhování tlumiče je snaha dosáhnout co nejvyšší hodnoty. Tato hodnota je v několika pracích uvedena, zatímco v jiných byla nutna dopočítat z odečtených hodnot z grafů. Na následujícím obrázku 4.5 jsou vykreslené závislosti dynamického rozsahu na rychlosti pohybu pístu tlumičů, u kterých bylo možné hodnoty odečíst ze zveřejněných grafů.



Obrázek 4.5 Závislost dynamického rozsahu na rychlosti

Jak je vidět z obrázku 4.5 testování tlumičů probíhalo pro různé intervaly rychlosti pohybu pístu. Nicméně lze z obrázku vyčíst, jakého maximálního dynamického rozsahu daný tlumič dosahuje. V následující tabulce 4.3 jsou tyto hodnoty zaznamenány. Pro práce: Spelta, Dan, Stribersky jsou hodnoty dynamického rozsahu čerpány z textu daných vědeckých skupin, protože nebylo možné tyto hodnoty patřičně odečíst ze zveřejněných grafů.

Zdroj	Maximální dynamický rozsah tlumičů	Rychlost
Guo [35]	9,1	75 mm/s
Oh [37]	2,5	50 mm/s
Spelta [38]	8	-
Dan [39]	10	-
Stribersky [40]	6	-
Imaduddin [41]	4,8	30 mm/s
Lau [42]	7,2	25 mm/s
Wang [43]	3,9	150 mm/s
Kim [44]	3,2	100 mm/s

Tabulka 4.3 Dynamický rozsah tlumičů

## 4.4 Časová odezva tlumičů

Jedná se o jednu z dalších výstupních hodnot tlumiče, která může být v určitých případech velice důležitá. Tato hodnota nebyla dohledatelná u všech tlumičů uvedených v práci, ale v ostatních případech se pohybovala od 15 ms do 300 ms. Pouze v jedné práci byly tyto hodnoty blíže specifikované, kdy 15 ms odpovídá odezvě tlumiče, pro stav, kdy se rychločinný škrťací ventil otevírá a 27 ms odpovídá hodnotě, kdy se rychločinný škrťací ventil uzavírá (Stribersky [44]). Podle získaných informací lze u zvyšování frekvence chvění vozidla očekávat i delší časové odezvy tlumiče[43].

Zdroj	Časová odezva tlumičů
Guo [35]	300 ms
Oh [37]	-
Spelta [38]	20-150 ms
Dan [39]	-
Stribersky [40]	15-27 ms
Imaduddin [41]	-
Lau [42]	-
Wang [43]	50-70 ms
Kim [44]	-

Tabulka 4.4 Časová odezva tlumičů

## 4.5 Šířka štěrbin

Jak lze vidět z určitých prací, tak šířka štěrbin, která slouží ke zmenšení průtoku MR kapaliny oblastí magnetického pole, které vytváří cívka, se pohybuje v rozmezí od 0,4 mm do 1 mm. Hodnotu 1 mm lze tedy považovat za nějakou horní hranici, kterou už šířka štěrbin nepřesahuje.

Zdroj	Šířka štěrbin
Guo [35]	-
Oh [37]	-
Spelta [38]	-
Dan [39]	0,4 mm
Stribersky [40]	-
Imaduddin [41]	0,5 mm
Lau [42]	0,8 mm
Wang [43]	-
Kim [44]	1 mm

Tabulka 4.5 Šířka štěrbin

## 4.6 Použitá MR kapalina

Zdroj	MR kapalina
Guo [35]	CN (BASF) + H2O1 (Sinopharm Chemical Reagent CO. Ltd.) + kyselina stearová (2 hm. %)
Oh [37]	500CP (RMS Corp.)
Spelta [38]	-
Dan [39]	132LD
Stribersky [40]	-
Imaduddin [41]	132DG (Lord Corp.)
Lau [42]	132AD (Lord Corp.)
Wang [43]	140CG (Lord Corp.)
Kim [44]	500CP (RMS Corp.)

Tabulka 4.6 Použitá MR kapalina

## 4.7 Způsoby testování tlumičů

### 4.7.1 Vlastnosti

Ze získaných informací z prací lze usoudit, že pro testování tlumičů a následné získávání jejich zdvihových a rychlostních charakteristik jsou používány hydraulické pulzátory, které se mohou mírně lišit svou konstrukcí. Další proměnnou u testování byly vstupní hodnoty, které definovaly kmitání, kterým byly tlumiče při zkouškách zatěžovány. Tyto hodnoty jsou zaznamenány v tabulce 4.7.

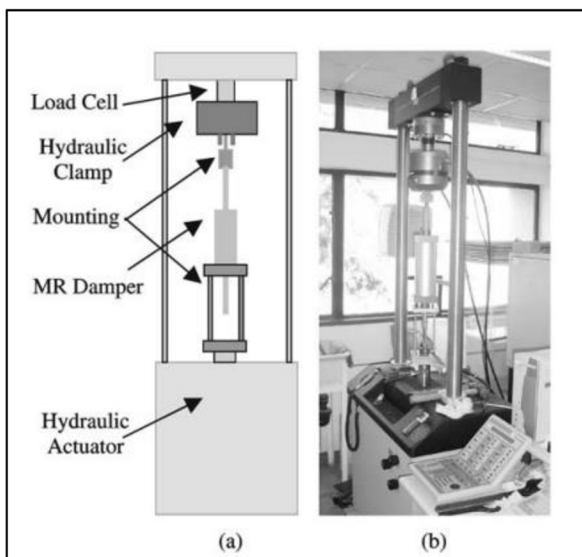
Zdroj	frekvence	amplituda	proud
Guo [35]	1 Hz	15/25 mm	0-1,6 A
Oh [37]	-	15 mm	0-0,8 A
Spelta [38]	0,1-2 Hz	10 mm	-
Dan [39]	-	2 mm	0-1,6 A
Stribersky [40]	0,5-1,5 Hz	-	-
Imaduddin [41]	0,1 Hz	25 mm	0-0,8 A
Lau [42]	0,1 Hz	20 mm	0-2 A
Wang [43]	12,7 Hz	3,2 mm	0,16-0,76 A
Kim [44]	1 Hz	15 mm	0-1,2 A

Tabulka 4.7 Vstupní hodnoty pro testování tlumičů

V následujícím výčtu jsou ukázány a popsány některé druhy zařízení, které byly ve zkoumaných pracích popsány.

- **Lau – Design and analysis of magnetorheological dampers for train suspension**

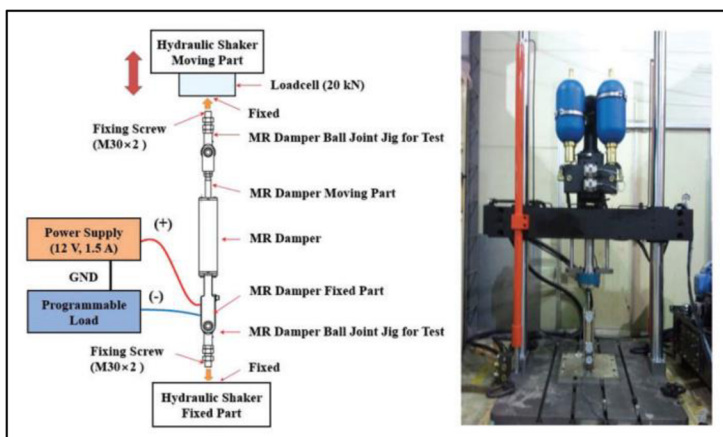
V této práci byl tlumič testován za různých podmínek, aby bylo přesně určeno jeho chování. Testy byly prováděny na servohydraulickém systému (Instron, Fast-Track™ 8801), pro testování bylo potřeba vyrobit vlastní uchycovací mechanismus tlumiče k testovacímu zařízení. Na obrázku 4.6 je znázorněno schéma a reálná fotografie tohoto zařízení. [42]



Obrázek 4.6 (a) schéma testovacího zařízení; (b) reálná fotografie (Lau) [42]

- **Kim – A ride quality evaluation of a semi-active railway vehicle suspension system with MR damper: Railway field tests**

V této práci byl tlumič testován pomocí hydraulického pulzátoru, jejíž schéma je znázorněno na obrázku 4.7. Z obrázku lze vidět, že tlumič je zafixován k zemi a vrchní část testovacího zařízení zatěžuje tlumič předem definovaným oscilujícím zatížením. S tím, že do tlumiče může být pomocí zdroje dodáván proud. Mezi vrchní částí tlumiče zařízením se nachází snímač zatížení, díky kterého je měřena tlumící síla tlumiče. [44]



Obrázek 4.7 Hydraulický pulzátor na testování MR tlumiče (Kim) [44]



- **Guo – Twin-tube and bypass-containing magneto-rheological damper for use in railway vehicles**

U této práce byl tlumič testován za pomoci systému MTS. Při následném buzení byly získány hodnoty tlumící síly a zdvihu v čase za pomoci silového senzoru. Testování bylo prováděno za konstantní teploty rovné 25 °C. Následná rychlost byla získána ze zdvihu pomocí časové difference. Na následujícím obrázku 4.8 je znázorněna testovací sestava. [35]



Obrázek 4.8 Testovací sestava tlumiče (Guo) [35]

- **Stribersky – Design and Evaluation of Semi-Active Damping System for Rail Vehicles**

V této práci byly tlumiče namontovány na reálná kolejová vozidla a následně testována. Jedním z testů bylo měření semi-aktivního vertikálního tlumení. Testování bylo prováděno na přímé trati s rychlostí vozů rovné 150 km/h. Dále byl u tlumiče proveden test pro určení měkkých a tvrdých tlumících charakteristik., kdy u tohoto testu se vozidlo pohybovalo rychlostí 140 km/h pro přímé trati. Získané hodnoty a grafy měření jsou blíže ukázány v kapitole 3.5.5.

#### 4.7.2 Životnost

Dále lze usoudit, že na testování životností by se daly použít podobné zařízení, kterým by se předdefinoval budící signál, který bude nejvíce odpovídat reálné situaci. Následně se bude tlumič cyklicky zatěžovat až do vzniku prvních porušení. Na základě devíti zkoumaných prací nelze říci, jakých životností by tlumiče měly dosahovat, protože o této hodnotě nejsou v pracích zmínky. Nicméně lze usoudit na základě komerčně dostupných tlumičů firmy KONI, u kterých je garantována životnost 1 200 000 km a více, že se jedná o nějakou hodnotu, které by se mělo minimálně docílit a tlumič se tedy v životnosti vyrovnal tomuto výrobcí.

## 5 ZÁVĚR

Hlavním cíle této bakalářské práce bylo získat dostatečný přehled a informace o konstrukcích adaptivních tlumičů určených pro kolejová vozidla, které jsou v dnešní době publikovány, realizovány a testovány. Dílčími cíli bylo získání tlumících charakteristik po boku s ostatními parametry tlumičů a jejich následné srovnání. V této práci bylo blíže popsáno 9 konstrukcí adaptivních tlumičů, které navrhovaly různé vědecké skupiny za účelem navrhnout nejlepší adaptivní tlumič pro danou aplikaci. Popisované práce vznikaly v letech 2005 až 2017.

V první části současného stavu poznání bylo uvedeno základní rozdělení podvozků kolejových vozidel na nízkorychlostní a vysokorychlostní, které byly dále popsány dle jejich využití. V hlavní části rešerše byly následně zkoumány tlumiče. Nejdříve byly uvedeny komerčně dostupné pasivní tlumiče různých firem, na které navazovaly konstrukce adaptivních tlumičů již zmiňovaných vědeckých skupin z různých univerzit. Na základě celkovém vzorku devíti prací bylo následně vytvořeno srovnání. Lze pozorovat, že v pracích se vyskytují různé typy konstrukcí a není tedy jasně výsledovatelné, že by některá konstrukce obecně předčila ostatní ve smyslu používání. V každé z prací bylo k těmto základním konstrukcím přidáno různých vylepšení či novinek za účelem objevit a dosáhnout něčeho inovativního. Jmenovat by se daly obtokové MR ventily nebo různé typy uspořádání štěrbin ve ventilech. Poté byly porovnány určité vlastnosti a parametry, kterými se tlumiče vyznačují a byly nalezeny v dostatečném počtu prací a tvoří dostatečně velký statistický soubor. Na základě tohoto porovnání bylo určeno rozmezí hodnot, kterých vědecké skupiny pro daný parametr dosáhly. Tyto hodnoty by měly být uvažovány při navrhování nového elektronicky řízeného tlumiče vyvíjeného na VUT v Brně, aby bylo zajištěno dostatečné kvality tohoto tlumiče oproti konkurenci a předešlo se případným problémům.

Jednou ze základních vlastností tlumičů, které se hodnotí jsou tlumící charakteristiky, na základě kterých bylo zjištěno, že dané tlumiče dosahují maximálních tlumících sil okolo 10 kN a nejvyšší tlumící síla byla určena na 15 kN. Naopak nejnižší možné tlumící síly, které tlumič produkuje ve vypnutém, či poruchovém stavu se pohybují okolo 1 kN. Další parametry jsou popsány a blíže hodnoceny v diskuzi.

## 6 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] SHABANA, Ahmed A, Khaled E ZAAZAA a Hiroyuki SUGIYAMA. *RAILROAD VEHICLE DYNAMICS: A Computational Approach*. B.m.: Taylor & Francis Inc, 2007. ISBN 9781420045819.
- [2] *Bogie* | [online]. [vid. 2019-04-30]. Dostupné z: <http://www.railsystem.net/bogie/>
- [3] HELLER, Petr a Josef DOSTÁL. *Kolejová vozidla II*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2009. ISBN 978-80-7043-641-7.
- [4] *Y25 Bogie - Railway Technology* [online]. 2018 [vid. 2019-02-10]. Dostupné z: <https://www.railway-technology.com/products/y25-bogie/>
- [5] *VAGONY.CZ: podvozek Y 25* [online]. [vid. 2019-04-30]. Dostupné z: <http://www.vagony.cz/pojezdy/y25/y25.html>
- [6] ZÍTKO, Martin Bc. *VAGONY.CZ: podvozek GP 200* [online]. [vid. 2019-02-10]. Dostupné z: <http://www.vagony.cz/pojezdy/gp200/gp200.html>
- [7] SIEMENS MOBILITY. First Class Bogies. *Siemens Mobility* [online]. nedatováno. Dostupné z: <https://www.mobility.siemens.com/mobility/global/sitecollectiondocuments/en/rail-solutions/components-and-systems/bogies-catalog-en.pdf>
- [8] CONNOR PIERCE DR. *Bogies | The Railway Technical Website | PRC Rail Consulting Ltd* [online]. 2018 [vid. 2019-02-10]. Dostupné z: <http://www.railway-technical.com/trains/rolling-stock-index-1/bogies.html>
- [9] ZHOU, Li a Zhiyun SHEN. Progress in high-speed train technology around the world. *Journal of Modern Transportation* [online]. 2011, **19**(1), 1–6. ISSN 2095-087X. Dostupné z: doi:10.1007/BF03325733
- [10] BOMBARDIER. *Equipment for mainline vehicles* [online]. 2019 [vid. 2019-02-10]. Dostupné z: <https://rail.bombardier.com/en/solutions-and-technologies/equipment/mainline-equipment.html>
- [11] SPEED, High a Bogie EXPERTISE. *FLEXX Bogies*. nedatováno.
- [12] PYRGIDIS, Chrystos N. *Railway Transportation Systems*. 2016. ISBN 978-1-4822-6216-2.
- [13] KOUROUSSIS, G., O. VERLINDEN a C. CONTI. Free field vibrations caused by high-speed lines: Measurement and time domain simulation. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* [online]. 2011, **31**(4), 692–707. ISSN 02677261. Dostupné z: doi:10.1016/j.soildyn.2010.11.012
- [14] ZÍTKO, Martin Bc. *VAGONY.CZ: vypružení* [online]. [vid. 2019-02-10]. Dostupné z: <http://www.vagony.cz/pojezdy/vypruzeni.html>
- [15] QAZIZADEH, Alireza. *On Active Suspension in Rail Vehicles*. 2017. ISBN 9789177294085.
- [16] *Všechny typy adaptivního odpružení: V čem se liší?* | *auto.cz* [online]. [vid. 2019-02-25]. Dostupné z: <http://www.auto.cz/vlechny-typy-adaptivneho-odprullen-v-tem-lil-98528>

- [17] ATAMURADOV, Vepa, Kamal MEDJAHHER, Pierre DERSIN, Benjamin LAMOUREUX a Noureddine ZERHOUNI. Open Archive Toulouse Archive Ouverte ( OATAO ) Prognostics and Health Management for Maintenance Practitioners - Review , Implementation and Tools Evaluation. 2017, **8**.
- [18] EUROPEAN SPRINGS. *The Rail Industry: Springs in Trains | European Springs* [online]. 2019 [vid. 2019-02-10]. Dostupné z: <https://www.europeansprings.com/the-rail-industry-springs-in-trains/>
- [19] *Railway primary vertical damper - Railway damper - Liaoning Gyrfalcon Electromechanical Equipment Co., Ltd.* [online]. [vid. 2019-02-10]. Dostupné z: <https://www.gyrfalconrailway.com/html/show-8-2-1.html>
- [20] ZÍTKO, Martin Bc. *VAGONY.CZ: druhotné vypružení podvozků* [online]. [vid. 2019-02-10]. Dostupné z: <http://www.vagony.cz/pojezdy/podvozky/druhotne.html>
- [21] *Yaw damper (railroad) - Wikipedia* [online]. 2018 [vid. 2019-02-10]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Yaw\\_damper\\_\(railroad\)#/](https://en.wikipedia.org/wiki/Yaw_damper_(railroad)#/)
- [22] DONG, Hao, Bin ZHAO a Yuanyuan DENG. Instability phenomenon associated with two typical high speed railway vehicles. *International Journal of Non-Linear Mechanics* [online]. 2018, **105**(February), 130–145. ISSN 00207462. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijnonlinmec.2018.06.006
- [23] YABUNO, Hiroshi, Hirokazu TAKANO a Hirokazu OKAMOTO. Stabilization control of hunting motion of railway vehicle wheelset using gyroscopic damper. *JVC/Journal of Vibration and Control* [online]. 2008, **14**(1–2), 209–230. ISSN 10775463. Dostupné z: doi:10.1177/1077546307080020
- [24] *KONI | About KONI* [online]. [vid. 2019-02-10]. Dostupné z: <http://www.koni.com/en-US/About-KONI/About-KONI/>
- [25] *KONI | Performance line* [online]. [vid. 2019-02-10]. Dostupné z: <http://www.koni.com/en-US/Railway/Products/suspension-dampers/Performance-line/>
- [26] *KONI 97 TYPE DAMPERS* [online]. nedatováno. Dostupné z: [http://www.koni.com/CorporateSite/media/itt/PageMedia/Railway/KONI\\_EU\\_Railway\\_Damper\\_97.pdf](http://www.koni.com/CorporateSite/media/itt/PageMedia/Railway/KONI_EU_Railway_Damper_97.pdf)
- [27] *KONI | Endurance line* [online]. [vid. 2019-02-10]. Dostupné z: <http://www.koni.com/en-US/Railway/Products/suspension-dampers/endurance-line/>
- [28] *KONI 96 TYPE DAMPERS* [online]. nedatováno, 96. Dostupné z: [http://www.koni.com/CorporateSite/media/itt/PageMedia/Railway/KONI\\_EU\\_Railway\\_Damper\\_96.pdf](http://www.koni.com/CorporateSite/media/itt/PageMedia/Railway/KONI_EU_Railway_Damper_96.pdf)
- [29] *KONI 02 TYPE DAMPERS* [online]. nedatováno. Dostupné z: [http://www.koni.com/CorporateSite/media/itt/PageMedia/Railway/KONI\\_EU\\_Railway\\_Damper\\_02.pdf](http://www.koni.com/CorporateSite/media/itt/PageMedia/Railway/KONI_EU_Railway_Damper_02.pdf)
- [30] *KONI 04 TYPE DAMPERS* [online]. nedatováno, 120. Dostupné z: [http://www.koni.com/CorporateSite/media/itt/PageMedia/Railway/KONI\\_EU\\_Railway\\_Damper\\_04.pdf](http://www.koni.com/CorporateSite/media/itt/PageMedia/Railway/KONI_EU_Railway_Damper_04.pdf)
- [31] *Tlumiče pro budoucnost | Strojírna oslavanyStrojírna oslavany* [online]. [vid. 2019-02-10]. Dostupné z: <http://www.st-os.cz/tlumice/>

- [32] *Railway: Hitachi Automotive Systems, Ltd.* [online]. [vid. 2019-02-11]. Dostupné z: [http://www.hitachi-automotive.co.jp/en/products/applied/applied\\_04/index.html](http://www.hitachi-automotive.co.jp/en/products/applied/applied_04/index.html)
- [33] GUPTA, Nikunj. Development of semi-active control system for hydraulic dampers [online]. 2015. Dostupné z: [https://www.politesi.polimi.it/bitstream/10589/117499/1/Project report.pdf](https://www.politesi.polimi.it/bitstream/10589/117499/1/Project%20report.pdf)
- [34] *Magnetic Ride: How Does it Work? - Fourtitude.com* [online]. [vid. 2019-05-13]. Dostupné z: <https://fourtitude.com/features/magnetic-ride-work/>
- [35] GUO, Chaoyang, Xinglong GONG, Luhang ZONG, Chao PENG 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]. 2015, **229**(1), 48–57. ISSN 20413017. Dostupné z: doi:10.1177/0954409713497199
- [36] SUZUKI, Mitsugi, Yukio NISHIYAMA, Takefumi MIYAMOTO, Daichi NAKAJIMA, Yasushi KAJITANI a Kohei IIDA. Development of a Lateral Damper to Improve the Running Safety of Railway Vehicles during an Earthquake. *Quarterly Report of RTRI* [online]. 2012, **53**(1), 34–40. ISSN 0033-9008. Dostupné z: doi:10.2219/rtriq.53.34
- [37] OH, Jong Seok, Yu Jeong SHIN, Hyung Wook KOO, Hwan Choong KIM, Jinhyuk PARK a Seung Bok CHOI. Vibration control of a semi-active railway vehicle suspension with magneto-rheological dampers. *Advances in Mechanical Engineering* [online]. 2016, **8**(4), 1–13. ISSN 16878140. Dostupné z: doi:10.1177/1687814016643638
- [38] SPELTA, Cristiano, Sergio M. SAVARESI, Fabio CODECÀ, Mauro MONTIGLIO a Michele IELUZZI. Smart-bogie: Semi-active lateral control of railway vehicles. *Asian Journal of Control* [online]. 2012, **14**(4), 875–890. ISSN 15618625. Dostupné z: doi:10.1002/asjc.481
- [39] DAN, BAIASU, SEBESAN IOAN a GHITA GHEORGHE. A magneto rheological hybrid damper for railway vehicles suspensions. *Incas Bulletin* [online]. 2013, **4**(3), 47–62. ISSN 20668201. Dostupné z: doi:10.13111/2066-8201.2012.4.3.5
- [40] STRIBERSKY, Anton, Andreas KIENBERGER, Günther WAGNER a Herbert MÜLLER. Design and Evaluation of a Semi-Active Damping System for Rail Vehicles. *Vehicle System Dynamics* [online]. 2007, **29**(1), 669–681. ISSN 0042-3114. Dostupné z: doi:10.1080/00423119708969594
- [41] IMADUDDIN, Fitriani, Saiful Amri MAZLAN, UBAIDILLAH, Muhammad Hafiz IDRIS a Irfan BAHIUDDIN. Characterization and modeling of a new magnetorheological damper with meandering type valve using neuro-fuzzy. *Journal of King Saud University - Science* [online]. 2017, **29**(4), 468–477. ISSN 10183647. Dostupné z: doi:10.1016/j.jksus.2017.08.012
- [42] LAU, Y. K. a W. H. LIAO. Design and analysis of magnetorheological dampers for train suspension. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit* [online]. 2005, **219**(4), 261–276. ISSN 09544097. Dostupné z: doi:10.1243/095440905X8899

- [43] WANG, W. L. a G. X. XU. Fluid formulae for damping changeability conceptual design of railway semi-active hydraulic dampers. *International Journal of Non-Linear Mechanics* [online]. 2009, **44**(7), 809–819. ISSN 00207462. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijnonlinmec.2009.05.003
- [44] KIM, Hwan Choong, Yu Jeong SHIN, Wonhee YOU, Kyu Chul JUNG, Jong Seok OH a Seung Bok CHOI. A ride quality evaluation of a semi-active railway vehicle suspension system with MR damper: Railway field tests. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit* [online]. 2017, **231**(3), 306–316. ISSN 20413017. Dostupné z: doi:10.1177/0954409716629706
- [45] DANIEL, C, G HEMALATHA, S Vincent SAM, L SARALA, D TENSING a S S Judith EMILIAH. A Review on the Magnetorheological Fluid , Damper and Its Applications for Seismic Mitigation. 2018, **4**(12), 3058–3074.
- [46] POTOS, San Luis. *OPTIMAL SKYHOOK CONTROL FOR SEMI-ACTIVE SUSPENSIONS* [online]. B.m.: IFAC, nedatováno. ISSN 1474-6670. Dostupné z: doi:10.3182/20060912-3-DE-2911.00106



## 7 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

<b>Obrázek 3.1</b> Schéma podvozku kolejového vozidla [2] (Upraveno) .....	15
<b>Obrázek 3.2</b> Podvozek Y25 [5] .....	16
<b>Obrázek 3.3</b> Podvozek GP 200 [6] .....	17
<b>Obrázek 3.4</b> Podvozky H-typu se dvěma elektrickými motory: (a) 1. typ; (b) 2. typ [8] (Upraveno) .....	18
<b>Obrázek 3.5</b> Podvozek FLEXX Link používaný u CRH1 v Číně [11] .....	19
<b>Obrázek 3.6</b> Podvozek FLEXX Power 350 [11] .....	20
<b>Obrázek 3.7</b> Schéma podvozku kolejových vozidel [23] (Upraveno) .....	21
<b>Obrázek 3.8</b> Řez tlumičem výkonnostní třídy se znázorněným průtokem kapaliny (KONI) [25] (Upraveno) .....	23
<b>Obrázek 3.9</b> Graf výkonnostní třídy tlumičů KONI, závislost tlumící síly na rychlosti pístu [25] .....	24
<b>Obrázek 3.10</b> Řez tlumičem odolnostní třídy se znázorněným průtokem kapaliny (KONI) [27] (Upraveno) .....	24
<b>Obrázek 3.11</b> Graf odolnostní třídy tlumičů KONI, závislost tlumící síly na rychlosti pístu [27] .....	25
<b>Obrázek 3.12</b> Řez tlumičem řady P8 (Strojárna Oslavany) [31] .....	26
<b>Obrázek 3.13</b> Adaptivní MR tlumič [34] .....	28
<b>Obrázek 3.14</b> Adaptivní tlumič s elektromagnetickým ventilem [33] .....	29
<b>Obrázek 3.15</b> Schéma průtoku MR kapaliny: „single-flow“ [36] (Převzato) .....	30
<b>Obrázek 3.16</b> Schéma MR tlumiče (Guo): 1) pístnice; 2) vnitřní hydraulická trubka; 3) vnější hydraulická trubka; 4) pístní ventil; 5) píst; 6) zpětný ventil; 7) spojovací trubice; 8) MR ventil; 9) cívka [35] .....	31
<b>Obrázek 3.17</b> Řez modelem MR ventilu (šipky ukazují směr tečení) [35] .....	33
<b>Obrázek 3.18</b> B-H křivky (a) MR kapalina; (b) elektricky čisté železo [35] .....	33
<b>Obrázek 3.19</b> Distribuce hustoty magnetického toku: (a) smyčka CD; (b) smyčka AB pro různé proudy [35] .....	34
<b>Obrázek 3.20</b> Tlumící charakteristiky pro amplitudu 15 mm [35] .....	34
<b>Obrázek 3.21</b> Tlumící charakteristiky pro amplitudu 25 mm [35] .....	35
<b>Obrázek 3.22</b> Úroveň asymetrie u tlumících sil [35] .....	35
<b>Obrázek 3.23</b> Schéma MR tlumiče (Oh) [37] (Upraveno) .....	36
<b>Obrázek 3.24</b> Vypočítaná tlumící síla [37] .....	37
<b>Obrázek 3.25</b> Naměřené tlumící charakteristiky: (a) závislost tlumící síly na rychlosti; (b) závislost zdvihu na tlumící síle [37] (Upraveno) .....	37
<b>Obrázek 3.26</b> Budící signál pro charakterizaci tlumiče [38] .....	38
<b>Obrázek 3.27</b> Závislost tlumící síly na rychlosti vzniklé harmonickým buzením v rozmezí 0,1 – 2 Hz [38] .....	39
<b>Obrázek 3.28</b> Měnění rychlosti za konstantního zdvihu 0,05 m/s [38] .....	39



<b>Obrázek 3.29</b> Hybridní MR tlumič (Dan) [38] .....	40
<b>Obrázek 3.30</b> Elektromagnetický ventil [38] .....	41
<b>Obrázek 3.31</b> (1) Vlevo – Závislost zdvihu na síle; (2) Vpravo – Závislost rychlosti na síle [38] .....	42
<b>Obrázek 3.32</b> Řez tlumičem (Stribersky) [40] .....	42
<b>Obrázek 3.33</b> Silový test [40].....	43
<b>Obrázek 3.34</b> Časová závislost tlumící síly [40].....	43
<b>Obrázek 3.35</b> Jízdní vlastnosti ve svislém směru [40] .....	44
<b>Obrázek 3.36</b> Jízdní vlastnosti ve vodorovném směru [40] .....	44
<b>Obrázek 3.37</b> Simulace pro průjezd zatáčkou [40] .....	45
<b>Obrázek 3.38</b> Naměřené zrychlení vozu při různých tlumeních [40] .....	45
<b>Obrázek 3.39</b> Experimentální výsledky pro jízdní vlastnosti ve svislém směru [40] .....	46
<b>Obrázek 3.40</b> MR tlumič s ventilem s klikatým uspořádáním (Imaduddin) [41] .....	46
<b>Obrázek 3.41</b> Závislost síly na zdvihu [41] .....	47
<b>Obrázek 3.42</b> Závislost síly na rychlosti [41] .....	48
<b>Obrázek 3.43</b> Vliv proudu na závislost síla-rychlost při frekvenci 0,5 Hz [41] .....	48
<b>Obrázek 3.44</b> Vliv proudu na závislost síla-zdvih při frekvenci 0,5 Hz [41] .....	49
<b>Obrázek 3.45</b> (a) MR tlumič; (b) schéma MR tlumiče (Lau) [42].....	49
<b>Obrázek 3.46</b> Schéma MR tlumiče [42].....	50
<b>Obrázek 3.47</b> Prodleva síly v závislosti na změně vnitřního tlaku [42].....	51
<b>Obrázek 3.48</b> Tlumící charakteristiky (a) amplituda 20 mm, frekvence 0,5 Hz; (b) amplituda 5 mm, frekvence 3,5 Hz [42] .....	52
<b>Obrázek 3.49</b> Nově vyvinutý semi-aktivní hydraulický tlumič regulovaný pomocí proporcionální škrtkovací ventil (Wang) [43].....	53
<b>Obrázek 3.50</b> (a) rychlostní charakteristika; (b) zdvihová charakteristika [43].....	53
<b>Obrázek 3.51</b> Hustota magnetického toku: (a) 0,3 A; (b) 0,6 A [44].....	55
<b>Obrázek 3.52</b> Hustota magnetického toku: (c) 0,9 A; (d) 1,2 A [44].....	55
<b>Obrázek 3.53</b> Schéma konstrukce MR tlumiče (Kim) [44] .....	56
<b>Obrázek 3.54</b> a) Zdvihová charakteristika, b) rychlostní charakteristika [44].....	56
<b>Obrázek 4.1</b> Jednoplášťový MR tlumič [45].....	57
<b>Obrázek 4.2</b> Dvouplášťový MR tlumič [45] .....	58
<b>Obrázek 4.3</b> MR tlumič s průchozí pístnicí [45].....	58
<b>Obrázek 4.4</b> Vliv frekvence (vlevo) a vliv proudu (vpravo) na tlumící sílu [46] (Upraveno) .....	60
<b>Obrázek 4.5</b> Závislost dynamického rozsahu na rychlosti .....	61
<b>Obrázek 4.6</b> (a) schéma testovacího zařízení; (b) reálná fotografie (Lau) [42] .....	64
<b>Obrázek 4.7</b> Hydraulický pulzátor na testování MR tlumiče (Kim) [44] .....	64
<b>Obrázek 4.8</b> Testovací sestava tlumiče (Guo) [35] .....	65

## 8 SEZNAM TABULEK

<b>Tabulka 3.1</b> Parametry MR tlumiče [35] .....	32
<b>Tabulka 3.2</b> Parametry MR tlumiče [42] .....	50
<b>Tabulka 3.3</b> Parametry MR tlumiče [44] .....	54
<b>Tabulka 4.1</b> Použité typy konstrukcí .....	59
<b>Tabulka 4.2</b> Rozsah tlumících sil .....	60
<b>Tabulka 4.3</b> Dynamický rozsah tlumičů .....	61
<b>Tabulka 4.4</b> Časová odezva tlumičů .....	62
<b>Tabulka 4.5</b> Šířka štěrbin .....	62
<b>Tabulka 4.6</b> Použitá MR kapalina .....	63
<b>Tabulka 4.7</b> Vstupní hodnoty pro testování tlumičů .....	63