



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

**HYDRAULICKÝ TLUMIČ V DOPRAVNÍCH PROSTŘEDCÍCH  
A JINÝCH APLIKACÍCH**

HYDRAULIC DAMPER IN MEANS OF TRANSPORT AND OTHER APPLICATIONS

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

Michal Vrba

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

Ing. Ondřej Blaťák, Ph.D.

**BRNO 2020**



## Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student:	<b>Michal Vrba</b>
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	<b>Ing. Ondřej Blaťák, Ph.D.</b>
Akademický rok:	2019/20

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

### HYDRAULICKÝ TLUMIČ V DOPRAVNÍCH PROSTŘEDCÍCH A JINÝCH APLIKACÍCH

#### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Princip hydraulického škrčení průtoku oleje je pro tlumení kmitání automobilů používán mnoho desítek let. Výrobci automobilových hydraulických tlumičů však stále hledají uplatnění svých výrobků i v dalších oblastech dopravy nebo zcela jiných, nově se rozvíjejících odvětvích.

#### Cíle bakalářské práce:

Vytvořit přehled použití hydraulických tlumičů v oblasti dopravy, zhodnotit rozdílnost konstrukce dle aplikace.

Vytvořit přehled použití hydraulických tlumičů mimo oblast dopravy, charakterizovat konstrukční odlišnosti (rozdílnost jejich charakteristik) ve srovnání s automobilovými tlumiči.

Charakterizovat vývojové trendy v oblasti konstrukce hydraulických tlumičů.

#### Seznam doporučené literatury:

DIXON, John. The Shock Absorber Handbook. Chichester: John Wiley & Sons, 2007. 432 s. ISBN 978-0-470-51020-9

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

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.  
ředitel ústavu

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

## ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá tématem konstrukčního řešení hydraulických tlumičů v dopravních prostředcích a jiných aplikacích. Byly popsány rozdíly v konstrukci mezi různými aplikacemi. V neposlední řadě byly charakterizovány trendy, kterými se může ubírat konstrukce hydraulických tlumičů.

## KLÍČOVÁ SLOVA

hydraulický tlumič, charakteristiky tlumičů, pasivní tlumič, semi-aktivní tlumič, magnetoreologický tlumič

## ABSTRACT

This bachelor thesis pursues the topic of the design of hydraulic shock absorbers in vehicles and other applications. Differences in the design of individual applications have been described. Last but not least, possible future trends concerning hydraulic shock absorbers were characterized.

## KEYWORDS

hydraulic shock absorber, characteristics of dampers, passive damper, semi-active damper, magnetorheological damper

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

VRBA, Michal. *Hydraulický tlumič v dopravních prostředcích a jiných aplikacích*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124393>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. 52 s. Vedoucí práce Ondřej Blažák.

## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Ondřeje Blatáka, Ph.D. a s použitím informačních zdrojů uvedených v seznamu.

V Brně dne 26. května 2020

.....

Michal Vrba

## **PODĚKOVÁNÍ**

Rád bych poděkoval Ing. Ondřeji Blatákovi, Ph.D. za jeho čas a cenné rady při vypracování této bakalářské práce.



# OBSAH

Úvod.....	11
<b>1 Základní informace a pojmy .....</b>	<b>12</b>
1.1 Odpružení.....	12
1.2 Pružiny .....	12
1.3 Hydraulický tlumič .....	12
1.4 Rozdělení tlumičů .....	13
<b>2 Osobní automobil.....</b>	<b>15</b>
2.1 Pasivní systémy tlumení .....	15
2.1.1 Jednoplášťový tlumič .....	15
2.1.2 Speciální konstrukce jednoplášťových tlumičů.....	16
2.1.3 Dvoupplášťový tlumič.....	16
2.1.4 Tlumiče závislé na poloze pístu.....	17
2.2 Semi-aktivní systémy tlumení .....	17
2.2.1 CDC Tlumiče.....	18
2.2.2 Elektoreologické tlumiče (ER).....	18
2.2.3 Magnetoreologické tlumiče (MR) .....	19
2.3 Aktivní systémy odpružení .....	19
2.4 Charakteristiky tlumiče.....	20
2.4.1 Závislost síly na rychlosti pístu .....	21
2.4.2 Poměrný útlum .....	22
<b>3 Vlaky.....</b>	<b>24</b>
3.1 Primární odpružení .....	24
3.2 Sekundární odpružení .....	24
3.3 Přehled tlumičů vlaků .....	25
3.3.1 Endurance line .....	25
3.3.2 Performance line.....	26
3.3.3 Magnetoreologické tlumiče .....	27
3.3.4 Elektronicky ovládaný tlumič vrtivých pohybů .....	28
3.3.5 Sběrač trakčního vedení.....	28
3.3.6 Tlumič příčných vibrací.....	29
3.3.7 Tlumič výhybek.....	29
3.3.8 Narážecí ústrojí.....	30
<b>4 Další dopravní prostředky .....</b>	<b>31</b>
4.1 Motocykl.....	31
4.1.1 Zavěšení předního kola.....	31
4.1.2 Zavěšení zadního kola .....	32
4.1.3 Tlumič řízení.....	33
4.2 Odpružení podvozku letadla .....	34
<b>5 Jiné aplikace tlumičů.....</b>	<b>36</b>
5.1 Dveřní zavírač .....	36
5.2 Pračka.....	37
5.3 Protézy dolních končetin .....	38

5.4	Tlumení vibrací staveb .....	39
5.4.1	Mosty .....	39
5.4.2	Budovy .....	40
<b>6</b>	<b>Vývojové trendy .....</b>	<b>43</b>
<b>Závěr .....</b>		<b>45</b>
<b>Seznam použitých zkratk a symbolů .....</b>		<b>52</b>

## ÚVOD

Důležitou součástí odpružení je hydraulický tlumič, který má za úkol disipovat energii uloženou v pružině. Rychlost dopravních prostředků se s technologickým pokrokem neustále zvyšuje, což přináší větší nároky na tlumiče. Postupem času se různé způsoby tlumení dostaly až k dnešní podobě hydraulických tlumičů rozebírané v této práci.

Tlumiče významně ovlivňují vzájemný styk kola s vozovkou a komfort cestujících v daném dopravním prostředku. Mezi bezpečností a komfortem je rozpor, neboť pro zajištění stálého kontaktu kola s vozovkou je vhodné “tvrdé” tlumení. Naopak pro komfort cestujících a ochranu nákladu je lepší menší tlumení. Výrobci se snaží o optimální nastavení tlumičů, aby byly v dostatečné míře splněny požadavky pro obě kritéria.

Hydraulické tlumiče našly své uplatnění i v mnohých využitích mimo dopravu, kde jsou nezbytnou součástí k zajištění správné funkce dané aplikace. Ač tlumiče fungují v různých aplikacích principiálně podobným způsobem, každý tlumič má pro svoji aplikaci vlastní specifika a charakteristické nastavení. V poslední kapitole byly přiblíženy vývojové trendy, kterými se hydraulické tlumiče mohou v příštích letech ubírat.

# 1 ZÁKLADNÍ INFORMACE A POJMY

## 1.1 ODPRUŽENÍ

Odpružení vozidla se skládá z dvou hlavních komponent, a to z pružiny a tlumiče. Systém odpružení významně ovlivňuje chování vozidla, zajišťuje styk kola s vozovkou, zvýšený komfort cestujících a minimalizuje dynamické účinky nerovností vozovky. [1]

Hmotnost vozidla se dělí na:

- a) odpruženou hmotu
- b) neodpruženou hmotu

Do odpružené hmoty spadá vše, co je nad pružinou, jedná se tedy o podvozek, karosérii, náklad a cestující. Neodpružená hmotnost jsou díly pod pružinou (pneumatiky, brzdy atd.). Zrychlení odpružené hmoty je hlavním kritériem pro určení komfortu cestujících. Stabilita vozidla je větší při větším poměru celkové hmotnosti a neodpružené hmotnosti. Platí tedy, že při menší hmotnosti neodpružené hmoty vozidlo drží lépe kontakt s vozovkou a je bezpečnější. [1] [2] [3]

## 1.2 PRUŽINY

Hlavní funkcí pružiny je, aby se dynamický účinek vznikající nerovností na vozovce nepřenesl přímo do karoserie vozidla, ale aby všechnu kinetickou energii absorbovala stlačením právě pružina. Ta dovoluje pohyb kola ve svislém směru. Pružiny udržují vozidlo v předurčené výšce. [1] [2]

Hlavními druhy pružin jsou:

- a) listové
- b) vinuté
- c) torzní
- d) pneumatické
- e) hydropneumatické
- f) hydroelastické
- g) pryžové

Listové pružiny se používají zejména v nápravách kamionů, těžších užitkových vozidlech nebo jsou součástí podvozku vlaku. Vinuté pružiny jsou nejobvyklejším druhem pružin v osobních automobilech. Torzní tyče se používají v kyvadlových polonápravách. Tvoří je přímé tyče obvykle kruhového průřezu. Pneumatická (Audi) a hydropneumatická (Citroën) pružina využívá stlačitelnosti plynu. Pryžové pružiny jsou k nalezení v podvozcích vlaků. [4] [5]

## 1.3 HYDRAULICKÝ TLUMIČ

Samotná pružina by měla na komfort a bezpečnost cestujících spíše negativní efekt, protože by se vozidlo po najetí na nerovnost rozkmitalo a stalo se neovladatelným. Tlumiče mění kinetickou energii uloženou v pružině na teplo škrcením viskózní tekutiny malým otvorem v pístu tlumiče. Tlumící síla tlumiče je závislá na rychlosti stlačení nebo roztažení tlumiče

dávající možnost tlumičům se přizpůsobit podmínkám jízdy. Tlumiče se umisťují paralelně co nejbližší pružinám nebo přímo do osy vinuté pružiny. [1] [2] [5]

## 1.4 ROZDĚLENÍ TLUMIČŮ

Tlumiče se dělí na:

- a) třecí
- b) hydraulické
  - pákové
  - teleskopické

Třecí tlumiče fungují na principu mechanického tření mezi dvěma pohyblivými deskami. V automobilové dopravě jsou k vidění jen zřídka, a to pouze na starších vozech. Používají se stále listové pružiny, které mají tlumící vlastnosti. Třecí tlumiče byly postupně vytlačeny z trhu hydraulickými tlumiči, které lépe vzdorují opotřebení. V 50. a 60. letech minulého století se využívaly tlumiče pákové, které používaly páku k ovládnání dvou pístů vytlačujících olej do škrticích ventilů. V 70. letech byly pákové tlumiče nahrazeny teleskopickými, které jsou až dodnes nejpoužívanějším druhem. [1] [3]

Rozdělení podle tlumících sil:

- a) jednočinné
- b) dvojčinné

Jednočinné tlumiče tlumí pouze v jednom směru pohybu pístu. Jeho funkce je založena na protékání oleje obtokovým ventilem o velkém průřezu, v tomto směru tedy nedochází k tlumení. Používají se například jako tlumiče, pomocí nichž se otevírají střešní poklapy nebo okna. Dvojčinné tlumiče tlumí v obou směrech pohybu pístu a jsou k nalezení ve většině aplikací. [1]

Rozdělení podle systémů odpružení:

- a) konvenční/pasivní
- b) adaptivní
- c) semi-aktivní
- d) aktivní

Pasivní tlumící systémy nelze obvykle nastavovat přímo z vozidla. Fungují s takovým nastavením, s kterým byly do vozu namontovány. Adaptivní tlumící systémy je možné seřizovat v několika stupních, a to buď řidičem, nebo automaticky. Jakmile dojde k seřízení tlumiče, chová se nadále jako pasivní tlumič. Semi-aktivní systémy mají prakticky nekonečně mnoho charakteristik, které se velmi rychle mění podle vyhodnocené potřeby. Energeticky nejnáročnější jsou aktivní systémy, kde je možné získat tlumící sílu s opačným znaménkem než je rychlost pístu. [6]

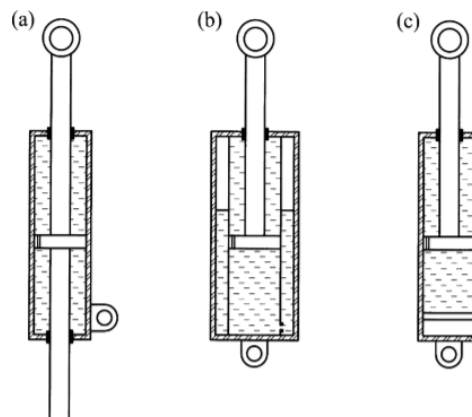
Na obrázku 1 je srovnání jednotlivých tlumících systémů podle tlumící síly, frekvenční oblasti a spotřeby energie. [6]

	sily	frekvenční oblast	potřeba energie	model
pasivní		—	—	
adaptivní		menší než vlastní frekvence nastavby	malá	
semiaktivní		větší než vlastní frekvence nastavby	malá	
aktivní		a) pomalá: menší než vlastní frekvence nastavby b) rychlá: větší než vlastní frekvence nastavby	vysoká	

Obrázek 1 Srovnání tlumících systémů [6]

Základní rozdělení teleskopických tlumičů:

- tlumič s průchozí pístnicí
- dvouplášťový tlumič
- jednoplášťový tlumič



Obrázek 2 Druhy teleskopických tlumičů [1]

Tlumič s průchozí pístnicí se vyhýbá problémům se změnou objemu v pracovním prostoru. To má však několik nevýhod. Stále je tu nutnost vyřešit tepelnou roztažnost oleje. Je nezbytné spolehlivé těsnění na obou koncích tlumiče. Tento typ tlumiče je někdy využíván v závodních vozidlech nebo pro tlumení řídek motocyklů. O dvouplášťových a jednoplášťových tlumičích bude pojednáno v kapitolách níže. [1]

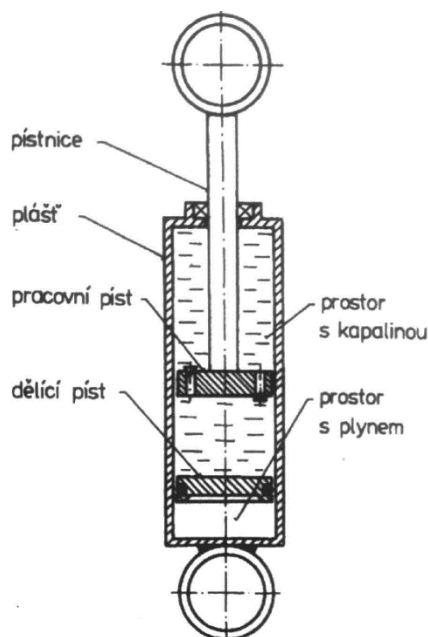
## 2 OSOBNÍ AUTOMOBIL

### 2.1 PASIVNÍ SYSTÉMY TLUMENÍ

Pasivní systémy obsahují tlumiče, jejichž charakteristiky se u osobních automobilů nedají za jízdy změnit. Do systému není potřeba přivádět energii. Pasivní tlumiče jsou konstrukčně nejjednodušší a nejlevnější.

#### 2.1.1 JEDNOPLÁŠŤOVÝ TLUMIČ

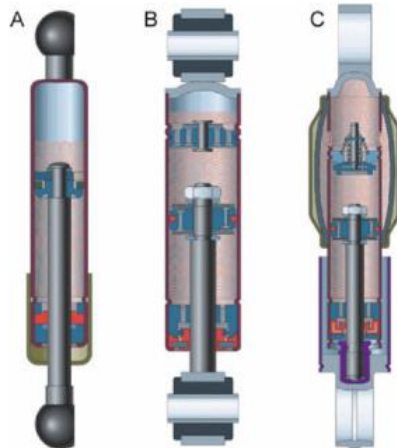
Základní konstrukce pasivního dvojčinného jednoplášťového tlumiče (obr. 3) je tvořena pracovním a dělícím pístem v uzavřeném válci plném oleje. Během stlačování spodní komory olej protéká skrz ventily v pracovním pístu do prostoru nad pístem. Tlumení vzniká díky tření oleje při průchodu ventily, čímž se kinetická energie mění na tepelnou. Pracovní píst je napojen na pístnici, která při stlačování tlumiče zmenšuje objem v komoře nad pístem. Jednoplášťové tlumiče využívají stlačitelnosti plynu k přizpůsobení se objemu, který zabrala pístnice, jakož i objemu, který vznikl vlivem tepelné roztažnosti oleje. Olej protékající skrz ventily může vlivem poklesu tlaku způsobit kavitaci. Přítomnost vzduchových dutin mění vlastnosti oleje, a tím i tlumící sílu tlumiče. Kavitace je nežádoucí, a proto je za dělícím pístem umístěna plynová komora s natlakovaným dusíkem nebo vzduchem. Ta vyvíjí tlak na prostor s olejem, což snižuje pravděpodobnost vzniku dutin. Jednou z nevýhod tohoto typu tlumiče je náchylnost k úniku oleje způsobeným vysokým tlakem. Jednoplášťové tlumiče mají oproti dvouplášťovým nižší životnost, ale výhodou je menší náchylnost ke kavitaci, větší průměr pracovního pístu a lepší chlazení pracovního prostoru. [1] [6] [7] [8]



Obrázek 3 Jednoplášťový tlumič [6]

### 2.1.2 SPECIÁLNÍ KONSTRUKCE JEDNOPLÁŠŤOVÝCH TLUMIČŮ

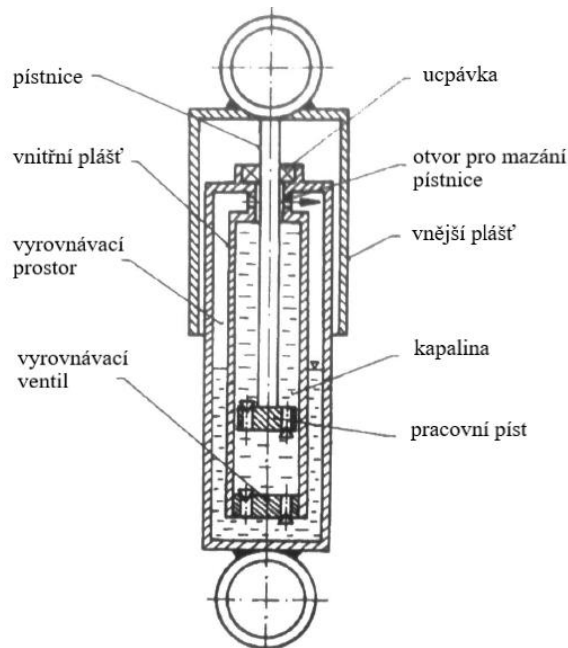
Kromě tlumiče v odpružení vozidla lze nalézt tlumič vibrací i v jiných částech automobilu. Tlumič A (obr. 4) je tlumič s nejjednodušší jednoplášťovou konstrukcí bez dělicího pístu a bez natlakovaného plynu. Využívá se k tlumení mezi automobilem a přívěsem, kde by mohlo dojít k vzájemnému narážení při brzdění. Specifikací tlumiče B je spodní ventil, který rozšiřuje možnosti nastavení a zabraňuje kavitaci. Používá se například jako tlumič vibrací motoru nebo hnacího ústrojí. Provedení C disponuje spodním ventilem a expanzní komorou. Tato konstrukce se používá jako tlumič řízení. [9]



Obrázek 4 Speciální konstrukce [9]

### 2.1.3 DVOUPLÁŠŤOVÝ TLUMIČ

Rozdíl v konstrukci od jednoplášťového tlumiče spočívá v přidání vnějšího válce. Vytvoří se tím vyrovnávací prostor mezi válci, kam protéká olej vytlačený pístnicí a objem oleje, vzniklý díky teplotní roztažnosti. Prostor ve vnějším válci je vyplněn buď vzduchem nebo natlakova-



Obrázek 5 Dvouplášťový tlumič [6]

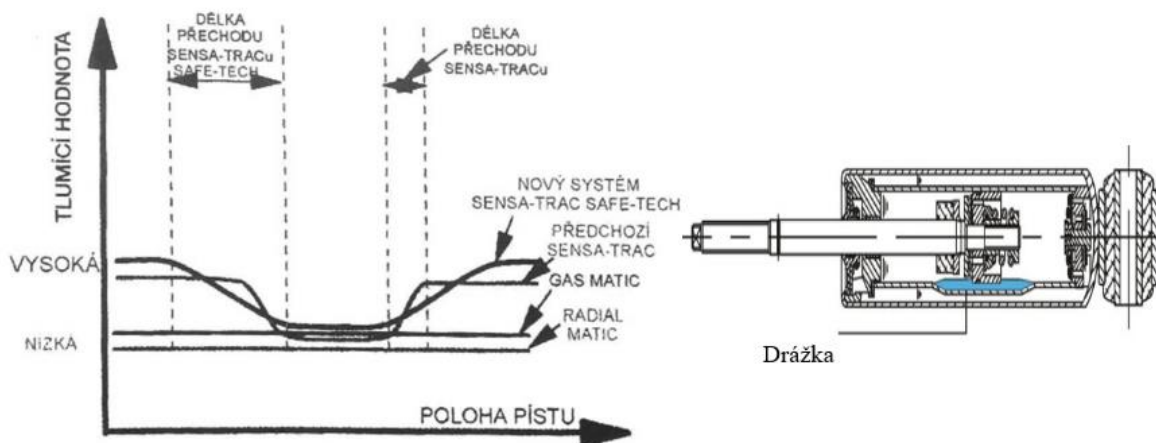


ným dusíkem. Pro tlumení jsou použity ventily v pracovním pístu a ventily ve vyrovnávacím pístu, který rozděluje pracovní a vyrovnávací prostor. Pracovní prostor musí být dokonale vyplněn olejem bez vzduchových polštářů, jinak dojde ke kolísání tlumící síly. Dvouplášťový tlumič nemůže být umístěn v libovolné poloze, vzduch se nesmí dostat z vyrovnávacího prostoru do pracovního. Existují dvouplášťové tlumiče, které tento problém řeší pomocí oddělené externí nádoby, kde je umístěna plynová komora a dělicí píst, podobně jako v jednoplášťových tlumiči. [1] [6]

#### 2.1.4 TLUMIČE ZÁVISLÉ NA POLOZE PÍSTU

Na silnici s kvalitním povrchem stačí menší tlumící síla pro komfortní a zároveň bezpečnou jízdu. Jakmile dojde k větším svislým pohybům pneumatik na poškozené vozovce (výmoly, opravy atd.), je zapotřebí větší tlumící síla k zabezpečení kontaktu kol s vozovkou. Firma Monroe uvedla na trh tlumič pod názvem SENSEA-TRAC, jehož funkčnost je závislá na poloze pístu. Tlumení závislé na poloze je realizováno pomocí drážky, která působí jako obtok pro kapalinu, a ta nemusí protékat všemi ventily v pístu. Snižuje se tím hydraulický odpor pístu, což snižuje tlumení. Toto řešení je jednoduché, efektivní a levné. [6] [9]

Firma představila i tlumič Safe-Tech, který doladil nedostatky předchozího typu. Náhlé zakončení drážky bylo prodlouženo pro pohodlnější přechod z oblasti komfortu do oblasti "tvrdého" tlumení. Závislosti tlumící síly na poloze pístu obou typů tlumiče jsou zobrazeny na obr. 6. [6]



Obrázek 6 a) F-v charakteristika [6] b) Konstrukce tlumiče s drážkou [9]

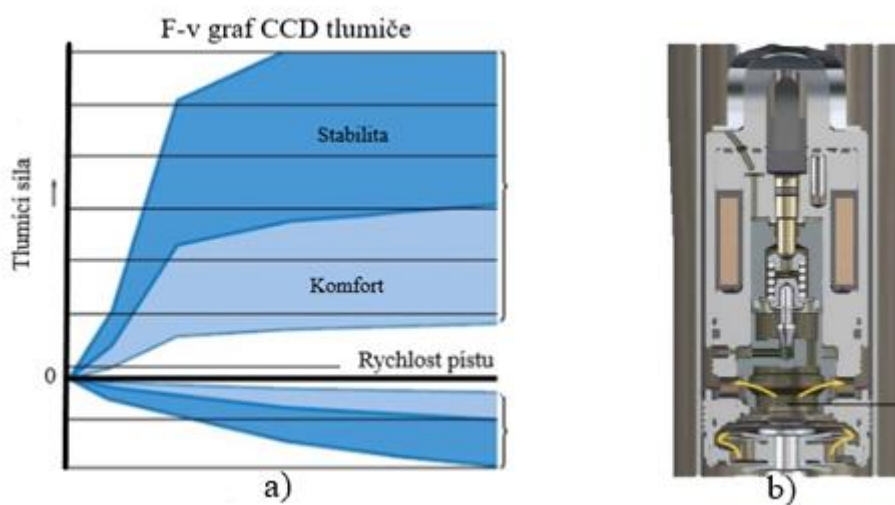
## 2.2 SEMI-AKTIVNÍ SYSTÉMY TLUMENÍ

Tento systém tlumení umožňuje měnit tlumící koeficient a lze pokrýt určitou oblast F-v diagramu. Tlumič reaguje na stav vozovky pomocí senzorů, anebo uživatel může přepínat mezi módy (sportovní, komfortní). Různých tlumících koeficientů je dosaženo buď změnou viskozity kapaliny v tlumiči nebo elektronickým uzavíráním ventilů. Semi-aktivní tlumiče eliminují kompromis mezi pohodlím a bezpečností jízdy. [9]

Semi-aktivní tlumiče jsou levnější a energeticky méně náročné než aktivní systémy, proto patří k používanějšímu typu tlumení mezi výrobci automobilů. [9]

### 2.2.1 CDC TLUMIČE

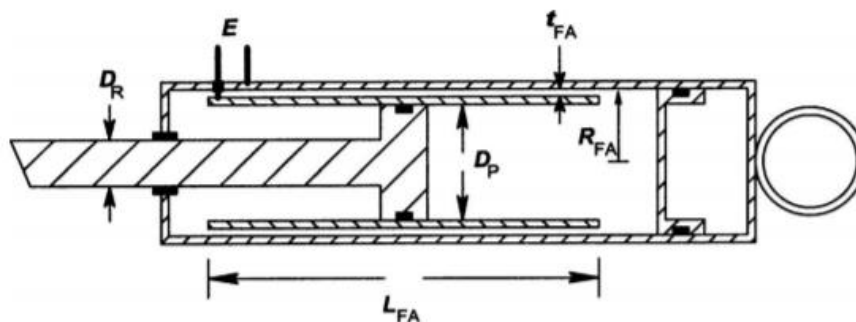
Jedním z nejpoužívanějších semi-aktivních tlumičů je CCD tlumič (Continuous Damping Control). Elektromagneticky nastavitelný člen uzavírá nebo otevírá ventily v pístu, a tím mění množství protékajícího oleje. Řídící jednotka, často napojena na systémy ABS nebo ESP, vyhodnocuje každé dvě milisekundy potřebnou hodnotu tlumení a je schopna 20x za sekundu změnit hodnotu proudu, který ovládá přítlačný nastavitelný člen ventilů v pístu. Potřebný ovládací proud se pohybuje v rozmezí 0-1,8 A. V případě poruchy se tlumič sám přepne do bezpečné varianty s větším tlumením. CCD tlumiče využívá například Audi A8, Ferrari 360, Opel Astra nebo Bentley Continental GT. Jedním z výrobců tohoto tlumiče je společnost ZF Sachs, která vyzdvihuje vysokou stabilitu v kritických situacích, tlumící sílu upravenou zvláště pro každé kolo vozidla a kratší brzdou dráhu. [1] [10] [11]



Obrázek 7 a) F-v charakteristika [10] b) Průřez CCD tlumiče [11]

### 2.2.2 ELEKTROREOLOGICKÉ TLUMIČE (ER)

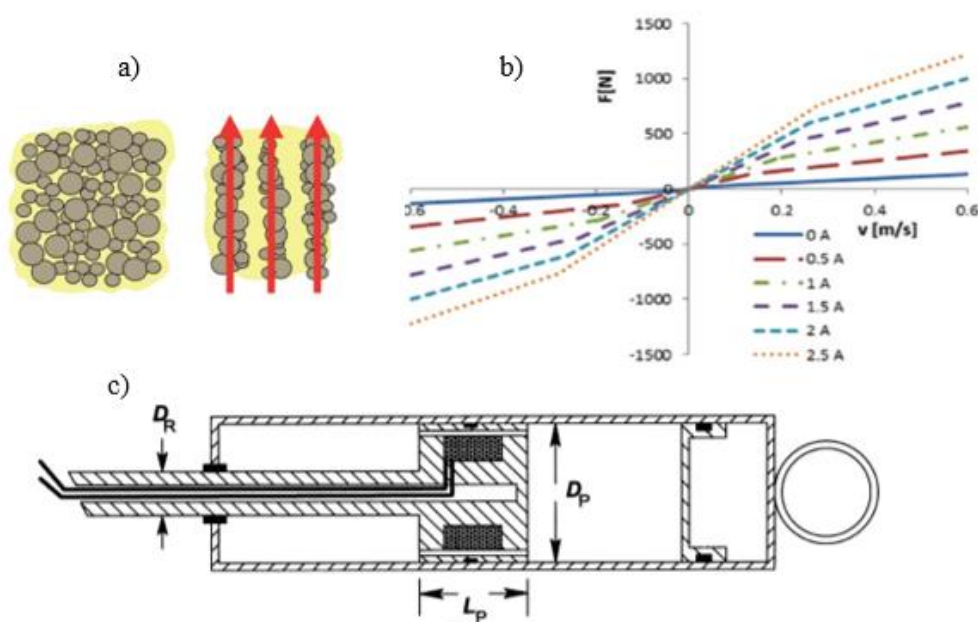
Jednoplášťová varianta provedení ER tlumiče je na obr. 8. Odlišností tohoto typu tlumiče je naplnění pracovního prostoru ER kapalinou. Kapalína vytlačená pístnicí pohybuje plovoucím pístem. Bez připojeného napětí a proudu vytváří tlumič pouze tlumící sílu viskózním odporem kapaliny. Při průchodu elektrického proudu se mikročástice obsažené v kapalině seskupí do řetězců, vzroste viskozita a tím i tlumící síla. Řídící jednotka má za úkol stanovit velikost elektrického proudu potřebného k zaručení nejlepších jízdních vlastností. [1] [12]



Obrázek 8 Elektoreologický tlumič [1]

### 2.2.3 MAGNETOREOLOGICKÉ TLUMIČE (MR)

MR tlumiče jsou schopny dosáhnout mnohem vyšších tlumících hodnot než ER tlumiče, proto je jejich použití příhodnější. Obr. 9c ukazuje základní provedení pro jednovláškovou variantu, nicméně dvouvláštové provedení je také konstrukčně možné. Různých tlumících charakteristik dosáhne tlumič změnou viskozity kapaliny v tlumiči. Kapalina MR tlumiče je tvořena nosným médiem, např. olejem, vodou nebo glykolem, a rozptýlenými feromagnetickými (nejčastěji železnými) částicemi, které se dají zpolarizovat. V přítomnosti magnetického pole se částice spojují do řetězců podél magnetických siločar (obr. 9a). Na rozdíl od ER tlumičů postačují k jevu jen malé proudy mezi 0-2 A. Magnetické pole vzniká při průchodu proudu cívkou. Změnou viskozity lze dosáhnout požadované tlumící síly, a tím vhodného tlumení. Viskozita opětovně klesne po vypnutí magnetického pole. Velkou předností MR tlumičů je rychlá odezva na změnu magnetického pole. [1] [13] [14]



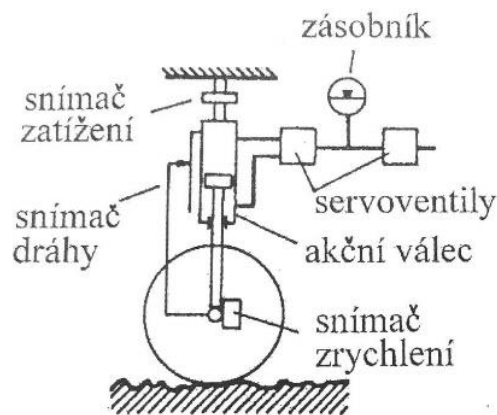
Obrázek 9 a) Řetězce magnetických částí [14] b)  $F$ - $v$  charakteristika [15]  
c) Průřez MR tlumičem [1]

## 2.3 AKTIVNÍ SYSTÉMY ODPRUŽENÍ

Aktivní systém odpružení dokáže měnit charakteristiky pružiny i tlumiče, což dovoluje udržovat potřebnou světlou výšku vozu i výrazně zlepšovat stabilitu automobilu zvláště na nekvalitní vozovce. Mezi hlavní nevýhody lze zařadit vysokou cenu, vyšší hmotnost a množství energie, které je potřebné dodávat systému. To vedlo výrobce komerčních automobilů k zaměření spíše na semi-aktivní systémy, které jsou levnější a energeticky dosažitelnější. Aktivní systémy se používají u výkonných a dražších automobilů, kterým je odebírána část výkonu motoru na čerpadla, kompresory a další prvky aktivního odpružení sloužící k regulaci charakteristik tlumiče a pružiny. [1] [6].

Energeticky nejnáročnější systém zavěšení je koncept od společnosti Lotus (obr. 10). Výkon dodávaný do systému k ovládní čtyř akčních regulovatelných válců se pohybuje kolem 10 kW. Jedním ze způsobů, jak se výrobci (nejen Lotus) snaží snížit potřebné množství energie, je netlumit každou nerovnost aktivním způsobem pomocí pracovního válce, ale reagovat jen na dlouhých či opakovaných nerovnostech. Tlumič funguje na principu změny tlaku

v komorách nad i pod pístem. Toho je docíleno pomocí servoventilů, které přivádí do tlumiče právě tolik oleje, aby měla kola stále zachovanou okamžitou hodnotu statického zatížení. Propružení kola vlivem nerovností vozovky nevyvolá odpor a vozidlo přejezdí nerovnosti bez negativních dynamických účinků. [6]



Obrázek 10 Aktivní systém od Lotus [6]

Mezi první aktivní systémy odpružení patří systém ABC (Active Body Control), který se poprvé objevil ve vozidle Mercedes-Benz CL. Další systémy aktivního odpružení jsou elektronicky modulované odpružení TEMS (Toyota Electronically Modulated Suspension) od Toyoty, aktivní podvozkový systém Dynamic Drive od BMW nebo aktivní podvozek MRC-Bose. [6]

## 2.4 CHARAKTERISTIKY TLUMIČE

Tlumič je charakterizován:

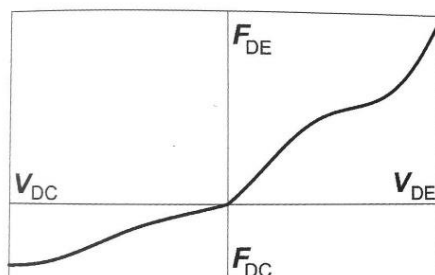
- a) rozměry
- b) charakteristikou tlumící síly
- c) dalšími faktory

Rozměry ovlivňující vlastnosti tlumiče jsou průměry pracovního a vyrovnávacího válce, minimální a maximální délka mezi úchyty nebo průřez ventilu. Tlumící charakteristiky F-v a F-s popisují tlumící sílu při stlačování a roztahování tlumiče v závislosti na rychlosti nebo poloze pístu. Další faktory popisují vlivy teploty, míru rozptýlení kinetické energie nebo chladící požadavky na tlumič. V této práci jsou pro některé aplikace předloženy následující charakteristiky. [1]

- graf znázorňující křivku tlumící síly v závislosti na rychlosti pístu
- poměrný útlum, závisející na tuhosti tlumiče (tlumící koeficient), tuhosti pružiny i hmotnosti vozidla.

### 2.4.1 ZÁVISLOST SÍLY NA RYCHLOSTI PÍSTU

Výběrem druhu tlumiče a nastavením průtokových ventilů lze dosáhnou široké škály tvarů křivek. Tlumící síla vykonaná tlumičem je závislá především na rychlosti pístu. Mezi další vlivy na velikost tlumící síly patří také změna teploty oleje, kavitace nebo v některých případech poloha pístu. Na obrázku č. 11 je znázorněn graf obecné závislosti tlumící síly na rychlosti za předpokladu, že tlumící síla není závislá na zdvihu (pozici) pístu. [1] [6]



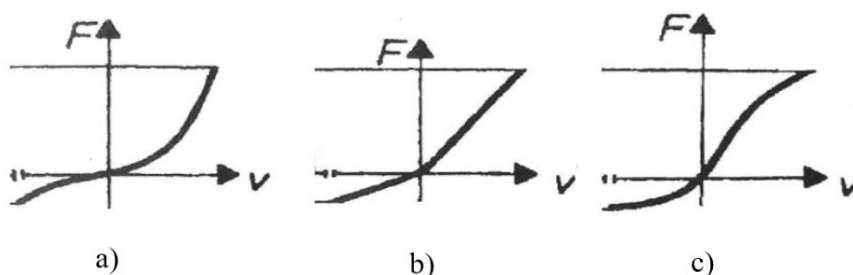
Obrázek 11 Závislost tlumící síly na rychlosti pístu [1]

Rychlost pístu je definována jako:

$$V_{DE} = -V_{DC} = \frac{dL}{dt} \quad (1)$$

Kde  $V_{DE}$  je rychlost pístu při roztahování tlumiče a  $V_{DC}$  při stlačování.  $F_{DE}$  a  $F_{DC}$  jsou tlumící síly, vzdálenost  $L$  je vzdálenost mezi úchyty tlumiče a  $t$  je čas. [1]

Odlišné požadavky v různých aplikacích vedou ke snaze docílit jiných  $F$ - $v$  křivek. Kombinováním ventilů a otvorů o různých průřezech je možné dosáhnout charakteristických křivek s progresivními, lineárními nebo degresivními segmenty (obr. 12).

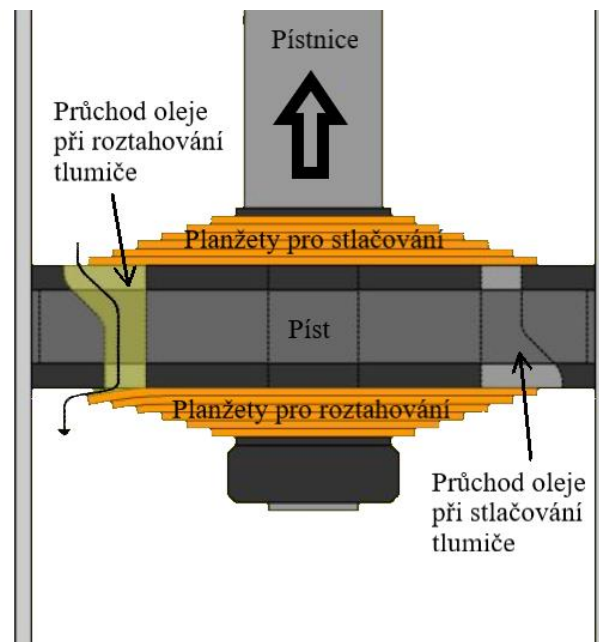


Obrázek 12 a) Progresivní b) Lineární c) Degresivní [6]

Při najetí na nerovnost vozovky jsou dynamické účinky přenášeny na odpruženou hmotu tím větší, čím větší je hydraulický odpor (tlumící síla) tlumiče. Proto je vysoká tlumící síla v tomto směru (stlačování) méně žádaná. Naopak při roztahování tlumiče je vhodné rozptýlit energii uloženou v pružině. Proto by měl být tlumič účinnější při roztahování pístu než při stlačování pístu, což je znázorněno i na grafu na obr. 11. Při brzdění, zrychlování a v zatáčkách, tedy v malých rychlostech pístu, by měl být tlumič „tvrdší“, aby se vozidlo nenaklápělo a neztrácelo na správné funkčnosti. V dnešní době je u pasivních tlumičů automobilů upřednostňována degresivní křivka, která nejlépe řeší požadavky této aplikace. [1] [6]

Doporučený poměr mezi tlumícími silami u osobních automobilů je 3:1. Ten společně s tvarem křivky zajišťuje mnoho typů ventilů, mezi které patří diskový, tyčový, šoupátkový, planžetový nebo tzv. 'blow-off' ventily. [1] [6]

U osobních aut je často využíván planžetový ventil (obr. 13). Planžety jsou na sebe poskládané do pyramidy od největšího po nejmenší průměr a jsou pevně spojeny s pístnicí. Olej tlumiče vytváří tlak na planžety, což způsobuje jejich ohýbání, a tím zvětšování plochy, kterou může olej protékat. Různých F-v křivek je docíleno přidáním dalších planžet do pyramidy nebo předeptnutím planžet. [1] [16]



Obrázek 13 Planžetový ventil [16]

## 2.4.2 POMĚRNÝ ÚTLUM

Poměrný útlum je bezrozměrná veličina, která dává do poměru tlumící koeficient a kritické tlumení. Pro tlumenou soustavu s jedním stupněm volnosti, tedy zjednodušeným modelem zanedbávající pružící a tlumící vlastnosti pneumatiky, platí:

$$F = -C\dot{z} \quad (2)$$

$$\omega_N = \sqrt{\frac{K}{m}} \quad (3)$$

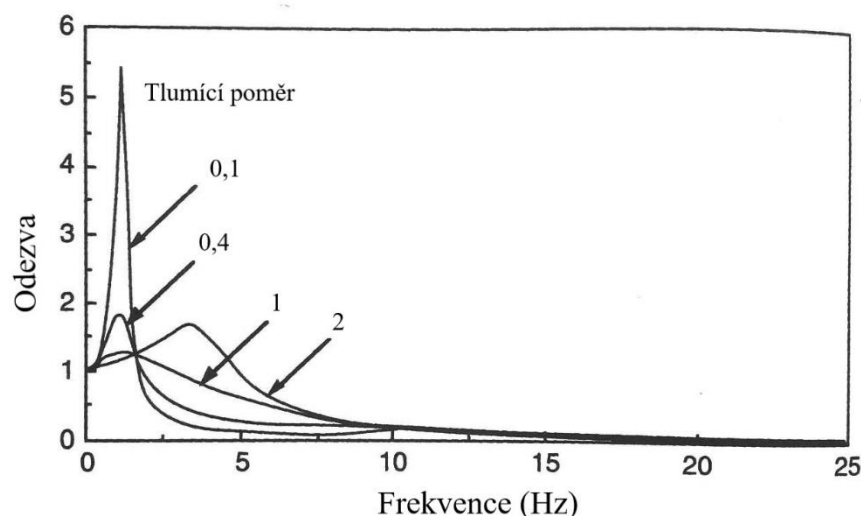
$$\zeta = \frac{C}{2m\omega_N} = \frac{C}{2\sqrt{mK}} \quad (4)$$

Kde  $F$  je tlumící síla,  $C$  tlumící koeficient,  $\dot{z}$  derivace polohy podle času (rychlost),  $\omega_N$  vlastní frekvence soustavy,  $K$  tuhost pružiny,  $m$  hmotnost soustavy a  $\zeta$  poměrný útlum. Znaménko mínus u výpočtu tlumící síly znamená, že tlumící síla je opačného směru než pohyb pístu [1]

Efekt tlumícího poměru je zobrazen na grafu  $T_s$ - $f$  (obr. 14). Odezva systému  $T_s$  vyjadřuje poměr amplitudy odezvy automobilu k nucené amplitudě povrchu vozovky. Může být vyjádřena pomocí frekvenčního poměru  $r$ , kde  $\omega_R$  je frekvence profilu vozovky. [1]

$$r = \frac{\omega_R}{\omega_N} \quad (5)$$

$$T_s = \sqrt{\frac{1 + 4\zeta^2 r^2}{(1 - r^2)^2 + 4\zeta^2 r^2}} \quad (6)$$



Obrázek 14 Vliv tlumícího poměru [17]

Při velmi malém tlumení  $\zeta = 0,1$  dojde k vysoké odezvě, v tomto případě kolem 1 Hz. Takové tlumení by značně zhoršilo ovladatelnost vozidla v této oblasti frekvencí, a tím bezpečnost jízdy. Při kritickém tlumení,  $\zeta = 1$ , je zamezeno téměř jakékoli oscilaci pružiny, nicméně ve vyšších frekvencích dochází k větší oscilaci než při nižších hodnotách poměrného útlumu. U nadkritického tlumení se stane tlumič příliš tuhý a nedochází k odpružení pomocí pružiny a tlumiče, nýbrž pomocí pneumatiky. [17]

V osobních automobilech se upřednostňuje degresivní  $F$ - $v$  charakteristika (obr. 12c). Při menší rychlosti pístu, kde je hodnota poměrného útlumu větší (strmá část křivky), je umožněno lepší tlumení pohybů odpružené hmoty při brzdění, zatáčení nebo zrychlení automobilu. Nižší poměrný útlum za vyšších rychlostí zajišťuje pohodlí a dostatečnou bezpečnost při přejezdění nerovností. [9] [18]

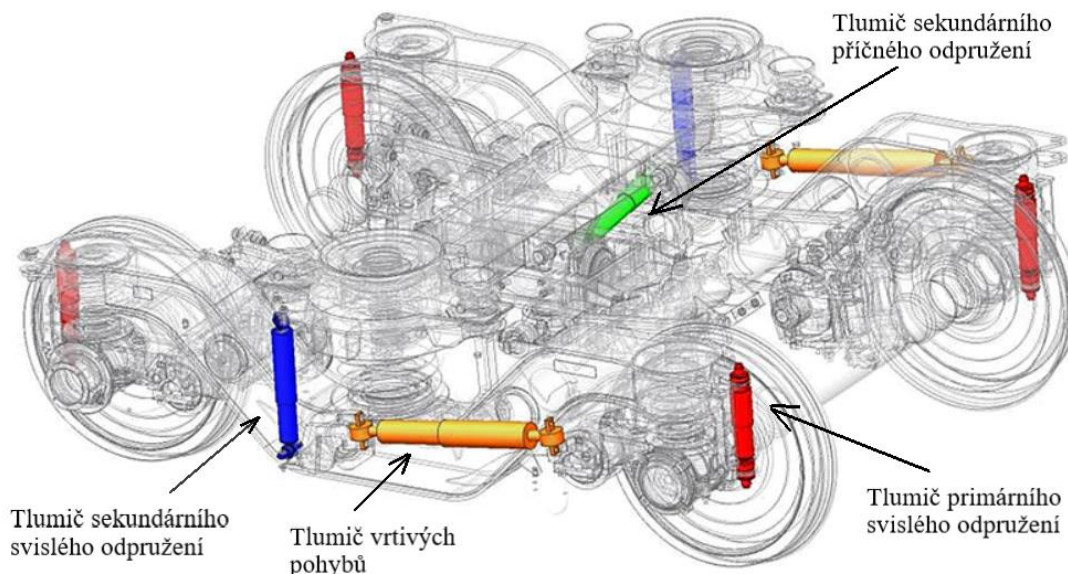
V závislosti na stavu vozovky by optimální pohodlí jízdy mělo nastat v okolí poměrného útlumu 0,2, zatímco nejlepších jízdních vlastností se dosahuje kolem hodnoty 0,8. Zvolená hodnota poměrného útlumu je tedy kompromis mezi komfortem cestujících a bezpečností při jízdě. U osobních automobilů se pohybuje hodnota poměrného útlumu nejčastěji mezi 0,2 a 0,4.[1]

## 3 VLAKY

### 3.1 PRIMÁRNÍ ODPRUŽENÍ

V primárním odpružení se využívají pružiny listové, vinuté, pryžové a vzduchové, a tlumiče hydraulické nebo třecí. Nachází se mezi dvojkolím a podvozkem, kde snižuje opotřebení podvozku a zajišťuje rovnoměrné rozložení hmotnosti soupravy na všechna kola. Další funkcí je udržování světlé výšky vozidla a odstranění dynamických účinků nerovností z kolejnice. [19] [20]

Primární i sekundární odpružení obstarává jízdní komfort vozidla. Při použití pryžových nebo listových pružin není obvykle nutné přidávat tlumiče. Pokud jsou použity vinuté pružiny, je nezbytné montovat i třecí nebo hydraulické tlumiče. Podle druhu vozidla a podvozku se značně liší konstrukční provedení odpružení vlaků. [19] [20]



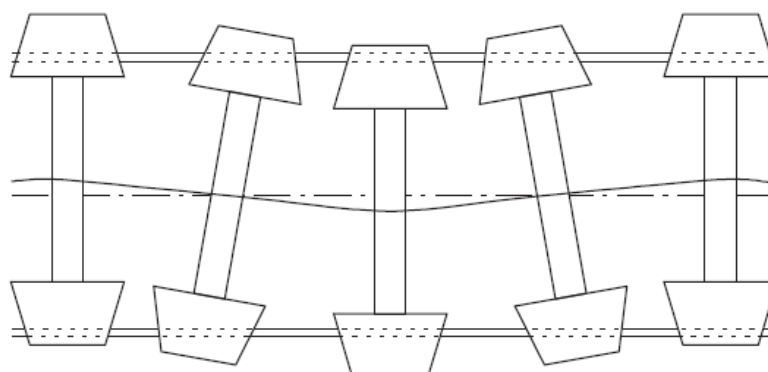
Obrázek 15 Uspořádání tlumičů na podvozku vlaku [21]

### 3.2 SEKUNDÁRNÍ ODPRUŽENÍ

Sekundární odpružení se vyskytuje především na osobních vozech, kde zajišťuje lepší jízdní komfort. Toho je docíleno vypružením mezi rámem podvozku a karoserií. Hlavními prvky sekundárního odpružení jsou pružiny, tlumiče, závěsky a torzní stabilizátory. Vypružení se vyskytuje v podélném, svislém i příčném směru. V podélném směru, směru jízdy vozidla, absorbují vrtivý pohyb a v příčném směru pak příčné vibrace. [19] [20]

Vrtivý pohyb kolejových vozidel je výsledkem kontaktu kolejnice s dvojkolím a jejich geometrie. Jakmile se dvojkolí příčně posune, vzhledem k ose kolejí, vlivem nerovností kola nebo kolejnice, projeví se rozdílné úhlové rychlosti na kolech. To donutí dvojkolí k zpětnému vybočení a návratu zpět do středu kolejnice. Vlivem setrvačných účinků prochází dvojkolí dál mimo osu kolejnic, dokud nedosáhne opět maximálního bočního posunu. To se opakuje a vzniká sinusový vrtivý pohyb (obr. 16). [13]





Obrázek 16 Vrtivý pohyb podvozku [13]

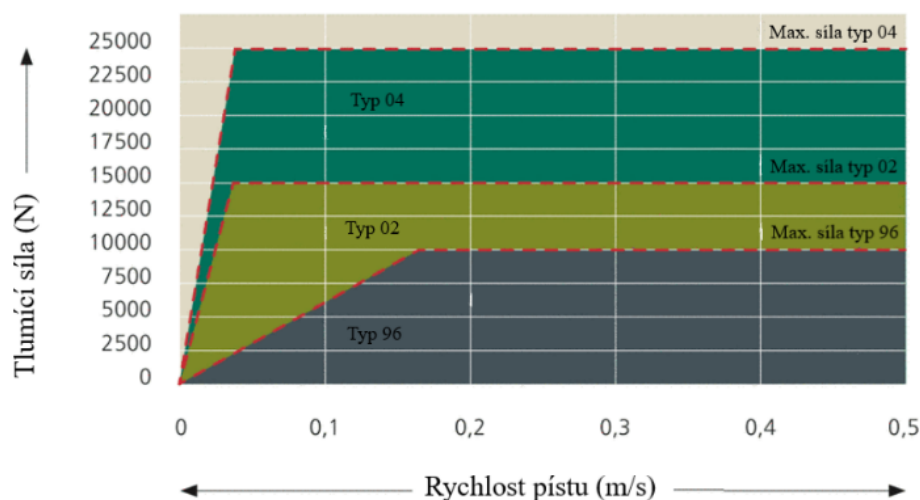
### 3.3 PŘEHLED TLUMIČŮ VLAKŮ

Popsány budou tlumiče od společnosti KONI, Liebherr a tlumiče zmíněné ve studiích [24] a [25]. Mezi další výrobce tlumičů patří například Dellner Dampers, Strojárna Oslavany, Hitachi, Cultraro nebo AL-KO.

KONI vyrábí tlumiče kolejových vozidel kategorií endurance line a performance line.

#### 3.3.1 ENDURANCE LINE

Jedná se o dvouplášťové tlumiče s životností nejméně pětadvacet let. Koni vyrábí tři typy tlumičů této série, typ 96, typ 02 a typ 04. Lineární provozní tlumicí charakteristika může být nastavena v oblastech dle grafu na obrázku 17. Tlumiče endurance line se využívají v primárním i sekundárním svislém odpružení. Můžou se aplikovat i jako podélné a příčné tlumiče v sekundárním odpružení. Důležité je umístit nasávací otvor do zpětného spodního ventilu tlumiče tak, aby nemohl nasávat vzduch nebo zpěněný olej ani v horizontální poloze. Hlavní výhodou, která zvyšuje celkovou životnost tlumiče, je možnost nastavení tlumicí síly otočením seřizovacího šroubu. Není nutné tlumič rozebrat, ani vyměňovat jeho vnitřní části. [22]



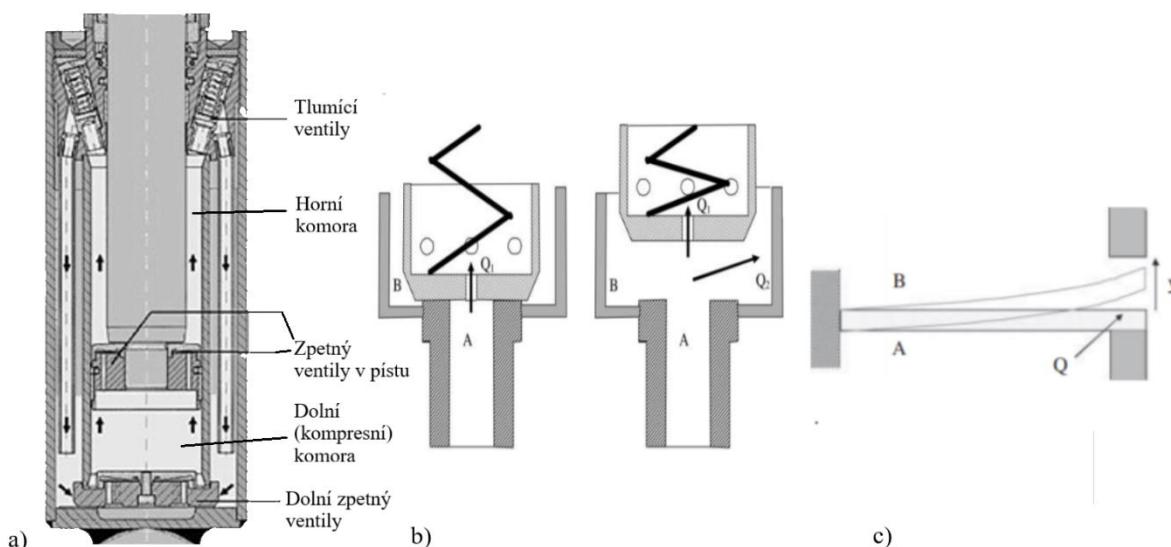
Obrázek 17 F-v charakteristika endurance line [22]

Průřez tlumičem je znázorněn na obrázku 18a. Dolní komora (kompresní) je obvykle dvakrát větší než horní komora (expanzní), což má za následek stejnou tlumící sílu pro stlačování a roztahování tlumiče. Během stlačování tlumiče se zmenšuje objem kompresní komory, což zvyšuje její tlak. Toto zvýšení otevírá zpětné ventily v pístu. Pístnice zmenšuje objem horní komory, což má za následek průtok oleje z horní komory do pomocné. Zpětný ventil, spojující kompresní komoru s pomocnou komorou, zůstává uzavřen, neboť tlak v kompresní komoře je větší. [61]

Při roztahování se zmenšuje objem a zvětšuje tlak v horní komoře. Zvětšování kompresní komory způsobuje pokles tlaku v této komoře, což má za následek uzavření ventilů v pístu a otevření ventilů mezi pomocnou a kompresní komorou. V tomto typu tlumiče olej vždy protéká stejným směrem. [22] [61]

Obr. 18b zobrazuje schematické znázornění tlumícího ventilu. Pokud je síla způsobená tlakovým rozdílem mezi horní a vyrovnávací komorou nižší než předpětí pružiny, pak může olej protékat pouze otvorem  $Q_1$ . Pokud je však tlak v horní komoře dostatečně vysoký, pak může síla způsobená tlakem pohybovat ventilem a olej protéká otvorem  $Q_1$  a  $Q_2$ . Paralelně k těmto ventilům jsou i tzv. "blow off" ventily. [61]

Zpětné ventily v pístu a v dolní části tlumiče jsou identické (obr. 18c). Pokud je tlak v B vyšší než tlak v A, zůstává disk nedeformovaný a průtok oleje je nulový. Když je však tlak na A vyšší než tlak na B, dochází k deformaci disku a vytvoří se průchozí plocha pro tok oleje z A do B. [61]

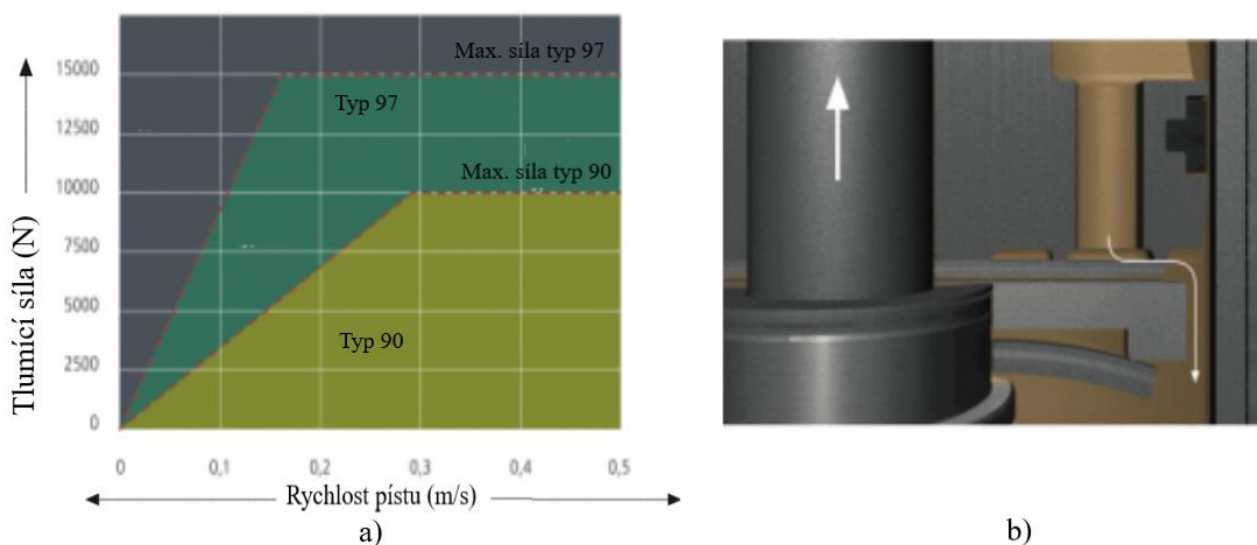


Obrázek 18 a) Konstrukce endurance tlumiče [23] b) Tlumící ventil [61] c) Zpětný ventil [61]

### 3.3.2 PERFORMANCE LINE

Jedná se opět o dvouplášťový hydraulický tlumič se stejnou tlumící charakteristikou pro stlačování a roztahování. Koni vyrábí dva druhy, typ 97 a typ 90. Používají se jako svislé tlumiče v primárním i sekundárním odpružení. Trvanlivost tohoto produktu se odhaduje na 1,2 milionu kilometrů. Hlavní výhodou je především jeho cena. [22]

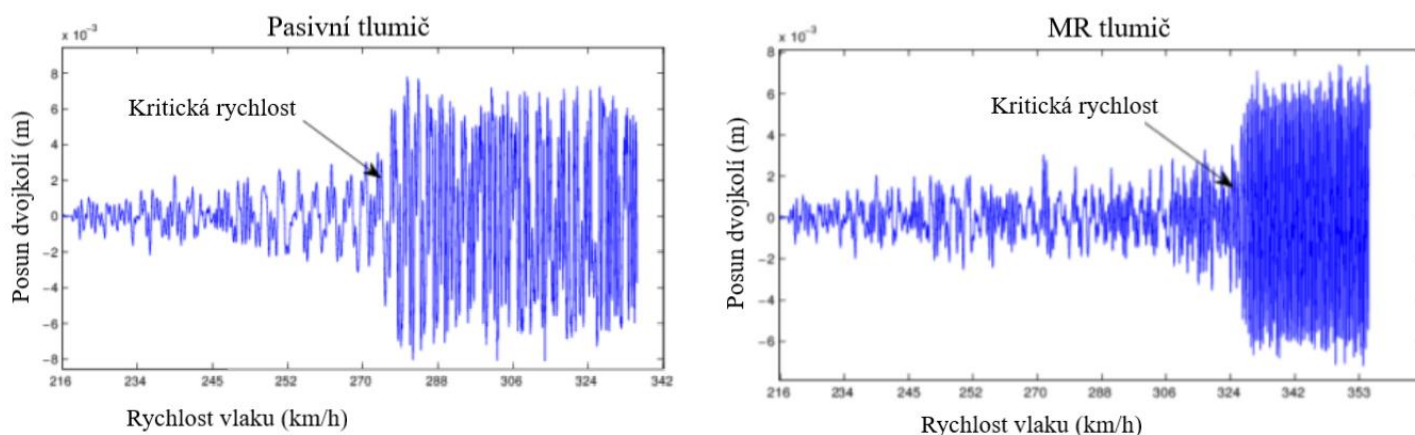
Lineární charakteristika této série tlumičů může být přizpůsobena v oblastech dle grafu na obr. 19a. Během roztahování tlumiče se tlumení provádí pomocí ventilů (planžet) pod pístem, zatímco během stlačování tlumiče vytváří ventily nad pístem požadovanou tlumící sílu. Zákazník si může také nastavit “blow off” bod (taktéž u endurance line), od kterého se tlumící síla nebude výrazně zvětšovat s nárůstem rychlosti pístu. “Blow off” se nastavuje pomocí předpětí na planžetě (obr. 19b). V momentě, kdy je toto předpětí překročeno, tak se planžeta otevírá natolik, že tlumící síla již dál neroste. “Blow off” ventil je využíván, aby nebyl tlumič při velkých rychlostech pístu příliš “tvrdý” a nepřenášely se dynamické účinky do celého vozidla. [1] [22]



Obrázek 19 a) F-v charakteristika [22] b) Blow off ventil [22]

### 3.3.3 MAGNETOREOLOGICKÉ TLUMIČE

Podle studie [24] má největší vliv na kritickou (maximální) rychlost vysokorychlostních vlaků sekundární příčný tlumič. Proto byl pasivní tlumič nahrazen semi-aktivním MR tlumičem. Z grafů je zřetelně vidět, že s použitím MR tlumičů mohou vysokorychlostní vlaky dosáhnout vyšších rychlostí. [24]

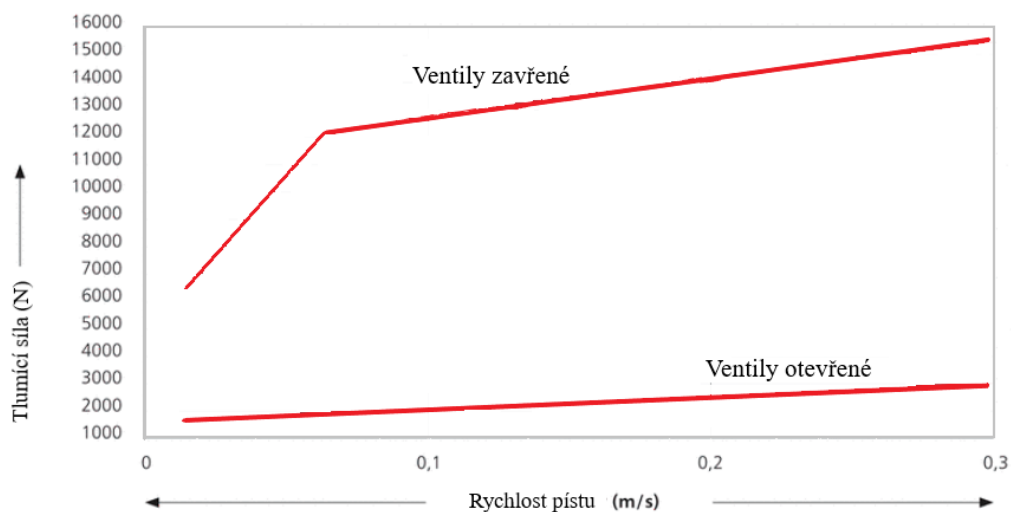


Obrázek 20 Posun dvojkolí v závislosti na rychlosti vlaku [24]

### 3.3.4 ELEKTRONICKY OVLÁDANÝ TLUMIČ VRTIVÝCH POHYBŮ

V zatáčkách při nižší rychlosti vozidla je žádoucí, aby tlumiče poskytovaly malou tlumící sílu. Zatímco k dosažení stabilní a bezpečné jízdy na přímé trati jsou vhodnější větší tlumící síly. Pasivní odpružení se snaží najít kompromis mezi těmito charakteristikami. Proto i u kolejových vozidel, hlavně na vysokorychlostních tratích, se uplatňují adaptivní a semi-aktivní tlumící systémy schopné zajistit změny tlumících charakteristik. [13]

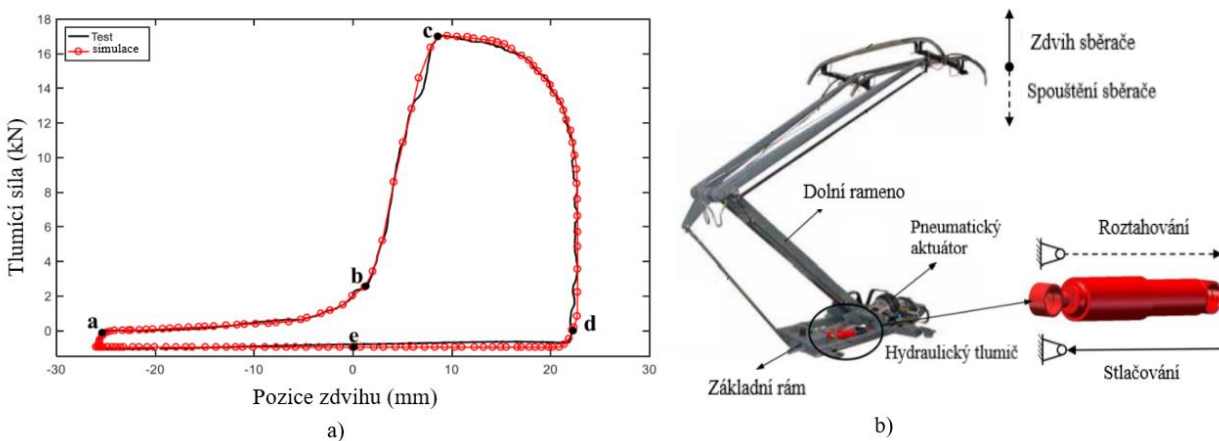
Mezi další výrobky firmy Koni patří elektronicky ovládaný tlumič vrtivých pohybů, který se umísťuje podélně ve směru jízdy. Při nižší rychlosti vozidla má otevřené ventily, při vyšších rychlostech na přímé trati zavřené. To vede k následující F-v charakteristice. [22]



Obrázek 21 F-v charakteristika [22]

### 3.3.5 SBĚRAČ TRAKČNÍHO VEDENÍ

Hydraulický tlumič sběrače trakčního vedení je instalován mezi základní rám a dolní rameno sběrače. Optimální nastavení tlumiče umožňuje stabilnější sběr proudu a získání ideální zdvihací a spouštěcí rychlosti sběrače. Když je trakční sběrač spuštěn na střeše vlaku, tak je tlumič roztáhnut; při zvednutém sběrači je tlumič stlačen. V sekci "a-b" se sběrač začne snižovat (tlumič se roztahuje). Všechny otvory jsou v tomto momentě otevřené, takže sběrač klesá

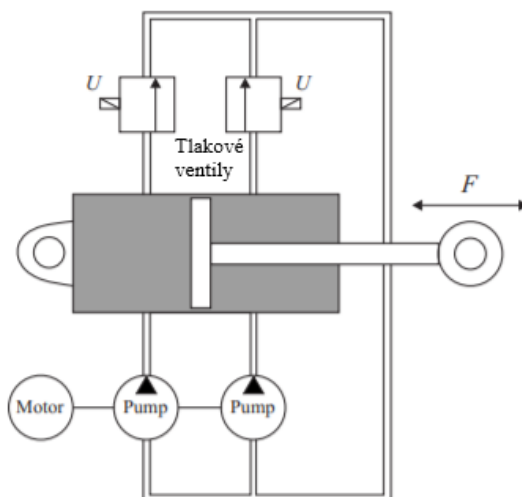


Obrázek 22 a) Závislost tlumící síly na pozici zdvihu [25] b) Umístění sběrače trakčního vedení [25]

rychle. Mezi “b-c“ se otvory v pístu zužují a tlumící síla rychle roste (rychlost sběrače klesá). V sekci “c-d“ se rychlost sběrače (píst) blíží k nule, a s tím klesá tlumící síla, dokud sběrač nedosedne na střechu vlaku. V “d-e-a“ je sběrač zvedán pneumatickým aktuátorem. Tlumič vytváří nízkou tlumící sílu přibližně konstantní v celé délce zdvihu. [25] [26]

### 3.3.6 TLUMIČ PŘÍČNÝCH VIBRACÍ

Jeden ze zástupců aktivního systému odpružení v kolejové dopravě je elektrohydraulický tlumič od německé společnosti Liebherr, určený pro příčné vibrace. Do komor tlumiče je dodávána kapalina pomocí dvou čerpadel, které jsou poháněna asynchronním motorem napájeným energií z vlaku. Tlakové ventily regulují výtok z válce, což generuje tlakový rozdíl mezi oběma komorami. Ventily jsou ovládány měnícím se napětím. Rozdíl v tlaku umožňuje elektrohydraulickému tlumiči vytvořit požadovanou sílu v tlaku i tahu. Maximální tlumící síla tohoto tlumiče je 30 kN při rychlosti pístu 50 mm/s. [27]



Obrázek 23 Schematické znázornění aktivního tlumiče [27]

### 3.3.7 TLUMIČ VÝHYBEK

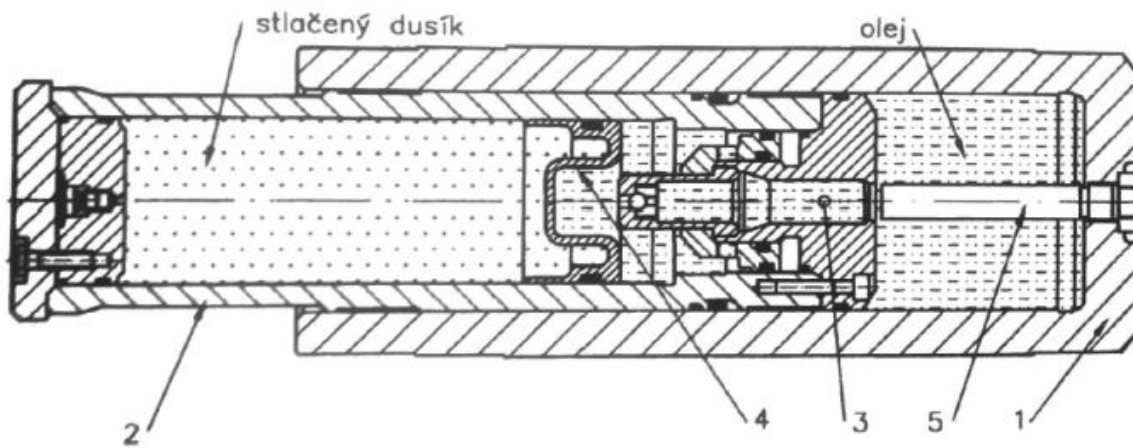
Hydraulické tlumiče se také používají při zpomalování pohybu kolejnice u železničních výhybek. Způsob montáže je ukázán níže. [28]



Obrázek 24 Tlumič výhybek [28]

### 3.3.8 NARÁŽECÍ ÚSTROJÍ

Další použití tlumičů je k nalezení v nárazecím ústrojí mezi vagony. Nárazecí ústrojí by mělo co nejlépe tlumit dynamické účinky přenášených podélných sil. Nejčastěji se používá elastomerový (hydrostatický) tlumič a pneumohydraulický (hydrodynamický) tlumič. Provedení pneumohydraulického jednoplášťového tlumiče od společnosti Oleo International je na obrázku níže. Do vnějšího válce (1) zasahuje dutý plunžr (2). Ventil (3) je umístěn na konci dutého plunžru (2). Komory jsou odděleny plovoucím pístem (4). Regulační čep (5) je zabudován v ose vnějšího válce. Do rychlosti pístu 0,05 m/s protéká olej škrťicím ventilem s malým hydraulickým odporem. Při razantním (dynamickém) zatížení se průřez škrťicího ventilu (3) sníží o zasahující regulační čep (5). Vzniká velká tlumící síla přímo úměrná kvadrátu rychlosti stlačování. Pohyb plovoucího pístu (4) vyrovnává tlaky v komorách. [29] [30]



Obrázek 25 Konstrukce nárazecího ústrojí [29]

## 4 DALŠÍ DOPRAVNÍ PROSTŘEDKY

### 4.1 MOTOCYKL

Podobně jako u automobilů a kolejových vozidel je tlumič u motocyklů zapotřebí k útlumu vzájemného periodického pohybu odpružených a neodpružených hmot. Zvláště důležité je tlumení, pokud jede motocykl přes od sebe stejně vzdálené nerovnosti rychlostí, že frekvence nárazů na přední nebo zadní kolo je stejná jako vlastní frekvence neodpružené hmoty. [31]

Vliv hmotnosti řidiče, spolujezdce a zavazadel na odpružení motocyklů je znatelnější než u automobilů, proto je u většiny tlumičů jednostopých vozidel zajištěno regulování tlumící síly seřizovacím šroubem. U dražších tlumičů společnosti Öhlins lze nastavit jiné tlumení pro stlačování a roztahování tlumiče. [31]

Postupným vývojem se pružina a tlumič motocyklu spojily do společného konstrukčního celku, tzv. pružící a tlumící jednotky, která je upevněna do záchyty rámu a kyvné vidlice jedním šroubem. [31]

#### 4.1.1 ZAVĚŠENÍ PŘEDNÍHO KOLA

Přední teleskopická vidlice, která spojuje přední kolo s rámem, je nejrozšířenějším způsobem pro uchycení a odpružení předního kola motocyklu. Konstrukce teleskopické vidlice je zobrazena na obrázku 26.

Dutina vidlice je rozdělena pístem (4) a ventily (8,9,10) do tří částí:

- a) spodní prstencový prostor (15)
- b) horní prstencový prostor (16)
- c) centrální prostor (17)

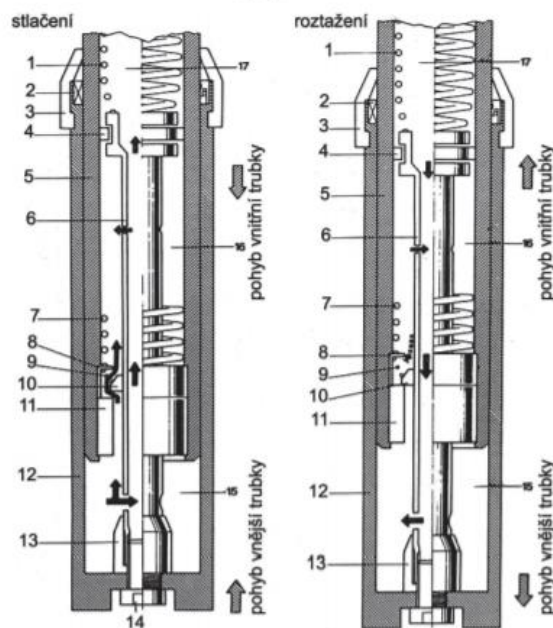
Centrální prostor je složen z dutiny v pístnici a nad ním ležícím prostorem ve vodící trubce (5). Při pohybu pístnice se mění objemy všech tří prostorů.

Při stlačování teleskopické vidlice se kluzná trubka (12) posunuje proti tlaku pružiny (1) nad vodící trubku. Olej vytlačený ze spodního prstencového prostoru protéká přes ventil (10) a otvory v pístnici do horního prstencového prostoru. Olej vytlačený vodící trubkou je tlačěn dutou pístnicí do centrálního prostoru. K zamezení propružení na doraz slouží objímky (11 a 13) zajišťující dodatečné tlumení. [31]

U roztahování vidlice proudí olej ze zmenšujícího se horního prostoru přes otvor v pístnici do centrálního prostoru. K dosažení větší tlumící síly při roztahování jsou uzavřené ventily (10).

Výhodou teleskopické vidlice je její kompaktnost, lehce zajistitelné mazání, nenáročnost na údržbu, nízká poruchovost a vysoká životnost. Nevýhodou je rychlé opotřebení těsnících kroužků, způsobené nečistotami přichycenými na nosných a kluzných trubkách, což vede k úniku oleje, a tím způsobení dalších problémů. [31]

Mezi další typy zavěšení kola patří obrácená teleskopická vidlice, tažená kyvná vidlice, tlačená kyvná vidlice nebo protiponořovací (antidive) systémy (ADS). [31]



Obrázek 26 Přední teleskopická vidlice [31]

#### 4.1.2 ZAVĚŠENÍ ZADNÍHO KOLA

Zadní vidlice může být odpružena jednou centrální pružicí jednotkou nebo dvěma postranními pružicími jednotkami. U moderních motocyklů se objevuje pouze kyvná zadní vidlice, kterou lze rozdělit na:

- a) konvenční dvouramenná vidlice
- b) jednoramenná vidlice
- c) konzolová vidlice
- d) vidlice s pákovým mechanismem a s centrální pružicí a tlumící jednotkou

Hydraulický tlumič s vyrovnávací nádržkou (obr. 27a) je často využíván ve všech typech zavěšení zadního kola. Nádržka, která je připevněna k rámu motocyklu, nebo přímo na těle tlumiče, je spojena s tlumičem hadičkou. Do nádržky protéká tlumičový olej, který zvětšuje svůj objem zahřátím v důsledku zatížení a objem oleje vytlačeny pístnicí. Vyskytují se i tlumiče s nádržkou, které obsahují natlakovaný vzduch nebo dusík. [31]

Společnost Sachs vyvinula tlumič se samočinnou regulací světlé výšky. Výhodou je jeho kompaktní uspořádání všech komponent (čerpadlo, zásobník oleje a ventily). Objevil se i v luxusních automobilech Mercedesu, Volva nebo BMW. Poprvé byl zaveden u motocyklů BMW v roce 1979. [31] [32]

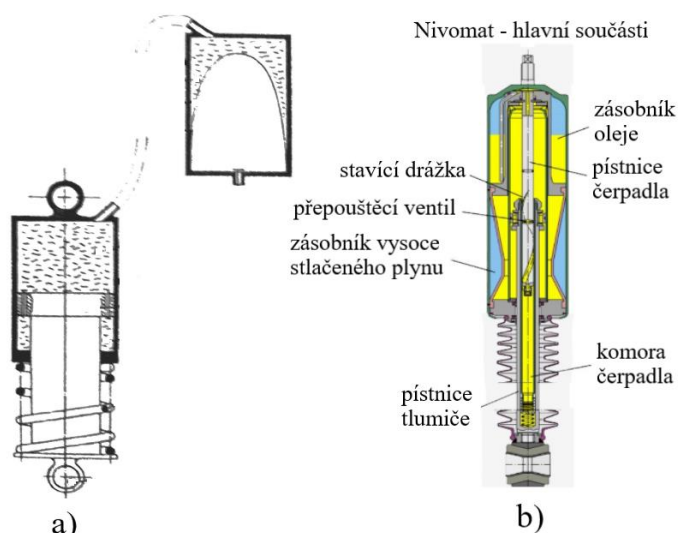
Tlumič používá jako čerpadlo komoru s pístem poháněnou samotným pohybem vozidla přes nerovnosti. Při roztahování tlumiče je olej nasáván dutou pístnicí čerpadla z olejového zásobníku do komory čerpadla. Naopak při stlačování tlumiče je pístnice tlumiče zatlačena proti pístnici čerpadla až na úroveň vymezující nestlačitelný olej v komoře čerpadla. Když se do-



stane pístnice tlumiče na potřebnou světlou výšku, začne unikat olej přes spirálovou drážku a tlak v komoře čerpadla dál neroste. [32]

Semi-aktivní magnetoreologické tlumiče také našly svoje uplatnění, když se Ducati Multistrada 1200 a BMW HP4 staly prvními sériově vyráběnými motocykly s tímto tlumením. V dnešní době výrobci vkládají MR tlumiče do většiny luxusních modelů. [33]

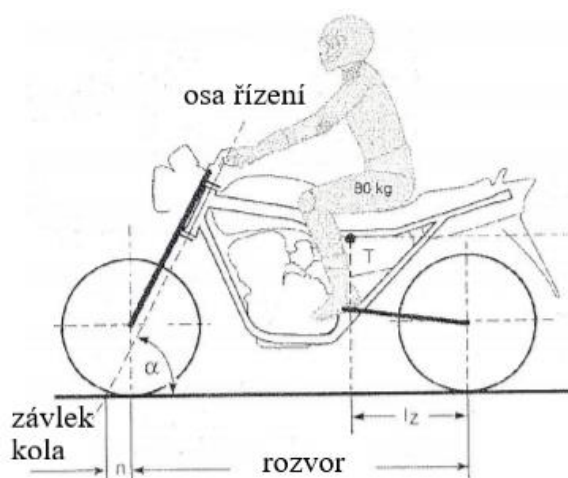
Aktivní tlumiče se vzhledem k jejich velikosti v současné době nevyužívají. [33]



Obrázek 27 a) Tlumič s externí nádobkou [31] b) Tlumič NIVOMAT [32]

#### 4.1.3 TLUMIČ ŘÍZENÍ

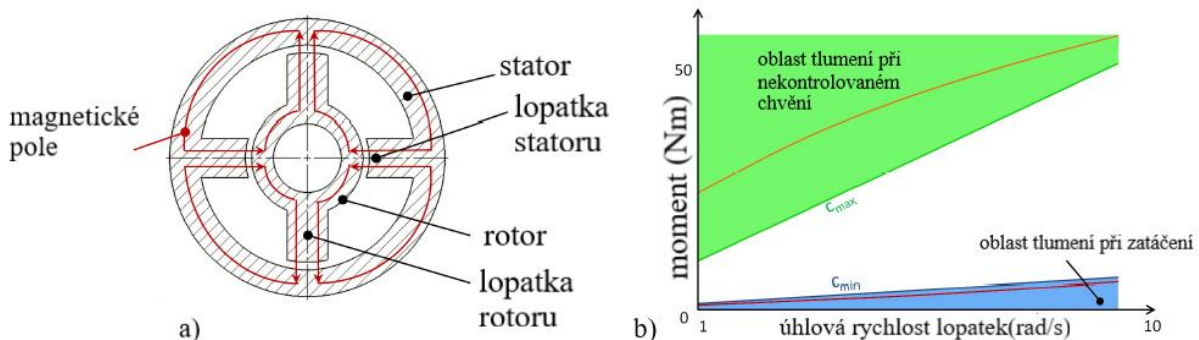
Motocykly s krátkým rozvorem a s úhlem osy řízení mezi  $75^\circ$  až  $90^\circ$  (obr. 28) rychleji reagují na pootočení řídicích. Vedlejším účinkem je menší stabilita. Pokud motocykl odskočí na nerovnosti a přední kolo není při dopadu v linii se směrem jízdy, tak to může způsobit nechtěné chvění řídicích, které je třeba utlumit. Tlumič by měl poskytovat tlumení jen když dojde k rychlému chvění, zatímco během zatáčení by neměl klást odpor. K útlumu kmitajících řídicích se využívá teleskopický nebo rotační tlumič. [34]



Obrázek 28 Rozvor a osa řízení [31]

Společnost Hyperpro vyrábí tlumič řídicích tyčí využívající tlumič s průchozí pístnicí. Vyznačuje se progresivní charakteristikou tlumení. [34]

Rotační MR tlumič popsáný ve studii [35] je integrován přímo do dutiny řídicích tyčí. Na obr. 29a je zobrazen průřez tlumiče. Tlumič je rozdělen na dvě části, každá část s dvěma lopatkami proti sobě (nepohyblivý stator a pohyblivý rotor). Obě části spolu uzavírají prostor, kde se nachází MR kapalina. Graf (obr. 29b) ukazuje akceptovatelné rozmezí tlumících hodnot pro bezpečnost (zelená oblast) a komfort (modrá oblast).



Obrázek 29 a) Rotační tlumič [35] b) Charakteristika tlumení [35]

## 4.2 ODPRUŽENÍ PODVOZKU LETADLA

Nejvyužívanějším typem odpružení podvozku letadla je oleo-pneumatická jednotka. Oleo-pneumatická jednotka je tvořena dvěma dutými válci. Horní fixní válec obsahuje dusík, který se při přistání stlačuje a funguje tedy jako pružina. Spodní pohyblivý válec je zaplněn hydraulickým olejem. Škrťací otvor uprostřed umožňuje oleji protékat mezi komorami jednotlivých válců. [36]

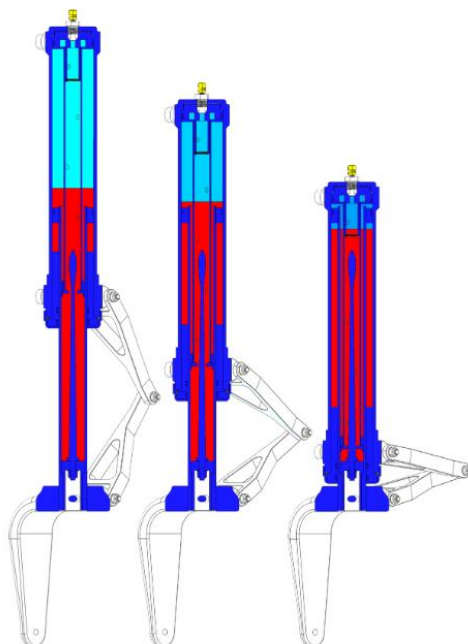
Při přistání se spodní válec zasouvá do vrchního, což nutí olej protékat mezi komorami. Dusík, chovající se jako pružina, absorbuje impakt. Stlačený plyn nutí olej protékat zpět do dolní komory, a tím se oleo-pneumatická jednotka zpětně roztahuje. Rychlost, kterou olej vstupuje do horní komory a kterou ji opouští, tedy rychlost, při které dochází ke kompresi a expanzi dusíku, je regulována velikostí otvoru. Existuje více způsobů, jak řídit průtok oleje. [36]

Některé oleo-pneumatické jednotky (obr. 30) využívají kuželovou tyč připevněnou na podstavě spodního válce. Kuželová tyč procházející škrťacím otvorem postupně zmenšuje velikost otvoru. Se zmenšující se plochou, kde může protékat olej, se zvyšuje tlumící síla. [36]

Některé oleo-pneumatické jednotky obsahují ventily, které omezují průtok při roztahování, aby se zabránilo rychlému pohybu spodního válce, což by mělo za následek tvrdé nárazy. Jiné obsahují tlakové ventily, které se otevrou, když se objeví neobvyklá zatěžovací síla. Změna tlaku způsobí otevření ventilu a propuštění více oleje, což sníží dynamickou sílu přenášenou na tělo letadla. [36]

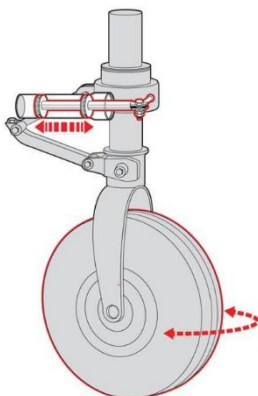
Další variantou oleo-pneumatické jednotky je varianta obsahující více komor, které účinně oddělují odezvu do dvou režimů a optimalizují tak účinnost tlumení pro každou z nich. Je vyžadováno jiné odpružení při samotném přistání a při pojíždění na přistávací dráze (parkování). Před přistáním není oleo-pneumatická jednotka zatížena vahou letadla, zatímco během

parkování zahrnuje počáteční zatížení plnou hmotností letadla. Tento typ jednotky je navržen tak, aby docházelo k optimálnímu odpružení v obou situacích. [36]



Obrázek 30 Oleo-pneumatická jednotka s kuželovou tyčí [36]

Oleo-pneumatické jednotky jsou často doprovázeny tlumiči (obr. 31), které tlumí třepetavý pohyb kol. Tyto hydraulické tlumiče zabráňují rychlému kmitavému pohybu kola, aniž by zasahovaly do pomalejších pohybů spojených s řízením a ovládáním letadla. [36] [37]



Obrázek 31 Tlumič třepetavého pohybu [37]

## 5 JINÉ APLIKACE TLUMIČŮ

### 5.1 DVEŘNÍ ZAVÍRAČ

Dveřní zavírač je mechanické zařízení zavírající automaticky dveře. Účelem zavírače dveří může být:

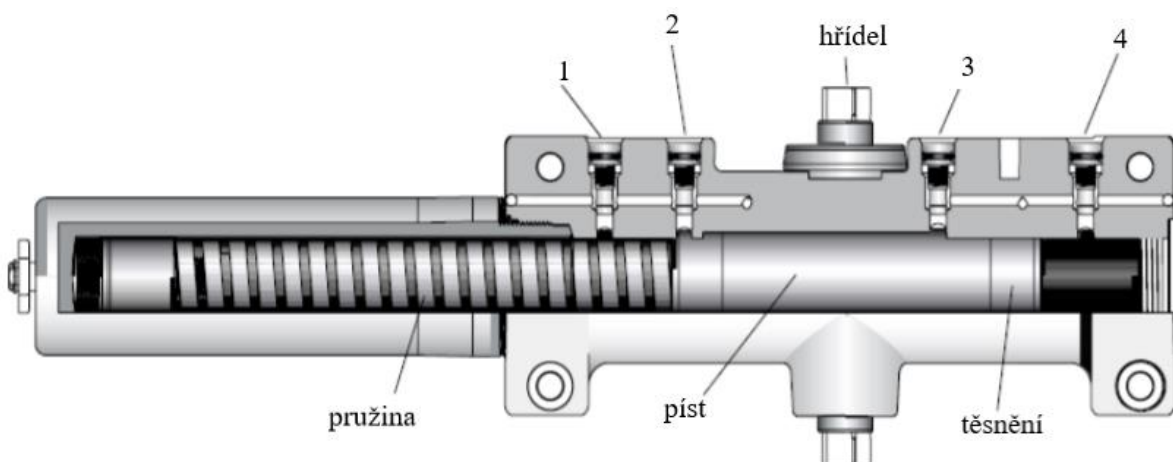
- a) zajištění dovržení protipožárních dveří
- b) zabránění prudkému zabouchnutí dveří
- c) regulace rychlosti otevření dveří
- d) zvýšení bezpečnosti
- e) snížení nákladů

Protipožární dveře umožňují bezpečně opustit budovu a zároveň udržet kouř a oheň vevnitř budovy. Pomalejší rychlost zavírání dveří předchází úrazům a zlepšuje přístupnost. Většina zavíračů je také vybavena funkcí bránící příliš rychlému otevření dveří (vítr, vandalismus), které by mohlo poškodit dveře, stěny nebo cokoliv/kohokoliv v cestě. Bezpečným zavřením také nedochází k úniku tepla, a tím k souvisejícím finančním ztrátám. [38]

Dveřní zavírač ukládá energii použitou při otevírání dveří v pružině a uvolňuje ji k zavírání dveří. Některé zavírače umožňují úpravu tuhosti pružiny, což činí dveře snadněji nebo obtížněji otevíratelné. Nejčastěji se k regulaci rychlosti pohybu dveří používá konstrukční uspořádání hydraulického tlumiče, který je zobrazen na obr. 32. [39]

Při otevírání dveří píst stlačuje pružinu a nutí procházet hydraulickou kapalinu ventilem 2, který zaručuje snadné otevírání. Jakmile jsou dveře otevřeny o 70° až 85°, píst plně uzavírá ventil 2. Kapalina protéká ventilem 1, kde vlivem menšího průřezu dochází ke zvětšení tlumící síly. V souvislosti s tím roste síla potřebná k otevření dveří. [40]

Uložená energie v pružině tlačí píst zpět a kapalina proudí skrz ventil 3, který reguluje zavírací rychlost. Posledních 15° je tlumeno prostřednictvím ventilu 4. Aby se dveře plně zavřely, musí být dosedací rychlost dostatečná, což zajišťuje právě ventil 4. [40]



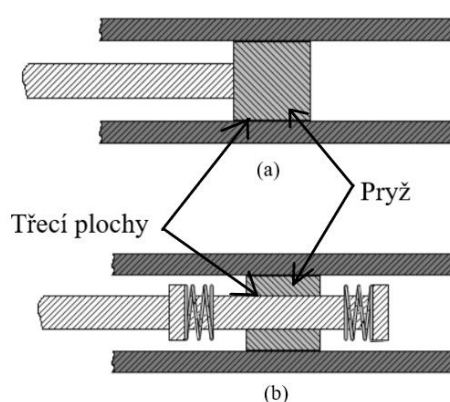
Obrázek 32 Konstrukce dveřního zavírače [39]

Velikost a hmotnost dveří se liší, a tak každý ventil zavírače dveří je seřiditelný. Velikost tlumící síly pro různé dveře se určuje podle normy en 1154.

## 5.2 PRAČKA

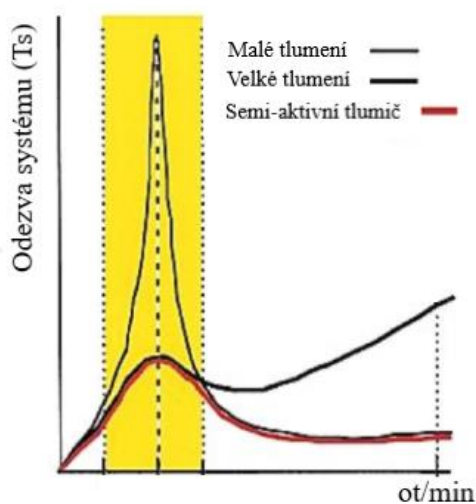
Vibrace pračky způsobuje především nevyrovnaná hmotnost oblečení rozložená v bubnu pračky. Vibrace jsou přenášeny na podlahu, způsobují nepříjemné zvuky, snižují životnost systému a jeho nespolehlivost. [41]

K tlumení vibrací pračky se nejčastěji používají pasivní třecí tlumiče, které jsou levné a konstrukčně jednoduché. Dvě varianty vyráběné společnostmi Suspa a Aweco jsou znázorněny na obr. 33. Ve variantě (a) dochází k tření mezi posuvnou pryží a válcem. Druhá možnost (b) využívá tlumení závislé na poloze. [42]



Obrázek 33 Třecí tlumiče pračky [42]

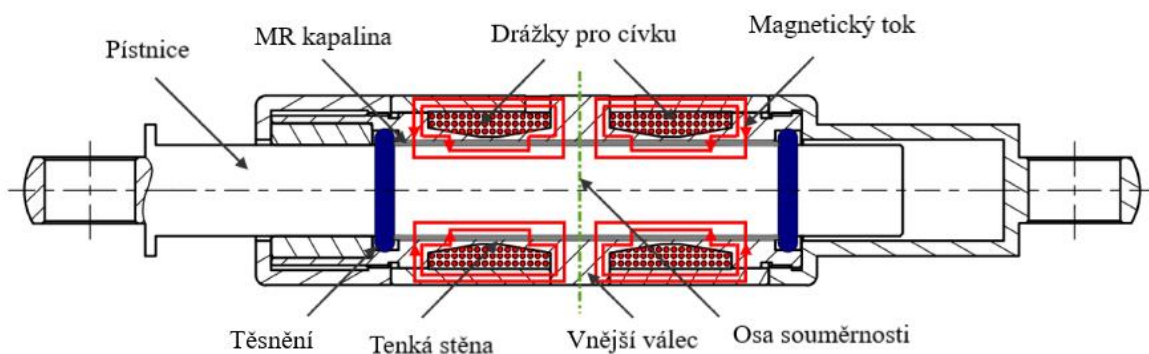
Když je použit pasivní tlumič ke snížení vibrací v nízkých frekvencích, způsobí to závažnější vibrace pračky ve vyšších frekvencích (obr. 34). Důvodem je skutečnost, že budící síla je přenášena do rámu pračky přes “tvrdý“ tlumič. Použitím pasivního tlumiče dochází ke kompromisu mezi tlumením v nízkých a vysokých frekvencích. Semi-aktivní systém tlumení začíná být využíván v moderních pračkách k nejefektivnějšímu snížení vibrací. [41] [42]



Obrázek 34 Odezva podle tlumení [43]

Magnetoreologický (MR) tlumič je nejvhodnější variantou semi-aktivního tlumení díky rychlé odezvě a snadnému upravení velikosti tlumení. Obr. 35 zobrazuje konfiguraci MR tlumiče podle studie [43]. Dvě cívky jsou svařeny do drážek ve válci. Tenká stěna mezi cívkou a MR kapalinou je navržena, aby měla malou plochu. Magnetický tok procházející skrz ni rychle dosáhne nasycení, a proto je nucen přejít přes mezeru. MR kapalina tuhne a vytváří odpor (tlumící sílu) mezi pístnicí a vnějším válcem. [43]

Hodnota poměrného útlumu 0,7 je dostačující k utlumení první rezonanční odezvy, vyšší hodnoty tedy nejsou potřeba. Při vysokých budících frekvencích není na cívku přiveden proud, což vede k poměrnému útlumu 0.01. Tím se dosahuje velmi malého přenosu vibrací do skříně pračky. [41]



Obrázek 35 Magnetoreologický tlumič pračky [43]

### 5.3 PROTÉZY DOLNÍCH KONČETIN

K dosažení správné kinematiky chůze a minimalizování energie k ní potřebné se do protéz dolních končetin přidávají tlumiče. Protézy lze rozdělit do dvou hlavních kategorií:

- a) pasivní
- b) aktivní

Pasivní protézy neobsahují zdroj energie. Využívají třecí nebo pasivní hydraulické tlumiče. Cena takové protézy je nižší a je spíše používaná v rozvojových zemích. Nevýhodou pasivních tlumičů je nenastavitelnost tlumení pro různé rychlosti chůze, musí tudíž dojít ke kompromisu. Také vzniká větší riziko pádu při chůzi po nerovném terénu. [44]

Aktivní protézy mají zdroj energie v podobě baterie. Sensory jsou použity k shromáždění kinematických dat (úhel kolena, moment kotníku atd.). Mikroprocesor analyzuje data, aby určil, zda je protéza uživatele v postoji nebo ve švihy a jaká aktivita se provádí (tempo chůze, nerovný terén, chůze do schodů). V závislosti na zjištěných datech se mění nastavení ventilů v tlumiči. Proměnné tlumení lze také dosáhnout změnou viskozity pomocí magnetoreologické tekutiny použitím MR tlumiče. V dnešní době jsou aktivní protézy schopny aktivně pohánět koleno během energeticky náročnějších činností (chůze do schodů). [44]

Podle výrobce se tlumiče umisťují do kolene (horizontálně nebo vertikálně), po délce holeně nebo do chodidla. V protézách lze nalézt rotační i teleskopické tlumiče, CCD tlumiče, MR tlumiče nebo pneumohydraulické tlumiče.

Společnost Lord Corp vyrábí MR tlumič pro protetické koleno, kde tlumič, senzory, ovládací jednotka i baterie jsou všechny uvnitř kolene. Pro toto použití pouze modifikovali svůj již vyráběný MR tlumič určený pro sedačky kamionu. Odezva tohoto systému je do 10 milisekund umožňující nejvíce přesný pohyb k chůzi. [45]

## 5.4 TLUMENÍ VIBRACÍ STAVEB

### 5.4.1 MOSTY

Tlumič je využíván v mostech k tlumení vibrací způsobených větrem, zemětřesením, nerovnoměrným provozem nebo silou od brzdících vozidel. Může být odstraněno nebo sníženo strukturální poškození po zemětřesení, a tudíž zmenšený náklady. Tlumič se umísťuje mezi bloky mostních konstrukcí v místech dilatačních spár nebo přímo na lana. [47]

Hydraulické tlumiče pro mosty pracují s velmi nízkou hodnotou alfa 0,04. Závislost síly na rychlosti pístu je tedy degresivní.

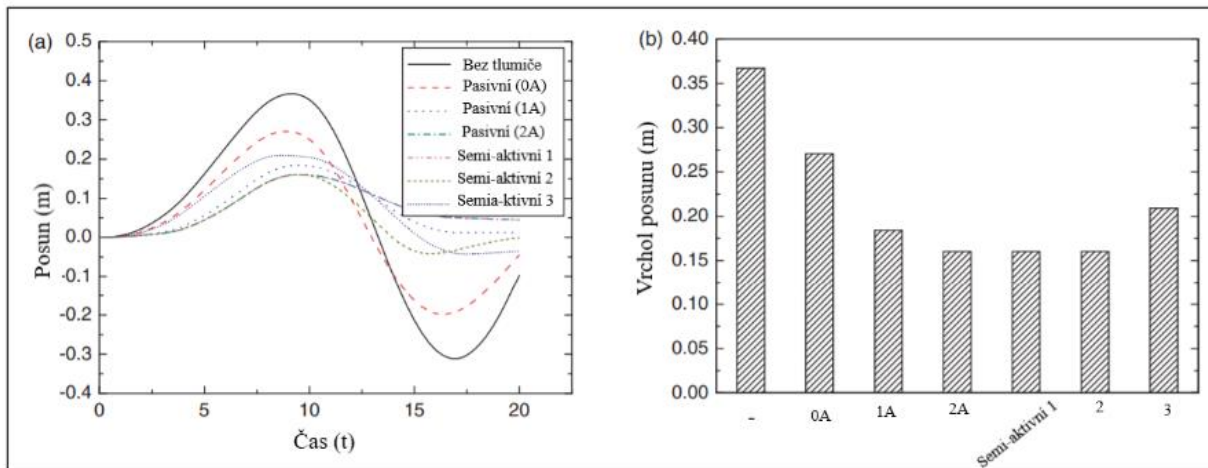
$$F = Cv^\alpha \quad (7)$$

Kde  $F$  je tlumící síla,  $C$  tlumící koeficient,  $v$  rychlost a alfa nastavitelný exponent.

S tímto exponentem tlumič nejúčinněji snižuje vibrace mostu, protože při nízké rychlosti pístu reaguje tlumič rychlým nárůstem tlumící síly zajišťující dostatečnou absorpci energie. Jak se rychlost pístnice zvyšuje, tak tlumící síla roste s menší rychlostí. To chrání strukturu mostu v případě nadměrné síly. [48]

Síly způsobené brzdícími vozidly se můžou naakumulovat natolik, že způsobí významné podélné vibrace. Ve studii [49] byl k výpočtům použit MR tlumič MRD 9000 type s maximální tlumící silou 200kN od společnosti LORD Corporation ke snížení vibrací v podélném směru. [49]

Bylo použito šest různých nastavení tlumiče pro analýzu nejlepšího snížení vibrací mostu. Pomocí simulační analýzy byly vytvořeny grafy (obr. 36) podélného posunu. Posun pro netlumenou soustavu byl 36 cm, což překračuje povolenou hodnotu 25 cm daného mostu. Je tedy nutné použít tlumič ke snížení vibrací. Nejlepšího výsledku dosáhl tlumič s permanentním el. proudem 2 A. Nicméně následná analýza vibrací vyvolaná zemětřesením ukázala, že nejvýhodnější nastavení s nejmenší spotřebou el. proudu je semi-aktivní způsob 3. (“semi-aktivní fuzzy control“). [49]



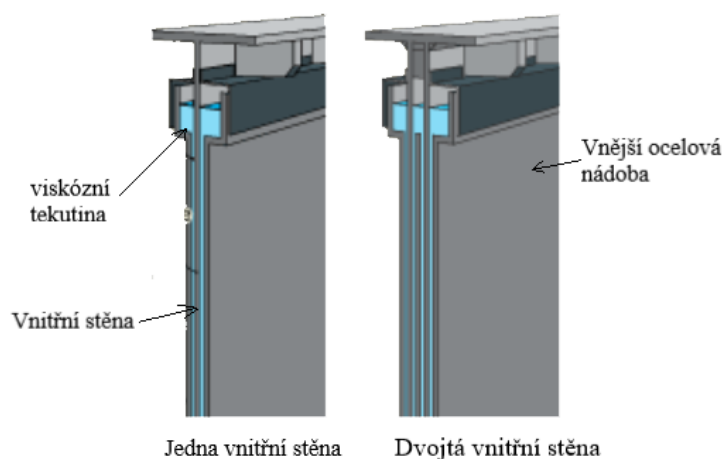
Obrázek 36 Posun mostu [49]

### 5.4.2 BUDOVY

Výškové budovy se do jisté míry pohybují. Během silného větru nebo zemětřesení se mohou nejvyšší mrakodrapy rozkmitat. To může způsobit nepohodlí a nevolnost lidí uvnitř budovy. Existuje několik způsobů, jak omezit houpání a vibrace konstrukce pomocí hydraulických tlumičů. [50]

#### VISKÓZNÍ TLUMÍCÍ STĚNA (VTS)

VTS využívá tření vysoce viskózní kapaliny. Skládá se z vnější ocelové nádoby připojené k nižšímu patru budovy a z vnitřní stěny, která je spojena s vyšším patrem (obr. 37). Během zemětřesení způsobuje pohyb podlahy pohyb vnitřní stěny, která se tře s kapalinou a disipuje energii. Tlumící síla je závislá na rychlosti relativního pohybu mezi deskami. VTS mohou být vyráběny s dvěma vnitřními stěnami, což zdvojnásobí tlumící sílu. [51]

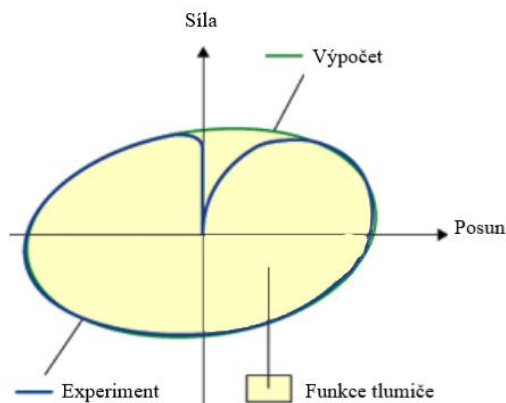


Obrázek 37 Viskózní tlumící stěna [52]

Výhodou VTS je efektivní tlumení široké škály vibrací od mírného větru až po silné zemětřesení. Není potřeba žádné údržby, protože v běžných podmínkách nejsou pod tlakem. [51] [52]



Graf na obrázku 38 ukazuje vztah mezi tlumící silou a posunem, když je VTS vystaveno pohybu, který je očekáván během silného zemětřesení. Hysterezní smyčka VTS vytváří hladkou křivku. Výsledky zkoušky ukazují, že dochází k stabilnímu tlumení od malých vibrací až po velké. [52]



Obrázek 38 Tlumící síla v závislosti na posunu pístu [52]

### MAGNETOREOLOGICKÝ TLUMIČ

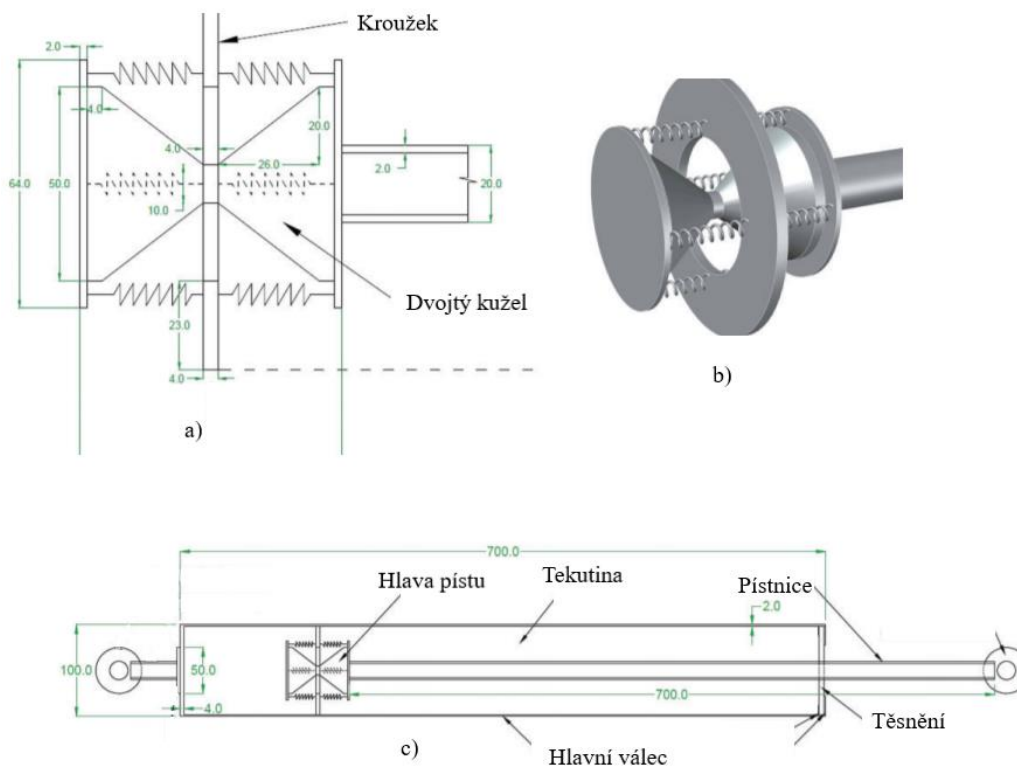
MR tlumiče od Lord Corporation si našly svoje uplatnění i v budovách. Použitím MR tlumiče lze odezvu na seismickou aktivitu automaticky upravit tak, aby docházelo k nejlepšímu tlumení pro danou frekvenci na každém patře. V případě výpadku proudu tlumič funguje v pasivním módu. [53]

### ADAPTIVNÍ TLUMIČ

Publikace [54] představila adaptivní viskózní tlumič (AVT) schopný přizpůsobit své charakteristiky bez potřeby dalších zařízení, jako jsou senzory, procesor nebo zdroj energie. Odstranění těchto zařízení nejen snižuje náklady, ale také odstraňuje související časové zpoždění. Průchodová plocha trysky je variabilní a v důsledku toho může tlumič pokrýt větší rozsah koeficientů tlumení. Během neextrémního buzení je koeficient tlumení malý, a proto i tlumící síla. Naopak, když dojde k extrémním pohybům, tryska se smrští a generuje velkou tlumící sílu potřebnou pro účinnou ochranu budovy. [54]

Navržený AVT se skládá z hlavního válce, pístu, silikonové kapaliny, těsnění a pístnice. Hlava pístu obsahuje variabilní trysku. Jak je znázorněna na obr. 39a, tryska je tvořena dvěma částmi, které jsou spolu spojeny osmi pružinami. První část je dvojitý kužel připojený napevno k pístní tyči. Druhá část je prstenec. Pokud se píst nepohybuje vzhledem k hlavnímu válci, tak je prstenec nad nejužší částí dvojitého kužele, průchozí plocha je tedy největší. Během pohybu pístní tyče začne tekutina vyvíjet sílu na prstenec. Tato síla je pak přenesena na kužel pružinami. V důsledku toho jsou pružiny stlačeny nebo napnuty a dvojitý kužel se pohybuje do prstence. Jak se kuželovitá část pohybuje do prstence, tak se průchozí díra zužuje a tlumící koeficient roste. [54]

Výsledky této studie ukázaly, že AVT je účinnější než klasický pasivní tlumič. Posun byl snížen až o 52 % a může zvýšit rozptyl energie až o 94 % ve srovnání s pasivním tlumičem. [54]



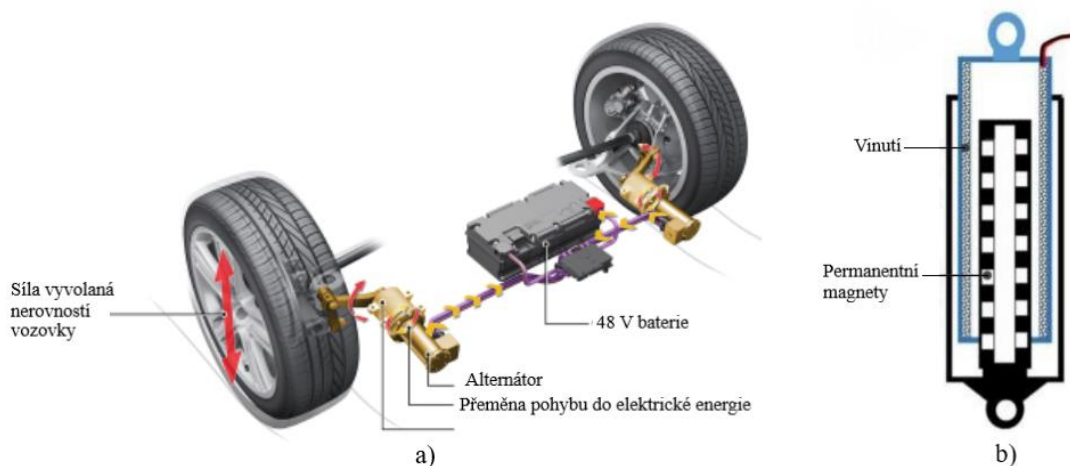
Obrázek 39 a) Píst tlumiče AVT [54] b) 3D pohled na píst [54] c) Konstrukční rozložení [54]

## 6 VÝVOJOVÉ TRENDY

Tlumiče se s nabývajícím zkušenostmi inženýrů a technologickým pokrokem vylepšují a zdokonalují. Konstrukce pasivních tlumičů se zdají být se současnými znalostmi na svém vrcholu, kdy k odstranění kompromisu mezi komfortem a bezpečností už nelze udělat více, než již existuje (obtokové kanálky, hydraulické dorazy, externí komory atd.). Nicméně tlak na snižování hmotnosti a ceny tu bude pořád. Znalosti o materiálech se v posledních dekádách rychle prohlubují a dá se předpokládat, že ještě nějakou dobu budou. Příkladem značně rozšiřujícího se materiálu používaného v tlumičích může být plast, který je lehký a odolný. Dalším novým materiálem v tomto odvětví je fluoro kaučuková směs [55], z které je vyráběno těsnění. Tento materiál lépe brání úniku oleje.

S rostoucími nároky na různé charakteristiky tlumičů bych očekával další vývoj v semiaktivních tlumičích. Dochází k elektronizaci ventilového systému v pístu. O zapojování elektroniky do konstrukce tlumiče vypovídá i patent [56] z roku 2019 od společnosti Volkswagen. Jedná se o uspořádání elektromagnetických ventilů v pístu dvouplášťového tlumiče.

V dnešní době je kladen velký důraz na ekologii, a tím spojené nízké emise. Tento trend se jistě odrazí i ve vývoji tlumičů. Tlumiče přeměňují kinetickou energii na tepelnou, která není nikterak využívána. Testují se způsoby, jak tuto nevyužitou energii efektivně přeměnit zpátky na energii elektrickou, s kterou by se mohla dobíjet baterie, a tím zvětšovat dojezd dopravního prostředku. Audi vyvinulo elektromechanický rotační tlumič zvaný eROT využívající k rekuperaci páku, která přenáší budící sílu od vozovky do rotoru alternátoru [57]. V patentu [58] je k rekuperaci využito permanentního magnetu a vinutí. Pohybem tlumiče se ve vinutí indukuje napětí.



Obrázek 40 a) eROT [57] b) Tlumič s permanentním magnetem [58]

S příchodem autonomních vozidel bude potřeba posunout odpružení podvozku na ještě vyšší úroveň tak, aby bylo možné ve voze nerušeně a bezpečně například pracovat. To by mohly zajistit aktivní tlumiče využívající kamery a senzory, které autonomní automobil musí mít, tak jako tak. S elektromobily se váže i nutnost brát na zřetel na hluk tlumiče, který bude znatelnější po odstranění spalovacího motoru.

Již z předešlých kapitol lze poznat, že magnetoreologické tlumiče se dostávají do všech technologických odvětví. To je způsobeno jejich rychlou odezvou, dlouhou životností (málo pohyblivých částí) a relativně nízkou cenou. Kromě aplikací již zmíněných se využívají i např. k odpružení sedačky v nákladních vozidlech a traktorech, sklápění lehátka v sanitce, tlumič kompenzující coriolisovo zrychlení vrtule helikoptéry, tlumič zpětného rázu artilerie nebo tlumiče v robotice.

Tlumiče se využívají v mnoha aplikacích, kde každá má svá specifika na konstrukci tlumiče. Výrobci tlumičů využívají modulární systém s účelem omezit počet variací. Modulární systém znamená, že tlumiče jsou navrhovány a vyráběny s omezeným počtem průměrů pro pístnici, hlavní válec a vnější válec. Rozsah průměrů definuje i rozsah tlumení. Standardní komponenty jako je těsnění pístnice, ventily v pístu, spodní ventil a dorazy jsou také omezeny rozsahem dostupných průměrů, které se vyrábějí. Tímto se výrobci snaží minimalizovat cenu tlumiče. [9]

## ZÁVĚR

Tlumiče jsou nutnou součástí dopravních prostředků, sloužící k dosažení komfortu a bezpečnosti. V aplikacích mimo dopravu bývají součástí nezbytnou k zaručení funkčnosti.

Výrobci automobilových tlumičů hledají uplatnění svých výrobků v dalších oblastech dopravy i v aplikacích mimo dopravu, které vyžadují tlumení kmitů soustavy. Při konstrukci se bere zřetel na cílovou aplikaci, které se přizpůsobí vlastnosti daného tlumiče. Jejich charakteristiky mohou být nastaveny pomocí ventilů na různé F-v charakteristiky, vhodných právě pro danou aplikaci. K zajištění žádané funkce tlumiče se často využívá obtokových kanálků, jejichž funkcí je omezení tlumení v daném místě zdvihu pístu.

Pro nastavení optimálního tlumení je klíčová hmotnost dopravního prostředku nebo dané aplikace. Příkladem jsou motocykly, kde je podíl jezdce na celkové hmotnosti vyšší, a proto mají tlumiče motocyklů možnost seřízení před jízdou. Obdobně dveřní zavírače bývají seřiditelné, protože hmotnost dveří se liší a každý zákazník může požadovat jinou rychlost zavírání.

Vlaky využívají hydraulický tlumič na mnoha místech k útlumu pohybů jak svislých, tak i příčných a podélných. Tlumič je umístěn mezi dvojkolí a podvozek k odstranění dynamických sil od nerovností kolejnice. Pro lepší komfort se také montuje tlumič mezi podvozek a karoserii.

Tlumicí systémy vozidel lze porovnávat z mnoha hledisek: spolehlivost a životnost, hmotnost, rozměry, cena, komfort či bezpečnost. Každý tlumicí systém má své výhody a nevýhody. Pasivní tlumiče jsou nejpoužívanější, neboť cena je nejdůležitějším faktorem pro většinu zákazníků. Do budoucna se dá předpokládat častější využití semi-aktivních systémů tlumení, které se najdou uplatnění i ve střední a nižší cenové kategorii vozidel. Očekává se také masivnější použití aktivních systémů ve spojitosti s autonomně řízenými vozidly. V souvislosti s rostoucím eko-trendem pokračuje vývoj tlumičů s rekuperačními vlastnostmi. Magnetoreologické tlumiče se zdají být nasazovány jako alternativa ve všech technologických odvětvích.

## POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] DIXON, John C. The Shock absorber Handbook. Second edition. England: Professional Engineering Publishing and John Wiley and Sons., 2007. ISBN 978-0-470-51020-9.
- [2] CARBIBLES [online]. [cit. 2020-02-20]. Dostupné z: <https://www.carbibles.com/guide-to-car-suspension/>
- [3] JAK FUNGUJÍ TLUMIČE PÉROVÁNÍ A KDY JE POTŘEBA VYMĚNIT? PIETRO autodíly [online]. [cit. 2020-02-28]. Dostupné z: [https://www.pietro-eshop.cz/clanky-navody/\\_zobraz=nepodcenujte-opotrebeni-tlumicu](https://www.pietro-eshop.cz/clanky-navody/_zobraz=nepodcenujte-opotrebeni-tlumicu)
- [4] [Sossoukyjov [online]. [cit. 2020-02-20]. Dostupné z: [http://www.sossoukyjov.cz/data/file/Odpruzeni\\_s\\_obrazky.pdf](http://www.sossoukyjov.cz/data/file/Odpruzeni_s_obrazky.pdf)
- [5] ČERMÁK, Ladislav. [online]. [cit. 2020-02-20]. Dostupné z: <https://www.auto.cz/technika-v-automobilech-odpruzeni-a-tlumeni-66689>
- [6] VLK, František. Podvozky motorových vozidel. 3., přeprac., rozš. a aktualiz. vyd. Brno: František Vlk, 2006. ISBN 80-239-6464-X.
- [7] MINAKER, Bruce P. FUNDAMENTALS OF VEHICLE DYNAMICS AND MODELLING: A TEXTBOOK FOR ENGINEERS WITH ILLUSTRATIONS AND EXAMPLES. University of Windsor: Wiley, 2019. ISBN 978-1-118-98009-5.
- [8] ROZDÍL MEZI PLYNOKAPALINOVÝM A KAPALINOVÝM TLUMIČEM. Autodíly Mjauto [online]. červenec 2014 [cit. 2020-02-28]. Dostupné z: <http://www.mjauto.cz/rozdil-mezi-plynokapalinovym-a-kapalinovym-tlumicem>
- [9] HEISSING, Bernd, a Metin ERSOY. Chassis Handbook: Fundamentals, Driving Dynamics, Components, Mechatronics, Perspectives. Germany: Vieweg+Teubner Verlag, 2011. ISBN 978-3-8348-0994-0.
- [10] SACHS [online]. [cit. 2020-03-08]. Dostupné z: [https://www.zf.com/products/en/buses/products\\_51140.html](https://www.zf.com/products/en/buses/products_51140.html)
- [11] LÁNÍK, Ondřej. CDC: aktivní tlumiče letos našly cestu do běžných aut! AUTO.CZ [online]. 19.8.2004 [cit. 2020-03-08]. Dostupné z: <https://www.auto.cz/cdc-aktivni-tlumice-letos-nasly-cestu-do-beznych-aut-16717>
- [12] NGUYEN, Sy Dzung. A new neuro-fuzzy training algorithm for identifying dynamic characteristics of smart dampers. Researchgate [online]. 2016 [cit. 2020-03-08]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/293821112\\_SMS\\_SyDung](https://www.researchgate.net/publication/293821112_SMS_SyDung)
- [13] QAZIZADEH, Alireza. Development and On-track Tests of Active Vertical Secondary Suspension for Passenger Trains. Researchgate [online]. 2015 [cit. 2020-03-06]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/292156917\\_Development\\_and\\_On-track\\_Tests\\_of\\_Active\\_Vertical\\_Secondary\\_Suspension\\_for\\_Passenger\\_Trains/citations](https://www.researchgate.net/publication/292156917_Development_and_On-track_Tests_of_Active_Vertical_Secondary_Suspension_for_Passenger_Trains/citations)

- [14] How Does an MR Damper Work? Parker Lord [online]. [cit. 2020-03-08]. Dostupné z: <https://www.lord.com/products-and-solutions/active-vibration-control/industrial-suspension-systems/how-does-mr-damper-work>
- [15] STRECKER, Zbyněk, Ivan MAZŮREK, J. ROUPEC a Milan KLAPKA. Influence of MR damper response time on semiactive suspension control efficiency. In: Researchgate [online]. August 2015 [cit. 2020-04-24]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/276839196\\_Influence\\_of\\_MR\\_damper\\_response\\_time\\_on\\_semiactive\\_suspension\\_control\\_efficiency](https://www.researchgate.net/publication/276839196_Influence_of_MR_damper_response_time_on_semiactive_suspension_control_efficiency)
- [16] How Shocks and Shock Valving Works. CRAWLpedia [online]. [cit. 2020-06-06]. Dostupné z: [https://www.crawlpedia.com/shock\\_valving.htm](https://www.crawlpedia.com/shock_valving.htm)
- [17] GILLESPIE, Thomas D. Fundamentals of Vehicle Dynamics. 400 Commonwealth Drive Warrendale, Pa 15096-0001: Society of Automotive Engineers, 1992. ISBN 978-1-56091-199-9.
- [18] KASPRZAK, Jim. Understanding your Dampers: A guide from Jim Kasprzak. KAZTECHNOLOGIES [online]. 2014 [cit. 2020-03-15]. Dostupné z: <http://www.kaztechnologies.com/wp-content/uploads/2014/03/A-Guide-To-Your-Dampers-Chapter-from-FSAE-Book-by-Jim-Kasprzak.pdf>
- [19] HELLER, Petr a Josef DOSTÁL. KOLEJOVÁ VOZIDLA II. 1. Plzeň: ZČU, 2009. ISBN 978-80-7043-641-7.
- [20] Vagony [online]. [cit. 2020-02-29]. Dostupné z: <https://www.vagony.cz/>
- [21] HITCHCOX, Alan. Hydraulic Dampers Help Improve Railway Safety and Stability. In: Hydraulics & Pneumatics [online]. OCT 21, 2019 [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: <https://www.hydraulicspneumatics.com/technologies/seals/article/21888046/hydraulic-dampers-help-improve-railway-safety-and-stability>
- [22] KONI [online]. [cit. 2020-03-06]. Dostupné z: <http://www.koni.com/en-US/Railway/Products/suspension-dampers/>
- [23] CONDE MELLADO, Alberto, Eduardo GOMEZ a Jordi VINOLAS. Advances on railway yaw damper characterisation exposed to small displacements. Researchgate [online]. 2006 [cit. 2020-03-06]. DOI: 10.1504/IJHVS.2006.010583.
- [24] SUN, Shuaishuai, Huaxia DENG, Weihua LI, Haiping DU, Yi Qing NI, Jin ZHANG a Jian YANG. Improving the critical speeds of high-speed trains using magnetorheological technology [online]. In: . University of Wollongong, 2013 [cit. 2020-03-07]. Dostupné z: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.880.1681&rep=rep1&type=pdf>
- [25] WANG, Wenlin, Yuwen LIANG, Weihua ZHANG a Simon IWNICKI. Effect of the nonlinear displacement-dependent characteristics of a hydraulic damper on high-speed rail pantograph dynamics [online]. In: . [cit. 2020-06-07]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s11071-019-04766-4>

- [26] KONVIČNÝ, Josef. Spolupráce sběrače s trakčním vedením. In: Czech Raildays [online]. 2006 [cit. 2020-03-07]. Dostupné z: [http://www.czech-raildays.cz/2003/seminare/zi\\_06.pdf](http://www.czech-raildays.cz/2003/seminare/zi_06.pdf)
- [27] ORVNÄS, Anneli. On Active Secondary Suspension in Rail Vehicles to Improve Ride Comfort [online]. Stockholm, 2011 [cit. 2020-03-06]. Dostupné z: <http://kth.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A460526&dswid=1596>. Disertace. KTH, School of Engineering Sciences (SCI), Aeronautical and Vehicle Engineering, Rail Vehicles. KTH, School of Engineering Sciences (SCI), Centres, The KTH Railway Group.
- [28] Solutions in Energy Absorption and Vibration Isolation for Railway Applications. In: Koni-enidine [online]. [cit. 2020-04-25]. Dostupné z: <http://www.koni-enidine-rail.com/core/medialibrary/itt-infrastructure/website/Tools-Resources/pdf/ITTRail.pdf>
- [29] HELLER, Petr a Josef DOSTÁL. Kolejová vozidla II. V Plzni: Západočeská univerzita, 2009. ISBN 978-80-7043-641-7.
- [30] OLEO HYDRAULIC PRINCIPLE [online]. United Kingdom [cit. 2020-03-07]. Dostupné z: <https://www.oleo.co.uk/hydraulic-principle>
- [31] VLK, František. Teorie a konstrukce motocyklů 2. Brno: Vlk, 2004. ISBN 80-238-1601-7.
- [32] BOGE – SACHS NIVOMAT. *Autodily Mjauto* [online]. Zář 2015 [cit. 2020-03-18]. Dostupné z: <http://www.mjauto.cz/boge-sachs-nivomat>
- [33] JANOUSEK, Marek. Tlumiče motocyklu. *Motorkari.cz* [online]. 27.11.2018 [cit. 2020-03-18]. Dostupné z: <https://www.motorkari.cz/clanky/jak-na-to/tlumice-motocyklu-40525.html>
- [34] STEERING DAMPERS: YOUR BIKE REACTS THE WAY YOU'D HOPE FOR. *HYPERPRO* [online]. [cit. 2020-03-18]. Dostupné z: <https://hyperpro.com/steering-dampers/>
- [35] MONTI, Cosimo, Alessandro GIORGETTI a Andrea GIRGENTI. An Axiomatic Design Approach for a Motorcycle Steering Damper. *ResearchGate* [online]. December 2015 [cit. 2020-03-19]. DOI: 10.1016/j.procir.2015.07.081.
- [36] OLSON, Eric. How do oleo-pneumatic shock struts work? *Engineering360* [online]. November 07, 2019 [cit. 2020-03-20]. Dostupné z: <https://insights.globalspec.com/article/12954/how-do-oleo-pneumatic-shock-struts-work>
- [37] MARSH, Alton K. HOW IT WORKS: SHIMMY DAMPER. *AOPA your freedom to flight* [online]. September 1, 2016 [cit. 2020-03-20]. Dostupné z: <https://www.aopa.org/news-and-media/all-news/2016/september/flight-training-magazine/how-it-works>
- [38] What is the Purpose of a Door Closer? *AmbassadorLOCKSMITHS* [online]. [cit. 2020-03-26]. Dostupné z: <https://www.ambassadorlocksmiths.com.au/what-is-the-purpose-of-a-door-closer/>



- [39] DAKHOLE, R.W., R.D. ASKHEDKAR a S. K. CHOUDHARY. *Compressive Spiral Spring Door Closer Using Simple Spur Gear Train Arrangement* [online]. International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), 2013 [cit. 2020-03-26]. ISSN 2278-0181. Dostupné z: <https://www.ijert.org/research/compressive-spiral-spring-door-closer-using-simple-spur-gear-train-arrangement-IJERTV2IS70283.pdf>
- [40] How Closers Internally Work | Norton Door Controls. In: *Norton Door Controls* [online]. 1.6.2018 [cit. 2020-03-26]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=ueKuYcvDQHQ>
- [41] QUOC NGUYEN, Hung, Diep NGUYEN NGOC a Seung BOK CHOI. Optimal design and performance evaluation of a flow-mode MR damper for front-loaded washing machines. In: *Researchgate* [online]. January 2014 [cit. 2020-03-28]. DOI: 10.1186/2196-1166-1-3. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/>
- [42] NYGÅRDS, Thomas. *Washing Machine Design Optimization Based on Dynamics Modeling*. Göteborg, Sweden, 2011. Disertace. Chalmers University of Technology.
- [43] QUOC DUUY, Bui, Tri DIEP, Le Dai HIEP, Hung QUOC NGUYEN a Vuong Long HOANG. Hysteresis investigation of shear-mode MR damper for front-loaded washing machine. In: *Researchgate* [online]. September 2018 [cit. 2020-03-30]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/327487340\\_Hysteresis\\_investigation\\_of\\_shear-mode\\_MR\\_damper\\_for\\_front-loaded\\_washing\\_machine](https://www.researchgate.net/publication/327487340_Hysteresis_investigation_of_shear-mode_MR_damper_for_front-loaded_washing_machine)
- [44] NARANG, Yashraj. Identification of design requirements for a high-performance, low-cost, passive prosthetic knee through user analysis and dynamic simulation. *Researchgate* [online]. November 2013 [cit. 2020-04-10]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/279814164\\_Identification\\_of\\_design\\_requirements\\_for\\_a\\_high-performance\\_low-cost\\_passive\\_prosthetic\\_knee\\_through\\_user\\_analysis\\_and\\_dynamic\\_simulation](https://www.researchgate.net/publication/279814164_Identification_of_design_requirements_for_a_high-performance_low-cost_passive_prosthetic_knee_through_user_analysis_and_dynamic_simulation)
- [45] BAJAJ, HARSHAL M., GAGANDEEP SINGH BIRDI a BHUSHAN A. UGALE. APPLICATION OF MAGNETO RHEOLOGICAL (MR) FLUID DAMPER AND ITS SOCIAL IMPACT [online]. International Journal of Mechanical And Production Engineering, 2014 [cit. 2020-04-10]. ISSN 2320-2092. Dostupné z: [http://iraj.in/journal/journal\\_file/journal\\_pdf/2-40-139486518941-45.pdf](http://iraj.in/journal/journal_file/journal_pdf/2-40-139486518941-45.pdf)
- [46] ARELEKATTI, Murthy a Nina PETELINA. Mechanical Component Optimization, Design and Testing of a Fully Passive Prosthetic Knee Mechanism. In: 8th World Congress of Biomechanics [online]. [cit. 2020-04-10]. Dostupné z: <https://app.oxfordabstracts.com/events/123/program-app/submission/22310>
- [47] DELIS, E.A., R.B. MALLA, M. MADANI a K.J. THOMPSON. ENERGY DISSIPATION DEVICES IN BRIDGES USING HYDRAULIC DAMPERS. In: ASCE Structures Congress [online]. 1996 [cit. 2020-04-12]. Dostupné z: <http://www.taylordevices.com/custom/pdf/tech-papers/40-EnergyDissipation.pdf>
- [48] Triple protection for railroad bridge in Greece. *Structurae* [online]. [cit. 2020-04-12]. Dostupné z: <https://structurae.net/en/products-services/triple-protection-for-railroad-bridge-in-greece>

- [49] YANG, Meng-Gang a CS CAI. Longitudinal vibration control for a suspension bridge subjected to vehicle braking forces and earthquake excitations based on magnetorheological dampers. *Journal of Vibration and Control* [online]. 2016 [cit. 2020-04-12]. DOI: 10.1177/1077546314564781. Dostupné z: <https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/1077546314564781>
- [50] GASPAR, Michael. The mechanism and applications of a Tuned Mass Damper (TMD). Bsbgroup [online]. Wednesday 22 November 2017 [cit. 2020-04-13]. Dostupné z: <https://bsbgroup.com/blog/the-mechanism-and-applications-of-tuned-mass-damper-tmd>
- [51] Viscous Wall Dampers. Dynamic isolation systems [online]. [cit. 2020-04-13]. Dostupné z: [http://www.dis-inc.com/pdf\\_files/DIS\\_VWD.pdf](http://www.dis-inc.com/pdf_files/DIS_VWD.pdf)
- [52] Viscous Wall Damper. OILES [online]. [cit. 2020-04-13]. Dostupné z: <https://www.oiles.co.jp/en/menshin/building/seishin/products/vwd/>
- [53] STEPHANS, Terry. Special dampers may shake up engineering field. *AE Perspectives* [online]. November 20, 2003 [cit. 2020-04-13]. Dostupné z: <https://www.djc.com/news/ae/11151055.html>
- [54] HORMOZABAD, S Javadinasab a SM ZAHRAI. Innovative adaptive viscous damper to improve seismic control of structures. *Journal of Vibration and Control* [online]. April 4, 2019 [cit. 2020-04-12]. DOI: 10.1177/1077546319841763. Dostupné z: <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/1077546319841763>
- [55] Global Automotive Dampers Market 2019-2023| Growing Advances in Automotive Suspension Technology to Boost the Market| Technavio. *Technavio* [online]. June 26, 2019 [cit. 2020-04-15]. Dostupné z: <https://www.businesswire.com/news/home/20190626005508/en/Global-Automotive-Dampers-Market-2019-2023-Growing-Advances>
- [56] LUEDECKE, Matthias, Stephan WAHL, Kai - Uwe TANKE, Jan - Rickmer SCHLEGEL a Stefan FLOTMANN. VALVE PISTON ARRANGEMENT FOR A VIBRATION DAMPER. Spojené státy americké. US 10 , 415 , 663 B2. Uděleno Sep . 17 , 2019.
- [57] Audi developing electromechanical rotary dampers; potential for energy recuperation from suspension; 48V. *Green Car Congress* [online]. 10 August 2016 [cit. 2020-04-15]. Dostupné z: <https://www.greencarcongress.com/2016/08/audi-developing-electromechanical-rotary-dampers-potential-for-energy-recuperation-from-suspension-4.html>
- [58] GOLDNER, Ronald B. a Peter ZERIGIAN;. Electromagnetic linear generator and shock absorber. 2001. Spojené státy americké. 09/850,412. Uděleno October 4, 2005. Zapsáno May 7, 2001.
- [59] JIRKŮ, Filip. REGENERATIVNÍ TLUMIČ ODPRUŽENÍ [online]. Brno, 2019 [cit. 2020-06-07]. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/176786/final-thesis.pdf?sequence=6&isAllowed=y>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Ondřej Blaták, Ph.D

- [60] RAJU, Ahamed, Seung-Bok CHOI a Md Meftahul FERDAUS. A state of art on magneto-rheological materials and their potential applications. Researchgate [online]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, February 2018 [cit. 2020-04-15]. DOI: 10.1177/1045389X18754350. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/>
- [61] ALONSO, A., J. G. GIMÉNEZ a E. GOMEZ. Yaw damper modelling and its influence on railway dynamic stability. In: *Tandfonline* [online]. 16 Jun 2011 [cit. 2020-06-11]. DOI: 10.1080/00423114.2010.515031. Dostupné z: <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/00423114.2010.515031>

**SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ**

$C$	$[\text{N}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}]$	Tlumicí koeficient
$F$	$[\text{N}]$	Tlumicí síla
$K$	$[\text{N}\cdot\text{m}^{-1}]$	Tuhost pružiny
$L$	$[\text{m}]$	Vzdálenost mezi úchyty tlumiče
$m$	$[\text{kg}]$	Hmotnost soustavy
$r$	$[-]$	Frekvenční poměr
$t$	$[\text{s}]$	Čas
$T_S$	$[-]$	Odezva systému
$V_{DC}$	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$	Rychlost stlačení tlumiče ( $-V_{DE}$ )
$V_{DE}$	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$	Rychlost roztažení tlumiče ( $-V_{DC}$ )
$\dot{z}$	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$	Derivace polohy podle času ( $\frac{dz}{dt}$ )
$\omega_N$	$[\text{f}]$	Netlumená vlastní frekvence
$\omega_R$	$[\text{f}]$	Efektivní frekvence profilu vozovky
$\zeta$	$[-]$	Poměr tlumení