

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**

**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY**

# **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Aktivní tlumení použitelné v automobilovém průmyslu**

**Jiří Roub**

**2016**

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jiří ROUB**  
Osobní číslo: **E13B0442P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Elektrotechnika**  
Název tématu: **Aktivní tlumení použitelné v automobilovém průmyslu**  
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Provedte literární a patentovou rešerši aktuátorů vhodných k aktivnímu tlumení v automobilovém průmyslu.
2. V práci uveďte základní vlastnosti, principy a parametry daných strojů.
3. Popište základní matematický model aktivního tlumení.
4. Zhodnoťte využitelnost aktivního tlumení u automobilů v porovnání s klasickým hydraulickým tlumením.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah kvalifikační práce: **30 - 40 stran**

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. **Veřejně dostupné informační zdroje, databáze [www.ieee.org](http://www.ieee.org).**
2. **Boldea, I.: Linear Motion Electromagnetic Devices, Taylor & Francis, 2001, ISBN: 9789056997021.**

Vedoucí bakalářské práce:

**Ing. Roman Pechánek, Ph.D.**


Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2015**

Termín odevzdání bakalářské práce: **2. června 2016**

  
Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.  
děkan



  
Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2015

## **Abstrakt**

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou aktivního tlumení použitelného v automobilovém průmyslu. V první části práce jsou popsány pasivní, semi-aktivní a aktivní systému tlumení a typy těchto systémů v současnosti používané za účelem porovnání jejich výhod a nevýhod. V druhé části práce je stručně zpracován matematický model aktivního tlumení. V poslední části se nachází popis tubulárních lineárních elektromotorů, které jsou nejvhodnějším typem elektromotorů pro využití jako aktuátorů v aktivních systémech tlumení. V závěru bakalářské práce je zhodnocena současná situace aktivních systémů tlumení a jejich budoucí vývoj.

## **Klíčová slova**

zavěšení kola, automobily, aktivní tlumení, aktuátory, tubulární lineární elektromotory, matematický model

## **Abstract**

This bachelor thesis deals with the issue of active dampening usable in automotive industry. In the first part passive, semi-active and active dampening systems currently in use are described in order to compare their advantages and disadvantages. In the second part a simple mathematical model of active suspension is devised. In the last part tubular linear electromotors, which are the most suitable type of electromotors for use in active suspension systems, are described. In the closing statement, the current situation of active suspension systems and their future development is evaluated.

## **Keywords**

suspension, automobiles, active damping, actuators, tubular linear electromotors, mathematical model

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 2. 6. 2016

Jiří Roub

## **Poděkování**

Chtěl bych tímto poděkovat Ing. Romanovi Pechánkovi, Ph.D. za odborné rady a názory. Dále bych poděkoval své rodině a své přítelkyni za jejich podporu během celého mého studia.

# Obsah

1. Úvod .....	8
2. Základní informace.....	9
2.1. Historie.....	9
2.2. Jízdní komfort .....	9
2.3. Bezpečnost .....	10
2.4. Rozdělení tlumičů .....	10
3. Pasivní tlumiče .....	11
3.1. Výhody a nevýhody .....	11
3.2. Náhrady pružiny.....	12
3.3. Dvouplášťový kapalinový tlumič.....	14
3.4. Dvouplášťový plynokapalinový tlumič.....	15
3.5. Jednoplášťový plynokapalinový tlumič .....	16
3.6. PSD tlumič .....	17
4. Semi-aktivní tlumiče .....	18
4.1. Výhody a nevýhody .....	18
4.2. Magnetoreologické tlumiče.....	19
4.3. CDC tlumič .....	20
5. Aktivní tlumiče.....	21
5.1. Výhody a nevýhody .....	21
5.2. Hydropneumatický tlumič.....	22
5.3. MRC-Bose.....	24
6. Matematický model.....	28
6.1. Aktivní tlumení .....	28
6.2. Lineární elektromotor.....	31
7. Lineární elektromotory .....	34
7.1. Tubulární lineární motor .....	36
7.2. Tubulární lineární motor jako aktuátor aktivního tlumení.....	37
8. Závěr.....	39
9. Seznam použitých zdrojů .....	41
10. Seznam obrázků.....	43



## 1. Úvod

Doprava je jedním ze základních pilířů moderní společnosti. Ať už jde o přepravu osob či materiálu, silniční doprava je něčím, bez čeho si člověk žijící ve vyspělých zemích neumí život představit. Zatímco železnice nabízí ekologičtější i ekonomičtější, doprava po silnici vyhrává ve dvou kritických parametrech – osoby i materiál lze dopravit téměř kdykoliv a kamkoliv. Se silniční dopravou lze tedy počítat i do budoucnosti.

Silniční vozidla kromě ekologie či ekonomie vždy řešila problém jízdního komfortu. Silnice, dálnice či jiné vozovky nejsou na rozdíl od železničních kolejí snadno udržitelné v dokonalém stavu. Každé silniční vozidlo se tak musí vypořádat s výmoly a jinými nerovnostmi, aby se zachoval jízdní komfort a především bezpečnost. Jednou z nejdůležitějších částí vozidla se tedy stala pružina a tlumič. Zatímco pružina tlačí kolo vozidla do neustálého dotyku s vozovkou, tlumič zmírňuje nežádoucí pohyby kola způsobené nárazy či vlastní oscilací pružiny.

## **2. Základní informace**

### **2.1. Historie**

Silniční vozidla již od svých začátků řešila problém nerovnosti vozovek. Problémem bylo dovézt náklad bez poškození, vozovky tehdy byly ve stavech dnes nepředstavitelných. V této době vzniklo listové odpružení, které pomocí překládaných kovových listů tlačilo kola do kontaktu s vozovkou, zatímco tření mezi listy tlumilo nárazy i kmity odpružení od zbytku vozu.

S časem přišly rovnější silnice, rychlejší vozidla a náročnější řidiči. Listové odpružení, příliš těžké, objemné a složité na údržbu, bylo nahrazeno vinutými pružinami. Ač lehčí, jednodušší a stejně efektivní, vinuté pružiny musejí být doplněny tlumičem kmitů. Ten tlumí vlastní kmity pružiny, bez něj by kolo po nárazu odskakovalo od vozovky a vůz by se stal neovladatelným.[1]

### **2.2. Jízdní komfort**

Dokonalý pasivní tlumič by neměl přenášet jakékoliv nárazy či vibrace kol do zbytku vozu, a zároveň by měl zajistit neustálý kontakt kol s vozovkou. Jízdní komfort je závislý na míře těchto přenesených vibrací, je však subjektivní. Měkčí tlumiče tlumí vibrace lépe, na druhou stranu jsou kompromisem z hlediska jízdních vlastností – tvrdší tlumiče lépe drží vozidlo vodorovně v zatáčkách, při rozjezdech a brzdění a tím poskytuje lepší vlastnosti. Zatímco ve Spojených Státech Amerických se zpravidla těší větší oblibě měkčí odpružení vozu, zbytek světa preferuje tvrdší odpružení spojené s lepšími jízdními vlastnostmi. Neexistuje jedno správné nastavení tlumičů, každý řidič preferuje něco jiného. Jízdní komfort je tedy subjektivní, moderní elektronicky řízené systémy odpružení tak nabízí širokou škálu nastavení.[2]

### **2.3. Bezpečnost**

Na jízdní vlastnosti a komfort se přímo váže bezpečnost. Pro dokonalou kontrolu nad vozem v krizové situaci je imperativní dobré rozložení hmotnosti mezi všechna kola a jejich konstantní kontakt s vozovkou, omezení naklánění vozu při změně směru, brždění a rozjezdu. Při nedodržení těchto základů může automobil špatně držet stopu či mít tendence ke smyku, což může vézt k nehodám.[3]

Na druhou stranu komfortní vůz méně unavuje řidiče, ten se při příliš tvrdém odpružení hůře soustředí na vozovku a dopravní situaci. Rázy přenesené do karoserie vozu také mohou způsobit přehnanou řidičovu reakci. Bezpečnost je tedy v praxi rovněž kompromisem mezi tvrdým a měkkým odpružením vozu.[4]

### **2.4. Rozdělení tlumičů**

V současnosti dělíme tlumiče do tří základních kategorií – pasivní, semi-aktivní a aktivní. Pasivní tlumiče jsou nejlevnější a nejjednodušší variantou, nemají žádný systém přímé kontroly nad energií a tuhostí odpružení. Na danou situaci reagují pouze pasivními prvky, zpravidla není možné měnit charakteristiku jejich tlumení. Semi-pasivní tlumič přidává k základní konstrukci pasivního tlumiče možnost úpravy tlumicí konstanty za určitých situací. Takové tlumiče získávají informace a momentálně situaci pomocí senzorů, řídicí systém pak vyhodnotí vhodnou korekci. Plně aktivní tlumič určuje míru tlumení aktuátory, kontrolovány řídicím systémem. Ty systému odpružení dodávají či odebírají energii a tím upravují míru tlumení.[5]

### **3. Pasivní tlumiče**

Pasivní tlumičové systémy nijak aktivně nereagují na momentální situaci. Charakteristika pasivního tlumiče je neměnná, dána vlastní konstrukcí. Je tedy nutné vhodně zvolit kompromis mezi měkčím a tvrdším tlumením již při výrobě. Většina variant pasivního tlumení se skládá pouze z pružiny a vlastního tlumiče. Zatímco pružina přenáší váhu vozidla na kola, tlumič tlumí kmity, vibrace a výkyvy pružiny. Energie pružiny je tak absorbována tlumičem a přeměňována na teplo.[5, 6]

Vlastní tlumič se skládá ze dvou základních částí – pístu a pracovních prostor. Pracovní prostory jsou pak naplněny pracovním médiem – olejem, plynem či jejich kombinací.[7]

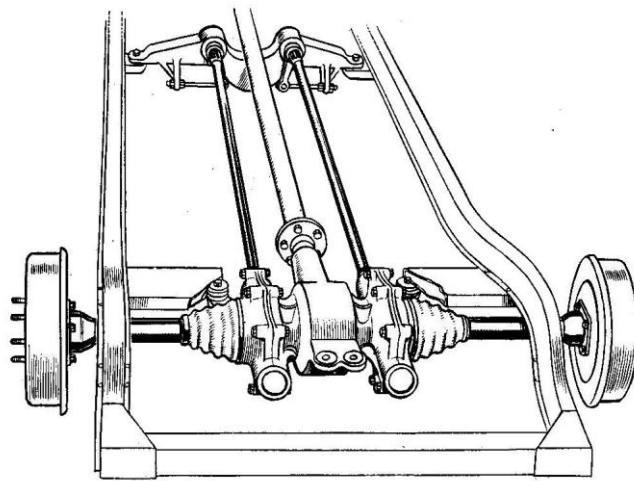
#### **3.1. Výhody a nevýhody**

Největší výhodou pasivních tlumičů, a zároveň důvodem jejich širokého rozšíření i mezi dnešními moderními vozy, je jednoduchost jejich konstrukce. Takové tlumiče je tedy levné a jednoduché vyrábět i servisovat. Díky jednoduchosti se vyznačují také nízkou poruchovostí. Nevýhodou je nemožnost změny charakteristiky tlumení. S tím je spojen horší zdánlivý komfort jízdy na různých typech vozovek. Tyto vlastnosti jsou důvodem jejich užití v automobilech nižších a středních tříd, kde je hlavním kritériem cena.[5]

### 3.2.Náhrady pružiny

Odpružení vozidla lze realizovat i jinak nežli použitím vinutých pružin. Mezi nejvýznamnější možnosti patří torzní tyče a listové pružiny.[8]

Torzní tyče vedou buď podélně nebo příčně pod podvozkem automobilu, na jedné straně spojeny s nápravou, na druhé s karoserií. Ohybem či krutem této zpravidla ocelové tyče dochází k reakci, kdy torzní tyč svým narovnáváním do původní polohy odděluje karoserii od rázů nápravy. Vinutá pružina je prakticky pouze torzní tyč zkroucená do podoby pružiny. Torzní tyče začaly být v automobilech používány v polovině 20. století, nejznámějším použitím v minulosti jsou především německé tanky z druhé světové války PzKpfw.VI Tiger a PzKpfw.V Panther. V dnešní době se stále používají v těžké vojenské technice (např. americký tank M1A1 Abrams) a vozech SUV (např. Toyota Hilux, Nissan Pathfinder).[3, 9–12]



Obrázek 1: Torzní tyče zadní nápravy[13]

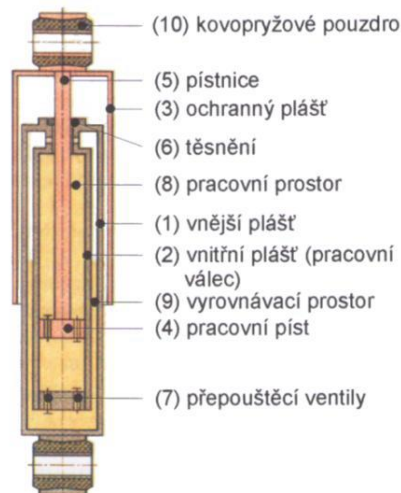
Listové pružiny jsou další možnou náhradou vinuté pružiny. Překládané kovové listy svázané k sobě fungují na stejném principu jako torzní tyč, reakcí na ohyb listů dochází k tlačení kol do kontaktu s vozovkou. Tření mezi listy pak dochází k tlumení kmitů a přeměně nashromážděné energie na teplo. Listové pružiny se do nedávna používaly v osobních, především amerických automobilech, dnes se s listovým odpružením vyrábí pouze nákladní automobily.[3, 14]



*Obrázek 2: Listová semi-eliptická pružina[15]*

### 3.3.Dvouplášťový kapalinový tlumič

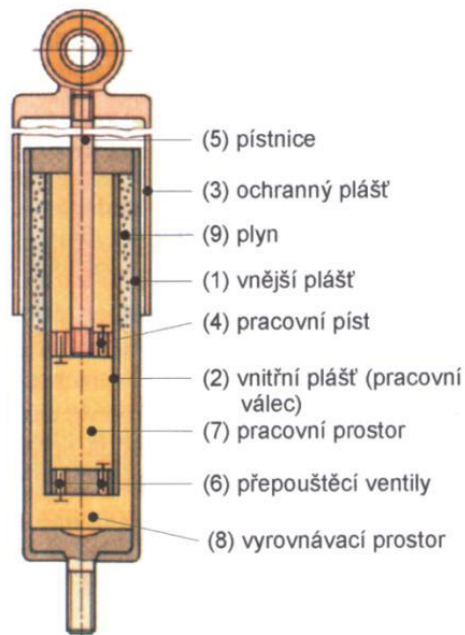
Kapalinové tlumiče se konstrukčně řeší pouze dvouplášťovým provedením. Tento tlumič se skládá ze dvou pracovních plášťů. Vnitřní plášť obsahuje pracovní kapalinu, zpravidla olej, a pracovní píst. V pracovním pístu se nachází průtokové ventily, celý píst je pevně spojen s pístnicí. Při pohybu nápravy, a tedy i pístu, vzniká tlumící síla pohybem kapaliny skrz ventily, která je závislá na rychlosti pístu. V druhém, venkovním plášti je takzvaný vyrovnávací prostor, oddělený od vnitřního prostoru přepouštěcím ventilem. Tento plášť je částečně naplněn kapalinou, jeho úkolem je vyrovnání rozdílu objemu kapaliny v pracovním prostoru, způsobovaného změnou teploty kapaliny.[16]



Obrázek 3: Dvouplášťový kapalinový tlumič[17]

### 3.4. Dvouplášťový plynokapalinový tlumič

Dvouplášťový plynokapalinový tlumič je téměř stejný jako dvouplášťový kapalinový tlumič. Hlavním rozdílem je náhrada atmosférického vzduchu ve vyrovnávacím prostoru inertním plynem. Tento plyn (většinou dusík) udržuje v pracovním i vyrovnávacím prostoru stálý tlak. Jeho hlavní funkcí je zabránění pění pracovní kapaliny, způsobovaného rychlým opakovaným průchodem kapaliny skrze ventily. [16]

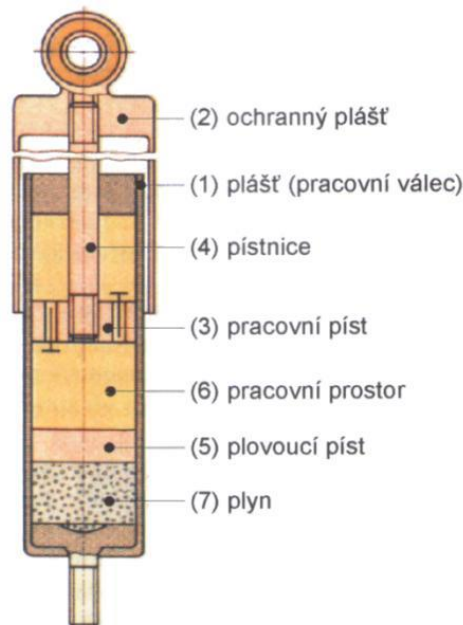


Obrázek 4: Dvouplášťový plynokapalinový tlumič [17]



### 3.5. Jednoplášťový plynokapalinový tlumič

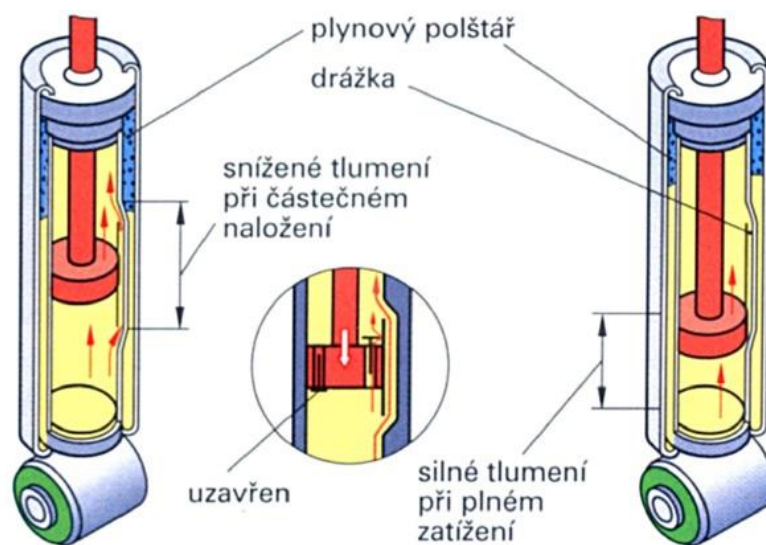
Jednoplášťový kapalinový tlumič nemá samostatnou vyrovnávací komoru. Inertní plyn zaručující dostatečný tlak v pracovním prostoru je umístěn pod pracovní kapalinou. Kapalina a plyn musí být odděleny, smíšením by tlumič ztratil podstatnou část své účinnosti. Oddělení je většinou realizováno dělicím (plovoucím) pístem. Na rozdíl od dvouplášťového tlumiče pracuje jednoplášťový s většími vnitřními tlaky plynu, aby nedocházelo k pění pracovní kapaliny. Výhodou jednoplášťového tlumiče je lepší tlumení kmitů o nízkých amplitudách a vysokých frekvencích. Pracovní prostor je lépe chlazen, navíc na rozdíl od dvouplášťového tlumiče lze jednoplášťový používat ve vodorovných polohách.[16]



Obrázek 5: Jednoplášťový plynokapalinový tlumič[17]

### 3.6.PSD tlumič

Firma Monroe vyvinula tlumič s označením PSD (Positive Sensitive Dampening), jehož základem je dvouplášťový plynokapalinový tlumič. Tento tlumič poskytuje rozdílnou tlumicí sílu podle polohy pracovního pístu. Ve středních polohách pístu je umožněno kapalině obtékat píst kanálky a tím snížit hydraulický odpor. Ve středních polohách tedy tlumí tlumič méně, čímž poskytuje lepší jízdní komfort. Při jízdě po větších nerovnostech se píst dostává do částí bez obtokových kanálků, účinnost tlumiče je tedy větší.[6]



Obrázek 6: PSD tlumič[18]

## 4. Semi-aktivní tlumiče

Semi-aktivní tlumiče jsou prakticky pasivní tlumiče doplněné o možnost plynule měnit charakter tlumení. Tlumič je řízen řídicím signálem pocházejícím ze systému, jež získává informace o současné situaci a vyhodnocuje správnou reakci. Řídicí systém je tak velice důležitým prvkem. Informace jsou sbírány z vlastního tlumiče, natočení volantu, míra aplikace brzdového či plynového pedálu a podobně. Konstruktivních řešení existuje mnoho, většinou se však jedná o systémy velice podobné pasivním tlumičům. Nejčastějším řešením jsou magnetoreologické tlumiče a tlumiče řízené škrtícím ventilem.[19]

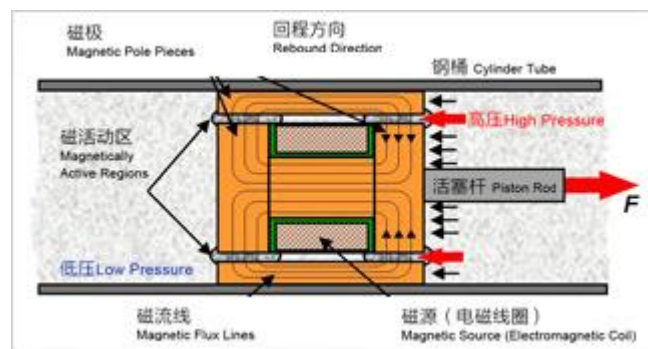
### 4.1. Výhody a nevýhody

Oproti plně aktivním systémům jsou semi-aktivní tlumiče lehčí, levnější, méně konstrukčně náročné, spolehlivější i méně energeticky náročné. Jde ale stále o disipativní systémy, tlumič tak pouze reaguje silou s opačným směrem proti síle původní. Dále mají oproti aktivním systémům delší časovou prodlevu, nejsou tedy tak dokonalé a komfortní.

Oproti pasivním systémům nabízí semi-aktivní větší možnosti nastavení a lepší účinnost tlumení. Složitější konstrukce oproti pasivním tlumičům pak přidává na ceně. Semi-aktivní tlumiče jsou tak kompromisem mezi schopností aktivních tlumičů a cenou/spolehlivostí pasivních tlumičů.[3, 19]

## 4.2. Magnetoreologické tlumiče

Magnetoreologické tlumiče vychází z konstrukce pasivních tlumičů, přidanými součástmi jsou cívky, senzory a řídicí jednotka. Cívky jsou navinuty kolem průtokových kanálů v pístu. Náplň tlumičů je magnetická kapalina, která se skládá z nosné kapaliny a mikrometrických magnetických částic. Bez magnetického pole jsou částice rovnoměrně rozprostřeny v pracovním prostoru a průtokovým kanálem kapalina snadno proudí. Přívodem elektrického proudu do cívky vzniká magnetické pole, které uspořádá magnetické částice do provazců napříč tlumičem. Kapalina pak proudí průtokovým kanálem značně obtížněji, což mění charakteristiku tlumiče na tvrdší. Míru změny charakteristiky lze upravovat řídicím, který si vybírá mezi tvrdší a měkčí jízdou.[1, 3, 20]



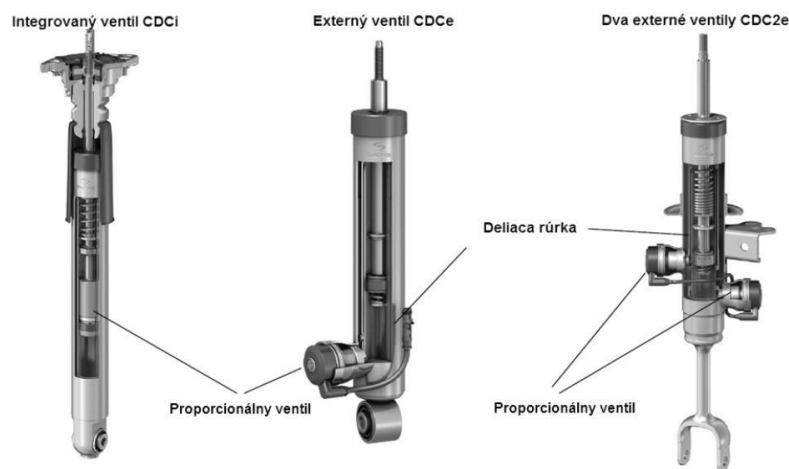
Obrázek 7: Řez magnetoreologickým tlumičem[20]

Tento systém je velice účinný a rychlý, odezvy se pohybují v rozmezí 5 – 10 ms. Možnost nastavení charakteristiky je široká díky možnosti snadno měnit proud proudící cívkou. Systém je relativně jednoduchý a spolehlivý, jelikož pochází převážně z designu pasivního tlumiče. Nevýhodou je ale vyšší cena, způsobena potřebou senzorů a řídicí jednotky. Magnetické částice v kapalině je nutno kvůli životnosti opatřit povrchovou úpravou, což přispívá kvůli technologické náročnosti k ceně. Díky cenovým omezením se v současnosti pouze užívá v automobilech vyšších tříd.[3]

### 4.3.CDC tlumič

Nejpoužívanějším semi-aktivním tlumičem je CDC (Continuous Damping Control). Jeho základem je dvouplášťový plynokapalinový tlumič. Průtokové ventily uzavírány či otevírány elektromagneticky ovládaným pístem. Tímto je regulován průtok kapaliny mezi pracovními komorami, což upravuje tlumící charakteristiku tlumiče. Bez průchodu proudu cívkou elektromagnetu je ventil nejvíce přiškrcen, při poruše zůstává tedy tlumič v tvrdším režimu. S rostoucím proudem se ventil otevírá a tím tlumení zmírňuje. Pracovní kapalina je identická s pasivními tlumiči, není zde třeba žádné speciální náplně.

Původní řešení s proporčním ventilem uvnitř tlumiče bylo nahrazeno modely s jedním či dvěma ventily umístěnými mimo tlumič. Systém obsahuje senzory ke snímání situace a řídicí jednotku. Propojení se systémy ABS a ESP, snímání jízdních podmínek, zatížení vozu, stylu řízení a pohybů vozidla poskytují dostatek informací k plynulému přizpůsobení tlumící síly každého tlumiče.[21, 22]



Obrázek 8: Konstrukční řešení CDC tlumiče[23]

CDC tlumiče jsou účinné, s odezvou až 2 ms. Stejně jako magnetoreologické tlumiče jsou výhodami jednoduchá konstrukce a spolehlivost. Oproti magnetoreologickým tlumičům jsou však levnější. V současnosti se používají u široké škály vozů, od motorsportových speciálů k sériovým vozům vyšší a střední síly.[3]

## 5. Aktivní tlumiče

Aktivní tlumicí systémy jsou sofistikovanou náhradou běžného tlumení s pružinami a tlumiči. Pružiny a tlumiče buď zcela chybí, nebo jsou přítomny pouze jako záložní systém v případě poruchy aktivního tlumicího systému. Tyto počítačově řízené složité mechatronické systémy vyhodnocuje situaci pro každé kolo samostatně, rozhoduje o jeho správné pozici a udržuje tak kola v kontaktu s vozovkou. Zároveň udržuje karoserii vozu v ideální vodorovné poloze, zatímco u pasivních a semi-aktivních systémů je karoserie značně ovlivňována nerovnostmi vozovky kvůli kompromisu mezi komfortem a jízdními vlastnostmi.[3]

Možností konstrukčního řešení aktivního tlumicího systému je více. Aktivní tlumiče se stále vyvíjejí, v současnosti se používá více řešení pomocí hydropneumatických tlumičů. Další možností, která již byla odzkoušena a realizována, je použití lineárních elektromotorů. Praktické testy firmy BOSE ukázaly impresivní možnosti systému, systém však komerčně neuspěl a v současnosti se nepoužívá.[3, 24]

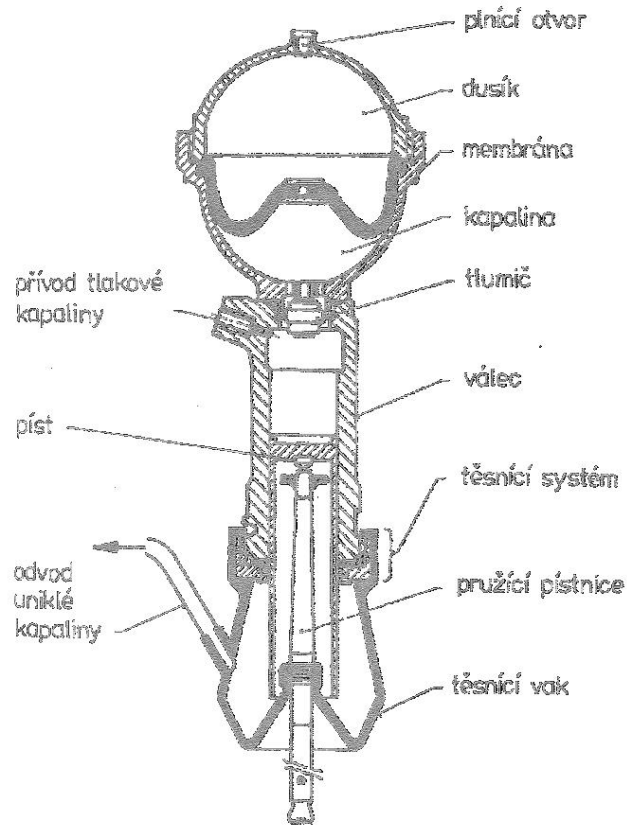
### 5.1. Výhody a nevýhody

Aktivní tlumicí systémy odstraňují direktivní limity charakteristiky tlumičů. Umí tedy vyvolat sílu libovolným směrem, nejen proti původní síle jako tlumiče pasivní a semi-aktivní. Je tedy možné přizpůsobit odpružení momentální situaci v extrémně krátkých časových intervalech. Zároveň aktivní systémy umožňují kombinaci vysokého komfortu spojeného s měkkým odpružením a vynikající jízdní vlastnosti i bezpečnost tvrdého odpružení. Dále lze jednoduše měnit světlou výšku vozidla, což poskytuje větší možnosti pro jízdu nerovným terénem či snížení aerodynamického odporu.

Aktivní systémy jsou velice složité s velkým množstvím senzorů, řídicích jednotek a dalších aktivních součástí. Jejich pořizovací cena je tak omezuje na využití pro drahé automobily. Nevýhodou je také velká energetická náročnost. K práci těchto systému je potřeba značné množství energie, což je limituje k použití u velmi výkonných vozů. Zároveň jsou kvůli složitosti a relativně limitovaným zkušenostem s provozováním těchto systému poruchovější než pasivní a semi-aktivní systémy.[1, 24]

## **5.2.Hydropneumatický tlumič**

Hydropneumatický tlumič nahrazuje klasický systém pružiny a tlumiče prací s plynem a kapalinou. Základem tohoto typu tlumiče je hydropneumatická pružina, plynem je nejčastěji dusík. Nad válcem, ve kterém se přímočaře pohybuje píst, je umístěna kulová nádoba s pryžovou membránou. Tato membrána kouli dělí na dvě poloviny. V horní polokouli se nachází vlastní pružící plyn, ve spodní polokouli již je pak hydraulická kapalina. Mezi kulovou nádobou a válcem tlumiče se nachází dvojčinný ventil, který při pohybu škrťí proudící kapalinu. Pružící plyn tedy zastává funkci pružiny, ventil pak funkci tlumiče. Celý systém je kontrolován přečerpáváním pracovní kapaliny mezi zásobníkem a válcem tlumiče. Lze tak aktivně měnit charakteristiku tlumení pomocí tlaku kapaliny a plynu, zároveň lze měnit světlou výšku vozu změnou objemu kapaliny. Celý systém je pak řízen řídicí jednotkou.[3, 16]



Obrázek 9: Schéma hydro-pneumatického tlumiče[3]

Takovéto systémy reagují na informace o změně polohy kola či charakteru vozovky ze senzorů. Regulace těchto systémů je schopna změny do 10 ms. Tlumící síly pokrývají vibrace zhruba do 6 Hz. Tyto systémy poskytují vysoký komfort, oproti systémům s lineárními elektromotory nedosahují dostatečných rychlostí změny pro absolutně hladkou jízdu. Kvůli složitosti systému a použití čerpadel je systém poměrně drahý, zároveň je také náchylný k poruchovosti. Mezi tyto systémy patří například tlumič Hydractiv III od Citroënu či ABC tlumič od automobilky Mercedes-Benz.[3, 25]



### 5.3.MRC-Bose

Firma Bose se vypořádala jinou cestou aktivního tlumení. V roce 2004 po 24 letech vývoje odhalila svůj aktivní systém, který místo klasických hydraulických tlumičů používá lineární elektromotory. Oproti hydraulickým systémům, které dokáží reagovat na situaci v časech kolem 10 ms, MRC-Bose systém (Magnetic Ride Control - Bose) dokáže zpracovat informace, rozhodnout o síle a vyvolat ji během jedné milisekundy. Firma Bose využila své expertízy technologie reproduktorových soustav, nerovnosti vozovky jsou tak snímány a zpracovávány podobně jako zvukové vlny. Na základě techniky potlačení šumu řídicí jednotka vydává signály pro elektromotory, které vyvolají potřebnou sílu.[24, 26]

Díky rychlým reakcím se tento systém blíží ideálnímu tlumiči, zároveň jsou potlačovány podélné i příčné náklony vozu, čímž je ještě více zlepšena bezpečnost přepravovaných osob. Systém dokáže skloubit vysoký komfort téměř absolutního tlumení vibrací a nárazů s perfektními jízdními vlastnostmi spojené s tvrdým odpružením závodních vozů. [24]



Obrázek 10: Testování systému MRC-Bose[27]

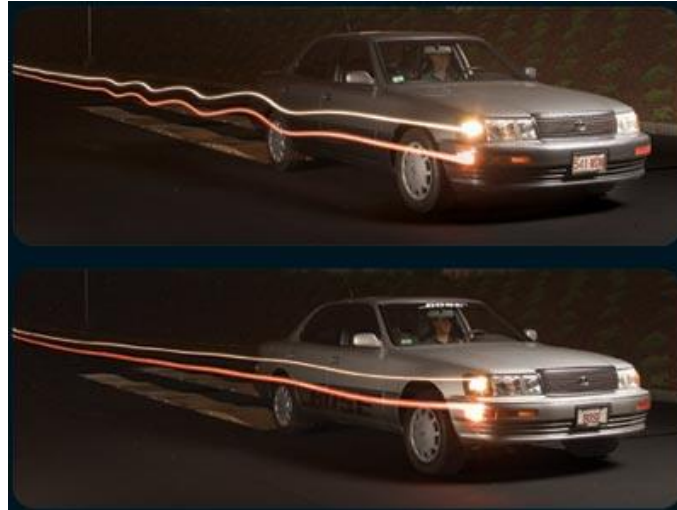
Vlastnosti systému MRC-Bose jsou nad rámec pouhého tlumení nárazů. Systém je natolik výkonný a adaptabilní, že testovaný vůz byl schopen přeskakovat níže překážky bez jakékoliv rampy – lineární motory dokáží samy o sobě s autem skočit do výšky několika centimetrů, zatímco řídicí systém dokáže takovou situaci správně analyzovat a poslat příslušné signály. Tato schopnost byla použita pouze pro prezentaci síly systému, nikdy nebyla plánována jako standardní součást sériové výroby.[28, 29]



*Obrázek 11: Lexus LS400 přeskakuje překážku díky MRC-Bose[29]*

Dále je systém schopný naklánět automobil do zatáček podobně jako letadlo, což zlepšuje přilnavost a částečně neguje odstředivé síly v zatáčce. Stejně jako u dalších systémů, které jsou tohoto schopné, se neplánuje jeho užití v sériové výrobě. Výzkum tohoto chování předpokládá, že část řidičů by tato schopnost nabádala k ještě rychlejší jízdě zatáčkou. Tak by častěji docházelo k momentům, kdy řidič překročí schopnosti adheze pneumatik a dostane se do smyku. Docházelo by tedy k častým nehodám.[30]

Výhodou tohoto systému je nízká energická náročnost. Při zkracování elektromotoru je systém schopen rekuperace energie, která se ukládá do vysokovýkonných kondenzátorů Ultra-Caps. Tato energie je později znovu využita k vyvolání tlumícího účinku. Systém pracuje s napětím 300V. Systém je dostatečně kompaktní, velikostí srovnatelný s běžnými tlumiči.[26, 29]



*Obrázek 12: Porovnání MRC-Bose a klasického tlumiče[30]*

V roce 2004 proběhlo úspěšné otestování systému, z technického hlediska byly schopnosti systému prohlášeny za revoluční. V roce 2009 firma Bose oznámila, že je systém připraven na sériovou výrobu. Prozatím se nepodařilo firmě začít spolupráci s žádným výrobcem automobilů, zejména kvůli podstatným nevýhodám systému.[29, 30]



Obrázek 13: Systém MRC-Bose[31]

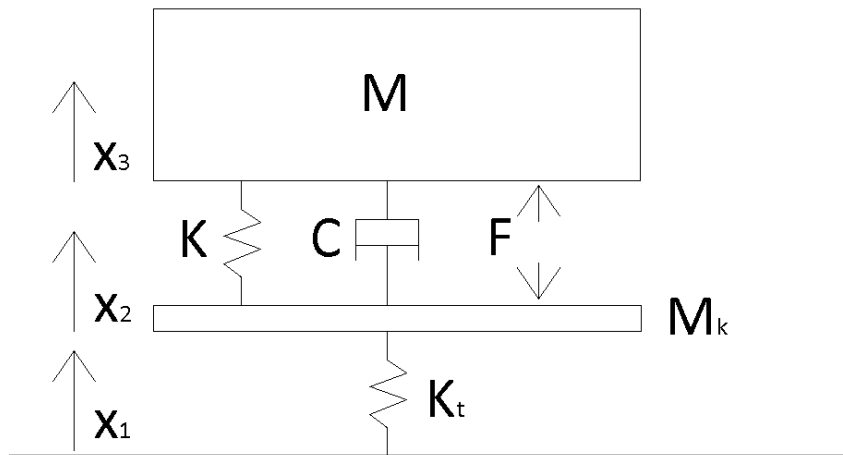
Jednou z nevýhod je hmotnost systému. Pro každé kolo váží tento systém odhadem 70 až 100 kilogramů, což je až trojnásobek váhy konvenčního pasivního tlumiče. Firma Bose uvedla, že pro použití v sériové výrobě výrobci automobilů požadují hmotnost maximálně 45 kilogramů. Druhou nevýhodou je cena samotného systému. Magnetoreologický systém MagneRide, používaný firmou General Motors, lze pořídit pod 60 tisíc korun. Cena MRC-Bose by se pravděpodobně pohybovala kolem čtyřnásobku této hodnoty. Technologie je momentálně využívána v podobě BoseRide, což je speciální odpružení sedačky řidiče nákladních vozů.[30, 32, 33]

## 6. Matematický model

### 6.1. Aktivní tlumení

Pro jednoduchost matematického modelování bude v této části používán čtvrtinový model automobilu. Cílem výpočtů v této kapitole je odhad velikosti síly, kterou musí aktuátor aktivního tlumiče vyvinout pro účinné utlumení. Největší silou na kolo vyvolává náraz nerovnosti vozovky. Další síly, spojené s příčným a podélným nakláněním vozu, by popisoval matematický model celého automobilu. Předpokládejme, že tyto síly nejsou větší než-li síly nárazu nerovnosti na kolo, pak nám pro přibližné určení síly požadované po aktuátoru postačuje čtvrtinový model.

Čtvrtinový model automobilu uvažuje váhu části automobilu, kterou nese jedno kolo. Dále je počítáno se silami pružiny, pasivního tlumiče a vlastního aktuátoru aktivního tlumení. Vzhledem k faktu, že všechny parametry a hodnoty jsou pouze přibližné, můžeme zanedbat pružící sílu pneumatiky – předpokládejme tedy, že pneumatika není při nárazu deformována. Zároveň předpokládejme neustálý kontakt kola s vozovkou.



Obrázek 14: Aktivní tlumič - čtvrtinový model

Z obrázku 14:

$x_1$  = souřadnice vozovky

$x_2$  = souřadnice kola

$x_3$  = souřadnice karoserie

$M$  = hmotnost karoserie

$M_k$  = hmotnost kola a tlumiče

$K$  = tuhost pružiny

$K_t$  = tuhost pneumatiky

$C$  = konstanta tlumiče

$F$  = síla aktuátoru

Jelikož uvažujeme, že pneumatika nepruží a kolo je v neustálém kontaktu, pak

$$\begin{aligned} x_1 &= x_2 \\ K_t(x_2 - x_1) &= 0 \end{aligned} \tag{1}$$

Nemusíme tedy počítat s tuhostí pneumatiky  $K_t$ .

Z druhého Newtonova zákona pro  $M$ :

$$F_0 = M_0 a_0 \quad (2)$$

$$M\ddot{x}_3 = -K(x_3 - x_1) - C(\dot{x}_3 - \dot{x}_1) - F$$

,kde  $\dot{x} = \frac{dx(t)}{dt}$ ,  $\ddot{x} = \frac{d^2x(t)}{dt^2}$

Pro zrychlení karoserie pak platí:

$$\ddot{x}_3 = \frac{-K(x_3 - x_1) - C(\dot{x}_3 - \dot{x}_1) - F}{M} \quad (3)$$

Pro  $M_k$ :

$$M_k \ddot{x}_2 = K(x_3 - x_1) + C(\dot{x}_3 - \dot{x}_1) + F \quad (4)$$

Pro zrychlení kola pak platí:

$$\ddot{x}_2 = \frac{K(x_3 - x_1) + C(\dot{x}_3 - \dot{x}_1) + F}{M_k} \quad (5)$$

$$F = -K(x_3 - x_1) - C(\dot{x}_3 - \dot{x}_1) + M_k \ddot{x}_2$$

Z těchto rovnic pak lze určit chování modelu. Stanovením požadovaného zrychlení kola  $\ddot{x}_2$  můžeme určit sílu aktuátoru k včasné změně pozice kola. Čím vyšší toto zrychlení, tím lépe si systém dokáže poradit s nerovnostmi vozovky ve vyšších rychlostech. Aktuátor samotný však přidává na hmotnosti  $M_k$ . Je tedy nutné použít aktuátor s nejlepším poměrem síla – hmotnost.

## 6.2. Lineární elektromotor

Následuje odvození síly aktuátoru, kterým uvažujeme lineární elektromotor.

Vycházíme z rovnice pro elektromagnetickou sílu

$$F = BIl \quad (6)$$

, kde

$F$  = požadovaná síla určená v předchozí kapitole

$B$  = magnetická indukce

$I$  = proud vinitím

$l$  = aktivní délka

Z výkonové rovnice elektromotoru:

$$P = CD^2 l_p n \quad (7)$$

$$n = 60\omega/2\pi$$

$$P = \frac{30}{\pi} CD^2 l \omega$$

, kde

$P$  = výkon

$C$  = Essonův činitel využití stroje

$D$  = vnitřní průměr statoru

$l_p$  = délka statorového paketu

$n$  = otáčky za minutu

$\omega$  = úhlová rychlost



Essonův činitel využití stroje je dán ve tvaru

$$C = \pi A \alpha_{\delta} B_{\delta} k_v k_B \quad (8)$$

,kde

$A$  = lineární proudová hustota

$\alpha_{\delta}$  = činitel pólového krytí

$B_{\delta}$  = indukce ve vzduchové mezeře

$k_v$  = činitel vinutí

$k_B$  = činitel tvaru pole

Z definice výkonu vyjádříme točivý moment

$$P = M\omega \quad (9)$$

$$M = \frac{P}{\omega}$$

Z rovnice 8 a 9 pak

$$M = \frac{30}{\pi} CD^2 l_P \quad (10)$$

Moment lze také vyjádřit jako

$$M = F \frac{D}{2} \quad (11)$$

Z rovnic 10 a 11 pak

$$F \frac{D}{2} = M = \frac{30}{\pi} CD^2 l_P \quad (12)$$

$$F = \frac{60CDl_P}{\pi}$$

,kde

$F$  = síla

$C$  = Essonův činitel využití stroje

$D\pi$  = délka kotvy

$l_P$  = délka statorového paketu

Z rovnic 6 a 12 pak

$$F = \frac{60CDl_P}{\pi} = BIl \quad (13)$$

$$l = D\pi$$

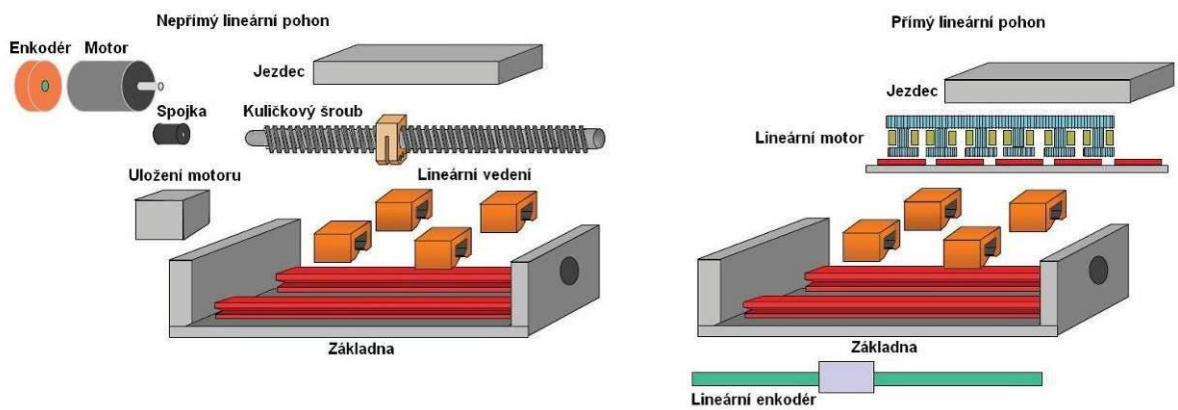
$$F = \frac{60CDl_P}{\pi} = BID\pi$$

Při známé síle  $F$ , zvolené délce statorového paketu  $l_P$  a magnetické indukci  $B$  (permanентní magnety) jsme schopni stanovit proud  $I$  potřebný pro vybuzení.

$$I = \frac{60Cl_P}{B\pi^2} \quad (14)$$

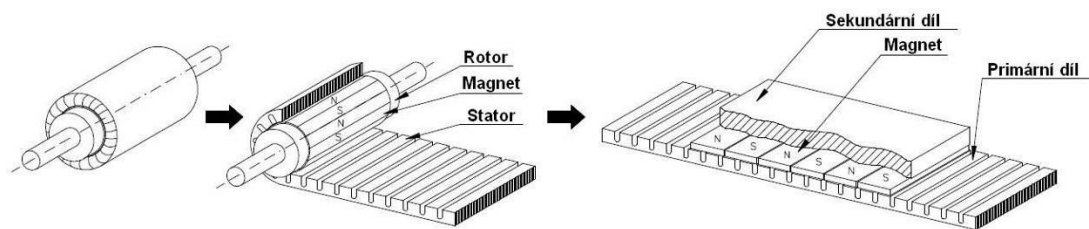
## 7. Lineární elektromotory

Lineární pohon je takový, který místo rotačního pohybu vyvolává pohyb přímočarý. Transformuje tedy elektrickou energii na mechanickou energii translačního pohybu. Nepřímým lineárním pohonem je klasický rotační elektromotor spojený s kuličkovým šroubem. Poháněné zařízení je pevně spojeno s maticí navlečené na kuličkovém šroubu. Otáčením tohoto šroubu je prostřednictvím matice vykonáván lineární pohyb. Přímým lineárním pohonem je pak lineární elektromotor. To je prakticky klasický rotační elektromotor rozvinutý do roviny. Stator, popřípadě stator motoru je pevně uložen, protějšek se pohybuje po dráze a je připevněn k poháněnému zařízení.



Obrázek 15: Přímý a nepřímý lineární pohon[34]

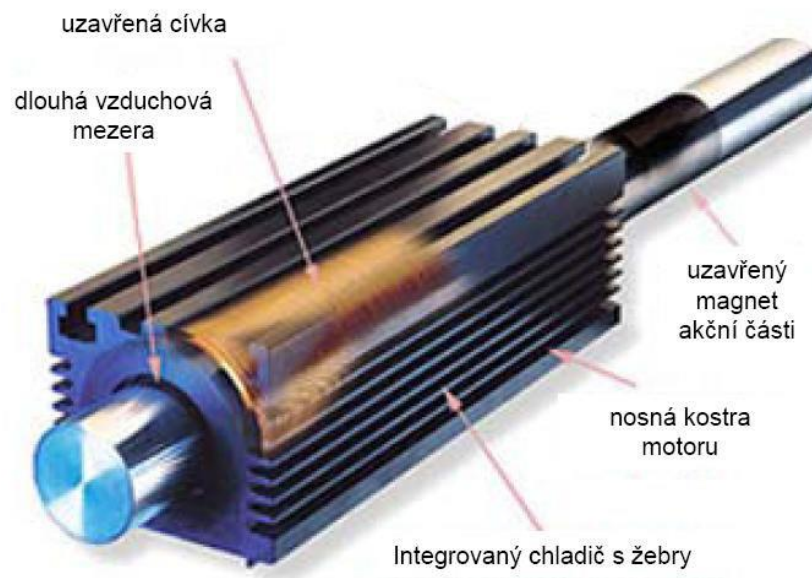
V podstatě každý druh elektrického rotačního stroje má svůj lineární protějšek, který vzniká jeho rozbalením do roviny. U lineárních motorů je statorem primární část a rotorem sekundární část. Primární částí je stejně jako u rotačních motorů skládána z elektrotechnických plechů a trojfázového vinutí uloženého v jeho drážkách. Proti primární části se nachází sekundární část. U synchronních motorů je sekundární část tvořena permanentními magnety na ocelové podložce, u asynchronních klec nakrátko. U většiny strojů je sekundární část delší částí stroje. Při přivedení proudu do primární části dochází k podélnému pohybu mezi částmi. Rychlost pohybu je pak určována velikostí proudu.



Obrázek 16: Lineární motor[34]

## 7.1. Tubulární lineární motor

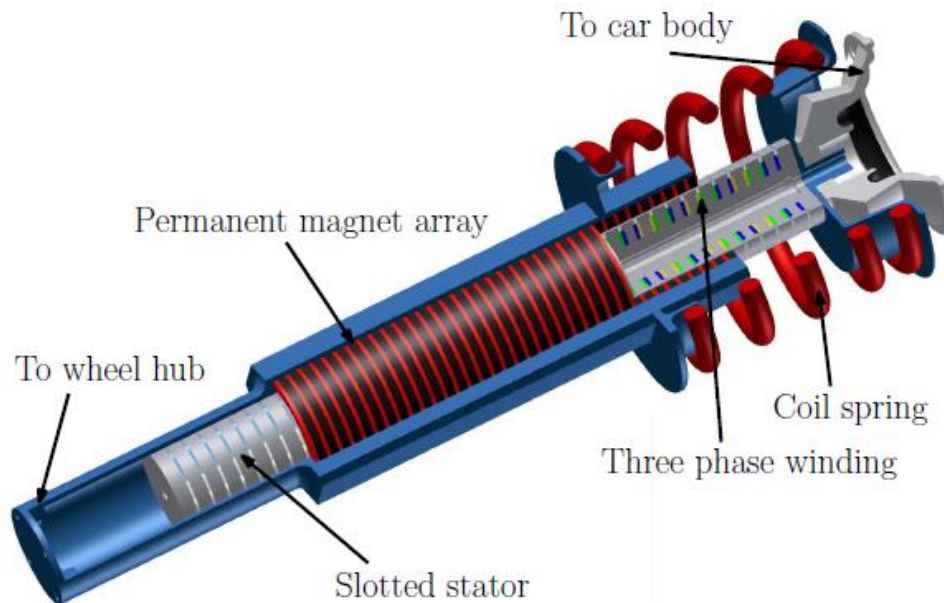
Tubulární lineární elektromotor vznikne zkroucením lineárního synchronního motoru do válce. Primární a sekundární část jsou ve výsledku koaxiální duté válce bez podstav, mezi nimiž je vzduchová mezera. Existují dvě možnosti jak primární a sekundární části uspořádat, každá možnost má své výhody i nevýhody. Buď je možné mít primární část motoru jako vnější a sekundární jako vnitřní část, či naopak. Díky rotačnímu uspořádání jsou kompenzovány přitažlivé síly mezi státorem a rotorem a díky tomu neovlivňují poháněné zařízení. Toto uspořádání minimalizuje přítomnost rozptylových toků, dochází tak k lepšímu využití pole permanentních magnetů. Tubulární lineární motory mají nejvyšší silovou hustotu ze všech typů lineárních motorů. Díky těmto vlastnostem jde o motor vhodný k použití v aktivních tlumících systémech. Tento motor užívá právě systém MRC-Bose, firma však nezveřejnila žádné technické detaily či parametry.[35, 36]



Obrázek 17: Tubulární lineární motor s vnější primární částí[34]

## 7.2. Tubulární lineární motor jako aktuátor aktivního tlumení

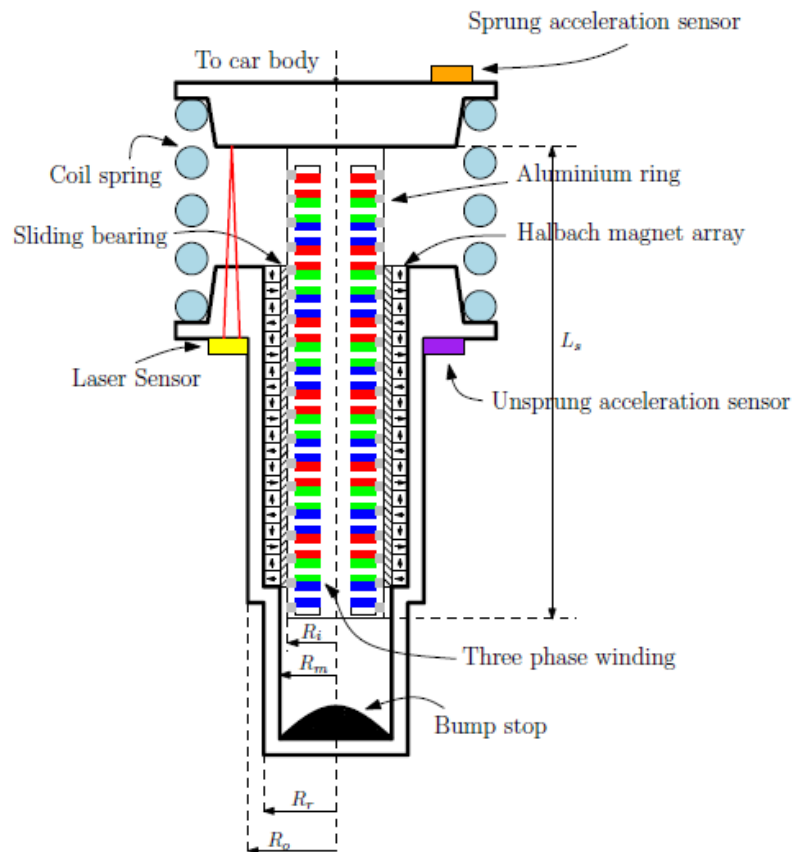
Firma Bose nezveřejnila podrobnosti a parametry systému MRC-Bose, v této části je tedy popsán systém užívaný v [36]. V této práci se autor zabývá designem řídicího systému pro aktivní elektromagnetický systém zavěšení kola, sestávající z tubulárního lineárního synchronního elektromotoru a paralelní pružinou.



Obrázek 18: Aktivní tlumič s paralelní pružinou[36]

Na obrázku 18 je znázorněn tento systém. Primární část tubulárního lineárního motoru je zde částí vnitřní a delší, pevně spojenou s karoserií vozu. Sekundární vnější část s permanentními magnety je pak spojena se závěsem kola. Paralelně uložená pružina má za úkol nést hmotnost vlastního automobilu, aby v klidu lineární elektromotor neběžel, pokud není třeba reagovat na nerovnosti vozovky. V klidu tedy systém nespotřebovává energii. Pro případ výpadku elektromotoru jsou v sekundární části hliníkové prstence. Ty pohybem v magnetickém poli indukují vířivé proudy, které vyvolávají sílu proti směru rychlosti. Tato síla má pak podobný charakter jako síla pasivního tlumiče.[36, 37]

V [36] byl simulován a měřen čtvrtinový model BMW 530i. Výsledky měření bylo až 48% zlepšení komfortu při nastavení řídicí jednotky na maximální komfort a až 48,5% zlepšení jízdních vlastností při nastavení pro maximální jízdní vlastnosti oproti původnímu systému.



Obrázek 19: Řez navrhnutým systémem[36]

## 8. Závěr

Cílem bakalářské práce bylo provést rešerši v oblasti aktivních automobilových tlumičů s ohledem na současnou situaci a potenciální vývoj takových zařízení. Za tímto účelem byly zpracovány a popsány hlavní typy pasivních a semi-aktivních tlumičů, s cílem zhodnotit výhody a nevýhody jednotlivých typů. Zjištěním bylo, že v současnosti používané semi-aktivní tlumiče jsou téměř stejně spolehlivé jako pasivní tlumiče, zatímco poskytují podobnou schopnost přizpůsobení jako aktivní tlumiče. Na rozdíl od aktivních tlumičů ale nepotřebují příliš výkonné zdroje energie. Aktivní tlumiče pak mají výhodu ve schopnosti vyvolat sílu v jakémkoliv směru, nikoliv jen proti síle budící, jak je to u tlumičů pasivních a semi-aktivních.

Rychlost změny charakteristiky tlumení činí u semi-aktivních tlumičů kolem 10 ms, u magnetoreologických tlumičů až 5 ms. Budoucí vývoj semi-aktivních tlumičů spočívá v jejich zrychlení, aby tyto systémy dokázaly přiblížit prodlevu své reakce co nejmenším hodnotám. Hydropneumatické tlumiče dosahují podobných hodnot. Elektromagnetické tlumiče, za užití lineárních elektromagnetů, dokáží změnit charakteristiku tlumení za méně než 1 ms. Aktivní tlumiče současnosti mají značnou nevýhodu nedostatečné spolehlivosti. Jsou zkrátka příliš složité, a tak obsahují velké množství součástí, které se mohou porouchat. Zároveň musí řešit vyšší spotřebu energie – u hydropneumatických tlumičů toto může znamenat velký problém. Elektromagnetické tlumiče jsou schopny rekuperace energie, přesto je jejich spotřeba zhruba kolem třetiny spotřeby klimatizačního systému. Prakticky tak vozidlu ubírají výkon několika koňských sil.



Prototypy elektromagnetických aktivních tlumičů v současnosti předvádějí schopnosti daleko nad rámec současných semi-aktivních systémů. Schopnost vyvolat sílu libovolným směrem umožňuje těmto systémům reagovat již v okamžiku nárazu na kolo, nikoliv až v momentě projevení síly. S těmito systémy se do budoucna počítá pro nové typy hybridních a elektrických automobilů, kde je integrace takových systémů jednodušší. Firma Bose již v roce 2004 předvedla unikátní schopnosti systému MRC-Bose. Tento systém však neodpovídá současným komerčním požadavkům na hmotnost a cenu. Systém by však mohl najít využití zejména v sanitních vozech, kde tlumení vibrací a nárazu naprosto kritické. Pro technologii firma Bose prozatím našla uplatnění v aktivních sedačkách pro řidiče kamionu BoseRide.

Budoucí využití lineárních elektromotorů k aktivnímu tlumení použitelnému v automobilovém průmyslu závisí na vývoji lepších materiálů a designů zařízení, aby byl zlepšen poměr síla - hmotnost. Pokud by byla otázka hmotnosti dostatečně vyřešena, tyto systémy mohou najít uplatnění u záchranných služeb či prémiových luxusních vozů.

V další části práce je popsán jednoduchý matematický model aktivního tlumení, který stále počítá s přítomností pružiny a tlumící síly. Tlumící síla jako taková je realizována přítomností hliníkových prstenců v rotoru lineárního motoru, které při průchodu mezi pevnými magnety vykonávají sílu proti síle budící, závislou na rychlosti, podobně jako klasický tlumič.

V poslední části práce se nachází úvod do lineárních elektromotorů. Zde jsou stručně popsány tyto elektromotory. Tubulární lineární elektromotor vybrán jako nejvhodnější pro účely aktivního tlumení díky své vysoké hustotě síly. Tento typ motoru je pak popsán podle návrhu, použitým v [36].

## 9. Seznam použitých zdrojů

- [1] DIXON, John C. *The Shock Absorber Handbook: Second Edition*. 2007. ISBN 9780470510209.
- [2] STRANDEMAR, Katrin. On Objective Measures for Ride Comfort Evaluation. nedatováno. ISSN 1404-2150.
- [3] *The Car Suspension Bible* [online]. [vid. 2016-04-03]. Dostupné z: [http://www.carbibles.com/suspension\\_bible.html](http://www.carbibles.com/suspension_bible.html)
- [4] PRAŽÁK, František. *Tlumič odpružení jako prvek ovlivňující jízdní vlastnosti vozidel*. B.m., 2006. b.n.
- [5] VLK, František. *Dynamika motorových vozidel*. 2006. ISBN 80-239-6464-X.
- [6] *What do shock absorbers do?* [online]. [vid. 2016-04-03]. Dostupné z: <http://www.monroeheavyduty.com/support/training/what-do-shock-absorbers-do>
- [7] HARRIS, William. *Dampers: Shock Absorbers* [online]. [vid. 2016-04-03]. Dostupné z: <http://auto.howstuffworks.com/car-suspension2.htm>
- [8] RYDER, Bob. *Suspension Theory 101* [online]. [vid. 2016-04-28]. Dostupné z: <http://www.trucktrend.com/how-to/chassis-suspension/0109tr-truck-suspension-handling-performance/>
- [9] *WW2 German Armour* [online]. [vid. 2016-05-05]. Dostupné z: [http://www.tanks-encyclopedia.com/ww2/nazi\\_germany/ww2\\_german\\_panzers.php](http://www.tanks-encyclopedia.com/ww2/nazi_germany/ww2_german_panzers.php)
- [10] *M1 Abrams Main Battle Tank* [online]. [vid. 2016-05-05]. Dostupné z: [http://www.armyrecognition.com/united\\_states\\_army\\_heavy\\_armoured\\_vehicles\\_tank\\_uk/m1\\_abrams\\_main\\_battle\\_tank\\_technical\\_data\\_sheet\\_specifications\\_information\\_pictures\\_video.html](http://www.armyrecognition.com/united_states_army_heavy_armoured_vehicles_tank_uk/m1_abrams_main_battle_tank_technical_data_sheet_specifications_information_pictures_video.html)
- [11] *Toyota Tech: Upgrading Torsion Bars* [online]. [vid. 2016-05-05]. Dostupné z: [http://www.4x4wire.com/toyota/tech/torsion\\_bars/](http://www.4x4wire.com/toyota/tech/torsion_bars/)
- [12] *Suspension Lift Frequently Asked Questions* [online]. [vid. 2016-05-05]. Dostupné z: <http://www.off-road.com/trucks-4x4/project/project926.html>
- [13] DINGLEY, Andy. Sken z *The Autocar* [online]. nedatováno. Dostupné z: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mathis\\_EMY6\\_torsion-bar\\_rear\\_suspension\\_\(Autocar\\_Handbook,\\_13th\\_ed,\\_1935\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mathis_EMY6_torsion-bar_rear_suspension_(Autocar_Handbook,_13th_ed,_1935).jpg)
- [14] *Leaf Springs Technical Information* [online]. [vid. 2016-04-28]. Dostupné z: <https://landrumspring.com/technical/leaf-spring-technical-information/>
- [15] WIKIPEDIA. *Leaf Spring* [online]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Leaf\\_spring](https://en.wikipedia.org/wiki/Leaf_spring)
- [16] VLK, František. *Podvozky motorových vozidel: pneumatiky a kola, zavěšení kol, nápravy, odpružení, řídicí ústrojí, brzdové soustavy*. 1. vyd. 2000. ISBN 80-238-5274-4.
- [17] JAN, Zdeněk, Bronislav ŽDÁNSKÝ a Jiří ČUPERA. *Automobily 1 -- Podvozky*. 2. vyd. 2009. ISBN 978-80-87143-11-7.
- [18] *Podvozkové centrum APM Bilstein - 9. díl: Tlumiče* [online]. [vid. 2016-05-16]. Dostupné z: <http://www.autoprofiteam.cz/article.php?artid=670>
- [19] GUGLIELMINO, Emanuele. *Semi-active suspension control: improved vehicle ride and road friendliness*. 2008.
- [20] *MAGNERIDE™ CONTROLLED SUSPENSION SYSTEM* [online]. [vid. 2016-05-22]. Dostupné z: <http://www.bwigroup.com/en/pshow.php?pid=22>
- [21] ZF. *Suspension Technology* [online]. 2016 [vid. 2016-05-05]. Dostupné z: [http://www.zf.com/global/media/product\\_media/cars\\_5/cars\\_suspension\\_technology\\_cdc/pdf\\_53/doppelseiten\\_daempfungsmodule\\_engl\\_20110823.pdf](http://www.zf.com/global/media/product_media/cars_5/cars_suspension_technology_cdc/pdf_53/doppelseiten_daempfungsmodule_engl_20110823.pdf)

- [22] LÁNÍK, Ondřej. *CDC: aktivní tlumiče letos našly cestu do běžných aut!* [online]. 2004 [vid. 2016-04-24]. Dostupné z: <http://www.auto.cz/cdc-aktivni-tlumice-letos-nasly-cestu-do-beznych-aut-16717>
- [23] RŮŽIČKA, Jiří. *Semiaktivní a aktivní tlumení vozidel*. B.m., 2014. Západočeská Univerzita v Plzni.
- [24] *The revolutionary Bose suspension that could have been* [online]. 2016 [vid. 2016-04-20]. Dostupné z: <http://www.autoblog.com/2016/02/08/bose-project-sound-suspension-cnet-video/>
- [25] DRAGOUN, Aleš. *Mercedes-Benz SL: Jak funguje Active Body Control (video)* [online]. 2012 [vid. 2016-05-14]. Dostupné z: <http://www.auto.cz/mercedes-benz-active-body-control-video-68378>
- [26] HANLON, Mike. <http://www.extremetech.com/extreme/97177-bose-active-suspension-moves-toward-market/2> [online]. 2004 [vid. 2016-05-12]. Dostupné z: <http://www.extremetech.com/extreme/97177-bose-active-suspension-moves-toward-market/2>
- [27] *Comparison of Factory-Installed and Bose® Suspensions: Body Motion on Bump Course* [online]. [vid. 2016-05-12]. Dostupné z: [http://www.bose.com/popup/tech\\_details/popup\\_lc\\_suspen\\_1.jsp](http://www.bose.com/popup/tech_details/popup_lc_suspen_1.jsp)
- [28] DIPIETRO, John. *Bose Suspension* [online]. 2009 [vid. 2016-05-12]. Dostupné z: <http://www.edmunds.com/car-technology/bose-suspension.html>
- [29] CSERE, Csaba. *A Surprising New Active Suspension - Column* [online]. 2004. Dostupné z: <http://www.caranddriver.com/columns/a-surprising-new-active-suspension>
- [30] HOWARD, Bill. *Bose's amazing active suspension uses speaker technology* [online]. 2011 [vid. 2016-05-12]. Dostupné z: <http://www.extremetech.com/extreme/97177-bose-active-suspension-moves-toward-market/2>
- [31] HARRIS, William. *How Car Suspensions Work* [online]. [vid. 2016-05-14]. Dostupné z: <http://auto.howstuffworks.com/car-suspension9.htm>
- [32] *Bose Ride - Frequently Asked Questions* [online]. [vid. 2016-05-12]. Dostupné z: <http://www.boseride.com/faq>
- [33] PITZEL, Garth. *Innovation In Driver Comfort & Safety* [online]. 2015. Dostupné z: <https://www.blog-bison.com/2015/07/innovation-in-driver-comfort-safety/>
- [34] GÄRTNER, Jan. *NÁVRH LINEÁRNÍHO OSCILAČNÍHO POHONU S VNĚJŠÍM BUZENÍM* [online]. B.m., 2010. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=30201](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=30201)
- [35] RAKSHITH, M., L. YATHIN KUMAR a S. G. VIKAS. *Bose Automotive Suspension. International Journal of Recent Technology and Engineering* [online]. 2014, roč. 3, č. 4, s. 18 [vid. 2016-05-14]. Dostupné z: <http://www.ijrte.org/attachments/File/v3i4/D1197093414.pdf>
- [36] VAN DER SANDE, T.P.J. *Control of an automotive electromagnetic suspension system* [online]. B.m., 2011. Eindhoven University of Technology. Dostupné z: <http://mate.tue.nl/mate/pdfs/12819.pdf>
- [37] MUSOLINO, A., R. RIZZO a E. TRIPODI. *TUBULAR LINEAR INDUCTION MACHINE AS A FAST ACTUATOR: ANALYSIS AND DESIGN CRITERIA. Progress In Electromagnetics Research* [online]. 2012, roč. 132, s. 17. Dostupné z: <http://www.jpier.org/PIER/pier132/31.12091506.pdf>

## 10. Seznam obrázků

Obrázek 1: Torzní tyče zadní nápravy[13] .....	12
Obrázek 2: Listová semi-eliptická pružina[15] .....	13
Obrázek 3: Dvouplášťový kapalinový tlumič[17] .....	14
Obrázek 4: Dvouplášťový plynokapalinový tlumič[17] .....	15
Obrázek 5: Jednoplášťový plynokapalinový tlumič[17].....	16
Obrázek 6: PSD tlumič[18].....	17
Obrázek 7: Řez magnetoreologickým tlumičem[20] .....	19
Obrázek 8: Konstrukční řešení CDC tlumiče[23].....	20
Obrázek 9: Schéma hydropneumatického tlumiče[3].....	23
Obrázek 10: Testování systému MRC-Bose[27] .....	24
Obrázek 11: Lexus LS400 přeskakuje překážku díky MRC-Bose[29] .....	25
Obrázek 12: Porovnání MRC-Bose a klasického tlumiče[30].....	26
Obrázek 13: Systém MRC-Bose[31] .....	27
Obrázek 14: Aktivní tlumič - čtvrtinový model.....	29
Obrázek 15: Přímý a nepřímý lineární pohon[34] .....	34
Obrázek 16: Lineární motor[34] .....	35
Obrázek 17: Tubulární lineární motor s vnější primární částí[34] .....	36
Obrázek 18: Aktivní tlumič s paralelní pružinou[36] .....	37
Obrázek 19: Řez navrhnutým systémem[36].....	38