



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A
BIOMECHANIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND
BIOMECHANICS

SIMULAČNÍ MODELOVÁNÍ TLUMIČE

SIMULATION MODELING OF A VIBRATION ABSORBER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

RADEK KUKAČKA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. LUKÁŠ BŘEZINA, Ph.D.

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky

Akademický rok: 2010/11

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Radek Kukačka

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

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:

Simulační modelování tlumiče

v anglickém jazyce:

Simulation modeling of a vibration absorber

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Součástí práce bude rešeršní studie analyzující současné způsoby tlumení vibrací přenášených od vozovky na karoserii automobilu a možné přístupy ke konstrukci tlumiče. Dále bude zhotoven zjednodušený simulační model pasivního tlumiče v prostředí Matlab, popř. Matlab Simulink.

Cíle bakalářské práce:

1. Proveďte rešeršní studii současných přístupů k tlumení vibrací přenášených od vozovky na karoserii automobilu, včetně možných konstrukcí tlumiče.
2. Vypracujte zjednodušený simulační model pasivního tlumiče v prostředí Matlab, popř. Matlab Simulink

prof. RNDr. Miroslav Douřek, CSc.
Děkan

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
Ředitel ústavu

Seznam odborné literatury:

B. Yang: Stress, strain and structural dynamics, Elsevier, 2005.

M. Zuščík: Návrh semiaktivního odpružení vozidla, disertační práce SjF, STU Bratislava, 2010

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Radek Kukučka

studijní program: Inženýrské studium v bakalářském studijním programu

obor: Strojná inženýrství (2301R016)

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

Simulační modelování tlumiče

v anglickém jazyce:

Simulation modeling of a vibration absorber

Stanovená charakteristika problematiky úkolu:

Součástí práce bude teoretická studie analýzy současné způsobu tlumení vibrací přenosných
od vozovky na karosérii automobilu a možné přístupy ke konstrukci tlumiče. Dále bude
zpracován zjednodušený simulační model pasivního tlumiče v prostředí Matlab, popř. Matlab
Simulink.

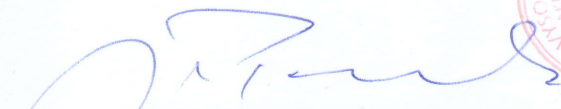
Vedoucí bakalářské práce: Ing. Lukáš Březina, Ph.D.

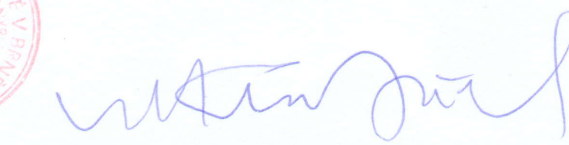
Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/11.

V Brně, dne 5.11.2010

L.S.




prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
Ředitel ústavu


prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá přehledem různých konstrukčních řešení tlumičů osobních automobilů. Součástí práce je zjednodušený simulační model pasivního tlumiče a jeho optimalizace pro daný pracovní cyklus.

V přehledu jsou uvedeny tlumiče používané v současnosti. Jsou to konstrukce pasivních plynokapalinových a kapalinových tlumičů. Dále jsou zastoupeny i moderní semiaktivní a aktivní elektronicky řízené tlumící systémy.

Ve zbývající části práce jsou uvedeny dva zjednodušené modely pasivního tlumiče. Pro každý tento model je provedena optimalizace parametrů tlumiče vzhledem k výchylce primární hmoty.

Klíčová slova:

tlumení, tlumič pérování, odpružení, model tlumiče, optimalizace tlumení

Abstract

The bachelor thesis gives an overview of different design solutions to car shock absorbers. The rest of the thesis describes a simplified model of passive shock absorber and its optimization.

The survey contains shock absorbers used in the present. There are various passive telescopic dampers and modern semi active and active electronically controlled damping systems.

The second part includes several simplified models of passive dampers. There is described an optimization of the damper parameters with respect to the displacement of the primary mass for each of the models.

Key words:

damping, shock absorber, damper, suspension, shock absorber model, damping optimization

Bibliografická citace:

KUKAČKA, R. *Simulační modelování tlumiče*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 43 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Lukáš Březina, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, pod vedením vedoucího bakalářské práce pana Ing. Lukáše Březiny, Ph.D. a s použitím uvedených zdrojů.

V Brně dne 27. května 2011

.....

Radek Kukačka

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval panu Ing. Lukáši Březinovi, Ph.D. za cenné připomínky a odborné rady, kterými přispěl k vypracování této bakalářské práce, a za čas, který mi věnoval.

Obsah

1	Úvod	11
2	Pasivní tlumiče.....	12
2.1	Teleskopické tlumiče.....	12
2.1.1	Kapalinové tlumiče	12
2.1.2	Plynokapalinové tlumiče	13
2.2	Polohově citlivé tlumiče PSD (Position Sensitive Damping)	16
2.3	Tlumič systému DCD (Displacement Conscious Damping)	17
3	Regulace odpružení vozidla	18
3.1	Adaptivní systémy.....	19
3.2	Semiaktivní systémy.....	19
3.3	Pomalé aktivní systémy	20
3.4	Rychlé aktivní systémy	20
3.5	Aktivní a semiaktivní systémy	20
3.5.1	Elektronicky ovládané tlumiče	20
3.5.1.1	Elektronické řízení tlumičů EDC (Electronic Damping Control)	20
3.5.1.2	Plynulé řízení tlumení CDC (Continuous Damping Control).....	22
3.5.1.3	Aktivní podvozkový systém Dynamic Drive BMW	23
3.5.1.4	Skyhook	24
3.5.2	Elektromagnetické systémy tlumení	24
3.5.2.1	Audi Magnetic Ride	24
3.5.2.2	MRC-Bose (Magnetic Ride Control-Bose)	25
4	Matematický model pasivního tlumiče	27
4.1	Netlumený model	27
4.2	Tlumený model	29
5	Optimalizace parametrů tlumičů	31
5.1	Metody optimalizace	31
5.1.1	Gradient descent	31
5.1.2	Pattern search	31
5.1.3	Simplex search	31
5.2	Optimalizace modelů	32
5.2.1	Model 1: Netlumené kmitání	33
5.2.2	Model 2: Tlumené kmitání	35
6	Závěr	38

7	Seznam použitých zdrojů a programového vybavení	39
7.1	Literatura	39
7.2	Internet	39
7.3	Programové vybavení	40
8	Seznam použitých zkratk a symbolů	41
9	Seznam obrázků	42
10	Přílohy.....	43
10.1	Obsah přiloženého CD	43

1 Úvod

V současné době je automobilová doprava jedním z nejčastějších způsobů přepravy osob nebo materiálu. S tím souvisí i neustálý rozvoj a vývoj technologií a techniky využívané při konstrukci jednotlivých dopravních prostředků – automobilů. Velkou část konstrukce automobilů tvoří různé bezpečnostní prvky, jak pasivní, tak aktivní. Jedním z těchto prvků je tlumič. Tlumič tlumí kmitání karoserie vozidla a mimo jiné také zajišťuje, aby bylo kolo v neustálém styku s vozovkou. Tímto samozřejmě přispívá ke zlepšení ovladatelnosti vozidla a komfortu posádky.

V práci je uvedeno základní rozdělení tlumících systémů a stručný popis konstrukce a princip funkce jednotlivých tlumičů.

Druhá část práce se zabývá vytvořením zjednodušeného matematického modelu pasivního tlumiče. Pro jeho odvození jsou využity Lagrangeovy rovnice druhého druhu. Na závěr jsou u tohoto modelu pro dvě různá zadání optimalizovány parametry tlumiče vzhledem k výchylce primární hmoty.

Vytvořený model je pouze zjednodušený, jeho hlavní uplatnění bude pro výukovou činnost v počítačových cvičeních předmětu Dynamika.

2 Pasivní tlumiče

Pasivní tlumič je charakteristický tím, že u něj nelze měnit charakteristiku tlumení během provozu a tím pádem ani ovlivňovat poměr mezi jízdním pohodlím a ovladatelností vozidla.

Kapitola je zpracována na základě [1] a [3].

2.1 Teleskopické tlumiče

V současnosti se téměř výhradně používají teleskopické dvojčinné kapalinové tlumiče. Tento typ tlumiče funguje jak ve směru dolů, od nápravy, tak i ve směru opačném. Hlavním principem fungování tlumiče je přetlačování oleje z jedné vnitřní komory do druhé skrz otvor, který má daný průřez. Tento princip se nazývá katarakt.

Základní rozdělení teleskopických tlumičů:

- kapalinové
- plynokapalinové

2.1.1 Kapalinové tlumiče

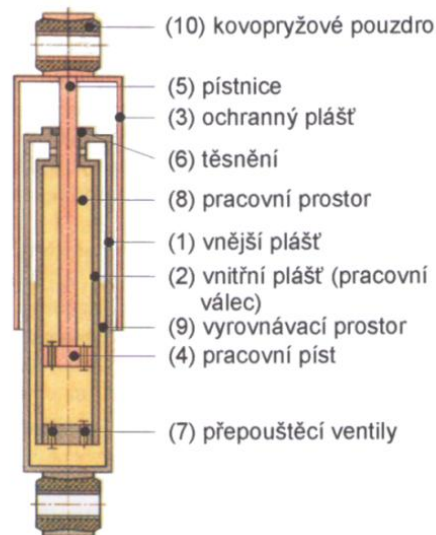
Konstrukční řešení těchto tlumičů je pouze dvouplášťové.

Ve vnitřním (pracovním) plášti je kapalina (převážně to bývá olej). V tomto plášti se pohybuje pracovní píst s průtokovými ventily, který je pevně spojen s pístitnicí. Při pohybu nápravy je jedním nebo více průtokovými ventily v pístu protlačována kapalina z jedné části pracovního prostoru do druhé. Tlumící síla, která je závislá na rychlosti pohybu pístu, vzniká díky hydraulickému odporu během tohoto škrcení. Mezi vnitřním a vnějším pláštěm tlumiče je tzv. vyrovnávací prostor, naplněný přibližně do poloviny kapalinou. Pracovní a vyrovnávací prostor jsou navzájem propojeny přepouštěcím ventilem.

Vyrovnávací prostor má za úkol zachytávat přebytečný objem kapaliny, který je vytlačen z pracovního prostoru pístitnicí při jejím zasouvání. Dále slouží k vyrovnání rozdílů objemu tlumičové kapaliny způsobených změnou její teploty.

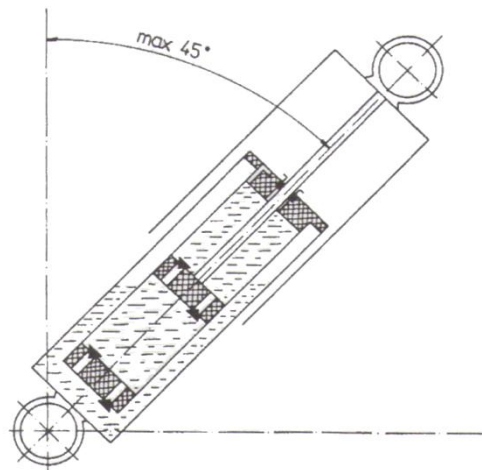
Horní část tlumiče tvoří víko, které uzavírá horní konec pracovního a vyrovnávacího prostoru. Ve víku je vodící pouzdro pístitnice a ucpávka.

Schéma tlumiče je uvedeno na obr. 2.1.



Obr. 2.1 Dvouplášťový kapalinový tlumič [3, str. 54]

Pro správné fungování tlumiče je nutné, aby byl pracovní prostor dokonale vyplněn tlumičovou kapalinou a neobsahoval žádné vzduchové bubliny. Pokud by se do kapaliny dostal nějaký stlačený vzduch, způsobil by kolísání tlumící síly, což by mělo za následek zhoršení účinků tlumiče. Proto nemůže být tlumič v libovolné poloze. Pokud by byl tlumič umístěn v příliš šikmé poloze, dostal by se vzduch z vyrovnávacího prostoru skrz přepouštěcí ventil až do pracovního prostoru. Z těchto důvodů může být maximální sklon dvouplášťového tlumiče maximálně 45° (obr. 2.2).



Obr. 2.2 Maximální sklon dvouplášťového tlumiče [1, str. 197]

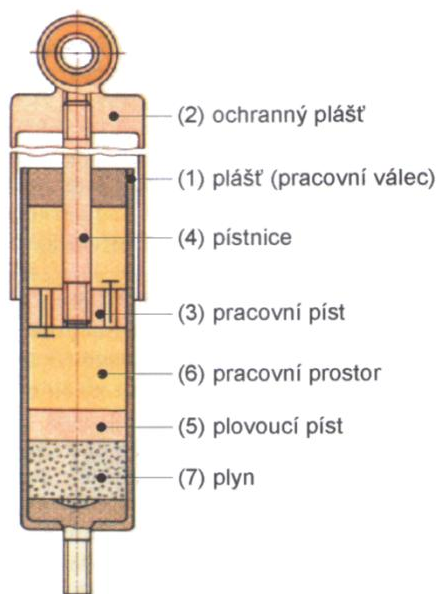
2.1.2 Plynokapalinové tlumiče

Teleskopické tlumiče pracují s kapalinou. Pro pohlcení pohybové energie využívají hydraulický odpor vzniklý průchodem kapaliny přepouštěcími ventily. Nevýhodou kapalinových tlumičů je to, že kapalina při průchodu ventily pění a tím se zhoršuje účinnost tlumiče. Z tohoto důvodu byly vynalezeny tlumiče plynokapalinové, v nichž je vnitřní prostor vyplněn inertním plynem (nejčastěji dusíkem), který vytvoří plynový polštář a ten zachytí kapalinu a nedovolí jí pění.

Plynokapalinové tlumiče mohou být podle typu konstrukce rozděleny na dvouplášťové a jednoplášťové.

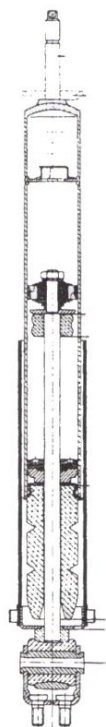
Jednoplášťový plynokapalinový tlumič (obr. 2.3) nemá samostatný vyrovnávací prostor. Změna objemu pracovního prostoru tlumiče je vyrovnávána měněním objemu plynu pod plovoucím (dělicím) pístem. Při zatlačení pístnice dolů proteče kapalina ventily v pracovním pístu do prostoru nad ním. V prostorech nad i pod pístem je tlak, a proto se zde netvoří bubliny. Průtokem kapaliny nastane jistý tlakový rozdíl, ale ten není kritický. Díky tomu je tlumič citlivý i na malé nerovnosti.

Tlak plynu pod plovoucím pístem se pohybuje v rozmezí od 2 MPa až do 3 MPa. Tlumič tedy pracuje jako vysokotlaký.

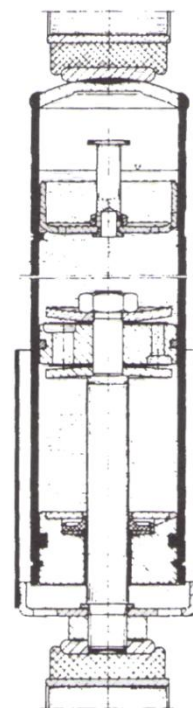


Obr. 2.3 Jednoplášťový plynokapalinový tlumič [3, str. 54]

Konstrukce jednoplášťového tlumiče může být řešena různě. Mohou být bez plovoucího pístu, z čehož plyne, že kapalina je v přímém styku s plynem. Při tomto řešení je nutné zabránit smísení kapaliny s plynem. Pokud by se smísily, opět by to mělo nepříznivý vliv na funkci tlumiče. Konstrukčně se to řeší pomocí odrazové stěny (obr. 2.4) nebo tzv. uklidňovacího pístu (obr. 2.5). Tato konstrukční řešení tlumí a uklidňují pohyb kapaliny na rozhraní s plynem.



Obr. 2.4 Jednoplášťový tlumič s odrazovou stěnou [1, str. 200]



Obr. 2.5 Jednoplášťový tlumič s uklidňovacím pístem [1, str. 200]

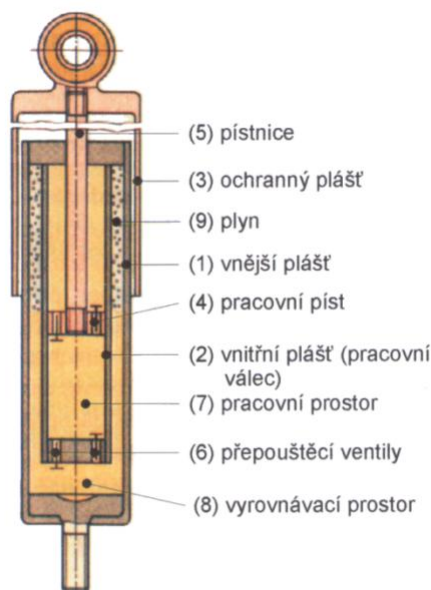
Výhody jednoplášťových tlumičů ve srovnání s dvouplášťovými:

- v kapalině vznikají nižší pracovní tlaky při pohybu pístu díky většímu průměru pracovního pístu (při současném zachování vnějšího průměru)
- lépe tlumí kmitání o vyšších frekvencích a nižších amplitudách, kdy přetlak v kapalině zabraňuje jejímu pění
- pracovní prostor je lépe chlazen
- tlumiče s dělicím pístem mohou pracovat v libovolné poloze

Velkým problémem těchto tlumičů je jejich utěsnění a životnost ucpávky, pístnice a vodícího pouzdra. Nižší životnost způsobuje přetlak kapaliny působící na ucpávku pístnice (u dvouplášťového je tento tlak téměř nulový). Přetlak zvyšuje možnost pronikání kapaliny ucpávkou a zvyšuje přítlak ucpávky na povrch pístnice, čímž zvětšuje tření, ale snižuje životnost ucpávky. Vodící pouzdro pístnice je umístěno až za ucpávkou, a to má za následek jeho nedostatečné mazání. Tímto se také snižuje životnost pístnice a pouzdra.

Dvouplášťový plynokapalinový tlumič (obr. 2.6) má téměř totožnou konstrukci i princip fungování jako kapalinový dvouplášťový tlumič. Hlavní rozdíl je ten, že prostor nad kapalinou ve vyrovnávacím prostoru je vyplněn inertním plynem (nejčastěji dusíkem) a není spojen s atmosférou. Tlak plynu nad hladinou kapaliny se pohybuje v rozmezí od 0,2 MPa až do 0,8 MPa. Tlumič tedy pracuje jako nízkotlaký.

Díky plynu je ve vyrovnávacím i pracovním prostoru udržován stálý tlak a tím je zabráněno nežádoucímu pění kapaliny.



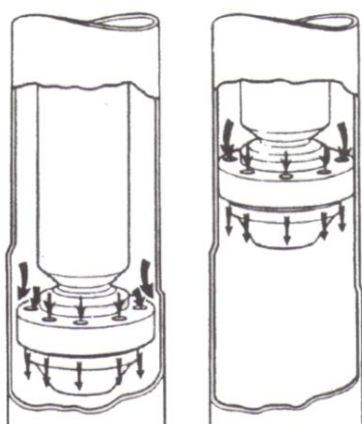
Obr. 2.6 Schéma dvouplášťového plynokapalinového tlumiče [3, str. 54]

2.2 Polohově citlivé tlumiče PSD (Position Sensitive Damping)

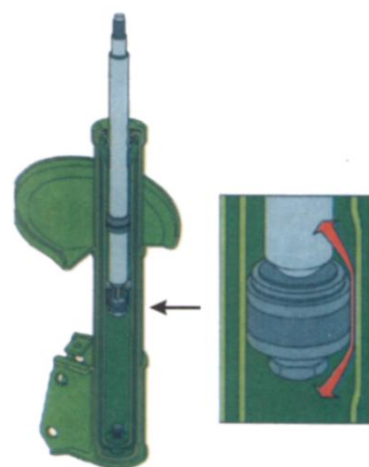
Belgická firma Monroe uvedla na trh tlumiče, jejichž tlumení je závislé na poloze pístu (označení SENSE-TRAC). Základní myšlenkou je to, že při klidné jízdě s malou zátěží je potřeba pouze malá tlumící síla. Oproti tomu při větším zatížení podvozku je nutné zvýšit odpor tlumení, aby kola neztratila přitlačnou sílu k vozovce.

Konstrukčně se jedná o upravený nízkotlaký plynokapalinový tlumič. Ve střední části pracovní tlakové trubky je tlumič rozšířen o obtokový kanál (obr. 2.7, 2.8). Když se píst pohybuje v této oblasti, je účinnost tlumiče menší, protože část kapaliny proudí obtokem a ne skrz ventily v pístu. Střední část tlumiče je potom také označovaná jako oblast komfortu.

Jakmile bude zdvih pístu větší (jízda v nerovném terénu), bude se píst pohybovat mimo obtokový kanál, všechna kapalina bude proudit skrz ventily a tlumič tak bude mít větší účinnost. Při velkém zatížení bude píst trvale přesunut mimo střední část do oblasti kontroly.

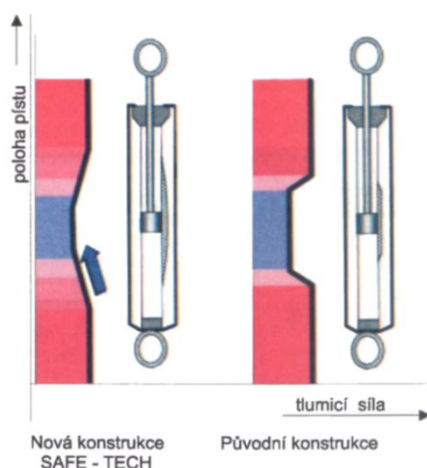


Obr. 2.7 Polohově citlivý tlumič PSD
[1, str. 203]



Obr. 2.8 Polohově citlivý tlumič PSD
[3, str. 56]

Tento tlumič se dočkal své inovace s označením SAFE-TECH (obr. 2.9). Princip fungování je stejný, ale změnilo se několik dílčích částí. Tvar obtokového kanálu u původní verze měl náhlý přechod, který je u novější verze nahrazen plynulým. To umožnilo pozvolnější přechod z oblasti komfortu do oblasti kontroly. Další změnou bylo překonstruování ventilů v pístu. Svazek kotoučků z pružinové oceli byl doplněn pružinou, což zjednodušilo provedení ventilu a snížilo jeho hmotnost. Tlumič tak rychleji reaguje na nerovnosti vozovky. Byl také změněn druh tlumičového oleje. Nový druh zaručuje, že tlumící síla při teplotě -40°C je pouze 2,1 krát větší než při teplotě 120°C (u původního to bylo 5,4 krát).

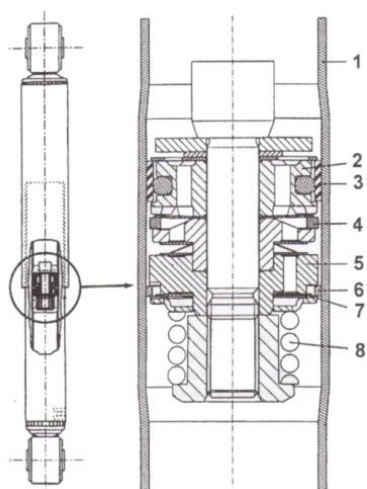


Obr. 2.9 Srovnání původní a nové konstrukce SENA-TRAC [3, str. 56]

2.3 Tlumič systému DCD (Displacement Conscious Damping)

Systém DCD (obr. 2.10) využívá kapalinový tlumič, jehož válec má dva průměry. Ve střední části je průměr válce zvětšen oproti oběma koncům. Při malém zatížení se píst pohybuje uprostřed a odpory jsou malé. Při větším zatížení se píst posune do dolní části, kde je při kratším zdvihu dosaženo větší tlumící síly.

Tento tlumič vyrábí také firma Monroe a je navržen pro velkokapacitní automobily (například Volkswagen Sharan, Ford Galaxy), kde jsou tlumiče uloženy šikmo.



Obr. 2.10 Tlumič systému DCD:

- 1 - tlakový pracovní válec;
 - 2 - píst;
 - 3 - pružný těsnící kroužek;
 - 4 - tlakový těsnící kroužek;
 - 5 - těleso zpětného ventilu;
 - 6 - pístní kroužek;
 - 7 - planžeta zpětného ventilu;
 - 8 - pružina
- [1, str. 205]

3 Regulace odpružení vozidla

Kapitola je zpracována na základě [2].

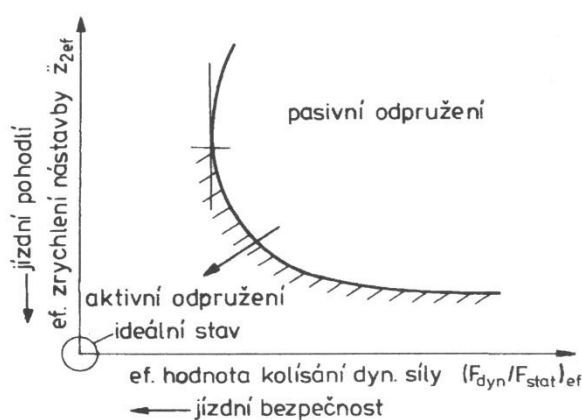
Regulací odpružení je myšlena regulace pružícího a tlumícího systému automobilu. Můžeme regulovat buď tlumič, nebo pružinu (adaptivní systémy odpružení). Druhou variantou je, že regulujeme tlumič i pružící vlastnosti podvozku (aktivní systémy odpružení).

Ocelové vinuté, listové nebo torzní pružiny s hydraulickými tlumiči (konvenční pružící soustavy) mají konstantní vlastnosti. Z tohoto důvodu je označujeme jako pasivní pružící systémy.

Pružící soustavy by měly splňovat tyto požadavky:

- jízdní pohodlí
- bezpečnost
- malý prostor pro pružící a tlumící elementy
- přizpůsobení výškové polohy

Sladění jednotlivých parametrů je náročné. Měkký podvozek je vhodný pro pohodlnou jízdu, oproti tomu pokud budící frekvence vozovky leží v rezonančním pásmu nápravy a nástavby, je lepší silnější tlumení. Na obr. 3.1 je ukázána závislost mezi jízdním pohodlím a kolísáním zatížení kola. Mezní křivka zobrazuje poměr pohodlí/bezpečnost u konvenčních pružících systémů. Pokud použijeme systémy s proměnným tlumením, docílíme toho, že se dostaneme do oblasti pod křivkou.



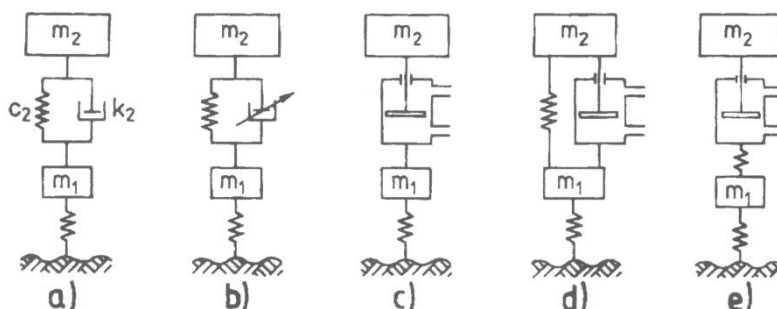
Obr. 3.1 Cílový konflikt mezi jízdní bezpečností a jízdním pohodlím při návrhu tlumení/pružení vozidla [2, str. 236]

Základní rozdělení systémů odpružení:

- konvenční: obr. 3.3a
- adaptivní (pomalé), případně semiaktivní (rychlé): obr. 3.3b
- aktivní pomalé: obr. 3.3e
- aktivní rychlé obr. 3.3c

	síly	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	

Obr. 3.2 Porovnání různých systémů odpružení [2, str. 240]



Obr. 3.3 Porovnání různých regulovaných systémů odpružení: a) konvenční (pasivní) systém; b) adaptivní systém (pomalý), semiaktivní (rychlý); c) aktivní rychlý systém (frekvenční oblast 0 až 25 Hz); d) jako systém c s přidavnou pružinou k podepření statické síly; e) aktivní pomalý systém (frekvenční oblast 0 až 5 Hz) [2, str. 241]

3.1 Adaptivní systémy

Doplňují konvenční odpružení a je možné je seřídit v několika stupních buď řidičem, nebo automaticky. Po seřízení tlumiče se tlumič chová konvenčně (nedochází k prolomení mezní křivky obr. 3.1). Pokud má tlumič dvě charakteristiky, „silné“ tlumení (horší pohodlí, ale menší kolísání zatížení kola a větší bezpečnost) a „slabé“ tlumení (opačně), je možné, aby si řidič za jízdy volil mezi oběma stupni.

3.2 Semiaktivní systémy

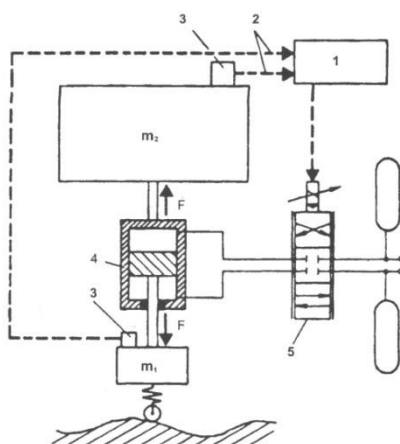
Pracovní oblast není omezena několika charakteristikami. Je téměř nekonečně mnoho charakteristik a může být regulován téměř každý bod v poli charakteristik. Důležité je, aby požadovaných bodů bylo dosaženo velmi rychle (10 ms). Proto jsou tyto systémy schopné pracovat v oblasti frekvence nastavby i nápravy. Lze říci, že semiaktivní systémy jsou adaptivní systémy, které zvládají rychle přepínat tlumení, případně pružení.

3.3 Pomalé aktivní systémy

Pokud má aktivní prvek vyvozovat síly i podle relativní dráhy, je nutné, aby fungoval ve všech čtyřech kvadrantech (síla nemusí být ve fázi s relativní rychlostí). Síla mezi nástavbou a nápravou je závislá nejen na relativní dráze a rychlosti, ale i na všech ostatních veličinách systému. Je to řešeno hydraulickým systémem (obr. 3.4). Pokud takovýto systém pokrývá frekvenční oblast jen lehce nad vlastní frekvencí nástavby, je označován jako pomalý aktivní systém. Používá se sériové zapojení s pružinou, protože nevzniká zablokování v oblasti s vysokou frekvencí.

3.4 Rychlé aktivní systémy

Jsou to systémy pokrývající oblast vlastní frekvence nápravy (10 – 15 Hz). Musí být rychlé (průtok ventily, objemové proudy), aby se daly regulovat vysokofrekvenční podíly pružící dráhy. Často bývají kvůli možné poruše systému doplněny přídatnou pružinou k podepření statického zatížení a tlumičem s malým základním tlumením.



Obr. 3.4 Schéma aktivního odpružení: 1 - řídicí jednotka; 2 - měřené signály; 3 - snímače; 4 - hydraulický válec; 5 – servoventil [2, str. 239]

3.5 Aktivní a semiaktivní systémy

Nyní je uveden přehled několika nejznámějších a v současné praxi nejvíce používaných moderních aktivních a semiaktivních tlumících systémů.

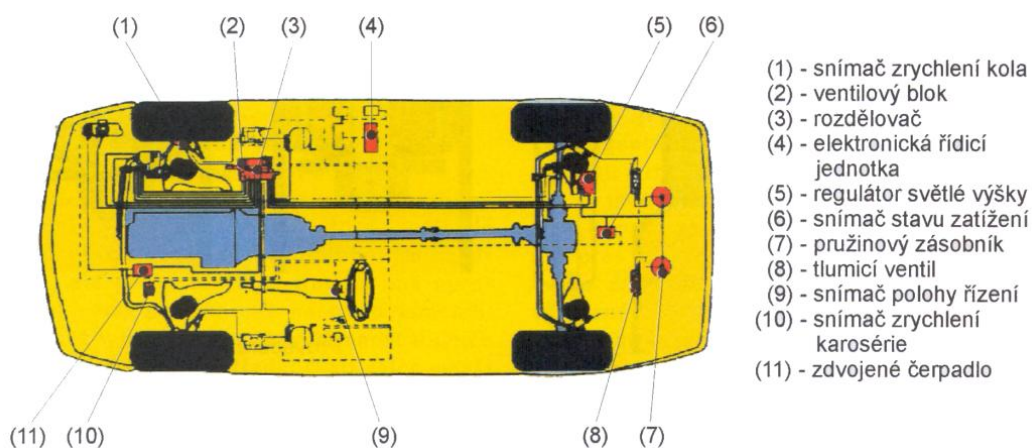
3.5.1 Elektronicky ovládané tlumiče

3.5.1.1 Elektronické řízení tlumičů EDC (Electronic Damping Control)

EDC je elektronicky řízený systém vyvinutý firmou BMW, který zajišťuje optimální nastavení tvrdosti odpružení na základě stavu vozovky, zatížení vozidla, rychlosti jízdy a dalších faktorů. Všechny faktory jsou snímány jednotlivými snímači, které posílají údaje do řídicí jednotky systému (obr. 3.5). Důležitým faktorem je nárůst bočního zrychlení, které je zjišťováno měřením úhlu natočení volantu, resp. rychlosti natáčení volantu v závislosti na rychlosti. Pokud vjedeme do zatáčky rychle nebo uděláme nějaký prudký manévry, systém automaticky přitvrdí tlumiče. Další důležitý snímač je tlakový spínač v brzděném systému. Jakmile je překročena mezní hodnota tlaku, je tlumení nastaveno do tzv. „tvrdé“ oblasti. [1]; [9]

U vozidel s mechanickými převodovkami je také snímač podélného kmitání (houpání) vozidla vybuzeného akcelerací. Opět, jakmile je překročena mezní hodnota úhlové rychlosti podélného kmitání, je tlumení přepnuto do „tvrdé“ oblasti. Pokud je vozidlo více zatížené

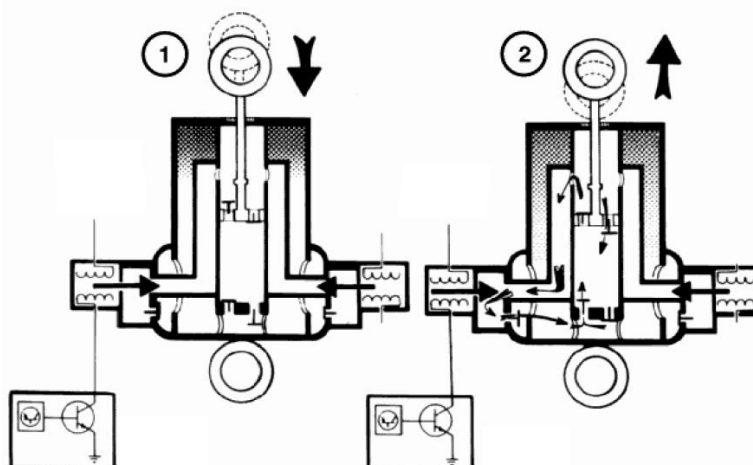
(plně obsazeno, těžký náklad apod.), je to rozpoznáno tlakovým spínačem v zařízení pro regulaci výškové polohy vozidla. Po překročení mezní hodnoty následuje přepnutí na tvrdší tlumení. [1]



Obr. 3.5 Elektronické ovládání tlumičů - umístění na vozidle [3, str. 55]

System funguje automaticky, ale řidič si může i manuálně zvolit jeden ze tří režimů – „Normal“, „Komfort“ a „Sport“. [3]

Tlumiče používané v systému EDC jsou podobné dvouplášťovým tlumičům, ale navíc mají na každém tlumiči dva elektromagnetické ventily, které zabezpečují dostatečný průtok kapaliny při měkkém a středním režimu provozu. Pokud je cívka elektromagnetu bez proudu, pružina udržuje ventily zavřené a kapalina protéká pouze pístem a základními ventily. Odpovídá to tvrdému nastavení tlumiče. Jakmile proud protéká cívkou jednoho elektromagnetu, otevře se ventil a začne jím proudit kapalina (obr. 3.6). Jednomu ventilu odpovídá střední a druhému měkká charakteristika. Ventil pro měkké nastavení umožňuje větší průtok kapaliny, a proto je větší než ventil pro střední nastavení. Nikdy nedochází k tomu, aby byly napájeny oba ventily současně. Tlumení lze nastavit odlišně pro přední a zadní nápravu, ale ne pro levou a pravou stranu. [10]



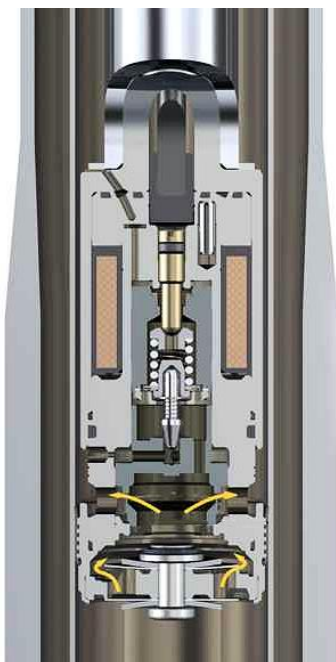
Obr. 3.6 Tlumič systému EDC: 1 - stlačování tlumiče; 2 - roztahování tlumiče [10]

3.5.1.2 Plynulé řízení tlumení CDC (Continuous Damping Control)

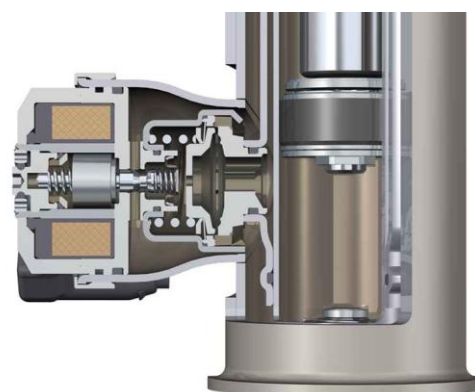
Systém CDC vyvinutý firmou ZF Sachs je podobný předchozímu systému. Je přímo propojen s protiblokovacím systémem ABS a se stabilizačním systémem ESP. Snímače monitorují jízdní podmínky, zatížení vozidla, styl řízení a pohyby vozidla. Na základě těchto údajů řídicí jednotka systému plynule přizpůsobuje tlumení každého tlumiče.

Konstrukce tlumiče vychází z konstrukce dvouplášťového teleskopického tlumiče. Rozdíl je v konstrukci vnitřního pláště, na kterém je umístěn plynule regulovatelný přepouštěcí (proporcionální) ventil (obr. 3.7, 3.8). Je to elektromagnetický ventil, jehož pohyb omezuje malý píst, který je ovládán elektromagneticky. Pohyb ventilu otevírá nebo uzavírá průtokové kanálky a tím reguluje průtok kapaliny. Prochází-li cívkou v proporcionálním ventilu proud, otevírá se. Čím větší je proud, tím více se otevře.

Během jízdy je díky elektronicky nastavitelným ventilům možné měnit charakteristiku tlumení. Změna probíhá velmi rychle a řídicí jednotka kontroluje každé 2 ms, jestli není nutné tlumení upravit. Úprava charakteristiky je nastavena změnou proudu (0 – 1,8 A). Při výpadku proudu přestává být ventil aktivní a přitlačná pružina ho posune do tvrdé polohy. [4]; [11]; [12]

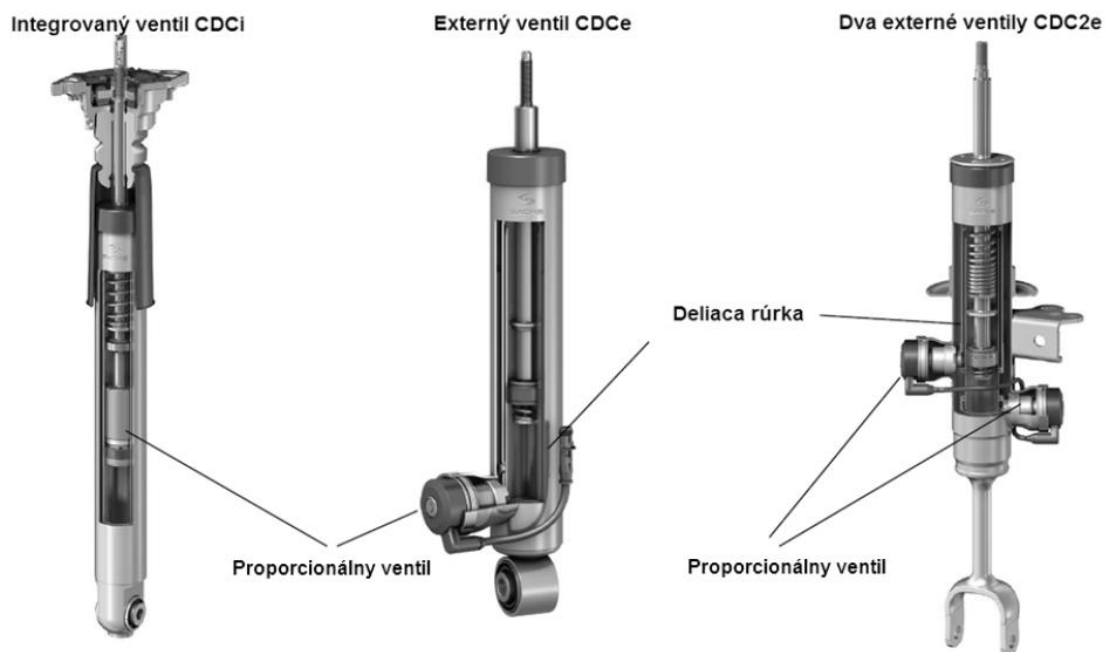


Obr. 3.7 Řez tlumičem CDCi [11]



Obr. 3.8 Řez tlumičem CDCe [11]

Původní konstrukční řešení systému CDC (označováno CDCi – Continuous Damping Control internal, protože proporcionální ventil je umístěn uvnitř tlumiče) bylo stejnou firmou vylepšeno. Nejdříve vznikl model CDCe (Continuous Damping Control external), který má proporcionální ventil umístěn mimo těleso tlumiče. Později pak vznikla úprava CDC2e, kde jsou mimo těleso tlumiče umístěny dva proporcionální ventily (obr. 3.9). Do sériové výroby se však dostal pouze typ CDCe. [5]



Obr. 3.9 Konštrukčné riešenie tlumičov CDC [5]

3.5.1.3 Aktivní podvozkový systém Dynamic Drive BMW

Aktivní systém Dynamic Drive minimalizuje boční náklon tím, že ho rozkládá mezi obě nápravy. K tomu využívá aktivní stabilizátory s integrovanými hydraulickými prvky na přední a zadní nápravě k vyrovnání kolébání karoserie (obr. 3.10). Pracuje společně se snímačem rychlosti, snímači polohy, systémem řízení a dalšími systémy.

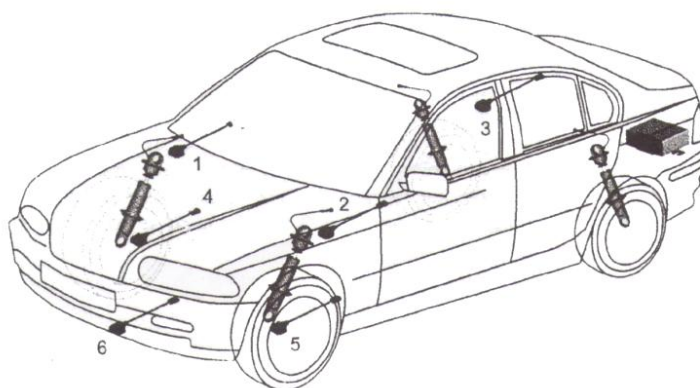
Stabilizátory se neustále přizpůsobují jízdě situaci a změnám při řízení. Například při jízdě po rovné cestě snižuje tlak na stabilizátory. S každým zachází individuálně, a tak umožňuje velmi pohodlnou jízdu. Hlavní přínos je pro zadní sedadla. Při průjezdu zatáčkou nebo při náhlých změnách směru bude nastaven sportovnější režim a zvýší se tuhost odpružení, aby se zvětšila intenzita bočních sil a zabránilo se převrácení vozu. Rozložení sil mezi přední a zadní nápravu také pomáhá v obtížných situacích. [1]; [13]



Obr. 3.10 BMW Dynamic Drive [13]

3.5.1.4 Skyhook

Tento systém odpružení je teoreticky optimální. Základním předpokladem je udržení karoserie vozidla v konstantní úrovni nezávisle na nerovnostech vozovky, po které auto jede. Lze říci, že auto je jakoby zavěšeno na koleji na nebi (označení Skyhook v překladu „nebeský hák“). Skyhook řeší pouze jízdní pohodlí (tlumení karoserie), ale pro praktické využití je nutné tlumit kmitání neodpružených hmot. V praxi jsou tlumící síly výsledkem kombinace skyhooku a korekčních zásahů pro různé jízdní situace. Schéma systému je uvedeno na obr. 2.21. [1]



Obr. 3.11 Nejdůležitější komponenty Skyhook regulace: 1 - zrychlení nastavby vpředu vpravo, 2 - zrychlení nastavby vpředu vlevo, 3 - zrychlení nastavby vzadu, 4 - zrychlení pravého předního kola, 5 - zrychlení levého předního kola, 6 - příčné zrychlení [1, str. 221]

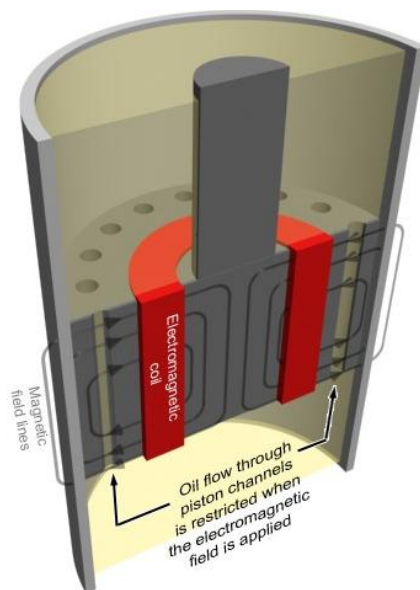
3.5.2 Elektromagnetické systémy tlumení

3.5.2.1 Audi Magnetic Ride

Firma Audi představila nový, spojitě adaptivní, systém tlumení. Byl navržen tak, aby byl schopný řešit konflikt mezi ovladatelností a jízdním pohodlím. Je to v podstatě uzavřený systém, který reaguje během několika milisekund na jakýkoliv pohyb karoserie.

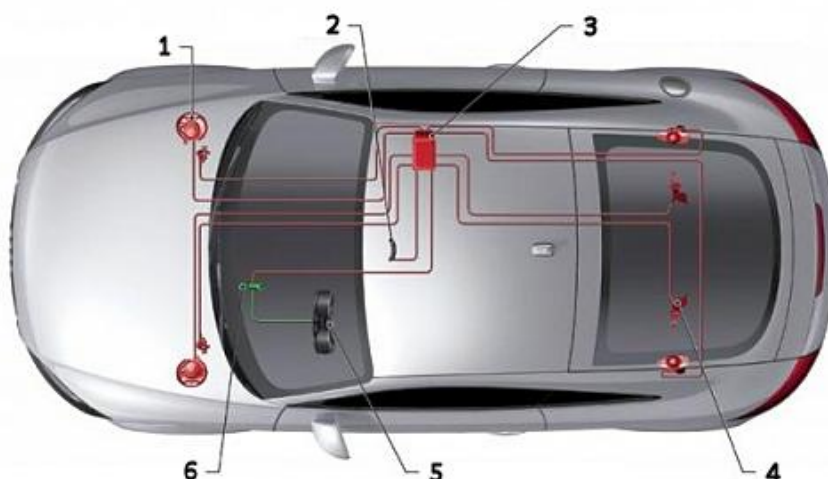
Pomocí magnetického pole systém přizpůsobuje tvrdost tlumičů aktuální jízdní situaci. Řidič si může sám volit základní nastavení pro pohodlnější nebo sportovnější jízdu (režim „Normal“ a „Sport“).

Tlumič neobsahuje klasický tlumičový olej, ale speciální magneticko-reologickou kapalinu, která obsahuje magnetické částice o velikosti několika mikrometrů. Po aktivaci magnetického pole se částice uspořádají ve směru napříč průtokem kapaliny (obr. 3.12). Tím se změní viskozita kapaliny a bude hůře protékat průtokovými ventily. Výsledkem toho je zvýšení tlumící síly tlumičů v závislosti na síle magnetického pole.



Obr. 3.12 Řez magneto-reologickým tlumičem [16]

Řídící jednotka vyhodnocuje signály z několika čidel (obr. 3.13) a poté počítá optimální tlumící sílu pro různé jízdní situace. [14]; [15]; [16]



Obr. 3.13 Schéma systému Magnetic Ride ve voze Audi TT: 1 - magneto-reologický tlumič; 2 - přepínač režimů; 3 - řídicí jednotka; 4 - čidlo pohybu; 5 - ukazatel zvoleného režimu; 6 - připojení na ECU/sběrnice CAN Bus [14]

3.5.2.2 MRC-Bose (Magnetic Ride Control-Bose)

S revoluční inovací v systémech tlumení přišla firma Bose. Místo hydraulických tlumičů byly použity lineární elektromagnetické motory (dále jen „LEM“) a výkonné zesilovače (obr. 3.14). Nevýhodou hydraulických tlumičů je rychlost tlumení. Aktivním tlumičům s obtokovým kanálem trvá změna nastavení kolem 10 ms, tlumiče s magneto-reologickou kapalinou provedou změnu v čase 5 až 10 ms, ale až LEM je schopný provést změnu už během 1 ms.

Tento systém se díky velmi rychlým reakcím blíží ideálnímu tlumiči. Kromě samotného tlumení jsou vyrovnávány i boční náklony, čímž je opět zlepšena bezpečnost.

Základem tlumiče je LEM a každý tlumič je samostatně obsluhován řídicí jednotkou, která v reálném čase upravuje charakter tlumení podle jízdních podmínek.

Obrovskou výhodou systému je nízká spotřeba energie. LEM Bose pracuje na principu rekuperace energie. Při propružení kola je generována elektrická energie, která je ukládána do velmi výkonných kondenzátorů. Tato energie je pak využita pro vytvoření tlumícího účinku. Systém pracuje s napětím 300 V, ale zbytek palubní sítě je stále pod napětím 12 V.

Nevýhodou je však složitost elektronického systému a vysoká hmotnost LEM. Naopak výhodou je, že se Bose podařilo tento systém zpracovat tak, že jsou v podstatě potřeba pouze dva šrouby pro jeho připojení k vozu. Tento kompaktní design není o moc větší než běžné tlumiče. [1]; [16]; [17]; [18]



Obr. 3.14 Náprava systému Bose suspension [17]

4 Matematický model pasivního tlumiče

Pro potřeby tvorby simulačního schématu je nejprve nutné sestavit matematický model soustavy. Pro tvorbu modelu byl podle zadání práce uvažován pasivní tlumič ve dvou variantách (obr. 4.1 a 4.2). Základní popis modelu vychází z [6].

Matematický model byl odvozen na základě metody Lagrangeových rovnic druhého druhu. Její výhodou je, že při sestavování rovnic není nutné volit žádný souřadný systém. Další výhodou je, že jedinými veličinami, které je pro sestavení rovnice nutné odvodit, jsou energie, což jsou skalární veličiny. V obecném tvaru lze rovnici napsat takto:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_k}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial E_k}{\partial q} + \frac{\partial E_D}{\partial \dot{q}} + \frac{\partial E_p}{\partial q} = \frac{\partial A}{\partial q} = \frac{\partial W}{\partial \dot{q}} \quad (4-1)$$

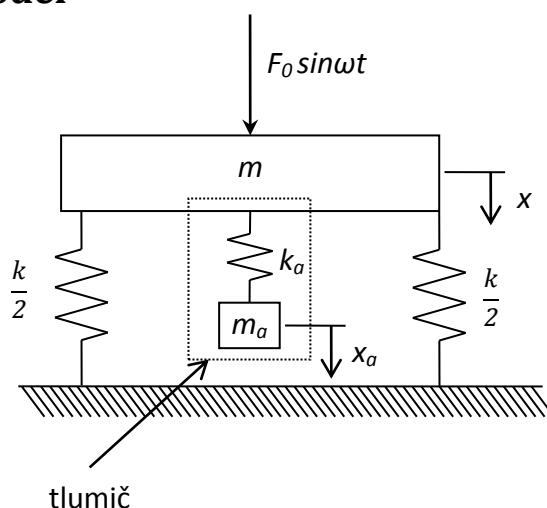
kde:

- q je zobecněná souřadnice kmitání, případně \dot{q} zobecněná rychlost kmitání (nejčastěji dráha x [m] nebo úhel φ [rad])
- E_k, E_D, E_p jsou jednotlivé energie systému [J] – kinetická, disipativní, potenciální
- A, W jsou práce [J] a výkon [W] vnějších sil

Při konkrétním sestavování rovnice se volí pravá strana buď na základě práce A , nebo na základě výkonu W . Volba je libovolná.

Pro sestavení rovnic byla použita jako zobecněná souřadnice dráha x a x_a a práce A . U tlumeného i netlumeného kmitání je uveden schématický náčrt (obr. 4.1 a 4.2), definice jednotlivých energií a práce, jejich derivace a poté odvození rovnic pro matematický model.

4.1 Netlumený model



Obr. 4.1 Systém bez viskózního tlumiče [6, str. 476]

Energie soustavy jsou vyjádřeny jako

$$E_k = \frac{1}{2} m \dot{x}^2 + \frac{1}{2} m_a \dot{x}_a^2, \quad (4-2)$$

$$E_D = \emptyset, \quad (4-3)$$

$$E_p = \frac{1}{2} \frac{k}{2} x^2 + \frac{1}{2} \frac{k}{2} x^2 + \frac{1}{2} k_a (x - x_a)^2 = \frac{1}{2} k x^2 + \frac{1}{2} k_a (x^2 - 2x x_a + x_a^2) \quad (4-4)$$

a práce vnějších sil jako

$$A = F(t)x = F_0 \sin(\omega t)x. \quad (4-5)$$

Dosažením do rovnice (4-1) pro jednotlivé derivace

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_k}{\partial \dot{x}} \right) &= m \ddot{x}, \\ \frac{\partial E_k}{\partial x} &= \emptyset, \\ \frac{\partial E_D}{\partial x} &= \emptyset, \\ \frac{\partial E_p}{\partial x} &= kx + k_a x - k_a x_a, \\ \frac{\partial A}{\partial x} &= F_0 \sin(\omega t) \end{aligned}$$

obdržíme rovnici

$$m \ddot{x} + kx + k_a x - k_a x_a = F_0 \sin(\omega t). \quad (4-6)$$

Analogicky je postupováno pro výchylku x_a , kdy je rovnice (4-1) ve tvaru

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_k}{\partial \dot{x}_a} \right) - \frac{\partial E_k}{\partial x_a} + \frac{\partial E_D}{\partial \dot{x}_a} + \frac{\partial E_p}{\partial x_a} = \frac{\partial A}{\partial x_a}$$

a jednotlivé derivace jsou potom vyjádřeny jako

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_k}{\partial \dot{x}_a} \right) &= m_a \ddot{x}_a, \\ \frac{\partial E_k}{\partial x_a} &= \emptyset, \\ \frac{\partial E_D}{\partial x_a} &= \emptyset, \\ \frac{\partial E_p}{\partial x_a} &= -k_a x + k_a x_a, \\ \frac{\partial A}{\partial x_a} &= \emptyset. \end{aligned}$$

Výsledná rovnice je potom ve tvaru

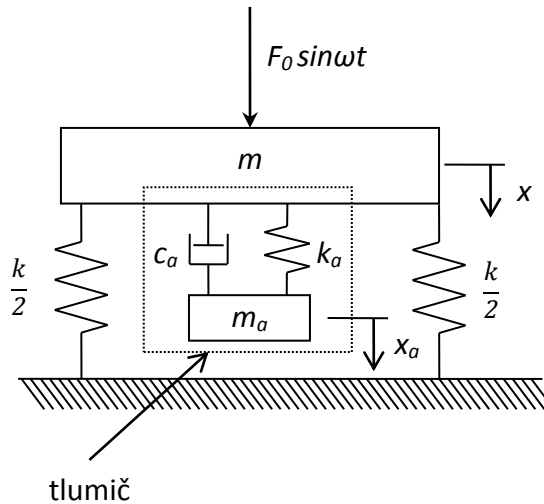
$$m_a \ddot{x}_a - k_a x + k_a x_a = \emptyset. \quad (4-7)$$

Pro snazší sestavení matematického modelu byly rovnice (4-6) a (4-7) upraveny do tvaru

$$m\ddot{x} = F_0 \sin(\omega t) - kx - k_a x + k_a x_a, \quad (4-8)$$

$$m_a \ddot{x}_a = k_a x - k_a x_a. \quad (4-9)$$

4.2 Tlumený model



Obr. 4.2 Systém s viskózním tlumičem [6, str. 481]

Energie soustavy jsou vyjádřeny jako

$$E_k = \frac{1}{2} m \dot{x}^2 + \frac{1}{2} m_a \dot{x}_a^2, \quad (4-10)$$

$$E_D = \frac{1}{2} c_a (\dot{x} - \dot{x}_a)^2 = \frac{1}{2} c_a (\dot{x}^2 - 2\dot{x}\dot{x}_a + \dot{x}_a^2), \quad (4-11)$$

$$E_p = \frac{1}{2} \frac{k}{2} x^2 + \frac{1}{2} \frac{k}{2} x^2 + \frac{1}{2} k_a (x - x_a)^2 = \frac{1}{2} k x^2 + \frac{1}{2} k_a (x^2 - 2x x_a + x_a^2) \quad (4-12)$$

a práce vnějších sil jako

$$A = F(t)x = F_0 \sin(\omega t) x. \quad (4-13)$$

Dosazením do rovnice (4-1) pro jednotlivé derivace

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_k}{\partial \dot{x}} \right) = m \ddot{x},$$

$$\frac{\partial E_k}{\partial x} = 0,$$

$$\frac{\partial E_D}{\partial \dot{x}} = c_a \dot{x} - c_a \dot{x}_a,$$

$$\frac{\partial E_p}{\partial x} = kx + k_a x - k_a x_a,$$

$$\frac{\partial A}{\partial x} = F_0 \sin(\omega t)$$

obdržíme rovnici

$$m\ddot{x} + c_a\dot{x} - c_a\dot{x}_a + kx + k_ax - k_ax_a = F_0 \sin(\omega t). \quad (4-14)$$

Analogicky je postupováno pro výchylku x_a , kdy je rovnice (4-1) ve tvaru

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_k}{\partial \dot{x}_a} \right) - \frac{\partial E_k}{\partial x_a} + \frac{\partial E_D}{\partial \dot{x}_a} + \frac{\partial E_p}{\partial x_a} = \frac{\partial A}{\partial x_a}$$

a jednotlivé derivace jsou potom vyjádřeny jako

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_k}{\partial \dot{x}_a} \right) &= m_a \ddot{x}_a, \\ \frac{\partial E_k}{\partial x_a} &= \emptyset, \\ \frac{\partial E_D}{\partial \dot{x}_a} &= -c_a \dot{x} + c_a \dot{x}_a, \\ \frac{\partial E_p}{\partial x_a} &= -k_a x + k_a x_a, \\ \frac{\partial A}{\partial x_a} &= \emptyset. \end{aligned}$$

Výsledná rovnice je potom ve tvaru

$$m_a \ddot{x}_a - c_a \dot{x} + c_a \dot{x}_a - k_a x + k_a x_a = \emptyset. \quad (4-15)$$

Pro snazší sestavení matematického modelu byly rovnice (4-14) a (4-15) opět upraveny do tvaru

$$m\ddot{x} = F_0 \sin(\omega t) - c_a \dot{x} + c_a \dot{x}_a - kx - k_ax + k_ax_a, \quad (4-16)$$

$$m_a \ddot{x}_a = c_a \dot{x} - c_a \dot{x}_a + k_ax - k_ax_a. \quad (4-17)$$

5 Optimalizace parametrů tlumičů

Pro optimalizaci parametrů jednotlivých tlumících systémů, jak bez viskózního tlumiče, tak s ním, byl použit blok ze simulinkové knihovny Simulink Design Optimization, který se nazývá „Signal Constraint“. Pomocí něj je možné ladit výstupní signál modelu. Tento blok se připojuje na signál v blokovém schématu, vzhledem ke kterému je prováděna optimalizace (v tomto případě jsou optimalizovány parametry tlumiče vzhledem k výchylce primární hmoty x).

V grafickém rozhraní optimalizačního bloku jsou zvoleny meze, ve kterých se má pohybovat výstupní signál (výchylka). Dále jsou nastaveny optimalizované parametry. V tomto případě budou optimalizovány následující parametry: hmotnost tlumící hmoty m_a , tuhost pružiny mezi hlavní a tlumící hmotou k_a a u modelu s viskózním tlumičem i koeficient tlumení tlumiče c_a .

5.1 Metody optimalizace

K optimalizaci volených parametrů používá blok „Signal Constraint“ tři optimalizační algoritmy, které pracují hlavně na základě numerických metod. Jsou to gradient descent, pattern search a simplex search.

5.1.1 Gradient descent

Gradient descent (neboli metoda největšího spádu) je základní optimalizační algoritmus. Pomocí jednotlivých iterací úměrných zápornému gradientu funkce k aktuálnímu bodu funkce je nalezeno lokální minimum. Pokud jsou iterační kroky úměrné kladnému gradientu, je nalezeno její lokální maximum.

Metoda je založena na poznatku, že pokud funkce $F(x)$ s reálnými hodnotami je definovaná a diferencovatelná v okolí bodu a , pak $F(x)$ klesá nejrychleji od bodu a ve směru záporného gradientu F na a , $-\nabla F(a)$. Z toho plyne, že pokud $b = a - \gamma \nabla F(a)$ pro dostatečně malé číslo $\gamma > 0$, pak $F(a) > F(b)$. Při platnosti tohoto předpokladu je hodnota x_0 brána jako lokální minimum funkce F a dále je považována posloupnost x_0, x_1, x_2, \dots za takovou, že $x_{n+1} = x_n - \gamma_n \nabla F(x_n)$, $n \geq 0$. Poté i platí: $F(x_0) \geq F(x_1) \geq F(x_2) \geq \dots$, pak posloupnost x_n konverguje na požadované lokální minimum. Hodnotu kroku γ je možné měnit při každé iteraci. [19]

5.1.2 Pattern search

Pattern search (neboli metoda vyhledávání vzorců) je numerická optimalizační metoda, která nevyžaduje gradient. Proto může být použita na funkce, které nejsou spojitě nebo diferencovatelné.

Pattern search konverguje na základě teorie pozitivních základů. Na základě této teorie byla prokázána konvergence na specifických třídách funkcí. Mimo tyto třídy může tato metoda poskytnout přibližné řešení, ale také může selhat. Mimo tyto třídy není tato metoda iterační a nemusí konvergovat k řešení. Také se může stát, že metoda bude konvergovat k nestacionárním bodům. [20]

5.1.3 Simplex search

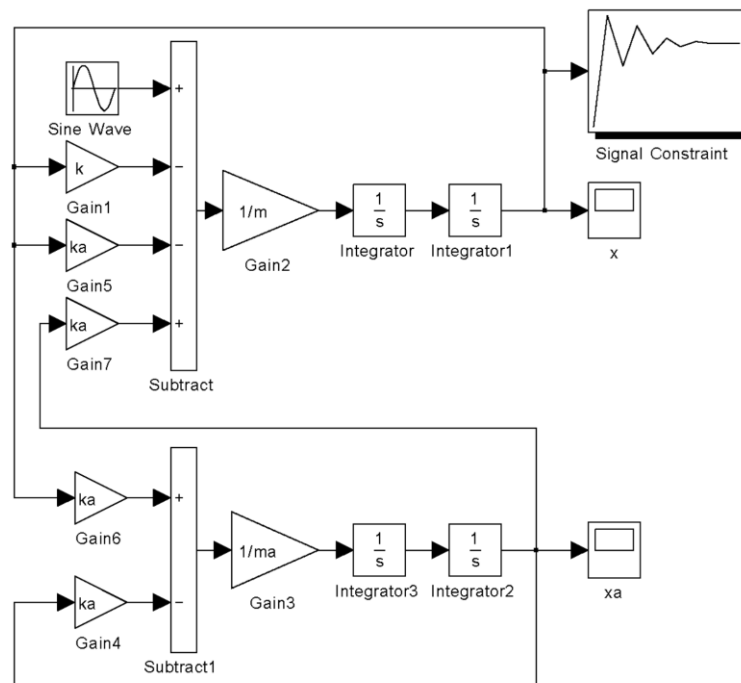
Pro jednoduché problémy, které obsahují nespojitosti, se často používá tato metoda, která je někdy rychlejší než metoda gradient descent. Podstatou metody je popsání systému soustavou lineárních rovnic a nerovnic. [8]

Simplex je geometrickou interpretací rozměru daného prostoru, ve kterém se nachází daný problém. Počet vrcholů obrazce je vždy o jeden větší, než je rozměr prostoru, tzn. než je počet nezávisle proměnných. Optimalizace probíhá tak, že se postupně ruší vrcholy simplexu, ve kterých je hodnota funkce „nejhorší“. Zrušený vrchol je nahrazen „lepší“, který je umístěn zrcadlově k „nejhoršímu“. Postupně se tak simplex posouvá k extrému optimalizované funkce. Jakmile se simplex pohybuje okolo „nejlepšího“ vrcholu, je optimalizace ukončena.

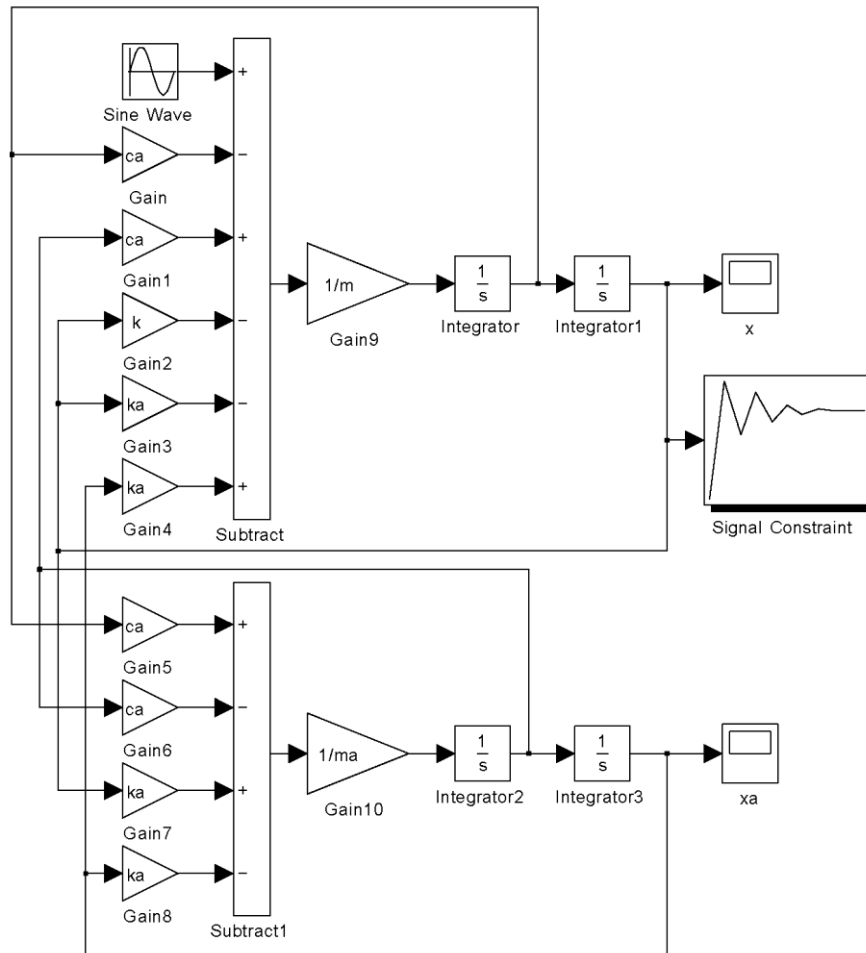
Postupem času byla tato metoda inovována. Při nalezení úspěšného zobrazení je v tomto směru simplex prodloužen. Naopak při neúspěšném zobrazení je simplex zkrácen. Do nového simplexu je poté zařazen ze zbývajících vrcholů vždy ten „lepší“. Tímto se ze simplexu stává takzvaný pružný polyedr. Takto se simplex postupně přibližuje tvaru funkce. Ve směru k optimu funkce se simplex prodlužuje a ve směru kolmém se zkracuje. Optimalizace je ukončena, když je splněna jedna ze tří podmínek: minimální velikost (rozměr) simplexu, minimální rozptyl hodnot funkce ve vrcholech simplexu nebo maximální počet iteračních kroků. [21]

5.2 Optimalizace modelů

Nyní je uveden návrh optimalizace pro netlumený a tlumený systém. Jejich simulinkové modely jsou uvedeny na obr. 5.1 a 5.2. Pro softwarové řešení byla využita metoda gradient descent, protože model neobsahuje nespojitosti a protože metoda pattern search by nemusela poskytnout relevantní výsledky.



Obr. 5.1 Model systému bez viskózního tlumiče v prostředí MATLAB/Simulink



Obr. 5.2 Model systému s viskózním tlumičem v prostředí MATLAB/Simulink

5.2.1 Model 1: Netlumené kmitání

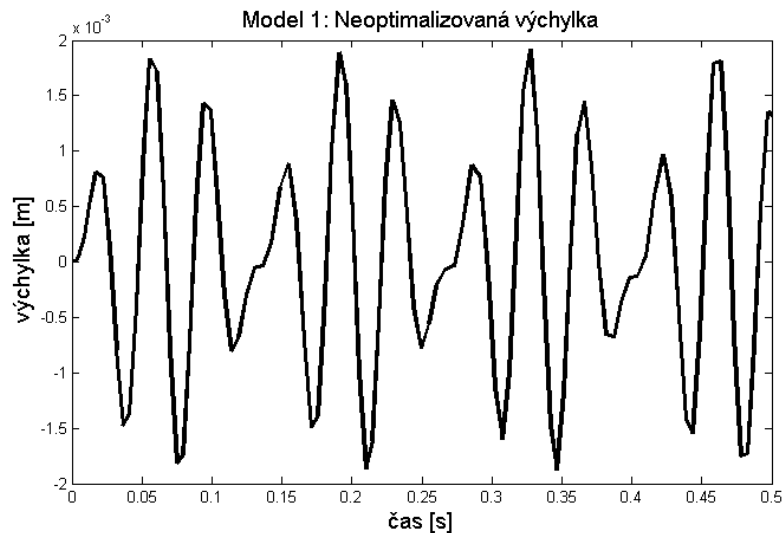
zadané hodnoty jsou (zadání převzato z [7]):

$m = 173 \text{ kg}$; $m_a = 14,6 \text{ kg}$; $k = 6 \cdot 10^6 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$; $k_a = 4,5 \cdot 10^4 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$; $F_0 = 3000 \text{ N}$;
 $\omega = 140 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$

Pro spuštění modelu je nutný script v init.m souboru:

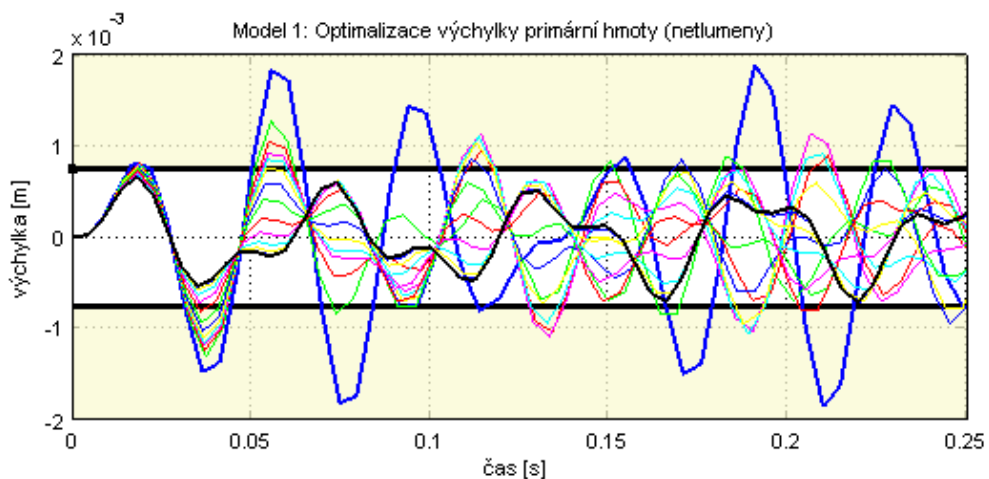
```
clear all;
clc;
```

```
m=173; %hmotnost primární hmoty [kg]
ma=14.6; %hmotnost tlumící hmoty [kg]
k=6e6; %tuhost hlavní pružiny [N/m]
ka=4.5e4; %tuhost tlumící pružiny [N/m]
F0=3000; %amplituda síly [N]
w=140; %frekvence [rad/s]
t=20;
```



Obr. 5.3 Výchylka x netlumeného systému

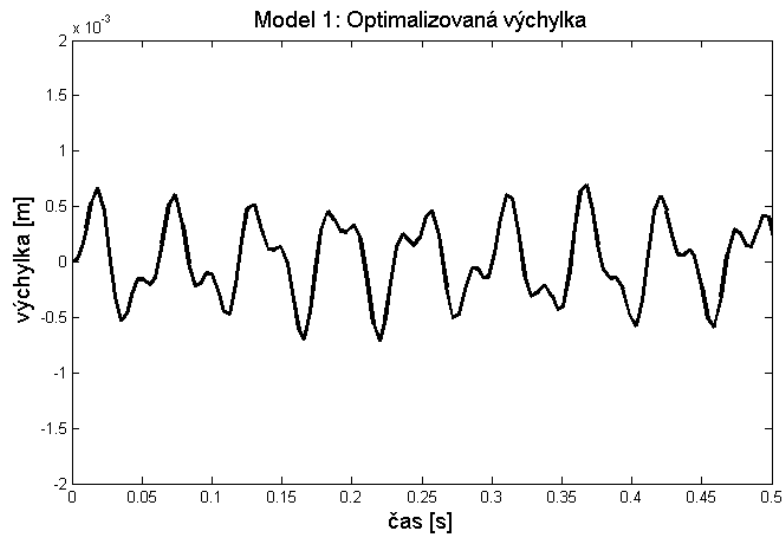
Výchylka tohoto systému před optimalizací je $1,96 \cdot 10^{-3}$ m (obr. 5.3). Pro dané pracovní zatížení se podařilo tuto výchylku maximálně snížit optimalizací parametrů tlumiče (k_a a m_a) na $7,5 \cdot 10^{-4}$ m (obr. 5.4).



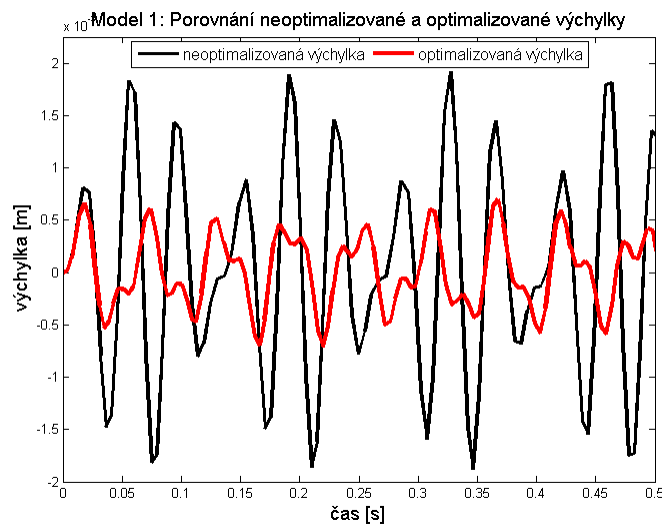
Obr. 5.4 Průběh optimalizace modelu 1 metodou gradient descent

Tato hodnota byla dosažena po patnácti iteracích (obr. 5.5, 5.6).

Nové parametry tlumiče jsou potom $k_a = 2,4654 \cdot 10^6$ N·m⁻¹; $m_a = 134,3854$ kg. Jedná se o výrazný nárůst hodnot parametrů. Pro praktické aplikace by bylo nutné zhodnotit realizovatelnost výsledku.



Obr. 5.5 Optimalizovaná výchylka x netlumeného systému



Obr. 5.6 Porovnání neoptimalizované a optimalizované výchylky modelu 1

5.2.2 Model 2: Tlumené kmitání

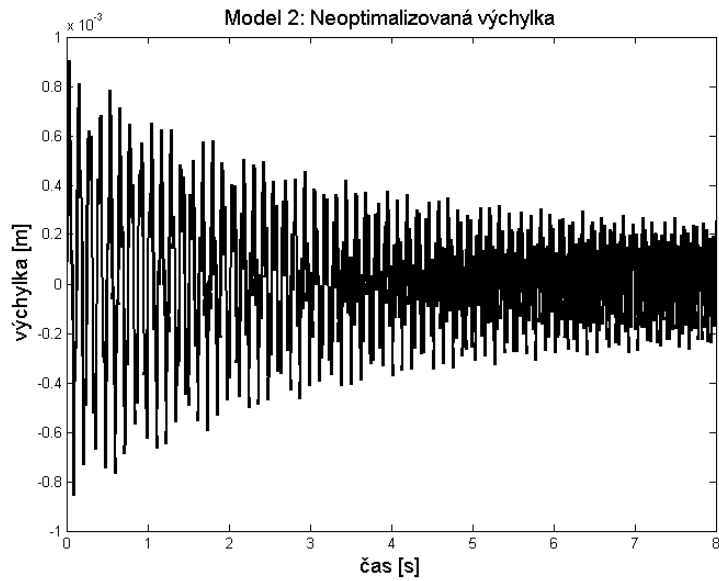
zadané hodnoty jsou (zadání převzato z [7]):

$m = 1550$ kg; $m_a = 50$ kg; $c_a = 3500$ N·s·m⁻¹; $k = 4 \cdot 10^6$ N·m⁻¹; $k_a = 2,5 \cdot 10^5$ N·m⁻¹;
 $F_0 = 8000$ N; $\omega = 160$ rad·s⁻¹

Script v init.m souboru:

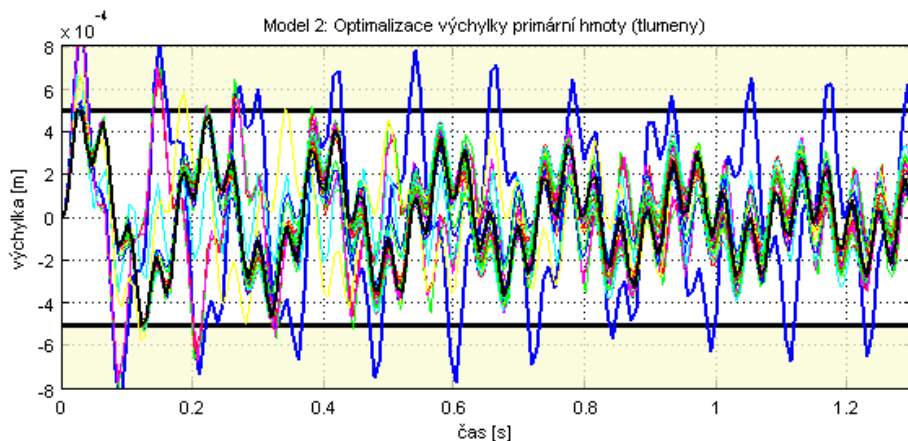
```
clear all;
clc;
```

```
m=1550; %hmotnost primární hmoty [kg]
ma=50; %hmotnost tlumící hmoty [kg]
ca=3500; %tlumení [N*s/m]
k=4e6; %tuhost hlavní pružiny [N/m]
ka=2.5e5; %tuhost tlumící pružiny [N/m]
F0=8000; %amplituda síly [N]
w=160; %frekvence [rad/s]
t=20;
```



Obr. 5.7 Výchylka x tlumeného systému

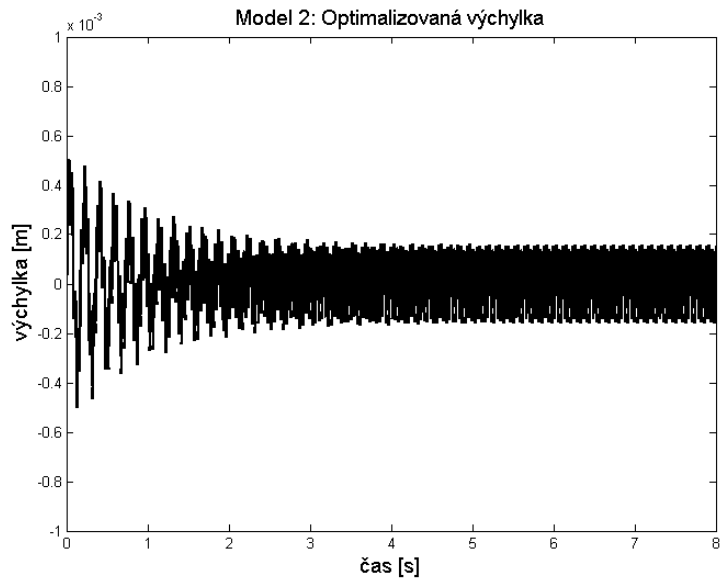
Výchylka tohoto systému před optimalizací je $9,02 \cdot 10^{-4}$ m (obr. 5.7). Pro dané pracovní zatížení se podařilo tuto výchylku maximálně snížit optimalizací parametrů tlumiče (k_a , c_a a m_a) na $5 \cdot 10^{-4}$ m (obr. 5.8).



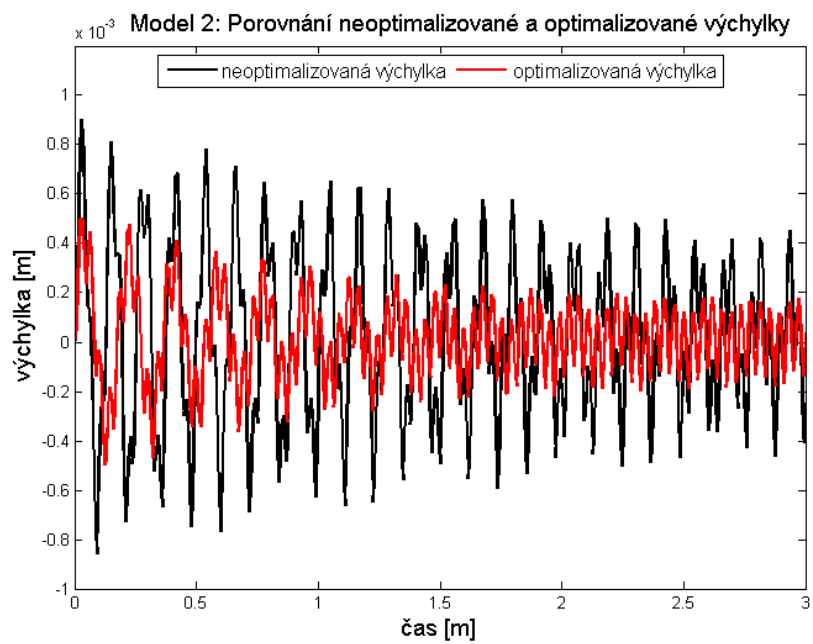
Obr. 5.8 Průběh optimalizace modelu 2 metodou gradient descent

Tato hodnota byla dosažena po třiceti čtyřech iteracích (obr. 5.9, 5.10).

Nové parametry tlumiče jsou potom $k_a = 8,4202 \cdot 10^6 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$; $c_a = 1,4644 \cdot 10^5 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$, $m_a = 1540,000 \text{ kg}$. Dochází k dramatickému nárůstu zejména hmotnosti, přičemž snížení výchylky není nijak zásadní. V tomto případě by bylo vhodné ponechat původní parametry systému, popř. optimalizovat pouze k_a a c_a .



Obr. 5.9 Optimalizovaná výchylka x tlumeného systému



Obr. 5.10 Porovnání neoptimalizované a optimalizované výchylky modelu 2

6 Závěr

V přehledu tlumících systémů se vycházelo ze základních konstrukčních návrhů jednoduchých teleskopických tlumičů. Jak se tyto tlumiče a tlumící systémy postupem času vyvíjely, tak jsou postupně zařazovány do práce a uváděny jejich výhody a nevýhody.

S dalším rozvojem techniky už nestačily pouze pasivní systémy a byly vynalezeny adaptivní, semiaktivní a aktivní systémy, které se lépe vyrovnávají s nerovnostmi povrchu. V práci jsou uvedeny stručně obecné charakteristiky jednotlivých systémů. Nakonec jsou uvedeny konkrétní moderní systémy, pro které jsou jako základní zdroje informací využity poznatky nejúspěšnějších výrobců tlumících systémů na českém i světovém trhu.

Byly vypracovány dva zjednodušené matematické modely pasivního tlumiče a podle nich byly sestaveny simulační modely v Matlab/Simulink.

Nad rámec zadání bakalářské práce byla popsána funkce Simulink bloku „Signal Constraint“ pro optimalizaci parametrů modelu. Funkce bloku byla prezentována na modelech tlumiče, kde byly pro daný pracovní cyklus optimalizovány parametry modelů tlumiče vzhledem k výchylce primární hmoty. Především u modelu s tlumeným kmitáním došlo pouze k nepatrnému snížení výchylky primární hmoty, přičemž nárůst hodnot optimalizovaných parametrů byl výrazný. Tyto úpravy by potom nebyly vhodné pro praktické použití. Lepších výsledků bylo dosaženo u netlumeného modelu, kde byla výchylka primární hmoty snížena o řád oproti zadání. V tomto případě by bylo nutné opět zhodnotit realizovatelnost výsledku pro danou aplikaci.

Výstupem práce je přehled současných přístupů ke konstrukci tlumičů a systémů tlumení v automobilovém průmyslu. Pomocí Lagrangeových rovnic druhého druhu byly sestaveny dva matematické modely v Matlab/Simulink. U každého z těchto modelů je potom nad rámec zadání práce provedena optimalizace jeho parametrů vzhledem k minimalizaci výchylky odpružené hmoty, čímž je demonstrována funkce optimalizačního bloku „Signal Constraint“. Vytvořené simulační modely je možné použít v rámci počítačových cvičení předmětu Dynamika.

7 Seznam použitých zdrojů a programového vybavení

7.1 Literatura

- [1] VLK, František. *Podvozky motorových vozidel*. 3. přepracované, rozšířené a aktualizované vydání. Brno: Prof. Ing. František Vlk, DrSc., nakladatelství a vydavatelství, 2006. 464 s. ISBN 80-239-6464-X.
- [2] VLK, František. *Dynamika motorových vozidel*. 1. vydání. Brno: Prof. Ing. František Vlk, DrSc., nakladatelství a vydavatelství, 2000. 434 s. ISBN 80-238-5273-6.
- [3] JAN, Zdeněk; ŽDÁNSKÝ, Bronislav; ČUPERA, Jiří. *Automobily. 1, Podvozky*. 2. vydání. Brno: Avid, 2009. 245 s. ISBN 978-80-87143-11-7.
- [4] PRAŽÁK, František. *Tlumič odpružení jako prvek ovlivňující jízdní vlastnosti automobilu*. Brno, 2005. 22 s. Pojednání ke státní doktorské zkoušce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování.
- [5] ZUŠČIK, Marian. *Navrh semiaktivneho odpruženia vozidla*. Bratislava, 2010. 133 s. Dizertační práce. Slovenská technická univerzita v Bratislavě, Strojní fakulta, Ústav aplikované mechaniky a mechatroniky.
- [6] YANG, Bingen. *Stress, Strain, and Structural Dynamics*. [s.l.]: Elsevier, 2005. 942 s. ISBN 0-12-787767-3.
- [7] BEARDS, C. F. *Structural Vibration: Analysis and Damping*. [s.l.]: Elsevier, 1996. 276 s. ISBN 0-340-64580-6.
- [8] CERMAN, Otto. *Řízení tlumení vibrací mechanických soustav*. Praha, 2007. 40 s. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra řídicí techniky.

7.2 Internet

- [9] *BMW World* [online]. c2007 [cit. 2011-03-28]. Technology. Dostupné z WWW: <<http://www.usautoparts.net/bmw/technology/edc.htm>>.
- [10] *Electronic Damping Control (EDC III)* [PDF dokument]. Woodcliff Lake, NJ: Service Engineering, 1990 [cit. 2011-03-28]. Dostupné z WWW: <<http://www.bmwrocketscience.com/upload/EDCIII-repair-manual.pdf>>.
- [11] LÁNÍK, Ondřej. CDC: aktivní tlumiče letos našly cestu do běžných aut!. *Auto.cz* [online]. 19.8.2004, [cit. 2011-03-28]. Dostupný z WWW: <<http://www.auto.cz/cdc-aktivni-tlumice-letos-nasly-cestu-do-beznych-aut-16717>>.
- [12] *PC Suspension Components* [PDF dokument]. [cit. 2011-03-28]. Dostupné z WWW: <http://www.zf.com/media/media/img_1/brands_1/sachs/technical_and_service_sachs/pdfs_2/pdf_technical_brochure_suspension_EN_SACHS.pdf>.
- [13] *BMW Technology Guide* [online]. 2008 [cit. 2011-03-28]. Dynamic Drive. Dostupné z WWW: <http://www.bmw.com/com/en/insights/technology/technology_guide/articles/dynamic_drive.html>.
- [14] HANLON, Mike. Audi's new magnetic semi-active suspension system. *Gizmag* [online]. 17.5.2006, [cit. 2011-03-28]. Dostupný z WWW: <<http://www.gizmag.com/go/5752/>>.

- [15] *Audi Worldwide* [online]. c2011 [cit. 2011-03-28]. Audi magnetic ride.
Dostupné z WWW:
<http://www.audi.com/com/brand/en/tools/advice/glossary/audi_magnetic_ride.broswer.html>.
- [16] *Car Bibles* [online]. c2011 [cit. 2011-03-28]. The Car Suspension Bible.
Dostupné z WWW: <http://www.carbibles.com/suspension_bible_pg3.html>.
- [17] *Bose* [online]. c2011 [cit. 2011-03-28]. Bose Suspension System.
Dostupné z WWW:
<http://www.bose.com/controller?url=/automotive/bose_suspension/index.jsp>.
- [18] *How Stuff Works* [online]. c2011 [cit. 2011-03-28]. How Car Suspensions Work.
Dostupné z WWW: <<http://auto.howstuffworks.com/car-suspension9.htm>>.
- [19] *Innovatia Software* [online]. c2007 [cit. 2011-03-28]. Gradient Descent.
Dostupné z WWW: <<http://www.innovatia.com/software/papers/gradient.htm>>.
- [20] *A Modified Pattern Search Approach for Unconstrained Optimization Problem* [PDF dokument]. 2008 [cit. 2011-03-28].
Dostupné z WWW: <<http://www.aporc.org/LNOR/8/ISORA2008F49.pdf>>.
- [21] TAUFER, I.; DRÁBEK, O.; JAVŮREK, M. Metoda simplexů – efektivní nástroj pro řešení optimalizačních úloh. *Chemagazín* [online]. 2010, XX, 6, [cit. 2011-05-10].
Dostupný z WWW:
<http://www.chemagazin.cz/userdata/chemagazin_2010/file/CHEMAGAZIN_XX_6_cl10.pdf>.

7.3 Programové vybavení

- Matlab 7.11.0.584 (R2010b)
- Microsoft Office 2010 14.0.5128.5000
- Corel Paint Shop Pro Photo X2

8 Seznam použitých zkratek a symbolů

A [J]	– práce vykonaná systémem
c_a [N·s·m ⁻¹]	– tlumení viskózního tlumiče
E_D [J]	– disipativní energie systému
E_k [J]	– kinetická energie systému
E_p [J]	– potenciální energie systému
F_0 [N]	– amplituda působící síly
k [N·m ⁻¹]	– tuhost hlavní pružiny
k_a [N·m ⁻¹]	– tuhost tlumící pružiny
m [kg]	– hmotnost primární hmoty
m_a [kg]	– hmotnost tlumící hmoty
t [s]	– čas
x [m]	– výchylka primární hmoty
\dot{x} [m·s ⁻¹]	– derivace výchylky primární hmoty neboli její rychlost
\ddot{x} [m·s ⁻²]	– druhá derivace výchylky primární hmoty neboli její zrychlení
x_a [m]	– výchylka tlumící hmoty
\dot{x}_a [m·s ⁻¹]	– derivace výchylky tlumící hmoty neboli její rychlost
\ddot{x}_a [m·s ⁻²]	– druhá derivace výchylky tlumící hmoty neboli její zrychlení
ω [rad·s ⁻¹]	– frekvence budící síly

9 Seznam obrázků

Obr. 2.1 Dvouplášťový kapalinový tlumič.....	13
Obr. 2.2 Maximální sklon dvouplášťového tlumiče.....	13
Obr. 2.3 Jednoplášťový plynokapalinový tlumič	14
Obr. 2.4 Jednoplášťový tlumič s odrazovou stěnou	15
Obr. 2.5 Jednoplášťový tlumič s uklidňovacím pístem.....	15
Obr. 2.6 Schéma dvouplášťového plynokapalinového tlumiče.....	16
Obr. 2.7 Polohově citlivý tlumič PSD	16
Obr. 2.8 Polohově citlivý tlumič PSD	16
Obr. 2.9 Srovnání původní a nové konstrukce SENSE-TRAC.....	17
Obr. 2.10 Tlumič systému DCD.....	17
Obr. 3.1 Cílový konflikt mezi jízdní bezpečností a jízdním pohodlím při návrhu tlumení/pružení vozidla.....	18
Obr. 3.2 Porovnání různých systémů odpružení	19
Obr. 3.3 Porovnání různých regulovaných systémů odpružení	19
Obr. 3.4 Schéma aktivního odpružení	20
Obr. 3.5 Elektronické ovládání tlumičů - umístění na vozidle.....	21
Obr. 3.6 Tlumič systému EDC	21
Obr. 3.7 Řez tlumičem CDCi.....	22
Obr. 3.8 Řez tlumičem CDCe	22
Obr. 3.9 Konstrukční řešení tlumičů CDC	23
Obr. 3.10 BMW Dynamic Drive	23
Obr. 3.11 Nejdůležitější komponenty Skyhook regulace	24
Obr. 3.12 Řez magneto-reologickým tlumičem.....	25
Obr. 3.13 Schéma systému Magnetic Ride ve voze Audi TT	25
Obr. 3.14 Náprava systému Bose suspension	26
Obr. 4.1 Systém bez viskózního tlumiče.....	27
Obr. 4.2 Systém s viskózním tlumičem.....	29
Obr. 5.1 Model systému bez viskózního tlumiče v prostředí MATLAB/Simulink.....	32
Obr. 5.2 Model systému s viskózním tlumičem v prostředí MATLAB/Simulink.....	33
Obr. 5.3 Výchylka x netlumeného systému	34
Obr. 5.4 Průběh optimalizace modelu 1 metodou gradient descent.....	34
Obr. 5.5 Optimalizovaná výchylka x netlumeného systému	35
Obr. 5.6 Porovnání neoptimalizované a optimalizované výchylky modelu 1	35
Obr. 5.7 Výchylka x tlumeného systému	36
Obr. 5.8 Průběh optimalizace modelu 2 metodou gradient descent.....	36
Obr. 5.9 Optimalizovaná výchylka x tlumeného systému	37
Obr. 5.10 Porovnání neoptimalizované a optimalizované výchylky modelu 2	37

10 Přílohy

10.1 Obsah přiloženého CD

- modely
 - netlumeny – složka se soubory k netlumenému modelu
 - tlumeny – složka se soubory k netlumenému modelu
- obrázky – složka s obrázky použitými v práci
- bakalarska_prace.pdf