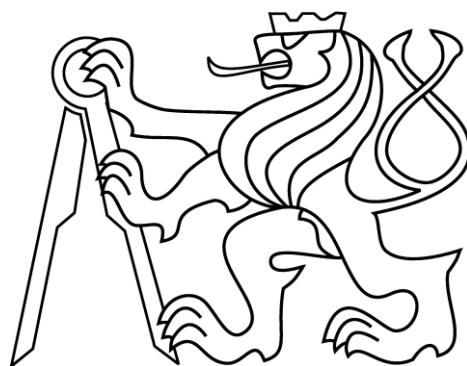


**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**  
**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**  
**Katedra řídicí techniky**



**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

Semiaktivní tlumení automobilu s lineárním elektrickým  
motorem

Praha, 2012

Pavel Jícha

České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta elektrotechnická

Katedra řídicí techniky

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: Pavel Jícha

Studijní program: Elektrotechnika a informatika (bakalářský), strukturovaný  
Obor: Kybernetika a měření

Název tématu: **Semiaktivní tlumení automobilu s lineárním elektrickým motorem**

Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se s vlastnostmi lineárního elektrického motoru.
2. Posuďte možnosti jeho využití pro systém poloaktivního tlumení pěrování automobilu.
3. Navrhněte řízení proudu tohoto motoru tak, aby pracoval jako poloaktivní tlumič s možností rekuperace energie.
4. Ověřte chování systému poloaktivního tlumení pomocí simulací v prostředí Matlab.

Seznam odborné literatury:

Dodá vedoucí práce

Vedoucí: Doc.Ing. Antonín Stříbrský, CSc.

Platnost zadání: do konce zimního semestru 2011/2012

  
prof. Ing. Michael Šebek, DrSc.  
vedoucí katedry



  
prof. Ing. Boris Šimák, CSc.  
děkan

V Praze dne 11. 10. 2010

# Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 25.5.2012

Pavel Šíčka

podpis

# Poděkování

Děkuji především vedoucímu své bakalářské práce Doc. Ing. Antonínu Stříbrskému CSc. za poskytnutí materiálů a rad týkajících se dané problematiky. Dále bych rád poděkoval Ing. Jaroslavu Honců CSc. za poskytnutí materiálů potřebných k vytvoření modelu lineárního motoru. Děkuji také své rodině, která mě ve studiu podporovala.

# **Abstrakt**

Tato práce se zabývá možností využití lineárního elektrického motoru v systému tlumení automobilu jako semiaktivního tlumiče.

Pro použití lineárního elektrického motoru jako semiaktivního tlumiče je zapotřebí, aby umožňoval plynulou změnu konstanty tlumení. Vhodným řízením proudu motoru pro takové chování se také tato práce zabývá.

Pro ověření vlastností semiaktivního systému tlumení je použit čtvrtinový model automobilu. Tento model simuluje odpružení jednoho kola automobilu a čtvrtiny hmotnosti automobilu. Pro semiaktivní tlumení jsou posouzeny čtyři strategie řízení konstanty tlumení. Následně jsou porovnány vlastnosti tlumení řízeného nejlepší z nich s vlastnostmi pasivního tlumení.

## **Klíčová slova**

Semiaktivní tlumení, lineární elektrický motor, skyhook, rekuperace energie

# **Abstract**

In this thesis possibility of use of linear electric motor in semiactive damping of car suspension is discussed.

The linear electric motor must allow continuous setting of the damping constant to use as semiactive damper. It can be done with appropriate control of the motor current which is also one goal of this thesis.

The quarter car model is used to verify properties of semiactive damping system. This model represents suspension of one wheel with quarter mass of the vehicle. There are four types of damping constant control algorithms. From these types the one with the best results in damping is chosen and the system with this control is compared with passive system.

## **Keywords**

Semiactive damping, linear electric motor, skyhook, energy recovery

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod .....</b>	<b>1</b>
1.1	Cíle tlumení .....	2
<b>2</b>	<b>Tlumení automobilu .....</b>	<b>3</b>
2.1	Druhy tlumení .....	3
<b>3</b>	<b>Lineární elektrický motor .....</b>	<b>5</b>
3.1	Popis lineárního elektrického motoru .....	5
3.2	Provedení lineárního elektromotoru .....	6
3.3	Konstrukční prvky lineárního motoru .....	8
3.4	Vlastnosti elektromotoru pro tlumení .....	10
3.5	Lineární elektromotor jako semiaktivní tlumič .....	11
<b>4</b>	<b>Řízení tlumiče .....</b>	<b>12</b>
4.1	Řízení proudu .....	12
<b>5</b>	<b>Součásti tlumícího systému .....</b>	<b>15</b>
5.1	Čtvrtinový model automobilu .....	15
5.2	Řízení konstanty tlumení .....	17
5.2.1	Typy řízení semiaktivního tlumení .....	18
5.2.2	Vlastnosti regulátorů .....	21
<b>6</b>	<b>Rekuperace energie .....</b>	<b>22</b>
<b>7</b>	<b>Chování systému .....</b>	<b>24</b>
7.1	Porovnání jednotlivých regulátorů .....	24
7.2	Porovnání s pasivním tlumením .....	27
<b>8</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>33</b>
A.1	Příloha .....	36
A.2	Příloha .....	37

# Kapitola 1

## Úvod

V současné době s přibýváním osobních automobilů na silnicích je stále důležitější otázka bezpečnosti. Obzvláště důležité jsou bezpečnostní prvky aktivní, které mají za úkol případné nehodě předejít. Mezi tyto prvky patří mimo brzdy, elektronické pomocné systémy, dobré pneumatiky, kvalitní a přesné řízení i kvalitní odpružení s tlumiči (součást zavěšení kol) pro zajištění stálého kontaktu pneumatiky s vozovkou.

Zavěšení kol vozidla je souhrn technických prostředků zajišťujících spojení náprav vozidla s rámem nebo samonosnou karoserií. Odpružení v tomto systému plní několik funkcí. Jedna z nich je udržet stálý kontakt pneumatik s vozovkou, aby byly zajištěny co nejlepší jízdní vlastnosti a s tím spojena i bezpečnost jízdy. Pokud by kontakt pneumatik s vozovkou byl nedostatečný, zvláště u přední nápravy, vozidlo by se v takovém případě stalo na okamžik neovladatelné. Dále je třeba, aby odpružení omezilo sílu rázů a kmitů přenášených na karoserii a posádku. Tento aspekt tlumení je důležitý pro pohodlí posádky vozidla i pro opotřebování součástí vozidla. Pohodlí je důležité hlavně z hlediska únavy řidiče a tím i jeho schopnosti soustředit se na řízení vozidla. Pohodlí posádky můžeme posuzovat podle zrychlení odpružené části vozidla, které určuje sílu působící na cestující. Jízdní vlastnosti vozidla hodnotíme pomocí přítlačné síly působící na kolo.

Důležitou částí zavěšení kol je odpružení. Tato část má za úkol vstřebat vertikální rázy, které vznikají přejetím nerovností na vozovce. Pro odpružení osobních automobilů bývá nejčastěji použita vinutá pružina. Další používané druhy odpružení jsou listové, torzní, pneumatické, hydraulické a jejich kombinace. Protože samotná pružina energii rázu,

kterou pohltila, musí opět vydat, je v systému zavěšení doplněna tlumičem, který tlumí její kmity. Ty je potřeba tlumit nejen z hlediska pohodlí a jízdních vlastností, ale také je třeba zajistit, aby rázy kola nepoškozovaly samotný povrch vozovky.

V tlumiči se energie z pružiny přeměňuje nejčastěji na teplo. Tlumiče existují také v několika variantách. Nejčastěji se setkáme s tlumičem kapalinovým. Může však být realizován jako pneumatický, popřípadě kombinovaný. Dříve jsme se mohli setkat s tlumiči deformačními, tvořenými blokem gumy, nebo s třecími tlumiči, kde k tlumení docházelo vlivem tření mezi pohyblivými částmi. U těchto tlumičů však docházelo k rychlému opotřebení.

## 1.1 Cíle tlumení

Ideální zavěšení kol vozidla by z hlediska pohodlí mělo udržovat karoserii v konstantní úrovni bez ohledu na nerovnosti vozovky. Takovou situaci si ilustruje obrázek 1.1, kde je karoserie zavěšena na myšlenou „nebeskou kolejnicí“ (odtud název „sky-hook“).



Obrázek 1.1: Ideální zavěšení vozidla – „sky-hook“

Při takovém konceptu zavěšení se na karoserii nepřenáší žádné zrychlení od vozovky a tím je dosaženo maximálního pohodlí posádky. Zároveň je zajištěn stálý kontakt pneumatik s vozovkou a tím zajištěny dobré jízdní vlastnosti. Takovému modelu se tedy snaží moderní tlumící systémy přiblížit.

# Kapitola 2

## Tlumení automobilu

### 2.1 Druhy tlumení

Z pohledu chování tlumiče v systému odpružení vozidla můžeme rozdělit systémy tlumení na tři druhy. Tlumič je většinou charakterizován tlumící charakteristikou ( $F-v$ ), která udává velikost síly, kterou tlumič vytváří, v závislosti na rychlosti, kterou se pohybuje. Pokud je tato charakteristika lineární, její směrnice je dána konstantou tlumení. Pokud je konstanta tlumení po celou dobu tlumení neměnná, hovoříme o tlumení pasivním. Pokud systém umožňuje měnit konstantu tlumení za chodu, hovoříme o tlumení semiaktivním. Pokud se tlumič chová jako nezávislý zdroj síly, jedná se o tlumení aktivní.

Pasivní systém tlumení se dnes nachází ve většině osobních automobilů. Jak bylo uvedeno, je charakteristický tím, že jeho konstanta tlumení je pevně nastavena z výroby na určité vlastnosti. Z toho vychází i jeho nevýhoda. Nastavení tlumení spolu s tuhostí pružiny může být nastaveno více na pohodlí posádky (tzv. měkké nastavení) nebo spíše pro lepší jízdní vlastnosti a menší přenášení váhy vozidla (tzv. tvrdé nastavení). U pasivního systému musí být zvolen jistý kompromis mezi pohodlím a jízdními vlastnostmi. Jeho výhodou je snadná konstrukce a tím i nízká cena. U některých vozidel se můžeme setkat s možností přepnutí mezi sportovním nastavením (lepší jízdní vlastnosti) a komfortním nastavením.

Semiaktivní (poloaktivní) systém rozšiřuje pasivní systém o možnost plynule měnit konstantu tlumení a přizpůsobovat se tak aktuální situaci. Pro tento systém je třeba navrhnout vhodný řídicí systém, který bude na základě informací z jízdy upravovat konstantu tlumení pro zajištění zvolených vlastností. Sám tlumič pak může být realizován

různými konstrukcemi. Může to být například kapalinový tlumič s kapalinou reagující na magnetické pole, kapalinový tlumič s řízenými ventily nebo lineární elektrický motor. Právě použitím lineárního elektrického motoru jako semiaktivního tlumiče se v této práci budu zabývat.

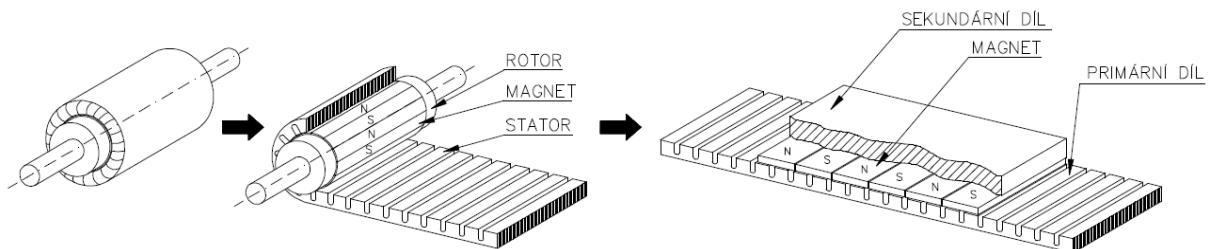
Jelikož poloaktivní systém je stále pouze tlumič, což znamená, že umožňuje pohyb pouze tlumit a zpomalovat, jsou jeho schopnosti měnit vlastnosti systému odpružení omezené. Oproti tomu aktivní systém tlumení umožňuje generovat sílu v obou směrech. Může tedy již probíhající pohyb kola tlumit, nebo pohyb sám vyvolat. Jako akční člen je tedy do systému zařazen zdroj síly. Jako tento zdroj může být také použit například lineární elektrický motor, popřípadě hydraulický akční člen. Aktivní systémy mají oproti pasivním a semiaktivním systémům vyšší energetickou náročnost.

# Kapitola 3

## Lineární elektrický motor

### 3.1 Popis lineárního elektrického motoru

Lineární elektrický motor (dále jen lineární elektromotor) je stroj, který přeměňuje elektrickou energii na lineární pohyb, a to přímo, na rozdíl od lineárních pohonů s převodem rotačního pohybu na lineární. Funguje na indukčním principu podobně jako rotační indukční motor. Můžeme si ho představit jako rotační motor, u kterého rozřízneme stator a rozvineme ho do roviny, jak je znázorněno na obrázku 3.1.



Obrázek 3.1: Přechod od rotačního elektrického motoru k lineárnímu (převzato z [2])

Na rozdíl od rotačního indukčního motoru, kde se vždy pohybuje rotor a stator vytváří otáčivé magnetické pole, u lineárních elektromotorů se můžeme setkat s různými uspořádáními. Části motoru jsou v tomto případě označovány jako primární a sekundární díl, kde jako primární díl se označuje část tvořená elektrotechnickými plechy s uloženým vinutím. Pohyblivou částí může být jak primární tak i sekundární část, záleží na konkrétní realizaci. Pokud je pohyblivá primární část, je třeba zajistit dostatečně flexibilní a odolné vedení kabelů pro napájení, snímače polohy a v případě vodně chlazené primární části i

přívod chladicí kapaliny. Výhodou uspořádání s pohyblivou primární částí je možnost relativně prodlužovat dráhu posuvu přidáním dalších permanentních magnetů.

Porovnáním přímého lineárního pohonu s pohony, které kombinují rotační pohyb se systémem převodů na pohyb lineární, zjistíme, že má mnohem lepší dynamické vlastnosti. Mechanické prvky v převodech mají vždy jistá omezení, jako maximální rychlosť otáčení, rozsah pohybu nebo maximální přesnost omezená mechanickými výlemy v převodech. Tím je omezena i dynamika celého lineárního pohonu. Přímý lineární pohon díky absenci těchto omezujících prvků může dosahovat vyššího zrychlení, vyšší rychlosti posuvu a vysoké přesnosti polohování. Vlivem absence převodového ústrojí mají lineární elektromotory jistou nevýhodu oproti posuvům s rotačním motorem a převodovým ústrojím. Mechanické převody mohou být konstruovány tak, aby převáděli vysoké otáčky motoru na pomalejší lineární pohyb, který ale dokáže působit větší silou. Lineární elektromotor musí veškerou sílu vyprodukovať proudem vinutím. Proto se pro aplikace, kde je potřeba působit velkou silou po delší dobu hodí více lineární posuvy s převodovým ústrojím.

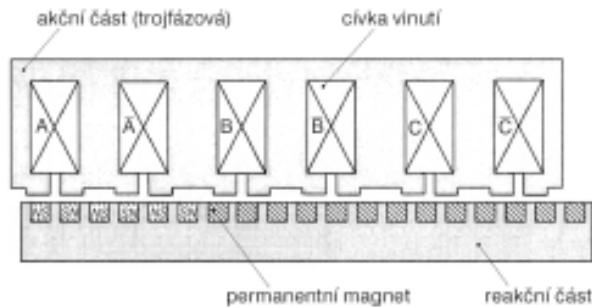
Lineární elektromotor se používá v zařízeních, kde se vyžaduje vysoká přesnost pohybu případně vysoká rychlosť. Můžeme je najít v obráběcích strojích, kde posouvají samotný obráběcí nástroj nebo produkt. Více o použití lineárních elektromotorů v [1]. Na stejném principu jako lineární elektromotor fungují rychlovlaky, které se pohybují na tzv. „magnetickém polštáři“, nedochází tak k vysokým ztrátám energie vlivem tření a je možné dosáhnout vysokých rychlosťí (více než 500 km/h).

## 3.2 Provedení lineárního elektromotoru

V závislosti na oblasti použití jednotlivých lineárních elektromotorů se liší jejich konstrukční provedení. Nejpoužívanější lineární elektromotory jsou trojfázové synchronní a asynchronní. Stejnosměrné lineární elektromotory se nepoužívají.

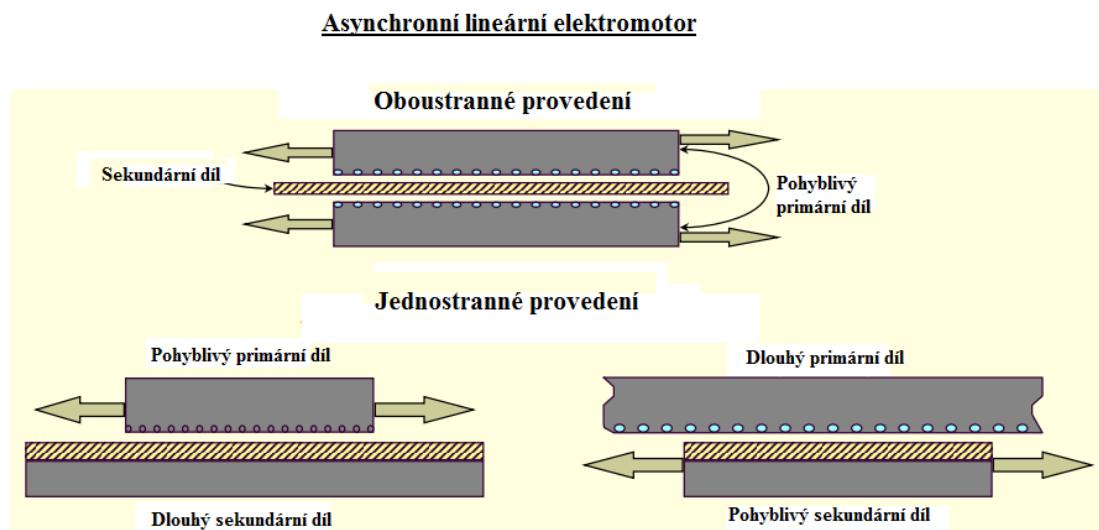
U synchronního lineárního elektromotoru je primární díl tvořen trojfázovým vinutím uloženým v drážkách elektrotechnických plechů. Sekundární část je tvořena permanentními magnety, u kterých se střídá polarita. Jak z názvu vyplývá, tento motor musí synchronizovat magnetické pole vinutí s magnetickým polem sekundární části. Musí tedy obsahovat snímač polohy pohyblivé části a na základě znalosti polohy upravit řídící signál. Pokud z určitého důvodu ztratí synchronizaci, může dojít ke ztrátě tahu.

Schematické uspořádání synchronního lineárního elektromotoru je na obrázku 3.2. Jednotlivé fáze cívek vinutí primární části jsou označeny A, B, C.



Obrázek 3.2: Struktura synchronního lineárního motoru (převzato z [3])

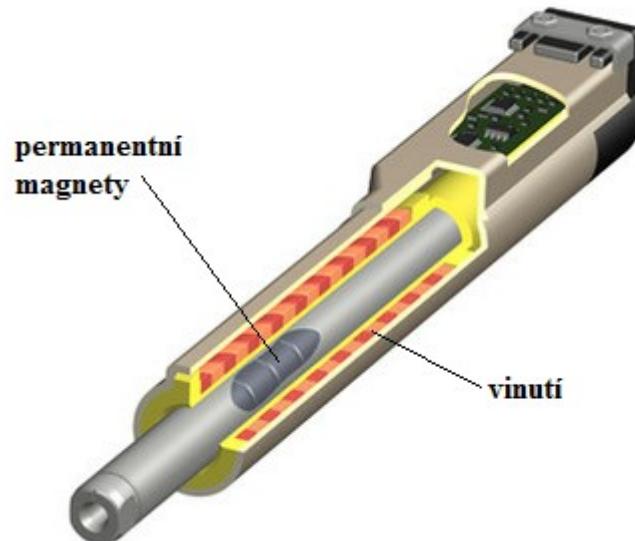
U asynchronních lineárních elektromotorů je opět v primární části vinutí v drážkách elektrotechnických plechů, sekundární část je však na rozdíl od synchronních motorů tvořena klecí nakrátko. Stejně jako synchronní lineární elektromotory se nejčastěji využívají v trojfázovém provedení. Mohou mít delší nepohyblivou sekundární část a pohyblivou primární část, nebo se může pohybovat kratší sekundární část podél dlouhé primární části s vinutím, případně se můžeme setkat s oboustranným provedením. Všechny tyto varianty jsou zobrazeny na obrázku 3.3. U oboustranného provedení se mohou pohybovat oba díly, záleží na připevnění v dané aplikaci.



Obrázek 3.3: Provedení asynchronního lineárního motoru (převzato z [4] - upraveno)

U všech zmíněných konstrukčních uspořádání hrájí velkou roli přitažlivé síly mezi primární a sekundární částí. Tyto přitažlivé síly zvyšují tření a tím zhoršují dynamiku daného motoru. Výhodné uspořádání lineárního elektromotoru jak z hlediska přitažlivých

sil mezi oběma částmi, ale i s menším rozptylem magnetického toku je provedení tzv. elektroválce. Na obrázku 3.4 je lineární elektromotor s pohyblivou sekundární částí tvořenou permanentními magnety, která je obklopena trojfázovým vinutím části primární.



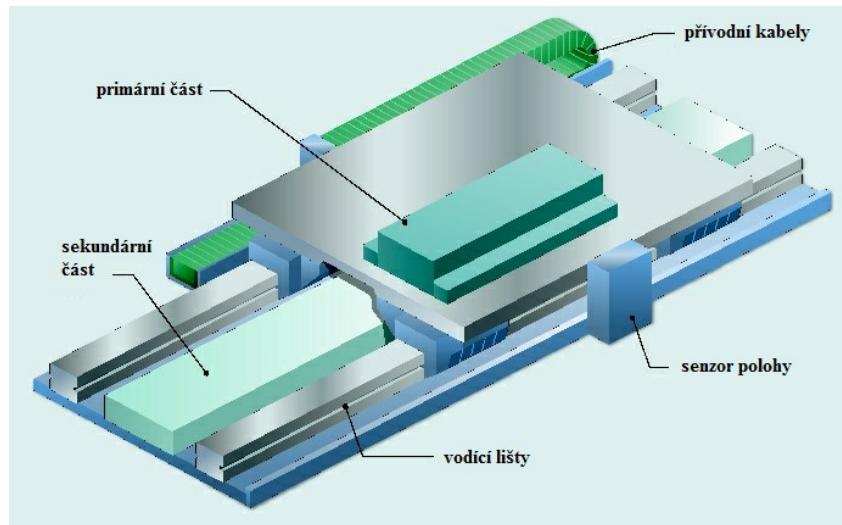
Obrázek 3.4: Lineární elektromotor v provedení „elektroválce“ (převzato z [5] - upraveno)

### 3.3 Konstrukční prvky lineárního motoru

Každý lineární elektromotor se skládá z akční části, tvořené primárním a sekundárním dílem. Další částí je přívodní kabeláž a vodiče k senzorům polohy. Dále mají většinou lineární elektromotory základní desku s elektronikou, vodící drážky nebo kolejnice, senzory polohy, mechanické dorazy, koncové spínače a zdroj napájení. Příklad uspořádání lineárního elektromotoru a jeho částí je na obrázku 3.5.

K primární části vždy vedou kabely pro přívod energie, případně další vodiče pro senzory a v případě kapalinového chlazení i přívod chladicí kapaliny. Pokud je primární část pohyblivá, musí být přívod kabelů řešen s ohledem na rozsah pohybu, maximální rychlosť a zrychlení. Většinou se pro přívod kabelů používá řetězu, v kterém jsou uloženy. Takto uzpůsobené přívodní vedení ovlivňuje vlastnosti celého motoru. Chlazení primární části bývá většinou řešeno pasivním chlazením okolním vzduchem. Primární část je obklopena kovovým krytem tvarovaným pro co nejúčinnější pasivní chlazení. Vinutí primární části může být chlazeno i kapalinou. Takové chlazení je účinnější než pasivní, ale zvyšuje složitost zařízení a tím i cenu.

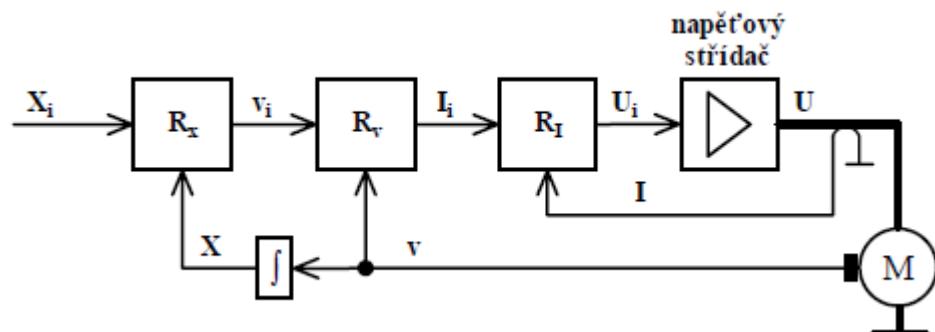
Pokud je použito mechanické vedení motoru, je třeba zvolit vhodná ložiska podle zamýšlené funkce a parametrů motoru. Mechanické vedení může být řešeno pomocí kluzných kovových ploch pro malé rychlosti, pomocí kuličkových pouzder, keramických kluzných ploch. Pro vysoké rychlosti se používají vzduchová ložiska a levitační systémy na magnetické bázi. Rychlosti posuvu u vzduchových a magnetických ložisek mohou být větší než 100 m/s.



Obrázek 3.5: Příklad konstrukce lineárního elektromotoru

Jako snímače polohy se většinou používají magnetické nebo optické senzory. Pracují většinou jako inkrementální snímače. Magnetické snímače jsou tvořeny magnetickou snímací hlavou a magnetickým páskem, vůči kterému se hlava pohybuje. Optické snímače využívají zdroj záření a odraz od lišty s drážkami. Ty od sebe mohou být vzdáleny řádově desítky  $\mu\text{m}$ . Snímače mají většinou vlastní elektroniku.

Další částí moderních lineárních pohonů musí být řídicí systém. Tento systém zpravidla bývá číslicový s procesorem s vysokou operační rychlostí.



Obrázek 3.6: Uspořádání regulačního obvodu (převzato z [6])

Regulátor většinou pracuje s několika zpětnovazebními smyčkami – vnitřní proudová, rychlostní a polohová (viz obrázek 3.6). V některých aplikacích může být ještě zařazena regulace zrychlení. Mezi regulátorem a motorem tedy probíhá obousměrná komunikace. Regulátor posílá řídící pokyny do motoru a zároveň přijímá údaje ze senzorů. Tyto údaje jsou nejen o poloze motoru a proudu, ale mohou informovat i o teplotě vinutí, o přetížení apod.

### 3.4 Vlastnosti elektromotoru pro tlumení

V této práci se zabývám možností nahradit tradiční kapalinový tlumič, používaný v osobních automobilech pro tlumení pérování. Lineární elektromotor má oproti pasivnímu kapalinovému tlumiči výhodu v rychlosti reakce. Umožňuje tak rychlejší přizpůsobení dané situaci.

Další výhodou lineárního motoru je možnost měnit jeho parametry za provozu a to relativně snadno v porovnání s řízenými tlumiči pracující na jiném principu, jak bylo zmíněno v úvodu. Pokud by byl elektrický tlumič u každého kola, umožňovalo by to měnit parametry jednotlivých motorů nezávisle na sobě s ohledem na požadovanou funkci.

Nevýhodou použití lineárního elektromotoru jako tlumiče je jeho energetická náročnost. Běžný kapalinový tlumič nevyžaduje žádnou dodávanou energii. Pracuje pouze s energií kmitání, kterou přeměňuje na teplo. V případě elektrického tlumiče musíme zajistit, aby tlumič stále kladl odpor probíhajícím pohybům a to s určitou minimální konstantou tlumení, jinak by kmitavý pohyb, vzniklý při přejetí nerovnosti, mohl způsobit odskočení kola od vozovky a tím ztrátu ovladatelnosti vozidla. Nevýhodu energetické náročnosti částečně snižuje možnost za určitých provozních podmínek z elektromotoru při tlumení rekuperovat energii zpět do zdroje.

Lineární elektromotor konstruovaný pro použití místo tlumiče u pérování automobilu by měl být rozměrově podobný kapalinovému tlumiči. Jeho provedení by tedy mělo být typu „elektroválce“. Takto řešený elektromotor by mohl být uložen uvnitř vinuté pružiny pérování a tím i ukotven co nejblíže vlastnímu závěsu kola, což umožňuje zachovat malou vzdálenost, na které by systém tlumení pracoval jako páka a tím zachovat účinnost odpružení.

Jistou nevýhodou řešení tlumení lineárním elektromotorem jsou vysoké pořizovací náklady a náklady spojené s údržbou takového systému. Dále by se musela zaručit vysoká spolehlivost systému, například vybavit tlumiče záložní jednotkou.

### 3.5 Lineární elektromotor jako semiaktivní tlumič

Pokud chceme použít lineární elektromotor jako semiaktivní tlumič, je třeba, aby umožňoval měnit konstantu tlumení. Jakýkoliv tlumič je charakterizován konstantou tlumení  $b$  [ $Ns/m$ ] ( $[kg/s]$ ). Tlumič vždy působí silou, která je přímo úměrná rychlosti pohybu a působí proti směru pohybu jak je vidět z rovnice (1).

$$F = -b \cdot v \quad [Ns/m] \quad (1)$$

Řídicí jednotka lineárního motoru většinou umožňuje nastavit sílu, jakou má působit. Pro řízení motoru máme k dispozici i informaci o okamžité rychlosti posuvu motoru, případně o jeho aktuální poloze, z které můžeme rychlosť dopočítat. Se zvolenou konstantou tlumení a ze znalosti okamžité rychlosťi, můžeme určit požadovanou sílu elektromotoru, kterou má působit.

# Kapitola 4

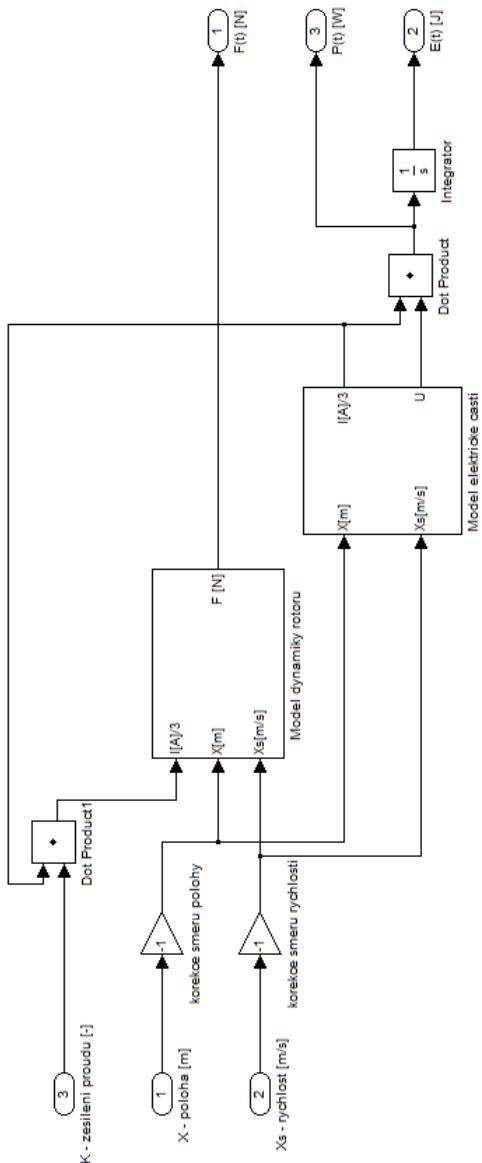
## Řízení tlumiče

### 4.1 Řízení proudu

Řízení proudu lineárního elektrického motoru musí zajistit, aby se motor choval jako tlumič s nastavenou konstantou tlumení. Jako model motoru jsem použil a částečně upravil model z [6] zobrazený na obrázku 4.1. Tento model simuluje chování trojfázového synchronního lineárního motoru. Jednotlivé bloky simulují dynamiku rotoru včetně třecích sil a elektrickou část, která zahrnuje simulaci proudů a napětí v LR obvodu vinutí jednotlivých fází. Vstupy modelu jsou okamžitá poloha v metrech, ze které se vypočítá komutace proudů cívek, a okamžitá rychlosť v m/s. Z hodnot rychlosti a aktuální polohy se vypočítají indukovaná napětí jednotlivých cívek, která jsou na rychlosti a poloze závislá. Parametry modelu převzaty z [6] jsou uvedeny v souboru *semiaktiv.m* na přiloženém CD.

Protože není potřeba, aby motor generoval sílu v obou směrech, ale stačí, aby kladl odpor již probíhajícímu pohybu, pro řízení proudu byl využit z [8] proporcionální zesilovač proudu, který zesiluje proud, generovaný pohybujícím se motorem. Při takto vytvořeném modelu je pro dané zesílení proudu koeficient tlumení motoru přibližně konstantní. Změnou zesílení tedy měníme konstantu tlumení, čímž dosáhneme toho, že se motor chová jako semiaktivní tlumič.

V tabulce 4.1 jsou uvedeny konstanty tlumení elektromotoru v závislosti na zesílení proudu motoru. Mezi těmito konstantami tlumení může řídící jednotka tlumení přepínat, nebo se může měnit konstanta plynule.

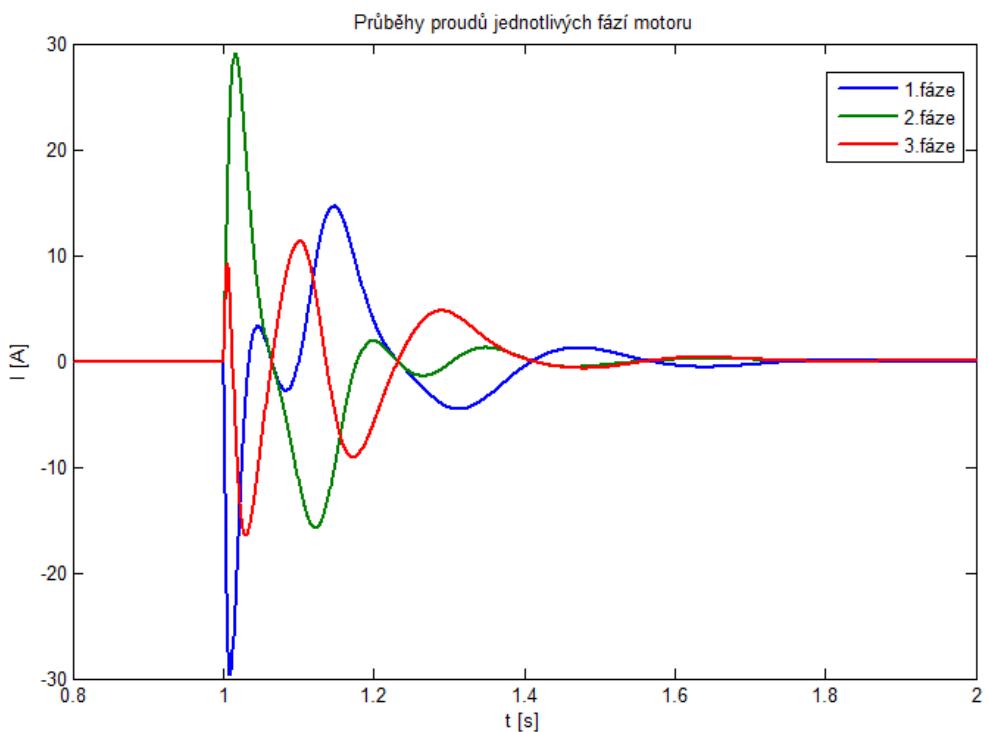


Obrázek 4.1: Model lineárního motoru

Průběhy proudů pro jednotlivé fáze jsou zobrazeny na obrázku 4.2. Konkrétně je zobrazen průběh proudů jednotlivých fází motoru při simulaci nájezdu vozidla na nerovnost vozovky ve tvaru skoku o velikosti 5 cm v čase 1 sekunda. Použité zesílení proudu je 7, což z tabulky 4.1 odpovídá hodnotě tlumení 6500 Ns/m. Z průběhů je vidět, že do času 1 sekunda, kdy je vertikální rychlosť karoserie a kola nulová, motor neklade žádný odpor a tak jím neprotéká proud. Při najetí na překážku se pohyblivá část motoru spolu s pružinou pohybují, vzrostě tak proud motoru, který vytváří odporovou sílu úměrnou rychlosti pohybu. Dále je vidět, jak jsou proudy jednotlivých fází vzájemně posunuty o  $120^\circ$ .

Tabulka 4.1: Hodnoty konstanty tlumení pro různé zesílení proudového zesilovače

K [-]	b [Ns/m]
1	940
2	1875
3	2800
4	3750
5	4680
6	5538
7	6500



Obrázek 4.2: Průběhy proudů jednotlivých fází motoru

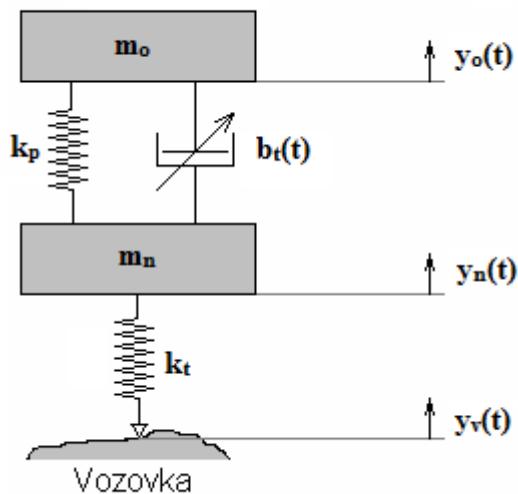
# Kapitola 5

## Součásti tlumícího systému

### 5.1 Čtvrtinový model automobilu

Čtvrtinový model automobilu je základní model pro simulaci vlastností odpružení automobilu. Tento model simuluje chování jednoho kola, jeho zavěšení a čtvrtiny hmotnosti karoserie (odpružené hmoty). Umožňuje tedy zhodnocení základních parametrů daného nastavení odpružení v jednoduchém matematickém modelu. Zanedbává však vzájemné ovlivňování přední a zadní nápravy a levé a pravé strany automobilu.

Jak je vidět na obrázku 5.1, model je tvořen odpruženou hmotou  $m_o$ , což je čtvrtina hmotnosti automobilu (karoserie, motor, náklad, posádka), neodpruženou hmotou  $m_n$ , což je hmota kola, brzd a součástí přímo spojených s kolem. Odpružení je modelováno jako pružina s tuhostí  $k_p$ , a tlumení pomocí lineárního elektrického motoru je simulováno jako tlumič s proměnnou konstantou tlumení  $b_t(t)$ . Pro simulaci pružení pneumatiky je mezi neodpruženou hmotou a vozovkou zařazena pružina s tuhostí  $k_t$ .



Obrázek 5.1: Čtvrtinový model automobilu (převzato z [7])

Ze čtvrtinového modelu automobilu je možné sestavit tyto pohybové rovnice:

$$\begin{aligned} m_o \ddot{y}_o &= -k_p(y_o - y_n) - b_t(\dot{y}_o - \dot{y}_n) \\ m_n \ddot{y}_n &= k_p(y_o - y_n) + b_t(\dot{y}_o - \dot{y}_n) - k_t(y_n - y_v) \end{aligned} \quad (2)$$

Pokud bude konstanta tlumení  $b_t$  konstantní, získáme model pasivního tlumení. Ten nám poslouží pro porovnání se systémem semiaktivního tlumení. Označíme si jednotlivé veličiny stavovými proměnnými (3), jako vstup soustavy označíme profil vozovky  $y_v$  a výstup soustavy je poloha karoserie  $y_o$ .

$$\begin{aligned} x_1 &= y_o \\ x_2 &= y_n \\ x_3 &= \dot{y}_o \\ x_4 &= \dot{y}_n \\ u &= y_v \\ y &= y_o = x_1 \end{aligned} \quad (3)$$

Nyní můžeme napsat stavové rovnice systému (4).

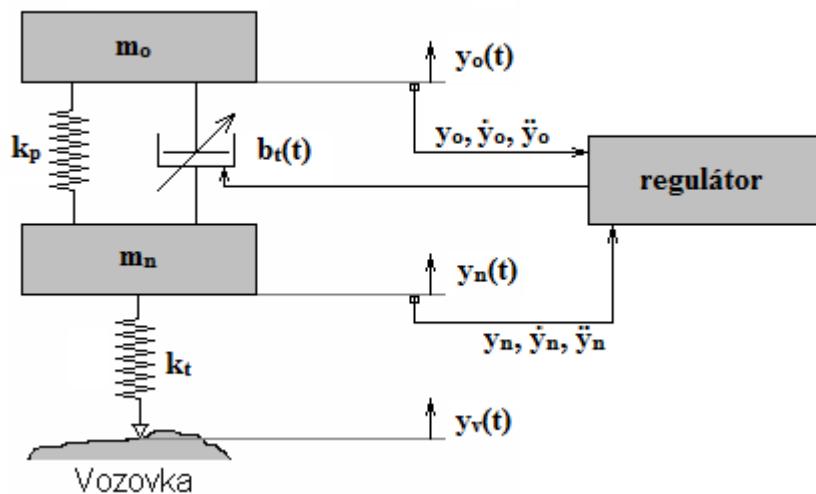
$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_3 \\ \dot{x}_2 &= x_4 \\ \dot{x}_3 &= -\frac{k_p}{m_o}x_1 + \frac{k_p}{m_o}x_2 - \frac{b_t}{m_o}x_3 + \frac{b_t}{m_o}x_4 \\ \dot{x}_4 &= \frac{k_p}{m_n}x_1 - \frac{k_p + k_t}{m_n}x_2 + \frac{b_t}{m_n}x_3 - \frac{b_t}{m_n}x_4 + k_t u \\ y &= x_1 \end{aligned} \quad (4)$$

Stavové rovnice můžeme přepsat do maticového tvaru (5). Maticový tvar pro popis pasivního systému použijeme pro porovnání vlastností se systémem semiaktivním. Pro simulaci systému s proměnnou konstantou tlumení jsem sestavil model (Příloha obrázek A.3) podle pohybových rovnic.

$$\begin{aligned}
\dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu} \\
\mathbf{y} &= \mathbf{Cx} + \mathbf{Du} \\
\mathbf{A} &= \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{k_p}{m_o} & \frac{k_p}{m_o} & -\frac{b_t}{m_o} & \frac{b_t}{m_o} \\ \frac{k_p}{m_n} & -\frac{k_p+k_t}{m_n} & \frac{b_t}{m_n} & -\frac{b_t}{m_n} \end{pmatrix} \\
\mathbf{B} &= \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ k_t \end{pmatrix} \\
\mathbf{C} &= (1 \quad 0 \quad 0 \quad 0) \\
\mathbf{D} &= 0
\end{aligned} \tag{5}$$

## 5.2 Řízení konstanty tlumení

Funkce regulátoru je nastavovat konstantu tlumení lineárního motoru tak, aby se chování celého systému odpružení co nejvíce přiblížilo konceptu „sky-hook“ odpružení. Regulátor na základě informací o relativní výchylce tlumiče  $y_o - y_n$  a relativní rychlosti  $\dot{y}_o - \dot{y}_n$ , případně i relativního zrychlení  $\ddot{y}_o - \ddot{y}_n$ , určuje velikost konstanty tlumení. Zapojení regulátoru je naznačeno na obrázku 5.2.



Obrázek 5.2: Regulátor semiaktivního tlumení

Regulátor může řídit konstantu různými způsoby [9]. Nejčastěji se u semiaktivních systémů setkáme právě se strategií přiblížit se „sky-hook“ systému nebo s regulátorem

vyrovnávající sílu pružiny tzv. vyvažující regulátor. Oba tyto regulátory mohou pracovat se spojitým nastavením konstanty tlumení nebo s přepínáním mezi dvěma hodnotami.

Regulátor, který přepíná mezi dvěma hodnotami konstanty tlumení má v jednom stavu vysokou konstantu tlumení, v druhém stavu je hodnota tlumení velmi malá a v ideálním případě by byla nulová. Regulátor se spojitým nastavením nepracuje spojite v celém rozsahu. Vyhodnocuje také dva stavy podle nastalé situace v soustavě. Za určitých podmínek nastaví konstantu tlumení také na velmi malou hodnotu. V druhém stavu však přizpůsobuje neustále konstantu tlumení podle daného algoritmu.

Ještě se můžeme setkat s tzv. adaptivním – pasivním řízením tlumení, který také přepíná mezi dvěma konstantami tlumení. Na rozdíl od semiaktivních systémů probíhá toto přepínání v časech mnohem delších, než je perioda kmitání od vozovky. Pokud tedy regulátor mění nastavení tlumiče v krátkých časech, výrazně ovlivňuje samotný průběh odezvy na nerovnosti vozovky, a v takovémto případě můžeme hovořit o semiaktivním tlumení.

Celkem tedy můžeme použít čtyři algoritmy řízení konstanty tlumení: spojité skyhook řízení, dvoustavové skyhook řízení, spojité vyvažující řízení a dvoustavové vyvažující řízení.

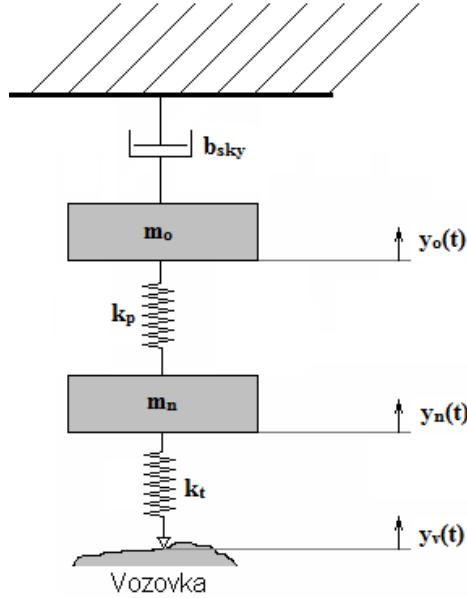
### 5.2.1 Typy řízení semiaktivního tlumení

#### *Spojité skyhook řízení (Continuous skyhook control)*

Představme si „skyhook“ tlumič jehož sílu můžeme popsat podle rovnice (6). Znázornění tohoto tlumiče je na obrázku 5.3, kde je odpružená hmota (karoserie) zavěšena k pevnému bodu právě pomocí tohoto tlumiče.

$$F_{sky} = b_{sky} \cdot \dot{y}_o \quad (6)$$

Cílem řízení je v tomto případě zajistit, aby systém s tlumičem mezi odpruženou a neodpruženou hmotou napodobil chování tlumiče z obrázku 5.3.



Obrázek 5.3: Znázornění tlumiče „skyhook“

Jsme ale omezeni tím, že použitý tlumič vždy působí silou opačného směru, než jakou má relativní rychlosť tlumiče  $\dot{y}_o - \dot{y}_n$ . Požadovaná síla tlumiče je tedy  $F_{sky} = b_{sky} \cdot \dot{y}_o$ . Takovou sílu vytvoří tlumič pouze v případě, že  $\dot{y}_o$  a  $\dot{y}_o - \dot{y}_n$  mají stejný směr (mají stejné znaménko). Pokud mají směr opačný, vytváří tlumič sílu v opačném směru, než bychom požadovali. V takovém případě by bylo nejlepší, kdyby tlumič nekladal odpor vůbec. Výslednou sílu, kterou by měl tlumič vyvinout v závislosti na znaménku součinu  $\dot{y}_o(\dot{y}_o - \dot{y}_n)$  je popsána v rovnici (7).

$$F_{sky} = \begin{cases} b_{sky} \cdot \dot{y}_o, & \dot{y}_o(\dot{y}_o - \dot{y}_n) \geq 0 \\ 0, & \dot{y}_o(\dot{y}_o - \dot{y}_n) < 0 \end{cases} \quad (7)$$

Součin  $\dot{y}_o(\dot{y}_o - \dot{y}_n)$  slouží jako rozhodovací funkce, která určí, kdy je tlumič aktivní. Pro takový stav je síla skutečného tlumiče  $F_t = b_t \cdot (\dot{y}_o - \dot{y}_n)$ . Konstanta tlumení  $b_t$  se tedy musí měnit tak, aby skutečná síla tlumiče byla stejná jako síla myšleného tlumiče „skyhook“. Pro tuto konstantu tedy dostaneme rovnici (8).

$$b_t = \begin{cases} \frac{b_{sky} \cdot \dot{y}_o}{(\dot{y}_o - \dot{y}_n)}, & \dot{y}_o(\dot{y}_o - \dot{y}_n) \geq 0 \\ 0, & \dot{y}_o(\dot{y}_o - \dot{y}_n) < 0 \end{cases} \quad (8)$$

Z rovnice (8) vidíme, že s klesající relativní rychlostí tlumiče nepřímo úměrně roste konstanta tlumení. V reálném systému je velikost konstanty tlumení omezena konstrukcí a konkrétně u lineárního elektrického motoru maximálním proudem vinutí. Vzhledem k takovému omezení a v případě, že by nebylo možné nastavit konstantu tlumení 0, konstantu tlumení bychom získali pomocí rovnice (9).

$$b_t = \begin{cases} \max \left[ b_{min}, \min \left[ \frac{b_{sky} \cdot \dot{y}_o}{(\dot{y}_o - \dot{y}_n)}, b_{max} \right] \right], & \dot{y}_o (\dot{y}_o - \dot{y}_n) \geq 0 \\ b_{min}, & \dot{y}_o (\dot{y}_o - \dot{y}_n) < 0 \end{cases} \quad (9)$$

### **Dvoustavové skyhook řízení (On-off skyhook control)**

Případ dvoustavového skyhook řízení je zjednodušení řízení spojitého. Pokud se směr rychlosti pohybu odpružené hmoty a rychlost tlumiče shoduje, tlumič se chová jako pasivní tlumič s neměnnou konstantou tlumení. Ve fázi tlumení, kdy tyto rychlosti mají opačný směr, tlumič opět netlumí vůbec, nebo tlumí s minimální konstantou tlumení. Pokud porovnáme skyhook řízení, v obou případech má tlumící síla stejný směr jako ideální síla tlumiče skyhook. V případě spojitého řízení je tato síla i stejně velká.

### **Dvoustavové vyvažující řízení (On-off balance control)**

Vyvažující řízení se snaží o vyrušení síly pružiny silou tlumiče. Pokud budeme uvažovat pasivní systém s pružinou a tlumičem, jeho pohybová rovnice bude (10)

$$\ddot{y} = -\frac{1}{m}(F_p + F_t), \quad (10)$$

kde  $F_p$  je síla pružiny a  $F_t$  síla tlumiče. Síla pružiny je přímo úměrná rozdílu okamžitých poloh odpružené a neodpružené hmoty ( $y_o - y_n$ ) s konstantou  $k_p$  a síla tlumiče je přímo úměrná rozdílu rychlostí ( $\dot{y}_o - \dot{y}_n$ ) s konstantou  $b_t$ . Na obrázku 5.4 je vidět, že během jedné periody kmitů soustavy síla tlumiče zvyšuje svou silou zrychlení odpružené hmoty ve dvou čtvrtinách periody. Ve zbylých dvou čtvrtinách periody síla tlumiče působí proti síle pružiny a zrychlení odpružené hmoty zpomaluje. Pokud tedy síla tlumiče a síla pružiny mají stejný směr, je žádoucí aby tlumič nevytvářel sílu žádnou (v případě aktivního systému by mohl klást sílu opačného směru). Směr obou sil udávají relativní rychlost a

relativní poloha. Můžeme tedy psát pro konstantu tlumení rovnici (11). Hodnoty  $b_{max}$  a  $b_{min}$  jsou maximální a minimální hodnoty konstanty tlumení.

$$b_t = \begin{cases} b_{max}, & (y_o - y_n)(\dot{y}_o - \dot{y}_n) \leq 0 \\ b_{min}, & (y_o - y_n)(\dot{y}_o - \dot{y}_n) > 0 \end{cases} \quad (11)$$

### **Spojité vyvažující řízení (*Continuous balance control*)**

Pouhým pasivním tlumením v případě dvoustavového řízení mají síly tlumiče a pružiny málodky stejnou velikost. Rozdíl sil způsobuje zrychlení karoserie. Tento nedostatek můžeme zlepšit plynulou změnou konstanty tlumení v  $b_{max}$ . Protože požadujeme, aby síla tlumiče v jednom stavu měla stejnou velikost jako síla pružiny, pouze působila v opačném směru. Pro tuto sílu můžeme napsat rovnici (12).

$$F_t = \begin{cases} -k_p(y_o - y_n), & (y_o - y_n)(\dot{y}_o - \dot{y}_n) \leq 0 \\ 0, & (y_o - y_n)(\dot{y}_o - \dot{y}_n) > 0 \end{cases} \quad (12)$$

Pokud budeme opět počítat s fyzikálními limity při praktické realizaci a přepočítáme sílu tlumiče na konstantu tlumení, můžeme napsat rovnici (13).

$$b_t = \begin{cases} \max \left[ b_{min}, \min \left[ \frac{-k_p(y_o - y_n)}{(\dot{y}_o - \dot{y}_n)}, b_{max} \right] \right], & (y_o - y_n)(\dot{y}_o - \dot{y}_n) \leq 0 \\ b_{min}, & (y_o - y_n)(\dot{y}_o - \dot{y}_n) > 0 \end{cases} \quad (13)$$

Obě varianty vyvažujícího řízení v určitém rozsahu ruší sílu pružiny v případech, kdy síly pružiny a tlumiče působí proti sobě.

### **5.2.2 Vlastnosti regulátorů**

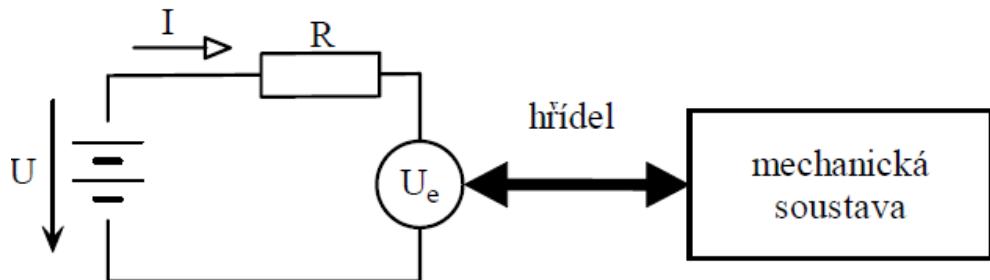
Všechny zmíněné regulátory semiaktivního tlumení vnášejí do systému nelinearitu vlivem jmenovatele ve výpočtu spojitéch regulátorů a přepínáním mezi stavy podle rozhodovací funkce. Změna konstanty tlumení se mění skokově a v určitých případech velmi často. Tyto změny způsobují skokové změny tlumící síly a prudké změny zrychlení. Pro odstranění těchto jevů se regulátory vybavují tvarovacími funkcemi, které nespojitosti v řízení odstraní. Podrobněji je tato problematika popsána v [9].

# Kapitola 6

## Rekuperace energie

Protože energetická náročnost elektrického tlumení automobilu je relativně vysoká, je vhodné využít možnosti získání části elektrické energie zpět z motoru pomocí rekuperace. Přeměna elektrické energie na mechanickou a naopak vychází ze vztahů vzájemného působení magnetického pole na vodič, protékající proudem a ze vztahů pro indukované napětí. Princip rekuperace energie je u lineárních elektrických motorů přibližně stejný, jako u motorů rotačních.

Podmínky, za kterých motor může dodávat energii do zdroje, je vhodné ukázat na zjednodušeném modelu stejnosměrného motoru na obrázku 6.1.



Obrázek 6.1: Zjednodušené schéma stejnosměrného motoru

Elektrický motor je spojen s mechanickou soustavou hřídelí, popřípadě ukotvením u lineárního motoru. Tato soustava se spolu s rotorem vůči statoru pohybuje rychlostí  $v > 0$ . Indukované elektromotorické napětí  $U_e$  bude mít při tomto otáčení kladnou hodnotu. Ze zákona o zachování energie můžeme napsat rovnost (14) mezi mechanickým výkonem  $P_m$  a výkonem elektromotorickým (pro zjednodušení neuvažujeme mechanické ztráty vzniklé třením).

$$\begin{aligned}
 P_m &= P_e \\
 P_m &= F \cdot v \\
 P_e &= U_e \cdot I
 \end{aligned} \tag{14}$$

V těchto rovnicích je  $F$  síla vytvořená motorem a  $I$  je proud protékající vinutím motoru. Pokud motor pracuje jako pohon, síla  $F$  a rychlosť  $v$  mají stejné znaménko. Pro takový režim činnosti můžeme napsat podmínky pro jednotlivé veličiny (15).

$$F > 0, P_m > 0, P_e > 0, I > 0 \tag{15}$$

Napětí zdroje  $U$  tedy musí být větší než elektromotorické napětí  $U_e$  a výkon motoru je:

$$P_p = U \cdot I > 0 \tag{16}$$

Energii do motoru tedy dodáváme. Pokud bude motor pracovat jako brzda, platí pro veličiny následující podmínky:

$$F < 0, P_m < 0, P_e < 0, I < 0 \tag{17}$$

Napětí zdroje  $U$  tak musí být menší, než napětí elektromotorické  $U_e$ . Proud v tomto režimu je záporný a  $U$  tak musí být v rozsahu  $0 < U < U_e$ .

Pokud je zapotřebí brzdit větší silou, než kterou vyvine motor s napětím zdroje v tomto rozmezí, je zapotřebí napětí zdroje  $U < 0$ . V takovém případě opět energii do motoru dodáváme. Z toho vyplývá, že pro rekuperaci energie do zdroje je zapotřebí brzdit pouze omezenou silou.

U synchronního lineárního motoru je situace složitější, protože při konstantní rychlosti posuvu  $v$  má indukované napětí sinusový průběh, a jednotlivé fáze jsou posunuty o  $120^\circ$ . Stejně tak proud jednotlivými vinutími je řízen podle aktuální hodnoty magnetického pole a jeho průběh je při konstantní rychlosti také sinusový. Pro tyto motory je vhodné zvolit frekvenční měniče s možnou rekuperací energie do trojfázové sítě.

# Kapitola 7

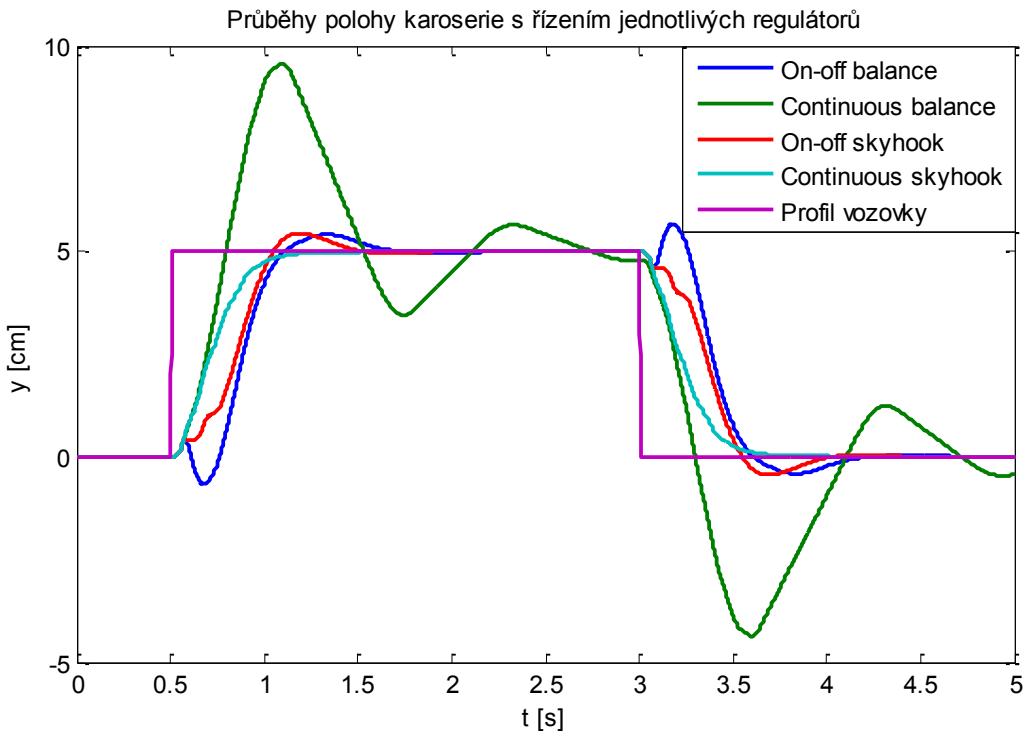
## Chování systému

### 7.1 Porovnání jednotlivých regulátorů

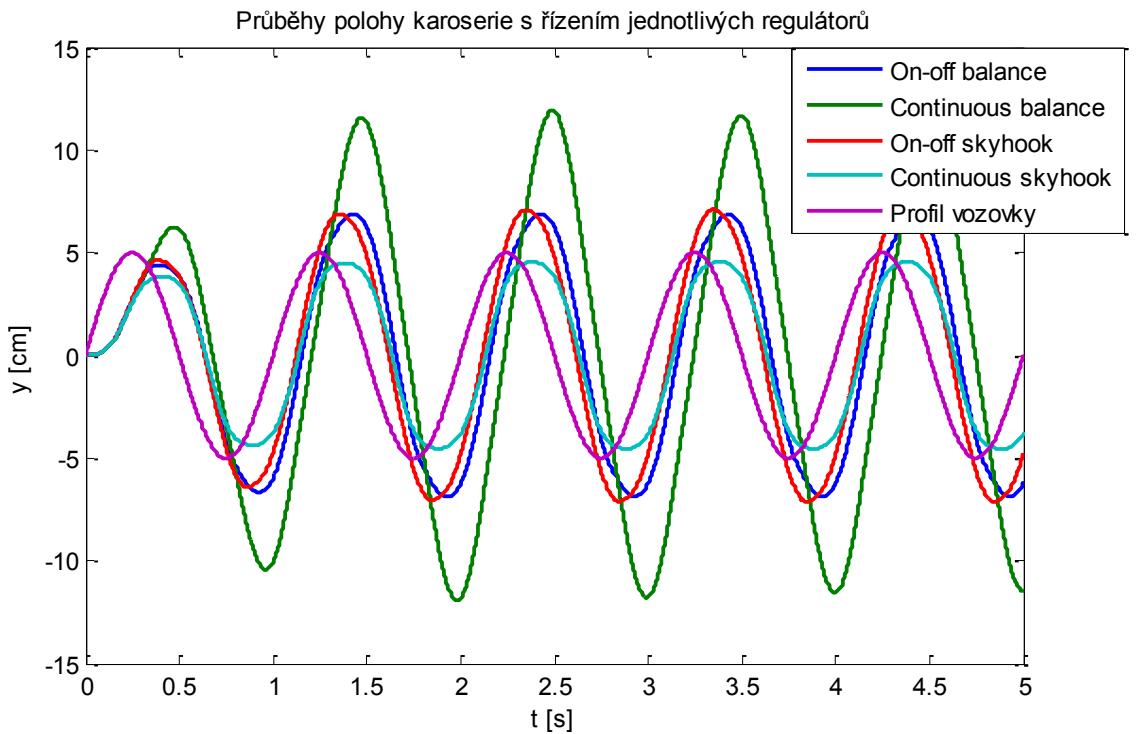
Pro zjištění vlastností jednotlivých regulátorů semiaktivního tlumení je použit model zavěšení s proměnnou konstantou tlumení spolu s regulátorem, který danou konstantu nastavuje. Pro simulaci chování modelů je použito prostředí Simulink v programu Matlab. Všechny modely použité při simulacích jsou na přiloženém CD a v příloze.

Pro porovnání odezvy regulátorů je použit jako výstup soustavy poloha karoserie a vstupní signál je profil vozovky. Jako testovací vstupní signály jsou zvoleny: obdélníkový průběh o velikosti 5 cm se skoky v čase 1 s a 3 s a strmostí hran 5 m/s (obrázek 7.1), sinusový průběh s frekvencí 1 Hz s amplitudou 5 cm (obrázek 7.2), pilovitý průběh s frekvencí 0,5 Hz a amplitudou 5 cm (obrázek 7.3) a náhodný průběh (obrázek 7.4).

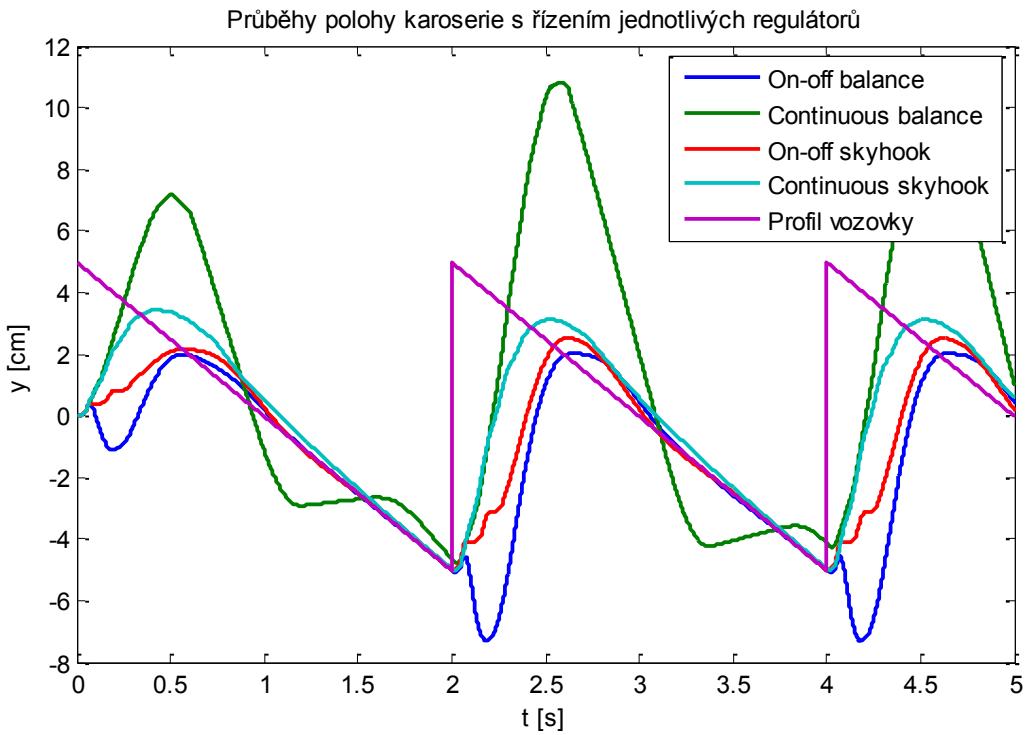
Z jednotlivých odezv je vidět, že nejlepší vlastnosti vykazuje spojitý regulátor typu skyhook. Ze všech testovaných regulátorů má při skokové změně profilu vozovky nejmenší překmit a to nulový. Dále je z obrázku 7.1 vidět rychlé ustálení polohy karoserie pro tento regulátor (přibližně 0,5 s). Při profilu vozovky ve tvaru sinusového signálu má kmitání karoserie s tímto regulátorem nejmenší amplitudu. Vzhledem k těmto je spojitý regulátor skyhook zvolen pro porovnání vlastností semiaktivního tlumení s pasivním tlumením automobilu.



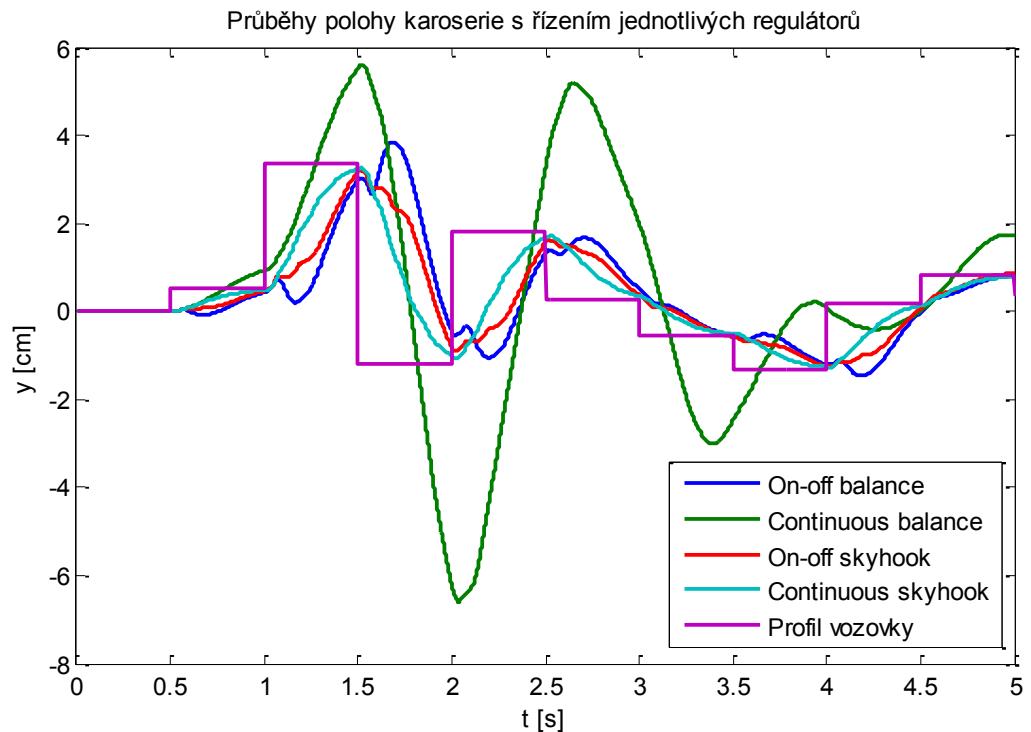
Obrázek 7.1: Změna polohy karoserie s různými regulátory při obdélníkovém signálu



Obrázek 7.2: Změna polohy karoserie s různými regulátory při sinusovém signálu



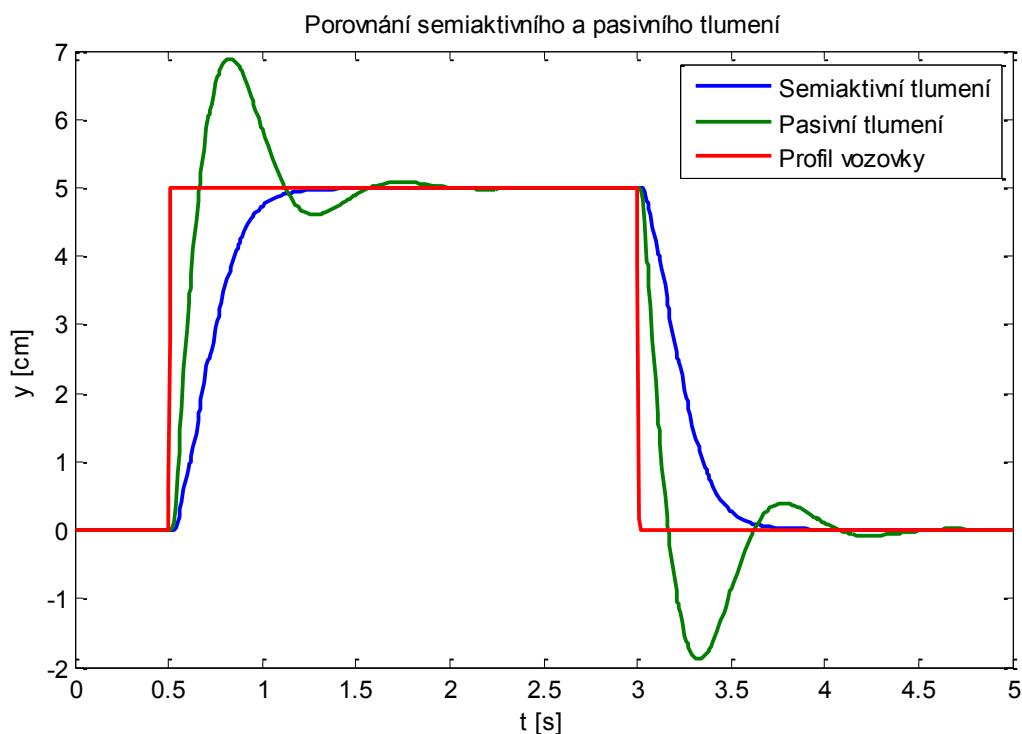
Obrázek 7.3: Změna polohy karoserie s různými regulátory při pilovitém signálu



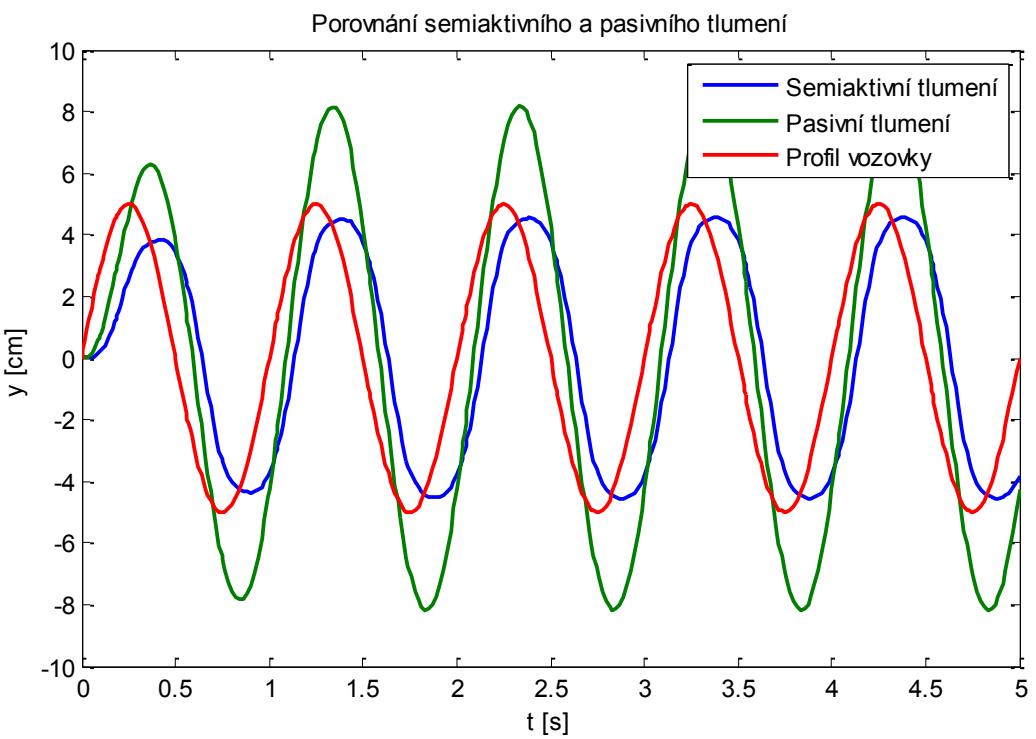
Obrázek 7.4: Změna polohy karoserie s různými regulátory při náhodném signálu

## 7.2 Porovnání s pasivním tlumením

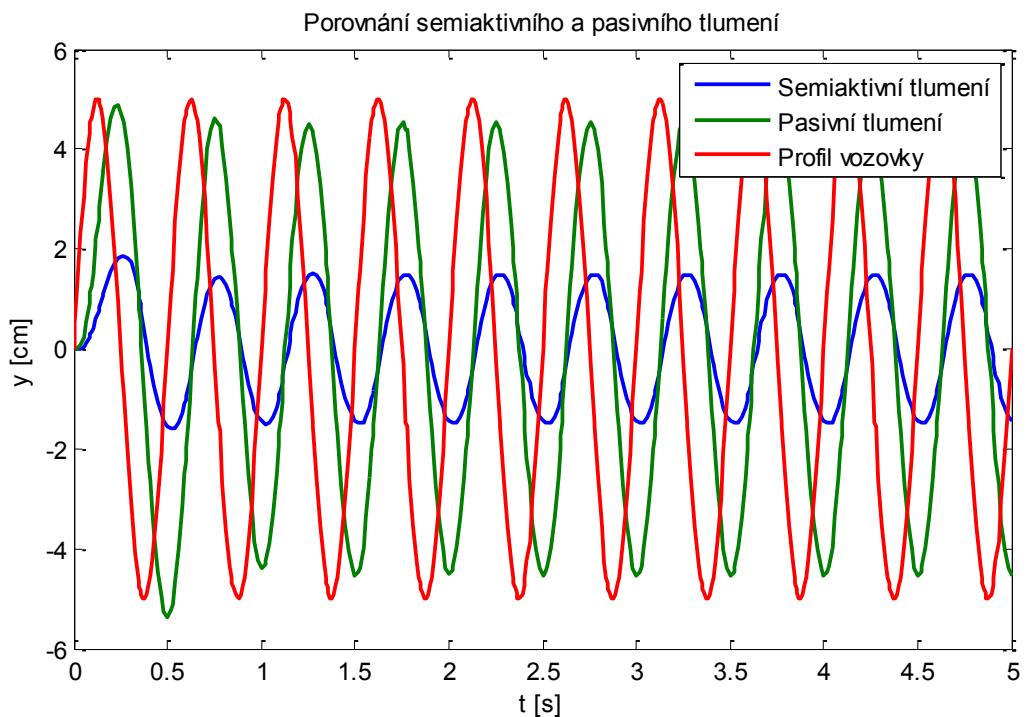
Pro porovnání semiaktivního a pasivního systému tlumení pérování automobilu jsme opět zvolili průběhy, na kterých je nejlépe možné pozorovat výhody semiaktivního tlumení. Při profilu vozovky ve tvaru obdélníkového signálu na obrázku 7.5 vidíme nulový překmit a rychlejší ustálení semiaktivního tlumení oproti pasivnímu. Při přejízdění pravidelných nerovností, které jsou zde simulovány sinusovým průběhem profilu vozovky, je důležité potlačení vysokých frekvencí. Z obrázků 7.6 a 7.7 lze vyčíst, že semiaktivní tlumení má menší amplitudu výchylky odpružené hmoty než systém pasivní a rozdíl mezi systémy se zvětšuje s rostoucí frekvencí. Z dalších průběhů vidíme, že odezva semiaktivního tlumení na nerovnosti vozovky je plynulejší a vhodně kopíruje průměrný sklon vozovky.



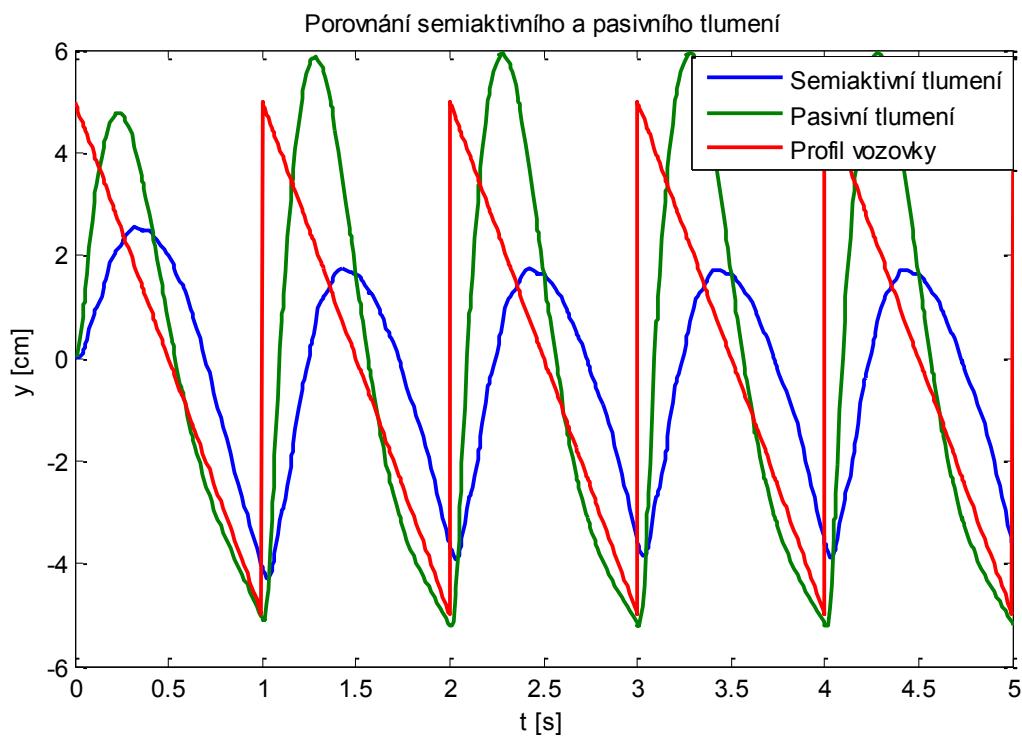
Obrázek 7.5: Porovnání pro obdélníkový profil vozovky



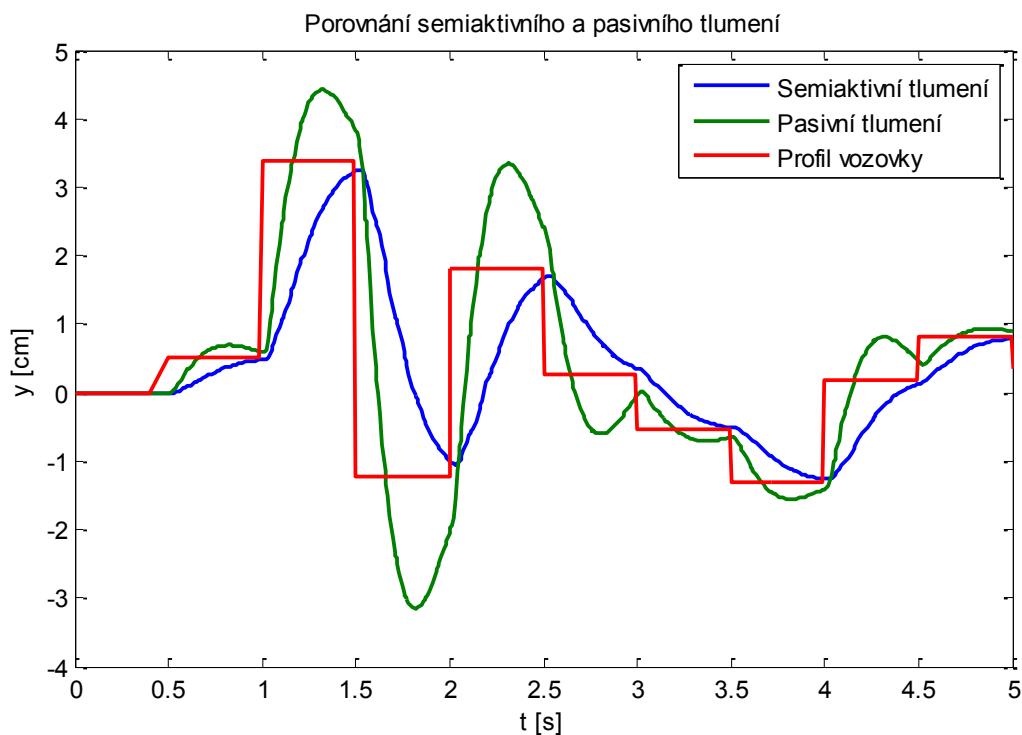
Obrázek 7.6: Porovnání pro sinusový profil vozovky s frekvencí 1 Hz



Obrázek 7.7: Porovnání pro sinusový profil vozovky s frekvencí 2 Hz

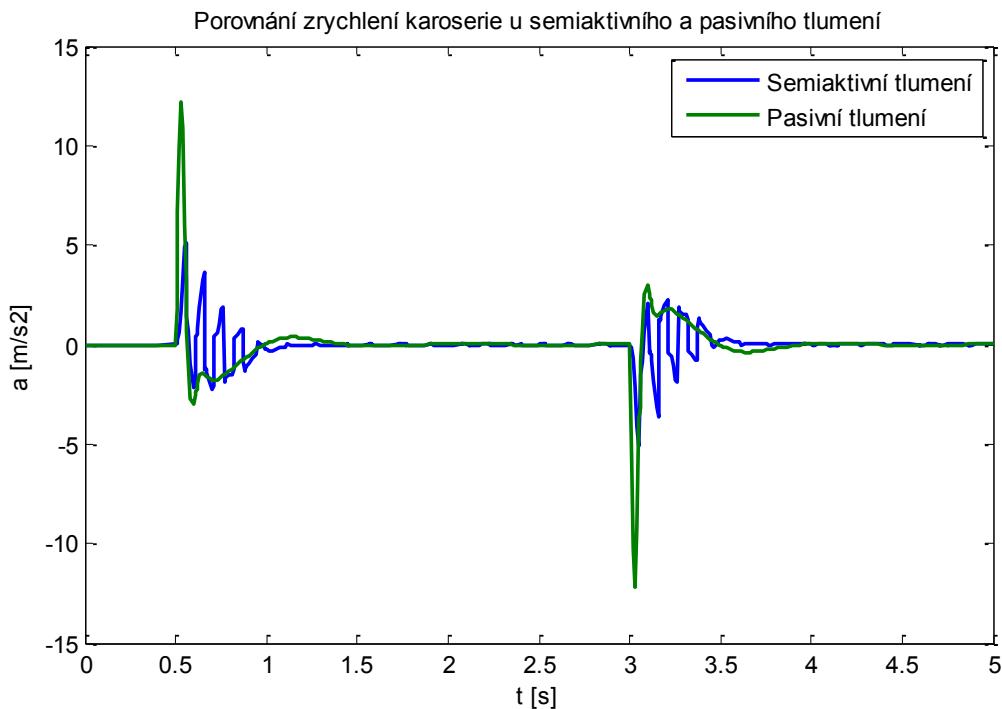


Obrázek 7.8: Porovnání pro pilovitý profil vozovky s frekvencí 1 Hz

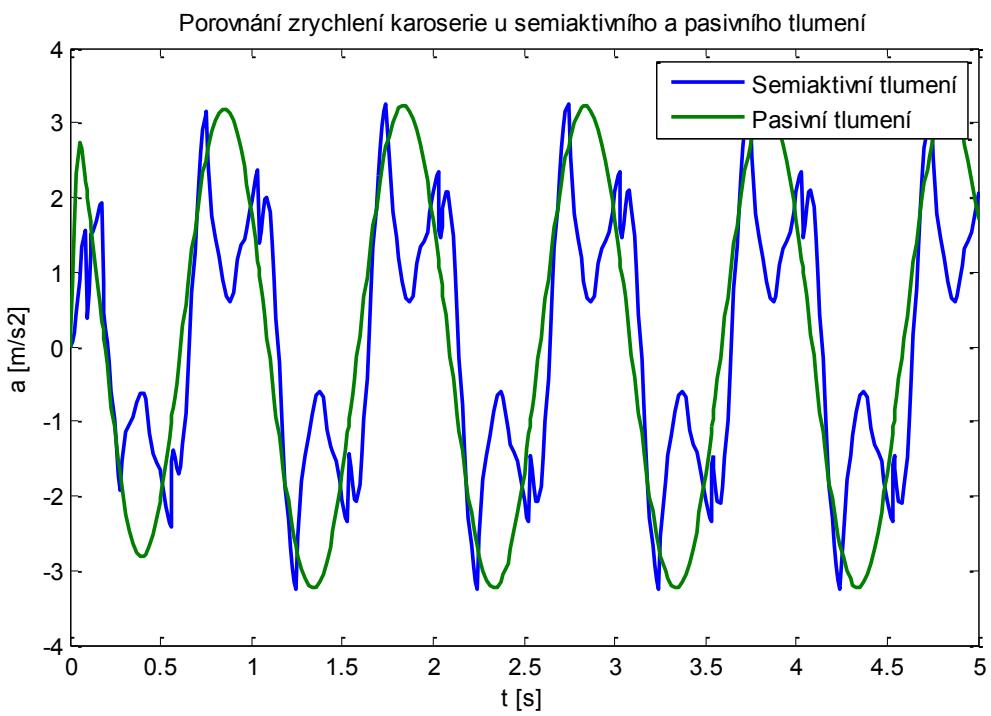


Obrázek 7.9: Porovnání pro náhodný profil vozovky

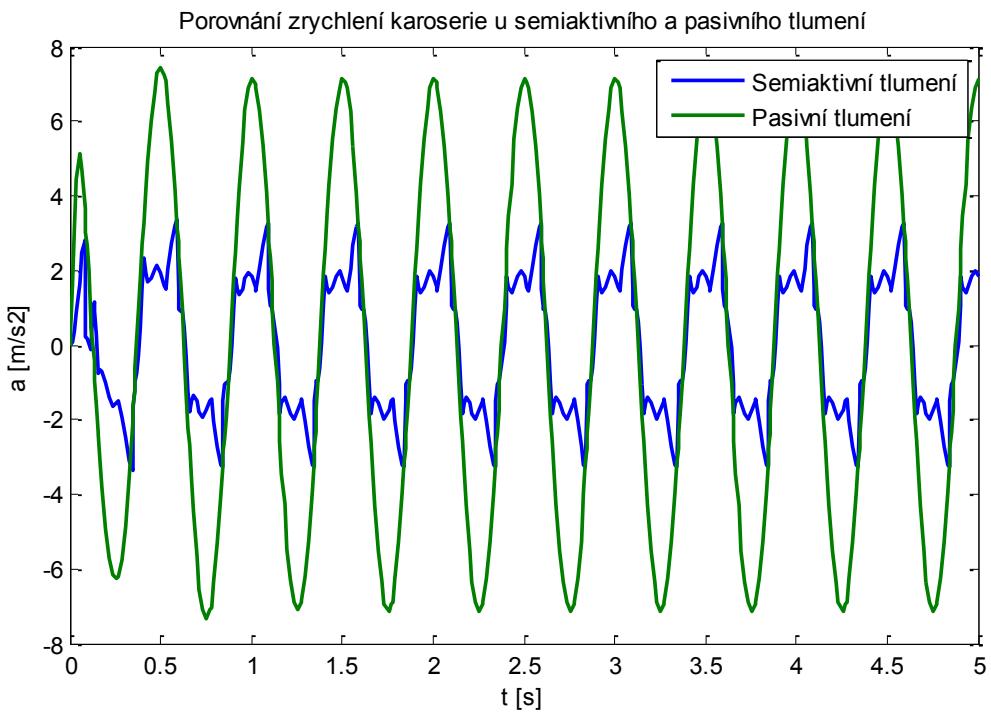
Pro posouzení komfortu posádky je vhodné porovnat průběhy zrychlení karoserie, které určují síly působící na osoby ve vozidle. Z následujících průběhů lze vyčíst, že maximální hodnoty zrychlení jsou u semiaktivního tlumení buď menší, nebo stejné jako u pasivního tlumení. Výrazný rozdíl ve zrychlení je při simulaci přejíždění nerovností s profilem sinusového průběhu, zvláště se zvětšující se frekvencí kmitání. Další vlastnost, které si lze všimnout jsou skokové změny ve zrychlení u semiaktivního tlumení. Tyto změny jsou způsobeny nelinearitou řízení takového systému, jak je uvedeno v kapitole 5. Takovýmto změnám se lze vyhnout použitím tvarovací funkce pro řízení konstanty tlumení.



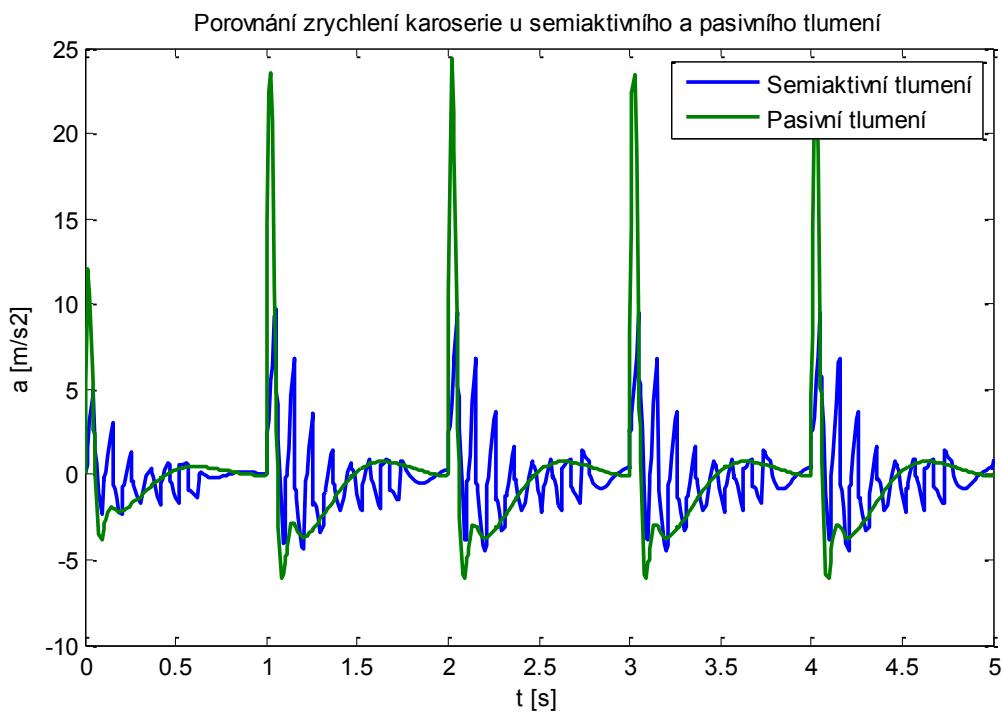
Obrázek 7.10: Průběhy zrychlení karoserie při obdélníkovém profilu vozovky



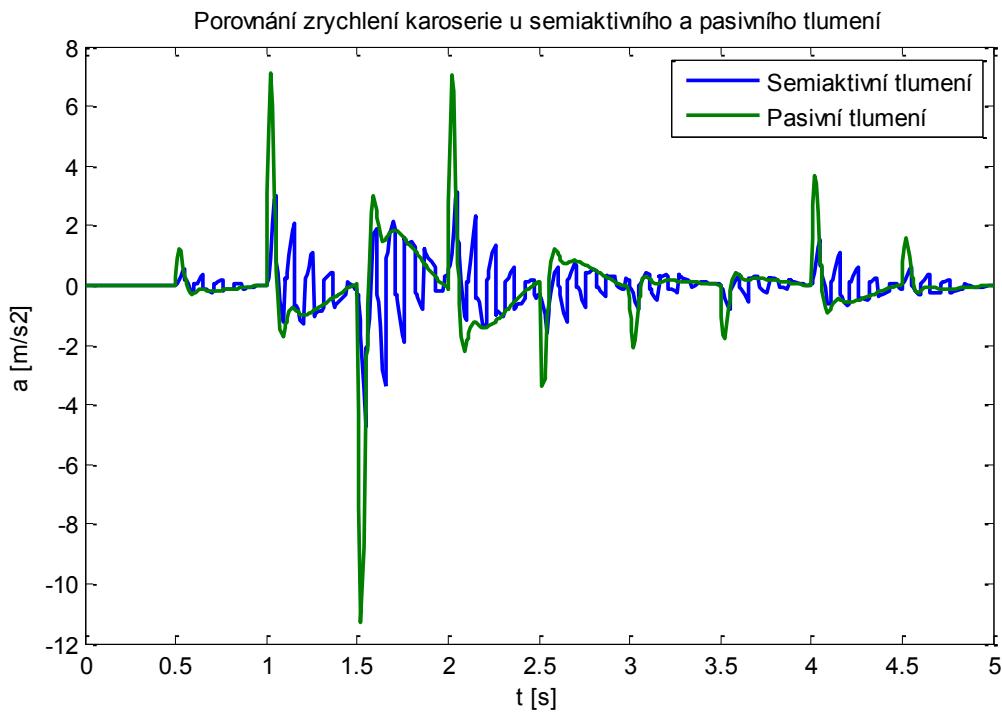
Obrázek 7.11: Průběhy zrychlení karoserie při sinusovém profilu vozovky ( $f = 1\text{Hz}$ )



Obrázek 7.12: Průběhy zrychlení karoserie při sinusovém profilu vozovky ( $f = 2\text{Hz}$ )



Obrázek 7.13: Průběhy zrychlení karoserie při pilovitém profilu vozovky ( $f = 1\text{Hz}$ )



Obrázek 7.14: Průběhy zrychlení karoserie při pilovitém profilu vozovky ( $f = 1\text{Hz}$ )

# Kapitola 8

## Závěr

Ve své práci jsem se seznámil se základními požadavky na tlumení pérování automobilu, se základními vlastnostmi lineárních elektromotorů a jejich konstrukcí. Pro použití lineárního elektrického motoru jako semiaktivního tlumiče pérování automobilu jsem zjistil, že jako vhodný druh motoru je lineární synchronní motor v symetrickém provedení ve tvaru válce. Pro simulace chování tohoto motoru jsem použil model v programu Matlab, konkrétně v prostředí Simulink. Pro tento model jsem upravil řízení proudu, aby se motor choval jako tlumič s proměnnou konstantou tlumení vhodný pro použití v semiaktivním systému tlumení.

Z pohybových rovnic pro čtvrtinový model automobilu jsem sestavil model tlumení pérování. Tento model jsem použil pro simulaci pasivního a semiaktivního tlumení. Pro nastavení konstanty tlumení jsem použil různé strategie řízení pro semiaktivní tlumení: řízení na základě přiblížení k ideálnímu tlumení typu skyhook a řízení, založené na vyrušení síly pružiny. Obě řízení existují ve spojité a dvoustavové verzi.

V kapitole 6 jsem naznačil možnosti rekuperace energie z motoru. Možnosti získávání energie z lineárních elektrických motorů v automobilech jsou zejména důležité pro elektromobily a hybridní vozidla.

V poslední části práce jsem na základě testovacích signálů, simulujících profil vozovky, vyhodnotil vlastnosti semiaktivních systémů tlumení s různým řízením konstanty tlumení. Nejlepší výsledky vykazovalo spojité řízení na základě skyhook tlumiče. Následně jsem porovnal výsledky tlumení semiaktivního systému s tímto řízením a pasivního systému tlumení. Nejdříve jsem provedl simulace pro změny polohy karoserie v závislosti na různých profilech vozovky. Pro posouzení komfortu posádky jsem poté sledoval průběh zrychlení karoserie opět v závislosti na různých profilech vozovky.

Z výsledků simulací vyplývá, že semiaktivní systém tlumení pérování vykazuje mnohem lepší tlumící vlastnosti oproti čistě pasivnímu systému. Je to dáno možností plynule regulovat konstantu tlumení podle nastalé situace a tím určovat sílu, jakou bude tlumič vyvíjet na soustavu.

Z hlediska zlepšení jízdních vlastností by bylo vhodné používat v automobilech semiaktivních systémů tlumení. U některých automobilů se s takovými systémy můžeme setkat (například systém CDC - continuous damping control). Většina používaných aktivních a semiaktivních systémů namísto lineárního elektrického motoru používá mechanických tlumičů s možností měnit v určitém rozsahu konstantu tlumení. Důvodem jsou nižší energetické nároky takových systémů a většinou i nižší cena.

# Literatura

- [1] SOUČEK, P., BUBÁK, A. *Vysoko dynamické pohony posuvů obráběcích strojů*. 1. vyd. Praha: Společnost pro obráběcí stroje, 2002. ISBN 80-238-8426-3.
- [2] VUES Brno s.r.o. [online]. [cit. 2012-05-10]. Dostupné z: <http://www.vues.cz>
- [3] ELEKTRO: Odborný časopis pro elektrotechniku. [online]. [cit. 2012-05-10]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz>
- [4] Electromechanical Systems & Actuators. [online]. [cit. 2012-05-10]. Dostupné z: <http://emsa.gastli.net/>
- [5] NTI AG - LinMot & MagSpring. [online]. [cit. 2012-05-10]. Dostupné z: <http://www.linmot.com>
- [6] Znamenáček K., *Lineární motor jako akční člen aktivního tlumiče*, Praha, 2004
- [7] Chaloupek J., *Teoretická omezení v systémech pasivního a aktivního tlumení*, Praha, 2006
- [8] Kruml M., *Pasivní tlumení automobilu s lineárním elektrickým motorem*, Praha, 2009
- [9] LIU, Y, T.P WATERS a M.J. BRENNAN. *A comparison of semi-active damping control strategies for vibration isolation of harmonic disturbances*. [online]. [cit. 2012-05-10]. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsv.2003.11.048>.

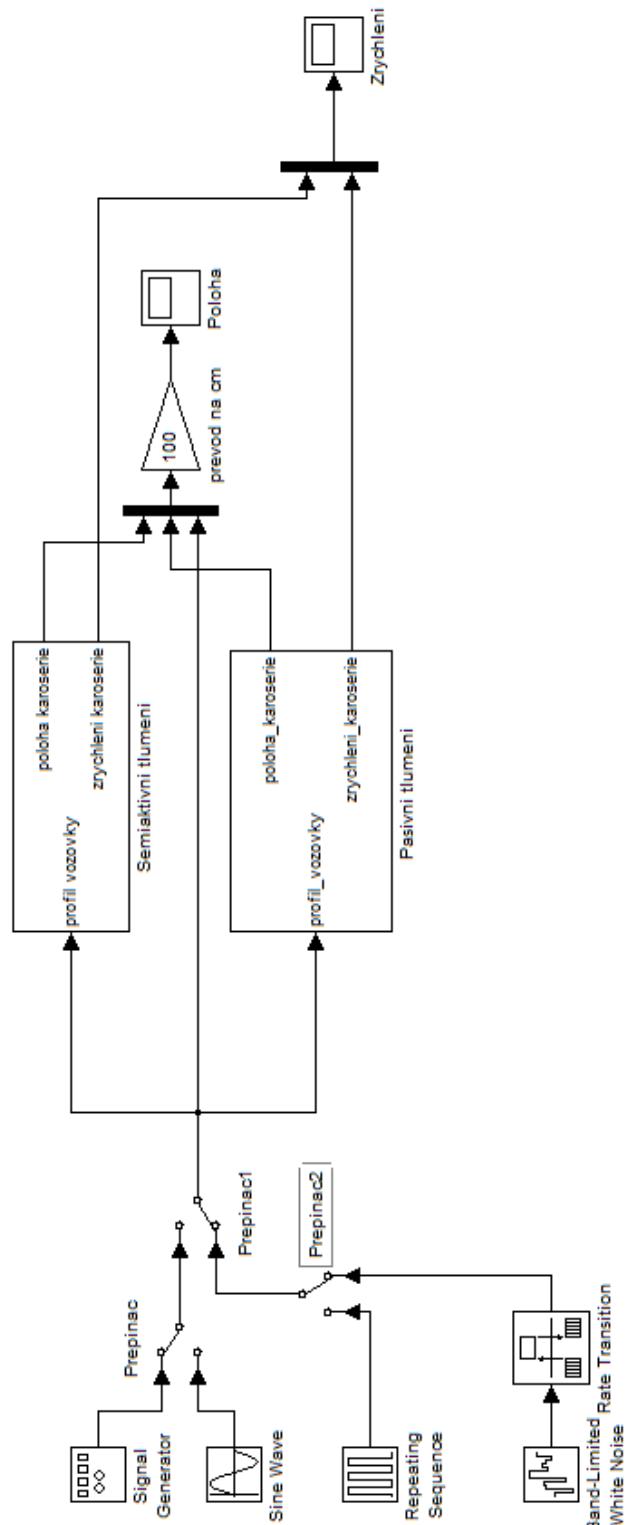
## A.1 Příloha - soubor: semiaktiv.m

```
%% konstanty pro model tlumeni
mo = 250;          % hmotnost 1/4 automobilu [kg]
mn = 35;           % hmotnost kola [kg]
kp = 15000;         % tuhost pružiny pérování [N/m]
kt = 115000;        % tuhost pneumatiky [N/m]
bt = 2000;          % konstanta tlumení pasivního tlumiče [N.s/m]
bmin = 0;           % minimální konstanta tlumení regulátorů [N.s/m]
bsky = 6000;         % konstanta tlumení skyhook tlumiče [N.s/m]
% maximální konstanta tlumení spojitého skyhook řízení [N.s/m]
bmax_cont_skyhook = 7000;
% maximální konstanta tlumení spojitého balance řízení [N.s/m]
bmax_cont_bal = 7000;
% maximální konstanta tlumení dvoustavového balance řízení [N.s/m]
bmax_on_off_bal = 3000;
% maximální konstanta tlumení dvoustavového skyhook řízení [N.s/m]
bmax_on_off_sky = 2500;

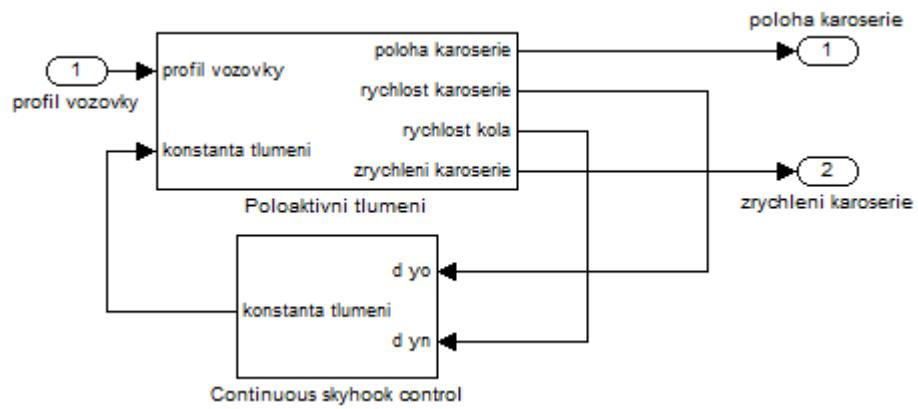
% testovací obdélníkový průběh s konečnou strmostí hran
time = [0, 0.5, 0.51, 3, 3.01, 5];
profil = [0, 0, 0.05, 0.05, 0, 0];

% konstanty modelu motoru
L_k1 = 107;          %[V.s/m] napěťová konstanta
L_m = 6;              %[kg] hmotnost rotoru
L_Fc = 1;              %[N] Coulombova třecí síla
L_bv = 10;             %[N.s/m] viskózní třecí síla
L_k2 = 93;             %[N/A] silová konstanta motoru
L_s0 = 0.0712/2;       %[m] délka elektrického cyklu
L_Rs = 16;             %[ohm] odpór vinutí
L_Ls = 0.0213;          %[H] indukčnost vinutí
L_fi = [0 2*pi/3 -2*pi/3]; %[rad] vzájemný posun fází
```

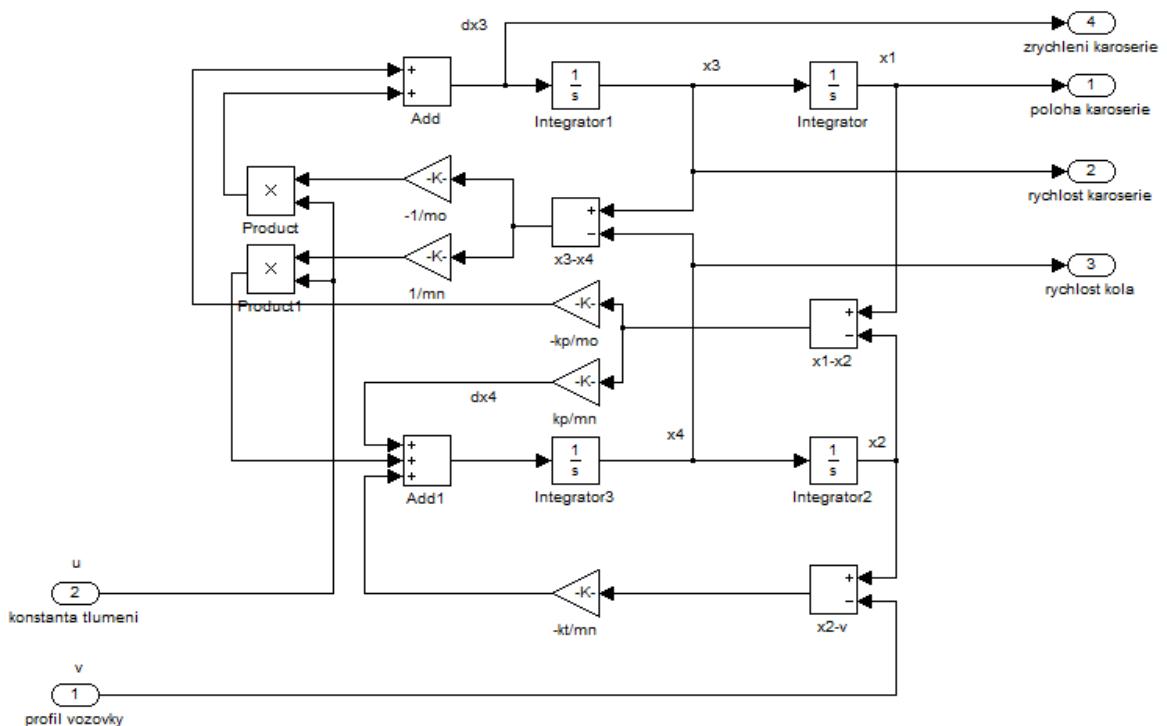
## A.2 Příloha – simulační modely



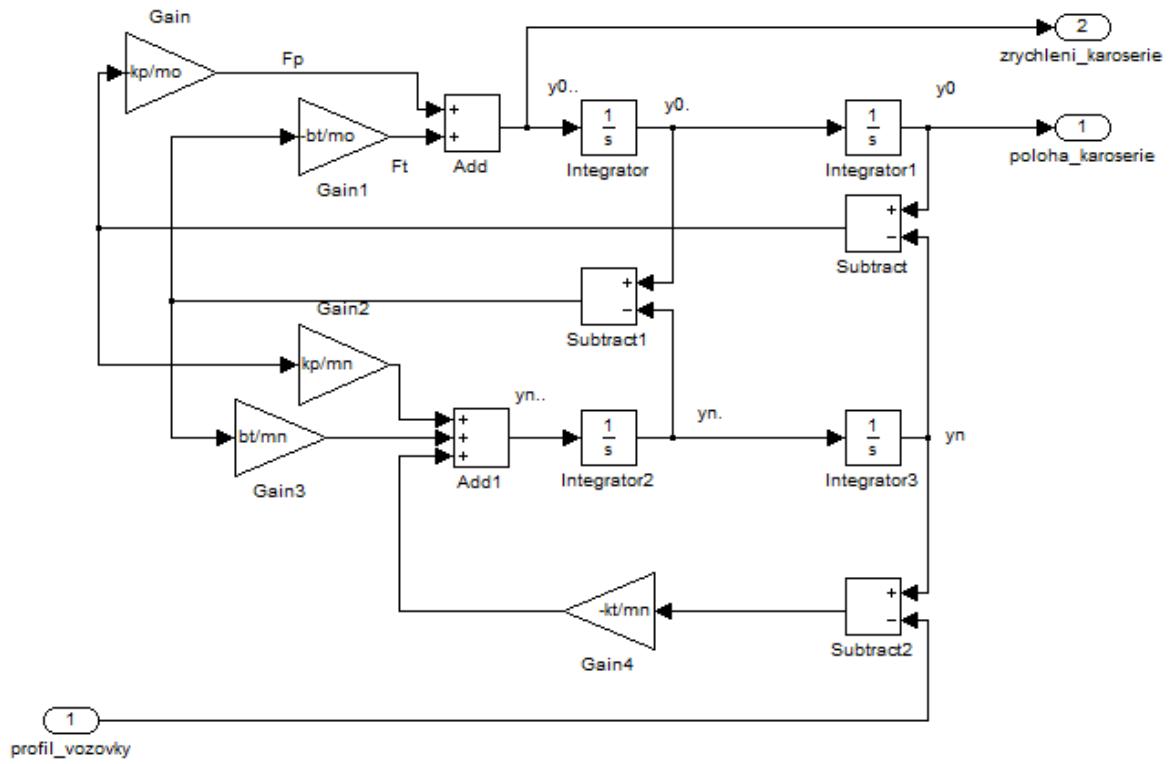
Obrázek A.1: Schéma pro porovnání semiaktivního a pasivního tlumení



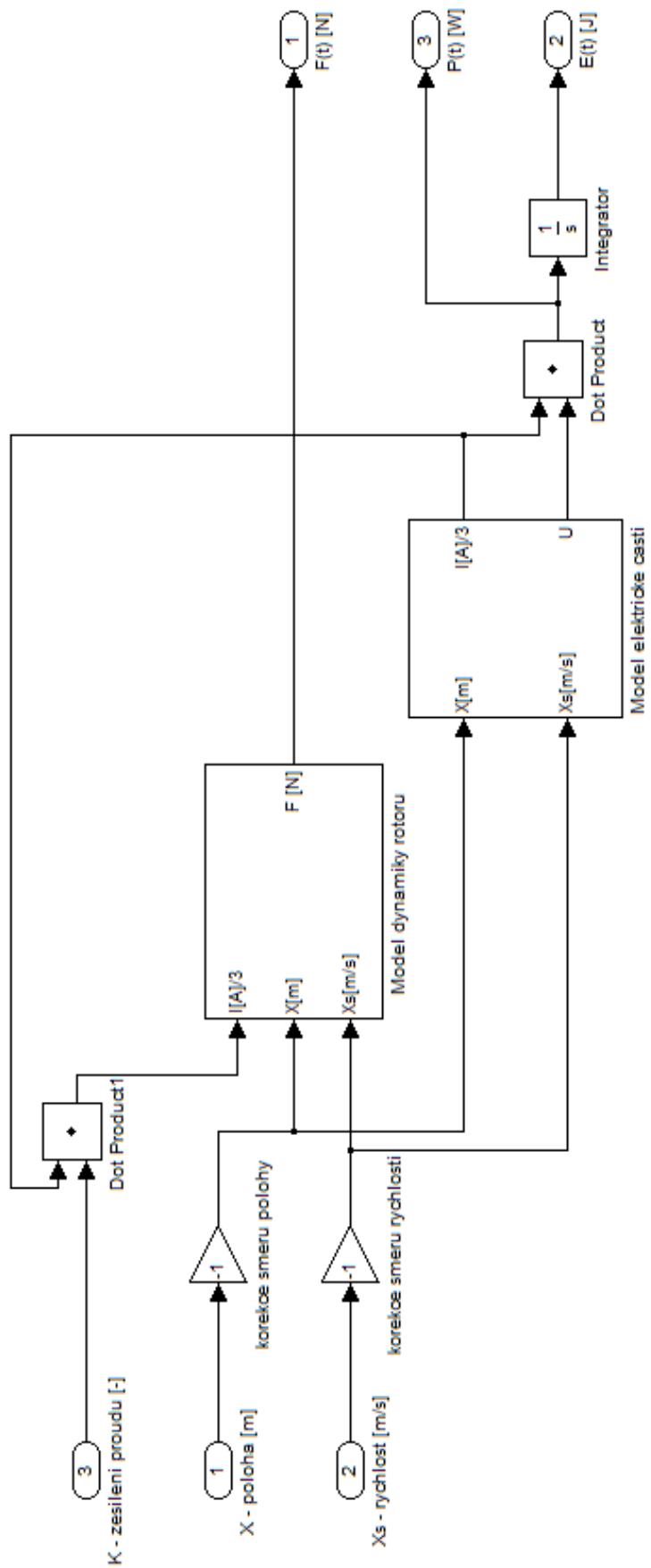
Obrázek A.2: Schéma semiaktivního tlumení s řízením konstanty tlumení



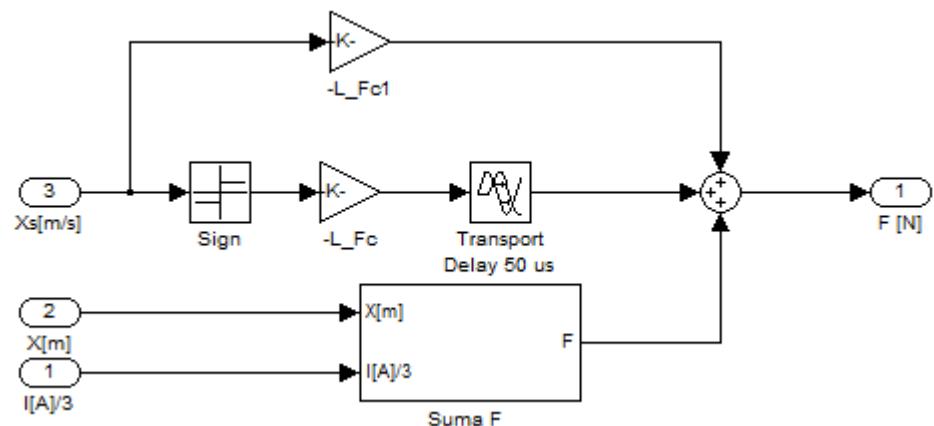
Obrázek A.3: Model ideálního semiaktivního tlumení



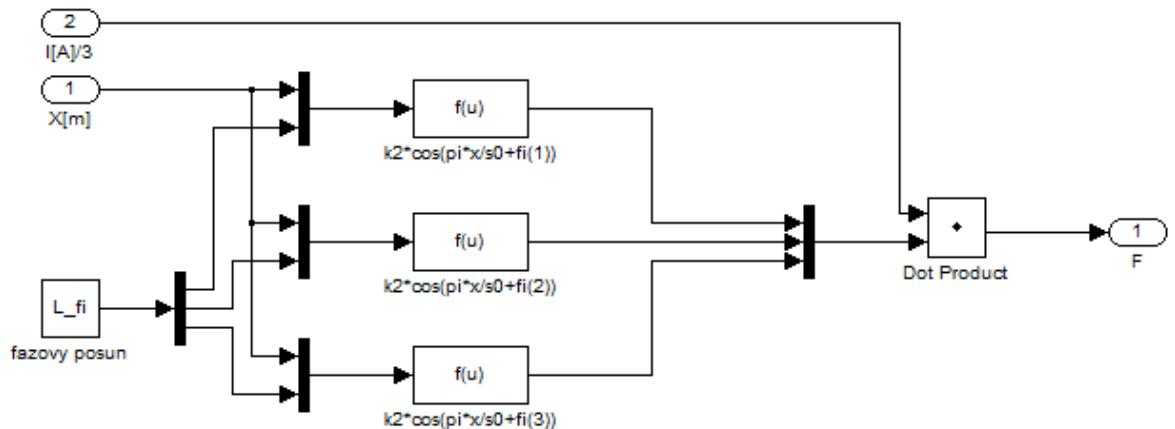
Obrázek A.4: Model pasivního tlumení



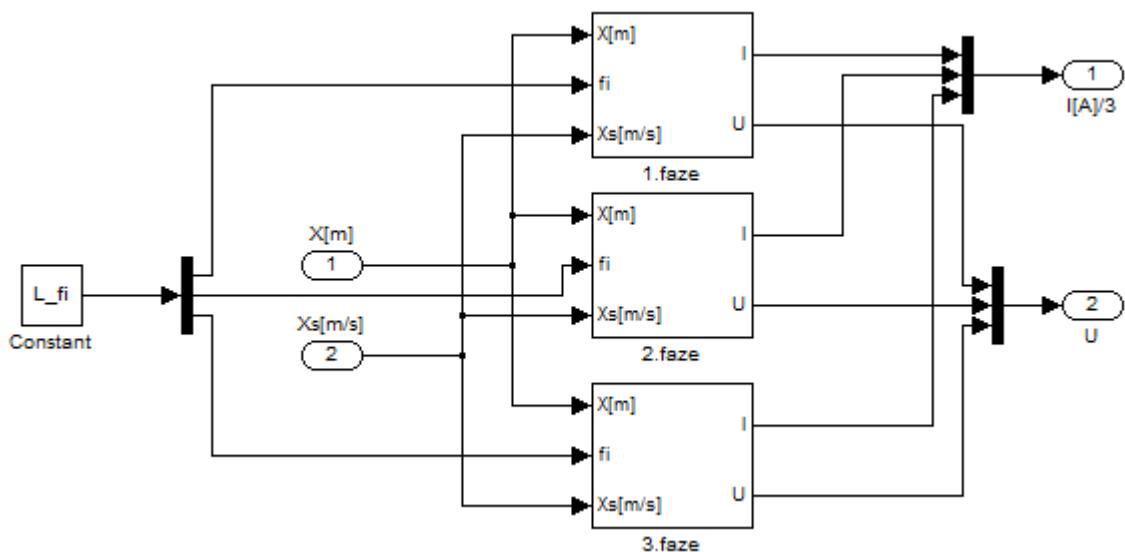
Obrázek A.5: Model lineárního motoru



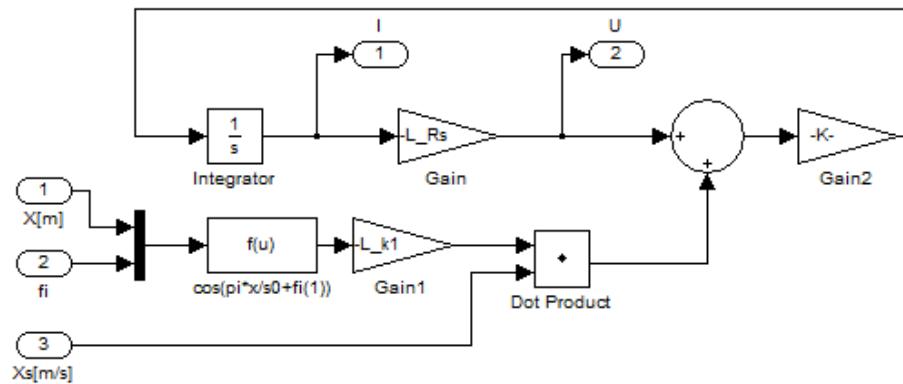
Obrázek A.6: Model dynamiky rotoru



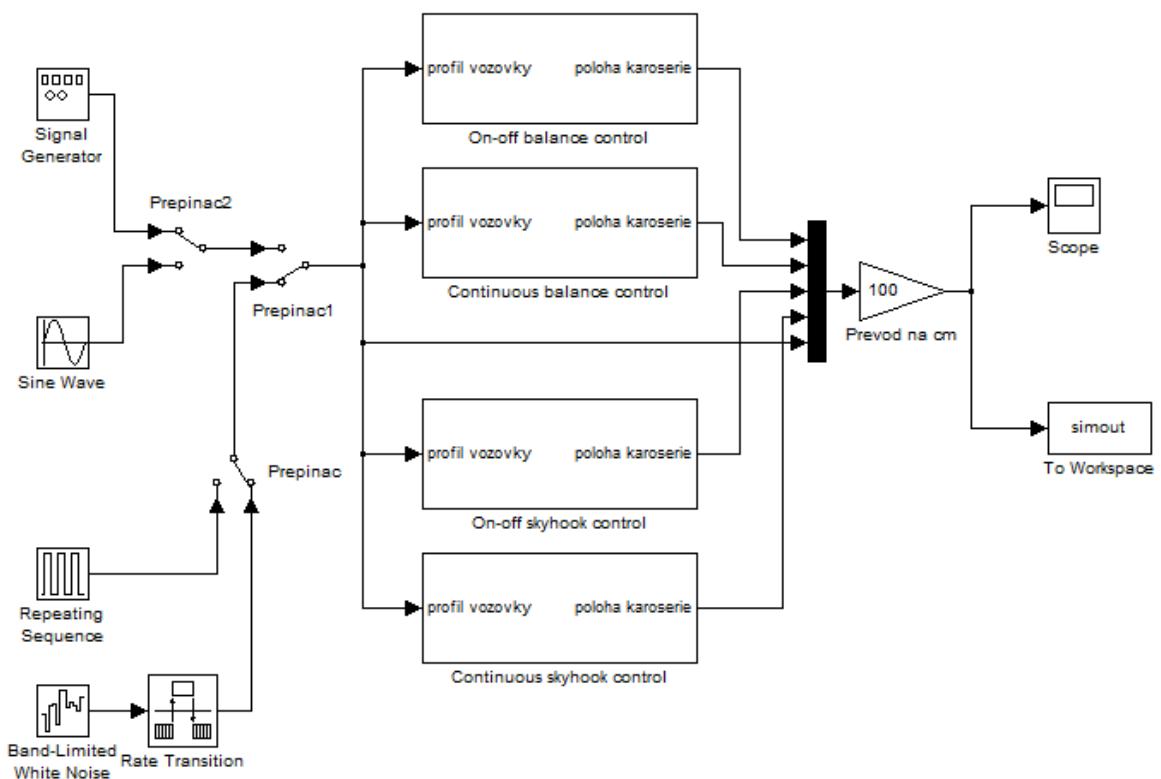
Obrázek A.7: Blok Suma F – součet silového působení vinutí



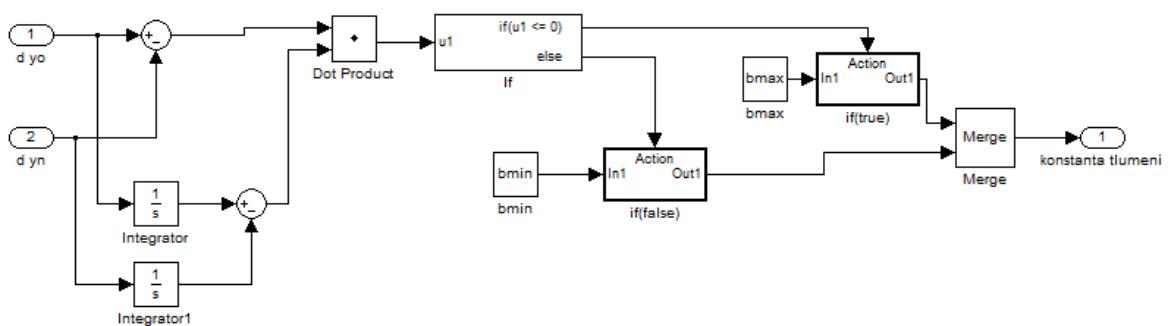
Obrázek A.8: Model elektrické části



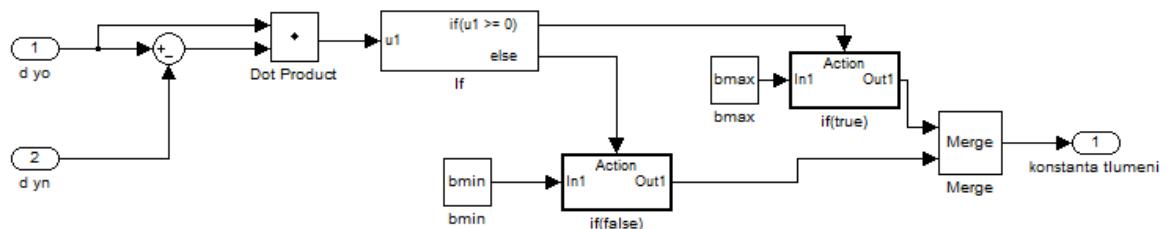
Obrázek A.9: Model jedné fáze



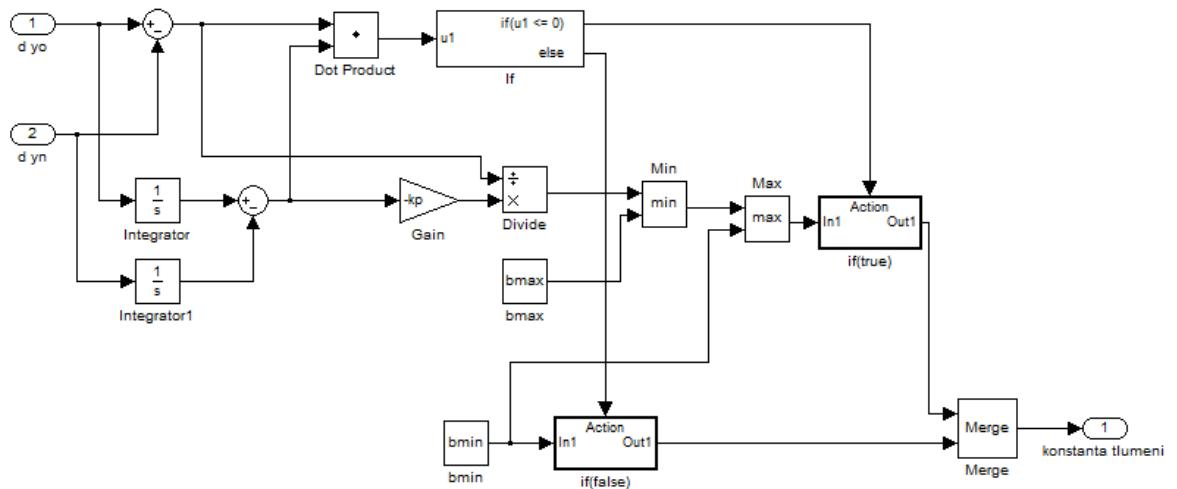
Obrázek A.10: Schéma pro porovnání regulátorů



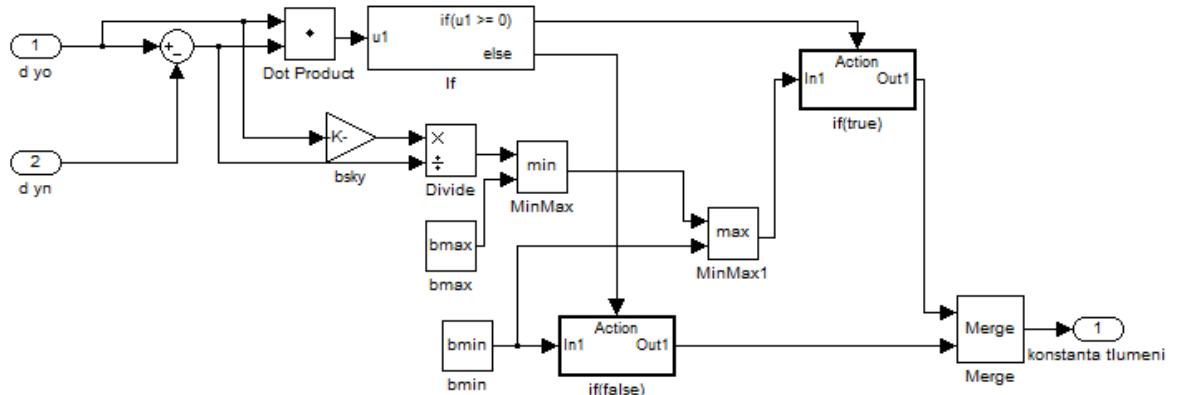
Obrázek A.11: Model dvoustavového vyvažujícího řízení



Obrázek A.12: Model dvoustavového skyhook řízení



Obrázek A.13: Model spojitého vyvažujícího řízení



Obrázek A.14: Model spojitého skyhook řízení