

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Aktivní tlumení pérování automobilu

Praha, 2006

Autor: Aleš Kozojed

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu.

V Praze dne _____

podpis

Poděkování

Děkuji především vedoucímu bakalářské práce,
panu Doc. Ing. Antonínu Stříbrskému, CSc. za jeho trpělivost a vstřícný přístup.

Abstrakt

V této bakalářské práci se zabývám návrhem fuzzy regulátoru pro systém aktivního tlumení automobilu.

Použití aktivního pérování automobilu má dva hlavní důvody použití. Prvním je zvýšení komfortu pro posádku vozidla, druhým je zlepšení jízdních vlastností automobilu. Tyto dva požadavky se však navzájem vylučují, nelze je tedy splnit použitím pouze pasivního tlumení.

Regulátor pro aktivní tlumení jsem postupně navrhoval pro čtvrtinový a poloviční model automobilu.

Základem čtvrtinového modelu jsou kolo, péro, tlumič a akční člen. Jako akční člen je zde uvažován lineárně řízený zdroj síly. Jako vstupy jsou zde používány rychlost podvozku, zrychlení podvozku a rychlost kola.

Poloviční model automobilu je složen ze dvou modelů čtvrtinových, s tím, že se zde navíc využívají informace z těžiště podvozku. Jedná se o rychlost a zrychlení těžiště modely.

Regulátory jsou navrženy tak, aby minimalizovali jak výchylku kola, tak podvozku. Z provedených simulací vyplývá, že navrhované aktivní tlumení řízené fuzzy regulátorem výše zmíněné požadavky splnilo.

Abstract

I design in this bachelor thesis an automotive active suspension controller using fuzzy theory.

Using of an automotive active suspension has two main reasons. The first is increasing ride comfort and the second is improving handling performance. This requirements are contradictory and it's impossible to satisfy them with passive suspension simultaneously.

I design the controler for automotive active suspension I design at first for a quarter car model, then for a half car model.

The basic parts of the quater car model are wheel, feather, inhibitor and actuator. As actuator I think a linear driving source of power. The quater model has folowing inputs: undercar speed, undercar acceleration and wheel speed.

The half car models consists of two quater car models. Compared with the quater car model the half model uses folowing informations from the undercar: centre of gravity speed, centre of gravity acceleration.

Controllers are designed for minimalization both deviation from wheel and undercar. From executed simulation passes that the designed active car suspension whith fuzzy controller realizes all our requirements.

Seznam použitých zkratek

- NV – záporné velmi velké (Negative Very Big)
- NB – záporné velké (Negative Big)
- NM – záporné středně velké (Negative Medium)
- NS – záporné malé (Negative Small)
- ZE – nulové (ZEro)
- PS – kladné malé (Positive Small)
- PM – kladné středně velké (Positive Medium)
- PB – kladné velké (Positive Big)
- PV – kladné velmi velké (Positive Very Big)

Obsah

Seznam obrázků	ix
Seznam tabulek	xii
1 Úvod	1
2 Popis modelu	3
2.1 Čtvrtinový model	3
2.1.1 Stavový popis čtvrtinového modelu	5
2.1.2 Čtvrtinový model v simulinku	8
2.2 Poloviční model	9
2.2.1 Stavový popis polovičního modelu	11
2.2.2 Poloviční model v simulinku	15
3 Návrh fuzzy regulátoru	18
3.1 Fuzzyfikace	19
3.1.1 Funkce příslušnosti čtvrtinového modelu	20
3.1.2 Funkce příslušnosti polovičního modelu	23
3.2 Tvorba pravidel	24
3.2.1 Pravidla čtvrtinového modelu	24
3.2.2 Pravidla polovičního modelu	26
3.3 Infereční mechanismus	28
3.4 Defuzzyfikace	30
4 Fuzzy řízení	32
4.1 Aktivní tlumení čtvrtinového modelu	32
4.1.1 Odezva čtvrtinového modelu na jednotkový skok	33
4.1.2 Odezva čtvrtinového modelu na bílý šum	37

4.1.3	Robustnost fuzzy regulátoru čtvrtinového modelu	41
4.2	Aktivní tlumení polovičního modelu	44
4.2.1	Odezva polovičního modelu na jednotkový skok	44
4.2.2	Odezva polovičního modelu na bílý šum	48
4.2.3	Odezva polovičního modelu na simulované rozjíždění a brzdění . .	52
4.2.4	Robustnost fuzzy regulátoru polovičního modelu	56
5	Závěr	61
	Literatura	63
A	Obsah příloženého CD	I

Seznam obrázků

2.1	Čtvrtinový model	4
2.2	Simulinkové schéma čtvrtinového modelu	8
2.3	Poloviční model	9
2.4	Simulinkový subsystému kola č.1 polovičního modelu	15
2.5	Simulinkové schéma polovičního modelu	16
2.6	Simulinkový subsystému kola č.2 polovičního modelu	17
3.1	Struktura fuzzy regulátoru	18
3.2	Testovací signál	20
3.3	Funkce příslušnosti rychlosti kola v_{w1}	21
3.4	Funkce příslušnosti rychlosti podvozku v_{b1}	22
3.5	Funkce příslušnosti zrychlení podvozku a_{b1}	22
3.6	Funkce příslušnosti síly f_1	23
3.7	Inferenční mechanismus	29
3.8	Příklady jednotlivých metod defuzzyfikací	31
4.1	Aktivní tlumení pro čtvrtinový model	33
4.2	Testovací signál	34
4.3	Rychlost podvozku nad kolem	34
4.4	Rychlost kola	35
4.5	Výchylka podvozku nad kolem	35
4.6	Výchylka kola	36
4.7	Akční člen	36
4.8	Síla působící na kolo	37
4.9	Testovací signál	38
4.10	Rychlost podvozku nad kolem	38
4.11	Rychlost kola	39
4.12	Výchylka podvozku nad kolem	39

4.13	Výchylka kola	40
4.14	Akční člen	40
4.15	Síla působící na kolo	41
4.16	Výchylka podvozku nad kolem při hmotnosti $m_{b1} \cdot 0,8$	42
4.17	Výchylka kola při hmotnosti $m_{b1} \cdot 0,8$	42
4.18	Výchylka podvozku nad kolem při hmotnosti $m_{b1} \cdot 1,2$	43
4.19	Výchylka kola při hmotnosti $m_{b1} \cdot 1,2$	43
4.20	Aktivní tlumení pro poloviční model	44
4.21	Testovací signál	45
4.22	Výchylka podvozku nad kolem č.1	45
4.23	Výchylka podvozku nad kolem č.2	46
4.24	Výchylka kola č.1	46
4.25	Výchylka kola č.2	47
4.26	Akční člen	47
4.27	Výchylka těžiště	48
4.28	Testovací signál	49
4.29	Výchylka podvozku modelu nad kolem č.1	49
4.30	Výchylka podvozku modelu nad kolem č.2	50
4.31	Výchylka kola č.1	50
4.32	Výchylka kola č.2	51
4.33	Akční zásah	51
4.34	Výchylka těžiště modelu	52
4.35	Testovací signál	53
4.36	Výchylka podvozku modelu nad kolem č.1	53
4.37	Výchylka podvozku modelu nad kolem č.2	54
4.38	Výchylka kola č.1	54
4.39	Výchylka kola č.2	55
4.40	Akční člen	55
4.41	Výchylka těžiště modelu	56
4.42	Výchylka podvozku nad kolem č.1 při hmotnosti $m_p \cdot 0,8$	57
4.43	Výchylka podvozku nad kolem č.2 při hmotnosti $m_p \cdot 0,8$	57
4.44	Výchylka kola č.1 při hmotnosti $m_p \cdot 0,8$	58
4.45	Výchylka kola č.2 při hmotnosti $m_p \cdot 0,8$	58
4.46	Výchylka podvozku nad kolem č.1 při hmotnosti $m_p \cdot 1,2$	59
4.47	Výchylka podvozku nad kolem č.2 při hmotnosti $m_p \cdot 1,2$	59

4.48	Výchylka kola č.1 při hmotnosti $m_p \cdot 1, 2$	60
4.49	Výchylka kola č.2 při hmotnosti $m_p \cdot 1, 2$	60

Seznam tabulek

3.1	Naměřené rozsahy veličin pro čtvrtinový model	21
3.2	Naměřené rozsahy veličin pro poloviční model	24
3.3	Příklad pravidel čtvrtinového modelu - skupina 1	25
3.4	Příklad pravidel čtvrtinového modelu - skupina 2	26
3.5	Příklad pravidel polovičního modelu - pravidla kol	27
3.6	Příklad pravidel polovičního modelu - pravidla podvozku	27

Kapitola 1

Úvod

System aktivního tlumení automobilu má dva hlavní důvody použití. Tím prvním je zvýšení jízdního komfortu cestujících, druhým je pak zlepšení jízdních vlastností automobilu. Jízdní komfort je možné definovat jako :

1. Míru schopnosti potlačení zrychlení karoserie, vznikající při kontaktu pneumatiky automobilu s nerovnostmi vozovky.
2. Míru omezení překmitu polohy odpružené části automobilu, tedy karosérie.

Jízdní vlastnosti pak můžou být definovány následujícím :

1. Stabilitou a říditelností automobilu. Ty jsou určeny zejména schopností potlačit naklání automobilu při průjezdech zatáčkou a dále předkláněním, které je důsledkem brzdění a rozjíždění.
2. Přilnutím k vozovce, tedy změnou tíhové síly jež působí na kolo.

Klasické pasivní tlumení je obvykle složeno z pružiny a vzduchového, případně kapalinového tlumiče. Pro zvýšení jízdního komfortu musí být tlumič vyroben měkce, aby omezil zrychlení karosérie způsobené nerovnostmi vozovky. Chceme-li zlepšit jízdní vlastnosti, musí být tlumič vyroben tvrdě, aby při jízdě nedocházelo k velkému naklání karosérie a tedy ke zhoršení jízdních vlastností. Pasivní tlumení pak tedy musí být navrhováno jako kompromis mezi komfortem pro cestující a ovladatelností automobilu. Aby bylo možné splnit oba výše zmíněné požadavky zároveň, je nutné měnit charakteristiku tlumení dynamicky, dle nastalé situace. Tímto vznikne tlumení aktivní, případně poloaktivní.

V této práci se zabývám návrhem fuzzy regulátoru pro aktivní tlumení. Fuzzy regulátor se pro tuto úlohu jeví jako velmi vhodný, zejména ze dvou důvodů. Tím prvním je efektivní využití zpětné vazby v řízení procesů, druhým pak schopnost řídit procesy, jejichž matematická formulace je neznámá, nebo velmi obtížně definovatelná. V oblasti aktivního tlumení automobilu se poslední zmíněný faktor týká hlavně vlastností pneumatik a podmínek provozu.

Základem pro návrh regulátoru je čtvrtinový model automobilu. Ten se skládá z jednoho kola a čtvrtiny podvozku. Úkolem fuzzy regulátoru je tlumit vibrace podvozku a zároveň tlumit vibrace kola pomocí akčního členu realizovaného jako zdroj síly. Při návrhu může nastat situace, kdy budeme zmenšovat kmity podvozku, ale zároveň zvyšovat kmity kola a naopak. Tento problém řeší několik strategií.

Nejznámější je použití dvou fuzzy regulátorů (ROUKIEH, S.; TITLE, A., 1993, strana 15), kde první regulátor je navržen tak, aby tlumil kmity podvozku bez ohledu na kmity kola. Druhý fuzzy regulátor pak navrhne opačně, tzn. aby tlumil kmity kola bez ohledu na kmity podvozku. Výstupy takto navržených regulátorů jsou váženy a hledá se kompromisní poměr vah, který nejlépe tlumí kmity kola i podvozku. Plusem této strategie je poměrně snadný a rychlý návrh regulace. Mínusem velmi hrubé nastavení obou fuzzy regulátorů pomocí vah.

Jiná strategie, kterou zde používám, je strategií jednoho regulátoru. Ten je navržen tak, aby zároveň tlumil kmity podvozku i kmity kola.

Základní částí každého fuzzy regulátoru je báze pravidel, což je soubor všech pravidel potřebných pro dostatečnou lingvistickou - vágní aproximaci závislosti mezi vstupem (vstupy) a výstupem (výstupy) regulátoru. Hlavním cílem při návrhu fuzzy regulátoru pro aktivní tlumení automobilu je vytvoření kooperativních pravidel pro kolo a podvozek. Výhodou takto navrženého regulátoru je, že se více blíží regulátoru ideálnímu, než regulátor navržený dle první strategie. Nevýhodou je pak obtížnější formulace pravidel.

Pro větší přiblížení reálnému automobilu dále vytvoříme jeho poloviční model, pro který také navrhne fuzzy regulátor. Poloviční model oproti čtvrtinovému navíc zahrnuje vzájemné ovlivňování kol, které se projeví při rozjíždění a brzdění automobilu. K pravidlům čtvrtinového modelu přidáme pravidla pro podvozek automobilu.

Kapitola 2

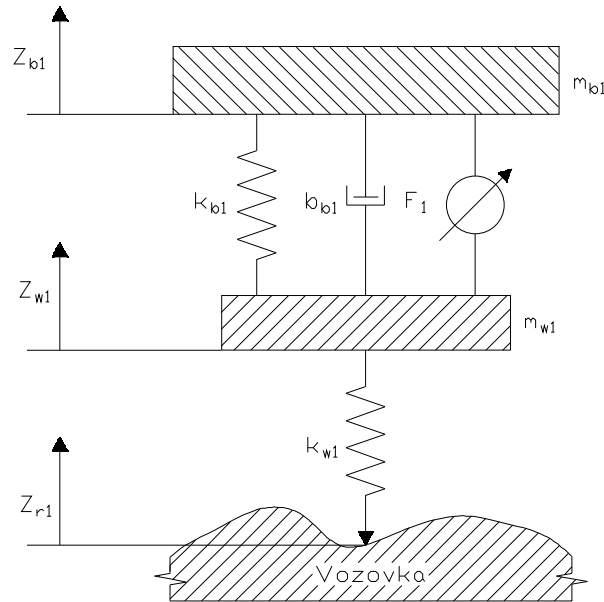
Popis modelu

Nejdříve vytvoříme čtvrtinový model (HORÁČEK, P.; FUKA, J., 1999, strana 45), který obsahuje jedno kolo a čtvrtinu hmotnosti podvozku. Poloviční model zahrnuje dvě kola spojená podvozkem s jeho poloviční hmotností. Oba modely zanedbávají nelinearity objektu.

2.1 Čtvrtinový model

Základním modelem aktivního tlumení, který charakterizuje chování vozidla a na němž můžeme simulovat vlastnosti regulátoru, je čtvrtinový model na obr. 2.1, obsahující dvě hmotná tělesa, aktivní prvek - zdroj síly a tlumič. Model má celkem dva stupně volnosti a jeden rovnovážný stav. Uvažujeme pouze vertikální pohyb, proto všechny vektory budeme značit jako skaláry.

Převedení modelu do matematického popisu provádíme pomocí pohybových rovnic v diferenciálním tvaru a jejich úpravou.



Obrázek 2.1: Čtvrtinový model

Z obr. 2.1 můžeme psát diferenciální pohybové rovnice ve tvaru :

$$\begin{aligned} m_{b1}\ddot{z}_{b1} &= f_1 - k_{b1}(z_{b1} - z_{w1}) - b_{b1}(\dot{z}_{b1} - \dot{z}_{w1}), \\ m_{w1}\ddot{z}_{w1} &= -f_1 + k_{b1}(z_{b1} - z_{w1}) - k_{w1}(z_{w1} - z_{r1}) + b_{b1}(\dot{z}_{b1} - \dot{z}_{w1}). \end{aligned} \quad (2.1)$$

V rovnicích (2.1) používáme následující proměnné a konstanty :

z_{r1} ... poloha nerovností vozovky,

z_{w1} ... poloha osy kola,

z_{b1} ... poloha odpružené části automobilu,

f_1 ... síla vyvíjená zdrojem síly,

m_{b1} ... hmotnost odpružené části automobilu, pro tento případ jeho čtvrtina

m_{w1} ... hmotnost kola a neodpružené části automobilu,
 b_{b1} ... konstanta tlumení tlumiče,
 k_{b1} ... konstanta tuhosti péra,
 k_{w1} ... konstanta tuhosti pružícího charakteru pneumatiky.

2.1.1 Stavový popis čtvrtinového modelu

Z pohybových rovnic (2.1) vytvoříme stavový popis ve tvaru :

$$\dot{x} = Ax + Bf_1 + F\dot{z}_r. \quad (2.2)$$

Stavový vektor \bar{x} je čtvrtého řádu ve tvaru :

$$\bar{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix}, \quad (2.3)$$

kde

$$\begin{aligned}
 x_1 &= z_{b1} - z_{w1}, \\
 x_2 &= z_{w1} - z_{r1}, \\
 x_3 &= \dot{z}_{b1}, \\
 x_4 &= \dot{z}_{w1}.
 \end{aligned} \quad (2.4)$$

Stav x_1 reprezentuje odchylku mezi podvozkem a kolem, x_2 odchylku mezi kolem a vozovkou, x_3 rychlost podvozku, x_4 rychlost kola čtvrtinového modelu. Matice A , B , F z (2.2) jsou :

$$\begin{aligned}
 A &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{-k_{b1}}{m_{b1}} & 0 & \frac{-c_{b1}}{m_{b1}} & \frac{c_{b1}}{m_{b1}} \\ \frac{k_{b1}}{m_{w1}} & -\frac{k_{w1}}{m_{w1}} & \frac{c_{b1}}{m_{w1}} & -\frac{c_{b1}}{m_{w1}} \end{bmatrix}, \\
 B &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{m_{b1}} \\ -\frac{1}{m_{w1}} \end{bmatrix}, \\
 F &= \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.
 \end{aligned} \tag{2.5}$$

Pro konkrétní hodnoty (CEBON, D., 1999, strana 468) :

$$m_{b1} = 2250 \text{ kg},$$

$$m_{w1} = 500 \text{ kg},$$

$$b_{b1} = 10 \text{ kN.s.m}^{-1},$$

$$k_{b1} = 2 \text{ MN.m}^{-1},$$

$$k_{w1} = 0,4 \text{ MN.m}^{-1},$$

dostaneme :

$$\begin{aligned}
 A &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -177,8 & 0 & -4,44 & 4,44 \\ 800 & -4000 & 20 & -20 \end{bmatrix}, \\
 B &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 4 \cdot 10^{-4} \\ -2 \cdot 10^{-3} \end{bmatrix}.
 \end{aligned} \tag{2.6}$$

$$F = \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

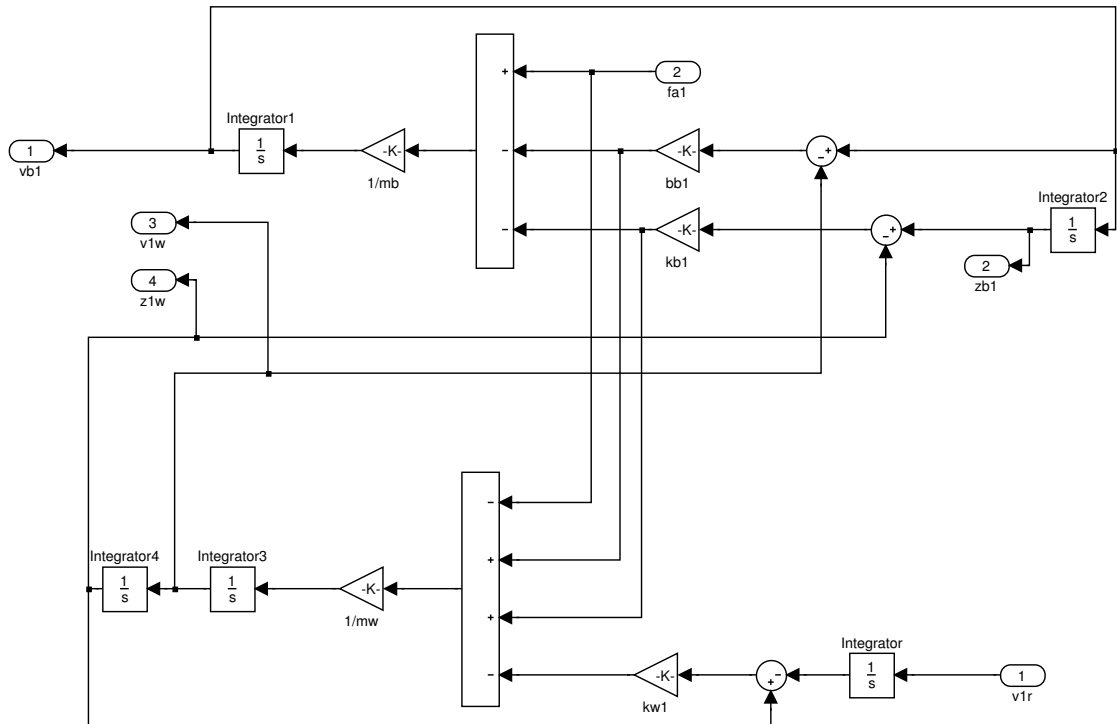
Matice A má čtyři vlastní čísla :

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= -14,3177 + 68,8061 j, \\ \lambda_2 &= -14,3177 - 68,8061 j, \\ \lambda_3 &= -1,6423 + 7,5191 j, \\ \lambda_4 &= -1,6423 - 7,5191 j, \end{aligned} \tag{2.7}$$

která jsme získali pomocí příkazu $eig(A)$ v prostředí programu *Matlab*. Všechna vlastní čísla mají zápornou reálnou část, systém je tedy stabilní.

2.1.2 Čtvrtinový model v simulinku

Čtvrtinový model se v simulinku skládá z pěti integrátorů, čtyři obsahuje vlastní model a pátý převádí rychlost na odchylku. Výsledná soustava je čtvrtého řádu.

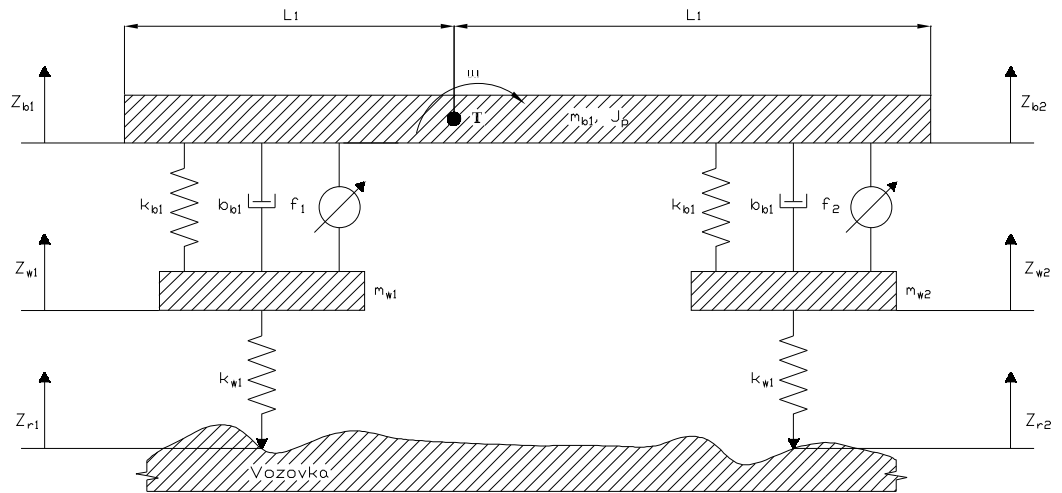


Obrázek 2.2: Simulinkové schéma čtvrtinového modelu

2.2 Poloviční model

Model aktivního tlumění, který více vypovídá o chování vozidla než model uvedený výše, je model poloviny vozidla.

Poloviční model je složen ze dvou čtvrtinových modelů, které jsou spojeny s homogenním podvozkem. Podvozek je určen svou hmotností, polohou těžiště, délkou a momentem setrvačnosti.



Obrázek 2.3: Poloviční model

Na podvozek polovičního modelu působí od kola č.1 respektive kola č.2 síly F_1 a F_2 . Pro tyto síly platí :

$$\begin{aligned} F_1 &= f_1 - k_{b1}(z_{b1} - z_{w1}) - b_{b1}(\dot{z}_{b1} - \dot{z}_{w1}), \\ F_2 &= f_2 - k_{b2}(z_{b2} - z_{w2}) - b_{b2}(\dot{z}_{b2} - \dot{z}_{w2}), \end{aligned} \quad (2.8)$$

dále ze čtvrtinového modelu platí :

$$\begin{aligned} m_{w1}\ddot{z}_{w1} &= -f_1 + k_{b1}(z_{b1} - z_{w1}) - k_{w1}(z_{w1} - z_{r1}) + b_{b1}(\dot{z}_{b1} - \dot{z}_{w1}), \\ m_{w2}\ddot{z}_{w2} &= -f_2 + k_{b2}(z_{b2} - z_{w2}) - k_{w2}(z_{w2} - z_{r2}) + b_{b2}(\dot{z}_{b2} - \dot{z}_{w2}). \end{aligned} \quad (2.9)$$

Rovnice předklánění¹ vyplývá z momentové rovnice :

$$F_1L_1 - F_2L_2 - J_P\dot{\omega} = 0, \quad (2.10)$$

rovnice pohybu těžiště je :

$$F_1 + F_2 - m_p\dot{v}_T = 0, \quad (2.11)$$

také platí :

$$\begin{aligned} v_{b1} &= v_T + \omega L_1, \\ v_{b2} &= v_T - \omega L_2. \end{aligned} \quad (2.12)$$

V rovnicích (2.8), (2.10), (2.11), (2.12) používáme oproti čtvrtinovému modelu navíc tyto konstanty a proměnné :

m_p [kg] ... hmotnost podvozku, v tomto případě jeho polovina

J_P [kg.m²] ... podélný moment setrvačnosti podvozku,

L_1 [m] ... délka ramene od těžiště ke kolu č.1,

L_2 [m] ... délka ramene od těžiště ke kolu č.2,

v_T [m.s⁻¹] ... rychlost těžiště,

ω [rad.s⁻¹] ... úhlová rychlost,

v_{b1} [m.s⁻¹] ... rychlost podvozku nad kolem č.1,

v_{b2} [m.s⁻¹] ... rychlost podvozku nad kolem č.2.

¹Pitching

2.2.1 Stavový popis polovičního modelu

Z pohybových rovnic můžeme vytvořit stavový popis ve tvaru (2.2).

$$\bar{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \\ x_8 \end{bmatrix}, \quad (2.13)$$

$$\bar{u} = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{bmatrix}, \quad (2.14)$$

$$\bar{v} = \begin{bmatrix} \dot{z}_{r1} & \dot{z}_{r2} \end{bmatrix}, \quad (2.15)$$

kde \bar{x} je stavový vektor osmého řádu, \bar{u} vstupní vektor, \bar{v} vektor rušení. Dílčí stavy z \bar{x} můžeme rozepsat :

$$x_1 = z_{b1} - z_{w1}, \quad (2.16)$$

$$x_2 = z_{w1} - z_{r1},$$

$$x_3 = \dot{z}_{w1},$$

$$x_4 = z_{b2} - z_{w2},$$

$$x_5 = z_{w2} - z_{r2},$$

$$x_6 = \dot{z}_{w2},$$

$$x_7 = v_T,$$

$$x_8 = \omega.$$

Matice A , B , F jsou :

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & L_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{k_{b1}}{m_{w1}} & \frac{-k_{w1}}{m_{w1}} & \frac{-b_{b1}}{m_{w1}} & 0 & 0 & 0 & \frac{b_{b1}}{m_{w1}} & \frac{b_{b1}L_1}{m_{w1}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & -L_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{k_{b2}}{m_{w2}} & \frac{-k_{w2}}{m_{w2}} & \frac{-b_{b2}}{m_{w2}} & \frac{b_{b2}}{m_{w2}} & \frac{-b_{b2}L_2}{m_{w2}} \\ \frac{-k_{b1}}{m_p} & 0 & \frac{b_{b1}}{m_p} & \frac{-k_{b2}}{m_p} & 0 & \frac{b_{b2}}{m_p} & \frac{b_{b1}+b_{b2}}{m_p} & \frac{-b_{b1}L_1+b_{b2}L_2}{m_p} \\ \frac{-L_1k_{b1}}{J_p} & 0 & \frac{L_1b_{b1}}{J_p} & \frac{L_2k_{b2}}{J_p} & 0 & \frac{-L_2b_{b2}}{J_p} & \frac{-L_1b_{b1}+L_2b_{b2}}{J_p} & \frac{-(b_{b1}L_1^2+b_{b2}L_2^2)}{J_p} \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{-1}{m_w} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{-1}{m_w} \\ \frac{1}{m_p} & \frac{1}{m_p} \\ \frac{L_1}{J_p} & \frac{L_1}{J_p} \end{bmatrix},$$

$$F = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Pro hodnoty polovičního modelu (CEBON, D., 1999, strana 468) :

$$m_p = 4500 \text{ kg},$$

$$m_{w1} = 500 \text{ kg},$$

$$m_{w2} = 500 \text{ kg},$$

$$b_{b1} = 10 \text{ kN.s.m}^{-1},$$

$$b_{b2} = 10 \text{ kN.s.m}^{-1},$$

$$\begin{aligned}
k_{b1} &= 2 \text{ MN.m}^{-1}, \\
k_{b2} &= 2 \text{ MN.m}^{-1}, \\
k_{w1} &= 0,4 \text{ MN.m}^{-1}, \\
k_{w2} &= 0,4 \text{ MN.m}^{-1}, \\
L_1 &= 4 \text{ m}, \\
L_2 &= 4 \text{ m}, \\
J_P &= 43000 \text{ kg.m}^2,
\end{aligned}$$

dostaneme :

$$A = \begin{bmatrix}
0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 4 \\
0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
800 & -4000 & -20 & 0 & 0 & 0 & 20 & 80 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & -4 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 800 & -4000 & -20 & 20 & 80 \\
-88,88 & 0 & 2,22 & -88,88 & 0 & 2,22 & -4,44 & 0 \\
-37,21 & 0 & 0,93 & 37,21 & 0 & -0,93 & -0 & -7,44
\end{bmatrix} \quad (2.17)$$

$$B = \begin{bmatrix}
0 & 0 \\
0 & 0 \\
-2 \cdot 10^{-3} & 0 \\
0 & 0 \\
0 & 0 \\
0 & -2 \cdot 10^{-3} \\
22 \cdot 10^{-5} & 22 \cdot 10^{-5} \\
93 \cdot 10^{-6} & 93 \cdot 10^{-6}
\end{bmatrix},$$

$$F = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ -1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} .$$

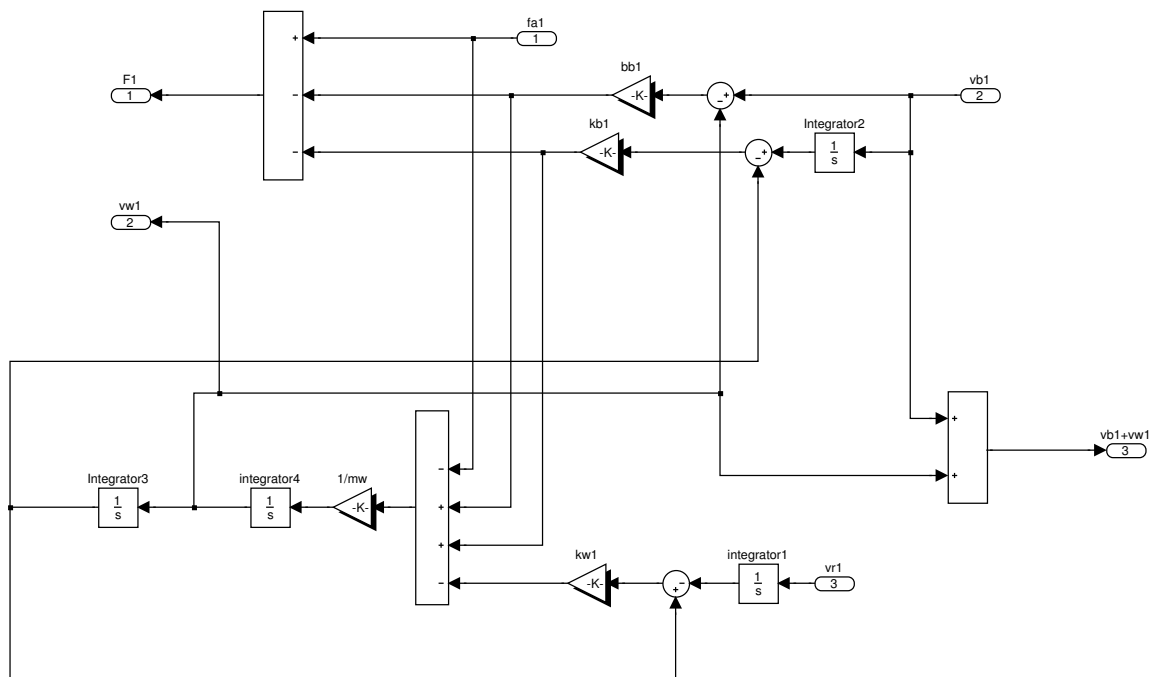
Matice A má osm vlastních čísel :

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= -10,6912 + 68,1814 j, \\ \lambda_2 &= -10,6912 - 68,1814 j, \\ \lambda_3 &= -11,1696 + 67,8771 j, \\ \lambda_4 &= -11,1696 - 67,8771 j, \\ \lambda_5 &= -1,5312 + 12,1225 j, \\ \lambda_6 &= -1,5312 - 12,1225 j, \\ \lambda_7 &= -2,5514 + 15,6561 j, \\ \lambda_8 &= -2,5514 - 15,6561 j, \end{aligned} \tag{2.18}$$

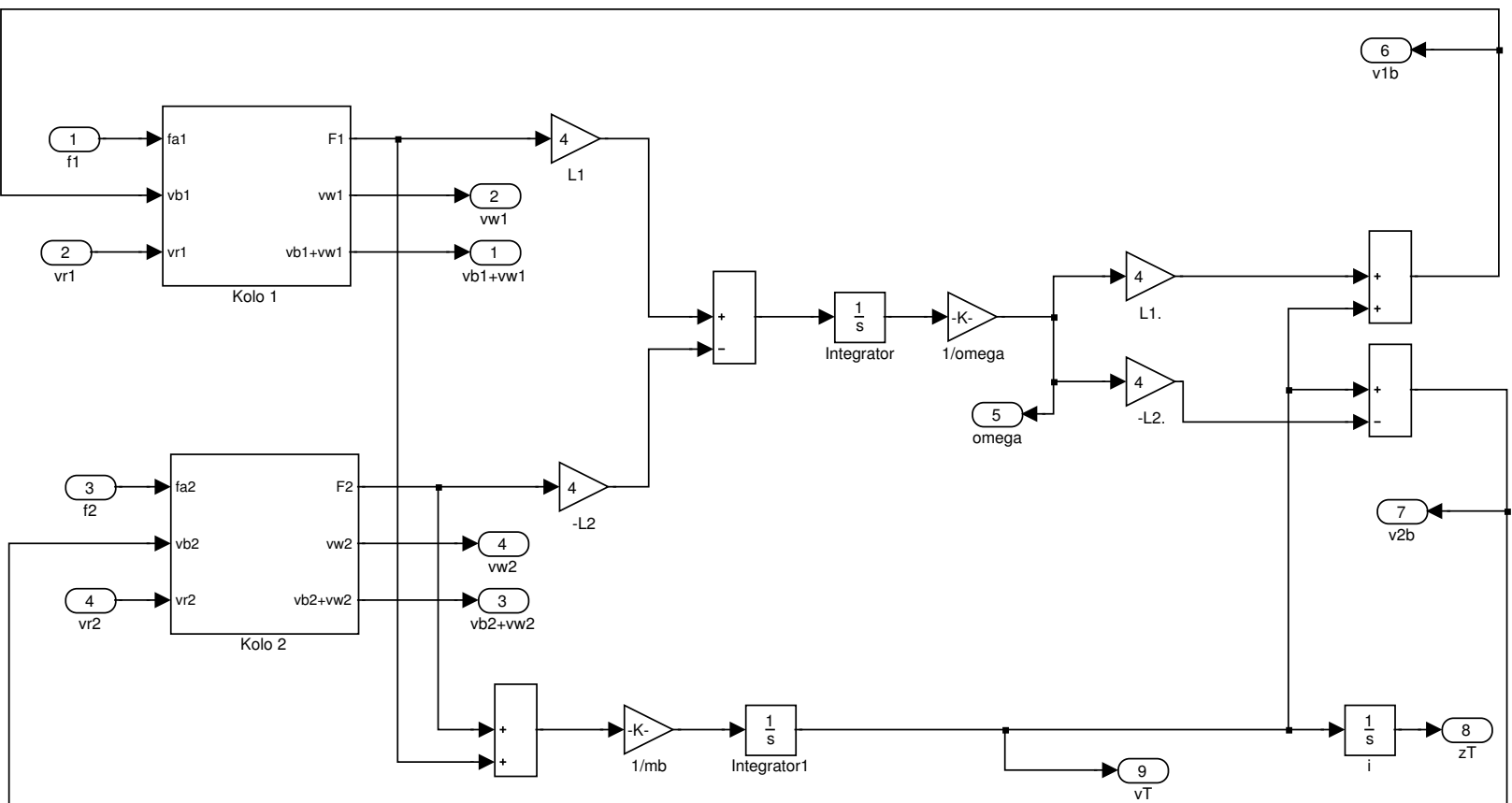
System je stabilní, protože má záporné reálné části všech osmi vlastních čísel.

2.2.2 Poloviční model v simulinku

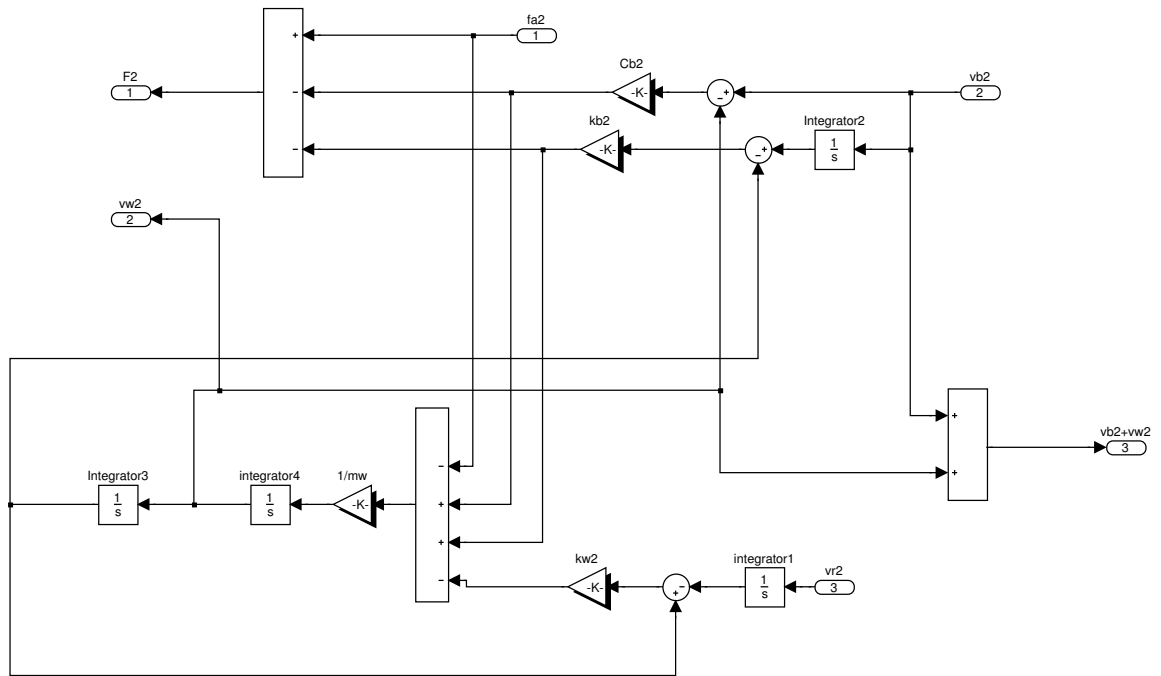
Simulinkové schéma polovičního modelu obr. 2.5 dle obr. 2.3 obsahuje dva subsystemy, subsystem kola č.1 obr. 2.4 a subsystem kola č.2 obr. 2.6. Každý subsystem obsahuje dynamiku jednoho kola.



Obrázek 2.4: Simulinkový subsystemu kola č.1 polovičního modelu



Obrázek 2.5: Simulinkové schéma polovičního modelu

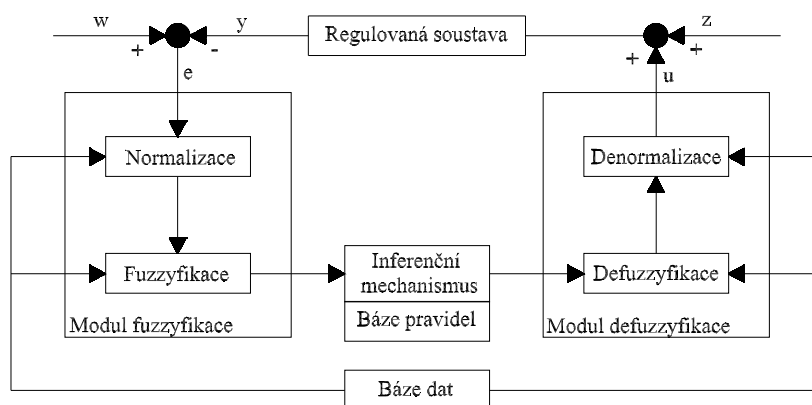


Obrázek 2.6: Simulinkový subsystému kola č.2 polovičního modelu

Kapitola 3

Návrh fuzzy regulátoru

Základní struktura fuzzy regulátoru je znázorněna na obr. 3.1. Skládá se ze tří základních bloků. Modul fuzzyfikace převádí ostrá data vstupních veličin regulované soustavy na fuzzy data. S takto fuzzyfikovanými vstupními veličinami poté inferenční mechanismus provádí vyhodnocení výsledku. Inferenční mechanismus využívá ke své činnosti znalostní báze fuzzy regulátoru - ústřední člen regulátoru. Výsledkem činnosti inferenčního mechanismu je fuzzy množina, která se v modulu defuzzyfikace převádí zpět na ostré hodnoty - číslo.



Obrázek 3.1: Struktura fuzzy regulátoru

Znalostní báze každého fuzzy regulátoru je složena z datové báze a báze pravidel. Datová báze obsahuje informace o fuzzy množinách¹. Ty reprezentují slovní hodnoty jednotlivých proměnných. Dále obsahuje informace o rozsazích jednotlivých vstupně / výstupních veličin regulované soustavy.

Základní funkcí báze pravidel je reprezentovat znalosti řízení dané soustavy ve formě pravidel. Tato pravidla by měla dostatečně lingvisticky reprezentovat závislost mezi vstupem a výstupem. Jednotlivá pravidla jsou ve tvaru

if (stav procesu) then (regulační zásah)

Část *if* pravidla se nazývá antecedent, který je vyjádřen ve formě kombinace fuzzy atomických výroků. Část *than* pravidla se nazývá konsekvent a představuje slovně definovaný akční zásah do regulovaného procesu. Pravidla jsou mezi sebou spojena spojkou *and*² která reprezentuje logický součin, případně dalšími spojkami³.

Inferenční mechanismus je postup, který stanovuje výstupní fuzzy množinu pro danou vstupní fuzzy množinu nebo ostrou výstupní hodnotu pro danou vstupní ostrou hodnotu. Více např. (JURA, P., 2003, strana 75)

3.1 Fuzzyfikace

Fuzzyfikace je proces, který převádí vstupní ostrá data na fuzzy data. K tomu je potřeba stanovit tvar a typ funkcí příslušnosti každé vstupní veličině.

Fuzzy Logic Toolbox, který je implementován v prostředí systému *Matlab* a který jsem použil pro implementaci regulátoru, podporuje několik typů funkcí příslušnosti, např. gaussovské, trojúhelníkové, zvonové nebo lichoběžníkové. Zvolil jsem trojúhelníkové a lichoběžníkové funkce příslušnosti, protože se skládají z lineárních členů a proto převod vstupních dat na fuzzy data probíhá relativně rychleji.

Nejdříve musíme zvolit veličiny, které budeme pro fuzzy regulaci využívat. Musí to být veličiny, které charakterizují regulovaný proces a jsou nositeli informací potřebných pro řízení. Zároveň by tyto veličiny měly být snadno měřitelné. Na základě těchto požadavků jsem jako vstupní hodnoty regulátorů zvolil rychlosti jednotlivých kol a rychlost a zrych-

¹funkcích příslušnosti

²a zároveň

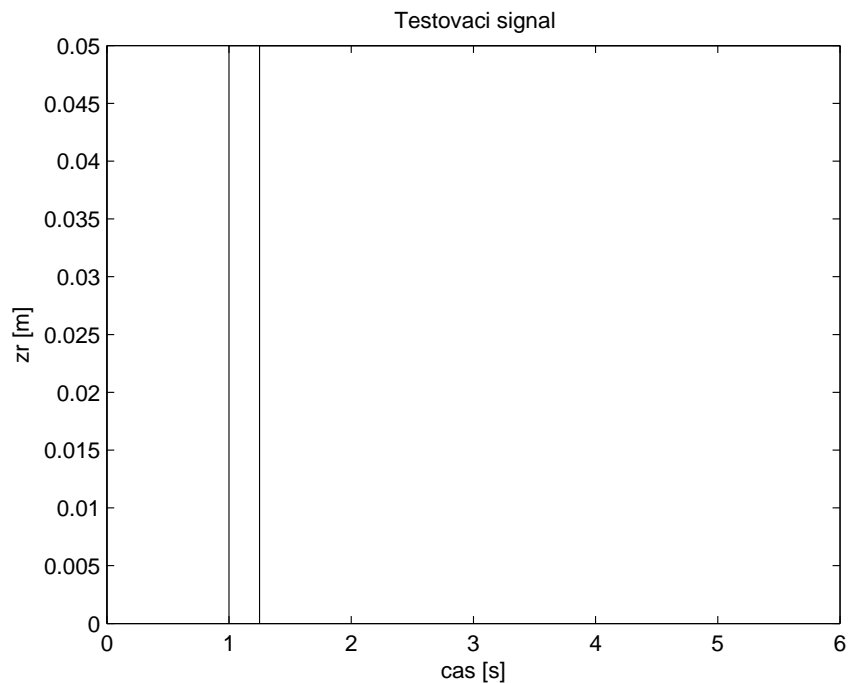
³nebo, negace

lení podvozku automobilu. Veličiny rychlost a zrychlení jsou snadno měřitelné pomocí některého z typů akcelerometrů. Rozsahy jednotlivých funkcí příslušnosti jsem určil na základě experimentů na jednotlivých modelech.

3.1.1 Funkce příslušnosti čtvrtinového modelu

Pro regulaci čtvrtinového modelu jsem použil tři vstupy a jeden výstup.

Jako vstupy jsem zvolil rychlost kola v_{w1} , rychlost podvozku nad kolem v_{b1} a zrychlení podvozku nad kolem a_{b1} . Výstup regulátoru je akční zásah zdroje síly f_1 .



Obrázek 3.2: Testovací signál

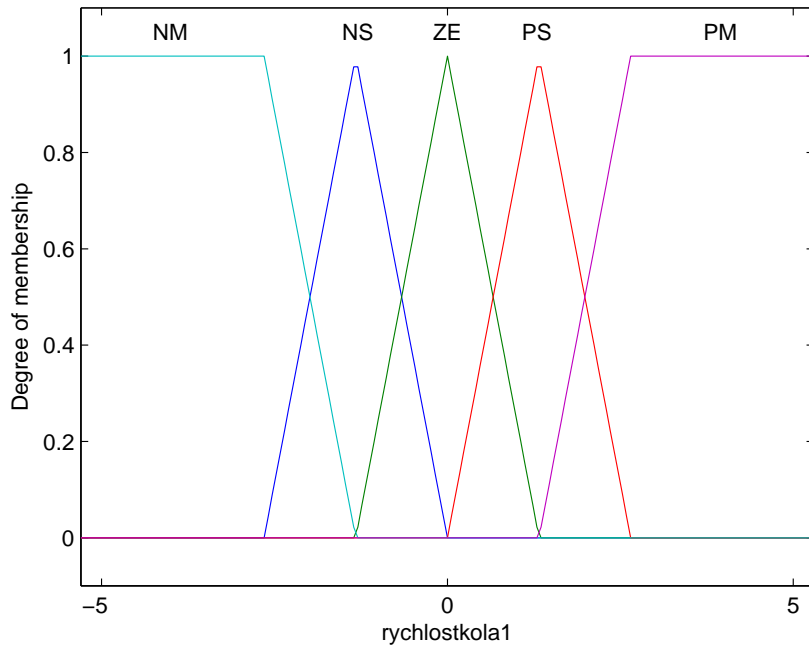
Rozsahy těchto veličin jsem stanovil experimentem, při kterém jsem simuloval nájezd čtvrtinového modelu na překážku. Tu představuje testovací signál z obr. 3.2. Tento signál vychýlí model o 5 cm. Dále jsem testoval vychýlení modelu o 10 cm. Z takto naměřených hodnot jsem vybral jejich maxima bez ohledu na jejich znaménko.

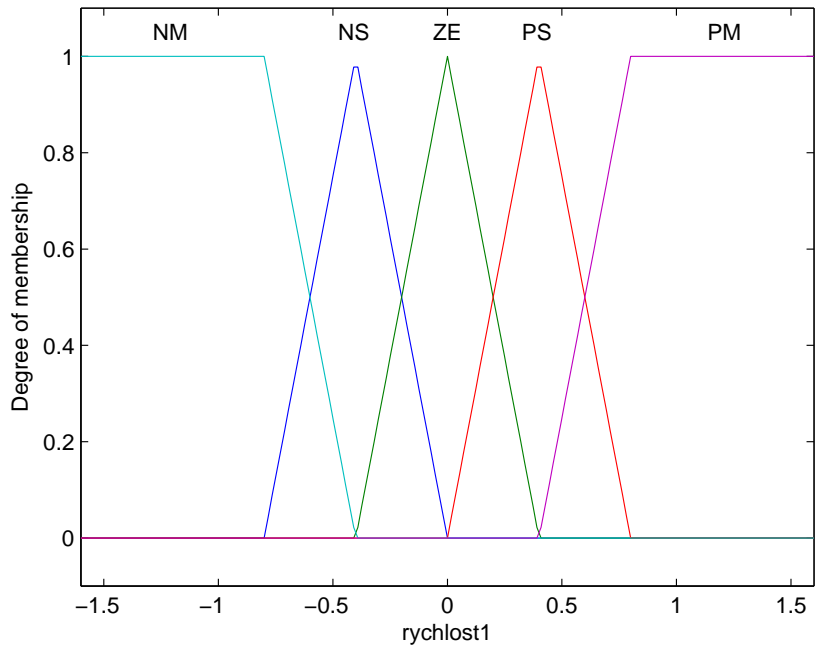
Tabulka 3.1: Naměřené rozsahy veličin pro čtvrtinový model

z_r [cm]	$ f_1 _{max}$ [N]	$ v_{w1} _{max}$ [m.s ⁻¹]	$ v_{b1} _{max}$ [m.s ⁻¹]	$ \dot{v}_{b1} = a_{b1} _{max}$ [m.s ⁻²]
5	39 387	2,7	0,8	23
10	78 775	5,3	1,6	44,5

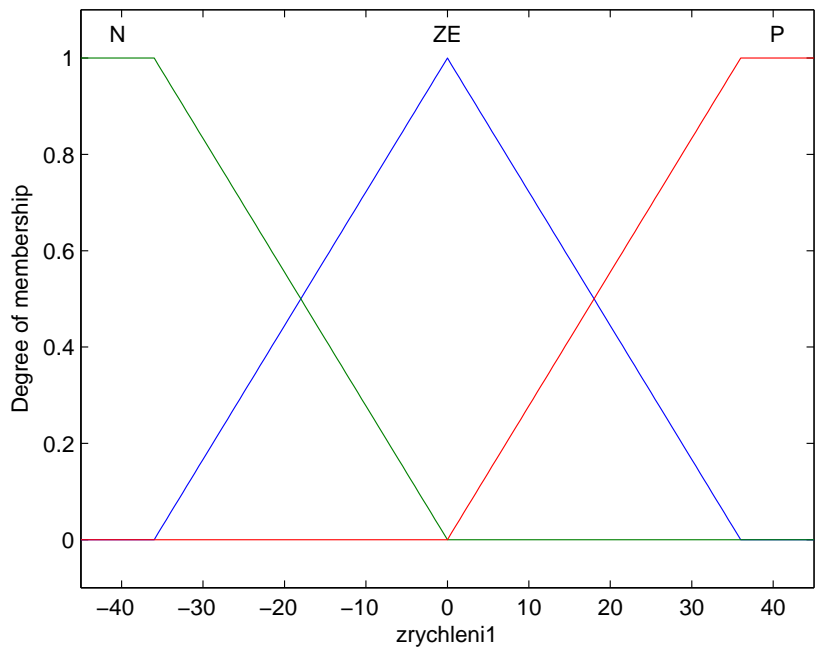
Z tabulka 3.1 vyplývají zvolené rozsahy funkcí příslušnosti. U vstupních veličin regulátoru jsem zvolil rovnoměrné rozprostřené trojúhelníky s rozsahem shodným s naměřenými hodnotami, viz obr. 3.3, obr. 3.4 , obr. 3.5.

Pro výstupní veličinu regulátoru - sílu f_1 obr. 3.6 jsem upravil její rozsah na $\langle -72000, 72000 \rangle$. K tomuto kroku mě vedly poznatky ze simulací, kdy po výše uvedené úpravě funkce příslušnosti došlo ke znatelnému zrychlení chodu simulace. Pro zvětšení citlivosti akčního zásahu jsem použil nerovnoměrného rozmístění trojúhelníků. Toto je důležité pro doregulování malých odchylek.

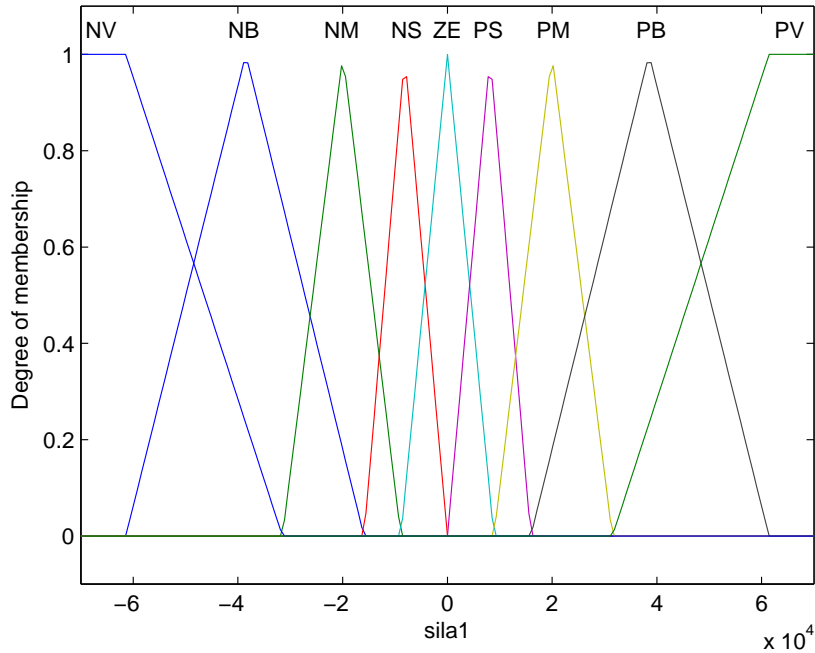
Obrázek 3.3: Funkce příslušnosti rychlosti kola v_{w1}



Obrázek 3.4: Funkce příslušnosti rychlosti podvozku v_{b1}



Obrázek 3.5: Funkce příslušnosti zrychlení podvozku a_{b1}

Obrázek 3.6: Funkce příslušnosti síly f_1

3.1.2 Funkce příslušnosti polovičního modelu

Pro regulátor polovičního modelu jsem zvolil celkem jedenáct funkcí příslušnosti.

Prvních šest vstupů je identických jako v případě čtvrtinového modelu. Jsou to rychlost kola č.1 v_{w1} , rychlost a zrychlení podvozku nad kolem č.1 v_{b1} respektive a_{b1} , rychlost kola č.2 v_{w2} , rychlost a zrychlení podvozku nad kolem č.2 v_{b2} respektive a_{b2} . Vstupy, které přibyly oproti čtvrtinovému modelu jsou tři, rychlost těžiště v_T , zrychlení těžiště a_T a podélná úhlová rychlost ω . Výstupem regulátoru jsou síly f_1 respektive f_2 , každá pro jedno kolo.

Rozsah výše zmíněných veličin jsem opět určil experimentem, stejným jako v případě čtvrtinového modelu. Testovací signál jsem však zaváděl do každého kola s fázovým posuvem odpovídajícím rychlosti automobilu $v_A = 50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Výpočet časového posuvu signálů viz (3.1)

$$\Delta t[s] = \frac{(L_1 + L_2) [m]}{50 \cdot 10^3 / 3600 [m \cdot s^{-1}]} \quad (3.1)$$

Tabulka 3.2: Naměřené rozsahy veličin pro poloviční model

z_r [cm]	$ f_1 _{max}$ [N]	$ f_2 _{max}$ [N]	$ v_T _{max}$ [m.s ⁻¹]	$ \dot{v}_T = a_T _{max}$ [m.s ⁻²]	ω [rad.s ⁻¹]
5	34 862	34 530	0, 5	12, 9	0, 13
10	71 122	73 018	1, 2	26	0, 26

$ v_{b1} _{max}$ [m.s ⁻¹]	$ \dot{v}_{b1} _{max}$ [m.s ⁻²]	$ v_{w1} _{max}$ [m.s ⁻¹]
1	20, 8	2, 4
2	40, 6	4, 8

$ v_{b2} _{max}$ [m.s ⁻¹]	$ \dot{v}_{b2} _{max}$ [m.s ⁻²]	$ v_{w2} _{max}$ [m.s ⁻¹]
1	21	2, 4
2	44, 5	4, 8

3.2 Tvorba pravidel

Nejdůležitější částí každého fuzzy regulátoru je báze znalostí, a zejména pak báze pravidel. Jednotlivá pravidla jsou formulována pomocí příkazů :

Jestliže (If) [Stav procesu] pak (Then) [Regulační zásah].

Pravidla jsem mezi sebou spojoval logickou spojkou *a zároveň* (AND).

3.2.1 Pravidla čtvrtinového modelu

Máme tři vstupy fuzzy regulátoru, rychlost kola v_{w1} , rychlost podvozku nad kolem v_{b1} , zrychlení podvozku nad kolem \dot{v}_{b1} a jeden výstup fuzzy regulátoru f_1 . Snažíme se v každém okamžiku minimalizovat výchylku kola i podvozku.

Vstupy rychlost kola v_{w1} a rychlost podvozku nad kolem v_{b1} jsou fuzzyfikovány každý pěti termy ⁴, zrychlení podvozku nad kolem je fuzzyfikováno třemi termy. Maximální počet pravidel fuzzy regulátoru čtvrtinového modelu je : $P = 5 \times 5 \times 3 = 75$. Jedná

⁴lingvistickými proměnými

se o kombinace termů všech tří vstupních veličin každý s každým. Ke každé kombinaci termů vstupních veličin stanovíme optimální akční zásah.

Při simulacích se však ukázalo, že postup, kdy vytvoříme maximální počet pravidel není pro tento případ vhodný. Docházelo k situacím, kdy simulace trvala nepřipustně dlouho (odezva čtvrtinového modelu na jednotkový skok) nebo se zasekla (odezva čtvrtinového modelu na bílý šum).

Proto jsem vytvořil pravidla nová. Opět jsem vytvářel kombinace termů vstupních veličin, v tomto případě jsem ale pozměnil logiku sestavování pravidel.

Zrychlení podvozku nad kolem \dot{v}_{b1} jsem stanovil jako výchozí pro další kombinace vstupních termů. Vytvořil jsem dvě skupiny pravidel. První skupina pravidel má společnou hodnotu termu zrychlení podvozku nad kolem \dot{v}_{b1} rovnu **IS ZE (je nulová)**. Druhá skupina pravidel pak **IS NOT ZE (je NEnulová)**. Tím jsem u druhé skupiny pravidel dosáhl stavu, kdy pro dvě možné varianty vstupních termů zrychlení podvozku nad kolem \dot{v}_{b1} bude použito jedno pravidlo, tedy pro hodnoty **P** i **N**. Tím jsem zároveň zredukoval počet pravidel o $\frac{1}{3}$. Podobný postup je použit např. v (HYNIOVÁ, K.; STRÍBRSKÝ, A.; HONCŮ, J., 2001, strana 3). Celkem jsem pro čtvrtinový model použil 50 pravidel.

Akční zásahy jsem pro obě skupiny pravidel stanovil z části dle "citu" a z části iterační metodou, kdy jsem při simulaci (Odezva čtvrtinového modelu aktivního tlumení na jednotkový skok) sledoval vliv změn akčních zásahů na výsledek regulace.

Tabulka 3.3: Příklad pravidel čtvrtinového modelu - skupina 1

If [$v_{w1} = \text{PM}$] AND [$v_{b1} = \text{PM}$] AND [$\dot{v}_{b1} = \text{ZE}$] THEN [$f_1 = \text{ZE}$]
If [$v_{w1} = \text{PS}$] AND [$v_{b1} = \text{PM}$] AND [$\dot{v}_{b1} = \text{ZE}$] THEN [$f_1 = \text{NS}$]
If [$v_{w1} = \text{ZE}$] AND [$v_{b1} = \text{PM}$] AND [$\dot{v}_{b1} = \text{ZE}$] THEN [$f_1 = \text{NM}$]
If [$v_{w1} = \text{NS}$] AND [$v_{b1} = \text{PM}$] AND [$\dot{v}_{b1} = \text{ZE}$] THEN [$f_1 = \text{NM}$]
If [$v_{w1} = \text{NM}$] AND [$v_{b1} = \text{PM}$] AND [$\dot{v}_{b1} = \text{ZE}$] THEN [$f_1 = \text{NV}$]
If [$v_{w1} = \text{PM}$] AND [$v_{b1} = \text{PS}$] AND [$\dot{v}_{b1} = \text{ZE}$] THEN [$f_1 = \text{ZE}$]
If [$v_{w1} = \text{PS}$] AND [$v_{b1} = \text{PS}$] AND [$\dot{v}_{b1} = \text{ZE}$] THEN [$f_1 = \text{NS}$]
If [$v_{w1} = \text{ZE}$] AND [$v_{b1} = \text{PS}$] AND [$\dot{v}_{b1} = \text{ZE}$] THEN [$f_1 = \text{NS}$]
If [$v_{w1} = \text{NS}$] AND [$v_{b1} = \text{PS}$] AND [$\dot{v}_{b1} = \text{ZE}$] THEN [$f_1 = \text{NM}$]
If [$v_{w1} = \text{NM}$] AND [$v_{b1} = \text{PS}$] AND [$\dot{v}_{b1} = \text{ZE}$] THEN [$f_1 = \text{NM}$]

Tabulka 3.4: Příklad pravidel čtvrtinového modelu - skupina 2

If [$v_{w1} = \text{PM}$] AND [$v_{b1} = \text{PM}$] AND [$\dot{v}_{b1} \text{ NOT ZE}$] THEN [$f_1 = \text{NS}$]
If [$v_{w1} = \text{PS}$] AND [$v_{b1} = \text{PM}$] AND [$\dot{v}_{b1} \text{ NOT ZE}$] THEN [$f_1 = \text{NM}$]
If [$v_{w1} = \text{ZE}$] AND [$v_{b1} = \text{PM}$] AND [$\dot{v}_{b1} \text{ NOT ZE}$] THEN [$f_1 = \text{NV}$]
If [$v_{w1} = \text{NS}$] AND [$v_{b1} = \text{PM}$] AND [$\dot{v}_{b1} \text{ NOT ZE}$] THEN [$f_1 = \text{NB}$]
If [$v_{w1} = \text{NM}$] AND [$v_{b1} = \text{PM}$] AND [$\dot{v}_{b1} \text{ NOT ZE}$] THEN [$f_1 = \text{NV}$]
If [$v_{w1} = \text{PM}$] AND [$v_{b1} = \text{PS}$] AND [$\dot{v}_{b1} \text{ NOT ZE}$] THEN [$f_1 = \text{ZS}$]
If [$v_{w1} = \text{PS}$] AND [$v_{b1} = \text{PS}$] AND [$\dot{v}_{b1} \text{ NOT ZE}$] THEN [$f_1 = \text{NM}$]
If [$v_{w1} = \text{ZE}$] AND [$v_{b1} = \text{PS}$] AND [$\dot{v}_{b1} \text{ NOT ZE}$] THEN [$f_1 = \text{NM}$]
If [$v_{w1} = \text{NS}$] AND [$v_{b1} = \text{PS}$] AND [$\dot{v}_{b1} \text{ NOT ZE}$] THEN [$f_1 = \text{NB}$]
If [$v_{w1} = \text{NM}$] AND [$v_{b1} = \text{PS}$] AND [$\dot{v}_{b1} \text{ NOT ZE}$] THEN [$f_1 = \text{NB}$]

3.2.2 Pravidla polovičního modelu

Pravidla polovičního modelu jsou dvojího typu. První typ pravidel vychází ze čtvrtinového modelu. Druhý typ pravidel popisuje vzájemné ovlivňování kol modelu.

Pravidla čtvrtinového modelu použijeme pro každé kolo zvlášť. Vstupy fuzzy regulátoru jsou rychlost kola č.1 v_{w1} , rychlost podvozku nad kolem č.1 v_{b1} , zrychlení podvozku nad kolem č.1 \dot{v}_{b1} , rychlost kola č.2 v_{w2} , rychlost podvozku nad kolem č.2 v_{b2} , zrychlení podvozku nad kolem č.2 \dot{v}_{b1} . Výstupy regulátoru jsou síla f_1 a síla f_2 .

Druhý typ pravidel, pravidla z podvozku, využívá informace o rychlosti těžiště v_T , zrychlení těžiště \dot{v}_T a podélné úhlové rychlosti ω . Tyto veličiny jsou vstupy regulátoru. Výstupem regulátoru jsou opět síly f_1 a f_2 . Podélnou úhlovou rychlost ω můžeme dopočítat z informací z kola č.1 respektive kola č.2 :

$$\begin{aligned} \omega &= \frac{v_{b1} - v_T}{L_1}, \\ \omega &= \frac{v_{b2} + v_T}{L_2}. \end{aligned} \tag{3.2}$$

Předešlá pravidla neuvážovala možnost, že jsou kola modelu v klidu, výchylky kol z_{w1} , z_{w2} jsou téměř nulové, ale podvozek kmitá. Tato situace nastane v případě rozjíždění respektive brzdění nebo např. při průjezdech automobilu zatáčkou. Předešlá pravidla také neuvážovala, že se kola navzájem ovlivňují. Pravidla sestavená pro podvozek tuto situaci uvažují. Regulátor polovičního modelu používá celkem 170 pravidel.

Tabulka 3.5: Příklad pravidel polovičního modelu - pravidla kol

If [$v_{w2} = \text{PM}$] AND [$v_{b2} = \text{PM}$] AND [$\dot{v}_{b2} = \text{ZE}$] THEN [$f_2 = \text{ZE}$]
If [$v_{w2} = \text{PS}$] AND [$v_{b2} = \text{PM}$] AND [$\dot{v}_{b2} = \text{ZE}$] THEN [$f_2 = \text{NS}$]
If [$v_{w2} = \text{ZE}$] AND [$v_{b2} = \text{PM}$] AND [$\dot{v}_{b2} = \text{ZE}$] THEN [$f_2 = \text{NM}$]
If [$v_{w2} = \text{NS}$] AND [$v_{b2} = \text{PM}$] AND [$\dot{v}_{b2} = \text{ZE}$] THEN [$f_2 = \text{NM}$]
If [$v_{w2} = \text{NM}$] AND [$v_{b2} = \text{PM}$] AND [$\dot{v}_{b2} = \text{ZE}$] THEN [$f_2 = \text{NV}$]
If [$v_{w1} = \text{PM}$] AND [$v_{b1} = \text{PS}$] AND [$\dot{v}_{b1} = \text{ZE}$] THEN [$f_1 = \text{ZE}$]
If [$v_{w1} = \text{PS}$] AND [$v_{b1} = \text{PS}$] AND [$\dot{v}_{b1} = \text{ZE}$] THEN [$f_1 = \text{NS}$]
If [$v_{w1} = \text{ZE}$] AND [$v_{b1} = \text{PS}$] AND [$\dot{v}_{b1} = \text{ZE}$] THEN [$f_1 = \text{NS}$]
If [$v_{w1} = \text{NS}$] AND [$v_{b1} = \text{PS}$] AND [$\dot{v}_{b1} = \text{ZE}$] THEN [$f_1 = \text{NM}$]
If [$v_{w1} = \text{NM}$] AND [$v_{b1} = \text{PS}$] AND [$\dot{v}_{b1} = \text{ZE}$] THEN [$f_1 = \text{NM}$]

Tabulka 3.6: Příklad pravidel polovičního modelu - pravidla podvozku

If[$v_T = \text{NM}$] AND [$\omega = \text{ZE}$] AND [$\dot{v}_T = \text{P}$] THEN [$f_1 = \text{PM}$] AND [$f_2 = \text{PM}$]
If[$v_T = \text{NM}$] AND [$\omega = \text{ZE}$] AND [$\dot{v}_T = \text{N}$] THEN [$f_1 = \text{PM}$] AND [$f_2 = \text{PM}$]
If[$v_T = \text{PS}$] AND [$\omega = \text{NS}$] AND [$\dot{v}_T = \text{P}$] THEN [$f_1 = \text{PS}$] AND [$f_2 = \text{NB}$]
If[$v_T = \text{PS}$] AND [$\omega = \text{NS}$] AND [$\dot{v}_T = \text{N}$] THEN [$f_1 = \text{PS}$] AND [$f_2 = \text{NB}$]
If[$v_T = \text{NS}$] AND [$\omega = \text{NS}$] AND [$\dot{v}_T = \text{N}$] THEN [$f_1 = \text{PB}$] AND [$f_2 = \text{NS}$]
If[$v_T = \text{PM}$] AND [$\omega = \text{NM}$] AND [$\dot{v}_T = \text{P}$] THEN [$f_1 = \text{ZE}$] AND [$f_2 = \text{NB}$]
If[$v_T = \text{ZE}$] AND [$\omega = \text{NM}$] AND [$\dot{v}_T = \text{P}$] THEN [$f_1 = \text{PB}$] AND [$f_2 = \text{NV}$]
If[$v_T = \text{NS}$] AND [$\omega = \text{PM}$] AND [$\dot{v}_T = \text{ZE}$] THEN [$f_1 = \text{NS}$] AND [$f_2 = \text{PB}$]
If[$v_T = \text{NM}$] AND [$\omega = \text{PS}$] AND [$\dot{v}_T = \text{ZE}$] THEN [$f_1 = \text{ZE}$] AND [$f_2 = \text{PM}$]
If[$v_T = \text{NM}$] AND [$\omega = \text{ZE}$] AND [$\dot{v}_T = \text{ZE}$] THEN [$f_1 = \text{PS}$] AND [$f_2 = \text{PS}$]

3.3 Infereční mechanismus

Infereční mechanismus je postup, který nám umožní stanovit výstupní fuzzy množinu pro danou vstupní fuzzy množinu. Toto infereční mechanismus realizuje aplikací pravidel. Dále si na několika pravidlech čtvrtinového modelu ukážeme jeho princip.

Mějme dvě pravidla :

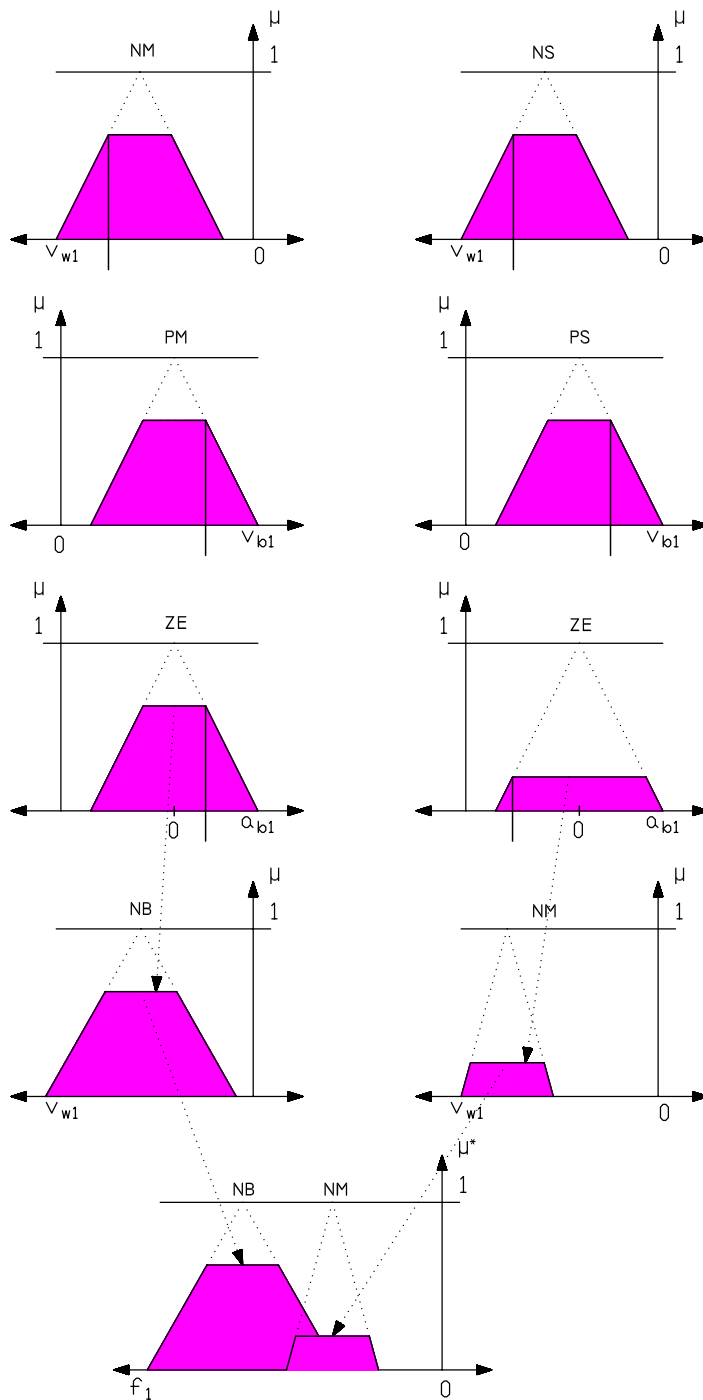
$$\begin{aligned} \text{If}[v_{w1} = \text{NM}] \text{ AND } [v_{b1} = \text{PM}] \text{ AND } [\dot{v}_{b1} = \text{ZE}] \text{ THEN } [f_1 = \text{NB}], \\ \text{If}[v_{w1} = \text{NM}] \text{ AND } [v_{b1} = \text{PM}] \text{ AND } [\dot{v}_{b1} = \text{ZE}] \text{ THEN } [f_1 = \text{NB}]. \end{aligned}$$

Všechny vstupy v_{w1} , v_{b1} , \dot{v}_{b1} jsou převedeny na fuzzy data. Infereční mechanismus porovná jednotlivé vstupy a vybere pro všechna pravidla nejmenší hodnoty funkce příslušnosti fuzzyfikovaných vstupů. Toto platí v případě, že v pravidlech je použita logická spojka *and* (3.3).

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \min \{ \mu_{NM}(v_{b1}), \mu_{PM}(v_{w1}), \mu_{ZE}(\dot{v}_{b1}) \}, \\ \alpha_2 &= \min \{ \mu_{NS}(v_{b1}), \mu_{PS}(v_{w1}), \mu_{ZE}(\dot{v}_{b1}) \}. \end{aligned} \quad (3.3)$$

Použijeme-li v pravidlech logickou spojku *or*, infereční mechanismus vybírá největší hodnotu funkce příslušnosti fuzzyfikovaných vstupů. Výstupní fuzzy množinu, která se skládá ze sjednocení oříznutých funkcí příslušnosti (3.4), dostaneme aplikováním inferečního mechanismu na všechna pravidla. Zbývá převést výstupní fuzzy množinu na ostré hodnoty. To je úkolem defuzzyfikace.

$$\mu^*(f) = \max \{ \min \{ \alpha_1, \mu_{NB} \}, \min \{ \alpha_2, \mu_{NM} \} \}. \quad (3.4)$$



Obrázek 3.7: Inferenční mechanismus

3.4 Defuzzyfikace

Pro praktickou realizaci akčního zásahu je potřeba přiřadit výstupním lingvistickým proměnným ostrou hodnotu akční veličiny v příslušném rozsahu. Proces, kdy aproximujeme neostře termy ostrou hodnotou akční veličiny se nazývá defuzzyfikace. Na základě inference získáme funkci příslušnosti výstupní fuzzy množiny jako sjednocení oříznutých (Mamdaniho implikace) nebo zmenšených (Larsenova implikace)⁵ funkcí příslušnosti. Metod defuzzyfikace je více, zde uvedu pouze často používané (JURA, P., 2003, strana 68). *Fuzzy logic toolbox* programu *Matlab* podporuje např. **metodu centroidů**, **metodu středu maxima MOM** nebo **metodu největšího maxima LOM**.

Metoda centroidů COA (centroid of area), nazývaná také **Metoda těžiště COG** (center of gravity). Je to nejznámější a obecně nejpoužívanější metoda. Fuzzyfikovaná ostrá hodnota se určí jako souřadnice těžiště plochy vytvořené sjednocením oříznutých výstupních fuzzy množin. Označíme-li funkci, která vznikne sjednocením oříznutých výstupních fuzzy množin od dílčích fuzzy pravidel $\mu_S(f)$, pak defuzzyfikovanou výstupní hodnotu metodou centroidů určíme :

$$f^* = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} f \cdot \mu_S(f) \cdot df}{\int_{-\infty}^{\infty} \mu_S(f) \cdot df}. \quad (3.5)$$

Tato metoda nezohledňuje překrytí jednotlivých funkcí, ze kterých se skládá výsledná funkce příslušnosti. Plocha překrytí je tedy započtena pouze jednou.

Metoda středu maxima MOM (middle of maximum) je metoda defuzzyfikace, kdy ostrou hodnotu udává aritmetický průměr prvního a posledního maxima, tzn. že výstupní funkce příslušnosti $\mu_S(f)$ má maximum v intervalu $\langle f_1^*; f_2^* \rangle$,

$$f_{MOM} = \frac{f_1^* + f_2^*}{2}. \quad (3.6)$$

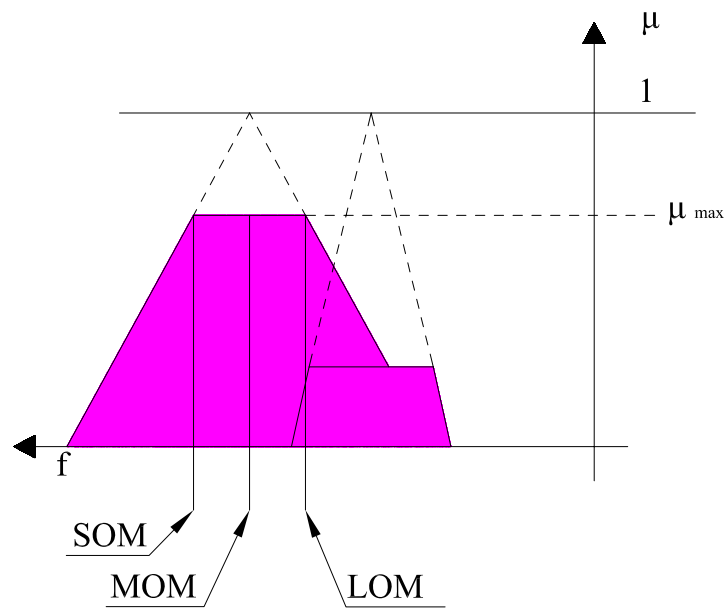
Metoda největšího maxima LOM (largest of maximum) je modifikací předešlé metody středu maxima. Jako defuzzyfikovaná hodnota se bere hodnota f největšího maxima funkce příslušnosti :

$$f_{LOM} = f_2^*. \quad (3.7)$$

⁵v této práci používám Mamdaniho implikaci

Metoda nejmenšího maxima SOM (smallest of maximum) je opět modifikací metody středu maxima. Jako defuzzyfikovaná hodnota se bere nejmenší hodnota f největšího maxima funkce příslušnosti :

$$f_{SOM} = f_1^* \quad (3.8)$$



Obrázek 3.8: Příklady jednotlivých metod defuzzyfikací

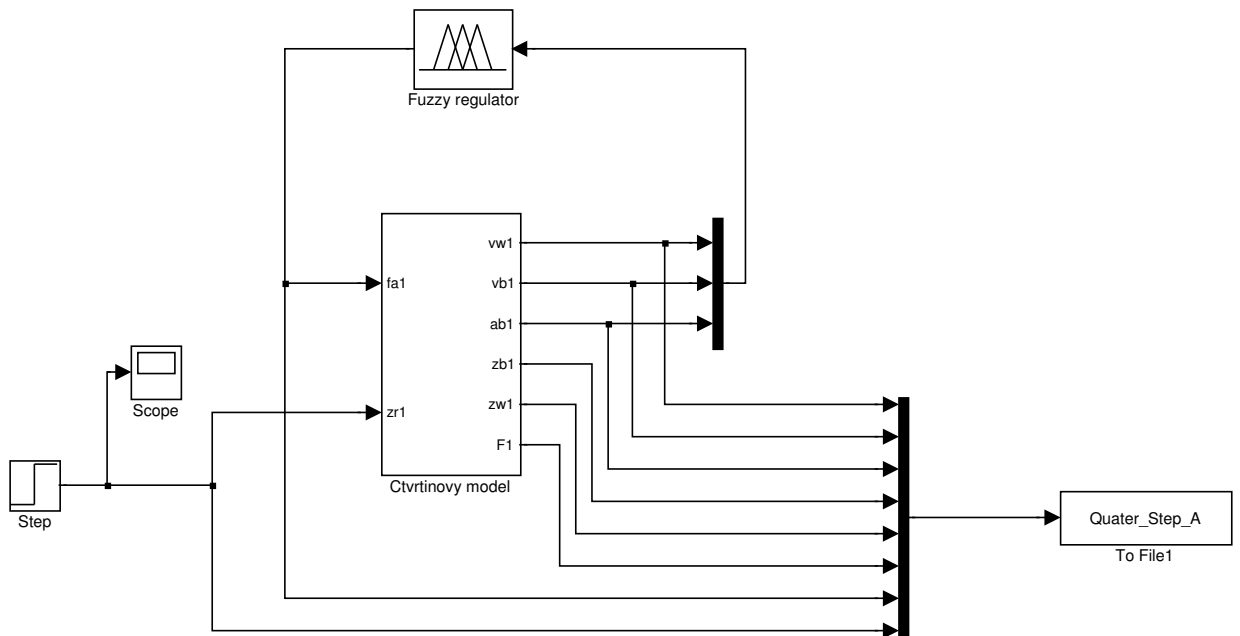
Kapitola 4

Fuzzy řízení

Po vytvoření jednotlivých modelů a jim příslušejících fuzzy regulátorů jsem simuloval vlastnosti navrženého aktivního tlumení pro čtvrtinový respektive poloviční model v prostředí *Matlab Simulink*.

4.1 Aktivní tlumení čtvrtinového modelu

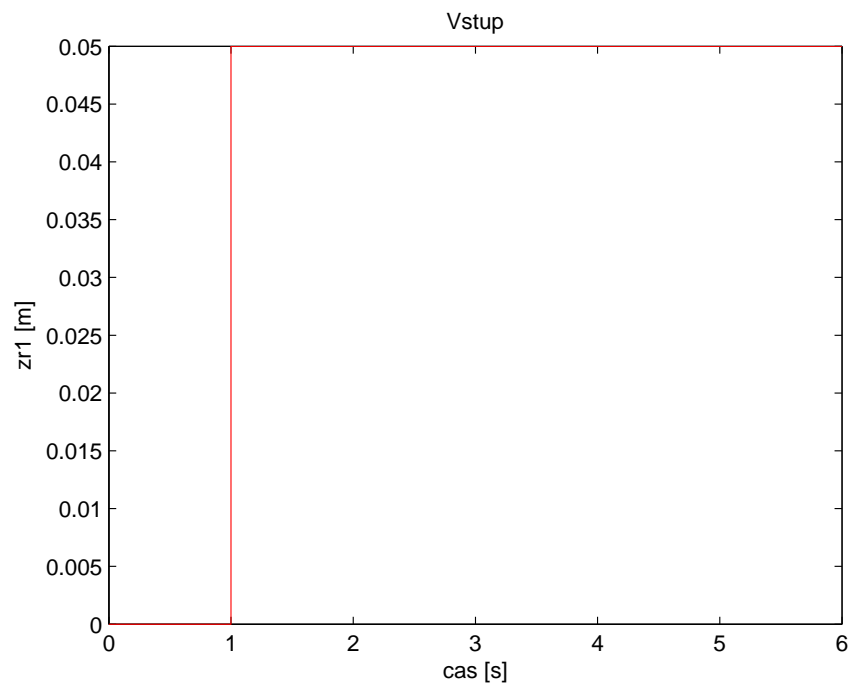
Syntézou čtvrtinového modelu s fuzzy regulátorem získáme systém aktivního tlumení obr. 4.1. Pro defuzzyfikaci používá regulátor metody centroidů.



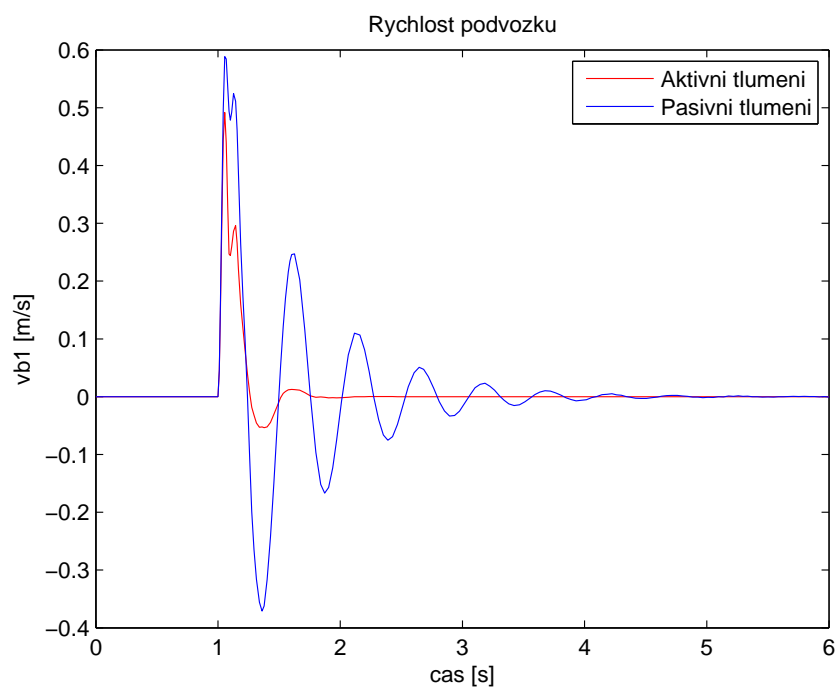
Obrázek 4.1: Aktivní tlumení pro čtvrtinový model

4.1.1 Odezva čtvrtinového modelu na jednotkový skok

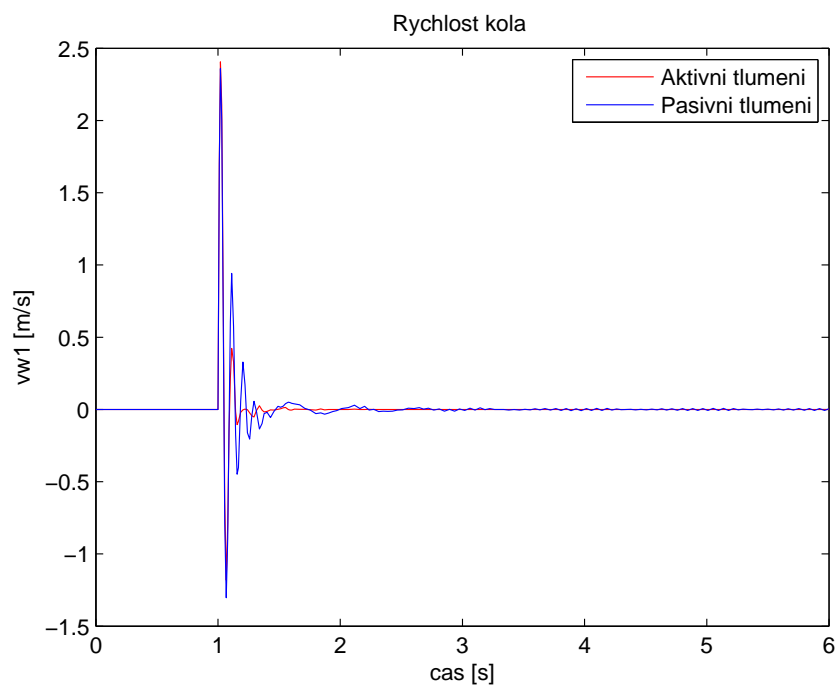
Jednotkovým skokem obr. 4.2 jsem simuloval nájezd čtvrtinového modelu obr. 2.1 na překážku o výšce 5 cm. Ve většině grafů jsou pro názornost vyneseny průběhy aktivního i pasivního tlumení. Z grafů vyplývá, že použitím regulátoru došlo jednoznačně ke zlepšení tlumení jak podvozku, tak kola modelu.



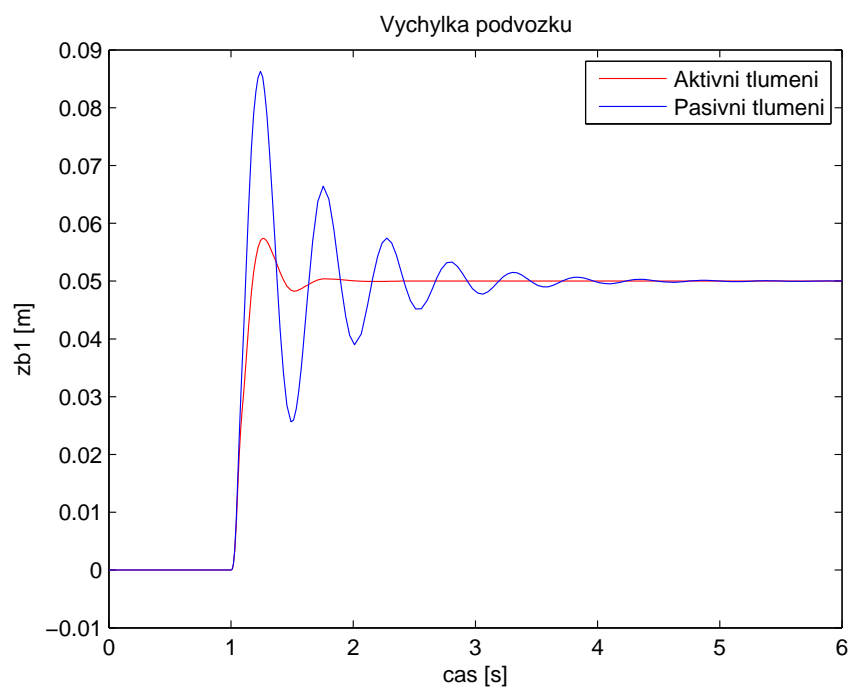
Obrázek 4.2: Testovací signál



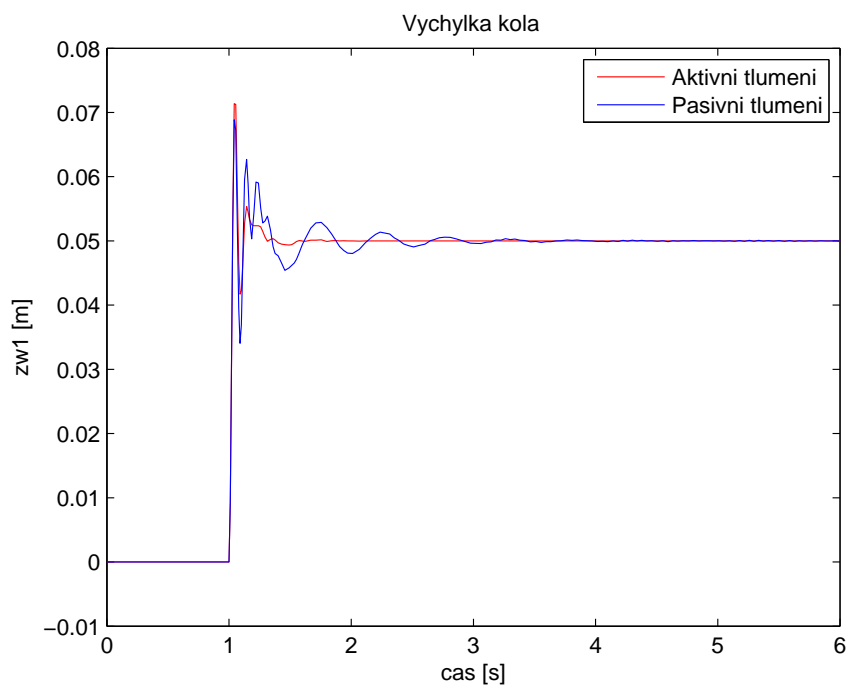
Obrázek 4.3: Rychlost podvozku nad kolem



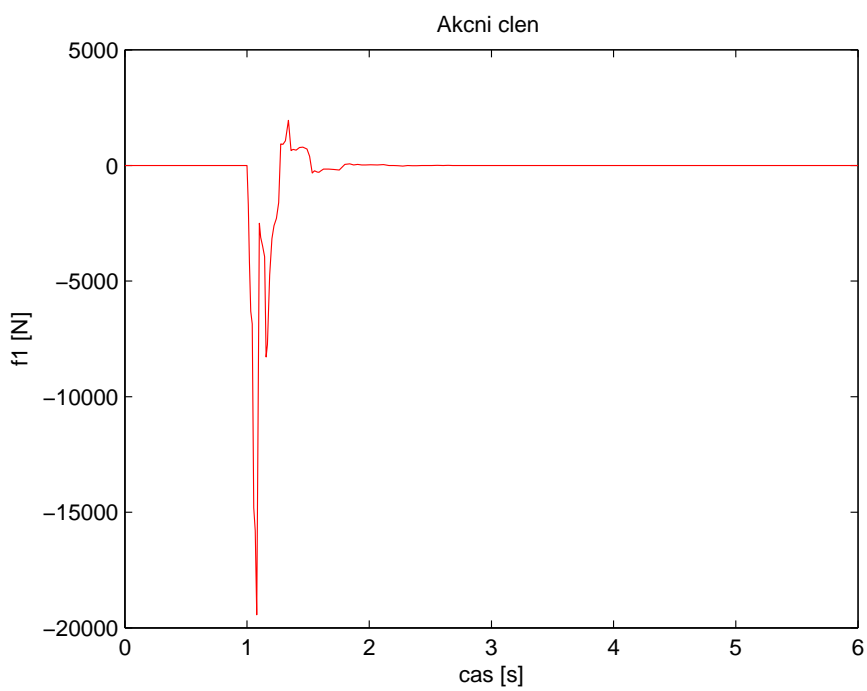
Obrázek 4.4: Rychlost kola



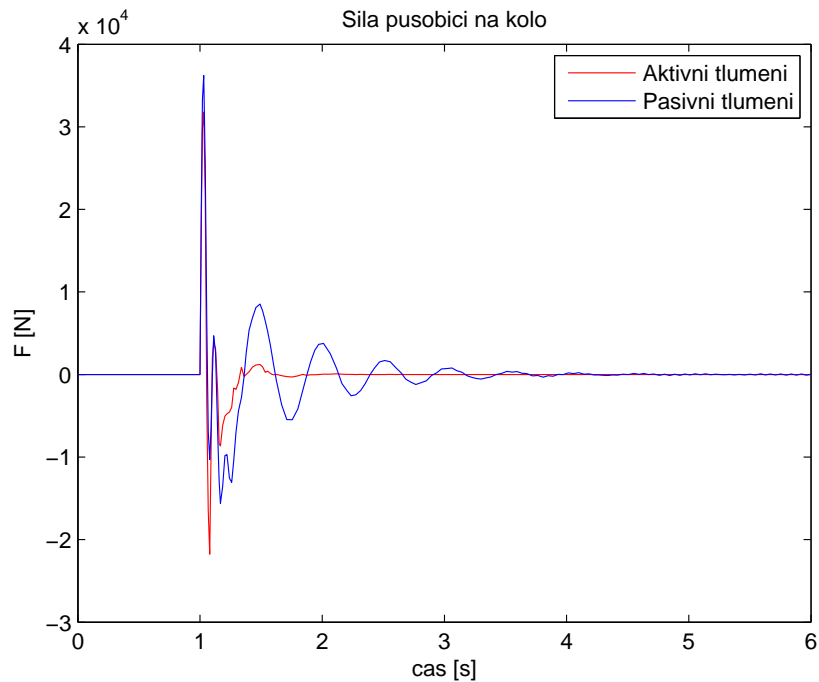
Obrázek 4.5: Výchylka podvozku nad kolem



Obrázek 4.6: Výchylka kola



Obrázek 4.7: Akční člen

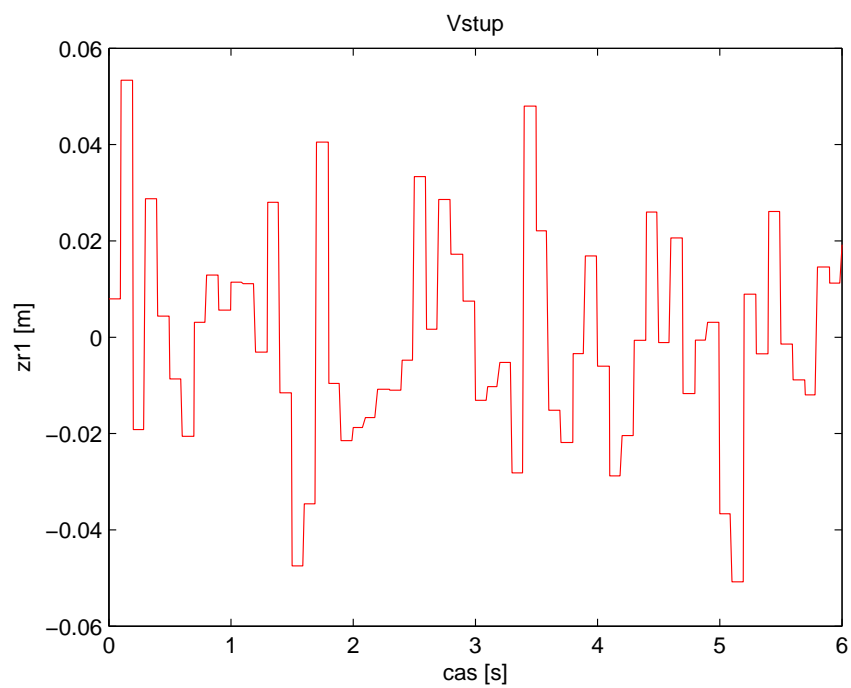


Obrázek 4.8: Síla působící na kolo

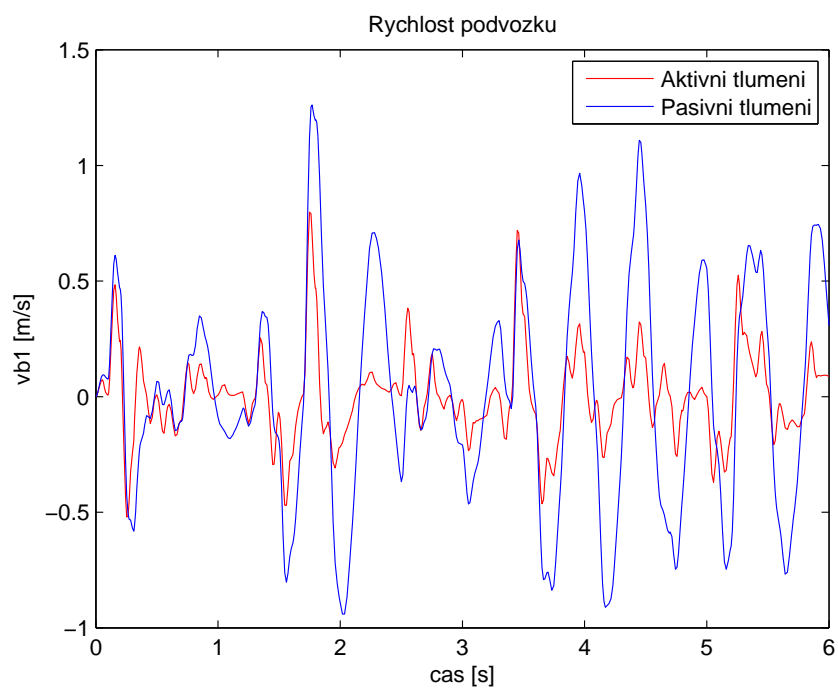
Graf průběhu síly působící na kolo z obr. 4.8 zobrazuje pouze sílu vyvozenou akčním členem. V grafu se nebere v úvahu síla vyvozená hmotností podvozku. Toto platí pro všechny grafy s průběhem síly působící na kolo uvedené dále.

4.1.2 Odezva čtvrtinového modelu na bílý šum

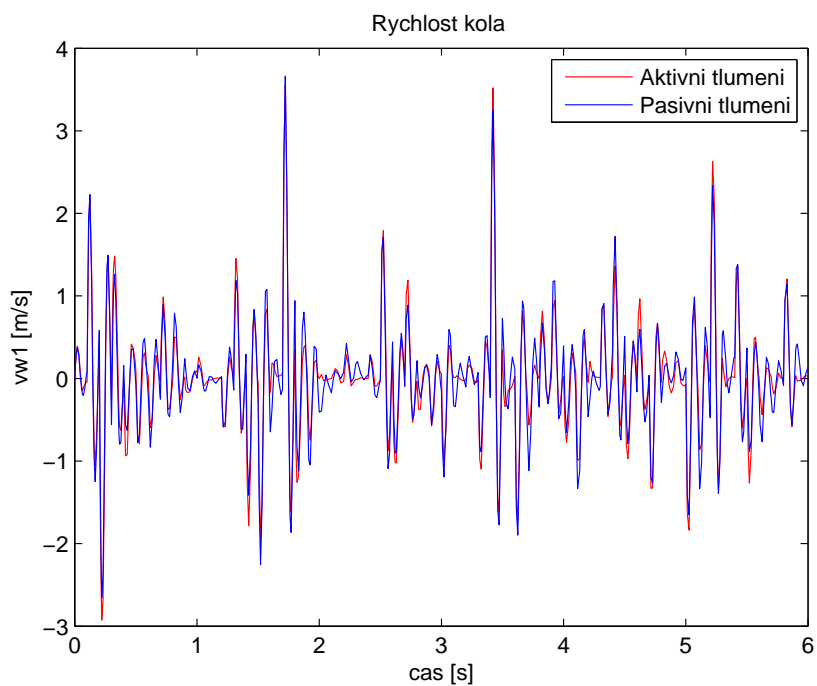
Při tomto testu působí na model náhodný signál z obr. 4.9. Tímto simulujeme velké nerovnosti vozovky. Z grafů je patrné, že použitím fuzzy regulátoru došlo ke zlepšení tlumení v oblasti podvozku, tlumení kola se však výrazně nezlepšilo. Toto je následek testovacího signálu, který působí na kolo s větší dynamikou než má podvozek. V konečném důsledku pak regulátor nestačí regulovat.



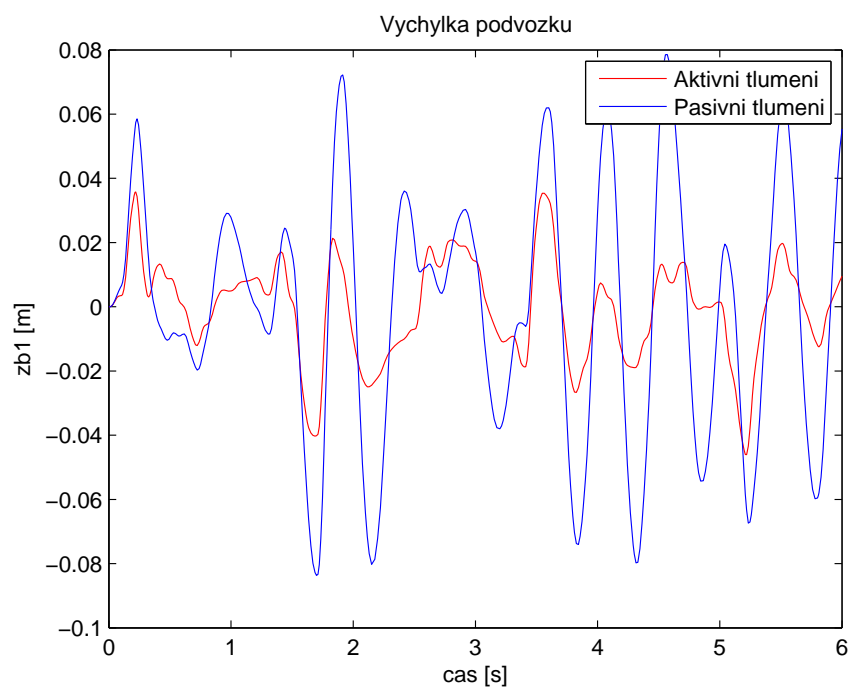
Obrázek 4.9: Testovací signál



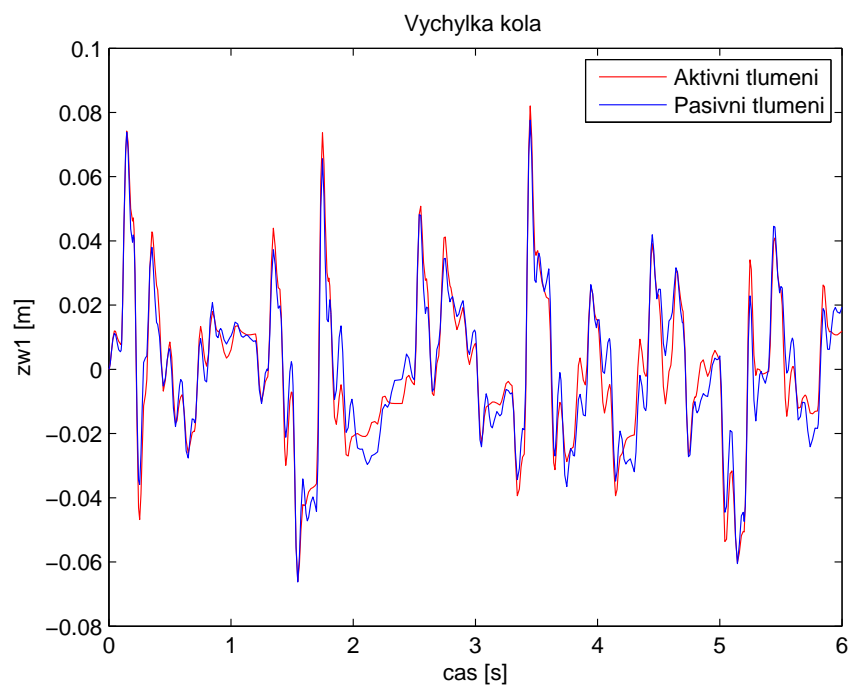
Obrázek 4.10: Rychlost podvozku nad kolem



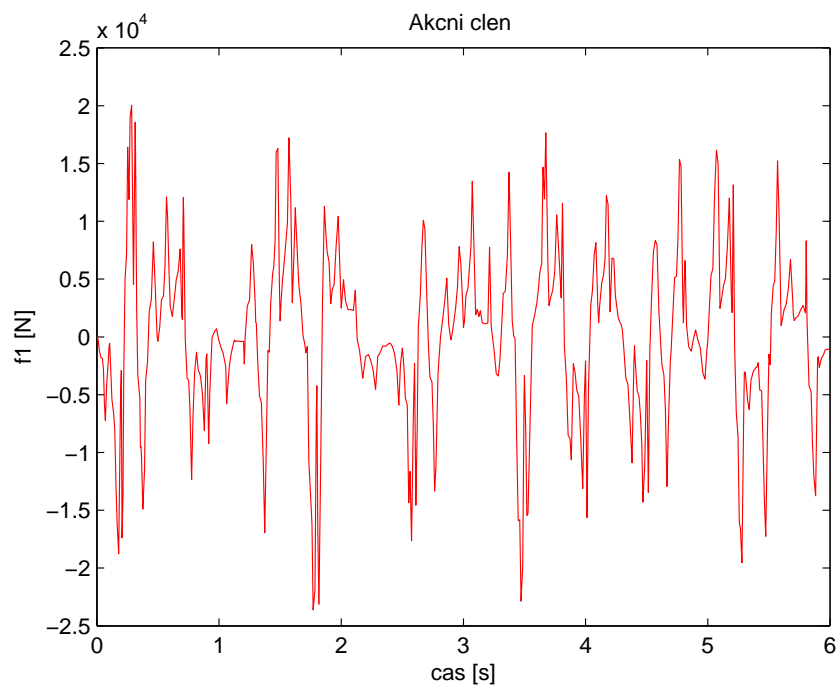
Obrázek 4.11: Rychlost kola



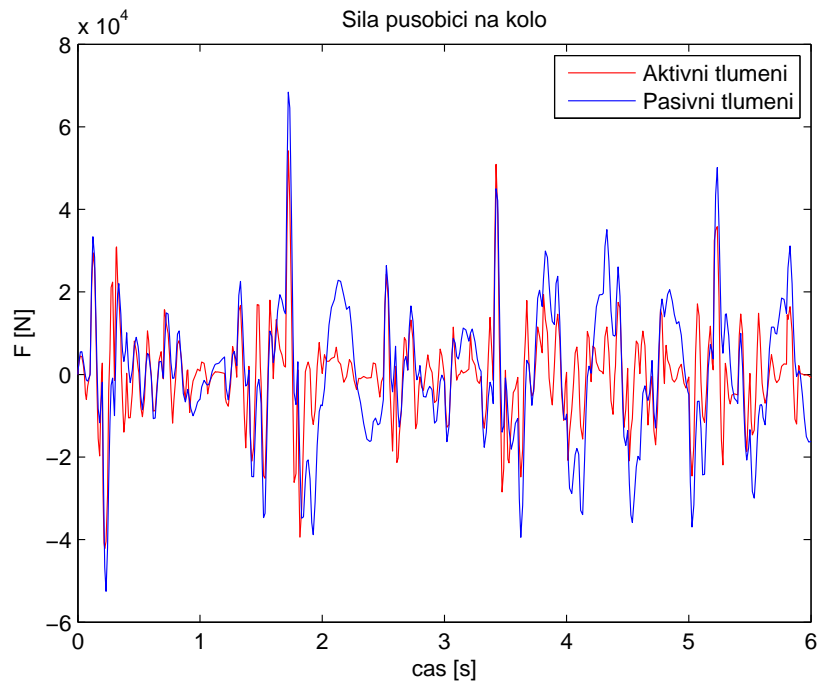
Obrázek 4.12: Výchylka podvozku nad kolem



Obrázek 4.13: Výchylka kola



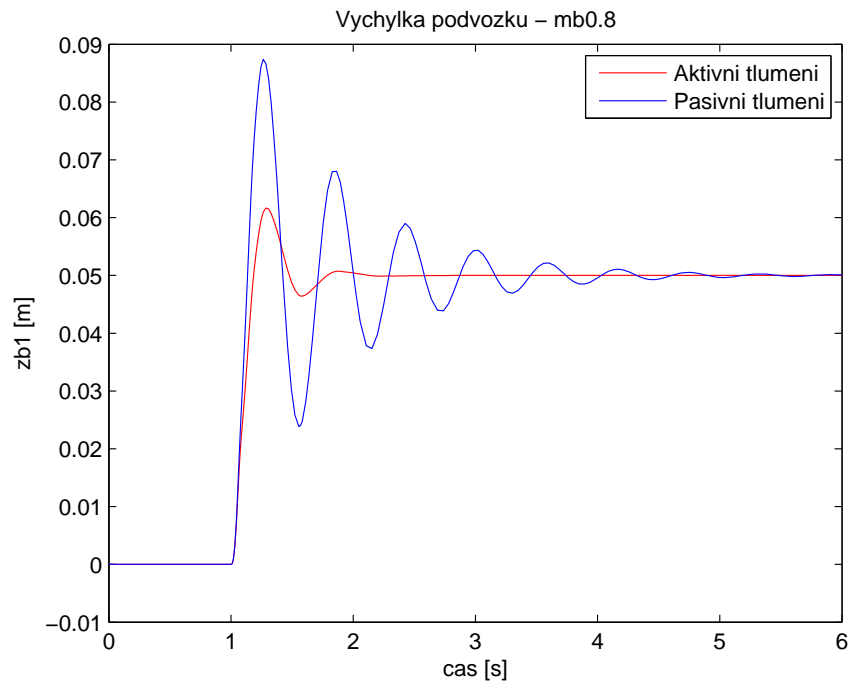
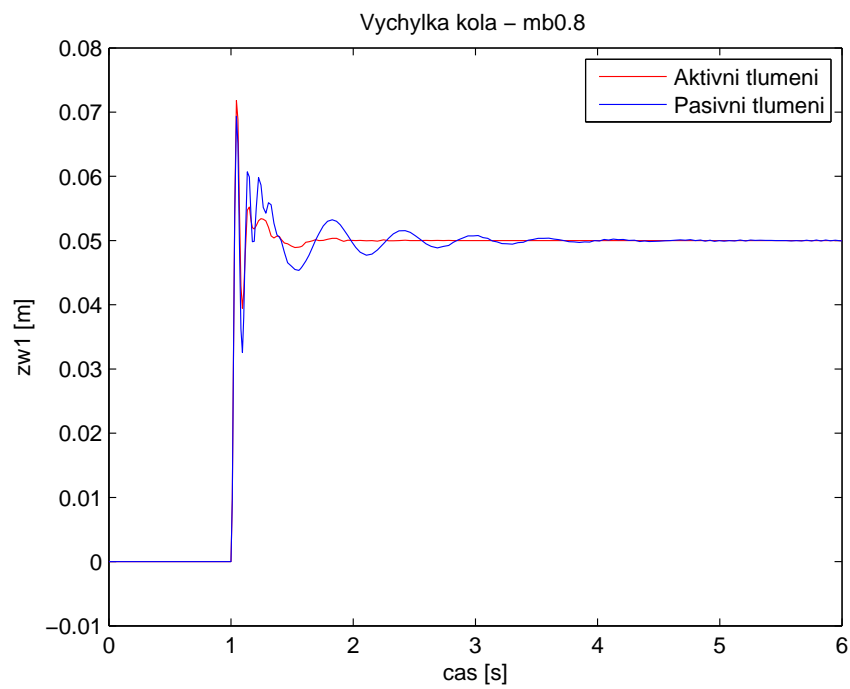
Obrázek 4.14: Akční člen

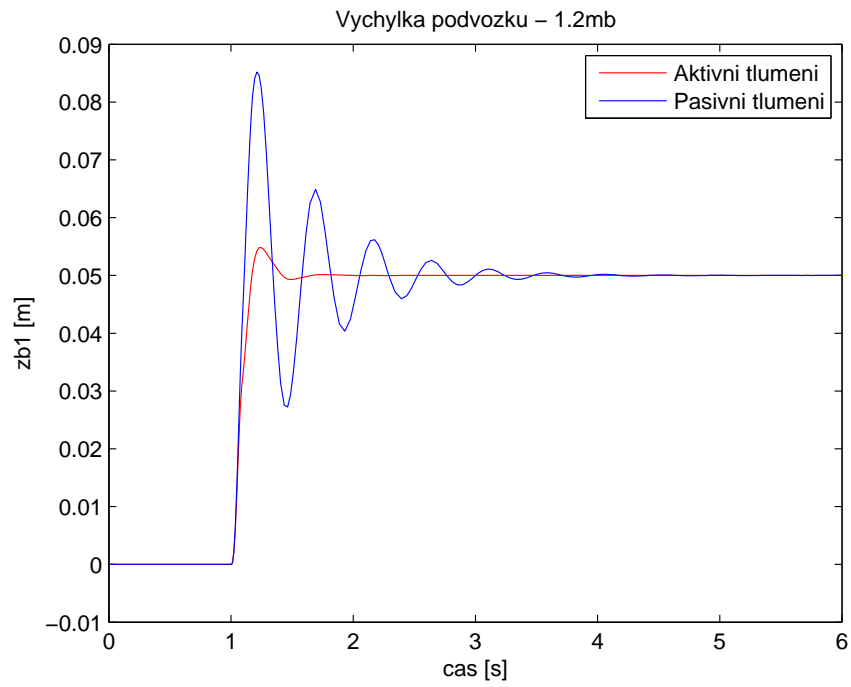
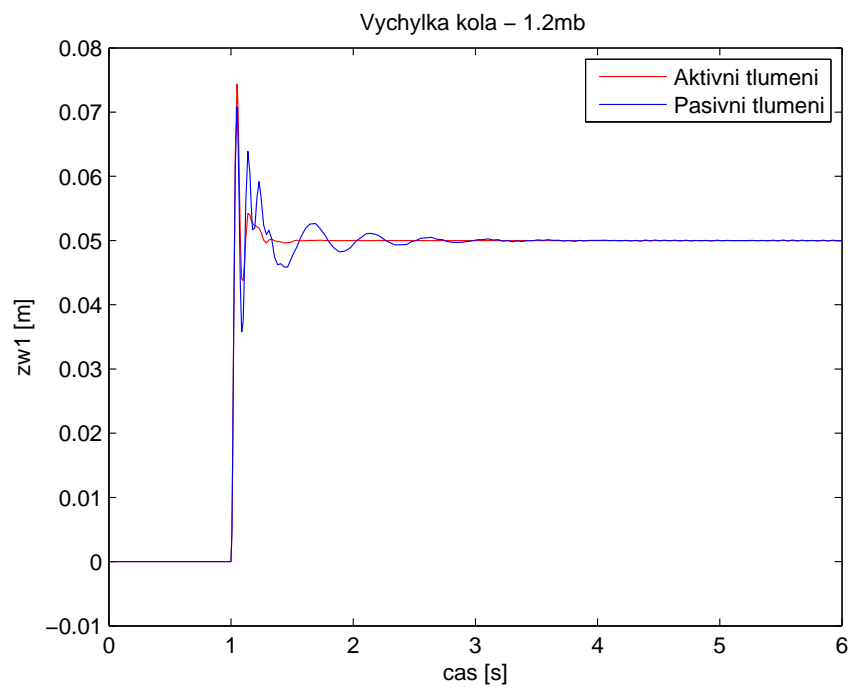


Obrázek 4.15: Síla působící na kolo

4.1.3 Robustnost fuzzy regulátoru čtvrtinového modelu

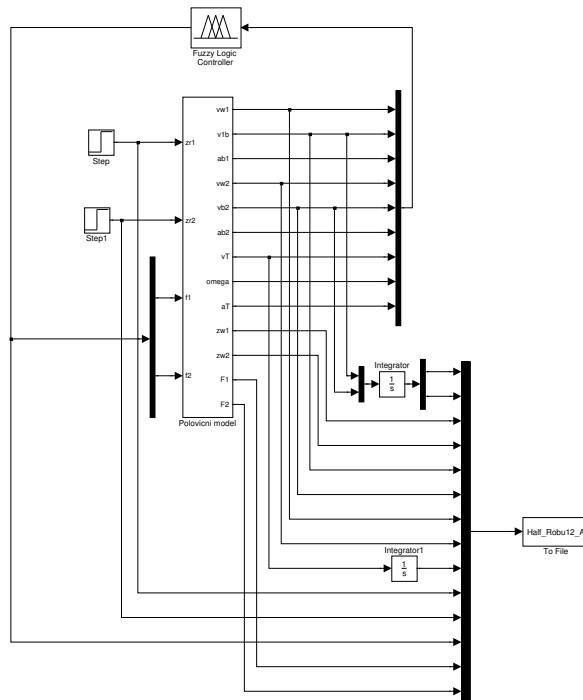
Robustnost regulátoru ověříme experimentem, při kterém budeme měnit hmotnost podvozku modelu m_{b1} v rozsahu $\langle 0,8 m_{b1}; 1,2 m_{b1} \rangle$. Testovacím signálem bude jednotkový skok z grafu obr. 4.2. Budou nás zajímat odchylky podvozku a kola. Z grafů vyplývá, že regulátor je navržen dostatečně robustně, neboť nedošlo ke zhoršení sledovaných parametrů.

Obrázek 4.16: Výchylka podvozku nad kolem při hmotnosti $m_{b1} \cdot 0,8$ Obrázek 4.17: Výchylka kola při hmotnosti $m_{b1} \cdot 0,8$

Obrázek 4.18: Výchylka podvozku nad kolem při hmotnosti $m_{b1} \cdot 1, 2$ Obrázek 4.19: Výchylka kola při hmotnosti $m_{b1} \cdot 1, 2$

4.2 Aktivní tlumení polovičního modelu

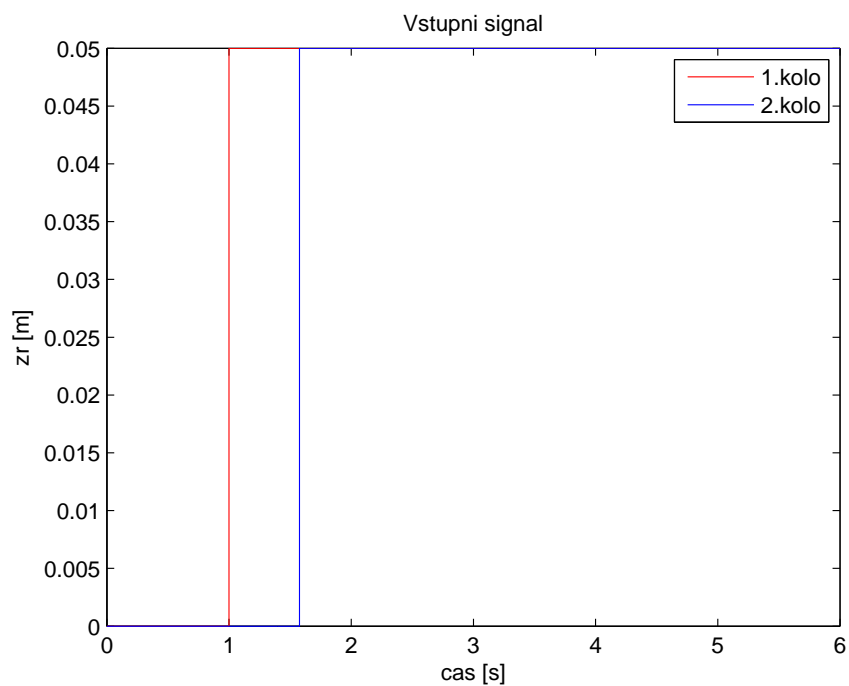
Syntézou polovičního modelu s fuzzy regulátorem získáme systém aktivního tlumení obr. 4.20. Pro defuzzyfikaci regulátor používá stejně jako v případě čtvrtinového modelu metodu centroidů.



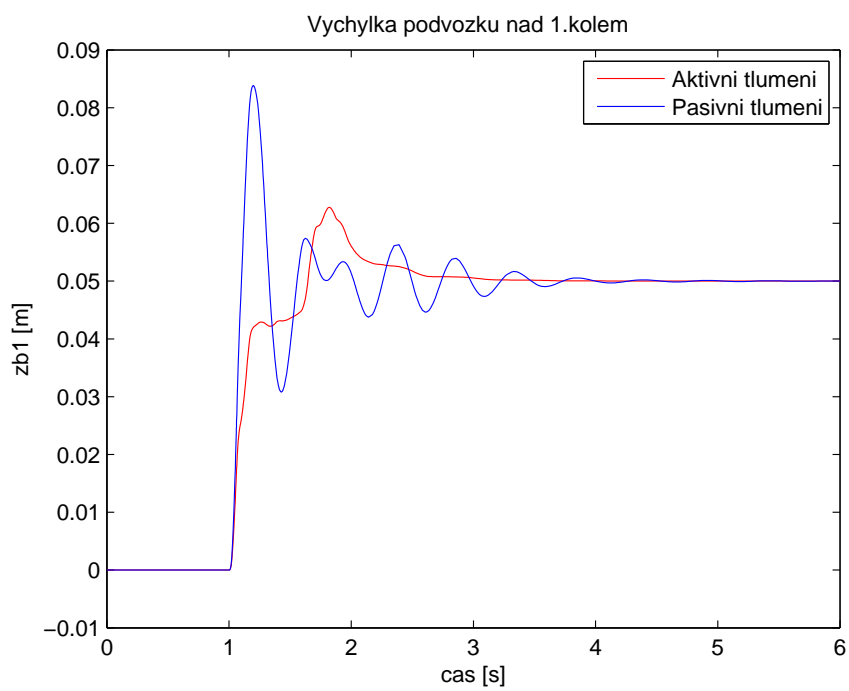
Obrázek 4.20: Aktivní tlumení pro poloviční model

4.2.1 Odezva polovičního modelu na jednotkový skok

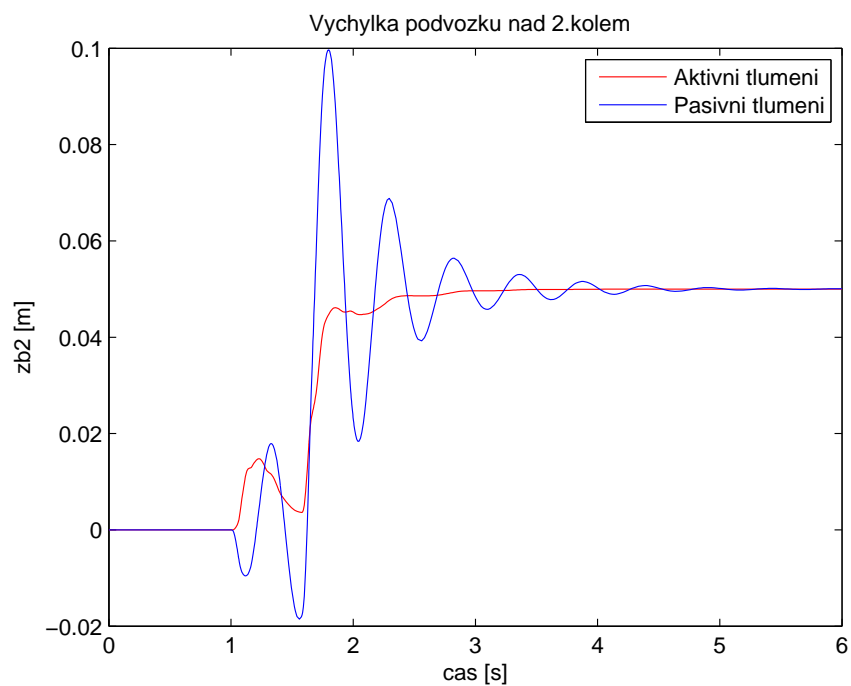
Nájezd polovičního modelu obr. 2.3 na překážku jsem simuloval pomocí testovacího signálu obr. 4.21. Tento signál vychýlí model o 5 cm. Skládá se ze dvou jednotkových skoků. Ty jsou vůči sobě posunuty o časový okamžik Δt symbolizující rychlost modelu $50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, viz. (3.1). Z naměřených grafů je patrné, že regulátor výrazně zlepšil odezvu podvozku. Co se týče odezvy kol, zde by bylo potřebné doladit nastavení regulátoru, přesněji pravidel pro podvozek modelu, abychom odstranili kmitání patrné na obr. 4.24 respektive obr. 4.24.



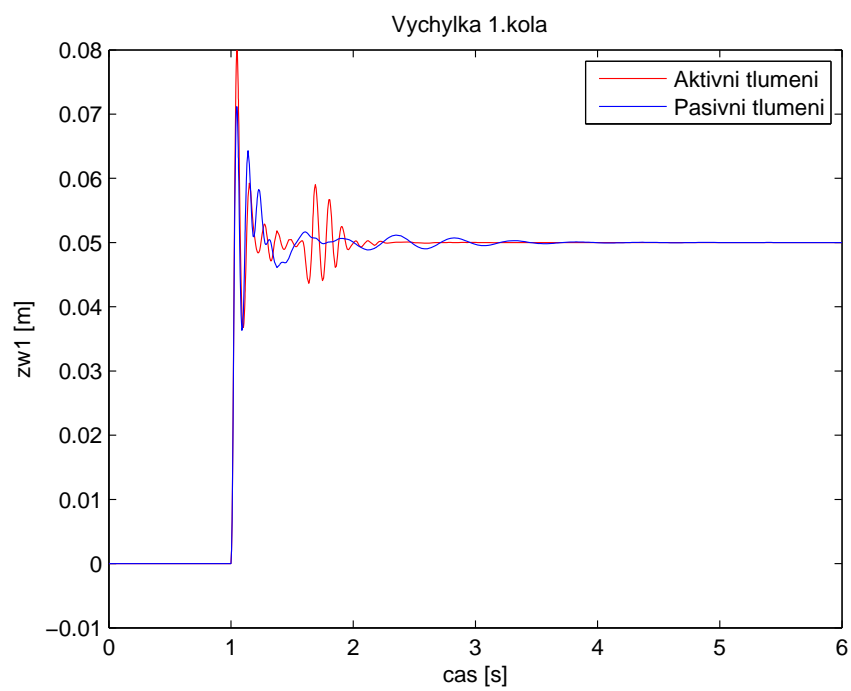
Obrázek 4.21: Testovací signál



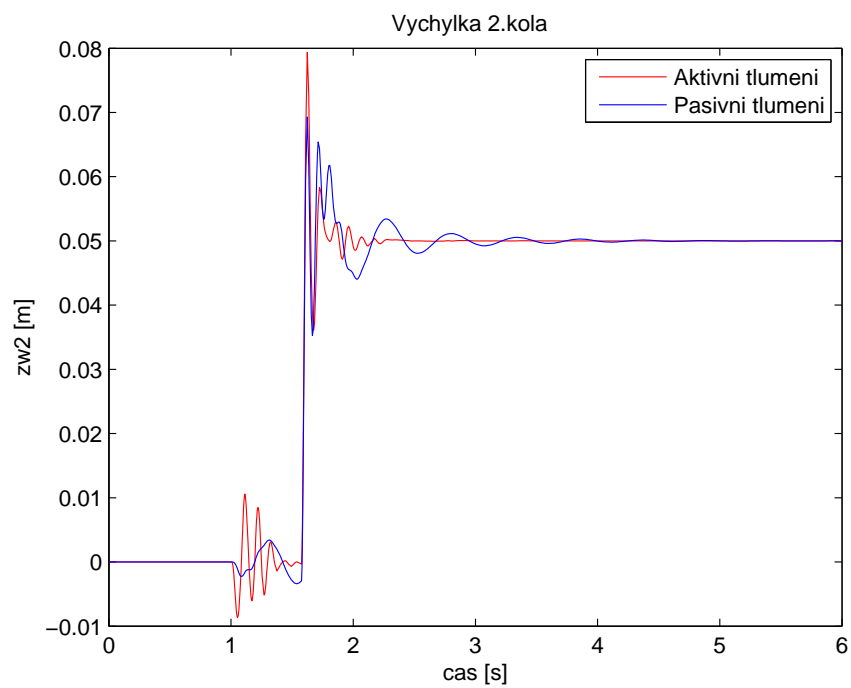
Obrázek 4.22: Výchylka podvozku nad kolem č.1



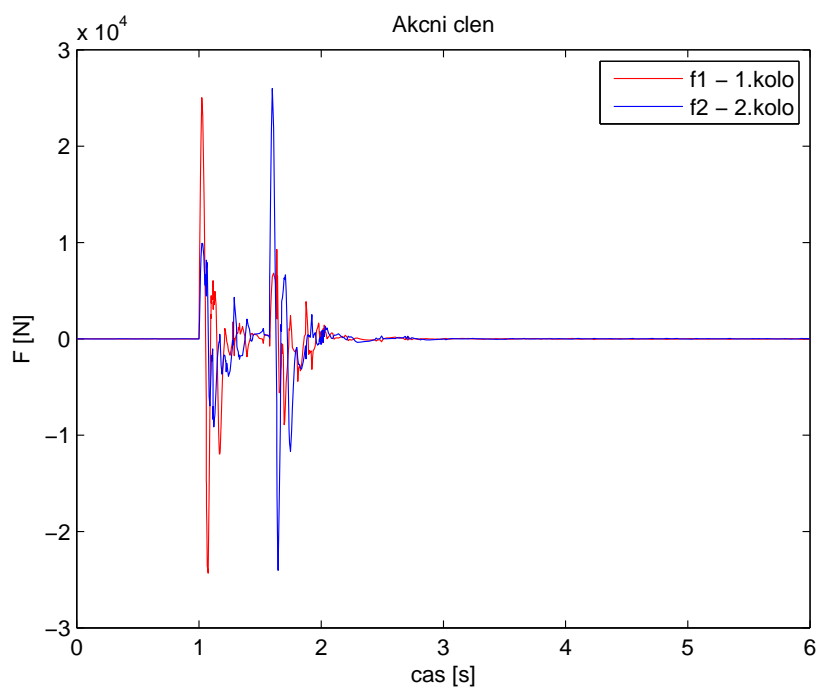
Obrázek 4.23: Výchylka podvozku nad kolem č.2



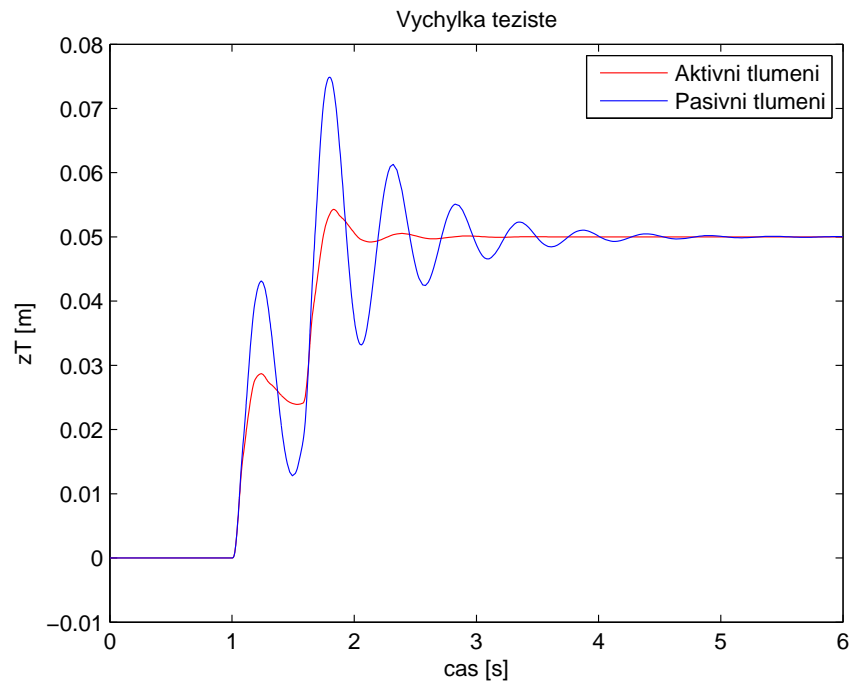
Obrázek 4.24: Výchylka kola č.1



Obrázek 4.25: Výchylka kola č.2



Obrázek 4.26: Akční člen

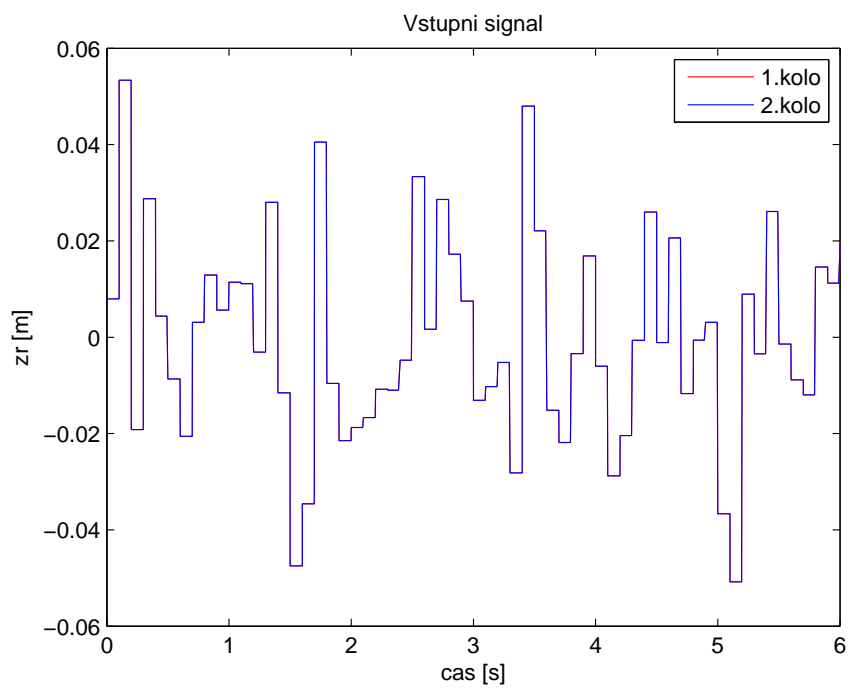


Obrázek 4.27: Výchylka těžiště

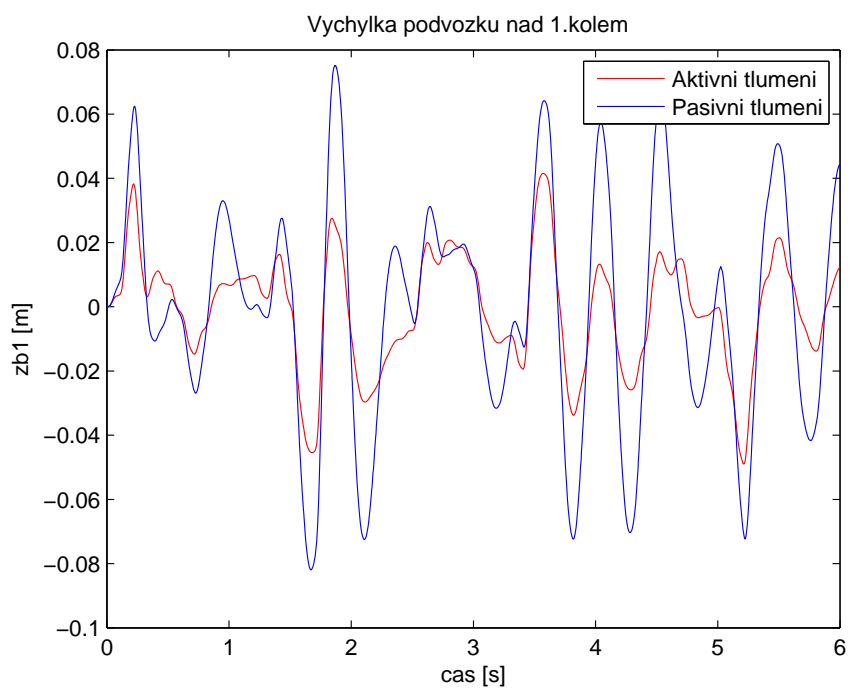
4.2.2 Odezva polovičního modelu na bílý šum

Při tomto testu působí na model náhodný signál z obr. 4.9. Tímto simulujeme velké nerovnosti vozovky. Z grafů je patrné, že použitím fuzzy regulátoru došlo ke zlepšení tlumení v oblasti podvozku, tlumení kola se však výrazně nezlepšilo. Toto je následek testovacího signálu, působícího na kolo s větší dynamikou než má podvozek.

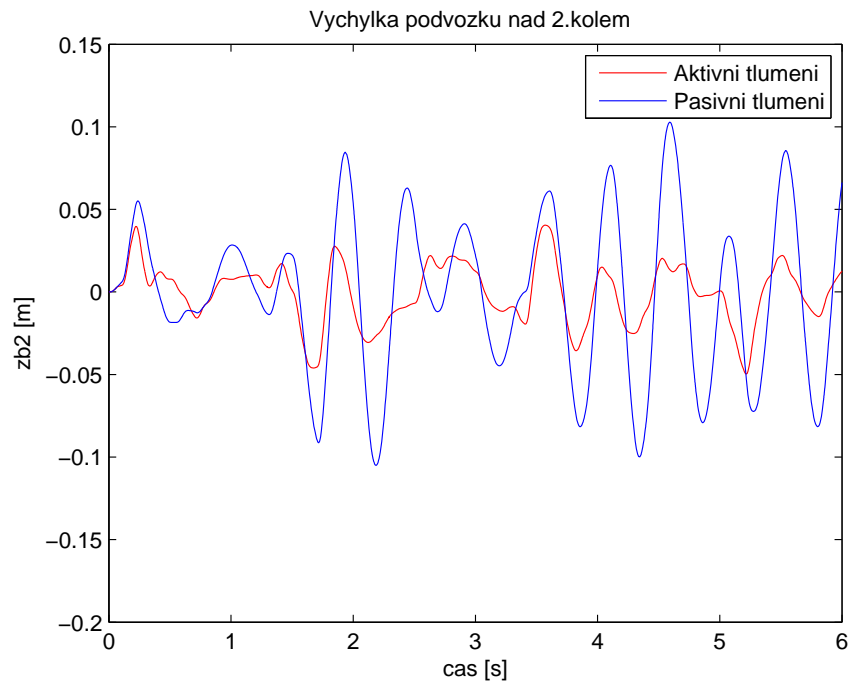
V konečném důsledku pak regulátor nestačí regulovat.



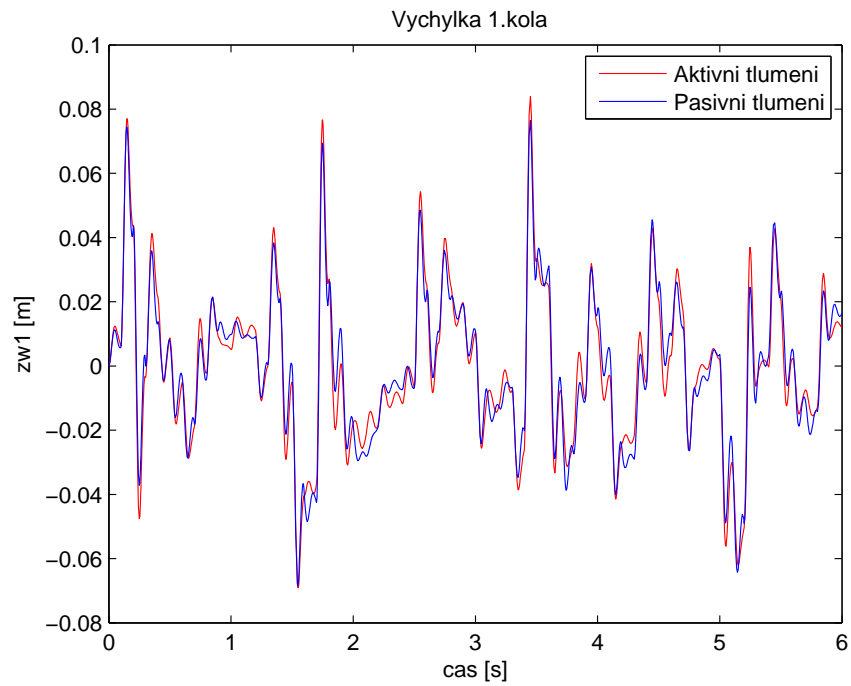
Obrázek 4.28: Testovací signál



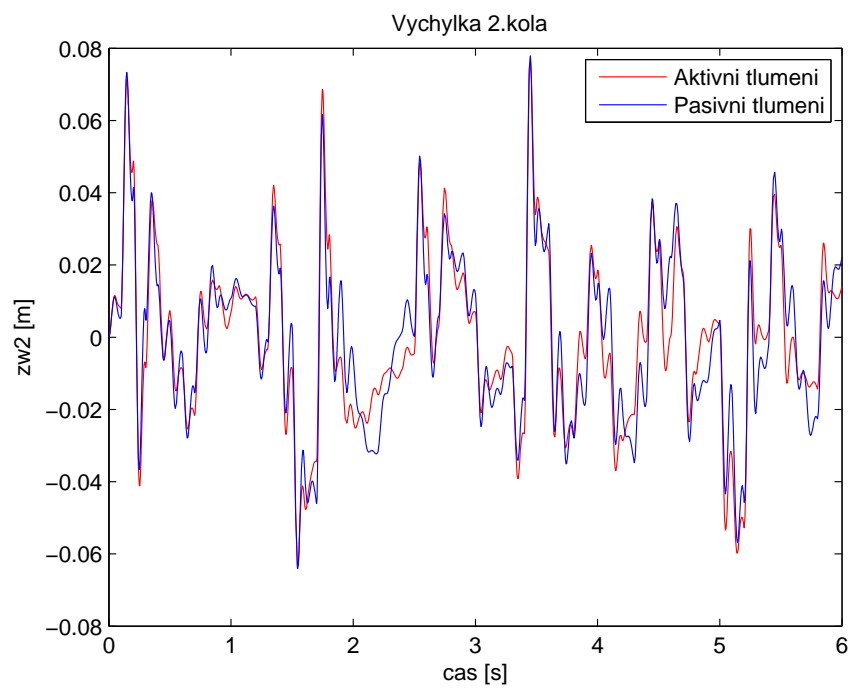
Obrázek 4.29: Výchylka podvozku modelu nad kolem č.1



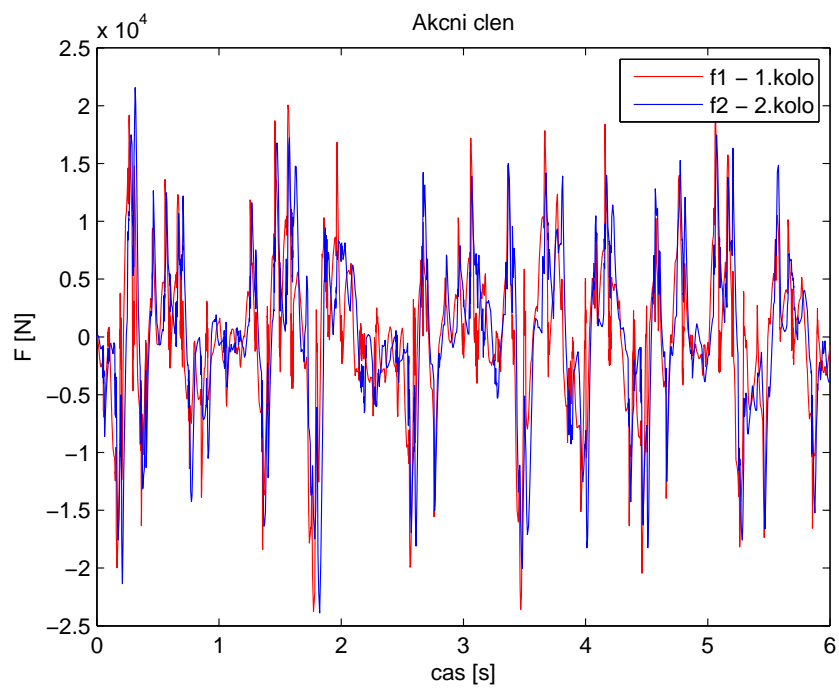
Obrázek 4.30: Výchylka podvozku modelu nad kolem č.2



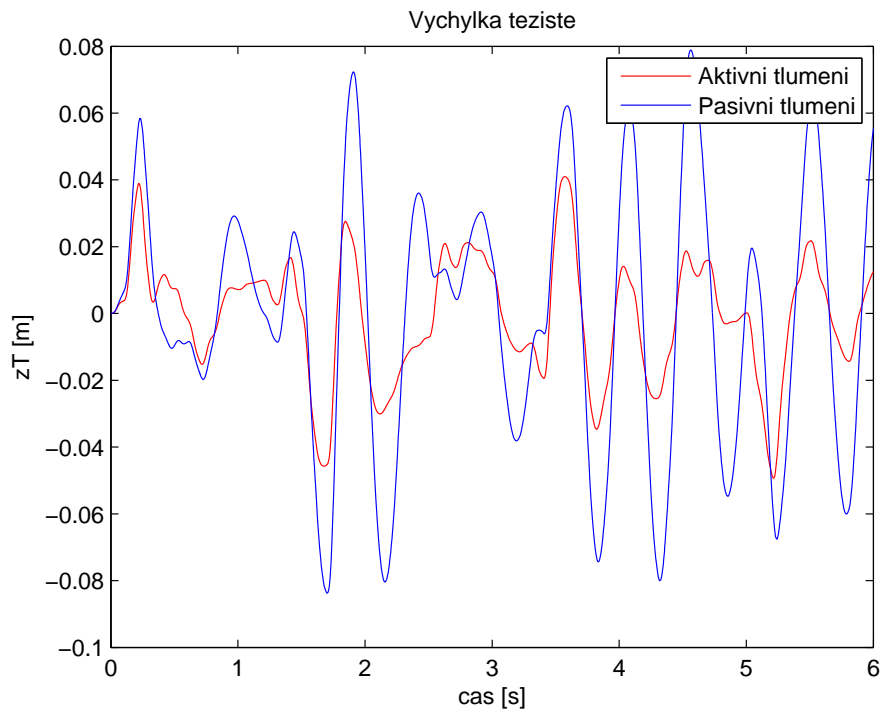
Obrázek 4.31: Výchylka kola č.1



Obrázek 4.32: Výchylka kola č.2



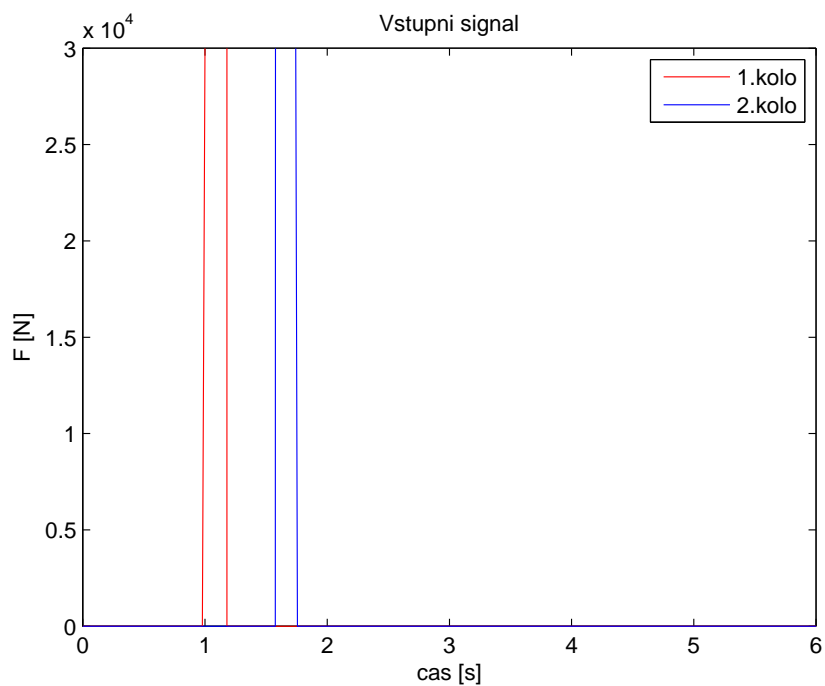
Obrázek 4.33: Akční zásah



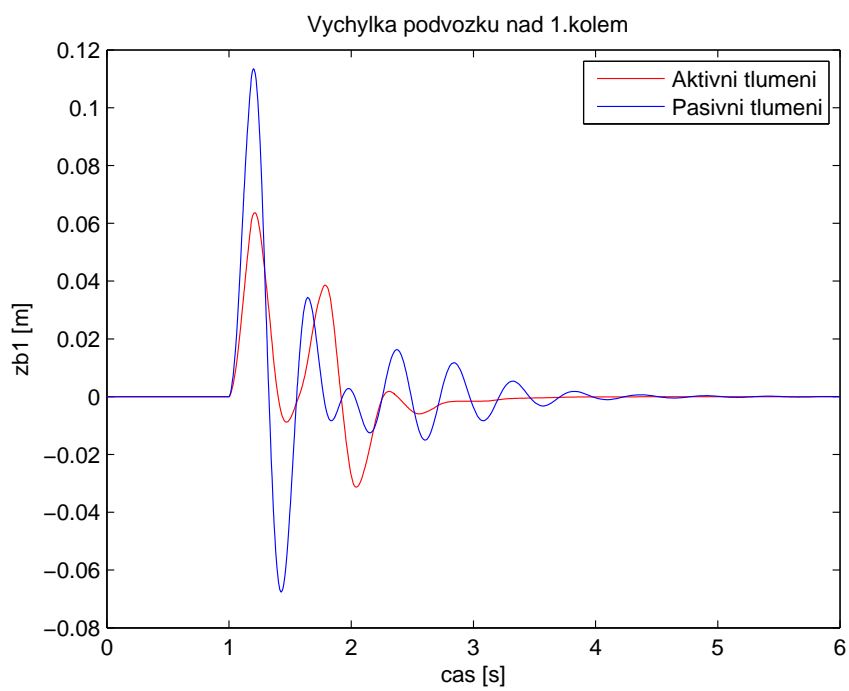
Obrázek 4.34: Výchylka těžiště modelu

4.2.3 Odezva polovičního modelu na simulované rozjždění a brzdění

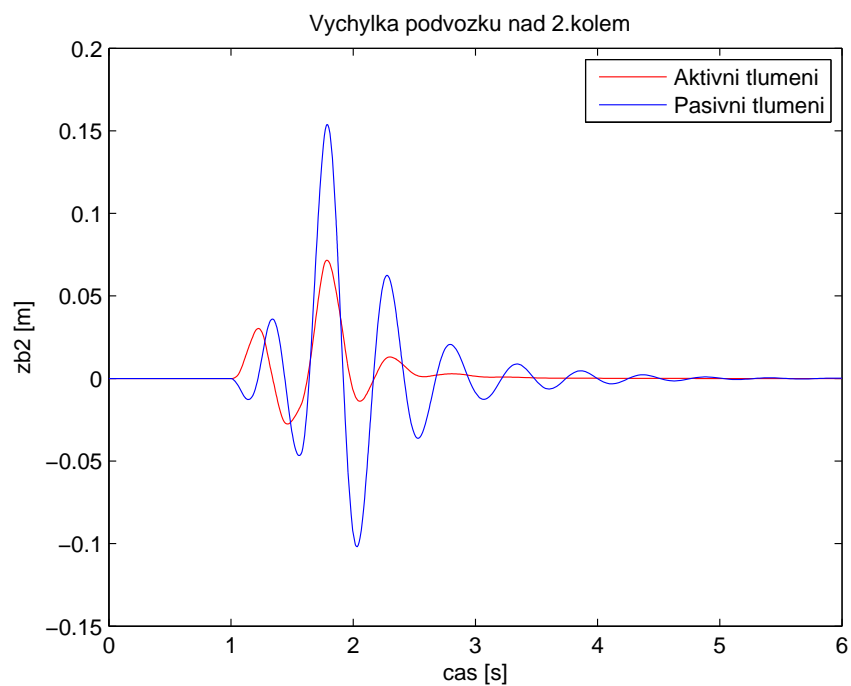
Doposud se model rozkmitával pouze impulzy pocházejícími od vozovky. Při brzdění respektive rozjždění však dochází k rozkmitání modelu od podvozku. Tento jev budeme simulovat zavedením výchylky do akčního členu pomocí signálu obr. 4.35. První impuls vychýlí první akční člen, druhý impuls vychýlí druhý akční člen. Z následujících grafů je vidět, že se zmenšily kmity podvozku a zejména kol. To je dáno využitím pravidel pro podvozek.



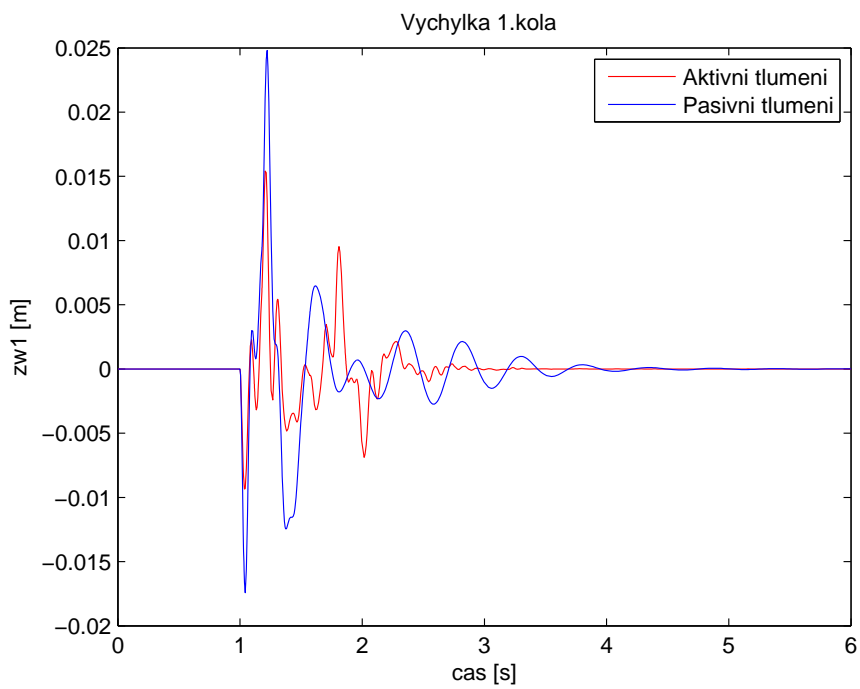
Obrázek 4.35: Testovací signál



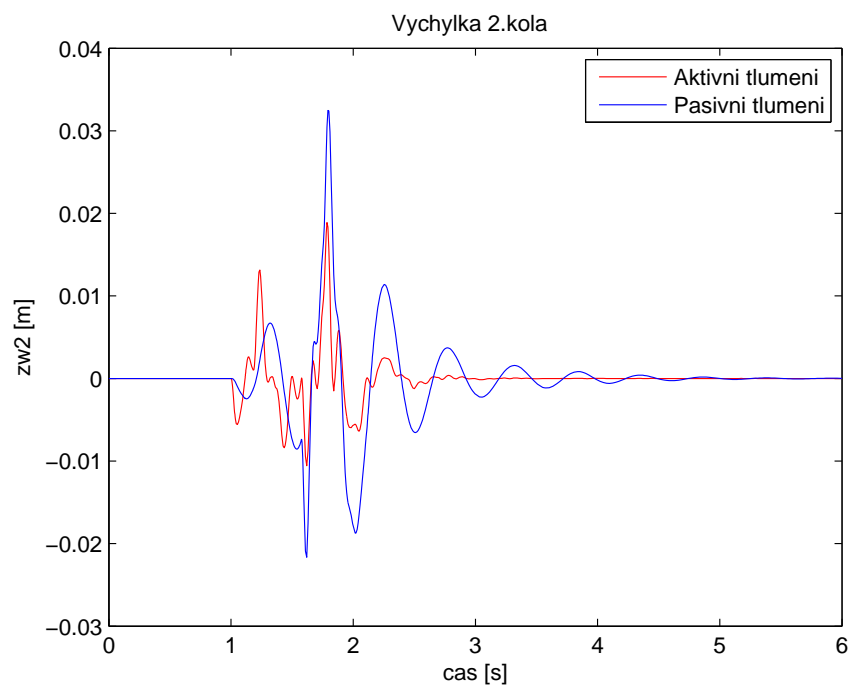
Obrázek 4.36: Výchylka podvozku modelu nad kolem č.1



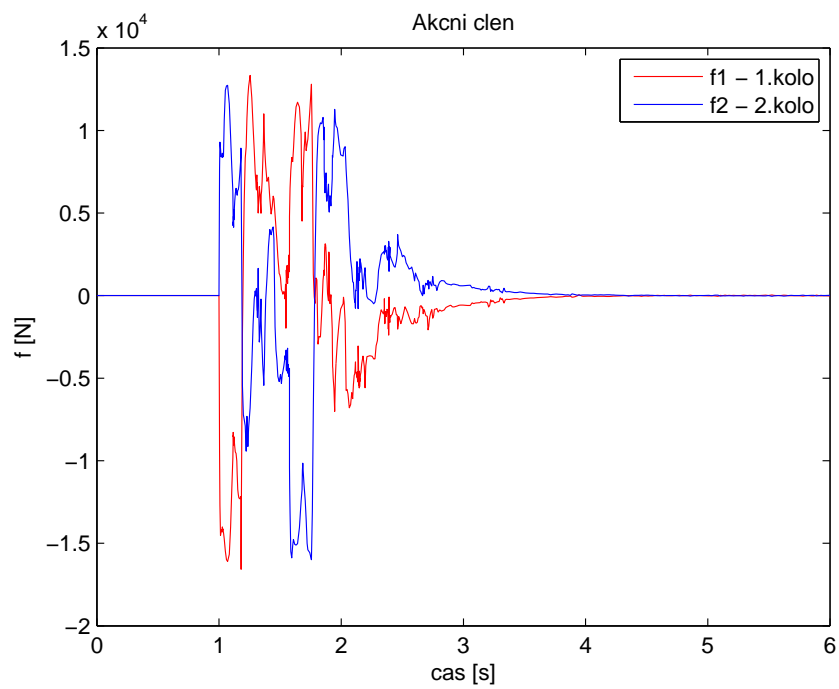
Obrázek 4.37: Výchylka podvozku modelu nad kolem č.2



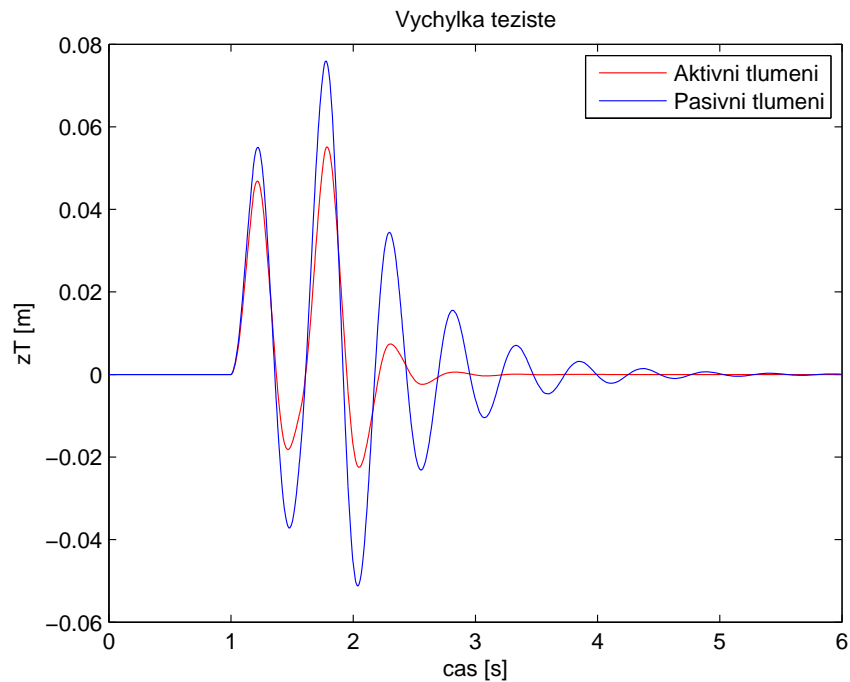
Obrázek 4.38: Výchylka kola č.1



Obrázek 4.39: Výchylka kola č.2



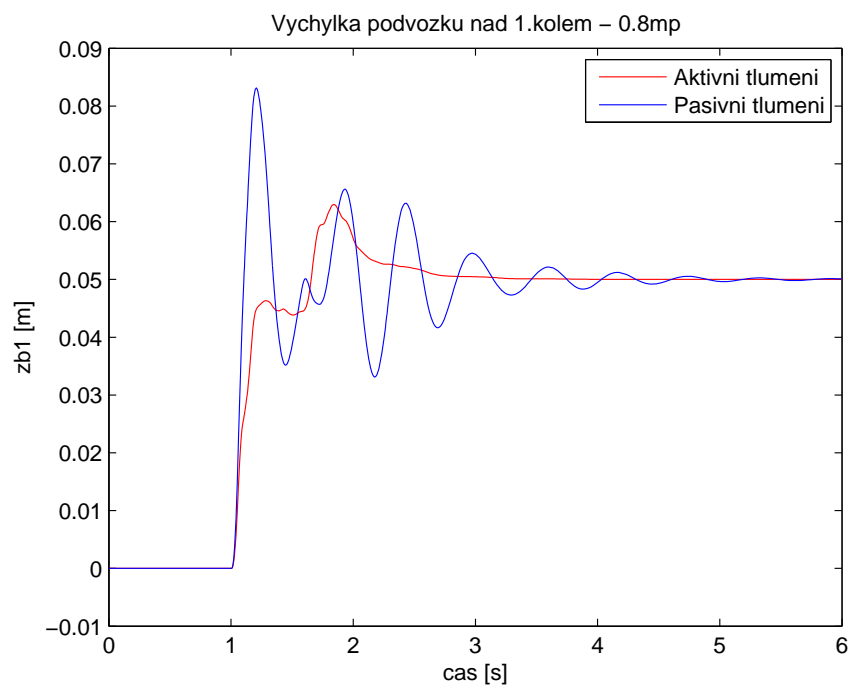
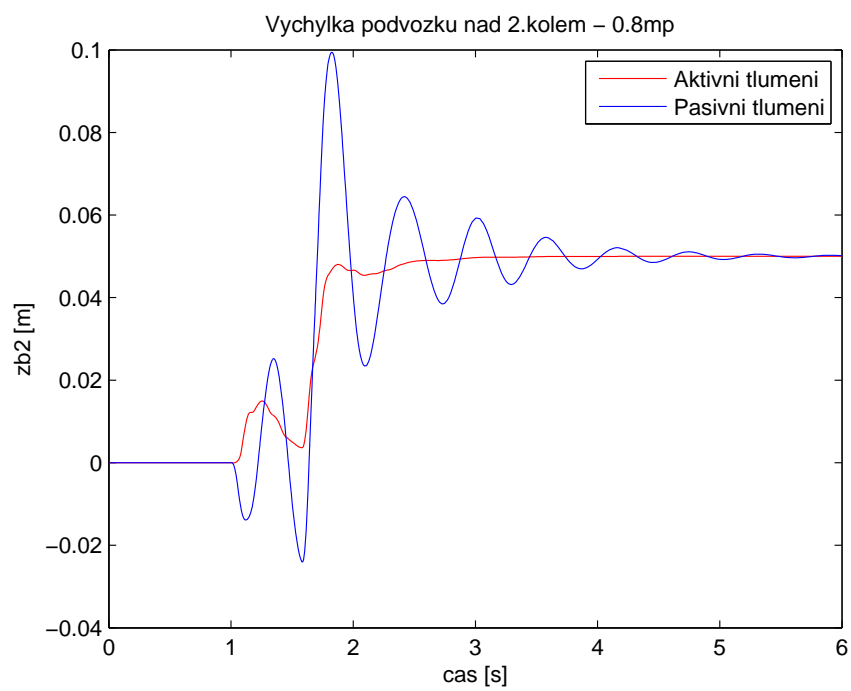
Obrázek 4.40: Akční člen

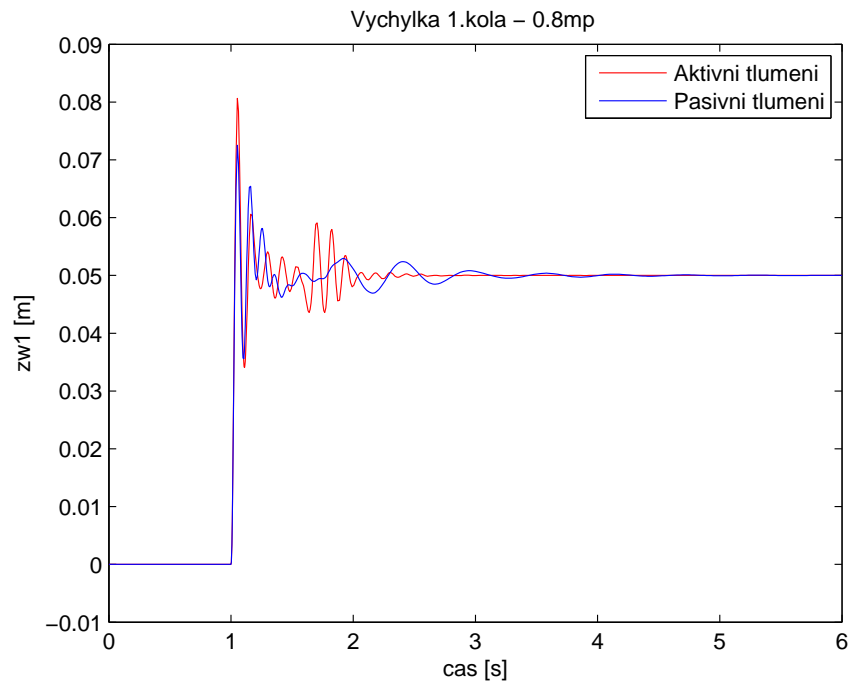
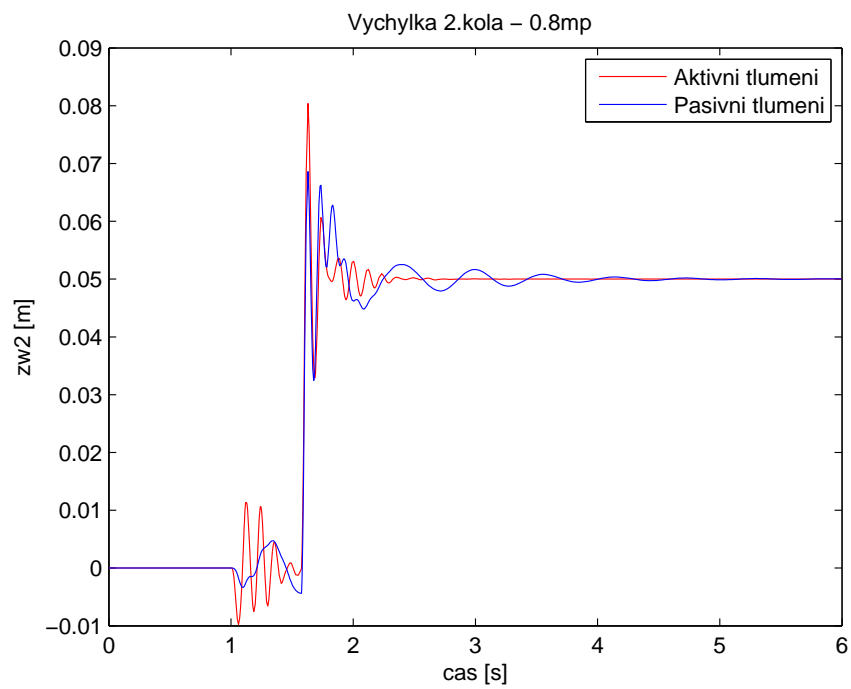


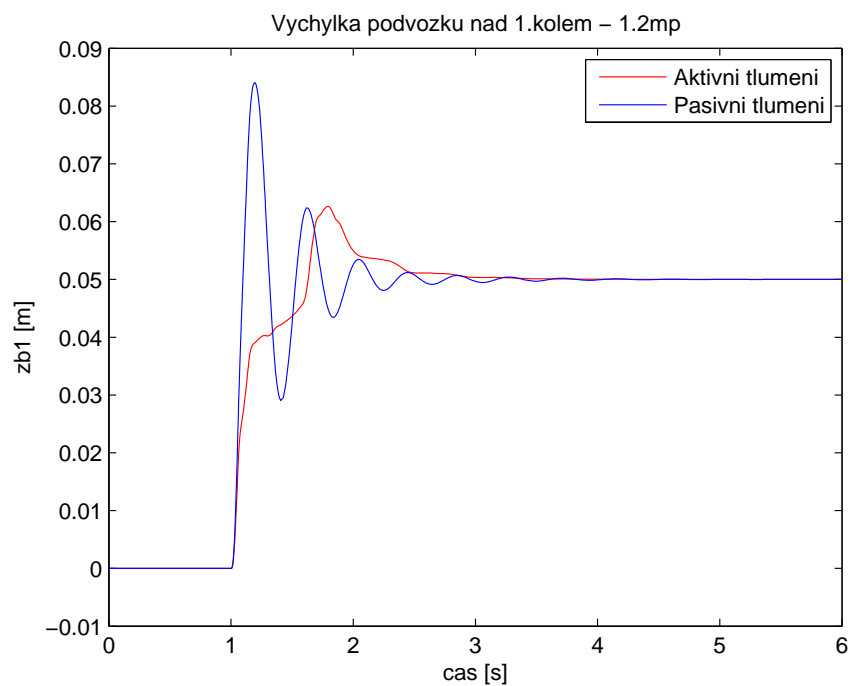
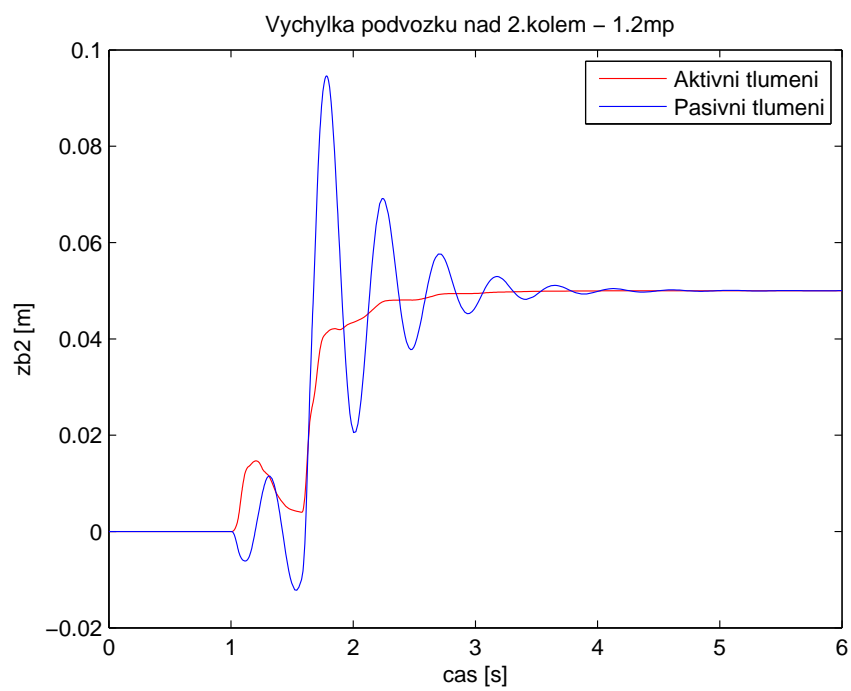
Obrázek 4.41: Výchylka těžiště modelu

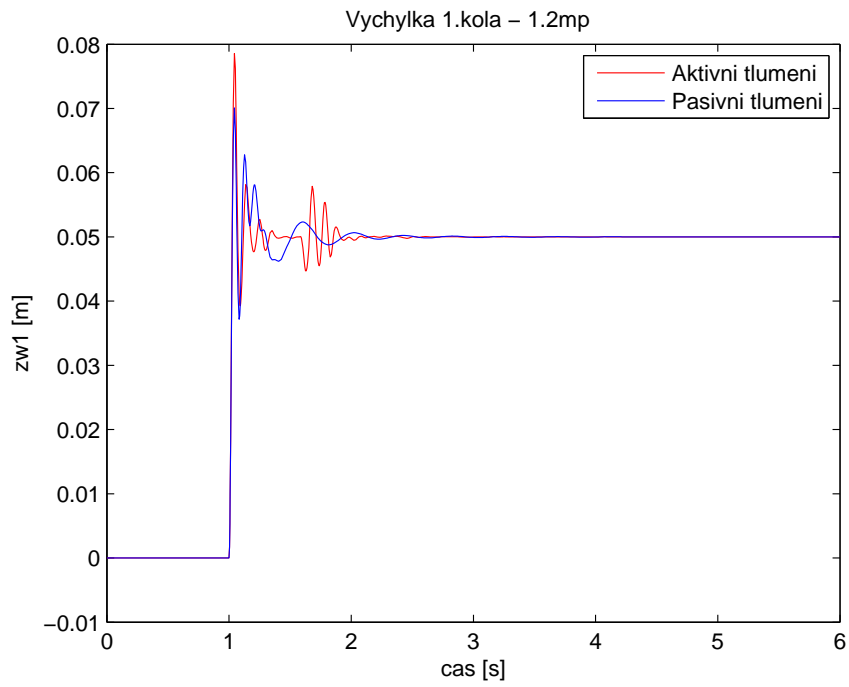
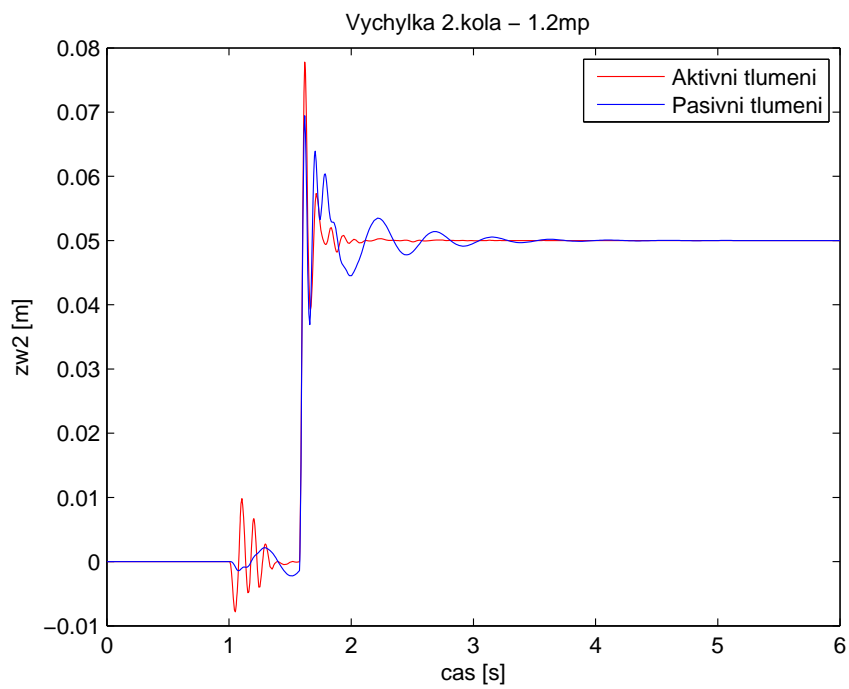
4.2.4 Robustnost fuzzy regulátoru polovičního modelu

Robustnost fuzzy regulátoru polovičního modelu jsem testoval podobně jako v případě čtvrtinového modelu. Měnil jsem hodnotu hmotnosti podvozku v rozmezí $\langle 0,8 m_p; 1,2 m_p \rangle$. Testovacími signály zde opět budou jednotkové skoky obr. 4.2 vychylující model o 5 cm, zavedené do každého kola s fázovým posuvem Δt z (3.1). Budou nás zajímat odchylky podvozku a kol. Z grafů vyplývá, že regulátor je navržen dostatečně robustně, neboť nedošlo ke zhoršení sledovaných parametrů.

Obrázek 4.42: Výchylka podvozku nad kolem č.1 při hmotnosti $m_p \cdot 0,8$ Obrázek 4.43: Výchylka podvozku nad kolem č.2 při hmotnosti $m_p \cdot 0,8$

Obrázek 4.44: Výchylka kola č.1 při hmotnosti $m_p \cdot 0,8$ Obrázek 4.45: Výchylka kola č.2 při hmotnosti $m_p \cdot 0,8$

Obrázek 4.46: Výchylka podvozku nad kolem č.1 při hmotnosti $m_p \cdot 1,2$ Obrázek 4.47: Výchylka podvozku nad kolem č.2 při hmotnosti $m_p \cdot 1,2$

Obrázek 4.48: Výchylka kola č.1 při hmotnosti $m_p \cdot 1,2$ Obrázek 4.49: Výchylka kola č.2 při hmotnosti $m_p \cdot 1,2$

Kapitola 5

Závěr

Cílem této práce bylo navrhnout fuzzy regulaci pro řízení aktivního tlumení čtvrtinového respektive polovičního modelu.

V první fázi jsem realizoval fuzzy regulátor pro aktivní tlumení čtvrtinového modelu. Zde jsem se seznámil s principy návrhu fuzzy regulátoru pro praktickou úlohu. Zjistil jsem, jak důležité je věnovat pozornost všem fázím návrhu fuzzy regulátoru. Jde zejména o tvorbu pravidel a zvolení správných rozsahů funkcí příslušnosti. Pokud byť pouze jedna z těchto fází je zanedbána, výsledek se velmi negativně projeví v několika faktech, ať už jde o zhoršení celé regulace či velmi dlouhou dobu simulací. Ověřil jsem, že každé přidání pravidlo může výrazně zlepšit, ale také zhoršit parametry řízení. Fuzzy regulátor jsem navrhoval s ohledem na budoucí defuzzyfikaci metodou centroidů. S takto navrženým regulátorem jsem poté uskutečnil několik experimentů, které ověřily jeho kvality. Šlo např. o test robustnosti regulátoru.

Poznatky získané při návrhu regulátoru čtvrtinového modelu jsem využil při návrhu fuzzy regulátoru pro aktivní tlumení polovičního modelu. Zde navíc oproti čtvrtinovému modelu přibyla pravidla pro podvozek. Zde bych rád zmínil nedostatek, který se neprojevil u čtvrtinového modelu (v podstatě se ani projevit nemohl), ale u polovičního ano. Jedná se o zákmity kol, viditelné např. na grafu obr. 4.24. Jejich odstranění bude vyžadovat další úpravu pravidel regulátoru. Z provedených experimentů vyplývá, že kromě zmíněného kmitání kol se regulátor osvědčil.

Na závěr bych s ohledem na provedené simulace a data z nich viditelná chtěl posoudit možnost využití lineárního elektrického motoru jako akčního členu. Z teoretického hlediska je tento typ elektrického motoru pro tuto aplikaci velice vhodný, zejména pro jeho kompaktnost. Bohužel, v současné době jsou na trhu dostupné modely, jejichž špičkový výkon je cca. 4000 N, zdůrazňuji špičkový, nejedná se tedy o sílu, kterou je motor schopen

vyvozovat trvale. Tento výkon je jistě dostačující pro aplikaci v případě osobních vozidel s hmotností okolo 1500 kg , kde se maximální akční zásah v extrémních situacích pohybuje na hranici zmíněných 4000 N . Pro hodnoty použité v této práci se v současnosti nevyrábí žádný lineární elektrický motor, který by se požadovaným silovým hodnotám 72000 N přibližoval.

Literatura

- ROUKIEH, S.;TITLE, A. (1993), *Using Fuzzy Logic*, Sydney:In Proc IFAC World Congress.
- JURA, P. (2003), *Základy fuzzy logiky pro řízení a modelování*, Brno: VUTIUM.
- MINAŘÍK, D. (2002), *Fuzzy řízení pro systém aktivního tlumení automobilu - diplomová práce*, Praha: ČVUT.
- CEBON, D. (1999), *Handbook of Vehicle - Road Interaction*, Lisse, Netherlands: Sweets and Zeitling publishers.
- KOVANDA, J.; RESL, I. SOCHA, J. (1997), *Konstrukce automobilů - Pérování vozidel*, Praha: Vydavatelství ČVUT.
- VYSOKÝ, O. (1996), *Fuzzy řízení*, Praha: Vydavatelství ČVUT.
- HORÁČEK, P.; FUKA, J. (1999), *Systémy a modely*, Praha: Vydavatelství ČVUT.
- MODRLÁK, O. (2004), *Teorie automatického řízení II. - Fuzzy řízení a regulace*, Praha: Technická universita v Liberci - Katedra řídicí techniky.
- KRUCZEK, A. (2002), *Řízení aktivního tlumení pérování automobilu - Diplomová práce*, Praha: ČVUT.
- HYNIOVÁ, K.; STRÍBRSKÝ, A.; HONCŮ, J. (2001), *Fuzzy control of mechanical vibrating system*, Praha: ČVUT.

Příloha A

Obsah příloženého CD

Obsah adresáře : Dokumenty

- BP_Kozojed_2006.pdf - Bakalářská práce ve formátu PDF

Obsah adresáře : Fuzzy regulátory

- ctvrtina.fis - Navržený fuzzy regulátor pro čtvrtinový model
- polovina.fis - Navržený fuzzy regulátor pro poloviční model

Obsah adresáře : Simulinkové modely

- Quater_Step.mdl - Čtvrtinový model v simulinku - odezva na skok
- Quater_Noise.mdl - Čtvrtinový model v simulinku - odezva na šum
- Quater_Robu08.mdl - Čtvrtinový model v simulinku - test robustnosti $m_{b1} \cdot 0,8$
- Quater_Robu12.mdl - Čtvrtinový model v simulinku - test robustnosti $m_{b1} \cdot 1,2$
- Half_Step.mdl - Poloviční model v simulinku - odezva na skok
- Half_Noise.mdl - Poloviční model v simulinku - odezva na šum

- Half_Robu08.mdl - Poloviční model v simulinku - test robustnosti $m_p \cdots 0,8$
- Half_Robu12.mdl - Poloviční model v simulinku - test robustnosti $m_p \cdots 1,2$

Obsah adresáře : Vykreslení odezev

- Draw_Quater_Step.m - Vykreslení odezvy čtvrtinového modelu - odezva na jednotkový skok
- Draw_Quater_Noise.m - Vykreslení odezvy čtvrtinového modelu - odezva na šum
- Draw_Quater_Robu08.m - Vykreslení odezvy čtvrtinového modelu - test robustnosti $m_{b1} \cdot 0,8$
- Draw_Quater_Robu12.m - Vykreslení odezvy čtvrtinového modelu - test robustnosti $m_{b1} \cdot 1,2$
- Draw_Half_Step.m - Vykreslení odezvy polovičního modelu - odezva na jednotkový skok
- Draw_Half_Noise.m - Vykreslení odezvy polovičního modelu - odezva na šum
- Draw_Half_Braking.m - Vykreslení odezvy polovičního modelu - odezva na simulované brzdění a rozjíždění
- Draw_Half_Robu08.m - Vykreslení odezvy polovičního modelu - test robustnosti $m_p \cdots 0,8$
- Draw_Half_Robu12.m - Vykreslení odezvy polovičního modelu - test robustnosti $m_p \cdots 1,2$

Obsah adresáře : Datové soubory

- Quater_Step_A.mat - Datový soubor : odezva čtvrtinového modelu aktivního tlumení na jednotkový skok
- Quater_Step_P.mat - Datový soubor : odezva čtvrtinového modelu pasivního tlumení na jednotkový skok

- Quater_Noise_A.mat - Datový soubor : odezva čtvrtinového modelu aktivního tlumení na šum
- Quater_Noise_P.mat - Datový soubor : odezva čtvrtinového modelu pasivního tlumení na šum
- Quater_Robu08_A.mat - Datový soubor : test robustnosti čtvrtinového modelu aktivního tlumení $m_{b1} \cdot 0,8$
- Quater_Robu08_P.mat - Datový soubor : test robustnosti čtvrtinového modelu pasivního tlumení $m_{b1} \cdot 0,8$
- Quater_Robu12_A.mat - Datový soubor : test robustnosti čtvrtinového modelu aktivního tlumení $m_{b1} \cdot 1,2$
- Quater_Robu12_P.mat - Datový soubor : test robustnosti čtvrtinového modelu pasivního tlumení $m_{b1} \cdot 1,2$
- Half_Step_A.mat - Datový soubor : odezva polovičního modelu aktivního tlumení na jednotkový skok
- Half_Step_P.mat - Datový soubor : odezva polovičního modelu pasivního tlumení na jednotkový skok
- Half_Noise_A.mat - Datový soubor : odezva polovičního modelu aktivního tlumení na šum
- Half_Noise_P.mat - atový soubor : odezva polovičního modelu pasivního tlumení na šum
- Half_Robu08_A.mat - Datový soubor : test robustnosti polovičního modelu aktivního tlumení $m_p \cdot \dots 0,8$
- Half_Robu08_P.mat - Datový soubor : test robustnosti polovičního modelu pasivního tlumení $m_p \cdot \dots 0,8$
- Half_Robu12_A.mat - Datový soubor : test robustnosti polovičního modelu aktivního tlumení $m_p \cdot \dots 1,2$
- Half_Robu12_P.mat - Datový soubor : test robustnosti polovičního modelu pasivního tlumení $m_p \cdot \dots 1,2$

- Half_Braking_A.mat - Datový soubor : odezva polovičního modelu aktivního tlumení na simulované brzdění a rozjíždění
- Half_Braking_P.mat - Datový soubor : odezva polovičního modelu pasivního tlumení na simulované brzdění a rozjíždění