



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

**TESTOVÁNÍ SPORTOVNÍHO AUTOMOBILOVÉHO
ODPRUŽENÍ**

TESTING OF AUTOMOTIVE SPORT SUSPENSION

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Pavel Čípek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Zbyněk Strecker, Ph.D.

BRNO 2016

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: **Bc. Pavel Čípek**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Konstrukční inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Zbyněk Strecker, Ph.D.**
Akademický rok: 2015/16

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

Testování sportovního automobilového odpružení

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem bude nalezení optimálního nastavení parametrů automobilového závěsu kola a následné porovnání kvality odpružení s pasivním nastavením tlumiče a s magnetoreologickým tlumičem řízeným semiaktivními algoritmy

Cíle diplomové práce:

Diplomová práce musí obsahovat: (odpovídá názvům jednotlivých kapitol v práci)

1. Úvod
2. Přehled současného stavu poznání
3. Analýza problému a cíl práce
4. Materiál a metody
5. Výsledky
6. Diskuze
7. Závěr
8. Seznam použitých zdrojů

Forma práce: průvodní zpráva, fotografická dokumentace, laboratorní protokol, digitální data

Typ práce: experimentální

Účel práce: výzkum a vývoj

Výstup práce: publikace

Projekt: Zakázka doplňkové činnosti (HS)

Rozsah práce: cca 72 000 znaků (40 - 50 stran textu bez obrázků)

Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně / Technická 2896/2 / 616 69 / Brno

Zásady pro vypracování práce: http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2016.pdf
Šablona práce: http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/UK_sablona_praci.zip

Seznam literatury:

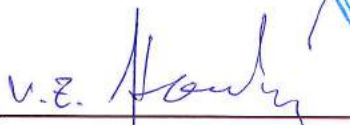
Karnopp, D., Crosby M. J. and Harwood, R.A. (1973): Vibration Control Using Semi-Active Force Generators. Journal of Engineering for Industry, vol. 96, no. 2, pp. 619-626, DOI:10.1115/1.3438373.

Koo, J., Goncalves, F. D. and Ahmadian, M. (2006): A comprehensive analysis of the response time of MR dampers. Smart Materials and Structures, vol. 15, no. 2, pp. 351-358. DOI: 10.1088/0964-1726/15/2/015.

Strecker, Z., Mazůrek, I., Roupec, J. and Klapka, M. (2015) Influence of MR damper response time on semiactive suspension control efficiency. Meccanica, vol. 50, no. 8, pp.1949-1959, DOI: 10.1007/s11012-015-0139-7.

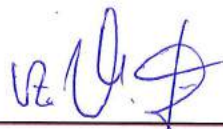
Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16.

V Brně, dne 26. 11. 2015



prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
ředitel ústavu





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

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá testováním sportovního automobilového odpružení, resp. testováním rychlého magnetoreologického tlumiče v semiaktivním závěsu odpovídajícímu čtvrtinovému modelu automobilu. Použitý rychlý magnetoreologický tlumič má časovou odezvu na řídicí signál 2 ms. Pokud je časová odezva magnetoreologického tlumiče dostatečně krátká (řádově jednotky ms) lze teoreticky (na základě v minulosti provedených simulací) dosáhnout zlepšení jízdní bezpečnosti (lepší stabilita přítláčné síly kola na vozovku), resp. komfortu (snížení vibrací). Tato práce se snaží toto tvrzení reálným experimentem dokázat, což se řadou experimentů podařilo.

KLÍČOVÁ SLOVA

MR tlumič, MR kapalina, časová odezva, semiaktivní řízení

ABSTRACT

The diploma thesis deals with testing of sports car suspension. The aim is the testing of fast magnetorheological damper in semiactive suspension that corresponds to quarter car model. The fast magnetorheological damper has a response time 2 ms. If the response time is short enough (order of units milliseconds) it is possible (based on earlier simulations) to achieve improvement of driving safety (better stability of force of tyre on roadway) and comfort (reduction of vibrations). The thesis proves this statement with series of experiments.

KEYWORDS

MR damper, MR fluid, time response, semiactive control

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ČÍPEK, P. *Testování sportovního automobilového odpružení*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 83 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Zbyněk Strecker, PhD.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně pod odborným vedením Ing. Zbyňka Streckera, PhD. s využitím informací a zdrojů, které jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

V Brně dne

.....
Podpis



PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval svému školiteli Ing. Zbyňku Streckerovi, PhD za mnoho cenných rad a připomínek v průběhu řešení této diplomové práce a po celou dobu magisterského studia. Také bych rád poděkoval svým rodičům za podporu při studiu.

OBSAH

1	Úvod.....	11
2	Přehled současného stavu poznání.....	12
2.1	Typy automobilových závěsů.....	12
2.1.1	Pasivní závěsy	12
2.1.2	Adaptivní závěsy	12
2.2	Magnetoreologický tlumič	13
2.2.1	Princip funkce MR tlumiče	13
2.2.2	Využití semiaktivních systémů s MR tlumiči	13
2.3	Modely MR tlumiče.....	15
2.3.1	Neparametrické modely	15
2.3.2	Parametrické modely	16
2.4	Model závěsu kola automobilu.....	21
2.5	Semiaktivní algoritmy řízení MR tlumiče.....	22
2.5.1	Skyhook	22
2.5.2	Groundhook.....	24
2.5.3	Modifikovaný Groundhook.....	25
2.5.4	Hybrid control	25
2.5.5	Sliding mode control (SMC)	26
2.5.6	Linear quadratic regulator (LQR).....	27
2.5.7	Fuzzy logic control	27
2.5.8	Srovnání efektivity řídicích algoritmů	27
2.6	Dynamické vlastnosti MR tlumiče	29
2.6.1	Doba odezvy MR tlumiče	29
2.6.2	Dynamický rozsah	34
3	Analýza problému a cíl práce	36
4	Materiál a metody	38
4.1	Experimentální vozík	38
4.2	Konstrukční úpravy částí experimentálního vozíku	39
4.2.1	Prolínání oleje přes pístnici MR tlumiče.....	39
4.2.2	Rekonstrukce uchycení tlumiče ke kyvnému rámu	41
4.3	Virtuální simulační model.....	43
4.4	Ověření virtuálního simulačního modelu.....	45
4.4.1	Pasivní režimy	46
4.4.2	Pasivní režimy s různou rychlostí kola vůči vozovce.....	48
4.5	Simulace ve virtuálním modelu.....	50
4.5.1	Princip semiaktivního algoritmu modifikovaný Groundhook	50
4.6	Experiment	51
4.6.1	Měřicí aparatura.....	51
4.6.2	Varianty měření	53
4.6.3	Metodika měření.....	54
4.6.4	Metodika úpravy dat v průběhu měření	54
4.7	Vyhodnocení experimentu	55
4.7.1	Vyhodnocení experimentu dle jízdní bezpečnosti a komfortu jízdy ...	56
5	Výsledky	57
5.1	Vyhodnocení vlivu tlaku v pneumatice při měření.....	59
5.2	Nalezení optimálního nastavení rychlého MR tlumiče.....	61

5.3	Vyhodnocení funkčnosti řídicího algoritmu modifikovaný Groundhook...	62
5.4	Experimentální ověření optimálního nastavení MR tlumiče	63
6	Diskuze	65
7	Závěr	66
7.1	Splnění cílů	66
7.1.1	Výsledky potvrzují, že s rychlým MR tlumičem semiaktivně řízeným lze dosáhnout lepších výsledků než s MR tlumičem pasivně nastaveným.	66
7.1.2	Byly odstraněny konstrukční nedostatky experimentálního zařízení ..	66
7.1.3	Byl upraven virtuální simulační model	66
7.1.4	Byl ověřen virtuální simulační model	66
7.1.5	Bylo nalezeno optimální nastavení rychlého MR tlumiče	66
7.1.6	Byl upraven semiaktivní řídicí algoritmus modifikovaný Groundhook	66
7.2	Praktický význam práce	67
7.3	Námět na další výzkum	67
8	Seznam použitých zdrojů	68
9	Seznam použitých zkratk, symbolů a veličin	74
10	Seznam obrázků a grafů	76
11	Seznam tabulek	78
12	Seznam příloh	79

1 ÚVOD

1

Při přejezdu terénních nerovností působí na karoserii automobilu vlivy, které nepříjemně ovlivňují posádku. Jedná se především o vertikální zrychlení karoserie (vibrace). Cílem je vibrace co nejvíce eliminovat a tak zajistit posádce vozidla co největší pohodlí jízdy. Dalším neméně důležitým cílem odpružení je stabilizace přitlaku kola na vozovku, což vede k lepší ovladatelnosti vozidla. Stabilita síly mezi kolem a vozovkou je považována za přímo úměrnou bezpečnosti jízdy. Tyto dva požadavky (pohodlí a bezpečnost) jsou často protikladné. V současné době je u většiny automobilů instalován závěs s kapalinovým tlumičem, který je paralelně propojený s pružinou. Tento typ závěsu je označován jako pasivní a představuje vždy kompromis mezi bezpečností a pohodlím. Jejich charakteristika je pevně daná a nelze ji tedy v průběhu jízdy měnit. S technologickým pokrokem v této oblasti se objevil požadavek na možnost dynamické změny vlastností tlumiče. Byl tedy vynalezen adaptivní systém odpružení. U adaptivních systémů lze v průběhu jízdy měnit některé vlastnosti závěsu. Pod adaptivní systémy spadají i systémy semiaktivní, mezi které patří odpružení realizované magnetoreologickým tlumičem, dále jen MR tlumičem. MR systémy jsou v dnešní době používány v mnoha aplikacích, avšak jejich slabým místem je dlouhá časová odezva. Pomocí simulací bylo dokázáno, že semiaktivní systémy odpružení výrazně zvýší bezpečnost jízdy. Simulace byly následně experimentálně ověřovány, avšak z důvodu dlouhé časové odezvy tlumičů, nemohly být tyto rychlé semiaktivní systémy odpružení ověřeny. V nedávné době byl na VUT v Brně zkonstruován rychlý MR tlumič s krátkou časovou odezvou, který ještě nebyl reálně otestován. Simulace s tímto rychlým MR tlumičem slibují výsledky, které sledované parametry zlepší.

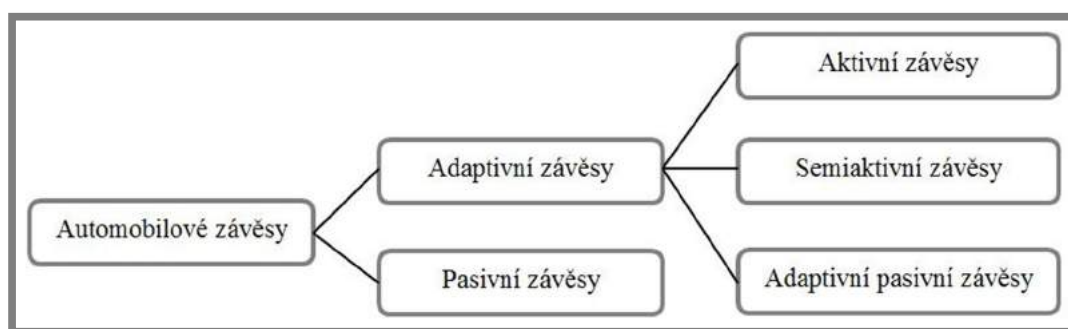
Tato práce se tedy bude zabývat experimentálním ověřením simulací rychlého MR tlumiče, následným porovnáním s jeho pasivním nastavením a vyhodnocením dopadu zvláště na bezpečnost jízdy, která je u sportovních automobilů prvořadá.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

Automobilové odpružení hraje důležitou roli z pohledu bezpečnosti jízdy, stejně tak i z hlediska pohodlí. Je tvořeno dvěma základními prvky, pružinou a tlumičem. Pružina akumuluje kinetickou energii od rázu způsobeného přejezdem nerovností vozovky a tlumič zabraňuje neřízenému kmitání přeměnou této energie na teplo. Tlumič a pružina jsou uloženy v závěsu kola.

2.1 Typy automobilových závěsů

Typy automobilových závěsů lze rozdělit do následujících skupin dle obr. 2-1.



Obr. 2-1 Dělení automobilových závěsů

2.1.1 Pasivní závěsy

Ve většině současných automobilů jsou použity pasivní závěsy, které obsahují kapalinové tlumiče paralelně spojené s pružinou. Ty neumožňují změnu charakteristiky v závislosti na okamžitých podmínkách, jejich nastavení je pevně dáno výrobcem. Takovéto řešení je levné a jednoduché, představuje však vždy kompromis mezi pohodlím a bezpečností.

2.1.2 Adaptivní závěsy

Se zvyšujícími se požadavky v této oblasti došlo k vývoji a začaly se používat adaptivní závěsy, u kterých je již možná změna charakteristiky některého z prvků závěsu kola podle provozních podmínek.

2.1.2.1 Aktivní závěsy

Tyto závěsy jsou realizovány pomocí aktuátorů, které umožňují ze všech typů nejlepší kontrolu nad vozidlem a eliminaci vibrací. Aktuátor (lineární motor) pohybuje s kolem tak, aby kolo pokud možno co nejlépe kopírovalo nerovnosti na vozovce při co nejnižších výchylkách vertikálního zrychlení. Tím kolo získá stabilní přítláčnou sílu a nízkou hladinu vibrací, tedy dobré pohodlí a bezpečnost. Jejich nevýhodou jsou rozměry, hmotnost, poměrně vysoký stálý příkon, značná složitost konstrukce a vysoká cena [1].

2.1.2.2 Adaptivní pasivní závěsy

jsou schopny měnit tuhost v delších časových intervalech, například reagovat na zatížení automobilu, ale rychlé děje jako je přejezd nerovnosti nejsou schopny postihnout [2].

2.1.2.3 Semiaktivní závěsy

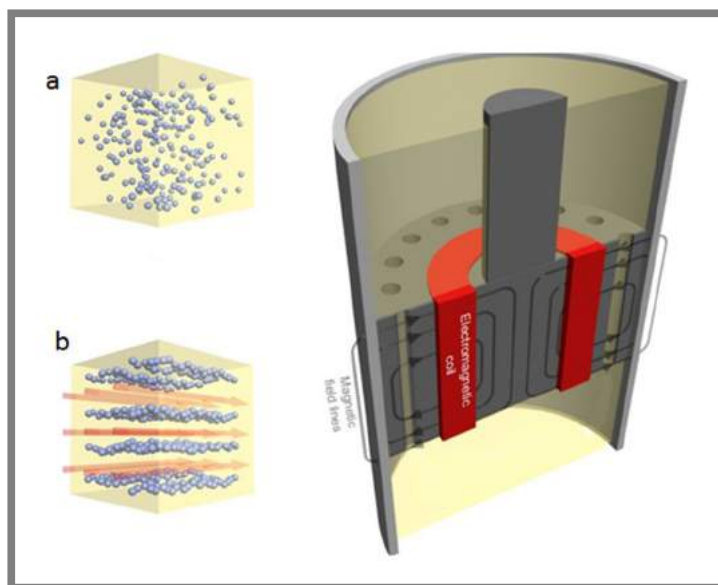
Semiaktivní závěsy umožňují změnu charakteristiky s frekvencí řádově rovnou rezonanční frekvenci závěsu [2]. Na rozdíl od aktivního způsobu toto řešení využívá energii z vnějšího zdroje, která je ale řádově menší, než u aktivních systémů. Má kompaktní rozměry a malou hmotnost [1]. Další nespornou výhodou je, že v případě poruchy systém funguje dále jako pasivní tlumič [2]. Semiaktivní závěsy často používají MR tlumiče.

2.2 Magnetoreologický tlumič

Hlavní rozdíl MR tlumiče od klasického kapalinového tlumiče je elektrická cívka, která je umístěna v pístu [2] a náplň MR tlumiče, kterou tvoří MR kapalina skládající se ze suspenze feromagnetických částic, nosné kapaliny a aditiv. Částice jsou vyrobeny z čistého železa a jejich velikost se pohybuje v rozmezí od 0,5 do 2 μm . Jako nosná kapalina se nejčastěji používá syntetický olej [3]. MR tlumiče se vyznačují jednoduchou konstrukcí, velkým dynamickým rozsahem, malým potřebným příkonem a spolehlivostí [4].

2.2.1 Princip funkce MR tlumiče

Princip MR tlumiče je znázorněn na obrázku 2-2. Pokud je kapalina mimo magnetické pole, jsou částice železa volně rozptýleny v celém objemu a nic nebrání tečení (viz stav **a** na následujícím obrázku, stav kdy cívkou MR tlumiče neprotéká žádný proud). V přítomnosti magnetického pole dojde k aktivaci kapaliny, feromagnetické částice se začnou řetězit ve směru rovnoběžném se siločarami magnetického pole a ztíží průtok kapaliny šterbinou (stav **b**, stav kdy cívkou MR tlumiče protéká proud). Ke zřetězení částic i zrušení tohoto stavu dochází řádově v milisekundách [4].



Obr. 2-2 Princip funkce MR tlumiče [5]

2.2.2 Využití semiaktivních systémů s MR tlumiči

Použití semiaktivních systémů odpružení není omezeno pouze na automobilový průmysl. *Y. Shin et al.* [6] se ve své práci zabývá možností využít semiaktivně

2.2

2.2.1

2.2.2

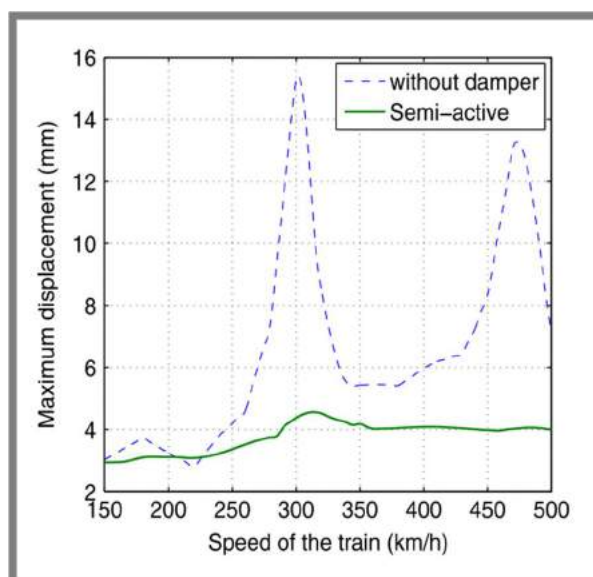
řízených MR tlumičů ke snížení vibrací a hluku železničních vozidel. Byl sestaven pětiový model železničního vozidla a na základě numerické simulace a řídicího algoritmu byla stanovena optimální nastavení. Poté bylo odpružení reálně sestaveno a provedena řada experimentů. Ty potvrdily zlepšení jízdních vlastností a snížení vibrací až o 24 % oproti pasivnímu tlumení.



Obr. 2-3 Testování odpružení vlaku [6]

M. Luu et al. [7] se ve svém článku zabývá MR tlumiči použitými ke snížení rezonanční odezvy železničních mostů pro vysokorychlostní železniční vozidla. Je zde podrobně popsána tvorba modelu příhradového mostu, MR tlumiče, zatěžování a navržen algoritmus řízení. Ten zohledňuje i možné chyby a s časem proměnné materiálové vlastnosti, které by mohly vést k rozladění systému.

Z výsledků numerické simulace, prezentovaných na následujícím grafu je vidět, že navržené řešení výrazně snižuje rezonanční projevy vznikající při vysokých rychlostech.



Obr. 2-4 Kmitání železničního mostu s a bez MR tlumiče [7]

MR tlumičů se také využívá ve stavebnictví v oblastech, kde hrozí častá zemětřesení nebo ke kompenzaci silových účinků větru. Poznatky z této oblasti shrnuje ve svém článku *N. Aguirre et al.* [8]. Popisuje současný stav poznání v oblasti řídicích algoritmů velkých MR tlumičů určených ke stabilizaci budov a navrhuje vlastní způsob řízení, který využívá PI regulátoru a nevyžaduje matematický model tlumiče. Další možnosti využití semiaktivních MR systémů se nabízí v oblasti protetiky, kde jako součást náhrad dolních končetin zlepšují komfort chůze [9], nebo pro tlumení zpětného rázu střelných zbraní [10].

2.3 Modely MR tlumiče

2.3

Velikost tlumicí síly je úměrná míře zřetězení částic MR kapaliny a to dále souvisí s intenzitou magnetického pole v tlumiči. Intenzita je řízena velikostí proudu procházejícího cívkou. Hlavním problémem semiaktivního řízení MR tlumičů je nelineární závislost uvedených veličin, z čehož vychází potřeba přesného, ale zároveň jednoduchého dynamického modelu. Rozlišujeme dvě základní skupiny modelů, jsou to modely parametrické a neparametrické.

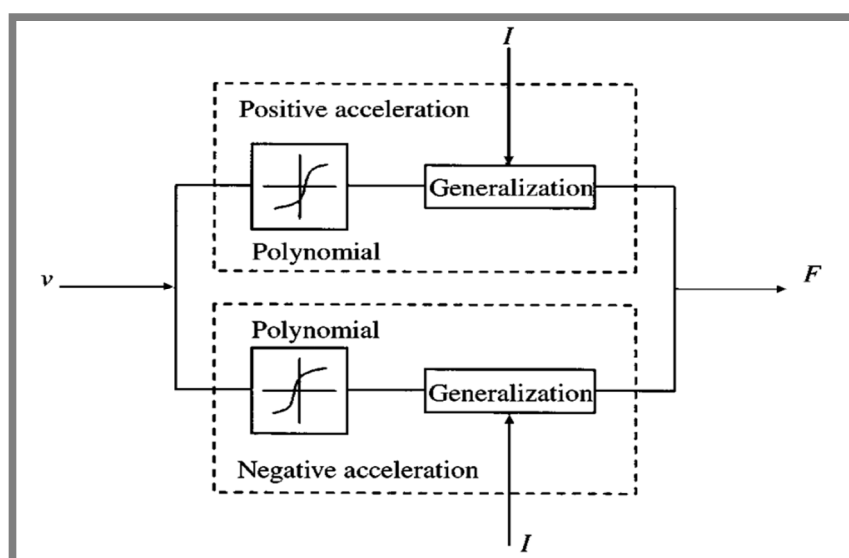
2.3.1 Neparametrické modely

2.3.1

Neparametrické modely jsou často velmi složité, jejich parametry nemusí mít žádné fyzikální opodstatnění a neexistuje obecná metodika návrhu pro konkrétní tlumič [2]. Používané neparametrické modely jsou například model pomocí Chebyshevových polynomů, modely na principu neuronových sítí a fuzzy řízení [11].

2.3.1.1 Polynomický model

Polynomický model vyjadřuje závislost tlumicí síly na rychlosti pístu ve formě polynomu. Lze tedy na základě rychlosti pístu průběžně určovat tlumicí sílu pro danou polynomickou křivku. Závislost je získávána proložením naměřených F - v charakteristik křivkou (polynomem), resp. splinem. Ve své základní formě neuvažuje hysterezi, tzn. pro konkrétní model je použita jedna proložená křivka. Pokud je požadováno uvažovat hysterezi, použijí se křivky dvě, viz. obr. 2-5 [12].



Obr. 2-5 Polynomický model uvažující hysterezi [12]

Polynomický model lze obecně popsat rovnicemi:

$$F = \sum_{i=0}^n a_i v^i \quad (13)$$

kde:

F tlumicí síla

v rychlost pístu

a koeficienty získané naměřenými daty

n stupeň polynomu

Koeficienty mohou být dále rozepsány v závislosti na proudu a to:

$$a_i = b_i + c_i I, \quad i = 0, 1, \dots, n \quad (14)$$

kde:

b, c koeficienty polynomu

I proud

Poté se dá rovnice pro tlumicí sílu zapsat jako:

$$F = \sum_{i=0}^n (b_i + c_i I) v^i \quad (15)$$

2.3.2 Parametrické modely

Parametrické modely se skládají z pomyslných mechanických prvků, jejichž parametry mají vždy fyzikální význam. Jsou zpravidla jednodušší, lze je snáze aplikovat na konkrétní tlumič [11]. Jejich nevýhodou je, že se často jedná o nespojitě nebo po částech spojitě aproximační funkce, které nejsou nejvhodnější pro numerické řídicí algoritmy [13]. Nejrozšířenější parametrické modely MR tlumičů budou popsány v následujících odstavcích.

2.3.2.1 Binghamský model

Jedná se o jeden z nejjednodušších a často používaných modelů popisujících chování MR tlumiče. Tento model zanedbává hysterezi. Binghamský model kapaliny je znám již od 70. let a používá se pro popis kapalin, které tečou až po překročení určitého smykového napětí, tzv. meze kluzu kapaliny. V případě MR kapaliny tato hodnota závisí na magnetickém poli. Na základě tohoto popisu vznikl mechanický model, který se skládá z paralelního spojení tlumiče a prvku zahrnující tření, viz obr. 2-6 [2]. Model popisuje závislost smykového napětí a smykového spádu. Je vyjádřen rovnicí [14]:

$$\tau = \tau_{y(field)} + \eta \dot{\gamma} \quad (1)$$

kde:

τ smykové napětí

$\tau_{y(field)}$ mez kluzu kapaliny

η viskozita

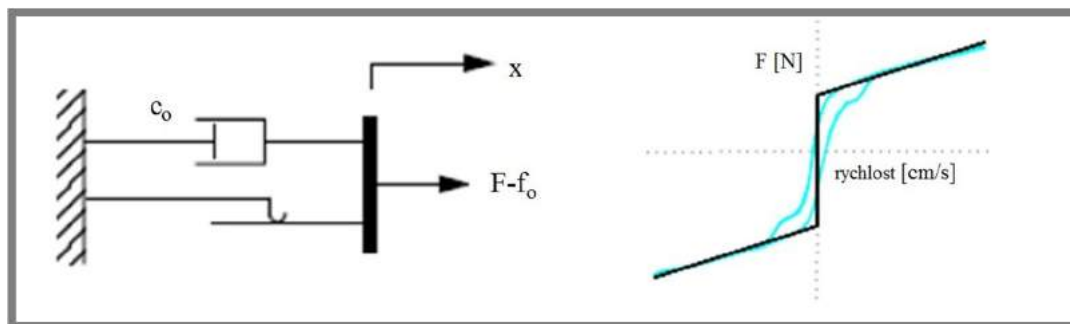
$\dot{\gamma}$ smykový spád

Při nenulové rychlosti pístu je pak tlumící síla vyjádřena jako [14]:

$$F = f_c \text{sign}(\dot{x}) + c_0 \dot{x} + f_0 \quad (2)$$

kde:

F	tlumící síla
f_c	třecí síla
f_0	síla v důsledku tlaku za pístem
c_0	tlumení



Obr. 2-6 Binghamský model [14, 15]

Jak lze vidět na obr. 2-6, vpravo je zobrazena F - v charakteristika, která srovnává modelovou F - v charakteristika (černá křivka) s reálnou (modrá křivka). Z tohoto srovnání vyplývá, že model špatně určuje hodnoty sil při nízkých rychlostech.

2.3.2.2 Gamota Filisco model

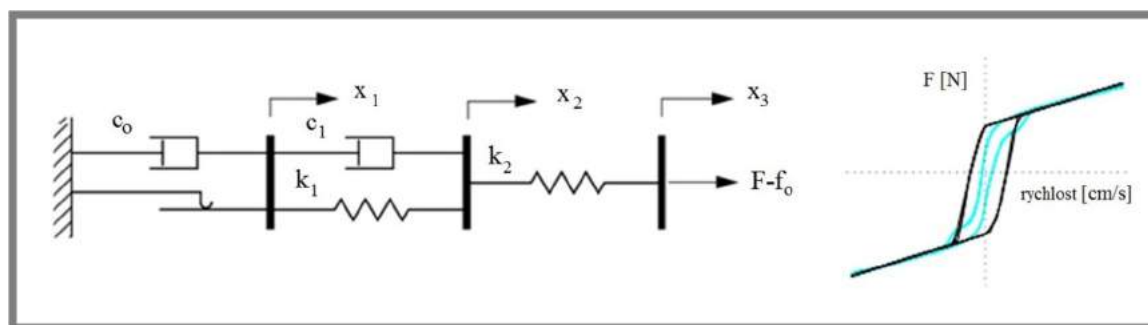
Gamota Filisco model, někdy také označovaný jako viscoelastic-plastic model, dobře popisuje chování MR tlumičů zvláště při vyšších rychlostech. Jde o rozšíření Binghamkého modelu, jeho schéma ukazuje obr. 2-7 níže. Zahrnuje i hysterezi. Jeho nevýhodou je náročnost numerického výpočtu parametrů potřebných k popisu konkrétního tlumiče. Model lze vyjádřit rovnicemi [15]:

$$\left. \begin{aligned} F &= k_1 (x_2 - x_1) + c_1 (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + f_0 \\ &= c_0 \dot{x}_1 + f_c \text{sgn}(\dot{x}_1) + f_0 \\ &= k_2 (x_3 - x_2) + f_0 \end{aligned} \right\}, \quad |F| > f_c \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} F &= k_1 (x_2 - x_1) + c_1 \dot{x}_2 + f_0 \\ &= k_2 (x_3 - x_2) + f_0 \end{aligned} \right\}, \quad |F| \leq f_c \quad (5)$$

kde:

F	tlumící síla
k_1, k_2	tuhost pružiny
c_0, c_1	tlumení
f_c	třecí síla
f_0	síla v důsledku tlaku za pístem



Obr. 2-7 Gamota Filisco model [15]

Na obr. 2-7 je znázorněno schéma Gamota Filisco modelu vlevo, a vpravo je zobrazeno porovnání skutečné F-v charakteristiky (modrá křivka) s modelovou (černá křivka). Opět je vidět neshoda v oblasti nižších rychlostí.

2.3.2.3 Bouc Wen model

Model je často využíván v inženýrské praxi k popisu nejrůznějšího hysterezního chování. Jeho výhodou je výpočetní jednoduchost, je třeba řešit pouze jedinou diferenciální rovnici. Byl rozšířen do mnoha variant, pomocí kterých lze popsat nejrůznější fyzikální jevy od vlastností MR kapaliny po degradaci mechanických vlastností [16]. Popisují jej rovnice [14]:

$$F = c\dot{x} + kx + \alpha z + f_0 \quad (6)$$

kde:

F tlumicí síla

k tuhost pružiny

c tlumení

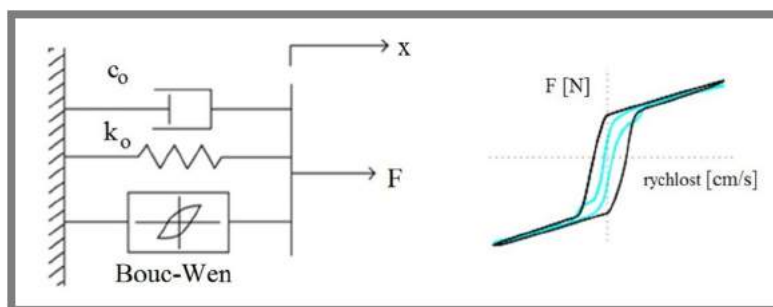
f_0 síla odpovídající počátečnímu stlačení pružiny

α koeficient vyjadřující míru hystereze, pokud $\alpha=0$, popisuje model chování pasivního tlumiče

a z je dáno [14]:

$$\dot{z} = -\gamma|\dot{x}|z|z|^{n-1} - \beta\dot{x}|z|^n + \delta\dot{x} \quad (7)$$

γ, β, δ, n Parametry modelu, které je třeba identifikovat. Děje se tak různými numerickými metodami, problematice se ve své práci věnuje **N. Kwok et al.** [17].



Obr. 2-8 Bouc-Wen model [18, 15]

Obr. 2-8 ukazuje v levé části schéma Bouc-Wen modelu a v pravo je znázorněno srovnání modelové F-v charakteristiky (černá křivka) a skutečné F-v charakteristiky (modrá křivka). Ze srovnání je názorně vidět, že model skutečnosti odpovídá pouze ve vyšších rychlostech.

2.3.2.4 Modified Bouc Wen model

Pro přesnější popis chování MR tlumiče byl model popsán v předchozím odstavci rozšířen do podoby, kterou zachycuje obrázek 2-9. Model velmi dobře popisuje chování tlumiče, je ovšem značně výpočetně náročný [2]. Model lze vyjádřit rovnicemi [18]:

$$\begin{aligned} F &= \alpha z + c_0 (\dot{x} + \dot{y}) + k_0 (x - y) + k_1 (x - x_0) \\ &= c_1 \dot{y} + k_1 (x - x_0) \end{aligned} \quad (8)$$

kde:

F tlumicí síla

k_0, k_1 tuhost pružiny

c_0, c_1 tlumení

α koeficient vyjadřující míru hystereze, pokud $\alpha=0$, popisuje model chování pasivního tlumiče

z je dáno jako [19]:

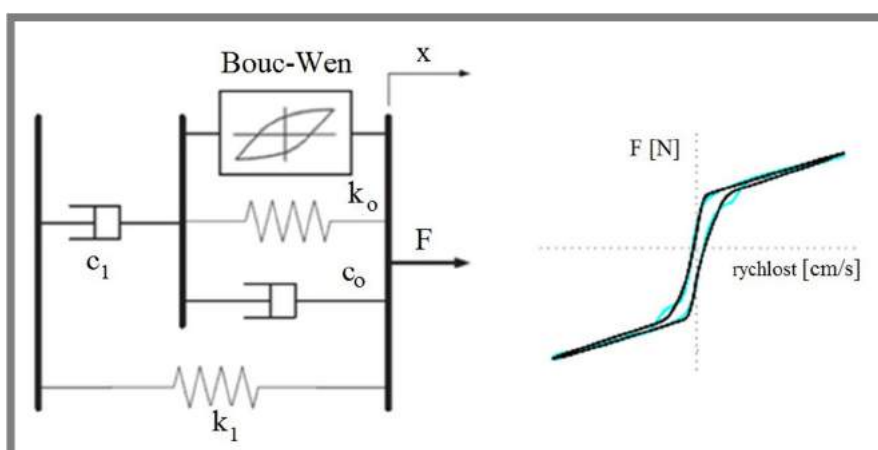
$$\dot{z} = -\gamma |\dot{x} - \dot{y}| z |z|^{n-1} - \beta (\dot{x} - \dot{y}) |z|^n + A(\dot{x} - \dot{y}) \quad (9)$$

a y lze vyjádřit [19]:

$$\dot{y} = \frac{1}{c_0 + c_1} \{ \alpha z + c_0 \dot{x} + k_0 (x - y) \} \quad (10)$$

kde:

$\gamma, \beta, \alpha, A, n$ jsou numericky určené parametry modelu



Obr. 2-9 Modifikovaný Bouc-Wen model [19, 15]

Vlevo na obr. 2-6 je znázorněno schéma Modifikovaného Bouc-Wen modelu a v pravé části toho obrázku je zobrazeno srovnání skutečné F-v charakteristiky

(modrá křivka) s modelovou (černá křivka). Z tohoto srovnání je velice dobře vidět, že model poskytuje velmi přesné výsledky.

2.3.2.5 Bi-viscous model

Jedná se o model, který ve své základní podobě aproximuje nelineární chování tlumiče třemi lineárními úseky. Hlavní předností tohoto modelu je jeho výpočetní jednoduchost. Lze ho vyjádřit rovnicemi [20]:

$$F = \begin{cases} c_{pr} \cdot \dot{x} & -\dot{x}_y \leq \dot{x} \leq \dot{x}_y \\ c_{po} \cdot \dot{x} + f_y + F_{MR} & \dot{x} > \dot{x}_y \\ c_{po} \cdot \dot{x} - (f_y + F_{MR}) & \dot{x} < -\dot{x}_y \end{cases} \quad (11)$$

kde:

F tlumicí síla

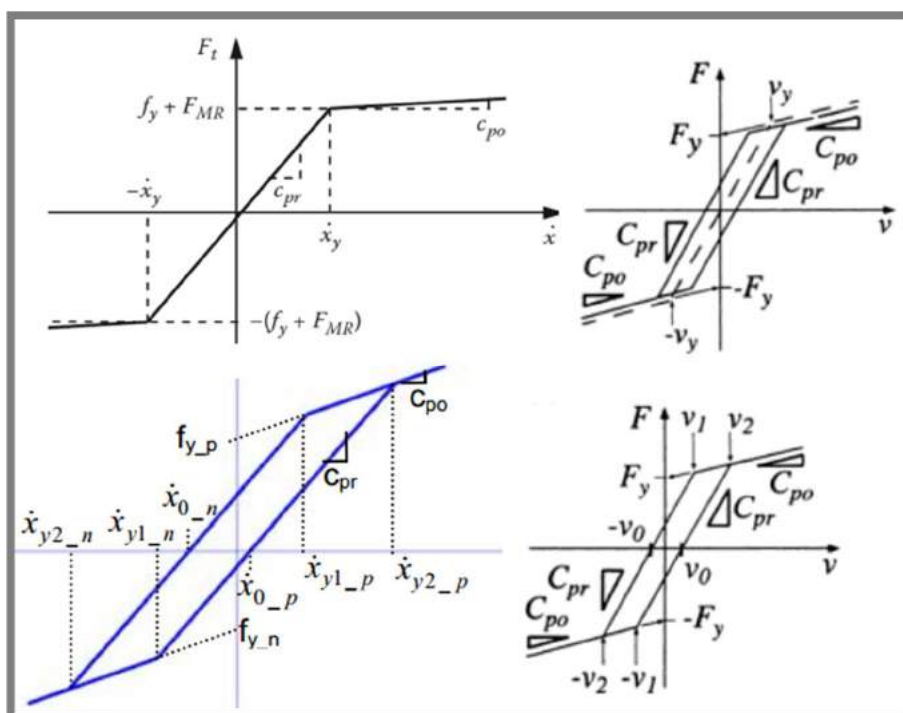
c_{pr}, c_{po} experimentálně získané koeficienty

$\dot{x}_y$ rychlost odpovídající mezi kluzu

f_y se určí z rovnice [20]:

$$f_y = c_{pr} \dot{x}_y. \quad (12)$$

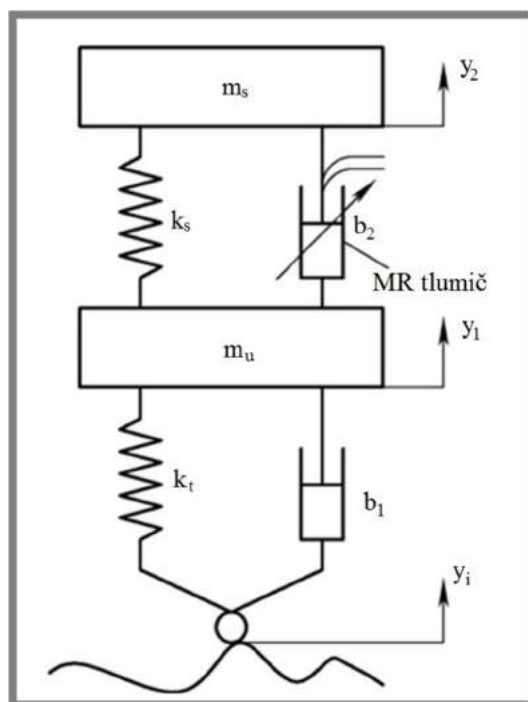
Na druhou stranu nemusí být tento model pro některé aplikace dostatečně přesný. Z tohoto důvodu vznikla celá řada modifikací, které berou v úvahu asymetrii průběhu F - v charakteristiky nebo hysterezní chování MR kapaliny. Možné varianty modelu ukazuje obrázek 2-10.



Obr. 2-10 zleva nahoře: Bi-viscous model [20], nonlinear bi-viscous model [21], zleva dole: asymmetric bi-viscous model [22], nonlinear hysteretic bi-viscous model [21]

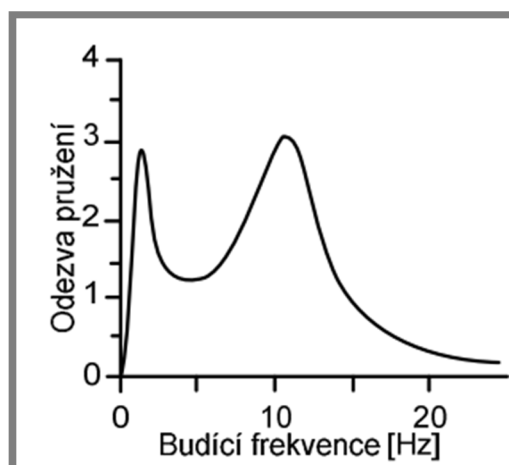
2.4 Model závěsu kola automobilu

Pro modelování semiaktivních systémů automobilového odpružení se používá čtvrtinového modelu vozidla simulující 1 závěs kola, viz obr. 2-11. Jedná se o model se dvěma stupni volnosti složený z odpružené hmoty m_s , neodpružené hmoty m_u , tuhosti pneumatiky (ráfek, závěs vozidla) k_t , tlumení pneumatiky b_1 , MR tlumiče s proměnnou tuhostí b_2 a pružiny o tuhosti k_s . Na obr. 2-11 je znázorněno ještě posunutí odpružené hmoty y_2 , posunutí neodpružené hmoty y_1 a profil terénu y_i .



Obr. 2-11 Čtvrtinový model vozidla [23]

Každý výše uvedený čtvrtinový model má frekvenční charakteristiku (obr. 2-12), na které lze pozorovat dva vrcholy, které představují rezonanční frekvenci odpružené hmoty (nižší frekvence) a rezonanční frekvenci neodpružené hmoty (vyšší frekvence) [2].



Obr. 2-12 Frekvenční charakteristika závěsu kola [2]

2.5 Semiaktivní algoritmy řízení MR tlumiče

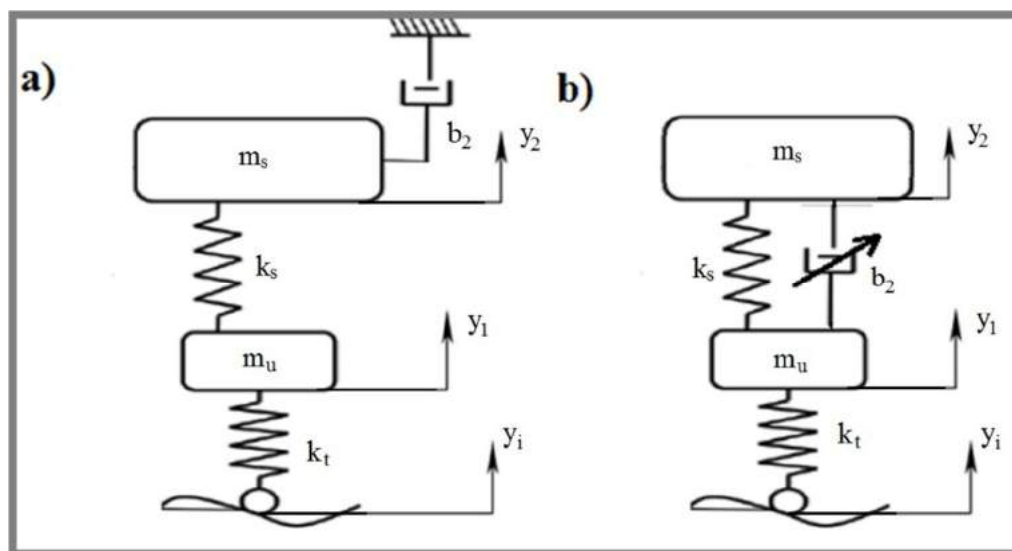
Samotný MR tlumič bez jakéhokoli řízení se chová jako klasický kapalinový tlumič o konstantním koeficientu tuhosti. Aby bylo dosaženo lepších vlastností MR tlumiče než tlumiče kapalinového, je zapotřebí jeho chování řídit. K tomuto účelu se používají semiaktivní řídicí algoritmy. Byla jich dosud navržena již řada. Řídicí algoritmy můžeme rozdělit do dvou skupin:

- algoritmy určené pro zvýšení komfortu, příkladem z této skupiny je Skyhook
- algoritmy zlepšující bezpečnost, např. Groundhook.

V následujících odstavcích budou popsány nejrozšířenější algoritmy pro řízení automobilového semiaktivního odpružení.

2.5.1 Skyhook

První semiaktivní řídicí algoritmus vznikl již v 70. letech a byl popsán v práci **D. Karnopa et al.** [24]. Myšlenka je postavena na fiktivním rámu vetknutém na obloze, mezi něj a odpruženou hmotu automobilu je vložen imaginární tlumič, který snižuje vibrace odpružené hmoty (ideální Skyhook, obr. 2-13 a). Reálně žádný pevný bod na obloze neexistuje, nicméně v určitých případech je možné působit na hmotu stejnou silou, jakou by vyvozoval ideální Skyhook (reálný Skyhook, obr. 2-13 b) [25].



Obr. 2-13 Ideální Skyhook (a) a reálný Skyhook (b) [26]

Síla vyvozovaná tlumičem je dána rovnicí [2]:

$$F_d = \begin{cases} by_2, & y_2(y_2 - y_1) \geq 0 \\ 0, & y_2(y_2 - y_1) < 0 \end{cases} \quad (16)$$

kde:

F_d tlumící síla

b tlumení

y_2 rychlost odpružené hmoty

y_1 rychlost neodpružené hmoty

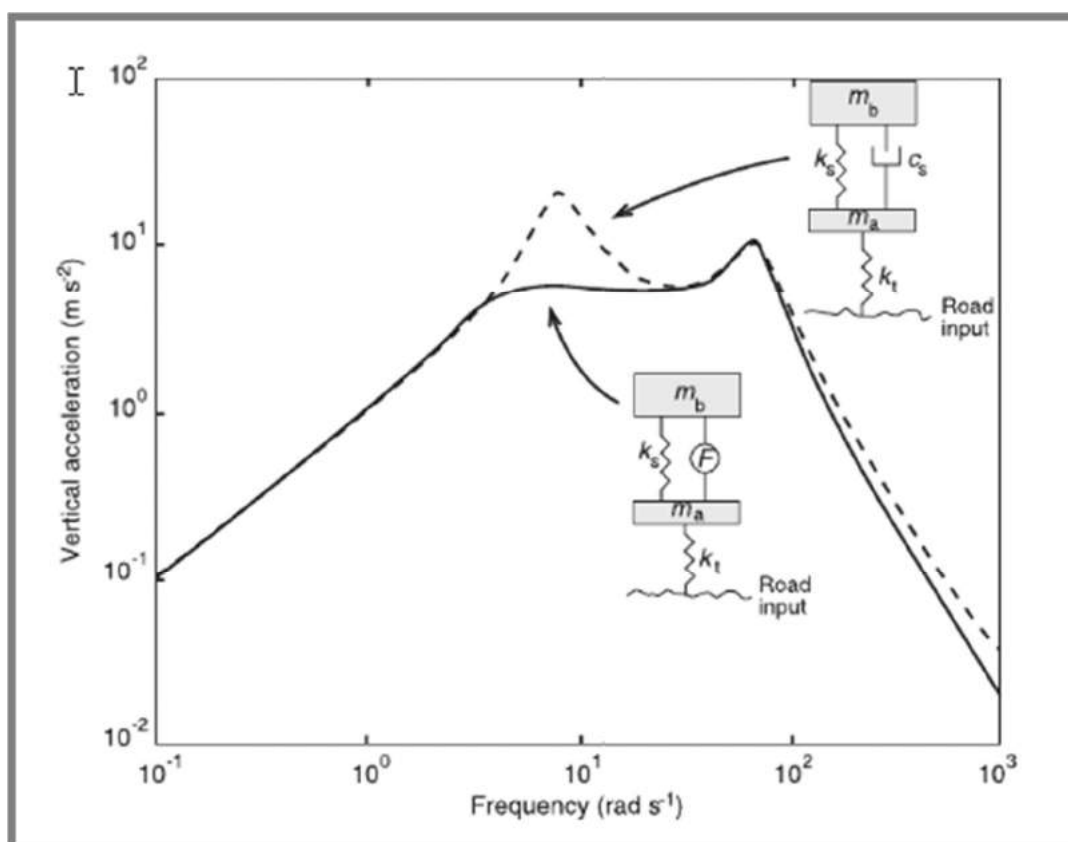
Vztah vyjadřuje, že pokud mají rychlosti odpružené hmoty a relativní rychlosti odpružené a neodpružené hmoty různá znaménka, měl by tlumič vyvozovat nulovou sílu, což MR tlumič neumožňuje (model byl původně navržen pro hydraulický tlumič). MR tlumič je v takovémto případě přepnut do neaktivovaného stavu a vyvozuje tedy co nejnížší možnou, i když nenulovou, sílu. Rovnice pak přejde do tvaru [2]:

$$F_d = \begin{cases} b_{\max}(\dot{y}_2 - \dot{y}_1), & \dot{y}_2(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) \geq 0 \\ b_{\min}(\dot{y}_2 - \dot{y}_1), & \dot{y}_2(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) < 0 \end{cases} \quad (17)$$

kde:

F_d tlumicí síla
 $b_{\max}$ maximální tlumení MR tlumiče
 $b_{\min}$ minimální tlumení MR tlumiče
 $\dot{y}_2$ rychlost odpružené hmoty
 $\dot{y}_1$ rychlost neodpružené hmoty

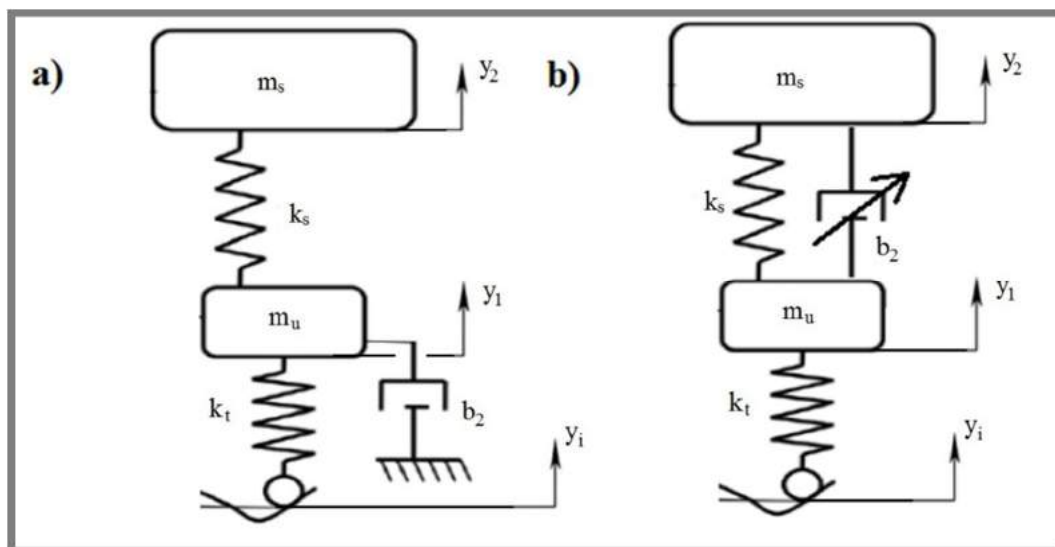
Skyhook snižuje rezonanční vrchol odpružené hmoty, čímž zvyšuje komfort jízdy (viz obr. 2-14). Nicméně pro zlepšení ovladatelnosti vozidla je zapotřebí snížit zároveň také rezonanční vrchol neodpružené hmoty, čehož nelze použitím samotného algoritmu Skyhook dosáhnout. Z tohoto důvodu je algoritmus různými způsoby modifikován [25].



Obr. 2-14 Porovnání pasivního tlumení a semiaktivního řízení algoritmem Skyhook [27]

2.5.2 Groundhook

Algoritmus Grounhook funguje podobně jako Skyhook s tím rozdílem, že pomyslný tlumič je vložen mezi zem a neodpruženou hmotu automobilu. Místo imaginárního vetknutí je na zemi, jak je vidět na obr. 2-15 a). Jeho účelem je zvyšování přitlaku pneumatiky na vozovku.



Obr. 2-15 Ideální Groundhook (a) a reálný Groundhook (b) [26]

model lze popsat rovnicí [2]:

$$F_d = \begin{cases} b(\dot{y}_2 - \dot{y}_1), & (\dot{y}_1 - \dot{y}_i) \cdot (\dot{y}_2 - \dot{y}_1) < 0 \\ 0, & (\dot{y}_1 - \dot{y}_i) \cdot (\dot{y}_2 - \dot{y}_1) \geq 0 \end{cases} \quad (18)$$

kde:

F_d tlumící síla
 b tlumení
 $\dot{y}_2$ rychlost odpružené hmoty
 $\dot{y}_1$ rychlost neodpružené hmoty
 $\dot{y}_i$ profil terénu

respektive pro MR tlumič [2]:

$$F_d = \begin{cases} b_{max} (\dot{y}_2 - \dot{y}_1), & (\dot{y}_1 - \dot{y}_i) \cdot (\dot{y}_2 - \dot{y}_1) < 0 \\ b_{min} (\dot{y}_2 - \dot{y}_1), & (\dot{y}_1 - \dot{y}_i) \cdot (\dot{y}_2 - \dot{y}_1) \geq 0 \end{cases} \quad (19)$$

kde:

F_d tlumící síla
 b_{max} maximální tlumení MR tlumiče
 b_{min} minimální tlumení MR tlumiče
 $\dot{y}_2$ relativní rychlost odpružené hmoty
 $\dot{y}_1$ relativní rychlost neodpružené hmoty
 $\dot{y}_i$ relativní rychlost terénu

2.5.3 Modifikovaný Groundhook

Aby byl daný řídicí algoritmus dobře použitelný v praxi, je třeba, aby všechny veličiny, na kterých je vyhodnocování závislé, byly jednoduše získatelné z experimentálního zařízení. Pro klasický Groundhook tomu tak není (je obtížné měřit $y_1 - y_i$), proto byla vyvinuta jeho modifikace. Princip je založený na porušování rovnováhy mezi gravitační silou a potenciální silou od pružiny (pneumatiky) v případě, že zrychlení neodpružené hmoty (kola) je nenulové. Při porušení rovnováhy mohou nastat dvě situace. První, že kolo zrychluje směrem k vozovce, tzn., že je gravitační síla větší než síla potenciální vyvozená pneumatikou. Druhým případem je kolo zrychlující směrem od vozovky, a to znamená, že je potenciální síla od pneumatiky větší než síla gravitační. Pro tyto dva stavy platí rovnice [2]:

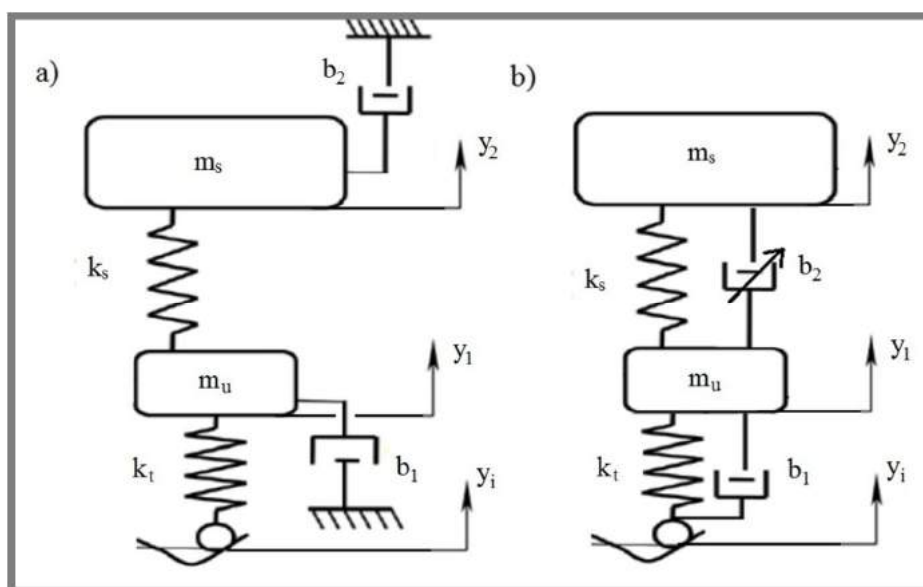
$$F_d = \begin{cases} b_{\max}(\dot{y}_2 - \dot{y}_1), & \ddot{y}_1(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) \geq 0 \\ b_{\min}(\dot{y}_2 - \dot{y}_1), & \ddot{y}_1(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) < 0 \end{cases} \quad (20)$$

kde:

F_d	tlumící síla
$b_{\max}$	maximální tlumení MR tlumiče
$b_{\min}$	minimální tlumení MR tlumiče
$\dot{y}_2$	rychlost odpružené hmoty
$\dot{y}_1$	rychlost neodpružené hmoty
$\ddot{y}_1$	zrychlení neodpružené hmoty

2.5.4 Hybrid control

Algoritmus Hybrid control kombinuje výhody Skyhooku a Groundhooku. Matematicky jde o lineární kombinaci funkcí obou řídicích algoritmů s koeficientem α , kterým se řídí jejich váha [26]. Schéma je znázorněno na obr. 2-16.



Obr. 2-16 Idealizace Hybrid control (a) a jeho reálná podoba (b) [26]

Algoritmus pak popisují rovnice [26]:

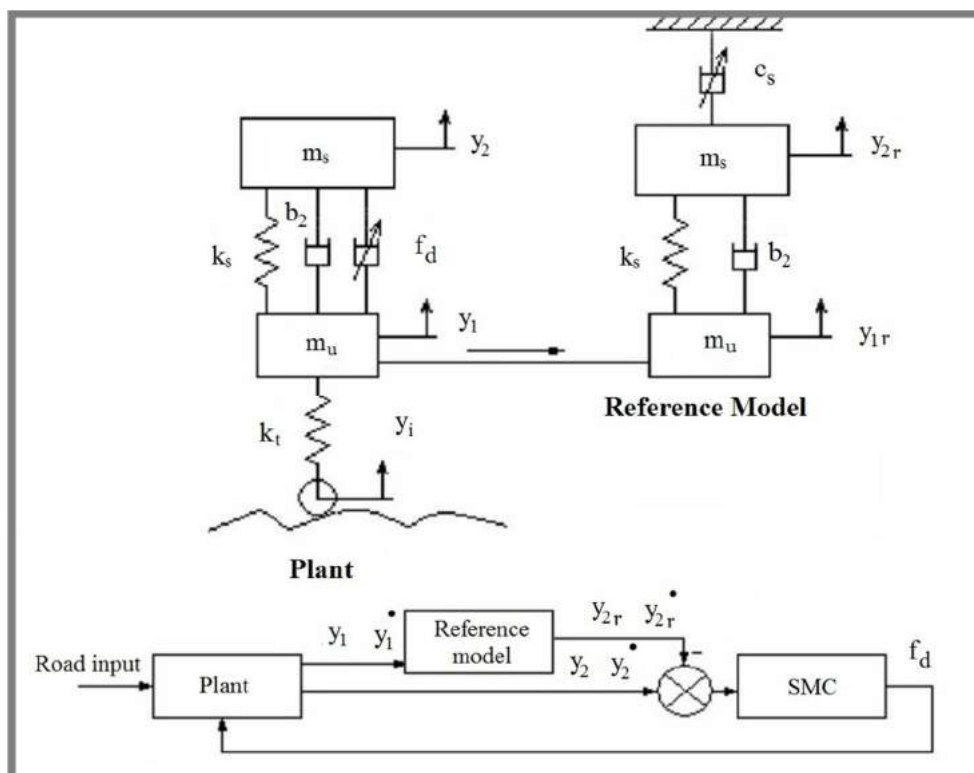
$$\begin{aligned}
 F_d &= G[\alpha \sigma_{sky} + (1 - \alpha)\sigma_{gnd}] \\
 y_2(\dot{y}_2 - y_1) &\leq 0, \sigma_{sky} = \dot{y}_2 \\
 y_2(\dot{y}_2 - y_1) &> 0, \sigma_{sky} = 0 \\
 y_1(\dot{y}_2 - y_1) &\leq 0, \sigma_{sky} = \dot{y}_1 \\
 y_1(\dot{y}_2 - y_1) &> 0, \sigma_{sky} = 0
 \end{aligned} \tag{21}$$

kde:

F_d tlumící síla
 α váhový koeficient
 σ_{sky} složka tlumící síly Skyhook
 σ_{gnd} složka tlumící síly Groundhook
 G minimální tlumící síla
 $\dot{y}_2$ rychlost odpružené hmoty
 $\dot{y}_1$ rychlost neodpružené hmoty

2.5.5 Sliding mode control (SMC)

Jedná se o algoritmus vycházející z modelu Skyhooku. Je robustnější, není tak citlivý na chyby modelu, je vhodný pro lineární i nelineární systémy. Ale protože je třeba měřit sílu generovanou tlumičem, což je nepraktické a drahé, není příliš vhodný pro sériově vyráběná vozidla. Algoritmus je založený na sledování rozdílů pohybu reálné odpružené hmoty vozidla a odpružené hmoty v modelu Skyhook. Schéma principu je vidět na obr. 2-17 [28].



Obr. 2-17 Schematické znázornění algoritmu Sliding control [28]

2.5.6 Linear quadratic regulator (LQR)

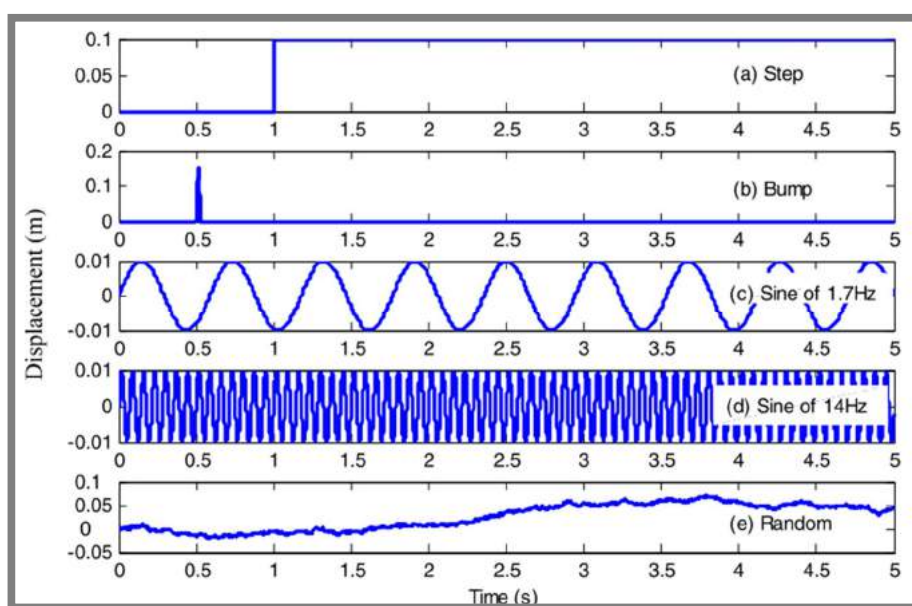
Tato metoda řízení je použitelná pro aktivní i semiaktivní tlumící systémy a jejím účelem je zlepšení komfortu jízdy. Algoritmus je vhodný pro stochastické děje. Do výpočtu vstupují váhové koeficienty, které se vztahují k odpružené hmotě, pracovní prostor zavěšení a dynamické charakteristiky pneumatiky. V první fázi se určí teoretická potřebná síla, v další části se do výpočtu zahrnou limity MR tlumiče [29]. Pro určení odpovídajících váhových koeficientů se používá řada numerických metod, viz článek *A. Jahromiho et al.* [30]. Podrobnému popisu možného způsobu se věnuje práce *Y. Shiho et al.* [31].

2.5.7 Fuzzy logic control

S rozvojem řízení pomocí fuzzy logiky došlo i k její uplatnění v různých oborech, semiaktivní tlumící systémy nevyjímaje. Výhodou tohoto přístupu je, že není třeba mít přesný dynamický model řízené soustavy. Místo číselných hodnot jsou používány slovní proměnné, které kvantifikují úroveň, ovládání a koordinace. Na ovládací úrovni jsou definovány vstupy a výstupy, v případě semiaktivního řízení MR tlumiče to jsou rychlost odpružené hmoty, rychlost neodpružené hmoty, relativní rychlost odpružené a neodpružené hmoty a tlumící síla. Systém pak vykonává definované příkazy tak, aby vstupy směřovaly k požadovaným výstupům. Tato pravidla se zadávají pomocí tabulek a k jejich vytvoření neexistuje obecná metodika, je třeba zkušeností, znalostí a intuice programátora, což je nevýhodou tohoto způsobu řízení [32].

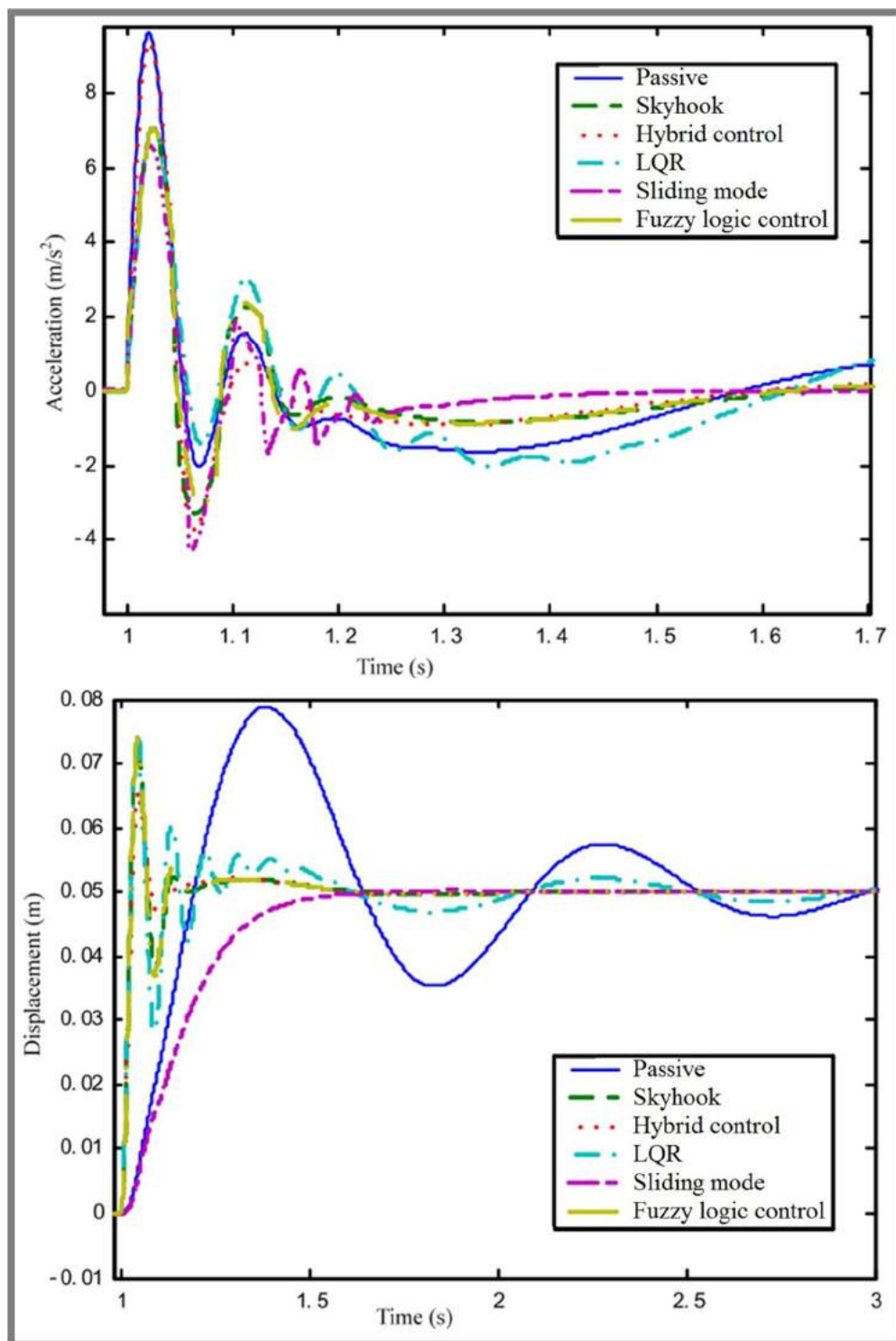
2.5.8 Srovnání efektivity řídicích algoritmů

Porovnáním efektivity jednotlivých řídicích algoritmů se zabývá ve své práci *Dong et al.* [29]. Srovnává pět možných řídicích algoritmů, Skyhook, Hybrid control, Sliding mode control, LQR a fuzzy řízení, s pasivními tlumiči. Pro srovnání byl použit čtvrtinový model automobilu, na němž byly provedeny numerické simulace přejezdu nerovnosti a buzení sinusovým signálem o frekvencích blízkých rezonančním, jak znázorňuje následující obrázek.



Obr. 2-18 Vstupy pro modelové testování [29]

Pro hodnocení kvality odpružení z hlediska komfortu jízdy se jako kritérium používá zrychlení a výchylka odpružené hmoty. Srovnání jednotlivých algoritmů je znázorněno na následujícím obrázku. Ukázalo se, že algoritmus Skyhook dokáže nejefektivněji tlumit vibrace jak od přejezdů nerovností, tak v důsledku sinusové budící síly. Ze své podstaty však nemůže být dosaženo žádného zlepšení v tlumení neodpružené hmoty. Za cenu zvýšení pohodlí se však zhoršuje stabilita.



Obr. 2-19 Srovnání zrychlení a výchylky odpružené hmoty při použití různých algoritmů [29]

Algoritmus Hybrid control kombinuje Skyhook a Groundhook, přičemž důležitým aspektem je výběr vhodného váhového koeficientu α . Po provedení řady testů autoři zvolili $\alpha=0,8$. Algoritmus nedosahuje v porovnání s ostatními takové odezvy v tlumení vibrací odpružené hmoty, ale jako jediný ze všech testovaných je schopen redukovat zrychlení neodpružené hmoty.

Sliding mode control algoritmus se vyznačuje velkou schopností útlumu první rezonanční frekvence odpružené hmoty, která leží obvykle v pásmu 4-8 Hz a na tyto frekvence je lidské tělo nejcitlivější.

Fuzzy logic control algoritmus v porovnání se Skyhookem a Groundhookem měl horší odezvu na jednotlivé nerovnosti vozovky, naopak pro sinusový signál vykazuje lepší tlumení.

2.6 Dynamické vlastnosti MR tlumiče

2.6

Pro efektivní řízení MR tlumiče je třeba popsat jeho dynamické vlastnosti. Chování při změnách stavu systému je obecně možné vyjádřit několika způsoby, např. dle [33]:

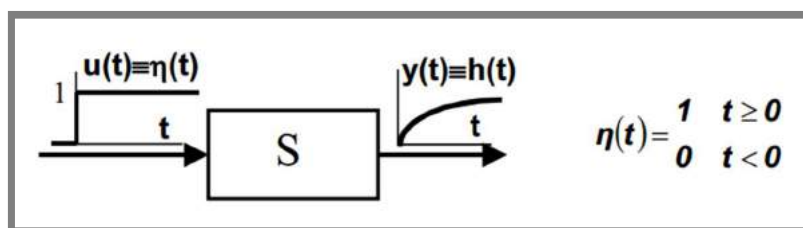
- diferenciální rovnicí
- operátorovým přenosem
- frekvenčním přenosem
- frekvenční charakteristikou
- impulsní charakteristikou
- přechodovou charakteristikou
- rozložením pólů a nul

Mezi hlavní dynamické vlastnosti MR tlumiče patří doba odezvy MR tlumiče a jeho dynamický rozsah. Budou popsány v následujících kapitolách.

2.6.1 Doba odezvy MR tlumiče

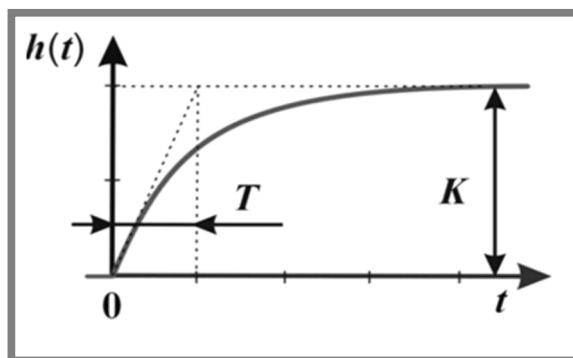
2.6.1

Pro popis dynamických vlastností MR tlumiče v časové oblasti je z hlediska realizovatelnosti výhodné použít přechodovou charakteristiku $h(t)$. Jedná se o odezvu na jednotkovou změnu vstupní veličiny, viz obr. 2-20.



Obr. 2-20 Přechodová charakteristika $h(t)$ [34]

MR tlumič je možné popsat jako dynamický systém prvního řádu. Dynamické systémy prvního řádu charakterizují dva důležité parametry, jsou jimi časová konstanta T a zesílení K . Časová konstanta, někdy též nazývaná doba odezvy, je definována jako čas potřebný k dosažení 63,2 % hodnoty požadované výstupní veličiny. Zesílení udává poměr výstupní a řídicí veličiny [35].



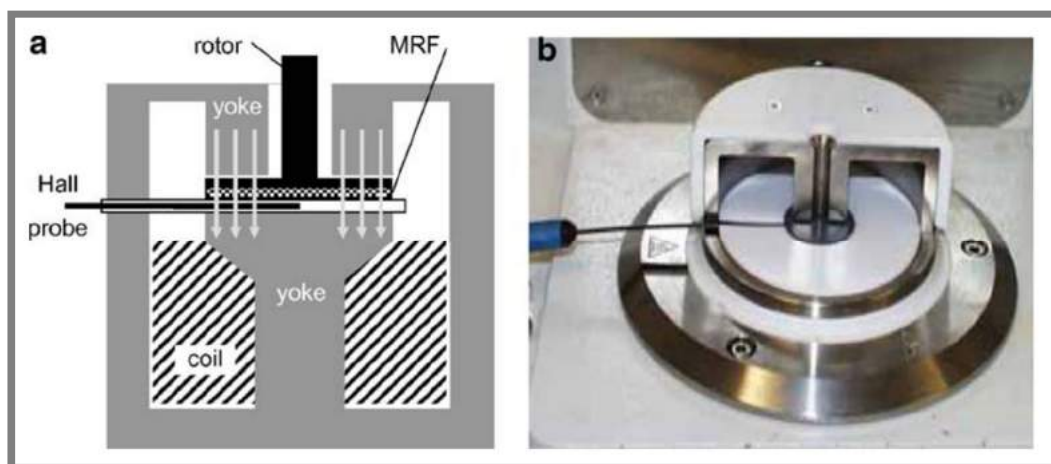
Obr. 2-21 Časová konstanta a zesílení [35]

Časovou konstantu způsobuje zejména:

- časová odezva MR kapaliny
- indukčnost cívky MR tlumiče
- vířivé proudy v jádře cívky

Efektivní regulace vyžaduje, aby byla časová konstanta menší než 1/10 převrácené hodnoty vlastní frekvence závěsu kola. Dobu odezvy je možné ovlivnit jednak konstrukcí MR tlumiče, ale také způsobem řízení [2].

Určením časové odezvy MR kapaliny se ve svém článku věnují **H. Laun a C. Gabriel** [36]. Prováděli experimenty na magneto-reometru MCR501 diskového typu při konstantní smykové rychlosti a sledovali odezvu MR kapaliny v závislosti na změně velikosti magnetické indukce. Velikost vznikajícího smykového napětí (a tedy i tlumicí síla) závisí právě na absolutní hodnotě magnetické indukce. Schéma a fotografii použité experimentální aparatury ukazuje obr. 2-22. Pro řízení byl použit obvod se známou časovou konstantou λ .



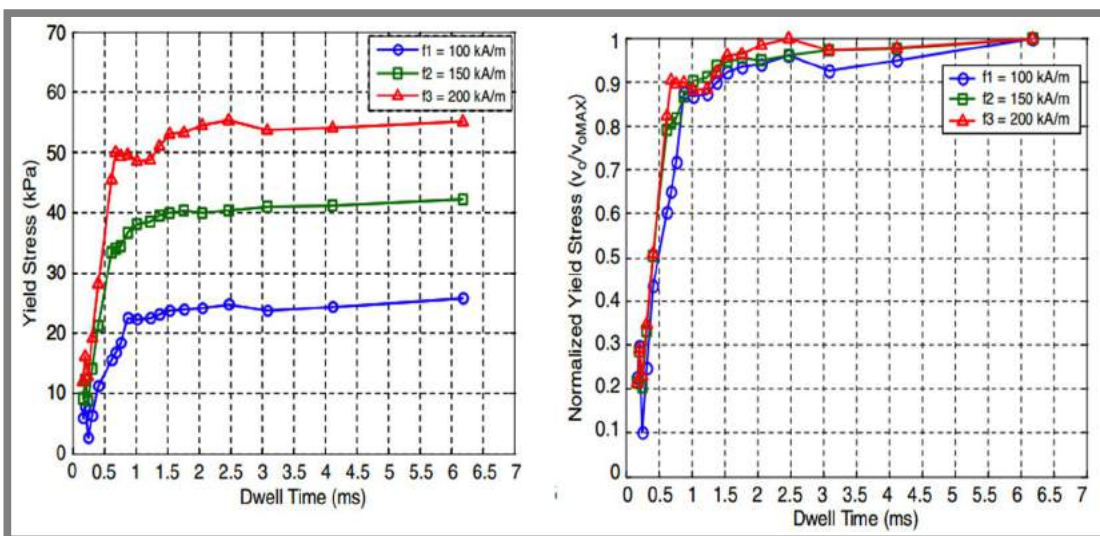
Obr. 2-22 Měřicí aparatura [36]

Podle výrobců MR kapalin by se měla jejich časová konstanta pohybovat řádově v jednotkách milisekund. To se měřením při použití harmonického průběhu i jednotkového skoku vstupního proudu potvrdilo. Naměřená odezva byla v rozmezí (1,8–2,8) ms.

Časovou odezvou MR kapaliny při vysokých rychlostech proudění se zabýval **D. Gonclaves et al.** [37]. Experimenty byly prováděny pomocí slit-flow reometru,

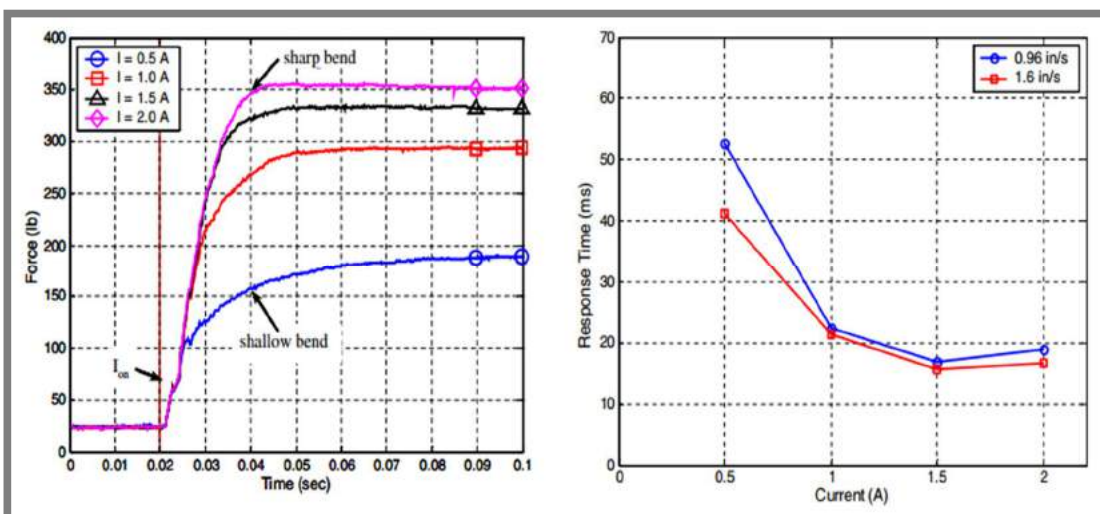
který umožňuje měnit průtok MR kapaliny a délku aktivní zóny (oblast, kde je MR kapalina vystavena účinkům magnetického pole). Autoři pro různé rychlosti toku měřili *dwell time*, což je čas, po který se částice MR kapaliny nachází v aktivní oblasti, odpovídající smykové napětí a F - v charakteristiku. Z těchto záznamů je možné určit zdánlivou viskozitu a mez kluzu.

S poklesem *dwell time* pod 1 ms bylo pozorováno strmé snižování meze kluzu, jak je vidět na následujícím obrázku. Pokud je časová odezva definována jako čas potřebný k dosažení 62,3 % požadované hodnoty, odpovídá jí pro měřenou kapalinu hodnota mezi 0,45 a 0,6 ms.



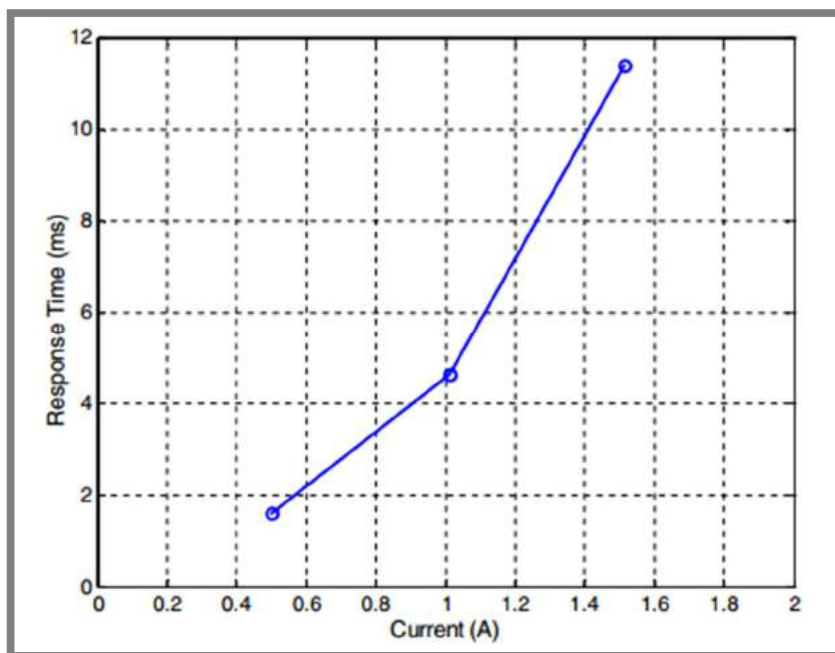
Obr. 2-23 Závislost meze kluzu na *dwell time* [37]

J. Koo et al. [38] srovnávali dobu odezvy pro různé provozní parametry MR tlumiče, konkrétně se zabývali vlivem velikosti proudu a rychlosti pístu. Jako časovou odezvu definují čas nutný k dosažení 92 % požadované výstupní veličiny. Z výsledků měření vyplývá, že se zvyšujícím se proudem klesá doba odezvy, jak je znázorněno na následujícím obrázku.



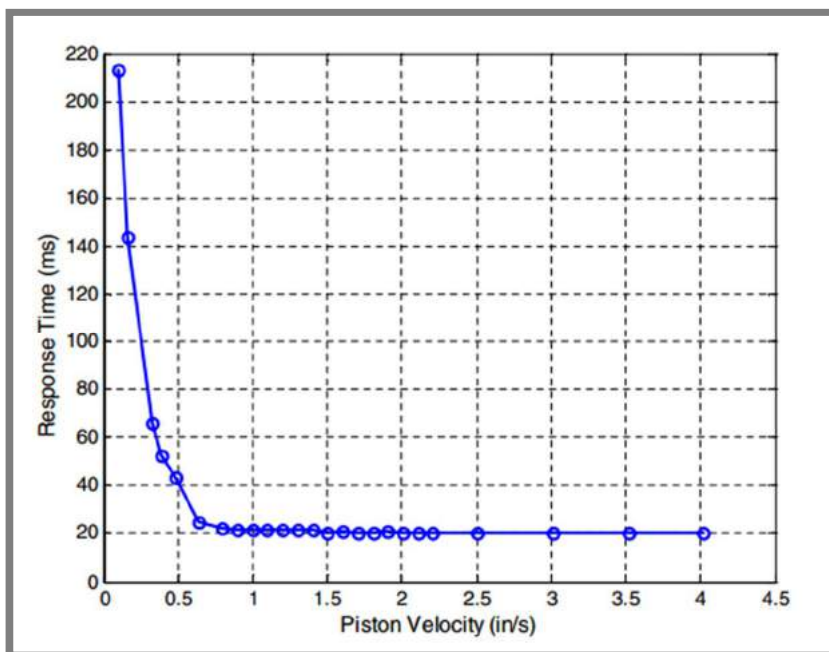
Obr. 2-24 Závislost časové odezvy MR tlumiče na velikosti proudu [38]

Naproti tomu doba odezvy řídící elektroniky v závislosti na proudu má trend opačný.



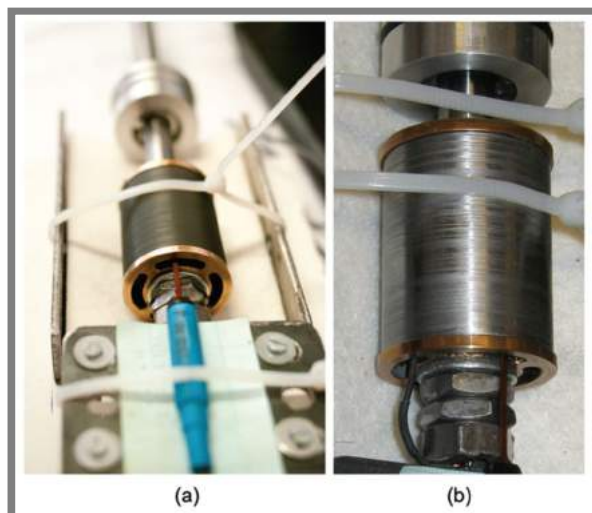
Obr. 2-25 Závislost časové odezvy elektroniky na velikosti proudu [38]

Výsledky měření pro různé pístové rychlosti ukazují, že doba odezvy klesá s rostoucí rychlostí exponenciálně.



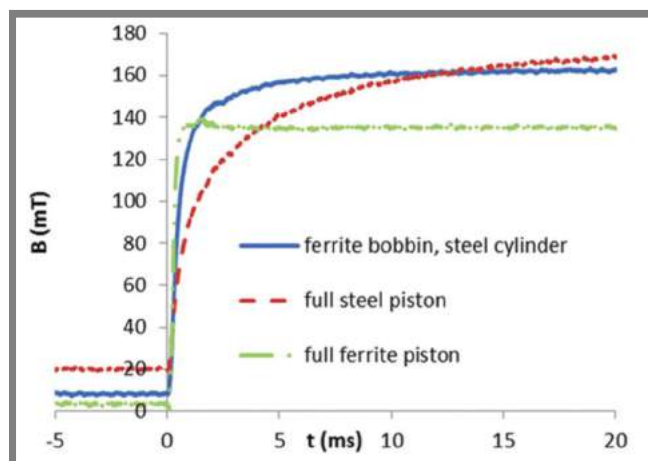
Obr. 2-26 Závislost časové odezvy na pístové rychlosti [38]

Z. Strecker et al. [39] se ve své práci zabývali vlivem materiálu jádra cívky pístu na časovou odezvu. Experimentálně došli k poznatku, že při použití feritového jádra cívky pístu dojde k rapidnímu snížení časové odezvy, až na 1,5 ms při použití rychlého proudového regulátoru Fotodokumentace měření je zobrazeno na obr. 2-27.

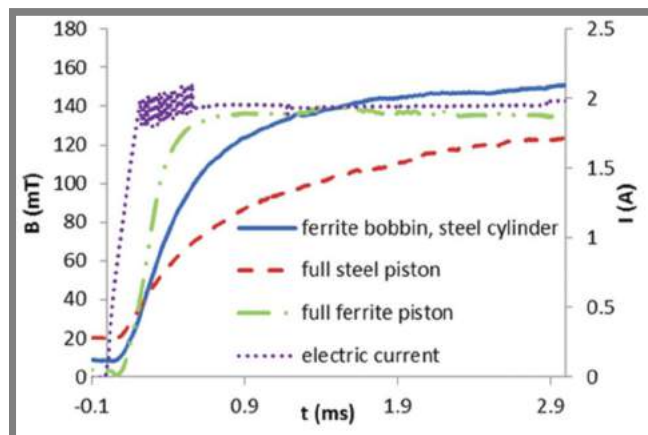


Obr. 2-27 Experiment a)feritový píst, b)feritové jádro cívky, ocelový válec [39]

Nevýhodou feritového jádra jsou horší mechanické a magnetické vlastnosti než má klasická ocel. Na obr. 2-28 a 2-29 je znázorněna závislost magnetické indukce na časové odezvě pro ocelový, feritový a feritovo-ocelový píst (feritová cívka, ocelový píst). Je vidět že pokud je píst feritový je časová odezva nejnižší.



Obr. 2-28 Závislost magnetické indukce na časové odezvě [39]



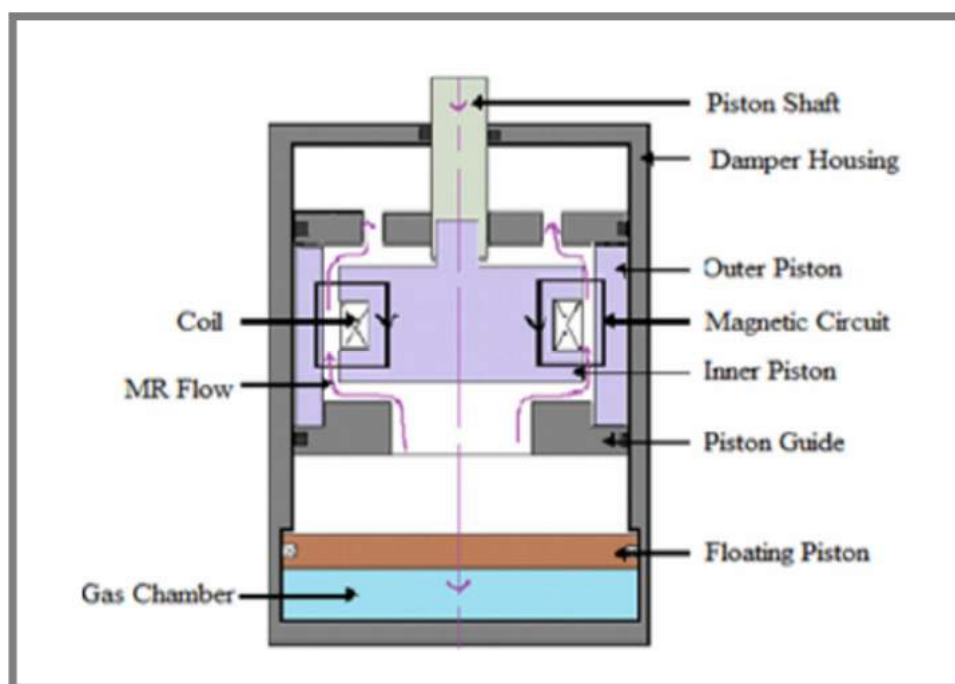
Obr. 2-29 Závislost magnetické indukce na časové odezvě a na proudu [39]

Z. Strecker et al. [40] se ve své práci zabýval vlivem odezvy na kvalitu odpružení při použití semiaktivních řídicích algoritmů. Došli k závěru, že časová odezva ovlivňuje efektivitu řídicích algoritmů. V případě MR tlumiče s odezvou 20 ms řízeného algoritmem Groundhook není možné potenciál semiaktivního řízení zcela využít a kvalita odpružení se příliš neliší od pasivního. Na základě simulace bylo ale dokázáno, že při zkrácení doby odezvy na 1,5 ms by došlo k výraznému zlepšení. V případě algoritmu Skyhook není kvalita odpružení časovou odezvou tolik ovlivněna, zlepšení oproti pasivnímu odpružení lze pozorovat i při odezvě 20 ms. Obecně však platí, že čím kratší je doba odezvy, tím se zvyšuje efektivita semiaktivních řídicích algoritmů a kvalita odpružení.

2.6.2 Dynamický rozsah

Důležitou vlastností MR tlumiče je jeho dynamický rozsah, protože určuje efektivitu tlumení. Je definován jako poměr celkové výstupní síly a její nekontrolovatelné složky, která zahrnuje sílu způsobenou viskozitou MR kapaliny a třecí sílu.

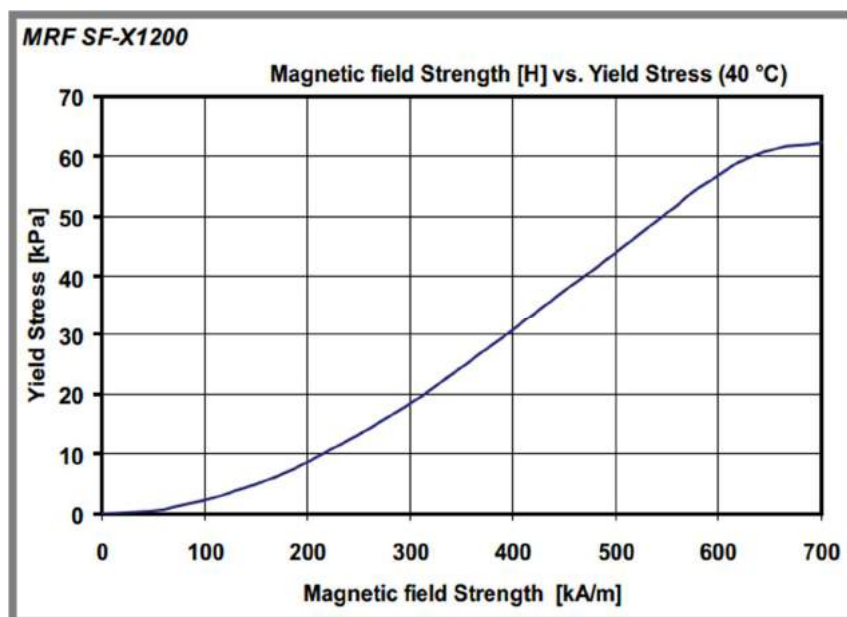
Vlivem vlastní konstrukce MR tlumiče na dynamický rozsah se zabýval **M. Ferdous et al.** [41]. Prostřednictvím MKP simulace v programu ANSYS byly testovány různé konfigurace plochy pístu, jeho tvaru a štěrby pro MR kapalinu. Výsledky byly ověřeny experimentálně na optimalizované variantě MR tlumiče. Bylo zjištěno, že dynamický rozsah závisí nepřímo úměrně na velikosti štěrby pro MR kapalinu. Zmenší-li se štěrbina, zvýší se regulovatelná síla. Pokud ale její velikost klesne pod určitou hodnotu, dojde k prudkému nárůstu síly způsobené viskozitou MR kapaliny a dynamický rozsah klesá.



Obr. 2-30 Hlavní části MR tlumiče [41]

Optimalizaci je též možné provádět z hlediska návrhu magnetického obvodu s ohledem na vlastnosti MR kapaliny a velikosti intenzity magnetického pole. Pro dosažení co největšího regulačního rozsahu MR tlumiče je třeba vycházet z nelineární závislosti intenzity magnetického pole na mezi kluzu MR kapaliny.

Štěrbina MR tlumiče musí být tedy navržena tak, aby v ní bylo možno dosáhnout bodu zalomení magnetické indukce – závislost meze kluzu MR kapaliny na intenzitě magnetického pole, viz obr. 2-31[2].



Obr. 2-31 Závislost meze kluzu MR kapaliny na intenzitě [41]

Na dynamický rozsah mají také podstatný vliv degradační procesy v MR kapalině. Zejména se jedná o [4]:

- Sedimentaci
- Provozní houstnutí
- Pokles MR efektu v aktivovaném stavu

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

První zmínky o semiaktivních závěsech s MR tlumiči se objevily již 70. letech minulého století. Z počátku se vědecké práce zabývaly převážně teorií. Byly vydefinovány problémy a požadavky, které musejí být vyřešeny, aby semiaktivní závěs s MR tlumičem správně fungoval. Byly vytvořeny modely pro MR kapalinu, pro MR tlumič a semiaktivní řídicí algoritmy. V simulačních modelech byl následně závěs s MR tlumičem ověřen s kladným výsledkem a sliboval značné zlepšení jízdního komfortu i bezpečnosti. Reálné testy však simulace nepotvrdily a ve většině měření výsledky ukazovaly komfort i bezpečnost horší než s pasivním nastavením daného MR tlumiče. Největší problém činila dlouhá časová odezva MR tlumiče na řídicí signál.

Z předešlých prací je zřejmé, že pokud bude časová odezva MR tlumiče dostatečně krátká, pak se dá očekávat za použití semiaktivního řízení, značné zlepšení jízdní bezpečnosti, resp. komfortu. V nedávné době byl vyvinut a zkonstruován rychlý MR tlumič, jehož časová odezva je kratší než 2 ms. Takový MR tlumič je k dispozici pouze na VUT v Brně a nebyl ještě nikým otestován v reálném semiaktivně řízeném automobilovém závěsu. Tato práce se tedy zabývá testováním rychlého MR tlumiče. Aby mohlo proběhnout měření, je třeba zvolit vhodné experimentální zařízení, vhodný semiaktivní řídicí algoritmus, který bude použit. Dále je třeba zvolit vhodné nastavení MR tlumiče, podmínky měření a vytvořit simulační model, aby bylo možné částečně odhadnout, jaká kombinace nastavení je vhodná pro experimentální ověření.

Prvořadě je třeba zvolit vhodný semiaktivní řídicí algoritmus. Tato práce pojednává o testování sportovního automobilového odpružení, kdy u sportovních vozů je vždy kladen důraz na jízdní bezpečnost za cenu, že jde komfort stranou. Pro tuto aplikaci se nabízejí dva řídicí algoritmy zmíněné v předešlé kapitole, a to Groundhook a modifikovaný Groundhook. Kvůli obtížnému měření relativní rychlosti kola vůči vozovce nutné pro řízení pomocí Groundhook algoritmu, byl na experiment vybrán algoritmus modifikovaný Groundhook, který pro řízení potřebuje pouze signál se zrychlením neodpružené hmoty a relativní rychlost odpružené a neodpružené hmoty. Dále je třeba vytvořit simulační model, který je nutné následně verifikovat kalibračním měřením, aby byly předpovězené výsledky simulačním modelem věrohodné. Poté je možné provést řadu simulací a stanovit tak nejlepší možná nastavení, která se následně experimentálně ověří. Nakonec budou data z měření vyhodnocena a porovnána s pasivním nastavením MR tlumiče. Dle studovaných odborných článků, zabývajících se stejnou problematikou, jsou očekávány kladné výsledky zvláště v tom smyslu, že bude zlepšena bezpečnost jízdy (přítlak kola na vozovku).

Pro tuto práci byly nastaveny hlavní cíle:

- Experimentálně potvrdit, že se semiaktivně řízeným rychlým MR tlumičem lze dosáhnout lepšího přitlaku kola na vozovku než s MR tlumičem pasivně nastaveným.
- Porovnat kvalitu odpružení (bezpečnost a pohodlí) realizovanou semiaktivně řízeným rychlým MR tlumičem a pasivně nastaveným MR tlumičem.

Pro splnění hlavních cílů je třeba splnit i tyto dílčí cíle:

- Odstranit konstrukční nedostatky experimentálního zařízení
- Upravit a verifikovat virtuální simulační model
- Nalézt optimální nastavení řídicího algoritmu

4 MATERIÁL A METODY

Jak již bylo, řečeno na počátku řešení je třeba vhodně zvolit experimentální zařízení. Na VUT v Brně je k dispozici zmenšený čtvrtinový model automobilu, který je posazen na simulátoru vozovky s nerovností typu příčný práh. Toto zařízení bylo již v minulosti k podobným účelům používáno, tudíž stačí pouze drobné konstrukční úpravy, aby experimentální zařízení vyhovovalo kladeným požadavkům. Prvním bodem kapitoly bude tedy stručný popis experimentálního zařízení (kapitola 4.1), na kterém proběhnou veškerá měření a dalším bodem jeho drobné konstrukční úpravy (kapitola 4.2). V kapitole 4.3 bude popsán virtuální simulační model, resp. jeho úpravy. Je třeba do modelu zanést stávající vstupní parametry. Dalším krokem je verifikace virtuálního modelu s měřením, ta bude popsána v kapitole 4.4. V kapitole 4.5 budou popsány provedené simulace za účelem nalezení optimálního nastavení MR tlumiče aby bylo dosaženo co nejlepších výsledků. Kapitola 4.6 se zabývá samotným experimentem.

4.1 Experimentální vozík

Veškeré měření probíhalo na experimentálním vozíku, který je k dispozici v laboratoři technické diagnostiky Ústavu Konstruování. Nastavení vozíku určují následující parametry: odpružená hmota m_2 , neodpružená hmota m_1 , MR tlumič s proměnným koeficientem tlumení b_2 , pružiny s tuhostí k_2 a pneumatika s tuhostí k_1 a tlumením b_1 . Hmotnosti odpružené a neodpružené hmoty lze jednoduše změnit výměnou závaží za lehčí, či těžší. Zdánlivá tuhost pružiny (tzn. Imaginární tuhost pružiny mezi rámem a kyvnou vidlicí) lze v určitém rozsahu měnit uchycením reálné pružiny za vidlici. Tuhost pneumatiky lze taktéž v určitém rozsahu měnit a to změnou tlaku. Parametry vozíku jsou uvedeny v Tab. 4-1.

Tab. 4-1 Tabulka parametrů nastavení experimentálního vozíku

Parametry	Hodnoty pro experimentální vozík
Dynamická tuhost pneumatiky při tlaku 2 bary k_1 [N/mm]	57,80
Redukovaná odpružená hmota m_2 [kg]	56,62
Redukovaná neodpružená hmota m_1 [kg]	7,97
Celková tuhost pružin k_2 [N/mm]	7,38

Kolo experimentálního vozíku se odvaluje po simulátoru vozovky. Simulátor vozovky je složen z rotačního bubnu o průměru 0,8 m, na bubnu příčný práh o maximální výšce 21 mm a délce 55 mm, který je zhotoven z kruhové trubky. Buben je rotačně uchycen do rámu a poháněn elektromotorem, který je řízen frekvenčním měničem, aby bylo možné nastavovat rychlost kola vůči vozovce. Na rámu jsou nalepeny tenzometry, kterými lze měřit přítlak kola na vozovku. Dále je simulátor vozovky vybaven snímačem otáček, z kterého lze určit rychlost kola vůči vozovce. Experimentální vozík na simulátoru vozovky je zobrazen na obr. 4-2.



Obr. 4-2 Experimentální vozík [2]

4.2 Konstrukční úpravy částí experimentálního vozíku

4.2

U vozíku byly v průběhu experimentů, které byly v minulosti provedeny, odhaleny různé ať už menší, nebo zásadní nedostatky. Největším nedostatkem je prolínání oleje z komory MR tlumiče přes jeho pístnici, a dále je třeba rekonstruovat uchycení tlumiče ke kyvnému rámu.

4.2.1 Prolínání oleje přes pístnici MR tlumiče

4.2.1

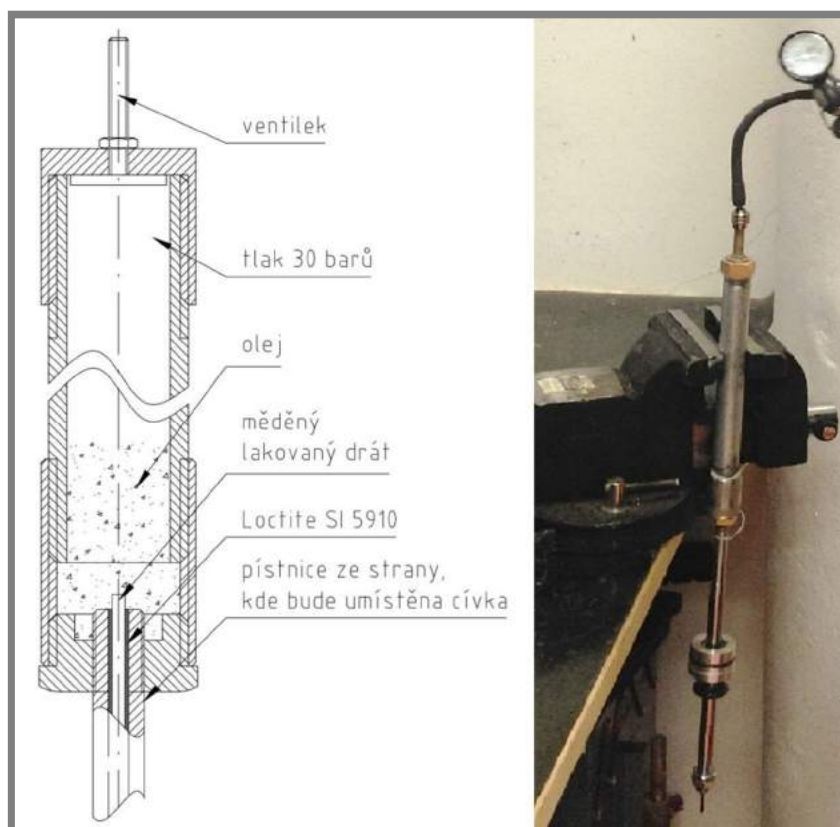
Cívka, která při sepnutí proudu začne seskupovat v oleji feritové částice, a tak mění koeficient tlumení, je napájena vodičem, který je protažen dutou pístnicí tlumiče. V minulosti byl pístnicí protažen lakovaný měděný drát (nesmí se dotknout dutiny pístnice, tím by se obvod vyzkratoval), který byl zatěsněn tmelem. Tmelu však bylo malé množství do hloubky pouze pár milimetrů. Tento stav byl způsoben malou mezerou mezi drátem a dutinou pístnice. Nové řešení bylo vybráno na základě odborné konzultace s dodavatelem těsnících tmelů Loctite. Doporučen byl těsnící tmel Loctite SI 5910 v balení 40 ml. Tento tmel je vhodný pro utěsnění mezer mezi 0,1 – 1 mm, což dané specifické požadavky splňuje. Přesná specifikace je uvedena na obr. 4-3. Nejprve byl z pístnice odvrtán starý drát s tmelem, poté byl nahrazen novým opět lakovaným měděným drátem, viz následující postup:

- Pístnice byla z jedné strany ucpána
- Do pístnice byl z druhé strany natlačen těsnící tmel Loctite SI 5910
- Do naplněné pístnice tmelem byl natlačen lakovaný měděný drát
- Zbytek tmelu, který byl vytlačen natlačeným drátem, byl odstraněn
- Tmel byl ponechán v klidu 4 dny, aby zatusnul a nabral dostatečnou pevnost

Popis výrobku	
LOCTITE® 5910® má následující vlastnosti:	
Technologie	Silikon
Chemický typ	Oximový silikon
Vzhled (nevytvrzený)	Černá pasta ^{LMS}
Složky	Jednosložkový
Viskozita	Tixotropní pasta
Vytvrzení	Vulkanizace při pokojové teplotě
Aplikace	utěsňování
Zvláštní výhoda	Vynikající odolnost vůči automobilovým motorovým olejům.

Obr. 4-3 Specifikace tmelu Loctite SI 5910 [42]

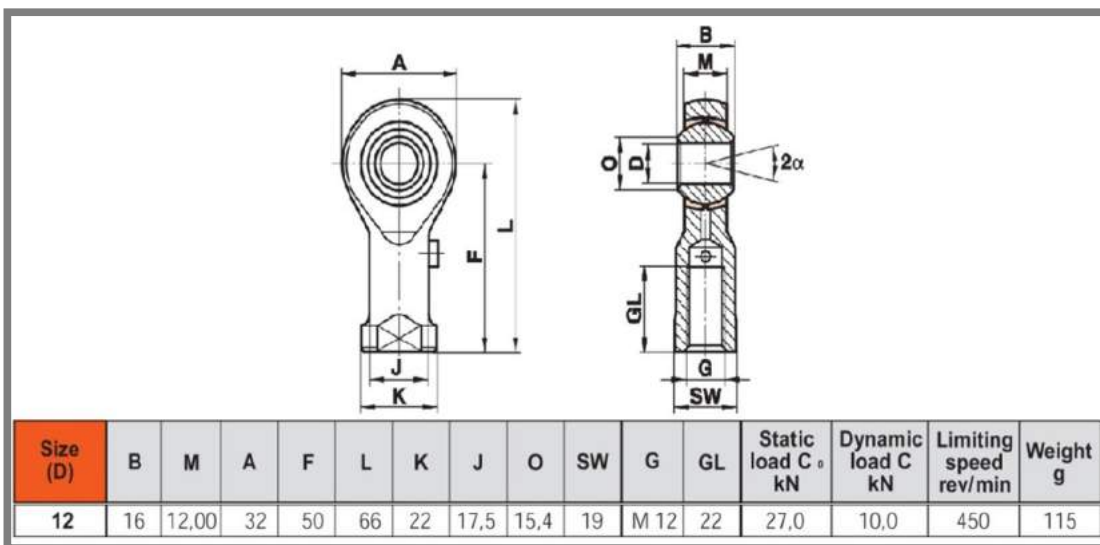
Aby bylo možné ověřit, že problém s prolínajícím olejem byl zdárně vyřešen, byl pro tento účel navržen tlakovací přípravek. Všechny závity namáhané tlakem byly ošetřeny Loctite páskou, aby z tlakovací komory neunikal tlak. Tento přípravek (viz. obr. 4-4) se našroubuje na závit pístnice ze strany, na které je v tlumiči umístěna cívka, a naplní se z části olejem. Na přípravek se poté našroubuje víčko s ventilem, přes které se do komory s olejem vnese tlak 30 barů, který odpovídá skutečnému tlaku v tlumiči za provozu. Natlakovaný přípravek byl upnut do svěráku a pod něj byl umístěn bílý papír, aby byl znát případný únik oleje. V tomto stavu byl přípravek ponechán 48 hodin. Po uplynutí tohoto času byl opět změřen tlak v komoře, který se shodoval s tlakem počátečním a byl zkontrolován bílý papír, na kterém nebyly znatelné žádné indikace úniku oleje.



Obr. 4-4 Tlakovací přípravek

4.2.2 Rekonstrukce uchycení tlumiče ke kyvnému rámu

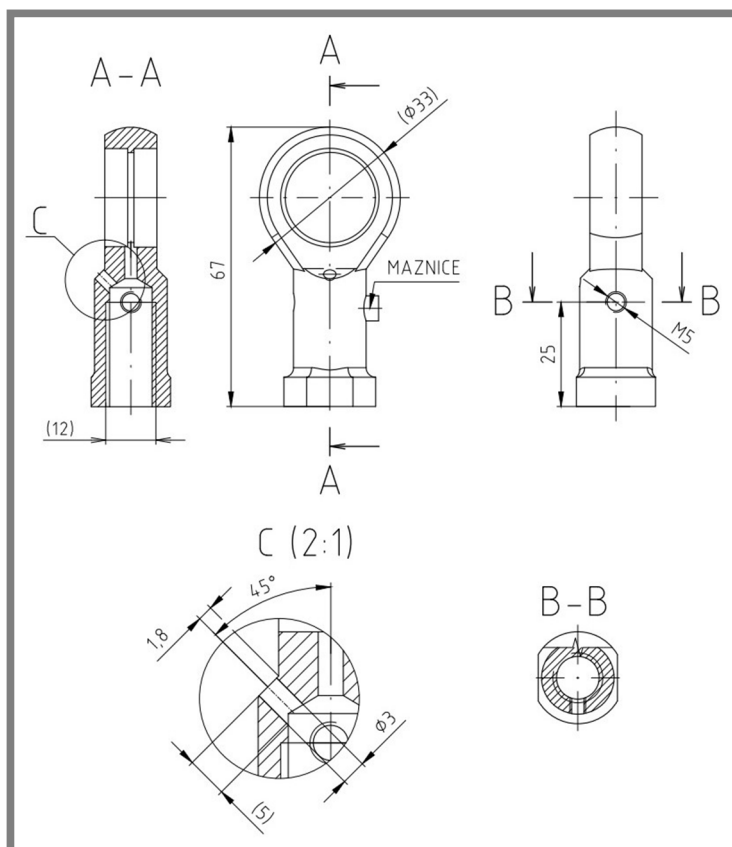
Původně bylo uchycení tlumiče k rámu řešeno pouhým uchycením pístnice na kyvnou vidlici přes gumové podložky. Toto řešení neumožňuje kyvný pohyb. Hlavním požadavkem uchycení pístnice ke kyvnému rámu je hlavně kyvný pohyb v různých osách. Pro tuto aplikaci se v praxi používají kloubová ložiska, nebo přímo kloubové hlavy, v kterých je kloubové ložisko již zabudováno. Klasická ložiska kývavý pohyb ve více osách neumožňují. V rekonstruované verzi byla použita z důvodu nižších nákladů kupovaná kloubová hlava. Dle potřebných rozměrů, typu a dalších požadavků byla zvolena hlava firmy Fluro, viz obr. 4-5.



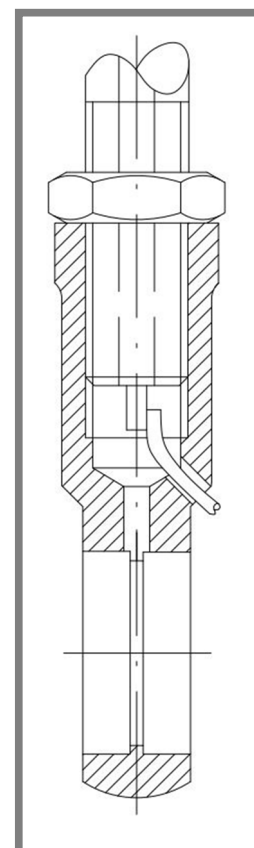
Obr. 4-5 Kloubová hlava GI 12 [43]

Síly v tlumiči se při experimentu pohybují řádově ve stovkách N, navržené ložisko má statickou únosnost 27 kN, což je vysoko nad silami provozními. Z tohoto důvodu není třeba žádného kontrolního výpočtu.

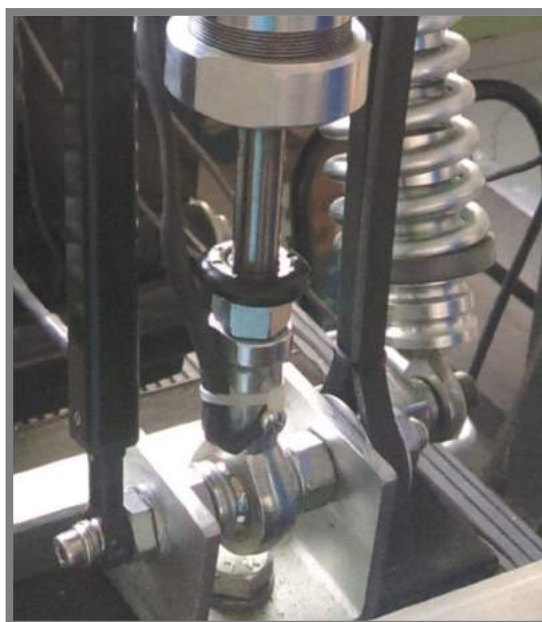
Dále bylo třeba kloubovou hlavou provést přívodní napájecí kabel, který je připájen na lakovaný drát v duté pístnici, který napájí cívku tlumiče. Pro tento účel bylo navrženo následující řešení. Drát byl proveden celou pístnicí až do kloubové hlavy a ještě před kloubovým ložiskem, které je v hlavě vlisované, byla vyvrtána díra, kterou byl drát vyveden z hlavy ven. Provedené úpravy zobrazuje obr. 4-6 a 4-7. Pístnici proti vymontování zajišťuje matice nad kloubovou hlavou, viz obr. 4-6. Jak je možné vidět na obr. 4-7 naproti maznici je závitová díra M5. Ta je určena pro šroub, kterým bude připojen mínusový vodič ke kloubové hlavě, tedy k tzv. kostře. Druhý, plusový přívod (lakovaný měděný drát) vede dutou pístnicí. Takto připravená pístnice byla smontována s cívkou a měděný kabel přiletován k cívce. Sestava pístnice byla smontována s tlumičem, naplněna MR kapalinou a tlumič byl natlakován na provozní tlak 30 barů. Kompletní MR tlumič byl namontován do experimentálního vozíku, viz obr. 4-8.



Obr. 4-7 Úprava kloubové hlavy



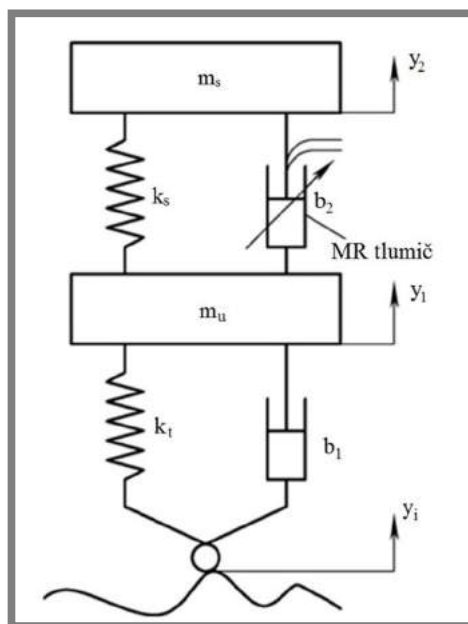
Obr. 4-6 Schéma pístnice
zamontované v kloubové hlavě



Obr. 4-8 MR tlumič po rekonstrukci
vmontovaný v experimentálním vozíku

4.3 Virtuální simulační model

Virtuální simulační model je sestaven jako čtvrtinový model automobilu se dvěma stupni volnosti, viz obr. 4-9.



Obr. 4-9 Čtvrtinový matematický model automobilu [23]

Virtuální simulační model byl vytvořen v softwaru Matlab a základem jsou Newtonovy pohybové rovnice:

$$a_{1(i+1)} = \frac{F_{k1} - b_1(v_{1(i)} - v_{i(i)}) + \frac{F_{d(i)}}{dt} - F_{k2} - m_{us} \cdot g}{m_u} \quad (22)$$

$$v_{1(i+1)} = v_{1(i)} + a_{1(i+1)} \cdot T \quad (23)$$

$$y_{1(i+1)} = y_{1(i)} + v_{1(i+1)} \cdot T \quad (24)$$

$$a_{2(i+1)} = \frac{F_{k2} - \frac{F_{d(i)}}{dt} - m_{2s} \cdot g}{m_2} \quad (25)$$

$$v_{2(i+1)} = v_{2(i)} + a_{2(i+1)} \cdot T \quad (26)$$

$$y_{2(i+1)} = y_{2(i)} + v_{2(i+1)} \cdot T \quad (27)$$

$$F_{k1} = k_t(y_{i(i)} - y_{1(i)}) \quad (28)$$

$$\text{jen pokud je splněna podmínka: } (y_{i(i)} - y_{1(i)}) > 0 \text{ pokud ne } F_{k1} = 0 \quad (29)$$

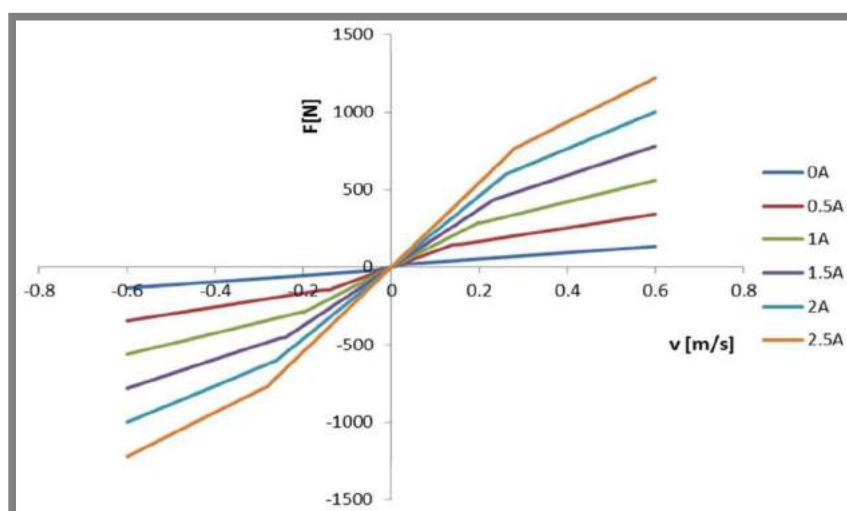
$$F_{k2} = k_s(y_{1(i)} - y_{2(i)}) \quad (30)$$

$$\text{jen pokud je splněna podmínka: } (y_{1(i)} - y_{2(i)}) > 0 \text{ pokud ne } F_{k2} = 0 \quad (31)$$

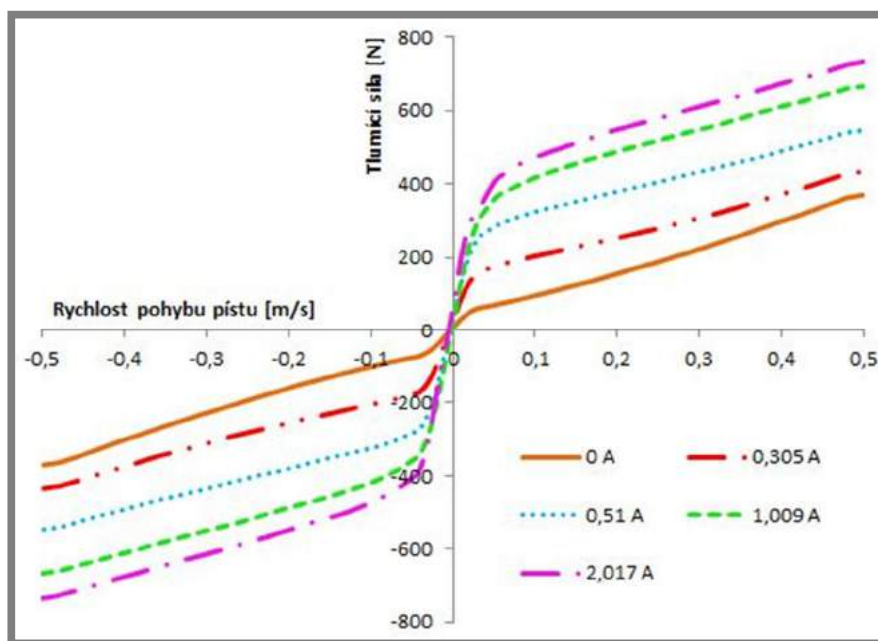
Kde:

a_1	zrychlení neodpružené hmoty
a_2	zrychlení odpružené hmoty
v_1	rychlost neodpružené hmoty
v_2	rychlost odpružené hmoty
v_i	rychlost bodu kontaktu pneumatiky s vozovkou
y_1	poloha neodpružené hmoty
y_2	poloha odpružené hmoty
y_i	poloha bodu kontaktu pneumatiky s vozovkou
m_{us}	redukovaná hmotnost neodpružené hmoty
m_{ss}	redukovaná hmotnost odpružené hmoty
m_u	hmotnost neodpružené hmoty
m_s	hmotnost odpružené hmoty
T	vzorkovací perioda
dl	koeficient přepákování
g	gravitační zrychlení
k_t	tuhost pneumatiky
k_s	tuhost pružin
F_d	tlumící síla

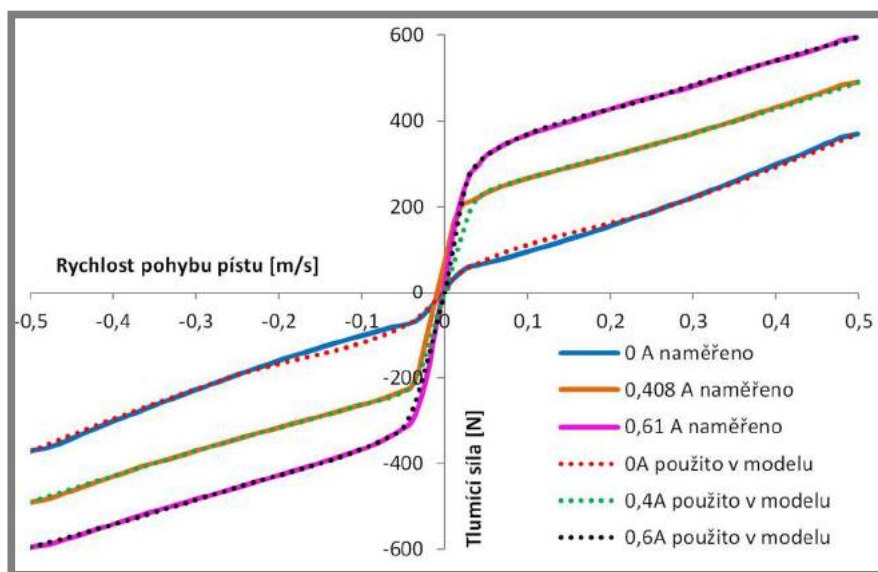
Tlumící síla F_d je polynomickým modelem, je tedy určována z F-v charakteristik podle momentální relativní rychlosti. Řídící algoritmus přepíná principem on/off z jedné křivky F-v charakteristiky na druhou, vždy mezi dvěma. Jedna je pro nižší proud (I_L) a stav s nižším koeficientem tlumení a druhá pro vyšší proud (I_H) a stav s vyšším koeficientem tlumení. Dříve byly ve virtuálním simulačním modelu použity F-v charakteristiky zjednodušené. Byly složeny ze tří lineárních částí, viz obr. 4-10. Nový upravený model uvažuje reálné F-v charakteristiky, aby bylo dosaženo přesnějších simulačních výsledků. Každá křivka F-v charakteristik je zadána pomocí devíti bodů a následně proložena kubickým splinem. Použité F-v charakteristiky jsou zobrazeny na obr. 4-11, detailnější obrázek je umístěn v přílohách této práce. Srovnání vybraných F-v charakteristik použitých v modelu s naměřenými je znázorněno na obr. 4-12.



Obr. 4-10 Křivky F-v charakteristik použité v minulosti pro simulace [2]



Obr. 4-11 Vybrané křivky F-v charakteristik naměřené pro MR kapalinu MR130



Obr. 4-12 Srovnání modelových a naměřených F-v charakteristik pro MR kapalinu MR130

4.4 Ověření virtuálního simulačního modelu

4.4

Aby bylo možné výsledky ze simulačního modelu považovat za správné, je třeba model ověřit. Byl tedy zkoumán vliv následujících vstupních parametrů:

- Proud tekoucí do cívky tlumiče
- Rychlost kola vůči vozovce

Pro tento účel bylo provedeno úvodní měření, které bylo následně porovnáno s virtuálním simulačním modelem. Byly tedy vybrány následné varianty kalibračního měření:

- Pasivní režimy
- Pasivní režimy s různou rychlostí kola vůči vozovce

4.4.1 Pasivní režimy

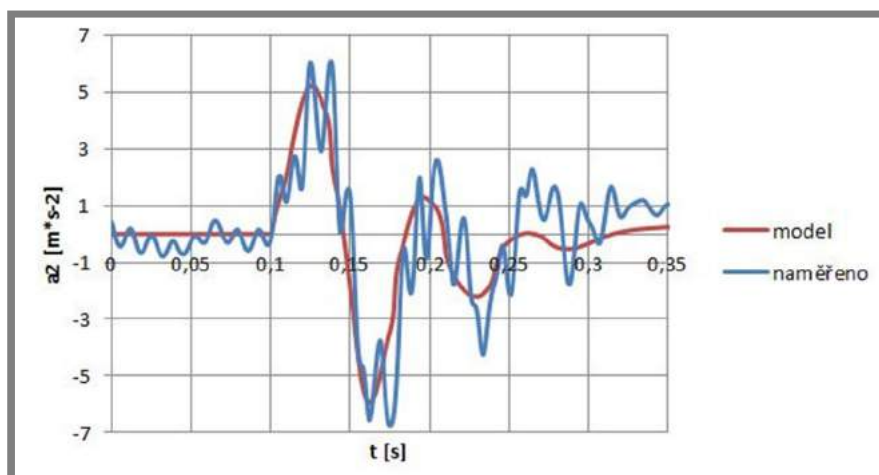
Bylo provedeno porovnání výsledků virtuálního simulačního modelu s měřením a to následujících veličin:

- Zrychlení odpružené hmoty a_1
- Zrychlení neodpružené hmoty a_2
- Přítlačná síla kola na vozovku F_r
- Závislost jízdní bezpečnosti na komfortu jízdy

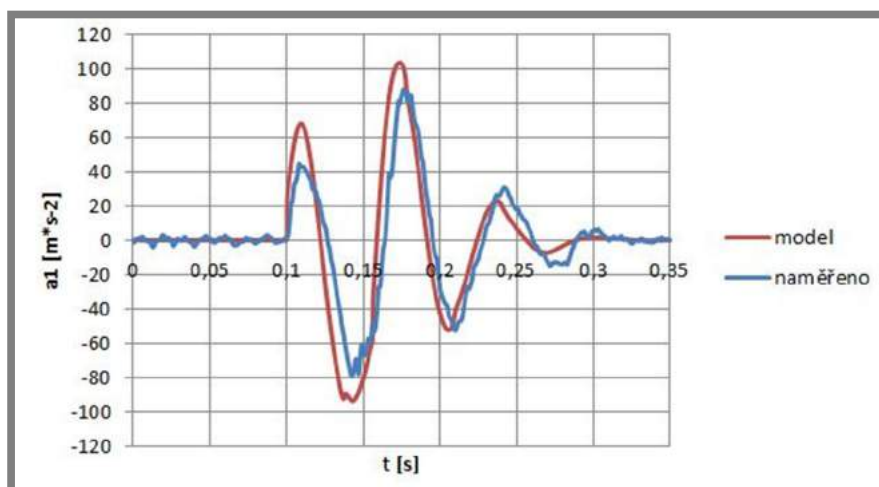
Porovnání průběhů pasivních režimů zmíněných veličin bylo provedeno pro následující vstupní parametry:

- Proud v cínce tlumiče [A] – 0 - 0,6; 0,8; 1,2; 1,8 a 2
- Rychlost kola vůči vozovce – 10 km/h
- Tlak v pneumatice – 2,5 baru
- Tlumič naplněn MR kapalinou MR 130

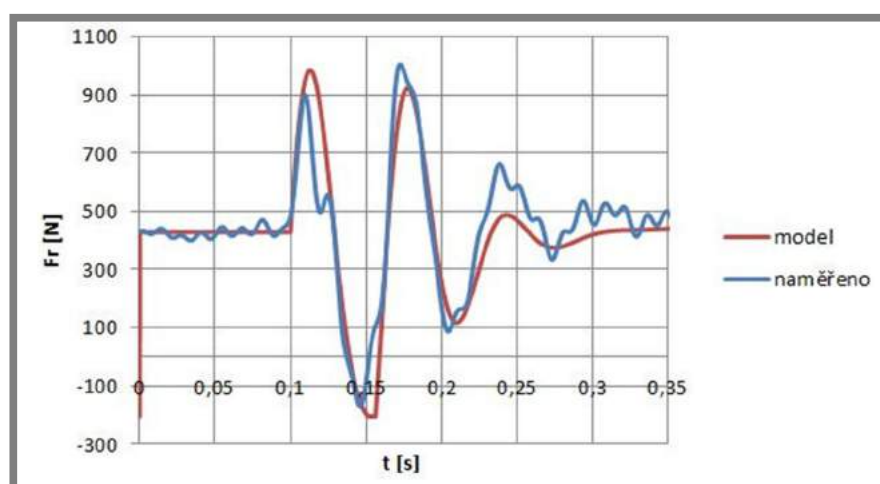
Na obr. 4-13 – 4-17 jsou znázorněny vybrané výsledky ze simulačního modelu porovnány s měřením. Srovnání ostatních variant je umístěno v přílohách této práce.



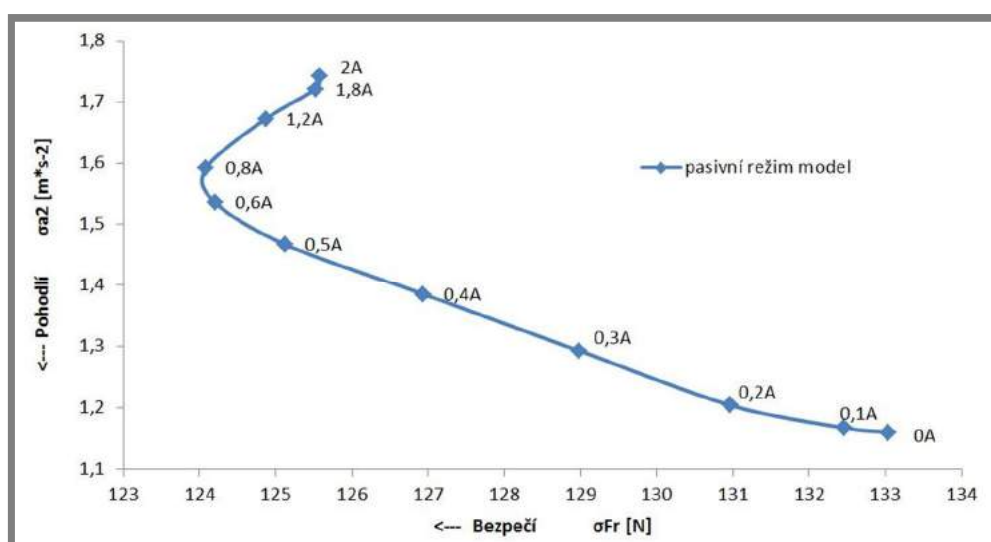
Obr. 4-13 Průběh zrychlení neodpružené hmoty, pasivní režim, proud 0A



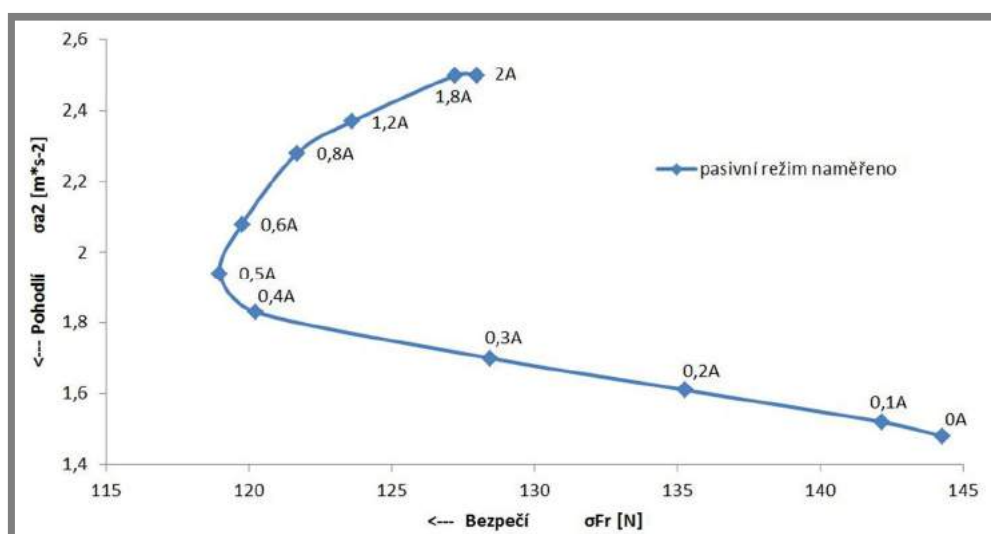
Obr. 4-14 Průběhy zrychlení odpružené hmoty, pasivní režim, proud 0A



Obr. 4-15 Průběhy přítláčné síly kola na vozovku, pasivní režim, proud 0A



Obr. 4-16 Závislost jízdní bezpečnosti na komfortu jízdy – pasivní režimy – virtuální simulační model



Obr. 4-17 Závislost jízdní bezpečnosti na komfortu jízdy – pasivní režimy – měření

Z grafických průběhů veličin a_1 , a_2 , F_r je vidět, že virtuální simulační model velice věrohodně napodobuje realitu. U grafických závislostí jízdní bezpečnosti na komfortu jízdy jsou trendy křivek velmi podobné. Z uvedených srovnaných grafických závislostí lze tedy soudit, že simulační model počítá pro pasivní režimy důvěryhodné výsledky.

4.4.2 Pasivní režimy s různou rychlostí kola vůči vozovce

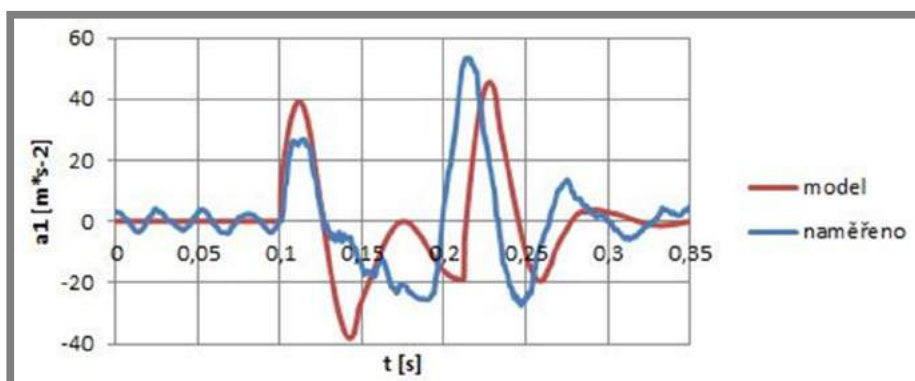
Bylo provedeno porovnání výsledků z virtuálního simulačního modelu s měřením a to následujících veličin:

- Zrychlení odpružené hmoty a_1
- Zrychlení neodpružené hmoty a_2
- Přítlačná síla kola na vozovku F_r

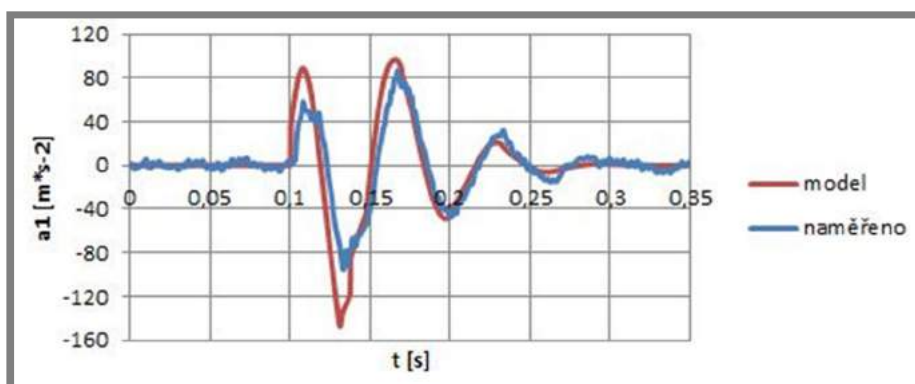
Porovnání průběhů pasivních režimů při různých rychlostech kola vůči vozovce zmíněných veličin bylo provedeno pro následující vstupní parametry:

- Proud v cívce tlumiče – 0 A
- Rychlost kola vůči vozovce [km/h] – 5, 10, 15, 20
- Tlak v pneumatice 2,5 baru
- Tlumič naplněn MR kapalinou MR 130

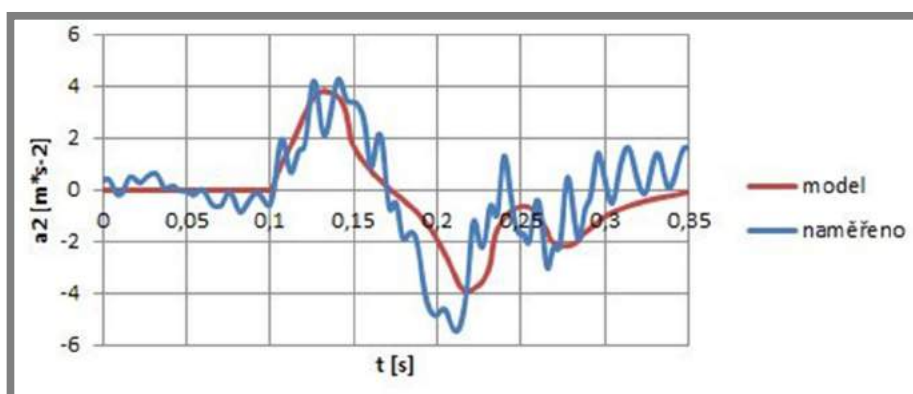
Na obr. 4-18 – 4-23 jsou znázorněny některé výsledky ze simulačního modelu porovnány s měřením. Srovnání ostatních variant je umístěno v přílohách této práce.



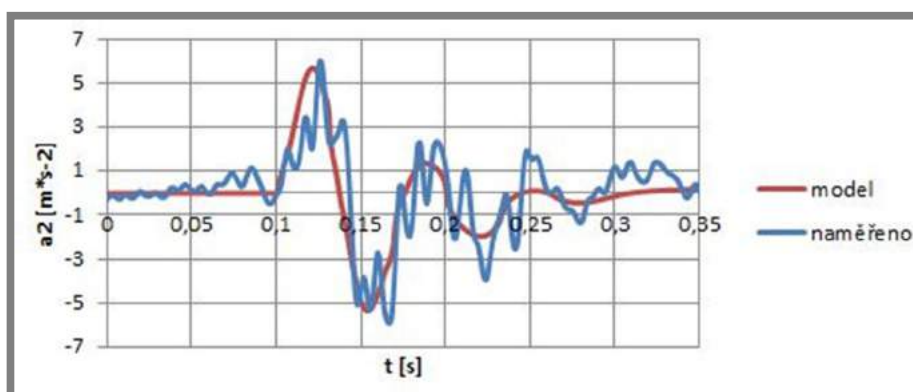
Obr. 4-18 Průběhy zrychlení neodpružené hmoty, pasivní režim 0 A, rychlost 5 km/h



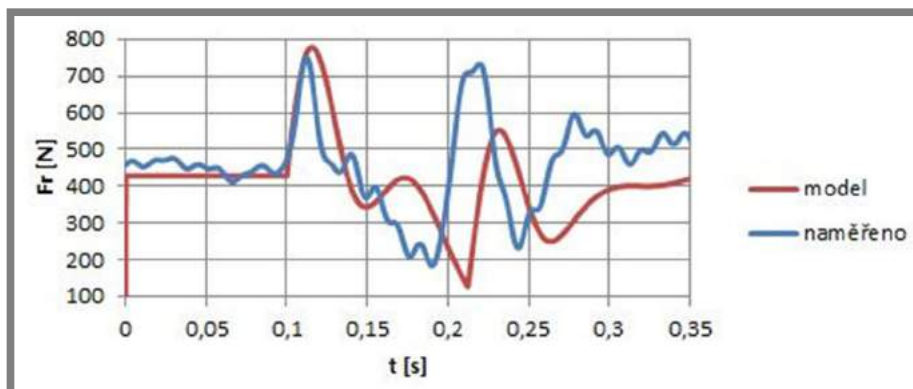
Obr. 4-19 Průběhy zrychlení neodpružené hmoty, pasivní režim 0 A, rychlost 15 km/h



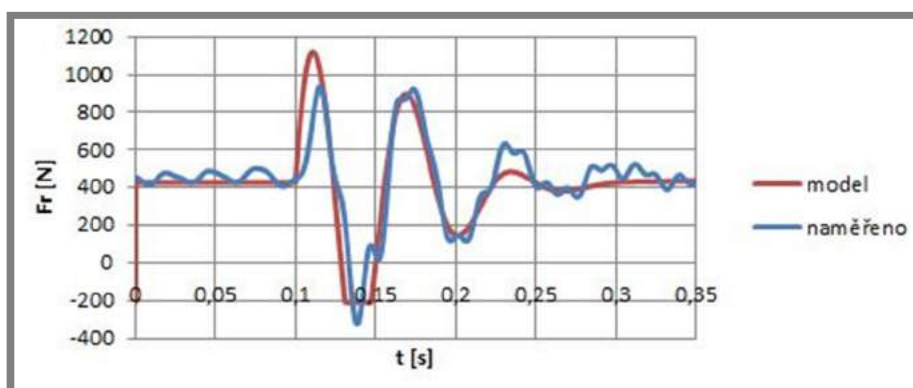
Obr. 4-20 Průběhy zrychlení odpružené hmoty, pasivní režim 0 A, rychlost 5 km/h



Obr. 4-21 Průběhy zrychlení odpružené hmoty, pasivní režim 0 A, rychlost 15 km/h



Obr. 4-22 Průběhy přítláčné síly, pasivní režim 0 A, rychlost 5 km/h



Obr. 4-23 Průběhy přítláčné síly, pasivní režim 0 A, rychlost 15 km/h

Na uvedených průbězích je vidět, že pro rychlosti větší než 10 km/h jsou průběhy věrohodně kopírující jak ve velikosti amplitudy, tak i v periodě kmitů. Naopak pro rychlost menší než 10 km/h velikosti amplitud poměrně souhlasí, ale periody kmitů jsou rozdílné. Tento nesoulad může být způsoben značně zjednodušeným modelem pneumatiky. Ve virtuálním simulačním modelu je pneumatika definována jako lineární pružina, která nemůže táhnout (případ kdy se kolo odlepí od vozovky), avšak ve skutečnosti tomu tak není.

4.5 Simulace ve virtuálním modelu

Aby bylo nalezeno optimální nastavení MR tlumiče, je vhodné toto nastavení hledat nejdříve v simulacích a poté ho pouze experimentálně ověřit. Je to podstatně méně časově náročné.

Pro veškeré simulace i měření semiaktivně řízených režimů byl vybrán za nejvhodnější řídicí algoritmus modifikovaný Groundhook. Pro řízení MR tlumiče jakýmkoli řídicím algoritmem je zapotřebí snímat potřebné veličiny k řízení z experimentálního zařízení pomocí senzorů. Pro modifikovaný Groundhook jsou to veličiny:

- Zrychlení neodpružené hmoty a_1
- Relativní rychlost mezi odpruženou a neodpruženou hmotou $v_2 - v_1$

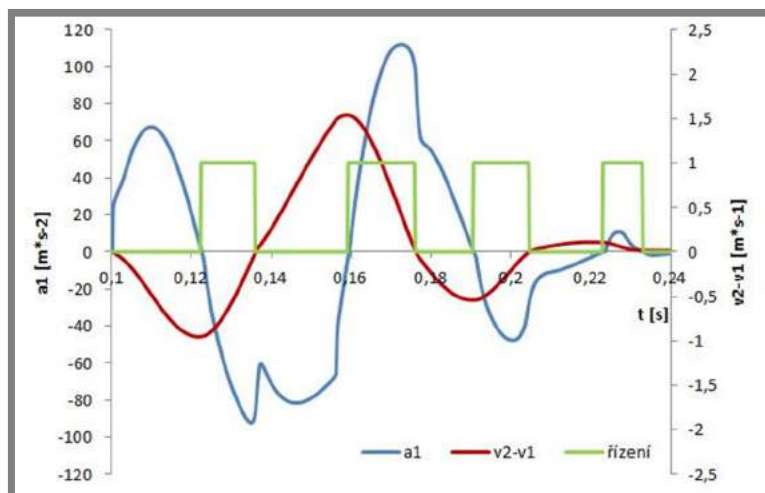
Z experimentálního zařízení lze zmíněné veličiny získat jednoduše a v poměrně dobré kvalitě signálu. Zrychlení neodpružené hmoty a_1 je měřeno přímo ze senzoru a relativní rychlost $v_2 - v_1$ je získávána derivací signálu ze snímače zdvihu tlumiče. Pro ostatní zmíněné semiaktivní algoritmy řízení MR tlumiče v řešeršní části práce by byly potřebné veličiny k řízení podstatně složitěji získatelné, nebo by byly signály ze senzorů příliš zarušené.

Detailnější princip semiaktivního algoritmu řízení modifikovaný Groundhook bude popsán v následující podkapitole.

4.5.1 Princip semiaktivního algoritmu modifikovaný Groundhook

Princip i rovnice byly nastíněny již v kapitole 2.5.3 řešeršní části práce. Rovnice určují pravidla, kdy má být MR tlumič ve stavu s vysokým koeficientem tlumení b_{max} a kdy ve stavu s nízkým koeficientem tlumení b_{min} . Tyto pravidla jsou graficky znázorněna na obr. 4-24, kde modrá křivka popisuje průběh zrychlení neodpružené hmoty (a_1), červená křivka relativní rychlost odpružené hmoty vůči neodpružené ($v_2 - v_1$) a zelená křivka znázorňuje spínání proudu do cívky tlumiče, resp. okamžiky, kdy bude MR tlumič ve stavu s vysokým koeficientem tlumení b_{max} a kdy ve stavu s nízkým koeficientem tlumení b_{min} . Obr. 4-24 ukazuje ideální řídicí signál a vyhodnocuje ideálně rovné průběhy zrychlení neodpružené hmoty a_1 a relativní rychlosti $v_2 - v_1$, proud je spínán v ideálních okamžicích. Pokud je algoritmus použit na reálném experimentu, signály, na kterých vyhodnocování závisí, jsou zarušené a nerovné. Tyto signály musí být filtrovány a pomocí rovnic musí být definovány meze pro zrychlení neodpružené hmoty a_1 a relativní rychlost $v_2 - v_1$, které upravují citlivost řídicího algoritmu na šum a posunují ideální okamžiky pro sepnutí proudu do cívky MR tlumiče. Stav s vysokým koeficientem tlumení tedy nastane tehdy když:

$$\left(a_1 > 6 \frac{m}{s^2} \wedge (v_2 - v_1) > 10 \frac{m}{s}\right) \vee \left(a_1 < 6 \frac{m}{s^2} \wedge (v_2 - v_1) < 10 \frac{m}{s}\right) \quad (32)$$

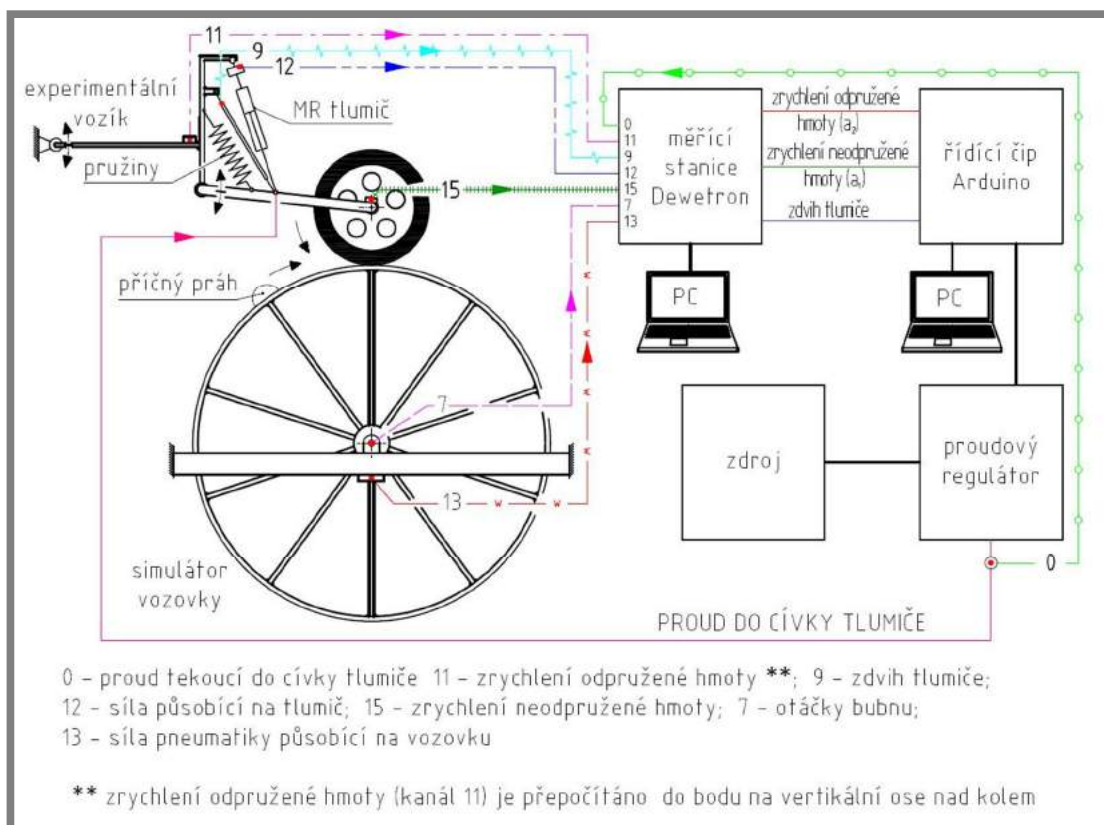


Obr. 4-24 Spínání proudu do cívky tlumiče pro modifikovaný Groundhook

4.6 Experiment

4.6.1 Měřicí aparatura

Měření bude provedeno na experimentálním vozíku v laboratoři Ústavu konstruování. Schéma, které popisuje kompletní měřící aparaturu, je vidět na obr. 4-25. Zvětšené schéma je umístěno v přílohách k této práci.



Obr. 4-25 Schéma měřící aparatury

Obr. 4-25 znázorňuje schéma zapojení snímačů na experimentálním vozíku. Čísla na obrázku, kterými jsou popsány jednotlivé kabely k senzorům, určují číslo kanálu, do

kterého jsou zapojeny v měřicí stanici Dewetron. K měřicí stanici je připojen počítač, který zaznamenává průběhy signálů ze snímačů. Nefiltrované signály (zdvih tlumiče a zrychlení neodpružené hmoty), které jsou nezbytně nutné k řízení MR tlumiče jsou z měřicí stanice posílány dále do řídicí desky Arduino Due. Řídicí program nahráný v Arduino řeší filtraci signálů, výpočet relativní rychlosti ze signálu zdvihu a na základě algoritmu modifikovaný Groundhook ovládá proudový regulátor a regulátor přepíná proud tekoucí do cívky tlumiče. Rychlost regulační smyčky je 2000 Hz. Na obr. 4-32 je fotografie experimentálního vozíku i s veškerým měřicím příslušenstvím.

Pro samotné řízení MR tlumiče je potřebný pouze snímač zrychlení neodpružené hmoty a_I a odporový snímač zdvihu tlumiče, ze kterého se následně v reálném čase počítá relativní rychlost v_2-v_I viz kapitola níže 4.6.4

Tab. 4-26 níže poskytuje přehled o zapojení a umístění senzorů na experimentálním vozíku a odkazuje na obrázky, kde jsou senzory zdokumentovány fotografiemi.

Tab. 4-26 Zapojení a umístění senzorů

Snímač	Poloha senzoru	Kanál č.	Obrázek č.
Zrychlení odpružené hmoty a_2 (akcelerometr)	Rám odpružené hmoty	11	4-29
Zrychlení neodpružené hmoty a_I (akcelerometr)	Osa kola	15	4-28
Zdvih tlumiče (odporový snímač posunutí)	Mezi rámem odpružené a neodpružené hmoty	9	4-27
Přítlačná síla kola na vozovku F_r (tenzomert)	Rám simulátoru vozovky	13	-
Tlumící síla F_t (siloměr)	Mezi rámem odpružené hmoty a MR tlumičem	12	4-31
Rychlost jízdy (otáčkoměr)	Osa simulátoru vozovky	7	
Proud tekoucí do MR tlumiče (proudové kleště)	Na kabelu napájecím MR tlumič	0	4-30



Obr. 4-29 Akcelerometr zrychlení odpružené hmoty



Obr. 4-28 Akcelerometr neodpružené hmoty



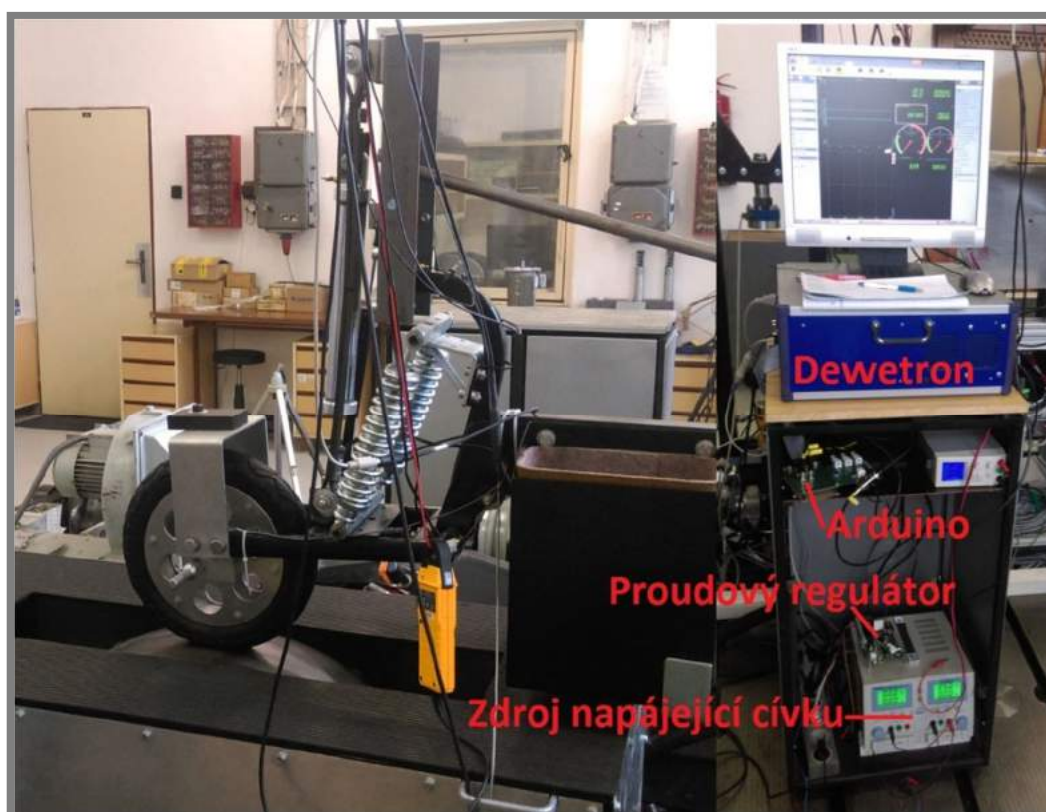
Obr. 4-27 Odporový snímač posunutí, zdvih tlumiče



Obr. 4-31 Siloměr měřící tlumičí sílu



Obr. 4-30 Proudové kleště měřící proud tekoucí do cívky tlumiče



Obr. 4-32 Experimentální vozík s připojenou aparaturou

4.6.2 Varianty měření

Varianty měření byly provedeny pro dvě MR kapaliny, a to pro:

- MR kapalinu MR 130
- MR kapalinu MRF 140 CG

Dále pro každou MR kapalinu byly provedeny následné varianty měření:

- Pasivní režimy pro proudy 0 – 2 A
- Semiaktivně řízené režimy modifikovaným Groundhookem – měření pro několik variant filtrů a mezí definovaných v řídicí desce

Všechny provedené varianty měření jsou uvedeny v Tab. 5-1 níže v kapitole 5.

4.6.3 Metodika měření

Aby byly výsledky relevantní, musí být dodržena určitá pravidla, podle kterých bude postupováno u všech měření stejně. Postup byl tedy před každou sérií měření následující:

- Kalibrace a nastavení všech používaných snímačů
- Dohuštění pneumatiky – je třeba pneumatiku před odpojením manometru nahustit o 0,1 baru více, aby po odpojení manometru v pneumatice zůstal požadovaný tlak 2,5 baru (experimentálně ověřeno)
- Dotlakování MR tlumiče na 30 barů

Před každým jednotlivým měřením v sérii byl postup následující:

- Měření teploty v MR tlumiči – do cívky tlumiče je puštěn proud 1A – s teplotou se mění elektrický odpor a z odporu lze zpětně spočítat teplota
- Provedení měření
- Zápis podmínek měření do knihy měření (teplota, tlak v pneumatice, tlak v tlumiči, I_L/I_H , σ_{Fr} , σ_{a2} , název souboru s měřením, rychlost kola vůči vozovce, řídicí algoritmus)

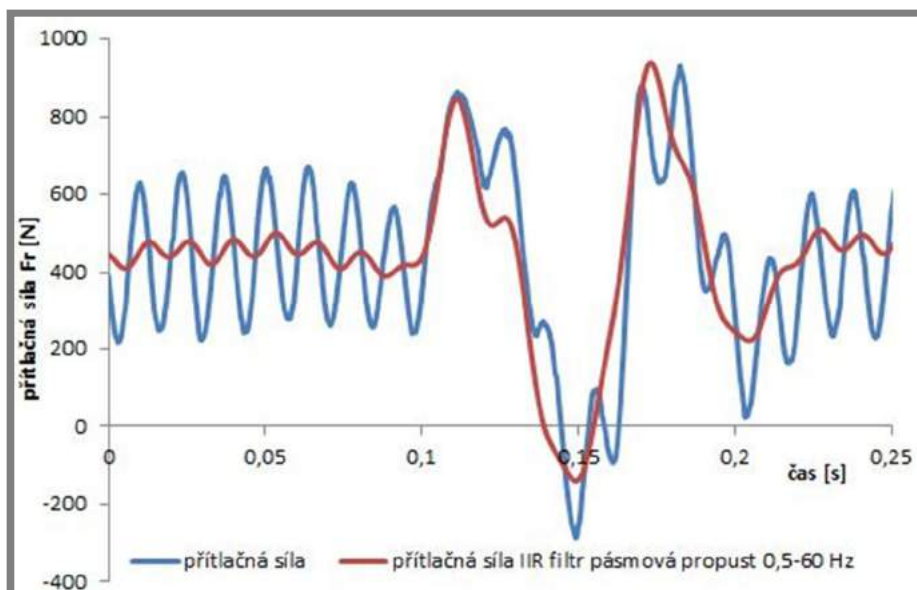
4.6.4 Metodika úpravy dat v průběhu měření

Při experimentu byla data zaznamenávána pomocí programu DEWESoft. Každé konkrétní měření trvalo 20s. Byly zaznamenávány veličiny ze zapojených senzorů, viz kapitola 4.6.1 a navíc byly zavedeny doplňující matematické kanály a filtry pro následující postprocessing. Signály z některých senzorů jsou značně zarušené a nelze je přímo použít. Přehled použitých filtrů potřebných k řízení a vyhodnocení modifikovaným Groundhookem je uveden v tab. 4-33

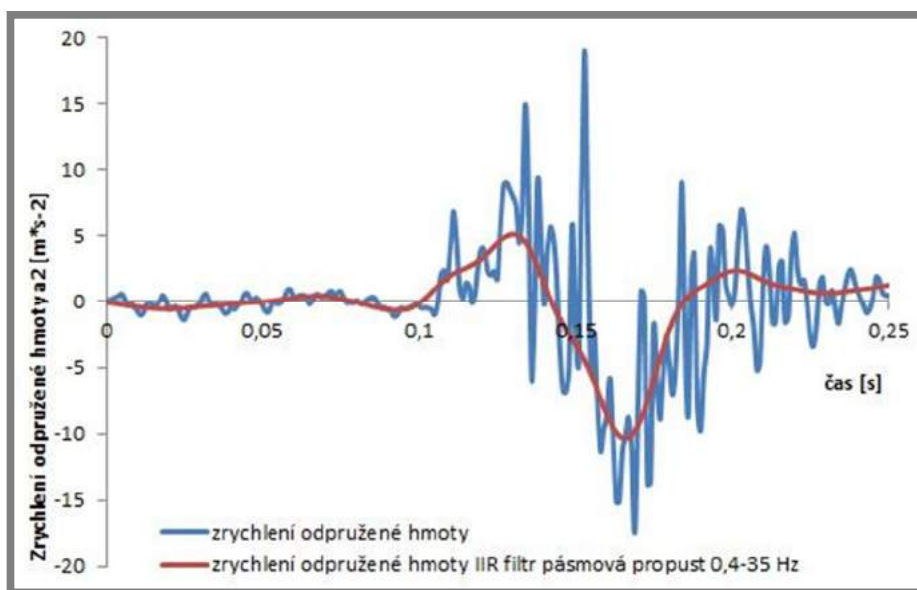
Tab. 4-33 Přehled filtrů potřebných pro řízení modifikovaným Groundhookem

Filtrovaný signál z	Použitý filtr	Výstup
Akcelerometru odpružené hmoty	IIR filtr pásmová propust 0,4 – 35 Hz	a_2
Tenzometru na rámu simulátoru vozovky	IIR filtr pásmová propust 0,5 – 60 Hz	F_r
Odporového snímače posunutí	IIR filtr $\frac{d}{d_t}$	v_2-v_1
Relativní rychlost	FIR filtr dolní propust na 100 Hz	v_2-v_1 vyhlazená

Na obr. 4-34 je znázorněno porovnání filtrovaného a nefiltrovaného signálu přítlačné síly na vozovku F_r . Je vidět, že veškeré podstatné informace signálu byly zachovány. Na obr. 4-35 je znázorněna filtrace zrychlení neodpružené hmoty a_1 . Taktéž je vidět, že filtrovaný signál nese veškeré podstatné informace původního signálu.



Obr. 4-34 Kontrola IIR filtru pásmová propust 0,5-60 Hz na signálu přítlačné síly kola na vozovku



Obr. 4-35 Kontrola IIR filtru pásmová propust 0,4-35 Hz na signálu zrychlení odpružené hmoty

4.7 Vyhodnocení experimentu

4.7

Aby bylo celé měření smysluplné a byly relevantní a porovnatelné s výsledky z jiných měření, musí být stanoveno kritérium, podle kterého budou všechna měření porovnávána. Pro celou práci byla stanovena dvě kritéria:

- Vyhodnocení dle jízdní bezpečnosti (σ_{Fr}) – pro tuto práci prioritní
- Vyhodnocení dle jízdního komfortu (σ_{a2})

4.7.1 Vyhodnocení experimentu dle jízdní bezpečnosti a komfortu jízdy

Závislost jízdní bezpečnosti na komfortu jízdy se nazývá kvalitou odpružení. Pokud je F_r stabilní (odvalující se pneumatika po vozovce má stálý styk s vozovkou), pak je vozidlo dobře ovladatelné, tedy poskytuje dobrou bezpečnost jízdy. Tento stav je však protichůdný druhému kritériu. Ve většině případů kdy je zlepšena bezpečnost jízdy, je snížen komfort jízdy. Komfort představují vibrace karoserie. Stabilita přitlaku kola je dána směrodatnou odchylkou přitlačné síly kola na vozovku (σ_{FR}) a velikost vibrací je určena směrodatnou odchylkou zrychlení odpružené hmoty (σ_{a2}). Matematicky jsou tyto směrodatné odchylky vyjádřeny v rovnicích 33 a 34.

$$\sigma_{a_2} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_{2i}^2} \quad (32)$$

$$\sigma_{F_r} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_i - F_{stat})^2} \quad (34)$$

Při měření se povětšinou hledá kompromis mezi těmito dvěma protichůdnými kritérii. V této práci, neboť jde o testování sportovního odpružení, je kladen důraz hlavně na bezpečnost, neboli ovladatelnost vozidla a komfort jízdy jde stranou.

5 VÝSLEDKY

V tab. 5-1 jsou vypsány všechna provedená měření včetně měření pro ověření virtuálního simulačního modelu.

Obr. 5-1 Tabulka měření

MR kapalina	Řídící algoritmus	Proud [A]	Rychlost [km/h]	Tlak v pneu/ v tlumiči [bar]	Meze řízení a ₁ [ms ⁻²] dv[mms ⁻¹]	σ _{Fr} /σ _{a2}	
Měření 16.10.2015							
MR-130	Pasiv	0	10	2,5/30	-	144,3/1,48	
		0,1				142,2/1,52	
		0,2				135,3/1,61	
		0,3				128,5/1,70	
		0,4				120,3/1,83	
		0,5				119,0/1,94	
		0,6				119,76/2,08	
		0,8				121,7/2,28	
		1,2				123,6/2,37	
		1,8				127,2/2,50	
		2				128,0/2,50	
		0				5	-
		0				15	-
		0				20	-
	Groundhook mod.	0/1	10		a ₁ ±10; dv±6	123,5/1,68	
		0,3/1				117,4/1,86	
		0/2				120,0/1,76	
		0,1/2				119,5/1,78	
		0,2/2				117,7/1,83	
		0,3/2				115,6/1,91	
		0,4/2				116,1/2,02	
		0,5/2				117,1/2,13	
		0,6/2				119,4/2,21	
		0,8/2				121,7/2,31	
		0/1,2				122,9/1,71	
		0/0,8				125,6/1,68	
		0/0,6				131,1/1,61	
		0/0,5				134,8/1,57	

MR-130	Groundhook mod.	0/0,4	10	2,5/30	a ₁ ±10; d _v ±6	138,7/1,53
		0/0,3				143,7/1,48
	Pasiv	0		2/30	-	123,0/1,33
		0,5				96,6/1,81
		1				-
	Ground.mod	0,3/1		3/30	a ₁ ±10; d _v ±6	95,2/1,84
	Pasiv	0			-	171,2/1,63
		0,6				134,2/2,34
		1				-
	Ground.mod	0,3/1			a ₁ ±10; d _v ±6	134,4/2,35
Měření 10.12.2015						
MR-130	Pasiv	0	10	2,5/30	-	138,2/1,47
		0,1				141,8/1,49
		0,2				135,9/1,57
		0,3				121,3/1,74
		0,4				120,0/1,74
		0,5				119,9/2,08
		0,8				118,8/2,16
		1				123,4/2,32
		1,2				125,6/2,41
	Groundhook mod.	0,3/1			a ₁ ±5; d _v ±30	114,6/1,91
		0,3/1			a ₁ ±5; d _v ±60	114,4/1,91
		0,3/1			a ₁ ±3; d _v ±50	114,6/1,93
		0,3/1				117,7/1,75
		0/1				113,7/1,98
		0,3/2				115,3/2,11
		0,4/2				
		Skyhook			0/0,5	-
Měření 1.2.2016						
MRF-140CG	Pasiv	0	10	2,5/30	a ₁ ±3; d _v ±50	112,3/1,89
		0,1				115,2/2,02
		0,2				121,3/2,29
		0,3				147,6/3,02
		0,4				155,1/3,23
		0,5				162,6/3,40
		0,6				165,4/3,47
		0,7				167,5/3,54

MRF-140CG	Pasiv	0,8	10	2,5/30	$a_1 \pm 3$; $d_v \pm 50$	169,9/3,57
		0,9				171,2/3,61
		1				173,0/3,66
	Groundhook mod.	0/0,2				110,9/1,95
		0/0,3				110,2/2,06
		0/0,4				109,8/2,11
		0/0,5				110,22/2,18
		0/0,6				110,9/2,20
		0/1				111,3/2,33
		0,1/1				126,1/2,62
		0,1/0,4				112,7/1,90
		0,2/0,4				112,25/1,89

Mezi prvním a druhým měřením byl experimentální vozík částečně rozmontován a poté opět složen, proto také byly znovu měřeny pasivní režimy, aby bylo možné ověřit, že měření probíhá za stejných podmínek jak předešlé. Ověření (porovnání pasivních režimů z první a druhé části) je přiloženo do příloh této práce. Druhý blok měření rozvíjí optimální nastavení určené z výsledků simulací. Jedná se konkrétně o úpravu řídicího algoritmu, aby algoritmus přepínal mezi stavy s nízkým a vysokým koeficientem tlumení správně. V algoritmu jsou upravovány filtry pro a_1 a v_2-v_1 . Tyto filtry určují citlivost algoritmu na zarušenost signálu. Pokud by tyto filtry nebyly v algoritmu definovány vůbec, řídicí algoritmus by reagoval na každý sebemenší výkmit signálu.

V této kapitole bude popsáno:

- Vyhodnocení vlivu přesnosti tlaku v pneumatice
- Nalezení optimálního nastavení rychlého MR tlumiče pro danou F-v charakteristik (MR kapalinu) MR tlumiče pomocí virtuálního simulačního modelu
- Úprava řídicího algoritmu, aby fungoval správně
- Experimentální ověření nalezeného optimálního nastavení

5.1 Vyhodnocení vlivu tlaku v pneumatice při měření

5.1

Na počátku měření je třeba zjistit jak velký vliv má přesnost nahuštění pneumatiky při měření na výsledky. Dosud tuto studii na tomto experimentálním zařízení nikdo neprovedl. V kapitole 4.6.3 je popsána metodika huštění pneumatiky. Při experimentu lze tímto postupem dodržet přesnost do 0,1 baru. V této kapitole bude ověřeno, zda je tato přesnost dostačující.

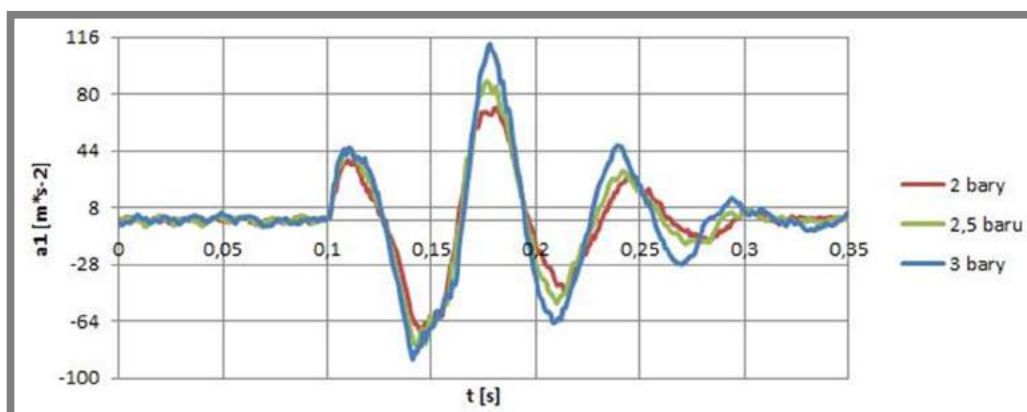
Za tímto účelem bylo provedeno měření a následný rozbor chování následujících veličin:

- Zrychlení odpružené hmoty a_1
- Zrychlení neodpružené hmoty a_2
- Přítlačná síla kola na vozovku F_r

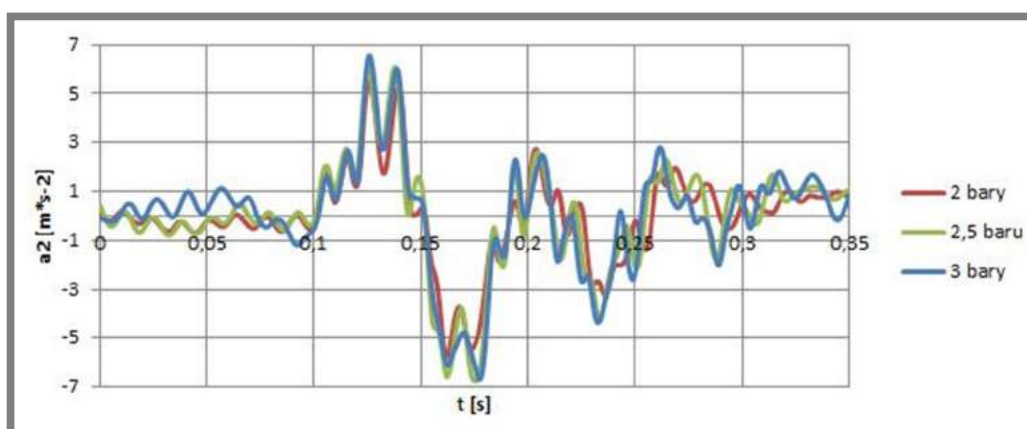
Pro měření byly zvoleny následující vstupní parametry:

- Proud v cívce tlumiče – 0 A
- Rychlost kola vůči vozovce – 10 km/h
- Tlak v pneumatice [bar] – 2; 2,5; 3
- Tlumič naplněn MR kapalinou MR 130

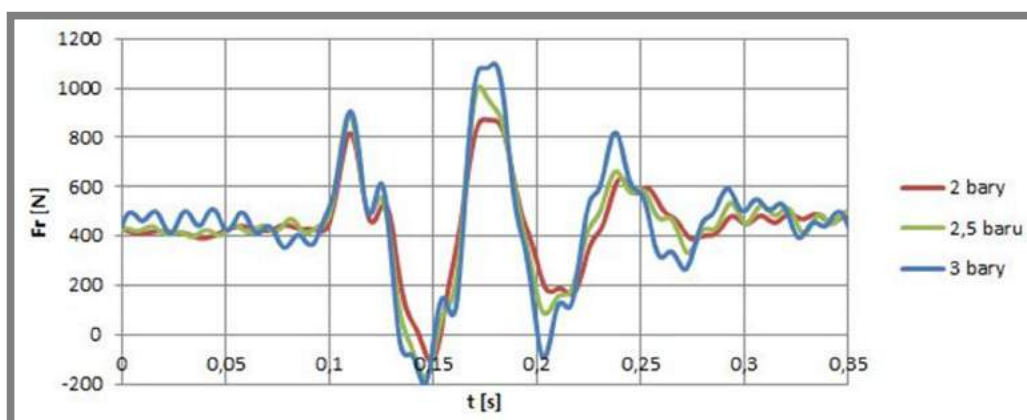
Na obr. 5-2 – 5-4 je znázorněno porovnání vybraných výsledků měření.



Obr. 5-2 Průběhy zrychlení neodpružené hmoty, pasivní režim 0A, tlaky 2, 2,5, 3 bary



Obr. 5-3 Průběhy zrychlení odpružené hmoty, pasivní režim 0A, tlaky 2, 2,5, 3 bary



Obr. 5-4 Průběhy síly mezi kolem a vozovkou, pasivní režim 0A, tlaky 2, 2,5, 3 bary

Z grafických závislostí je možné vidět, že při snižujícím se tlaku v pneumatice mírně klesají výchylky zrychlení neodpružené hmoty (a_1) a to v okamžiku, kdy kolo dopadá zpět na vozovku po přejezdu přes příčný práh. Při pohledu na srovnání zrychlení odpružené hmoty (a_2) je vidět, že změna tlaku v pneumatice nemá na tyto průběhy zcela žádný vliv. V případě průběhu přitlačné síly kola na vozovku (F_r) s rostoucím tlakem také mírně rostou síly taktéž v okamžiku dopadu kola zpět na vozovku po přejezdu překážky. Po zhodnocení těchto výsledků bylo zjištěno, že mírná odchylka tlaku v pneumatice zásadně neovlivňuje výsledky měření.

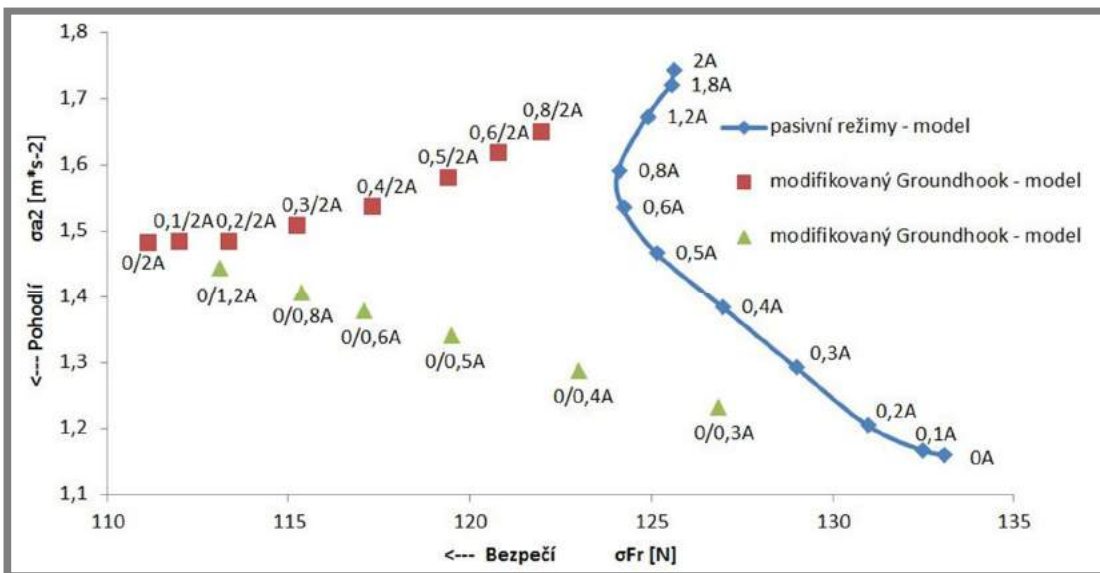
5.2 Nalezení optimálního nastavení rychlého MR tlumiče

5.2

Nejdříve byly vytypovány pro simulaci následné kombinace vstupních parametrů:

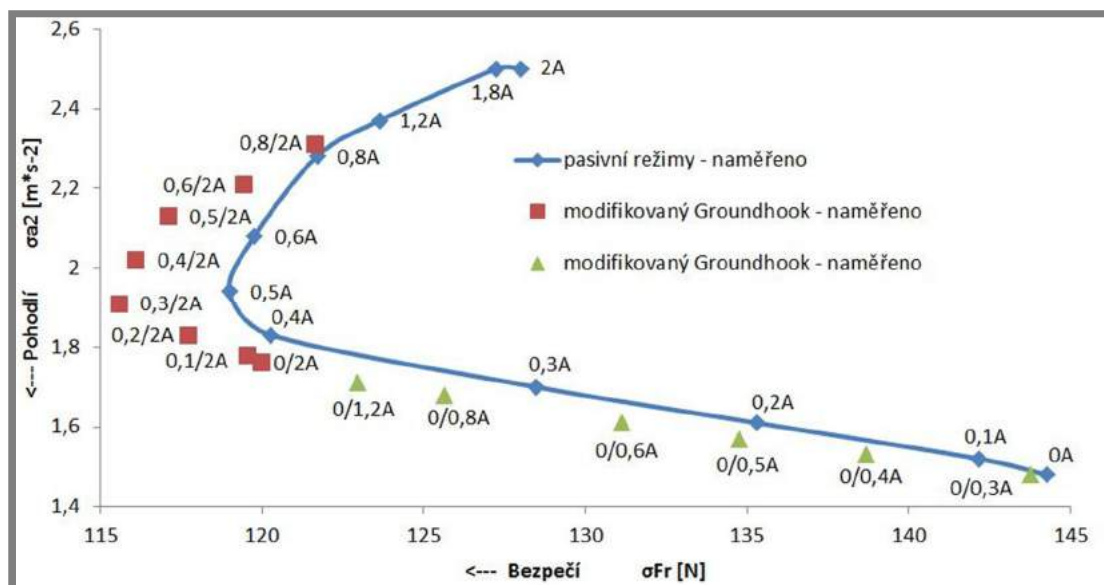
- Proud v cínce tlumiče [A] (I_L/I_H) – 0/0,3; 0/0,4; 0/0,5; 0/0,6; 0/0,8; 0/1; 0/1,2; 0/2; 0,1/2; 0,2/2; 0,3/2; 0,3/1; 0,4/2; 0,5/2; 0,6/2; 0,8/2
- Rychlost kola vůči vozovce 10 km/h
- Tlak v pneumatice 2,5 baru
- Tlumič naplněn MR kapalinou MR 130

Na obr. 5-5 je zobrazena grafická závislost komfortu jízdy na jízdní bezpečnosti výsledků z virtuálního simulačního modelu pro zvolené kombinace výše uvedených vstupních parametrů. Z obrázku je zřejmé, že neoptimálnější nastavení rychlého MR tlumiče řízeného semiaktivním algoritmem modifikovaný Groundhook, je s proudy pro stav s nízkým / vysokým koeficientem tlumení (I_L/I_H) 0/2 A, protože má nejmenší hodnoty σ_{FR} . Pro pasivní režim je neoptimálnější nastavení s proudem 0,8 A.



Obr. 5-5 Závislost jízdní bezpečnosti na komfortu jízdy – semiaktivní režimy řízené modifikovaným Groundhookem – virtuální simulační model

Stejné kombinace vstupních parametrů jako byly použity pro simulace, byly i ověřeny experimentem. Na obr. 5-6 je opět znázorněna grafická závislost komfortu jízdy na jízdní bezpečnosti.

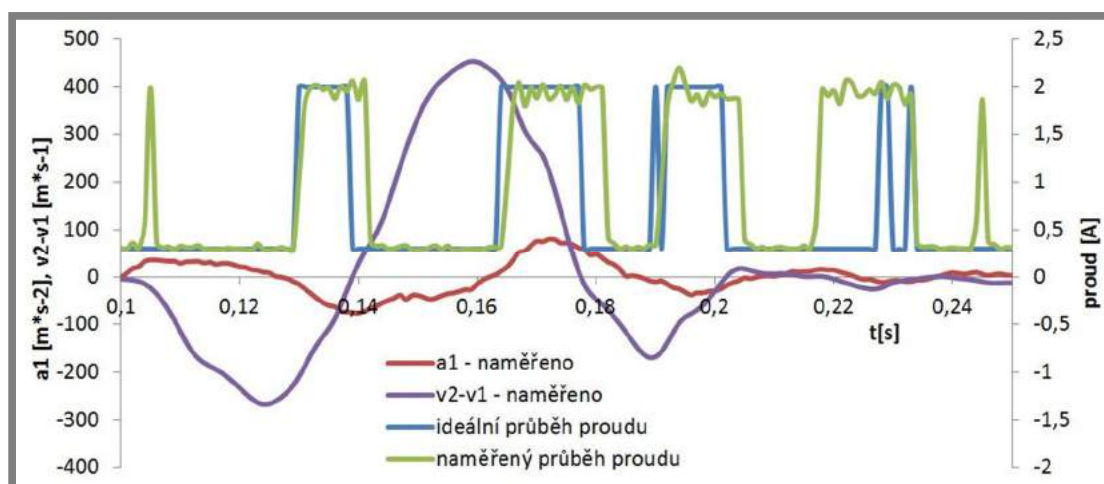


Obr. 5-6 Závislost jízdní bezpečnosti na komfortu jízdy – semiaktivní režimy řízené modifikovaným Groundhookem – měření

Při porovnání grafických závislostí jízdní bezpečnosti na komfortu jízdy pro simulace a experiment jsou zřejmé značné rozdíly. Z experimentu vyplývá, že optimální nastavení rychlého MR tlumiče řízeného semiaktivním algoritmem modifikovaný Groundhook, je s proudy pro stav s nízkým / vysokým koeficientem tlumení (I_L/I_H) 0,3/2 A, protože má nejmenší hodnoty σ_{FR} . Pro pasivní režim je neoptimalnější nastavení pro proud 0,5 A.

5.3 Vyhodnocení funkčnosti řídicího algoritmu modifikovaný Groundhook

Je velmi důležité, aby při řízení MR tlumiče pomocí semiaktivního algoritmu byl proud do tlumiče spínán ve správných okamžicích. Pro názornou ukázkou bylo vybráno jedno z prvních (kalibračních) měření, semiaktivně řízený režim modifikovaný Groundhookem, kde $I_L=0,3$ A a $I_H = 2$ A. Na obr. 5-7 lze vidět vynesené závislosti všech veličin, které přímo souvisí s řízením MR tlumiče, na čase.



Obr. 5-7 Řízení modifikovaného Groundhooku 0,3/2 A

Modrá křivka reprezentuje průběh proudu u ideálního řídicího algoritmu, tzn. kdy má být MR tlumič ve stavu s vysokým koeficientem tlumení a kdy s nízkým koeficientem tlumení. Zelená křivka zobrazuje naměřený průběh proudu tekoucího do MR tlumiče. Fialová křivka je relativní rychlost v_2-v_1 a červená je zrychlení neodpružené hmoty a_1 . V časovém intervalu 0,1 – 0,12 a 0,24 – 0,25 jsou na křivce naměřeného proudu sepnutí do cívky MR tlumiče, které nekorespondují s ideálním průběhem. Je to nesrovnalost v řídicím algoritmu a je třeba ji odstranit. Snímané signály jsou zarušené a je třeba je filtrovat, což způsobuje značnou deformaci signálu. Dále je třeba kvůli šumu v signálu definovat meze pro spínání proudu do cívky tlumiče, a ty posunují ideální okamžiky sepnutí. Byly tedy změněny meze citlivosti filtru i samotné filtry.

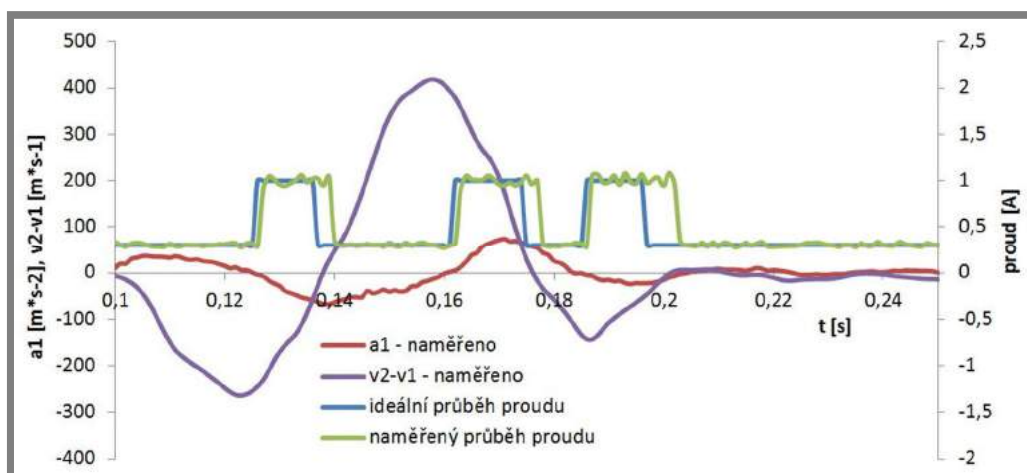
Původní meze a filtry byly definovány takto:

- Původní meze: pro $v_2-v_1 \pm 10$ m/s, pro $a_1 \pm 6$ m/s²
- Původní filtr: IIR filtr 3. řádu dolní propust na 200 Hz

Nové definované filtry a meze byly definovány takto:

- Nové meze: $v_2-v_1 \pm 50$ m/s, pro $a_1 \pm 3$ m/s²
- Nový filtr: IIR filtr 3. řádu dolní propust na 360 MHz

Případ s upravenými filtry v řídicím algoritmu modifikovaný Groundhook je zobrazen na obr. 5-8.



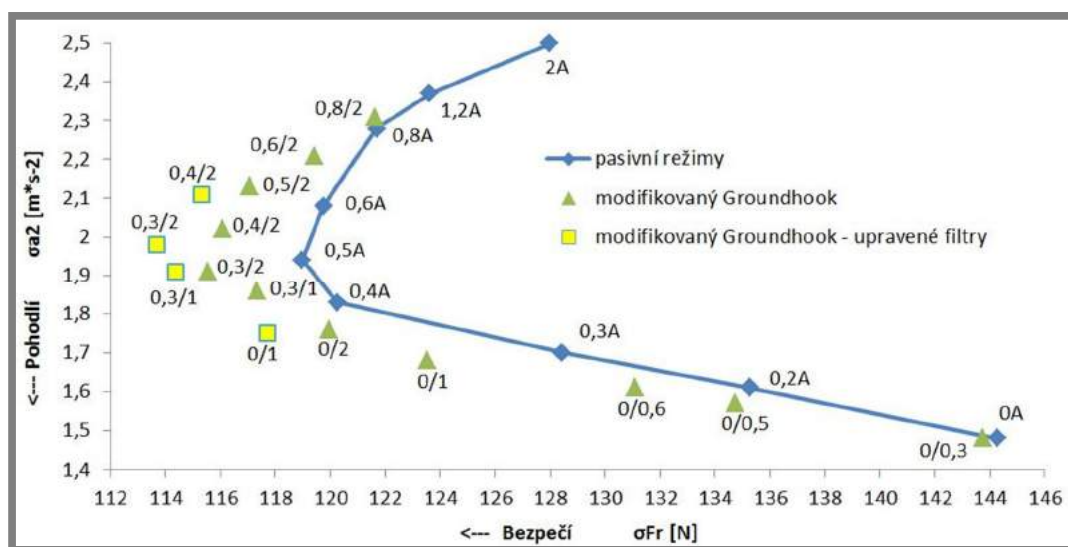
Obr. 5-8 Řízení modifikovaného Groundhooku 0,3/1 A s upravenými mezemi

Z obr. 5-8 je zřejmé, že nedostatky řídicího algoritmu byly odstraněny a proud tedy teče do cívky pouze ve správných okamžicích. Drobná zpoždění v přepínání mezi I_L a I_H jsou způsobeny šumem a filtrací signálu, časovými prodlevami a nepřesností řídicí a měřicí aparatury.

5.4 Experimentální ověření optimálního nastavení MR tlumiče

5.4

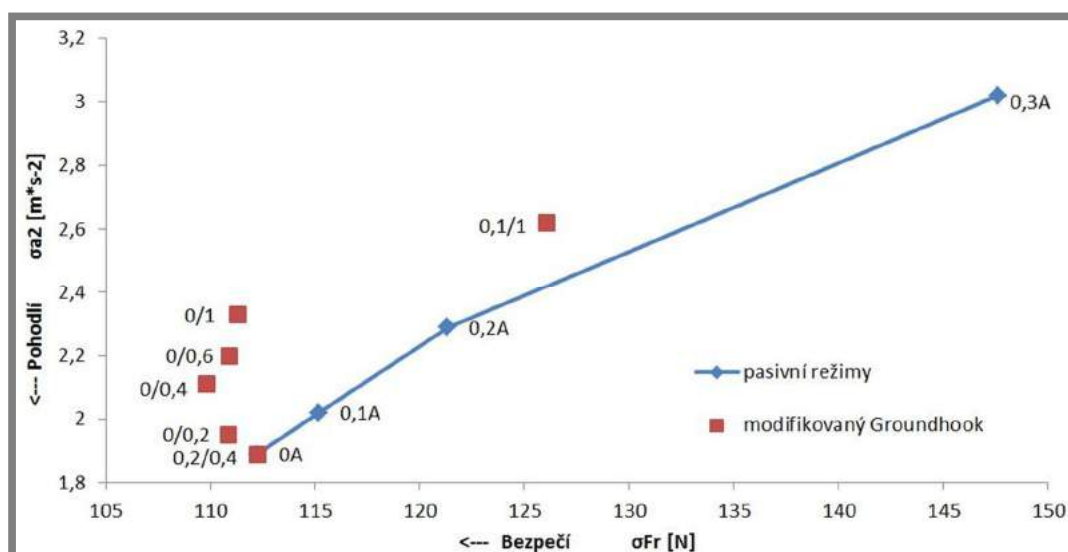
Ověření nalezeného optimálního nastavení rychlého MR tlumiče semiaktivně řízeného algoritmem modifikovaný Groundhook proběhlo již s upraveným algoritmem, viz kapitola 5.2. Na obr. 5-9 je zobrazena závislost jízdní bezpečnosti na komfortu jízdy. Modrá křivka reprezentuje dosažitelné pasivní režimy, zelené body jsou semiaktivně řízené režimy modifikovaným Groundhookem z první (kalibrační) části měření a žluté body jsou taktéž semiaktivně řízené režimy modifikovaným Groundhookem, ale již s upravenými filtry a mezemi.



Obr. 5-9 Srovnání měření s MR kapalinou MR 130 na základě jízdní bezpečnosti a komfortu

Jak lze vidět na obr. 5-9, přítlak kola na vozovku se po úpravě algoritmu zlepšil a optimálním nastavením pro rychlý MR tlumič semiaktivně řízený modifikovaným Groundhookem je s proudy pro stav s nízkým / vysokým koeficientem tlumení (I_L/I_H) 0,3/2 A, protože má opět nejmenší hodnoty σ_{Fr} .

Protože optimální nastavení je pro proud $I_L=0,3$ A bylo provedeno ještě jedno měření s hustší MR kapalinou MRF-140CG, a to za účelem posunutí a zvětšení rozsahu proudů. Toto měření je graficky znázorněno na obr. 5-10, je opět zobrazena závislost jízdní bezpečnosti na komfortu jízdy. Modrá křivka reprezentuje dosažitelné pasivní režimy s MR kapalinou MRF-140CG a červené body reprezentují semiaktivně řízené režimy modifikovaným Groundhookem. Jak je vidět na obrázku, tlumicí systém již od nulového proudu pasivního režimu silně přetlumený. Použitá MR kapalina je příliš hustá. Mezi MR kapalinou použitou v předešlém měření a MRF-140CG bohužel žádný další mezistupeň není.



Obr. 5-10 Srovnání měření s MR kapalinou MRF-140CG na základě jízdní bezpečnosti a

6 DISKUZE

Výsledky v kapitole 5.1 jsou důkazem toho, že s rychlým MR tlumičem jsou semiaktivní režimy výhodnější než pasivní. Názorná ukázka je zobrazena na obr. 5.9 v kapitole 5.4. Všechny uvedené semiaktivní režimy jsou výhodnější, zvláště z hlediska zlepšení jízdní bezpečnosti, což je převratný výsledek, ještě nikomu se toto tvrzení experimentálně dokázat nepodařilo.

V kapitole 4.4 je měření porovnáváno se simulacemi. Trendy průběhů porovnávaných veličin jsou podobné, jak amplitudy, tak i periody, avšak vždy je vidět mírná neshoda. Při porovnání grafických závislostí jízdního komfortu na bezpečnosti jízdy z kapitoly 5.2 je odlišnost výsledků mezi simulací a měřením větší. Tyto odlišnosti mohou být způsobeny např.:

- Jinými průběhy řídicího signálu než je ideální
- Zarušenost signálů a jejich filtrace, která způsobuje zkreslení
- Zjednodušená aproximace časové odezvy MR tlumiče prostou exponenciálou použitá ve virtuálním simulačním modelu
- Zjednodušená aproximace tuhosti pneumatiky ve virtuálním simulačním modelu na lineární
- Pasivní odpory experimentálního zařízení
- Tuhost experimentálního zařízení, a další

I když jsou mezi simulacemi a měřením menší neshody, jsou výsledky z virtuálního simulačního modelu velmi dobré.

V průběhu měření došlo i k ověření opakovatelnosti měření, a to před a po rozebrání a opětovném složení experimentálního zařízení. Toto ověření ukázalo, že opakovatelnost měření je vyhovující a výsledky pak srovnatelné.

Pokud by mělo být dosaženo ještě lepších výsledků, bylo by dobré upravit geometrii pístu MR tlumiče, aby bylo možné použít hustší MR kapalinu, a tak zvětšit a posunout rozsah proudů.

Dále by bylo dobré do budoucna otestovat rychlý MR tlumič řízený semiaktivními algoritmy na jiném druhu nerovnosti, než je překážka typu příčný práh, aby bylo ověřeno, že dojde ke zlepšení přitlaku kola na vozovku i při jiných, než již testovaných podmínkách.

7 ZÁVĚR

V minulosti se mnoho autorů zabývalo semiaktivním řízením MR tlumiče. Bylo vyvinuto mnoho řídicích algoritmů, provedeno mnoho simulací, které slibovali značné zlepšení jak jízdní bezpečnosti, tak i komfortu. Následné experimentální ověření těchto simulací však tyto slibné výsledky nepotvrdilo. Reálné experimenty často narážely na problém s dlouhou časovou odezvou MR tlumiče na řídicí signál. Dnes je již k dispozici první rychlý MR tlumič, a to pouze na VUT FSI. Žádné měření s výsledky dosud nebylo publikováno. Tato práce měla tedy dokázat, že pokud je časová odezva MR tlumiče dostatečně krátká (2 ms) dojde ke značnému zlepšení jízdní bezpečnosti. Práce se tedy zabývala nejprve studii související problematiky, poté řešila rekonstrukci experimentálního zařízení, dále virtuální simulační model, vhodný výběr řídicího algoritmu, samotné simulace a nakonec měření a vyhodnocení. V kapitole 2 byly stanoveny hlavní cíle a i další dílčí cíle. Rozbor splnění cílů je uveden níže.

7.1 Splnění cílů

7.1.1 Výsledky potvrzují, že s rychlým MR tlumičem semiaktivně řízeným lze dosáhnout lepších výsledků než s MR tlumičem pasivně nastaveným.

Z výsledků je zřejmé, že všechny uvedené semiaktivní režimy řízené modifikovaným Groundhookem jsou z hlediska jízdní bezpečnosti výhodnější než dosažitelné pasivní režimy daného rychlého MR tlumiče.

7.1.2 Byly odstraněny konstrukční nedostatky experimentálního zařízení

Experimentální vozík byl zrekonstruován a byly odstraněny jeho předešlé nedostatky, které se objevily v minulých letech. Přesněji byl odstraněn problém s prolínajícím olejem přes pístnici a bylo zrekonstruováno uchycení pístnice na kavný rám.

7.1.3 Byl upraven virtuální simulační model

Virtuální simulační model byl doplněn o reálné F-v charakteristiky a byly do něj zaneseny stávající parametry experimentálního zařízení

7.1.4 Byl ověřen virtuální simulační model

Virtuální simulační model byl porovnán s měřením. Byly porovnány naměřené a simulované průběhy jednotlivých veličin a_1 , a_2 a F_r a závislosti jízdního bezpečí na komfortu. Výsledky ze simulací a z měření jsou podobné, trendy průběhů křivek jsou stejné. Virtuální simulační model produkuje důvěryhodné výsledky.

7.1.5 Bylo nalezeno optimální nastavení rychlého MR tlumiče

Pomocí virtuálního simulačního modelu a kalibračních měření bylo nalezeno optimální nastavení rychlého MR tlumiče. Je to nastavení s proudem pro stav s nízkým koeficientem tlumení 0,3 A a pro stav s vysokým koeficientem tlumení 2 A. Toto nastavení bylo následně experimentálně ověřeno.

7.1.6 Byl upraven semiaktivní řídicí algoritmus modifikovaný Groundhook

Do řídicího algoritmu byly zaneseny poznatky z kalibračních měření a byl upraven tak, aby přepínal mezi proudy co nejbližší teorii. Tato úprava byla dosažena úpravou

filtrů definovaných v řídicím algoritmu, resp. úpravou citlivostních mezí pro relativní rychlost a zrychlení neodpružené hmoty.

Všechny definované cíle této práce byly splněny.

7.2 Praktický význam práce

7.2

Tato práce je v dané problematice převratnou, protože je první, která experimentálně dokázala, že s rychlým MR tlumičem řízeným semiaktivními algoritmy lze dosáhnout lepších výsledků než s jeho pasivním nastavením. Při použití semiaktivního závěsu kola osazeného rychlým MR tlumičem bude možné dosáhnout za dobrého komfortu jízdy i lepší bezpečnost. Hlavní uplatnění rychlého MR tlumiče řízeného semiaktivním algoritmem modifikovaný Groundhook bude u sportovních vozů. Tento řídicí algoritmus je vhodný především na zlepšení bezpečnosti jízdy, tedy zkvalitnění styku kola s vozovkou. Pokud je kolo s vozovkou ve stabilním kontaktu, automobil je dobře ovladatelný, pneumatiky dokáží dobře přenášet brzdné účinky i v situacích, kdy jsou klasické kapalinové tlumiče na hraně svých možností.

7.3 Námět na další výzkum

7.3

- Simulace rychlého MR tlumiče řízeného semiaktivními algoritmy v reálném provozu
- Experimentální odzkoušení rychlého MR tlumiče řízeného semiaktivními algoritmy i v reálném provozu
- Rozšíření simulací z on/off semiaktivních algoritmů o algoritmy s plynulou regulací
- Provedení simulací s různými tvary F-v charakteristik a zjištění vlivu na kvalitu odpružení

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] PEPE, G. a A. CARCATERRA. A new semi-active variational based damping control. *2014 IEEE/ASME 10th International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications (MESA)*. IEEE, 2014, s. 1-7. DOI: 10.1109/MESA.2014.6935611. Dostupné z: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6935611>>.
- [2] STRECKER, Z. *Optimalizace regulačního algoritmu MR tlumiče*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 114 s. Vedoucí disertační práce Doc. Ing. Ivan Mazůrek, CSc.
- [3] ROUPEC, J. *Mezní a degradační procesy magnetoreologických tlumičů odpružení*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 140 s. Vedoucí disertační práce Doc. Ing. Ivan Mazůrek, CSc.
- [4] AMINI, Fereidoun, N. Khanmohammadi HAZAVEH a A. Abdolahi RAD. Wavelet PSO-Based LQR Algorithm for Optimal Structural Control Using Active Tuned Mass Dampers. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 2013, vol. 28, issue 7, s. 542-557. DOI: 10.1111/mice.12017. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1111/mice.12017>.
- [5] LONGHURST, C. *The suspension bible*[online]. [cit. 2012-03-21]. Dostupné z: <<http://www.carbibles.com/images/magneride.jpg>>.
- [6] SHIN, Y.-J., W.-H. YOU, H.-M. HUR, J.-H. PARK a G.-S. LEE. Improvement of Ride Quality of Railway Vehicle by Semiactive Secondary Suspension System on Roller Rig Using Magnetorheological Damper. *Advances in Mechanical Engineering*. 2014-08-20, vol. 6, issue 0, s. 298382-298382. DOI: 10.1155/2014/298382. Dostupné z: <<http://ade.sagepub.com/lookup/doi/10.1155/2014/298382>>.
- [7] LUU, M., M.D. MARTINEZ-RODRIGO, V. ZABEL a C. KÖNKE. Semi-active magnetorheological dampers for reducing response of high-speed railway bridges. *Control Engineering Practice*. 2014, vol. 32, s. 147-160. DOI: 10.1016/j.conengprac.2014.08.006. Dostupné z: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0967066114002056>>.
- [8] AGUIRRE, N., F. IKHOUANE a J. RODELLAR. Proportional-plus-integral semiactive control using magnetorheological dampers. *Journal of Sound and Vibration*. 2011, vol. 330, issue 10, s. 2185-2200. DOI: 10.1016/j.jsv.2010.11.027. Dostupné z: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022460X10007893>>.

- [9] CARLSON, J. D., MATTHIS, W., TOSCANO, J. R., Smart prosthetics based on magnetorheological fluids. In *Proceedings of SPIE, Smart Structures and Materials 2001: Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies*, 5. March 2001. Newport Beach, CA, USA, 2001. vol. 4332, s. 308-316.
- [10] LI, Z C a J WANG. A gun recoil system employing a magnetorheological fluid damper. *Smart Materials and Structures*. 2012, vol. 21, issue 10. DOI: 10.1088/0964-1726/21/10/105003
- [11] JIANG, Z a R E CHRISTENSON. A fully dynamic magneto-rheological fluid damper model. *Smart Materials and Structures*. 2012-06-01, vol. 21, issue 6, s. 065002-. DOI: 10.1088/0964-1726/21/6/065002. Dostupné z: <<http://stacks.iop.org/0964-1726/21/i=6/a=065002?key=crossref.70ac70cf50207016758850f8af40ac46>>.
- [12] CHOI, S.-B., S.-K. LEE a Y.-P. PARK. A HYSTERESIS MODEL FOR THE FIELD-DEPENDENT DAMPING FORCE OF A MAGNETORHEOLOGICAL DAMPER. *Journal of Sound and Vibration*. 2001, 245(2), 375-383. DOI: 10.1006/jsvi.2000.3539. ISSN 0022460x. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022460X00935399>
- [13] TU, Jia-Ying, Pei-Yang LIN a Tsu-Yun CHENG. Continuous hysteresis model using Duffing-like equation. *Nonlinear Dynamics*. 2015, vol. 80, 1-2, s. 1039-1049. DOI: 10.1007/s11071-015-1926-3. Dostupné z: <<http://link.springer.com/10.1007/s11071-015-1926-3>>.
- [14] AHN, Kyoung Kwan, Dinh Quang TRUONG a Muhammad Aminul ISLAM. Modeling of a magneto-rheological (MR) fluid damper using a self tuning fuzzy mechanism. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2009, vol. 23, issue 5, s. 1485-1499. DOI: 10.1007/s12206-009-0359-7. Dostupné z: <<http://link.springer.com/10.1007/s12206-009-0359-7>>.
- [15] SPENCER, S. J. DYKE, M. K. SAIN a J. D. CARLSON. Phenomenological Model for Magnetorheological Dampers. *Journal of Engineering Mechanics*. 1997, vol. 123, issue. 3, s. 238-238.
- [16] ORTIZ, Gilberto A., Diego A. ALVAREZ a Daniel BEDOYA-RUÍZ. Identification of Bouc–Wen type models using the Transitional Markov Chain Monte Carlo method. *Computers*. 2015, vol. 146, s. 252-269. DOI: 10.1016/j.compstruc.2014.10.012. Dostupné z: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0045794914002417>>.

- [17] KWOK, N.M., Q.P. HA, M.T. NGUYEN, J. LI a B. SAMALI. Bouc–Wen model parameter identification for a MR fluid damper using computationally efficient GA. *ISA Transactions*. 2007, vol. 46, issue 2, s. 167-179. DOI: 10.1016/j.isatra.2006.08.005. Dostupné z: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0019057807000237>>.
- [18] LI, Chunxiang, Qing LIU a Shengning LAN. Application of Support Vector Machine-Based Semiactive Control for Seismic Protection of Structures with Magnetorheological Dampers. *Mathematical Problems in Engineering*. 2012, vol. 2012, s. 1-18. DOI: 10.1155/2012/268938. Dostupné z: <<http://www.hindawi.com/journals/mpe/2012/268938/>>.
- [19] HAZAVEH, N.K., S. PAMPANIN, J.G. CHASE, G.W. RODGERS a P. GHADERI. Semi-active control of structure with MR damper using wavelet-based LQR. In: *2014 NZSEE*. New Zeland, s. 9.
- [20] SEUNG-BOK CHOI, Young-Min Han. *Magnetorheological fluid technology applications in vehicle systems*. Boca Raton, FL, 2013. ISBN 978-143-9856-741.
- [21] TOMLINSON, Geoffrey R a W BULLOUGH. *Smart materials and structures: proceedings of the 4th European Conference on Smart Structures and Materials in conjunction with the 2nd International Conference on Micromechanics, Intelligent Materials, and Robotics, Harrogate, UK, 6-8 July, 1998*. Philadelphia: Institute of Physics Publishing, c1998, xvii, 834 p. ISBN 07-503-0547-9.
- [22] SEONG, M S, S B CHOI a C H KIM. Damping force control of frictionless MR damper associated with hysteresis modeling. *Journal of Physics: Conference Series*. 2013-02-15, vol. 412, s. 012044-. DOI: 10.1088/1742-6596/412/1/012044. Dostupné z: <<http://stacks.iop.org/1742-6596/412/i=1/a=012044?key=crossref.3d02a2c393f03ac7f41fcb2c511887ab>>.
- [23] ZHANG, Hailong, Enrong WANG, Ning ZHANG, Fuhong MIN, Rakheja SUBASH a Chunyi SU. Semi-active sliding mode control of vehicle suspension with magneto-rheological damper. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 2015, vol. 28, issue 1, s. 63-75. DOI: 10.3901/CJME.2014.0918.152. Dostupné z: <<http://link.springer.com/10.3901/CJME.2014.0918.152>>.
- [24] KARNOPP, D., M. J. CROSBY a R. A. HARWOOD. Vibration Control Using Semi-Active Force Generators. *Journal of Engineering for Industry*. 1973, vol. 96, issue. 2, s. 619-626.
- [25] PRIYANDOKO, G., M. MAILAH a H. JAMALUDDIN. Vehicle active suspension system using skyhook adaptive neuro active force control. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2009, vol. 23, issue 3, s. 855-868. DOI: 10.1016/j.ymssp.2008.07.014. Dostupné z: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0888327008001982>>.

- [26] MULLA, Ansar, Sudhindra JALWADI a UNAUNE. Performance Analysis of Skyhook, Groundhook and Hybrid Control Strategies on Semiactive Suspension System. *International Journal of Current Engineering and Technology IJCET*. 2014, č. 3, s. 5. Dostupné z: <<http://inpressco.com/wp-content/uploads/2014/04/Paper56265-269.pdf>>.
- [27] Braun, Simon G. Ewins, David J. Rao, Singiresu S. *Encyclopedia of Vibration*. 2002. Volumes 1-3. Elsevier. Dostupné z: <<http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpEvv00007/encyclopedia-vibration/encyclopedia-vibration>>.
- [28] YAO, Jia-ling a Jia-qiang ZHENG. Semi-active Suspension System Design for Quarter-car Model using Model Reference Sliding Mode Control. 2006 IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety. IEEE, 2006, s. 398-402. DOI: 10.1109/ICVES.2006.371623. Dostupné z: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4234059>>.
- [29] DONG, Xiao-min, Miao YU, Chang-rong LIAO a Wei-min CHEN. Comparative research on semi-active control strategies for magneto-rheological suspension. *Nonlinear Dynamics*. 2010, vol. 59, issue 3, s. 433-453. DOI: 10.1007/s11071-009-9550-8. Dostupné z: <<http://link.springer.com/10.1007/s11071-009-9550-8>>.
- [30] JAHROMI, Ali Fellah, Wen Fang XIE a Rama B. BHAT. [Http://waset.org/publications/5929/ride-control-of-passenger-cars-with-semi-active-suspension-system-using-a-linear-quadratic-regulator-and-hybrid-optimization-algorithm](http://waset.org/publications/5929/ride-control-of-passenger-cars-with-semi-active-suspension-system-using-a-linear-quadratic-regulator-and-hybrid-optimization-algorithm). *World Academy of Science, Engineering and Technology*. 2012, vol. 6, issue. 7, s. 7. Dostupné z: <<http://waset.org/publications/5929/ride-control-of-passenger-cars-with-semi-active-suspension-system-using-a-linear-quadratic-regulator-and-hybrid-optimization-algorithm>>.
- [31] SHI, Yundong, Tracy C. BECKER, Sachi FURUKAWA, Eiji SATO a Masayoshi NAKASHIMA. LQR control with frequency-dependent scheduled gain for a semi-active floor isolation system. *Earthquake Engineering*. 2014-07-25, vol. 43, issue 9, s. 1265-1284. DOI: 10.1002/eqe.2352. Dostupné z: <<http://doi.wiley.com/10.1002/eqe.2352>>.
- [32] AHMADIAN, M. ACTIVE CONTROL OF VEHICLE VIBRATION. *Encyclopedia of Vibration*. Elsevier, 2001, s. 37. DOI: 10.1006/rwvb.2001.0193. Dostupné z: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B0122270851001934>>.
- [33] SROVNAL, V. *Kybernetika*. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2008.

- [34] ŠVARC, I. *Základy automatizace*. 2. vyd. Brno: VUT Brno, 2002. 102 s. Učební texty pro kombinovanou formu bakalářského studia. Vysoké učení technické v Brně.
- [35] KUČERA, P. *Experimentální zjištění doby odezvy MR tlumiče s modifikovaným pístem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 53 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Zbyněk Strecker, Ph.D.
- [36] LAUN, Hans Martin a Claus GABRIEL. Measurement modes of the response time of a magneto-rheological fluid (MRF) for changing magnetic flux density. *Rheologica Acta*. 2007-5-13, vol. 46, issue 5, s. 665-676. DOI: 10.1007/s00397-006-0155-6. Dostupné z: <<http://link.springer.com/10.1007/s00397-006-0155-6>>
- [37] GONCALVES, Fernando D, Mehdi AHMADIAN, J D CARLSON, Martin EKENBERG, Bengt JOHANSSON a J D SIEGWARTH. Investigating the magnetorheological effect at high flow velocities. *Smart Materials and Structures*. 2005, vol. 15, issue 1, s. 75-85. DOI: 10.6028/nbs.tn.1302.
- [38] KOO, Jeong-Hoi, Fernando D GONCALVES a Mehdi AHMADIAN. A comprehensive analysis of the response time of MR dampers. *Smart Materials and Structures*. 2006-04-01, vol. 15, issue 2, s. 351-358. DOI: 10.1088/0964-1726/15/2/015. Dostupné z: <<http://stacks.iop.org/0964-1726/15/i=2/a=015?key=crossref.7f677e6e61e570cabbd73a5ad620fd46>>.
- [39] STRECKER, Zbyněk, Jakub ROUPEC, Ivan MAZŮREK, Ondřej MACHÁČEK, Michal KUBÍK a Milan KLAPKA. Design od magnetorheological damper with short time response. *Intelligents Material Systém and Structures*. DOI: 10.1177/1045389X1559138I.
- [40] STRECKER, Zbyněk, Ivan MAZŮREK, Jakub ROUPEC a Milan KLAPKA. Influence of MR damper response time on semiactive suspension control efficiency. *Meccanica*. DOI: 10.1007/s11012-015-0139-7. Dostupné z: <<http://link.springer.com/10.1007/s11012-015-0139-7>>
- [41] FERDAUS, Mohammad Meftahul, Muhammad Mahbubur RASHID, Muhammad Hasibul HASAN a Mohammed Aatur RAHMAN. Optimal design of Magneto-Rheological damper comparing different configurations by finite element analysis. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2014, vol. 28, issue 9, s. 3667-3677. DOI: 10.1007/s12206-014-0828-5. Dostupné z: <<http://link.springer.com/10.1007/s12206-014-0828-5>>.
- [42] *LOCTITE: Technický list LOCTITE 5910* [online]. In: . Europe, 2009, s. 3 [cit. 2016-05-16]. Dostupné z: http://zbozi.arkov.cz/dl/704/Technicke_listy_Loctite_5910.pdf.html

- [43] INDUSTRIAL CZ [online]. Praha, 2015 [cit. 2016-05-03]. Dostupné z: <http://www.industrial.cz/>
- [44] ZHOU, Yu-feng a Hua-ling CHEN. Study on damping properties of magnetorheological damper. *Frontiers of Mechanical Engineering in China*. 2006, vol. 1, issue 4, s. 452-455. DOI: 10.1007/s11465-006-0057-4. Dostupné z: <<http://link.springer.com/10.1007/s11465-006-0057-4>>.
- [45] Ionica Technologies, *SF-XI200*. Datasheet Ionica Technologies, 2014.
- [46] KWOK, N.M., Q.P. HA, T.H. NGUYEN, J. LI a B. SAMALI. A novel hysteretic model for magnetorheological fluid dampers and parameter identification using particle swarm optimization. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2006, 132(2): 441-451. DOI: 10.1016/j.sna.2006.03.015. ISSN 09244247. Dostupné z: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924424706002019>>.
- [47] Česká republika. *Hodnocení výsledků výzkumných organizací a hodnocení výsledků ukončených programů*. In: 1417/2013-RVV. Praha, 2013, č. 475. Dostupné z: <http://www.vyzkum.cz/storage/att/373C18E8F5E1311F5B8AF2BD17FAB115/M2013_v95.pdf>.

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

Zkratka	Význam
ÚK	- Ústav konstruování
VUT	- Vysoké učení technické
FSI	- Fakulta strojního inženýrství
MR tlumič	-magneto-reologický tlumič
MR kapalina	.magneto-reologická kapalina

Symbol	Jednotka	Popis
τ	[Pa]	-smykové napětí
$\tau_{y(field)}$	[Pa]	-mez kluzu kapaliny
η	[Pa/s]	-viskozita
$\dot{\gamma}$	[s ⁻¹]	-smykový spád
F	[N]	-tlumící síla
f_c	[N]	-třecí síla
f_0	[N]	-síla v důsledku tlaku za pístem
c, c_0, c_1	[N/m]	-tlumení
k, k_1, k_2	[N/m]	-tuhost pružiny
α	[-]	-koeficient míry hystereze
z	[-]	-parametr Bouc-Wen modelu
c_{pr}, c_{po}	[-]	-experimentálně zjištěné parametry Bi-viscous modelu
$\dot{x}_y$	[m/s]	-rychlost odpovídající meze kluzu
a, b, c	[-]	-koeficienty polynomu
I	[A]	-proud
m_s	[kg]	-hmotnost odpružené hmoty
m_u	[kg]	-hmotnost neodpružené hmoty
m_{ss}	[kg]	-redukována hmotnost odpružené hmoty
m_{us}	[kg]	-redukována hmotnost neodpružené hmoty
y_1	[m]	-posunutí neodpružené hmoty
y_2	[m]	-posunutí odpružené hmoty
y_i	[m]	-posunutí bodu styku pneumatiky s vozovkou
k_s	[N/m]	-tuhost pružiny odpružené hmoty
k_t	[N/m]	-tuhost pneumatiky
b_1	[N.s.m ⁻¹]	-koeficient tlumení pneumatiky
b_2	[N.s.m ⁻¹]	-koeficient tlumení tlumiče
b_{max}	[N.s.m ⁻¹]	-maximální koeficient tlumení tlumiče
b_{min}	[N.s.m ⁻¹]	-minimální koeficient tlumení tlumiče
$\dot{y}_2, v_2$	[m/s]	-rychlost odpružené hmoty
$\dot{y}_1, v_1$	[m/s]	-rychlost neodpružené hmoty
$\dot{y}_2 - \dot{y}_1$	[m/s]	-relativní rychlost
$v_2 - v_1$	[m/s]	-relativní rychlost
$\dot{y}_i$	[m/s]	-rychlost bodu kontaktu pneumatiky s vozovkou
$\ddot{y}_1, a_1$	[m/s ²]	-zrychlení neodpružené hmoty
$\ddot{y}_2, a_2$	[m/s ²]	-zrychlení odpružené hmoty
σ_{sky}	[N]	-složka tlumící síly Skyhooku

σ_{gnd}	[N]	-složka tlumící síly Groundhooku
G	[N]	-minimální tlumící síla
T	[s]	-časová konstanta
K	[-]	-zesílení
t	[s]	-čas
B	[T]	-magnetická indukce
g	[m/s ²]	-gravitační zrychlení
I_L	[A]	-proud pro stav s nízkým koeficientem tlumení
I_H	[A]	-proud pro stav s vysokým koeficientem tlumení
F_t	[N]	-tlumící síla
σ_{Fr}	[N]	-směrodatná odchylka přítláčné síly
σ_{a2}	[m/s ²]	-směrodatná odchylka zrychlení odpružené hmoty
F_r	[N]	-přítláčná síla kola na vozovku
F_{stat}	[N]	-statická síla přítlaku kola na vozovku

10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 2-1 Dělení automobilových závěsů	12
Obr. 2-2 Princip funkce MR tlumiče [5]	13
Obr. 2-3 Testování odpružení vlaku [6]	14
Obr. 2-4 Kmitání železničního mostu s a bez MR tlumiče [7]	14
Obr. 2-5 Polynomický model uvažující hysterezi [12]	15
Obr. 2-6 Binghamský model [14, 15].....	17
Obr. 2-7 Gamota filisco model [15]	18
Obr. 2-8 Bouc-Wen model [18, 15]	18
Obr. 2-9 Modifikovaný Bouc-Wen model [19, 15].....	19
Obr. 2-10 zleva nahoře: Bi-viscous model [20], nonlinear bi-viscous model [21], zleva dole: asymmetric bi-viscous model [22], nonlinear hysteretic bi-viscous model [21]	20
Obr. 2-11 Čtvrtinový model vozidla [23]	21
Obr. 2-12 Frekvenční charakteristika závěsu kola [2].....	21
Obr. 2-13 Ideální Skyhook (a) a reálný Skyhook (b) [26].....	22
Obr. 2-14 Porovnání pasivního tlumení a semiaktivního řízení algoritmem Skyhook [27]	23
Obr. 2-15 Ideální Groundhook (a) a reálný Groundhook (b) [26]	24
Obr. 2-16 Idealizace Hybrid control (a) a jeho reálná podoba (b) [26].....	25
Obr. 2-17 Schematické znázornění algoritmu Sliding control [28]	26
Obr. 2-18 Vstupy pro modelové testování [29]	27
Obr. 2-19 Srovnání zrychlení a výchylky odpružené hmoty při použití různých algoritmů [29]	28
Obr. 2-20 Přechodová charakteristika $h(t)$ [34]	29
Obr. 2-21 Časová konstanta a zesílení [35]	30
Obr. 2-22 Měřicí aparatura [36]	30
Obr. 2-23 Závislost meze kluzu na <i>dwell time</i> [37]	31
Obr. 2-24 Závislost časové odezvy MR tlumiče na velikosti proudu [38].....	31
Obr. 2-25 Závislost časové odezvy elektroniky na velikosti proudu [38].....	32
Obr. 2-26 Závislost časové odezvy na pístové rychlosti [38].....	32
Obr. 2-27 Experiment a)feritový píst, b)feritové	33
Obr. 2-28 Závislost magnetické indukce na časové odezvě [39].....	33
Obr. 2-29 Závislost magnetické indukce na časové	33
Obr. 2-30 Hlavní části MR tlumiče [41].....	34
Obr. 2-31 Závislost meze kluzu MR kapaliny na intenzitě [41].....	35
Obr. 4-2 Experimentální vozík [2]	39
Obr. 4-3 Specifikace tmelu Loctite SI 5910 [42].....	40
Obr. 4-4 Tlakovací přípravek	40
Obr. 4-5 Kloubová hlava GI 12 [43]	41
Obr. 4-6 Schéma pístnice zamontované v kloubové hlavě	42
Obr. 4-7 Úprava kloubové hlavy	42
Obr. 4-8 MR tlumič po rekonstrukci vmontovaný v experimentálním vozíku.....	42
Obr. 4-9 Čtvrtinový matematický model automobilu [23]	43
Obr. 4-10 Křivky F-v charakteristik použité v minulosti pro simulace [2]	44
Obr. 4-11 Vybrané křivky F-v charakteristik naměřené pro MR kapalinu MR130 ..	45

Obr. 4-12 Srovnání modelových a naměřených F-v charakteristik pro MR kapalinu MR130.....	45
Obr. 4-13 Průběh zrychlení neodpružené hmoty, pasivní režim, proud 0A.....	46
Obr. 4-14 Průběhy zrychlení odpružené hmoty, pasivní režim, proud 0A	46
Obr. 4-15 Průběhy přítláčné síly kola na vozovku, pasivní režim, proud 0A	47
Obr. 4-16 Závislost jízdní bezpečnosti na komfortu jízdy – pasivní režimy – virtuální simulační model.....	47
Obr. 4-17 Závislost jízdní bezpečnosti na komfortu jízdy – pasivní režimy – měření	47
Obr. 4-18 Průběhy zrychlení neodpružené hmoty, pasivní režim 0 A, rychlost 5 km/h	48
Obr. 4-19 Průběhy zrychlení neodpružené hmoty, pasivní režim 0 A, rychlost 15 km/h	48
Obr. 4-20 Průběhy zrychlení odpružené hmoty, pasivní režim 0 A, rychlost 5 km/h	49
Obr. 4-21 Průběhy zrychlení odpružené hmoty, pasivní režim 0 A, rychlost 15 km/h	49
Obr. 4-22 Průběhy přítláčné síly, pasivní režim 0 A, rychlost 5 km/h	49
Obr. 4-23 Průběhy přítláčné síly, pasivní režim 0 A, rychlost 15 km/h	49
Obr. 4-24 Spínání proudu do cívky tlumiče pro modifikovaný Groundhook	51
Obr. 4-25 Schéma měřicí aparatury	51
Obr. 4-27 Odporový snímač	52
Obr. 4-28 Akcelerometr	52
Obr. 3-29 Akcelerometr	52
Obr. 4-30 Proudové kleště měřící proud tekoucí do cívky tlumiče	53
Obr. 4-31 Siloměr měřící tlumící sílu	53
Obr. 3-32 Experimentální vozík s připojenou aparaturou.....	53
Obr. 4-34 Kontrola IIR filtru pásmová propust 0,5-60 Hz na signálu	55
Obr. 4-35 Kontrola IIR filtru pásmová propust 0,4-35 Hz na signálu zrychlení odpružené hmoty.....	55
Obr. 5-1 Tabulka měření	57
Obr. 5-2 Průběhy zrychlení neodpružené hmoty, pasivní režim 0A, tlaky 2, 2,5, 3 bary	60
Obr. 5-3 Průběhy zrychlení odpružené hmoty, pasivní režim 0A, tlaky 2, 2,5, 3 bary	60
Obr. 5-4 Průběhy síly mezi kolem a vozovkou, pasivní režim 0A, tlaky 2, 2,5, 3 bary	60
Obr. 5-5 Závislost jízdní bezpečnosti na komfortu jízdy – semiaktivní režimy řízené modifikovaným Groundhookem – virtuální simulační model	61
Obr. 5-6 Závislost jízdní bezpečnosti na komfortu jízdy – semiaktivní režimy řízené modifikovaným Groundhookem – měření	62
Obr. 5-7 Řízení modifikovaného Groundhooku 0,3/2 A	62
Obr. 5-8 Řízení modifikovaného Groundhooku 0,3/1 A s upravenými mezemi.....	63
Obr. 5-9 Srovnání měření s MR kapalinou MR 130 na základě jízdní bezpečnosti a komfortu.....	64
Obr. 4-10 Srovnání měření s MR kapalinou MRF-140CG na základě jízdní bezpečnosti a komfortu	64

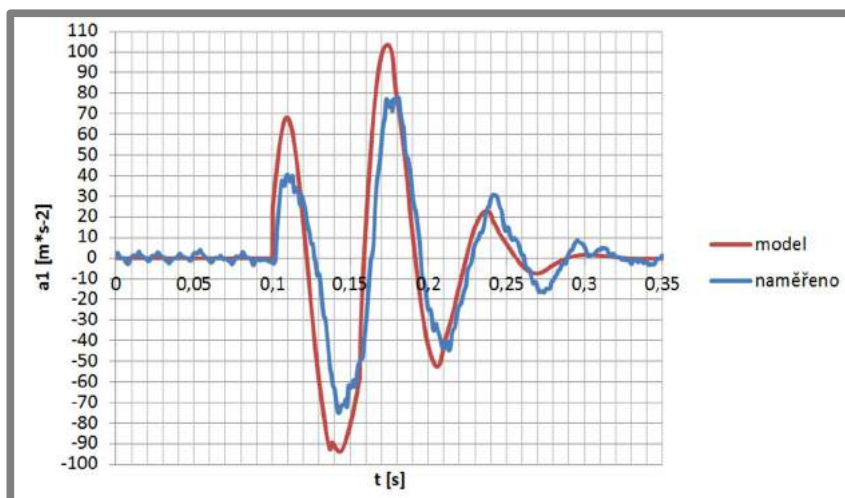
11 SEZNAM TABULEK

Tab. 4-1 Tabulka parametrů nastavení experimentálního vozíku	38
Tab. 4-26 Zapojení a umístění senzorů.....	52
Tab. 4-33 Přehled filtrů potřebných pro řízení modifikovaným Groudhookem.....	54

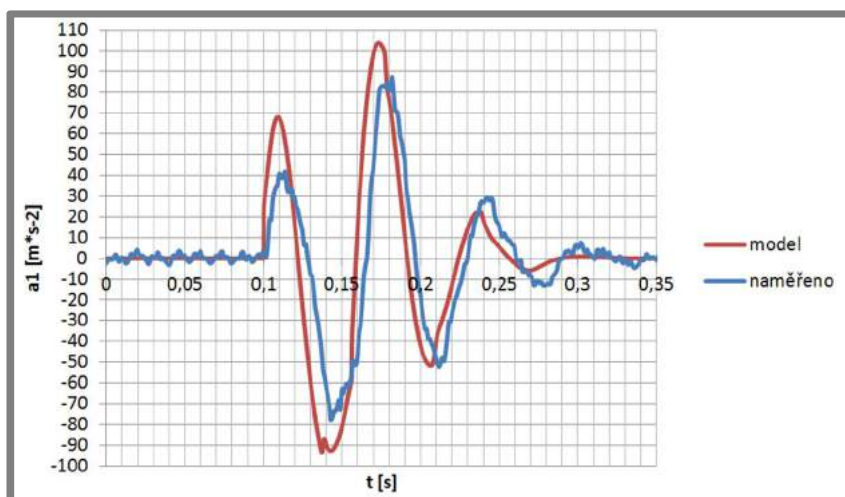
12 SEZNAM PŘÍLOH**12**

- Příloha 1** Ověření virtuálního simulačního modelu pro MR kapalinu MR 130
- Příloha 2** Ověření virtuálního simulačního modelu pro MR kapalinu MRF-140 CG
- Příloha 3** Ověření experimentálního zařízení po rozebrání a opětovném složení
- Příloha 4** Publikace – *Testing of car suspension with fast damper controlled by modified Groundhook algorithm*
- Příloha 5** Schéma měření
- Příloha 6** F-v charakteristiky pro MR kapalinu MR 130
- Příloha 7** F-v charakteristiky pro MR kapalinu MRF-140 CG

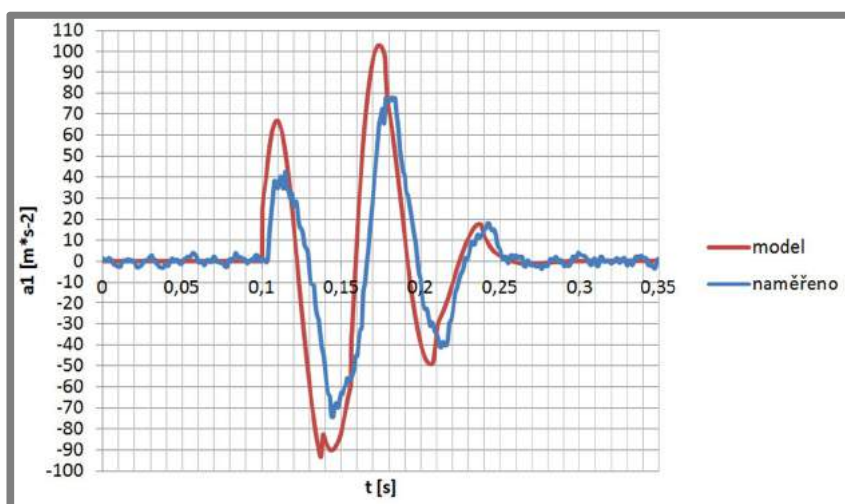
Příloha 1.



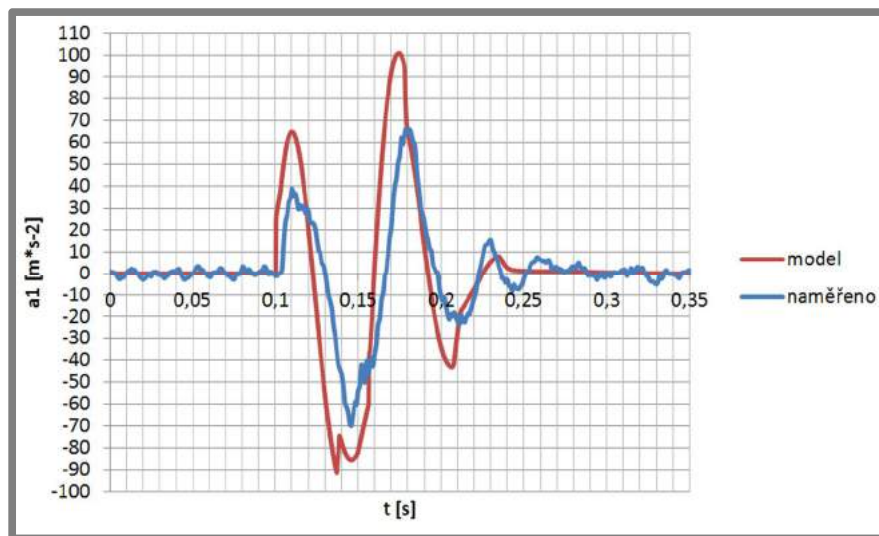
zrychlení neodpružené hmoty, pasivní režim s proudem 0 A



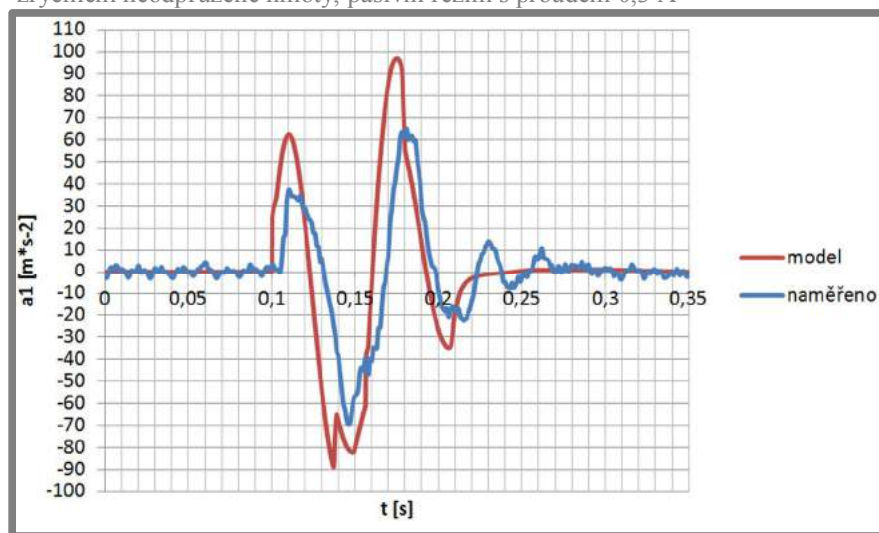
zrychlení neodpružené hmoty, pasivní režim s proudem 0,1 A



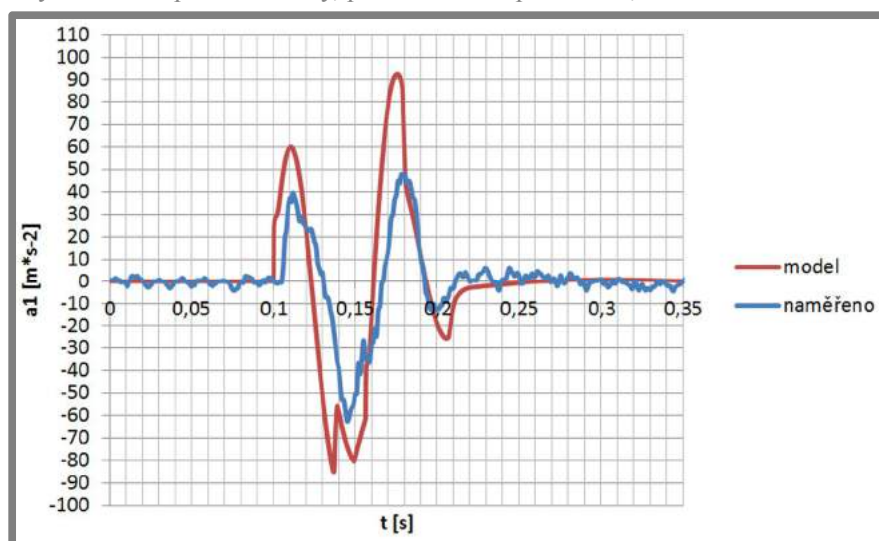
zrychlení neodpružené hmoty, pasivní režim s proudem 0,2 A



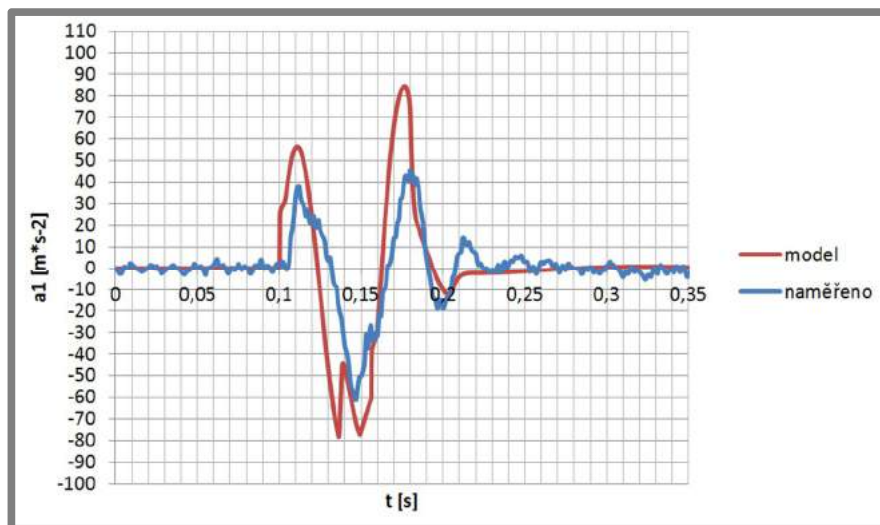
zrychlení neodpružené hmoty, pasivní režim s proudem 0,3 A



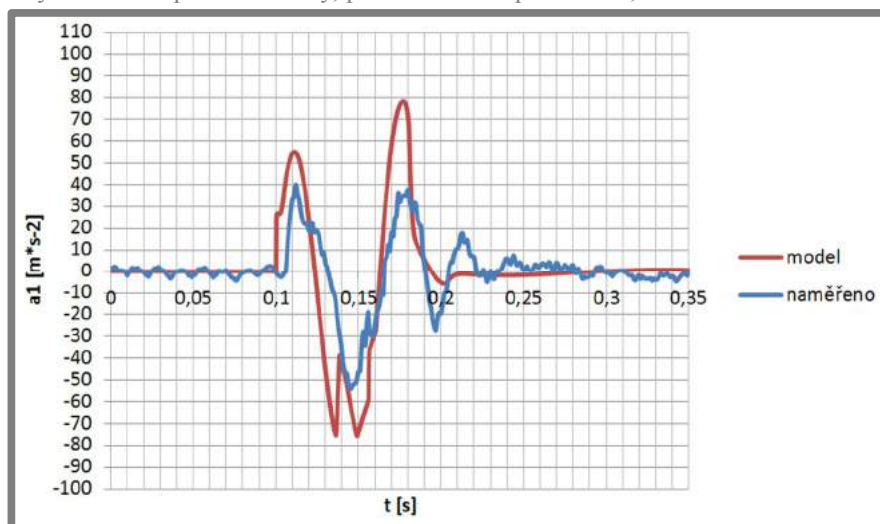
zrychlení neodpružené hmoty, pasivní režim s proudem 0,4 A



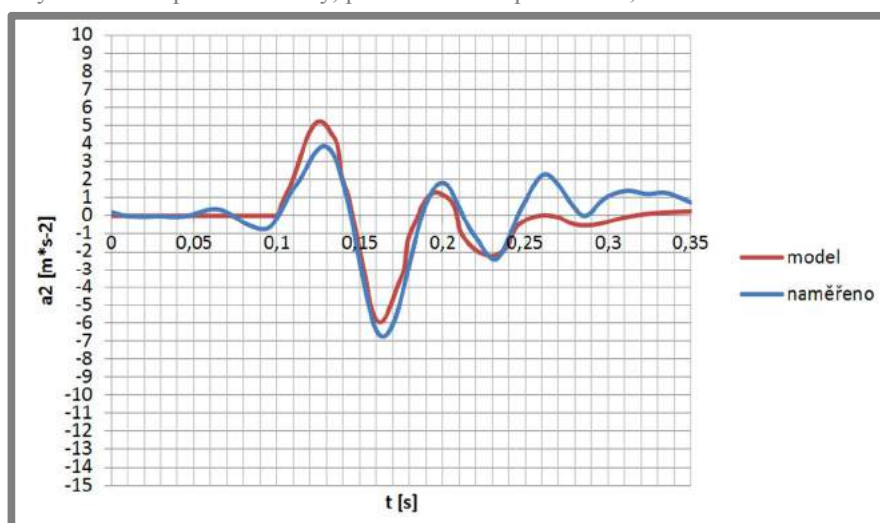
zrychlení neodpružené hmoty, pasivní režim s proudem 0,5 A



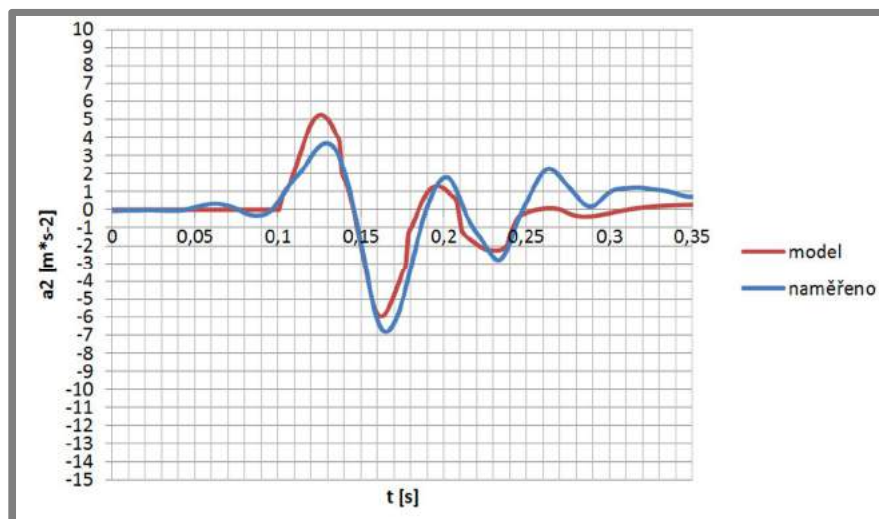
zrychlení neodpružené hmoty, pasivní režim s proudem 0,8 A



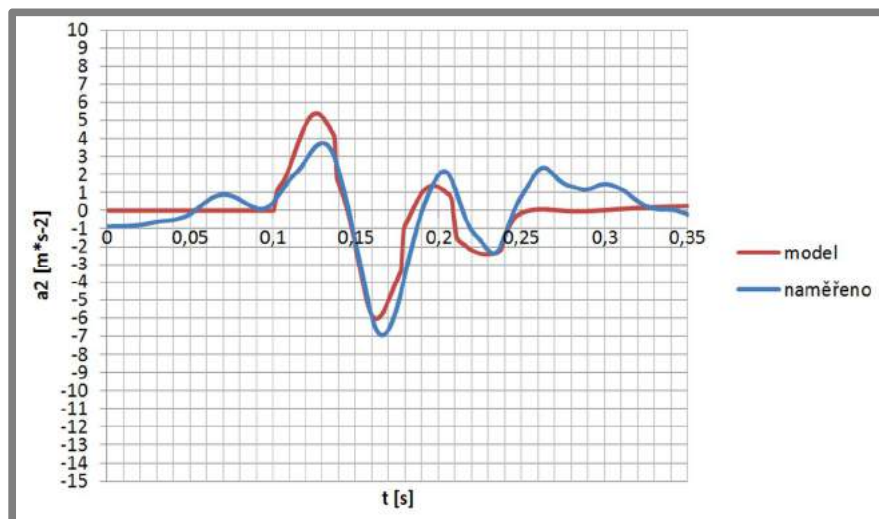
zrychlení neodpružené hmoty, pasivní režim s proudem 1,2 A



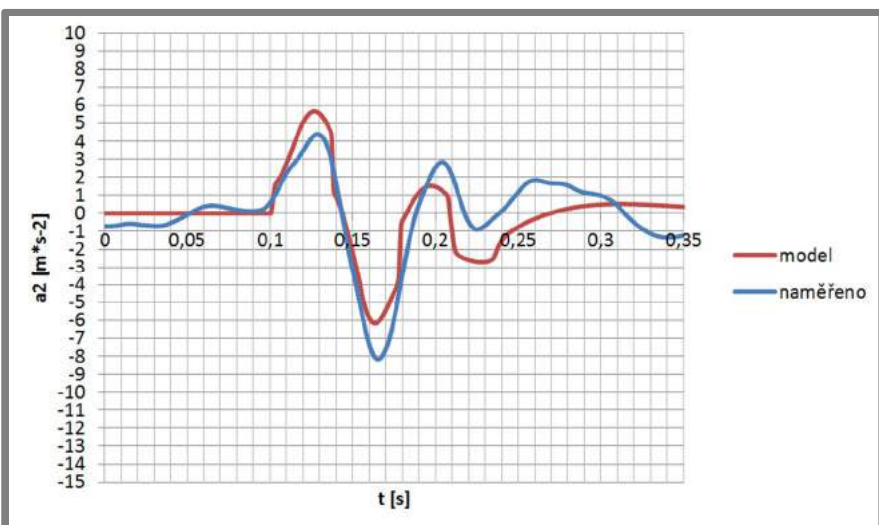
zrychlení odpružené hmoty, pasivní režim s proudem 0 A



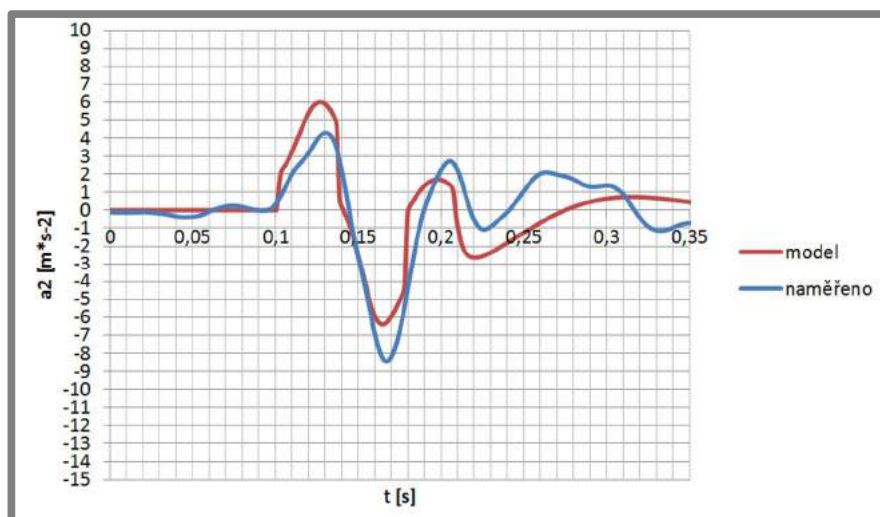
zrychlení odpružené hmoty, pasivní režim s proudem 0,1 A



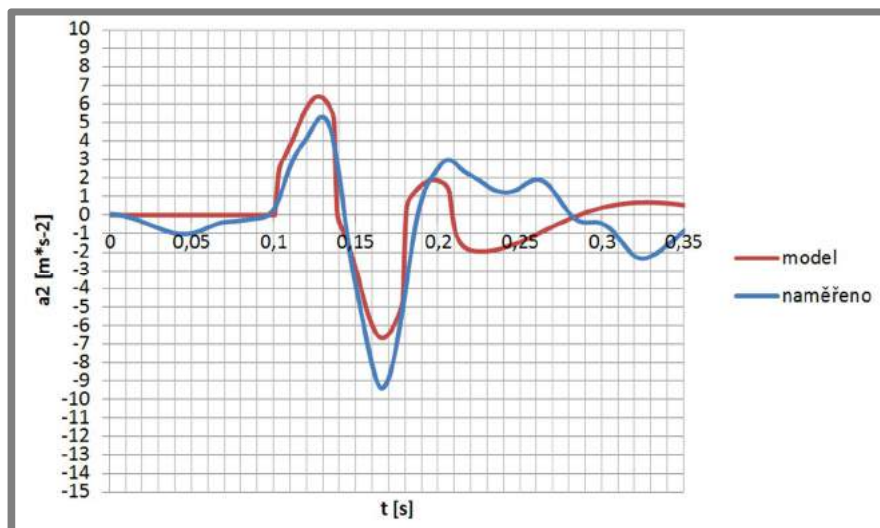
zrychlení odpružené hmoty, pasivní režim s proudem 0,2 A



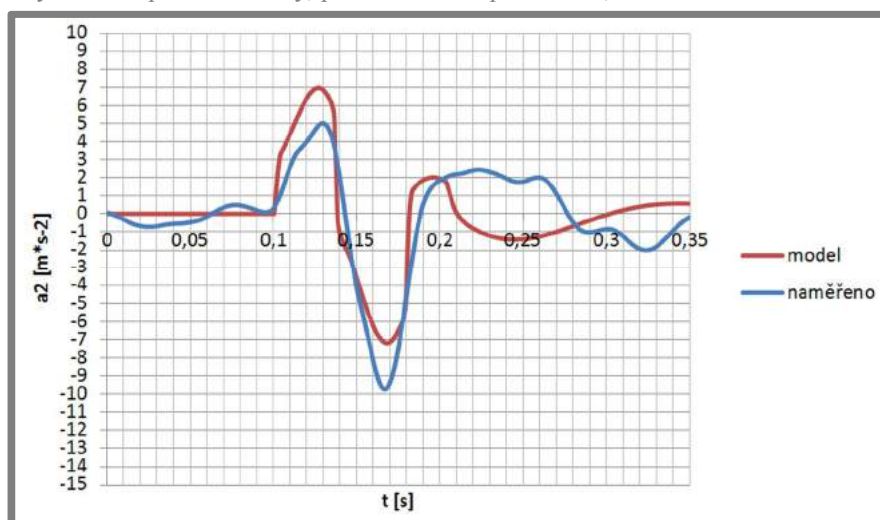
zrychlení odpružené hmoty, pasivní režim s proudem 0,3 A



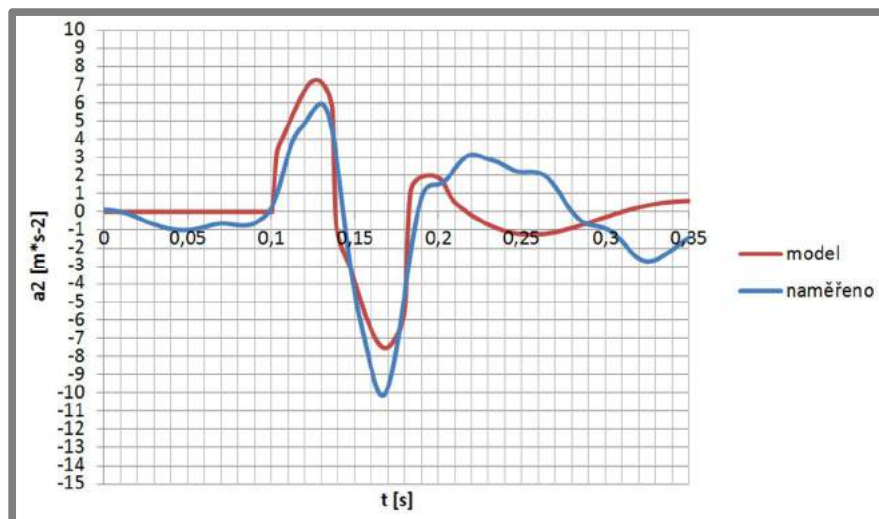
zrychlení odpružené hmoty, pasivní režim s proudem 0,4 A



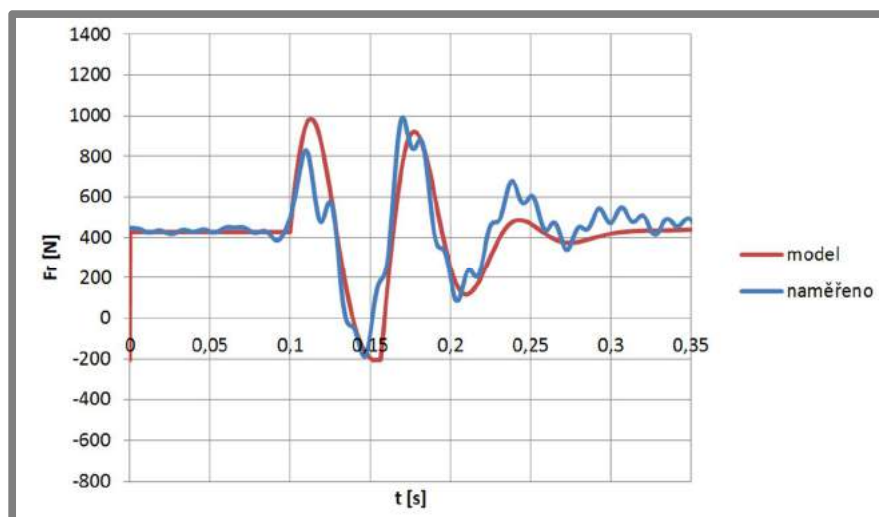
zrychlení odpružené hmoty, pasivní režim s proudem 0,5 A



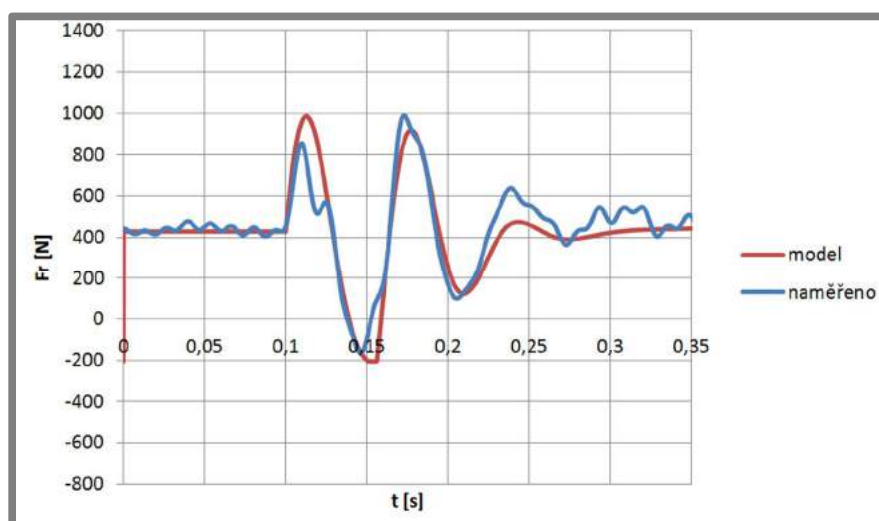
zrychlení odpružené hmoty, pasivní režim s proudem 0,8 A



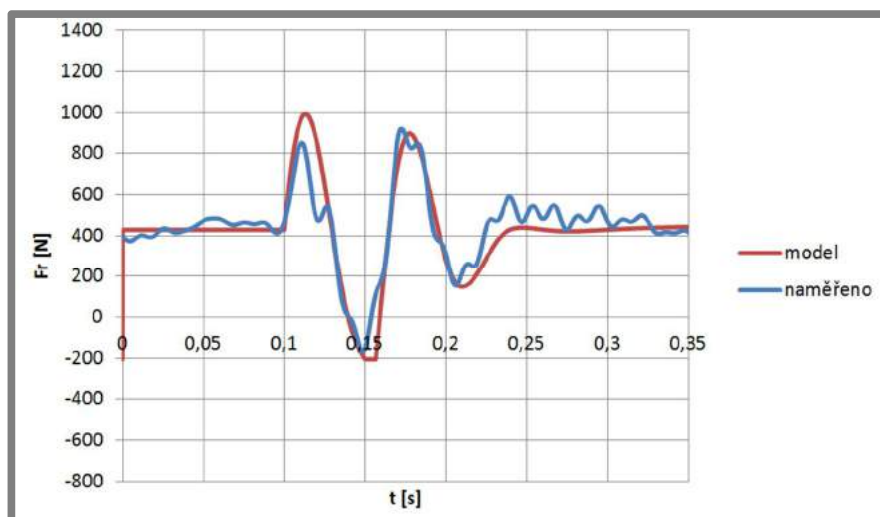
zrychlení odpružené hmoty, pasivní režim s proudem 1,2 A



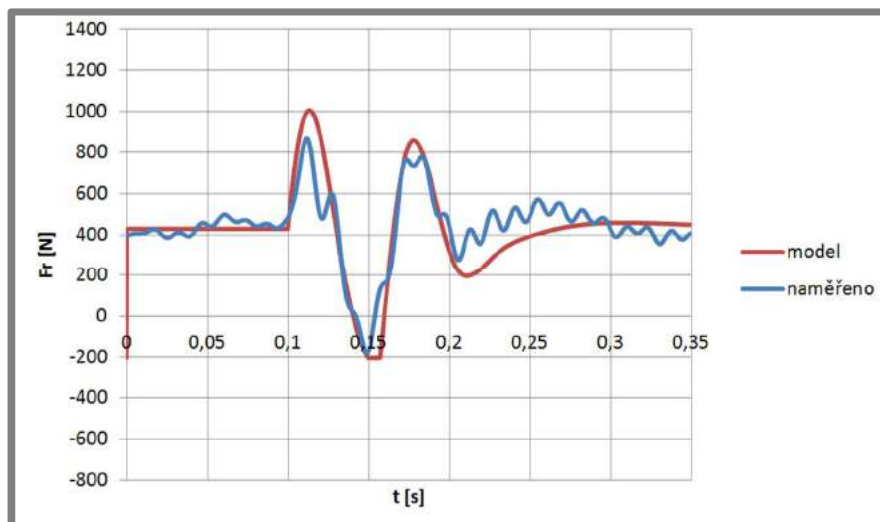
Přítlačná síla kola na vozovku, pasivní režim s proudem 0 A



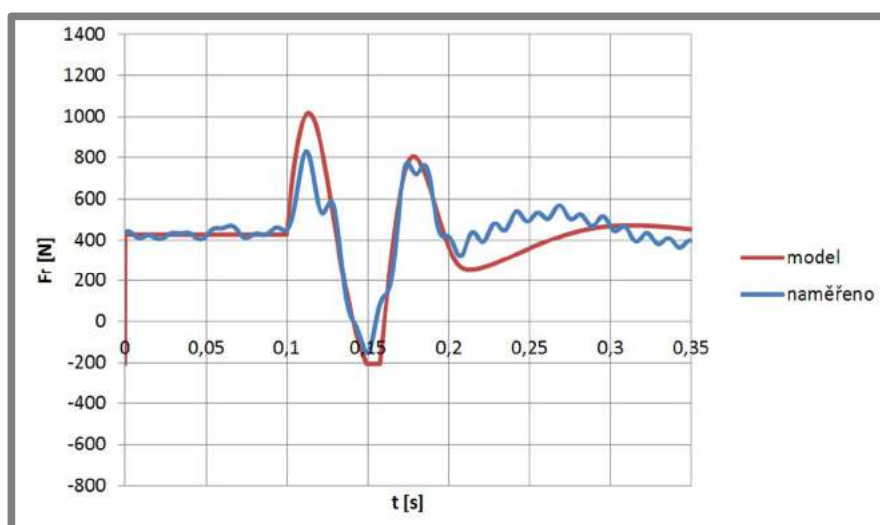
Přítlačná síla kola na vozovku, pasivní režim s proudem 0,1 A



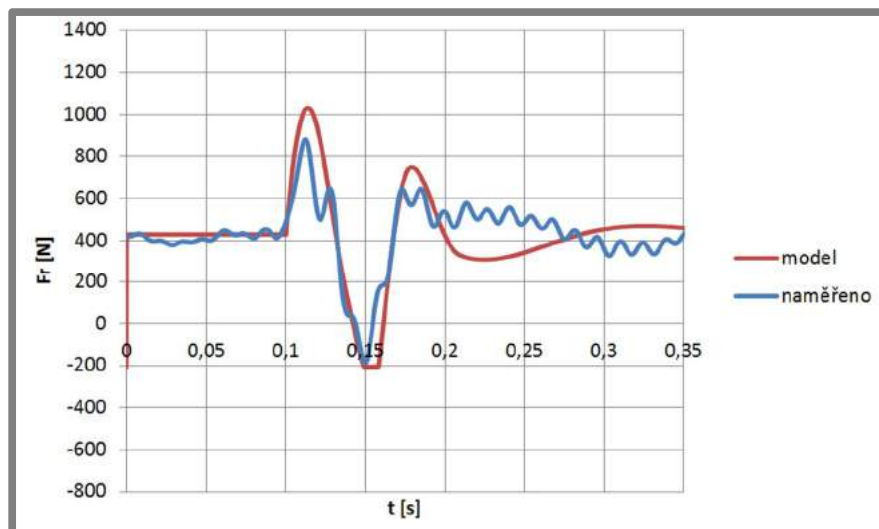
Přítlačná síla kola na vozovku, pasivní režim s proudem 0,2 A



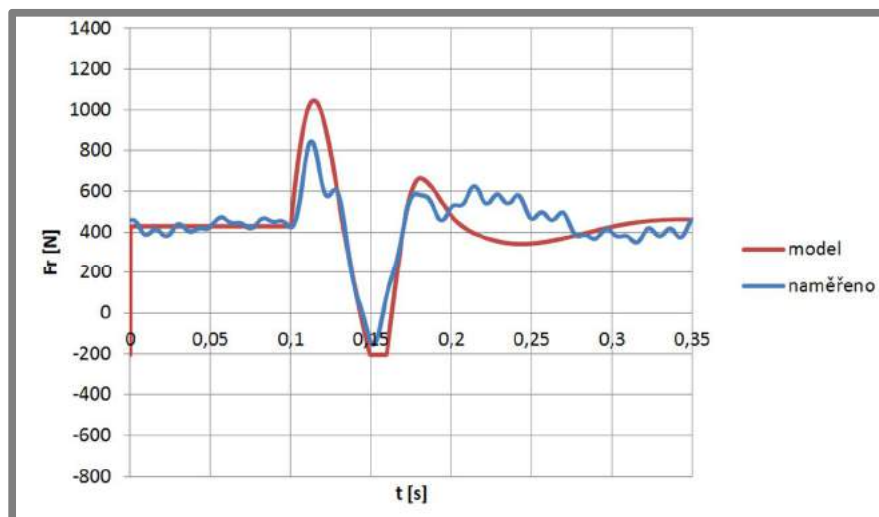
Přítlačná síla kola na vozovku, pasivní režim s proudem 0,3 A



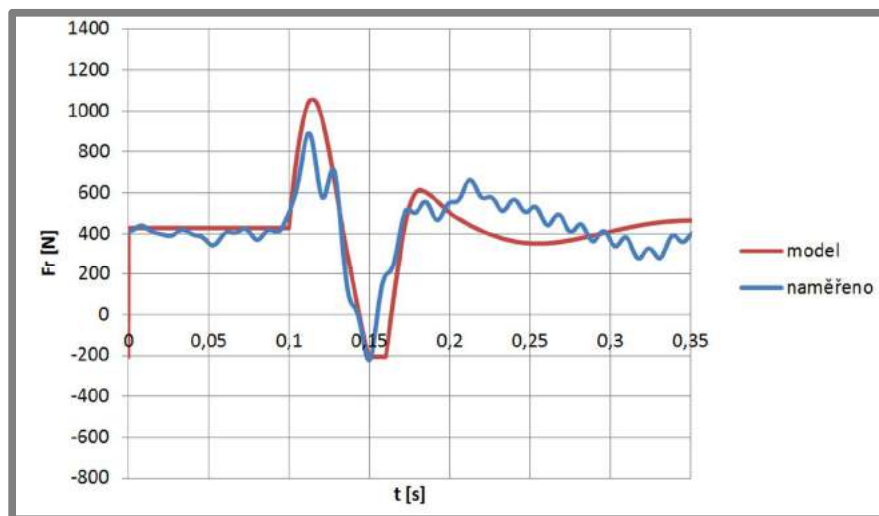
Přítlačná síla kola na vozovku, pasivní režim s proudem 0,4 A



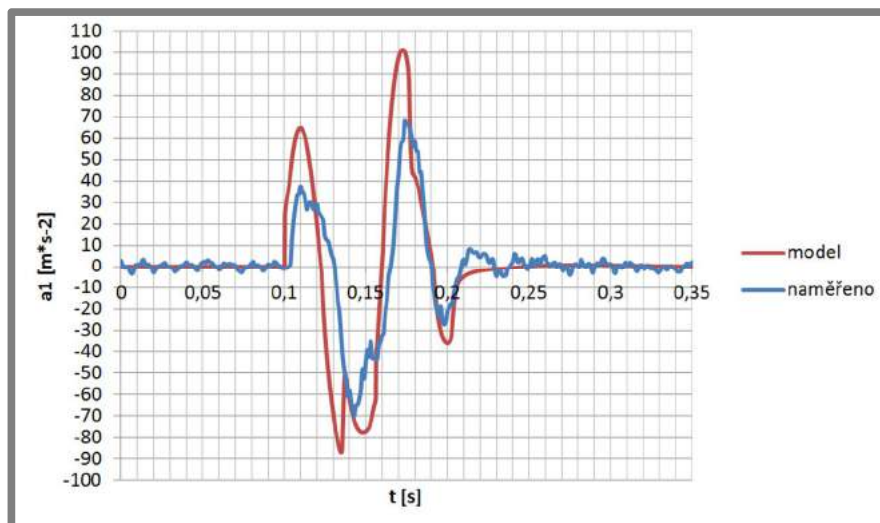
Přítlačná síla kola na vozovku, pasivní režim s proudem 0,5 A



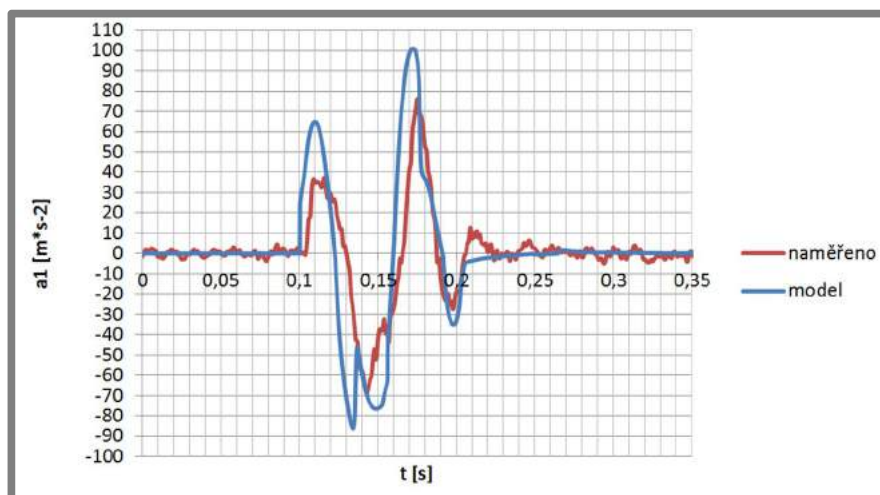
Přítlačná síla kola na vozovku, pasivní režim s proudem 0,8 A



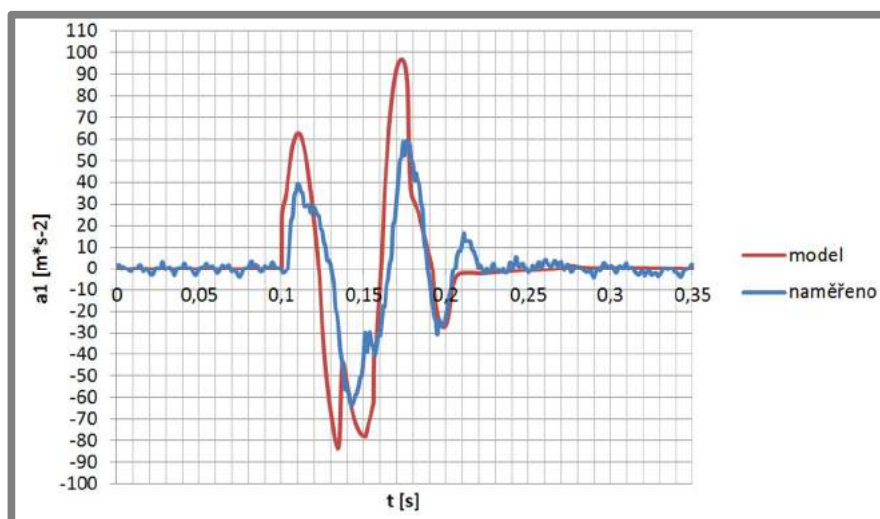
Přítlačná síla kola na vozovku, pasivní režim s proudem 1,2 A



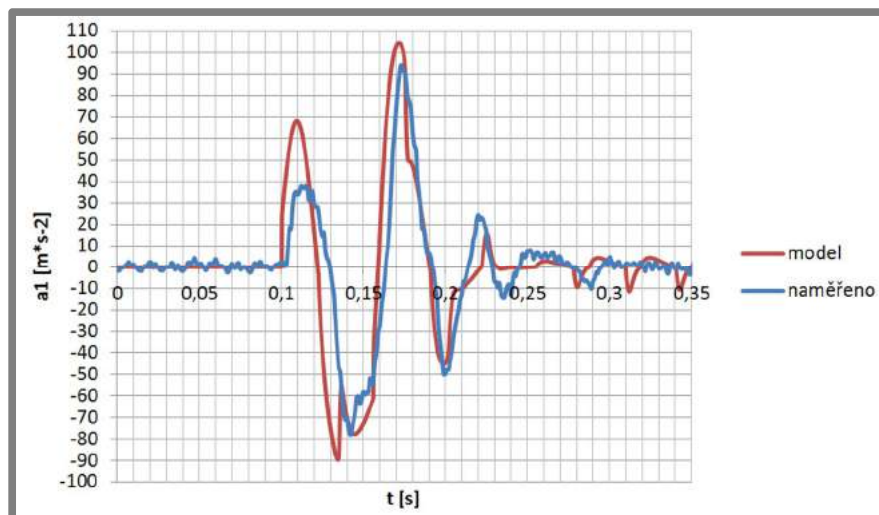
zrychlení neodpružené hmoty, modifikovaný Groundhook s proudem 0,3/1 A



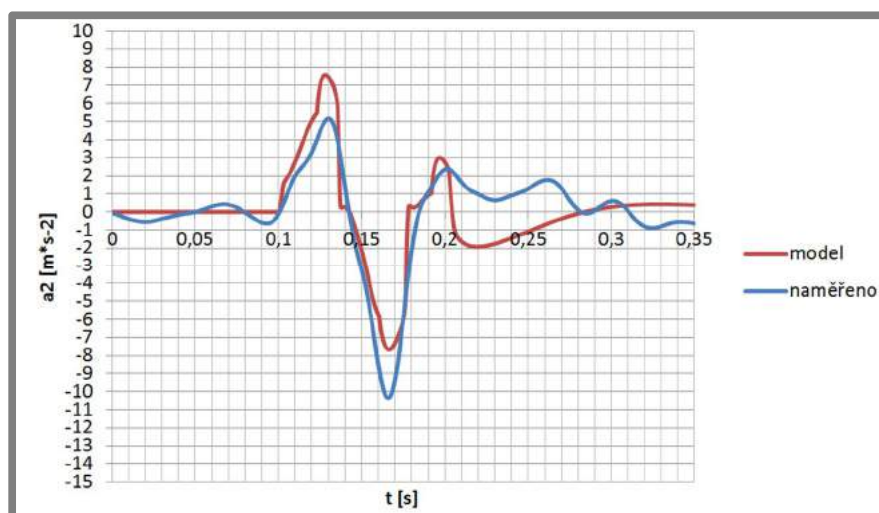
zrychlení neodpružené hmoty, modifikovaný Groundhook s proudem 0,3/2 A



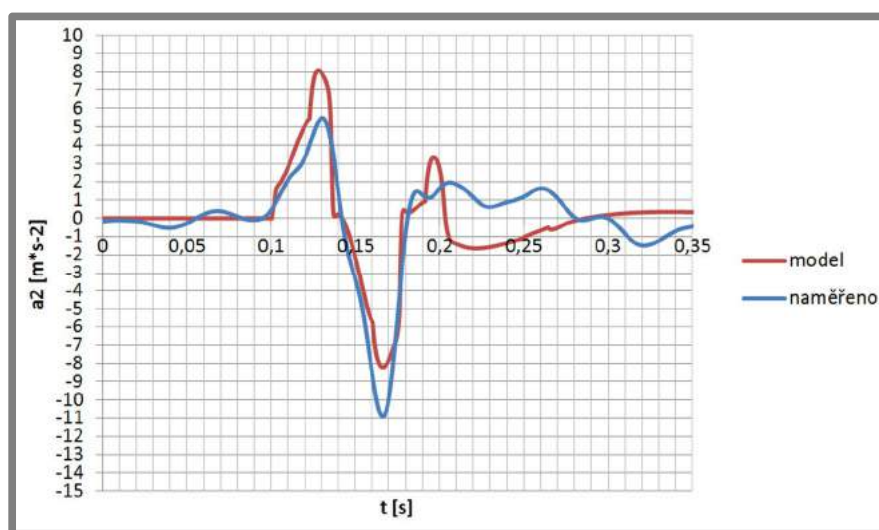
zrychlení neodpružené hmoty, modifikovaný Groundhook s proudem 0,4/2 A



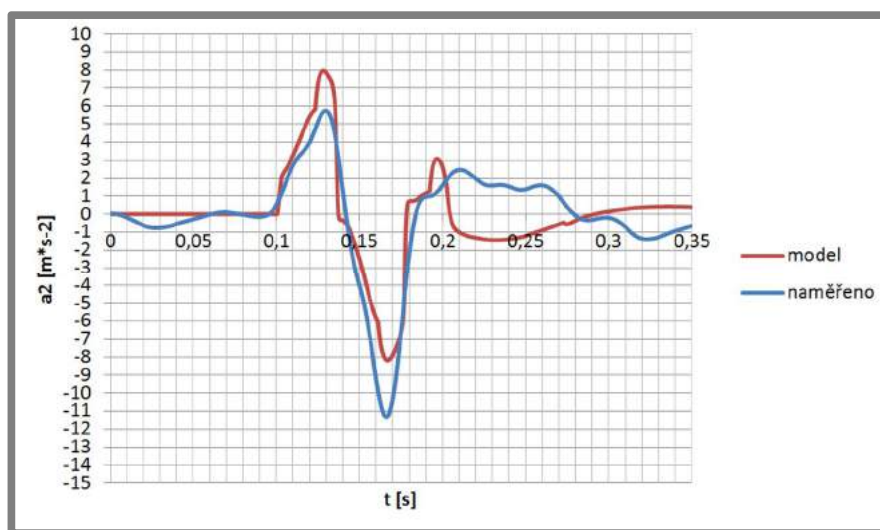
zrychlení neodpružené hmoty, modifikovaný Groundhook s proudem 0/1 A



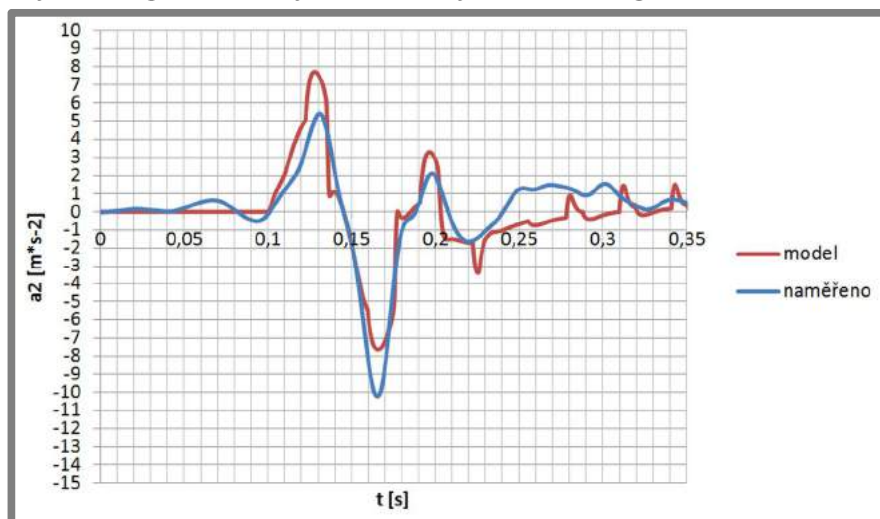
zrychlení odpružené hmoty, modifikovaný Groundhook s proudem 0,3/1 A



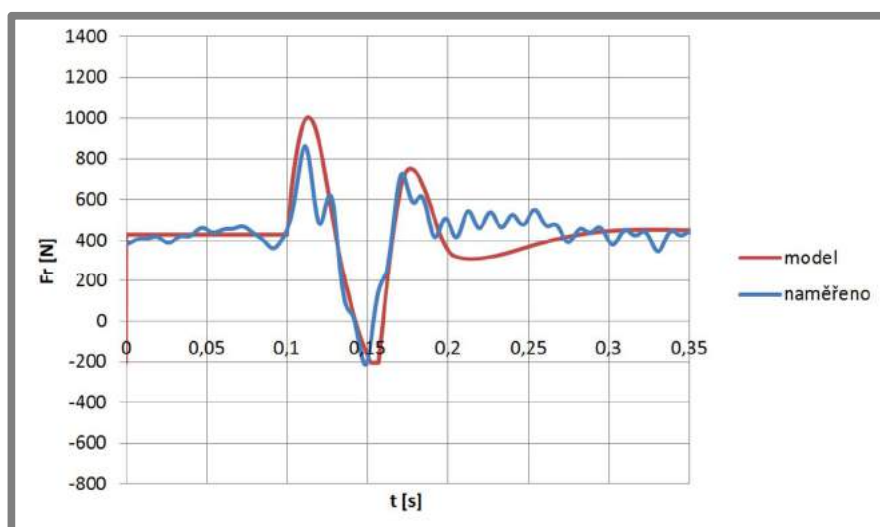
zrychlení odpružené hmoty, modifikovaný Groundhook s proudem 0,3/2 A



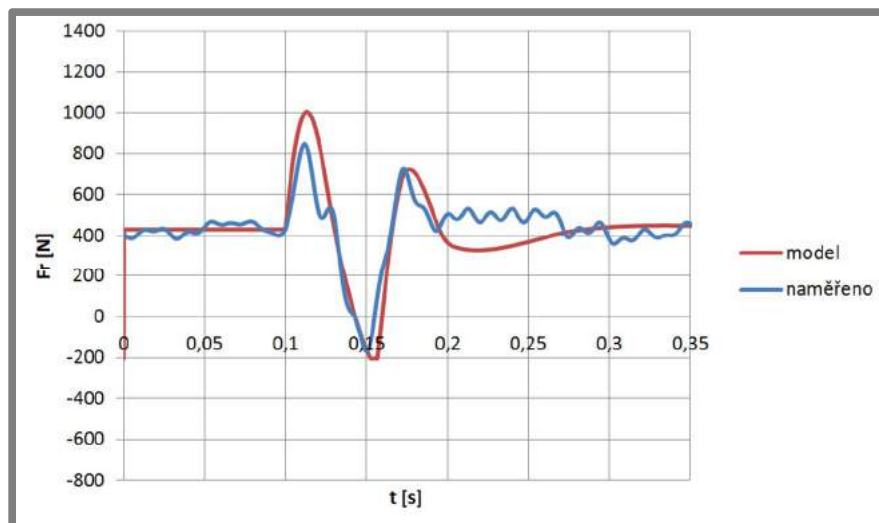
zrychlení odpružené hmoty, modifikovaný Groundhook s proudem 0,4/2 A



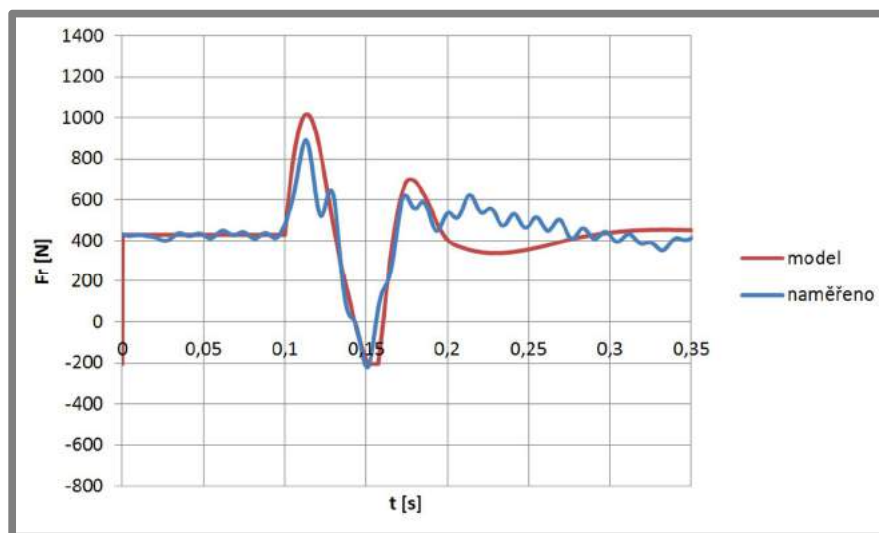
zrychlení odpružené hmoty, modifikovaný Groundhook s proudem 0/1 A



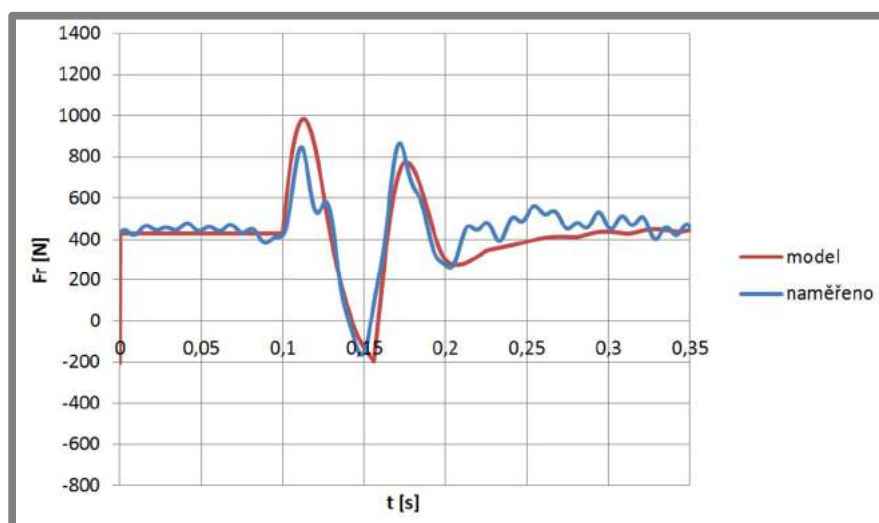
Přítlačná síla kola na vozovku, modifikovaný Groundhook s proudem 0,3/1 A



Přítlačná síla kola na vozovku, modifikovaný Groundhook s proudem 0,3/2 A

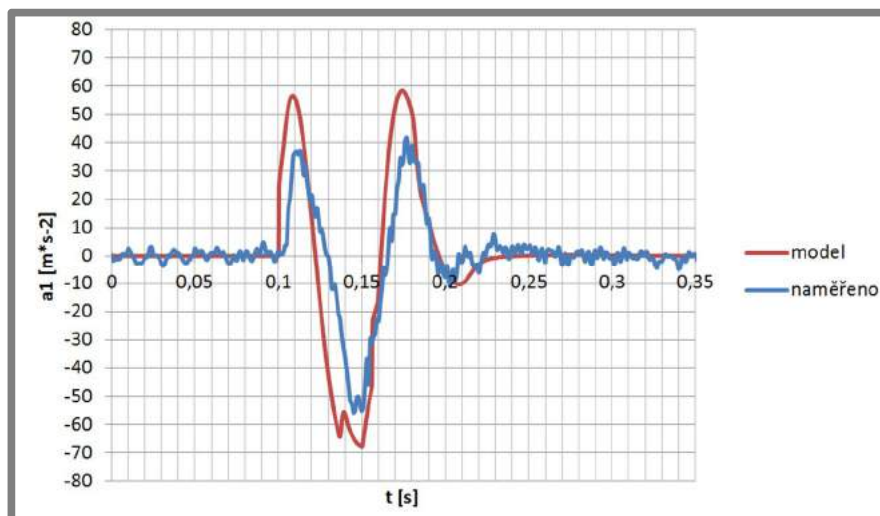


Přítlačná síla kola na vozovku, modifikovaný Groundhook s proudem 0,4/2 A

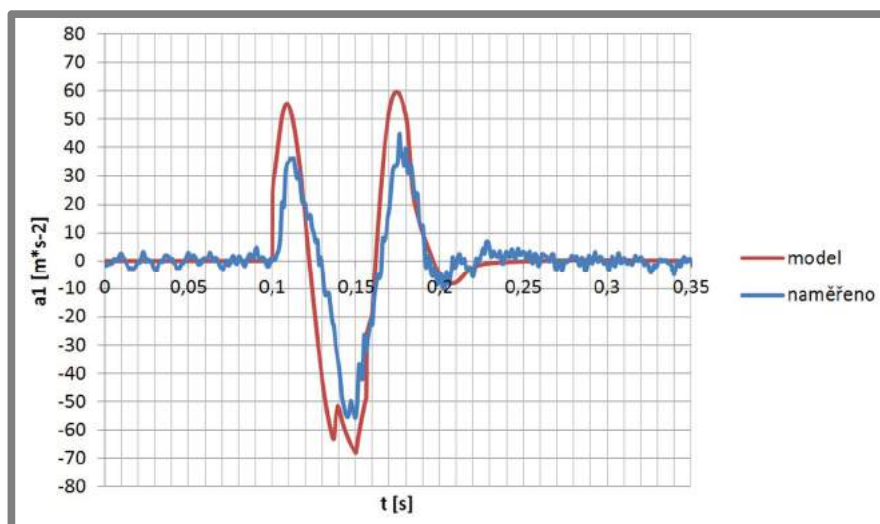


Přítlačná síla kola na vozovku, modifikovaný Groundhook s proudem 0/1 A

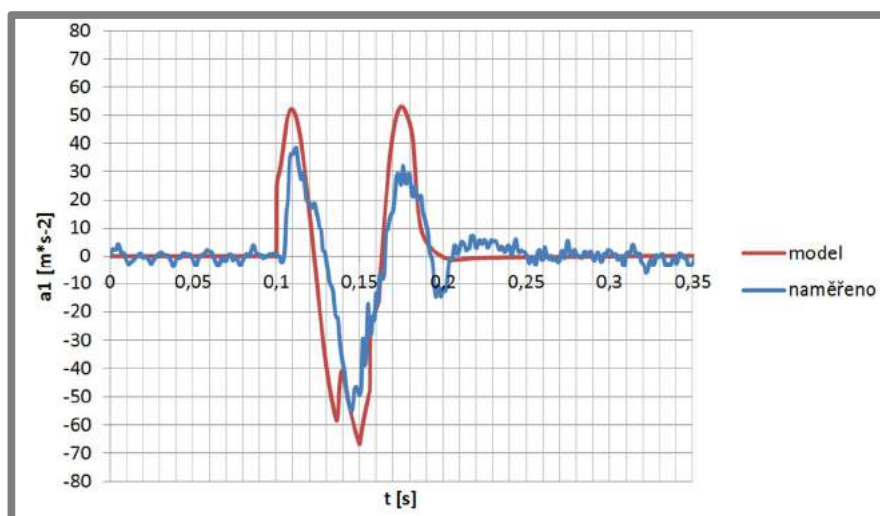
Příloha 2.



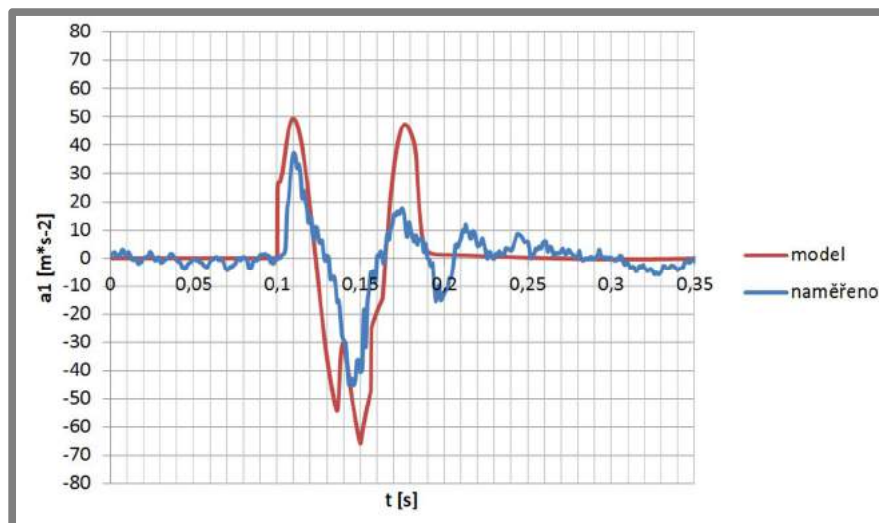
Zrychlení neodpružené hmoty, pasivní režim s proudem 0 A



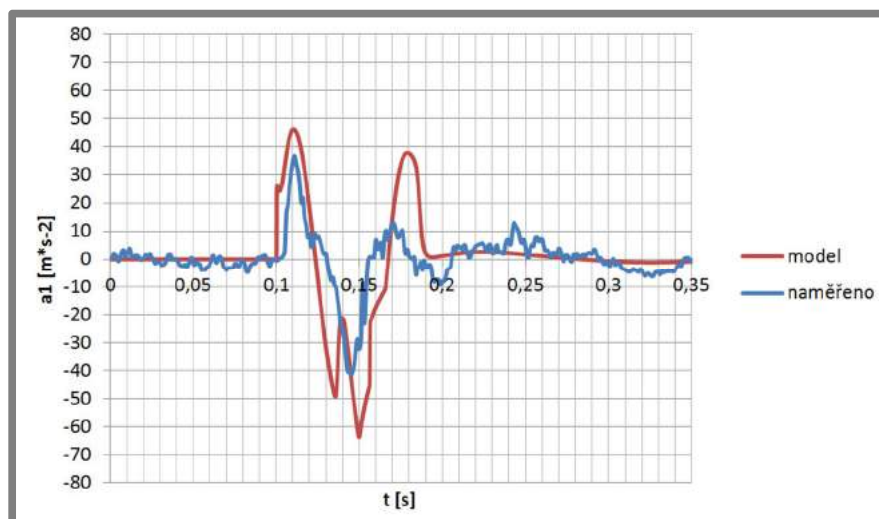
Zrychlení neodpružené hmoty, pasivní režim s proudem 0,1 A



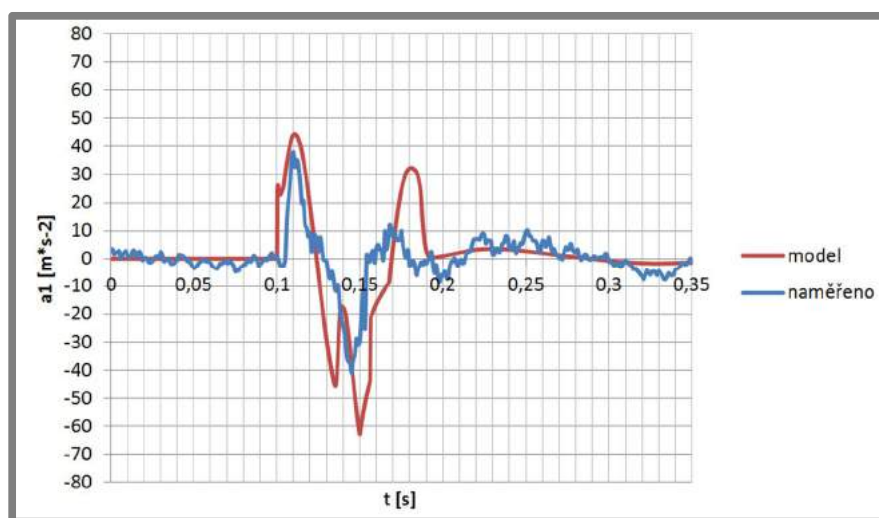
Zrychlení neodpružené hmoty, pasivní režim s proudem 0,2 A



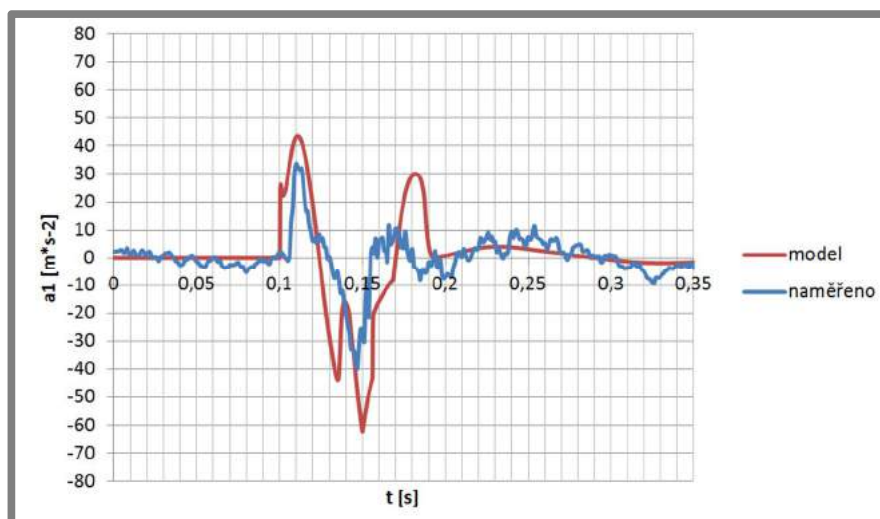
Zrychlení neodpružené hmoty, pasivní režim s proudem 0,3 A



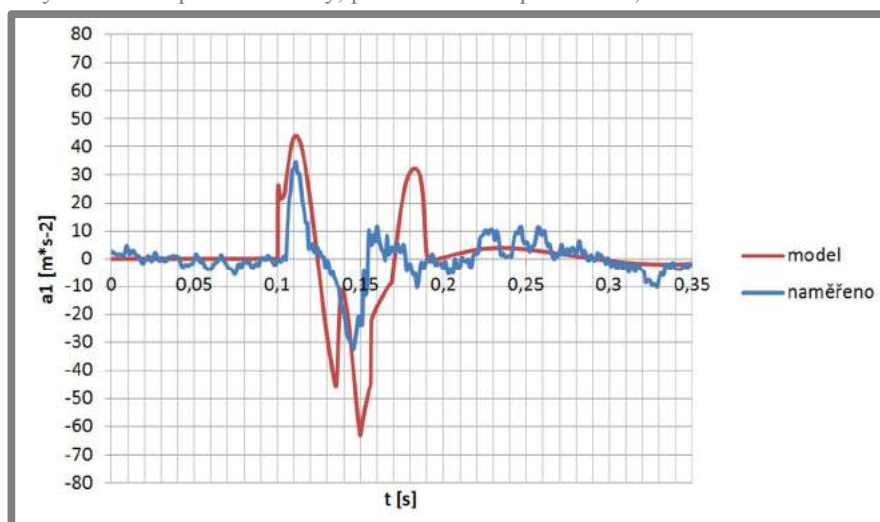
Zrychlení neodpružené hmoty, pasivní režim s proudem 0,4 A



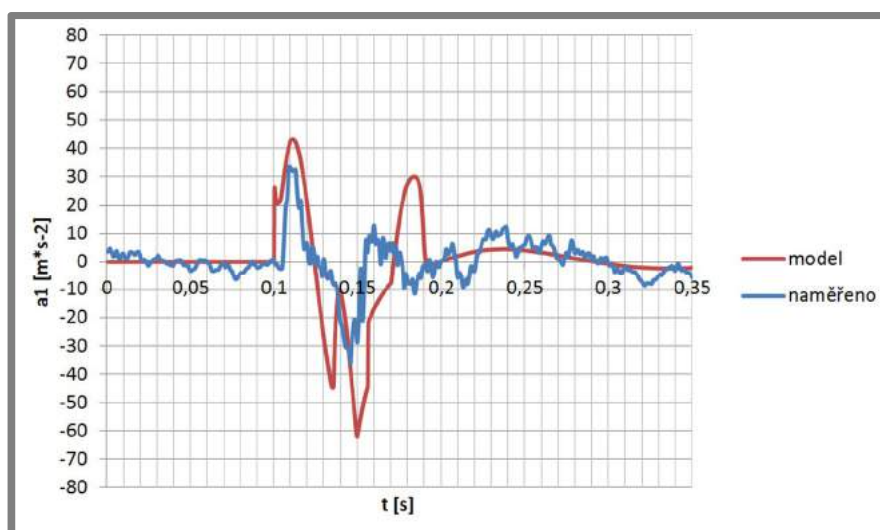
Zrychlení neodpružené hmoty, pasivní režim s proudem 0,5 A



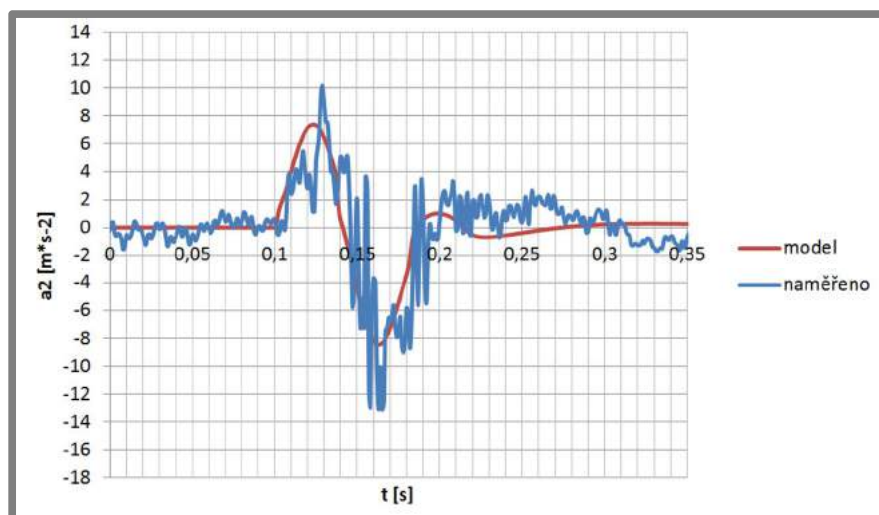
Zrychlení neodpružené hmoty, pasivní režim s proudem 0,6 A



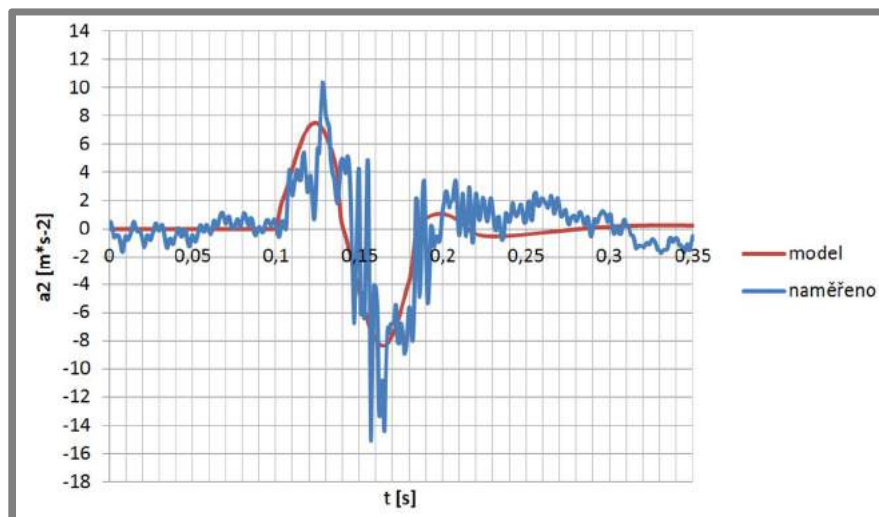
Zrychlení neodpružené hmoty, pasivní režim s proudem 0,7 A



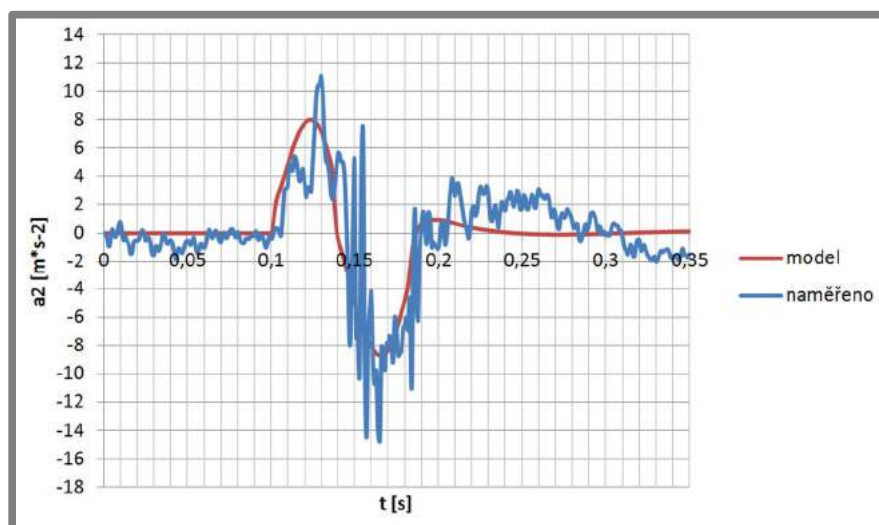
Zrychlení neodpružené hmoty, pasivní režim s proudem 1 A



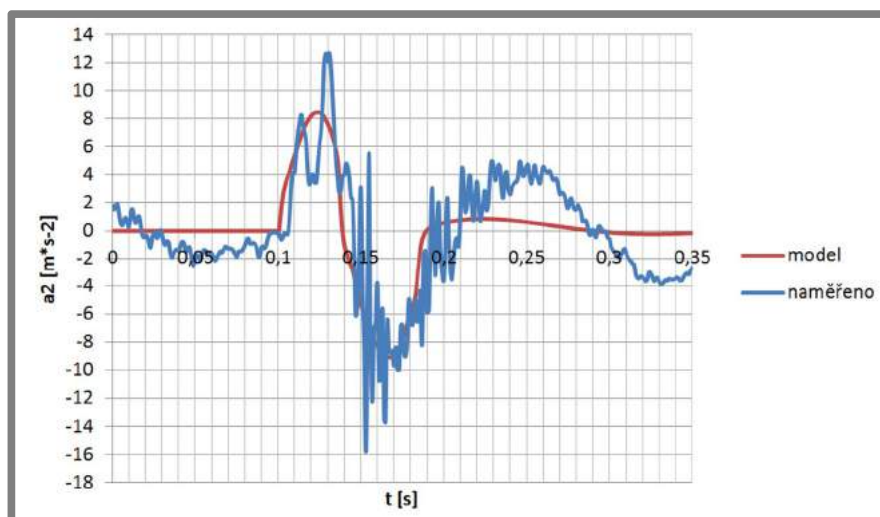
Zrychlení odpružené hmoty, pasivní režim s proudem 0 A



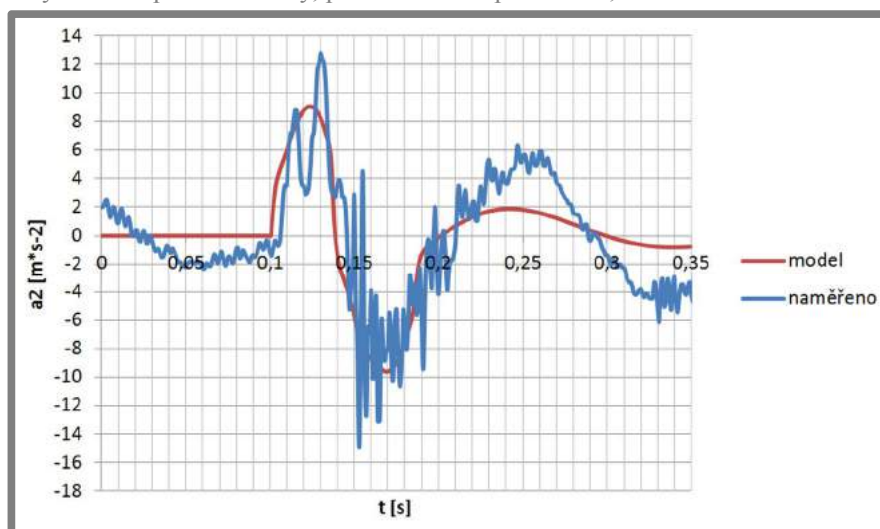
Zrychlení odpružené hmoty, pasivní režim s proudem 0,1 A



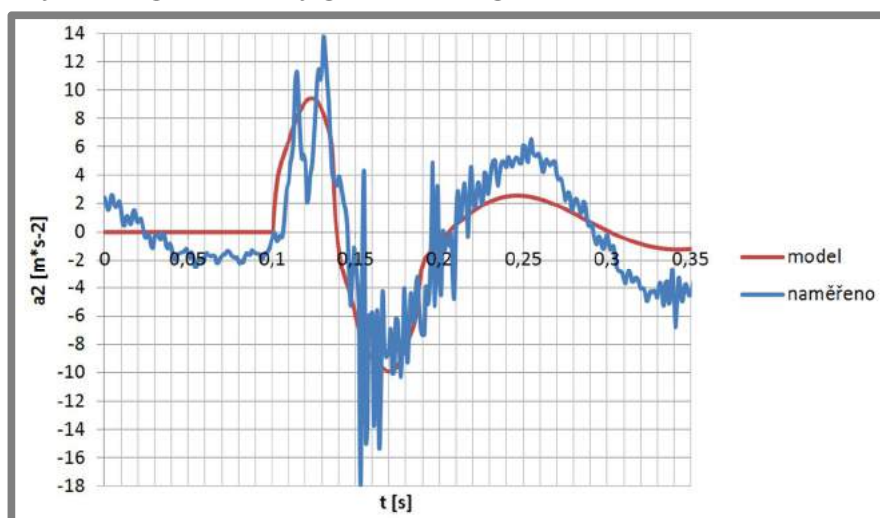
Zrychlení odpružené hmoty, pasivní režim s proudem 0,2 A



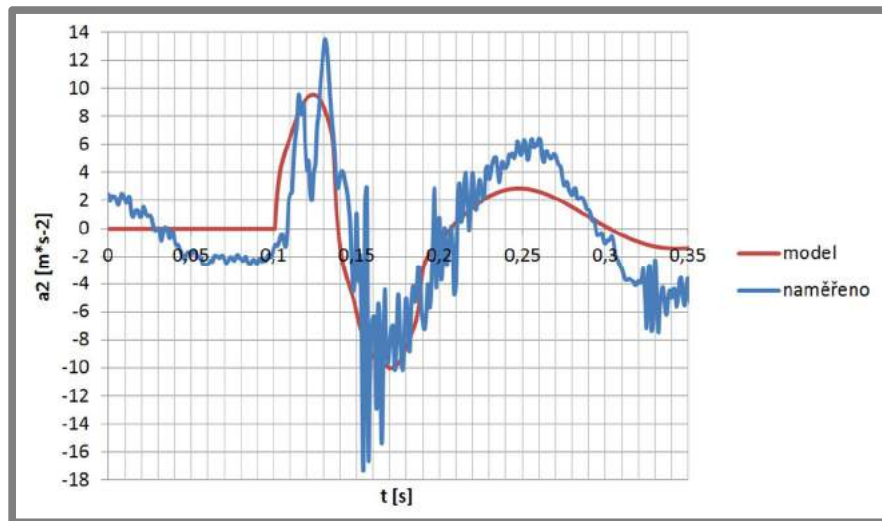
Zrychlení odpružené hmoty, pasivní režim s proudem 0,3 A



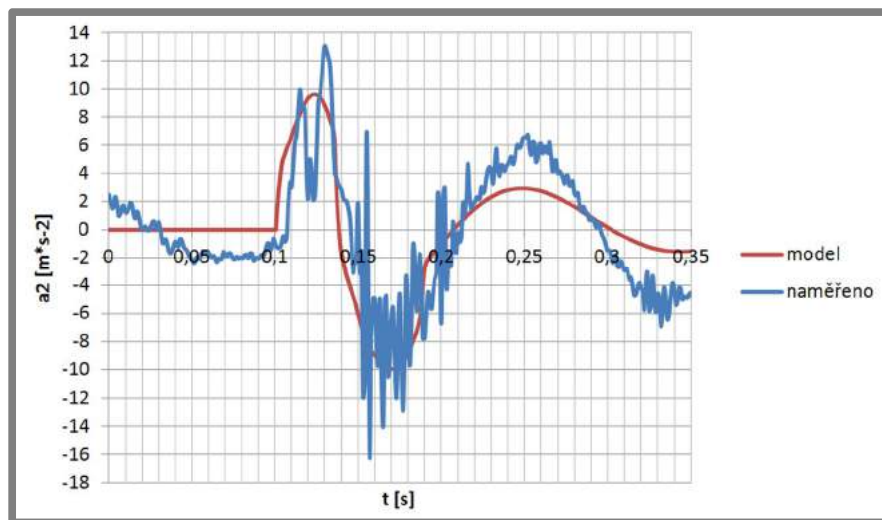
Zrychlení odpružené hmoty, pasivní režim s proudem 0,4 A



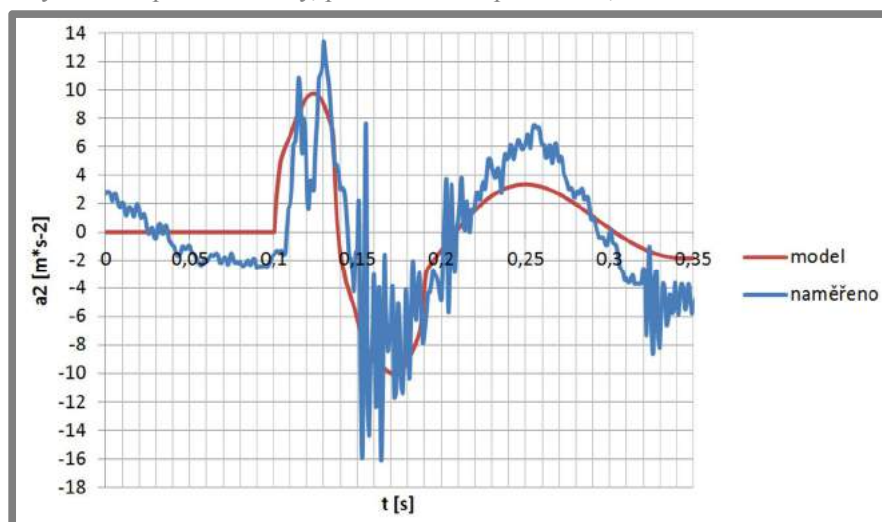
Zrychlení odpružené hmoty, pasivní režim s proudem 0,5 A



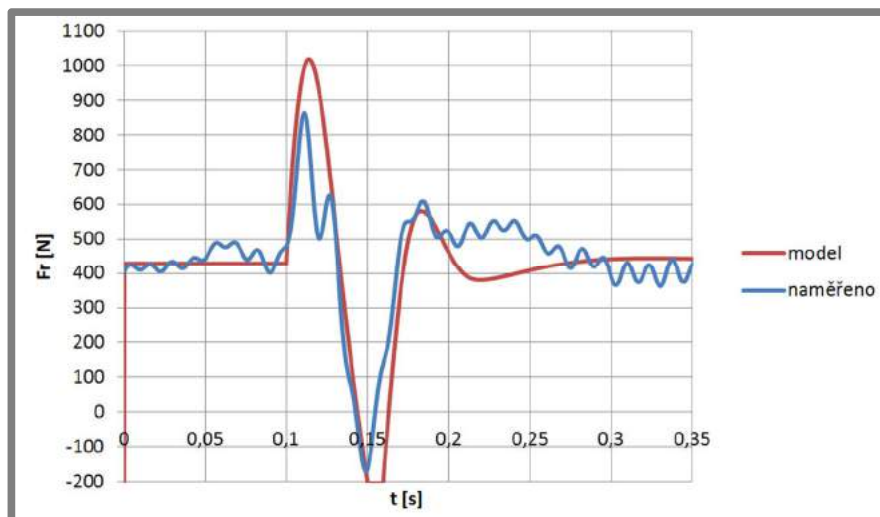
Zrychlení odpružené hmoty, pasivní režim s proudem 0,6 A



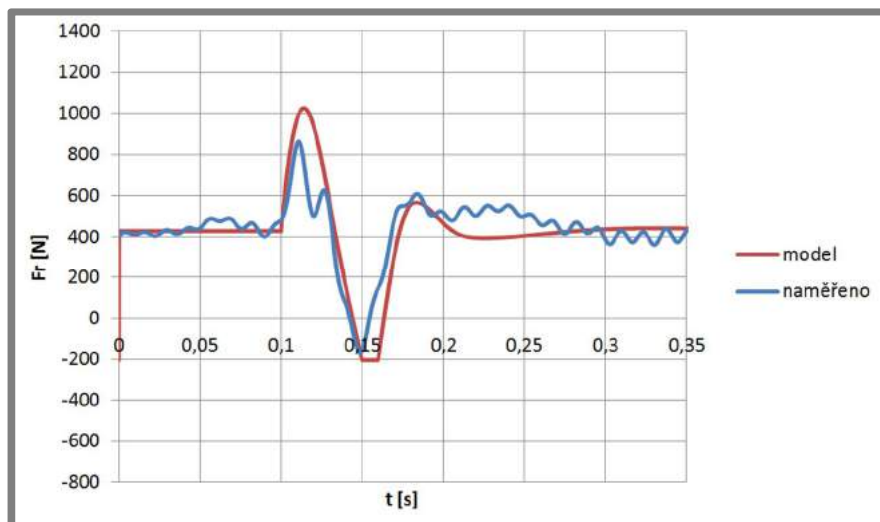
Zrychlení odpružené hmoty, pasivní režim s proudem 0,7 A



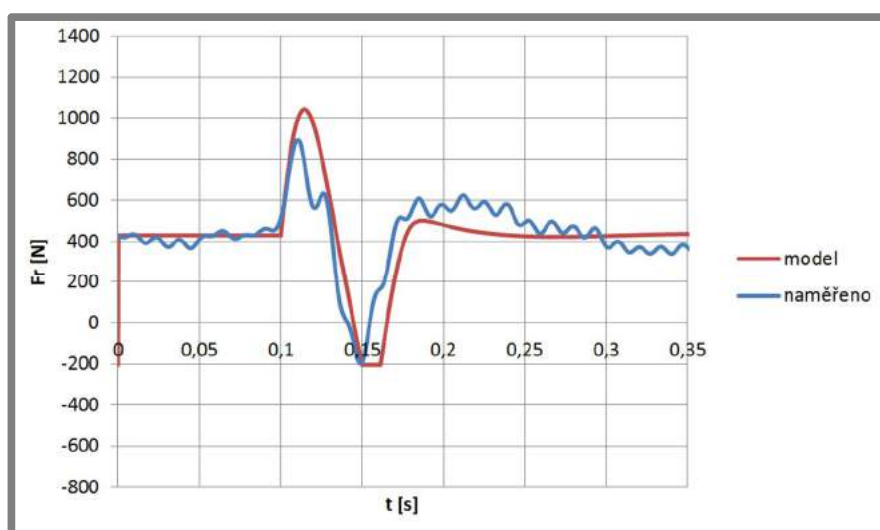
Zrychlení odpružené hmoty, pasivní režim s proudem 1 A



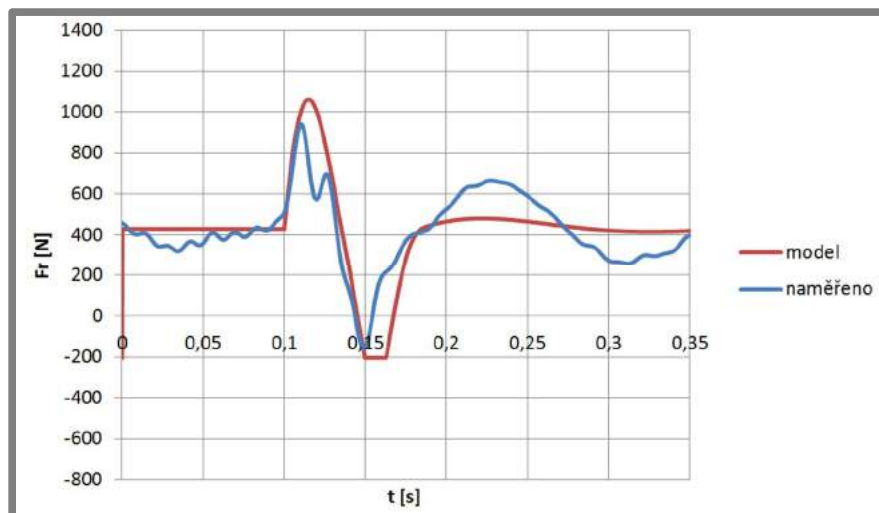
Přítlačná síla kola na vozovku, pasivní režim s proudem 0 A



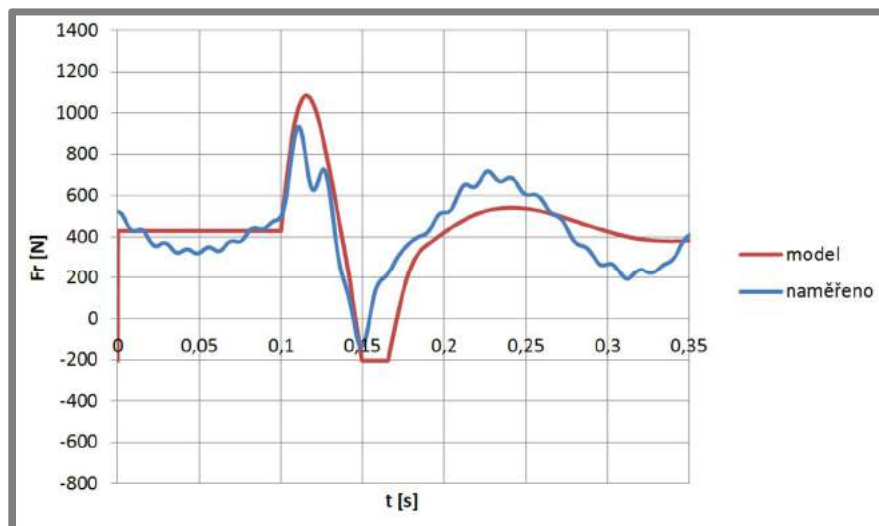
Přítlačná síla kola na vozovku, pasivní režim s proudem 0,1 A



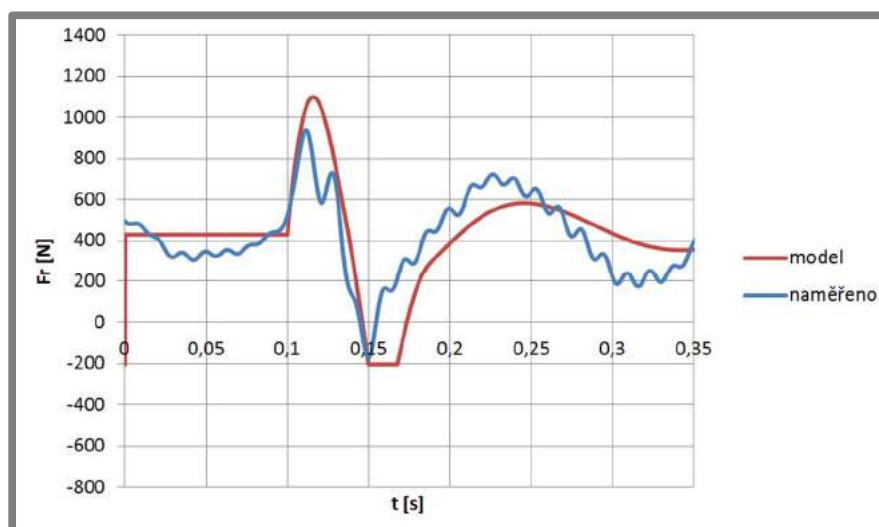
Přítlačná síla kola na vozovku, pasivní režim s proudem 0,2 A



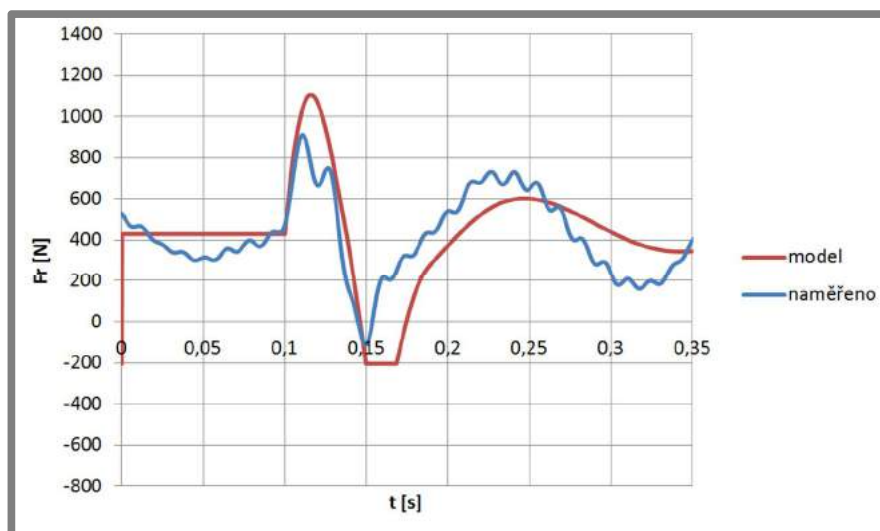
Přítlačná síla kola na vozovku, pasivní režim s proudem 0,3 A



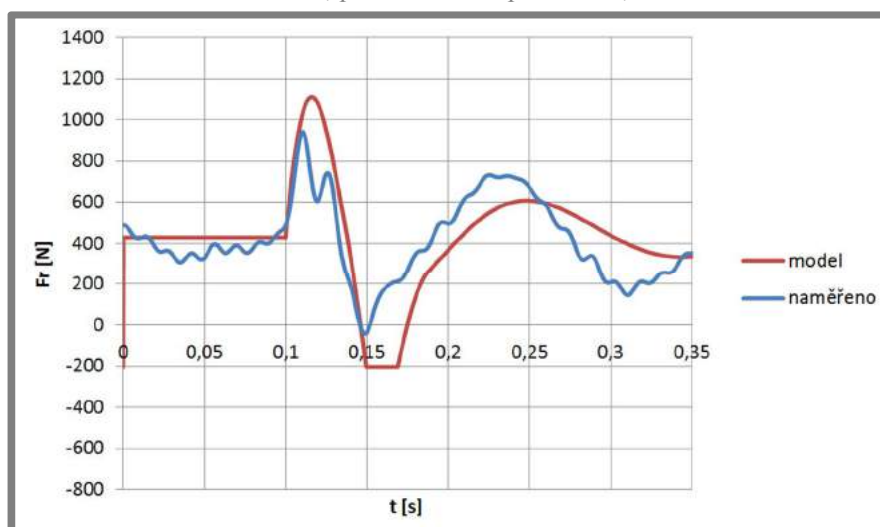
Přítlačná síla kola na vozovku, pasivní režim s proudem 0,4 A



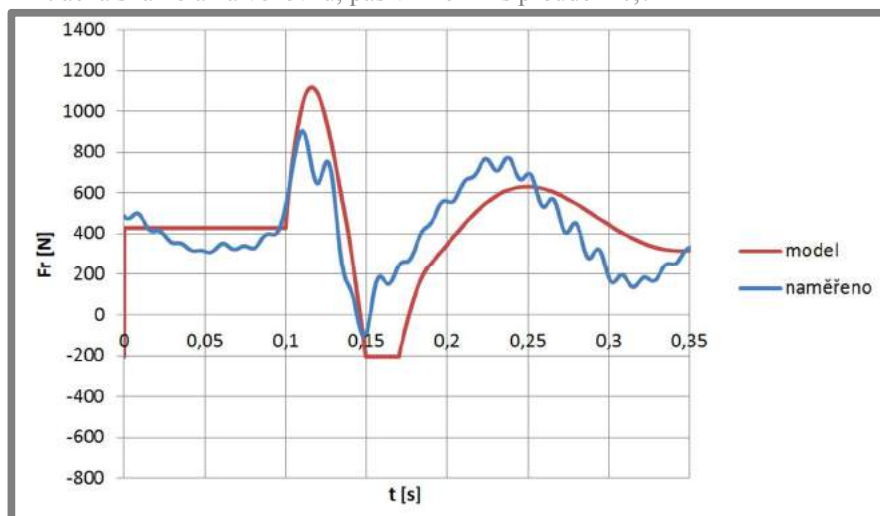
Přítlačná síla kola na vozovku, pasivní režim s proudem 0,5 A



Přítlačná síla kola na vozovku, pasivní režim s proudem 0,6 A

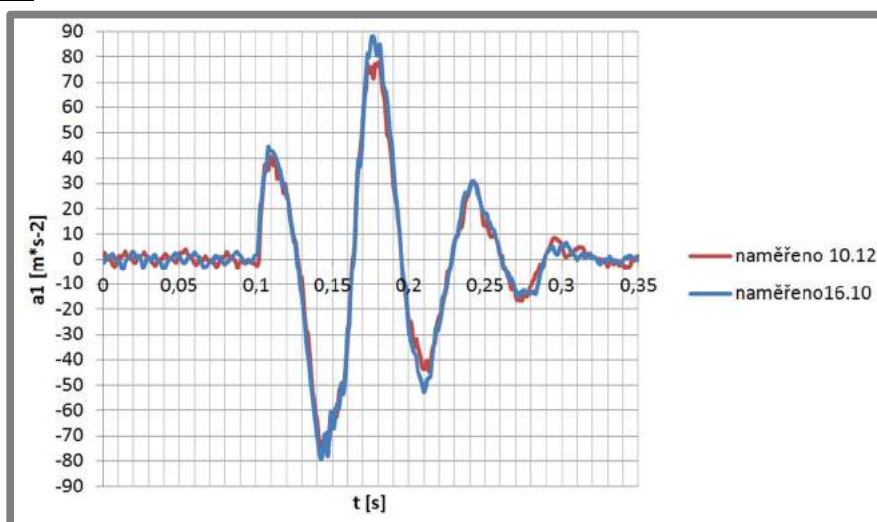


Přítlačná síla kola na vozovku, pasivní režim s proudem 0,7 A

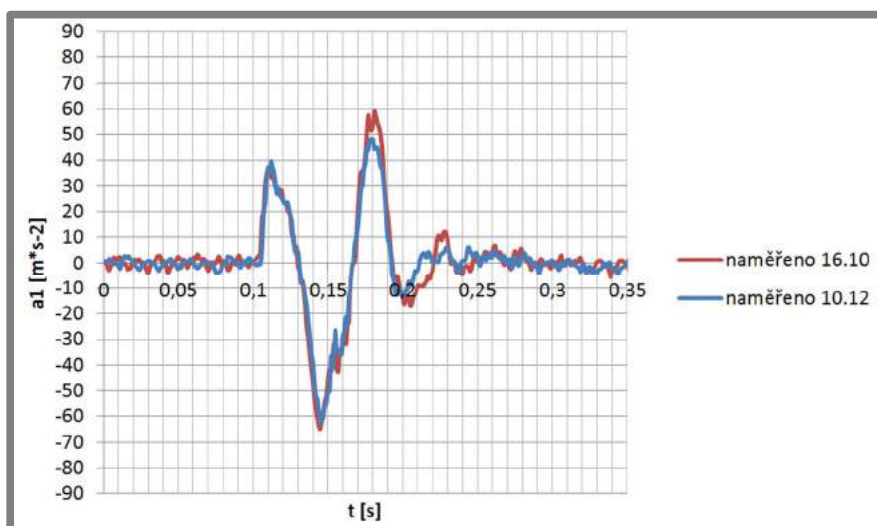


Přítlačná síla kola na vozovku, pasivní režim s proudem 1 A

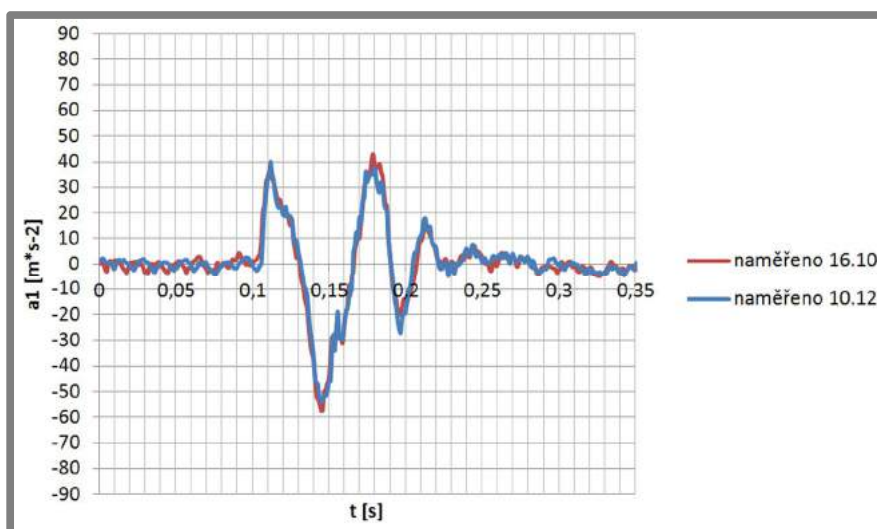
Příloha 3.



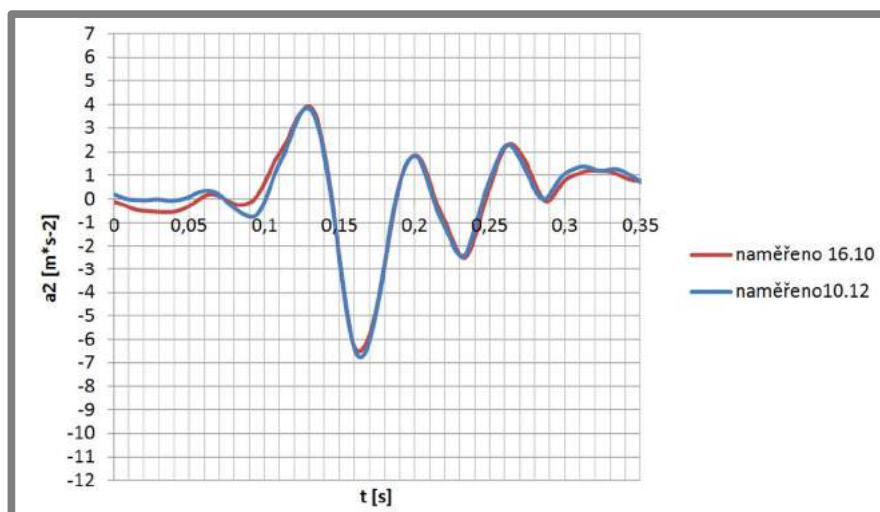
Zrychlení neodpružené hmoty, pasivní režim s proudem 0 A



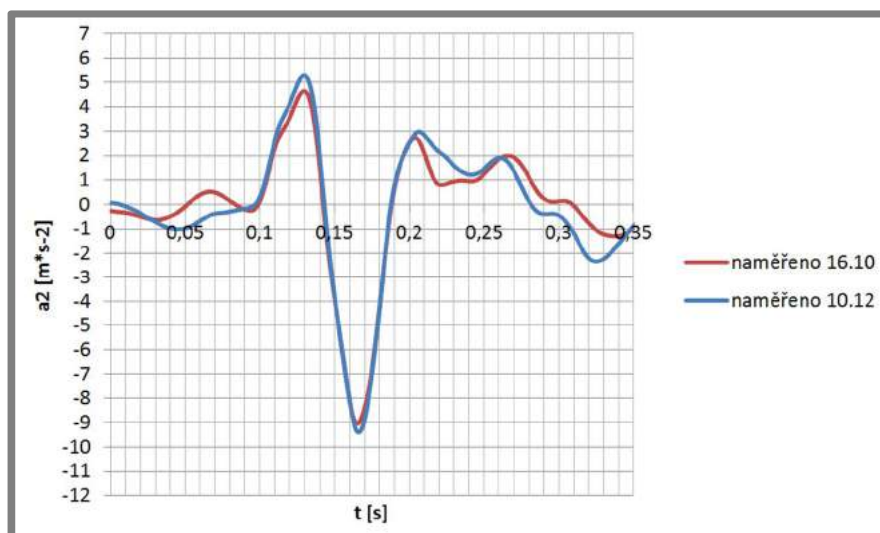
Zrychlení neodpružené hmoty, pasivní režim s proudem 0,5 A



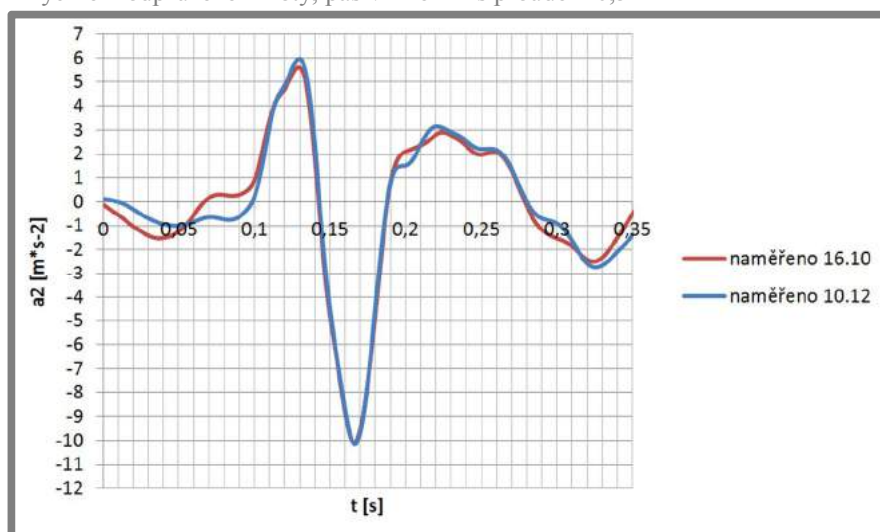
Zrychlení neodpružené hmoty, pasivní režim s proudem 1,2 A



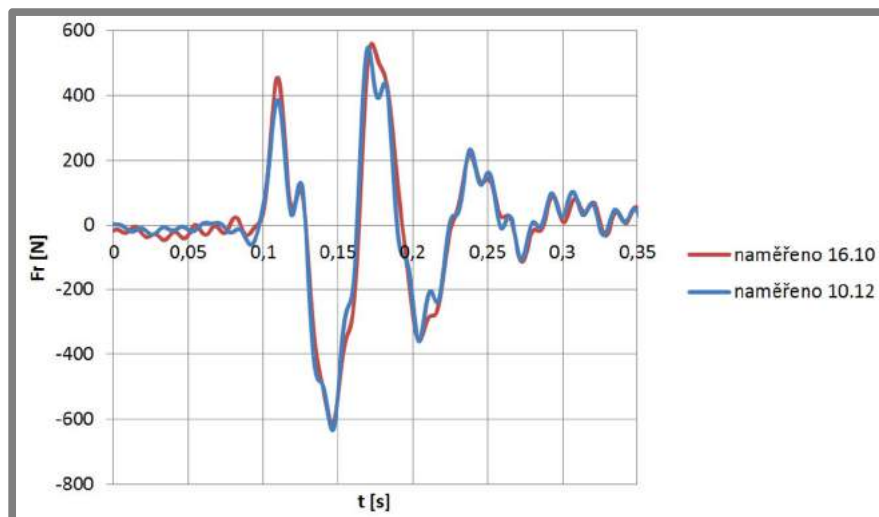
Zrychlení odpružené hmoty, pasivní režim s proudem 0 A



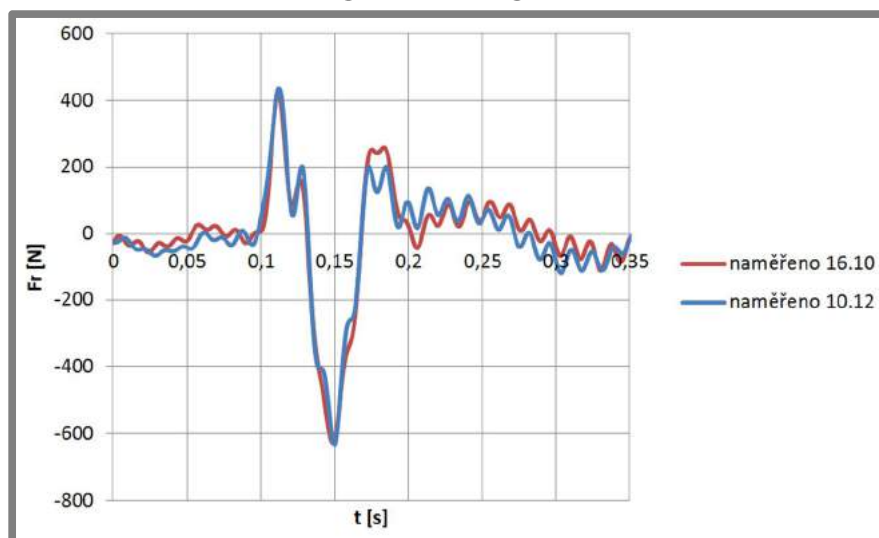
Zrychlení odpružené hmoty, pasivní režim s proudem 0,5 A



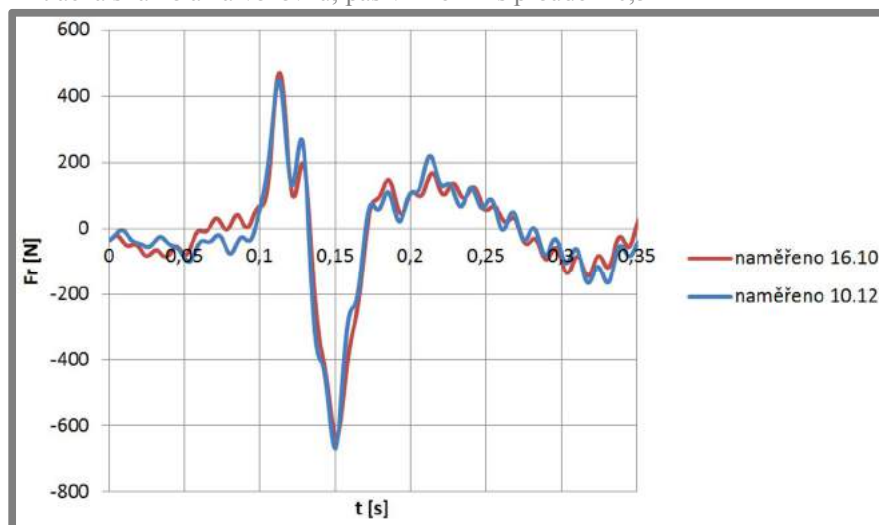
Zrychlení odpružené hmoty, pasivní režim s proudem 1,2 A



Přítlačná síla kola na vozovku, pasivní režim s proudem 0 A



Přítlačná síla kola na vozovku, pasivní režim s proudem 0,5 A



Přítlačná síla kola na vozovku, pasivní režim s proudem 1,2 A

TESTING OF CAR SUSPENSION WITH FAST MR DAMPER CONTROLLED BY MODIFIED GROUNDHOOK ALGORITHM

Z. Strecker*, P. Čípek, J. Roupec, M. Kubík, O. Macháček

Abstract: The paper describes the comparison of traditional passive suspension to the suspension with MR damper controlled by on/off Modified groundhook algorithm. The MR damper used in the experimental trolley together with current controller has exceptionally short time response of force on control signal – up to 1.5 ms. The MR damper was mounted into experimental trolley, which is scaled quarter suspension car model. The experimental trolley was riding on the road simulator over a bump. The suspension quality was evaluated according to the standard deviation of sprung mass acceleration (the lower value means higher comfort) and according to the standard deviation of force (the lower value means better grip). The results show that suspension system controlled by Modified groundhook algorithm outperforms passive system, but the level of improvement is dependent on the setting of current respectively damping in on and off state.

Keywords: Modified groundhook, fast MR damper, response time, tyre grip, comfort

1. Introduction

The possible wheel grip provided by suspension with passive dampers is limited. Many simulations proved that higher grip can be achieved when semiactive algorithms controlling the amount of dissipated energy are used (Poussot-vassal et al. (2012)). These semiactive suspension systems can employ different types of controllable dampers. Valášek et al. (1998) used CDC damper for controlling the Truck suspension with Groundhook algorithm. Ahmadian et al. (2005) simulated semiactive suspension with magnetorheological damper.

The simulations, however, often use idealized models of dampers with zero time response. In real situations, the time response of MR damper can be in tens of milliseconds (Koo et al. (2006)). Eslaminasab and Golnaraghi (2008) showed the significant influence of the damper time response on semiactive suspension performance on 1 DOF system. Strecker et al. (2015) implemented time response of the MR damper into the quarter model of car suspension. Results from simulations showed that suspension controlled by Groundhook algorithm cannot offer better wheel grip when MR damper with long time response is used. Experiment confirmed no improvement in tyre grip when automotive MR damper with response time 8 ms was used in experimental trolley. The improvement in grip, predicted by the simulations with MR damper with response time 2 ms, was not experimentally evaluated, because it was not possible to obtain MR damper with such low response time.

The reasons of long response time of MR devices was described in Maas and Güth (2011). They also designed a MR clutch with very short time response. Based on this knowledge, Strecker et al. (2015) designed a fast MR damper, with time response of damper force on control signal up to 1.5 ms. Such time response can be reached only in case when fast current controller with voltage overdrive is used.

The MR damper with fast time response was never experimentally evaluated in car suspension. This paper describes the performance of such damper in semiactive suspension in comparison with passive damper.

2. Methods

The experimental setup is in Fig. 1:

*All authors: Institute of Machine and Industrial Design, Brno Technical University, Technická 2896/2; 616 69, Brno; CZ,
*strecker@fme.vutbr.cz

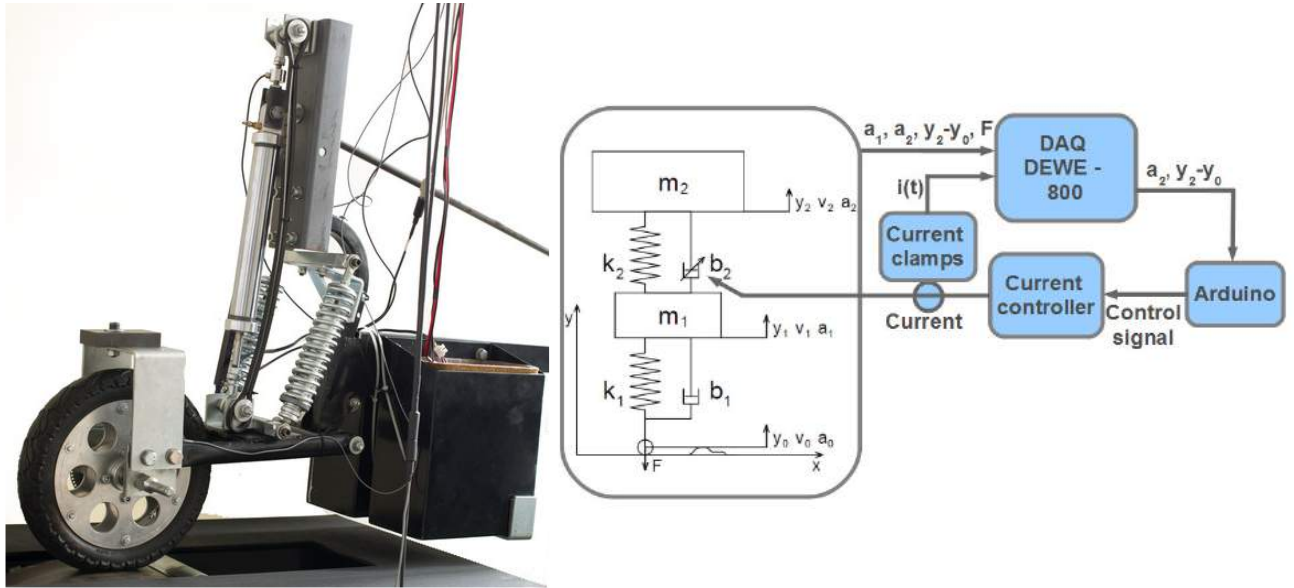


Fig. 1: The experimental trolley (left) and the block scheme of experimental setup

The experiment was conducted on a quarter car suspension model (Fig. 1) with unsprung mass m_1 , sprung mass m_2 , tyre stiffness k_1 , main spring stiffness k_2 , damping of the tyre b_1 and damper with variable damping b_2 . The damping is dependent on piston velocity and electric current in the MR damper coil (Fig. 2). The other parameters are in Tab. 1. The experimental trolley was riding on the road simulator with the velocity 10 km/h over speed bump with the length 55 mm and height 21 mm.

Tab. 1: The parameters of experimental trolley

Dynamic tyre stiffness k_1 [N/mm]	50,2
Sprung mass m_2 [kg]	42.2
Unsprung mass m_1 [kg]	6.7
Overall stiffness k_2 [N/mm]	7,4

The measured force-velocity dependency for the currents between 0-2 A is in Fig. 2:

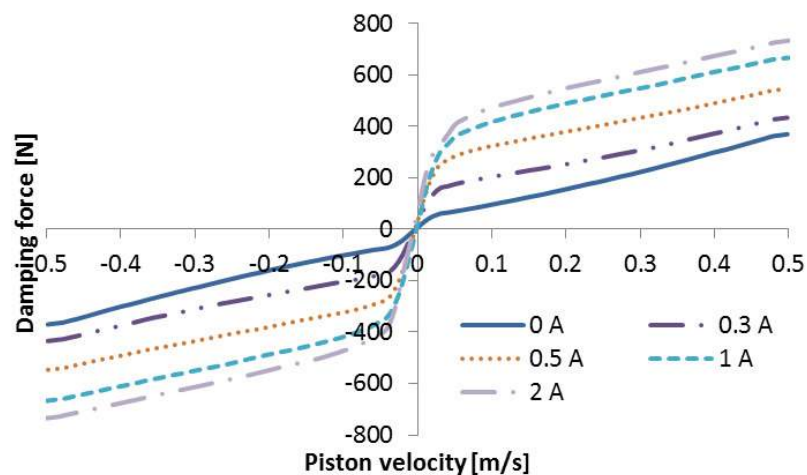


Fig. 2: F-v dependency of MR damper

The suspension quality was evaluated according to the standard deviation of sprung mass acceleration (1) which reflects comfort (the lower sprung mass acceleration standard deviation means better quality) and standard deviation of force (2) which reflects the tyre grip (the lower value means better grip):

$$\sigma(a_2) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_{2(i)}^2} \quad (1)$$

$$\sigma(F) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_i - F_{stat})^2} \quad (2)$$

The suspension quality was evaluated for the whole range of the possible passive settings and for Modified groundhook algorithm. In this settings, the electric current to the coil was switched between two states – with low current I_L (low damping) and high current I_H (high damping). The rule for switching between these two states was according to the equation (3).

$$\begin{aligned} a_1(v_2 - v_1) &\geq 0 \Rightarrow I = I_H \\ a_1(v_2 - v_1) &< 0 \Rightarrow I = I_L \end{aligned} \quad (3)$$

The signals with acceleration of sprung mass, unsprung mass, relative displacement and force of the wheel to the road were sampled at 5 kHz and recorded by DEWE-800 measurement station. The signals with relative displacement and acceleration of unsprung mass were also used as input for control loop programmed in Arduino Due board (Fig. 2 right). The control loop was counting the output signal corresponding to the electric current I according to the equation (3). The relative velocity of sprung and unsprung mass was calculated from the rate relative displacement divided by control loop periode. The signal with relative velocity was filtered by low-pass IIR filter with the cutoff frequency 360 Hz.

3. Results and discussion

The results are in Fig. 3. The passive setting for the current 0 A exhibits the best comfort, but the grip is the worst. With the rising current up to 0.5 A, the grip is improving, but the comfort is getting worse. The use of currents higher than 0.5 A does not bring any advantage, because both grip and comfort are getting worse.

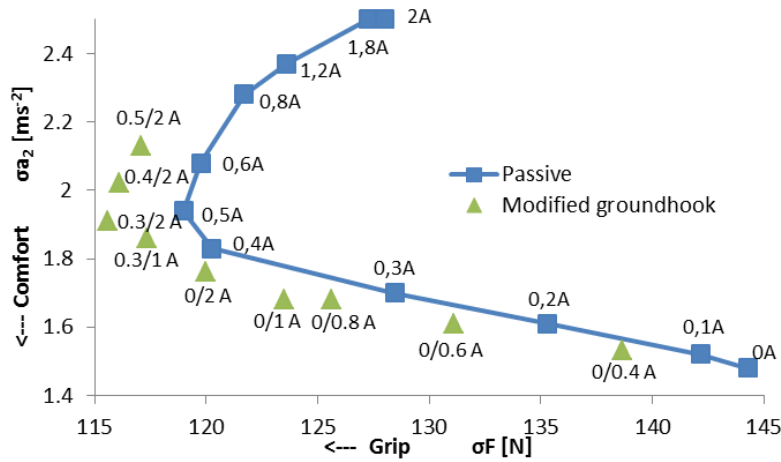


Fig. 3: Comparison of passive and modified groundhook controlled suspension

Suspension controlled by Modified groundhook algorithm exhibits better performance than passive suspension for all settings. When the current for low damping I_L was 0 A, the comfort of suspension was better than for passive settings with the same level of the grip. For achieving better grip than any passive setting, it was necessary to increase I_L . The best grip was reached for $I_L = 0.3$ A and $I_H = 2$ A.

Fig. 4 shows the courses of unsprung mass acceleration and filtered relative velocity together with ideal desired current and the real current. It can be seen that the course of real current is delayed in comparison with desired current and especially for small amplitudes of relative velocity, the current is switched not exactly according to the algorithm. These differences are probably caused by delay from IIR low pass filter used for relative velocity and the noise in the signal.

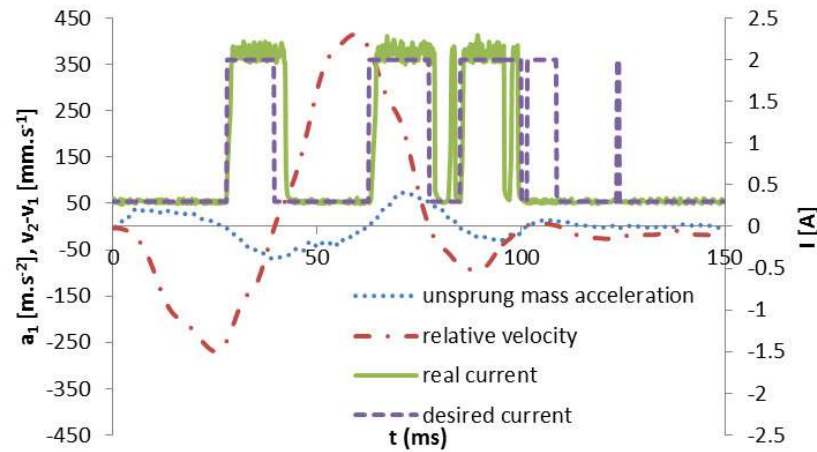


Fig. 4: The courses of current switching

4. Conclusions

The results from measurement showed that semiactive suspension with fast MR damper controlled by Modified groundhook algorithm is able to outperform any passive setting especially in tyre grip. The suspension performance is however sensitive on setting of the currents I_H and I_L . The measurement was conducted only for one type of bump with relatively high amplitudes of unsprung mass acceleration and relative velocity amplitudes. The switching of the current to the MR damper for small amplitudes was not exactly according to the algorithm. For smoother roads with smaller wheel disturbances, it will be necessary to use sensors with higher sensitivity and lower noise.

Acknowledgement

The research leading to these results has received funding from the MEYS under the National Sustainability Programme I (Project LO1202), FSI-S-14-2329, FEKT/FSI-J-15-2777 and GAČR 13-31834P.

References

- Ahmadian, M., Goncalves, F.D. & Sandu, C. (2005) An experimental analysis of suitability of various semiactive control methods for magneto rheological vehicle suspensions, in: Smart Structures and Materials 2005: Damping and Isolation, pp. 208–216
- Eslaminasab, N. & Golnaraghi, M.F. (2008) The effect of time delay of the semi-active dampers on the performance of on-off control schemes, in: Proceedings of the Asme International Mechanical Engineering Congress and Exposition 2007, Vol 9, Pts a-C, pp. 1911–1918.
- Koo, J.-H., Goncalves, F.D. & Ahmadian, M. (2006) A comprehensive analysis of the response time of MR dampers. Smart Materials and Structures, 15,2, pp. 351–358.
- Maas, J. & Güth, D. (2011) Experimental Investigation of the Transient Behavior of MR Fluids, in: ASME 2011 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems, Scottsdale, pp. 228–239.
- Poussot-vassal, C., Spelta, C., Sename, O., Sergio, S. & Dugard, L. (2012) Survey and performance evaluation on some automotive semi-active suspension control methods: A comparative study on a single-corner model, Annual Reviews in Control, 36, 1, pp. 148–160.
- Strecker, Z., Roupec, J., Mazurek, I., Machacek, O., Kubík, M. & Klapka, M. (2015) Design of magnetorheological damper with short time response, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 26, 14, pp. 1951–1958.
- Strecker, Z., Mazurek, I., Roupec, J. & Klapka, M. (2015) Influence of MR damper response time on semiactive suspension control efficiency, Meccanica, 50, 8, pp. 1949–1959.
- Valášek, M., Kortüm, W., Šika, Z., Magdolen, L. & Vaculín, O. (1998) Development of semi-active road-friendly truck suspensions Control Engineering Practice, Elsevier 6, 6, pp. 735–744.