



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

NÁVRH SEMIAKTIVNÍHO ODPRUŽENÍ HORSKÉHO KOLA

DESIGN OF SEMIACTIVE SUSPENSION FOR MOUNTAIN TERRAIN BIKE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Kryštof Mráz

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Zbyněk Strecker, Ph.D.

BRNO 2018

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav konstruování
Student:	Kryštof Mráz
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Zbyněk Strecker, Ph.D.
Akademický rok:	2017/18

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

Návrh semiaktivního odpružení horského kola

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Vibrace při sjezdech na MTB omezují maximální rychlost jezdce a zvyšují jeho únavu. Současná jízdní kola omezují vibrace přenášené na jezdce odpruženými vidlicemi s vinutou nebo vzduchovou pružinou a olejovým tlumením s nastavitelným obtokem. Aplikací magnetoreologického tlumiče s vhodným řízením by mělo být možné vibrace dále redukovat.

Typ práce: výzkumná

Cíle bakalářské práce:

Hlavním cílem je návrh semiaktivního odpružení horského kola.

Dílčí cíle bakalářské práce:

- analýza problematiky odpružení MTB,
- sestavení modelu jezdce na MTB, určení vhodné charakteristiky MR tlumiče,
- návrh řízení MR tlumiče.

Požadované výstupy: průvodní zpráva.

Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 – 20 stran textu bez obrázků).

Struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2018.pdf

Seznam doporučené literatury:

NAM, Yun-Joo a Myeong-Kwan PARK. Electromagnetic Design of a Magnetorheological Damper. Journal of Intelligent Material Systems and Structures. 2008, 20(2), 181-191. DOI: 10.1177/1045389X08091117. ISSN 1045-389x.

STRECKER, Zbyněk, Ivan MAZŮREK, Jakub ROUPEC a Milan KLAPKA. Influence of MR damper response time on semiactive suspension control efficiency. Meccanica. 2015, 50(8), 1949-1959.

KARNOPP, D., M. J. CROSBY a R. A. HARWOOD. Vibration Control Using Semi-Active Force Generators. ASME Journal of Engineering for Industry. 1974, 96(2), 619-626.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

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

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

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem semiaktivního odpružení horského kola využívajícího MR tlumič. V rešeršní části práce jsou shrnuty současné poznatky z problematiky pasivního a semiaktivního odpružení horských kol a problematiky MR tlumičů. Pomocí virtuálního dynamického modelu vytvořeného v grafickém prostředí MATLAB Simulink bylo simulováno chování odpružené přední vidlice. Byly simulovány semiaktivní algoritmy Skyhook a modifikovaný Groundhook a pro porovnání také pasivní nastavení. Podle výsledků těchto simulací je navrženo takové semiaktivní odpružení s MR tlumičem, které stabilizuje přítláčnou sílu předního kola, čímž zlepšuje bezpečnost jezdce.

KLÍČOVÁ SLOVA

MR tlumič, semiaktivní odpružení, horské kolo, dynamický model, kmitání

ABSTRACT

This Bachelor Thesis is focused to design semiactive suspension of mountain bike using MR damper. In research part of thesis is summarised knowledge about passive and semiactive suspension of mountain bikes and about MR dampers. Behaviour of suspended front fork was simulated using virtual dynamic model which was created in graphic environment MATLAB Simulink. Semiactive algorithms Skyhook and modified Groundhook and for comparison also passive settings are simulated. According to results of these simulations is designed semiactive suspension with MR damper which has effect to stabilising contact force of front wheel and therefore increases safety of rider.

KEYWORDS

MR damper, semiactive suspension, mountain bike, dynamic model, vibration

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MRÁZ, K. *Návrh semiaktivního odpružení horského kola*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 47 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Zbyněk Strecker, Ph.D..

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkovat vedoucímu této práce Ing. Zbyňku Streckerovi, Ph.D. za poskytnutí cenných připomínek a rad a dále také za jeho trpělivost a ochotu. Děkuji také svým blízkým, zejména rodičům, za podporu a pochopení při vypracovávání této práce a během celého studia.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci *Návrh semiaktivního odpružení horského kola* vypracoval samostatně pod vedením Ing. Zbyňka Streckera, Ph.D. a že jsem čerpal pouze ze zdrojů uvedených v seznamu použité literatury.

V Brně dne

.....

Podpis

OBSAH

1 ÚVOD	12
2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	13
2.1 Koncepce odpružení horských kol	13
2.1.1 Pružina	13
2.1.2 Tlumič	14
2.3 Výpočtové modelování MTB odpružení	15
2.4 Semiaktivní odpružení	16
2.4.1 Realizace semiaktivního odpružení na MTB	16
2.4.2 Semiaktivní algoritmy	18
2.4.3 Kritéria hodnocení efektivity odpružení	19
2.5 Magnetoreologické tlumiče	20
2.5.1 MR efekt	20
2.5.2 Dynamické vlastnosti MR tlumiče – dynamický rozsah a doba odezvy	22
3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	23
3.1 Analýza problému	23
3.2 Cíl práce	23
4 MATERIÁL A METODY	24
4.1 Dynamický model přední vidlice	24
4.1.1 Pasivní nastavení	25
4.1.2 F-v charakteristiky MR tlumiče	25
4.1.3 Použité semiaktivní algoritmy	27
4.2 Postup simulací	29
4.2.1 Simulace přejezdu překážky	29
4.2.2 Určení frekvenční odezvy	30
5 VÝSLEDKY	31
5.1 Výsledky simulací přejezdu překážky	31
5.1.2 Vyhodnocení simulací	33
5.2 Výsledky simulací s harmonickým vstupním signálem	33
5.2.1 Komfort	33
5.2.2 Bezpečnost	33
5.2.3 Souhrnné vyhodnocení simulací s harmonickým vstupním signálem	35
5.3 Stanovení vhodného semiaktivního systému odpružení	35
6 DISKUZE	37
7 ZÁVĚR	38
8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	39
9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	42
10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	43
11 SEZNAM TABULEK	44
12 SEZNAM PŘÍLOH	45

1 ÚVOD

Důvodem pro využívání odpružení u horských kol (zkráceně MTB) je podobně jako u motorových vozidel jezdcův komfort a bezpečnost. Komfortu je dosahováno tlumením vibrací a rázů přenášených od terénu do komponentů se kterými je jezdec v kontaktu (řídítka, sedlo, pedály). Bezpečností je míněna stabilizace kontaktu pneumatiky s terénem, což snižuje riziko smyku. Snižování vibrací a stabilizace přitlačné síly umožňují lepší ovladatelnost a snižují únavu jezdce v těžkém terénu, pro který jsou horská kola primárně určena. Výsledné odpružení je vždy určitým kompromisem mezi těmito dvěma vlastnostmi. Vývoj odpružení je proto po celou dobu vývoje horských kol oblastí, kam výrobci MTB směřují značné úsilí [1].

Na drtivé většině současných horských kol najdeme pasivní odpružení, které se skládá z kapalinového tlumiče a pružiny (vinuté nebo vzduchové). Prvky tohoto odpružení pracují výlučně na mechanických principech a umožňují pouze ruční nastavování určitých parametrů pružení či tlumení. Naproti tomu semiaktivní odpružení umožňuje změnu parametrů přímo za jízdy. Semiaktivní systém je schopen pomocí senzorů analyzovat okamžitý stav odpružení a pomocí řídicí jednotky v reálném čase reagovat na nerovnosti upravením tlumících vlastností. Správně navržený semiaktivní systém dokáže zajistit lepší bezpečnost nebo komfort jezdce ve srovnání se systémem pasivním. Semiaktivní systémy různých výrobců jsou již využívány u aut a silničních motocyklů a je tedy reálné očekávat jejich rozšíření i na horská kola [2]. V automobilovém průmyslu se setkáme také s koncepty aktivního odpružení, což zahrnuje kromě regulace tlumení i vyvolávání silového působení za účelem pokročilé stabilizace vozidla. Tyto systémy však vyžadují značné množství dodané energie a aplikace na horská kola je tedy nereálná.

Běžně se regulace tlumení v pasivních a semiaktivních systémech realizuje pomocí mechanicky či elektromagneticky ovládaného systému ventilů v konvenčním kapalinovém tlumiči. Do skupiny semiaktivního odpružení však patří také systémy využívající magnetoreologické (zkráceně MR) tlumiče. MR tlumič využívá magnetoreologickou kapalinu, která obsahuje feromagnetické částice o průměru v řádu jednotek mikrometrů. Pokud se kapalina nenachází v magnetickém poli, má vlastnosti podobné hydraulickému oleji. Pokud se však kapalina ocitne v magnetickém poli, dojde ke změně jejích mechanických vlastností, které se dále mění s rostoucí intenzitou magnetického pole. Tyto změny se odehrávají v řádu desítek až jednotek milisekund, což umožňuje změnu charakteristik systému odpružení přímo za jízdy. MR tlumiče jsou tedy zajímavou alternativou ke konvenčním tlumičům, jelikož umožňují plynulou regulaci tuhosti tlumení v reálném čase při zachování relativně jednoduché konstrukce.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

2

2.1 Koncepce odpružení horských kol

2.1

Odpružení MTB vychází principiálně z odpružení motocyklů. Stejně jako u motocyklů najdeme i u kol dva základní prvky odpružení, a to odpruženou přední vidlici a odpruženou zadní stavbu rámu (viz obr. 2.1). Většina horských kol jsou tzv. hardtaily, což znamená, že mají odpruženou pouze přední vidlici, která je konstrukčně jednodušší. Zřídka se můžeme setkat i s odpruženou sedlovkou či představcem, ale na současných horských kolech se tyto prvky nepoužívají. Odpružení rámu má několik konstrukčních variant, z nichž každá má odlišný dopad na jízdní vlastnosti. Cílem však je vždy co největší nezávislost odpružení na silách od šlapání a brzdění [3].



Obr. 2.1 Celoodpružené horské kolo [3]

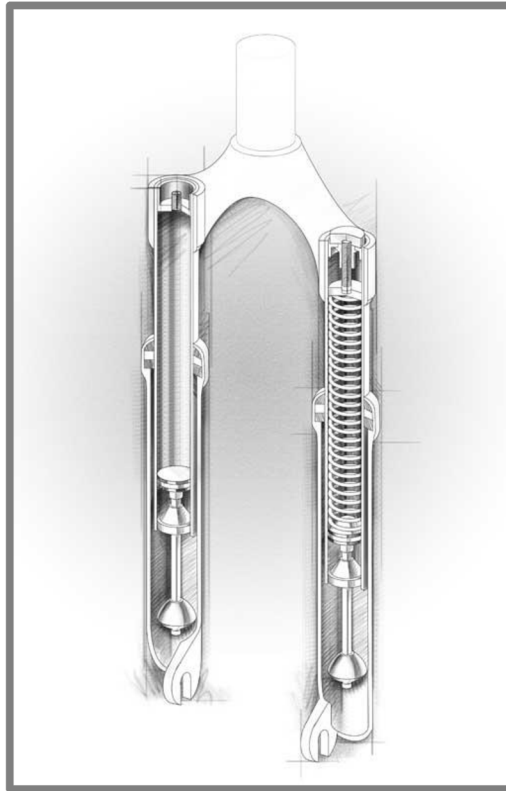
2.1.1 Pružina

2.1.1

Odpružení se vždy skládá ze dvou částí. První část poskytuje pružnou sílu působící proti silám, které způsobuje přejezd nerovností. Pružnou sílu zajišťuje buď šroubová válcová tlačná pružina, nebo vzduchová komora. Vzduchové odpružení je oblíbené kvůli své univerzálnosti, protože lze změnou tlaku snadno regulovat tuhost pružení. Systémy využívající vinutou pružinu jsou však spolehlivější a vhodné pro extrémně náročný terén. U nich je možné regulovat pružnou sílu vyvinutím předpětí. Pružná síla je v případě vinuté pružiny závislá na podélné deformaci x (m):

$$F_k = kx \quad (2-1)$$

kde k (Nm^{-1}) je tuhost pružiny. U vzduchových systémů, je průběh pružné síly progresivní. Na obr. 2.2 je zobrazeno klasické řešení přední vidlice – tlumič a pružina (v tomto případě vinutá) jsou umístěny paralelně v nohách vidlice.



Obr. 2.21 Odpružená přední vidlice [4]

2.1.2 Tlumič

Druhou částí odpružení je tlumič, který přeměňuje kinetickou energii pružiny na teplo. Zmírňuje tak velké rázy a rovněž výrazně tlumí kmitání pružiny. Základem tlumiče je válec naplněný olejem, ve kterém se pohybuje píst s jedním nebo více ventily, kterými proudí tlumicí olej. Při proudění ventily dochází k disipaci kinetické energie díky viskóznímu tření v kapalině. Tlumicí síla F_b je přímo úměrná rychlosti pohybu pístu v (ms^{-1}):

$$F_b = bv \quad (2-2)$$

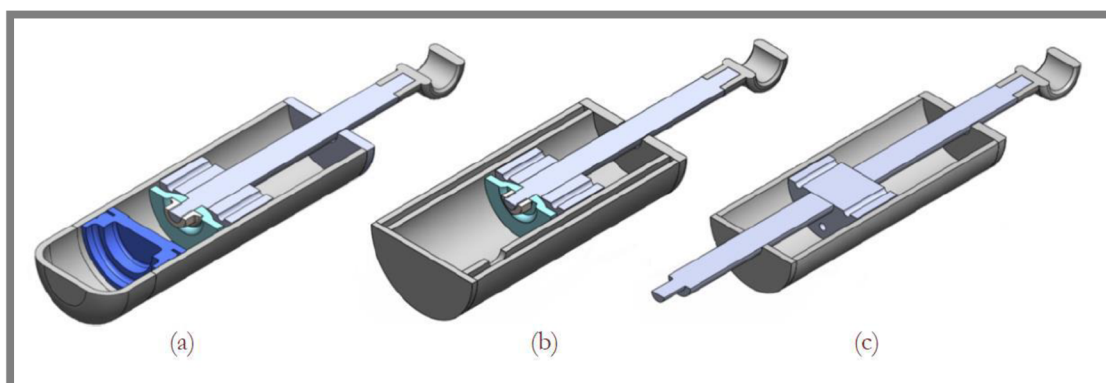
Kde b (Nsm^{-1}) je koeficient tlumení, který závisí na hydromechanických vlastnostech kapaliny a konstrukci tlumiče. Méně často se můžeme setkat s označováním koeficientu tlumení jako c [5].

Konstrukce pasivních tlumičů

U MTB jsou používané teleskopické hydraulické tlumiče jednoplášťové, dvouplášťové a s průběžnou pístnicí (obr. 2.3). Rozdíl mezi nimi je zejména ve vyrovnávání změny objemu prostoru pro tlumičovou kapalinu díky zasouvání pístnice. Tlumiče s průběžnou pístnicí tento problém eliminují a navíc oproti prvním dvěma typům poskytují stejnou tlumicí sílu v obou směrech – díky stejnému obsahu plochy pístu z obou stran. Tento typ však není často používaný díky své nekompaktnosti. Jednoplášťové tlumiče mají prostor kapaliny a plynu, kterým se vyrovnávají změny

objemu, rozdělen plovoucí přepážkou. Dvouplášťové tlumiče tuto přepážku neobsahují, plyn se nachází ve vnějším válci, pracují však s menšími tlaky plynu i kapaliny [5].

MTB tlumiče často disponují odlišnými tlumícími charakteristikami při stlačování a následném návratu (odskoku) pružiny do své původní polohy. Toho je nejčastěji dosahováno odlišnými ventily pro jeden a druhý směr proudění. Při stlačení pružiny je obecně požadován menší tlumivý účinek, než při vrácení, tzv. odskoku. Některé tlumiče umožňují oddělené nastavení úrovně tlumení pro stačení a odskok [6].



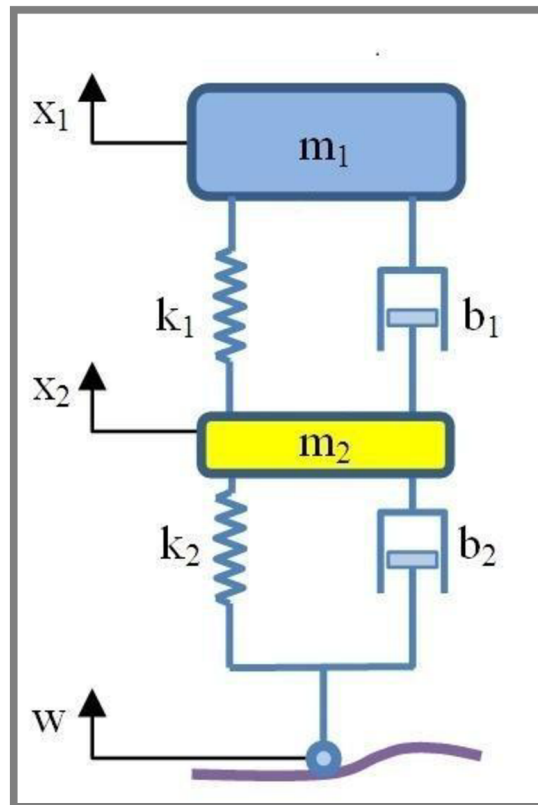
Obr. 2.3 Konstrukce pasivních tlumičů: a) jednoplášťový tlumič, b) dvouplášťový tlumič, c) tlumič s průběžnou pístnicí [5]

2.3 Výpočtové modelování MTB odpružení

Pro věrnou simulaci dynamického chování jízdního kola existují relativně komplikované modely, které obsahují velké množství vstupních parametrů. Pro simulaci odpružení se však používají modely výrazně zjednodušené, které uvažují pouze posuvy ve vertikálním směru [7]. Pro simulaci pouze odpružené přední vidlice se využívá model uvažující pružinu, tlumič a pneumatiku, což je dynamická soustava se dvěma stupni volnosti pro simulaci kmitání (obr. 2.4) [6]. Tento model byl využil například v práci **C. Spelty et al.** [8] dokonce k simulaci zadního odpružení motocyklu. V tomto modelu je pneumatika pojata jako lineární pružina a klasický tlumič. Pro aplikaci modelu je nutné znát tuhost pružiny a pneumatiky – k_1 a k_2 a koeficienty tlumení tlumiče a pneumatiky b_1 a b_2 . Dále je nutné znát hmotnosti odpružené a neodpružené hmoty m_1 a m_2 . V případě přední vidlice MTB je hmotnost odpružené hmoty rovna hmotnosti jezdce a rámu, která působí na přední kolo a neodpružená hmotnost zahrnuje přední kolo a spodní část vidlice. Vstupní parametr je vertikální posuv povrchu w . Vstupní signál může mít podobu harmonického buzení, skokové změny nebo složitějšího signálu, simulujícího reálný povrch. Výstupní parametry jsou posuvy (případně rychlosti či zrychlení) odpružené, resp. neodpružené hmoty x_1 a x_2 . Tento model lze popsat soustavou 2 diferenciálních rovnic 2. řádu:

$$m_1 \ddot{x}_1 = -b_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - k_1(x_1 - x_2) \quad (2-3)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 = -b_2(\dot{x}_2 - \dot{w}) - k_2(x_2 - w) + b_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + k_1(x_1 - x_2) \quad (2-4)$$



Obr. 2.4 Model využívaný pro simulaci kmitání [9]

Pro jednotnost práce bude nadále používáno značení dle tohoto modelu. Pro větší přehlednost je možné používat a místo \ddot{x} a v místo \dot{x} .

2.4 Semiaktivní odpružení

Dosud jsem se zabýval pouze pasivním odpružením, které je založeno pouze na mechanickém principu. Existují také adaptivní pasivní tlumiče, které mění intenzitu tlumení v závislosti na zdvihu pístu, což je zajištěno nejčastěji systémem obtokových kanálů ve válci. Pasivní odpružení však nemá schopnost reagovat na jízdní podmínky a nerovnosti v reálném čase. Naproti tomu semiaktivní odpružení je schopno upravovat vlastnosti (koeficient tlumení) tlumiče v reálném čase a reagovat tak na okamžité jízdní podmínky. Regulace funguje obvykle na elektromagnetickém principu, což bude dále popsáno.

2.4.1 Realizace semiaktivního odpružení na MTB

Semiaktivní systém se skládá z několika základních prvků. Pro zjišťování okamžitých jízdních podmínek a nerovností povrchu se používají akcelerometry, které zjišťují zrychlení neodpružené a odpružené hmoty a tedy pohyb tlumičů. Tyto údaje z

akcelerometrů slouží jako základní vstupní veličiny. Je možné měřit také sklon terénu pomocí gyroskopů, nebo zjišťovat zda se kolo nachází ve stavu volného pádu. Vstupní veličiny jsou vyhodnoceny řídicí jednotkou, která na základě algoritmu vyše signál do regulovatelného tlumiče, který následně upraví charakteristiku tlumení na požadovanou hodnotu. Do finální fáze bylo dovedeno jen několik málo semiaktivních systémů. Nejvýznamnější z nich je FOX Live Valve, který je v závěrečné fázi testování a u něhož se očekává brzká sériová výroba [10].

FOX Live Valve

Jedná se o systém semiaktivního odpružení přední vidlice a zadního tlumiče. Regulace tlumení je realizována solenoidovým ventilem v pístu tlumiče, který má pouze dvě polohy a odezvu 5 ms. Ventil má malý příkon a výdrž baterie s parametry $U=7,4$ V a $Q=500$ mAh tak činí cca 25 hodin v závislosti na jízdním režimu. Tento systém se zaměřuje na eliminaci nežádoucího pružení způsobeného šlapáním, což je častý problém zejména zadních tlumičů. Základní nastavení tlumičů je značně tuhé a při zaznamenání nerovnosti vydá řídicí jednotka signál k otevření ventilu, což znamená snížení koeficientu tlumení. Po uplynutí určitého času je ventil opět přivřen. Systém umožňuje nastavení v rozsahu 8 stupňů tuhosti tlumení, přičemž se mění hodnota zrychlení potřebná k otevření ventilu. Například v poloze 4 se jedná o zrychlení odpovídající 7 G. Se stoupajícím stupněm tuhosti systému také klesá doba, kdy je ventil otevřen. Systém využívá dvou akcelerometrů – na ose předního a zadního kola. Pokud zaznamená nerovnost přední akcelerometr, otevřou se ventily na předním i zadním tlumiči, pokud však náraz zaznamená zadní akcelerometr, je otevřen pouze ventil zadního tlumiče. Akcelerometry také umožňují detekovat volný pád – pokud oba nezachytí gravitační zrychlení po dobu 25 ms, řídicí jednotka vydá signál k otevření ventilů na obou tlumičích. [10]



Obr. 2.5 Zadní tlumič a řídicí jednotka systému FOX Live Valve [10]

2.4.2 Semiaktivní algoritmy

Na rozdíl od relativně komplikovaného systému FOX Live Valve jsou nepoužívanější algoritmy popsateľné jednoduchými nerovnicemi a ty základní fungují na principu *on-off* přepínače mezi dvěma hodnotami koeficientu tlumení. Tyto algoritmy je možné rozdělit do dvou skupin. První skupina obsahuje algoritmy zaměřené primárně na zlepšení komfortu – z nich je nejznámější a nepoužívanější *Skyhook*, který bude podrobně rozebrán (*Skyhook* je nepoužívanější semiaktivní algoritmus obecně) [8]. Druhou skupinu tvoří algoritmy zaměřené na zlepšení přitlaku pneumatiky. Zde je nepoužívanějším algoritmem *Groundhook*, ten však v praxi nelze aplikovat při použití výše zmíněných akcelerometrů. Z tohoto důvodu byl vytvořen a popsán v článku **Z. Streckera et al.** [11] tzv. modifikovaný *Groundhook*, který bude také podrobně rozebrán.

Skyhook

Tento algoritmus počítá se dvěma stavy – s neaktivovaným tlumičem s výchozí nízkou hodnotou koeficientu tlumení b_{1L} a aktivovaným tlumičem s vyšší hodnotou koeficientu tlumení b_{1H} . Vstupními parametry tohoto algoritmu jsou rychlost odpružené hmoty v_1 a relativní rychlost odpružené hmoty vůči hmotě neodpružené. Pokud je směr těchto dvou rychlostí stejný (v praxi to znamená, že řídkta se pohybují vzhůru a píst tlumiče se vysunuje nebo že řídkta klesají a tlumič je stlačován) je tlumič aktivován a koeficient tlumení je zvýšen na hodnotu b_{1H} . Cílem je, aby se hodnota v_1 co nejvíce blížila nule [11].

Tlumicí sílu je možné vyjádřit následovně:

$$F_{bs} \begin{cases} b_{1H}(v_1 - v_2), & v_1(v_1 - v_2) \geq 0 \\ b_{1L}(v_1 - v_2), & v_1(v_1 - v_2) < 0 \end{cases} \quad (2-5)$$

Modifikovaný *Groundhook*

Klasický *Groundhook* využívá jako jeden ze vstupních údajů rychlost neodpružené hmoty vzhledem k vertikální rychlosti povrchu – tuto hodnotu však v praxi nelze akcelerometry naměřit, proto byl vyvinut modifikovaný *Groundhook*, který je založen na zrychlení neodpružené hmoty a_2 . Zrychlení a_2 je kladné, pokud je pružná síla od pneumatiky větší, než gravitační síla (lze si to zjednodušeně představit tak, že pneumatika je více stlačena než při rovnovážném stavu). Pokud je zrychlení a_2 záporné, znamená to, že gravitační síla je větší, než pružná síla (pneumatika je odlehčena a méně stlačena). Druhým vstupním údajem je stejně jako v případě *Skyhooku* relativní rychlost odpružené hmoty vůči hmotě neodpružené. Stejně jako *Skyhook* je tento algoritmus určen pro tlumič se dvěma možnými hodnotami koeficientu b_1 . Cílem algoritmu je co nejrychlejší dosažení nulové hodnoty a_2 [11]. Algoritmus lze opět popsat pomocí jednoduchých nerovnic:

$$F_{bmG} \begin{cases} b_{1H}(v_1 - v_2), & a_2(v_1 - v_2) \geq 0 \\ b_{1L}(v_1 - v_2), & a_2(v_1 - v_2) < 0 \end{cases} \quad (2-6)$$

2.4.3 Kritéria hodnocení efektivity odpružení

Ke zhodnocení efektivity odpružení je potřeba stanovit jednoznačná kritéria. Jak bylo nastíněno v úvodu, základní úkol odpružení je snižování vibrační odpružené hmoty a stabilizace přtlaku kola na povrch. Stanovením exaktních kritérii pro porovnávání efektivity semiaktivních a pasivních systémů se mj. zabývá ve svém článku **C. Poussot-Vassal et al.** [12]. Při simulacích vychází prakticky virtuálního dynamického modelu, který je prakticky totožný s modelem popsáním v kapitole 2.3. Pro optimalizaci efektivity odpružení využívá ztrátovou funkci použitelnou pro diskrétní výpočty, jejíž minimalizací se dosáhne ideálního stavu. Porovnáváním hodnot této funkce pro různé systémy odpružení můžeme tedy zjistit míru dosažení ideálního stavu. Jsou uvedeny dvě ztrátové funkce – pro komfort a stabilitu přtlaku:

$$J_k(N) = \sum_{i=1}^N x_{1(i)}^2 \quad (2-7)$$

$$J_k(N) = \sum_{i=1}^N (x_{2(i)} - w_{(i)})^2 \quad (2-8)$$

Kde N je počet bodů, ve kterých je vyhodnocována hodnota x_1 . Pro vyhodnocení komfortu je možno využít jako výstupní hodnotu, jak polohu odpružené hmoty x_1 , tak také její zrychlení a_1 . Tyto ztrátové funkce lze použít pro jakýkoliv vstupní signál. Vyhodnocováním efektivity odpružení se zabývá ve svém článku také **Z. Strecker et al.** [11], který zvolil jako kritéria efektivity směrodatné odchytky. Efektivita odpružení z hlediska komfortu je tedy vyhodnocována za použití směrodatné odchytky zrychlení odpružené hmoty:

$$\sigma_{a_1} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_{1(i)}^2} \quad (2-9)$$

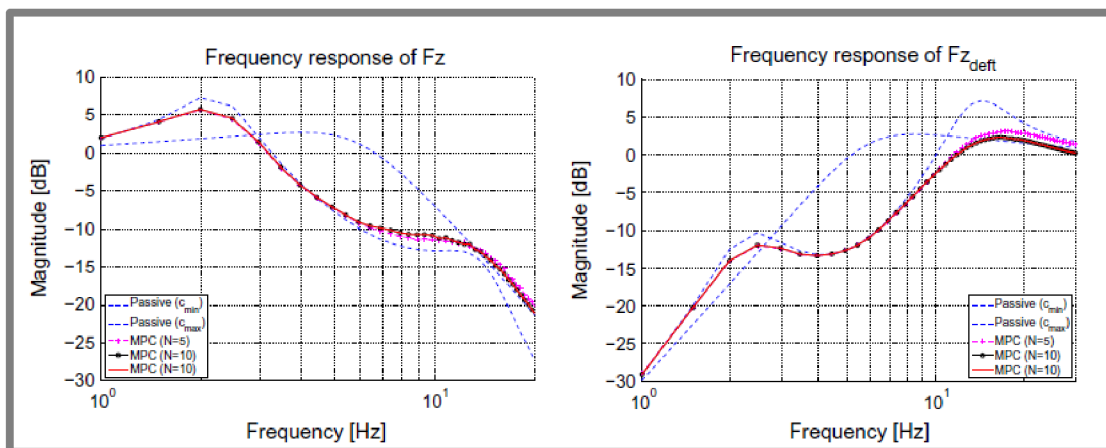
Je tedy zřejmé, že se jedná o stejný princip jako v případě rovnice (2-7). Pro kritérium bezpečnosti je zvolena směrodatná odchytky přtláčné síly F_i :

$$\sigma_F = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_i - F_{stat})^2} \quad (2-10)$$

kde F_{stat} je síla, kterou působí kolo na povrch v klidu. V článku [12] je místo výrazu $F - F_{stat}$ použit výraz $x_2 - w$, který vyjadřuje vertikální výchylku pneumatiky vzhledem k vertikální poloze terénu, opět se jedná o principiálně shodné přístupy. Tyto rovnice však nepracují se vstupními parametry simulací, je tedy nutné porovnávat ztrátové funkce, resp. směrodatné odchytky pro stejné vstupní signály a stejný časový úsek.

Frekvenční odezva

Pro porovnávání efektivity odpružení pro harmonický vstupní signál s proměnnou frekvencí je v článku [12] využito frekvenční odezvy (obr. 2.6) Princip této metody je v porovnávání amplitudy vstupního signálu (vertikální poloha nebo zrychlení povrchu) a amplitudy výstupního signálu. Výstupní signál je v případě hodnocení komfortu vertikální poloha nebo zrychlení odpružené hmoty. Pro hodnocení stability přitlaku je výstupní signál vertikální výchylka pneumatiky odečtená od výchylky povrchu: $x_1 - w$. Jako reprezentativní rozsah je uváděno 0–20 Hz pro komfort a 0–30 Hz pro přitlak. Amplitudy jsou porovnány pomocí logaritmické jednotky decibel. Stejně jako u rovnic uvedených výše je žádoucí co nejnižší hodnota přenosu.



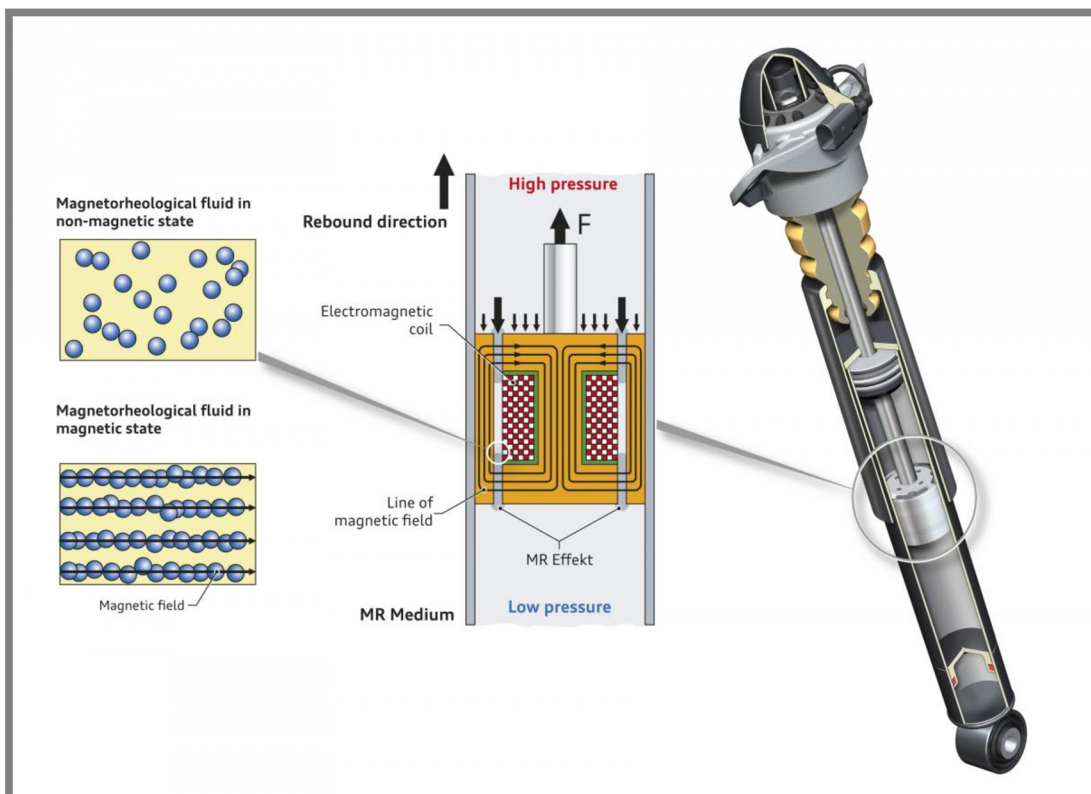
Obr. 2.6 Frekvenční odezva; vlevo výsledky pro komfort, vpravo pro bezpečnost [12]

2.5 Magnetoreologické tlumiče

Magnetoreologické tlumiče umožňují semiaktivní tlumení a už řadu let se používají zejména v automobilovém průmyslu. Tyto tlumiče obsahují namísto klasické tlumičové kapaliny magnetoreologickou kapalinu. MR kapaliny obsahují 20–40 % železných částic o velikosti nejčastěji 0,1 – 10 μm . V kapalině jsou přítomny také aditiva, která zabraňují shlukování těchto částic [14]. Konstrukce MR tlumiče vychází z konvenčního pasivního tlumiče. Součástí hlavy pístu jsou však navíc cívky, které vytvářejí magnetické pole (viz obr. 2.7) [15]. Magnetické pole mění mechanické vlastnosti MR kapaliny a tím i F - v charakteristiku tlumiče. Přívod proudu do cívek vyhodnocuje dle zvoleného algoritmu řídicí jednotka, která může být například na bázi Arduina [16]. Nejrozšířenější aplikací MR tlumičů je systém MagneRide, který využívají společnosti jako Audi, Ferrari, Land Rover a další [17].

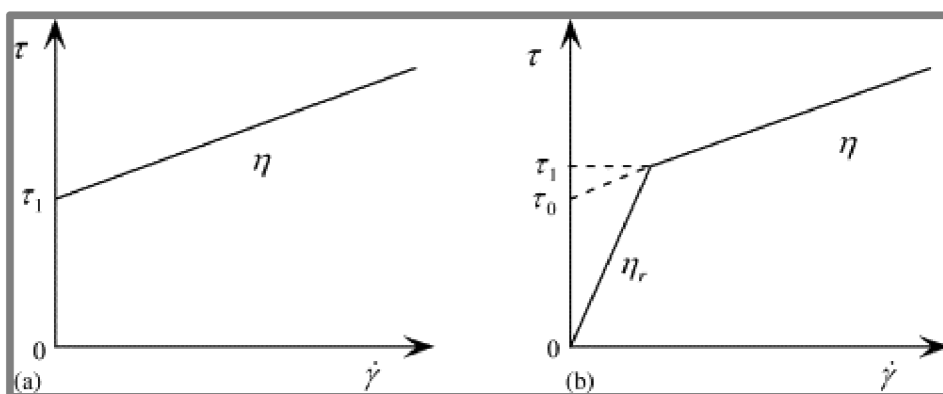
2.5.1 MR efekt

V neaktivovaném stavu (kapalina se nenachází v magnetickém poli) se kapalina chová jako klasická Newtonovská kapalina. Jakmile je MR kapalina vystavena magnetickému poli (aktivovaný stav), dojde ke shlukování železných částic. Tyto částice vytvoří řetězce ve směru magnetických siločar. Toto přeskupení se nazývá magnetoreologický jev a nese s sebou změnu fyzikálních vlastností a při určitých zjednodušeních můžeme k popisu chování kapaliny v tomto stavu využít Binghamův



Obr. 2.7 Schéma MR tlumiče [13]

reologický model (obr. 2.8 (a)). Je nutné tedy překonat určitou mez smykového (tečného) napětí τ , aby se kapalina začala deformovat – téct.



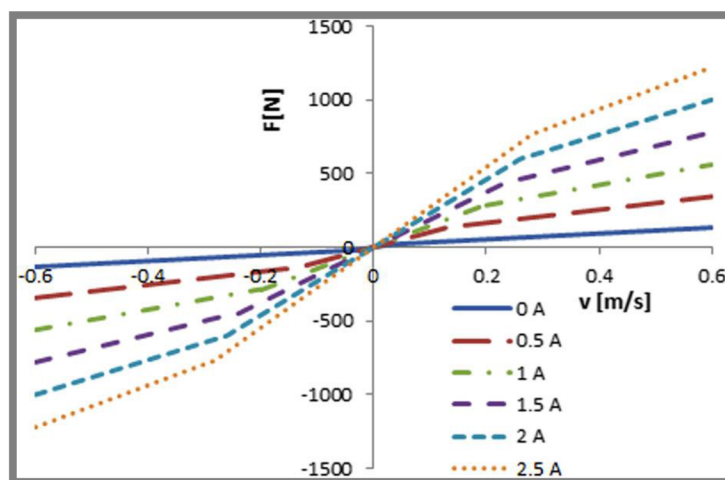
Obr. 2.8 Reologické modely MR kapaliny v aktivovaném stavu: (a) Binghamský (b) bi-viskózní model [18]

Tato mez se nazývá mez kluzu, τ_1 . Binghamský model je však velmi zjednodušený, proto se pro výpočty používá stále ještě relativně jednoduchý, avšak realitě bližší tzv. bi-viskózní model (obr. 2.8 (b)). Tento model popisuje chování MR kapaliny v aktivovaném stavu pomocí dvou oblastí s různými viskozitami [18]. Na obr. 2.9 je F - v závislost tlumiče s MR kapalinou vycházející z bi-viskózního modelu pro různé el. proudy procházející cívkou. Při zvyšujícím se elektrickém proudu v cínce roste intenzita magnetického pole, kterému je kapalina vystavena, závislost přestává být

čistě lineární (Newtonovský model) a projevuje se zvyšující se mez kluzu. Reálná F - v charakteristika MR tlumiče se od té používané pro výpočtové modelování odlišuje zejména hysterezní smyčkou.

2.5.2 Dynamické vlastnosti MR tlumiče – dynamický rozsah a doba odezvy

Poměr celkové tlumicí síly v aktivovaném stavu a neregulovatelné složky, zahrnující pasivní odpory v tlumiči a viskózní tření v kapalině se nazývá dynamický rozsah. Obecně je pro efektivní odpružení žádoucí, aby byl tento rozsah co nejvyšší. Toho lze dosáhnout jednak optimální intenzitou magnetického pole a jednak snížením pasivních odporů v tlumiči a viskózního tření v kapalině. Z konstrukčního hlediska se jedná o optimalizaci průřezu šterbiny a tvaru pístu [19].



Obr. 2.9 F - v charakteristiky MR tlumiče pro různé proudy [11]

Další velmi důležitou vlastností tlumiče je doba odezvy. Tento časová hodnota je definována jako doba, za kterou tlumič dosáhne 63,2 % požadované tlumicí síly [11]. Doba odezvy tlumiče má velký vliv na efektivitu odpružení. Tento vliv podrobně zkoumal **Z. Strecker et al.** [11]. Pomocí simulací a měření bylo zjištěno, že semiaktivní řízení s využitím algoritmů Groundhook a modifikovaný Groundhook nevykazuje výrazná zlepšení oproti pasivním tlumičům za použití konvenčních MR tlumičů s dobou odezvy 20 ms a 8 ms. Naopak v případě tlumiče s dobou odezvy 1,5 ms bylo zjištěno výrazné zlepšení bezpečnosti. V případě algoritmu Skyhook nejsou rozdíly mezi tlumiči s různou dobou odezvy tak výrazné a ke zlepšení komfortu dochází už u MR tlumiče s dobou odezvy 20 ms.

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

3

3.1 Analýza problému

3.1

V rešeršní části práce byly rozebrány základní pojmy a koncepce týkající se odpružení horských kol, dále bylo podrobně rozebráno semiaktivní odpružení, a nakonec představeno chování magnetoreologického tlumiče. O všech třech tématech již bylo zpracováno značné množství publikací. Pokud se však zaměříme na propojení těchto témat, tedy implementaci semiaktivně řízeného MR tlumiče do odpružení horského kola, nalezneme relativně malý počet publikací, které se navíc zaměřují pouze na dílčí části celého procesu návrhu až po realizaci. Například v článku **K. Plazy** [7] je rozebrán model celoodpruženého kola, popsány elektronické komponenty semiaktivního řízení a pouze teoreticky nastíněné možnosti semiaktivního řízení. Realizaci především elektronického obvodu se věnuje také projekt, popsáný v [18]. Jiné publikace [15, 19] se věnují konstrukci MR tlumiče pro horská kola. V žádném z těchto zdrojů však nebylo obsaženo srovnání efektivity semiaktivního a pasivního odpružení a stanovení požadované charakteristiky MR tlumiče na základě dynamického modelu.

3.2 Cíl práce

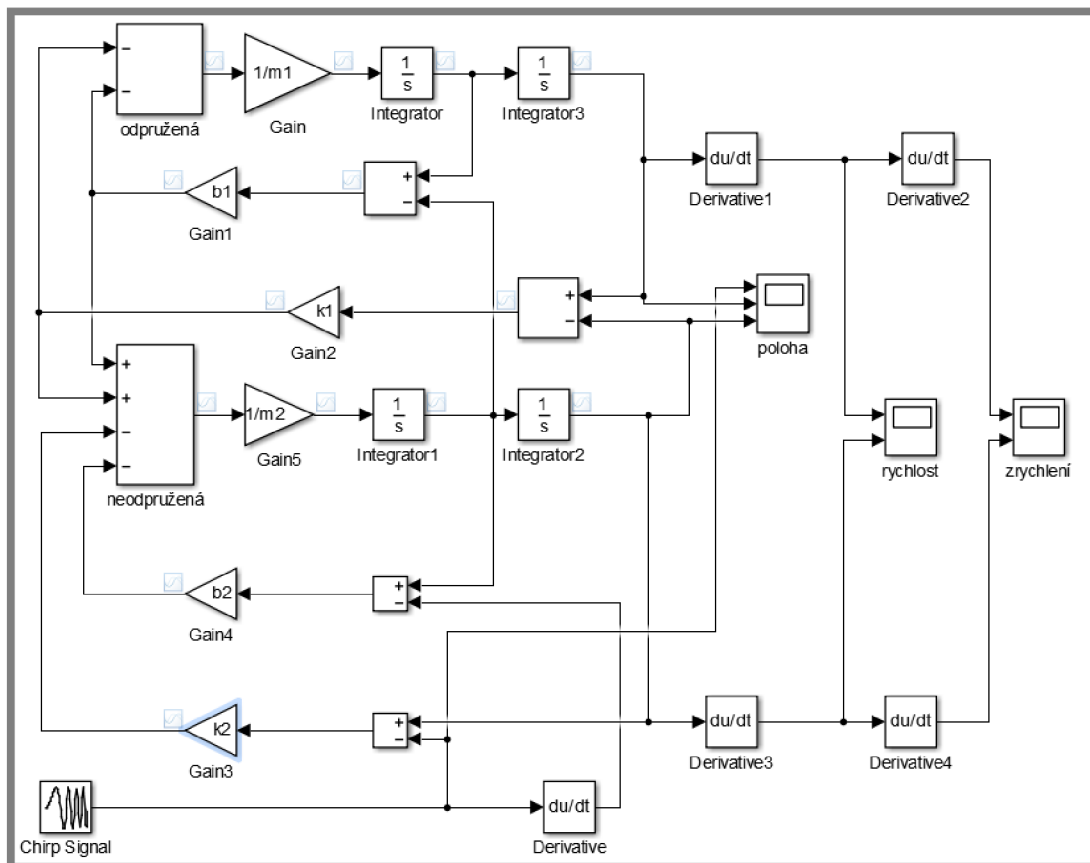
3.2

Hlavním cílem této práce je navrhnout semiaktivní odpružení horského kola. Dílčími cíli jsou sestavení modelu jezdce na MTB a určení vhodné charakteristiky MR tlumiče a dále návrh řízení MR tlumiče vhodným semiaktivním algoritmem. Práce bude dále obsahovat srovnání efektivity navrženého semiaktivního odpružení s odpružením pasivním, dle předem definovaných kritérií a také porovnání semiaktivních algoritmů. S výslednou optimální F - v charakteristikou MR tlumiče bude možné dále pracovat a použít ji k návrhu konstrukce samotného tlumiče. Vzhledem k značné složitosti modelování odpružení zadní stavby rámu (podrobně řešeno například v [20]), která je nad rámec této práce, bude modelována pouze odpružená přední vidlice, a to za použití válcové tlačné pružiny s lineárním průběhem tuhosti. Simulován bude pouze jednoduchý tlumič bez nastavitelných obtoků, jednocestných ventilů, atd., protože tyto úpravy lze provádět na pasivních i MR tlumičích a jsou už záležitostí mechanické konstrukce.

4 MATERIÁL A METODY

4.1 Dynamický model přední vidlice

K porovnání výsledků systému s pasivním a semiaktivním tlumením bylo nutno vytvořit dynamický model, který simuluje kmitání odpružené a neodpružené hmoty. Jako základ byl použit model popsáný v kapitole 2.4. Tento model nezahrnuje sklonění vidlice, nicméně tento vliv zanedbává řada publikací [6, 7, 8, 12]. Model byl realizován v prostředí Simulink, což je grafický nástroj pro modelování a simulace dynamických systémů. Simulink je součástí softwaru MATLAB. Tento program umožňuje numerické řešení diferenciálních rovnic, přičemž zadávání je graficky řešeno pomocí spojování jednotlivých bloků, které reprezentují vstupy, výstupy operátory (integrátor, derivace, násobení konstantou, atd.) a další prvky. Základní model vytvořený podle rovnic (2-3) a (2-4) je na obr. 4.1. Do tohoto základního modelu bylo potřeba dodat také působení gravitační síly.



Obr. 4.1 Model pasivního systému odpružení přední vidlice

Dále bylo potřeba lépe definovat chování pneumatiky. Jelikož pneumatika je v tomto modelu simulována pomocí pružiny a tlumiče, je potřeba upravit chování těchto prvků tak, aby odpovídalo realitě. K tomu slouží následující rovnice:

$$F_{k2} \begin{cases} k_2(x_2 - w), & x_2 - w \leq 0 \\ 0, & x_2 - w > 0 \end{cases} \quad (4-1)$$

$$F_{b2} \begin{cases} b_2(\dot{x}_2 - \dot{w}), & x_2 - w \leq 0 \\ 0, & x_2 - w > 0 \end{cases} \quad (4-2)$$

kde F_{k1} je pružná a F_{b1} tlumící síla pneumatiky. Tyto rovnice vyjadřují, že pokud pneumatika ztratí kontakt s povrchem, její pružná a tlumící síla budou automaticky nulové. Tyto rovnice byly v Simulinku realizovány pomocí bloků Signum a Porovnání s nulou, kde výstupy jsou logická 0 a 1.

4.1.1 Pasivní nastavení

4.1.1

K simulacím pasivního systému bylo potřeba stanovit výchozí hodnoty konstant tak, aby model odpovídal reálnému horskému kolu. Zde je nutno upozornit, že tyto hodnoty se mohou v realitě lišit v závislosti na mnoha proměnných (např. tlak v pneumatikách, postoj a hmotnost jezdce, geometrie rámu, atd.), nicméně na porovnání pasivního a semiaktivního odpružení toto nebude mít zásadní dopad. Hodnoty konstant k_2 a b_2 , popisujících chování pneumatiky, závisí především na tlaku v pneumatice. Běžný tlak v MTB pneumatikách se pohybuje kolem hodnoty 0,2 MPa. Naproti tomu pneumatiky pro silniční kola mají průměrnou hodnotu tlaku cca 0.8 MPa [21]. V literatuře se nepodařilo najít spolehlivé charakteristiky pneumatik pro horská kola, a proto byly použity údaje uvedené v článku [11], které se týkají experimentálního vozíku s tlakem v pneumatice 0,2 MPa [22]. Koeficient tlumení b_1 byl odečten z F - v závislosti uvedené v článku [6] (tato hodnota je však pouze orientační, při simulacích bude měněna). Hodnota tuhosti pružiny k_1 byla zvolena dle katalogu firmy RockShox [23]. Zvolena byla střední hodnota tuhosti, což odpovídá hmotnosti jezdce 77 kg. Hmotnost jízdního kola byla zvolena 13 kg. Neodpruženou hmotnost m_2 , tedy hmotnost zejména ráfku, náboje, výpletu, duše, pláště a dolní části vidlice byla stanovena jako 2 kg. Rozložení zatížení na přední a zadní kolo se může výrazně lišit podle typu rámu a jezdcova postoje, nicméně dle experimentu uvedeného v článku [24] lze za určitou střední hodnotu považovat zatížení předního kola 40 % celkové hmotnosti. Všechny hodnoty konstant jsou vypsány v tab. 4.1.

Tab. 4.1 Hodnoty konstant výchozího pasivního systému

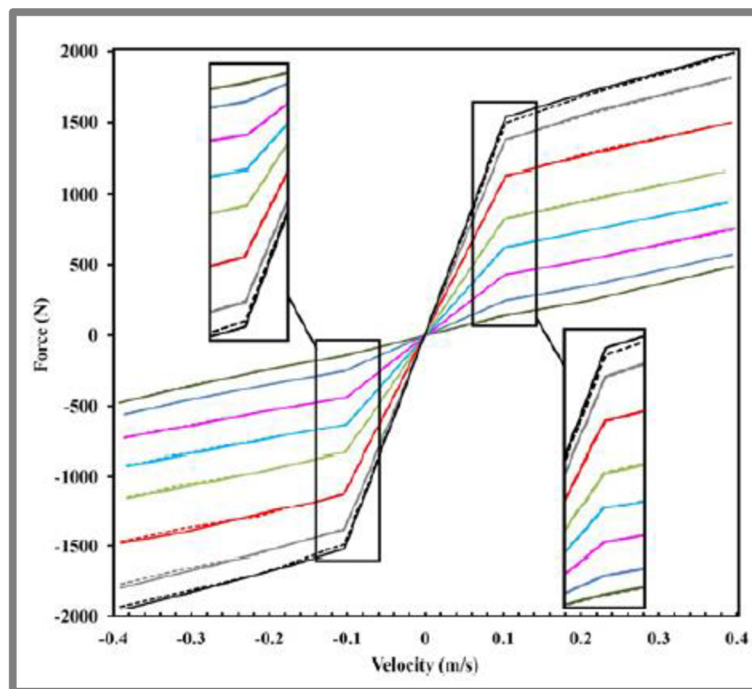
Název	Zkratka	Hodnota
Odpružená hmotnost	m_1	35,2 kg
Neodpružená hmotnost	m_2	2 kg
Tuhost pružiny	k_1	7005 Nm ⁻¹
Tuhost pneumatiky	k_2	50 190 Nm ⁻¹
Koeficient tlumení tlumiče	b_1	200 Nsm ⁻¹
Koeficient tlumení pneumatiky	b_2	100 Nsm ⁻¹

4.1.2 F-v charakteristiky MR tlumiče

4.1.2

Při simulaci semiaktivního systému s MR tlumičem je tlumící síla F_{b1} určována z F - v charakteristik, což jsou závislosti tlumící síly na pístové rychlosti tlumiče. Jelikož model přímo nevyužívá experimentálně změřené charakteristiky z již existujícího tlumiče, bylo potřeba vytvořit postup, jak tyto charakteristiky jednoduše, a přitom realisticky definovat, aby odpovídaly reálným charakteristikám MR tlumičů, které

byly experimentálně změřeny např. v člancích [19, 25]. Na obr. 4.2 jsou experimentálně získané charakteristiky, které byly použity jako předloha. Tyto charakteristiky jsou upraveny k výpočtům podle bi-viskózního modelu popsaného v kapitole 2.5.1. Jsou tedy tvořeny 3 lineárními úseky, až na charakteristiku pro neaktivovaný stav ($I=0$), která je celá tvořena jedním úsekem, stejně jako u pasivního tlumiče. Tyto úseky byly definovány pomocí dvou parametrů (proměnných): p_1 a p_2 . Parametr p_1 určuje sklon charakteristiky a rozdíl parametrů p_2 a p_1 určuje rozdíl mezi hodnotami F_{b1} pro aktivovaný a neaktivovaný stav. Charakteristika neaktivovaného stavu je tedy určena pouze parametrem p_1 . Dvojici charakteristik (aktivovaný a neaktivovaný stav) je nutno definovat oběma parametry. Body, kde zjednodušeně dochází ke změně viskozity mají vždy hodnotu $v = 0,1 \text{ ms}^{-1}$, resp. $v = -0,1 \text{ ms}^{-1}$. Aby při výpočtech nedocházelo ke kolabování modelu díky ostrým změnám v těchto zlomových bodech, bylo nutno tyto charakteristiky rozdělit na velké množství jednotlivých bodů a tyto proložit kubickými spliny. V okolí zlomových bodů tak vznikne nepřesnost, která však na výsledky simulací nemá vliv. Dle údajů uvedených v [19, 25] lze v aktivovaném stavu dosáhnout maximálně přibližně čtyřnásobku síly F_{b1} v neaktivovaném stavu pro hodnotu $v = 0,5 \text{ ms}^{-1}$. Znamená to tedy, že parametr p_2 může být maximálně čtyřikrát vyšší než parametr p_1 , aby bylo možné takový tlumič vůbec zkonstruovat.



Obr. 4.2 Experimentálně změřené a pro výpočtové modely upravené F - v charakteristiky MR tlumiče [24]

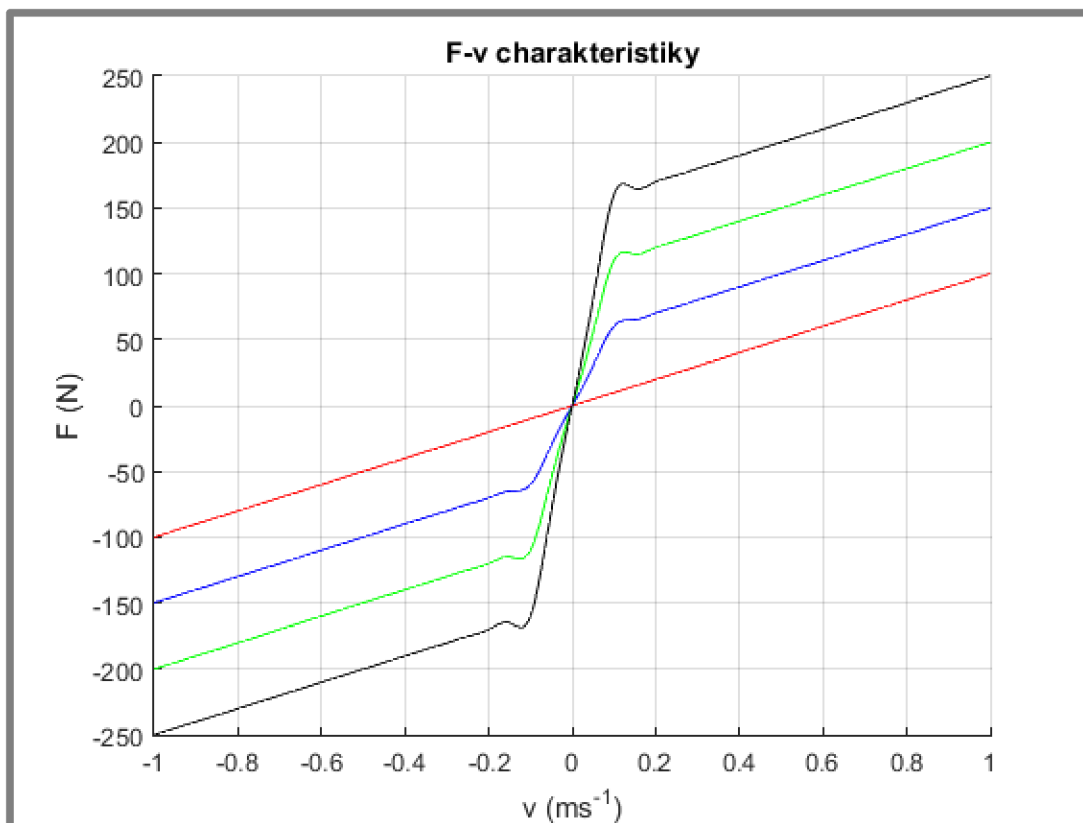
Zdrojový kód takto v MATLABu definované charakteristiky je na obr. 4.3. Příklady vytvořených F - v charakteristik jsou na obr. 4.4. Zvolený semiaktivní algoritmus poté přepíná mezi dvojicí charakteristik, které reprezentují aktivovaný a neaktivovaný stav.

```

xp=[-1:0.05:1];
u1= [-1 -0.1 0 0.1 1];
u2= [-(1*p1+0.5*(p2-p1)) -(0.1*p1+0.5*(p2-p1)) 0 0.1*p1+0.5*(p2-p1) 1*p1+0.5*(p2-p1)];
yp=interp1(u1,u2,xp);           %rozdělení na jednotlivé body a lineární interpolace
y = interp1(xp,yp,u,'spline');  %interpolace těchto bodů kubickým splinem

```

Obr. 4.3 Zdrojový kód pro tvorbu F - v charakteristik, kde u je hodnota pístové rychlosti a y je výstupní hodnota síly

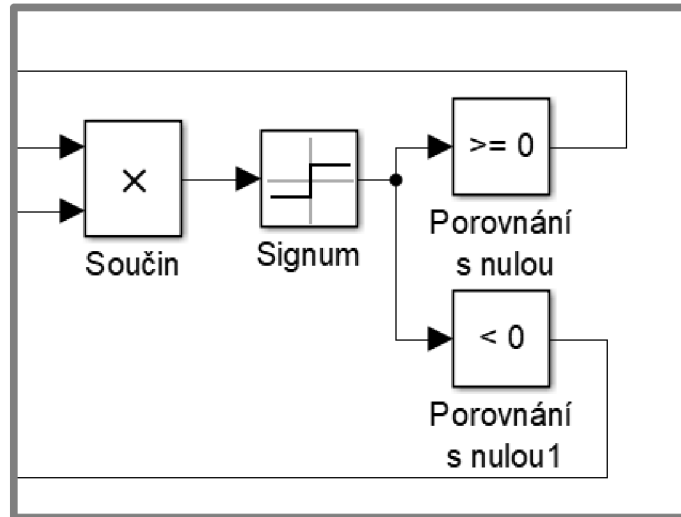


Obr. 4.4 Příklad sestavených F - v charakteristik s parametrem $p_1=100$ pro neaktivovaný stav a aktivované stavy s parametry $p_2= \{200; 300; 400\}$

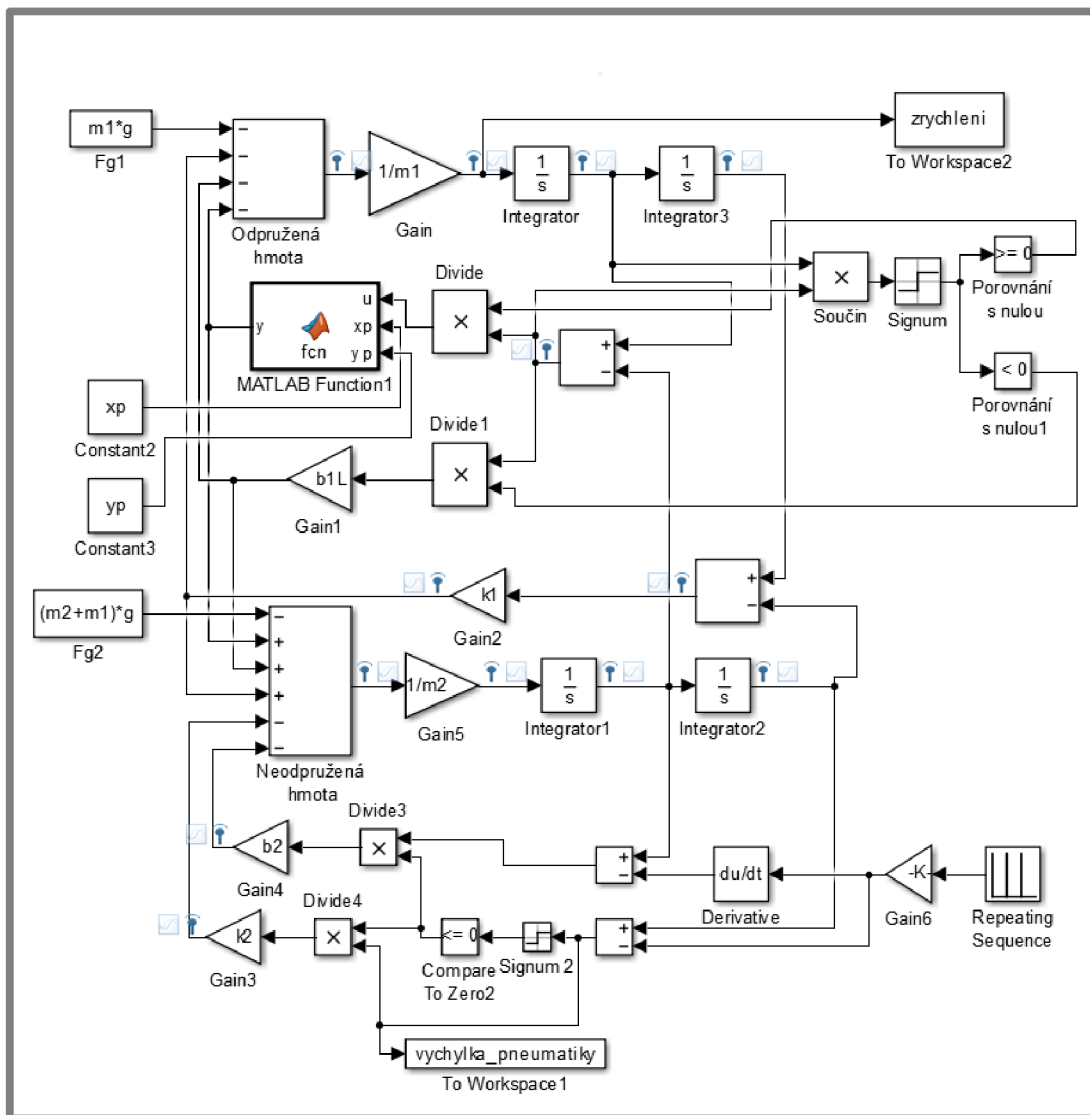
4.1.3 Použité semiaktivní algoritmy

4.1.3

K simulacím byly použity algoritmy zmíněné v řešeršní části – Skyhook (SH) a modifikovaný Groundhook (mGH). Algoritmy popsané rovnicemi (2-5) a (2-6) bylo nutno v prostředí Simulinku realizovat pomocí jednotlivých bloků. Tuto realizaci zachycuje obr. 4.5. V tomto sestavení se algoritmy liší pouze prvním vstupem do bloku Součin (pro SH v_1 , pro mGH a_2). Druhý vstup je pro oba algoritmy stejný ($v_1 - v_2$). Výstupy z bloků Porovnání s nulou jsou potom logické 0 a 1. Tyto výstupy pokračují do bloků, které stanovují tlumící sílu F_{b1} pro aktivovaný, resp. neaktivovaný stav a pomocí součinů, které fungují vlastně jako logické operátory, mezi nimi přepínají. Celý dynamický model, zapojený pro simulaci algoritmu Skyhook je pro ilustraci na obr. 4.6.



Obr. 4.5 Realizace algoritmů SH a mGH



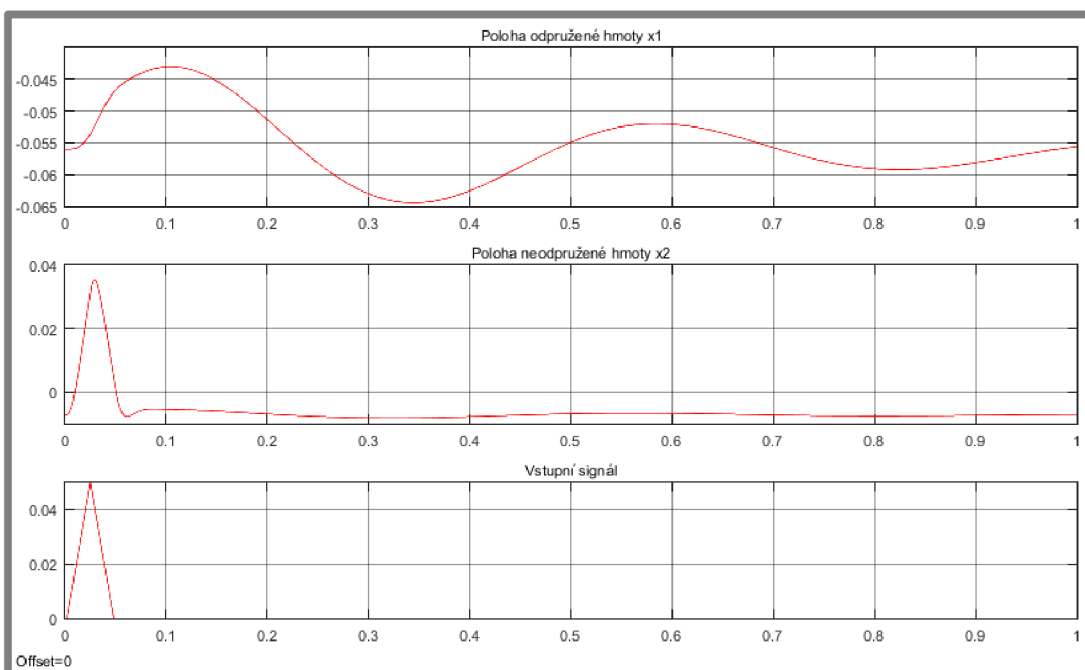
Obr. 4.6 Virtuální dynamický model zapojený pro simulaci algoritmu SH

4.2 Postup simulací

Pro tvorbu výsledků a návrh optimální F - v charakteristiky MR tlumiče pro vhodný semiaktivní algoritmus byly provedeny dva typy simulací. Jednalo se jednak o buzení harmonickým signálem s proměnnou frekvencí (*sweep*) a jednak o simulaci přejezdu překážky v určité rychlosti. Vyšší vypovídající hodnotu mají výsledky simulací přejezdu překážky, protože lépe vystihují reálné jízdní podmínky.

4.2.1 Simulace přejezdu překážky

Vzhledem k tomu, že se horská kola pohybují v těžkém terénu, ve kterém se náhodně vyskytují izolované nerovnosti v podobě kořenů a kamenů, je vhodné simulovat přejezd právě takové nerovnosti. Vstupní signál byl tedy definován pomocí bloku *Repeating sequence*, který umožňuje ručně zadat jednotlivé body signálu. Simulován byl přejezd překážky s příčným kruhovým průřezem o průměru 5 cm při rychlosti 20 a 30 km/h. Při uvažovaném průměru předního kola 29“ byl vytvořen signál, který odpovídá vertikální změně polohy terénu v čase. Ve skutečnosti by tento signál měl mít podobu části kružnice, protože střed předního kola se při odvalování pohybuje po kružnici, nicméně nahrazení dvěma lineárními úseky je adekvátní zjednodušení. Doba trvání simulace je vždy 1 s. Na obr. 4.7 jsou pro ilustraci výsledky simulace výchozího pasivního nastavení (viz tab. 4.1), včetně vstupního signálu. Na vodorovných osách je čas v sekundách a na svislých je vertikální poloha v metrech.



Obr. 4.7 Výsledky simulace přejezdu překážky v rychlosti 30 km/h při výchozím pasivním nastavení

Pro tento typ simulací jsou použity kritéria rozebraná v kapitole 2.4.3 a to směrodatná odchylka zrychlení odpružené hmoty (bude dále značena σ_k) pro komfort a směrodatná odchylka přítláčné síly F_p (dále značena σ_p). Přítláčná síla je vyjádřena jako pružná síla pneumatiky:

$$F_p = (x_2 - w)k_2 \quad (4-3)$$

V rámci ověření funkčnosti byly nastaveny stejné parametry jako v článku [11], a tímto způsobem nasimulovány obdobné hodnoty směrodatných odchylek. Bohužel přesné ověření není možné, protože v článku není uvedena délka trvání simulace.

4.2.2 Určení frekvenční odezvy

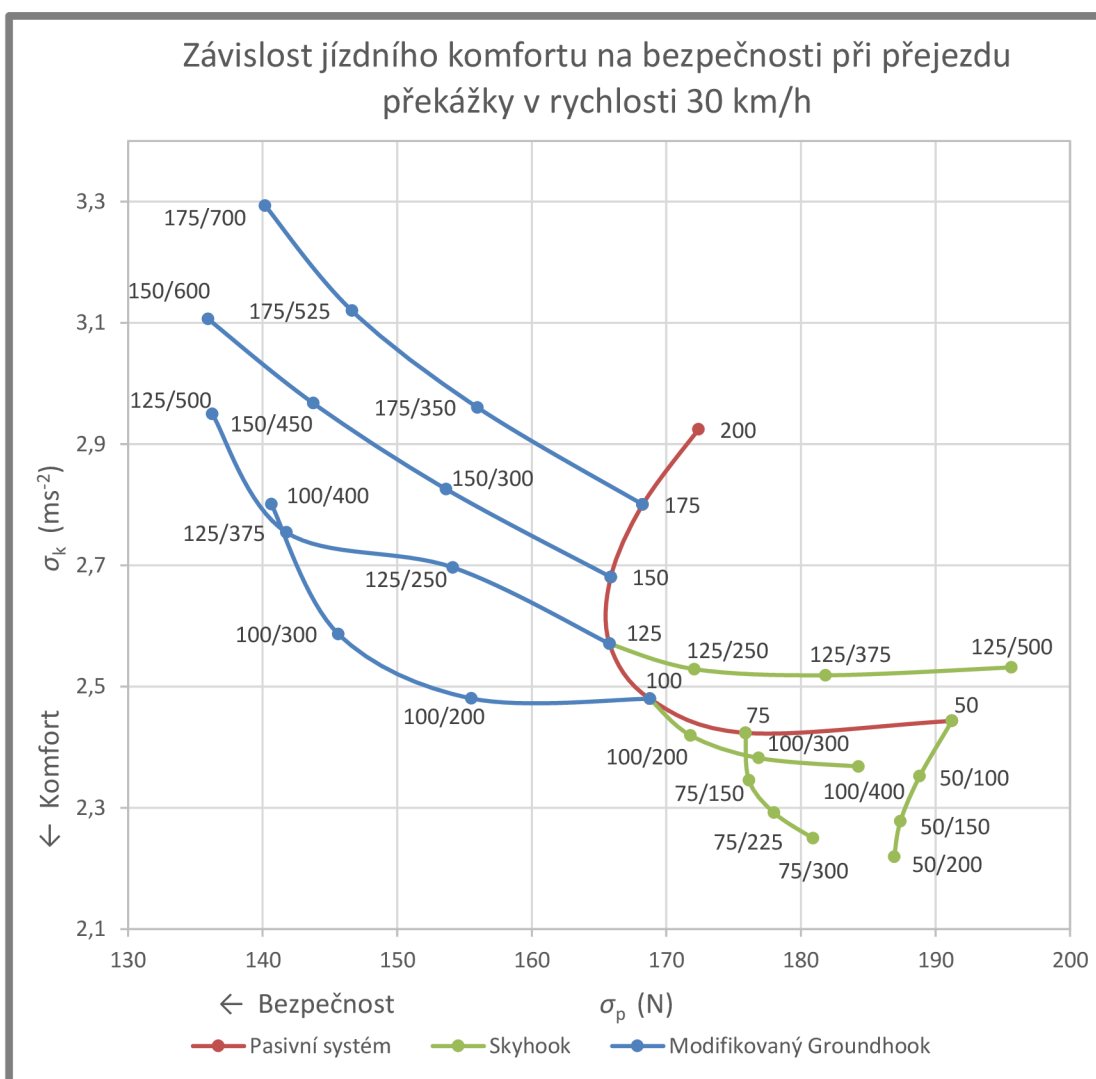
Kromě simulace přejezdu překážky byly provedeny i simulace s harmonickým vstupním signálem o proměnné frekvenci. Tyto simulace slouží k vyhodnocení chování systému v širokém spektru frekvencí a je takto možno porovnávat míru utlumení vlastních frekvencí odpružené a neodpružené hmoty. Podobně jako v článku [12] (viz kapitola 2.4.3) byly vytvořeny dva typy frekvenčních přenosů – pro vyhodnocování komfortu a přítlaku. Rozsah testovaných frekvencí byl zvolen 0–20 Hz pro testování komfortu a 0–30 Hz pro stabilitu přítlaku. Velikost amplitudy byla v obou případech 5 cm. Vzhledem k tomu, že tyto rozsahy byly použity pro testování odpružení motocyklů, jsou v případě MTB důležitější nižší frekvence, kterých může horské kolo dosáhnout pravděpodobněji [8, 12]. Frekvenční charakteristiky jsou vytvořeny z několika bodů (13 pro komfort, 14 pro bezpečnost), které udávají přenos výstupní hodnoty (x_1 pro komfort a $x_2 - w$ pro bezpečnost) vzhledem k vstupnímu signálu w . Každý bod byl vytvořen pomocí samostatného signálu s danou frekvencí, doba simulace byla vždy 5 s. Následně byla určena velikost amplitudy pomocí poloviny rozdílu maxima a minima v časovém úseku 3–5 s, což je rozmezí, kde už byly všechny výstupní signály ustálené. Výsledné simulace korespondují s průběhem frekvenčních odezev uvedených v článku [12].

5 VÝSLEDKY

Hledání optimální F - v charakteristiky a určení vhodnějšího algoritmu z dvojice Skyhook a modifikovaný Groundhook probíhalo „vylučovací metodou“, tedy postupným zmenšováním počtu možných nastavení. Nejprve byly provedeny simulace pro přejezd překážky. Simulace s harmonickým buzením, byly provedeny již jen pro vybraná nastavení.

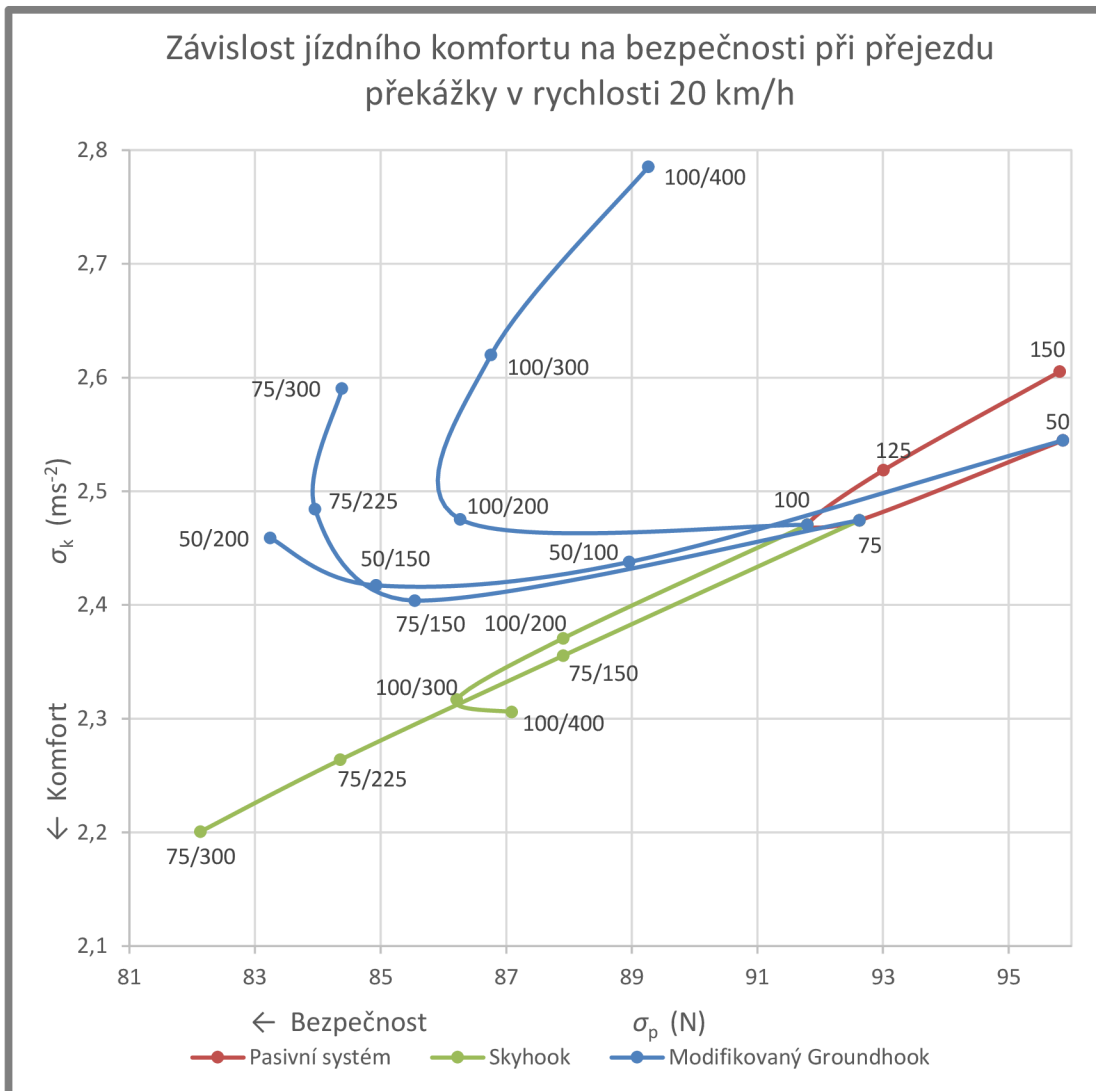
5.1 Výsledky simulací přejezdu překážky

Na obr. 5.1 a 5.2 jsou zobrazeny závislosti jízdního komfortu na bezpečnosti pro pasivní systém a semiaktivní systémy řízené algoritmy Skyhook a modifikovaný Groundhook. Jednotlivé body představují dvojice F - v charakteristik a jsou popsány dvojicí parametrů p_1/p_2 (viz kapitola 4.1.2). Pasivní nastavení využívá pouze F - v charakteristiku neaktivovaného stavu, takže jej popisuje pouze parametr p_1 .



Obr. 5.1 Závislost jízdního komfortu na bezpečnosti při přejezdu překážky v rychlosti 30 km/h

Nepodařilo se zjistit, proč se výsledky měření při nastavení 125/250 vymykají z určitého trendu, který simulace naznačují, pravděpodobně však jde o interní chybu ve výpočtech. Kompletní výsledky ze simulací jsou v příloze I. Na obr. 5.2 jsou pro větší přehlednost zobrazená pouze taková nastavení, která v nějakém ohledu zlepšují efektivitu odpružení.



Obr. 5.2 Závislost jízdního komfortu na bezpečnosti při přejezdu překážky v rychlosti 20 km/h

Jak je ze závislostí vidět, i pouhá změna jízdní rychlosti výrazně ovlivní podobu celé závislosti. Obecně lze na základě těchto výsledků usoudit, že algoritmus Skyhook je velmi efektivní při nižších rychlostech, kdy výrazně zlepšuje komfort i bezpečnost. Ve vyšších rychlostech zůstává zachován jeho pozitivní vliv na komfort, zatímco bezpečnost je obecně horší při srovnání s pasivním systémem. Algoritmus modifikovaný Groundhook zlepšuje jízdní bezpečnost lépe při vyšší rychlosti, kde však zároveň při všech nastaveních zhoršuje komfort. Při nižší rychlosti už nemá natolik výrazný vliv na bezpečnost, nicméně některá nastavení v tomto případě mírně zlepšují komfort.

5.1.2 Vyhodnocení simulací

Ke správné interpretaci těchto výsledků bylo nutné si uvědomit, že odpružení hraje nejdůležitější roli ve vyšších rychlostech, kde působí na horské kolo větší síly a také, že ovladatelnost kola ve vysokých rychlostech závisí především na stabilizaci přítláčné síly. Z těchto důvodů byl jako vhodnější algoritmus vybrán modifikovaný Groundhook, protože s rostoucí rychlostí roste i jeho pozitivní vliv na bezpečnost, zatímco Skyhook naopak tento pozitivní vliv ztrácí. Dále bude tedy nutné nalézt takovou F - v charakteristiku, která bude při použití tohoto algoritmu vykazovat nejlepší výsledky. Pokud vezmeme v úvahu obě závislosti, dostaneme dvě semiaktivní nastavení, která vykazují zlepšení efektivity odpružení při obou rychlostech. Jedná se o dvojici charakteristik s parametry p_1/p_2 : 100/200 a 100/300. První uvedená v obou rychlostech zlepšuje bezpečnost a snižuje směrodatnou odchylku σ_p o cca 7 %. Na komfort má toto nastavení zanedbatelný vliv. Druhá dvojice charakteristik vykazuje v případě nižší rychlosti o něco horší výsledky, avšak simulace pro rychlost 30 km/h vykazuje snížení σ_p o téměř 14 %. K dalšímu porovnání těchto dvou nastavení bylo použito vyhodnocení pomocí frekvenční odezvy na harmonický budící signál, a to jak z hlediska bezpečnosti, tak i komfortu.

5.2 Výsledky simulací s harmonickým vstupním signálem

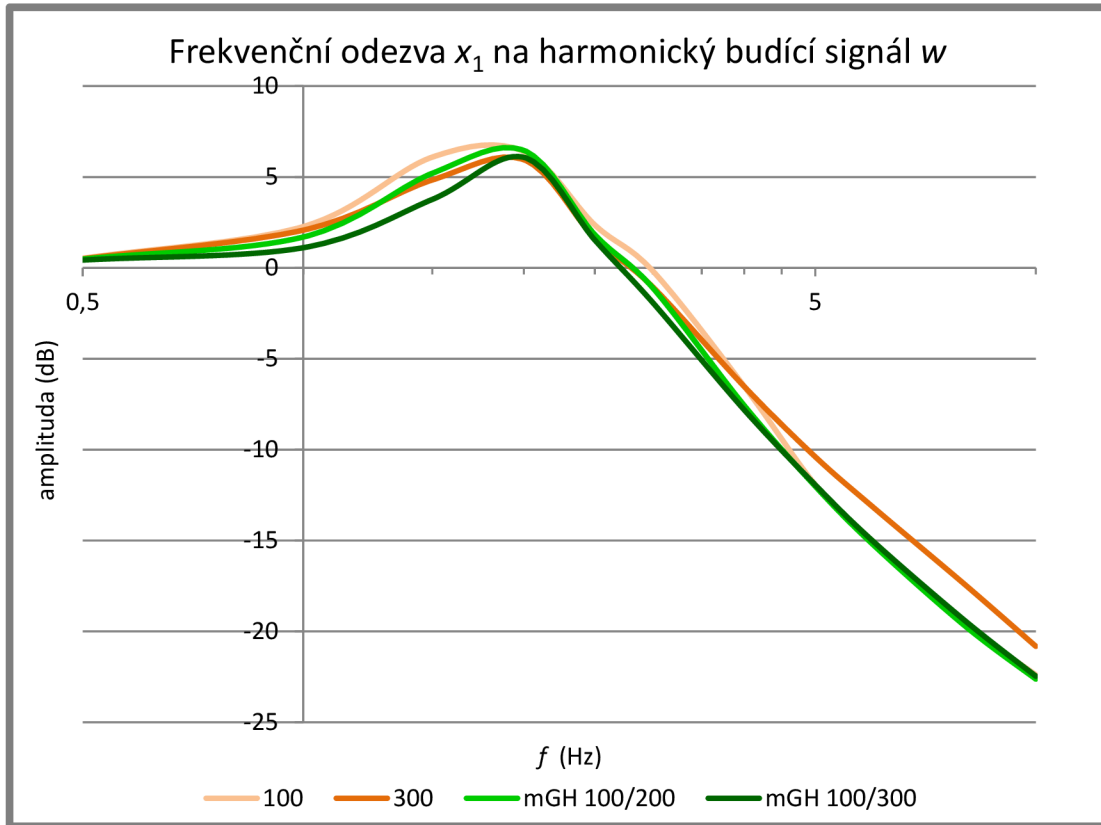
Pro získání frekvenčních charakteristik z hlediska komfortu a bezpečnosti bylo simulováno několik pasivních nastavení a dvě výše zmíněné dvojice F - v charakteristik MR tlumiče za použití algoritmu Groundhook. Z pasivních nastavení byly pro přehlednost vybrány pouze dvě, a to s parametry p_1 : 100 a 300.

5.2.1 Komfort

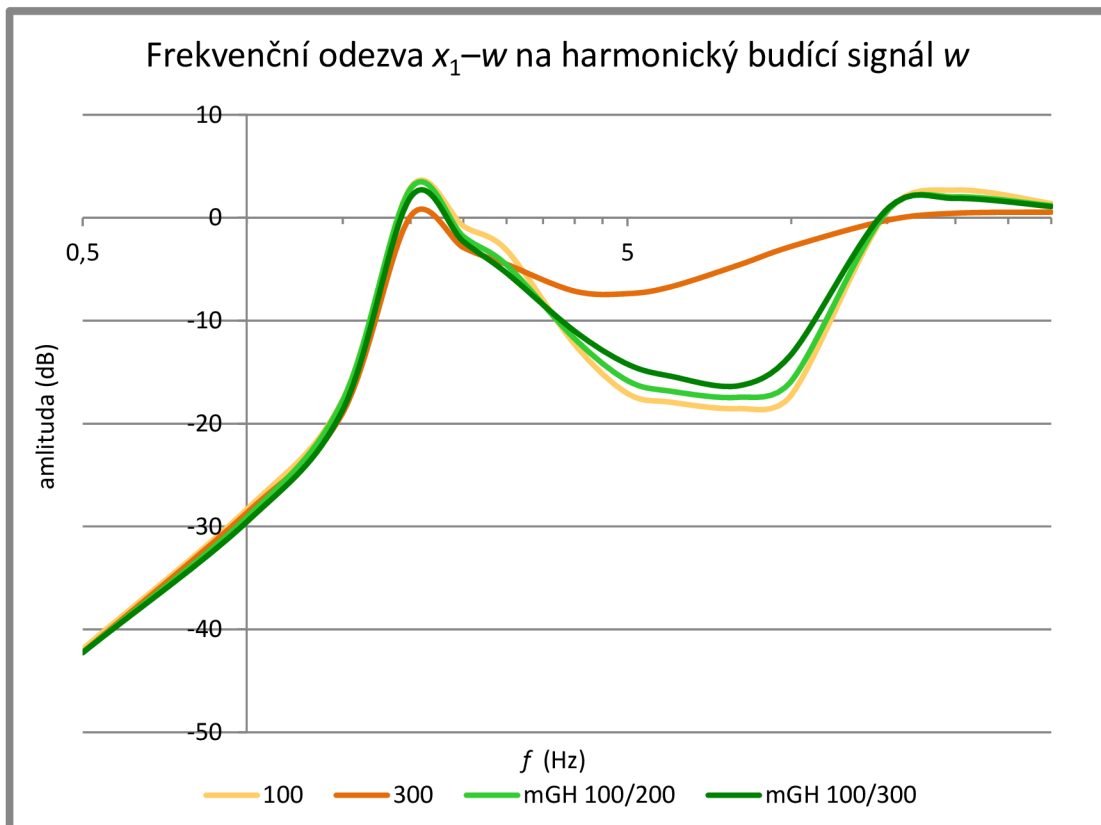
Výsledky simulace harmonického buzení s rozsahem frekvence 0,5–10 Hz z hlediska komfortu jsou na obr. 5.3. Výsledné frekvenční charakteristiky zobrazují odezvu polohy odpružené hmoty x_1 na budící signál w . Simulace byly ve skutečnosti prováděny až do 20 Hz, nicméně v oblasti 10–20 Hz všechny charakteristiky pouze pokračují v lineárně dál, a proto je pro přehlednost tato část vynechána. Vlastní frekvence odpružené hmoty se nachází přibližně na frekvenci 3 Hz. Vlastní frekvence neodpružené hmoty je vzhledem k velkému rozdílu mezi hmotnostmi m_1 a m_2 plně utlumená.

5.2.2 Bezpečnost

Výsledky simulace harmonického buzení s rozsahem frekvence 0,5–30 Hz z hlediska komfortu jsou na obr. 5.4. Výsledné frekvenční charakteristiky zobrazují odezvu vzdálenosti pneumatiky od povrchu x_2-w na budící signál w . Můžeme vidět vlastní frekvenci odpružené hmoty přibližně okolo hodnoty 3 Hz a také vlastní frekvenci neodpružené hmoty v rozmezí 20–30 Hz.



Obr. 5.3 Frekvenční odezva x_1 na harmonický budící signál w



Obr. 5.4 Frekvenční odezva x_1-w na harmonický budící signál w

5.2.3 Souhrnné vyhodnocení simulací s harmonickým vstupním signálem

Je zajímavé, že ačkoliv je algoritmus modifikovaný Groundhook zaměřen především na zlepšení bezpečnosti, v těchto konkrétních podmínkách zlepšuje spíše komfort. Výraznější zlepšení bezpečnosti, které by bylo možné zachytit pomocí frekvenčních charakteristik se objevuje až při vyšším rozdílu parametrů p_1 a p_2 . Tato nastavení však nelze v praxi se současnými tlumiči realizovat. Při přímém porovnání dvojic 100/200 a 100/300 vychází o něco lépe dvojice charakteristik 100/300, přestože jsou tyto rozdíly relativně malé. Ve frekvenční charakteristice zaměřené na komfort vykazuje nastavení s parametry 100/300 nižší amplitudy v celém průběhu. Ve frekvenční charakteristice z hlediska bezpečnosti dokáže tlumič s tímto nastavením lépe tlumit vlastní frekvenci odpružené hmoty. V rozmezí 5–15 Hz na druhou stranu vykazuje vyšší amplitudy, nicméně hodnoty amplitud jsou v této oblasti obecně velmi nízké, a neznamenají proto nějaké větší riziko pro bezpečnost.

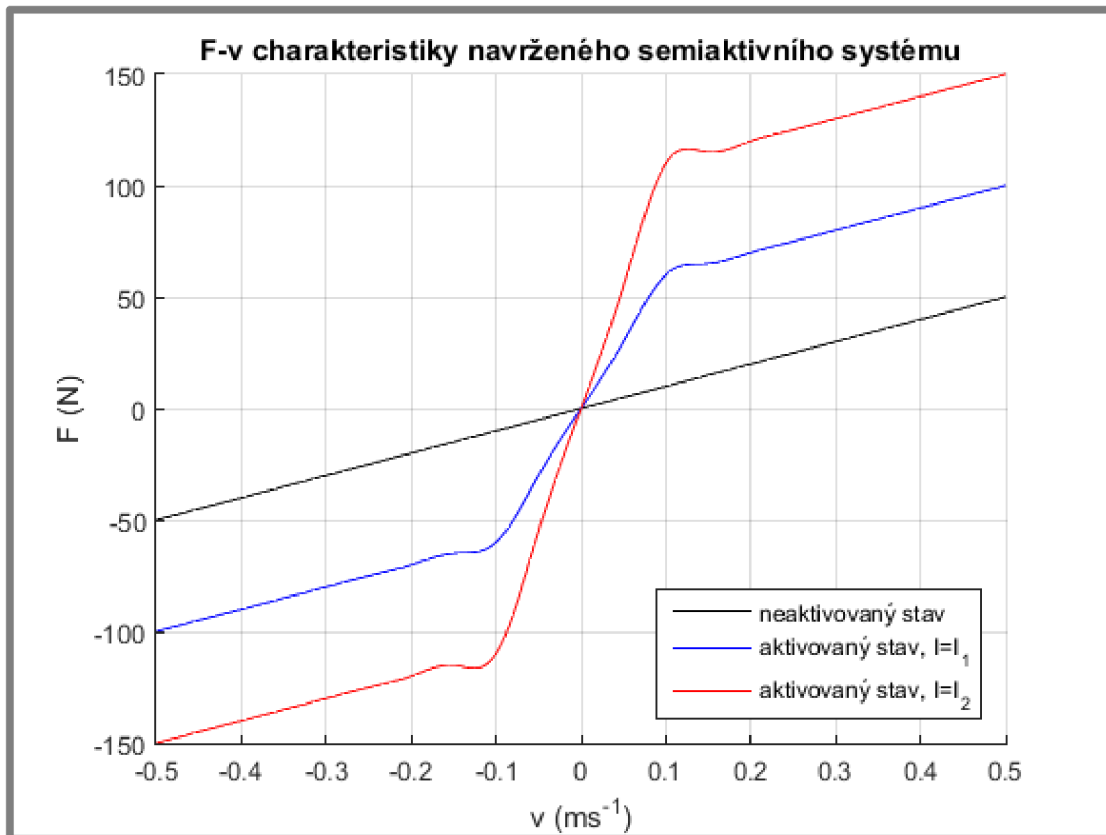
5.3 Stanovení vhodného semiaktivního systému odpružení

Z výše zobrazených výsledků frekvenčních odezev je zřejmé, že neprokázaly výrazné rozdíly v chování MR tlumičů s nastaveními 100/200 a 100/300. Je tedy potřeba vycházet především z výsledků simulací přejezdu překážky. Tyto simulace ukázaly, že pro nižší rychlosti je podle kritéria bezpečnosti i komfortu vhodnější charakteristika s parametry 100/200. Pro vyšší rychlosti, kde bezpečnost hraje vyšší roli, se naopak ukázala jako výhodnější charakteristika 100/300, protože zlepšení bezpečnost je téměř dvojnásobné, pokud porovnáváme obě semiaktivní nastavení, naproti tomu zhoršení komfortu není až tak zásadní (cca 4 % σ_k). Jelikož mají obě tyto dvojice charakteristik stejnou základní pasivní F - v charakteristiku s parametrem $p_1 = 100$, je možné využít vlastností obou těchto dvojic. Výsledný pasivní semiaktivní systém bude využívat MR tlumič, který bude mít v neaktivovaném stavu koeficient tlumení $b_1 = 100 \text{ Nsm}^{-1}$. Semiaktivní systém bude muset mít v tomto případě, kromě informací o vertikálním zrychlení odpružené a neodpružené hmoty z akcelerometrů umístěných například v představci a na spodní části přední vidlice, také informace o jízdní rychlosti z magnetického snímače otáček předního kola. Řídící jednotka poté bude schopna volit mezi dvěma intenzitami magnetického pole pro aktivaci MR kapaliny pomocí dvou hodnot proudu I protékajícího cívkou – nižší hodnotou proud I_1 pro F - v charakteristiku s parametry 100/200 a vyšší I_2 pro parametry 100/300. Při vyšší rychlostech (nad 25 km/h) bude zvolen proud I_2 a bude zajištěna vyšší bezpečnost, naopak při nižších rychlostech bude dosahováno vyššího komfortu při volbě proudu I_1 . Takto upravený algoritmus lze tedy zjednodušeně vyjádřit následující rovnicí:

$$F_{bmg} \begin{cases} b_{H1}(v_1 - v_2), & a_2(v_1 - v_2) \geq 0 \wedge v_j < v_k \\ b_{H2}(v_1 - v_2), & a_2(v_1 - v_2) \geq 0 \wedge v_j > v_k \\ b_L(v_1 - v_2), & a_2(v_1 - v_2) < 0 \end{cases} \quad (5-1)$$

Kde v_j je jízdní rychlost, v_k je kritická rychlost, při jejímž překročení se mění proud I a koeficienty tlumení b_{H1} a b_{H2} zastupují skutečné F - v charakteristiky. V této rovnici tedy zanedbáváme, že charakteristiky ve skutečnosti nejsou lineární. F - v

Charakteristiky pro neaktivovaný stav a aktivovaný stav s proudy I_1 a I_2 jsou na obr. 5.5.



Obr. 5.1 F-v charakteristiky navrženého semiaktivního systému

6 DISKUZE

Součástí této práce bylo simulování chování pasivních a semiaktivních systémů odpružené přední vidlice. Hodnoty vstupních parametrů (hmotnosti, tuhosti a koeficient tlumení pneumatiky) nebyly v průběhu práce měněny a navržené semiaktivní odpružení je tedy optimální pouze pro relativně specifické podmínky a rozhodně jej nelze zevšeobecnit na širší spektrum horských kol. Výrazně závisí například na tlaku v pneumatice, protože ten přímo ovlivňuje charakteristiky pneumatiky. Výsledky simulací virtuálního dynamického modelu byly porovnávány s výsledky obsaženými v literatuře a dosažené průběhy korespondovaly i s experimentálně ověřenými daty.

Výsledky frekvenční odezvy na harmonický budící signál neukázaly velké rozdíly mezi pasivními a semiaktivními nastaveními, nicméně tento typ simulací je nutno brát pouze jako sekundární, protože nesimuluje reálné jízdní podmínky (zvláště ve velkých frekvencích, kdy působí na přední kolo značně velké síly), na druhou stranu však vypovídá o míře tlumení vlastních frekvencí odpružené a neodpružené hmoty. Tyto simulace by bylo možné za účelem přiblížení se realitě provádět také se snižující se amplitudou vstupního signálu, nicméně vyhodnocení by potom bylo obtížnější a na druhou stranu malé nerovnosti ve vysoké rychlosti nemají pro jízdu na horském kole zásadní vliv.

Při simulacích nebylo počítáno se zpožděním reakcí tlumiče, tedy s dobou odezvy. Doba odezvy má vliv na efektivitu odpružení a je možné, že při použití tlumičů s dlouhou dobou odezvy by se semiaktivní systém ukázal jako méně efektivní než pasivní. Nicméně s postupujícím vývojem MR tlumičů se doba odezvy zkracuje.

Ze simulací je zřejmé, že efektivitu odpružení horského kola lze pomocí aplikace semiaktivních systémů odpružení zvýšit. Zjednodušeně lze popsat křivky pasivních i semiaktivních nastavení v závislostech komfortu na bezpečnosti při simulaci přejezdu překážky jako paraboly nebo jejich částí. Z tohoto trendu se odchyloval pouze jeden bod, což ukazuje na relativní spolehlivost vypočtených dat. Byl navržen semiaktivní systém fungující na principu algoritmu modifikovaný Groundhook, který se ukázal pro aplikaci na horských kolech obecně vhodnější. Vzhledem k tomu, že výsledky simulace přejezdu překážky jsou velmi citlivé na zvolenou rychlost, byl zvolený takový semiaktivní systém, který ve svém řízení využívá jako jeden ze vstupních parametrů i jízdní rychlost. Toto navržené semiaktivní odpružení dokáže zlepšovat stabilitu přítláčné síly předního kola, a pokud bereme jako kvantitativní kritérium bezpečnosti směrodatnou odchylku přítláčné síly, je bezpečnost zlepšena v rozmezí cca 5–15 % v závislosti na jízdní rychlosti, přičemž platí, že s rostoucí rychlostí se zvyšuje i míra zlepšení bezpečnosti. Komfort zůstává v nižší rychlosti stejný jako v případě pasivního nastavení, při vyšší rychlosti dochází ke zhoršení komfortu, které lze kvantitativně vyjádřit nárůstem směrodatné odchylky zrychlení odpružené hmoty o přibližně 4 %.

7 ZÁVĚR

Tato práce se zabývá návrhem semiaktivního odpružení horského kola za použití MR tlumiče. V rešeršní části práce byly shrnuty současné poznatky ze tří oblastí – konvenční odpružení (se zaměřením na horská kola), semiaktivní řízení a problematika MR tlumičů. V provedené analýze bylo zjištěno, že je nedostatek publikací, které by se věnovaly propojení těchto témat a snažily se o implementaci semiaktivně řízeného MR tlumiče do odpružení horských kol. Proto byl vytyčen cíl navrhnout tímto způsobem odpruženou přední vidlici. Nejedná se však o kompletní návrhový proces, na konci kterého by byl prototyp, ale o nalezení vhodného semiaktivního algoritmu a určení optimální F - v charakteristiky MR tlumiče.

Pro návrh byl vytvořen virtuální dynamický model odpružení v softwaru MATLAB za využití grafického prostředí Simulink. Bylo potřeba také vytvořit reálné F - v charakteristiky MR tlumiče, které se nemohly zakládat na konkrétních experimentálně změřených datech již existujícího tlumiče, protože výsledné optimální charakteristiky jsou určeny právě k vývoji tlumiče nového. Před samotnými simulacemi byla stanovena kritéria posuzování efektivity odpružení z hlediska bezpečnosti a komfortu. Pomocí modelu bylo simulováno chování reálného odpružení za použití dvou typů simulací. Prvním typem byla simulace přejezdu překážky o výšce 5 cm v rychlosti 30 km/h a 20 km/h. Výstupem z těchto simulací byly dvě závislosti jízdního komfortu na bezpečnosti, kde jednotlivé body představovaly tlumiče pasivní, či MR tlumiče se semiaktivním řízením s různými F - v charakteristikami. Druhý typ simulací bylo buzení harmonickým signálem s proměnnou frekvencí a následné vytvoření frekvenční charakteristiky z pohledu komfortu a bezpečnosti. Po vyhodnocení všech simulací bylo zvoleno netradiční řešení a byl zvolen MR tlumič s třemi stavy řízený algoritmem na základě modifikovaného Groundhooku. Inovace spočívá v přidání jízdní rychlosti jako dalšího vstupního parametru do semiaktivního systému. Díky tomu může řídicí jednotka rozhodovat mezi třemi stavy – buď cívkou MR tlumiče protéká nulový proud, proud I_1 nebo proud I_2 . Tyto tři stavy znamenají lepší přizpůsobení tlumiče jízdním podmínkám, než v případě klasických *on-off* algoritmů. Navrhnuté odpružení zlepšuje bezpečnost jezdce, a to zejména při vyšší rychlosti, za cenu malého zhoršení komfortu při vyšší rychlosti.

Vzhledem k těmto výsledkům lze usoudit, že takto navrhnuté odpružení má potenciál na uplatnění zejména u špičkových závodních modelů horských kol, kde jde komfort stranou a cílem je maximální bezpečnost a ovladatelnost při vysokých rychlostech. Vzhledem k tomu, že navržené odpružení je optimální pouze pro konkrétní vstupní hodnoty (hmotnost jezdce a kola, postoj jezdce, tlak v pneumatice, jízdní rychlost), přichází v úvahu pouze návrh takového odpružení „na míru“ konkrétnímu jezdci, typu kola, a určitému stylu jízdy.

Pro kompletní realizaci odpružení by však bylo žádoucí provést experimentální měření, protože je mnoho vlivů, které efektivitu odpružení ovlivňují a které virtuální model nezahrnuje (konstrukce tlumiče a rozdíl skutečné podoby F - v charakteristiky od teoretické, reálné chování pneumatiky, změna zatížení při brzdění a jízdě z kopce, síly od šlapání, atd.). Dále by bylo nutno provést návrh magnetického pole, elektronického řízení a napájení celého obvodu. Využití experimentu a kompletní realizace tlumiče by mohly být předmětem dalšího studia.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

Seznam použité literatury a odkazů. Je pro něj vytvořen zvláštní styl „literatura“, který odsazuje spodní řádek víceřádkového textu na úroveň tabulátoru odsazujícího text od čísla.

- [1] Discussing mountain bike suspension theory with the experts. In: *Discussing mountain bike suspension theory with the experts - MBR* [online]. Farnborough: Time, 2011 [cit. 2018-01-30]. Dostupné z: http://www.mbr.co.uk/mountain-bike-videos/q_and_a/discussing-mtb-suspension-theory-with-the-experts-258916
- [2] Semi-Active Suspension: An in-depth look at BMW Dynamic Damping Control, Ducati Skyhook Suspension, and Marzocchi's semi-active system. In: *Sport Rider* [online]. Harlan: Bonnier Corporation, 2014 [cit. 2018-01-30]. Dostupné z: <https://www.sportrider.com/tech/semi-active-suspension>
- [3] ŠKVARKA, Jan. *Historie a současnost vývoje technických prvků a doplňků horského kola*. České Budějovice, 2007. Diplomová práce. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, Pedagogická fakulta. Vedoucí práce PaedDr. Ludvík Michalov.
- [4] Servis amortizera Fanatic. In: Fanatic [online]. Novi Sad [cit. 2018-05-11]. Dostupné z: <https://fanatic.rs/servis-prednjeg-zadnjeg-amortizera-viljuske-suspenzije>
- [5] JANČÍK, K. *Konstrukční návrh vibroizolační vzpěry s minimálními pasivními odpory*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 73 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Ondřej Macháček.
- [6] BALTES, Jeff, Cory SUTELA a Rob REDFIELD. Development of a freeride mountain bike suspension fork. *Sports Technology* [online]. 2008, **1**(2-3), 152-165 [cit. 2018-01-30]. DOI: 10.1002/jst.16. ISSN 19346182. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/jst.16>
- [7] PLAZA, Krzysztof. Semiactive control strategies for a fully suspended bicycle. *Mechanics*. 2005, **24**(2), 135–139. ISSN 1734-8927.
- [8] SPELTA, Cristiano, Sergio M. SAVARESI a Luca FABBRI. Experimental analysis of a motorcycle semi-active rear suspension. *Control Engineering Practice*. 2010, **18**(11), 1239-1250. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2010.02.006>. ISSN 0967-0661. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0967066110000432>
- [9] FLORIN, Andronic; IOAN-COZMIN, Manolache-Rusu; LILIANA, Pătuleanu. Passive suspension modeling using MATLAB, quarter-car model, input signal step type. *New technologies and products in machine manufacturing technologies*, 2013, 258-263.
- [10] Exclusive Ride Report: FOX Live Valve Active Suspension System. In: *Exclusive Ride Report: FOX Live Valve Active Suspension System - Pinkbike* [online]. Squamish: Pinkbike, 2015 [cit. 2018-02-05]. Dostupné z: <https://www.pinkbike.com/news/exclusive-ride-report-fox-live-valve-active-suspension-system.html>
- [11] STRECKER, Zbyněk, Ivan MAZŮREK, Jakub ROUPEC a Milan KLAPKA. Influence of MR damper response time on semiactive suspension control efficiency. *Meccanica* [online]. 2015, **50**(8), 1949-1959 [cit. 2018-01-30]. DOI:

- 10.1007/s11012-015-0139-7. ISSN 0025-6455. Dostupné z:
<http://link.springer.com/10.1007/s11012-015-0139-7>
- [12] POUSSOT-VASSAL, C., C. SPELTA, O. SENAME, S.M. SAVARESI a L. DUGARD. Survey on Some Automotive Semi-Active Suspension Control Methods: a Comparative Study on a Single-Corner Model. *IFAC Proceedings Volumes*. 2011, 44(1), 1802-1807. DOI: <https://doi.org/10.3182/20110828-6-IT-1002.00446>. ISSN 1474-6670.
- [13] *Audi magnetic ride* [online]. Ingolstadt: Audi, 2011 [cit. 2018-02-05]. Dostupné z: https://www.audi-technology-portal.de/en/chassis/suspension-control-systems/audi-magnetic-ride_en
- [14] CARLSON, J.David a Mark R JOLLY. MR fluid, foam and elastomer devices. *Mechatronics* [online]. 2000, 10(4-5), 555-569 [cit. 2018-02-05]. DOI: 10.1016/S0957-4158(99)00064-1. ISSN 09574158. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0957415899000641>
- [15] AHMADIAN, Mehdi. *Design and development of magneto rheological dampers for bicycle suspensions*. 1999/01/01, 67, s. -741, 737 s.
- [16] BRACK, Jason, David DANG a Broc SOMMERMEYER. *Magnetorheological Bike Shock*. Dostupné také z: <http://downloads.deusm.com/designnews/20130715-build-instructions.pdf>.
- [17] *MagneRide* [online]. Peking: BWI Group, 2014 [cit. 2018-02-05]. Dostupné z: <http://www.magneride.com/MAGNERIDE20DOT%0COM/magneride%20home%20page.html>
- [18] YANG, Shi-Pu a Ke-Qin ZHU. Analytical solutions for squeeze flow of Bingham fluid with Navier slip condition. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. 2006, 138(2), 173-180. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnnfm.2006.05.007>. ISSN 0377-0257. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377025706001133>
- [19] SEFIDKAR-DEZFOULI, Soroush. *Design, Simulation and Fabrication of a Lightweight Magneto Rheological Damper* [online]. Burnaby, 2014 [cit. 2018-04-07]. Dostupné z: <http://summit.sfu.ca/item/15251>. Diplomová práce. Simon Fraser University, Faculty of Applied Sciences.
- [20] DAMGAARD, Brian, Gustav SVENDSEN, Nicolai BLOCH, Rasmus NIELSEN, Jonas MORSBOL a Jesper KANN. *Modelling and Dimensioning the Rear Suspension of a Mountain Bike*. Aalborg, 2009. Bakalářský projekt. Aalborg University, Department of Mechanical Engineering.
- [21] What Is The Best Tyre Pressure For Bicycle Tyres?. In: *Cycling Inform* [online]. Mansfield: Cycling-Inform Unit Trust [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: <https://www.cycling-inform.com/what-is-the-best-tire-pressure-for-bicycle-tires>
- [22] 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.
- [23] *RockShox Spare Parts Catalog*. Chicago: SRAM Corporation, 2007.
- [24] Investigating Weight Distribution on a Bicycle. *Vernier* [online]. Beaverton: Vernier Software & Technology, 2015 [cit. 2018-03-19]. Dostupné z: <https://www.vernier.com/innovate/investigating-weight-distribution-on-a-bicycle/>
- [25] ZEINALI, Mohammadjavad, Saiful Amri MAZLAN, Abdul Yasser Abd FATAH, Hairi a ZAMZURI. A phenomenological dynamic model of a

magnetorheological damper using a neuro-fuzzy system. *Smart Materials and Structures*. 2013, 22(12), 125013. ISSN 0964-1726. Dostupné také z:
<http://stacks.iop.org/0964-1726/22/i=12/a=125013>

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

MR	- magnetoreologický
MTB	- horské kolo
SH	- Skyhook
mGH	- modifikovaný Groundhook
F_k (N)	- pružná síla
k (Nm ⁻¹)	- tuhost
x (m)	- podélná deformace pružiny
F_b (N)	- tlumící síla
b (Nsm ⁻¹)	- koeficient tlumení
v (ms ⁻¹)	- rychlost
k_1 (Nm ⁻¹)	- tuhost pružiny
k_2 (Nm ⁻¹)	- tuhost pneumatiky
b_1 (Nsm ⁻¹)	- koeficient tlumení tlumiče
b_2 (Nsm ⁻¹)	- koeficient tlumení pneumatiky
m_1 (kg)	- hmotnost odpružené hmoty
m_2 (kg)	- hmotnost neodpružené hmoty
a_1, \ddot{x}_1 (ms ⁻²)	- zrychlení odpružené hmoty
a_2, \ddot{x}_2 (ms ⁻²)	- zrychlení neodpružené hmoty
v_1, \dot{x}_1 (ms ⁻¹)	- rychlost odpružené hmoty
v_2, \dot{x}_2 (ms ⁻¹)	- rychlost neodpružené hmoty
x_1 (m)	- posuv odpružené hmoty
x_2 (m)	- posuv neodpružené hmoty
w (m)	- vertikální posuv povrchu
\dot{w} (ms ⁻¹)	- vertikální rychlost povrchu
U (V)	- napětí
Q (Ah)	- náboj
b_{1L} (Nsm ⁻¹)	- nižší hodnota koeficientu tlumení
b_{1H} (Nsm ⁻¹)	- vyšší hodnota koeficientu tlumení
F_{bS} (N)	- tlumící síla při použití algoritmu Skyhook
F_{bmg} (N)	- tlumící síla při použití algoritmu modifikovaný Groundhook
N (-)	- počet vyhodnocovaných bodů
J_k (-)	- ztrátová funkce pro komfort
J_p (-)	- ztrátová funkce pro přítlak (bezpečnost)
σ_k, σ_{a1} (ms ⁻²)	- směrodatná odchylka zrychlení odpružené hmoty
σ_p, σ_F (N)	- směrodatná odchylka přítlačné síly
τ (MPa)	- tečné napětí
τ_1 (MPa)	- mez kluzu
p_1, p_2	- parametry F - v charakteristik
F_p (N)	- přítlačná síla
f (Hz)	- frekvence
v_j (ms ⁻¹)	- jízdní rychlost
v_k (ms ⁻¹)	- kritická rychlost
I_1 (A)	- nižší napájecí proud cívky
I_2 (A)	- vyšší napájecí proud cívky
b_{1H1} (Nsm ⁻¹)	- koeficient tlumení pro nižší napájecí proud cívky
b_{1H2} (Nsm ⁻¹)	- koeficient tlumení pro vyšší napájecí proud cívky

10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	
Obr. 2.1 Celoodpružené horské kolo [3]	13
Obr. 2.2 Odpružená přední vidlice [4]	14
Obr. 2.3 Konstrukce pasivních tlumičů: a) jednoplášťový tlumič, b) dvouplášťový tlumič, c) tlumič s průběžnou pístnicí [5]	15
Obr. 2.4 Model využívaný pro simulaci kmitání [9]	16
Obr. 2.5 Zadní tlumič a řídicí jednotka systému FOX Live Valve [10]	17
Obr. 2.6 Frekvenční odezva; vlevo výsledky pro komfort, vpravo pro bezpečnost [12]	20
Obr. 2.7 Schéma MR tlumiče [13]	21
Obr. 2.8 Reologické modely MR kapaliny v aktivovaném stavu: (a) Binghamský (b) bi--viskozni model [18]	21
Obr. 2.9 F - v charakteristiky MR tlumiče pro různé proudy [11]	22
Obr. 4.1 Model pasivního systému odpružení přední vidlice	24
Obr. 4.2 Experimentálně změřené a pro výpočtové modely upravené F - v charakteristiky MR tlumiče [24]	26
Obr. 4.3 Zdrojový kód pro tvorbu F - v charakteristik, kde u je hodnota pístové rychlosti a y je výstup-ní hodnota síly	27
Obr. 4.4 Příklad sestrojených F - v charakteristik s parametrem $p_1=100$ pro neaktivovaný stav a aktivované stavy s parametry $p_2 = \{200; 300; 400\}$	27
Obr. 4.5 Realizace alogitmů SH a mGH	28
Obr. 4.6 Virtuální dynamický model zapojený pro simulaci algoritmu SH	28
Obr. 4.7 Výsledky simulace přejezdu překážky v rychlosti 30 km/h při výchozím pasivním nastavení	29
Obr. 5.1 Závislost jízdního komfortu na bezpečnosti při přejezdu překážky v rychlosti 30 km/h	31
Obr. 5.2 Závislost jízdního komfortu na bezpečnosti při přejezdu překážky v rychlosti 20 km/h	32
Obr. 5.3 Frekvenční odezva x_1 na harmonický budící signál w	34
Obr. 5.4 Frekvenční odezva x_1-w na harmonický budící signál w	34
Obr. 5.5 F - v charakteristiky navrženého semiaktivního systému	346

11 SEZNAM TABULEK

Tab. 4.1 Hodnoty konstant výchozího pasivního systému

25

12 SEZNAM PŘÍLOH

12

Příloha I Výsledky simulace přejezdu překážky s vyznačenými optimálními
charakteristikami

Příloha I Výsledky simulace přejezdu překážky s vyznačenými optimálními charakteristikami

Tab. I.1 Kompletní výsledky simulace přejezdu překážky pro rychlost 30 km/h

Řídící algoritmus	Parametry F-v charakteristik	Komfort σ_K (ms ⁻²)	Bezpečnost σ_K (N)
Pasivní	50	2,44	191,22
	75	2,42	175,89
	100	2,48	168,78
	125	2,57	165,78
	150	2,68	165,87
	175	2,80	168,24
	200	2,92	172,39
Skyhook	50/50	2,44	191,22
	50/100	2,35	188,83
	50/150	2,28	187,39
	50/200	2,22	186,94
	75/75	2,42	175,89
	75/150	2,35	176,14
	75/225	2,29	177,99
	75/300	2,25	180,90
	100/100	2,48	168,78
	100/200	2,42	171,80
	100/300	2,38	176,86
	100/400	2,37	184,27
	125/125	2,57	165,78
	125/250	2,53	172,09
125/375	2,52	181,82	
125/500	2,53	195,64	
Modifikovaný Groundhook	100/100	2,48	168,78
	100/200	2,48	155,51
	100/300	2,59	145,63
	100/400	2,80	140,64
	125/125	2,57	165,78
	125/250	2,70	154,14
	125/375	2,75	141,77
	125/500	2,95	136,26
	150/150	2,68	165,87
	150/300	2,83	153,65
	150/450	2,97	143,76
	150/600	3,11	135,94
	175/175	2,80	168,24
175/350	2,96	155,97	
175/525	3,12	146,64	
175/700	3,29	140,19	

Tab. I.2 Kompletní výsledky simulace přejezdu překážky pro rychlost 20 km/h

Řídicí algoritmus	Parametry F-v charakteristik	Komfort σ_K (ms ⁻²)	Bezpečnost σ_K (N)
Pasivní	50	2,54	95,87
	75	2,47	92,63
	100	2,47	91,80
	125	2,52	93,01
	150	2,61	95,81
Skyhook	75/75	2,47	92,63
	75/150	2,36	87,91
	75/225	2,26	84,36
	75/300	2,20	82,13
	100/100	2,47	91,80
	100/200	2,37	87,91
	100/300	2,32	86,21
Modifikovaný Groundhook	100/400	2,31	87,09
	50/50	2,54	95,87
	50/100	2,44	88,96
	50/150	2,42	84,93
	50/200	2,46	83,24
	75/75	2,47	92,63
	75/150	2,40	85,55
	75/225	2,48	83,96
	75/300	2,59	84,38
	100/100	2,47	91,80
	100/200	2,48	86,27
100/300	2,62	86,76	
100/400	2,79	89,26	