



# 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 KONSTRUKCE MR TLUMIČE DO ODPRUŽENÉ VIDLICE KOLA

THE CONSTRUCTION OF MR DAMPER FOR MTB FORK SUSPENSION

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Matúš Salva

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Zbyněk Strecker, Ph.D.

BRNO 2020



# Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav konstruování
Student:	<b>Matůš Salva</b>
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	<b>Ing. Zbyněk Strecker, Ph.D.</b>
Akademický rok:	2019/20

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 konstrukce MR tlumiče do odpružené vidlice kola

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Vibrace a rázy přenášené do řídítek horského kola zvyšují únavu a snižují ovladatelnost jízdního kola. Přední odpružená vidlice má tyto rázy minimalizovat. Semiaktivní řízení tlumiče umožňuje dosáhnout vyšší míry vibroizolace s malými energetickými nároky.

Typ práce: výzkumná

### Cíle bakalářské práce:

Hlavním cílem je návrh semiaktivního řízení přední odpružené vidlice sjezdového kola.

Dílčí cíle bakalářské práce:

- určení optimálního silového rozsahu MR tlumiče,
- vytvoření jednoduchého simulačního modelu kola,
- simulace semiaktivního řízení odpružené vidlice + analýza výsledků.

Požadované výstupy: průvodní zpráva.

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

Časový plán, struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

<http://ustavkonstruovani.cz/texty/bakalarske-studium-ukonceni/>

### Seznam doporučené literatury:

GOŁDASZ, J. a B. SAPIŃSKI. Insight into Magnetorheological Shock Absorbers. New York: Springer International Publishing, 2015. ISBN 978-3-319-13232-7.

STRECKER, Z., J. ROUPEC, I. MAZUREK, O. MACHACEK, M. KUBIK a M. KLAPKA. Design of magnetorheological damper with short time response. Journal of Intelligent Material Systems and Structures. 2015, 26(14), 1951-1958. DOI: 10.1177/1045389X15591381. ISSN 1045-389x.

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 2019/20

V Brně, dne

L. S.

---

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

---

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

## ABSTRAKT

V horskej cyklistike je predné odpruženie dôležitý komponent, ktorý zaisťuje komfort a bezpečnosť jazdy. Táto bakalárska práca sa zaoberá návrhom semiaktívneho odpruženia, ktoré zvláda tieto úlohy lepšie ako v cyklistike bežne používané adaptívne odpruženie. Za týmto účelom boli vytvorené simulačné modely odpruženia s adaptívnym odpružením a so semiaktívnym odpružením obsahujúcim MR tlmič s riadiacim algoritmom Skyhook. Na základe simulácie bol vytvorený optimálny silový rozsah MR tlmiča pre použitie v horskej cyklistike. Výsledky simulácie MR tlmiča boli ďalej porovnané s výsledkami simulácie odpruženia obsahujúceho experimentálne zistené F-v charakteristiky adaptívneho tlmiča, použitého v zjazdovom bicykli. MR tlmič v kombinácii s algoritmom Skyhook dosiahol lepšie výsledky v oblasti jazdného komfortu a zachoval adhéziu predného kolesa rovnakú ako v prípade použitia adaptívneho tlmiča. Výsledný silový rozsah je možné použiť k ďalšiemu testovaniu, prípadne ku konštrukcii MR tlmiča vhodného do vidlice horského bicykla.

## KLÚČOVÉ SLOVÁ

MR tlmič, Skyhook, semiaktívne odpruženie, MTB predná vidlica, horský bicykel

## ABSTRACT

In MTB is front suspension very important part of bike. It ensures comfort of ride and security. This Bachelor thesis deals with the theoretical design of semi-active suspension for MTB fork. For this purpose of simulation models of suspension used adaptive damper and MR damper with Skyhook algorithm were made. Range of forces for MR damper for use in MTB was made on basis of simulation. Simulation results of semi-active suspension were compared to simulation results of adaptive suspension which contained F-v characteristics of damper used in downhill bike. MR damper with Skyhook had better results in field of riding comfort and it retained adhesion of adaptive damper. Final range of forces for MR damper in possible to use for more tests or for design of MR damper for fork of mountain bike.

## KEYWORDS

MR damper, Skyhook, semi-active suspension, MTB fork, mountain bike



## BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

Salva, Matúš. *Návrh konstrukce MR tlumiče do odpružené vidlice kola*. Brno, 2020, 60 s. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedúci bakalárskej práce Ing. Zbyněk Strecker, Ph.D.





## POĎAKOVANIE

Na tomto mieste by som rád poďakoval vedúcemu mojej bakalárskej práce Ing. Zbyňkovi Streckerovi, Ph.D za odborné vedenie pri práci, za ochotu, trpezlivosť a čas, ktorý mi venoval. Ďakujem tiež svojim blízkym a rodičom za podporu počas celého štúdia a pri vypracovaní tejto práce.

## PREHLÁSENIE AUTORA O PÔVODNOSTI PRÁCE

Prehlasujem, že bakalársku prácu som vypracoval samostatne, pod odborným vedením Ing. Zbyňka Streckera, Ph.D Súčasne prehlasujem, že všetky zdroje obrazových a textových informácií, z ktorých som čerpal, sú riadne citované v zozname použitých zdrojov.

.....

Podpis autora



# OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b>	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>PREHLAD SÚČASNÉHO STAVU POZNANIA</b>	<b>14</b>
2.1	Časti odpruženej vidlice horských bicyklov	14
2.1.1	Pružina	14
2.1.2	Adaptívny tlmič	17
2.2	Aktívne odpruženie	18
2.3	Semiaktívne odpruženie	19
2.3.1	Magnetoreologický (MR) tlmič	20
2.3.2	Skyhook a Modifikovaný Groundhook	23
<b>3</b>	<b>ANALÝZA PROBLÉMU A CIEĽ PRÁCE</b>	<b>26</b>
3.1	Analýza problému	26
3.2	Cieľ práce	27
<b>4</b>	<b>MATERIÁL A METÓDY</b>	<b>28</b>
4.1	Simulačný model	28
4.1.1	F-v charakteristika adaptívneho tlmiča	31
4.2	Meranie trate	32
4.3	Semiaktívne riadenie	34
4.4	Výpočet adhézie, RMS a prenosovej charakteristiky	35
<b>5</b>	<b>VÝSLEDKY</b>	<b>36</b>
5.1	Hodnoty zrýchlenia zjazdovej trate	36
5.2	Simulácia adaptívneho odpruženia	37
5.2.1	Výsledné vertikálne rýchlosti	38
5.2.2	Adhézia a stlačenie vidlice	40
5.3	Simulácia odpruženia s použitím MR tlmiča a porovnanie výsledkov so simuláciou s použitím adaptívneho tlmiča	41
5.3.1	Výsledné vertikálne rýchlosti	45
5.3.2	Adhézia	47
5.3.3	Vertikálne zrýchlenie	48
<b>6</b>	<b>DISKUSIA</b>	<b>49</b>

<b>7</b>	<b>ZÁVER</b>	<b>51</b>
<b>8</b>	<b>ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV</b>	<b>52</b>
<b>9</b>	<b>ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK, SYMBOLOV A VELIČÍN</b>	<b>54</b>
<b>10</b>	<b>ZOZNAM OBRÁZKOV A GRAFOV</b>	<b>55</b>
<b>11</b>	<b>ZOZNAM TABULIEK</b>	<b>57</b>
<b>12</b>	<b>ZOZNAM PRÍLOH</b>	<b>58</b>
12.1	Príloha 1: Model semiaktívneho odpruženia prednej vidlice	58
12.2	Príloha 2: Program na meranie zrýchlenia trate	59
12.3	Príloha 3: Program na vyhodnotenie nameraného zrýchlenia	60

# 1 ÚVOD

System odpruženia a rám bicykla sú dve najdôležitejšie súčasti horského bicykla. Práve vidlica je súčasťou, ktorá odlišuje odpružené bicykle od tých neodpružených. Odpružená vidlica má za úlohu tlmiť nárazy vznikajúce prejazdom po terénnych nerovnostiach. Je to zásadný komponent zvyšujúci komfort a bezpečnosť jazdy, ale bez neho by zároveň nebolo možné posúvať hranice horskej cyklistiky ďalej a jazdiť v tých najnáročnejších podmienkach. Pri navrhovaní systému odpruženia je potrebné aby bolo možné kontrolovať relatívnu polohu medzi podložkou a telesom, ktoré chceme odpružiť. Aby bolo možné túto charakteristiku dosiahnuť musí byť odpruženie veľmi „tvrdé“. Druhou rovnako dôležitou úlohou odpruženia je izolovať pohyb odpruženého telesa od pohybu podložky. Na dosiahnutie tohto efektu musí byť odpruženie veľmi „mäkké“. Bežne používané adaptívne systémy odpruženia využívajú k dosiahnutiu tejto charakteristiky možnosť meniť tuhosť pružiny a koeficient tlmenia [1]. Tieto možnosti však majú svoje limity a sú na vrchole súčasných konštrukčných možností, z toho dôvodu začínajú mnohí výrobcovia nielen v automobilovom priemysle využívať výhody semiaktívneho odpruženia. Semiaktívne tlmiče majú v porovnaní s adaptívnymi výrazne kratšiu časovú odozvu, sú schopné zaznamenať nerovnosti povrchu a podľa toho upraviť tlmiacu charakteristiku odpruženia. Tieto vlastnosti majú rozhodne uplatnenie aj v oblasti horskej cyklistiky.

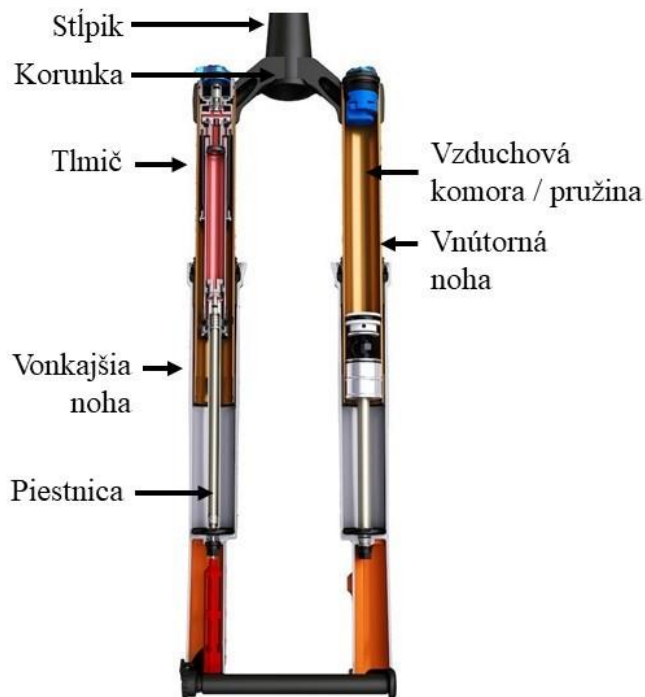
V tejto práci je popísaný návrh semiaktívneho riadenia prednej odpruženej vidlice na zjazdovom bicykli. Zjazd na horských bicykloch patrí medzi extrémne športy a často sa jazdí v náročných podmienkach. Preto je práve odpruženie kľúčový komponent zjazdového bicykla.

Na navrhnutie semiaktívneho riadenia bol použitý princíp magnetoreologizmu, s využitím algoritmu semiaktívneho riadenia. To umožní znížiť vibrácie a rázy prechádzajúce do riaditok bicykla a tým zvýšiť komfort a bezpečnosť jazdy.

## 2 PREHL'AD SÚČASNÉHO STAVU POZNANIA

### 2.1 Časti odpruženej vidlice horských bicyklov

V súčasnej dobe existujú dva typy konštrukcií predných vidlíc. Sú to paralelogramové a teleskopické vidlice. Táto práca sa zaoberá iba teleskopickým prevedením. Vidlica je spojená s rámom stĺpikom a korunkou (v prípade zjazdovej vidlice dvoma korunkami), ktoré sú priskrutkované alebo vlepene na vnútorné nohy. Na vnútorné nohy sú nasunuté vonkajšie nohy, v ktorých sa nachádzajú klzné puzdra. Aby sa vonkajšie nohy nevysunuli z vnútorných nôh von, sú spoločne prepojené piestnicou. Vo vnútorných nohách sa nachádza tlmič a pružina, ktorá môže byť vinutá alebo vzduchová [2] [3].



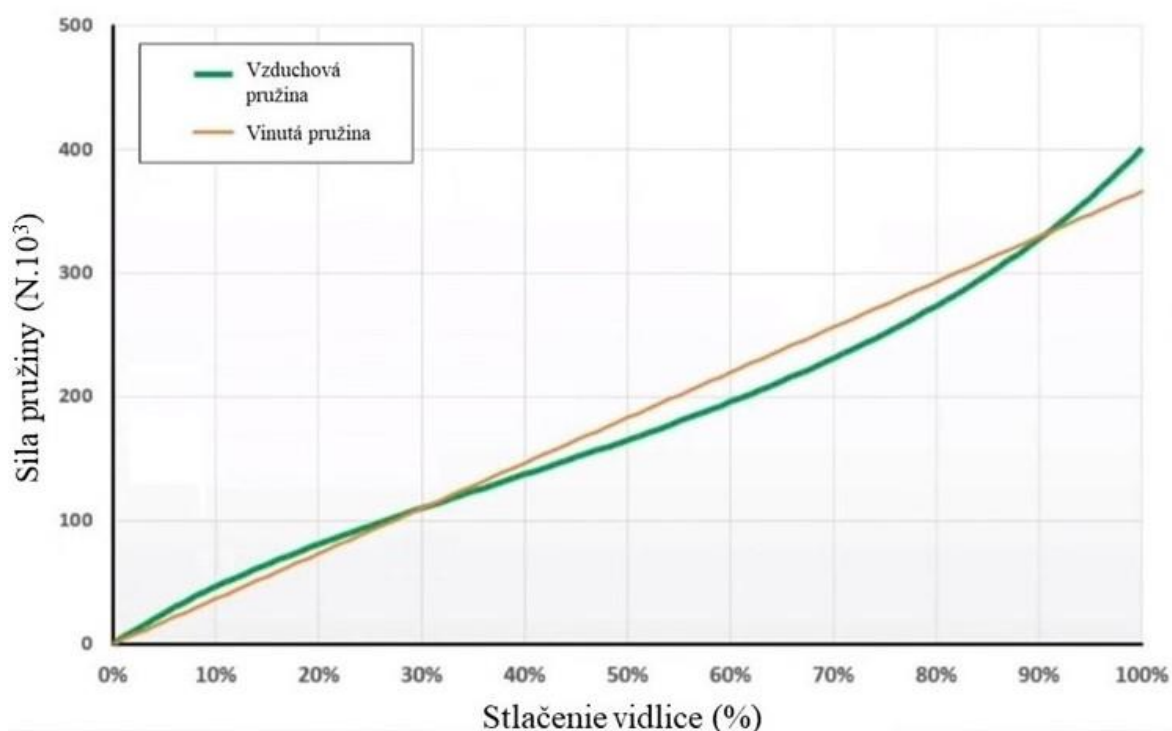
Obr. 2-1 Predná odpružená vidlica horského bicykla [4].

#### 2.1.1 Pružina

Pružina vo vidlici slúži ako komponent absorbujúci nárazy a premieňa kinetickú energiu spôsobenú nárazom kolesa na prekážku na energiu potenciálnu. Zároveň udržiava trakciu kolesa s podložkou a zabezpečuje ich vzájomný kontakt. Bežne sa k pohlteniu nárazu používajú dva typy pružín.

Pružina:

- vinutá
- vzduchová



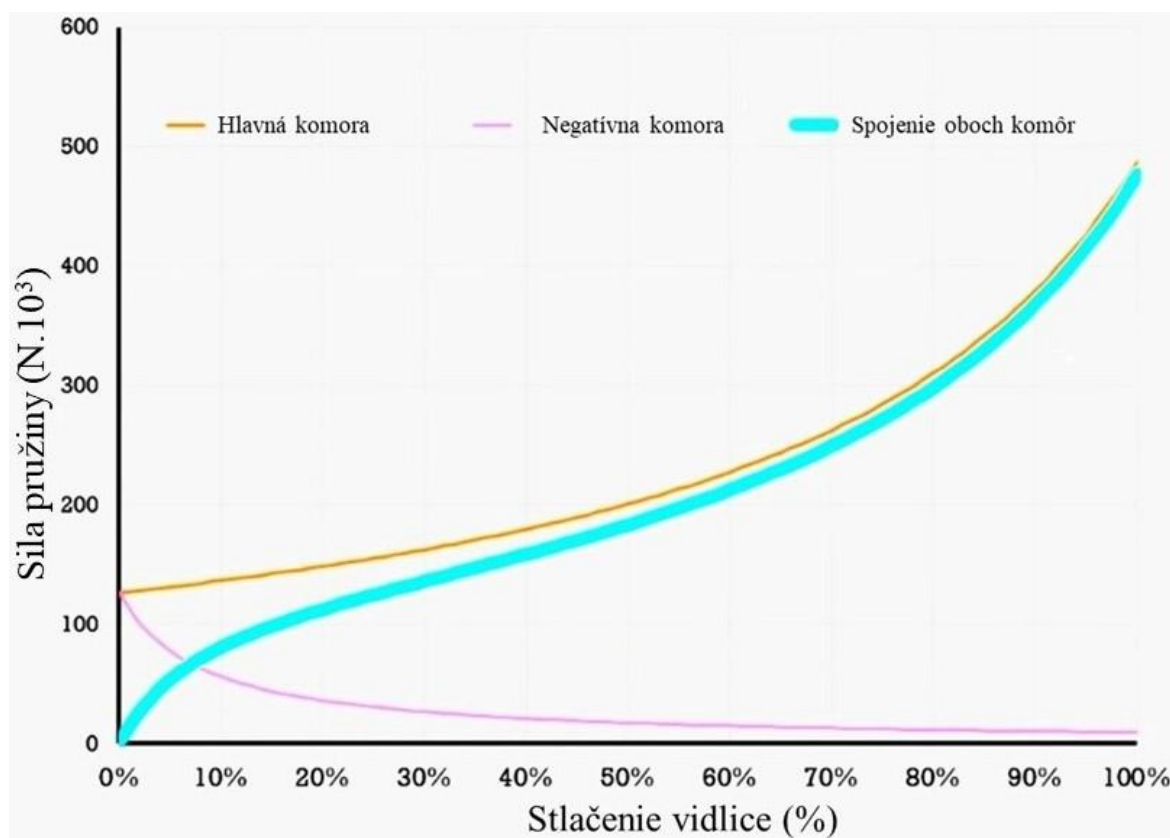
Obr. 2-2 Porovnanie priebehu pružnej sily vinutej pružiny so vzduchovou pružinou [5].

Vinuté pružiny sú vyrobené z drôtu pružinovej ocele alebo titánu. Vinutá pružina poskytuje lineárny priebeh sily počas celého priebehu kompresie (stlačenia). Táto pružná sila závisí na dĺžkovej deformácii pružiny  $x$  (m):

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

kde  $k$  ( $\text{Nm}^{-1}$ ) je tuhosť pružiny. Vinuté pružiny sú dostupné v rôznych tvrdostiach a vďaka lineárnej závislosti poskytujú hladkú a konzistentnú absorpciu nárazov v celom rozsahu chodu vidlice [5]. Lineárnu charakteristiku pruženia je možné odstrániť premenlivým stúpaním závitov alebo premenlivým priemerom pružinového drôtu, kedy sa priemer drôtu pružiny znižuje smerom k jednému koncu. To zmení charakter pružiny na progresívny [6].

Vzduchová pružina má progresívny stupeň kompresie, to znamená, že priebeh pružnej sily je nelineárny. V počiatočnej časti chodu je pružina mäkkšia ako v poslednej časti. Tlak vzduchu vo vzduchovej komore je zväčša možné meniť v rozsahu stanovenom výrobcom. Hlavnými výhodami vidlice so vzduchovou pružinou je nižšia hmotnosť a jednoduchšia zmena tuhosti pružiny ako v prípade vidlice s vinutou pružinou [5]. Naopak častou nevýhodou vzduchových pružín býva počiatočné predpätie pružiny vychádzajúce z konštrukcie vzduchovej komory. V prípade, že je vidlica úplne vysunutá, je potrebné na jej stlačenie prekonať počiatočnú silu predpätia. Táto sila predpätia je často nežiadúca, lebo znižuje citlivosť vidlice na malé nerovnosti. Preto sa pri konštrukcii vzduchových pružín používa okrem hlavnej vzduchovej komory aj negatívna komora, ktorá silu predpätia eliminuje (viď Obr. 2-3).



Obr. 2-3 Vplyv hlavnej a negatívnej komory na priebeh pružnej sily vzduchovej pružiny [7].

Pri použití vinutej pružiny sa sila predpätia vo vidlici nenachádza. Je možné ju dodatočne pridať manuálnym predpätím pružiny a to skrátením dĺžky komory kde je pružina umiestnená pomocou vymedzovacích vložiek.

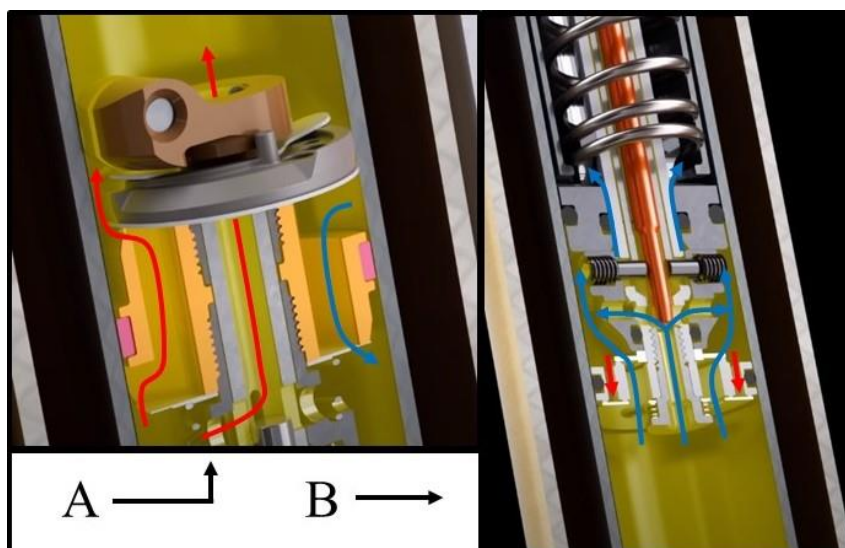


## 2.1.2 Adaptívny tlmič

V druhej vnútornej nohe vidlice sa nachádza tlmič. Ako už bolo spomenuté v úvode kapitoly, v horskej cyklistike sa väčšinou využívajú teleskopické tlmiče, a to buď jednoplášťové alebo dvojplášťové. Tlmič pomáha pružine pohltiť veľké rázy a kinetickú energiu premieňa na teplo. Rovnako reguluje rýchlosť vysunutia vidlice zo stlačeného stavu do stavu kedy je pružina plne rozťahnutá. Regulácia tejto rýchlosti sa nazýva odskok. Ďalšou nemenej dôležitou úlohou tlmiča je tmiť vlastné kmity pružiny. Sila tmenia  $F_b$  lineárne závisí na rýchlosti pohybu piestu v tlmiči  $v$  ( $\text{ms}^{-1}$ ):

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

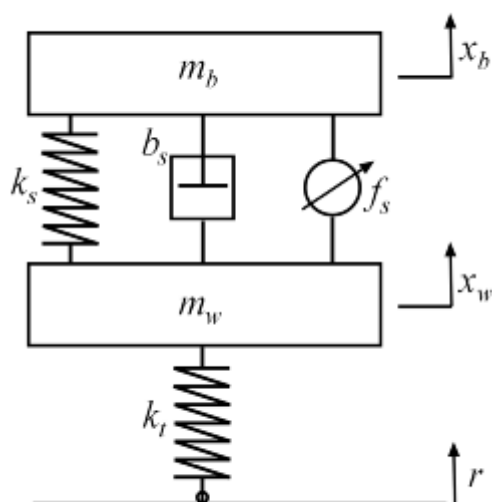
kde  $b$  ( $\text{Nsm}^{-1}$ ) je koeficient tmenia závislý na vlastnostiach kvapaliny a konštrukcií tlmiča. V cyklistike sa väčšinou používajú tlmiče pracujúce s olejom ako tlmiacou kvapalinou. Pri tmení prúdi olej z jednej tlmiacej komory do druhej cez ventily. Tie slúžia na reguláciu prietoku oleja. Viskozita oleja a veľkosť ventilov definuje koeficient tmenia. Voľba optimálneho koeficientu tmenia závisí na viacerých faktoroch. Sú to napríklad hmotnosť jazdca alebo charakteristika trate [8]. Preto tlmiče, obzvlášť tie použité v zjazdových vidliciach, poskytujú možnosť nastavenia prietoku oleja vo ventiloch. Je možné nastaviť nezávisle na sebe ventil kompresie a odskoku. To je znázornené na Obr. 2-4, ktorý predstavuje rez tlmičom vidlice Fox 36. Systém odpruženia využívajúci kombináciu pružiny a adaptívneho tlmiča sa nazýva adaptívny systém odpruženia. V cyklistike sa okrem adaptívnych tlmičov používajú aj pasívne tlmiče. Pasívne na rozdiel od adaptívnych neumožňujú nastavenie prietoku oleja cez jednotlivé ventily. Pasívne tlmiče sa používajú najmä v lacnejších vidliciach a v porovnaní s adaptívnymi majú horšie vlastnosti. Z tohto dôvodu budú ďalej v práci porovnávané semiaktívne tlmiče s adaptívnymi.



Obr. 2-4 Rez tlmičom vidlice Fox 36, modré šípky znázorňujú prúdenie oleja cez ventily pri kompresii, červené šípky znázorňujú prúdenie oleja pri odskoku. Ventil označený (A) predstavuje ventil odskoku, ventil označený (B) predstavuje ventil kompresie [9].

## 2.2 Aktívne odpruženie

Aktívny systém odpruženia je inteligentný v tom zmysle, že používa ovládateľné prvky. Tieto prvky využívajú silu ako spätnú väzbu. Sú schopné generovať sily, ktoré sú lineárnymi kombináciami nameraných stavových premenných a tým dodávajú energiu priamo do systému. Stavové premenné dostatočne popisujú systém, aby určili jeho budúce správanie pri neprítomnosti vonkajších síl. Sú to napríklad súradnice polohy, rýchlosti pohybu, objem, teplota alebo tlak. Systémy, v ktorých sú všetky stavové premenné merateľné sa označujú ako aktívne systémy s plným stavom spätnej väzby. Pokiaľ môžu byť merané len niektoré stavové premenné, je systém definovaný ako aktívny systém s limitovaným stavom spätnej väzby [10] [11]. Aktívne odpruženie je charakteristické umiestnením aktuátora. Aktuátor (napríklad lineárny motor) umožňuje kontrolovať pohyb kolesa aj rámu. Vylepšuje komfort jazdy a súčasne aj jazdné vlastnosti, čím zvyšuje bezpečnosť [12]. Aktuátor sa môže nachádzať v odpružení ako samostatný člen nahradzujúci pružinu a tlmič adaptívneho odpruženia. Prípadne môže byť použitý v kombinácii s pružinou a tlmičom (viď Obr. 2-5) alebo inom prevedení.



Obr. 2-5 Schéma aktívneho odpruženia [13].

Aj napriek všetkým výhodám sú aktívne systémy odpruženia vo všeobecnosti drahšie, komplikovanejšie a menej spoľahlivé ako adaptívne systémy. Aktívne odpruženie sa používa iba v prípadoch kedy výhody prevážia nad nevýhodami zvýšenej ceny, zložitosti a vyššej hmotnosti [1].

## 2.3 Semiaktívne odpruženie

Semiaktívne odpruženie je systém riadený spätnou väzbou, pričom aktuátor umiestnený v systéme je obmedzený na poskytovanie disipácie energie. Hlavnou myšlienkou je meniť silu tlmenia v závislosti na niektorých kontrolných meraniach popisujúcich okamžitý stav systému. Tlmič zasiahne iba ak je potrebná disipácia energie. V opačnom prípade sa vypne. Správanie takéhoto systému je nelineárne, preto proces prepínania semiaktívneho tlmiča a popisovanie systému vo všeobecnosti sú predmetom počítačovej simulácie [10]. Cieľom semiaktívneho odpruženia je dosiahnuť jednoduchosť jednotlivých komponentov podobne ako u pasívneho odpruženia a zároveň zachovať čo najviac výhod aktívneho systému odpruženia. Podľa typu tlmiča sa semiaktívne systémy odpruženia delia na:

- elektrohydraulické (EH)
- elektorreologické (ER)
- magnetoreologické (MR)

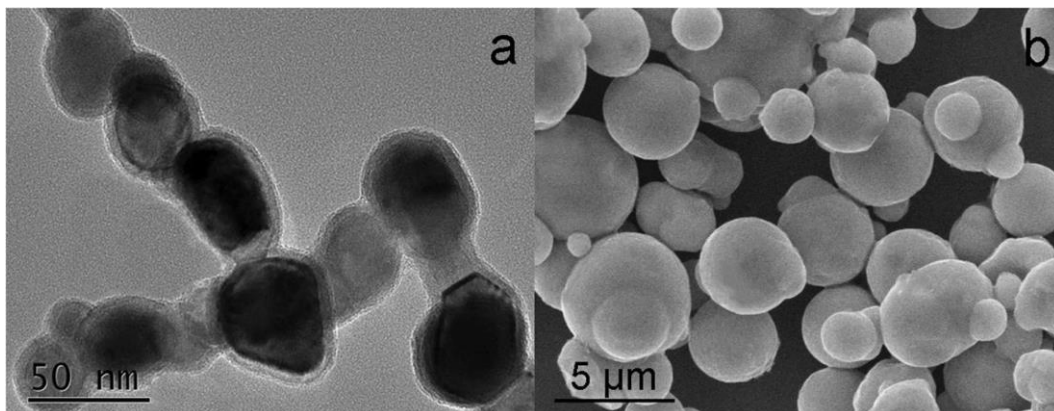
Elektrohydraulické odpruženie využíva proporcionálny ventil a aktuátor podobný dvojčinnému hydraulickému valcu s tlakovými komorami [14]. Medzi EH systémy odpruženia patrí aj Fox Live Valve. Tento systém odpruženia obsahuje tri trojosé akcelerometre. Jeden akcelerometer je umiestnený na vidlici, druhý na zadnej stavbe rámu bicykla a tretí akcelerometer sa nachádza na rámovom trojuholníku spoločne s riadiacou jednotkou a batériou. Akcelerometre zaznamenávajú natočenie rámu bicykla v troch osiach. Po vyhodnotení, že bicykel stúpa do kopca sa ventily uzatvoria. Naopak pri zjazde dole kopcom sa kompresné ventily otvoria a umožnia odpruženiu pohltiť nárazy. Po detekcii voľného pádu sa kompresné ventily v prednom aj zadnom odpružení plne otvoria a umožnia pohodlne absorbovať náraz pri dopade zo skoku. Riadiaca jednotka umožňuje päť stupňov nastavenia. Jednotlivé nastavenia ovplyvňujú rýchlosť uzatvárania ventilov. Tým sa mení citlivosť odpruženia na nárazy. Okrem nastavenia rýchlosti uzatvárania kompresných ventilov je možné odpruženie nastaviť mechanicky ako pri adaptívnom odpružení. Systém odpruženia Fox Live Valve je napájaný batériou o napätí 7,4 V a kapacite 800 mAh. V nepretržitej prevádzke vydrží 16–20 h. Proces od odoslania signálu akcelerometrom až do zmeny otvorenia ventilu trvá 3 ms. Tento čas sa nazýva reakčný čas a bude podrobnejšie popísaný v kapitole 2.3.1 [15].



Obr. 2-6 Systém odpruženia Fox Live Valve [16].

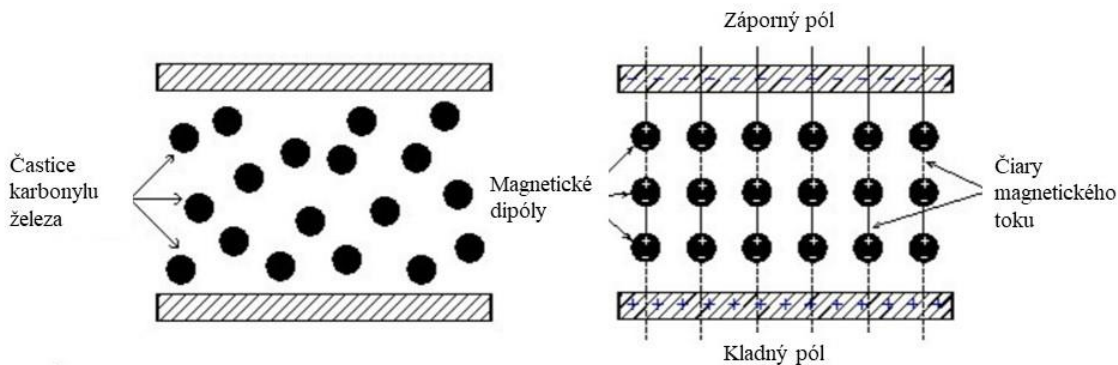
### 2.3.1 Magnetoreologický (MR) tlmič

MR a ER tlmiče k svojej činnosti využívajú oleje, ktoré patria do triedy chytrých materiálov. Pri ich vystavení elektrickému alebo magnetickému poľu majú schopnosť meniť svoje vlastnosti. Aktivácia daného typu poľa na ER alebo MR olej sa predovšetkým prejaví zvýšením dynamickej medze klzu kvapaliny (dynamická medza klzu je hraničné napätie, pri ktorom začína dochádzať k pohybu kvapaliny), zatiaľ čo viskozita ostane relatívne konštantná. MR oleje majú v porovnaní s ER olejmi vynikajúce vlastnosti vrátane 20–50krát vyššej hodnoty medze klzu (typicky je to 50–100 kPa) a oveľa širšiemu rozsahu prevádzkovej teploty, zvyčajne od  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$  [17] [18]. Magnetoreologické oleje sú naplnené sférickými feromagnetickými častočkami kovu (napríklad karbonylu železa) o veľkostiach desiatok nm až jednotiek  $\mu\text{m}$ . Na povrchu častíc sa nachádza tenká oxidačná vrstva, ktorá predchádza celkovej oxidácii kovových častíc na vzduchu (viď Obr. 2-7) [19].



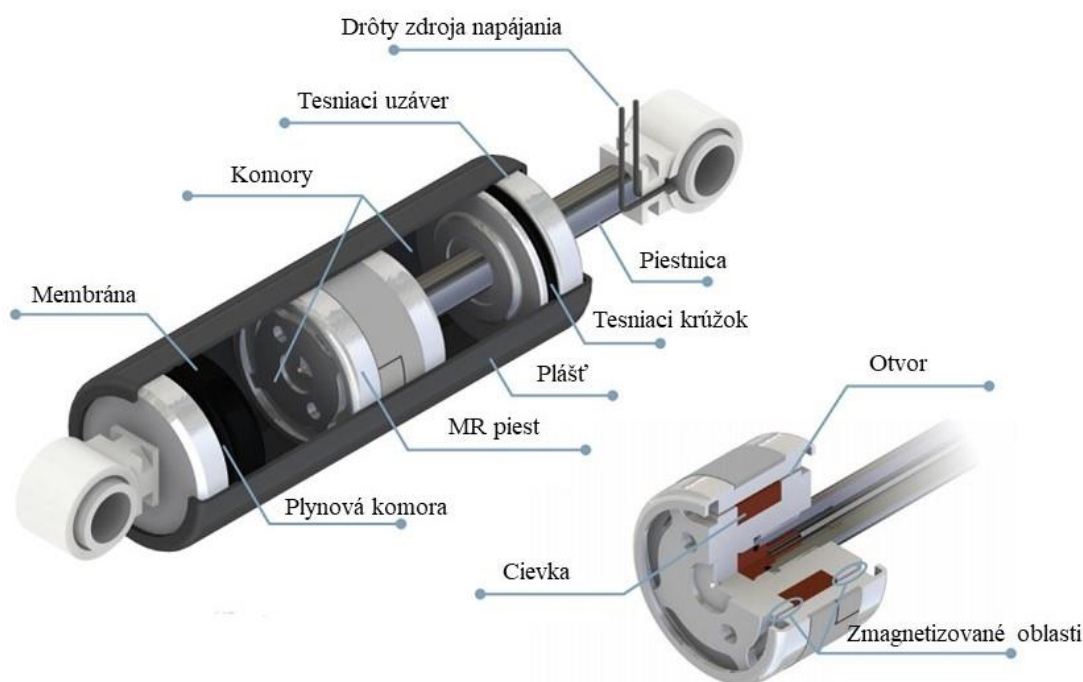
Obr. 2-7 Snímky častíc zachytené elektrónovým mikroskopom [19].

Častice tvoria 20–40 % objemu MR oleja [20]. Keď sa tlmič nachádza vo vypnutom stave a magnetické pole na olej nepôsobí správa sa MR olej ako newtonovská kvapalina. Pri pôsobení magnetického poľa sa častice v oleji sformujú do magnetických dipólov pozdĺž čiar magnetického toku a MR olej sa chová ako Binghamova kvapalina [18] [21]. Usporiadanie častíc je zobrazené na Obr. 2-8.



Obr. 2-8 Usporiadanie častíc karbonylu železa v MR oleji, vľavo nezmagnetizovaný stav, vpravo zmagnetizovaný stav [18].

Ako už bolo spomenuté v úvode kapitoly 2.3 MR tlmič funguje podobne ako adaptívny tlmič. Olej prúdi medzi dvomi komorami cez malé otvory v pieste a kinetickú energiu premieňa na teplo. MR tlmič obsahuje elektrický obvod, ktorého súčasťou je cievka umiestnená v pieste (Obr. 2-9). Keď sa do obvodu dodáva elektrický prúd cievka generuje magnetické pole a mení vlastnosti MR kvapaliny v pieste. V dôsledku toho je možné meniť odpor tlmiča v reálnom čase [22].



Obr. 2-9 Schematický model MR tlmiča [22].

Avšak každý tlmič má istý reakčný čas. Je to čas potrebný na dosiahnutie 63,2 % konečnej ustálenej hodnoty sily po odoslaní kontrolného signálu z riadiacej jednotky do obvodu [23]. Adaptívne tlmiče používané v horskej cyklistike majú reakčný čas 250 ms alebo viac. Systém odpruženia Fox Live Valve dosahuje hodnotu reakčného času 3 ms. Najrýchlejšie MR tlmiče dosahujú podobné hodnoty reakčného času ako systém Fox Live Valve. V oblasti cyklistiky sa ukázalo, že na zlepšenie jazdného komfortu je postačujúce keď sa táto hodnota pohybuje v rozmedzí 10–30 ms [8]. Meraním semiaktívneho odpruženia využívajúceho riadiaci algoritmus nazývaný Modifikovaný Groundhook (podrobnejšie je popísaný v kapitole 2.3.2) bolo zistené, že môže byť očakávané značné zlepšenie trakcie kolesa pri použití MR tlmiča s reakčným časom 1,5 ms. Zvýšenie jazdného komfortu môže byť dosiahnuté pri použití MR tlmiča s reakčným časom 20 ms a s riadiacim algoritmom Skyhook (je popísaný v kapitole 2.3.2). Ešte lepšie výsledky sú dosiahnuté pri použití MR tlmiča s ešte kratším reakčným časom. Uvedené hodnoty sú hraničné hodnoty, pri ktorých je možné dosiahnuť výrazné zlepšenie jazdných vlastností alebo komfortu oproti výsledkom získaným meraním odpruženia s využitím adaptívneho tlmiča [23]. Koncept magnetoreologického tlmiča má však nevýhodu vo forme zvýšenej hmotnosti celého systému odpruženia. Ako piest MR tlmiča tak aj samotný MR olej majú vyššiu hmotnosť v porovnaní s adaptívnym systémom odpruženia. Tento nárast hmotnosti však nie je tak veľký aby spôsobil výraznejší problém pri použití MR tlmiča v horskej cyklistike.

### 2.3.2 Skyhook a Modifikovaný Groundhook

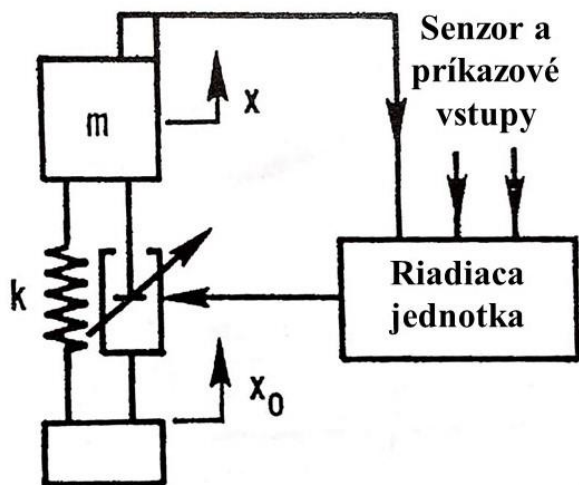
Jazdou po nerovnostiach môžu nastať 3 situácie. Frekvencia nárazov môže byť nízka a zároveň sa nachádzať pod rezonančnou frekvenciou systému nazývanou tiež vlastná frekvencia systému. Druhý prípad je, že frekvencia nárazov sa zhoduje s rezonančnou frekvenciou systému a tretí prípad, ktorý môže nastať je že frekvencia nárazov prevyšuje rezonančnú frekvenciu systému. Vlastná uhlová rýchlosť systému sa vypočíta podľa vzťahu:

$$\Omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (3)$$

kde  $k$  ( $\text{Nm}^{-1}$ ) je tuhosť pružiny a  $m$  (kg) je odpružená hmotnosť systému. Následnou úpravou rovnice (3) sa získa vzťah na výpočet vlastnej frekvencie systému.

$$f_0 = \frac{\sqrt{\frac{k}{m}}}{2\pi} \quad (4)$$

Pri budení systému signálom o frekvencii nižšej než je rezonančná frekvencia je pružina schopná udržať výchylky odpruženej hmoty relatívne malé. Budením systému signálom o frekvencii zhodnej s vlastnou frekvenciou systému a pre malú hodnotu koeficientu tlmenia  $b$  z rovnice (2) platí, že odozva odpruženej hmoty sa niekoľko násobne zvýši. Pokiaľ ostane koeficient tlmenia  $b$  nezmenený, ale budiaca frekvencia sa zvýši nad hodnotu vlastnej frekvencie systému, je odpruženie schopné izolovať odpruženú hmotu od pohybu podložky. Tieto vlastnosti odpruženia platia ako pre semiaktívne tak aj pre adaptívne systémy odpruženia. Rozdiel ale nastáva, keď sa koeficient tlmenia  $b$  zvýši. Pri použití semiaktívneho odpruženia s riadiacim algoritmom Skyhook sa odozva v blízkosti rezonančnej frekvencie zníži a zároveň sa o čosi zníži odozva aj pre vyššie frekvencie. Pri použití adaptívnych systémov odpruženia platí, že hoci sa odozva v blízkosti rezonančnej frekvencie zníži, je to za cenu zvýšenia odozvy pri budení vyššími frekvenciami ako je rezonančná [1].



Obr. 2-10 Semiaktívny systém [1].

Navyše pri použití semiaktívneho odpruženia sa tlmiaci koeficient  $b$  mení v závislosti na vertikálnej rýchlosti odpruženej hmoty  $\dot{x}$  ( $\text{ms}^{-1}$ ) a vertikálnej rýchlosti neodpruženej hmoty  $\dot{x}_0$  ( $\text{ms}^{-1}$ ) (viď Obr. 2-10). Pokiaľ je splnená podmienka, že  $\dot{x}(\dot{x} - \dot{x}_0) \geq 0$  tak sa tlmiaca sila  $F_b$  vypočíta podľa vzťahu:

$$F_b = b\dot{x} \quad (5)$$

kde  $b$  ( $\text{Nsm}^{-1}$ ) je koeficient tlmenia v zmagnetizovanom stave tlmiča. Pokiaľ  $\dot{x}(\dot{x} - \dot{x}_0) < 0$  tak pre tlmiacu silu  $F_b$  platí:

$$F_b = b_0\dot{x} \quad (6)$$

kde  $b_0$  ( $\text{Nsm}^{-1}$ ) je koeficient tlmenia v odmagnetizovanom stave MR tlmiča. V odmagnetizovanom stave je tlmiaca sila  $F_b$  výrazne nižšia v porovnaní s tlmiacou silou  $F_b$  v zmagnetizovanom stave MR tlmiča [1].

Na rozdiel od algoritmu Skyhook, ktorý vychádza čisto z hodnôt rýchlostí základom pre Modifikovaný Groundhook sú hodnoty rýchlostí a zrýchlenia. Modifikovaný Groundhook zlepšuje najmä trakciu kolesa rovnako ako algoritmus Groundhook, ale jeho implementácia do systému odpruženia je jednoduchšia. Modifikovaný Groundhook je popísaný nasledujúcimi podmienkami a rovnicami:

$$F_b = b\dot{x}, \quad \ddot{x}_0(\dot{x} - \dot{x}_0) \geq 0 \quad (7)$$

$$F_b = b_0\dot{x}, \quad \ddot{x}_0(\dot{x} - \dot{x}_0) < 0 \quad (8)$$



kde  $b$  ( $\text{Nsm}^{-1}$ ) je koeficient tlmenia v zmagnetizovanom stave MR tlmiča,  $b_0$  ( $\text{Nsm}^{-1}$ ) je koeficient tlmenia v odmagnetizovanom stave MR tlmiča,  $\dot{x}$  ( $\text{ms}^{-1}$ ) je vertikálna rýchlosť odpruženej hmoty,  $\dot{x}_0$  ( $\text{ms}^{-1}$ ) je vertikálna rýchlosť neodpruženej hmoty a  $\ddot{x}_0$  ( $\text{ms}^{-2}$ ) je vertikálne zrýchlenie neodpruženej hmoty [23]. Riadiace algoritmy semiaktívneho odpruženia je potrebné zohľadniť v simulácii dynamického modelu s 2 stupňami voľnosti, ktorý popisuje systém predného odpruženia horského bicykla (podrobnejšie popísané v kapitole 4-1).

## 3 ANALÝZA PROBLÉMU A CIEĽ PRÁCE

### 3.1 Analýza problému

Odpružená vidlica je dôležitá súčasť horského bicykla. Slúži na odfiltrovanie nerovností povrchu a udržiava trakciu predného kolesa aj pri jazde v náročnom teréne. V súčasnej dobe sa odpružené systémy delia na štyri skupiny. Sú to systémy pasívneho, adaptívneho, semiaktívneho a aktívneho odpruženia. Pasívne systémy odpruženia majú výrazne horšie vlastnosti oproti adaptívnemu odpruženiu a používajú sa v lacnejších vidliciach určených do nenáročných podmienok.

Adaptívne systémy sú v súčasnosti najrozšírenejší typ odpruženia v horskej cyklistike. Adaptívne systémy odpruženia majú oproti semiaktívnym a aktívnym systémom odpruženia nižšiu hmotnosť a sú lacnejšie. Avšak vo zvyšovaní komfortu a bezpečnosti v porovnaní s aktívnymi a semiaktívnymi systémami zaostávajú.

Aktívne systémy odpruženia majú uplatnenie v oblastiach, kde je kvalita tlmenia vibrácií prvoradá a preváži nad nevýhodami vo forme vyššej hmotnosti, ceny a náročnejšej údržby. V súčasnej dobe sa tento systém odpruženia v horskej cyklistike nevyužíva.

Semiaktívne systémy odpruženia kombinujú vlastnosti pasívneho a aktívneho odpruženia. Zachovávajú väčšinu výhod aktívneho odpruženia, pri použití konštrukcie komponentov podobných pasívnemu odpruženiu.

Pri návrhu ideálneho odpruženia nastáva rozpor, kedy na kontrolovanie relatívnej polohy medzi podložkou a odpruženým telesom je potrebné „tvrdé“ tlmenie, ale na odizolovanie pohybu odpruženého telesa je vhodné čo „najmäkšie“ tlmenie. Magnetoreologický tlmič v spojení s vhodným riadiacim algoritmom je schopný dosiahnuť ako „tvrdú“ tak aj „mäkkú“ charakteristiku tlmenia vďaka svojim vlastnostiam. MR tlmiče majú v porovnaní s inými semiaktívnymi systémami výhodu možnosti použitia v širšom rozsahu prevádzkových teplôt. MR olej sa oproti ER oleju vyznačuje takisto vyššou dynamickou medzou klzu. Použitie MR tlmiča je preto vhodné aj v horskej cyklistike.

Pri výbere vhodného riadiaceho algoritmu semiaktívneho odpruženia je potrebné brať v úvahu hlavné nedostatky adaptívneho odpruženia, ktoré je potrebné čo možno najlepšie odstrániť. Pri jazde v teréne poskytuje adaptívne odpruženie dostatočnú trakciu na predné koleso aj v náročnejších podmienkach. Tento systém však nie je schopný dostatočne odizolovať pohyb odpruženého telesa a tým sa komfort jazdy priamoúmerne znižuje s narastajúcou náročnosťou terénu. Preto je pre účel tejto práce vhodné použiť algoritmus Skyhook, ktorý je schopný znížiť odozvu na budiaci signál a to v celom frekvenčnom rozsahu. Pre správne fungovanie tohto riadiaceho algoritmu musí byť použitý tlmič s časovou odozvou najviac 20 ms (podrobnejšie bolo popísané v kapitole 2.3.1). Moderné MR tlmiče sú schopné dosiahnuť časovú odozvu okolo 2 ms, čo je viac než postačuje. Na porovnanie výsledkov adaptívneho a semiaktívneho odpruženia bude použitá simulácia, ktorá však nebude ani v jednom prípade zahrňovať časovú odozvu tlmenia. Aby boli zachované čo najrealistickejšie podmienky simulácie, je vhodné zaznamenať informácie o trati, po ktorej zjazdový bicykel jazdí a použiť ich v simulácii.

## 3.2 Cieľ práce

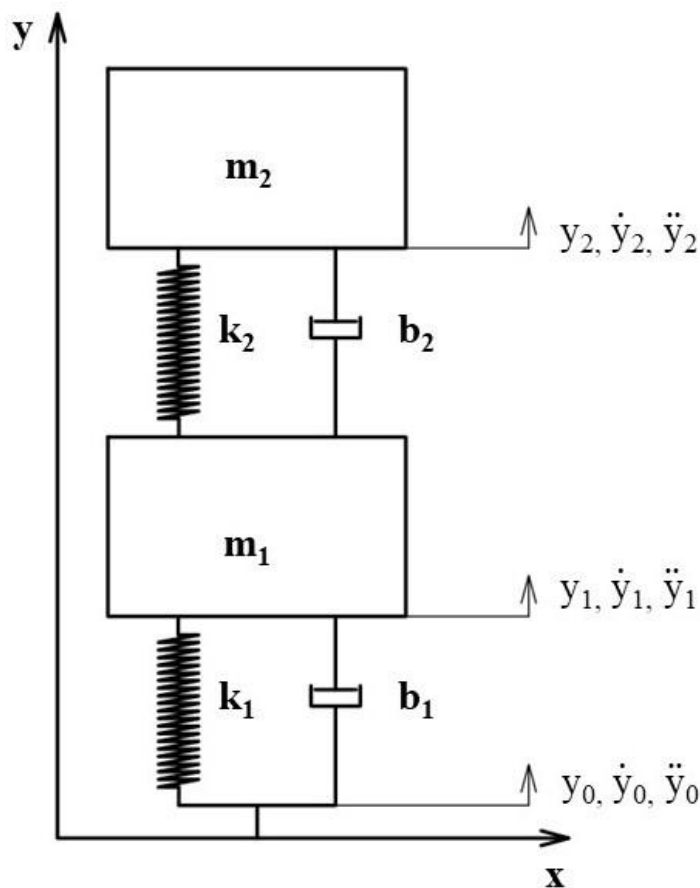
Bakalárska práca sa venuje návrhu využitia semiaktívneho odpruženia v horskej cyklistike. Hlavným cieľom je návrh semiaktívneho riadenia prednej odpruženej vidlice zjazdového bicykla. Kvalita odpruženia bude porovnávaná s adaptívnym odpružením a vyhodnocovaná prostredníctvom simulácie modelu s dvomi stupňami voľnosti. Boli definované nasledujúce ciele:

- **vytvorenie jednoduchého simulačného modelu s dvomi stupňami voľnosti**
- **nameranie vhodných údajov zo zjazdovej trate a ich použitie v simulácii**
- **určenie optimálneho silového rozsahu MR tlmiča**
- **simulácia adaptívneho a semiaktívneho odpruženia**
- **porovnanie výsledkov simulácie**

## 4 MATERIÁL A METÓDY

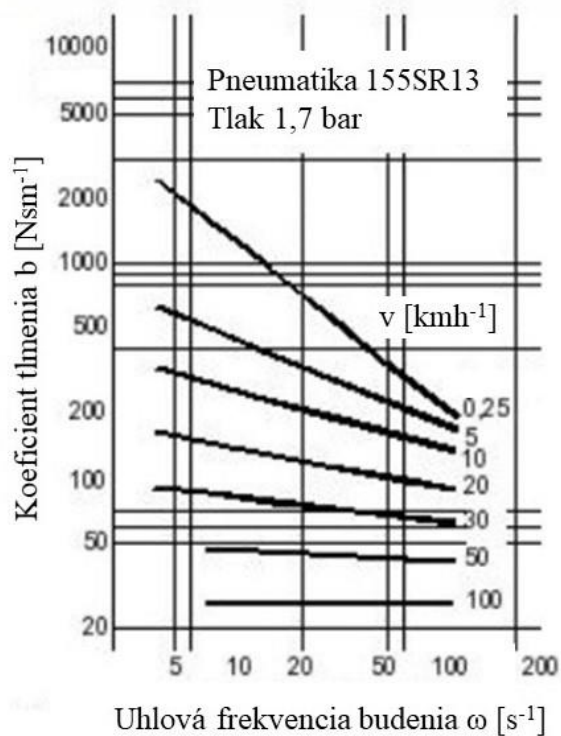
### 4.1 Simulačný model

K simulácii odpruženia bolo potrebné najskôr vytvoriť jednoduchý model s dvomi stupňami voľnosti (viď Obr. 4-1), kde odpružená hmota zahrňuje hmotnosť jazdca a rámu pôsobiacu na predné koleso navýšenú o hmotnosť vnútorných nôh a koruniiek vidlice. Neodpružená hmota je hmotnosť predného kolesa a vonkajších nôh vidlice. Obe hodnoty boli zistené experimentálne.



Obr. 4-1 Schéma modelu s dvomi stupňami voľnosti.

Pneumatika bola nahradená lineárnym tlmičom s koeficientom tlmenia  $b_1$  a vinutou pružinou s tuhosťou  $k_1$ . Tuhosť pneumatiky bola určená experimentálne zaťažením a meraním pozdĺžnej deformácie pneumatiky o prekážky rôznych priemerov. K tomuto účelu bola požitá bežná zjazdová pneumatika s priemerom 698,5 mm, šírkou 61 mm a nafúkaná vzduchom na tlak 1,75 bar. Hodnota koeficientu tlmenia pneumatiky bola približne určená z Obr. 4-2 a pomerovo zmenená o rozdiel šírky pneumatiky.



Obr. 4-2 Experimentálne zistené koeficienty tlmenia [24].

Koeficient tlmenia  $b_2$  adaptívneho tmiča bol zistený experimentálne a podrobnejšie je popísaný v kapitole 4.1.1. Hodnoty všetkých konštánt sa nachádzajú v Tab. 4-1.

Tab. 4-1 Hodnoty konštánt simulačného modelu.

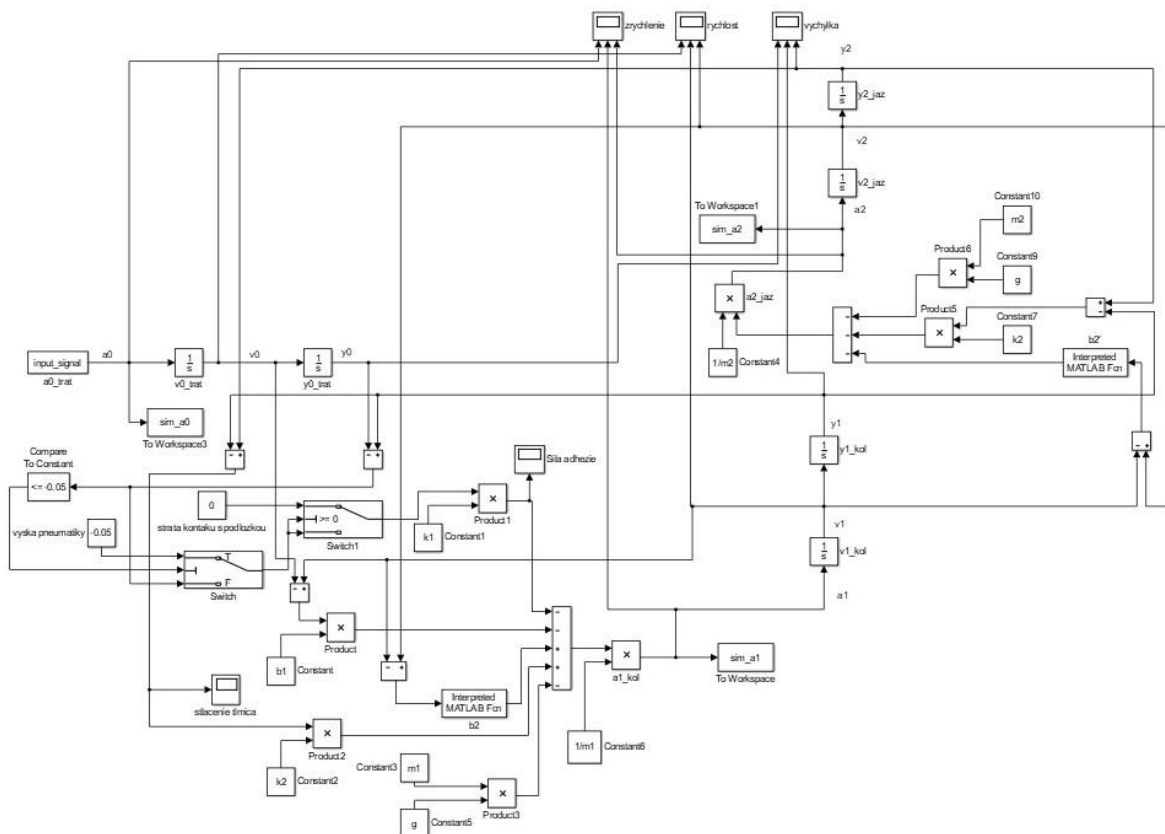
Názov	Symbol	Hodnota
Odpružená hmotnosť	$m_2$	35,8 kg
Neodpružená hmotnosť	$m_1$	4,2 kg
Tuhosť pružiny	$k_2$	11463 Nm <sup>-1</sup>
Koeficient tlmenia adaptívneho tmiča	$b_2$	viď Obr. 4-5
Tuhosť pneumatiky	$k_1$	37000 Nm <sup>-1</sup>
Koeficient tlmenia pneumatiky	$b_1$	24 Nsm <sup>-1</sup>

S využitím Newtonových zákonov bola zapísaná sústava dvoch diferenciálnych rovníc druhého rádu popisujúcich simulačný model z Obr. 4-1.

$$\ddot{y}_1 = \frac{-b_1(\dot{y}_1 - \dot{y}_0) - k_1(y_1 - y_0) + b_2(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) + k_2(y_2 - y_1) - m_1 g}{m_1} \quad (9)$$

$$\ddot{y}_2 = \frac{-b_2(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) - k_2(y_2 - y_1) - m_2g}{m_2} \quad (10)$$

Na základe týchto rovníc bol vytvorený dynamický model prednej vidlice v prostredí Matlab Simulink. Tento model simuluje pohyb odpruženej a neodpruženej hmoty v závislosti na vložených hodnotách zrýchlenia trate. Do modelu boli vložené obmedzujúce podmienky, ktoré riešia možnosť straty kontaktu medzi kolesom a podložkou a možnosť stlačenia pneumatiky na doraz až k ráfiku. Pokiaľ tieto prípady nastanú bude v oboch prípadoch nastavená príslušná krajná hodnota rozdielu výchylek  $y_1$  a  $y_0$ . Vytvorený model však nezahŕňa maximálne možné stlačenie a vysunutie vidlice. Simulovaná vidlica má nekonečnú dĺžku, čo sa nezhoduje s realitou, ale na porovnanie systémov odpruženia a určenie optimálneho silového rozsahu je to postačujúce. Simulačný model adaptívneho aj semiaktívneho systému odpruženia ďalej neobsahuje časovú odozvu tlmiča. Tá mierne zmení priebeh tlmenia, avšak v tomto prípade je pre zjednodušenie tento rozdiel zanedbaný. Výsledný dynamický model prednej vidlice s adaptívnym odpružením je na Obr. 4-3.



Obr. 4-3 Model adaptívneho odpruženia prednej vidlice.

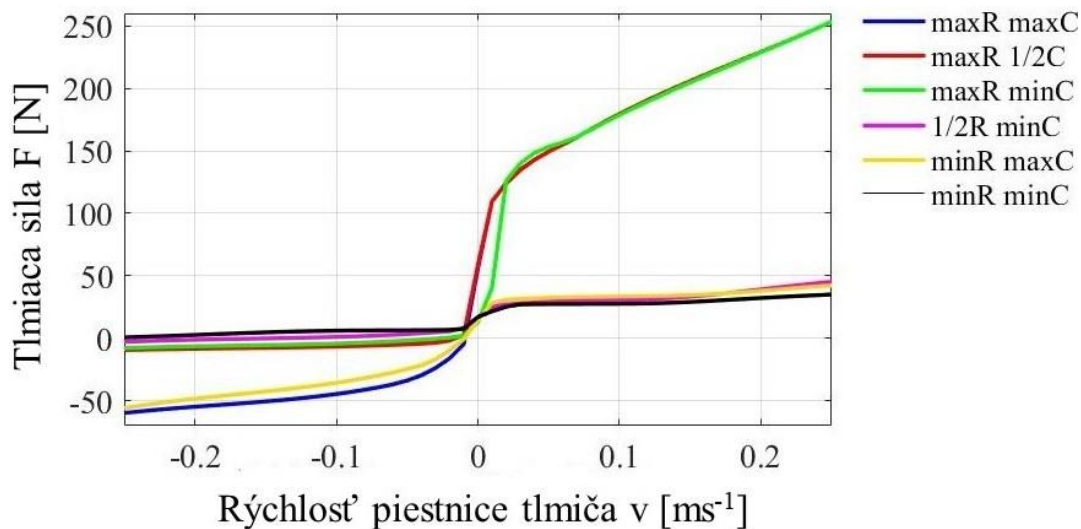
#### 4.1.1 F-v charakteristika adaptívneho tlmiča

Pri simulácii adaptívneho systému bola namiesto konštantného koeficientu tlmenia  $b_2$ , použitá F-v charakteristika tlmiča, čo je závislosť tlmiacej sily na rýchlosti piestnice tlmiča. Táto závislosť bola zistená meraním na hydraulickom pulzátore Inova.



Obr. 4-4 Hydraulický pulzátor Inova [25].

K tomuto účelu boli skonštruované úpinky a použitá zjazdová vidlica Rockshox Boxxer Team 2015 s nastaviteľným ventilom odskoku a kompresie. Jedná sa vidlicu používanú profesionálnymi jazdcami na svetovej úrovni. Tlmiace charakteristiky boli namerané v krajných polohách a taktiež v strednej polohe možného rozsahu nastavenia a ich vzájomné kombinácie. Po spracovaní nameraných hodnôt v programe Matlab boli vytvorené F-v charakteristiky adaptívneho tlmiča (viď Obr. 4-5).



Obr. 4-5 F-v charakteristiky adaptívneho tlmiča, R označuje odskok a C označuje kompresiu.

## 4.2 Meranie trate

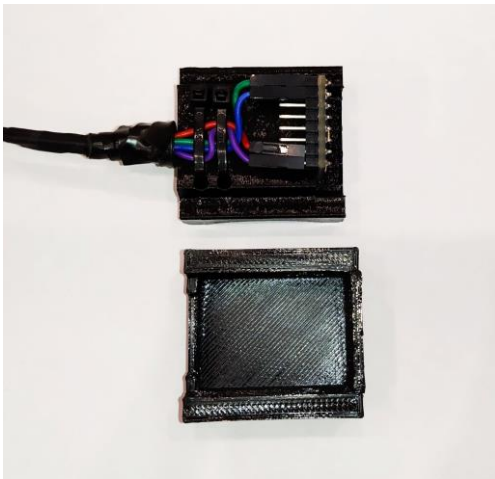
Ako vstupné údaje do simulácie je možné použiť:

- hodnoty vertikálnych výchyliek nerovností na trati
- hodnoty vertikálneho zrýchlenia vzniknutého prejazdom po nerovnostiach

V tejto práci boli namerané hodnoty vertikálneho zrýchlenia trate pomocou akcelerometra. Pre tento účel bol použitý trojosí akcelerometer ADXL 345, ktorý dokáže zaznamenávať zrýchlenia v rozsahu 32 g. Voči mechanickému poškodeniu bol chránený ochranným obalom vytlačeným pomocou 3D tlačne (Obr. 4-6). Namerané údaje zaznamenával mikroprocesor Raspberry Pi 2 Model B (Obr. 4-7). Ten obsahoval program vytvorený v programovacom jazyku Python. Tento program umožnil zaznamenať údaje o vertikálnom zrýchlení trate. Hodnoty zrýchlenia boli merané s frekvenciou 200 Hz, zapísané do textového súboru a uložené na priloženú pamäťovú kartu. Uložené hodnoty boli následne spracované v programe Matlab. Namerané hodnoty vertikálneho zrýchlenia boli znížené o hodnotu gravitačného zrýchlenia, pretože hodnota gravitačného zrýchlenia je už zahrnutá v simulačnom modeli. Z výsledných hodnôt bol vytvorený graf závislosti vertikálneho zrýchlenia na čase. Graf bol následne vložený do simulácie ako vstupné zrýchlenie.

Tieto hodnoty vstupného zrýchlenia sú mierne skreslené z dôvodu umiestnenia akcelerometra. Ten bol uchytený na vonkajších nohách vidlice (viď Obr. 4-8). Tým došlo k miernemu skresleniu nameraných hodnôt v dôsledku tlmenia pneumatiky. Toto skreslenie je však možné zanedbať, pretože výsledné hodnoty vertikálneho zrýchlenia neodpruženej hmoty získané pomocou simulácie sa len nepatrne líšia od nameraných hodnôt zrýchlenia trate.





Obr. 4-6 Akcelerometer ADXL 345 v ochrannom obale.



Obr. 4-7 Vľavo Raspberry Pi 2 Model B, vpravo akcelerometer ADXL 345.



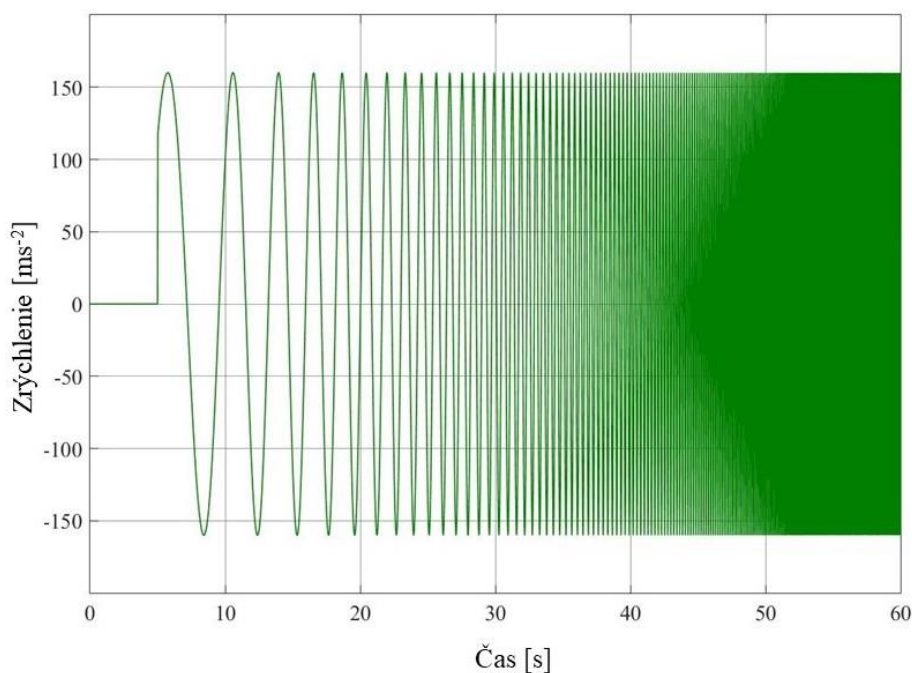
Obr. 4-8 Umiestnenie akcelerometra na odpruženej vidlici.

### 4.3 Semiaktívne riadenie

Za účelom simulácie semiaktívneho riadenia bol vytvorený dynamický model obsahujúci riadiaci algoritmus Skyhook. V kapitole 3.1 bolo vysvetlené odôvodnenie výberu práve tohto riadiaceho algoritmu. Do modelu boli vložené rovnaké obmedzujúce podmienky ako v prípade modelu adaptívneho odpruženia. Model semiaktívneho riadenia aj v tomto prípade neobsahuje časovú odozvu tlmiča. Schéma modelu semiaktívneho odpruženia je podobná so schémou na Obr. 4-1 s tým rozdielom, že adaptívny tlmič je nahradený magnetoreologickým tlmičom. Namiesto konštantného koeficientu tlmenia  $b_2$  je aj v tomto prípade použitá F-v charakteristika, ktorá bola vytvorená na základe F-v charakteristiky adaptívneho tlmiča, upravená pre použitie v MR tlmiči a optimalizovaná na základe simulácie so vstupnými údajmi nameranými pomocou akcelerometra. Pri návrhu danej F-v charakteristiky tlmenia sa však pracovalo s rôznymi koeficientami tlmenia  $b$  v závislosti na zvolených koeficientoch pomerného útlmu  $b_r$ . Tie sa volili vzhľadom k rezonančnej frekvencii odpruženej sústavy. Koeficienty tlmenia boli vypočítané pomocou vzťahu:

$$b = 2b_r\sqrt{km} \quad (11)$$

kde  $k$  ( $\text{Nm}^{-1}$ ) je tuhosť pružiny a  $m$  (kg) je hmotnosť. Charakteristika odpruženia s vypočítanými koeficientami tlmenia bola najskôr simulovaná s budiacim signálom vo forme logaritmického sweepu vo frekvenčnom rozsahu 0,1–20 Hz. Na základe výsledkov simulácie bola vytvorená F-v charakteristika, ktorá sa následne optimalizovala pomocou simulácie so vstupnými hodnotami zrýchlenia trate nameranými akcelerometrom. Výsledná F-v charakteristika je podrobnejšie popísaná v kapitole 5.3.



Obr. 4-9 Logaritmický sweep.

## 4.4 Výpočet adhézie, RMS a prenosovej charakteristiky

Adhézia je priľnavosť pneumatiky k podložke. V tomto prípade sa jedná o prítlačnú silu, ktorá vzniká tlakom pružiny na koleso. Vypočíta sa pomocou vzťahu

$$F_k = k_1(y_1 - y_0) \quad (12)$$

kde  $k_1$  ( $\text{Nm}^{-1}$ ) je tuhosť pneumatiky z Tab. 4-1,  $y_1$  (m) je výchylka neodpruženej hmoty a  $y_0$  (m) je výchylka trate. Pri výpočte bola sila vzniknutá tlmením pneumatiky zanedbaná. Sila, ktorá stláča pneumatiku sa prenáša na podložku a tým zaisťuje trakciu.

Kvadratický priemer (RMS) je štatistická veličina, ktorá sa označuje aj ako efektívna hodnota. Kvadratický priemer je možné vypočítať v Matlabe pomocou funkcie rms. Hodnota kvadratického priemeru je použitá pri porovnaní výsledkov v kapitole 5.

Prenosová charakteristika zrýchlenia, ktorá je použitá v tejto práci je frekvenčná charakteristika podielu vertikálneho zrýchlenia odpruženej hmoty a neodpruženej hmoty. V kapitole 5 je použitá na prehľadné odčítanie amplitúdy zrýchlenia v závislosti na frekvenciách. Použité prenosové charakteristiky boli získané pomocou vzťahu

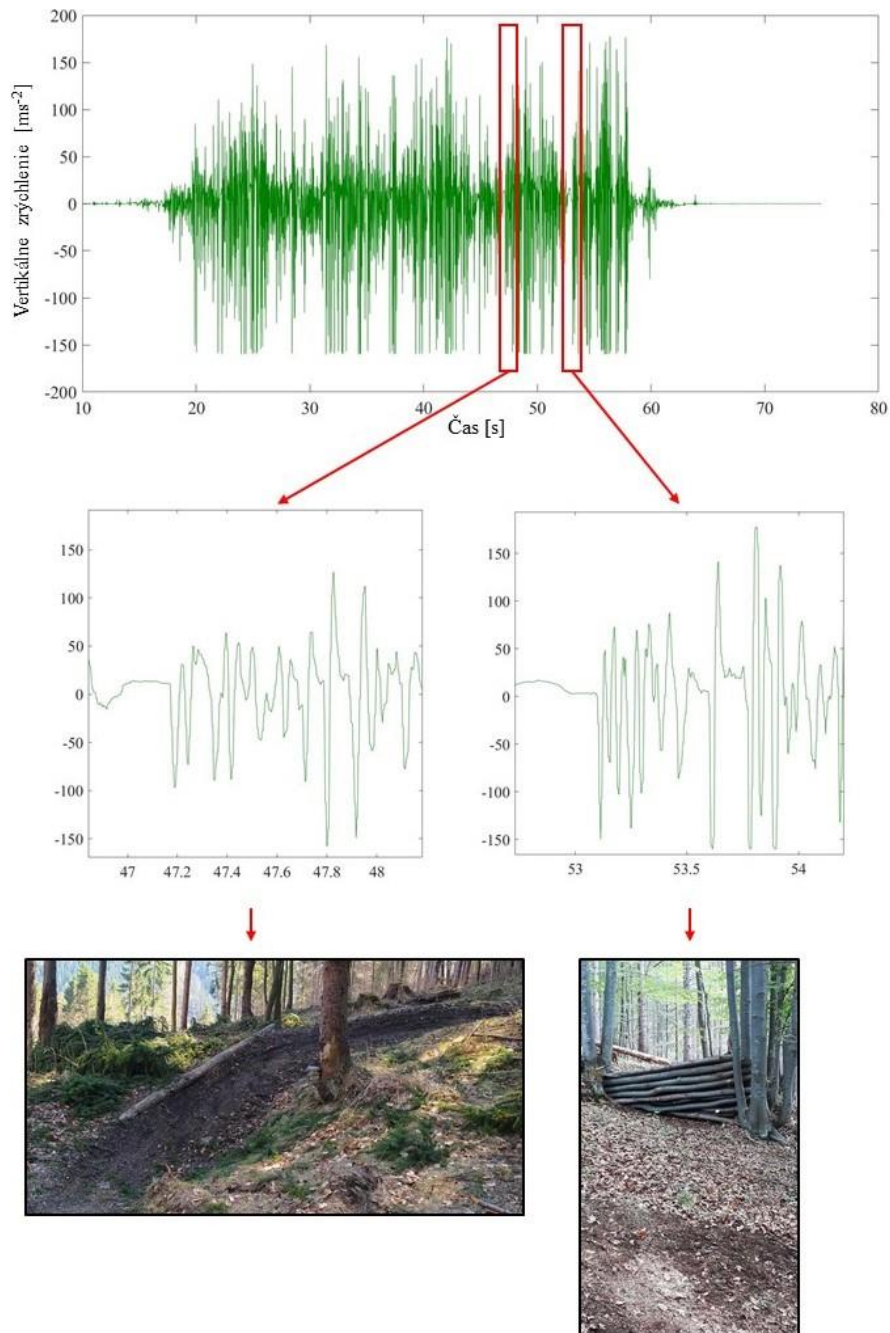
$$P_{ch} = \sqrt{\frac{p_2}{p_1}} \quad (13)$$

kde  $p_2$  je power spektrum zrýchlenia odpruženej hmoty,  $p_1$  je power spektrum zrýchlenia neodpruženej hmoty. Na vygenerovanie power spektra bola použitá funkcia pwelch v programe Matlab. Výsledné hodnoty prenosovej charakteristiky boli vynesené do grafu na zvislú os. Na vodorovnej osi sa nachádzajú hodnoty frekvencie (viď kapitola 5).

## 5 VÝSLEDKY

### 5.1 Hodnoty zrýchlenia zjazdovej trate

Údaje o vertikálnom zrýchlení spôsobenom prejazdom po nerovnostiach na trati boli zaznamenané na zjazdovej trati, ktorá obsahuje rozličné prekážky vo forme skokov, klopených zákrut, úsekov z kameňov a podobne. Výsledky boli spracované do grafu znázornenom na Obr. 5-1.

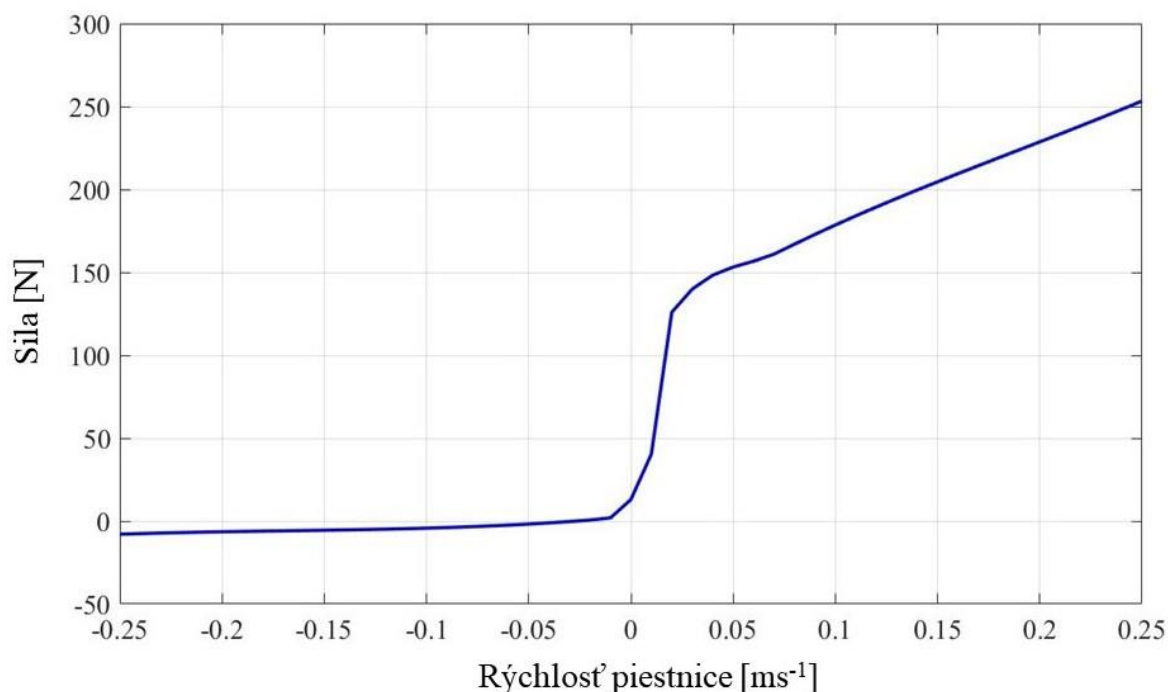


Obr. 5-1 Hodnoty vertikálneho zrýchlenia získané meraním trate.

Kladné hodnoty zrýchlenia na grafe reprezentujú stláčanie vidlice a hodnoty záporného zrýchlenia vznikajú v okamihu kedy piestová rýchlosť vidlice začína klesať a následne nastáva vysúvanie vidlice do pôvodnej nestlačenej polohy. Toto zrýchlenie je spôsobené rozťahovaním pružiny. Pri výraznejšom stlačení vidlice je pružná sila väčšia a spôsobuje zrýchlenie v rozsahu 150–160 ms<sup>-2</sup>. Zrýchlenia spôsobené stlačením vidlice sa pohybujú v rôznych hodnotách v závislosti na tvare a veľkosti prekážky. Pri prejazde klopenými zákrutami je náraz do vidlice plynulý, preto sa hodnoty zrýchlenia pohybujú okolo 50 ms<sup>-2</sup>. Podobné hodnoty zrýchlenia sú dosiahnuté pri dopade kolesa na zem po odraze zo skoku. V niektorých prípadoch môžu byť tieto hodnoty výrazne vyššie, to závisí na odraze a dopade (na ich výške a uhle sklonu). Vysoké hodnoty zrýchlenia sú rovnako dosiahnuté aj prejazdom po väčších prekážkach ako sú napríklad kamene alebo vystúpené korene. Vtedy môžu hodnoty vertikálneho zrýchlenia dosiahnuť aj 160 ms<sup>-2</sup>.

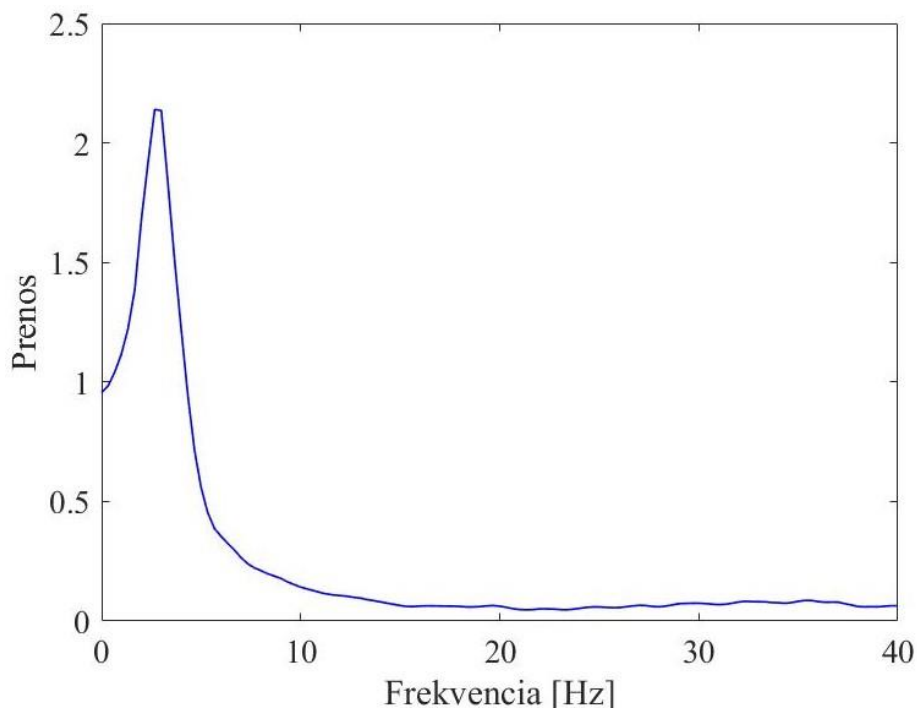
## 5.2 Simulácia adaptívneho odpruženia

Najvhodnejšia F-v charakteristika adaptívneho tlmiča v kombinácii s testovanou pružinou bola vybraná na základe výsledkov simulácie prejazdu po nameranej trati. Daná F-v charakteristika je vybraná s ohľadom na amplitúdu zrýchlenia v rezonančnej frekvencii a veľkosti rýchlostí odpruženej hmoty, vzniknutých v priebehu simulácie. Rovnako pri testovacej jazde bola subjektívne jazdcom táto charakteristika označená za ideálnu.



Obr. 5-2 Vybraná F-v charakteristika adaptívneho tlmiča.

Zvolená F-v charakteristika je vyňatá z F-v charakteristík zobrazených na Obr. 4-5. Táto charakteristika bola nameraná pri nastavení tlmiča na maximálny odskok a minimálnu kompresiu (na Obr. 4-5 je pod označením maxR minC).

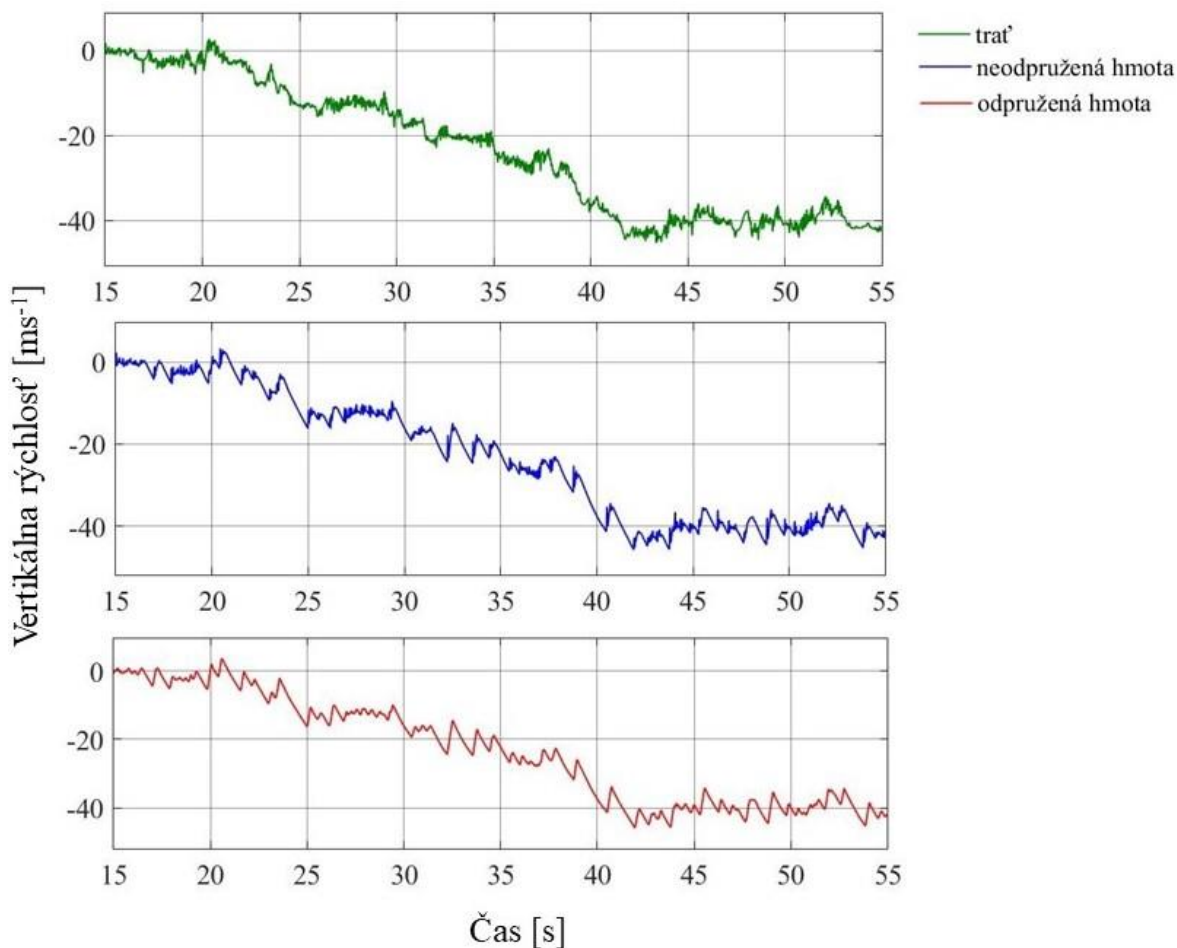


Obr. 5-3 Prenosová charakteristika zvolenej F-v charakteristiky získaná simuláciou adaptívneho odpruženia pri použití zrýchlenia trate.

Na grafe prenosovej charakteristiky je zobrazená maximálna amplitúda zrýchlenia, ktorá je dosiahnutá pri tomto nastavení.

### 5.2.1 Výsledné vertikálne rýchlosti

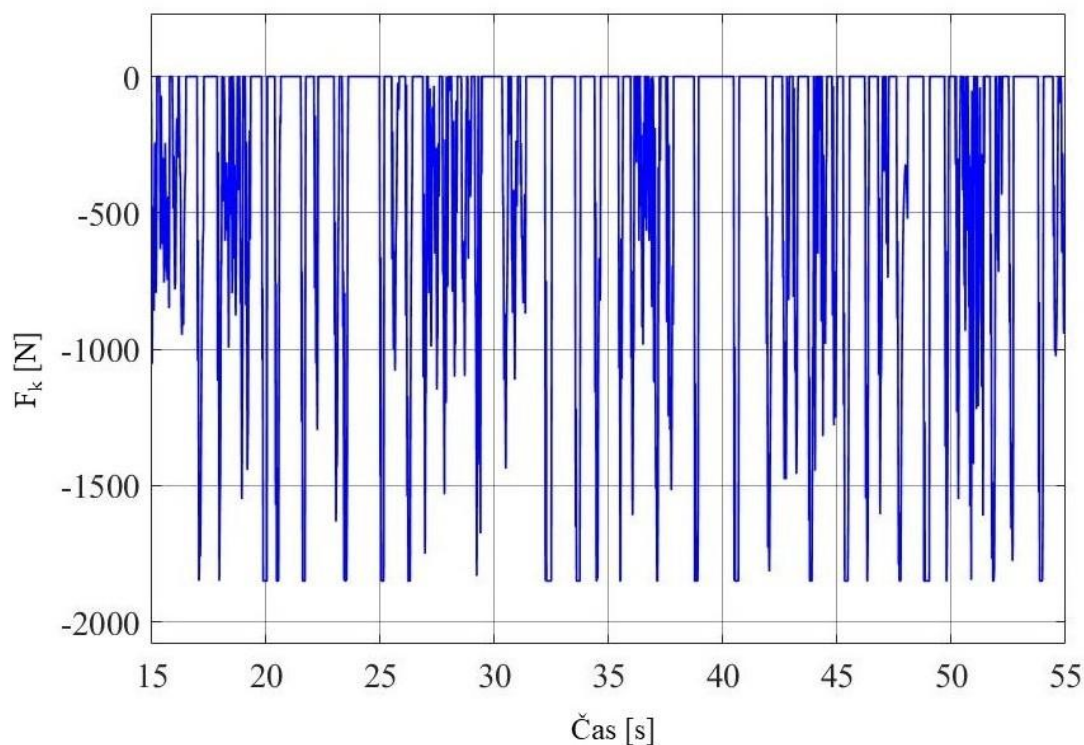
Na grafe vertikálnych rýchlostí (viď Obr. 5-4) je možné pozorovať, že adaptívne tlmenie je schopné dostatočne dobre odfiltrovať menšie vertikálne rýchlosti (medzi 25–30 s) vzniknuté pri prejazde po menších nerovnostiach, ale pri väčších vertikálnych rýchlostiach (medzi 32–34 s) nie je schopné dostatočne odizolovať pohyb odpruženej hmoty. V časovom úseku 32–34 s sa vertikálna rýchlosť odpruženej a neodpruženej hmoty sa veľmi nelíši. To je spôsobené tým, že adaptívny tlmič rozloží pohltený náraz čiastočne medzi odpruženú a neodpruženú hmotu. Tým je zachovaná pomerne dobrá trakcia kolesa, ale zhoršuje sa komfort jazdy.



Obr. 5-4 Graf s hodnotami vertikálnych rýchlostí získanými simuláciou adaptívneho odpruženia.

Vertikálna rýchlosť v čase klesá, čo je spôsobené vplyvom nenulovej strednej hodnoty rýchlosti. Integrácia zrýchlenia spôsobí postupné znižovanie strednej hodnoty rýchlosti. Tento efekt by bolo možné odstrániť pomocou filtra horná prepust'. Použitie filtra bolo z dôvodu pravdepodobného ovplyvnenia výsledkov zamietnuté vedúcim práce.

## 5.2.2 Adhézia a stlačenie vidlice

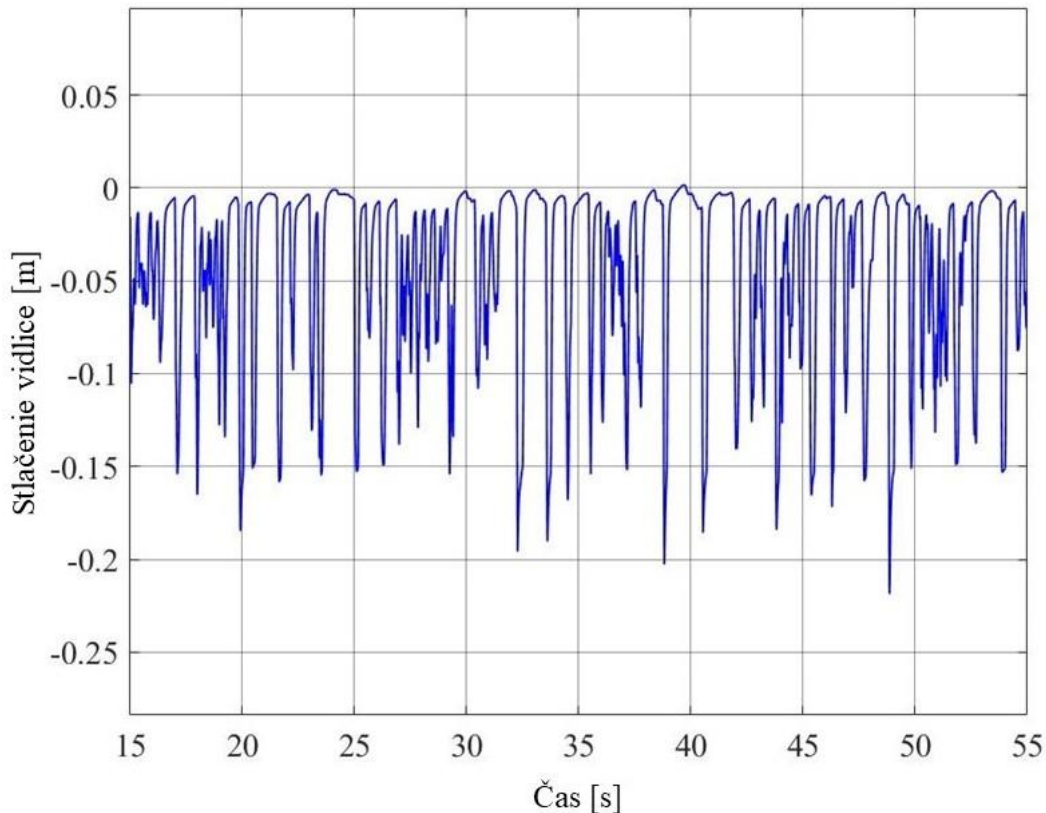


Obr. 5-5 Prítlačná sila zabezpečujúca trakciu kolesa.

Na Obr. 5-5 je prítlačná sila adaptívneho odpruženia. Na osi y sa nachádza pružná sila  $F_k$  vysvetlená v kapitole 4.4. Je možné vidieť, že prítlačná sila môže byť maximálne 1850 N. Tento limit je spôsobený ohraničujúcou podmienkou, kedy sa pneumatika stlačí na doraz k ráfiku a hrozí preseknutie duše alebo pneumatiky. Druhá ohraničujúca podmienka je nastavená na minimálnu hodnotu prítlačnej sily. V prípadoch kedy na grafe na Obr. 5-5 má prítlačná sila hodnotu 0 N koleso stráca trakciu a odliepa sa od podložky. Reálne tento prípad nenastáva tak často, pretože jazdec aktívne pracuje s odpruženou hmotnosťou a koleso vie v prípade potreby odľahčiť alebo prípadne dodatočne zaťažiť zmenou svojho ťažiska.

Na Obr. 5-6 je graf stlačenia vidlice, kde stlačenie je rozdiel vertikálnej výchylky odpruženej hmoty  $y_2$  a vertikálnej výchylky neodpruženej hmoty  $y_1$ . Vidlica má v skutočnosti zdvih 200 mm a nie je možné ju stlačiť viac ako je hodnota tohto zdvihu. Simulačný model toto obmedzenie neobsahuje, ako už bolo spomenuté aj v kapitole 4.1, toto obmedzenie nemá výrazný vplyv na výsledky tejto práce.



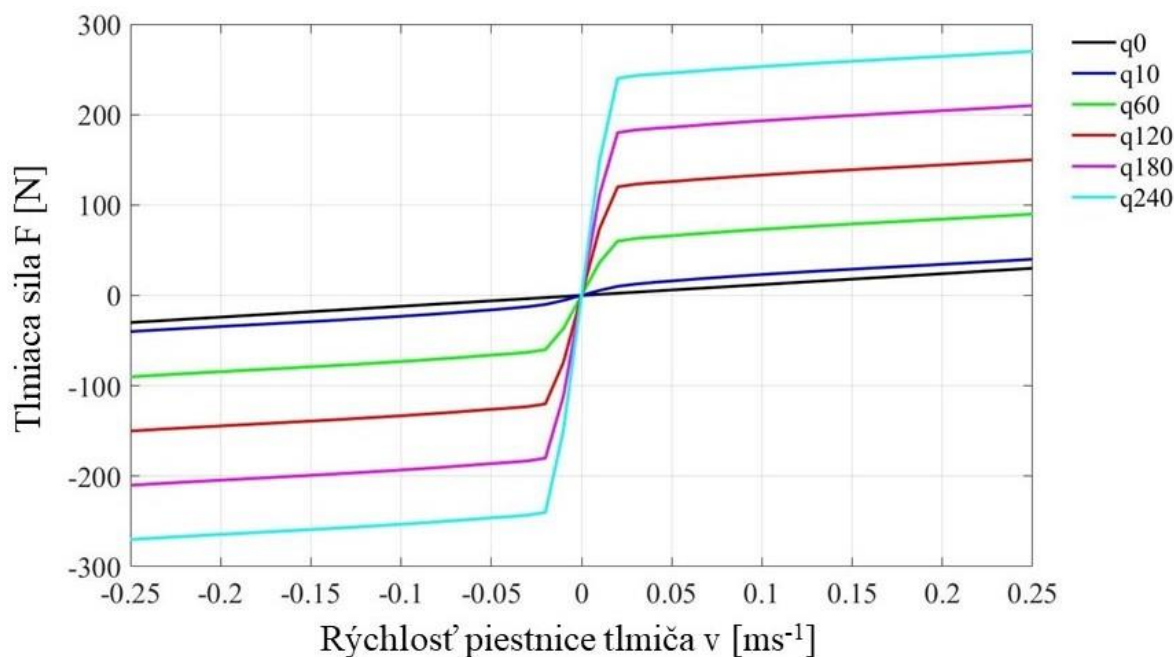


Obr. 5-6 Graf stláčania vidlice počas simulácie.

Z grafu je možné vidieť, že vidlica sa v 48 s výrazne zatlačila. Tento časový úsek je zvýraznený na Obr. 5-1 a odpovedá prejazdu klopenou zákrutou. Napriek tomu, že zrýchlenie nie je veľké dochádza k výraznému zatlačeniu vidlice. To je spôsobené tým, že pri prejazde klopenou zákrutou pôsobí na bicykel a jazdca preťaženie, ktoré sa síce na grafe vertikálnych zrýchlení trate neprejaví výraznejšou odchýlkou, ale pôsobí na odpruženie zaťažujúcou silou. Keďže má táto sila pomalý nábeh a pomerne dlhé trvanie tak olej v tlmiči pretečie ventilmi bez výraznejšieho odporu.

### 5.3 Simulácia odpruženia s použitím MR tlmiča a porovnanie výsledkov so simuláciou s použitím adaptívneho tlmiča

Po simulovaní niekoľkých variant F-v charakteristík MR tlmiča pomocou vytvoreného dynamického modelu semiaktívneho odpruženia s použitím riadiacim algoritmom Skyhook boli vybrané F-v charakteristiky zobrazené na Obr. 5-7.



Obr. 5-7 Optimálne F-v charakteristiky MR tlmiča.

Výsledné F-v charakteristiky tvoria optimálne nastavenie MR tlmiča z hľadiska zníženia amplitúdy zrýchlenia pri rezonančnej frekvencii odpruženej sústavy. Pri simulácii modelu s použitím vstupných zrýchlení zjazdovej trate bolo pri použití týchto F-v charakteristík zároveň dosiahnuté zníženie vibrácií odpruženej hmoty. Výsledné F-v charakteristiky boli určené na základe zvolenej priamky s označením  $q_0$ , ktorá reprezentuje silový rozsah MR tlmiča v odmagnetizovanom stave. Body, ktorými dané F-v charakteristiky prechádzajú, boli dopočítané pomocou rovnice priamky:

$$y = kx + q$$

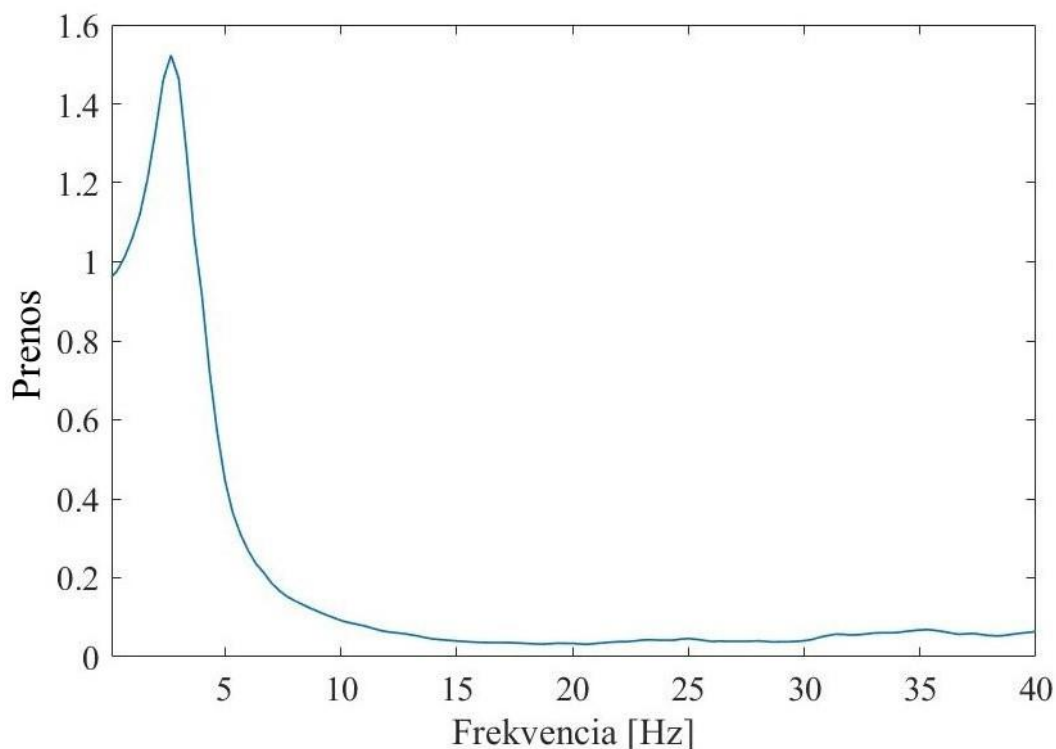
kde  $y$  predstavuje silu  $F$  (N),  $k$  je hodnota smernice priamky  $q_0$ ,  $x$  reprezentuje rýchlosť piestnice tlmiča  $v$  ( $\text{ms}^{-1}$ ) a  $q$  je hodnota posunutia priamky (viď Tab. 5-1). Následne boli tieto body preložené polynomicou funkciou.

Tab. 5-1 Vypočítané hodnoty F-v charakteristík.

Názov	Hodnota smernice $k$	Hodnota posunutia $q$	Bod prieniku 1 [x;y]	Bod prieniku 2 [x;y]	Bod prieniku 3 [x;y]	Bod prieniku 4 [x;y]	Rozsah použitých rýchlostí [ms <sup>-1</sup> ]
q0	120	-	[0;0]	[0,02;2,4]	[0,05;6]	[0,25;30]	< 0
q10	120	10	[0;0]	[0,02;10]	[0,05;16]	[0,25;40]	0–0,02
q60	120	60	[0;0]	[0,02;60]	[0,05;66]	[0,25;90]	0,02–0,15
q120	120	120	[0;0]	[0,02;120]	[0,05;126]	[0,25;150]	0,15–0,25
q180	120	180	[0;0]	[0,02;180]	[0,05;186]	[0,25;210]	0,25–0,35
q240	120	240	[0;0]	[0,02;240]	[0,05;246]	[0,25;270]	0,35 <

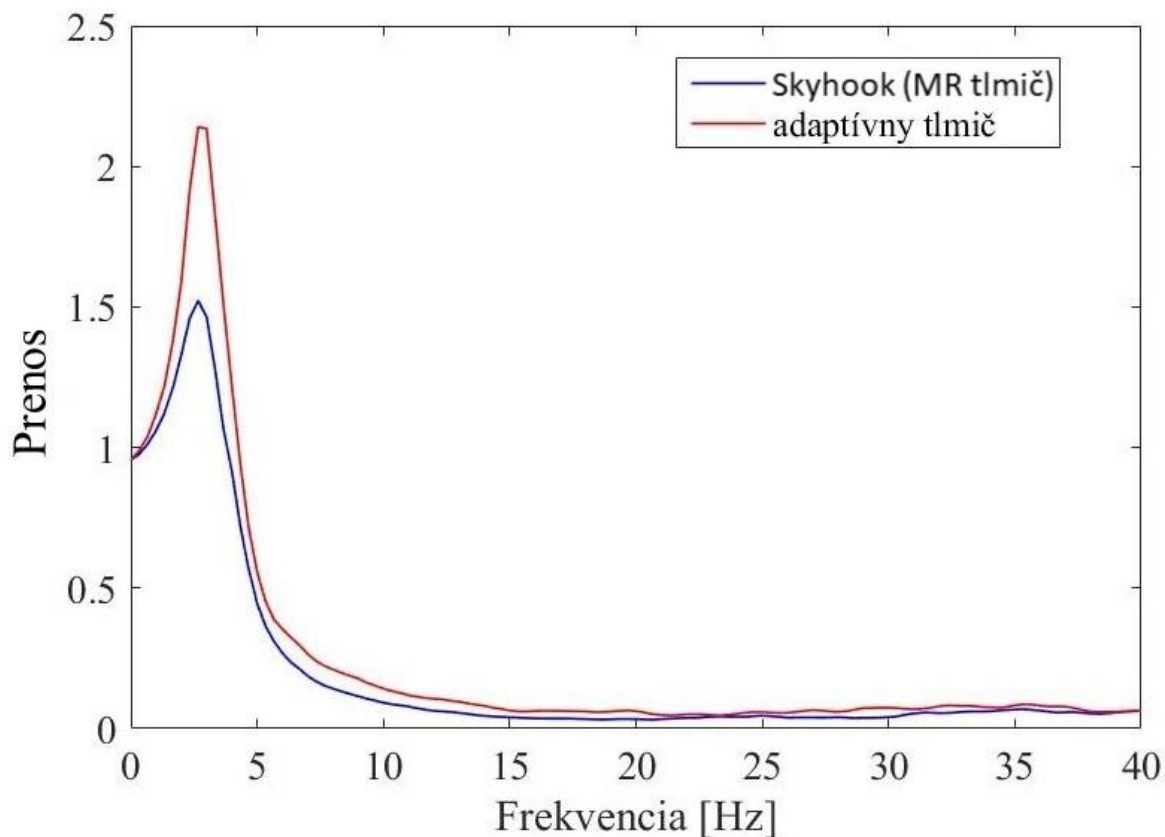
Všetky F-v charakteristiky prechádzajú bodom [0;0] a sú podľa neho súmerné (jedná sa o nepárne funkcie). Výber medzi jednotlivými F-v charakteristikami zabezpečuje algoritmus Skyhook na základe vertikálnych rýchlostí odpruženej hmoty a neodpruženej hmoty. Prepínanie jednotlivých F-v charakteristík prebieha na základe podmienok z rovníc (5) a (6). Rozsah rýchlostí piestnice, pre ktoré boli jednotlivé F-v charakteristiky použité sa nachádza v Tab. 5-1 v poslednom stĺpci. Medzi jednotlivými charakteristikami bolo prepínané diskkrétne.

Na Obr. 5-8 je prenosová charakteristika simulovaného semiaktívneho odpruženia. Prenosová charakteristika odpovedá očakávaniu.



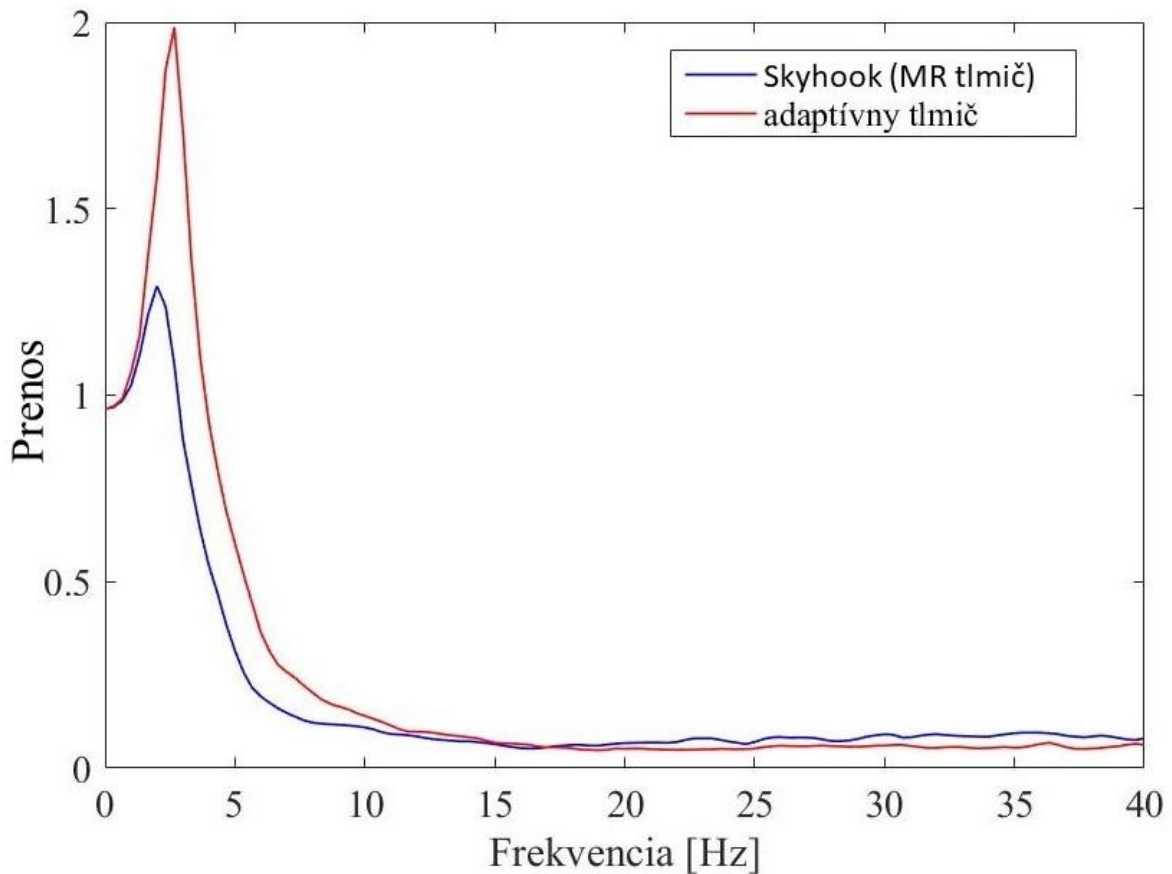
Obr. 5-8 Prenosová charakteristika semiaktívneho odpruženia získaná simuláciou semiaktívneho odpruženia pri použití zrýchlenia trate.

Na Obr. 5-9 je porovnanie prenosových charakteristík (z Obr. 5-3 a Obr. 5-8) získaných simuláciou pri budení nameraným zrýchlením zjazdovej trate. Pri použití semiaktívneho odpruženia sa amplitúda v okolí rezonančnej frekvencie celkovo znížila. Rovnako došlo k zníženiu amplitúdy zrýchlenia vo frekvenciách vyšších než je rezonančná. Amplitúda zrýchlenia v rezonančnej frekvencii 2,6 Hz je pri použití MR tmiča nižšia o približne 28 %.



Obr. 5-9 Porovnanie prenosových charakteristík pri budení nameraným zrýchlením zjazdovej trate pomocou akcelerometra.

Na Obr. 5-10 je porovnanie prenosových charakteristík získaných simuláciou pri budení logaritmickým sweepom v rozsahu frekvencií 0,1–20 Hz (vid' Obr. 4-9). Porovnaním amplitúd zrýchlenia v rezonančných frekvenciách simulovaných systémov odpruženia je možné vidieť pri použití MR tmiča zníženie amplitúdy zrýchlenia približne o 35 %. Adaptívny systém odpruženia má hodnotu rezonančnej frekvencie 2,6 Hz, semiaktívny systém odpruženia pri použití MR tmiča má hodnotu rezonančnej frekvencie 2 Hz. Pri porovnaní prenosových charakteristík z Obr. 5-9 a Obr. 5-10 je zrejmé, že rozdiel amplitúd zrýchlenia je o 7 % väčší na Obr. 5-10. To je spôsobené tým, že meraná trať neobsahovala dostatočne veľké terénne nerovnosti a jednotlivé prekážky na trati sa nevyskytovali príliš husto vedľa seba. Pri simulácii s použitím budiaceho signálu vo forme logaritmického sweepu bolo odpruženie otestované v širšom frekvenčnom rozsahu.

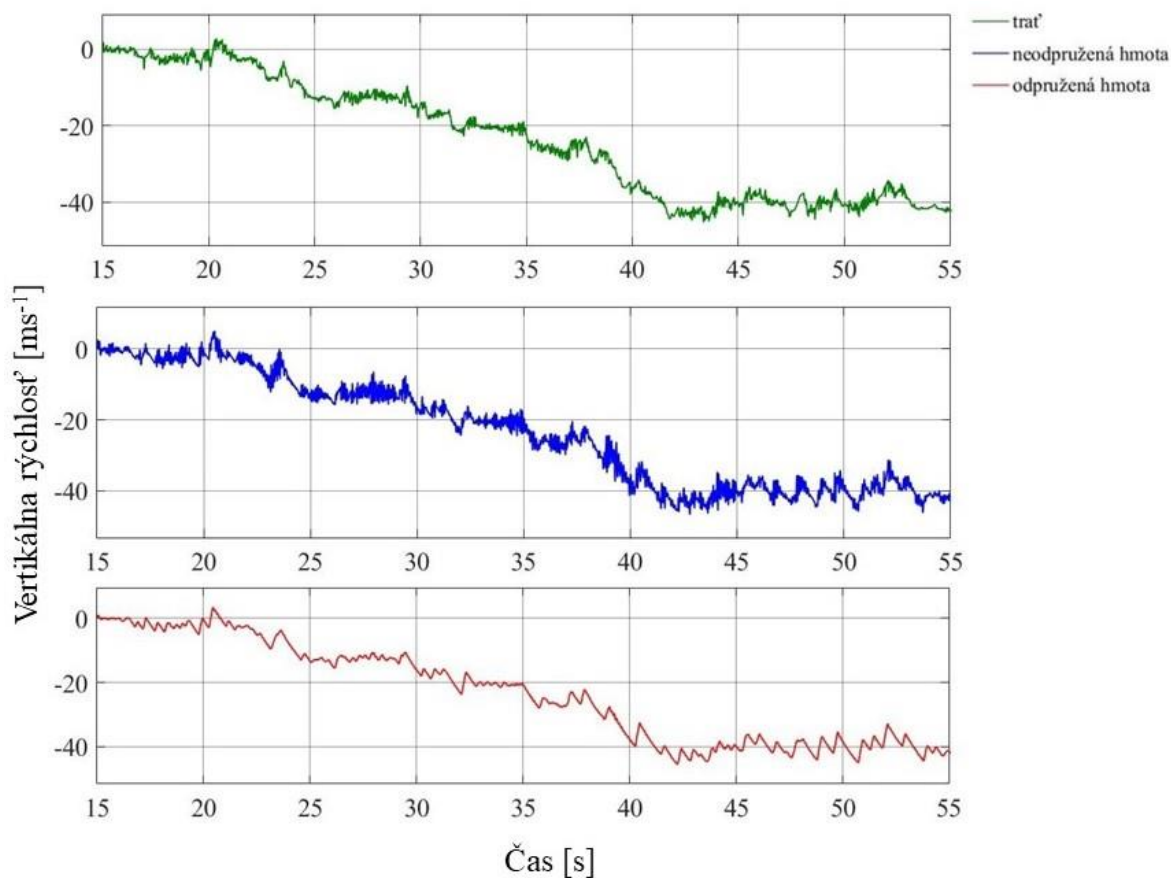


Obr. 5-10 Porovnanie prenosových charakteristík pri budení logaritmicným sweepom.

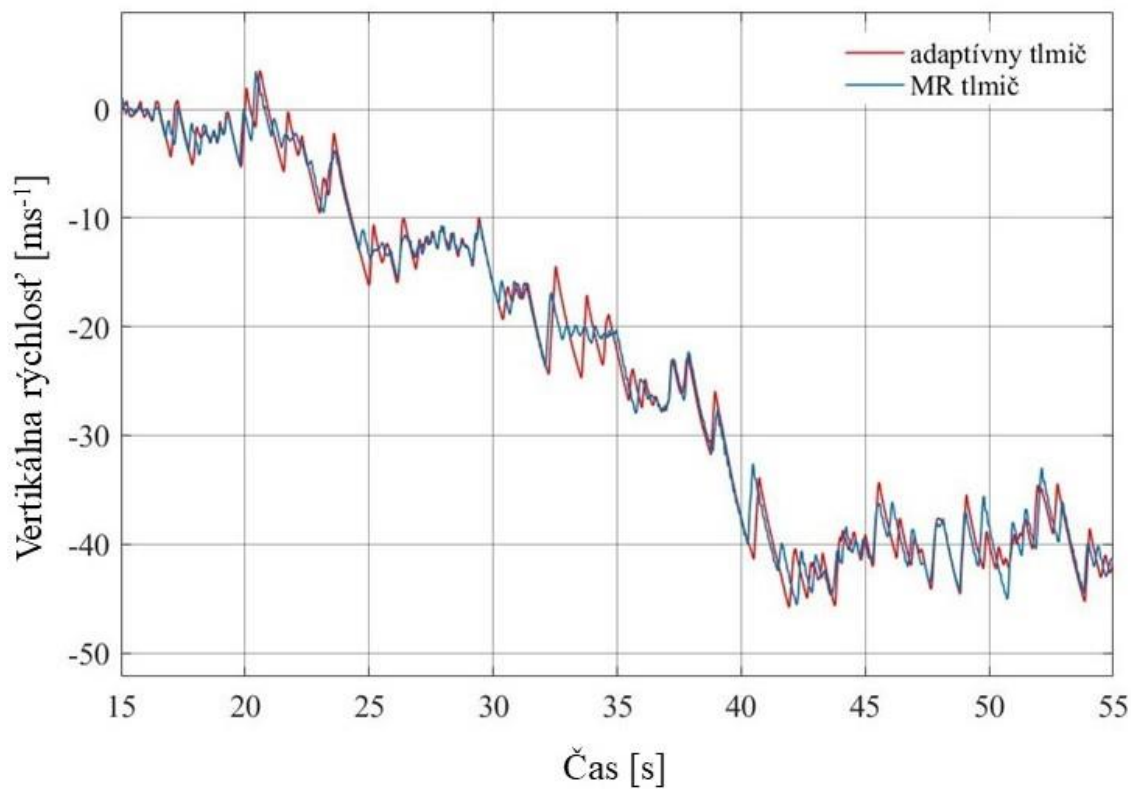
Pri použití MR tlmiča v kombinácii s riadiacim algoritmom Skyhook a pri použití F-v charakteristík z Obr. 5-7 došlo k výraznému zlepšeniu jazdného komfortu v porovnaní s adaptívnym tlmičom Rockshox Boxxer Team 2015. Toto zlepšenie jazdného komfortu je spôsobené znížením amplitúdy zrýchlenia pri rezonančnej frekvencii a zároveň znížením amplitúdy pri frekvenciách vyšších ako je rezonančná.

### 5.3.1 Výsledné vertikálne rýchlosti

Vertikálne rýchlosti získané simuláciou modelu semiaktívneho odpruženia s použitím MR tlmiča sú na Obr. 5-11. Priame porovnanie vertikálnych rýchlostí odpruženej hmoty pri použití adaptívneho a MR tlmiča je na Obr. 5-12.



Obr. 5-11 Graf s hodnotami vertikálnych rýchlostí získanými simuláciou semiaktívneho odpruženia.

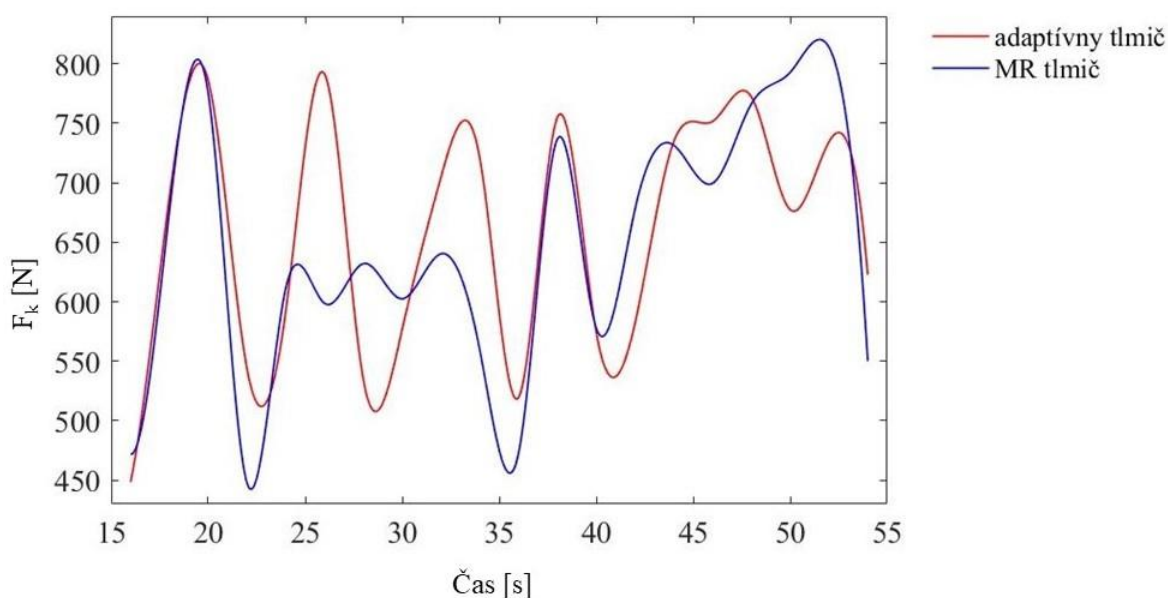


Obr. 5-12 Porovnanie vertikálnych rýchlostí odpruženej hmoty.

Hodnoty vertikálnych rýchlostí sú v prípade odpruženia s MR tlmičom nižšie. Nejedná sa však o výrazný rozdiel, čo je spôsobené tým, že meraná trať neobsahovala veľké množstvo nerovností nasledujúcich husto po sebe. Jednalo sa skôr o ojedinelé korene a terénne nerovnosti. Úsek s väčším množstvom nerovností sa nachádza na grafe získanom meraním pomocou akcelerometra v úseku 32–34 s, kde je rozdiel medzi MR tlmičom a adaptívnym tlmičom výrazný. V prípade prejazdu po nerovnostiach takým spôsobom, že frekvencia nárazov je menšia než rezonančná frekvencia zvláda adaptívny tlmič odizolovať pohyb odpruženej hmoty uspokojivo. Avšak v prípade MR tlmiča s použitím algoritmu Skyhook je odizolovanie pohybu odpruženej hmoty ešte lepšie.

### 5.3.2 Adhézia

Prítlačná sila zabezpečujúca trakciu kolesa bola pri použití MR tlmiča získaná rovnakým spôsobom ako v prípade použitia adaptívneho tlmiča (podrobnejšie vid' kapitola 5.2.2).

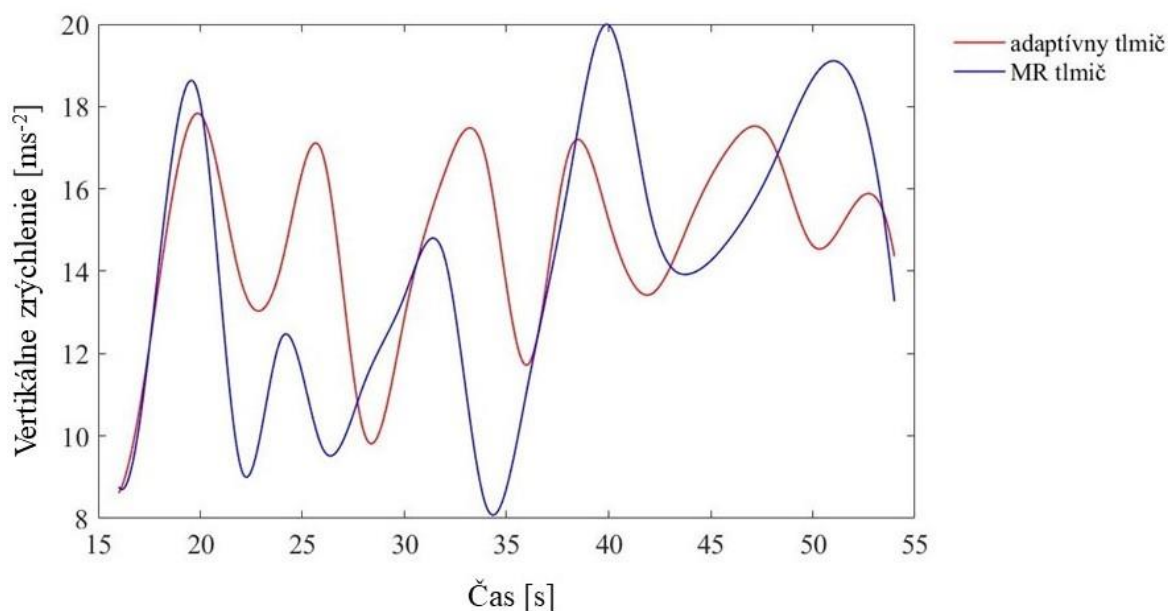


Obr. 5-13 RMS prítlačných síl MR tlmiča a adaptívneho tlmiča.

Porovnanie kvadratických priemerov (RMS) prítlačných síl MR tlmiča a adaptívneho tlmiča je na Obr. 5-13. Z grafu vyplýva, že hodnoty prítlačnej sily vzniknutej pri simulácii MR tlmiča sa výrazne nelíšia od hodnôt získaných simuláciou adaptívneho tlmiča. Testovaný adaptívny tlmič Rockshox Boxxer Team 2015 patrí k závodne používaným tlmičom testovaným profesionálnymi jazdcami. Preto je možné považovať, že tento tlmič poskytuje dostatočnú trakciu a tlmenie nárazov aj pri jazde v náročných podmienkach. Rovnako pri testovacej jazde nedochádzalo k strate trakcie predného kolesa. Trakcia predného kolesa je pri použití oboch tlmičov dostatočná a v tejto práci nie je cieľom ju vylepšovať.

### 5.3.3 Vertikálne zrýchlenie

Porovnaním RMS výsledkov vertikálneho zrýchlenia odpruženej hmoty na grafe (viď Obr. 5-14) je zrejmé, že pri odpružení MR tlmíča došlo k zmene vertikálneho zrýchlenia odpruženej hmoty v porovnaní s použitím adaptívneho tlmíča. Iba v úseku medzi 47–48 s, čo odpovedá prejazdu klopenou zákrutou je RMS hodnota vertikálneho zrýchlenia pri simulácii MR tlmíča zhodná s hodnotou v prípade použitia adaptívneho tlmíča. Získaná hodnota kvadratického priemeru vertikálneho zrýchlenia je v tomto úseku  $16,7 \text{ ms}^{-2}$ . Porovnaním výsledkov v časovom úseku 32–34 s je RMS hodnota vertikálneho zrýchlenia pri použití MR tlmíča  $9,06 \text{ ms}^{-2}$  a pri použití adaptívneho tlmíča je získaná hodnota  $17,28 \text{ ms}^{-2}$ . Jedná sa teda o pokles vertikálneho zrýchlenia o približne 48 % v prípade použitia MR tlmíča. V tomto časovom úseku sa nachádza najväčší počet terénnych nerovností na trati. V kapitole 5.3.1 bolo popísané, že v tomto úseku dochádza k poklesu vertikálnej rýchlosti odpruženej hmoty. V 40 s naopak dochádza k 25 % nárastu RMS vertikálneho zrýchlenia v prípade MR tlmíča. V tomto úseku sa na trati nachádzala priehlbina s plynulým klesaním a prudkým stúpaním. Napriek nárastu vertikálneho zrýchlenia sa hodnota vertikálnej rýchlosti v porovnaní s adaptívnym tlmíčom nezmenila (viď Obr. 5-12). Nárast vertikálneho zrýchlenia v tomto úseku je spôsobený algoritmom Skyhook, ktorý v prípade kedy dochádza k stláčaniu vidlice vplyvom vyššej vertikálnej rýchlosti odpruženej hmoty v porovnaní s neodpruženou hmotou, použije F-v charakteristiku s väčšími silami (viď rovnice (5) a (6)). Tým sa zníži vertikálna rýchlosť a vertikálna výchylka odpruženej hmoty.



Obr. 5-14 Graf RMS hodnôt vertikálneho zrýchlenia odpruženej hmoty získaný prostredníctvom simulácií.



## 6 DISKUSIA

Na začiatku experimentálnej časti tejto bakalárskej práce boli namerané hodnoty F-v charakteristík zjazdovej vidlice horského bicykla, na základe ktorých bol zostavený simulačný model adaptívneho odpruženia. Následne bol vytvorený simulačný model semiaktívneho odpruženia s použitím MR tlmiča. Tieto modely boli ďalej použité na simuláciu daných typov odpruženia a porovnanie výsledkov. Ako vstupné údaje do simulácii boli použité namerané hodnoty vertikálneho zrýchlenia pri prejazde po zjazdovej trati pomocou programu vytvoreného na zber dát z akcelerometra. Akcelerometer sa nachádzal na vonkajších nohách vidlice a pri meraní došlo k miernemu skresleniu výsledkov v dôsledku tlmenia pneumatiky. Toto skreslenie je však možné zanedbať, pretože výsledné hodnoty vertikálneho zrýchlenia neodpruženej hmoty získané pomocou simulácie sa len nepatrne líšia od nameraných hodnôt zrýchlenia trate. Ako riadiaci algoritmus MR tlmiča bol vybraný Skyhook, ktorý vykazuje najlepšie vlastnosti v oblasti zvýšenia komfortu jazdy.

Po stanovení optimálneho silového rozsahu MR tlmiča na základe hodnôt získaných meraním adaptívneho tlmiča a upravených prostredníctvom simulácie boli stanovené výsledky adaptívneho aj semiaktívneho odpruženia. Z porovnania výsledkov vyplýva zníženie amplitúdy v rezonančnej frekvencii o 35 %. Tieto výsledky boli dosiahnuté prostredníctvom simulácie so vstupným budiacim signálom logaritmickým sweepom. Pri použití vstupného zrýchlenia zjazdovej trate nameraného akcelerometrom došlo k zníženiu amplitúdy zrýchlenia o 28 %. Pri vyšších frekvenciách ako rezonančná boli amplitúdy zrýchlenia rovnako nižšie v prípade použitia MR tlmiča. Tým dochádza k výraznému zníženiu vibrácií prenášaných do riadítok bicykla a zlepšeniu jazdného komfortu pri použití MR tlmiča s riadiacim algoritmom Skyhook. Kombinácia MR tlmiča s týmto algoritmom je schopná zlepšiť odizolovanie pohybu odpruženej hmoty najmä v oblasti rezonančnej frekvencie odpruženej sústavy, ale aj vo frekvenciách vyšších než je rezonančná. Pri budení frekvenciami nižšími než je rezonančná frekvencia vykazujú oba simulované systémy odpruženia podobné správanie. Prítlačná sila je v prípade testovaného semiaktívneho odpruženia podobná s prítlačnou silou zaznamenanou počas simulácie adaptívneho odpruženia. Ako bolo spomenuté v kapitole 5.3.2 testovaný adaptívny tlmič patrí medzi bežne používané tlmiče profesionálnymi jazdcami na pretekoch svetovej úrovne a preto sa predpokladá, že poskytuje dostatočnú trakciu predného kolesa. Preto v prípade výsledkov adhézie MR tlmiča je predpoklad, že prítlačná sila je dostatočujúca na zachovanie trakcie. Porovnaním RMS hodnôt vertikálneho zrýchlenia odpruženej hmoty bol počas väčšieho časového úseku testovanej trate zistený pokles hodnôt vertikálneho zrýchlenia pri použití MR tlmiča. Najväčší pokles vertikálneho zrýchlenia bol zistený pri simulovaní prejazdu po úseku trate s najväčšou koncentráciou prekážok. Pokles RMS vertikálneho zrýchlenia bol v tomto úseku približne o 48 %.

Pre vstup do simulácie bola použitá hodnota tlaku, ktorá je bežne používaná pri zjazde v prednej pneumatike. Na základe merania bola určená tuhosť pneumatiky. Tuhosť pružiny bola zistená taktiež experimentálne na štandardne používanom type vinutej pružiny. Výsledky získané prostredníctvom simulácii sa vzťahujú k týmto vstupným hodnotám a rovnako k stanoveným hodnotám odpruženej a neodpruženej hmotnosti. Avšak vytvorené simulačné modely je možné použiť všeobecne k simulácii chovania predného odpruženia horského bicykla s rôznymi vstupnými parametrami.

Pre dosiahnutie lepších výsledkov simulácie by bolo vhodné namerať hodnoty vertikálneho zrýchlenia trate, ktorá obsahuje viac terénnych nerovností nasledujúcich hustejšie za sebou. Tým by bol získaný budiaci signál s vyššími frekvenciami a bolo by možné lepšie otestovať vybrané F-v charakteristiky MR tlmiča. Súčasne by bolo možné otestovať tieto nastavenia na viacerých tratiach a porovnať výsledky.

## 7 ZÁVER

Táto bakalárska práca sa zaoberá návrhom semiaktívneho riadenia MR tlmiča pre prednú odpruženú vidlicu zjazdového bicykla. V horskej cyklistike sú najdôležitejšie parametre bicykla geometria rámu, kinematika rámu a vlastnosti odpruženia. Hlavnými úlohami odpruženia je odizolovať pohyb odpruženej hmoty a čo najlepšie kontrolovať jej samotný pohyb. V teoretickej časti bolo zistené, že za účelom zvýšenia komfortu jazdy je najvhodnejšie použiť riadiaci algoritmus semiaktívneho odpruženia Skyhook.

Za účelom, čo najlepšieho určenia silového rozsahu MR tlmiča boli namerané a vyhodnotené F-v charakteristiky zjazdovej vidlice pri rôznych nastaveniach. Ďalej boli vytvorené simulačné modely ako adaptívneho odpruženia tak aj semiaktívneho. Ako vstupné parametre boli použité experimentálne namerané hodnoty odpruženej a neodpruženej hmotnosti a hodnoty tuhosti pružiny a pneumatiky. Ako ďalší krok bol vytvorený program na spracovanie hodnôt z akcelerometra, ktorým bola následne nameraná zjazdová trať. Tieto hodnoty boli použité ako vstupný budiaci signál pri simulácii oboch modelov odpruženia. Pri simulácii adaptívneho tlmiča boli použité namerané F-v charakteristiky, z ktorých bola vybraná tá s najlepšimi vlastnosťami v danom prípade. Podľa výsledkov simulácie adaptívneho tlmenia boli vytvorené F-v charakteristiky pre semiaktívne odpruženie. Tie boli následne použité v simulácii modelu semiaktívneho odpruženia a na základe výsledkov tejto simulácie boli ďalej optimalizované. Výsledky oboch simulácií boli zhodnotené a porovnané. Z nich vyplýva, že MR tlmič s použitím algoritmu Skyhook výrazne zlepši schopnosť odpruženia odizolovať pohyb odpruženého telesa a pri tom výsledné hodnoty trakcie predného kolesa ostanú zachované ako pri adaptívnom tlmiči. Pri použití MR tlmiča dochádza k zníženiu amplitúdy v rezonančnej frekvencii až o 35 %. V dôsledku tohto zníženia amplitúdy pri použití MR tlmiča s riadiacim algoritmom Skyhook dochádza k lepšiemu tlmeniu vibrácií prenášaných do riaditok bicykla a k následnému zlepšeniu jazdného komfortu.

Tým boli splnené všetky ciele tejto bakalárskej práce. MR tlmič s vybranými F-v charakteristikami dokáže zlepšiť komfort jazdy v horskej cyklistike a tým umožňuje jazdiť v náročnejších podmienkach. Vytvorený simulačný model je zjednodušený a nezahŕňa časovú odozvu tlmiča ani prácu jazdca s ťažiskom. Napriek tomu výsledné trendy získané pomocou simulácie sú totožné s reálnymi výsledkami. Výsledný silový rozsah MR tlmiča je možné ďalej simulovať pri použití hodnôt z viacerých zjazdových tratí a prípadne vytvoriť optimálne F-v charakteristiky pre jednotlivé trate. Pri ďalšej simulácii je vhodné použiť iné hodnoty odpruženej a neodpruženej hmotnosti, ktoré by sa však už nemali príliš líšiť od hodnôt použitých v tejto práci. Zakomponovanie časovej odozvy tlmiča do simulácie umožní získať presnejšie výsledky. Získaný silový rozsah MR tlmiča je následne možné použiť pri skonštruovaní tohto tlmiča a porovnať výsledky získané experimentálne s tými simulovanými.

## 8 ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

- [1] KARNOPP, D., M. J. CROSBY a R. A. HARWOOD. Vibration control using semi-active force generators. *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME* [online]. 1974. ISSN 15288935. Dostupné z: doi:10.1115/1.3438373
- [2] CYKL.CZ. Seříd'te si odpruženou vidlici (1. část). *Seříd'te si odpruženou vidlici (1. část)* [online]. 2012 [vid. 2020-03-28]. Dostupné z: <http://cykl.cz/item/seridte-si-odpruzenou-vidlici-1-cast>
- [3] BIKERADAR. Mountain bike suspension forks – a buyer's guide. *Mountain bike suspension forks – a buyer's guide* [online]. 2014 [vid. 2020-03-28]. Dostupné z: <https://www.bikeradar.com/advice/buyers-guides/mountain-bike-suspension-forks-a-buyers-guide/>
- [4] TURMAN, Brandon. FOX 32 Step-Cast 2017 Fork. *FOX 32 Step-Cast 2017 Fork* [online]. 2016 [vid. 2020-04-03]. Dostupné z: <https://www.vitalmtb.com/product/guide/Forks,33/FOX/32-Step-Cast-SC-Factory-FIT4,17323#product-reviews/2395/expand>
- [5] REI CO-OP. Bike Suspension Basics. *Bike Suspension Basics* [online]. [vid. 2020-03-30]. Dostupné z: <https://www.rei.com/learn/expert-advice/suspension.html>
- [6] AUTORIDE. Pruženie automobilu: Vedel si, čo sú to vinuté pružiny? [online]. [vid. 2020-03-30]. Dostupné z: <https://autoride.sk/pruzenie-automobilu-vedel-si-co-su-vinute-pruziny>
- [7] ANDREXTR. *Air spring shocks (MTB Rear suspension Ep.13)* [online]. 2016 [vid. 2020-04-10]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=3HeL5NNHbFw>
- [8] BATTLOGG, Stefan, Martin WALTHERT, Gernot ELSENSOHN a Juergen POESEL. Shock absorber and method for operating a shock absorber in particular for a bicycle. US 9,719,574 B2. 2017.
- [9] FOX. *FOX Explains the GRIP2 Damper* [online]. 2019 [vid. 2020-04-28]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=xvrjA4MBnBA>
- [10] HASSAN, Samy Aly. *Fundamental Studies Of Passive, Active And Semi-Active Automotive Suspension Systems*. B.m., 1986. The University of Leeds.
- [11] PALM, William J. *System dynamics*. 2nd ed. Dubuque, IA: McGraw-Hill, 2010. ISBN 978-0-07-352927-1.
- [12] KAMARUDDIN, Saiful Amin Bin. *Modelling and simulation of skyhook controller for semi-active suspension system*. B.m., 2012. Universiti Malaysia Pahang.
- [13] MATHWORKS. Robust Control of an Active Suspension. *Robust Control of an Active Suspension* [online]. [vid. 2020-03-31]. Dostupné z: <https://es.mathworks.com/help/robust/examples/robust-control-of-an-active-suspension.html>
- [14] LAW, M., M. WABNER, A. COLDITZ, M. KOLOUCH, S. NOACK a S. IHLENFELDT. Active vibration isolation of machine tools using an electro-hydraulic actuator. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* [online]. 2015. ISSN 17555817. Dostupné z: doi:10.1016/j.cirpj.2015.05.005

- [15] COLLINS, Ian. FOX Live Valve Suspension: Robots, MTB and the Rise of the Machines. *VITALMTB* [online]. 2018. Dostupné z: <https://www.vitalmtb.com/features/FOX-Live-Valve-Suspension-Robots-MTB-the-Rise-of-the-Machines,2508>
- [16] CUNNINGHAM, Richard. Review: Fox Live Valve Suspension. *pinkbike* [online]. 2018. Dostupné z: <https://www.pinkbike.com/news/review-fox-live-valve-suspension.html>
- [17] PANG, Li, Gopalakrishna M. KAMATH a Norman M. WERELEY. Analysis and testing of a linear stroke magnetorheological damper. In: *Collection of Technical Papers - AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference* [online]. 1998. ISSN 02734508. Dostupné z: doi:10.2514/6.1998-2040
- [18] BHISE, Ankita R., Rutuja G. DESAI, Mr. R. N. YERAWAR, Dr. A.C. MITRA a Dr. R. R. ARAKERIMATH. Comparison Between Passive And Semi-Active Suspension System Using Matlab/Simulink. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering* [online]. 2016, **13**(4), 01–06. Dostupné z: doi:10.9790/1684-1304010106
- [19] ZHU, Wanning, Xufeng DONG, Hao HUANG a Min QI. Iron nanoparticles-based magnetorheological fluids: A balance between MR effect and sedimentation stability. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* [online]. 2019. ISSN 03048853. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmmm.2019.165556
- [20] WILSON, TRACY V. How Liquid Body Armor Works. *HowStuffWorks* [online]. [vid. 2020-04-02]. Dostupné z: <https://science.howstuffworks.com/liquid-body-armor2.htm>
- [21] KULKARNI, Abhijeet N a Santosh R PATIL. Magneto-Rheological ( MR ) and Electro-Rheological ( ER ) Fluid Damper : A Review Parametric Study of Fluid Behavior. *International Journal of Engineering Research and Applications* [online]. 2013, **3**(6), 1879–1882. Dostupné z: [https://www.ijera.com/papers/Vol3\\_issue6/LA3618791882.pdf](https://www.ijera.com/papers/Vol3_issue6/LA3618791882.pdf)
- [22] LORD, Parker. How Does an MR Damper Work? *How Does an MR Damper Work?* [online]. [vid. 2020-04-02]. Dostupné z: <https://www.lord.com/products-and-solutions/active-vibration-control/industrial-suspension-systems/how-does-mr-damper-work>
- [23] STRECKER, Zbyněk, Ivan MAZŮREK, Jakub ROUPEC a Milan KLAPKA. Influence of MR damper response time on semiactive suspension control efficiency. *Meccanica* [online]. 2015. ISSN 15729648. Dostupné z: doi:10.1007/s11012-015-0139-7
- [24] EUROMOTOR VIRTUAL COLLEGE. Damping Factor of a Tire Dependent onRolling Velocity and Excitation Frequency. *Damping Factor of a Tire Dependent onRolling Velocity and Excitation Frequency* [online]. [vid. 2020-04-10]. Dostupné z: <https://www.euromotor.org/mod/resource/view.php?id=21354>
- [25] BUCHTA, Tomáš. *Staviteľný portál pro hydraulický pulzátor Inova* [online]. B.m., 2017. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav konstruování. Vedoucí práce Ivan Mazůrek. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/66219>

## 9 ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK, SYMBOLOV A VELIČÍN

EH	elektrohydraulický systém odpruženia
ER	elektroreologický systém odpruženia
MR	magnetoreologický systém odpruženia
R	odskok tlmiča
C	kompresia tlmiča
RMS	kvadratický priemer
$F_k$ (N)	pružná sila
$F_b$ (N)	sila tlmenia
$k, k_1, k_2$ (Nm <sup>-1</sup> )	tuhosť pružiny
$b, b_1, b_2$ (Nsm <sup>-1</sup> )	koeficient tlmenia
$b_r$ (-)	koeficient pomerného útlmu
$m, m_1, m_2$ (kg)	hmotnosť
$v$ (ms <sup>-1</sup> )	rýchlosť
$x$ (m)	dĺžková deformácia
$g$ (ms <sup>-2</sup> )	gravitačné zrýchlenie
$\Omega_0$ (rads <sup>-1</sup> )	vlastná uhlová rýchlosť
$f_0$ (Hz)	vlastná frekvencia
$\ddot{y}_2$ (ms <sup>-2</sup> )	vertikálne zrýchlenie odpruženej hmoty
$\ddot{y}_1$ (ms <sup>-2</sup> )	vertikálne zrýchlenie neodpruženej hmoty
$\dot{y}_2$ (ms <sup>-1</sup> )	vertikálna rýchlosť odpruženej hmoty
$\dot{y}_1$ (ms <sup>-1</sup> )	vertikálna rýchlosť neodpruženej hmoty
$\dot{y}_0$ (ms <sup>-1</sup> )	vertikálna rýchlosť podložky
$y_2$ (m)	vertikálna výchylka odpruženej hmoty
$y_1$ (m)	vertikálna výchylka neodpruženej hmoty
$y_0$ (m)	vertikálna výchylka podložky
$\dot{x}, \dot{x}_0$ (ms <sup>-1</sup> )	vertikálna rýchlosť

## 10 ZOZNAM OBRÁZKOV A GRAFOV

Obr. 2-1 Predná odpružená vidlica horského bicykla [4].	14
Obr. 2-2	15
Obr. 2-3 Vplyv hlavnej a negatívnej komory na priebeh pružnej sily vzduchovej pružiny [7].	16
Obr. 2-4 Rez tlmáčom vidlice Fox 36, modré šípky znázorňujú prúdenie oleja cez ventily pri kompresii, červené šípky znázorňujú prúdenie oleja pri odskoku. Ventil označený (A) predstavuje ventil odskoku, ventil označený (B) predstavuje ventil kompresie [9].	17
Obr. 2-5 Schéma aktívneho odpruženia [13].	18
Obr. 2-6 Systém odpruženia Fox Live Valve [16].	20
Obr. 2-7 Snímky častíc zachytené elektrónovým mikroskopom [19].	20
Obr. 2-8 Usporiadanie častíc karbonylu železa v MR oleji, vľavo nezmagnetizovaný stav, vpravo zmagnetizovaný stav [18].	21
Obr. 2-9 Schematický model MR tlmáča [22].	22
Obr. 2-10 Semiaktívny systém [1].	24
Obr. 4-1 Schéma modelu s dvomi stupňami voľnosti.	28
Obr. 4-2 Experimentálne zistené koeficienty tlmenia [24].	29
Obr. 4-3 Model adaptívneho odpruženia prednej vidlice.	30
Obr. 4-4 Hydraulický pulzátor Inova [25].	31
Obr. 4-5 F-v charakteristiky adaptívneho tlmáča, R označuje odskok a C označuje kompresiu.	32
Obr. 4-6 Akcelerometer ADXL 345 v ochrannom obale.	33
Obr. 4-7 Vľavo Raspberry Pi 2 Model B, vpravo akcelerometer ADXL 345.	33
Akcelerometer ADXL 345 v ochrannom obale.	33
Obr. 4-9 Logaritmickej sweep.	34
Obr. 5-1 Hodnoty vertikálneho zrýchlenia získané meraním trate.	36
Obr. 5-2 Vybraná F-v charakteristika adaptívneho tlmáča.	37
Obr. 5-3 Prenosová charakteristika zvolenej F-v charakteristiky získaná simuláciou adaptívneho odpruženia pri použití zrýchlenia trate.	38

Obr. 5-4 Graf s hodnotami vertikálnych rýchlostí získanými simuláciou adaptívneho odpruženia.	39
Obr. 5-5 Prítlačná sila zabezpečujúca trakciu kolesa.	40
Obr. 5-6 Graf stláčania vidlice počas simulácie.	41
Obr. 5-7 Optimálne F-v charakteristiky MR tlmiča.	42
Obr. 5-8 Prenosová charakteristika semiaktívneho odpruženia získaná simuláciou semiaktívneho odpruženia pri použití zrýchlenia trate.	43
Obr. 5-9 Porovnanie prenosových charakteristík pri budení nameraným zrýchlením zjazdovej trate pomocou akcelerometra.	44
Obr. 5-10 Porovnanie prenosových charakteristík pri budení logaritmickým sweepom.	45
Obr. 5-11 Graf s hodnotami vertikálnych rýchlostí získanými simuláciou semiaktívneho odpruženia.	46
Obr. 5-12 Porovnanie vertikálnych rýchlostí odpruženej hmoty.	46
Obr. 5-13 RMS prítlačných síl MR tlmiča a adaptívneho tlmiča.	47
Obr. 5-14 Graf RMS hodnôt vertikálneho zrýchlenia odpruženej hmoty získaný prostredníctvom simulácií.	48

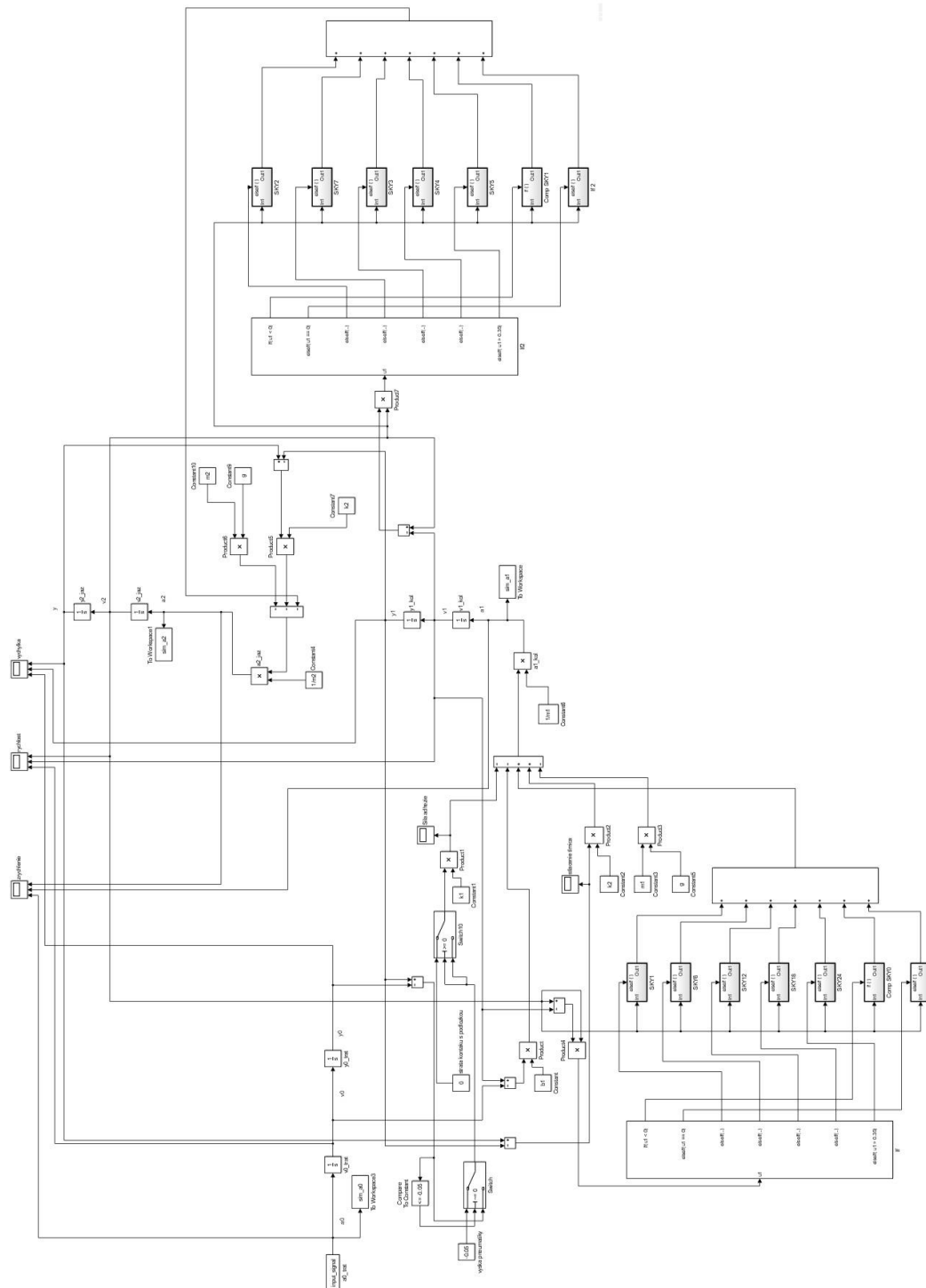


## 11 ZOZNAM TABULIEK

Tab. 4-1 Hodnoty konštánt simulačného modelu.	29
Tab. 5-1 Vypočítané hodnoty F-v charakteristík.	43

# 12 ZOZNAM PRÍLOH

## 12.1 Príloha 1: Model semiaktívneho odpruženia prednej vidlice



## 12.2 Príloha 2: Program na meranie zrýchlenia trate

```
1 import time
2 import math
3 import smbus
4 from time import sleep
5
6 revision = ([l[12:-1] for l in open('/proc/cpuinfo','r').readlines() if l[:8]=="Revision"]+['0000'])[0]
7 bus = smbus.SMBus(1 if int(revision, 16) >= 4 else 0)
8
9 # ADXL345 konstanty
10 EARTH_GRAVITY_MS2 = 9.80665
11 SCALE_MULTIPLIER = 0.0042
12
13 DATA_FORMAT = 0x31
14 BW_RATE = 0x2C
15 POWER_CTL = 0x2D
16 FIFO_CLT = 0x38
17
18 BW_RATE_3200HZ = 0x0F
19 BW_RATE_1600HZ = 0x0E
20 BW_RATE_800HZ = 0x0D
21 BW_RATE_400HZ = 0x0C
22 BW_RATE_200HZ = 0x0B
23 BW_RATE_100HZ = 0x0A
24 BW_RATE_50HZ = 0x09
25 BW_RATE_25HZ = 0x08
26
27 RANGE_2G = 0x00
28 RANGE_4G = 0x01
29 RANGE_8G = 0x02
30 RANGE_16G = 0x03
31
32 MEASURE = 0x08
33 AXES_DATA = 0x32
34
35 BYPASS = 0x00
36 FIFO = 0x01
37 STREAM = 0x02
38 TRIGGER = 0x03
39
40 class ADXL345:
41
42     address = None
43
44     def __init__(self, address = 0x53):
45         self.address = address
46         self.setBandwidthRate(BW_RATE_200HZ)
47         self.setRange(RANGE_16G)
48         self.enableMeasurement()
49
50     def setFifo(self, fifo_flag):
51         bus.write_byte_data(self.address, FIFO_CLT, fifo_flag)
52
53     def enableMeasurement(self):
54         bus.write_byte_data(self.address, POWER_CTL, MEASURE)
55
56     def setBandwidthRate(self, rate_flag):
57         bus.write_byte_data(self.address, BW_RATE, rate_flag)
58
59     def setRange(self, range_flag):
60         value = bus.read_byte_data(self.address, DATA_FORMAT)
61
62         value &= ~0x0F;
63         value |= range_flag;
64         value |= 0x08;
65
66         bus.write_byte_data(self.address, DATA_FORMAT, value)
67
68     def getAxes(self, gforce = False):
69         bytes = bus.read_i2c_block_data(self.address, AXES_DATA, 6)
70
71         x = bytes[0] | (bytes[1] << 8)
72         if(x & (1 << 16 - 1)):
73             x = x - (1<<16)
74
75         y = bytes[2] | (bytes[3] << 8)
76         if(y & (1 << 16 - 1)):
77             y = y - (1<<16)
78
79         z = bytes[4] | (bytes[5] << 8)
80         if(z & (1 << 16 - 1)):
81             z = z - (1<<16)
82
83         x = x * SCALE_MULTIPLIER
84         y = y * SCALE_MULTIPLIER
85         z = z * SCALE_MULTIPLIER
86
87         if gforce == False:
88             x = x * EARTH_GRAVITY_MS2
89             y = y * EARTH_GRAVITY_MS2
90             z = z * EARTH_GRAVITY_MS2
91
92         return ("x":x, "y":y, "z":z)
93
94 if __name__ == "__main__":
95     adxl345 = ADXL345()
96     print ("ADXL345 on address 0x%x:" % (adxl345.address))
97     f = open("acc_data.txt", "w")
98     f.write("1. stlpec = x 2. stlpec = y 3. stlpec = z 4. stlpec = systemovy cas, hodnoty su v nasobkoch G (G = 9.80665)\n")
99     while True:
100         f.write("%s.6f %s.6f %s.6f %s.6f\n" % (adxl345.getAxes(True)['x'], adxl345.getAxes(True)['y'], adxl345.getAxes(True)['z'], time.time() ))
101     f.close()
```

## 12.3 Príloha 3: Program na vyhodnotenie nameraného zrýchlenia

```
1 clear all;
2 clc;
3 close all;
4 g = 9.81;
5 A=importdata('acc_data.txt');
6 matice=A.data;
7 clear A;
8 j = 0;
9
10 acc_x = matice(1:end-1,1)' * (g); % +g lebo pri merani bola os +x smerom dole
11
12 t(1,1) = 0;
13 for i = 1:length(matice)-2
14     t(1,i+1) = t(1,i) + (matice(i+1,4) - matice(i,4));
15 end
16
17 t_celk = t(1,end)-t(1,1)
18
19 figure
20 plot(t(1,1:end),acc_x(1,1:end));
21
22 gcomp = sum(acc_x(1:2000))/2000 %odstranenie gravitacneho zrychlenia
23
24 p = 0;
25 z = 10; %[s] zaciatok casoveho useku, tu odrezat zaciatok
26 for i = 1:length(t)
27     p = t(1,i);
28     if p >= z
29         k = i;
30         break
31     elseif p >= z & i == length(t)
32         disp('Chyba');
33     elseif z > t(end)
34         disp('Zly pociatocny cas');
35         break
36     end
37 end
38
39 t_data = t(1,k:end);
40 a0_data = acc_x(1,k:end) - gcomp;
41
42 figure
43 plot(t_data,a0_data);
44
45 save 'a0_namerane' a0_data t_data;
```