

ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
Ústav automobilů, spalovacích motorů
a kolejových vozidel

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2022



PARAMETRICKÝ MODEL ZAVĚŠENÍ ZADNÍHO KOLA HORSKÉHO KOLA

**PARAMETRIC MODEL OF MOUNTAIN BIKE
REAR SUSPENSION**

AUTOR:	Aleš Plaček
VEDOUCÍ PRÁCE:	Ing. Václav Jirovský, Ph.D.
STUDIJNÍ PROGRAM:	(B2342) Teoretický základ strojního inženýrství
STUDIJNÍ OBOR:	(2301R000) bez oboru

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Plaček** Jméno: **Aleš** Osobní číslo: **492457**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Parametrický model zavěšení zadního kola horského kola

Název bakalářské práce anglicky:

Parametric model of mountain bike rear suspension

Pokyny pro vypracování:

Vytvořte rovinný parametrický model zadního zavěšení celoodpruženého horského kola s cílem automatického generování mechanismu zavěšení dle zadaného průběhu zdvihu. Nejprve proveďte rešerši v oblasti užívaných typů zavěšení kol, analyzujte podobnosti s většími typy dopravních prostředků (motocykl, osobní automobil) a identifikujte principiální charakteristiky zavěšení. Následně zvolte vhodný nástroj pro realizaci parametrického modelu, stanovte základní vstupní parametry tak, aby je bylo možné omezit např. rozměrem rámu kola a průběhem zdvihu, a s využitím genetického algoritmu vytvořte generátor kinematického modelu.

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Václav Jirovský, Ph.D. 16123

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **22.04.2022**

Termín odevzdání bakalářské práce: **13.07.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Ing. Václav Jirovský, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Oldřich Vítek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Anotační záznam

Jméno autora:	Aleš Plaček
Název práce:	Parametrický model zavěšení zadního kola horského kola
Anglický název:	Parametric model of mountain bike rear suspension
Rozsah práce:	48 stran 32 obrázků 3 tabulky
Akademický rok:	2021/2022
Ústav:	12 120 Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel
Studijní program:	(B2342) Teoretický základ strojního inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Václav Jirovský, Ph.D.
Klíčová slova:	horská cyklistika, celoodpružené kolo, mechanismus, kinematika, genetický algoritmus
Key words:	mountain biking, full suspension bike, mechanism, kinematics, genetic algorithm

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá kinematikou mechanismů odpružení horských kol. Ve velkém množství vyráběných kol lze najít různé konstrukční řešení závěsu zadního kola. Předmětem zkoumání je mechanismy porovnat a rozdělit do základních skupin. Záměrem je také hledat souvislosti mezi odpružením horských kol a jiných dopravních prostředků. Výsledkem práce je rovinná parametrizace mechanismu odpružení horského kola, automatizovaný výpočet trajektorie mechanismu a návrh hodnot parametrů mechanismu na základě požadované trajektorie prostřednictvím genetického algoritmu.

Klíčová slova: horská cyklistika, celoodpružené kolo, mechanismus, kinematika, genetický algoritmus

Abstract

Object of study of the bachelor thesis are kinematics of mountain bike suspension mechanisms. Various design solutions of rear suspension can be found on the current market of mountain bikes. The subject of research is to compare these mechanisms and divide them into basic groups. The intention is also to look for links between mountain bike suspensions and suspensions of other means of transport. The result of the work is first of all a method of parameterization that ensures an uniform specification of the kinematics of the mountain bike suspension, secondly a calculation of the wheel trajectory and the last result is a genetic algorithm engineered to come up with the mountain bike suspension mechanism parameters values.

Keywords: mountain biking, full suspension bike, mechanism, kinematics, genetic algorithm

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma: „Parametrický model zavěšení zadního kola horského kola” vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu zdrojů.

V Praze dne 2.6.2022

.....

(podpis autora)

Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu práce Ing. Václavu Jirovskému, Ph.D. za rady v problematice tohoto tématu, odborné vedení a čas, který mi věnoval.

Přehled použitých veličin a jednotek

Symbol	Jednotka	Název veličiny
A_0	[mm]	Osová vzdálenost řetězových kol
A_x	[mm]	Souřadnice x bodu A
A_{xMax}	[mm]	Maximální hodnota souřadnice x bodu A
A_{xMin}	[mm]	Minimální hodnota souřadnice x bodu A
A_y	[mm]	Souřadnice y bodu A
A_{yMax}	[mm]	Maximální hodnota souřadnice y bodu B
A_{yMin}	[mm]	Minimální hodnota souřadnice y bodu B
α_1	[°]	Úhel natočení ramene 1
α_2	[°]	Úhel natočení ramene 2
α_3	[°]	Úhel natočení ramene 3
α_4	[°]	Úhel natočení ramene 4
a	[-]	Koeficient polynomu
B_x	[mm]	Souřadnice x bodu B
B_{xMax}	[mm]	Maximální hodnota souřadnice x bodu B
B_{xMin}	[mm]	Minimální hodnota souřadnice x bodu B
B_y	[mm]	Souřadnice y bodu B
B_{yMax}	[mm]	Maximální hodnota souřadnice y bodu B
B_{yMin}	[mm]	Minimální hodnota souřadnice y bodu B
b_x	[N·s/m]	Tlumicí koeficient tlumiče
b	[-]	Koeficient polynomu
β	[rad]	Úhel opásání řetězového kola řetězem
c	[-]	Koeficient polynomu
d_1	[mm]	Roztečný průměr předního řetězového kola
d_2	[mm]	Roztečný průměr zadního řetězového kola
ε	[rad]	Úhel natočení spojnice středů řetězových kol
F_n	[N]	Síla nohy jezdce působící na pedál

F_p	[N]	Síla v pružině
F_r	[N]	Síla v řetězu
F_t	[N]	Síla v tlumiči
φ	[rad]	Doplňkový úhel předního řetězového kola
γ	[rad]	Doplňkový úhel zadního řetězového kola
K_x	[mm]	Souřadnice x osy zadního kola
K_y	[mm]	Souřadnice y osy zadního kola
K_{yMax}	[mm]	Maximální hodnota souřadnice y osy zadního kola
K_{yMin}	[mm]	Minimální hodnota souřadnice y osy zadního kola
k	[N/m]	Tuhost pružiny
l_r	[mm]	Vzdálenost působíště síly F_r
λ	[rad]	Úhel mezi tažnou větví řetězu a normálou
M_x	[mm]	Souřadnice x osy zadního řetězového kola
M_y	[mm]	Souřadnice y osy zadního řetězového kola
M	[N·m]	Moment působící na kyvné rameno
N_x	[mm]	Souřadnice x osy předního řetězového kola
N_y	[mm]	Souřadnice y osy předního řetězového kola
v_1	[mm]	Délka ramene 1
v_2	[mm]	Délka ramene 2
v_3	[mm]	Délka ramene 3
v_4	[mm]	Délka ramene 4
x_{3k}	[mm]	Souřadnice x osy zadního kola (lokální systém)
y_{3k}	[mm]	Souřadnice y osy zadního kola (lokální systém)
<i>zdvih</i>	[mm]	Zdvih odpružení

Obsah

1	ÚVOD	11
2	TEORETICKÝ ROZBOR ODPRUŽENÍ VYBRANÝCH DOPRAVNÍCH PROSTŘEDKŮ	12
2.1	PRUŽENÍ.....	13
2.2	TLUMENÍ.....	13
2.3	VÝZNAM PNEUMATIK.....	14
2.4	AUTOMOBILOVÉ ZAVĚŠENÍ KOL.....	14
2.4.1	<i>Zavěšení typu MacPherson.....</i>	<i>14</i>
2.4.2	<i>Lichoběžníkové zavěšení.....</i>	<i>15</i>
2.4.3	<i>Další typy automobilového zavěšení.....</i>	<i>16</i>
2.5	MOTOCYKLOVÉ ZAVĚŠENÍ KOL.....	18
2.5.1	<i>Zavěšení předního kola motocyklu</i>	<i>18</i>
2.5.2	<i>Zavěšení zadního kola motocyklu</i>	<i>18</i>
2.6	TYPY ZAVĚŠENÍ HORSKÝCH KOL	19
2.6.1	<i>Zavěšení s jedním kloubem.....</i>	<i>20</i>
2.6.2	<i>Čtyřkloubové zavěšení</i>	<i>20</i>
2.6.3	<i>Speciální zavěšení.....</i>	<i>21</i>
2.6.4	<i>Zavěšení předního kola.....</i>	<i>22</i>
3	VLASTNOSTI A ROZDĚLENÍ HORSKÝCH KOL.....	23
3.1	ROZDĚLENÍ TYPŮ A SPECIFIKACÍ HORSKÝCH KOL	23
3.1.1	<i>Rozdělení jízdních kol podle normy ASTM F2043-13</i>	<i>24</i>
3.2	SPECIÁLNÍ ASPEKTY CHOVÁNÍ ODPRUŽENÍ HORSKÉHO KOLA.....	24
3.2.1	<i>Anti squat.....</i>	<i>24</i>
3.2.2	<i>Pedal kickback.....</i>	<i>25</i>
4	PARAMETRIZACE MECHANISMU ZAVĚŠENÍ HORSKÉHO KOLA	26
4.1	GEOMETRIE MECHANISMU	26
4.2	VÝPOČET ZÁVISLÝCH SOUŘADNIC MECHANISMU.....	28
4.3	VÝPOČET ZMĚNY DÉLKY ŘETĚZU	30
4.4	PARAMETRIZACE KONKRÉTNÍHO HORSKÉHO KOLA	32
5	STANOVENÍ TRAJEKTORIE OSY ZADNÍHO KOLA.....	34
6	NÁVRH PARAMETRŮ MECHANISMU	37

6.1	GENETICKÝ ALGORITMUS OBECNĚ.....	37
6.1.1	<i>Metody selekce</i>	38
6.1.2	<i>Metody křížení a mutace</i>	39
6.2	NÁVRH GENETICKÉHO ALGORITMU.....	40
6.2.1	<i>Ukázka výsledků genetického algoritmu</i>	41
6.2.2	<i>Porovnání výstupu genetického algoritmu s existujícím kolem</i>	43
7	ZÁVĚR	44
8	ZDROJE	45
	SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK.....	47
	SEZNAM PŘÍLOH	48

1 Úvod

Bakalářská práce se zabývá problematikou kinematiky konstrukce mechanismu odpružení horských kol. Z pohledu stavby horského kola stojí za úvahu, jak mechanismus zavěšení konstruovat tak, aby přesně vyhověl požadavkům na jízdní vlastnosti. Na trhu s horskými koly se vyskytuje mnoho konstrukčních řešení zavěšení zadního kola. Kola jednotlivých výrobců se dají na základě odlišností rozeznat rozdělit do základních skupin. Tento průzkum nabízených horských kol bude představovat základní odrazový můstek této práce. Horská kola představují podstatnou část cyklistického průmyslu. Významným jevem v cyklistickém průmyslu je aktuálně nárůst prodeje v odvětví elektrokol. Horská kola a jízdní kola obecně slouží nejenom jako zábava pro volný čas, ale také jako zdraví prospěšný, tichý a cenově dostupný dopravní prostředek. Provoz jízdních kol na rozdíl od některých jiných dopravních prostředků neprodukuje člověku škodlivé emise. Množství pevných částic z brzd a pneumatik u jízdních produkovaných je, ovšem v menším množství než u těžších pozemních dopravních prostředků. Plánem je provedení rešerše kinematiky zavěšení kol různých dopravních prostředků a poukázat na možné souvislosti s řešením odpružení horských kol. Cílem práce je provést parametrizaci zadního zavěšení a dále se zaměřit na stanovení trajektorie pohybu zadního kola parametrického modelu. Konečným výsledkem práce je také návrh parametrů odpružení na základě požadované trajektorie kola. Záměrem je výpočet trajektorie i parametrů automatizovat výpočetní technikou.

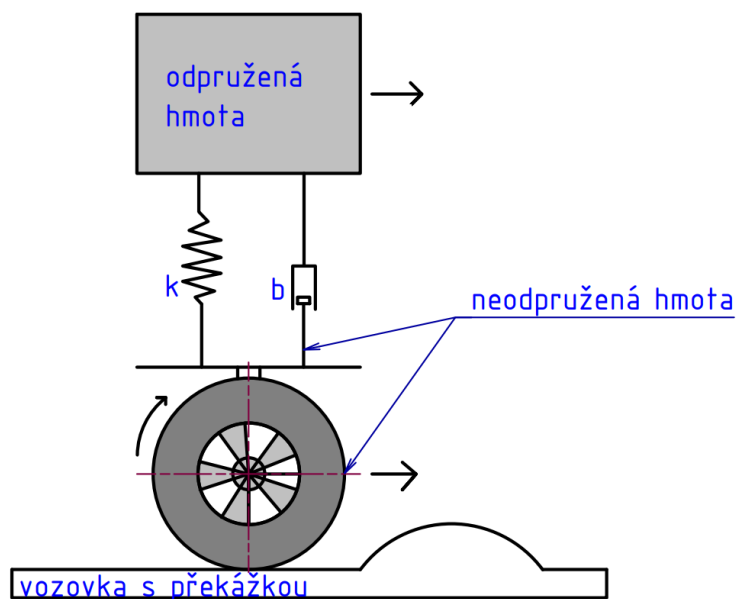
2 Teoretický rozbor odpružení vybraných dopravních prostředků

Odpružené zavěšení kol se používá z několika důvodů. Prvním důvodem je zvýšení času kontaktu pneumatik s terénem. To má za důsledek lepší ovladatelnost vozidla při průjezdu přes nerovnosti. Dalším důvodem je jízdní komfort. Odpružení chrání před otřesy náklad, cestující a celkově snižuje zátěž člověka. [1]

Zavěšení se zpravidla skládá ze tří základních prvků:

- a) Nosná konstrukce připevněná k tělu nebo rámu vozidla, která určuje geometrii zavěšení
- b) Pružina
- c) Tlumič

Zjednodušený model odpružení je zobrazen na obrázku 1. Kolo odvalující se po vozovce je upevněno k základnímu rámu skrze pružinu o tuhosti k a tlumičem o tlumicí konstantě b . Tlumení a pružení se dále věnují v následujících podkapitolách.



Obrázek 1- Zjednodušený model zavěšení kola

U vozidel se jejich hmotnost dělí na odpruženou a neodpruženou. Do neodpružené hmotnosti patří součásti pružících mechanismů. U celoodpružených horských kol například: ráfky, pláště, osy kol, spodní část teleskopické vidlice, brzdové třmeny a kotouče, převodník, zadní přesmykač atd.

V zájmu dobrého fungování odpružení je výhodné, aby poměr odpružené hmotnosti ku neodpružené hmotnosti byl co nejvyšší. Trajektorie, kterou zavěšení při propružení prochází, by neměla obsahovat žádný inflexní bod. [2]

2.1 Pružení

Pružina v sobě akumuluje mechanickou energii v podobě potenciální energie a udržuje světlu výšku vozidla. Obecně se pružiny dělí na materiálově poddajné, objemově poddajné a tvarově poddajné. U motocyklů, automobilů a horských bicyklů se nejčastěji vyskytuje vzduchové pružení a pružina vinutá. U automobilů se ale můžeme setkat i s listovými pružinami.

Síla v pružině se dá napsat takto:

$$F_p = -k \cdot x [N] \quad (1)$$

Kde x je souřadnice vychýlení pružiny od nezátíženého stavu a k je tuhost pružiny. Míinus ve vzorci značí to, že pružina tlačí vždy proti směru vychýlení. Pružina se chce vrátit do výchozího stavu.

2.2 Tlumení

Tlumič přeměňuje mechanickou energii na tepelnou energii. Síla v tlumiči se dá napsat jako:

$$F_t = -b_x \cdot \dot{x} [N] \quad (2)$$

Míra odporu kapaliny je závislá na pohybu pístu. Větší rychlost pohybu tlumiče má za důsledek větší odporovou sílu tlumení. Podle toho, jak moc se mění odporová síla tlumiče v závislosti na rychlosti pohybu tlumiče, rozdělujeme tlumiče na tlumiče lineární, progresivní a regresivní. Tlumící koeficient b tlumiče je rozdílný pro kompresi a expanzi. Při kompresi tlumiče je síla potřebná pro překonání odporu kapaliny větší než v případě expanze tlumiče. [3]

2.3 Význam pneumatik

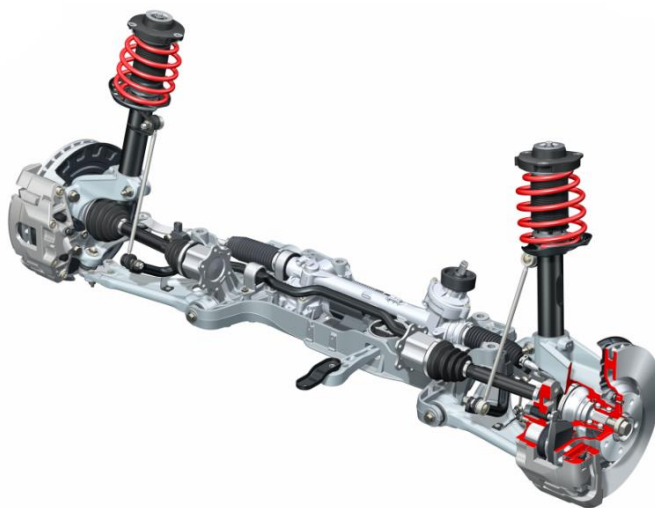
Pneumatika je v přímém dotyku s podkladem a díky tomu tvoří teoreticky první pružící člen vozidla, který se při kontaktu s nerovností začne deformovat. Při přejezdu malých nerovností může být pružící a tlumící efekt od samotných pneumatik dostatečný, a tak ani nemusí dojít k propružení v závěsu kola. Vliv na schopnost pneumatiky tlumit nerovnosti má její tvar a rozměry příčného průřezu, pružnost materiálu, z kterého je vyrobena, a tlak vzduchu uvnitř pneumatiky. [2]

2.4 Automobilové zavěšení kol

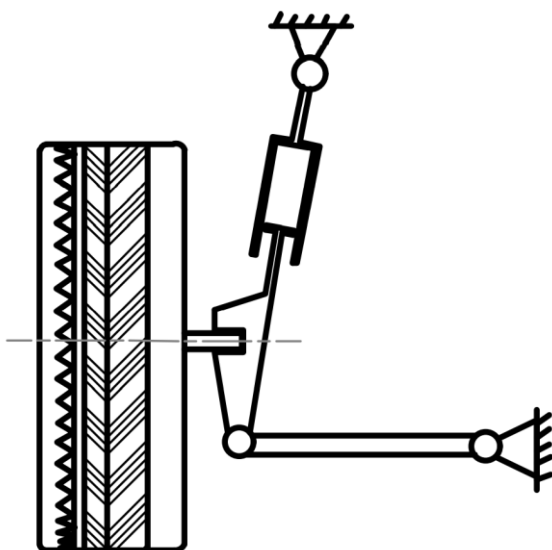
Při pohledu na konstrukci nezávislého zavěšení kol automobilu se lze inspirovat při tvorbě zavěšení horského kola. Níže jsou uvedeny základní typy mechanismů odpružení automobilových podvozků.

2.4.1 Zavěšení typu MacPherson

Zavěšení typu MacPherson se používá na nápravách automobilů se samonosnou karoserií. Kolo automobilu je přimontováno k těhlici. Těhlice je zespoda připevněna k dolnímu ramenu pomocí rejdového čepu. Dolní rameno je upevněno v čepch do karoserie automobilu. V horní části těhlice je uložen tlumič s pružinou, který se přimontován do karoserie. Hlavní tok síly prochází pružinou do horního ukotvení do karoserie. Náprava se zavěšením typu MacPherson je zobrazeno na obrázku 2. Na obrázku 3 je uvedeno kinematické schéma v pohledu kolmo na osu pneumatiky. [4] [5]



Obrázek 2 - Zavěšení MacPherson, přední náprava Audi TT [6]



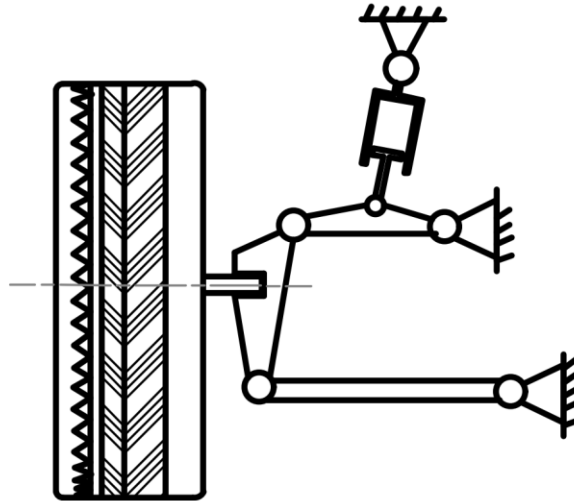
Obrázek 3 - Zavěšení MacPherson, kinematické schéma

2.4.2 Lichoběžníkové zavěšení

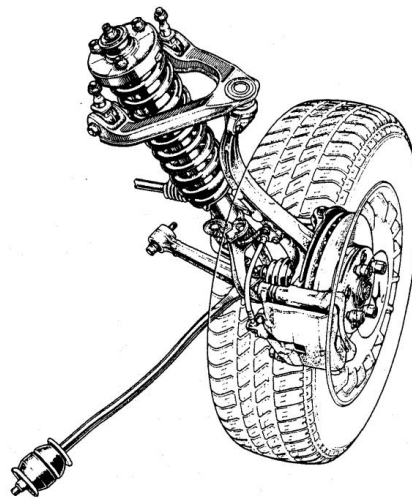
V automobilech, u kterých je kladen větší důraz na kvalitní jízdní vlastnosti, se obvykle nepoužívá zavěšení typu MacPherson, ale lichoběžníkové zavěšení. Součástí lichoběžníkového podvozku není na rozdíl od zavěšení typu MacPherson jen spodní, ale také horní rameno. Náprava se zavěšením typu lichoběžník je zobrazeno na obrázku 4. Na obrázku 5 je uvedeno kinematické schéma. Na obrázku 6 je uvedena varianta lichoběžníkového zavěšení, u kterého je pružina upevněna k dolnímu ramenu (důsledkem je mimo jiné oproti řešení na obrázku 4 menší výška zástavby mechanismu). [4] [5]



Obrázek 4 - Zavěšení typu lichoběžník, přední náprava Audi R8 [6]



Obrázek 5 - Zavěšení typu lichoběžník, kinematické schéma



Obrázek 6 - Zavěšení typu lichoběžník, přední kolo, Honda Prelude [5]

2.4.3 Další typy automobilového zavěšení

Mezi další typy způsobů zavěšení se řadí tzv. tuhá náprava, uvedena na obrázku 8. V dnešní době se používá v automobilovém průmyslu zejména u terénních a užitkových vozidel. Za zmínku stojí také zavěšení provedené torzní příčkou, kterou charakterizuje to, že kola jsou spojena nosníkem, který svojí torzní poddajností dovoluje pohyb obou kol nezávisle na sobě (viz obrázek 7). [4] [5]



Obrázek 7 - Zavěšení kol torzní příčkou, zadní náprava VW Golf [5]



Obrázek 8 - Zavěšení kol torzní tuhou nápravou s listovými pružinami [7]

2.5 Motocyklové zavěšení kol

V porovnání s automobilem, motocykly mají ke konstrukci jízdního kola mnohem blíže. Avšak i přes to nacházíme u motocyklů některé principiálně podobné řešení odpružení kol jako u automobilů.

2.5.1 Zavěšení předního kola motocyklu

Nejběžnější zavěšení předního kola je realizováno teleskopickou vidlicí, která má v sobě pružící i tlumící složku (viz obrázek 9). Nejenom že má toto zavěšení nosnou a pružící funkci, ale také funkci řízení motocyklu díky uložení vidlice v rámu ložiskem. Teleskopická vidlice se skládá ze dvou nosných trubek, po kterých kloužou na olejovém filmu kluzáky. Ve spodní části kluzných trubek se nachází úchyty osy předního kola. Uvnitř nosných trubek se nachází vinuté pružiny společně s tlumičem. Upravením tohoto typu vidlice vznikla také obrácená teleskopická vidlice. Invertní teleskopická vidlice má hlavní výhodu v úspoře neodpružené hmotnosti. Princip invertní vidlice je takový, že kluzáky jsou upevněny k říditkům a nosné trubky jsou připevněné k přednímu kolu. [2]



Obrázek 9 - Teleskopická vidlice motocyklu, invertovaná [8]

2.5.2 Zavěšení zadního kola motocyklu

Zadní kolo bývá upevněno v kyvném ramenu, které je přes čep upevněno k rámu motocyklu. Tlumení a pružení se v současné době upřednostňují v podobě jedné centrální konstrukční

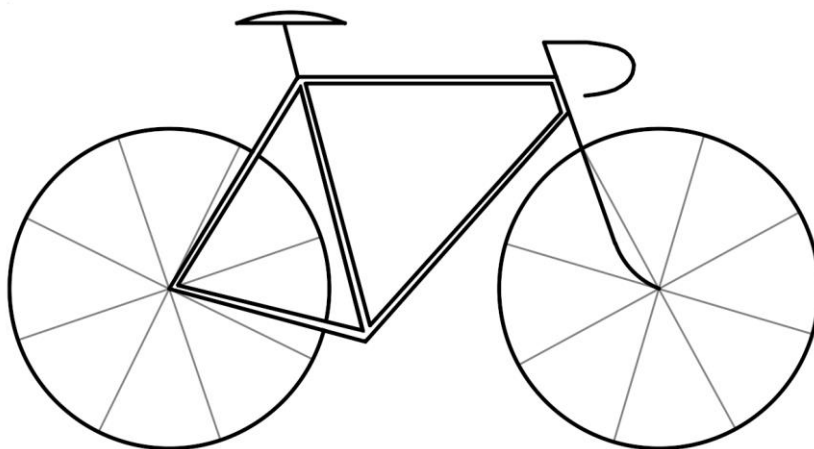
jednotky. Tyto jednotky mají na obou koncích oka se silentbloky. Těmito oky jsou běžně upevněny šroubem do záchyty rámu a do kyvné vidlice (obrázek 10). Přepákování pružiny a tlumiče umožňuje progresivitu tlumení a pérování, avšak nemá vliv na geometrii pohybu kola. [2]



Obrázek 10 - Zavěšení zadního kola motocyklu KTM [9]

2.6 Typy zavěšení horských kol

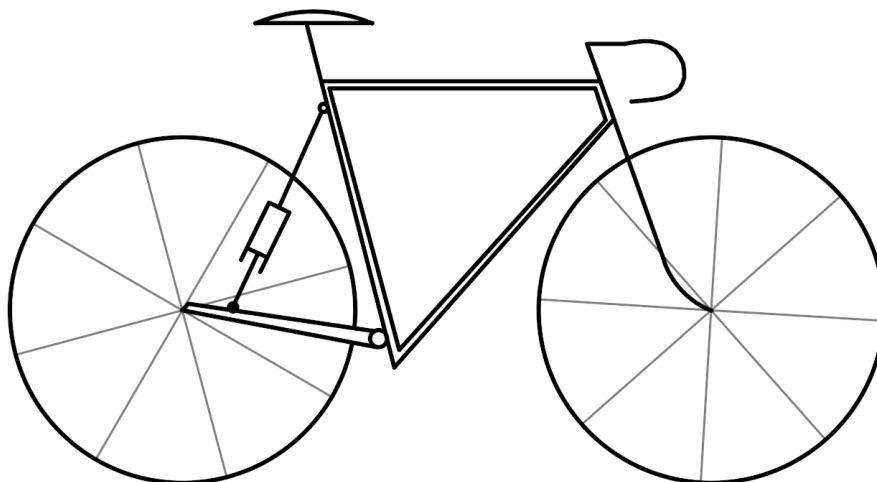
V této kapitole jsou rozděleny mechanismy zadního zavěšení horského kola na 3 typy. Na základě poznatků z předchozích odstavců můžeme poukázat na souvislost s automobily a motocykly. Nezávislé automobilové zavěšení (lichoběžník a MacPherson) lze brát jako inspiraci k tvorbě zavěšení jízdního kola. Je důležité zmínit, že jízdní kola nemusí, na rozdíl od výše zmíněných dopravních prostředků, mít žádné odpružené zavěšení kol (obrázek 11). Nezanedbatelnou část pružení poskytují jezdci jeho vlastní nohy a ruce, a také poddajnost pneumatik.



Obrázek 11 - Neodpružené jízdní kolo

2.6.1 Zavěšení s jedním kloubem

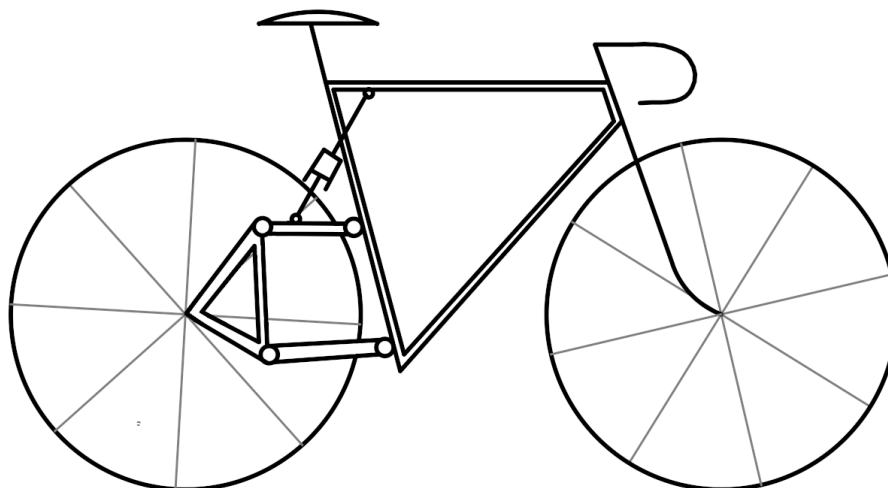
Jedná se o jednoduchý mechanismus zavěšení, u kterého se zadní kolo pohybuje po trajektorii odpovídající kružnici. Osa kola je uložena v kyvném rameni, které je čepem uchyceno v základním rámu (viz obrázek 12). Je to ekvivalent automobilového odpružení MacPherson, které se velmi hojně využívá na předních nápravách současných osobních automobilů. Odpružení tohoto typu také nachází uplatnění ve většině motocyklů (zavěšení zadního kola).



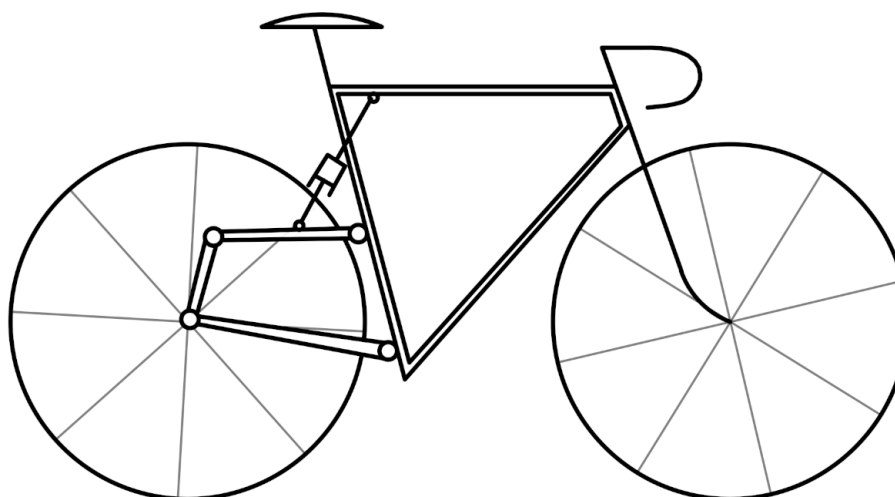
Obrázek 12 – Jízdní kolo se zavěšením zadního kola typu MacPherson

2.6.2 Čtyřkloubové zavěšení

Čtyřkloubové zavěšení umožňuje, oproti zavěšení s jedním kloubem, trajektorii osy kola při propružení jinou než kružnicovou. Osa kola je uložena v rameni, které je uchyceno v základním rámu přes další dvě kyvná ramena. Je to ekvivalent automobilového lichoběžníkovému zavěšení. Jízdní kolo s čtyřkloubovým zavěšením zadního kola je zobrazeno na obrázku 13 a 14.



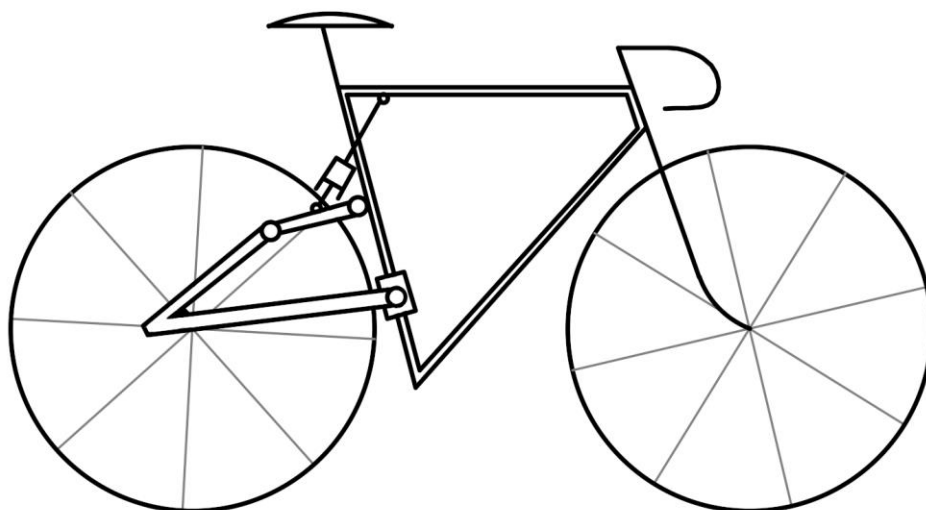
Obrázek 13- Jízdní kolo se zavěšením zadního kola čtyřkloubovým mechanismem



Obrázek 14- Jízdní kolo se zavěšením zadního kola čtyřkloubovým mechanismem v krajní konfiguraci

2.6.3 Speciální zavěšení

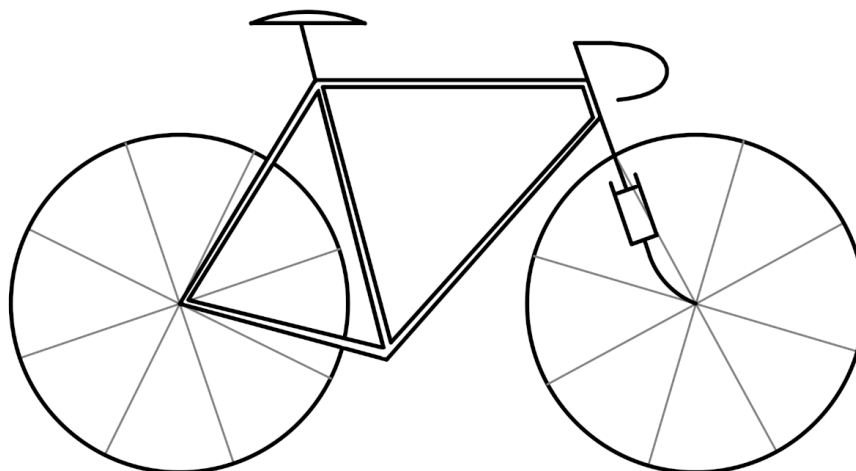
Ojediněle se na trhu horských kol vyskytují inovativní mechanismy odpružení. Jako příklad lze uvést značku Yeti (mechanismus s názvem Switch Infinity suspension system). Jejich model horského kola, zobrazený na obrázku 15, využívá v zavěšení nejenom kloubové vazby, jako je běžně u horských kol zvykem, ale i vazbu posuvnou. [10]



Obrázek 15 - Jízdní kolo s odpružením zadního kola - Switch Infinity suspension system

2.6.4 Zavěšení předního kola

K zavěšení předního kola se na celoodpružených horských kolech i horských kolech typu hardtail¹ převážně uplatňuje neinvertovaná teleskopická vidlice (viz obrázek 16). Principiálně se jedná o totožný mechanismus jako mechanismus popsany v podkapitole číslo 2.5.1, pojednávající o zavěšení kol motocyklů, s tím rozdílem, že u jízdních kol je v jedné noze tlumič a v druhé pružení. Výjimku představuje výrobce Cannondale, který na některá svá kola montuje teleskopické vidlice pouze s jednou nohou (Cannondale Lefty)



Obrázek 16 - Jízdní kolo typu hardtail s přední teleskopickou vidlicí

¹ Hardtail je horské kolo s neodpruženým zadním kolem

3 Vlastnosti a rozdělení horských kol

Horské kola jsou podmnožinou jízdnicích kol. Jak z názvu vyplívá, horská kola jsou původně konstruována na provoz v horském prostředí. Toto určení horských kol je podmíněno schopností průchodnosti terénem a zvýšenou odolností konstrukce. S horskými koly se pojí určité specifické termíny, v této kapitole jsou některé z nich vysvětleny.

3.1 Rozdělení typů a specifikací horských kol

Horská cyklistika se dělí na více podtypů, u každého z nich se kladou jiné požadavky na parametry konstrukce. První zásadní rozdělení se provádí na základě toho, zda je zadní kolo odpružené nebo ne. Horská kola se podle toho rozdělují na celoodpružená a tzv. kola typu hardtail, která mají zadní kolo neodpružené. Oba typy horských kol mají zpravidla téměř vždy přední kolo odpružené teleskopickou vidlicí. Podle typu cyklistiky, na které je horské kolo určeno, rozlišujeme pět základních kategorií horských kol: [11]

- a) Cross-country
 - Důraz na nízké jízdnicí odpory
 - Zdvih předního odpružení do 120 mm
 - zadní kolo neodpružené
- b) Trail
 - Univerzální horské kolo (jízda z kopce i do kopce)
 - Zadní kolo může být odpružené nebo neodpružené
 - Zdvih odpružení od 120 do 150 mm
- c) Enduro
 - Vychází z požadavků enduro závodů (těžký terén, převážně na jízdu z kopce)
 - Zdvih odpružení 150 mm a více, přední i zadní kolo
- d) Downhill
 - Kolo určené pro nejnáročnější sjezdy
 - Zdvih odpružení kolem 200 mm, přední i zadní kolo
- e) Fatbike
 - Jízdnicí kolo určené primárně na sníh, písek a bláto
 - Oproti ostatním horským kolům širší pneumatiky, přibližně 100 až 130 mm
 - Zavěšení kol může být odpruženo, ale často není

Rozdělení horských kol lze provést na základě pořizovací ceny nebo podle materiálu, z kterého je rám kolo vyroben. V dnešní době jsou rámy horských kol vyráběny nejčastěji ze slitin hliníku nebo z uhlíkových vláken. Další, avšak méně časté materiály, jsou ocel a titan. [12]

3.1.1 Rozdělení jízdních kol podle normy ASTM F2043-13

Norma ASTM F2043-13 rozděluje všechny typy jízdních kol celkově do 5 kategorií, označených číslicemi 1 až 5: [13]

1. Jízdní kola určená výhradně pro provoz na zpevněných cestách a silnicích, na kterých jsou v trvalém kontaktu se zemí.
2. Kola určené pro provoz mimo zpevněné cesty s mírným stoupáním. Pripouští se přechodná ztráta kontaktu pneumatiky se zemí. Seskoky maximálně z výšky 15 cm.
3. Kola určená pro těžké nezpevněné trasy a nerovný terén se seskoky z maximální výšky 61 cm.
4. Jízdní kola určená pro sjezdy v nerovném terénu až do rychlosti 40 km/h. Seskoky jsou dovoleny z výšky maximálně 122 cm.
5. Kola pro extrémní skoky a sjezdy při rychlosti nad 40 km/h.

Kolo, splňující určitou kategorii, automaticky splňuje podmínky všech nižších kategorií.

3.2 Speciální aspekty chování odpružení horského kola

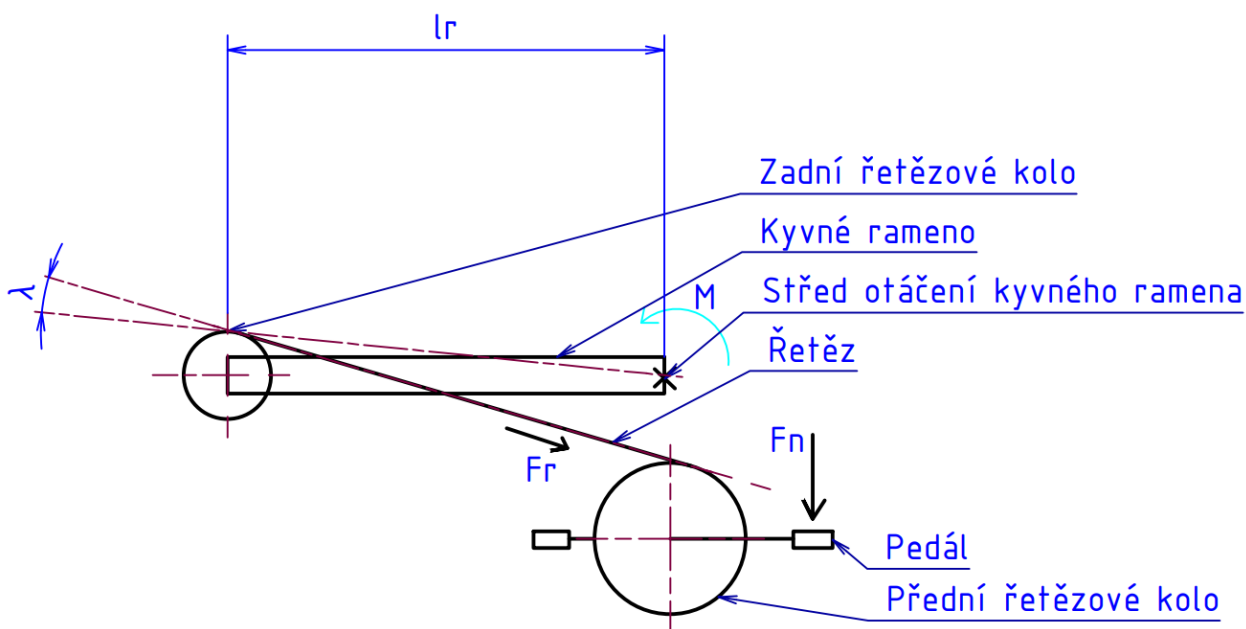
S celoodpruženými horskými koly se pojí určité pojmy, které popisují jeho jízdní vlastnosti. Jedná se o termíny anti squat a pedal kickback.

3.2.1 Anti squat

Antisquat je aspekt odpružení, který představuje k jak velkému propužení zadního zavěšení kola dojde při akceleraci. Tato vlastnost je dána vzájemnou pozicí řetězu a okamžitým středem otáčení mechanismu zavěšení zadního kola. Tento údaj se uvádí v procentech. Antisquat s hodnotou 100 % znamená, že akcelerace nezpůsobí žádné propužení (to znamená, že síla v řetězu přesně vyváží moment v zavěšení, který je způsobený přenosem hmotnosti kola na zadní kolo v důsledku akcelerace). Pokud je antisquat menší než 100 %, dojde při akceleraci k propužení. Pokud je hodnota více než 100 %, dojde při akceleraci k zdvihnutí zadního propužení. [14]

Schéma tohoto jevu je zobrazeno na obrázku 17. Ve vyobrazeném případě je v důsledku zvolené geometrie hodnota antisquat $> 100\%$ (rozhodující pro hodnotu antisquat je úhel λ). Jezdec působí svým chodidlem na pedál silou F_n , tím vyvodí v řetězu sílu F_r , která vyvozuje vzhledem ke středu otáčení kyvného ramene moment M . Síla F_r působí na rameno pod úhlem λ , ve vzdálenosti l_r od středu otáčení kyvného ramene. Výsledný moment M se vypočte na základě uvedeného schématu takto:

$$M = F_r \cdot l_r \cdot \sin(\lambda) \quad (3)$$



Obrázek 17 - Schéma znázorňující silové působení v zavěšení horského kola, realizovaného kyvným ramenem (princip MacPherson)

3.2.2 Pedal kickback

Při propružení zpravidla dochází ke změně délky tažné větve řetězu mezi předním a zadním řetězovým kolem. Tento jev se může projevit rázem v pedálech. Podrobněji je toto téma rozepsáno v podkapitole 4.3.

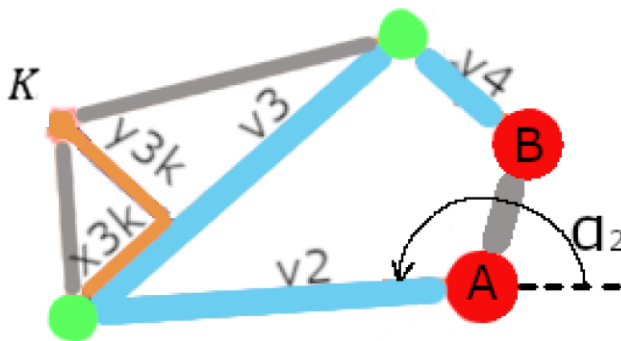
4 Parametrizace mechanismu zavěšení horského kola

V této kapitole je řešen návrh parametrů, které v rovině jednoznačně popíší mechanismus odpružení horského kola. Z analýzy typických mechanismů zavěšení kol bylo zjištěno, že kinematické chování lze popsat jedním geometrickým modelem (platí pro zavěšení typu MacPherson a lichoběžník), který je blíže popsán v následující podkapitole.

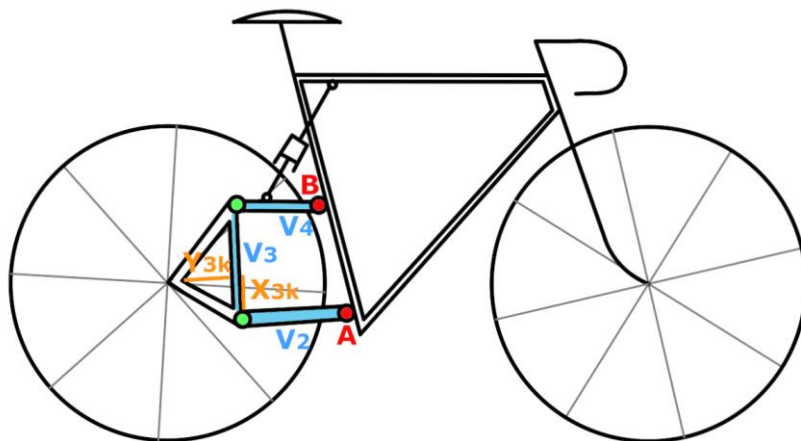
4.1 Geometrie mechanismu

Začátek dvourozměrného souřadného systému kartézských souřadnic byl zvolen v ose středového uložení horského bicyklu. Upevnění mechanismu odpružení zadního kola do rámu bicyklu je realizováno v bodě $A [A_x; A_y]$ a $B [B_x; B_y]$. Další parametry jsou délky 3 ramen (v_2, v_3, v_4). Určení výchozí polohy mechanismu zajišťuje parametr úhlu natočení ramene v_2 , upevněného v rámu bicyklu v bodě A (α_2). Úhel je uvažován ke kladné části osy x souřadnicového systému.

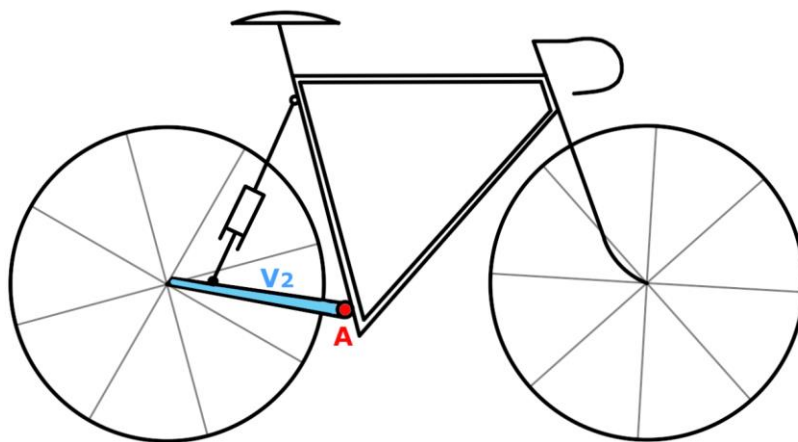
Pozice osy zadního kola $K [x_{3k}, y_{3k}]$ je určena lokálním souřadnicovým systémem s počátkem v kloubu mezi rameny mechanismu v_2 a v_3 . Lokální osa x splývá s ramenem v_3 . Parametry jsou graficky znázorněny na obrázku 18. Na obrázcích 19, 20 a 21 se vyskytuje parametrizace schémat uvedených v kapitole 2.6. Na obrázku 20 je znázorněna parametrizace typu zavěšení MacPherson v klasické podobě. Na obrázku 21 je předvedena parametrizace zavěšení MacPherson jako speciální případ čtyřkloubového zavěšení ($x_{3k} = y_{3k} = 0$). U typu zavěšení typu MacPherson jsou potřebné pouze parametry: $A [A_x; A_y]$, v_2 , α_2 .



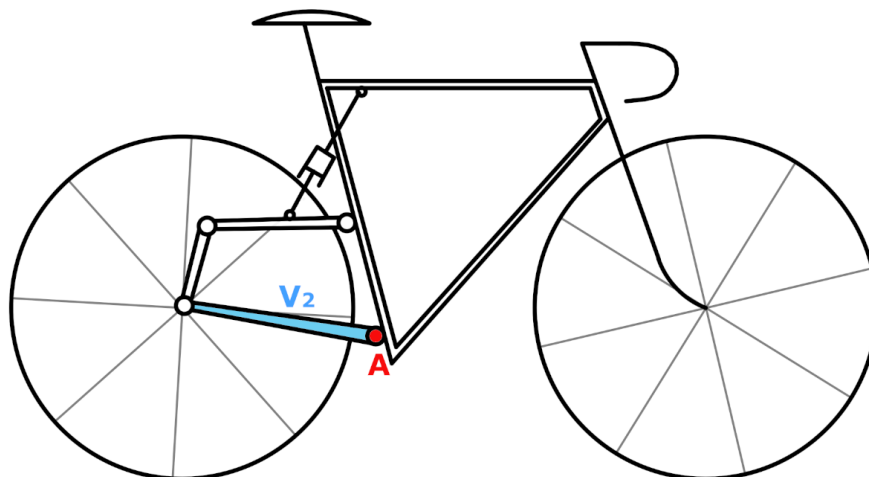
Obrázek 18 - Grafický přehled parametrů



Obrázek 19 - Zobrazení parametrů horského kola s čtyřkloubovým mechanismem



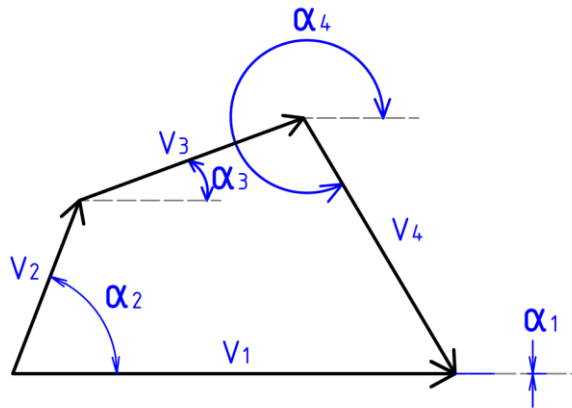
Obrázek 20 - Zobrazení parametrů horského kola s jednokloubovým mechanismem



Obrázek 21 - Zobrazení parametrů horského kola s čtyřkloubovým mechanismem v krajní konfiguraci

4.2 Výpočet závislých souřadnic mechanismu

Mechanismus zavěšení zadního kola má jeden stupeň volnosti. Jedná se o čtyřkloubový mechanismus. Pro následnou práci s parametrickým modelem je pro jeho jednoznačné určení nutno dopočítat závislé proměnné. Jelikož se v čtyřkloubovém mechanismu zavěšení zadního kola objevují jen rotační vazby a rám bicyklu uvažujeme jako pevný, jsou délky ramen vždy neměnné. Závislé proměnné jsou úhly α_3 a α_4 . Nezávislou souřadnicí byla určena souřadnice α_2 . Délky ramen mechanismu v_2, v_3 a v_4 jsou konstantní.



Obrázek 22 - Schéma vektorů reprezentující mechanismus zavěšení horského kola

Do výpočetního programu byla zvolena metoda výpočtu vektorovou metodou. [15] Začátek výpočtu spočívá ve vytvoření uzavřené vektorové smyčky (obrázek 22). Na základě zvolené smyčky a zvolené orientace vektorů je možno psát rovnici:

$$\vec{v}_1 = \vec{v}_2 + \vec{v}_3 + \vec{v}_4 \quad (4)$$

Rozpisem složek vektorů do směru x a y získáme soustavu 2 rovnic o 2 neznámých (α_3, α_4):

$$\begin{cases} x: & v_1 \cos\alpha_1 = v_2 \cos\alpha_2 + v_3 \cos\alpha_3 + v_4 \cos\alpha_4 \\ y: & v_1 \sin\alpha_1 = v_2 \sin\alpha_2 + v_3 \sin\alpha_3 + v_4 \sin\alpha_4 \end{cases} \quad (5)$$

Za úhel α_1 můžeme dosadit: $\alpha_1 = 0$, v dalším kroku obě rovnice umocníme na druhou a sečteme:

$$\begin{cases} v_1 - v_2 \cos\alpha_2 - v_4 \cos\alpha_4 = v_3 \cos\alpha_3 \\ v_2 \sin\alpha_2 - v_4 \sin\alpha_4 = v_3 \sin\alpha_3 \end{cases} \quad (6)$$

$$v_1^2 + v_2^2 + v_4^2 - 2v_1v_2\cos\alpha_2 - 2v_1v_4\cos\alpha_4 + 2v_2v_4(\cos\alpha_2\cos\alpha_4 + \sin\alpha_2\sin\alpha_4) = v_3^2 \quad \left| \cdot \frac{1}{2v_2v_4} \right. \quad (7)$$

$$\frac{v_1^2 + v_2^2 - v_3^2 + v_4^2}{2v_2v_4} - \frac{v_1}{v_4}\cos\alpha_2 - \frac{v_1}{v_2}\cos\alpha_4 + (\cos\alpha_2\cos\alpha_4 + \sin\alpha_2\sin\alpha_4) = 0 \quad (8)$$

K zjednodušení výrazu zavedeme substituci:

$$\left\{ \begin{array}{l} k_1 = \frac{v_1}{v_2} \\ k_2 = \frac{v_1}{v_4} \\ k_3 = \frac{v_1^2 + v_2^2 - v_3^2 + v_4^2}{2v_2v_4} \end{array} \right. \quad (9)$$

$$k_3 - k_2\cos\alpha_2 - k_1\cos\alpha_4 + (\cos\alpha_2\cos\alpha_4 + \sin\alpha_2\sin\alpha_4) = 0 \quad (10)$$

Po využití goniometrického vzorce pro poloviční úhel získáme:

$$k_3 - k_2\cos\alpha_2 - k_1 \frac{1 - \operatorname{tg}^2\left(\frac{\alpha_4}{2}\right)}{1 + \operatorname{tg}^2\left(\frac{\alpha_4}{2}\right)} + \cos\alpha_2 \frac{1 - \operatorname{tg}^2\left(\frac{\alpha_4}{2}\right)}{1 + \operatorname{tg}^2\left(\frac{\alpha_4}{2}\right)} + \sin\alpha_2 \frac{2\operatorname{tg}\left(\frac{\alpha_4}{2}\right)}{1 + \operatorname{tg}^2\left(\frac{\alpha_4}{2}\right)} = 0 \quad \left| \cdot \left(1 + \operatorname{tg}^2\left(\frac{\alpha_4}{2}\right)\right) \right. \quad (11)$$

Vytkneme členy s tg, a seřadíme podle mocnin:

$$(k_3 - k_2\cos\alpha_2 - k_1 - \cos\alpha_2) \cdot \operatorname{tg}^2\left(\frac{\alpha_4}{2}\right) + (2\sin\alpha_2) \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha_4}{2}\right) + (k_3 - k_2\cos\alpha_2 - k_1 + \cos\alpha_2) = 0 \quad (12)$$

Ted' řešíme kvadratickou rovnici. Pro zjednodušení zavedeme substituci koeficientů kvadratické rovnice:

$$\begin{cases} A = k_3 - k_2 \cos \alpha_2 - k_1 - \cos \alpha_2 \\ B = 2 \sin \alpha_2 \\ C = k_3 - k_2 \cos \alpha_2 - k_1 + \cos \alpha_2 \end{cases} \quad (13)$$

$$A \cdot \operatorname{tg}^2 \left(\frac{\alpha_4}{2} \right) + B \cdot \operatorname{tg} \left(\frac{\alpha_4}{2} \right) + C = 0 \quad (14)$$

Vyřešíme kvadratickou rovnici pomocí determinantu a dostaneme vztah pro úhel α_4 :

$$\alpha_4 = 2 \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \right) [\operatorname{rad}] \quad (15)$$

Úhel α_3 se vypočte obdobně:

$$\alpha_3 = 2 \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{-E \pm \sqrt{E^2 - 4DF}}{2D} \right) [\operatorname{rad}] \quad (16)$$

Kde koeficienty D , E , F jsou:

$$\begin{cases} D = k_1 - k_4 \cos \alpha_2 - k_5 - \cos \alpha_2 \\ E = 2 \sin \alpha_2 \\ F = -k_1 - k_4 \cos \alpha_2 + k_5 + \cos \alpha_2 \end{cases} \quad (17)$$

Koeficienty k_4 a k_5 :

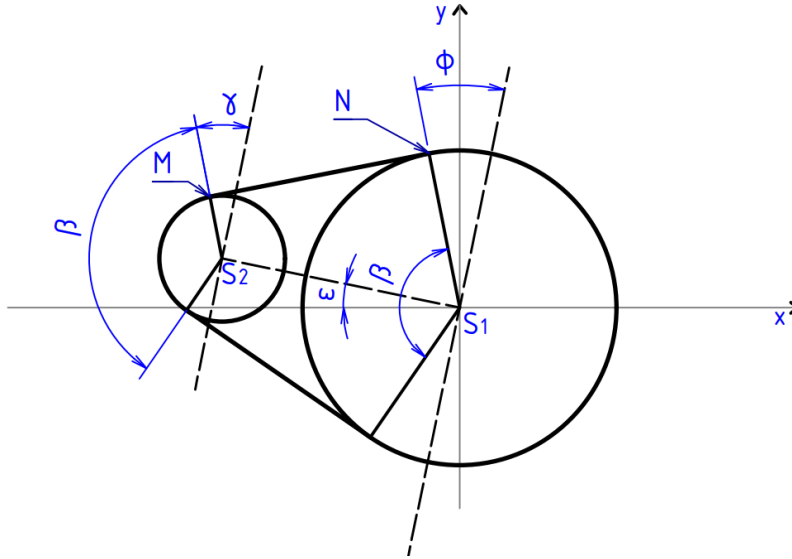
$$\begin{cases} k_4 = \frac{v_1}{v_3} \\ k_5 = \frac{v_1^2 + v_2^2 + v_3^2 - v_4^2}{2v_2v_3} \end{cases} \quad (18)$$

V momentě, kdy jsou vyčísleny neznámé závislé souřadnice α_3 a α_4 , máme všechny potřebné parametry pro další práci s modelem zavěšení.

4.3 Výpočet změny délky řetězu

Změna délky tažné větve řetězu, zapříčiněného propružením zadního kola, může mít negativní dopad na jízdní komfort. Tento jev se při jízdě po nerovnostech projevuje rázem, který jezdec pociťuje v pedálech. Pro výpočet hodnoty, o kolik se při plném propružení změní délka řetězu mezi předním a zadním řetězovým kolem, potřebujeme znát roztečný průměr (d_1 , d_2) a pozici obou řetězových kol (S_1 , S_2). Pozice zadního řetězového kola (běžně označovaného jako kazeta) je shodná s pozicí zadního kola. Přední řetězové kolo (převodník) má shodnou pozici se středovým uložením. Pro vytvořený parametrický model to znamená, že zadní řetězové kolo má střed

na souřadnici $S_2 = K [x_{3k}, y_{3k}]$ a přední řetězové kolo se nachází v počátku souřadnicového systému $S_1 = [0, 0]$. Schéma veličin je zobrazeno na obrázku 23.



Obrázek 23- Schéma řetězového převodu

Postup výpočtu začíná vzorcem pro úhel opásání řetězového kola [16]:

$$\beta = 2 \cos^{-1} \left(\frac{d_1 - d_2}{2 A_0} \right) \text{ [rad]} \quad (19)$$

kde „ A_0 “ představuje vzájemnou osovou vzdálenost řetězových kol.

Úhel, který svírá spojnice os s osou x (ε):

$$\varepsilon = \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{K_x}{K_y} \right) \text{ [rad]} \quad (20)$$

Úhel γ , který jsou potřeba pro další výpočty:

$$\gamma = \varphi = \frac{\pi - \beta}{2} \text{ [rad]} \quad (21)$$

Souřadnice bodů N a M:

$$N = [N_x; N_y] = \left[\frac{d_1}{2} \cos \left(\varphi + \frac{\pi}{2} - \varepsilon \right); \frac{d_1}{2} \sin \left(\varphi + \frac{\pi}{2} - \varepsilon \right) \right] \text{ [mm]} \quad (22)$$

$$M = [M_x; M_y] = \left[\frac{d_2}{2} \cos \left(\gamma + \frac{\pi}{2} - \varepsilon \right); \frac{d_2}{2} \sin \left(\gamma + \frac{\pi}{2} - \varepsilon \right) \right] \text{ [mm]} \quad (23)$$

Délka tažné části řetězu se potom vypočte:

$$l = |NM| = \sqrt{(M_x - N_x)^2 + (M_y - N_y)^2} \text{ [mm]} \quad (24)$$

4.4 Parametrizace konkrétního horského kola

K ukázce bylo náhodně vybráno celoodpružené horské kolo Canyon Spectral 29“ (obrázek 24). V době vzniku této bakalářské práce se jedná o prodávané horské kolo vyšší cenové kategorie. Výrobce ho zařazuje do kategorie horských kol trail. Podle normy ASTM F2043-13 patří jízdní kolo do kategorie 4. [12]



Obrázek 24 - Celoodpružené horské kolo Canyon Spectral 29" [12]

Parametry horského kola Canyon Spectral:

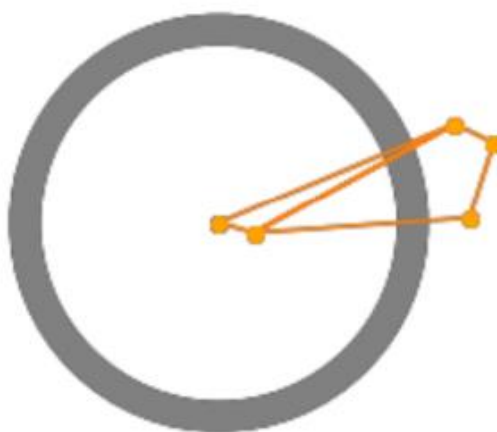
Tabulka 1 - Parametry horského kola Canyon Spectral 29"

Původ informace	Vysvětlení parametru	Parametr	Hodnota	Jednotka
Měřeno	Bod A – upevnění v rámu	A_x	0	mm
		A_y	60	mm
	Bod B – upevnění v rámu	B_x	43	mm
		B_y	193	mm
	Délky ramen mechanismu	v_2	379	mm
		v_3	402	mm
		v_4	76	mm
	Relativní pozice kola	x_{3k}	-45	mm
		y_{3k}	45	mm
		Úhel ramena v_2	α_2	1,64
Údaj výrobce	Zdvih odpružení	zdvih	150	mm

Měření výrobcem neuváděných parametrů proběhlo virtuálně, na základě dostupné fotografie horského kola Canyon, pomocí obrazového měřicího softwaru dostupného na internetu. [17] Parametrický model mechanismu zavěšení horského kola Canyon Spectral je zobrazen na obrázku 26. Na obrázku 25 je pro názornost zobrazen parametrický model v zákrytu s fotografií kola Canyon Spectral.



Obrázek 26 – Zobrazení parametrizace mechanismu a fotografie kola Canyon Spectral



Obrázek 25 – Rovinný parametrický model závěsu zadního kola horského kola Canyon Spectral

5 Stanovení trajektorie osy zadního kola

Výpočet je realizován ve skriptovacím jazyce Python, použito bylo uživatelské rozhraní Spyder. Ve vzniklém skriptu je možný výpočet trajektorie osy zadního kola (kód programu je obsahem přílohy 1). Algoritmus je navrhnut zároveň pro jednokloubový a čtyřkloubový typ zavěšení horského kola. Tato univerzálnost je dosažitelná díky tomu, že typ zavěšení MacPherson je parametricky určen jako speciální případ lichoběžníkového zavěšení (hodnoty parametrů x_{3k}, y_{3k} jsou rovné nule). Toto zjednodušení neklade žádný odpor kinematické povaze zadané úlohy (dynamické chování mechanismu není náplní této práce). Parametrizace se týká mechanismu zavěšení zadního kola. Výpočet trajektorie zavěšení předního kola není ve skriptu realizován – trajektorie odpružení prostřednictvím teleskopické vidlice je přímková. Díky vhodně zvolenému souřadnicovému systému s počátkem v ose středového uložení² horského kola, nemusíme zohledňovat při výpočtech velikost a specifikace základního rámu.

Omezení pohybu mechanismu zavěšení zadního kola probíhá pomocí parametru zdvihu odpružení. Tento zdvih je uvažován jako rozdíl souřadnice y osy kola v nepropruženém a plně propruženém stavu. Algoritmus na základě vložených parametrů vypočítává trajektorii osy zadního kola ve tvaru kvadratického polynomu $x = ay^2 + by + c$. Tento polynom je generován funkcí „polyfit“³, která je dostupná v knihovně NumPy. Vstupem funkce „polyfit“ je v tomto případě 20 rovnoměrně rozložených pozic osy kola $K [x_{3k}, y_{3k}]$, během jeho pohybu při plném propružení mechanismu. Pohyb je omezen v dolní pozici výchozí pozicí mechanismu a v horní pozici je omezen maximálním zdvihem parametrického modelu odpružení (parametr „Zdvih“). [18]

Na základě nezávislé souřadnice mechanismu α_2 a vstupních parametrů mechanismu se v každé z 20 pozic dopočítají neznámé parametry (α_3, α_4) . Tyto hodnoty jsou nezbytné pro výpočet souřadnic osy kola. K výpočtu pozice osy kola v globálním souřadnicovém systému $K [k_x, k_y]$ jsou využity složkové rovnice do směru x a y :

² Středové uložení je běžně označováno jako místo, kde je kliková hřídel (středová osa) jízdního kola uložena do rámu jízdního kola.

³ Výstupem funkce je proměnná typu array koeficientů polynomu, seřazených od nejvyššího stupně po nejnižší. Povinné parametry funkce polyfit jsou: souřadnice x typu array, souřadnice y typu array, stupeň polynomu typu int. [18]

$$k_x = A_x + v_2 \cos(\alpha_1 + \alpha_2) + x_{k3} \cos(\alpha_1 + \alpha_3) + y_{k3} \cos(\alpha_1 + \alpha_3) \quad (25)$$

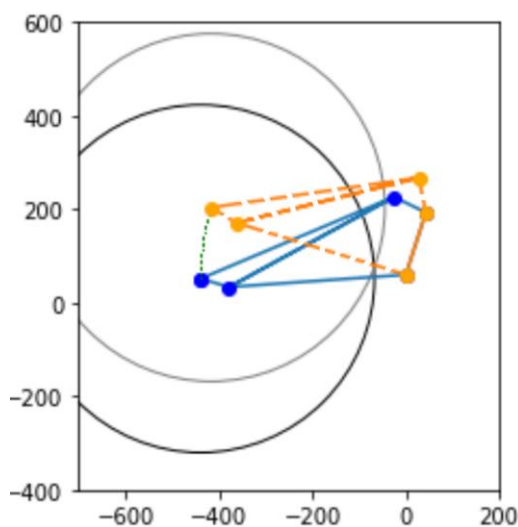
$$k_y = A_y + v_2 \sin(\alpha_1 + \alpha_2) + x_{k3} \sin(\alpha_1 + \alpha_3) + y_{k3} \sin(\alpha_1 + \alpha_3) \quad (26)$$

(úhel α_1 je úhel natočení ramene v_1 , který se v programu vypočte z hodnot souřadnic bodů A a B)

Vytvořený program generuje schéma (obrázek 27), ve kterém je mimo vnějšího obrysu zadní pneumatiky zobrazeno:

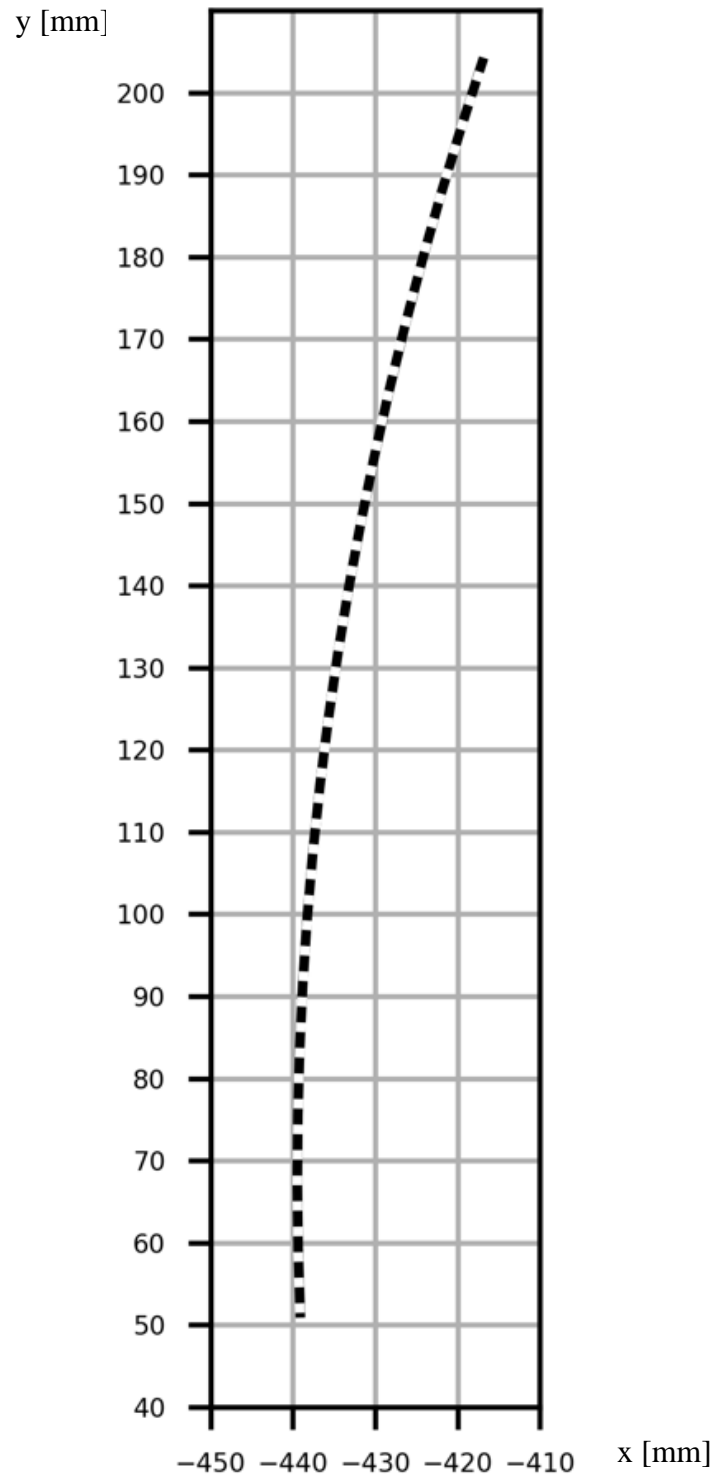
- Geometrie mechanismu ve výchozí nezatížené pozici – modře, plnou čarou
- Geometrie mechanismu v koncové pozici při maximálním propružení – oranžově, přerušovanou čarou
- Trajektorie pohybu osy zadního kola v celém rozsahu propružení – zeleně, tečkovanou čarou

Průběh aproximační funkce „polyfit“ velmi přesně odpovídá reálné trajektorii osy zadního kola. Použití funkce „polyfit“ druhého řádu je k účelu specifikace parametrického modelu vhodná a dostatečně přesná.



Obrázek 27 - Schéma mechanismu kola Spectral při propružení

Dalším grafickým výstupem programu je detailnější graf trajektorie osy zadního kola, který je zobrazen na obrázku 28.



Obrázek 28 - Trajektorie zadního kola, horské kolo Canyon Spectral

6 Návrh parametrů mechanismu

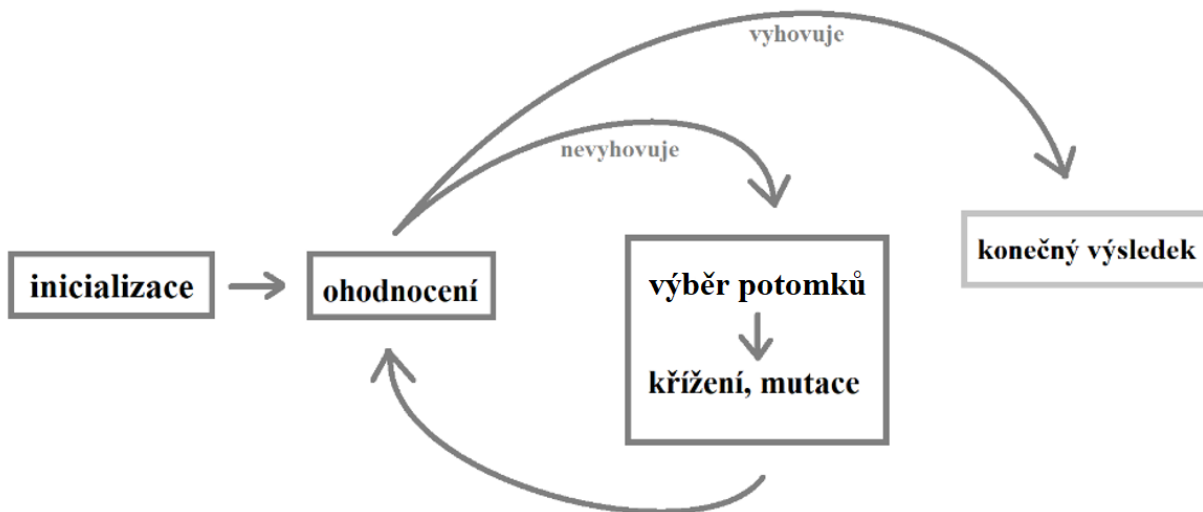
Poslední část práce spočívá v návržení parametrů zavěšení kola na základě požadované trajektorie osy zadního kola. Výchozím vstupem tohoto úkolu je polynom ve tvaru $x = ay^2 + by + c$. Dále je potřeba stanovit hodnotu zdvihu odpružení, 2 souřadnice ve směru y k umístění trajektorie do požadované výšky (K_{yMin}, K_{yMax}) a limitní polohy pozice uložení mechanismu do rámu kola ($A_{xMin}, A_{yMin}, B_{xMin}, B_{yMin}, A_{xMax}, A_{yMax}, B_{xMax}, B_{yMax}$). K řešení úkolu byl zvolen genetický algoritmus. Vstupní hodnoty se nastavují v úvodní části kódu, který je obsahem přílohy 2.

6.1 Genetický algoritmus obecně

Genetický algoritmus je evoluční algoritmus, který se používá k řešení složitých optimalizačních problémů, které mají velké množství řešení. Využívá k tomu výpočetní výkon počítače, který vyniká v možnosti provedení obrovského počtu operací v krátkém čase. Genetický algoritmus přímo vychází z přírodního principu evoluce, u kterého na základě zákona přírodního výběru platí, že přežijí jen ti nejsilnější. Existuje mnoho způsobů, jak genetický algoritmus implementovat. Obecně se genetický algoritmus skládá z následujících prvků:

- Inicializace
 - Vytvoření první generace – náhodně
- Ohodnocení
 - Posouzení vhodnosti potomků v dané generaci na základě zhodnocovací funkce
- Výběr potomků – (selekce)
 - Stanovení potomků, kteří budou základem nové generace
- Křížení
 - Kombinování genů potomků v jedné generaci
- Mutace
 - Náhodná změna genů potomka

Tyto výše uvedené prvky algoritmu jsou cyklicky prováděny v pořadí, které je znázorněno schématem na obrázku 29.



Obrázek 29 - Základní schéma fungování genetického algoritmu

Výhodou genetického algoritmu je jeho univerzálnost. Ideálně by mělo dojít ke konvergování k ustáleným hodnotám. U genetického algoritmu se rozlišují 2 typy konvergence. Genová konvergence a konvergence k optimu. Optimum může být buď lokální nebo globální. Genová konvergence nastane tehdy, když dojde z důvodu nedostatečné diverzity k předčasné konvergenci k hodnotám, které nejsou optimální. Je důležité zmínit to, že genetický algoritmus není schopen vytvořit přesné řešení, pouze se k němu dostatečně přiblížit. Podle toho, jak velkou odchylku jsme ochotni tolerovat, nastavíme podmínku pro ukončení cyklu genetického algoritmu. [19]

6.1.1 Metody selekce

Výběr neboli selekce potomků hraje ve fungování genetického algoritmu klíčovou roli. Mezi nejpoužívanější metody selekce patří: [19]

- a) Výběr na principu rulety
 - Potomkům se na ruletě přiřadí políčko o velikosti, které proporciálně odpovídá hodnotě jeho vhodnosti. Výběr se provede podle toho, na jakém políčku se kulička zastaví.
- b) Výběr na základě pořadí
 - Potomci jsou seřazeni podle hodnoty vhodnosti a jsou vybíráni podle hodnoty na tomto žebříčku. To znamená, že nezáleží, jak moc se liší vhodnosti jednotlivých potomků – bere se v potaz pouze jejich pořadí.

c) Soutěžní výběr

- Tato metoda má nižší časovou složitost, protože se hodnota ohodnocení vypočítává jen pro některé potomky. (U předchozích dvou metod se hodnota vhodnosti vypočítává pro všechny potomky.) Další úspora časové náročnosti spočívá v tom, že potomci zde nejsou celkově seřazováni. V metodě soutěžního výběru, dojde k náhodnému výběru 2 potomků z celé generace. Potom se vyčíslí jejich vhodnost a dojde s určitou pravděpodobností k výběru jednoho z nich (větší pravděpodobnost výběru připadá na zvolení lepšího jedince – konkrétní hodnota pravděpodobnosti je na autorovi)

6.1.2 Metody křížení a mutace

Po selekci následuje křížení a mutace. Tyto operace zvyšují diverzitu populace. Křížení lze provést několika způsoby. Selekcí jsme vybrali z populace potomky (jedince), kteří v této fázi můžeme nazvat jako rodiče. Všichni jedinci jsou složeny z genů. Předmětem křížení je nakombinování genů rodičů, což má za důsledek vznik nového jedince. Níže jsou uvedeny 3 základní mechanismy křížení. Ke každému z nich je uveden příklad rodiny, ze kterého je princip všech 3 typů křížení pochopitelný:

a) Křížení rozdělením genů v jednom bodě: předěl označen svislou čarou

- Rodič 1 = [111 | 1111111]
- Rodič 2 = [000 | 0000000]
- Dítě 1 = [111 | 0000000]
- Dítě 2 = [000 | 1111111]

b) Křížení rozdělením genů ve více bodech: předěly označeny svislou čarou

- Rodič 1 = [11111 | 11 | 111]
- Rodič 2 = [00000 | 00 | 000]
- Dítě 1 = [11111 | 00 | 111]
- Dítě 2 = [00000 | 11 | 000]

c) Křížení náhodných genů na základě náhodně generovaného operátoru

- Rodič 1 = [1111111111]
- Rodič 2 = [0000000000]
- Operátor = [0001100101]
- Dítě 1 = [1110011010]
- Dítě 2 = [0001100101]

Mutace je dalším krokem. Ideální je proces křížení a mutace kombinovat a najít optimální parametry obou procesů, aby dohromady zajišťovaly tvorbu nové generace. Mutace náhodně změní některé geny potomků, viz příklad, kde byl změněn 3. a 10. gen:

Potomek před mutací = [1110011010]

Potomek po mutaci = [1100011011]

Konkrétní hodnoty genetického algoritmu (např. velikost generace, pravděpodobnosti křížení a mutací atd.) jsou na volbě autora algoritmu. Existují určitá doporučení, avšak konkrétní nastavení parametrů algoritmu se vždy musí odladit pro jeho konkrétní aplikaci.

6.2 Návrh genetického algoritmu

V této podkapitole popisují fungování genetického algoritmu, který slouží k navržení parametrů mechanismu odpružení horského kola.

Vstupními parametry jsou: zdvih trajektorie, polynom trajektorie, horní a dolní mez trajektorie v rámci souřadnice y, poloměry řetězových kol a 8 hodnot pro omezení pozice upevnění mechanismu do základního rámu.

První generace parametrů se inicializuje náhodnou hodnotou, která je pro každý parametr zvlášť omezená v určitém rozmezí. Generace má určitý počet potomků, v tomto případě bylo nakonec zvoleno 60 potomků. Každý potomek představuje souhrn parametrů, které představují možné řešení optimalizačního úkolu.

Důležitou roli v algoritmu hraje ohodnocovací funkce (fitness funkce), která posuzuje vhodnost potomka k řešení problému. Vhodnost potomka je nepřímo úměrně číselně

kvantifikována součtem odchylek⁴ parametrů od požadovaných hodnot pomocí algoritmu (příloha 2, řádek 223 až 231), který zohledňuje:

- a) Jak moc se trajektorie posuzovaného mechanismu odlišuje od požadované trajektorie.
- b) O kolik se změní vzdálenost řetězu mezi řetězovými koly při plném propružení.
- c) Pozici trajektorie v rámci jejího ohraničení.

Po ohodnocení všech potomků v dané generaci se potomci seřadí podle hodnoty vhodnosti. Pokud nesplní nejlepší potomek generace požadavek na nejnižší přípustnou hodnotu vhodnosti, stanou se dva vybraní potomci rodiči nové generace. (Metoda výběru na základě pořadí, kapitola 6.1.1. bod b). Nová generace potomků se zrodí následovně:

- a) Náhodně se zkombinují parametry obou rodičů, prioritně jsou brány parametry lepšího rodiče, s pravděpodobností 63 %. (Křížení náhodných genů na základě náhodně generovaného operátoru, uvedeno v kapitole 6.1.2, bod c).
- b) Parametry potomka se zmutují náhodně v rozmezí -2,5 % až +2,5 % (každý parametr zvlášť).

Pokud nejlepší potomek generace splní podmínku na minimální hodnotu vhodnosti, algoritmus se ukončí (požadovaná vhodnost byla stanovena hodnotou 20). Výsledkem je 10 parametrů, které jednoznačně určují mechanismus zavěšení zadního kola horského bicyklu. [20]

Navržený mechanismus není optimalizován z výrobního a technologického hlediska, je optimalizován pouze z hlediska trajektorie zadního kola. Výsledné mechanismy odpružení kinematicky odpovídají zadané rovnici jen s velmi malou odchylkou. Konkrétní čísla vybraných potomků jsou uvedena v následující podkapitole.

6.2.1 Ukázka výsledků genetického algoritmu

Pro spuštění genetického algoritmu musíme nejdříve stanovit požadované vstupní hodnoty (výčet vstupních hodnot je uveden na začátku kapitoly 6). Pro ukázkou byly zvoleny hodnoty již dříve zkoumaného horského kola Canyon Spectral (se zjištěnou trajektorií: $x = 0,001227 y^2 - 0,1678 y - 433,7$). Algoritmus byl spuštěn dvakrát. Výsledkem jsou 2 rozdílné mechanismy, označené čísly: I a II (obrázky 30 a 32). V tabulce číslo 2 jsou

⁴ Jednotlivým odchylkám parametrů vstupujících do výpočtu vhodnosti je udělena váha

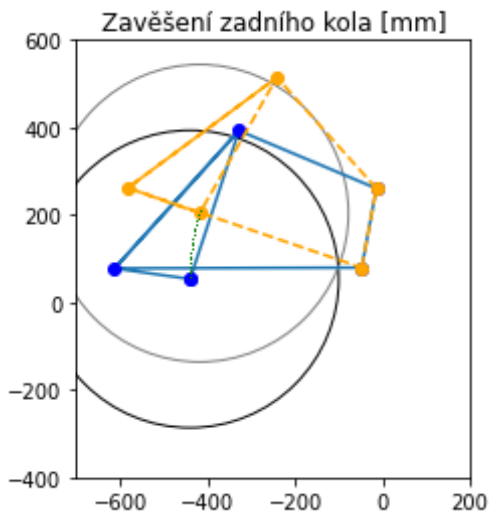
zobrazeny parametry navržených mechanismů, včetně mechanismu parametrů kola Canyon Spectral. V tabulce číslo 3 je porovnání koeficientů polynomu trajektorie mechanismů a porovnání potřebného počtu generací genetického algoritmu. Sloupec s označením vhodnost představuje hodnotu mechanismu, ohodnoceného fitness funkcí. Součástí výsledku jsou grafické znázornění závislostí označených jako „závislost vhodnosti nejlepších potomků na čísle generace“, které jsou níže uvedené pro mechanismy I a II (zobrazeno na obrázcích 31 a 33). Vizualizace obou navržených mechanismů je zde taktéž vyobrazena níže (grafické provedení je stejné, jako v schématu na obrázku 27). Z výsledků vyplývá, že parametry výsledných mechanismů se výrazně odlišují, avšak koeficienty trajektorie jsou s velmi malou odchylkou totožné s koeficienty vstupní funkce.

Tabulka 2- Parametry mechanismů navržených genetickým algoritmem a mechanismus Canyon

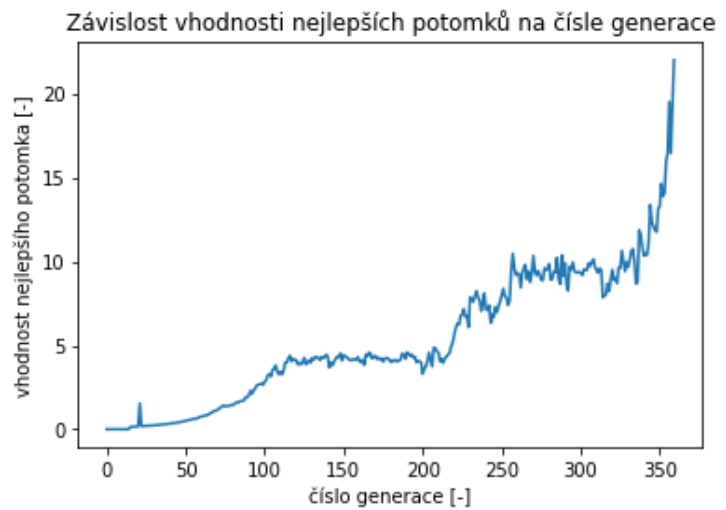
Mechanismus	Koeficienty rovnice trajektorie $x = ay^2 + by + c$			Hodnoty genetického algoritmu		Prodloužení řetězu [mm]
	a	b	c	Počet generací	Vhodnost	
I	0,00122	-0,1679	-434,6	359	22	17,53
II	0,00124	-0,166	-440,35	437	23	17,23
Canyon spectral	0,001227	-0,1678	-433,7	-	-	22,65

Tabulka 3 - Porovnání parametrů mechanismů navržených genetickým algoritmem a mechanismu Canyon

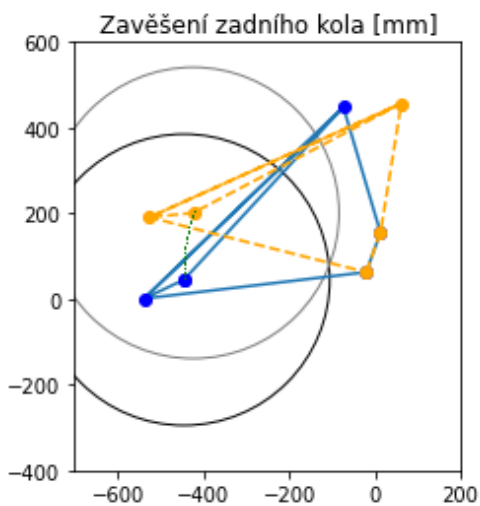
Mechanismus	Parametry									
	v_2 [mm]	v_3 [mm]	v_4 [mm]	A_x [mm]	B_x [mm]	A_y [mm]	B_y [mm]	α_2 [rad]	x_{3k} [mm]	y_{3k} [mm]
I	564,9	424,3	340,6	47,7	-14,3	79,4	260,6	1,57	97,5	144,3
II	521,3	644,7	305,5	-20,5	12,8	62,7	155,0	1,69	97,3	-32,6
Canyon spectral	379	402	76	0	43	60	193	1,64	-45	45



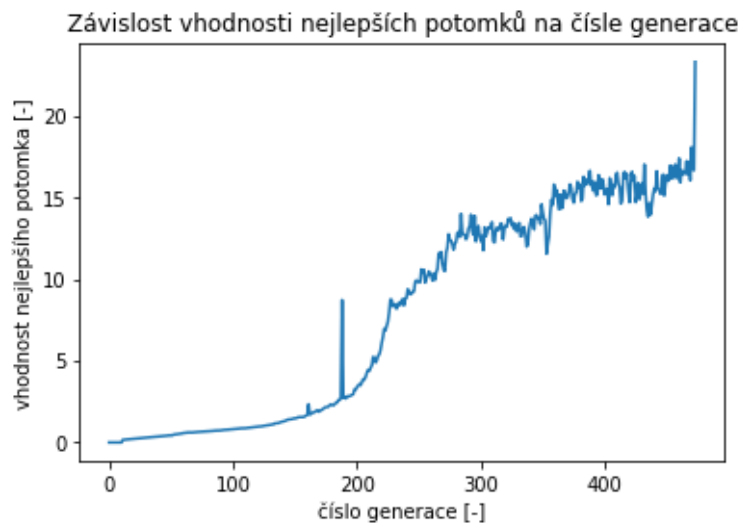
Obrázek 30 - Mechanismus I



Obrázek 31 - Vývoj vhodnosti potomků mechanismu I na čísle generace



Obrázek 32 - Mechanismus II



Obrázek 33 - Vývoj vhodnosti potomků mechanismu II na čísle generace

6.2.2 Porovnání výstupu genetického algoritmu s existujícím kolem

Algoritmus generuje různorodá řešení. Výsledná trajektorie výstupu algoritmu se téměř od existujícího kola, zvoleného jako předloha neliší. Algoritmus navrhl mechanismy, které mají menší hodnotu prodloužení řetězů než předlohové kolo. Mechanismus předlohového kola je uveden na obrázku 32, navržené mechanismy jsou na obrázcích 30 a 32.

7 Závěr

V počáteční fázi bakalářské práce došlo k rešerši různých konstrukcí odpružení motocyklů, automobilů a horských kol. Ve velkém množství typů nabízených celoodpružených horských kol byly nakonec shledány 2 nejběžnější základní principiální typy uchycení zadního kola (zavěšení typu lichoběžník a MacPherson, neboli obecně čtyřkloubový a jednokloubový mechanismus).

Toto bylo důležité pro další část práce, která spočívala v parametrizaci mechanismu zavěšení horského kola. Předmětem bližšího zkoumání bylo zavěšení typu MacPherson a lichoběžníku. Poté byla pomocí vektorové metody zjištěna trajektorie osy zadního kola horského kola Canyon Spectral, která byla následně aproximována do podoby polynomu druhého stupně. Výpočet trajektorie mechanismu na základě vstupních parametrů je zautomatizován v programovacím jazyce Python.

Poslední část zadání spočívala v navržení parametrů mechanismu na základě požadované trajektorie osy zadního kola. K optimalizaci všech 10 parametrů, které jednoznačně specifikují mechanismus odpružení, byl navrhnout genetický algoritmus (opět byl použit programovací jazyk Python). Na ukázkou genetického algoritmu byl jako vstupní polynom trajektorie použit polynom mechanismu, který vzešel z výpočtu v předchozím části zadání (trajektorie kola Canyon Spectral). Výsledky genetického algoritmu jsou prezentovány v závěru této práce. Opakovaným spuštěním algoritmu byly vytvořeny různé mechanismy, jejichž vlastnosti odpovídají vstupním požadavkům.

8 Zdroje

- [1] Trevor Worsley, Ruben Torenbeek. Understanding MTB suspension. *Enduro*. [Online] 2. 3. 2019. [Citace: 9. únor 2022.] <https://enduro-mtb.com/en/mtb-suspension-kinematics/>.
- [2] Vlk, prof. Ing. František. *Rámy a odpružení motocyklů*. Brno : Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav dopravní techniky, 2004.
- [3] Cossalter, Vittore. *Motorcycle dynamics*. Morrisville : LULU, ISBN: 9781430308614, 2006.
- [4] Robert P. Tata, P.E. Automotive Suspension Systems. [Online] 2012. [Citace: 2.. 4. 2022.] <https://www.cedengineering.com/userfiles/Automotive%20Suspension%20Systems.pdf>.
- [5] Prof. Dipl.-Ing. Jornsens Reimpell, Dipl.-Ing. Helmut Stoll, Prof. Dr.-Ing. Jurgen W. Betzler. *The Automotive Chassis: Engineering Principles*. Oxford : Butterworth-Heinemann, 2001. ISBN: 0 7680 06570.
- [6] Audi. Radaufhängungen/Lenkung. *Audi Technology Portal*. [Online] [Citace: 27. 5. 2022.] <https://www.audi-technology-portal.de/de/fahrwerk#filter=radaufhaengungen-lenkung>.
- [7] Dayton, Thomas. Counterman. *Live Axle*. [Online] [Citace: 27. 5. 2022.] <https://www.counterman.com/counter-view-live-axle/>.
- [8] How it works: Forks. *Bennets*. [Online] [Citace: 27. 5. 2022.] <https://www.bennets.co.uk/bikesocial/news-and-views/features/bikes/how-do-motorcycle-forks-work>.
- [9] Kinematics. Dual front suspension system on a KTM. *Thumbertalk*. [Online] [Citace: 27. 5. 2022.] <https://www.thumpertalk.com/forums/topic/1350345-dual-front-suspension-system-on-a-ktm/>.
- [10] Yeti. Yeti Cycles. [Online] [Citace: 4. 12. 2022.] <https://yeticycles.com/technology/switch-infinity>.
- [11] Simonovich, Ryan. Bike perfect. *Types of mountain bikes*. [Online] 1. 6. 2021. [Citace: 2. 4. 2022.] <https://www.bikeperfect.com/features/types-of-mountain-bike>.
- [12] Canyon. Canyon. *Spectral 29 AL 6*. [Online] 2022. [Citace: 12. Duben 2022.] https://www.canyon.com/cs-cz/horska-kola/trail-bikes/spectral/spectral-29/spectral-29-al-6/3185.html?dwvar_3185_pv_rahmenfarbe=OG.
- [13] F2043-13, Norma ASTM. SRM. [Online] [Citace: 13. 4. 2022.] http://www.srm.de/fileadmin/user_upload/products/SRM_ASTM-F2043-13.pdf.
- [14] Roberts, Dan. Pinbike. [Online] 20.. 5. 2020. [Citace: 12. 4. 2022.] <https://www.pinkbike.com/news/definitions-what-is-anti-squat.html>.

- [15] Antonio Simón Mata, Alex Bataller Torras, Juan Antonio Cabrera Carrillo, Francisco Ezquerro Juanco, Antonio Jesús Guerra Fernández, Fernando Nadal Martínez, Antonio Ortiz Fernández. *Fundamentals of Machine Theory and Mechanisms*. Switzerland : Springer, Cham, ISBN: 978-3-319-31970-4, 2016.
- [16] Kříž, Rudolf. *Stavba a provoz strojů II. převody*. Praha : SNTL - Státní nakladatelství technické literatury, 1978. ISBN: 04-223-78.
- [17] Kayser, Leif. Photo measure. [Online] 2021. [Citace: 15. 1. 2022.] https://eleif.net/photo_measure.html.
- [18] Developers, NumPy. numpy.polyfit. [Online] [Citace: 13. 4. 2022.] <https://numpy.org/doc/stable/reference/generated/numpy.polyfit.html>.
- [19] Maik Butteltmann, Boris Lohmann. *Optimierung mit Genetischen Algorithmen und eine Anwendung zur Modellreduktion*. München : Oldenbourg, 2004.
- [20] Orbitko, Marek. Introduction to Genetic Algorithms. [Online] 1998. [Citace: 12. 2. 2022.] <https://www.obitko.com/tutorials/genetic-algorithms/recommendations.php>.
- [21] PhDr. Ludmila Tichá, Mgr. Zdeňka Cívínová, Mgr. Michaela Morysková, Mgr. Ilona Trtíková, Mgr. Lenka Němečková. Jak psát vysokoškolské závěrečné práce, ÚSTŘEDNÍ KNIHOVNA ČVUT. [Online] 2009, akt. 2016. [Citace: 15. 4. 2022.] <http://knihovna.cvut.cz/files/VSKP/VSKP.pdf>.
- [22] Paul Thede, Lee Parks. *Motorcycle Suspension Bible*. Minneapolis : Zack Miller, ISBN: 0752748331402, 2010.
- [23] Cibula, Karel. *Mechanika jízdního kola*. Praha : ČVUT, ISBN: 80-01-03016-4, 2004.

Seznam obrázků a tabulek

Obrázek 1- Zjednodušený model zavěšení kola.....	12
Obrázek 2 - Zavěšení MacPherson, přední náprava Audi TT [6]	14
Obrázek 3 - Zavěšení MacPherson, kinematické schéma	15
Obrázek 4 - Zavěšení typu lichoběžník, přední náprava Audi R8 [6].....	15
Obrázek 5 - Zavěšení typu lichoběžník, kinematické schéma	16
Obrázek 6 - Zavěšení typu lichoběžník, přední kolo, Honda Prelude [5]	16
Obrázek 7 - Zavěšení kol torzní příčkou, zadní náprava VW Golf [5]	17
Obrázek 8 - Zavěšení kol torzní tuhou nápravou s listovými pružinami [7].....	17
Obrázek 9 - Teleskopická vidlice motocyklu, invertovaná [8]	18
Obrázek 10 - Zavěšení zadního kola motocyklu KTM [9].....	19
Obrázek 11 - Neodpružené jízdní kolo	19
Obrázek 12 – Jízdní kolo se zavěšením zadního kola typu MacPherson	20
Obrázek 13- Jízdní kolo se zavěšením zadního kola čtyřkloubovým mechanismem	21
Obrázek 14- Jízdní kolo se zavěšením zadního kola čtyřkloubovým mechanismem v krajní konfiguraci..	21
Obrázek 15 - Jízdní kolo s odpružením zadního kola - Switch Infinity suspension system	22
Obrázek 16 - Jízdní kolo typu hardtail s přední teleskopickou vidlicí	22
Obrázek 17 - Schéma znázorňující silové působení v zavěšení horského kola, realizovaného kyvným ramenem (princip MacPherson)	25
Obrázek 18 - Grafický přehled parametrů.....	26
Obrázek 19 - Zobrazení parametrů horského kola s čtyřkloubovým mechanismem	27
Obrázek 20 - Zobrazení parametrů horského kola s jednokloubovým mechanismem.....	27
Obrázek 21 - Zobrazení parametrů horského kola s čtyřkloubovým mechanismem v krajní konfiguraci..	27
Obrázek 22 - Schéma vektorů reprezentující mechanismus zavěšení horského kola	28
Obrázek 23- Schéma řetězového převodu.....	31
Obrázek 24 - Celoodpružené horské kolo Canyon Spectral 29" [12]	32
Obrázek 25 - Zobrazení mechanismu a fotografie kola Canyon Spectral.....	33
Obrázek 26 – Rovinný parametrický model závěsu zadního kola horského kola Canyon Spectral	33
Obrázek 27 - Schéma mechanismu kola Spectral při propružení.....	35
Obrázek 28 - Trajektorie zadního kola, horské kolo Canyon Spectral.....	36
Obrázek 29 - Základní schéma fungování genetického algoritmu	38
Obrázek 30 - Mechanismus I.....	43
Obrázek 31 - Vývoj vhodnosti potomků mechanismu I na čísle generace.....	43
Obrázek 32 - Mechanismus II.....	43
Obrázek 33 - Vývoj vhodnosti potomků mechanismu II na čísle generace.....	43
Tabulka 1 - Parametry horského kola Canyon Spectral 29"	32
Tabulka 2- Parametry mechanismů navržených genetickým algoritmem a mechanismus Canyon.....	42
Tabulka 3 - Porovnání parametrů mechanismů navržených genetickým algoritmem a mechanismu Canyon	42

Seznam příloh

Příloha 1 – Zdrojový kód programu na výpočet trajektorie

Příloha 2 – Zdrojový kód programu genetického algoritmu