

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta aplikovaných věd

Katedra mechaniky

Bakalářská práce

Model závodního offroad podvozku

Předkládá: Michal Vondrášek

Obor: Výpočty a design

Vedoucí práce: ing. Miroslav Horák, Ph.D.

Prohlášení

Čestně prohlašuji, že svoji bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

V Plzni dne

Michal Vondrášek

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Miroslavu Horákovi, Ph.D. za cenné rady, připomínky a vedení práce.

Abstrakt

Cílem práce je vytvoření modelu RC offroad podvozku. K tomuto účelu byly vytvořeny počítačové simulace pomocí programu MSC.ADAMS, ve kterém bylo ověřeno chování modelu ve třech vzorových situacích. V prvním případě se jednalo o skok vozidla pod malým úhlem odrazu, ve druhém případě o skok vozidla pod velkým úhlem odrazu a poslední simulace se zabývala chováním modelu při natočení podvozku v letové části simulace.

Klíčová slova: RC model, podvozek, MSC.ADAMS, dynamika vázaných soustav, offroad

Abstract

The aim is to create a model RC offroad chassis. For this purpose were created computer simulations by using the program MSC.ADAMS, in which the behavior of the model was verified in three sample situations. In the first case the vehicle jump at a slight angle, in the second case the vehicle jump at a high angle reflection and final simulation dealt with the behavior of the model when chassis rotation in the flight part of the simulation.

Keywords: RC model, chassis, MSC.ADAMS, multibody dynamics , offroad

Obsah

1. Úvod	6
2. Úvod do světa modelů	7
3. Historie	8
4. Vytvoření modelu	11
4.1 Základní geometrie	12
4.2 Nápravy	12
4.3 Pneumatiky	14
4.4 Cesta	15
5. Simulace	17
5.1 Skok s odrazem 5°	20
5.2 Skok s odrazem 45°	22
5.3 Úprava dopadového úhlu	26
6. Závěr	27
Seznam literatury a zdrojů	28
Příloha č.1	29
Příloha č.2	31
Příloha č.3	32

1. Úvod

Modely řízené dálkovým ovládním jsou od svého uvedení na trh fenoménem, který těží ze své variability. Každý kluk někdy chtěl nebo i v dospělosti stále ještě chce vlastnit nějaký model na ovládní. A také prakticky každý někdy doma nějaký měl nebo má. Všechny majitele modelů spojuje láska k rádiem řízeným modelům, ať už se jedná o velmi populární letadla, auta nebo třeba ponorky.

Od dětských hraček, které jsou velmi jednoduché bez jakékoliv možnosti nastavení a jejichž hlavním cílem je jednoduchost a vzhled, jsou dalším stupněm polomakety a makety reálných vozů. Jejich záměrem je vizuální shoda s reálnou předlohou. V automobilovém prostředí se nejčastěji setkáme s maketami stavební techniky, které mají stejné funkce jako jejich předlohy a často vytvářejí i iluzi běhu motoru. Existují skupiny lidí vlastníci makety terénních vozidel, se kterými imitují expediční cesty (cestování divočinou a těžkým terénem).

Posledním stupněm jsou závodní modely, které pojí hlavně možnosti nastavení podvozku a pohonu, což je pro jejich využití důležité. Vzhledová stránka je tu naprosto vedlejší. Podvozek takového stroje musí být maximálně funkční a adaptabilní na různé podmínky. Dosahuje se toho nastavitelností jednotlivých součástí podvozku. Velká variabilita podvozku je dána také možností výměny jednotlivých součástí za jiné s jinými vlastnostmi např. tlumiče, pružiny, pneumatiky atd. Cílem je vždy nejlepší čas na trati a výhra jako v každém závodění.

Cílem této bakalářské práce je sestavení modelu offroad podvozku v programu MSC.ADAMS tak, aby bylo možné simulovat jeho chování. Dále se zabývá postupem při vytváření modelu a simulací zadaných situací.

2. Úvod do světa modelů

V první řadě je důležité vysvětlení pojmu RC. Zkratka RC pochází z anglických sousloví "Radio Control" nebo "Remote Control". Už z názvu vyplývá, že se jedná o něco, co je řízené na dálku. Obecně je toto slovo nejčastěji spojováno s modely letadel, lodí a aut. Méně často lidem na mysl přijdou modely motorek, vrtulníků, ponorek, bojové techniky aj. Dnes už jsou například k vidění i závody reálných aut ovládaných dálkově v zábavném pořadu na televizní stanici Discovery Channel.

K ovládání se používají vysílače, které se liší svým zaměřením. Pro modely aut, na která je tato práce zaměřena, se nejčastěji používá ovladač pistolového tvaru. Rychlost modelu, případně zpětný chod motoru se ovlivňuje spouští a směr se řídí volantem po straně ovladače. Signál do modelu vysílač posílá po rádiových vlnách. Nejčastěji používané frekvence v České Republice jsou 27 MHz, 40 MHz a v nynější době převládají digitální vysílače na frekvenci 2,4 GHz. Poslední zmiňovaná frekvence nahradila ty předchozí hlavně z důvodu lepší spolehlivosti a téměř nulové náchylnosti k rušení.

Hlavní dělení modelů aut je podle zaměření. Onroad modely jsou, jak už z názvu vyplývá, uzpůsobeny pro jízdu na silnici. Pro svou jízdu potřebují rovnou hladkou plochu. Tratě se pro ně staví venku, kde se jezdí po asfaltu nebo také ve sportovních halách. Jejich podvozek je nízko položen, aby se snížilo těžiště a tím se zlepšila přilnavost v zatáčkách. Kola jsou většinou úplně hladká a liší se hlavně materiálem v závislosti na povrchu, na kterém se mají používat.

Zato offroad modely jsou pravým opakem. Mají větší světlou výšku kvůli průchodnosti terénu a možnosti delších zdvihů náprav. Tlumiče jsou také mnohem delší a je na ně kladen důraz hlavně v otázce tlumení. Tlumící vlastnosti jsou dány viskozitou oleje uvnitř tlumiče. Kola jsou obecně většího průměru než u silničních modelů. Přenos výkonu od pohonu na kola je řešen kardanovou hřídelí nebo řemínky. Poháněná jsou nejčastěji všechny 4 kola, ale ani pohon jedné nápravy není nikterak vzácný. Dalším dělicím faktorem je samozřejmě měřítko, ve kterém je model postaven oproti původní předloze.

3. Historie

První dálkově ovládaný model představil Nicola Tesla v roce 1898. Byl jím model lodě (obr. 3.1), který byl předveden veřejnosti v New Yorku v Madison Square Garden [1].



Obr. 3.1 První rádiem ovládaná loď Nicola Tesly

Ačkoliv v první polovině 20. století proběhly hned dvě světové války, v roce 1936 vznikl v Anglii jeden z prvních modelářských klubů s názvem Model Car Racing Association. V té době ještě neřízené modely dosahovaly velkého zrychlení z 0 – 65 km/h za necelé 3 vteřiny, ale jezdily pouze v přímém směru. O čtyři roky později se v Americe začaly v modelech používat diesellové motory, které zvýšily rychlost na 100 km/h. V této době nebyl ještě zahájen prodej za komerčním účelem a v provozu bylo pouze několik desítek možná stovek kusů.

Prvním komerčním dálkově ovládaným modelem byl v roce 1966 model Ferrari 250LM 1/12 od firmy El-Gi. Následoval další model od stejné firmy a to Ferrari P4 1/10. Tato auta nebyla ještě ovládána klasickou vysílačkou, ale kabelem, který propojoval ovladač s modelem. V roce 1976 vstoupila na trh firma Tamiya se svým onroad modelem, který byl již uzpůsoben pro použití vysílače. Tato firma přišla jako první i s offroad podvozkem. Použila v něm plnohodnotné odpružení náprav s olejovými tlumiči. Následovaly první dva kompletní terénní modely Sand Scorcher a Rough Rider (obr. 3.2 a obr. 3.3).



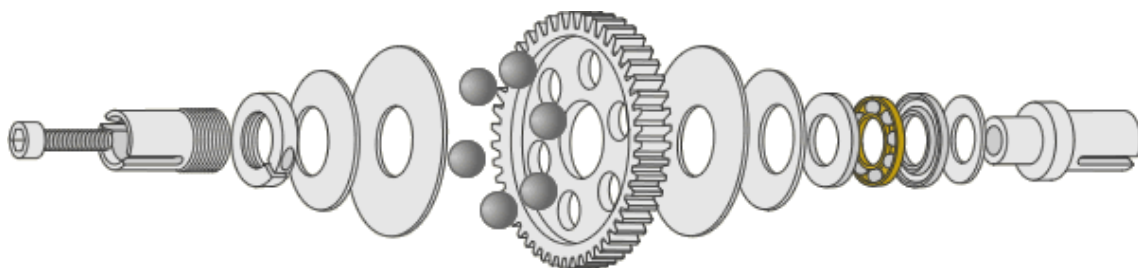
Obr.3.2 Sand Scorcher



Obr.3.3 Rough Rider

Oba dva modely firma představila v roce 1979. Podvozek byl pro oba modely stejný, modely se lišily pouze použitými koly a karoserií. Plastová karoserie byla ve stylu „buggy“. Na počátku 80. let začala firma produkovat makety. Tímto krokem a hlavně modelem Toyota HiLux Pickup odstartovala Tamiya novou vlnu záliby v realisticky vypadajících modelech.

V roce 1980 vytvořila firma Schumacher Racing Products kuličkový diferenciál (obr. 3.4).



Obr. 3.4 Schéma kuličkového diferenciálu

Jeho hlavním plusem byla možnost změny nastavení pro různé druhy trati. A to v době, kdy onroad modely používaly hlavně pevnou osu a offroad modely diferenciál s kuželovými koly. Tatiž firma v roce 1986 postavila model CAT (Competition All Terrain) (obr. 3.5). Byla to „buggyna“ s pohonem všech kol (tzv. 4WD) a byla označována za nejlepší model všech dob.



Obr. 3.5 Poslední modifikace modelu CAT (CAT K1)

V dnešní době jsou nejznámějšími výrobci firmy Traxxas (USA), zahrnující celé portfolio odvětví offroad modelů, a Kyosho (Japonsko) známé hlavně pro svá auta s pohonem jedné nápravy. Také firma Tamiya je stále velmi rozšířená, ale už se řadí mezi výrobce střední cenové kategorie a kvalita jejich modelů je často zpochybňována. Dalšími známými výrobci jsou Lossi, HB, Yokomo, Schumacher, Associated atd.

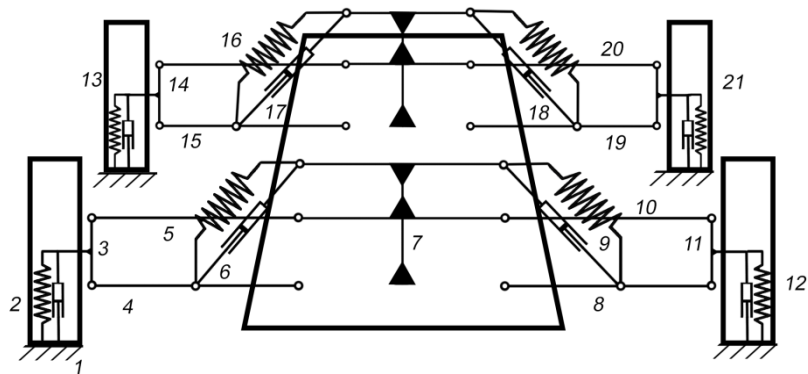
4. Vytvoření modelu

Podvozky dnešních modelů jsou velmi sofistikovaná zařízení. Lze na nich nastavit vše stejně jako na reálném vozidle. Záměnou pružin a tlumičů s rozdílnou charakteristikou začínaje a nastavením kompletní geometrie konče.

V práci popisovaný model podvozku je vytvořen v softwarovém prostředí programu MSC.ADAMS (Automatic Dynamic Analysis of Mechanical Systems). Program MSC.ADAMS (dále jen ADAMS) je výpočtový systém pro modelování a simulaci vázaných mechanických soustav, který převádí vstupní data na matematický model a řeší soustavu nelineárních algebraických a diferenciálních rovnic. Je schopen řešit statické, kinematické i dynamické úlohy pro tuhá i poddajná tělesa, která jsou k sobě vázána pomocí kinematických vazeb. Výpočtový systém je sestaven z jednotlivých modulů, které jsou schopny pracovat samostatně. Model je sestavován v modulu ADAMS/View, kde je model i graficky zobrazen. Následný převod na matematický model byl proveden pomocí řešiče ADAMS/Solver. Pro jednodušší následné vyhodnocení získaných dat se využívá modul ADAMS/PostProcessor.

Nejprve byl sestaven kinematický model (obr. 4.1). Všechny vazby mezi tělesy jsou rotační bez pasivních účinků. Pouze mezi rámem a koly, reprezentovány tělesy 2, 12, 13 a 21, jsou vazby valivé a pasivní účinky jsou dány vlastnostmi modelu kol a cesty.

V pneumatikách je zobrazeno kinematické schéma tlumiče. Tímto je reprezentována tlumicí a pružící vlastnost pneumatiky. Základní rozměry byly odměřeny z modelu 1:10 Stormracer 2 od firmy Carson Model Sport. Možnost zatáčení byla vzhledem k povaze simulací a s ohledem na zjednodušení modelu zanedbána. Do budoucna je možnost tento model vylepšit zakomponováním řízení.



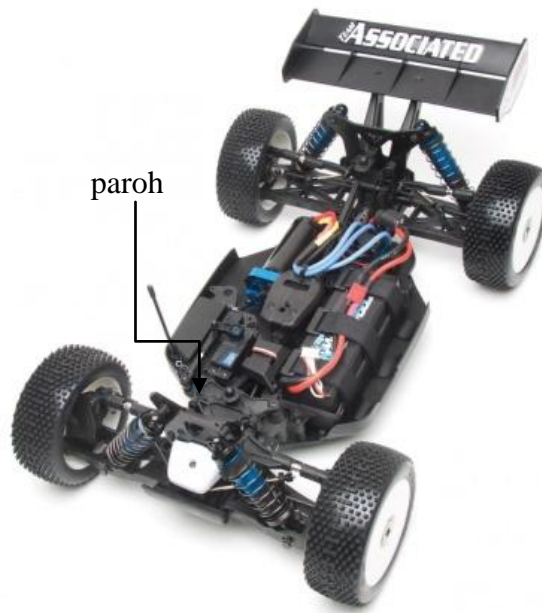
Obr.4.1 Kinematický model podvozku

4.1 Základní geometrie

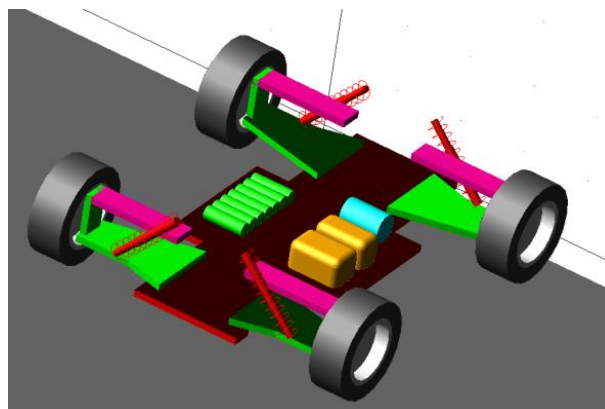
Pro vytvoření základní geometrie byla použita plná tělesa. Ta byla modelována pomocí funkcí boolean a unite. Jednotlivým tělesům byl následně přiřazen materiál. Z těchto zadaných dat již program dopočítal hmotnosti a momenty setrvačnosti jednotlivých těles. Baterie, motor, servo a regulátor jsou k základní desce přichyceny pomocí fixní vazby, která udává přesnou polohu vůči základní desce a zamezuje těmto tělesům pohyb po desce.

4.2 Nápravy

Nápravy u reálných modelů jsou dnes již poměrně složité a existuje mnoho různých druhů zavěšení. U 4-kolového zavěšení je tlumič připojen okem na tzv. parohu (obr. 4.2). Na parohu se nachází více takovýchto ok a tím je zde dána možnost změny geometrie připojení tlumiče.

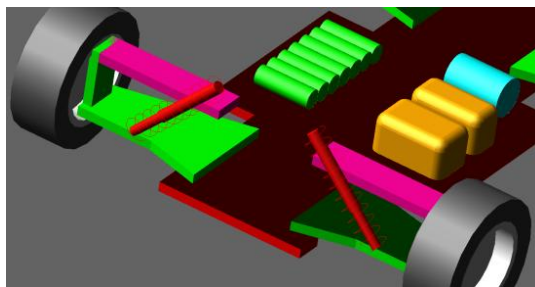


Obr. 4.2 Běžný způsob zavěšení



Obr. 4.3 Vytvořený model v programu ADAMS

Pro model bylo použito zjednodušené 4-kloubové zavěšení. Bylo vypuštěno zatáčení kol na přední nápravě. K propojení jednotlivých součástí byly použity rotační vazby, které mají vždy v jedné požadované ose volnost pohybu. Tlumiče jsou z jedné strany uchyceny v polovině spodního ramene a z druhé strany k markeru, spojeného pevně se základní deskou, který nahrazuje funkci parohu. Markery jsou v ADAMSU body pevně spojené s nějakým tělesem nebo rámem. Jejich polohami jsou definovány lokality jednotlivých vazeb. Během výpočtu je v markerech možno odečítat různé veličiny.

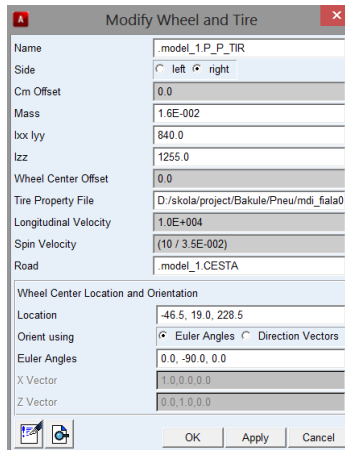


Obr. 4.4 Model zavěšení v programu ADAMS

4.3 Pneumatiky

Kola byla připojena k závěsům náprav pomocí dalších rotačních vazeb, které mají přiřazenou rotační rychlost, a tímto je modelu udělován pohyb.

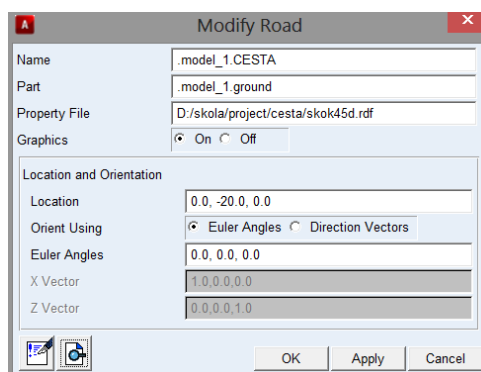
Vlastnosti kol jsou zadávány z externího souboru `fiala.tir` (viz příloha č. 2). Sestaven byl podle `MDI_FIALA` [3]. Původně byl použit model pneumatiky `PAC2002.tir` [8], který vytvořil Hans Bastiaan Pacejka. Po špatných výsledcích ze simulací bylo studiem literatury zjištěno, že se tento model hodí převážně pro pomalé manévry. Proto bylo od tohoto modelu upuštěno a byl použit model kol s vlastnostmi vycházejícími z modelu `MDI_FIALA`. Základním parametrem pro vstup do výpočtu pneumatiky u tohoto druhu modelu je nezátížený poloměr kola a jeho šíře. Tuhost a tlumení kol bylo ponecháno na původních hodnotách doporučených k modelu `fiala.tir`. Momenty setrvačnosti a počáteční podmínky pneumatik se zadávají ručně. Kolo bylo pro potřeby výpočtu momentu setrvačnosti nahrazeno homogenním plným válcem o průměru nezátíženého tedy nezdeformovaného kola.



Obr. 4.5 Zadávání vlastností kol v programu ADAMS

4.4 Cesta

Cesta je stejně jako model kol načítána z externího souboru (příloha č. 1). Byl využit typ 3D cesty [2]. Geometrie cesty byla zadána dvěma lokalizačními tabulkami. V první se zapisují souřadnice jednotlivých uzlů. Pomocí druhé se určuje, které uzly se spojí a vytvoří jeden element. Celá cesta je tvořena sítí trojúhelníkových elementů. V programu ADAMS byla už pouze zadána orientace a pozice cesty vůči modelu.

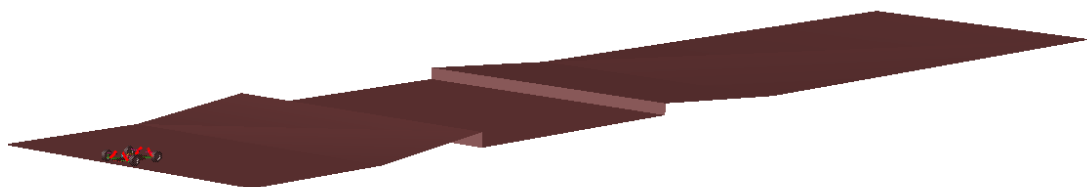


Obr. 4.6 Zadávání pozice a orientace cesty v programu ADAMS

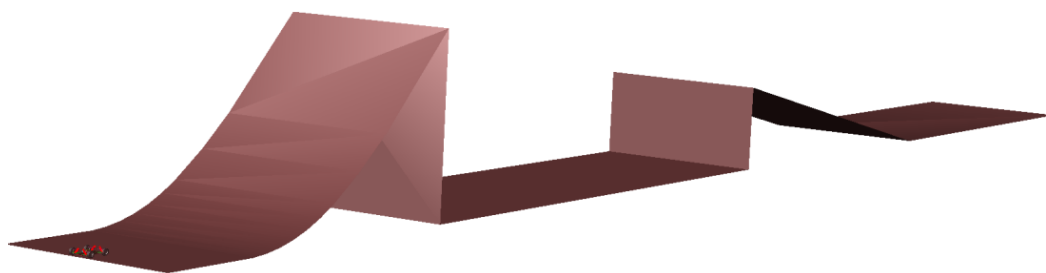
Cesty byly vytvořeny dvě. První cesta reprezentuje skok se sklonem odrazu 5° . Vzhledem k tomu, že úhel nájezdu je malý, nebylo třeba přechod z roviny do odrazu nikterak upravovat. Chování modelu tento přechod nijak významně neovlivňoval.

Druhou cestou je skok se sklonem 45° . Cestu už nebylo možné realizovat bez vytvoření přechodu. Sklon odrazu byl zvyšován postupně v úsecích po 5° až do výsledných 45° . Poslední úsek byl oproti předchozím výrazně prodloužen, aby se mohl model před odrazem ustálit a skok nebyl ovlivňován „propružením“ podvozku v momentě opuštění odrazu, které vznikalo během překonávání přechodu z roviny.

Vzdálenost dopadu obou skoků byla spočítána na základě výpočtu šikmého vrhu vzhůru viz. kapitola 5.



Obr. 4.7 Tvar cesty s 5° odrazem



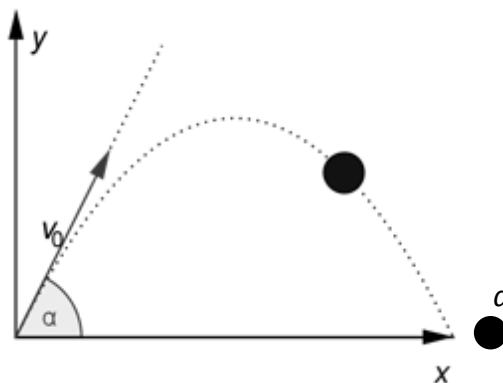
Obr. 4.8 Tvar cesty s 45° odrazem

5. Simulace

Simulace probíhala v softwaru ADAMS/View. Model s pohonem všech kol se pohybuje po testovací trati konstantní rychlostí 10 m/s. Rychlost je zadána na rotační vazbě mezi kolem a závěsem.

Při simulacích jsou porovnávány dva různé modely. Příčně vyvážený a nevyvážený. „Nevyváženosti“ bylo dosaženo přidáváním nebo ubíráním hmotnosti jednotlivých komponent na základní desce podvozku. Následně bylo do těžiště modelu přidáno virtuální těleso tak, aby měly oba modely stejnou hmotnost.

Jak již bylo řečeno, byly simulace prováděny především se zaměřením na chování modelu při skocích. Zvláštní důraz byl potom kladen na porovnání chování příčně vyváženého a nevyváženého modelu. Pro ověření byly numericky vypočtené hodnoty porovnávány s analytickým výpočtem pohybu hmotného bodu při vrhu šikmo vzhůru (obr. 5.1).



5.1 Šikmý vrh vzhůru

Vycházíme z rovnic polohy (1) a (2)

$$x = v_0 \cdot t \cdot \cos \alpha \quad (1)$$

$$y = v_0 \cdot t \cdot \sin \alpha - \frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2. \quad (2)$$

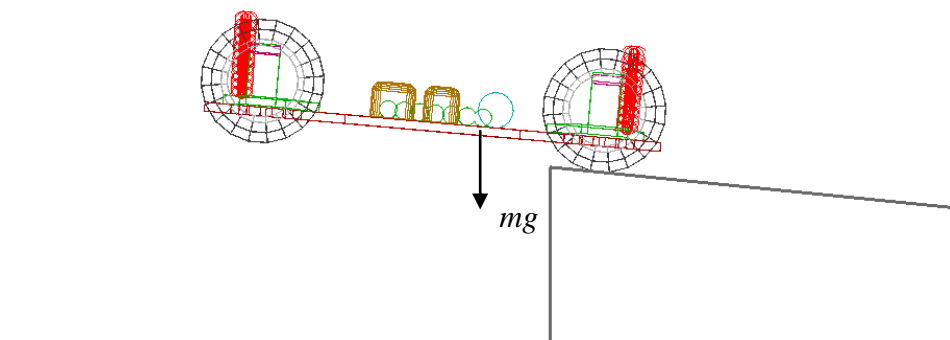
Dosažením $y = 0$ do rovnice (2) a jednoduchou úpravou vyjádříme čas dopadu t

$$t = \frac{2v_0}{g} \sin \alpha. \quad (3)$$

Dosažením rovnice (3) do (1) a následnou úpravou získáme požadovanou délku skoku (4)

$$d = \frac{v_0^2}{g} \sin 2\alpha. \quad (4)$$

Od okamžiku, kdy opustí odrazovou rampu přední náprava, do okamžiku odpoutání zadní nápravy se podvozek vlivem gravitační síly natáčí. Relativní pohyb podvozku okolo zadní nápravy potom modelujeme pohybem fyzikálního kyvadla (obr. 5.2).



5.2 Podvozek v době opouštění odrazu

Vydeme z Lagrangeovi rovnice (5)

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\delta E_k}{\delta \dot{q}} \right) - \frac{\delta E_k}{\delta q} = Q, \quad (5)$$

kde E_k je kinetická energie tělesa (6) a q je zobecněná souřadnice, v tomto případě úhel natočení φ . Pro kinetickou energii platí

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot I \cdot \dot{\varphi}^2, \quad (6)$$

I je moment setrvačnosti k ose rotace (místo dotyku zadních kol s podložkou).
Postupně dostáváme

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\delta E_k}{\delta \dot{\varphi}} \right) = I \cdot \ddot{\varphi} = I \cdot \alpha \quad (7)$$

$$\frac{\delta E_k}{\delta \varphi} = 0 \quad (8)$$

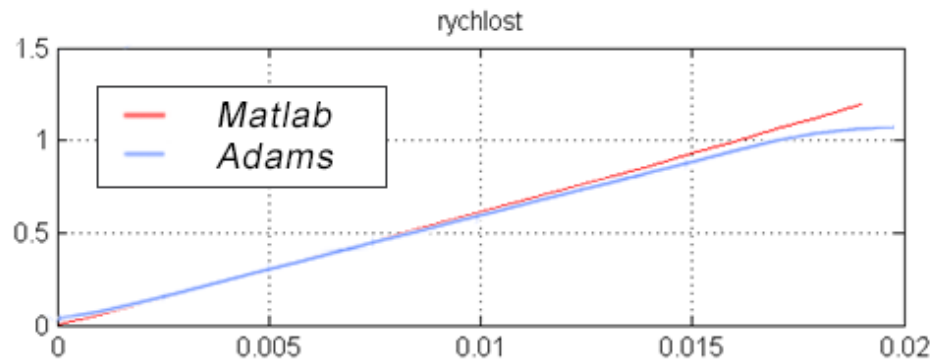
Virtuální práci vyjádříme jako

$$Q = -m \cdot g \cdot e \cdot \cos \varphi, \quad (9)$$

kde m je hmotnost modelu, e je vzdálenost těžiště podvozku od osy rotace, g je gravitační zrychlení. Dosazením (6) – (9) do Lagrangeovy rovnice (5) po úpravě dostaneme pohybovou rovnici

$$\alpha = -\frac{m \cdot e \cdot g}{I} \cdot \cos \varphi. \quad (10)$$

Výsledná pohybová rovnice byla řešena numericky metodou počátečního zrychlení. Výsledky jsou porovnány v grafu 5.3 s hodnotami získanými simulací v prostředí Adams. Počátek simulace je dán časem odpoutání přední nápravy od hrany skoku a její konec okamžikem, kdy hrany skoku dosáhne zadní náprava.



Obr. 5.3 Graf rychlosti natočení modelu.

Pokud není uvedeno jinak je v grafech znázorněn pohyb střediska hmotnosti základní desky modelu. Model se pohybuje v souřadném systému xyz, rovnoběžně s osou z. Výchylka ve směru x značí vybočení modelu z přímého směru a y-ová souřadnice značí výškový pohyb modelu.

5.1 Skok s úhlem odrazu 5°

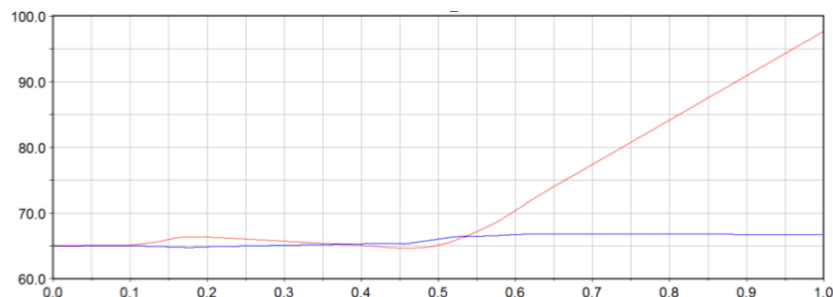
Pro tuto úlohu byla použita první cesta s 5° odrazem. Model se pohyboval rychlostí 10 m/s. Doba simulace byla 1 s a tento časový úsek byl rozdělen na 1000 kroků pro přesnější výpočet v oblasti odrazu a možnosti porovnání s analytickými výpočty. Nastavení vlastností tlumičů:

Přední -	tuhost	10,2 N/mm
	tlumení	0,3 Ns/mm
Zadní -	tuhost	10 N/mm
	tlumení	0,3 Ns/mm

Tuhost pružin byla odměřena na konkrétních dílech podvozku Stormracer 2. Různých koeficientů tlumení v tlumiči se dosáhne použitím olejů různých viskozit. Zvolené hodnoty byly nastaveny podle chování modelu po dopadu při simulacích.

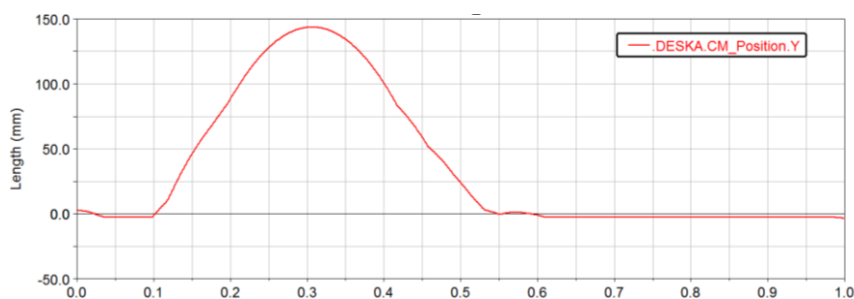
Vlivem počáteční úhlové rychlosti, kterou získá při odrazu, se podvozek během letu natáčí. Dopadne nejprve na přední nápravu a jednou odskočí. Po dopadu zadní nápravy je model již ustálený.

V grafu 5.4 je zobrazeno stranové vybočení vyváženého a nevyváženého modelu. Je evidentní, že příčné vyvážení má zásadní vliv na chování podvozku po dopadu. Je-li podvozek nevyvážený, dochází po dopadu vlivem nerovnoměrného zatížení kol na levé a pravé straně podvozku ke značnému vybočení, které je nutné korigovat natočením kol přední nápravy. V prostředí „závodního“ nasazení dochází ke ztrátě soustředění pilota a v krajním případě může dojít i k havárii modelu.



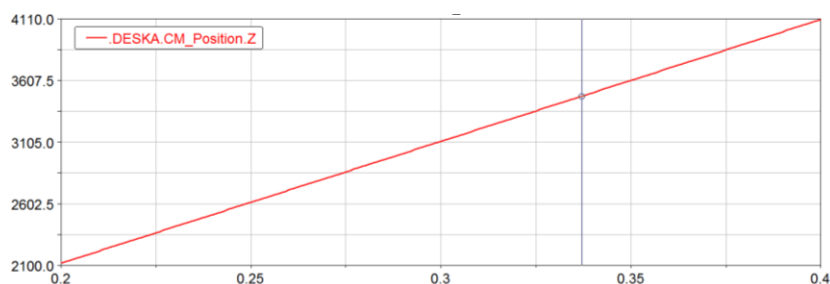
Obr. 5.4 Porovnání stranového vybočení vyváženého a nevyváženého modelu

Z grafu 5.5 lze vyčíst výškový pohyb podvozku. Odečtením výšky odrazu a dopadu byl získán časový úsek letu. A tento úsek je zobrazen v detailu pohybu modelu ve směru osy z (obr. 5.6).



Obr. 5.5 Graf výškového pohybu modelu

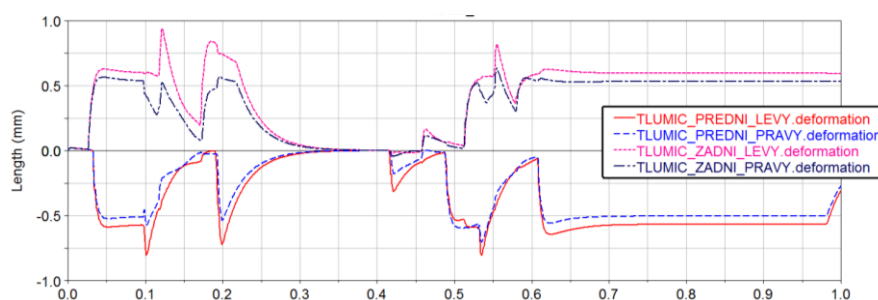
Počáteční hodnoty: $v_0 = 10 \text{ m/s}$, $g = 9,81$, $\alpha = 5$ byly dosazeny do vzorce (4). Pro tuto simulaci je vzdálenost dopadu, vypočítaná ze šikmého vrhu vzhůru, rovna $d = 1,77 \text{ m}$. V porovnání analyticky vypočtené vzdálenosti a vzdálenosti získané ze simulace (obr. 5.2) bylo zjištěno, že rozdíl činí $0,24 \text{ m}$.



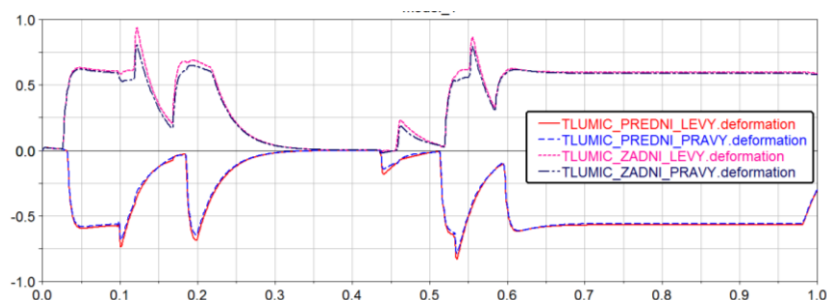
Obr. 5.6 Graf závislosti z-ové souřadnice polohy střediska hmotnosti podvozku v čase. Odraz 5°

Na obr. 5.7 jsou zobrazeny hodnoty deformace jednotlivých tlumičů nevyváženého podvozku v závislosti na čase. Záporné hodnoty jsou dány pouze opačnou orientací předních a zadních tlumičů. Tlumiče byly takto zadány z důvodu lepšího vizuálního rozlišení v grafu. Na funkci tato orientace nemá vliv.

Z grafu je zřejmé, že pravá strana podvozku je méně zatížena. Proto tlumiče na levé straně zaznamenají větší deformaci a model při propružení vybočuje. U vyváženého modelu je rozdíl v deformacích tlumičů minimální viz. (obr. 5.8).



Obr. 5.7 Deformace tlumičů nevyváženého modelu



Obr. 5.8 Deformace tlumičů vyváženého modelu

5.2 Skok s úhlem odrazu 45°

V tomto případě použijeme cestu s odrazem pod úhlem 45° (obr. 5.9). Tento skok můžeme zařadit mezi extrémní prvky jízdy. Dnešní modely z moderních materiálů ale i takovéto skoky zvládají bez větší úhony a při závodech se s takovými skoky běžně setkáváme.

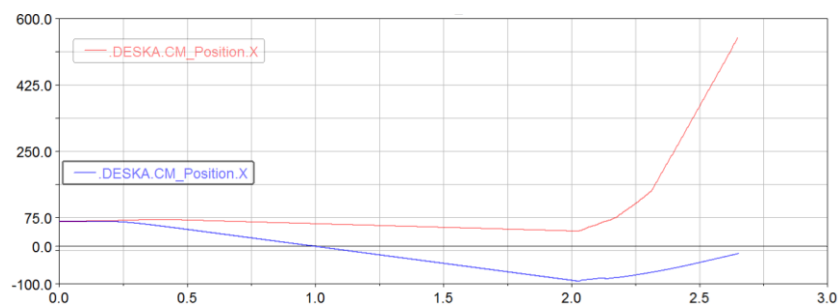


Obr. 5.9 tvar cesty a její rozdělení

Model se pohyboval rychlostí 10 m/s. Čas simulace 2,65 s byl opět rozdělen na 1000 kroků. Charakteristika podvozku byla nastavena stejně jako v předchozí situaci.

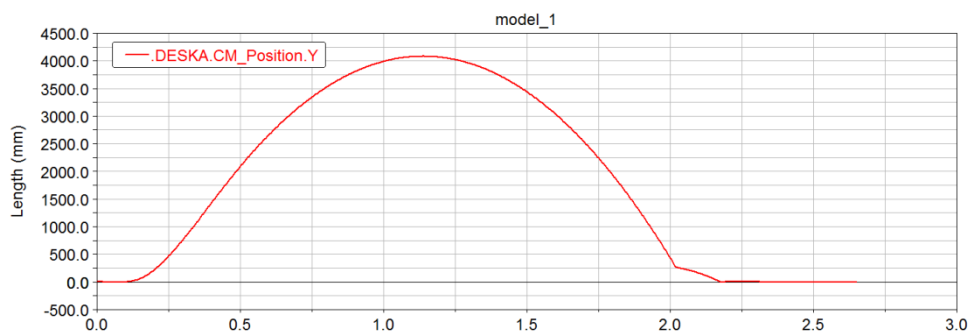
I přesto, že se při rozjezdu objevují v pružinách a tlumičích síly a pohyby způsobené přejezdem zlomů v cestě, model se vlivem tlumení rychle ustálí a odrazový můstek opouští v ustáleném stavu. Model je ve vzduchu 1,55 s a dopadne ve vzdálenosti 10 m. Model dopadá značně na plochu. Nejprve dosedne přední nápravou, která stlačí přední pružiny. Vzápětí dopadnou i zadní kola. Model ještě dvakrát „odskočí“, než se vrátí do ustálené polohy. Z průběhu dopadu z velké výšky lze vyzorovat, že tuhost pružin je správná pro očekávaný výsledek. Model se v žádné části dopadu nedotkne podvozkem cesty. Diskutabilní je nastavení tlumičů. Model po dopadu ještě dvakrát odskočí. Ovšem jak již bylo řečeno, jedná se v tomto případě o velice extrémní skok, který se na trati závodu objeví jednou nebo dvakrát za jedno kolo. Je otázkou, zda naladění tlumičů na ideální chování podvozku při tomto doskoku negativně neovlivní chování modelu na zbytku dráhy. Nastavení podvozku tedy musí být kompromisem pro všechny situace, které se na trati vyskytují.

I v tomto případě byl na podvozku testován vliv nevyvážení na stranové vybočení. Na obr. 5.10 je znázorněn rozdíl vybočení vyváženého a nevyváženého modelu. Je evidentní, že nevyvážený podvozek po dopadu opět značně vybočí. Z grafu je patrné i malé vybočení „vyváženého“ podvozku. Toto vybočení vzniká pravděpodobně vlivem numerických chyb především při drobných prokluzech pneumatik při přejíždění počátečních „zlomů“ na trase rozjezdu. Tuto domněnku se nám ovšem nepodařilo během simulací potvrdit ani vyvrátit.

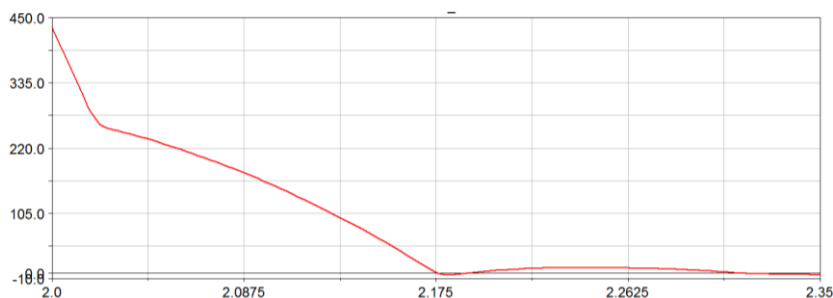


Obr. 5.10 Porovnání stranového vybočení vyváženého a nevyváženého modelu

Na obr. 5.12 je zobrazen detail dopadu podvozku, ze kterého je patrné značné odskočení modelu po prvním dopadu.



Obr. 5.11 Záznam výškového pohybu modelu

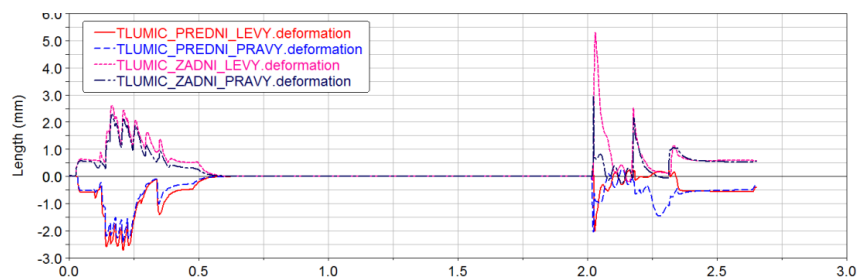


Obr. 5.12 Detail dopadu modelu

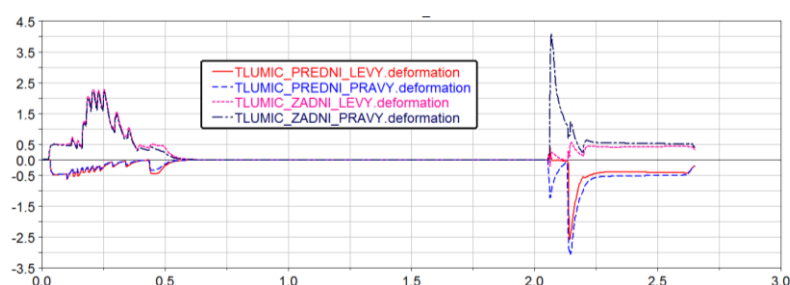
Na obr. 5.13 je zobrazena deformace jednotlivých tlumičů náprav před a po dopadu. „Zubatý“ začátek grafu je dán zlomy v odrazu. Znovu je zde vidět nevyváženost mezi pravou a levou stranou podvozku. Největší rozdíl je vidět na zadní nápravě, která vysvětluje značné vybočení modelu.

Obrázek č. 5.14 zobrazuje deformace tlumičů vyváženého modelu. Nerovnoměrnost v zatížení zadních tlumičů po dopadu vzniká příčným

nakloněním podvozku za letu. Podvozek neletí úplně „naplocho“ a dopadne jednou stranou nepatrně dříve než druhou.

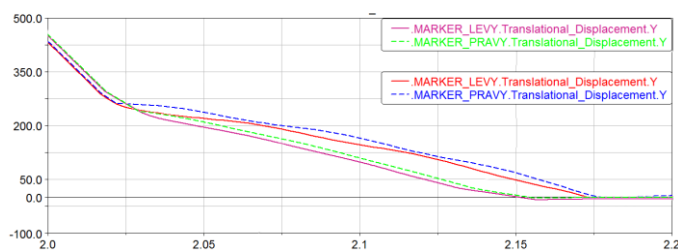


Obr. 5.13 Deformace tlumičů



Obr. 5.14 Graf deformace tlumičů vyváženého modelu

Pro ověření této doměnky byly na boky základní desky přidány dva markery, které umožňovaly sledovat příčné naklonění modelu. Výsledky jsou zobrazeny na obr. 5.15. Zobrazena je pouze část simulace těsně před a po dopadu. Mimo tento časový okamžik model vykazoval prakticky nulový boční náklon. Červená a modrá křivka zobrazuje časově závislou polohu markerů nevyváženého modelu vzhledem k y-ové souřadnici. Ihned po dopadu se projevil boční náklon reprezentovaný rozdílem hodnot y-ových souřadnic. Rozdíl hodnot je nekonstantní a to ukazuje na rozkmitání celého modelu při opětovném odrazu od cesty. Naproti tomu vyvážený model vykazuje pouze mírné boční naklonění. Toto naklonění je způsobené mírným vybočením z přímého směru daného geometrií cesty.



Obr. 5.15 Boční náklon vyváženého a nevyváženého modelu

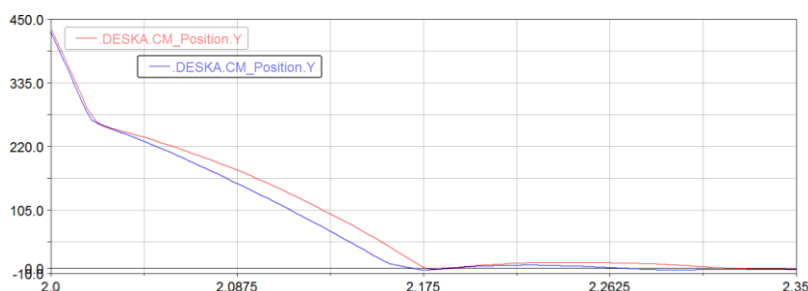
5.3 Úprava dopadového úhlu

Závodníci se snaží let svého modelu korigovat za cílem lepšího dopadu modelu. Přidáním nebo ubráním plynu je možné měnit natočení modelu. Touto změnou dopadového úhlu závodníci minimalizují ztráty rychlosti po dopadu. Pokud model "přistává" rovnoběžně s dopadem, model se rychle ustálí a závodník může dříve zrychlit.

V tomto úkolu byla snaha vyrovnat model s dopadem tak, aby dopadl oběma nápravami zároveň a tím ověřit zdali model svým chováním potvrdí zkušenosti z praxe. Z předchozích situací bylo známo, že vždy model nejdříve dopadl přední nápravou. Proto místo zadání fixní rychlosti na osách kol byla využita funkce Step5 a během letu zvýšena rotační rychlost kol. Funkce Step5 je spojitá a má tvar $\text{Step5}(\text{TIME}, t_0, v_0, t_1, v_1)$. TIME je proměnná funkce. Čas t_0 do kterého má model rychlost v_0 . Do času t_1 musí funkce dosáhnout hodnoty v_1 .

Obě dvě úpravy rychlosti byly provedeny těsně před dopadem a zvýšení probíhalo 0,1 s. Zvýšenou rychlost si model následně uchoval až do konce simulace. Pro 5° skok bylo třeba zvýšit z úhlové rychlosti, zadanou pro potřeby programu ve tvaru posuvná rychlost/nezatížený poloměr kola, 10000/35 rad/s na 10125/35 rad/s a model již dopadal rovnoběžně s cestou. Model i bez této úpravy dopadového úhlu dopadal téměř rovnoběžně, proto neměl tento zásah velký vliv na výsledky získané z první simulace.

V případě druhého skoku pod úhlem 45° bylo třeba z 10000/35 rad/s zvýšit rychlost na 10200/35 rad/s. Tato změna již měla i praktický význam. Úpravou rychlosti rotace kol se eliminovalo druhé odskočení modelu po dopadu (obr. 5.16).



Obr. 5.16 Detail dopadu podvozku

6. Závěr

V práci představený model podvozku je možné považovat jako úvodní krok do složité problematiky dynamiky pohybu vozidel.

Cílem této práce bylo vytvoření modelu RC offroad podvozku, kterým by se mohly simulovat reálné situace. Testován byl při třech různých situacích. Při všech simulacích se model pohyboval stejnou počáteční rychlostí 10 m/s. V první situaci skočil skok s 5° úhlem odrazu. Nastavení tlumičů a pružin s ohledem na výsledky vyhovovalo. Ve druhém skoku s 45° odrazu již nebylo nastavení tlumičů ideální. Jeho následkem bylo odskakování po dopadu. Tuto skutečnost se však povedlo poměrně dobře vyřešit v další simulaci, kdy byl model během letu vyrovnán do rovnoběžnosti s dopadem.

Při všech simulacích se ukázalo, že příčné vyvážení podvozku má zásadní vliv na ovladatelnost modelu a na jeho chování za jízdy.

Dalším vylepšením modelu by bylo doplnění přední nápravy o svislé čepy (mezi modeláři zvané C-huby) a doplnění modelu o natáčení přední nápravy. Portfolio úloh by se tak dalo rozšířit o velkou skupinu simulací zaměřených na chování modelu při projíždění zatáček.

Seznam literatury a zdrojů

- [1] http://news.cnet.com/2300-33566_3-10011762-2.html
- [2] Tire Models
ftp://ftp.mscsoftware.com.tw/download/training/ADM740_Car_MDR2/ADM740_CourseNotes_MDr2/S14_Tires.ppt
- [3] http://www.kxcad.net/msc_software/ADAMS_md_r2/ADAMS_tire/tire_models.pdf
- [4] Manuál MSC.ADAMS
- [5] <http://sbel.wisc.edu/documents/TR-2011-02.pdf>
- [6] <http://msc.e-works.net.cn/DownloadInfo.aspx?dataid=6606>
- [7] <http://forums.mscsoftware.com/ADAMS/ubbthreads.php>
- [8] http://mech.unibg.it/~lorenzi/VD&S/Matlab/Tire/tire_models_pac2002.pdf
- [9] http://en.wikipedia.org/wiki/Radio-controlled_car

Příloha č. 1

Zdrojový kód cesty s 45° odrazem

```
$-----MDI_HEADER
[MDI_HEADER]
FILE_TYPE = 'rdf'
FILE_VERSION = 5.00
FILE_FORMAT = 'ASCII'
(COMMENTS)
{comment_string}
'Big bump for testing durability tire.'
$-----units
[UNITS]
LENGTH      = 'mm'
FORCE       = 'newton'
ANGLE       = 'radians'
MASS        = 'kg'
TIME        = 'sec'
$-----definition
[MODEL]
METHOD      = '3D'
$-----nodes
[NODES]
NUMBER_OF_NODES = 32
{ node  x_value  y_value  z_value }
1  -1000.0  0.0      0.0
2   1000.0  0.0      0.0
3  -1000.0  0.0     1200.0
4   1000.0  0.0     1200.0
5  -1000.0  17.4    1400.0
6   1000.0  17.4    1400.0
7  -1000.0  52.6    1600.0
8   1000.0  52.6    1600.0
9  -1000.0  106.2   1800.0
10  1000.0  106.2   1800.0
11 -1000.0  179.0   2000.0
12  1000.0  179.0   2000.0
13 -1000.0  272.2   2200.0
14  1000.0  272.2   2200.0
15 -1000.0  387.6   2400.0
16  1000.0  387.6   2400.0
17 -1000.0  667.6   2800.0
18  1000.0  667.6   2800.0
19 -1000.0  1003.2  3200.0
20  1000.0  1003.2  3200.0
21 -1000.0  2003.2  4200.0
22  1000.0  2003.2  4200.0
23 -1000.0   0.0    4200.0
24  1000.0   0.0    4200.0
25 -1000.0   0.0   10700.0
26  1000.0   0.0   10700.0
27 -1000.0  1000.0  10700.0
28  1000.0  1000.0  10700.0
29 -1000.0   0.0   15200.0
30  1000.0   0.0   15200.0
31 -1000.0   0.0   20200.0
32  1000.0   0.0   20200.0
$-----offset
[ELEMENTS]
NUMBER_OF_ELEMENTS = 30
{ node_1  node_2  node_3  mu }
1  2  3  1.0
2  3  4  1.0
3  4  5  1.0
4  5  6  1.0
5  6  7  1.0
6  7  8  1.0
7  8  9  1.0
```

8 9 10 1.0
9 10 11 1.0
10 11 12 1.0
11 12 13 1.0
12 13 14 1.0
13 14 15 1.0
14 15 16 1.0
15 16 17 1.0
16 17 18 1.0
17 18 19 1.0
18 19 20 1.0
19 20 21 1.0
20 21 22 1.0
21 22 23 1.0
22 23 24 1.0
23 24 25 1.0
24 25 26 1.0
25 26 27 1.0
26 27 28 1.0
27 28 29 1.0
28 29 30 1.0
29 30 31 1.0
30 31 32 1.0

\$-----PARAMETERS
[PARAMETERS]
MU = 100
OFFSET = 0.0

Příloha č.2

Zdrojový kód externího souboru pneumatik fiala.tir

```
$-----MDI_HEADER
[MDI_HEADER]
FILE_TYPE = 'tir'
FILE_VERSION = 2.0
FILE_FORMAT = 'ASCII'
(COMMENTS)
{comment_string}
'Tire - XXXXXX'
'Pressure - XXXXXX'
'Test Date - XXXXXX'
'Test tire'
'New File Format v2.1'
$-----units
[UNITS]
LENGTH = 'mm'
FORCE = 'newton'
ANGLE = 'degree'
MASS = 'kg'
TIME = 'sec'
$-----model
[MODEL]
! use mode 1 2 11 12
! -----
! smoothing X X
! transient X X
!
PROPERTY_FILE_FORMAT = 'FIALA'
USE_MODE = 2.0
$-----dimension
[DIMENSION]
UNLOADED_RADIUS = 35
WIDTH = 25.0
ASPECT_RATIO = 0.25
$-----parameter
[PARAMETER]
VERTICAL_STIFFNESS = 510.0
VERTICAL_DAMPING = 3.1
ROLLING_RESISTANCE = 0.05
CSLIP = 9900000
CALPHA = 5000000.0
UMIN = 130
UMAX = 155.0
RELAX_LENGTH_X = 0.9
RELAX_LENGTH_Y = 1.0
```

Příloha č.3

Zdrojový kód numerické metody počátečního zrychlení aplikované na pohybovou rovnici fyzikálního kyvadla.

```
m = 1.5; %hmotnost
e = 0.130; %vzdalenost strediska hmotnosti
g = 9.81;
I = 0.0027568; % moment k ose otaceni

d = (m * e * g) / (I);
fi0 = (pi/2) + degtorad(5);
dt = 0.001; % krok casu
T = 0.02; % celkovy cas deje
omega = 0;
fi = fi0;

t = 0;
k = 1;

for k = 1:1:10000

    t(k+1) = t(k) + dt;

    if t <= T

        alfa(k) = -d * cos(fi(k));

        omega(k+1) = omega(k) + dt * alfa(k);

        fi(k+1) = fi(k) + omega(k) * dt + ((dt * dt)/2) * alfa(k);

        subplot(2,1,1);
        plot(t,fi,'k'), title('vychylka')
        grid;

        subplot(2,1,2);
        plot(t,omega,'r'), title('rychlost')
        grid;

    else
        return;
    end
end
```