



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA DOPRAVNÍ

Bc. Ondřej Paprčka

**SIMULACE JÍZDNÍ DYNAMIKY SOUTĚŽNÍHO MOTOCYKLU
MOTOSTUDENT**

Diplomová práce

2019



K616..... Ústav dopravních prostředků

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Bc. Ondřej Paprčka

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

N 3710 – DS – Dopravní systémy a technika

Název tématu (česky): **Simulace jízdní dynamiky soutěžního motocyklu
MotoStudent**

Název tématu (anglicky): Simulation of driving dynamics of the MotoStudent
competition motorcycle

Zásady pro vypracování

Při zpracování diplomové práce se řiďte osnovou uvedenou v následujících bodech:

- Prostudujte dynamické jízdní zkoušky v rámci soutěže MotoStudent
- Vytvořte model soutěžního motocyklu pro simulaci jízdní dynamiky
- Proveďte simulace dle pravidel soutěže MotoStudent
- Vyhodnoťte výsledky simulace a porovnejte vliv tuhosti pružin, nastavení tlumičů a polohy těžiště na jízdní vlastnosti motocyklu
- Navrhněte vhodné úpravy pro zlepšení jízdních vlastností motocyklu

- Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucího práce
- Rozsah průvodní zprávy: minimálně 55 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)
- Seznam odborné literatury: Vlk, F.: Teorie a konstrukce motocyklů, Brno: František Vlk, 2004
Pravidla a předpisy soutěže MotoStudent
FIRST, Jiří a kol. Zkoušení automobilů a motocyklů: příručka pro konstruktéry. Vyd. 1. Praha: S&T CZ, 2008. 348 s. ISBN 978-80-254-1805-5.

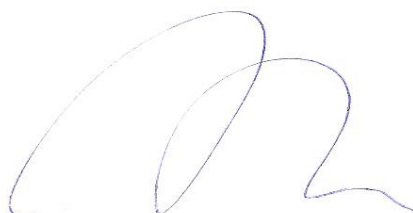
Vedoucí diplomové práce: **Ing. Josef Mík, Ph.D.**

Datum zadání diplomové práce: **26. července 2017**
(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání diplomové práce: **28. května 2019**
a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia



doc. Ing. Petr Bouchner, Ph.D.
vedoucí
Ústavu dopravních prostředků



doc. Ing. Pavel Hrubeš, Ph.D.
děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání diplomové práce.



Bc. Ondřej Paprčka
jméno a podpis studenta

V Praze dne..... 3. prosince 2018

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval všem, kteří mi pomohli s tvorbou této práce. Zvláště bych rád poděkoval vedoucímu této práce Ing. Josefu Míkovi, Ph.D. a také Ing. Přemyslu Tomanovi za podporu při zpracování praktické části této práce.

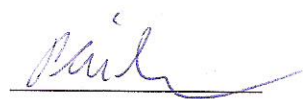
Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci zpracovanou na závěr studia na ČVUT v Praze Fakultě dopravní.

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 24.5.2019



Ondřej Paprčka

Abstrakt

Diplomová práce „Simulace jízdní dynamiky soutěžního motocyklu MotoStudent“ řeší problematiku dynamických jízdních zkoušek závodního motocyklu v rámci soutěže MotoStudent. V první části této práce je proveden teoretický rozbor dynamických zkoušek v soutěži MotoStudent. V druhé části práce jsou provedeny zkoušky jízdní dynamiky závodního motocyklu v simulačním prostředí počítačových simulačních programů a je provedeno jejich následné vyhodnocení.

Klíčová slova

Soutěž MotoStudent, motocykl, dynamika, akcelerace, brzdění, simulace.

Abstract

The master thesis “Simulation of driving dynamics of the MotoStudent competition motorcycle” deals with the tests of driving dynamics within the MotoStudent competition. The first part of this thesis describes the dynamic tests that are compulsory in the MotoStudent competition. In the second part tests of driving dynamics are carried out in the simulation environment using computer simulation programs and the results are analysed.

Key words

MotoStudent competition, motorcycle, dynamics, acceleration, breaking, simulation.

Obsah

Seznam použitých zkratk	6
Úvod	7
1 Soutěž MotoStudent	8
1.1 Dynamické zkoušky v rámci vývoje motocyklu	9
1.2 Dynamické zkoušky před závodem	11
1.3 Dynamické zkoušky v rámci závodu	13
2 Základní metody modelování	15
2.1 Metoda konečných prvků	15
2.2 Metoda Multibody System	16
2.3 Využití	17
3 Tvorba a úprava modelu motocyklu	18
3.1 První fáze úpravy modelu motocyklu	18
3.1.1 Tvorba chybějících prvků motocyklu	19
3.1.2 Tvorba jezdce	20
3.2 Příprava modelu na dynamické simulace	23
3.2.1 Vytvoření vazeb	23
3.2.2 Nastavení hmotnosti a momentu setrvačnosti	24
3.2.3 Vytvoření odpružení a stabilizace motocyklu	26
3.2.4 Vytvoření a nastavení jízdny plochy pro motocykl	27
3.3 Provedení měření chybějících parametrů	30
3.3.1 Měření polohy těžiště	30
3.3.2 Měření parametrů pružin	34
3.4 Nastavení naměřených parametrů v modelu	35
3.4.1 Poloha těžiště v modelu	35
3.4.2 Nastavení odpružení v modelu	36
3.4.3 Jízdní odpory a síly v modelu	38
3.4.4 Reprezentace motoru v modelu	40
3.4.5 Reprezentace brzd v modelu	44

4 Testy modelu motocyklu	45
4.1 Validace	46
4.1.1 Točivý moment působící na zadní kolo	46
4.1.2 Brzdný moment brzd	49
4.2 Napřímená poloha jezdce	49
4.2.1 Točivý moment působící na zadní kolo	50
4.2.2 Brzdný moment brzd	52
4.3 Změny tuhosti pružin	52
4.4 Změny tlumící síly tlumičů	54
4.5 Změny polohy těžiště	56
4.6 Shrnutí nastavení parametrů testů	57
5 Výsledky	59
5.1 Výsledky testu validace	59
5.1.1 Akcelerace	59
5.1.2 Brzdění	61
5.1.3 Porovnání výsledků s reálným testem motocyklu	64
5.2 Výsledky testu napřímené polohy jezdce	65
5.3 Výsledky testů pružin	65
5.4 Výsledky testů tlumičů	66
5.5 Výsledky testů polohy těžiště	68
5.6 Shrnutí výsledků	69
5.6.1 Výsledky akcelerace	69
5.6.2 Výsledky brzdění	71
Závěr	73
Použité zdroje	75

Seznam použitých zkratek

ČVUT – České vysoké učení technické

CTU – Czech Technical University

FEM – Finite Element Method

Úvod

Tato práce byla zpracována v rámci účasti v mezinárodní soutěži MotoStudent. Částí této soutěže je provedení zkoušek jízdní dynamiky závodního motocyklu v rámci jeho vývoje. Zkoušky jízdní dynamiky pomáhají vyzkoušet funkčnost návrhu motocyklu a na základě jejich výsledků upravit návrh motocyklu dle potřeb konstruktérů. Fakultě dopravní ČVUT byl na tyto účely poskytnut software od společnosti MSC Software, který byl použit v této práci.

Prvním cílem této práce bylo udělat rozbor všech dynamických zkoušek v rámci soutěže MotoStudent. Tento rozbor umožní přehlednou orientaci ve všech dynamických zkouškách požadovaných a vykonávaných v průběhu soutěže MotoStudent. Druhým cílem práce bylo vytvořit model motocyklu pro účely simulace jízdní dynamiky. Zjednodušený geometrický model aktuálního závodního motocyklu již existoval, ale nebyl kompletní a také nebyl uzpůsoben pro zkoušky jízdní dynamiky. Třetím cílem této práce bylo provedení zkoušek jízdní dynamiky na vytvořeném modelu motocyklu dle pravidel soutěže MotoStudent. Z rozboru všech dynamických zkoušek soutěže měly být vybrány adekvátní zkoušky, které měly být následně provedeny na vytvořeném modelu závodního motocyklu. Čtvrtým cílem této práce bylo vyhodnocení výsledků těchto dynamických zkoušek motocyklu a také vyhodnocení vlivu tuhosti pružin, nastavení tlumičů a polohy těžiště na jízdní vlastnosti motocyklu. Tato vyhodnocení měla pomoci konstruktérům motocyklu zjistit ideální nastavení tuhosti pružin, tlumící síly tlumičů a polohy těžiště v návrhu motocyklu. Posledním cílem této práce bylo navržení vhodných úprav pro zlepšení jízdních vlastností motocyklu na základě předchozích výsledků testů. Všechny tyto cíle měly umožnit zlepšení konečného výsledku v soutěži MotoStudent.

Tato práce se zabývá především problematikou provedení simulací dynamických testů na dopravním prostředku, v tomto případě motocyklu. V této práci je komplexně popsán postup přípravy těchto testů, od tvorby modelu zkoušeného objektu po měření potřebných parametrů k uskutečnění těchto testů. Dále je v této práci řešena problematika vyhodnocení testů jízdní dynamiky a dopady změn parametrů odpružení a polohy těžiště na výsledky testů jízdní dynamiky dopravního prostředku.

1 Soutěž MotoStudent

Soutěž MotoStudent je mezinárodní soutěž, ve které soutěží týmy studentů z technických univerzit z celého světa. V této soutěži je hlavním cílem návrh a stavba závodního motocyklu, se kterým se na konci soutěže jede závod na okruhu Motorland Aragón ve Španělsku. V rámci soutěže si týmy mohou vybrat, jestli chtějí vyvíjet a konstruovat motocykl poháněný spalovacím motorem, nebo motocykl poháněný elektromotorem. Již ve fázi návrhu motocyklu je nutno provést testy, které vyzkouší kvalitu návrhu motocyklu. Další testy jsou následně požadovány před samotným závodem. [1]

Tým ČVUT v Praze byl založen na Fakultě dopravní v roce 2015 a byl prvním týmem z České republiky, který se této soutěže účastnil. Tým má jméno CTU Lions a je složen nejen ze studentů Fakulty dopravní ČVUT, ale i ostatních fakult ČVUT. V roce 2016 se tým účastnil své první soutěže, a to čtvrtého ročníku soutěže MotoStudent. V tomto ročníku soutěžil tým CTU Lions s motocyklem poháněným spalovacím motorem. Od té doby se tým rozšiřoval a v roce 2018 se znovu účastnil soutěže MotoStudent, tentokrát jejího pátého ročníku. V tomto ročníku soutěžil tým nejen s motocyklem poháněným spalovacím motorem, ale také s motocyklem poháněným elektromotorem. Foto týmu s oběma motocykly z tohoto ročníku soutěže můžeme vidět na obrázku 1.



Obrázek 1 - Foto týmu CTU Lions na okruhu Motorland Aragón [4]

V soutěži MotoStudent se bodově hodnotí dvě fáze soutěže. První fází je vývoj motocyklu, který v sobě obsahuje prvotní návrh parametrů motocyklu, vytvoření modelu motocyklu, zkoušky tohoto modelu, vytvoření prototypu motocyklu, návrh plánu sériové výroby tohoto motocyklu, vytvoření podnikatelského plánu sériové výroby a prodeje tohoto motocyklu a také navržení určité inovace, kterou bude motocykl disponovat. Ve druhé fázi soutěže musí postavený motocykl nejdříve projít bezpečnostními testy a následně jsou bodovány testy jízdní dynamiky motocyklu a konečný závod. V této práci se zabývám testy jízdní dynamiky, a to v obou fázích soutěže. [1]

1.1 Dynamické zkoušky v rámci vývoje motocyklu

Dokument o vývoji motocyklu musí obsahovat v první řadě detailní dynamické zátěžové výpočty. Tyto výpočty nejsou více specifikované v pravidlech soutěže. V předchozích ročnících se v rámci těchto výpočtů prováděly zejména testy odpružení motocyklu, testy vibrací a testy polohy těžiště. Za druhé musí dokument obsahovat výpočty výkonové dynamiky motocyklu, což znamená výpočty akceleračních a brzdných schopností motocyklu a s nimi související aerodynamické výpočty, výpočty parametrů výkonu motoru motocyklu s určitým nastavením sacího a výfukového potrubí (případně výpočty výkonu elektromotoru u elektrického motocyklu) a výpočty výkonnosti brzd motocyklu. [1]

Testy odpružení motocyklu

Testy odpružení motocyklu jsou velmi významnou částí dynamických testů modelu motocyklu. V těchto testech se získávají informace o požadované tuhosti pružin z hlediska geometrických vzdáleností jednotlivých částí motocyklu při stlačení pružin a také z hlediska správné funkce jednotlivých pružin. Také se zde testuje vliv nastavení tuhosti pružin na dynamiku jízdy motocyklu při akceleraci, brzdění a při zatáčení. Testům akcelerace a brzdění se věnuje praktická část této práce. Také se v této sekci testují tlumiče motocyklu, a to především jejich schopnost utlumit kmity motocyklu dle požadovaných parametrů. Provádějí se i testy vlivu nastavení tlumičů na jízdní dynamiku motocyklu. Těmto testům se také věnuje praktická část této práce. [2]

Provedení testů odpružení motocyklu může být provedeno více způsoby. Tyto testy mohou být provedeny pouze výpočtem nebo pomocí výpočetních simulačních programů. Také je více způsobů, v jaké situaci nastavení odpružení motocyklu testovat. Běžnou zkouškou nastavení pružin a tlumičů je zkouška jízdy po úseku s různými výstupky na vozovce. Motocykl tyto výstupky přejede a zkoumá se reakce odpružení motocyklu. Další metodou je simulace akcelerace, brzdění a zatáčení motocyklu. Tyto simulace jsou složitější, ale zároveň podávají

podrobnější informace o vlivu nastavení parametrů odpružení na dynamické schopnosti motocyklu. [2]

Testy vibrací motocyklu

Testy vibrací motocyklu umožňují konstruktérům zjistit místa vzniku nechtěných vibrací v motocyklu. Nechtěné vibrace mohou vznikat přejezdem nerovností na vozovce a nevyváženými hmotami rotačních a posuvných částí motocyklu. Tyto vibrace pak přispívají k celkovému hluku vydávanému motocyklem a velké vibrace mohou snižovat jízdní schopnosti motocyklu. Měření celkového hluku motocyklu je součástí bodovaného testu v soutěži, proto je vhodné se o jeho snížení zajímat. Omezení vibrací také přispívá k prodloužení životnosti motocyklu. [2]

Tyto testy se ve fázi vývoje motocyklu mohou provést výpočtem, ve kterém se určí zda hmoty rotačních částí (např. kol) a posuvných částí (např. ojnic) jsou dostatečně vyvážené. Dále se musí určit, zda tlumící vlastnosti materiálů a jednotlivých tlumících prvků motocyklu jsou dostatečné pro absorpci vibrací generovaných těmito nevyváženými hmotami a přejezdem nerovností na vozovce. Toto všechno je také možno provádět pomocí specializovaných výpočetních programů. [2]

Testy polohy těžiště motocyklu

Poloha těžiště má velký vliv na konečné jízdní vlastnosti. V těchto testech je nutno zjistit polohu těžiště navrženého motocyklu a následně rozhodnout, zda tato poloha vyhovuje, nebo zda se má poloha těžiště posunout. K tomuto rozhodnutí mohou přispět testy vlivu změny polohy těžiště na jízdní dynamiku motocyklu. Testy vlivu změny polohy těžiště při rozjezdu a brzdění jsou obsaženy v praktické části této práce. [3]

Aerodynamické výpočty

Aerodynamické výpočty slouží především k výpočtu aerodynamického odporu motocyklu. Pro výpočet tohoto odporu potřebujeme znát součinitel aerodynamického odporu motocyklu a jeho čelní plochu. Pro získání těchto údajů lze provést simulace modelu motocyklu ve specializovaných programech. Simulace zahrnují výpočet obtékání modelu motocyklu vzduchem v různých rychlostech. Na základě těchto simulací lze také provést úpravy v konstrukci motocyklu pro snížení jeho aerodynamického odporu. Znalost aerodynamického odporu umožňuje lépe posoudit akcelerační a brzděné schopnosti motocyklu. [2]

Výpočty výkonových parametrů motoru

Výpočty výkonových parametrů motoru motocyklu umožňují konstruktérům zjistit jeho akcelerační schopnosti a maximální rychlost. Příkladem těchto výpočtů je tvorba pilového diagramu pro motocykl. V rámci tohoto diagramu se také testuje nastavení převodových poměrů řetězu mezi motorem a zadním kolem (pokud je zadní kolo poháněno řetězem). Toto nastavení je velmi důležité pro konečné točivé momenty motoru v jednotlivých rychlostech a také pro zvýšení či snížení maximální rychlosti. [2] [3]

Výpočty výkonnosti brzd

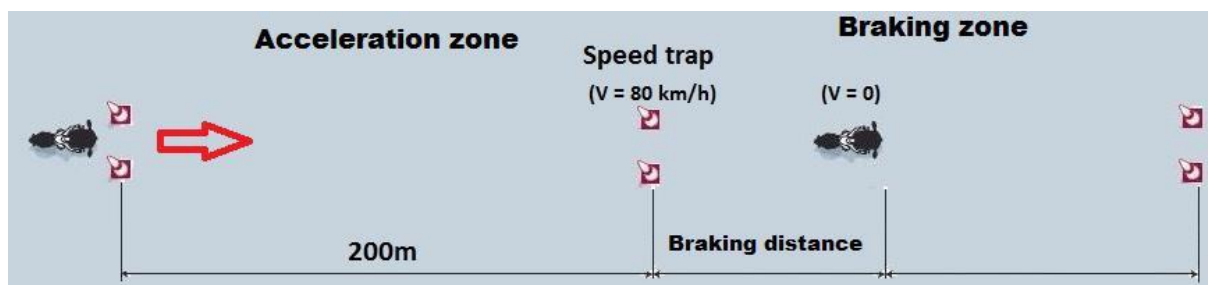
Výpočty brzdných schopností brzd konstruktérům pomohou zjistit brzdné momenty brzd a časy zabrzdění. Správné nastavení parametrů brzd a zvolení správných brzd může velmi ovlivnit časy zabrzdění a také celkový výsledek v závodě. Brzdné momenty brzd musí být vypočteny, ale následné časy zabrzdění a brzdné schopnosti celkového motocyklu mohou být zjištěny pomocí simulačních programů. Těmito simulacemi se také zabývá praktická část této práce. [3]

1.2 Dynamické zkoušky před závodem

Po úspěšném dokončení vývoje a sestrojení motocyklu se účastníci soutěže setkají ve Španělsku na okruhu Motorland Aragón, kde po důkladných bezpečnostních testech motocyklů začnou jejich reálné dynamické zkoušky. [1]

Test brzdění

Prvním testem v těchto reálných testech je test brzdění motocyklu. Tento test obnáší rozjezd motocyklu na minimální rychlost 80 km/h, ze které musí po projetí specifického bodu začít brzdit. Jeho brzdná dráha se změří a největším počtem bodů jsou ohodnoceny nejkratší brzdné dráhy. Schéma tohoto testu můžeme vidět na obrázku 2. [1]

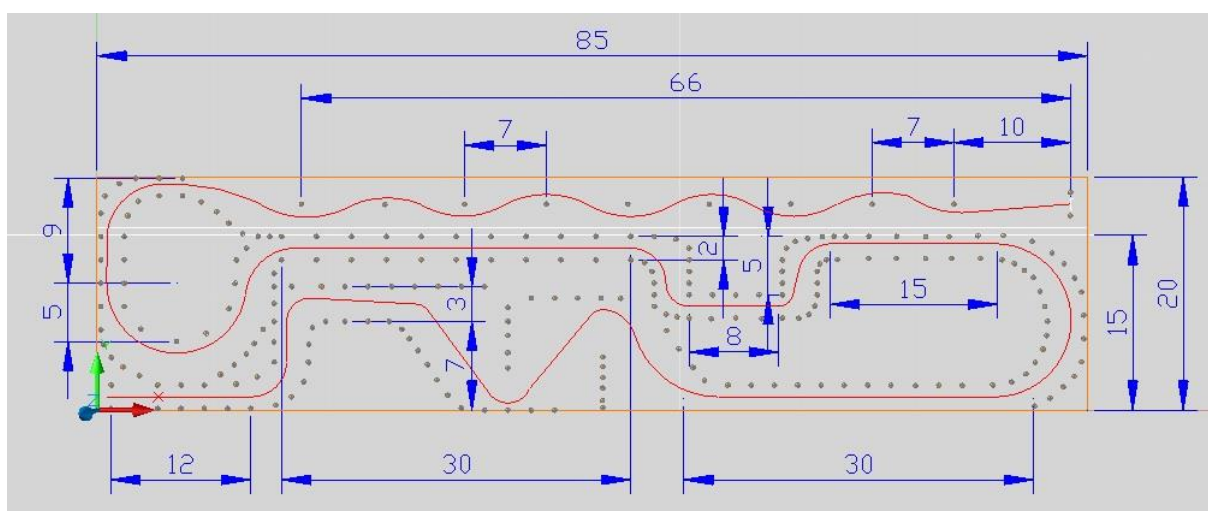


Obrázek 2 - Schéma testu brzdění v soutěži MotoStudent [1]

V bodě, ve kterém motocykl může začít brzdít, je umístěn měřič rychlosti motocyklu. Pokud je naměřená rychlost motocyklu menší než 80 km/h je k výsledné brzdě vzdálenosti týmu přičtena určitá penalizační vzdálenost. Velikost této penalizace závisí na velikosti rozdílu mezi naměřenou hodnotou rychlosti a rychlostí 80 km/h. Schéma a průběh tohoto testu byly použity jako podklad k testům brzdění v praktické části této práce. [1]

Gymkhana

Dalším reálným dynamickým testem je gymkhana, tedy průjezd slalomovou tratí. Tato trať je tvořena z kuželů a je primárně zaměřena na testování točivých schopností motocyklu a jezdce. Obsahuje různé typy směrových oblouků, které mají vyzkoušet, jak si motocykl poradí s různými poloměry zatáčení. Schéma této trati můžeme vidět na obrázku 3. [1]



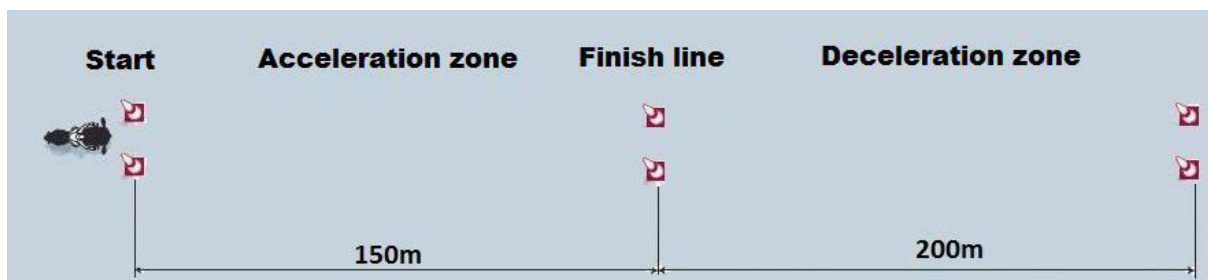
Obrázek 3 - Schéma testu gymkhana (vzdálenosti v metrech) [1]

Bodové ohodnocení tohoto testu se uděluje na základě nejkratších časových úseků nutných k projetí této trati od začátku do konce. Na začátku i na konci tratě jsou umístěny časové snímače. Jelikož je trať postavena z kuželů, je možné, že motocykl některý kužel při jízdě shodí nebo posune. V takovém případě tým dostane časovou penalizaci za každý shozený kužel. Pokud motocykl při průjezdu určitý kužel vynechá, nebo objede z jiné strany, bude týmu přičtena větší časová penalizace, než za shozený nebo posunutý kužel. [1]

Test akcelerace

Test akcelerace je dalším testem v těchto reálných dynamických zkouškách. Jak jméno tohoto testu napovídá, jedná se o test největší možné akcelerace, jakou je motocykl schopen vyvinout. Test probíhá tak, že motocykl stojící v klidu začne akcelerovat na vzdálenost 150 m. Na konci této vzdálenosti má dalších 200 m na bezpečné zpomalení a návrat do boxů. Bodové

hodnocení tohoto testu probíhá na základě měření času, který motocykl potřebuje k tomu, aby překonal vzdálenost 150 m. Konečná rychlost motocyklu není měřena. Schéma tohoto testu můžeme vidět na obrázku 4. [1]

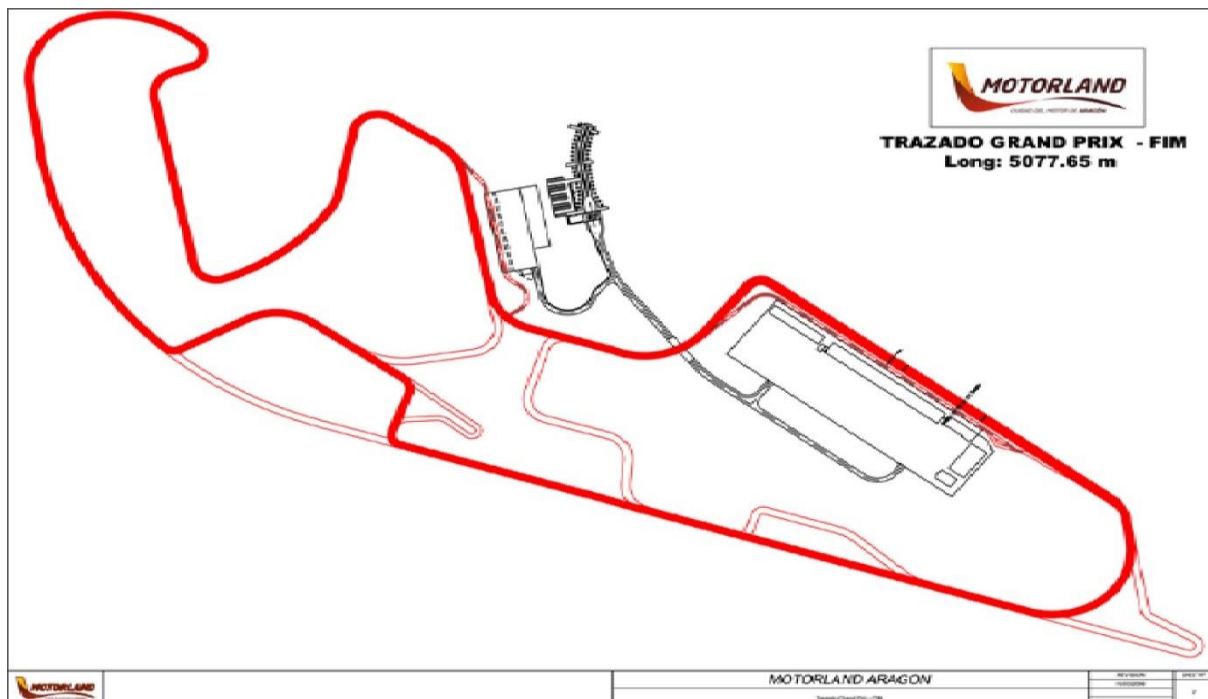


Obrázek 4 - Schéma testu akcelerace v soutěži MotoStudent [1]

Tento test byl také použit v praktické části této práce.

1.3 Dynamické zkoušky v rámci závodu

Poslední dynamickou zkouškou motocyklu je konečný závod soutěže. Tento závod se jede na trati FIM Grand Prix International okruhu Motorland Aragón a obsahuje další dílčí zkoušky jízdní dynamiky motocyklu. Schéma této trati a tohoto okruhu můžeme vidět na obrázku 5. [1]



Obrázek 5 - Schéma trati na okruhu Motorland Aragón [1]

Test maximální rychlosti

Prvním dílčím testem je měření maximální rychlosti. První povolená jízda motocyklů na okruhu je v prvním čtyřicetiminutovém volném tréninku. V tomto tréninku neprobíhá žádné měření. Po něm následuje druhý čtyřicetiminutový trénink, ve kterém proběhne měření rychlosti. Toto měření probíhá před koncem nejdelšího úseku trati bez směrových oblouků. V tomto místě trati mají motocykly nejvyšší rychlost. Tímto se testuje, jak vysokou rychlost jsou motocykly v tomto úseku schopny vyvinout, což pro mnoho motocyklů v této soutěži znamená test jejich maximální rychlosti. Dle nejvyšší naměřené rychlosti jsou týmům přiřazeny příslušné body. [1]

Test nejlepšího času

V další fázi závodu jedou motocykly na trati další čtyřicetiminutový trénink, ale tento trénink už je časovaný. Měření času každého kola probíhá na startovní linii, a to pomocí vysílačů umístěných na motocyklech. Tento test zkouší, jak si motocykly poradí s celou tratí, a také slouží k určení pořadí jednotlivých týmů na startovní linii finálního závodu. [1]

Závod

Konečnou a nejtěžší zkouškou jízdní dynamiky je finální závod motocyklů. Trať závodu již byla popsána, jedno kolo této trati činí 5077,65 m. V závodě motocyklů se spalovacím motorem je závod na 8 kol trati. Pro závod motocyklů s elektromotorem je závod zkrácen na 5 kol. Hlavním cílem závodu je dojet první. Dojezdová místa jsou sestupně bodově ohodnocena od první pozice. Druhým cílem závodu je zajet nejrychlejší kolo. Časy jednotlivých kol jsou měřeny a body jsou přiděleny týmům v závislosti na pořadí času nejrychlejšího kola. Toto je poslední test jízdní dynamiky motocyklu v rámci soutěže MotoStudent. [1]

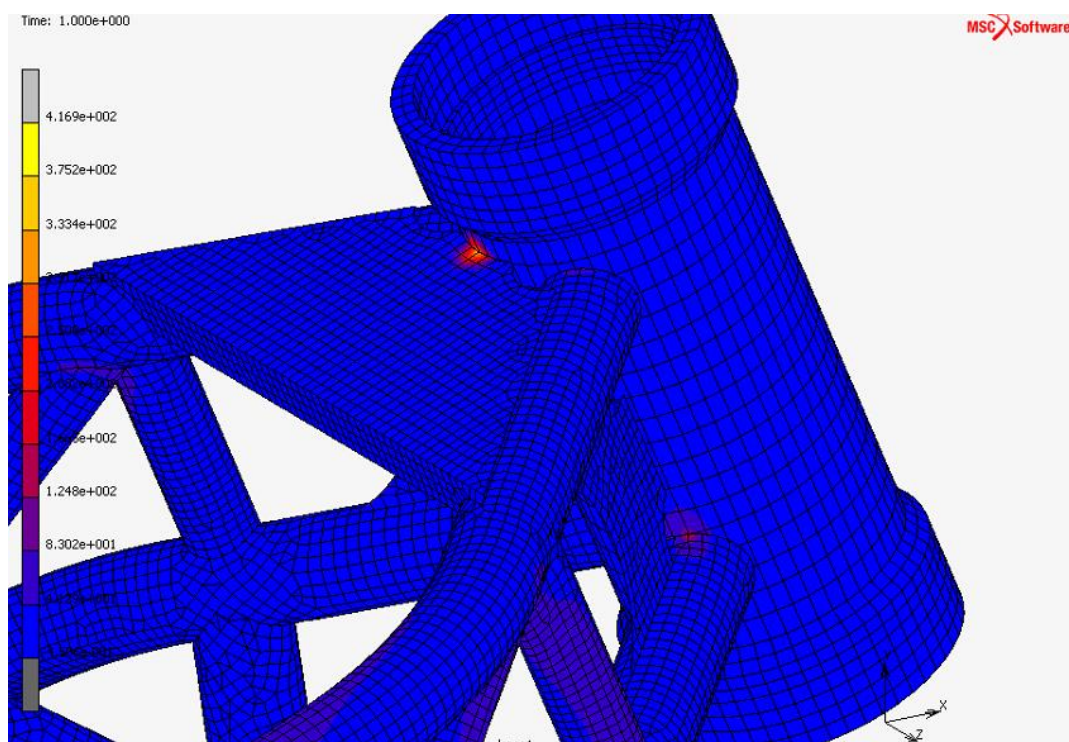
2 Základní metody modelování

Pro modelování statických a dynamických simulací se používají dvě základní metody. První metodou je metoda FEM (Finite Element Method), nazývaná také Metoda konečných prvků. Druhou metodou je metoda Multibody System. Tyto dvě metody definují základní přístup k simulacím a jsou prvním krokem realizace simulací. [5] [6] [7]

2.1 Metoda konečných prvků

Metoda konečných prvků se používá zejména ve statických simulacích, ale může být využita také v dynamických simulacích, buďto ve spojení s Multibody metodou, nebo i sama o sobě.

Tato metoda umožňuje zkoumat deformace těles a vyvolané napětí ve struktuře tělesa. Pro svou funkci Metoda konečných prvků využívá principu rozdělení tělesa na větší množství menších částí do tzv. sítě. Příklad takové sítě můžeme vidět na obrázku 6. [7]



Obrázek 6 - Ukázka sítě Metody konečných prvků [8]

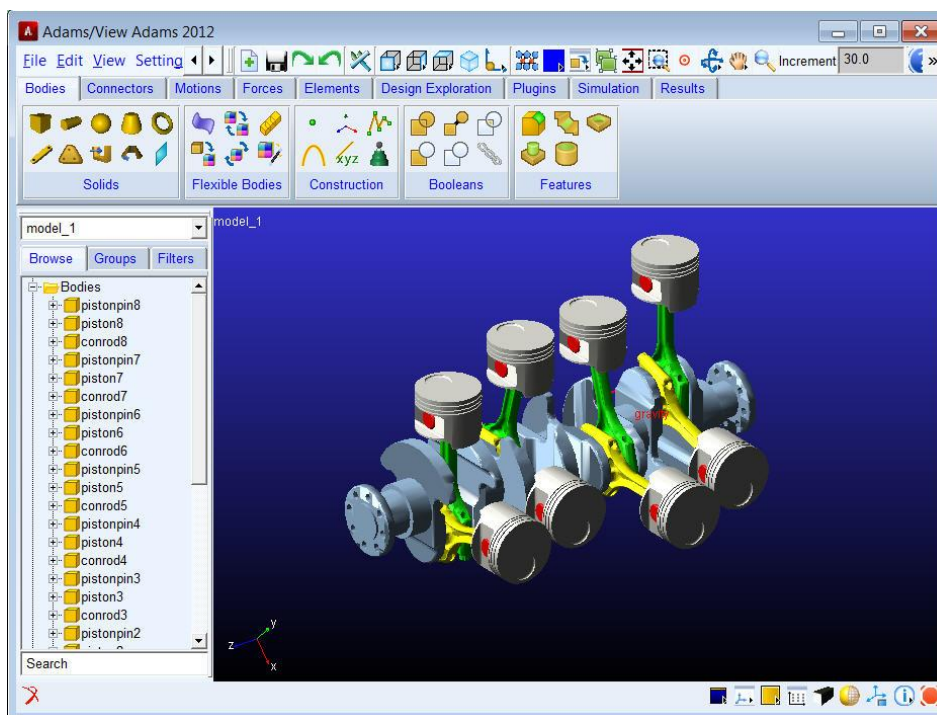
Touto sítí rozdělíme tělesa na konečný počet menších prvků, které mezi sebou přenášejí všechny síly a napětí. Jednotlivé prvky jsou homogenní a síly a napětí se vypočítávají pouze na hranicích mezi jednotlivými prvky. Tím, že je těleso složeno z více prvků lze docílit deformace celkového tělesa posunem a deformací jednotlivých prvků. Síť může být tvořena

prvky jakýchkoliv tvarů. Běžně se používají čtvercové a obdélníkové tvary které tvoří krychlové a kvádrové prvky, ale také se mohou využít trojúhelníkové tvary. Využití určitého tvaru závisí primárně na tvaru tělesa, na které chceme síť použít. Obecně platí, že čím hustší síť, tedy čím větší počet prvků v síti vytvoříme, tím přesněji simulujeme reálné chování těles. Na druhou stranu čím více prvků v síti vytvoříme, tím jsou pak simulace náročnější na výpočetní techniku. [7]

2.2 Metoda Multibody System

Metoda Multibody System se používá hlavně pro tvorbu dynamických simulací. Ve statických simulacích může být také použita, ale poskytne nám velmi omezené výsledky.

Tato metoda na rozdíl od předchozí metody neumožňuje deformaci těles ani zkoumání strukturálních změn v tělese. Nicméně umožňuje zkoumání pohybů jednotlivých těles. Tato metoda nerozděluje tělesa na menší části, ale naopak považuje celé vybrané těleso za homogenní část, ve které se strukturálně nic nemění. Jednotlivá tělesa se navzájem mohou ovlivňovat pomocí vazeb a mohou jim být určeny různé vstupní síly a pohyby. Tímto se dají simulovat jakékoliv mechanismy s pohyblivými prvky, například funkce ozubených kol, funkce odpružení dopravních prostředků či pohyby pístů v motoru. Ukázkou modelu motoru můžeme vidět na obrázku 7. [5]



Obrázek 7 - Ukázka metody Multibody System [5]

Výstupem ze simulací pomocí této metody mohou být údaje o akceleraci, rychlosti a poloze těles a také hodnoty sil, které mezi tělesy přenáší vazby. [5]

2.3 Využití

Tyto dvě metody popisují základní přístupy k řešení statických a dynamických simulací. Pro přesnou reprezentaci reálných situací a mechanismů je zapotřebí vybrat adekvátní metodu. Obě metody se také mohou kombinovat pro vytvoření kompletní pohybové i strukturální analýzy situace. Použitím metody Multibody System můžeme zjistit vstupní síly a točivé momenty do jednotlivých těles při určitých pohybech v rámci dynamických simulací. Z těchto sil můžeme vybrat největší z nich, nebo ty, které považujeme za nejnebezpečnější pro soudržnost konstrukce a materiálu. Tyto síly můžeme následně použít jako vstupní síly do statických simulací pomocí Metody konečných prvků. Touto metodou zjistíme, zda návrh konstrukce a použité materiály vyhovují tomuto zatížení.

V praktické části této práce se zabývám pouze dynamickými simulacemi, proto jsem použil metodu Multibody System.

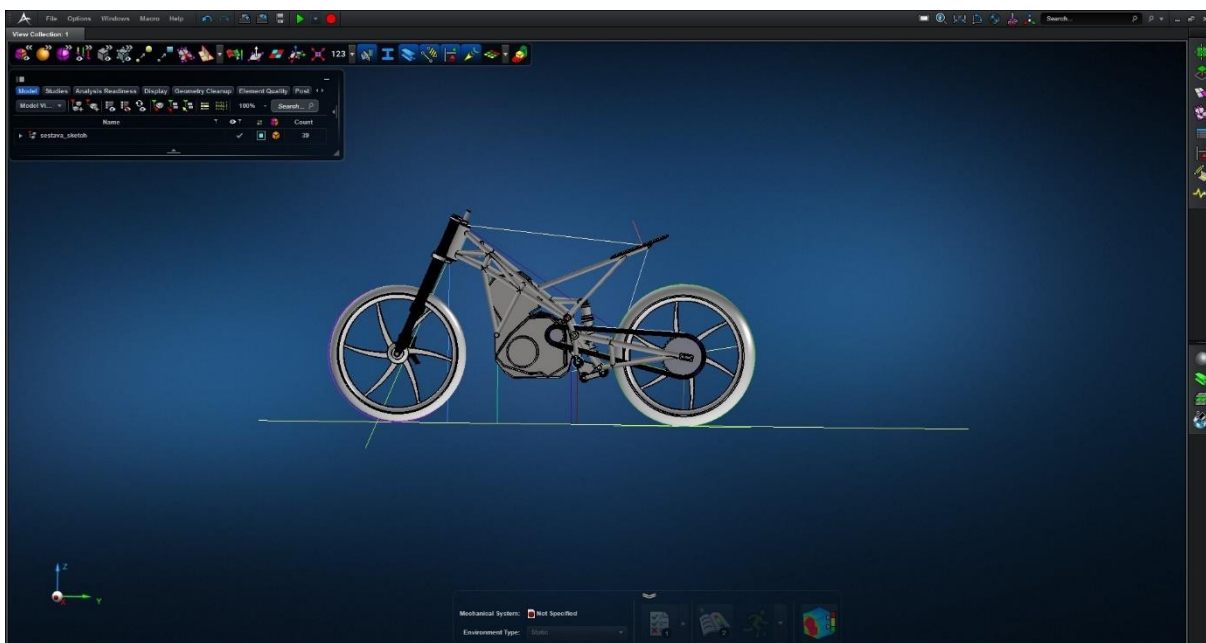
3 Tvorba a úprava modelu motocyklu

V praktické části této práce jsem se zabýval simulacemi jízdní dynamiky závodního motocyklu týmu CTU Lions v rámci soutěže MotoStudent. Jedná se o motocykl se spalovacím motorem. Tyto simulace zahrnovaly tvorbu a úpravy modelu motocyklu pro dynamické simulace a následné testy tohoto modelu. Jako testy modelu byly vybrány dva testy ze soutěže MotoStudent, a to test akcelerace na 150 m a test brzdění z rychlosti 80 km/h. V této kapitole se zabývám tvorbou a úpravami modelu motocyklu a vším, co bylo nutné pro tuto činnost provést. Testy se zabývá kapitola 4 Testy modelu motocyklu.

Díky tomu, že motocykl, kterým se tyto simulace zabývají, byl v době psaní této práce již fyzicky postaven, bylo možné provést různá měření fyzického motocyklu pro zpřesnění reprezentace motocyklu v modelu.

3.1 První fáze úpravy modelu motocyklu

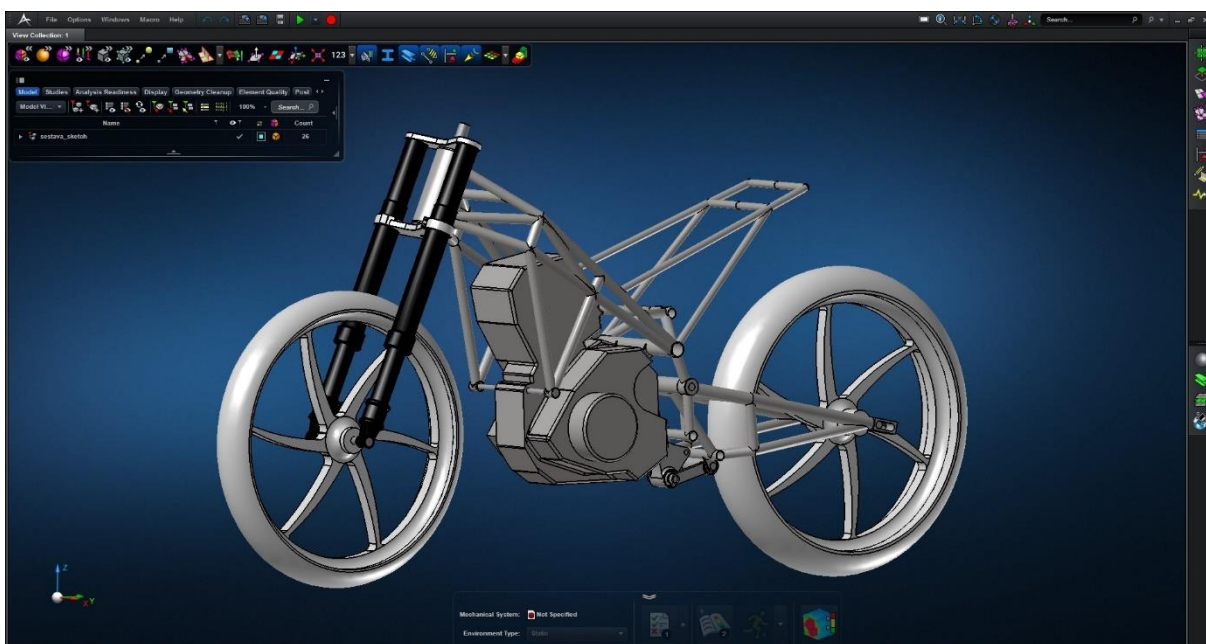
Pro účely dynamických zkoušek závodního motocyklu MotoStudent jsem použil základní geometrický model motocyklu vytvořený Ondřejem Pokorným z týmu CTU Lions. Model jsem dále upravoval pro použití v softwarových produktech MSC Apex a MSC Adams. Tyto produkty jsem použil pro tvorbu a úpravu modelu a jeho následné testování a zpracování výsledků. Na obrázku 8 můžeme vidět základní geometrický model v programu MSC Apex. [5] [6]



Obrázek 8 - Základní geometrický model motocyklu

Tento model obsahuje geometrický model rámu, zadní kyvné vidlice, předního odpružení, zadního odpružení, uchycení zadního odpružení (pákový systém), uchycení předního odpružení (tzv. brýle motocyklu), předního a zadního kola a zjednodušený model motoru. Tento zjednodušený model motoru obsahuje motor a přidružené části související s motorem.

V tomto modelu se také vyskytovaly prvky, které nebyly vhodné pro mé účely. Byly to například čáry, body a deska sedadla, která do modelu byla přidána pro účely statických simulací. Tyto zbytečné prvky bylo nutné smazat. Také jsem smazal řetěz převodu motoru, jelikož jsem v dynamických simulacích aplikoval točivý moment motoru přímo na kolo. Použití řetězu k tomuto úkonu by sice zpřesnilo simulace motocyklu, ale bylo by velmi náročné na simulační počítač, kvůli malým rozměrům jednotlivých řetězových částí. Dále bylo nutné smazat model zadního odpružení, protože v dalších fázích modelování je vytvořen specifický model zadního odpružení pro využití v dynamických simulacích. Přední odpružení bylo možno ponechat, protože se jedná pouze o „obal“ pružiny a tlumiče. V dalších fázích modelování jsem vytvořil model pružiny a tlumiče uvnitř tohoto geometrického „obalu“ pro využití v dynamických simulacích. Ostatní prvky důležité pro přesnou reprezentaci motocyklu jsem v modelu zanechal. Model po této první úpravě můžeme vidět na obrázku 9.



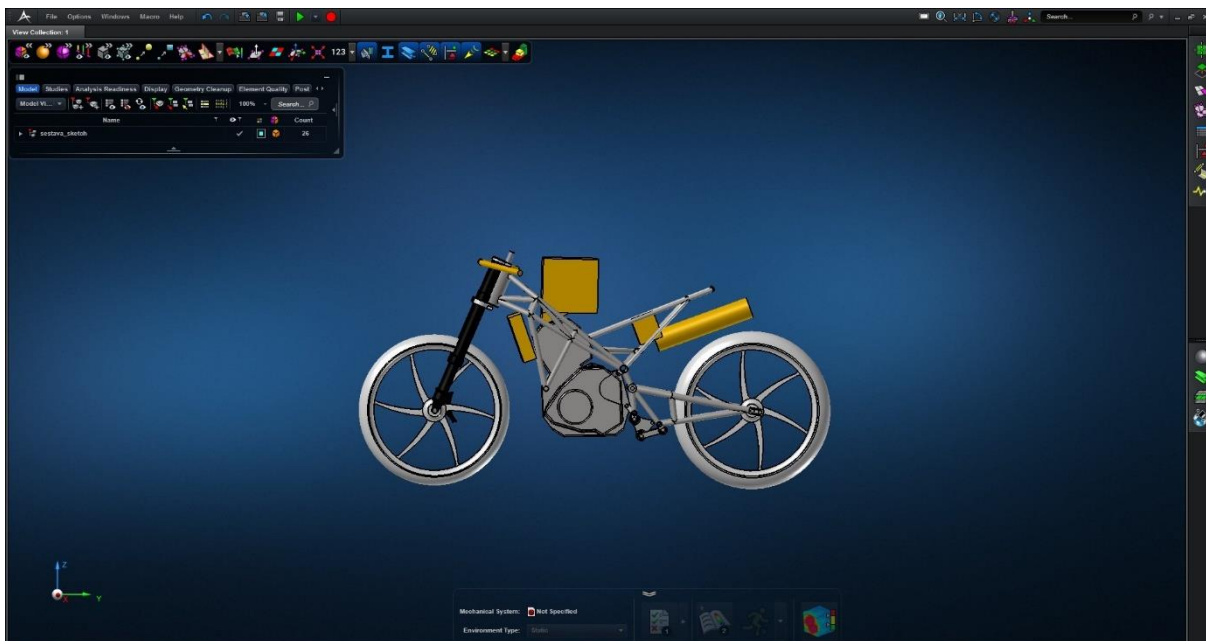
Obrázek 9 - Geometrický model motocyklu po prvních úpravách

3.1.1 Tvorba chybějících prvků motocyklu

Jak je na těchto obrázcích zřejmé, model není kompletní. Chybí v něm základní stavební prvky motocyklu, jejichž absence by měla velký vliv na přesnost dynamických zkoušek. Tudíž jsem alespoň základní prvky v programu MSC Apex vytvořil.

Rozhodl jsem se vytvořit tyto prvky: palivovou nádrž, chladič, řídítka, baterii a výfuk. Všechny tyto prvky jsem změřil na reálném testovaném motocyklu, aby byly co nejpřesněji reprezentované. Měření bylo provedeno svinovacím metrem o nejmenší jednotce 1 mm. Tvorba geometrického modelu nebyla předmětem této práce, proto jsou tyto prvky v modelu pouze zjednodušené.

Na obrázku 10 můžeme vidět vytvořené prvky v modelu. Nové prvky jsou vyznačeny žlutou barvou.



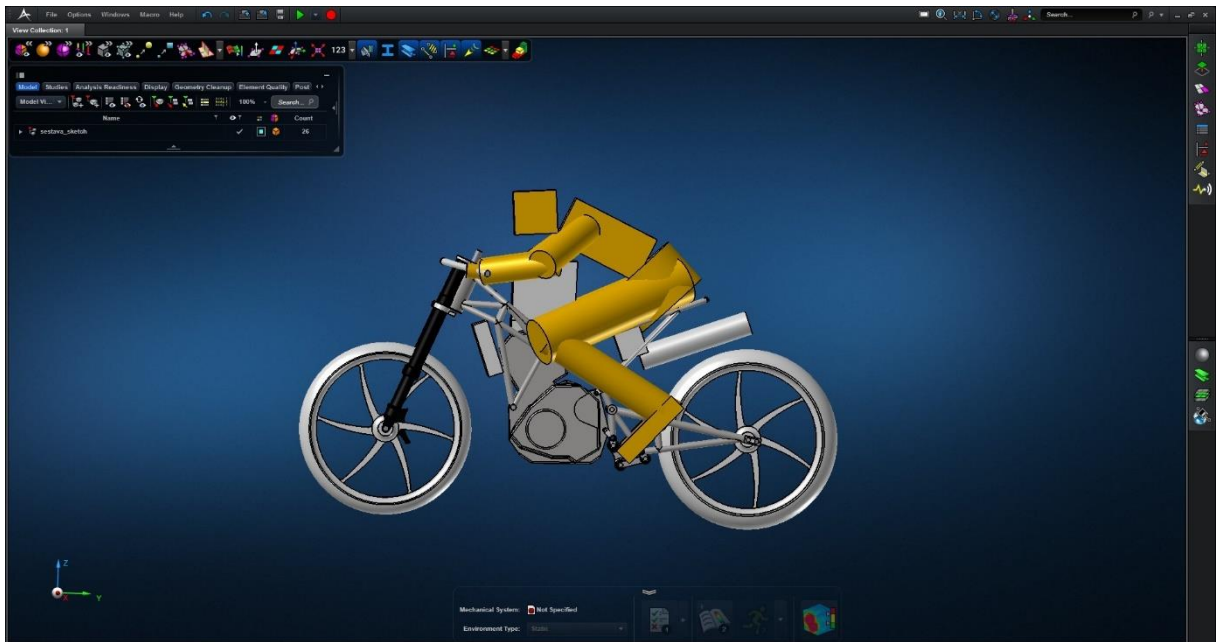
Obrázek 10 - Nově vytvořené prvky v modelu

Menší prvky motocyklu a kapotáž v modelu bohužel stále chybí, nicméně jejich hmotnost a pozice (parametry mající vliv na dynamické chování motocyklu) jsou započítány v celkovém těžišti motocyklu. Více v kapitole 3.4.1 Poloha těžiště v modelu.

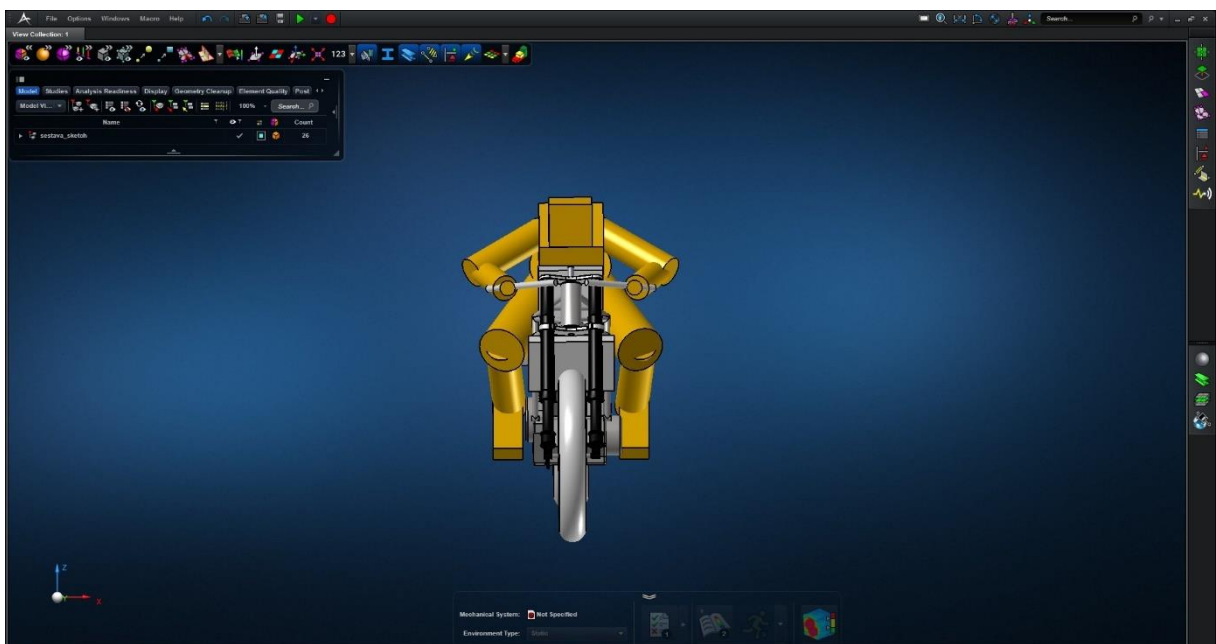
3.1.2 Tvorba jezdce

Dalším hlavním prvkem pro zkoumání dynamického chování motocyklu je jezdec. Bohužel jsem neměl k dispozici přesný model jezdce, proto jsem si opět vytvořil svůj zjednodušený model. Geometrické parametry jednotlivých částí těla jezdce v modelu jsem použil stejné jako parametry testovací figuríny čelního nárazu Hybrid III padesátiprocentní. [9] [10]

Pro základní model jsem zvolil zalehlou pozici jezdce, kterou v modelu můžeme vidět na obrázku 11 (pohled ze strany) a obrázku 12 (pohled zepředu). Na obou obrázcích je jezdec vyznačen žlutě.

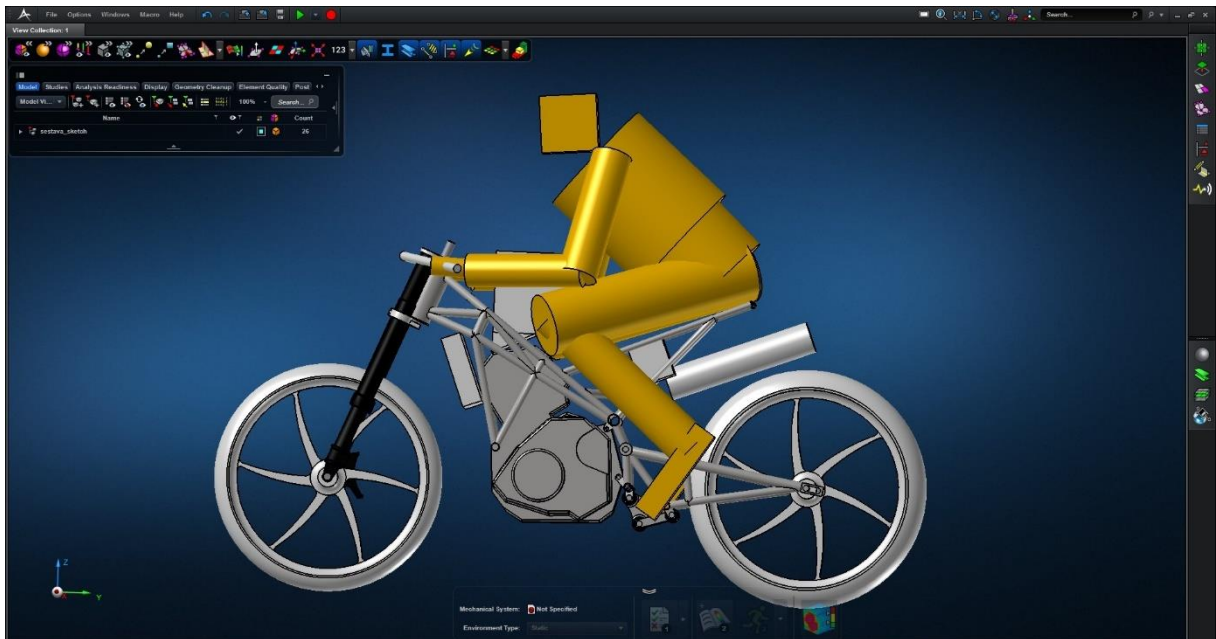


Obrázek 11 – Model zalehlé pozice jezdce, pohled ze strany

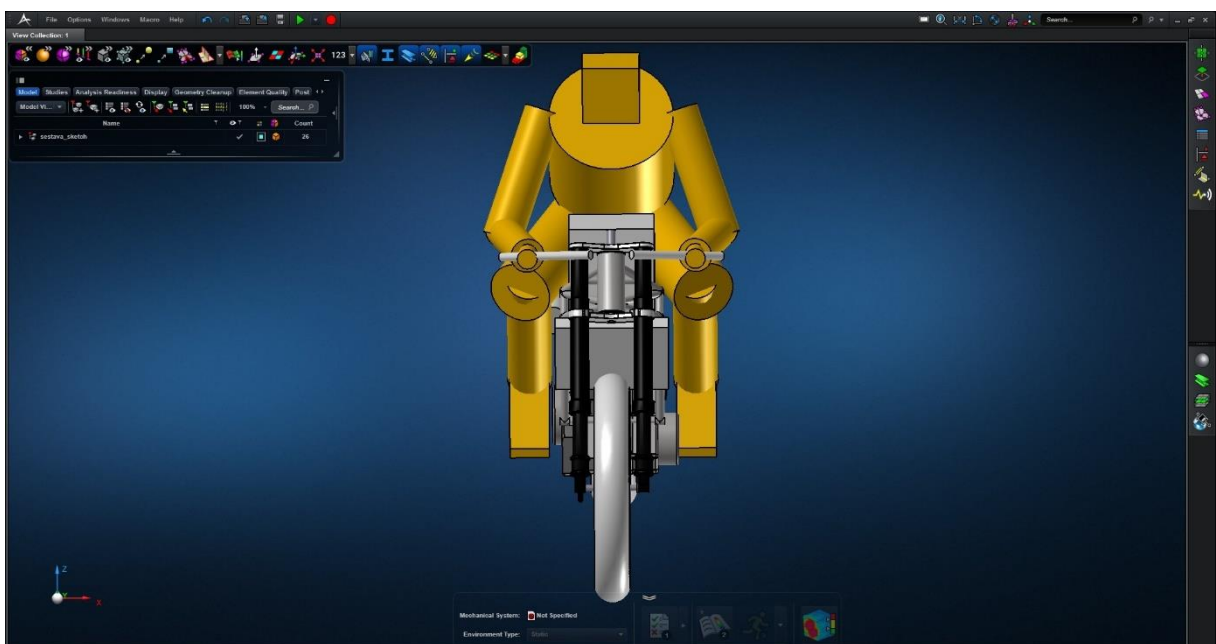


Obrázek 12 – Model zalehlé pozice jezdce, pohled zepředu

Pro větší variabilitu simulací jsem vytvořil i více napřímenou pozici jezdce. Jednotlivé varianty simulací jsou popsány podrobněji v kapitole 4 Testy modelu motocyklu. Tuto napřímenou pozici jezdce můžeme vidět na obrázku 13 (pohled ze strany) a obrázku 14 (pohled zepředu). Na obou obrázcích je jezdec vyznačen žlutě.



Obrázek 13 - Model napřimené pozice jezdce, pohled ze strany



Obrázek 14 - Model napřimené pozice jezdce, pohled zepředu

Tato poloha jezdce má odlišný tvar trupu těla oproti zalehlé poloze jezdce. Tento tvar byl původně zamýšlen i pro zalehlou polohu jezdce. V zalehlé poloze jezdce tento trup geometricky narušuje nádrž motocyklu, proto byl následně upraven na kvádrový tvar trupu těla. Tento odlišný tvar nemá žádný dopad na výsledky dynamických simulací, protože obě polohy jezdce mají nastaveny identické parametry. Více v kapitole 4 Testy modelu motocyklu.

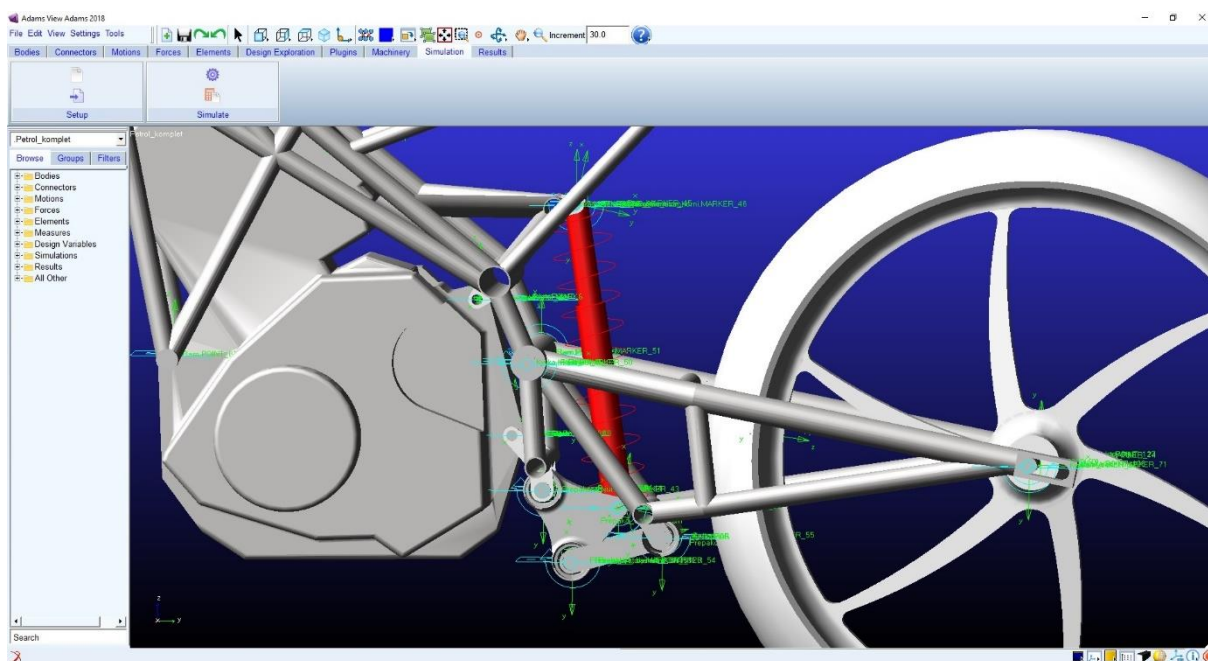
Celá tvorba geometrie proběhla pomocí funkcí tvoření geometrie v programu MSC Apex.

3.2 Příprava modelu na dynamické simulace

Po tvorbě a úpravě geometrického modelu jsem byl schopen model ve formátu Parasolid importovat do programu MSC Adams, ve kterém jsem model mohl začít připravovat na dynamické simulace.

3.2.1 Vytvoření vazeb

Prvním krokem přípravy modelu v programu MSC Adams bylo vytvoření vazeb mezi jednotlivými prvky motocyklu. Jednotlivé prvky jsem vložil do MSC Adams postupně a jednotlivě, aby byly na sobě vzájemně nezávislé. Poté jsem mezi jednotlivými prvky vytvářel vazby tak, aby odpovídaly co nejvíce reálným vazbám. Tyto vazby byly buďto posuvné v ose, rotační kolem osy nebo pevné. Na obrázku 15 můžeme vidět ukázkou těchto vazeb v oblasti uchycení kyvné vidlice k rámu motocyklu a také uchycení zadního odpružení.

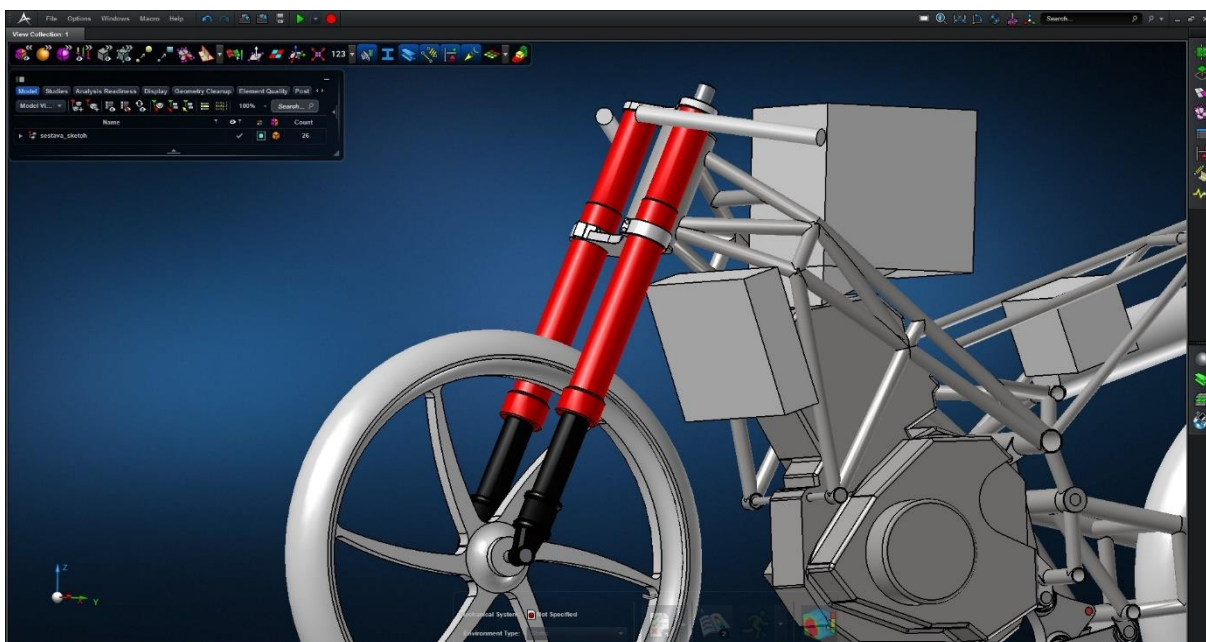


Obrázek 15 - Ukázka vazeb

V této oblasti vidíme převážně rotační vazby, které umožňují otáčení obou spojených částí kolem jedné osy a zároveň spojení obou částí v určitém místě (v místě této osy). Tyto vazby jsem použil tam, kde v realitě při jízdě dochází k těmto rotačním pohybům, například vazba: rám – kyvná vidlice.

Posuvné vazby umožňují vzájemný posun dvou částí v rámci jedné osy a také je spojují a zamezují vzájemnému pohybu těchto částí v ostatních osách. Tyto vazby jsem použil

například v předním odpružení, kde se spodní část krytu tohoto odpružení zasouvá do vrchní části (při správné funkci odpružení). Toto je vidět na obrázku 16. Vrchní část odpružení je znázorněna červeně a spodní černě.



Obrázek 16 – Spodní a vrchní části předního odpružení motocyklu

Pevné vazby uchyťí dvě spojené části pevně k sobě v jednom bodě. Tyto vazby jsou použity tam, kde nechceme mít žádný vzájemný pohyb mezi prvky (například vazba: motor – rám).

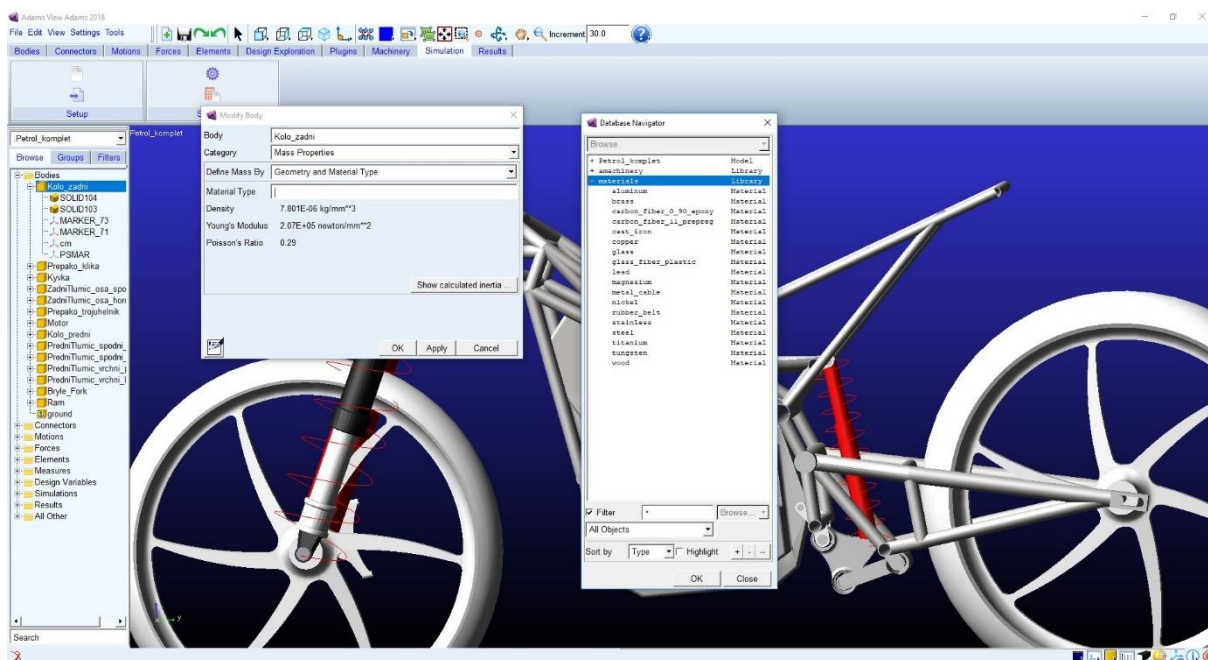
Díky těmto vazbám jsem byl schopen spojit celý model tak, aby jeho vazby fungovaly jako v reálném motocyklu.

3.2.2 Nastavení hmotnosti a momentu setrvačnosti

Dalším krokem v přípravě modelu bylo nastavení hmotnosti a momentu setrvačnosti jednotlivých částí.

Informace o hmotnosti jednotlivých částí se dají do programu přímo zapsat, nebo lze zadat hustotu materiálu, ze kterého je prvek vytvořen. Tento materiál je možno vybrat z knihovny materiálů přímo v programu, nebo samostatně vytvořit. Program si dále spočítá celkovou hmotnost tělesa z geometrického tvaru prvku a hustoty. Program tímto počítá s homogenním rozložením hmoty materiálu v tělese. Toto rozložení se dá změnit pomocí změny umístění bodu těžiště tohoto prvku.

Já jsem prvotně zvolil materiály, které nejvíce odpovídaly realitě. Mezi těmi byla převážně ocel a hliník. V zadávání hmotnosti jsem počítal s homogenním rozložením hmoty jednotlivých prvků. Seznam materiálů a okno výběru materiálu můžeme vidět na obrázku 17.



Obrázek 17 – Výběr materiálů a nastavení hmotnosti

Hmotnosti většiny dílů jsem byl schopen zjistit od výrobců a případným výpočtem. Některé díly jsem nechal definované pouze materiálem a jeho odpovídající hmotností, ale u některých bylo potřeba přesnou hmotnost zadat přímo do systému. Hmotnost nádrže jsem počítal s plným objemem paliva.

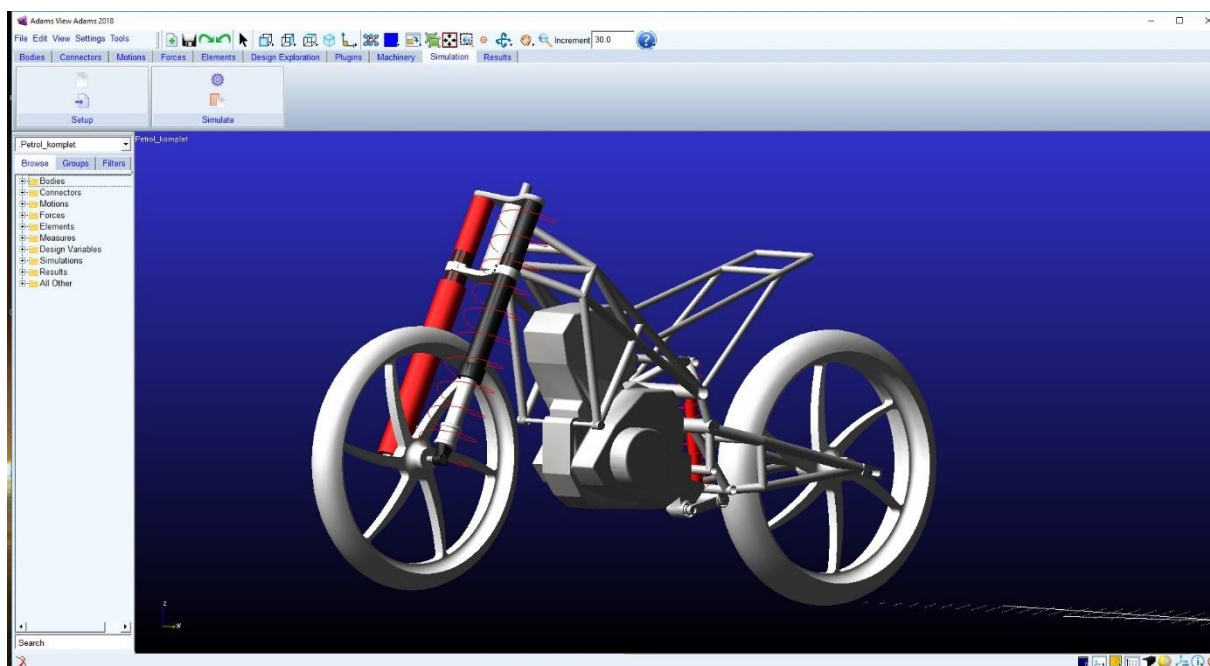
Další úpravy hmotnosti jednotlivých částí motocyklu proběhly po provedení měření těžiště motocyklu. Více v kapitolách 3.3.1 Měření polohy těžiště a 3.4.1 Poloha těžiště v modelu.

Pro zadání momentu setrvačnosti vůči jednotlivým osám jsem použil ten samý způsob jako pro zadání hmotnosti. Zadáním parametru materiálu (případně hustoty materiálu) a geometrickými parametry jednotlivých částí jsem programu umožnil výpočet všech momentů setrvačnosti všech prvků motocyklu k jednotlivým osám.

Pro jezdce jsem počáteční hmotnost a momenty setrvačnosti volil z parametrů testovací figuríny čelního nárazu Hybrid III padesátiprocentní a dále z průměrné hustoty lidského těla (985 kg/m^3). Hmotnosti jednotlivých částí těla jezdce byly také dále upravovány dle měření těžiště.

3.2.3 Vytvoření odpružení a stabilizace motocyklu

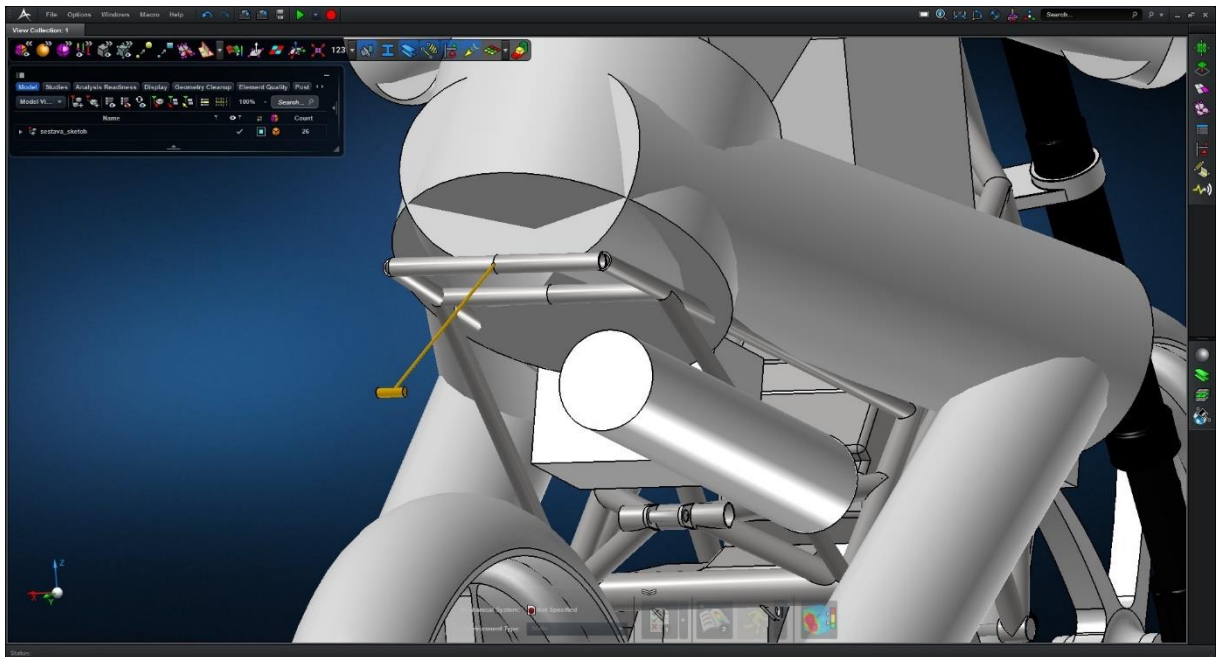
Dalším krokem přípravy modelu bylo vytvoření systémů odpružení, tedy tlumičů a pružin. Program MSC Adams má na tuto tvorbu specifickou funkci, která umožňuje mezi dvěma body vytvořit pružinu či tlumič, případně obě části zároveň. Jak můžeme vidět na obrázku 18, zadní odpružení bylo vytvořeno kombinací pružiny a tlumiče (znázorněno červeně) a v předním odpružení byl vytvořen tlumič v pravé části odpružení a pružina v levé části (znázorněno červeně).



Obrázek 18 - Ukázka odpružení motocyklu v modelu

Přední odpružení bylo pevně spojeno s geometrickým obalem tohoto odpružení, popisovaným dříve. Tímto, a použitím posuvných vazeb v tomto odpružení, bylo docíleno realistického pohybu odpružení a jeho správné funkce.

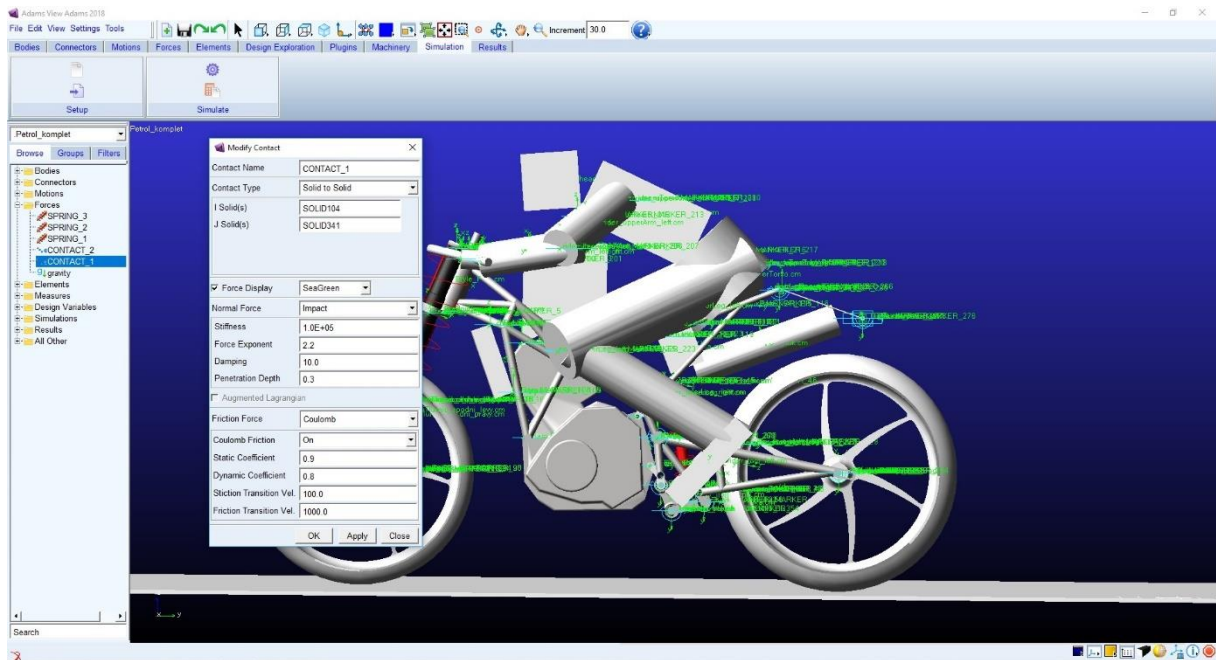
Jelikož se v této práci zabírám pouze simulacemi rozjezdu a brzdění motocyklu, bylo nutné vytvořit prvek, který udrží motocykl rovně a v jedné ose (ose jízdy). Tento prvek můžeme vidět na obrázku 19 (znázorněn žlutě) a jeho funkcí je pouze udržování směru jízdy. Prvek je uchycen k rámu motocyklu v oblasti sedla a skládá se ze dvou válců vzájemně spojených rotační vazbou a spojených s rámem motocyklu také rotační vazbou. Druhý konec tohoto prvku je zachycen posuvnou vazbou vůči zemi (prostředí) v ose jízdy. Prvek sám nemá žádnou hmotnost, takže nezasahuje ničím do výsledků simulací, pouze udržuje motocykl ve vzpřímené poloze.



Obrázek 19 – Prvek udržení směru jízdy

3.2.4 Vytvoření a nastavení pojízdné plochy pro motocykl

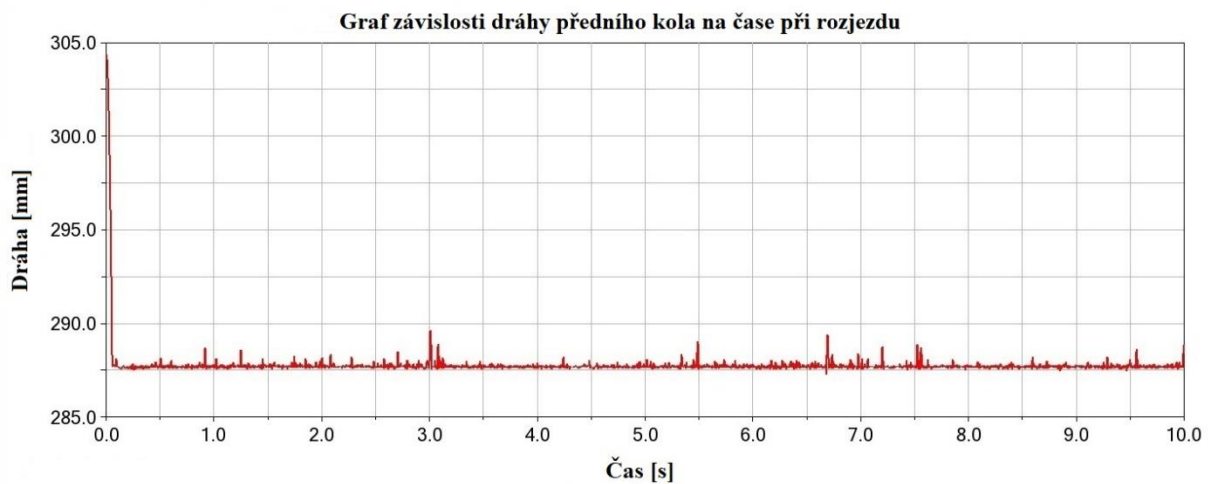
Dalším krokem bylo vytvoření plochy, po které bude motocykl jezdit. Geometrie plochy byla vytvořena v programu MSC Apex a následně importována do programu MSC Adams pro provedení úprav. Aby plocha fungovala jako podklad, po kterém by motocykl jezdil, a chovala se dle potřeb simulace, bylo nutné použít funkci „Contact“ mezi plochou a oběma koly motocyklu. Tato funkce zabraňuje propadnutí motocyklu deskou, a to tím, že vypočítává reakční síly, které mají působit na kola motocyklu, v reakci na působení kol motocyklu svojí vahou na tuto plochu. Na obrázku 20 můžeme vidět nastavení parametrů této funkce v programu MSC Adams. [11]



Obrázek 20 - Nastavení Contact funkce

První část těchto parametrů se zabývá tím, jak program počítá normálovou reakční sílu, která udržuje kola na této ploše. V této sekci se dají nastavit dva základní přístupy k počítání normálové síly, které využívají jiné parametry k vypočítání normálové síly. Prvním přístupem je „Impact“ funkce a druhým „Poisson“ funkce. Obě funkce používají jiné mechanismy k vypočítání normálové síly, ale obě jsou v mém případě platné. Rozdíl v nastavení parametrů a ve volbě těchto dvou funkcí se projeví především v odskakování kol od pojízdné plochy. [11]

Po vyzkoušení obou funkcí s různým nastavením parametrů jsem vybral pro mé simulace funkci „Impact“ s nastavením parametrů které jsou vidět na předešlém obrázku (Obrázek 20). Toto nastavení parametrů jsem zvolil po důkladném vyzkoušení různých nastavení parametrů. Při tomto nastavení kola motocyklu nejméně odskakují od podložky při jízdě. Na obrázku 21 můžeme vidět graf vertikálního pohybu (odskoku) předního kola při rozjezdu.



Obrázek 21 – Graf vertikálního pohybu předního kola

Model motocyklu na začátku simulace neleží přímo na podložce, ale je umístěn přibližně 18 mm nad podložkou, tudíž model prvních 0,1 s simulace padá. Následně dojde k dopadu kol na podložku. Poté už motocykl akceleruje a z grafu je zřejmé, že odskoky kola za jízdy nejsou větší než 2,5 mm. Toto je nejlepší výsledek, kterého jsem dosáhl s tímto nastavením „Impact“ funkce, proto jsem ji použil ve všech simulacích.

Druhou částí parametrů funkce „Contact“ jsou parametry tření. Proto, aby se motocykl mohl rozjet a brzdit, bylo zapotřebí použít tření. Třecí síla je v programu MSC Adams řešena Coulombovým třením. Toto tření je definováno statickým koeficientem tření a dynamickým koeficientem tření. Statické tření působí ve chvíli, kdy mezi třecími tělesy nedochází ke smyku. To nastává v našem případě při odvalování kola vůči podložce. Statický koeficient tedy udává závislost třecí síly a normálové síly působící na podložku ve chvíli, kdy nedochází ke smyku kola na podložce. V případě, kdy ke smyku dojde (například když velký točivý moment motoru působí na kolo, tím pádem okrajová otáčivá síla na kole je větší než maximální třecí síla), začne působit dynamické tření, jehož koeficient bývá menší nežli statický koeficient. [11]

Jelikož jsem neznal přesné koeficienty použitých pneumatik, použil jsem statický koeficient 0,9 a dynamický 0,8. Statický koeficient odpovídá koeficientu tření mezi pryží a suchým asfaltem. U reálného závodního motocyklu by mohl být tento koeficient i vyšší. Dynamický koeficient jsem zvolil pouze o 0,1 nižší, avšak k prokluzu a smyku by v mých simulacích docházet nemělo. U reálného závodního motocyklu může být tento koeficient i nižší. [12]

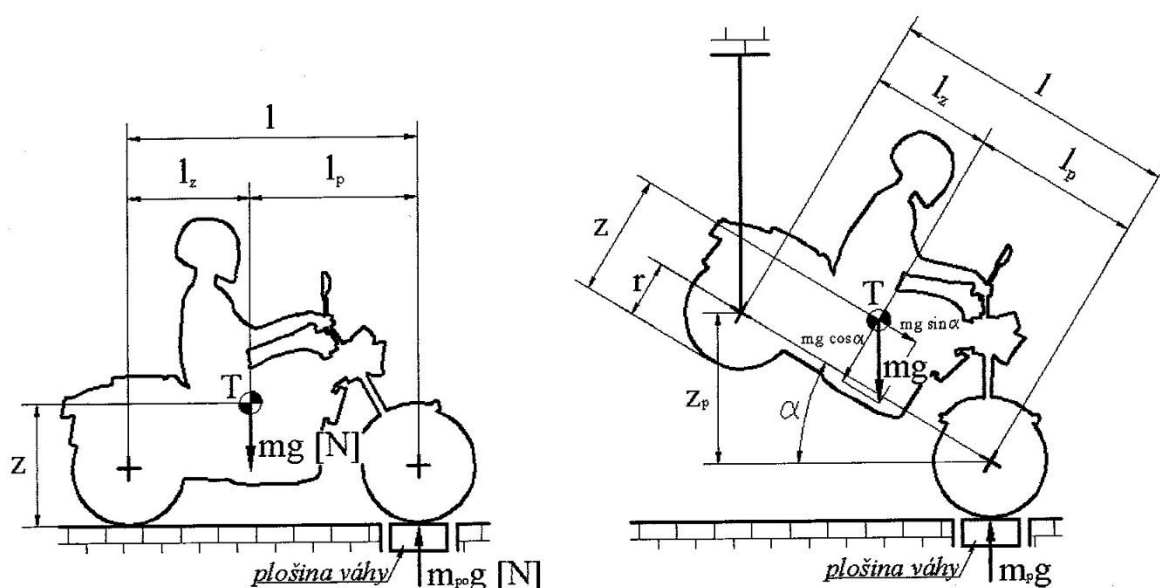
Poslední dva parametry se zabývají rychlostmi prokluzu, ve kterých začne přepočítání ze statického tření na dynamické. Jednotky těchto parametrů jsou v milimetrech za sekundu. Tyto parametry jsou takto nastaveny od výrobce programu a já je tak ponechal. [11]

3.3 Provedení měření chybějících parametrů

Pro zpřesnění modelu a kvůli chybějícím údajům jsem provedl několik měření na reálném motocyklu. Byla to měření podélné a výškové souřadnice těžiště motocyklu s jezdcem a bez jezdce, a také měření tuhosti přední a zadní pružiny. K oběma měřením jsem využíval dvě tenzometrické váhy.

3.3.1 Měření polohy těžiště

Měření polohy těžiště proběhlo dle metodiky, kterou můžeme vidět na obrázku 22.



Obrázek 22 - Metodika měření těžiště [2]

Souřadnice X, tedy podélná poloha těžiště, byla zjištěna vážením na tenzometrických vahách ve vzpřímené poloze (váhy byly pod oběma koly). Proběhlo měření nejdříve bez jezdce a následně s jezdcem. V motocyklu byly přítomny všechny provozní kapaliny a jezdec měl nasazenou helmu. Měření proběhlo třikrát, aby se zmenšila nepřesnost měření. Přesnost mohla být ovlivněna ručním přidržováním motocyklu ve vzpřímené poloze. Tento postup byl zvolen z důvodu nemožnosti uchycení motocyklu ve vzpřímené poloze jiným způsobem. Měření s jezdcem proběhlo v jezdcově zalehlé pozici. Výsledky byly statisticky zpracovány. Měření podélné polohy těžiště bez jezdce můžeme vidět na obrázku 23. Měření podélné polohy těžiště s jezdcem můžeme vidět na obrázku 24. [2]



Obrázek 23 - Měření podélné polohy těžiště bez jezdce



Obrázek 24 - Měření podélné polohy těžiště s jezdce

Výpočet vzdálenosti těžiště od předního a zadního kola byl proveden pomocí momentové rovnice, ze které vychází vztah:

$$X = \frac{m_z}{m} * l = \frac{m_z}{m_p + m_z} * l$$

Kde:

X – vzdálenost těžiště od osy předního kola

m_z – měřená váha na zadním kole

m_p – měřená váha na předním kole

l – rozvor motocyklu

Souřadnice Z , tedy výšková souřadnice těžiště, byla zjištěna vážením na tenzometrických vahách s nadzvednutým zadním kolem motocyklu. Měření proběhlo nejdříve bez jezdce a poté s jezdce. V motocyklu byly přítomny všechny provozní kapaliny a jezdec měl nasazenou helmu. Bohužel nebylo možné aretovat odpružení motocyklu, což mělo za následek posun výškové polohy těžiště kvůli zatížení (vlastní vahou a jezdce). Tento fakt zvýšil nepřesnost měření. Pro zvýšení přesnosti měření bylo provedeno měření ve dvou výškových polohách zvednutí zadního kola motocyklu. Přesnost mohla být ovlivněna ručním přidržováním motocyklu ve vzpřímené poloze. Měření výškové polohy těžiště bez jezdce můžeme vidět na obrázku 25 (v jedné z výškových poloh). Měření výškové polohy těžiště s jezdce můžeme vidět na obrázku 26 (pro ukázkou v druhé z výškových poloh). [2]



Obrázek 25 - Měření výškové polohy těžiště bez jezdce v jedné poloze



Obrázek 26 - Měření výškové polohy těžiště s jezdcem v druhé poloze

Výpočet výškové souřadnice těžiště byl proveden z momentové rovnice viditelné na obrázku 22 vpravo. Po úpravě této rovnice se dostaneme ke vztahům:

$$m_p * \cos \alpha * l - m * [\sin \alpha * (z - r)] - m * \cos \alpha * l_z = 0$$

$$m_p = m * \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} * \frac{(z - r)}{l} + \frac{m * l_z}{l}$$

$$z = \frac{m_p * l}{m * \tan \alpha} - \frac{m * l_z}{m * \tan \alpha} + r$$

$$z = \frac{m_p * l - m * l_z}{m * \tan \alpha} + r$$

Kde:

m_p – měřená váha na předním kole

α – úhel naklonění motocyklu

l – rozvor motocyklu

z – výšková souřadnice těžiště

r – poloměr zadního kola

l_z – vzdálenost těžiště od osy zadního kola

Výsledky výpočtu těžiště motocyklu bez jezdce:

Podélná souřadnice těžiště od osy zadního kola = 64,24 cm

Podélná souřadnice těžiště od osy předního kola = 58,76 cm

Výšková souřadnice těžiště od podkladové plochy = 44,19 cm

Výsledky výpočtu těžiště motocyklu s jezdcem:

Podélná souřadnice těžiště od osy zadního kola = 57,05 cm

Podélná souřadnice těžiště od osy předního kola = 65,95 cm

Výšková souřadnice těžiště od podkladové plochy = 44,72 cm

Z těchto výsledků je patrné, že přidaná váha jezdce posune celkové těžiště motocyklu o 7,19 cm k zadní části motocyklu a o 0,53 cm výš. Toto je v souladu s teoretickým odhadem posunu těžiště.

3.3.2 Měření parametrů pružin

Jelikož jsem neměl k dispozici údaje o tuhosti přední pružiny motocyklu, muselo být provedeno měření tuhosti pružin motocyklu. Toto měření proběhlo také na reálném motocyklu, přičemž byl motocykl zatěžkán čtyřmi různými silami: vlastní tíhou motocyklu a třemi jezdci o různých hmotnostech. Pod kola motocyklu byly umístěny tenzometrické váhy. Byly naměřeny délkové posuny přední i zadní pružiny při každém ze čtyř zatěžkání, a také vzdálenost konce sedadlové části rámu k podkladové ploše, vzdálenost uchycení kyvné vidlice k podkladové ploše a vzdálenost středu brýlí motocyklu k podkladové ploše. Všechny tyto naměřené hodnoty byly zpracovány a z délky posunutí jednotlivých pružin byly vypočteny předběžné tuhosti pružin.

Zprůměrované výsledky výpočtu tuhosti pružin:

Tuhost zadní pružiny = 72,5 N/mm

Tuhost přední pružiny = 24,8 N/mm

U zadní pružiny byla při konstrukci motocyklu použita vložka o šířce 1 cm, která měla za účel předpětí pružiny. Tato vložka byla do výpočtů započtena. Údaj výrobce zadní pružiny udává její tuhost 70 N/mm. Tento rozdíl o 2,5 N/mm vznikl nejspíše nepřesností měření.

Měření vzdálenosti sedadlové části rámu k podkladové ploše, vzdálenosti uchycení kyvné vidlice k podkladové ploše a vzdálenosti středu brýlí motocyklu k podkladové ploše jsem využil k další kalibraci pružin v modelu. Více v kapitole 3.4.2 Nastavení odpružení v modelu.

3.4 Nastavení naměřených parametrů v modelu

Po provedení měření a získání potřebných údajů pro kompletní sestavu modelu jsem tyto údaje implementoval v programu MSC Adams.

3.4.1 Poloha těžiště v modelu

Těžiště a hmotnost motocyklu a jezdce v modelu byla upravena tak, aby co nejvíce odpovídala naměřeným hodnotám. Hmotnosti byly uzpůsobeny přidáním či ubráním hmotnosti jednotlivých částí těla jezdce a jednotlivých částí motocyklu. Jelikož model motocyklu neobsahuje všechny části jako reálný motocykl, byly hmotnosti částí, které v modelu nejsou obsaženy, započítány do existujících částí. Dále byly hmotnosti částí uzpůsobeny tak, aby poloha těžiště jezdce a motocyklu co nejvíce odpovídala naměřeným hodnotám.

Hmotnost jezdce a motocyklu odpovídá naměřeným hodnotám s rozdílem menším než 0,002 g. Poloha těžiště motocyklu bez jezdce a motocyklu s jezdcem je vidět zde:

Poloha těžiště motocyklu bez jezdce v modelu:

Podélná souřadnice těžiště od osy zadního kola = 64,24 cm

Podélná souřadnice těžiště od osy předního kola = 58,76 cm

Výšková souřadnice těžiště od podkladové plochy = 44,15 cm

Poloha těžiště motocyklu s jezdcem v modelu:

Podélná souřadnice těžiště od osy zadního kola = 57,08 cm

Podélná souřadnice těžiště od osy předního kola = 65,92 cm

Výšková souřadnice těžiště od podkladové plochy = 45,32 cm

Z těchto výsledků je vidět že většina parametrů byla do modelu převedena s vysokou přesností. Nejvyšší nepřesnost je u parametru výškové souřadnice těžiště, kde byla tato hodnota zvolena z důvodů vyšší nepřesnosti měření této hodnoty. Vyšší nepřesnost u měření této hodnoty vznikla z důvodu nemožnosti aretace odpružení motocyklu při měření, což mělo

za následek změny výškové polohy těžiště v průběhu měření. Dalším důvodem této nepřesnosti je, že základní geometrický model motocyklu byl sestaven v poloze nezátíženého odpružení motocyklu, což neodpovídá situaci měření.

3.4.2 Nastavení odpružení v modelu

Pro zpřesnění tuhosti pružin byla v modelu vytvořena zkouška, která simulovala chování motocyklu při měření.

Motocykl byl v modelu uchycen za rám na místě a zespodu do kol byly přidány síly odpovídající naměřené váze při zatěžování motocyklu jednotlivými silami. Po tomto zatížení došlo u přední i zadní pružiny ke stlačení. Následně jsem v modelu změřil tyto vzdálenosti: vzdálenost konce sedadlové části rámu k podkladové ploše, vzdálenost uchycení kyvné vidlice s rámem k podkladové ploše a vzdálenost středu brýlí motocyklu k podkladové ploše. V tomto experimentu podkladová plocha neexistovala, tudíž byly jako body reference použity osy kol. Nejdříve byly tuhosti pružin nastaveny podle výpočtu a následně upravovány tak, aby co nejvíce odpovídaly měření.

Po vyzkoušení různých nastavení jsem došel k těmto hodnotám:

Tuhost zadní pružiny = 70 N/mm + 0,9 cm vložka

Tuhost přední pružiny = 16 N/mm

Vložka o šířce 1 cm odpovídá předpětí zadní pružiny o 700 N. Tímto experimentem jsem zjistil, že toto předpětí je příliš velké a že ideální předpětí činí 630 N. To by odpovídalo vložce o šířce 0,9 cm. Toto může být zapříčiněno tím, že část vložky se nachází mimo rozsah pružiny, tudíž je její efektivní působení omezeno na 0,9 cm.

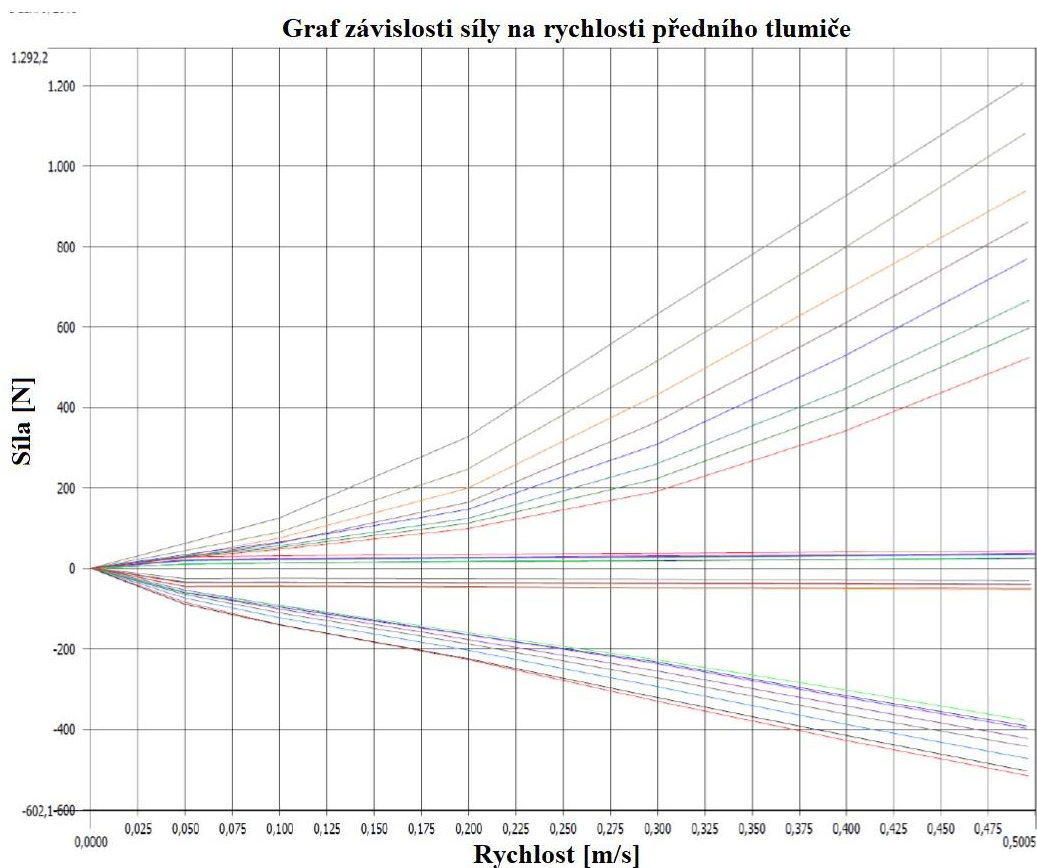
Výsledky naměřených vzdáleností pro tyto hodnoty nastavení tuhosti pružin můžeme vidět v tabulce 1:

Tabulka 1 - Výsledky naměřených vzdáleností pro různé síly

	Model	Měření	Model	Měření	Model	Měření
	Střed brýlí	Střed brýlí	Rám	Rám	Kyvná vidlice	Kyvná vidlice
Zatěžkání silou 1	82,0 cm	81,5 cm	73,8 cm	72,8 cm	35,5 cm	37,0 cm
Zatěžkání silou 2	80,6 cm	80,7 cm	70,2 cm	69,4 cm	33,0 cm	33,4 cm
Zatěžkání silou 3	80,5 cm	80,7 cm	70,4 cm	69,7 cm	33,0 cm	33,4 cm
Zatěžkání silou 4	80,0 cm	80,1 cm	69,0 cm	68,9 cm	32,1 cm	32,9 cm

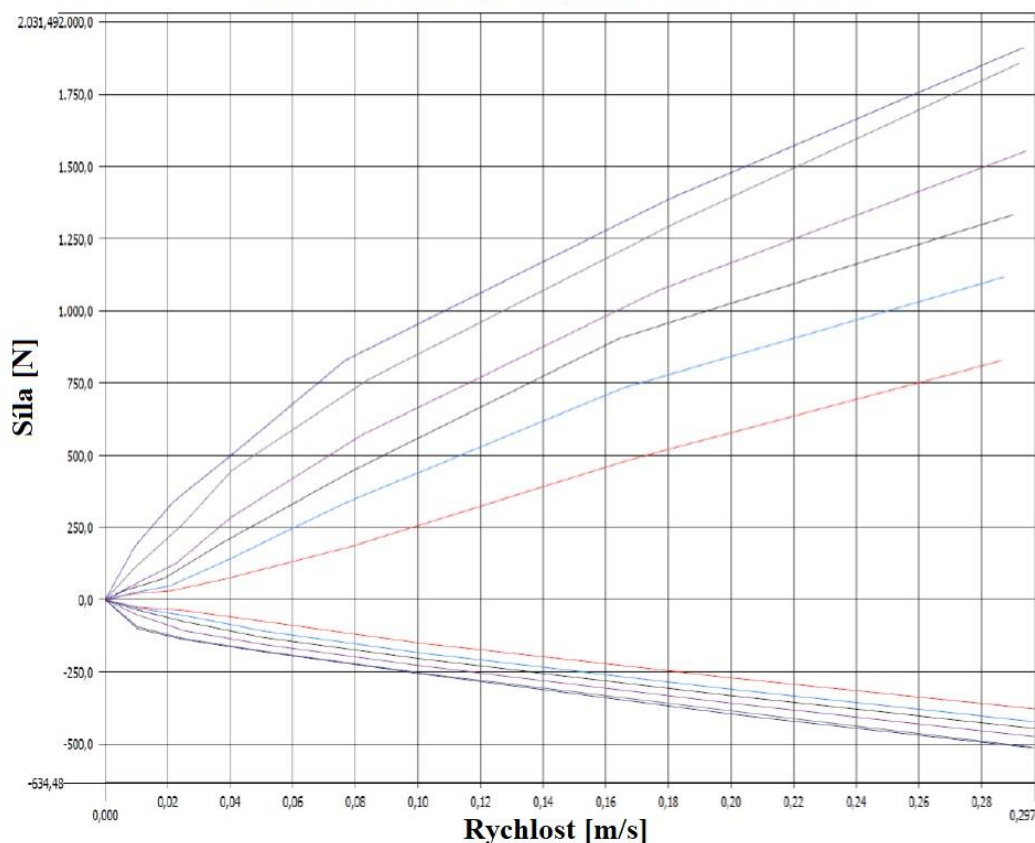
Z těchto výsledků je vidět, že průměrný rozdíl oproti měření je 0,55 cm (pokud počítáme pouze absolutní hodnoty odchylek od naměřených hodnot) a 0,23 cm (pokud počítáme celkové odchylky od naměřených hodnot). Tyto výsledky mají nejmenší rozdíly modelu oproti měření ze všech nastavení tuhosti pružin, které jsem zkoušel.

Dalším bodem nastavení modelu bylo nastavení tlumičů. Od dodavatele tlumičů jsem měl k dispozici grafy znázorňující průběh tlumící síly tlumiče v závislosti na rychlosti pohybu. Na obrázku 27 můžeme vidět tento graf pro přední tlumič a na obrázku 28 můžeme vidět tento graf pro tlumič zadní. [13]



Obrázek 27 - Graf tlumící síly předního tlumiče [13]

Graf závislosti síly na rychlosti zadního tlumiče



Obrázek 28 - Graf tlumící síly zadního tlumiče [13]

Tyto grafy obsahují křivky pro více nastavení obou tlumičů. Na motocyklu byly oba tlumiče nastaveny na největší tlumící síly, proto jsem pro základní model použil křivky s nejstrmějším stoupáním/klesáním. Křivky jsem zadal do programu pomocí základních bodů a nastavil jako křivky tuhosti jednotlivých tlumičů.

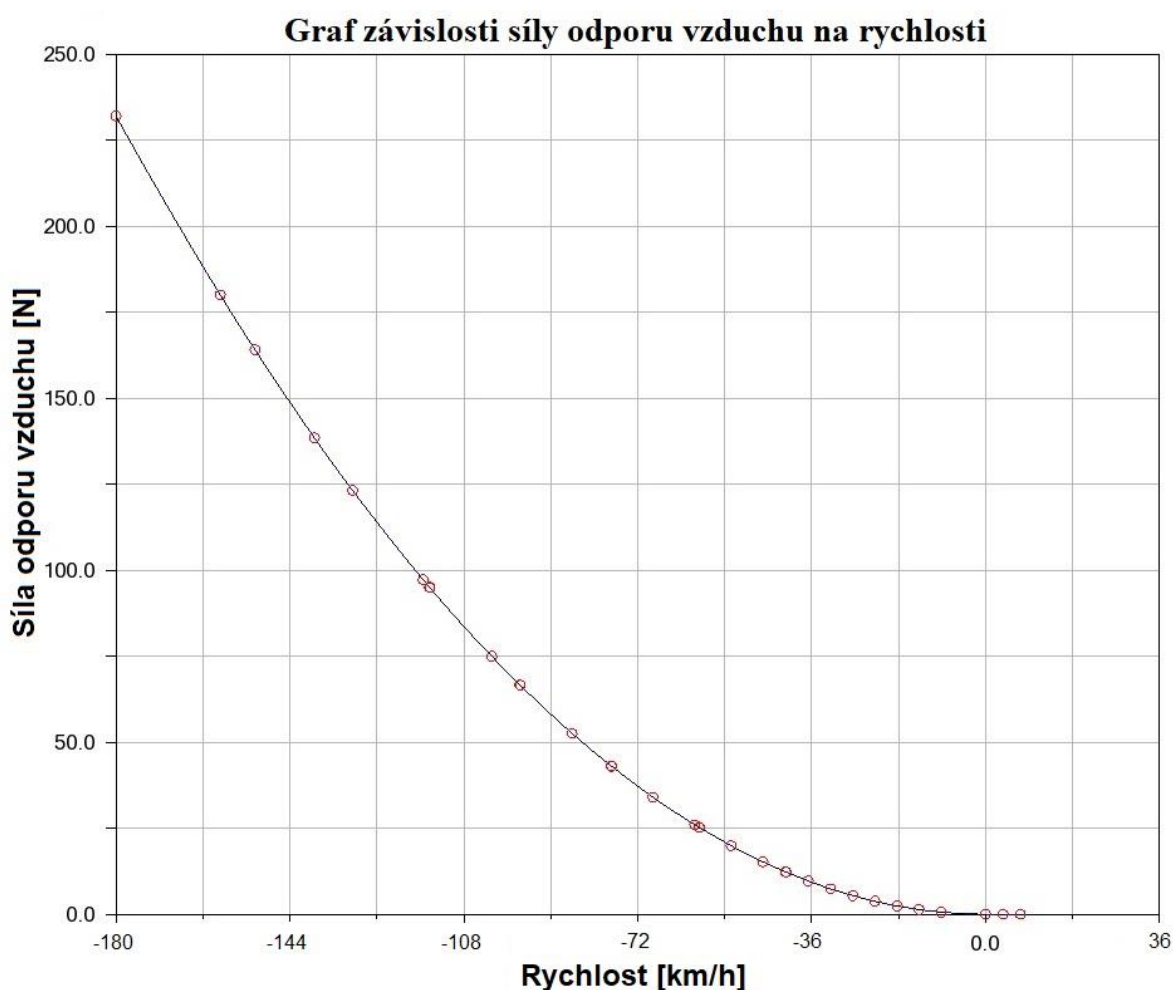
3.4.3 Jízdní odpory a síly v modelu

Pro přesnou simulaci rozjezdu a brzdění motocyklu bylo potřeba brát v potaz jízdní odpory působící na motocykl. [2]

Odpor valení nemohl být určen kvůli faktu, že v modelu nejsou kola tvořena pneumatikou, která se stlačuje, ale pouze pevným geometrickým prvkem. Také kontakt kol s podložkou je definován specifickým způsobem, který sice umožňuje průnik obou částí, avšak neobsahuje v sobě odpor valení. Odpor valení byl brán jako zanedbatelný v celkovém modelu.

Odpor setrvačnosti je obsažen v základu programu, tím pádem si ho program sám vypočítává, když působí zrychlení a síly na určitý objekt. Tento odpor nemusel být samostatně simulován.

Odpor vzduchu v programu samostatně neexistuje. Program se zabývá dynamickými simulacemi, ale ne simulacemi obtékání těles. Pro tyto účely jsem použil výsledky simulací obtékání motocyklu, které již dříve provedl Ing. Přemysl Toman z týmu CTU Lions v programu Autocad Flow Design. Z těchto simulací jsem se dozvěděl, že průměrný součinitel aerodynamického odporu je roven 0,31 a že čelní plocha motocyklu s jezdcem je rovna 0,48 m². V kombinaci s hodnotou hustoty vzduchu jsem byl schopen stanovit sílu odporu vzduchu v závislosti na rychlosti. Tuto závislost můžeme vidět na obrázku 29. V tomto grafu jsou údaje na ose x záporné, to je dáno tím, že se motocykl rozjíždí proti kladné orientaci osy rozjezdu. Síla odporu vzduchu tedy stoupá s rychlostí v negativním směru osy, avšak s rostoucí rychlostí motocyklu. Tento graf je výstupem programu MSC Adams.



Obrázek 29 - Graf síly odporu vzduchu

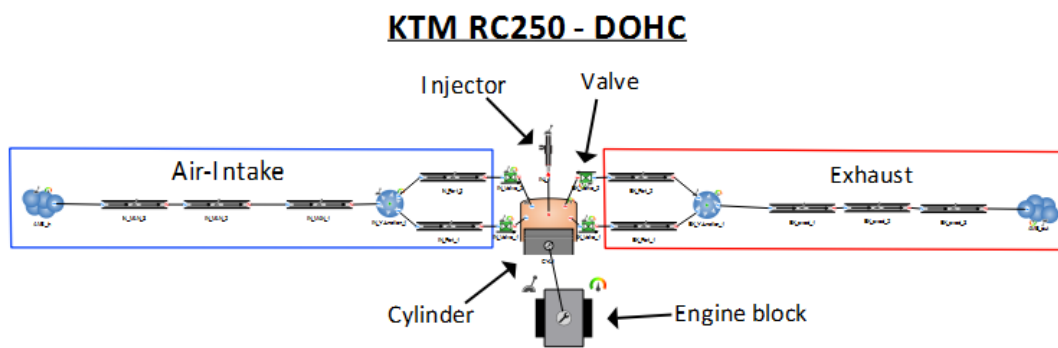
Odpor vzduchu jsem modeloval jako sílu působící v bodě. Orientace této síly je proti ose rozjezdu motocyklu. Bod kde tato síla působí, jsem určil jako bod přední části rámu motocyklu, v oblasti hlavy řízení. Tento bod je nejkonkrétnější bod, který je nejbližší výslednici působení odporu vzduchu na čelní plochu motocyklu.

Gravitační síla je v modelu také reprezentována, a to svojí vlastní funkcí. Tato funkce ve výsledku funguje stejně jako gravitace v reálném světě.

3.4.4 Reprezentace motoru v modelu

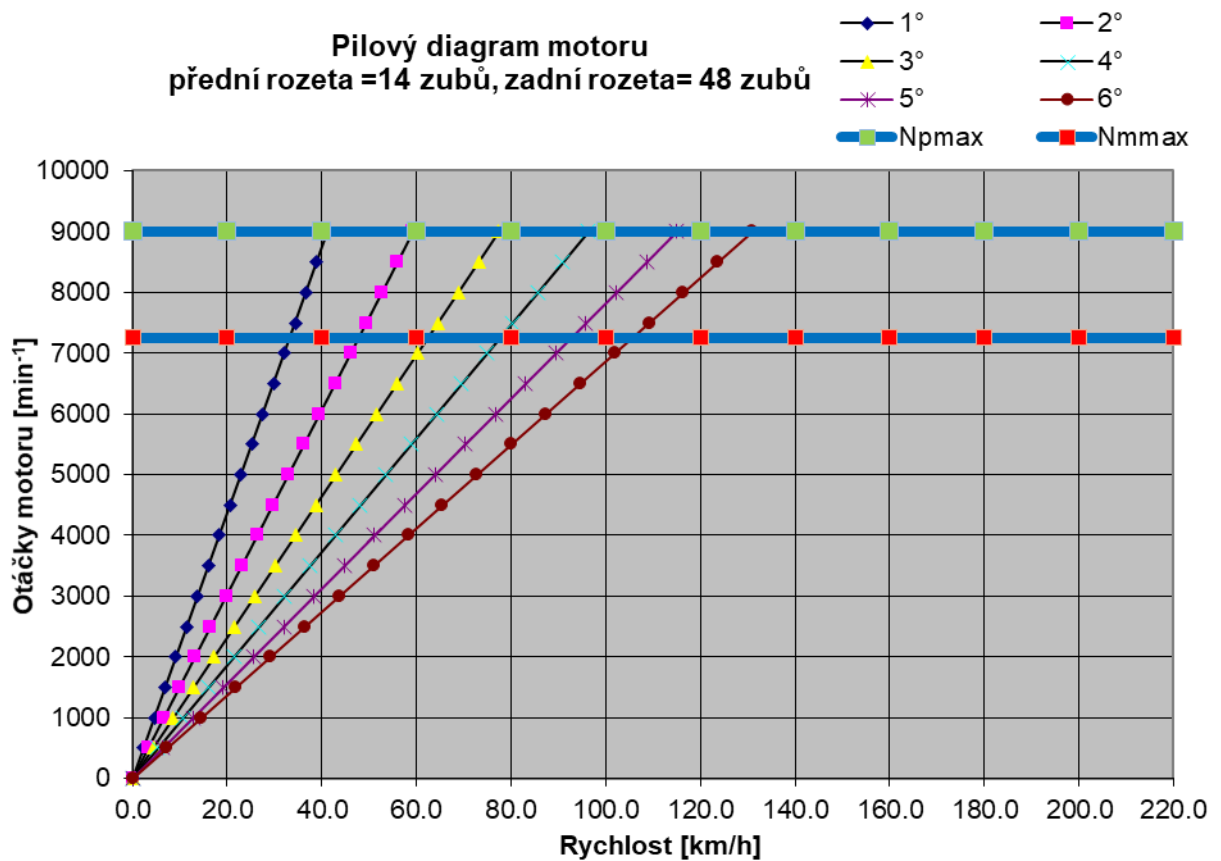
Pro přesnou reprezentaci síly, která se z motoru přenáší na kola, jsem použil nejen informace od výrobce motoru, ale také výpočty modelu motoru vytvořené Ing. Přemyslem Tomanem z týmu CTU Lions.

Pro potřeby mých simulací jsem potřeboval vědět průběh točivého momentu působícího na zadní kolo motocyklu při rozjezdu. Od výrobce motoru jsem zjistil základní parametry motoru, například převodové poměry, maximální točivý moment motoru při určitých otáčkách a maximální výkon při určitých otáčkách. Toto ovšem nestačilo pro určení průběhu točivého momentu působícího na kolo. Proto jsem použil i model tohoto motoru s výpočty výkonu a točivého momentu motoru z archivu týmu CTU Lions, který můžeme vidět na obrázku 30.



Obrázek 30 - Diagram modelu motoru [zdroj: archiv týmu CTU Lions]

Z dat, které mi z tohoto modelu byly poskytnuty, lze zjistit závislost výkonu motoru na otáčkách. Pro další postup jsem potřeboval zjistit otáčky motoru při rozjezdu a řazení převodových stupňů. Tato data jsem získal z výpočtů pilového diagramu, který počítal v rámci soutěže MotoStudent týmu CTU Lions. Tento pilový diagram motoru můžeme vidět na obrázku 31.



Obrázek 31 - Pilový diagram motoru [zdroj: archiv týmu CTU Lions]

S tímto pilovým diagramem jsem měl k dispozici všechna potřebná data pro výpočet točivého momentu působícího na zadní kolo při rozjezdu. Pro výpočet jsem uvažoval, že u každého převodového stupně nejdříve dosáhnou otáčky stupně maximálního výkonu, což znamená 9000 otáček za minutu. Poté se přeřadí na další stupeň. Takto by se mělo docílit, aby se otáčky motoru pohybovaly co nejvíce mezi 7000 otáčkami za minutu a 9000 otáčkami za minutu, tedy mezi otáčkami odpovídajícími největšímu točivému momentu motoru a největšímu výkonu motoru.

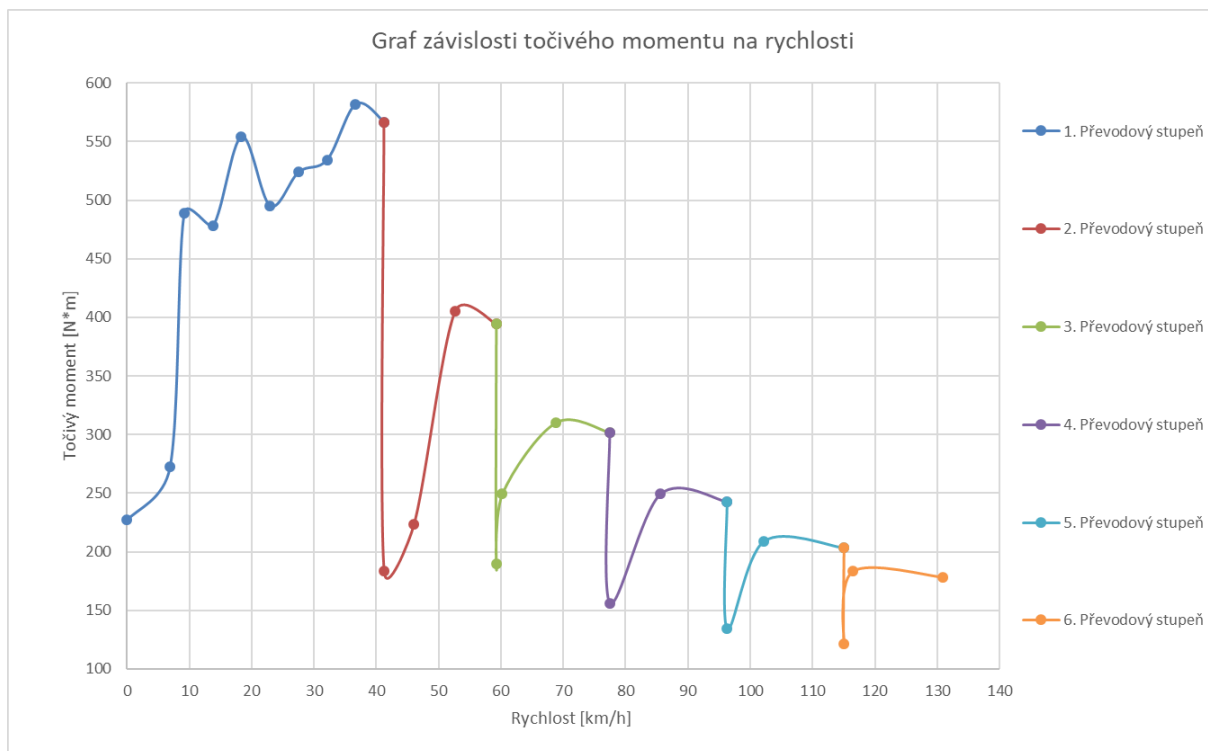
Z pilového diagramu jsem použil otáčky motoru v závislosti na rychlosti pro celý rozjezd motocyklu s řazením. Poté jsem pro tyto otáčky našel odpovídající výkon motoru, dle modelu motoru. Z otáček a výkonu motoru jsem vypočítal odpovídající točivý moment motoru a ten následně přepočítal všemi převodovými poměry na teoretický točivý moment na zadní rozetě motocyklu. Tento točivý moment působící na zadní rozetě motocyklu odpovídá točivému momentu, který působí při rozjezdu na zadní kolo.

Výpočet točivého momentu působícího na zadní kolo motocyklu v sobě nezahrnoval použití spojky motocyklu k přenosu pouze části točivého momentu motoru při rozjezdu a řazení. Proto bylo nutné nastavit točivý moment působící na zadní kolo motocyklu tak, aby co nejlépe

simuloval použití spojky. Otáčky motoru při volnoběhu jsou v rozmezí 1450-1550 otáček za minutu. Proto jsem použil jako nejnižší hodnotu otáček motoru (a odpovídající točivý moment motoru) 1500 otáček za minutu. Pro zařazení prvního převodového stupně jsem použil od nulové rychlosti do rychlosti 6,9 km/h (což odpovídá otáčkám motoru 1500 min⁻¹) postupné zvyšování točivého momentu motoru od hodnoty jedné poloviny vypočítaného točivého momentu motoru pro otáčky 1500 min⁻¹ do dvou třetin velikosti vypočítaného točivého momentu motoru pro otáčky 1500 min⁻¹. Dále od rychlosti 6,9 km/h do rychlosti 9,2 km/h (což odpovídá otáčkám motoru 2000 min⁻¹) jsem použil postupné zvyšování momentu motoru od hodnoty dvou třetin velikosti točivého momentu motoru odpovídajícího otáčkám 1500 min⁻¹ do plné hodnoty točivého momentu motoru odpovídajícího otáčkám 2000 min⁻¹. Pro ostatní převodové stupně jsem použil stejný postup, avšak jiné hodnoty. Pro zařazení druhého převodového stupně jsem od rychlosti 41,3 km/h do rychlosti 46,1 km/h použil hodnoty od jedné poloviny točivého momentu motoru odpovídajícího otáčkám 6273 min⁻¹ do třech pětín točivého momentu motoru odpovídajícího otáčkám 7000 min⁻¹ (otáčky odpovídají rychlostem). Dále od rychlosti 46,1 km/h do rychlosti 49,4 km/h jsem použil hodnoty od třech pětín točivého momentu motoru odpovídajícího otáčkám 7000 min⁻¹ do plného točivého momentu motoru odpovídajícího otáčkám 8000 min⁻¹. Pro třetí převodový stupeň jsem použil pro rychlosti od 59,2 km/h do 60,2 km/h odpovídající hodnoty od dvou třetin točivého momentu motoru pro otáčky 6884 min⁻¹ do sedmi osmin točivého momentu motoru pro otáčky 7000 min⁻¹. Dále pro rychlosti od 60,2 km/h do rychlosti 68,8 km/h jsem použil hodnoty od sedmi osmin točivého momentu motoru pro otáčky 7000 min⁻¹ do celého točivého momentu motoru pro otáčky 8000 min⁻¹. Pro čtvrtý převodový stupeň jsem použil pro rychlosti od 77,4 km/h do 85,6 km/h hodnoty od dvou třetin točivého momentu motoru pro otáčky 7236 min⁻¹ do celého točivého momentu motoru pro otáčky 8000 min⁻¹. Pro pátý převodový stupeň jsem použil pro rychlosti od 96,3 km/h do 102,2 km/h hodnoty od dvou třetin točivého momentu motoru pro otáčky 7539 min⁻¹ do celého točivého momentu motoru pro otáčky 8000 min⁻¹. Pro zařazení šestého převodového stupně jsem použil pro rychlosti od 115,0 km/h do 116,4 km/h hodnoty od dvou třetin točivého momentu motoru pro otáčky 7904 min⁻¹ do celého točivého momentu motoru pro otáčky 8000 min⁻¹.

Tyto poměry byly zvoleny na základě testování v modelu, které můžeme vidět v kapitole 4.1 Validace, a také dle skutečnosti, že s vyššími převodovými stupni motocyklu se zmenšuje rozdíl mezi otáčkami motoru pro vedlejší převodové stupně, tím pádem lze zařadit vyšší rychlost rychleji ve vyšších převodových stupních než v nižších převodových stupních. Tudíž u vyšších převodových stupňů byly zvoleny menší ztráty točivého momentu motoru.

Graf závislosti točivého momentu působícího na zadní kolo motocyklu (po těchto úpravách) na rychlosti motocyklu můžeme vidět na obrázku 32.



Obrázek 32 – Graf závislosti točivého momentu působícího na zadní kolo na rychlosti

Na tomto grafu můžeme vidět vypočtené křivky točivých momentů na zadním kole všech rychlostních stupňů v závislosti na rychlosti motocyklu. Každé velké klesání křivky znázorňuje přeřazení na další převodový stupeň. Tuto závislost jsem vybral proto, že tímto způsobem bylo možné vložit tato data do modelu. Závislost točivého momentu na čase by byla flexibilnější, ale bohužel nebylo možné zjistit závislost točivého momentu motoru na čase. Také se v jednotlivých testech zadání točivého momentu působícího na zadní kolo mění, tudíž vstupní závislost točivého momentu na čase by nebylo možné určit.

Tato závislost má nevýhodu v tom, že nelze nasimulovat okamžiky při řazení jednotlivých stupňů, kdy se nepřenáší žádný točivý moment motoru. Kdyby se v určitém bodě vyskytl točivý moment působící na zadní kolo rovný nule, motocykl by začal zpomalovat, poté zrychlovat a poté hned zase zpomalovat. Takto by se model zasekl ve smyčce a motocykl by nikdy nezrychlil na požadovanou rychlost. Tudíž bylo nutné započítat tyto okamžiky do celkové velikosti točivého momentu působícího na zadní kolo při řazení a po řazení.

Točivý moment v modelu působí přímo na kolo, a to v ose otáčení kola.

3.4.5 Reprerentace brzd v modelu

Pro simulace brzdění motocyklu jsem vybral způsob užití funkce točivého momentu jako u simulace motoru. Tento točivý moment působí přímo na kola, ale proti směru otáčení, čímž funguje jako brzdny moment brzd. Pro tyto účely bylo potřeba vypočítat brzdne schopnosti motocyklu, tudíž jeho obou brzd.

Z informací dodaných výrobcem brzd jsem zjistil rozměry brzdových destiček, jejich plochu, teoretické umístění a koeficient tření materiálu. Dále jsem zjistil maximální tlaky, které se mohou vyskytnout v brzdovém systému. Z těchto parametrů jsem vypočítal maximální sílu, kterou brzdový systém může vyvinout na brzdový kotouč. Dále jsem provedl měření střední vzdálenosti brzdových destiček od středu brzdového kotouče pro každé kolo. Díky této naměřené vzdálenosti jsem byl schopen určit maximální brzdny točivý moment pro každé kolo. [14] [15]

Tyto hodnoty můžeme vidět zde:

Maximální brzdny moment pro přední brzdový systém = 964,688 N*m

Maximální brzdny moment pro zadní brzdový systém = 350,350 N*m

Tyto maximální hodnoty nejsou v simulacích překročeny.

Dalším ovlivňujícím parametrem pro maximální brzdny moment je tření. V modelu jsem simuloval pouze situace se statickým třením, tedy bez prokluzu kol. V případě, že prokluz nastal, musela být brzdna síla upravena tak, aby prokluz nenastal. Tímto jsem dokázal získat brzdne momenty působící na kola, které jsou na hranici prokluzu. Na této hranici by mělo docházet k nejsilnějšímu brzdění motocyklu, tudíž k nejkratšímu brzdnému času. Více v kapitole 4.1 Validace.

V simulacích jsem počítal s konstantním brzdny momentem po celou dobu brzdění. Při reálném brzdění se tento brzdny moment může měnit. Neměl jsem bohužel k dispozici data k výpočtu změny tohoto brzdneho momentu v čase, tudíž jsem vybral jeho konstantní působení po celou dobu brzdění. Nicméně model byl validován dle reálné zkoušky brzdění, více v kapitole 4.1 Validace.

4 Testy modelu motocyklu

Všechny dynamické testy motocyklu proběhly ve dvou základních variantách. Akcelerace na 150 m a brzdění z rychlosti 80 km/h. Tyto dvě varianty byly provedeny ve všech testech pro porovnání. Tyto varianty jsou stejné jako testy v pravidlech soutěže MotoStudent, proto byly také vybrány. Ve všech testech platily stejné podmínky odporu vzduchu a parametry kontaktu mezi koly motocyklu a podložkou byly také ve všech testech stejné. Geometrie motocyklu je také ve všech testech identická.

Test akcelerace

Test akcelerace motocyklu probíhal tak, že motocyklu byl dodán točivý moment působící na zadní kolo od začátku simulace a pouze se zkoumalo za jaký čas dosáhne vzdálenosti 150 m. Také se zkoumalo, jaké rychlosti za tento čas dosáhne a další parametry, které budou popsány v kapitole 5 Výsledky.

Test brzdění

Test brzdění proběhl tak, že se motocykl nejdříve rozjel na rychlost 80 km/h za pomoci konstantního jednoduchého točivého momentu působícího na zadní kolo o velikosti 280 N*m. Tento točivý moment je stejný pro všechny testy a byl vybrán na základě jeho průměrné velikosti a jeho konstantnost byla z části dána jeho závislostí na čase. Díky této závislosti mohl být točivý moment působící na zadní kolo přerušen po dosažení rychlosti 80 km/h. Po tomto dosažení jel motocykl dál bez využití motoru či brzd po dobu 0,28 s, což je doba, po kterou byla započítána reakce a náběh brzdového systému. Toto číslo bylo určeno na základě validace modelu. Po tuto dobu na motocykl působil pouze odpor vzduchu. Po uběhnutí této doby motocykl začal brzdit konstantním brzdícím momentem. V tomto testu se zkoumala brzdná dráha od okamžiku, kdy přestane působit točivý moment působící na zadní kolo motocyklu. Dále se zkoumal čas do úplného zabrzdění a další parametry, které budou popsány v kapitole 5 Výsledky.

Model motocyklu je ve všech testech umístěn přibližně 18 mm nad plochou jízdy. To znamená že ve všech testech model motocyklu prvních 0,1 s padá pouze působením gravitace. Toto je způsobeno původním geometrickým modelem, který byl vytvořen v této vyšší poloze. Také jeho odpružení je na začátku simulace v nezátížené poloze. Toto bylo také dáno geometrickým modelem motocyklu. Jelikož při rozjezdu motocyklu je síla točivého momentu působícího na zadní kolo závislá na rychlosti motocyklu v ose jízdy a tato síla pro nulovou rychlost odpovídá nenulovému točivému momentu, nebylo možné model motocyklu v prvních okamžicích

simulace nechat dopadnout a ustálit pohyb odpružení motocyklu bez působení točivého momentu na zadní kolo. Ve všech testech motocyklu začíná točivý moment zadního kola působit hned od začátku simulace. Tato fakta ovlivňují všechny výsledky testů, avšak neovlivňují je natolik, aby znehodnotila výsledky simulací. Naopak díky tomuto faktu jsem mohl porovnávat vliv tuhosti tlumičů s větší přesností, jelikož tento pád z výšky umožňuje lepší pozorování funkce tlumičů.

Osy ve všech testech byly stejné a to takové, že kladná část osy směru jízdy je v negativním smyslu osy Y a kladná část výškové osy je v pozitivním smyslu osy Z. Tudíž všechny výsledky, které jsou závislé na ose jízdy mají parametry a výsledky v obráceném smyslu v záporné části osy Y.

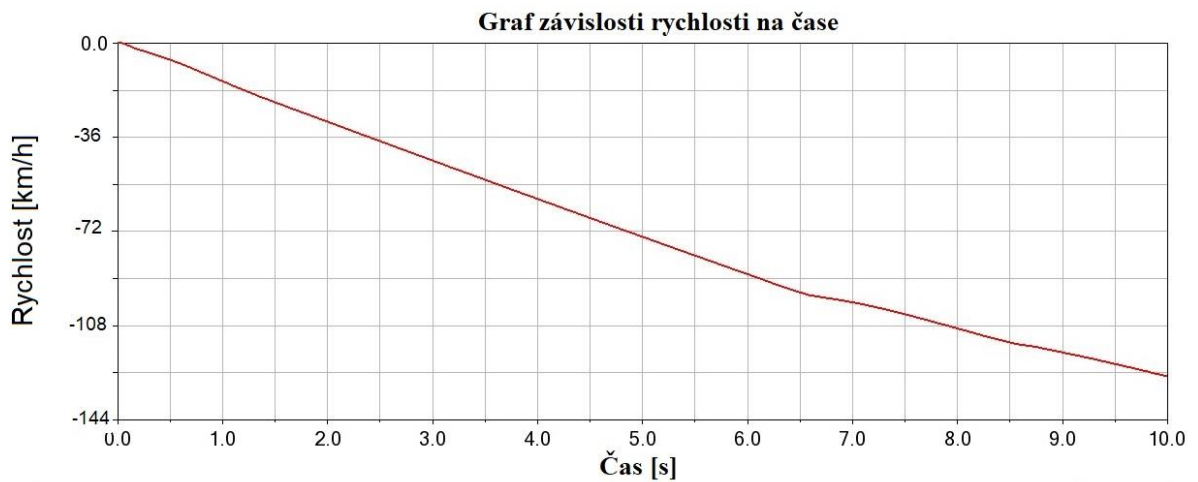
4.1 Validace

Prvním testem modelu motocyklu byla také validace jeho přesnosti a realističnosti. Tímto testem byl test dle pravidel soutěže MotoStudent, jak již bylo zmíněno dříve, kterému byl vystaven model motocyklu s nastavením všech parametrů tak, jak bylo zatím popsáno. V rámci tohoto testu se zkoušela přesnost těchto parametrů a to tím, že se porovnávaly výsledky tohoto testu s reálnými výsledky testů motocyklu, které proběhly ve Španělsku na závodech v rámci soutěže MotoStudent. Všechny základní vstupní parametry byly popsány v předešlých kapitolách, proto se v této kapitole budeme věnovat parametrům, které musely být kvůli validaci modelu změněny. Základní nastavení parametrů pro všechny další testy je stejné jako nastavení parametrů po tomto testu (kromě maximálního točivého momentu motoru a brzděného momentu).

4.1.1 Točivý moment působící na zadní kolo

Točivý moment pro rozjezd motocyklu musel být upraven. Pro test rozjezdu motocyklu byl použit vypočtený točivý moment působící na zadní kolo motocyklu, ale poupravený na základě simulací. Tato úprava byla zapříčiněna příliš velkým točivým momentem působícím na zadní kolo v určitých oblastech křivky. Tento točivý moment způsoboval prokluz kol motocyklu a přenášel tření do dynamické pozice. V simulacích bylo požadováno, aby kola motocyklu neprokluzovala a tím přesněji odpovídala realitě. Proto byl maximální točivý moment působící na zadní kolo motocyklu omezen na nejvyšší, který nezpůsoboval prokluz kol.

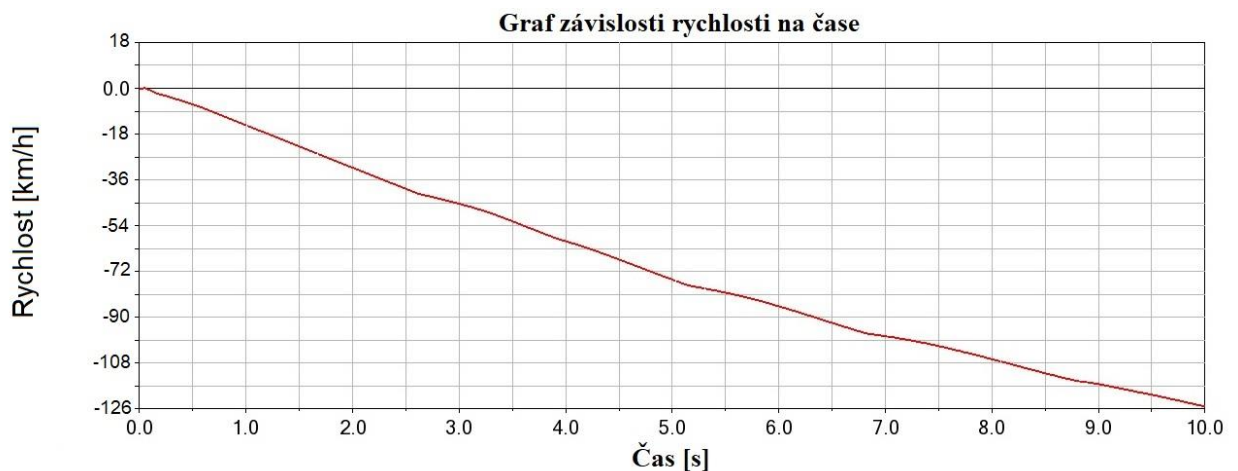
Prokluz kol mohl být identifikován nejen při sledování chování modelu, ale také z výsledného grafu závislosti rychlosti motocyklu na čase. Pro ukázkou máme na obrázku 33 výsledky simulace s prokluzem zadního kola, tedy před úpravou točivého momentu.



Obrázek 33 - Ukázka grafu rozjezdu s prokluzem

Na tomto obrázku je vidět konstantní zrychlování motocyklu až do času 6,6 s, kdy se začne zmenšovat jeho zrychlení. V tomto bodě dochází ke zpětnému přechodu z dynamického tření na statické, a to díky dostatečnému zmenšení točivého momentu, který nastal v závislosti na zvyšování rychlostních stupňů.

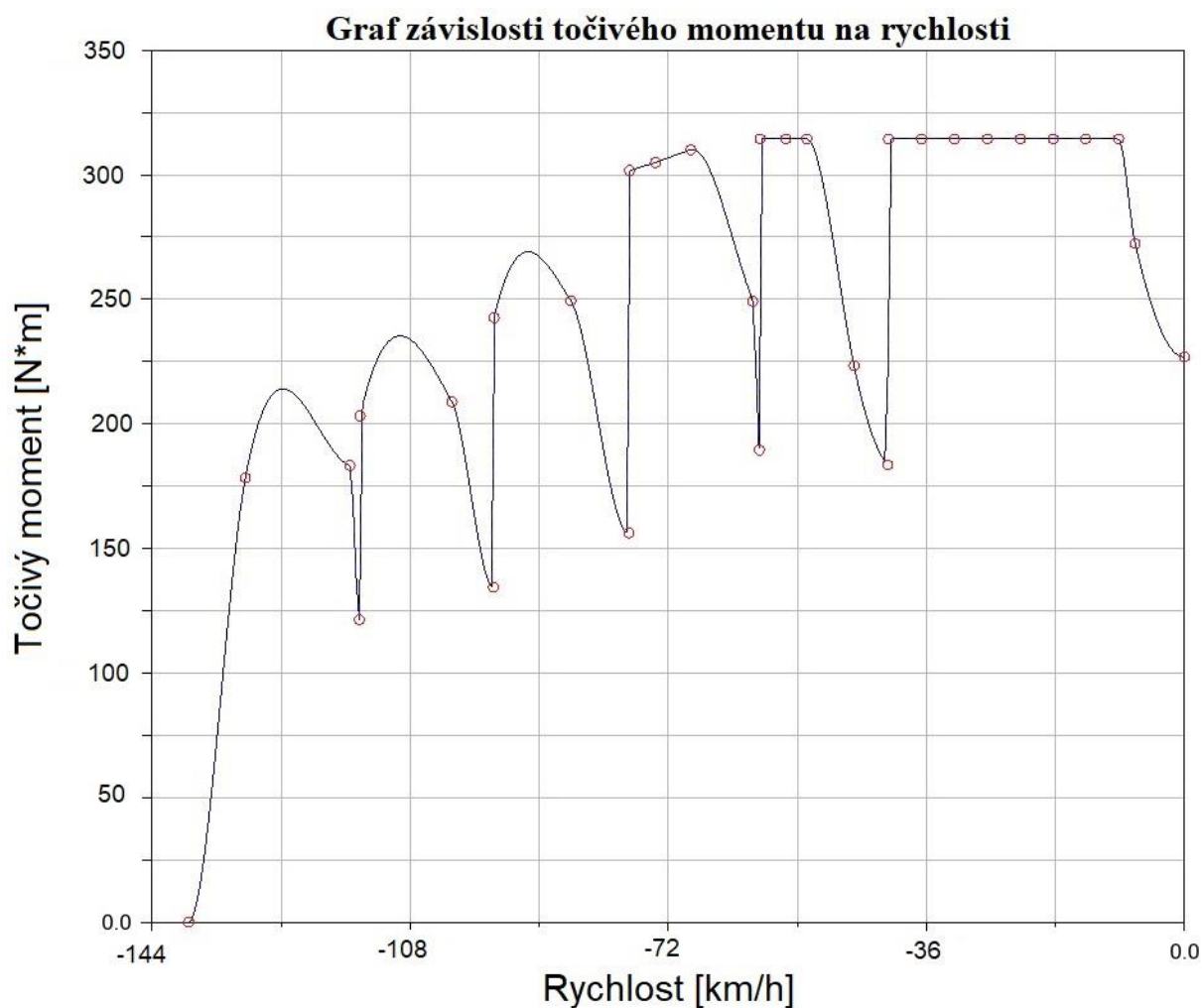
Na obrázku 34 můžeme vidět tento graf po úpravě točivého momentu.



Obrázek 34 - Graf rozjezdu motocyklu bez prokluzu

V tomto grafu můžeme oproti předchozímu grafu vidět, že zmenšení zrychlení motocyklu probíhá již po 2,6 s, tedy právě v čase přeřazení motocyklu na druhý rychlostní stupeň, kdy se zmenšuje točivý moment působící na kolo.

Hodnoty točivého momentu působícího na zadní kolo se tedy musely změnit a to tak, že byly ohraničeny maximálním točivým momentem, který dokáže na kolo působit bez prokluzu tohoto kola. Graf závislosti točivého momentu na rychlosti po úpravě můžeme vidět na obrázku 35.



Obrázek 35 – Graf závislosti točivého momentu působícího na zadní kolo na čase po úpravě

V tomto grafu vidíme, že první dva rychlostní stupně jsou omezeny horní hranicí točivého momentu. Třetí rychlostní stupeň je částečně omezen, jelikož jeho zadané hodnoty nepřesahují hodnotu maximálního točivého momentu, ale křivka, kterou jsem použil k interpolaci těchto bodů, přesahovala tuto hranici, proto musela být také upravena.

Také je vidět, že velikost točivého momentu jde k nule ke konci křivky. To je tím, že v této oblasti už se motocykl pohybuje v rychlostech kolem 130 km/h. V těchto simulacích se k těmto rychlostem nedostaneme, proto nebylo zapotřebí řešit podrobněji křivky ve vyšších rychlostech.

Tento graf je vygenerovaný programem MSC Adams a využívá ke spojení zadaných bodů funkci Akima interpolace. Tuto interpolaci jsem vybral na základě její plynulosti.

Velikosti maximálního točivého momentu působícího na zadní kolo, který lze pro tento test použít bez překročení hranice statického tření je zde:

Velikost maximálního točivého momentu = 314.4 N*m

S takto nastaveným točivým momentem rozjezdu bylo docíleno akcelerace na 150 m za čas 8,601 s. V tomto čase se nezapočítává čas 0,1 s, po který motocykl v prvních okamžicích padá na podložku. Reálnému motocyklu byl naměřen při akceleraci na 150 m čas 8,6 s. Na tento čas se upravovaly parametry zmíněné v předchozích kapitolách a také tento točivý moment. Bylo docíleno odchylky 0,001 s.

4.1.2 Brzdný moment brzd

U brzdného momentu nastal v testech stejný problém jako u točivého momentu působícího na zadní kolo. Vypočítané maximální brzdné momenty, které jsou brzdy schopny vyvinout, nemohly být použity, protože způsobovaly prokluz kol při brzdění. V tomto případě nebylo poznat z výsledného grafu, jestli prokluz kol nastal, jelikož brzdný moment byl konstantní, takže v grafu nebyly žádné významně viditelné změny. Tudíž bylo zapotřebí pozorovat simulace v simulačním prostředí a vizuálně určit, zda k prokluzu dochází, či ne. Jelikož v modelu platí zákon setrvačnosti a model motocyklu obsahuje odpružení, změna brzdného momentu jedné z brzd vždy ovlivnila maximální brzdný moment druhé z brzd. Tento fakt významně ztížil nalezení maximálních brzdných momentů pro obě brzdy.

Touto metodou byly zjištěny maximální brzdné momenty pro obě brzdy. Pro tento validační test vyšly maximální brzdné momenty takto:

Brzdný moment přední brzdy = 287.3 N*m

Brzdný moment zadní brzdy = 266.0 N*m

S těmito brzdnými momenty a s časem náběhu brzd rovným 0,28 s bylo docíleno brzdné dráhy 35,2 m. Reálnému motocyklu při testech ve Španělsku byla naměřena brzdná dráha 35,3 m.

Podrobné výsledky tohoto testu můžeme najít v kapitole 5 Výsledky.

Všechny ostatní parametry nastavení modelu motocyklu byly nastaveny tak, jak bylo popsáno v předchozích kapitolách.

4.2 Napřímená poloha jezdce

Dalším testem modelu motocyklu byl jeho test s druhým vytvořeným modelem jezdce. Jak již bylo popsáno v předchozích kapitolách, tento jezdec má oproti prvnímu jezdci napřímenou polohu. Kromě změněné polohy jezdce má jezdec naprosto stejné vlastnosti jako první jezdec.

Skládá se z částí těla, které mají stejnou hmotnost a stejné momenty setrvačnosti jako části těla prvního jezdce. Hlavní rozdíl mezi těmito testy je v narovnané poloze jezdce, tudíž ve změně polohy těžiště. Polohu těžiště s tímto jezdce můžeme vidět zde:

Podélná souřadnice těžiště od osy zadního kola = 56,74 cm

Podélná souřadnice těžiště od osy předního kola = 66,26 cm

Výšková souřadnice těžiště od podkladové plochy = 46,06 cm

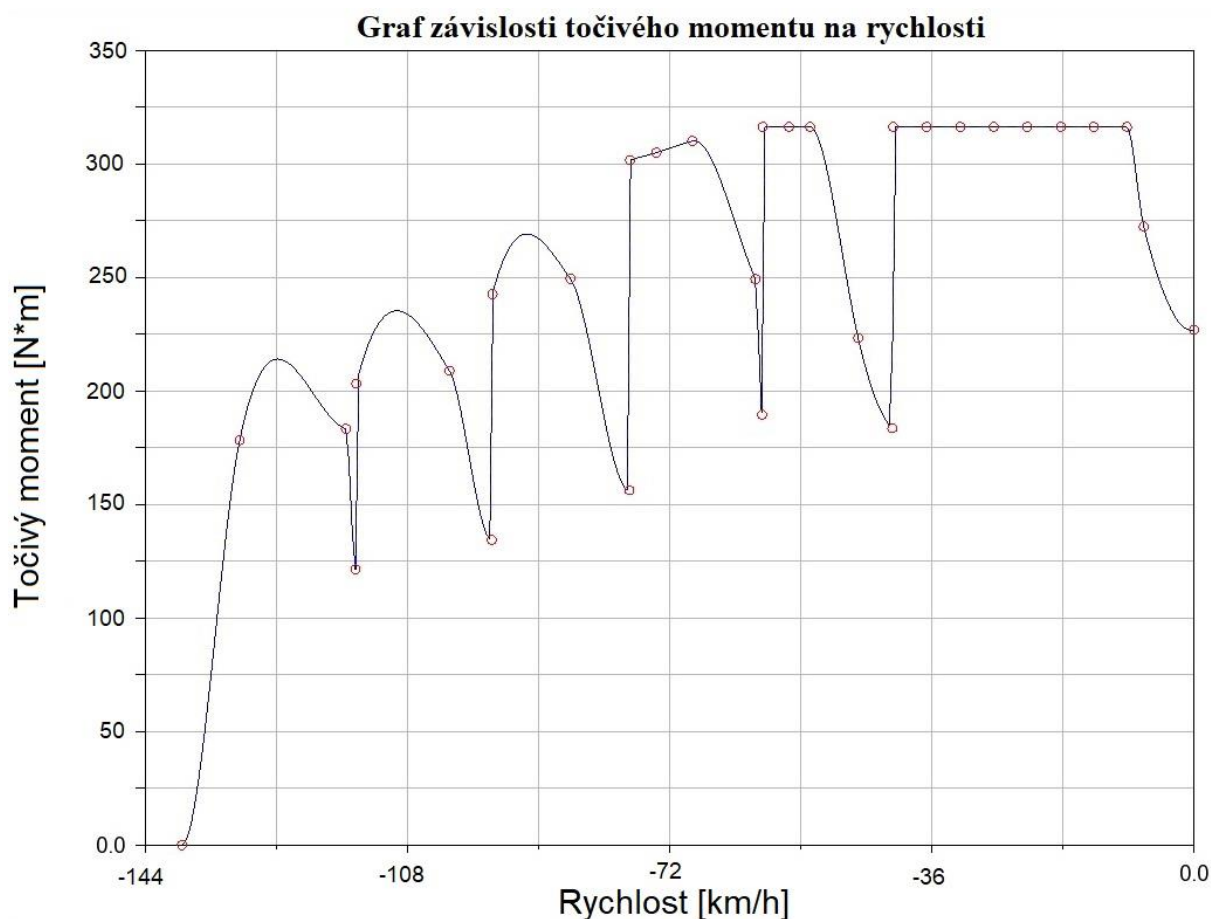
Z těchto hodnot plyne, že těžiště soustavy motocyklu a jezdce se posunulo změnou polohy jezdce o 0,34 cm k zadní části motocyklu a o 0,74 cm výše. Tento posun není příliš velký, ale umožní nám sledovat změny výsledků při změně polohy identického jezdce.

V reálném případě by měla tato poloha jezdce i jiný odpor vzduchu. Data pro vypočítání odporu vzduchu pro tuto polohu jsem bohužel neměl k dispozici, proto bylo nutné počítat se stejnými hodnotami jako v kapitole 4.1 Validace.

Změnou polohy těžiště se změnila maximální třecí síly při rozjezdu a brzdění, tudíž bylo nutné znovu najít maximální brzděné a točivé momenty.

4.2.1 Točivý moment působící na zadní kolo

Jelikož je v tomto testu jinak rozložena váha jezdce, působí i jiná třecí síla mezi podložkou a zadním kolem při akceleraci. Bylo opět nutné najít maximální točivý moment působící na zadní kolo, který nezpůsobí prokluz kola a zůstane v pásmu statického tření. Tento maximální točivý moment byl nalezen. Graf závislosti točivého momentu na rychlosti motocyklu s omezením tímto maximálním točivým momentem můžeme vidět na obrázku 36.



Obrázek 36 - Graf točivého momentu pro napřímenou polohu jezdce

Tento graf je velmi podobný grafu z kapitoly Validace, avšak hodnota maximálního točivého momentu je jiná. Tuto hodnotu můžeme vidět zde:

Velikost maximálního točivého momentu = 316.3 N*m

Tento maximální točivý moment je oproti testu validace větší. To je dáno změnou polohy těžiště, která umožnila větší části hmotnosti motocyklu působit na zadní kolo a tím umožnila zvětšení maximální třecí síly mezi podložkou a kolem. Toto bylo dáno posunem těžiště více dozadu, ale také posunem těžiště výš. Tento efekt vyšší polohy těžiště se projevil při zrychlení, kdy vyšší poloha způsobila větší stlačení zadní pružiny, tím pádem větší přenos síly k zadnímu kolu. To je dáno setrvačným efektem těla jezdce, který vytváří sílu působící proti zrychlení motocyklu. Díky vyšší poloze těžiště má tato síla delší rameno působení ku ose kol. To má za následek přenos větší síly do zadní části motocyklu na úkor přední části motocyklu. Tato síla se následně přenáší jako normálová síla mezi kolem a podložkou a je využita k výpočtu maximální třecí síly.

Všechny hodnoty maximálních točivých momentů pro všechny testy jsou přehledně popsány v kapitole 5.6 Shrnutí výsledků.

4.2.2 Brzdny moment brzd

Brzdny moment brzd musel být také upraven, a to na tyto hodnoty:

Brzdny moment přední brzdy = 291.8 N*m

Brzdny moment zadní brzdy = 264.2 N*m

Zde vidíme, že brzdny moment přední brzdy je větší oproti testu validace a brzdny moment zadní brzdy je menší. To je dáno rozložením váhy při brzdění. Platí zde stejný efekt jako u akcelerace a to ten, že setrvačnost těla jezdce zvětší normálovou sílu působící na podložku předním kolem a zmenší normálovou sílu působící na podložku zadním kolem.

4.3 Změny tuhosti pružin

V těchto testech byl zkoušen vliv tuhosti pružin, specificky vliv zvětšení tuhosti zadní pružiny, zmenšení tuhosti zadní pružiny, zvětšení tuhosti přední pružiny a zmenšení tuhosti zadní pružiny na jízdní vlastnosti motocyklu. Tuhosti pružin v jednotlivých testech můžeme vidět zde:

Tabulka 2 - Tuhosti pružin v testech změny tuhosti pružin

Test	Tuhost [N/mm]	Předpětí [N]
Větší tuhost zadní pružiny	110	630
Menší tuhost zadní pružiny	30	630
Větší tuhost přední pružiny	22	0
Menší tuhost přední pružiny	10	0

Předpětí zadní pružiny bylo ponecháno stejné jako v základním testu, ale samotná tuhost byla změněna.

Točivý moment působící na zadní kolo

Točivý moment byl opět změněn a to tak, že byl omezen jinou maximální hodnotou. Hodnoty maximálních točivých momentů jsou pro všechny testy v tabulce 3.

Tabulka 3 – Maximální točivé momenty v testech změny tuhosti pružin

Test	Maximální točivý moment[N*m]
Větší tuhost zadní pružiny	314.9
Menší tuhost zadní pružiny	311.0
Větší tuhost přední pružiny	316.4
Menší tuhost přední pružiny	309.7

Grafy průběhu točivého momentu vypadají velmi podobně jako v předchozích testech, proto není nutné je zobrazovat.

Obecně lze k těmto hodnotám říci, že větší hodnoty tuhosti pružin posouvají těžiště motocyklu výš, jelikož nedojde k tak velkému stlačení pružin pod vahou jezdce. Toto zvýšení polohy těžiště má za následek zvýšení maximální třecí síly mezi kolem a podložkou, tudíž umožňuje použití vyšší hodnoty maximálního točivého momentu. Obrácený efekt mají menší tuhosti pružin. Zvětšení tuhosti zadní pružiny má také za následek posun těžiště vpřed. To je dáno větším stlačením přední pružiny a menším stlačením zadní pružiny. Tento posun těžiště vpřed má za následek zmenšení celkové normálové síly mezi zadním kolem a podložkou a směřuje ke zmenšení maximálního točivého momentu. Zmenšení tuhosti zadní pružiny má obrácený efekt. Vyšší tuhost přední pružiny má za následek větší stlačení zadní pružiny a menší stlačení přední pružiny, tím pádem posouvá těžiště dopředu a tím zmenšuje maximální točivý moment zadního kola. Menší tuhost přední pružiny má opět opačný efekt.

Z toho plyne, že změna tuhosti pružiny má vždy dva efekty: posun polohy těžiště vpřed nebo vzad a posun polohy těžiště výš nebo níž. Když mají oba tyto efekty stejný vliv na změnu velikosti maximálního točivého momentu, tak se jejich vlivy sčítají. Pokud mají tyto efekty obrácený vliv, pak záleží na tom, který vliv je větší, a ten rozhodne o výsledné velikosti maximálního točivého momentu.

Brzdňý moment

Brzdňý moment byl opět omezen maximální třecí silou. Výsledné nalezené hodnoty maximálních brzdňých momentů můžeme vidět v tabulce 4.

Tabulka 4 – Maximální brzdňé momenty v testech změny tuhosti pružin

Test	Brzdňý moment přední brzdy [N*m]	Brzdňý moment zadní brzdy [N*m]
Větší tuhost zadní pružiny	293.8	264.5
Menší tuhost zadní pružiny	281.9	272.4
Větší tuhost přední pružiny	295.4	266.8
Menší tuhost přední pružiny	290.2	267.4

Změna tuhosti pružin má na maximální brzdné momenty při simulaci brzdění stejný vliv jako na maximální točivé momenty zadního kola při simulaci akcelerace. Všechny změny tuhosti posouvají těžiště ve dvou směrech (níž/vyš a vpřed/vzad). Tento posun zvyšuje či snižuje hodnotu maximální třecí síly mezi koly a podložkou a tím ovlivňuje maximální brzdné momenty. Brzdné momenty obou brzd se navzájem ovlivňují a každá změna tuhosti pružin má na hodnoty maximálních brzdných momentů pro přední a zadní brzdu opačný vliv.

V testu menší tuhosti přední pružiny jsou oba maximální brzdné momenty větší než v základním testu. Teoreticky by měl být celkový součet obou hodnot stejný pro všechny testy, měnit by se měl pouze jejich poměr. Jak již bylo zmíněno, v testu brzd docházelo k větším nepřesnostem, proto celkový součet hodnot není u testů stejný. U tohoto testu měla nepřesnost za následek zvýšení obou hodnot, nicméně hodnota maximálního brzdného momentu přední brzdy se zvětšila více, což odpovídá teoretickým úvahám.

4.4 Změny tlumící síly tlumičů

V těchto testech byla zkoušena různá nastavení tlumící síly tlumičů. Jelikož jsem pro základní test vybral nastavení nejvyšší síly pro oba tlumiče, zabývám se v těchto testech nastavením nejmenší a střední tlumící síly pro oba tlumiče postupně. Tyto síly byly vybrány dle křivek v - Graf tlumící síly předního tlumiče a- Graf tlumící síly zadního tlumiče v kapitole 3.4.2 Nastavení odpružení v modelu. Pro hodnoty menší tlumící síly byly vždy vybrány křivky v obou grafech, které popisují nejmenší síly tlumičů vůči rychlosti pohybu. Pro hodnoty střední tlumící síly byla vybrána křivka fialové barvy pro zadní tlumič a křivka modré barvy pro přední tlumič.

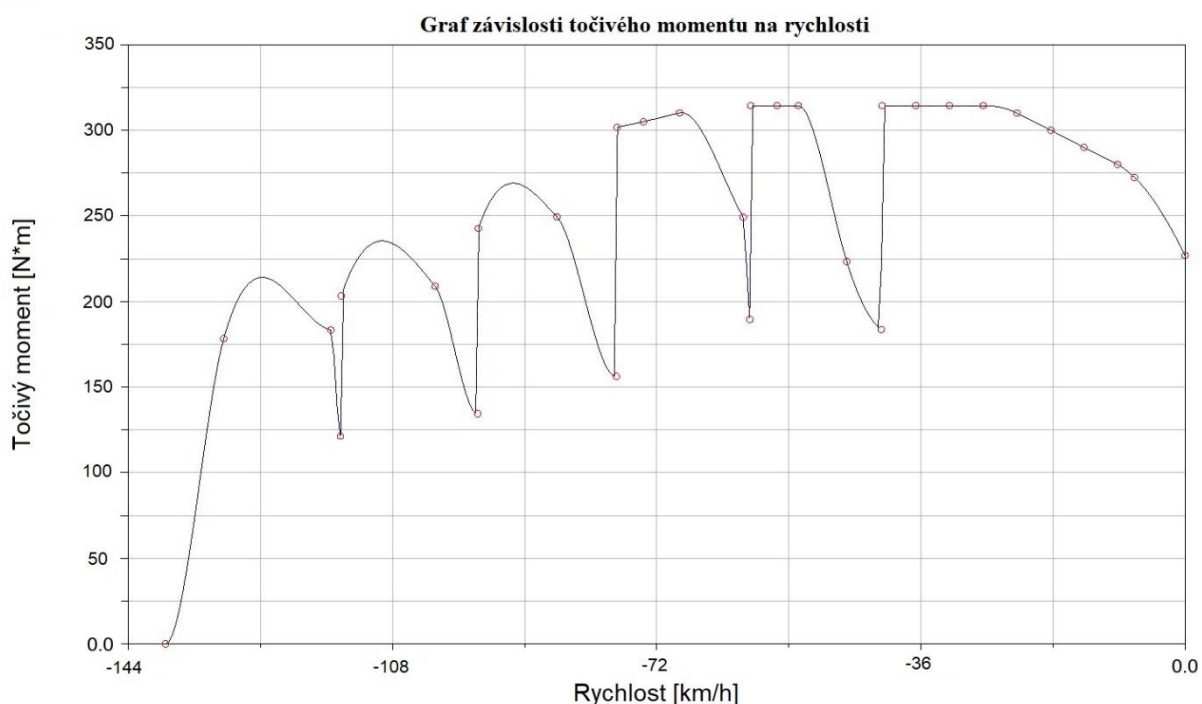
Točivý moment působící na zadní kolo

Maximální točivý moment nemusel být upravován pro testy menšího a středního nastavení tlumící síly předního tlumiče. Pro testy zadního tlumiče musel být maximální točivý moment opět upraven. Bylo to z toho důvodu, že motocykl v modelu nestojí na počátku simulace přímo na podložce, ale prvních 0,1 s padá. Tento pád není natolik velký, aby dokázal při prvotní akceleraci ovlivnit výsledky pro testy se základní tuhostí tlumičů, ale je natolik velký, aby dokázal ovlivnit výsledky s nastavením menší a střední tlumící síly tlumičů.

Kvůli působení menší tlumící síly v těchto testech oproti testům základního nastavení tlumičů, prvotní pád v simulaci motocyklu na podložku dokáže zadní a přední část motocyklu rozkmitat ve vertikálním směru. Toto kmitání periodicky snižuje normálovou sílu, která se přenáší na

podložku, tudíž snižuje maximální třecí sílu. Toto nenastane v ostatních testech se základním nastavením tlumičů, jelikož v těchto testech tlumič ihned kmity utlumí.

Ve všech testech tlumičů se také nemění poloha těžiště motocyklu, tím pádem se nemění velikosti celkových maximálních točivých momentů působících na kolo, ale mění se velikost maximálního točivého momentu při tlumení kmitů. Toto tlumení probíhá na začátku simulace, tudíž musely být počáteční hodnoty točivého momentu zmenšeny do té doby, než došlo k úplnému útlumu. Upravený graf průběhu točivého momentu pro test menší tlumící síly zadního tlumiče můžeme vidět na obrázku 37.



Obrázek 37 - Graf průběhu točivého momentu s nastavením menší tlumící síly zadního tlumiče

Tyto zmenšené hodnoty byly nastaveny pomocí zkoušení různých hodnot. Konečná nejvyšší hodnota točivého momentu pro tyto testy je stejná jako pro základní test. Rozdíl je pouze v počátečních kmitech a nutnosti kvůli těmto kmitům snížit počáteční točivé momenty působící na kolo.

Brzdňý moment

V případě simulace brzdění byl u maximálního brzdňého momentu v těchto testech nalezen podobný problém jako u testu akcelerace. Po prvotním pádu motocyklu se zadní část motocyklu rozkmitá, ale jelikož při rozjezdu v testu brzd není akcelerační točivý moment

působící na zadní kolo tak velký, nemusel být pro tento test snižován. Co muselo být sníženo, byl brzdový moment při začátku brzdění. V tomto místě dochází ke stejnému principu jako při prvotním pádu motocyklu. Při prvním zapojení brzd se brzdou silou rozkmitá zadní i přední část motocyklu ve vertikálním směru. Nastane stejná situace jako v testu akcelerace, tudíž musí být zmenšen prvotní brzdový moment, dokud se kmitání neustálí, jinak nastane prokluz zadního kola. Zmenšení nastane u zadní či přední brzdy (případně u obou brzd) podle toho, jestli změna tlumící síly proběhla na předním tlumiči nebo na zadním.

4.5 Změny polohy těžiště

Po testech tlumičů jsem přešel k testům posunu pozice těžiště systému motocyklu a jezdce v jednotlivých osách. Tyto posuny byly: posun těžiště níž, posun těžiště výš, posun těžiště vpřed a posun těžiště vzad. Těžiště jsem posouval úpravou nastavení hmotností jednotlivých částí motocyklu a jednotlivých částí těla jezdce. Vždy bylo zamýšleno změnit pozici těžiště pouze v jedné ose, ale kvůli úpravě hmotností různých částí došlo k velmi malému posunu i v jiných osách. Tyto posuny ovšem byly natolik malé (řádově desetiny milimetru), že jsou z hlediska výsledků zanedbatelné. Hodnoty jednotlivých posunů můžeme vidět v tabulce 5.

Tabulka 5 – Hodnoty posunů těžiště v testech změny polohy těžiště

Test	Hodnota posunu [cm]
Posun těžiště níž	4.0
Posun těžiště výš	15.0
Posun těžiště vpřed	3.1
Posun těžiště vzad	6.0

Rozdíl ve velikosti posunu těžiště výš a níž je dán větší možností posunu těžiště výš v modelu. Pro posun těžiště výš byly vhodnější počáteční hmotnosti jednotlivých částí motocyklu a jednotlivých částí těla jezdce. To samé platí pro rozdíl velikosti posunu vpřed a vzad.

Tyto testy vedly k potvrzení předchozích hypotéz o vlivu posunu těžiště na maximální třecí síly mezi koly a podložkou.

Točivý moment působící na zadní kolo

Hodnoty maximálních točivých momentů pro tyto testy můžeme vidět v tabulce 6.

Tabulka 6 - Maximální točivé momenty v testech změny polohy těžiště

Test	Maximální točivý moment [N*m]
Posun těžiště níž	306.8
Posun těžiště výš	353.2
Posun těžiště vpřed	300.4
Posun těžiště vzad	345.3

Tyto hodnoty potvrzují vliv změny polohy těžiště na maximální točivý moment působící na zadní kolo motocyklu.

Brzdný moment

Hodnoty maximálních brzdných momentů pro testy změny polohy těžiště jsou v tabulce 7.

Tabulka 7 - Maximální brzdné momenty v testech změny polohy těžiště

Test	Brzdný moment přední brzdy [N*m]	Brzdný moment zadní brzdy [N*m]
Posun těžiště níž	280.1	274.3
Posun těžiště výš	338.4	201.8
Posun těžiště vpřed	295.0	250.0
Posun těžiště vzad	206.9	290.1

Tyto maximální brzdné momenty také potvrzují předchozí závěry o vlivu změny polohy těžiště na maximální brzdné momenty.

4.6 Shrnutí nastavení parametrů testů

V následující tabulce jsou shrnuty parametry základní polohy těžiště, tuhosti pružin a nastavení tlumící síly tlumičů pro všechny testy. Žlutě jsou vyznačeny změněné hodnoty v jednotlivých testech oproti základnímu testu.

Tabulka 8 - Shrnutí nastavení parametrů v jednotlivých testech

Testy	Podélná poloha těžiště od osy zadního kola [cm]	Výšková poloha těžiště [cm]	Tuhost zadní pružiny [N/mm]	Tuhost přední pružiny [N/mm]	Nastavení tlumící síly zadního tlumiče	Nastavení tlumící síly předního tlumiče	
Validace	57,08	45,32	70	16	základní (nejvyšší)	základní (nejvyšší)	
Napřimený jezdec	56,74	46,06	70	16	základní (nejvyšší)	základní (nejvyšší)	
Pružiny	Tuhost zadní větší	57,08	45,32	110	základní (nejvyšší)	základní (nejvyšší)	
	Tuhost zadní menší	57,08	45,32	30	základní (nejvyšší)	základní (nejvyšší)	
	Tuhost přední větší	57,08	45,32	70	22	základní (nejvyšší)	základní (nejvyšší)
	Tuhost přední menší	57,08	45,32	70	10	základní (nejvyšší)	základní (nejvyšší)
Tlumiče	Menší zadní tlumící síla	57,08	45,32	70	16	nejmenší	základní (nejvyšší)
	Střední zadní tlumící síla	57,08	45,32	70	16	střední	základní (nejvyšší)
	Menší přední tlumící síla	57,08	45,32	70	16	základní (nejvyšší)	nejmenší
	Střední přední tlumící síla	57,08	45,32	70	16	základní (nejvyšší)	střední
Těžiště	Těžiště níž	57,08	41,32	70	16	základní (nejvyšší)	základní (nejvyšší)
	Těžiště výš	57,08	60,32	70	16	základní (nejvyšší)	základní (nejvyšší)
	Těžiště vpředu	60,18	45,32	70	16	základní (nejvyšší)	základní (nejvyšší)
	Těžiště vzadu	51,08	45,32	70	16	základní (nejvyšší)	základní (nejvyšší)

5 Výsledky

Tato kapitola se zabývá představením všech výsledků simulací. Nejdříve se podíváme na specifika jednotlivých testů a poté se podíváme na celkové shrnutí výsledků pro všechny testy.

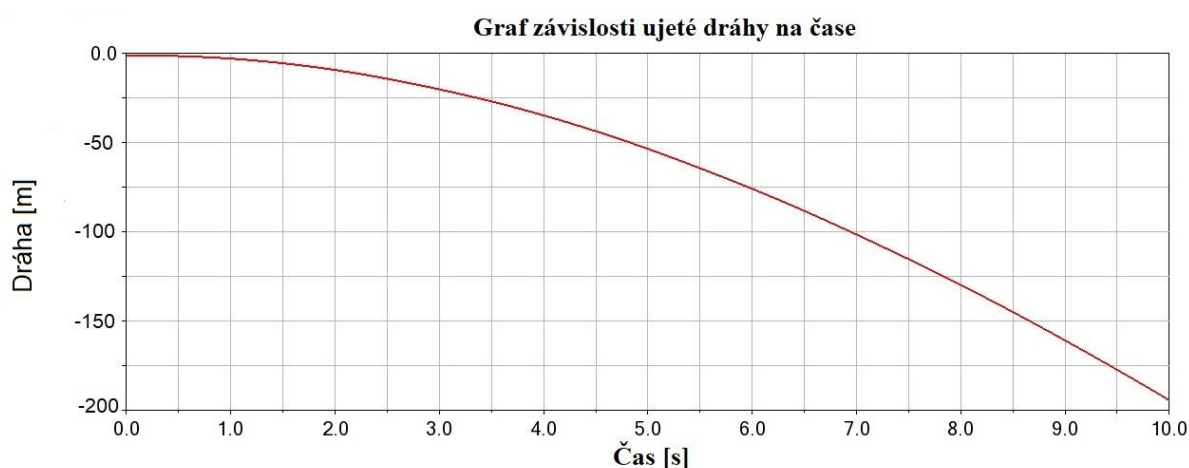
5.1 Výsledky testu validace

Výsledky testu validace jsou naznačeny již v předchozích kapitolách, nicméně v této kapitole se zabírám všemi parametry, které byly měřeny při simulacích.

5.1.1 Akcelerace

Pro všechny testy byly v simulaci akcelerace motocyklu měřeny tyto parametry: čas akcelerace na 150 m, rychlost po 150 m akcelerace, ujetá vzdálenost po 8,6 s akcelerace, rychlost po 8,6 s akcelerace, stlačení zadní pružiny a stlačení přední pružiny. Tyto parametry jsou založeny na naměřené hodnotě akcelerace reálného motocyklu. Tato hodnota je hodnota času akcelerace na 150 m, a její velikost je 8,6 s. Proto jsem vybral pro porovnání hodnot vzdálenost 150 m a čas 8,6 s. Délka stlačení obou pružin je ve výsledcích obsažena pro lepší představu chování motocyklu při jednotlivých testech. Také nám umožňuje získat informace o tom, jak se síly rozdělují na jednotlivá kola.

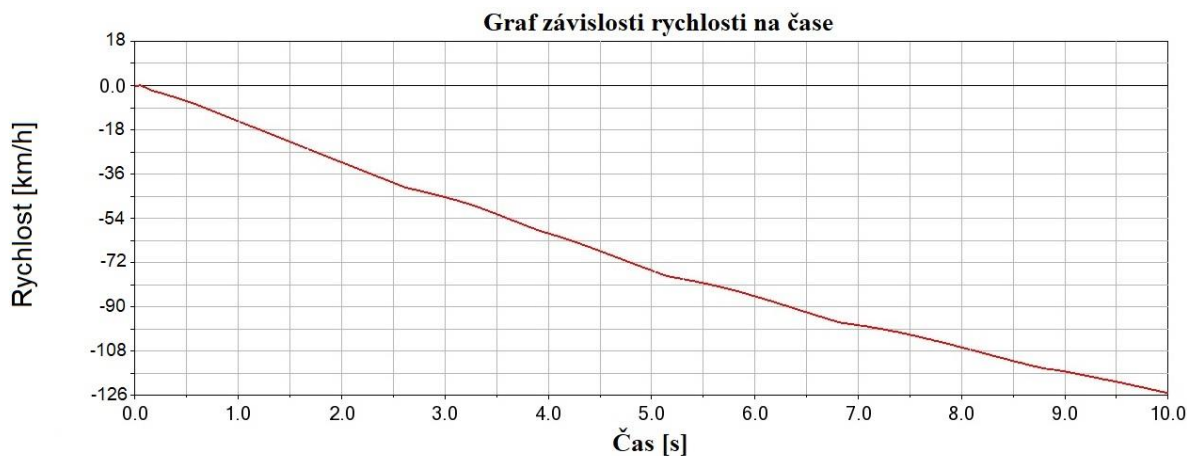
Hodnoty času akcelerace na 150 m a ujeté vzdálenosti po 8,6 s akcelerace jsem získal z grafu závislosti ujeté vzdálenosti na čase. Tento graf můžeme vidět na obrázku 38.



Obrázek 38 - Graf závislosti ujeté dráhy na čase pro validační test akcelerace

Z tohoto grafu vidíme, že pokles (z důvodu záporných hodnot) křivky ujeté dráhy se postupně s časem zvyšuje, což odpovídá působícímu zrychlení na motocykl.

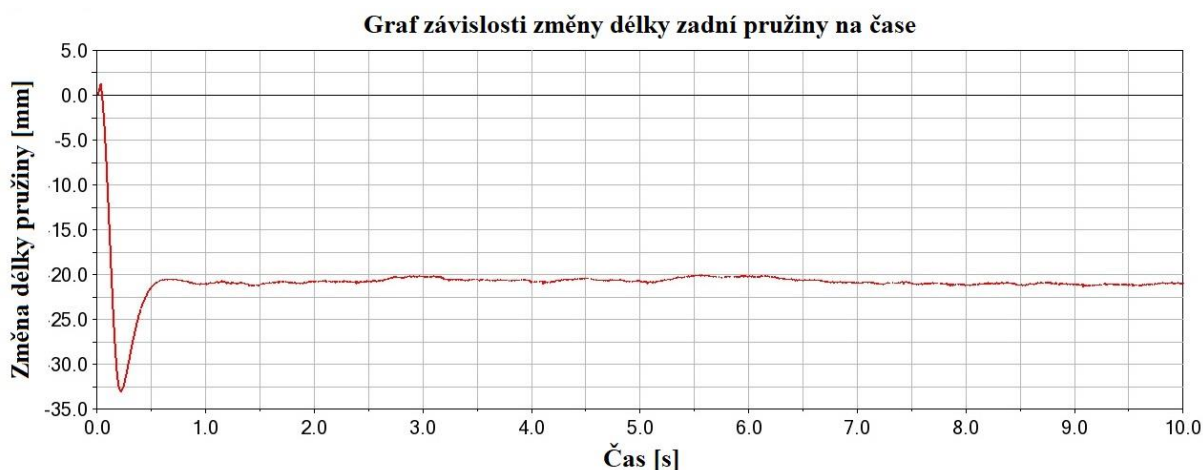
Hodnoty rychlosti po 150 m akcelerace a rychlosti po 8,6 s akcelerace jsem získal pro každý test z grafu závislosti rychlosti motocyklu na čase. Tento graf můžeme vidět na obrázku 39.



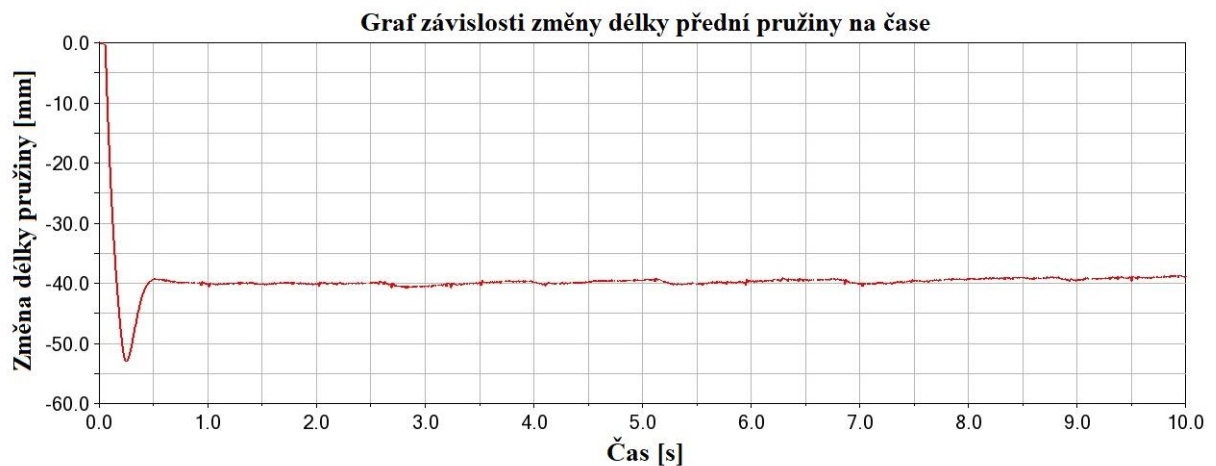
Obrázek 39 - Graf závislosti rychlosti na čase pro validační test akcelerace

Tento graf byl již popsán v kapitole 4.1.1 Točivý moment . Graf obsahuje křivku rychlosti, která se postupně mění se změnou jednotlivých převodových stupňů. Nárůst křivky v tomto případě klesá, protože točivé momenty motoru pro jednotlivé převodové stupně postupně klesají.

Hodnoty stlačení obou pružiny jsem získal z grafů změny délek těchto pružin v závislosti na čase. Tyto grafy můžeme vidět na obrázku 40 (pro zadní pružinu) a obrázku 41 (pro přední pružinu).



Obrázek 40 - Graf závislosti změny délky zadní pružiny na čase pro validační test akcelerace



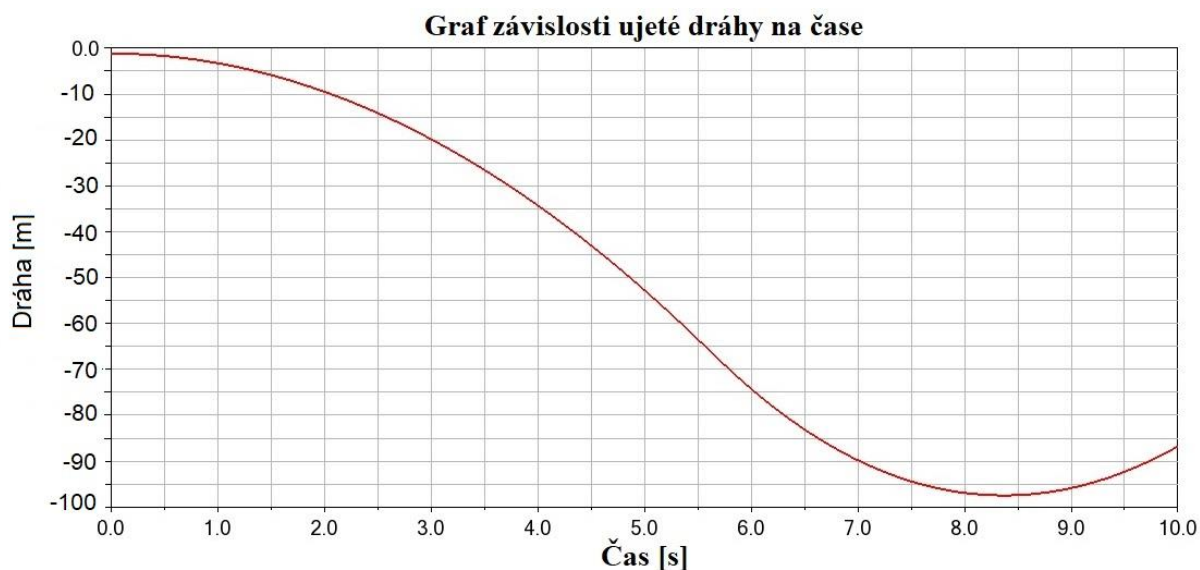
Obrázek 41 - Graf závislosti změny délky přední pružiny na čase pro validační test akceleraace

V těchto grafech je vidět prvotní pád motocyklu z výšky na podložku a poté je vidět vyrovnání stlačení obou pružin kolem určité hodnoty. Záporné hodnoty změny délky pružiny popisují stlačení pružiny. Také si můžeme všimnout tendence pružin začít po vyrovnání pádu kmitat. To je v grafu vidět v menších hodnotách stlačení ihned po vyrovnání stlačení pádu. Zde je vidět působení tlumiče, které ihned kmity utlumí. Nicméně první velmi malý kmit je v grafu viditelný. Pro výsledky testů byly brány průměrné hodnoty stlačení po ustálení odpružení po prvotním pádu.

5.1.2 Brzdění

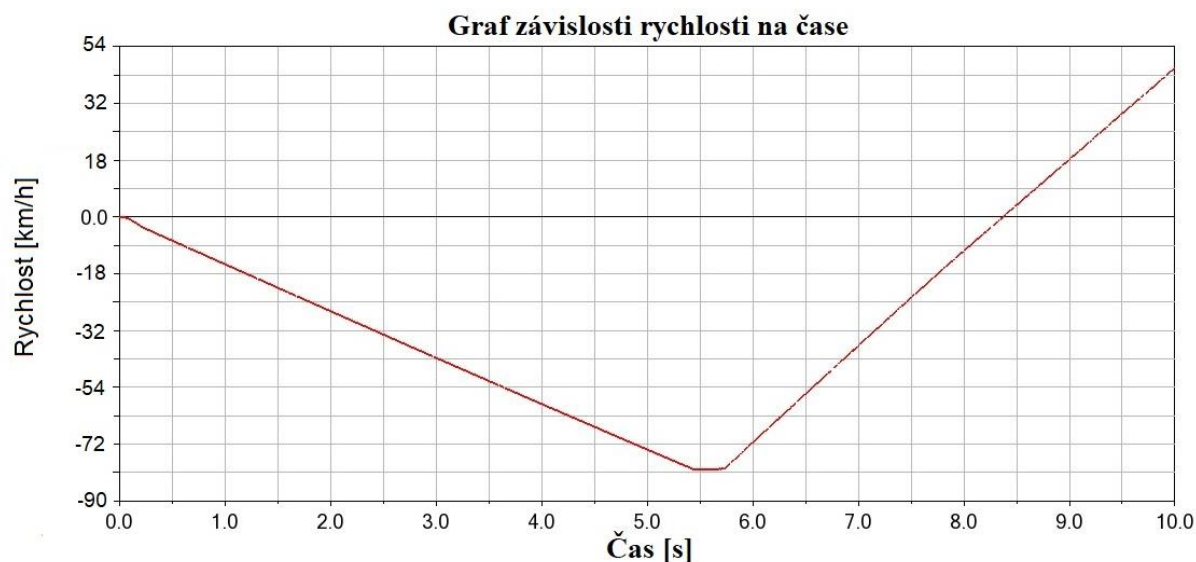
V simulaci brzdění motocyklu byly pro všechny testy naměřeny tyto parametry: brzdná dráha, čas zabrzdění, stlačení zadní pružiny při akceleraci a při následném brzdění a stlačení přední pružiny při akceleraci a při následném brzdění. Brzdná dráha a čas zabrzdění byly měřeny pro porovnání s reálným měřením motocyklu, dle kterého je model validován. Hodnoty stlačení obou pružin při rozjezdu motocyklu jsou obsaženy ve výsledcích proto, aby bylo možné porovnat vliv nastavení parametrů v jednotlivých testech na stlačení pružin při identických podmínkách (v tomto případě při působení identického točivého momentu na zadní kolo). Následné hodnoty stlačení pružin při brzdění zpřesňují popis chování motocyklu při brzdění.

Hodnoty brzdné dráhy a čas zabrzdění byly získány z kombinace grafu závislosti ujeté dráhy na čase a grafu závislosti rychlosti na čase. Tyto grafy můžeme vidět na obrázcích 42 a 43.



Obrázek 42 - Graf závislosti ujeté dráhy na čase pro validační test brzdění

V tomto grafu můžeme vidět průběh křivky ujeté dráhy motocyklu. V první části grafu působí akcelerace a v druhé části můžeme vidět účinky brzdění. Jelikož brzdné momenty v modelu nepřestávají působit po zastavení motocyklu, ale působí dále, můžeme vidět, že se motocykl po zastavení začne rozjíždět na opačnou stranu. Tato část grafu nebyla brána v potaz. Z tohoto grafu nelze přesně určit v jakém bodě má motocykl nulovou rychlost, tedy v jakém bodě došlo k úplnému zastavení. Tento bod můžeme zjistit z následujícího grafu.

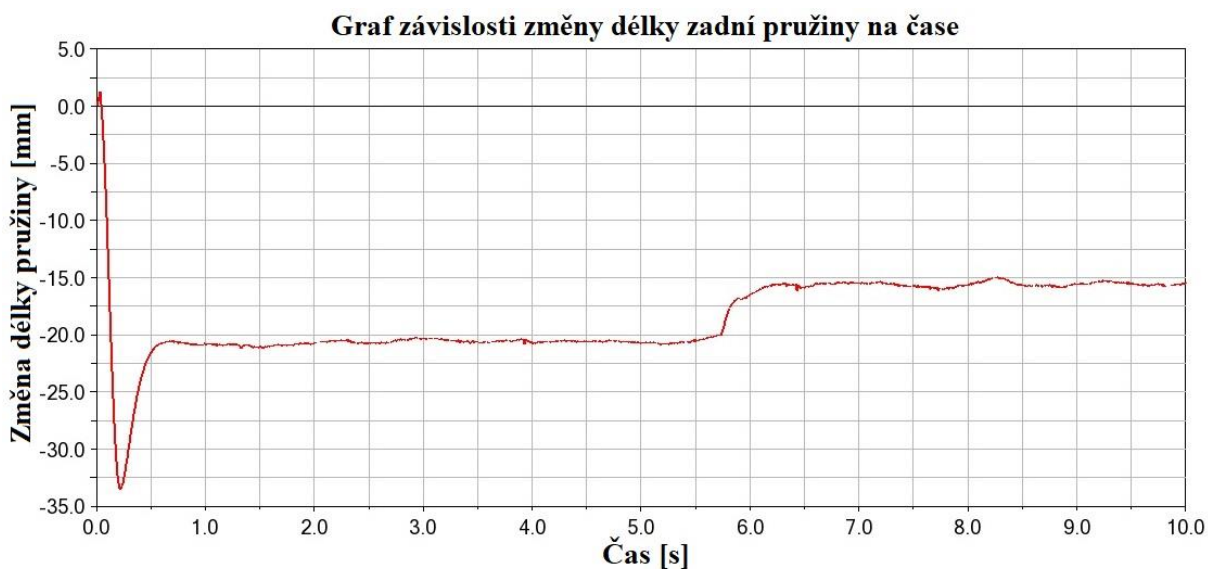


Obrázek 43 - Graf závislosti rychlosti na čase pro validační test brzdění

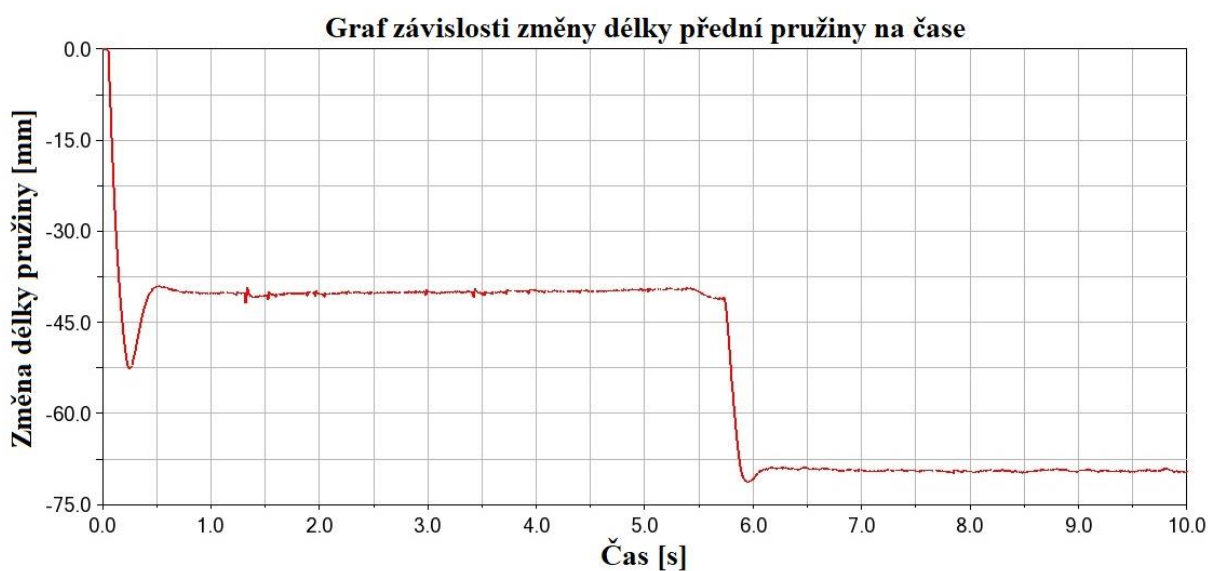
Zde je vidět nejdříve konstantní zrychlování motocyklu, následný konec působení točivého momentu motoru a působení pouze odporu vzduchu a pak začátek působení brzdného momentu a konstantního zpomalování motocyklu. Jak již bylo uvedeno, brzdný moment na

motocykl nepřestává působit po úplném zabrzdění motocyklu, ale v tomto bodě se z něj stává hnací točivý moment motocyklu v opačném směru jízdy. Proto křivka pokračuje dále do kladných hodnot. Hodnoty časů do úplného zabrzdění všech testů jsou podrobněji popsány v kapitole 5.6 Shrnutí výsledků.

Hodnoty stlačení obou pružin jsem opět získal z grafů změny délek těchto pružin v závislosti na čase. Tyto grafy můžeme vidět na obrázku 44 (pro zadní pružinu) a obrázku 45 (pro přední pružinu).



Obrázek 44 - Graf závislosti změny délky zadní pružiny na čase pro validační test brzdění



Obrázek 45 - Graf závislosti změny délky přední pružiny na čase pro validační test brzdění

Z těchto grafů lze vyčíst průměrné hodnoty stlačení pružin v rozjezdové části grafu a v následné části grafu, kde dochází k brzdění. Mezi těmito dvěma částmi je vidět efekt konce akcelerace a působení pouze odporu vzduchu. Stlačení pružiny se v tuto chvíli vyrovná na úroveň, která odpovídá jízdě touto rychlostí bez použití točivého momentu motoru.

5.1.3 Porovnání výsledků s reálným testem motocyklu

Tabulka 9 zobrazuje porovnání výsledků testu validace s výsledky reálného testu motocyklu ve Španělsku.

Tabulka 9 - Porovnání výsledků testu validace a výsledků reálných testů motocyklu

	Čas akcelerace na 150 m [s]	Brzdná dráha z 80 km/h [m]
Test validace	8,601	35,2
Reálný test motocyklu	8,600	35,3

Rozdíl v akceleraci na 150 m je 0,001 s. Tento rozdíl je minimální, nicméně v simulacích akcelerace testu validace jsou oproti reálnému testu určité odlišnosti. První hlavní odlišností je prvotní pád motocyklu v simulačním prostředí, který ve skutečnosti nenastal. Tento pád nemá velký dopad na výsledky testu validace, jelikož čas pádu motocyklu je z celkového času rozjezdu odebrán a díky nastavení velké tlumicí síly tlumičů tento pád nezpůsobí znatelné rozkmitání odpružení motocyklu. Druhou hlavní odlišností je průběh a velikost točivého momentu působícího na zadní kolo motocyklu. V simulacích nebylo možné vytvořit okamžiky, kdy by točivý moment na zadní kolo nepůsobil. Tyto okamžiky nastávají u reálného motocyklu při změně převodových stupňů, při kterých také následně dojde k použití spojky motocyklu k přenosu části točivého momentu motoru na zadní kolo. Použití spojky bylo v modelu započítáno a okamžiky bez působení točivého momentu na zadní kolo byly v modelu vynahrazeny delším a větším zapojení spojky při rozjezdu motocyklu a při změně převodových stupňů. Tyto okamžiky mohly být také vynahrazeny nižším maximálním točivým momentem působícím na zadní kolo při akceleraci, jelikož v reálném testu motocyklu mohl být větší statický koeficient tření.

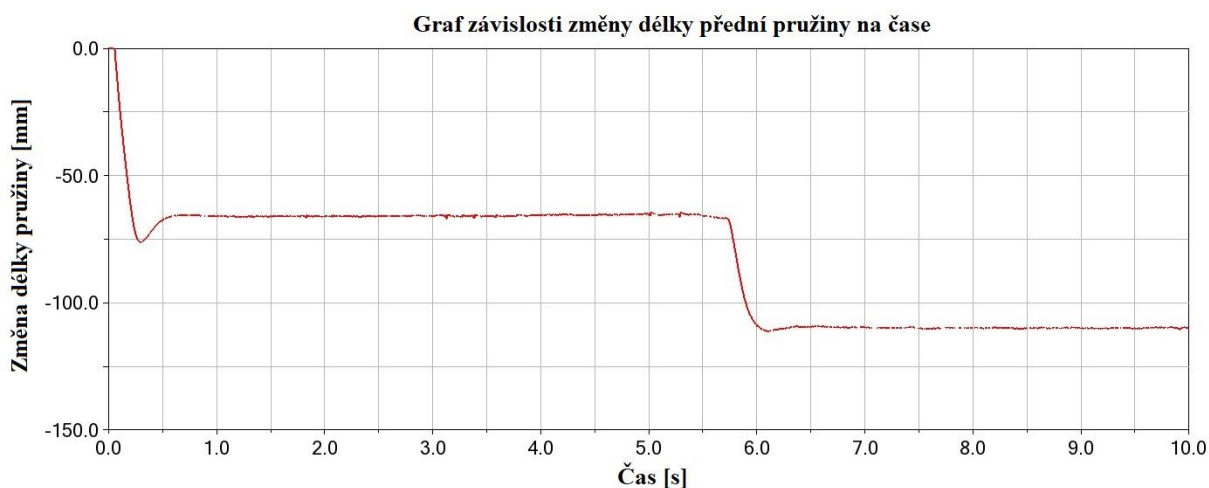
Rozdíl v brzdné dráze je 0,1m. Tento rozdíl mohl nastat tím, že v reálném testu neměl motocykl počáteční rychlost přesně 80 km/h (jak je tomu v simulacích), ale mohl mít rychlost větší. Také jezdec v reálném testu pravděpodobně nebrzdil konstantním brzdným momentem, ale s určitou fluktuací. Tato fluktuace mohla být vynahrazena vyšším maximálním brzdným momentem v reálném testu způsobeným větším statickým koeficientem tření, ale také se mohla ve výsledku projevit.

5.2 Výsledky testu napřímené polohy jezdce

V tomto testu byly měřeny stejné parametry jako v předchozím testu. Grafy, které jsou výstupem tohoto testu jsou velmi podobné výsledným grafům z předchozího testu validace. Liší se zejména v hodnotách jednotlivých parametrů, ale průběh křivek těchto grafů je přibližně stejný jako v předchozím testu. Proto zde tyto grafy zobrazeny nejsou. Výsledné hodnoty pro tento test i pro ostatní testy jsou shrnuty v kapitole 5.6 Shrnutí výsledků.

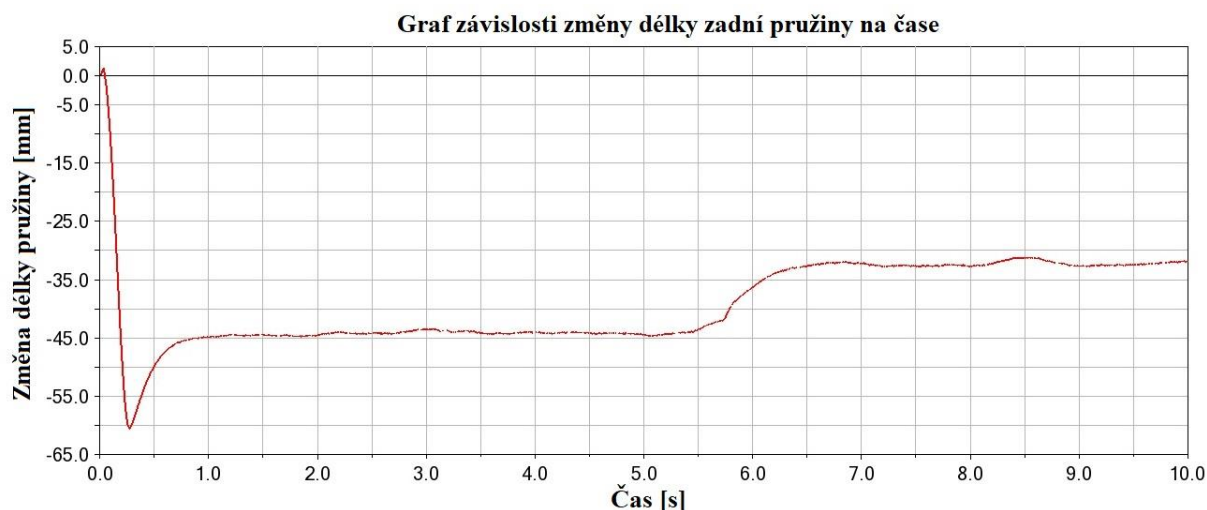
5.3 Výsledky testů pružin

Hlavním rozdílem ve výsledcích testů pružin oproti výsledkům základního testu validace jsou odlišné hodnoty v grafech stlačení pružin. Tyto hodnoty jsou v určitých testech velmi odlišné, například v testu nastavení menší tuhosti přední pružiny se při brzdění dostáváme na velmi vysoké hodnoty stlačení přední pružiny. Graf, který popisuje tuto situaci můžeme vidět na obrázku 46.



Obrázek 46 - Graf závislosti změny délky přední pružiny na čase v testu brzdění pro menší tuhost přední pružiny

V tomto grafu je vidět, že průběh křivky je velmi podobný, ale hodnoty v grafu se velmi liší. Velké rozdíly byly také při testech ostatních tuhostí. Zajímavým výsledkem je také výsledný graf testu menší tuhosti zadní pružiny při akceleraci a brzdění. Graf simulací brzdění tohoto testu můžeme vidět na obrázku 47.

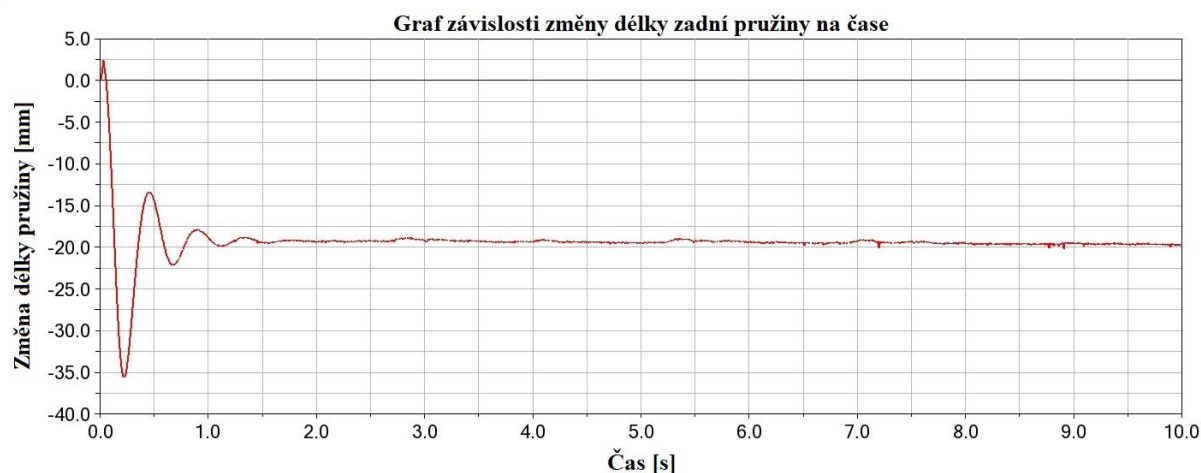


Obrázek 47 - Graf zadní pružiny v testu brzdění pro menší tuhost zadní pružiny

V tomto grafu je vidět, že menší tuhost pružiny způsobila pomalejší přechod pružiny z více stlačené polohy do méně stlačené polohy. Také zde vidíme, že oproti grafu ze základního testu validace zde nedochází po prvotním pádu motocyklu k žádnému kmitání. To je také způsobeno pomalejším vracením pružiny do vyrovnané polohy, což způsobuje menší síla pružiny, která umožňuje větší tlumení kmitů tlumičem.

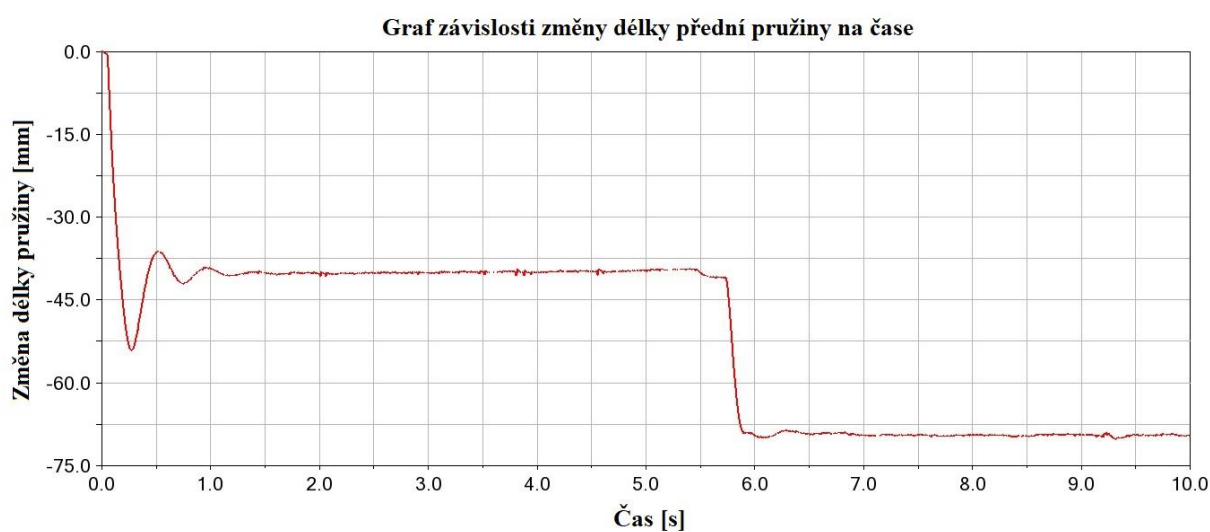
5.4 Výsledky testů tlumičů

V testech tlumičů se ve výsledcích velmi zřetelně projevoval efekt menšího tlumení, který způsoboval rozkmitání částí motocyklu po pádu a po začátku brzdění. Nejvíce se tento efekt projevil v testech menší tlumící síly zadního a předního tlumiče. Na obrázku 48 můžeme vidět graf simulace akcelerace motocyklu pro nastavení menší tlumící síly zadního tlumiče.



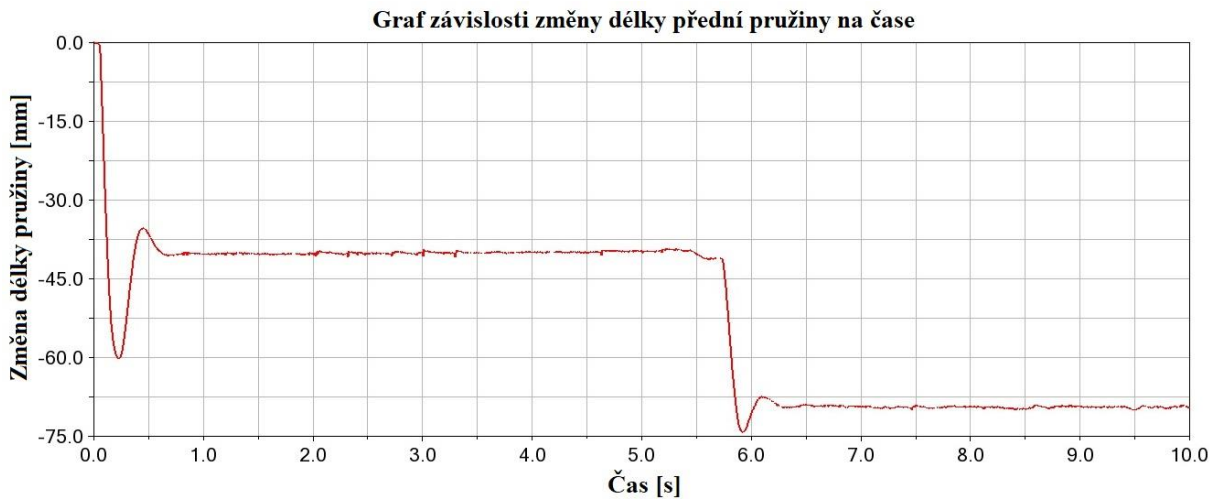
Obrázek 48 - Graf zadní pružiny v testu akcelerace pro menší tlumící sílu zadního tlumiče

V tomto grafu je vidět, že kmitání zadní části motocyklu po pádu trvá znatelně déle než v základním testu. Zajímavé také je, že kmitání zadní pružiny při rozjezdu a brzdění také způsobí kmitání přední pružiny, jejíž tlumič nemá změněné nastavení tlumící síly. Tento efekt můžeme vidět v grafu přední pružiny v simulaci brzdění pro test menší tlumící síly zadního tlumiče. Tento graf je na obrázku 49.



Obrázek 49 - Graf přední pružiny v testu brzdění pro menší tlumící sílu zadního tlumiče

Rozkmit po začátku brzdění můžeme vidět například v grafu přední pružiny v simulaci brzdění pro test střední tlumící síly předního tlumiče. Tento graf můžeme vidět na obrázku 50.

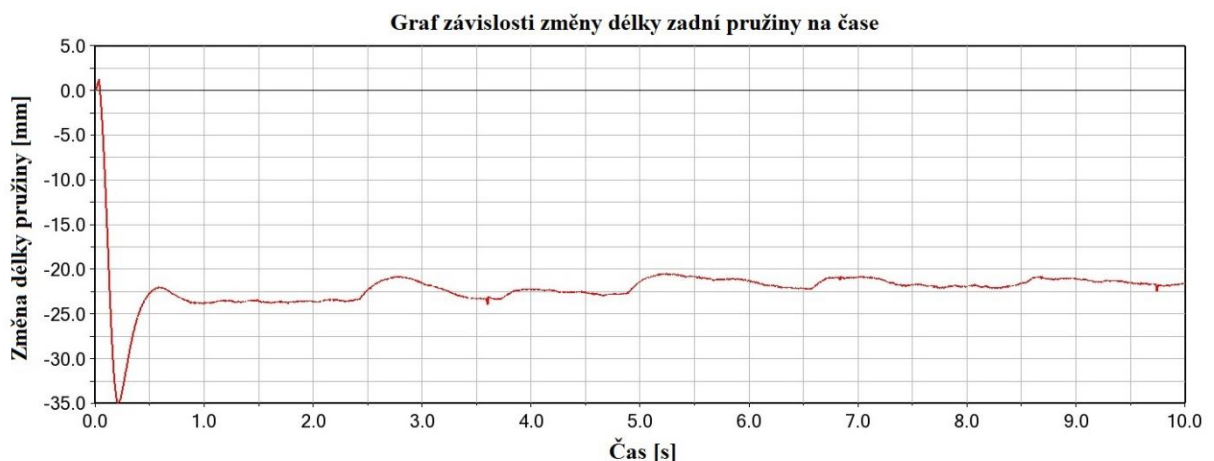


Obrázek 50 - Graf přední pružiny v testu brzdění pro střední tlumící sílu předního tlumiče

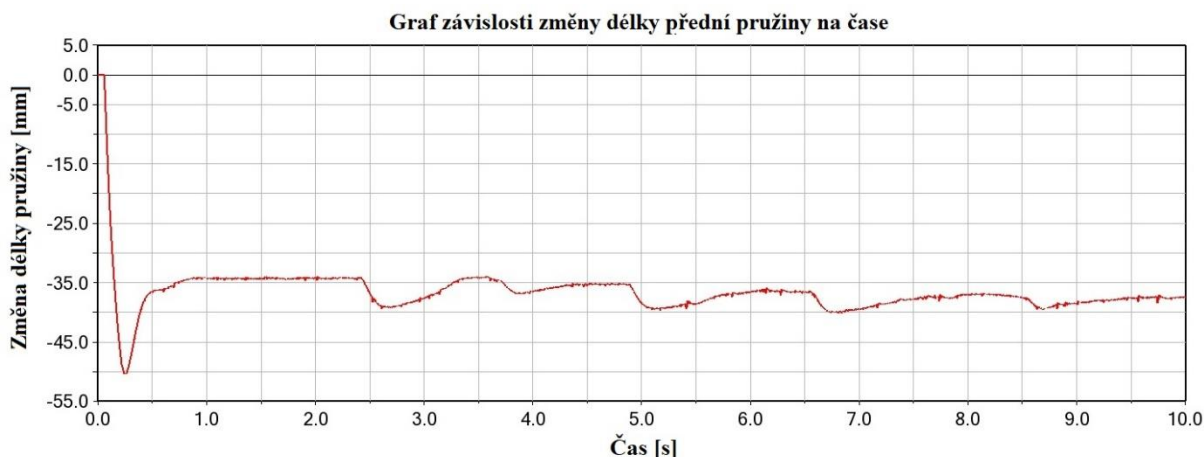
Po začátku brzdění zde vidíme mírný kmit pružiny a jeho následné ustálení. I tento kmit měl vliv na výsledný brzdný moment, který mohl být použit pro tento test.

5.5 Výsledky testů polohy těžiště

Nejzajímavější výsledky testů změny polohy těžiště jsou výsledky pro simulace akcelerace testu posunu těžiště výš. V těchto výsledcích je v grafech stlačení pro obě pružiny vidět změna stlačení pružin při každé změně převodového stupně. Těžiště je v těchto testech posunuto tak vysoko, že i malá změna velikosti točivého momentu působícího na zadní kolo způsobí znatelnou změnu stlačení obou pružin. Tyto grafy můžeme vidět na obrázku 51 (stlačení zadní pružiny) a obrázku 52 (stlačení přední pružiny).



Obrázek 51 - Graf zadní pružiny v testu akcelerace pro vyšší polohu těžiště



Obrázek 52 - Graf přední pružiny v testu akcelerace pro vyšší polohu těžiště

5.6 Shrnutí výsledků

Tato kapitola obsahuje shrnutí výsledných hodnot pro všechny testy. Dále se zde rozebírají implikace těchto výsledků.

5.6.1 Výsledky akcelerace

Přehledný výpis všech výsledků akcelerace můžeme vidět v následujících tabulkách:

Tabulka 10 - první část výsledků simulací akcelerace

Testy		Maximální točivý moment [N*m]	Čas akcelerace na 150 m [s]	Rychlost po 150 m akcelerace [km/h]
	Validace	314.4	8.60	114.10
	Napřímený jezdec	316.3	8.59	114.13
Pružiny	Tuhost zadní větší	314.9	8.60	114.11
	Tuhost zadní menší	311.0	8.62	114.03
	Tuhost přední větší	316.4	8.59	114.14
	Tuhost přední menší	309.7	8.63	113.98
Tlumiče	Menší zadní tlumící síla	314.4	8.64	114.04
	Střední zadní tlumící síla	314.4	8.62	114.00
	Menší přední tlumící síla	314.4	8.60	114.10
	Střední přední tlumící síla	314.4	8.60	114.10
Těžiště	Těžiště níž	306.8	8.65	113.86
	Těžiště výš	353.2	8.42	114.92
	Těžiště vpředu	300.4	8.69	113.60
	Těžiště vzadu	345.3	8.45	114.70

Tabulka 11 - Druhá část výsledků simulací akcelerace

Testy		Ujetá vzdálenost po 8,6 s akcelerace [m]	Rychlost po 8,6 s akcelerace [km/h]	Stlačení zadní pružiny [mm]	Stlačení přední pružiny [mm]
	Validace	151.17	114.05	21.0	40.0
	Napřiměný jezdec	151.49	114.24	21.2	39.5
Pružiny	Tuhost zadní větší	151.25	114.11	13.5	40.1
	Tuhost zadní menší	150.59	113.87	44.4	39.8
	Tuhost přední větší	151.55	114.23	21.1	28.7
	Tuhost přední menší	150.34	113.71	21.0	65.2
Tlumiče	Menší zadní tlumící síla	149.97	113.63	19.7	40.0
	Střední zadní tlumící síla	150.63	113.89	20.0	39.9
	Menší přední tlumící síla	151.17	114.05	21.0	39.4
	Střední přední tlumící síla	151.17	114.05	21.0	40.0
Těžiště	Těžiště níž	149.75	113.39	17.9	37.6
	Těžiště výš	157.13	115.99	22.4	36.7
	Těžiště vpředu	148.36	112.67	20.1	41.2
	Těžiště vzadu	155.99	115.66	24.0	36.6

V těchto tabulkách jsou zelenou barvou zvýrazněné dva nejlepší výsledky simulací, a to testů posunutí těžiště výš a posunutí těžiště k zadní části motocyklu. Naopak červenou barvou jsou zvýrazněny nejhorší výsledky simulací akcelerace, a to testů posunutí těžiště níž a posunutí těžiště k přední části motocyklu. Žlutou barvou jsou zvýrazněny dva nejlepší výsledky ostatních testů mimo testy posunů polohy těžiště.

Výsledky závisí primárně na velikosti maximálního točivého momentu, který může být přenesen na zadní kolo motocyklu. Toto neplatí v případě testů různých nastavení tlumičů, kdy ve dvou případech musel být počáteční točivý moment snížen, aby nedocházelo k prokluzu zadního kola v důsledku rozkmitání zadní části motocyklu. V druhých dvou případech jsou výsledky velmi podobné výsledkům testu validace. Liší se pouze v parametru stlačení přední pružiny, což může být ovlivněno mírnou změnou konečné pozice po utlumení kmitů přední pružiny. Celkově je z výsledků jasné, že pro akceleraci motocyklu je lepší nastavení větší tlumící síly tlumičů, a to zejména zadního. V reálné situaci by pravděpodobně nedošlo k pádu motocyklu před začátkem akcelerace, ale na trati se mohou vyskytnout nerovnosti, které by také mohly rozkmitat pružiny natolik, aby ovlivnily akcelerační schopnosti motocyklu.

Výsledek testu napřiměné polohy jezdce je lepší než výsledek základního testu, jak se dalo předpokládat z většího maximálního točivého momentu motoru. Tento test je kombinací efektů posunu těžiště výš a zároveň posunu těžiště vzad. Tyto dva testy mají nejlepší výsledky, a to díky možnosti přenosu největšího točivého momentu motoru na zadní kolo. V reálné situaci je diskutabilní, zda by maximální točivý moment, který je možno přenést na zadní kolo nebyl omezen spíše zdvihem přední části motocyklu při jízdě. Tento zdvih přední části motocyklu může nastat v případě vyšší hodnoty koeficientu tření mezi pneumatikou a podkladem, který

by umožnil implementaci tak velkého točivého momentu na zadní kolo, který by působením sil na motocykl a jezdce začal zdvihát přední část motocyklu. Tato situace v simulacích nenastala, ale je velmi pravděpodobné, že při použití jiných materiálů na výrobu pneumatik motocyklu by k této situaci dojít mohlo. V tom případě by točivý moment byl omezen hlavně maximální velikostí, při které ke zdvihu přední části motocyklu nedojde. Tím pádem by bylo pro výsledky akcelerace motocyklu lepší takové nastavení parametrů, které posouvá těžiště naopak vpřed a níž, aby co nejvíce zamezilo tomuto zdvihu. V reálné situaci je potřeba zjistit, zda omezujícím parametrem akcelerace motocyklu je nedostatek třecí síly, nebo naopak zdvih přední části motocyklu.

5.6.2 Výsledky brzdění

Obdobně jako u výsledků akcelerace, můžeme všechny hodnoty výsledků brzdění vidět v následujících tabulkách:

Tabulka 12 - První část výsledků simulací brzdění

Testy	Maximální brzdny moment přední brzdy[N*m]	Maximální brzdny moment zadní brzdy[N*m]	Brzdná dráha [m]	Čas zabrzdění [s]	
Validate	287.3	266.0	97.46	8.37	
Napřiměný jezdec	291.8	264.2	97.33	8.36	
Pružiny	Tuhost zadní větší	293.8	97.33	8.36	
	Tuhost zadní menší	281.9	97.31	8.34	
	Tuhost přední větší	295.4	266.8	97.32	8.36
	Tuhost přední menší	290.2	267.4	97.28	8.36
Tlumiče	Menší zadní tlumící síla	287.3	266.0	98.00	8.39
	Střední zadní tlumící síla	287.3	266.0	97.66	8.38
	Menší přední tlumící síla	287.3	266.0	97.66	8.38
	Střední přední tlumící síla	287.3	266.0	97.54	8.37
Těžiště	Těžiště níž	280.1	274.3	97.32	8.34
	Těžiště výš	338.4	201.8	97.96	8.39
	Těžiště vpředu	295.0	250.0	97.64	8.38
	Těžiště vzadu	206.9	290.1	97.54	8.36

Tabulka 13 - Druhá část výsledků simulací brzdění

Testy	Stlačení zadní pružiny při akceleraci na 80 km/h [mm]	Stlačení zadní pružiny při brzdění [mm]	Stlačení přední pružiny při akceleraci na 80 km/h [mm]	Stlačení přední pružiny při brzdění [mm]	
Validate	20.7	15.6	40.1	69.5	
Napřiměný jezdec	21.1	15.4	39.6	70.3	
Pružiny	Tuhost zadní větší	13.4	10.4	40.2	70.4
	Tuhost zadní menší	44.1	32.5	40.1	68.1
	Tuhost přední větší	20.7	15.8	28.8	51.5
	Tuhost přední menší	20.6	15.2	66.2	109.8
Tlumiče	Menší zadní tlumící síla	19.4	14.4	40.1	69.5
	Střední zadní tlumící síla	19.8	14.8	40.1	69.5
	Menší přední tlumící síla	20.7	15.6	39.5	68.5
	Střední přední tlumící síla	20.7	15.6	40.1	69.5
Těžiště	Těžiště níž	17.9	15.2	38.0	60.3
	Těžiště výš	22.4	5.7	36.4	90.0
	Těžiště vpředu	20.4	15.2	41.5	70.9
	Těžiště vzadu	23.8	18.8	36.6	65.1

V těchto výsledcích nebylo možné jednoznačně určit nejlepší celkové výsledky, proto jsou zeleně vyznačeny nejvyšší hodnoty maximálních brzdných momentů jednotlivých brzd a červeně jsou vyznačeny nejmenší hodnoty maximálních brzdných momentů. V druhé tabulce jsou žlutě vyznačeny vždy největší a nejmenší hodnoty pro jednotlivé parametry.

Výsledky testů brzdění jsou si velmi podobné v parametrech brzdné dráhy a času zabrzdění. Tato podoba je dána tím, že v průběhu brzdění brzdí obě brzdy, a jejich maximální brzdné momenty se navzájem ovlivňují. Proto by se měl měnit primárně poměr těchto brzdných momentů. V simulacích se mění i celkový součet obou brzdných momentů, a to hlavně z důvodu horší detekce prokluzu kol vůči testu akcelerace. Nicméně výsledky testů brzdění jsou si velmi podobné, což odpovídá teorii. Jako u testů akcelerace zde platí, že pro nejlepší výsledek je nutno zjistit, zda má motocykl při brzdění tendenci nadzdvíhat svoji zadní část nebo mají spíše jeho kola tendenci k prokluzu. Při nadzdvíhávání zadní části motocyklu je lepší zvolit parametry tak, aby tomuto zdvihu co nejvíce zabraňovaly. To znamená zvolení parametrů, které umožňují použití většího brzdného momentu na zadním kole, spíše než na předním. Pokud spíše dochází k prokluzu, pak budou výsledky reálného měření velmi podobné těmto výsledkům, a je pak pouze na konstruktérech, jaké poměry mezi brzdnými momenty obou brzd preferují.

Závěr

V této práci jsem nejdříve provedl rozbor všech dynamických zkoušek v rámci soutěže MotoStudent. V tomto rozboru jsem objevil požadované dynamické zkoušky v části vývoje motocyklu i dynamické zkoušky zkonstruovaného motocyklu. Všechny tyto zkoušky jsem popsal a na jejich základě jsem definoval dvě zkoušky (zkoušku akcelerace a zkoušku brzdění) pro využití v praktické části této práce.

Pro splnění druhého cíle této práce jsem nejdříve získal částečný geometrický model od Ondřeje Pokorného, člena týmu CTU Lions. Tento model jsem dále upravil pro použití v dynamických simulacích jízdy motocyklu.

Dalším krokem bylo provedení zkoušek jízdní dynamiky motocyklu dle pravidel soutěže MotoStudent. Byly to tyto zkoušky: zkouška akcelerace a zkouška brzdění motocyklu. Parametry obou zkoušek jsou identické se zkouškami v soutěži MotoStudent. Nejdříve proběhlo provedení těchto zkoušek na základním vytvořeném modelu a pro validaci tohoto modelu se výsledky porovnávaly s reálnými výsledky těchto zkoušek, které byly naměřeny reálnému motocyklu. Při této validaci proběhlo dodatečné nastavení parametrů základního modelu motocyklu a jezdce. Po validaci byly provedeny další testy zaměřené na zkoumání vlivu tuhosti pružin, tlumící síly tlumičů a polohy těžiště na jízdní vlastnosti motocyklu.

Všechny úpravy modelu motocyklu a všechny zkoušky jízdní dynamiky motocyklu byly provedeny v programech MSC Apex a MSC Adams společnosti MSC Software Corporation.

Vyhodnocením výsledků všech testů jsem zjistil, že změna tuhosti pružin má vliv na jízdní vlastnosti motocyklu v testech akcelerace a brzdění, a to tím, že posune těžiště v určitém směru. Tento posun těžiště má za následek změnu rozložení váhy motocyklu a jezdce na kola motocyklu a tím ovlivňuje normálové síly které se přenáší mezi koly a podložkou. Z těchto sil vychází maximální třecí síla mezi koly a podložkou, která ovlivňuje maximální velikost točivého momentu a brzdného momentu, který může na kola působit, aniž by došlo k prokluzu kol, tedy k dynamickému tření. Změna tuhosti pružin také ovlivňuje vliv setrvačné síly při akceleraci a brzdění (tedy setrvačného momentu vyvolaného setrvačnou silou), čímž opět ovlivňuje normálové síly mezi koly a podložkou. Změna polohy těžiště má podobný vliv, jelikož změna tuhosti pružin způsobuje také změnu polohy těžiště. Při změně polohy těžiště může také docházet ke změně setrvačného momentu vyvolaného setrvačnou silou, a to zejména při posunu těžiště výš či níž. Změna nastavení tlumící síly tlumičů na vlastní akceleraci a brzdění vliv nemá, má však vliv na rychlost utlumení různých kmitů vyvolaných nerovnostmi na vozovce či rychlým zabrzděním motocyklu. Pokud tyto kmity trvají déle a mají větší amplitudu

mohou také ovlivnit velikost normálové síly, která se přenáší mezi koly a podložkou, tím pádem ovlivnit maximální třecí síly.

Návrh úprav motocyklu na základě těchto testů závisí pro tuhost pružin a polohu těžiště na koeficientu tření mezi koly a vozovkou. Pokud je koeficient tření dost velký, aby docházelo při akceleraci a brzdění motocyklu spíše ke zdvihu zadní části (při brzdění) nebo přední části (při akceleraci) motocyklu, pak je lepší zvolit nastavení tlumičů a polohy těžiště tak, aby zabraňovalo tomuto efektu. Z hlediska tuhosti pružin toto znamená nastavení menší tuhosti přední i zadní pružiny pro akceleraci motocyklu a nastavení menší tuhosti zadní pružiny pro brzdění. Z hlediska polohy těžiště toto znamená posunutí polohy těžiště níž a vpřed pro test akcelerace motocyklu a posunutí polohy těžiště níž a vzad pro test brzdění motocyklu. **Celkově pro případ zdvihu částí motocyklu při akceleraci a brzdění zvýší dynamické schopnosti motocyklu použití zadní pružiny s menší tuhostí a konstrukční posunutí těžiště motocyklu (případně polohy jezdce) níž. Pokud ovšem ke zdvihu nedochází, ale spíše dochází k prokluzu kol při použití maximálních točivých momentů brzd a motoru, jako v simulacích v této práci, pak je potřeba zvolit opačný přístup k úpravám návrhu motocyklu.** V tomto případě je z hlediska jízdních vlastností motocyklu při akceleraci a brzdění výhodnější nastavení takových parametrů, které umožní využití co největších točivých momentů motoru a brzd. Pro nastavení tuhosti pružin toto znamená **nastavení větší tuhosti přední i zadní pružiny pro test akcelerace.** V testu brzdění se mění zejména poměr mezi maximálními brzdnými momenty na přední a zadní brzdě, tudíž nelze jednoznačně určit, které nastavení je lepší. Konstrukteři si musí zvolit jaké poměry brzdných momentů předního a zadního kola jsou pro motocykl výhodnější. Pro testy posunu těžiště v této situaci lepší jízdní vlastnosti motocyklu **posun těžiště výš a vzad pro test akcelerace.** Pro test brzdění nastane stejná situace jako při změně nastavení pružin. Změní se pouze poměry mezi jednotlivými brzdnými momenty brzd. **Nastavení tlumící síly tlumičů navrhuji ponechat nejvyšší, a nastavit na nejvyšší u případných následných závodních motocyklů.** Rychlým utlumením kmitů může motocykl využít plně své točivé a brzdné momenty v celé délce akcelerace a brzdění.

Tato práce může sloužit jako souhrn postupu při realizaci dynamických simulací motocyklu pro tým CTU Lions v dalších ročních soutěže MotoStudent.

Použité zdroje

- [1] MOTO ENGINEERING FOUNDATION. *MotoStudent: Competition Regulations* [online]. Španělsko, 2017. [cit 2019-03-24]. Dostupné z: <http://motostudent.com/>.
- [2] FIRST, Jiří a kol. *Zkoušení automobilů a motocyklů: příručka pro konstruktéry*. 1. vyd. Praha: S&T CZ, 2008. 348 s. ISBN 978-80-254-1805-5.
- [3] VLK, F. *Teorie a konstrukce motocyklů*. 1. vyd. Brno: František Vlk, 2004. ISBN 80-239-1601-7.
- [4] České vysoké učení technické v Praze. *Gallery* [online]. [cit 2019-03-25]. Dostupné z: <https://k616.fd.cvut.cz/motostudent/rocnik2018.php>
- [5] MSC Software Corporation. *Adams* [online]. [cit 2019-04-02]. Dostupné z: <https://www.mscsoftware.com/product/adams>
- [6] MSC Software Corporation. *MSC Apex* [online]. [cit 2019-04-02]. Dostupné z: <https://www.mscsoftware.com/product/msc-apex>
- [7] MSC Software Corporation. *Patran* [online]. [cit 2019-04-02]. Dostupné z: <https://www.mscsoftware.com/product/patran>
- [8] PAPRČKA, O. *Statické zkoušky motocyklu MotoStudent*. Praha 2016. Bakalářská práce. Fakulta dopravní ČVUT v Praze. Ústav dopravních prostředků
- [9] Humanetics Innovative Solutions. *Hybrid III 50th Male Dummy* [online]. [cit 2019-04-06]. Dostupné z: <https://web.archive.org/web/20160713141544/http://www.humaneticsatd.com/crash-test-dummies/frontal-impact/hybrid-iii-50th>
- [10] National Highway Traffic Safety Administration. *Hybrid III 50th Percentile Male* [online]. [cit 2019-04-06]. Dostupné z: <https://web.archive.org/web/20100528110712/http://www.nhtsa.gov/Research/Hybrid%2BIII%2B50th%2BPercentile%2BMale>
- [11] GIESBERS, J. *Contact Mechanics in MSC Adams*. Twente 2012. Bachelor thesis. Faculty of Engineering and Technology
- [12] Engineering ToolBox. *Friction and Friction Coeficients* [online]. [cit 2019-04-10]. Dostupné z: https://www.engineeringtoolbox.com/friction-coefficients-d_778.html
- [13] MOTO ENGINEERING FOUNDATION. *Motorcycle Fork-Shock Absorber Optional Kit* [online]. Španělsko, 2017. [cit 2019-04-14]. Dostupné z: <http://motostudent.com/>.

- [14] MOTO ENGINEERING FOUNDATION. *Official Brake System Supplier Technical Specs* [online]. Španělsko, 2017. [cit 2019-04-18]. Dostupné z: <http://motostudent.com/>.
- [15] MOTO ENGINEERING FOUNDATION. *Official Brake Pads Supplier Technical Specs* [online]. Španělsko, 2017. [cit 2019-04-18]. Dostupné z: <http://motostudent.com/>.