



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

ANALÝZA MĚŘENÝCH DYNAMICKÝCH STAVŮ MOTOCYKLŮ

ANALYSIS OF MEASURED DYNAMIC STATES OF MOTORCYCLES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Martin Tobiáš

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Porteš, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student:	Bc. Martin Tobiáš
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Automobilní a dopravní inženýrství
Vedoucí práce:	doc. Ing. Petr Porteš, Ph.D.
Akademický rok:	2018/19

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

Analýza měřených dynamických stavů motocyklů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce z oblasti dynamiky motocyklů je zaměřena na měření a analýzu dat s využitím matematických modelů.

Cíle diplomové práce:

Rešerše matematických modelů jednostopého vozidla v oblasti jízdní dynamiky.

Sestavení vstupních dat pro matematický model motocyklu včetně měření parametrů vybraného motocyklu.

Vytvoření matematického modelu motocyklu.

Volba snímačů a návrh měřicího systému pro měření jízdní dynamiky motocyklu.

Dle možnosti realizovat měření a následně provést analýzu měřených dat.

Seznam doporučené literatury:

COCCO, Gaetano. Motorcycle design and technology: how and why. Vimodrone [Milano]: Giorgio Nada Editore, 1999. ISBN 88-791-1189-2.

COSSALTER, Vittore. Motorcycle dynamics. Greendale, WI: Race Dynamics, c2002. ISBN 09-72-5140-6.

VLK, František. Teorie a konstrukce motocyklů 1. První vydání. Brno: Nakladatelství Vlk, 2004. ISBN 80-239-1601-7.

VLK, František. Teorie a konstrukce motocyklů 2. První vydání. Brno: Nakladatelství Vlk, 2004. ISBN 80-239-1601-7.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá přípravou motocyklu pro analýzu jeho dynamických jízdních stavů v rámci dlouhodobého projektu na Ústavu automobilního a dopravního inženýrství na FSI VUT. Na základě naměřených parametrů je vytvořen jeho multi-body model a je navržen měřicí systém pro měření jízdních stavů. Potřebné parametry motocyklu byly naměřeny pomocí 3D skeneru a experimentálně s využitím výpočetní techniky a CAD softwaru. Byl tak položen základ pro navazující výzkumné a vývojové práce.

KLÍČOVÁ SLOVA

motocykl, dynamika, simulace, matematický model, multi-body, měření

ABSTRACT

This thesis, within a long-term project at the Institute of automotive engineering at FME BUT, aspires to prepare a motorcycle for analysis of its dynamic riding behavior. A multi-body model of a motorcycle is created based on the measured parameters and a system for measuring driving conditions is designed. The necessary motorcycle parameters were measured using a 3D scanner and through experiments aided by computer technology and CAD software. This laid the foundation for the follow-up research and development work.

KEYWORDS

motorcycle, dynamics, simulation, mathematical model, multi-body, measurement

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Citace tištěné práce:

TOBIÁŠ, Martin. Analýza měřených dynamických stavů motocyklů. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/116752>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vedoucí práce Petr Porteš.

Citace elektronického zdroje:

TOBIÁŠ, Martin. Analýza měřených dynamických stavů motocyklů [online]. Brno, 2019 [cit. 2019-04-24]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/116752>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vedoucí práce Petr Porteš.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením doc. Ing. Petra Porteše, Ph.D., čerpal jsem ze zdrojů uvedených v seznamu.

V Brně dne 20. května 2019

.....

Bc. Martin Tobiáš

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji v první řadě vedoucímu práce, panu doc. Ing. Petru Portešovi, Ph.D., dále Ing. Janu Fojtáškoví, Ing. Luboru Zháňalovi, Ph.D., Ing. Petru Hejtmánkovi, Ph.D., Ing. Ondřeji Macháčkovi, Ph.D. a Ing. Jakubu Roupci, Ph.D. za poskytnutí konzultací a odbornou a praktickou pomoc při tvorbě této práce. V neposlední řadě věnuji poděkování také své rodině, která mi po celou dobu studia byla oporou.

OBSAH

Úvod.....	9
1 Rešerše matematických modelů motocyklů v oblasti jízdní dynamiky	10
1.1 Úvod do problematiky	10
1.2 Vybrané matematické modely odpružení motocyklu	11
1.3 Vybrané modely pro simulování jízdních vlastností	13
1.4 Multi-body simulace	14
1.4.1 Multi-body software	15
2 Měření parametrů vybraného motocyklu	16
2.1 Měření kinematiky motocyklu 3D skenováním	17
2.1.1 Měření poloh klíčových bodů.....	18
2.1.2 Měření polohy těžiště.....	24
2.1.3 Doplnující měření	34
2.1.4 Souřadný systém CS_2	36
2.2 Výsledky měření kinematiky motocyklu	37
2.3 Měření momentů setrvačnosti	41
2.3.1 BODY – osa x	41
2.3.2 BODY – osa y	44
2.3.3 BODY – osa z.....	45
2.3.4 KOLA – osa rotace	47
2.3.5 KOLA – osy klopení.....	50
2.4 Výsledky měření momentů setrvačnosti	51
2.4.1 Zhodnocení a poznatky k měření momentů setrvačnosti.....	53
3 Matematický model motocyklu	58
3.1 Popis matematického modelu.....	59
4 Návrh měřicího systému	61
5 Závěr.....	64
Seznam použitých informačních zdrojů.....	65
Seznam obrázků.....	66
Seznam tabulek.....	67

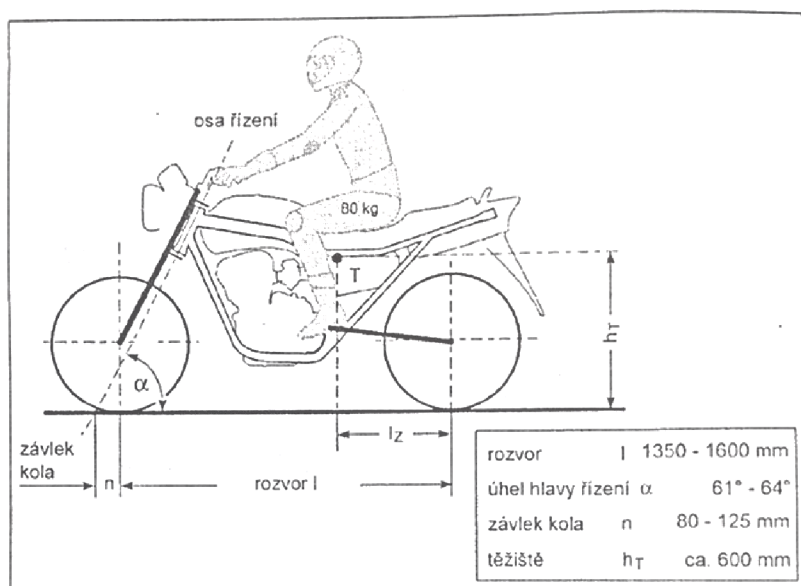
ÚVOD

Na Ústavu automobilního a dopravního inženýrství Fakulty strojního inženýrství VUT byl vyvinut systém nástrojů určených ke zlepšení návrhů konstrukcí dvoustopých vozidel, analýzy vypočtených i měřených jízdních stavů a optimalizaci kinematických i dynamických vlastností zavěšení kol a subsystémů, které mají vliv na jízdní vlastnosti automobilů. Na rozdíl od jiných softwarových řešení poskytují tyto nástroje mimo jiné unikátní možnost realizace přímých i inverzních úloh. Jinými slovy, umožňují přesně dopočítat parametry, které na vozidle nebyly přímo měřeny. Tato práce je první v řadě dalších, které mají za cíl tyto nástroje použít k analýze vybraného jednostopého vozidla – motocyklu. Nicméně matematický popis automobilů a citlivost na změny v modelovaném systému jsou proti motocyklům velmi odlišné. Konstrukce těchto vozidel tak s sebou nevyhnutelně přináší řadu unikátních výzev, které bude pro naplnění tohoto dlouhodobého cíle potřeba překonat. V této práci se proto zaměřuji na vytvoření základního matematického modelu vybraného motocyklu v softwaru MSC Adams a k přípravě motocyklu na měření jízdních stavů, jakožto základu pro navazující výzkumné a vývojové práce.

1 REŠERŠE MATEMATICKÝCH MODELŮ MOTOCYKLŮ V OBLASTI JÍZDNÍ DYNAMIKY

1.1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY

Veškeré jízdní vlastnosti motocyklu, jeho limity, dynamické vlastnosti a subjektivní dojem z jízdy vycházejí v první řadě z jeho kinematického popisu neboli jeho geometrie. Každá změna kinematického parametru se projeví na dynamickém chování celku. Některé z těchto parametrů se přitom za jízdy mění (změna celkové polohy těžiště, úhlu hlavy řízení, rozvoru, aj.). V závislosti na tom, jaký jízdní stav motocyklu chceme modelovat je možné model sestavit v různých úrovních komplexnosti. Je tak možné jej vhodnou volbou počtu vázaných těles (nebo hmotných bodů), určením počtu stupňů volnosti a zanedbáváním některých skutečností redukovat od jednoduchých sestav řešitelných analyticky až po komplexní multi-body modely řešitelné za pomoci výpočetní techniky. Základní parametry, které zcela zásadně ovlivňují vlastnosti motocyklu jsou na Obr. 1.1.



Obr. 1.1 Základní parametry motocyklu [1]

Jsou jimi tedy [1]:

- úhel sklonu přední vidlice
- styčný bod kola se zemí
- průsečík osy řízení se zemí
- zavlek předního kola (někdy nazýván stopa)
- rozvor kol
- poloha těžiště
- rozdělení zatížení na přední a zadní kolo

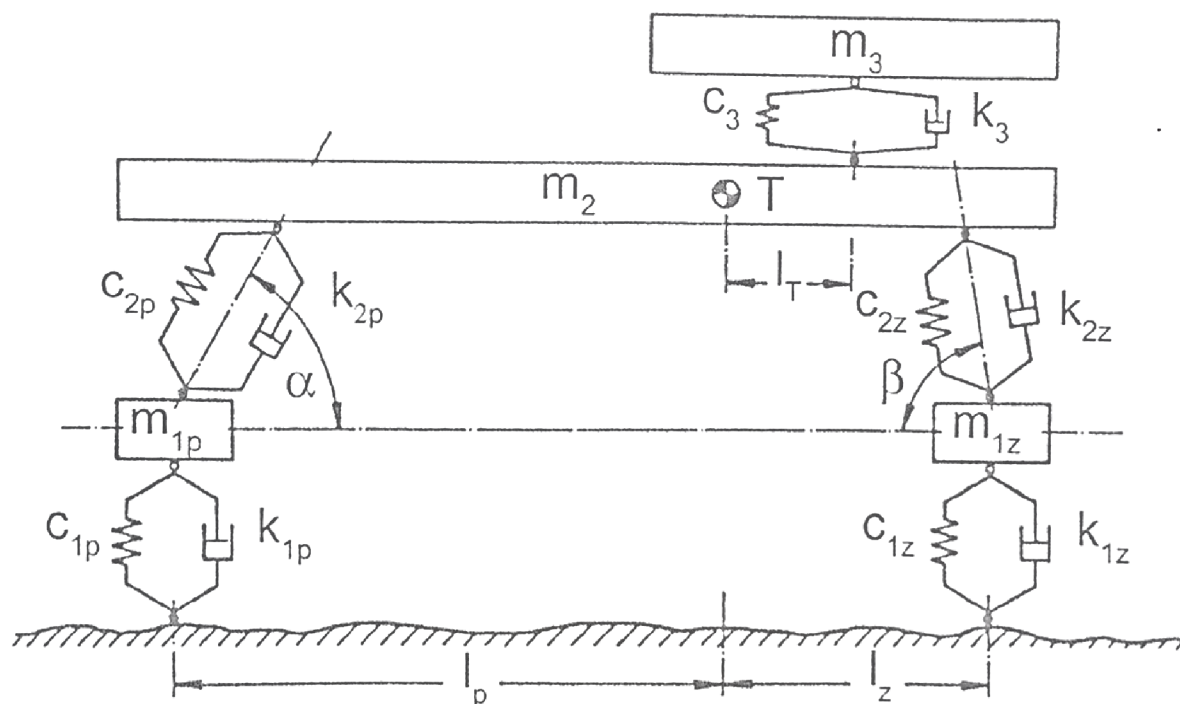
Dynamika motocyklů je notoricky ožehavé téma zejména skrze komplexnost, kterou do této problematiky vnáší konstrukční řešení řízení, proměnlivé jízdní podmínky jako např. rychlost a také jízdní styl jezdce, jeho řídičské schopnosti a zkušenosti. Z toho vyplývá, že pokud chceme zjistit, které parametry ovlivňují chování motocyklu je nutné studovat motocykl s jezdce jako celek. Jasný postup při řešení dynamiky motocyklů je tedy v systematickém rozdělení systému jezdec-motocykl na tři základní podsystémy. Prvním je řidič, který ovládá motocykl silovým působením na řídítka, ovládním brzd, plynu a pohyby svého těla. To jsou vstupy systému motocyklu, které mají své fyzikální limity. Motocykl lze rozdělit na mnoho podsystémů, pro řešení dynamiky jízdy v přímém směru jej lze rozdělit na podsystémy dva. Těmi jsou podsystém řízení (mechanismus vyvolávající boční síly na přední kolo) a podsystém vozidla (tuhé těleso, na něž působí gyroskopický efekt kol, na která jsou přenášeny síly v kontaktu s vozovkou). [2]

Tyto dva podsystémy jsou otočné kolem společné osy, tj. osy otáčení přední vidlice. Podsystém řízení tvoří přední vidlice s předním kolem, brzdou, světlometem (v případě, že je připevněn k vidlici) a řídítka. Podsystém vozidla je tvořen rámem, motorem s převodovkou, zadní vidlicí s brzdou, zadním kolem a sedadlem jezdce. Oba podsystémy mají vlastní mechanické kmitavé vlastnosti a mají být schopné co nejučinněji tlumit rychlé výkyvy. Při špatném tlumení výkyvů může od určité rychlosti a v určitých režimech (např. při rychlém projíždění táhlé zatáčky na dálnici) dojít k nebezpečnému podélnému rozkývání motocyklu. Motocykl jako jednostopé vozidlo nemá možnost se sám udržet v rovnováze, v klidu (při stání) musí být nějakým způsobem opřen. Jakmile s však začne pohybovat dopředu, může již při velmi malé rychlosti udržet rovnováhu. Při velmi malých rychlostech, když se ještě neprojeví gyroskopické momenty, závisí rovnováha především na schopnostech jezdce, na geometrii podvozku, poloze těžiště a hmotnosti vozidla. Při vyšších rychlostech hraje umění řidiče menší roli, rovnováha je potom více a více udržována gyroskopickými účinky kol. [1]

1.2 VYBRANÉ MATEMATICKÉ MODEL Y ODPRUŽENÍ MOTOCYKLU

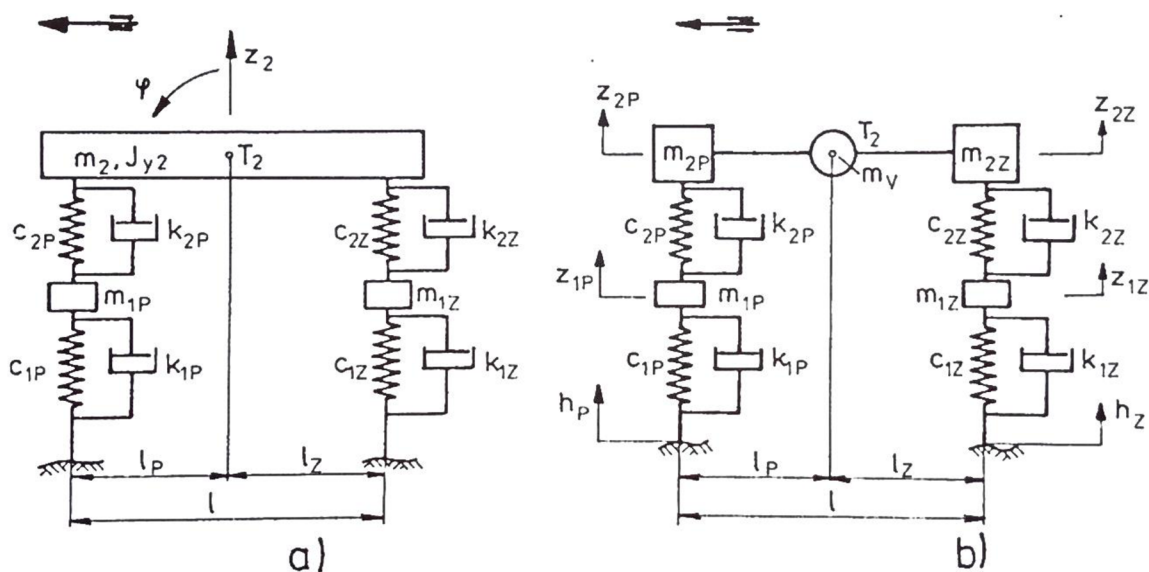
Analytické matematické výpočtové modely odpružení motocyklů při řešení dynamiky jízdy v přímém směru lze řešit jako soustavy těles odpovídajících hmotností, propojené pružinami s odpovídajícími tuhostmi a tlumiči s odpovídajícími tlumícími konstantami. Je tak možné počtem těchto těles a vazeb modelovat různě komplikované systémy. Lze tedy modelovat chování jednotlivých podsystémů podvozku samostatně nebo společně s dalšími podsystémy motocyklu, modelovat jejich vzájemné ovlivňování, případně tato ovlivnění dále omezovat odebíráním stupňů volnosti.

Relativně jednoduchý, ale pro analytický výpočet již značně komplikovaný systém odpružení motocyklu je znázorněn na Obr. 1.2. Nástavba (rám s motorem) je nahrazena deskou o hmotnosti m_2 . Kola jsou nahrazena dvěma tělesy o hmotnostech m_{1i} ; ($i = p, z$). Mezi deskou a těmito tělesy jsou pružiny s tuhostmi c_{2i} a tlumiče s konstantami tlumení k_{2i} . Pružící a tlumící vlastnosti kol jsou znázorněny dalšími pružinami (c_{1i}) a tlumiči (k_{1i}). Na desce je připevněna kmitavá soustava hmotnosti m_3 , která nahrazuje sedadlo s řidičem; c_3 je tuhost pružin sedadla a k_3 je součinitel tlumení sedadla. [1]



Obr. 1.2 Dynamický model odpružení motocyklu [1]

Soustava se 4 stupni volnosti je znázorněna na Obr. 1.3. Dochází přitom ke svislému a podélnému kmitání (houpání). Hmotnost nástavby je označena m_2 a její moment setrvačnosti k příčné ose jdoucí těžištěm T_2 je J_{y2} . Hmotnost neodpružených částí, tj hmotnost kol a brzd, je označena m_{1p} m_{1z} . Tuhost přední pružiny je c_{2p} , tuhost zadní pružiny c_{2z} . Součinitele tlumení tlumičů vpředu a vzadu jsou označeny k_{2p} , k_{2z} . Radiální tuhost pneumatik c_{1p} , c_{1z} a součinitele tlumení pneumatiky k_{1p} , k_{1z} .



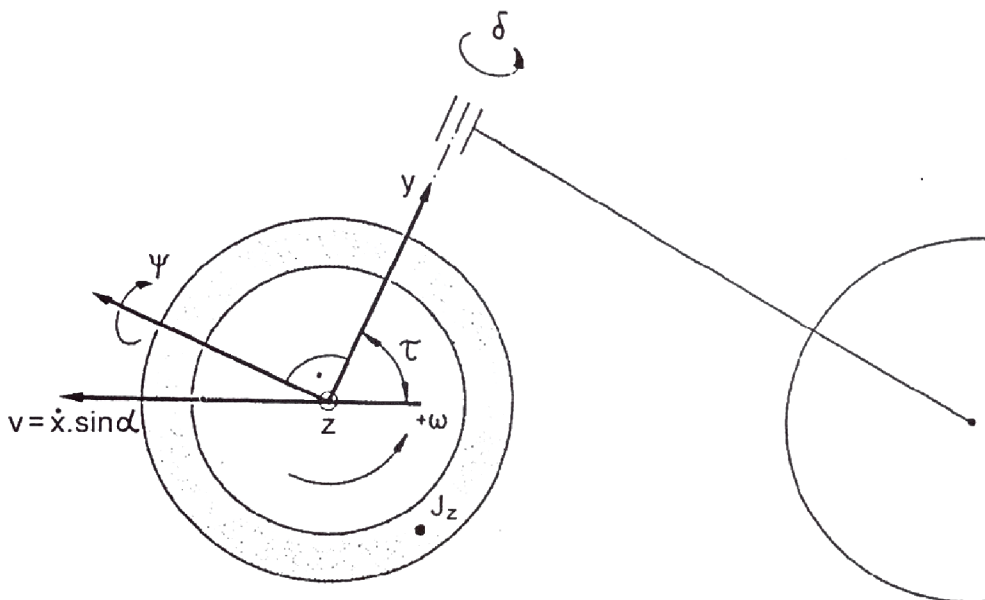
Obr. 1.3 Jednoduchý model kmitání motocyklu [1]

Nástavbu o hmotnosti m_2 s momentem setrvačnosti J_{y2} je možno rozdělit na tři tělesa o hmotnostech m_{2P} , m_{2Z} a m_V , Obr. 1.3b. Těleso s hmotností m_V umístěné v těžisti vyjadřuje vazbu soustavy. Tyta tři tělesa jsou spojena bezhmotnostní tyčí. Velikost hmotností m_{2P} , m_{2Z} a m_V , poloha těžiště a velikost momentu setrvačnosti takto rozdělené nástavby jsou určeny tak, aby byla zachována ekvivalence k nástavbě na Obr. 1.3a.

Bude-li hmotnost vazebního tělesa $m_V = 0$, je přerušena vazba mezi přední a zadní nápravou čili svislé pohyby tělesa o hmotnosti m_{2P} a tělesa o hmotnosti m_{2Z} jsou navzájem nezávislé. To znamená, že bude-li např. vybudena ke kmitání přední náprava, pak se bude pohybovat jen těleso s hmotností m_{2P} a těleso s hmotností m_{2Z} zůstane v klidu. Je-li hmotnost $m_V \neq 0$, pak jsou pohyby vpředu a vzadu vázány, tzn. při nájězdu předních kol na nerovnost se pohybuje jak těleso s hmotností m_{2P} , tak těleso s hmotností m_{2Z} . [1]

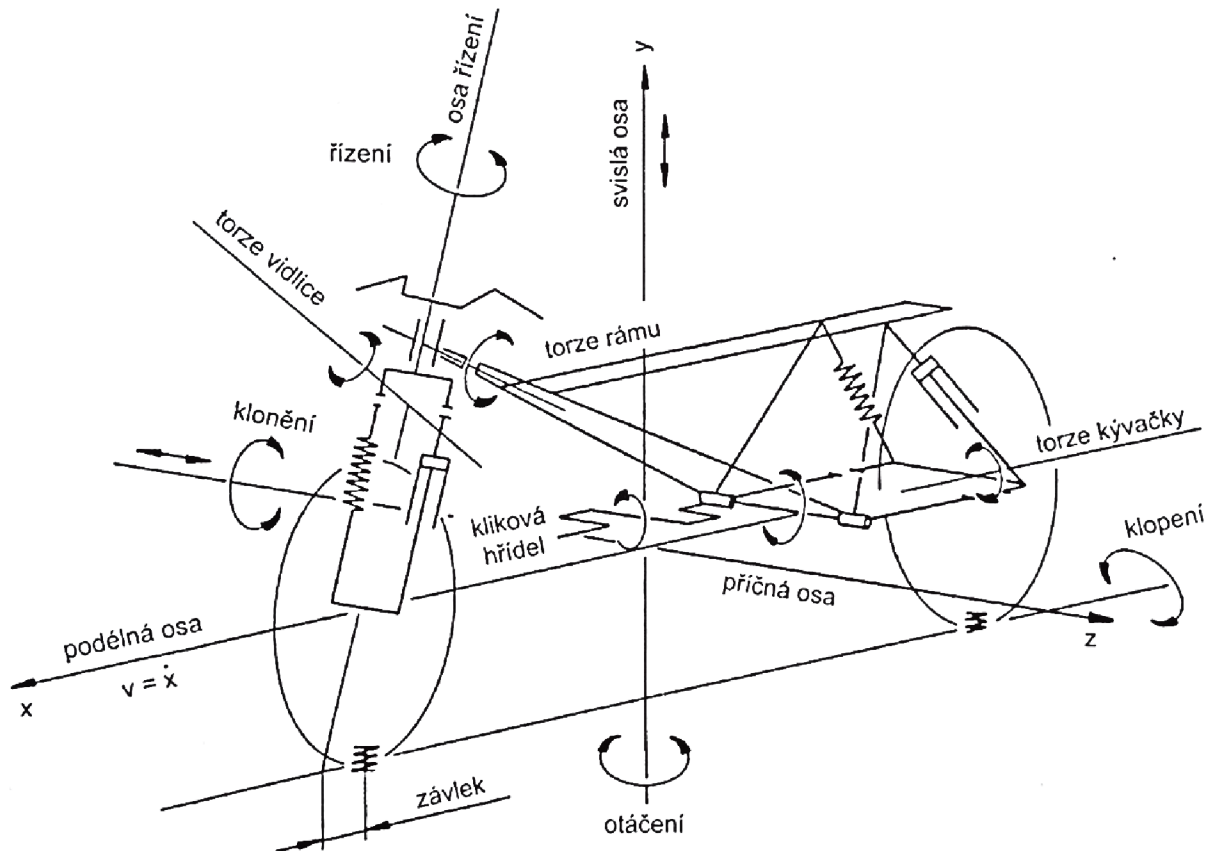
1.3 VYBRANÉ MODELY PRO SIMULOVÁNÍ JÍZDNÍCH VLASTNOSTÍ

Pro teoretické vyšetřování směrové dynamiky motocyklu je nutno nejdříve zvolit vhodný matematický model. Pro základní vyšetřování se používá rovinný dynamický model. V tomto případě leží těžiště vozidla v rovině vozovky, tzn. že karoserie se vlivem odstředivých sil nenaklápí. Příkladem použití rovinného modelu je posouzení stability jednošopého vozidla na Obr. 1.4, který se skládá ze systému předního kola a systému zadního kola kloubově spojeným se sloupkem řízení. [1]



Obr. 1.4 Jednoduchý model pro posouzení stability [1]

Při teoretickém vyšetřování jízdních vlastností motocyklu je možné sestavit modely zahrnující i torzní vlastnosti motocyklu. Pro simulování různých forem kmitání vznikajících při jízdě motocyklu lze použít model, jehož schéma je na Obr. 1.5. [1]



Obr. 1.5 Komplexní model pro simulování kmitání motocyklu [1]

1.4 MULTI-BODY SIMULACE

Moderní metodou teoretického vyšetřování dynamických vlastností motocyklu je použití výpočetní techniky, resp. využitím tzv. multi-body programů, které umožňují precizně a komplexně analyzovat jízdní vlastnosti vozidel. Počítačové analýzy mechanických systémů, obecně známé pod zkratkou MSA (Multi-body systém analysis), slouží ke zkoumání pohybů v těchto systémech, vyvolaných externími silami. V případě jednostopých vozidel se jedná o prostorové systémy, ve kterých je motocykl modelován tuhými nebo flexibilními elementy, vzájemně vázanými různými typy kinematických a dynamických vazeb. Externí síly a výsledné reakce vyvolávají v rámci nadefinovaných omezení pohybu v modelovaných komponentech. Je tak obecně možno vyhodnocovat a optimalizovat charakteristiky a chování produktů před výrobou prototypů, čímž se snižuje cena vývoje a především čas potřebný k uvedení produktu na trh. [2]

Motocykl má mnoho režimů kmitání, které lze rozdělit na režimy:

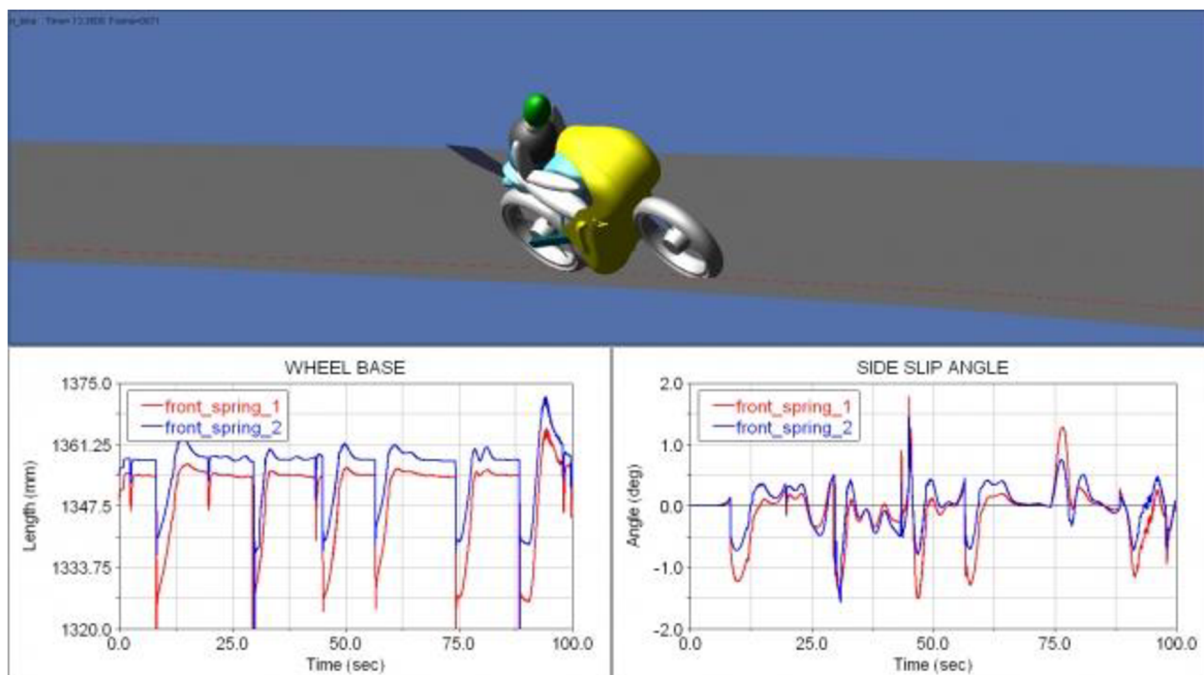
- *rovinné* – pohyby rámu, vidlic, tlumičů a kol ve vertikální rovině
- *nerovinné* – zahrnující klopení, stáčení, úhel a posun hlavy řízení

Rovinné režimy souvisí s jízdním komfortem a udržováním kontaktu kol s vozovkou, zatímco režimy nerovinné souvisí s jízdní stabilitou a říditelností. Při přímé jízdě jsou tyto režimy nezávislé a lze je zkoumat samostatně. Pro zkoumání chování motocyklu v nerovinných režimech je nasazení multi-body programů nutné. Dále také počítačové simulace umožňují definovat nelineární charakteristiky pružin a tlumičů, stejně tak i nasazení různě pokročilých modelů pneumatik. [2]

1.4.1 MULTI-BODY SOFTWARE

Světově nejpoužívanějším softwarem pro multi-body simulace systémů je program Adams americké společnosti MSC Software. Ten ve své základní verzi umožňuje sestavovat obecné systémy, aplikovat zatížení a následně tyto systémy analyzovat. Tento program je dále rozšířen mnoha moduly a nastavbami umožňující uživatelsky přívětivé simulování konkrétních systémů. V oblasti dynamiky vozidel se jedná například o nastavbu Adams Car (zahrnující další specializované moduly), která slouží k simulaci kompletních vozidel a jejich podsystémů.

Pro MSA jednostopých vozidel vyvinula nezávislá společnost VI-grade nastavbu programu Adams s názvem VI-motorcycle. Ta umožňuje realizovat komplexní simulace motocyklů, resp. sestavovat jejich virtuální prototypy, včetně modelování řidiče, který dodává systému motocyklu vstupy. Je tak možné studovat interakce řidiče s motocyklem, které určují celkové chování systému. Snímek obrazovky simulace v tomto programu zachycující modelovaný motocykl a průběhy dvou sledovaných veličin je na Obr. 1.6.



Obr. 1.6 Snímek obrazovky VI-motorcycle [3]

2 MĚŘENÍ PARAMETRŮ VYBRANÉHO MOTOCYKLU

Pro účely této (a navazujících) diplomových prací byl panem Ing. Luborem Zháňalem, Ph.D. zapůjčen motocykl KTM RC 390, na Obr. 2.1.



Obr. 2.1 KTM RC 390 [4]

Jedná se o moderní, lehký, sportovně-silniční jednoválcový motocykl, nižší-střední objemové třídy. Přední teleskopická vidlice je typu upside-down, zadní kyvná vidlice je odpružena centrální tlumící a pružící jednotkou bez přepákování. Základní vybrané technické parametry jsou v Tabulka 2.1.

Tabulka 2.1 [5] KTM RC 390, vybrané technické parametry

Parametr	Hodnota	Parametr	Hodnota
Zdvihový objem	373,2 ccm	Světlost (bez zatížení)	178,5 mm
Vrtání	89 mm	Výška sedla (bez zatížení)	820 mm
Zdvih	60 mm	Zdvih předního odpružení	125 mm
Maximální výkon	32 kW/9000 rpm	Zdvih zadního odpružení	150 mm
Max. točivý moment	35 Nm/7000 rpm	Průměr předního brzd. Kotouče	320 mm
Rozvor	1340 +/- 15mm	Průměr zadního brzd. Kotouče	230 mm
Úhel hlavy řízení	66,5°	Objem palivové nádrže	10 l

Z motocyklu byly odmontovány některé plastové díly v rámci usnadnění přístupu k jednotlivým prvkům motocyklu a snaze omezit riziko jejich poškození při manipulaci se strojem. Zároveň však pouze do té míry, aby byl motocykl stále provozovatelný na pozemních komunikacích. Tento stav je patrný z fotografií této i dalších kapitol.

Nejprve byla zjištěna poloha klíčových bodů v kartézském souřadném systému. Jeho počátek a orientace os byly pro opakovatelnost dalších měření určeny pomocí pevných konstrukčních prvků rámu motocyklu. Posléze byla určena poloha těžiště a změřeny momenty setrvačnosti.

2.1 MĚŘENÍ KINEMATIKY MOTOCYKLU 3D SKENOVÁNÍM

Základním předpokladem pro vytvoření matematického modelu motocyklu je znalost jeho kinematiky. Jinými slovy, polohy klíčových bodů motocyklu v prostoru a jejich interpretace do podoby vzájemně vázaných těles. Tyto údaje se od výrobce nepodařilo získat (navíc by poté bylo otázkou, do jaké míry by takové údaje odpovídaly skutečným parametrům zkoumaného motocyklu), bylo proto nutné dostat se k nim jiným způsobem. Ve snaze dosáhnout co největší přesnosti byla zvolena metoda 3D skenování.

ZÁKLADNÍ POPIS SKENERU A PRŮBĚHU SKENOVÁNÍ

Za tímto účelem byl použit 3D skener ATOS Compact Scan 2M výrobce GOM, GmbH, jenž je vlastnictvím Ústavu automobilního a dopravního inženýrství. Tento skener se řadí k mobilním, bezkontaktním, optickým, reflexivním, aktivním skenerům, využívající strukturované světlo. Skener použit v konfiguraci pro snímání největšího možného objemu, při kterém lze spolehlivě určit polohu kinematických bodů (za vhodných podmínek) s přesností řádově v desetinách milimetru.

Ne všechny snímané plochy motocyklu bylo možné naskenovat za vhodných podmínek, resp. neměly vhodnou odrazivost, nebo je nebylo možné zachytit z více úhlů. Při nevhodné odrazivosti povrchu (zejména lesklé povrchy) byly tyto plochy ošetřeny křídovým sprejem nebo šedou lepicí páskou. Na motocykl byly podle potřeby lepeny referenční terčíky (průměr 5 mm), které skener potřebuje k prostorové orientaci, resp. k napojení jednotlivých snímků.

Digitalizace snímaných ploch byla prováděna softwarem GOM ATOS Professional včetně polygonizace naskenovaného mračna bodů do sítí tvořících virtuální povrchy. Následné určování poloh klíčových bodů bylo provedeno v programu GOM Inspect v licenci pro použití zdarma, tudíž s omezenými funkcemi. Nicméně pro účely této práce byla funkčnost programu zcela dostačující (omezení se prakticky projevila jen v občasné uživatelské nepříjemnosti). Polohy klíčových bodů byly určeny prokládáním odpovídajících virtuálních povrchů matematickými prvky (např. válce, přímky, plochy), z jejichž průniků byly stanoveny souřadnice těchto bodů. Před započítím všech prací se skenerem byla pokaždé provedena kalibrace. Pro názornost přikládám údaje z kalibrace prvního měření, Tabulka 2.2.

Všechna měření na motocyklu využívající 3D skener byla prováděna v laboratoři C1 ÚADI na FSU, VUT.

Tabulka 2.2 Údaje z kalibrace

Obecné informace	
Datum kalibrace	Pátek 30.11. 09:58:49 2018
Kalibrované zařízení	ATOS Compact Scan 2M / 500
Měřicí objem	MV1000 (1000x750x750)
Kalibrační objekt	
Typ, název	Panel, CP40-1000-80436
Počet kalibračních bodů	2655
Certifikované délky	1285.888 / 1285.812 mm
Certifikovaná teplota	20.0 °C
Součinitel tepelné roztažnosti	22.67 x 10 ⁻⁶ 1/K
Teplota měření	21.0 °C
Nastavení kalibrace	
Objektivy	8.00 mm
Intenzita světla	100%
Snímání	dvojitě
Kvalita elipsy	0,4
Výsledky kalibrace	
Odchylka	0,024 Pixelů
Odchylka (optimalizovaná)	0,013 Pixelů
Limitní odchylka, kontrola	0,045 Pixelů, OK
Úhel kamery	24.3°
Výškový rozdíl	737 mm
Měřicí objem	1040 / 800 / 785 mm

2.1.1 MĚŘENÍ POLOH KLÍČOVÝCH BODŮ

PŘÍPRAVA A REALIZACE 3D SKENOVÁNÍ

Při přípravě motocyklu ke skenování a jeho následném provádění bylo nutné mít na paměti především následující skutečnosti vyplývající z principů fungování 3D skeneru. Kromě vhodné odrazivosti snímaných povrchů (kterou lze snadno nedestruktivně upravit) je nutné, aby daný povrch byl v zorném poli obou kamer. Se zvětšujícím se skenovaným objemem se zvětšuje i vzdálenost těchto kamer (v tomto případě byla 500 mm, maximální možná) a bylo tak přinejmenším obtížné naskenovat povrchy v dutinách nebo v zákrytu jedné z kamer.

Proto byl motocykl pro zajištění co nejlepších podmínek pro skenování částečně rozebrán. Dále byl podepřen pod rámem tak, aby byly obě kola vyvšena, resp. vidlice v polohách maximálního roztažení a kola zajištěna proti otáčení. Stejně tak celý motocykl musel zůstat nehybný ve vhodné poloze. Kromě již zmíněného byla přední vidlice proti pootočení v krku řízení zajištěna upínacím pásem. Při manipulaci se skenerem bylo přesto nutno dbát zvýšené opatrnosti, viz Obr. 2.2 a Obr. 2.3.



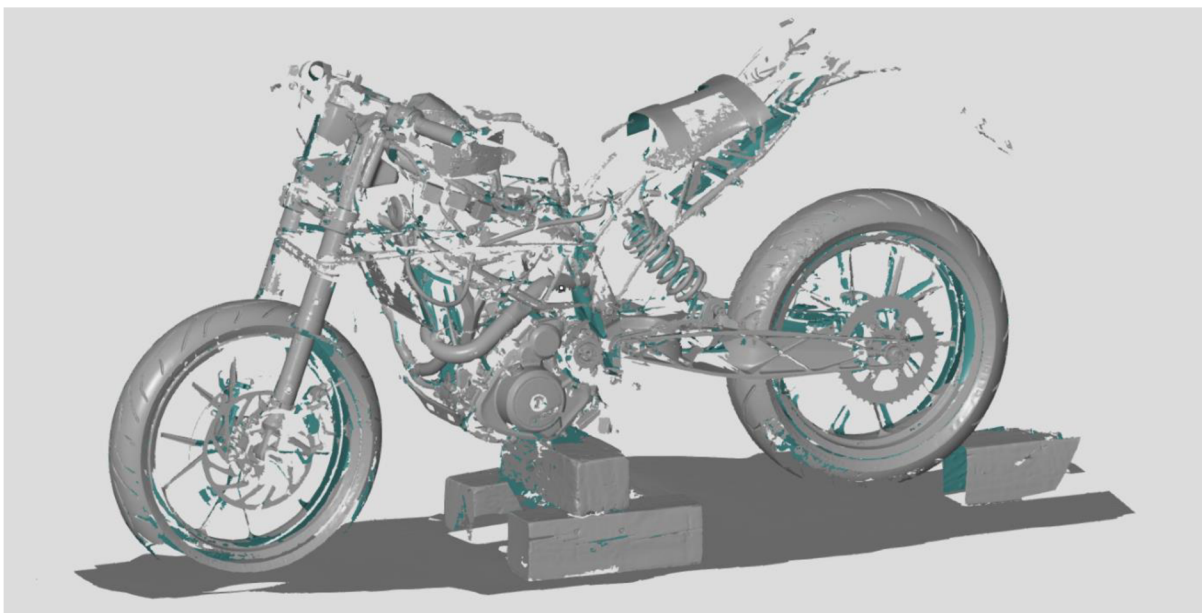
Obr. 2.2 KTM RC 390, 3D skenování, pohled 1



Obr. 2.3 KTM RC 390, 3D skenování, pohled 2

Motocykl byl skenovacím zařízením zachycen z různých úhlů celkem 99krát, bylo nalepeno celkem 105 referenčních terčů pro orientaci. Důraz byl kladen na ty oblasti motocyklu,

kde se nacházely plochy, ze kterých se později plánovalo vycházet při určování kinematických bodů. Výsledkem byla síť polygonů s 1 540 439 uzly, kterou bylo možné prokládat matematickými prvky, viz Obr. 2.4.



Obr. 2.4 KTM RC 390, naskenovaná síť

ZPRACOVÁNÍ NASKENOVANÉ SÍTĚ

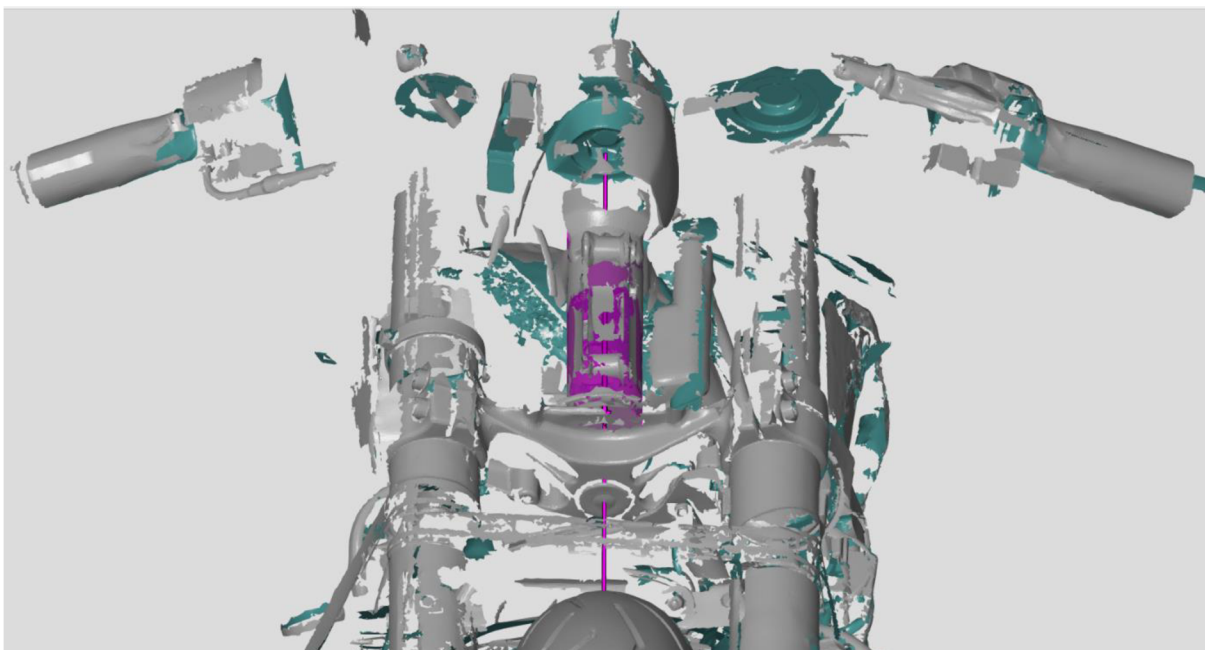
Při určování poloh klíčových bodů byly přijaty některé zjednodušující úvahy. Z nich byly vyvozeny následující předpoklady, podle kterých bylo postupováno. Základním z nich byl předpoklad, že motocyklem lze proložit podélnou rovinu souměrnosti. V této rovině, či kolmo vůči ní se pak uvažovaly polohy následujících bodů a os:

- počátek souřadného systému; osy X, Z koplanární, osa Y kolmá, směr vlevo ke směru jízdy
- osa hlavy řízení, koplanární
- osa kyvné vidlice, kolmá
- těžiště motocyklu
- těžiště paliva
- těžiště jezdce
- středy kol koplanární, osy rotace kol kolmé

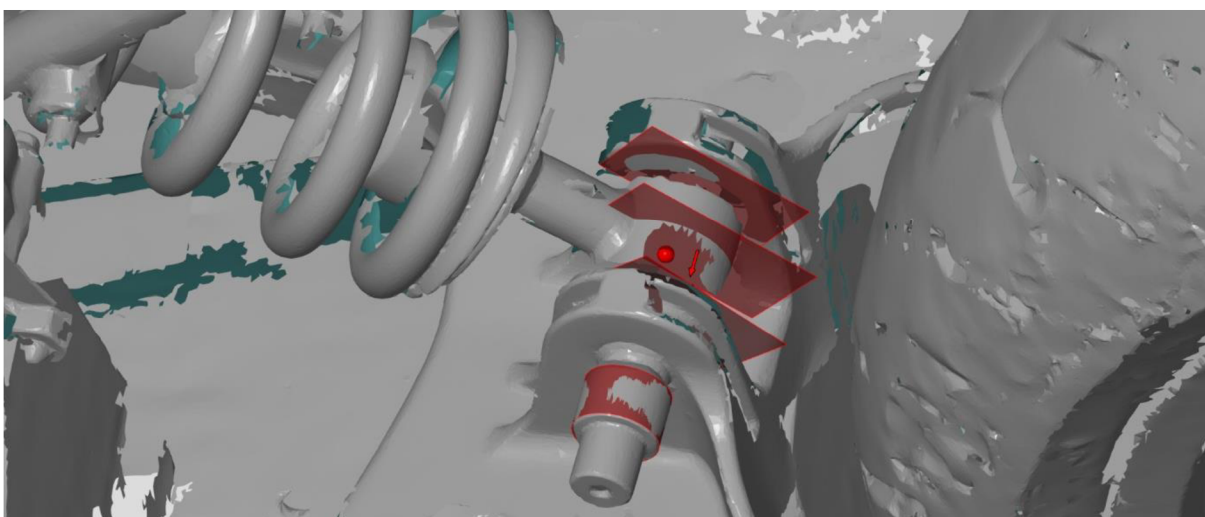
Nejprve byla určena rovina souměrnosti nazvaná CTR_PLANE následujícím způsobem:

- 1) Proložením naskenované plochy krku rámu válcem je nalezena osa hlavy řízení. Osa válce představuje osu hlavy řízení, viz Obr. 2.5.

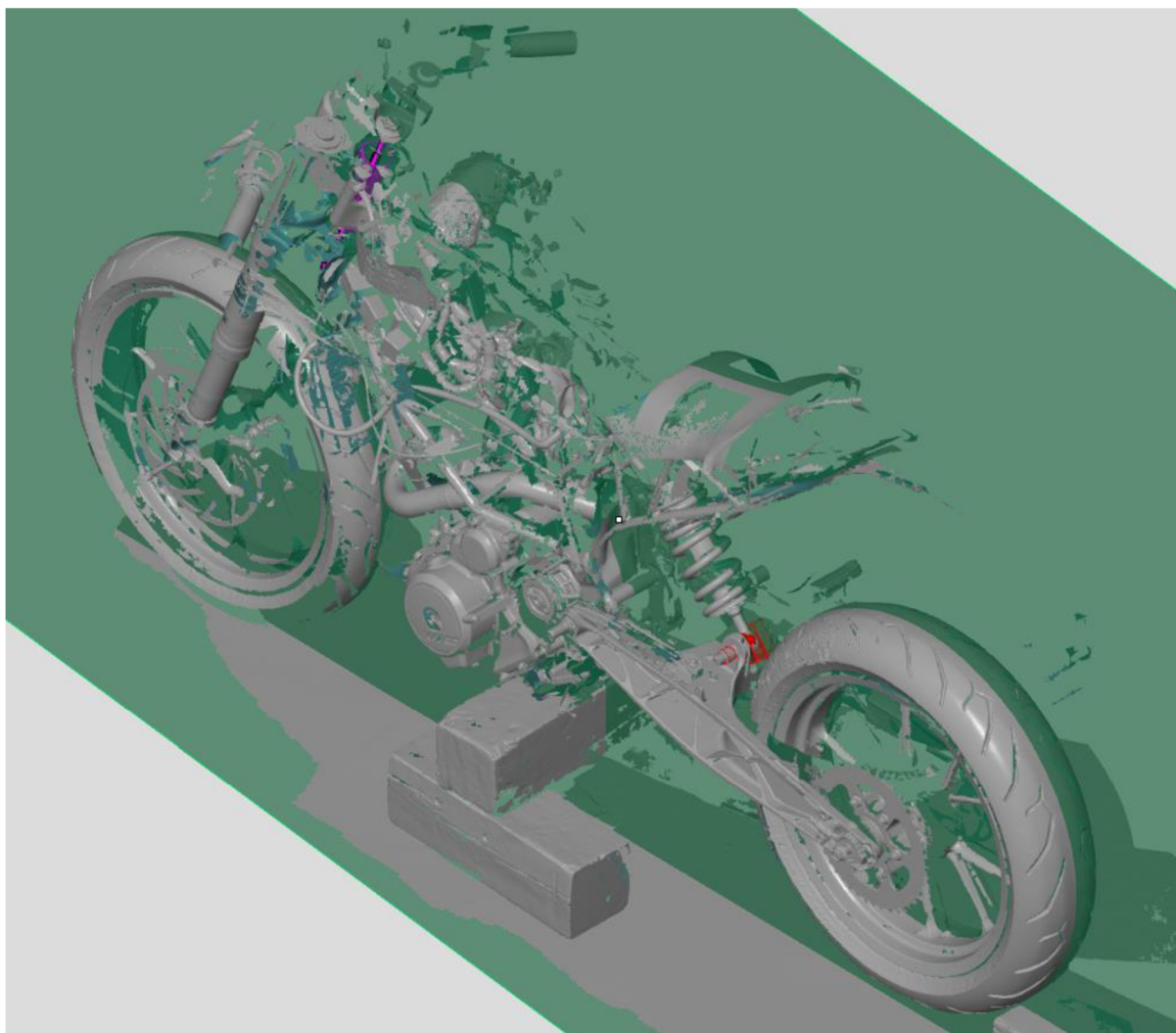
- 2) Dolní uchycení zadního tlumiče na kyvné vidlici je provedeno uprostřed. Vytvořen bod ležící uprostřed držáků zadního tlumiče na kyvné vidlici viz Obr. 2.6 Střed dolního uložení zadního tlumiče Obr. 2.6. Tento bod je tedy zároveň bodem dolního uložení tlumiče C_ARM.
- 3) Osa válce z kroku 1) a bod z kroku 2) určí hledanou rovinu CTR_PLANE viz Obr. 2.7.



Obr. 2.5 Osa hlavy řízení, zvýrazněna fialově



Obr. 2.6 Střed dolního uložení zadního tlumiče, znázorněn červeně



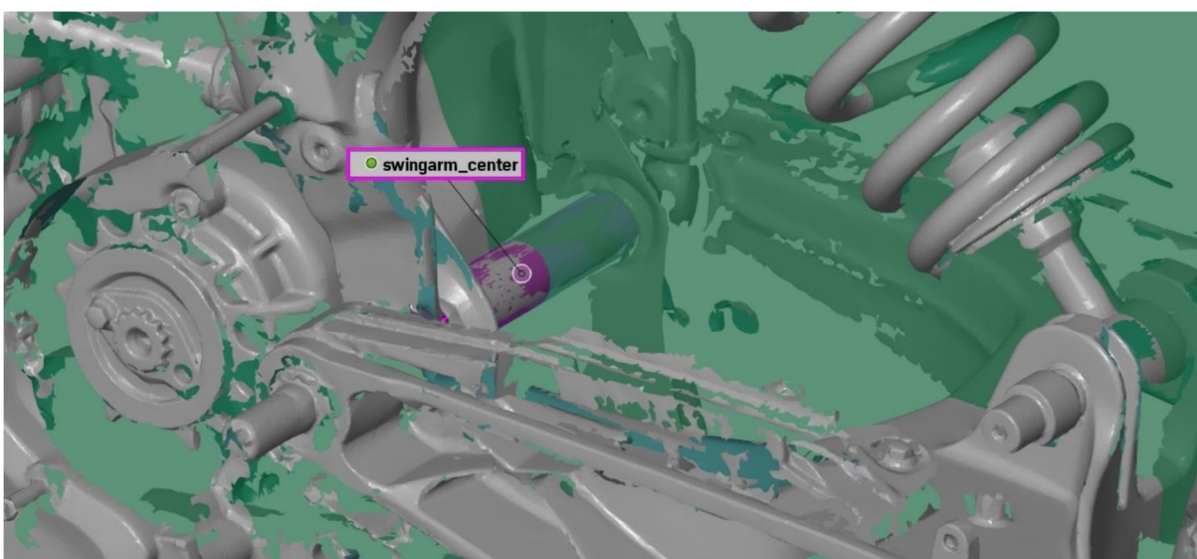
Obr. 2.7 Středová rovina - CTR_PLANE, znázorněna zeleně

SOUŘADNÝ SYSTÉM CS_1

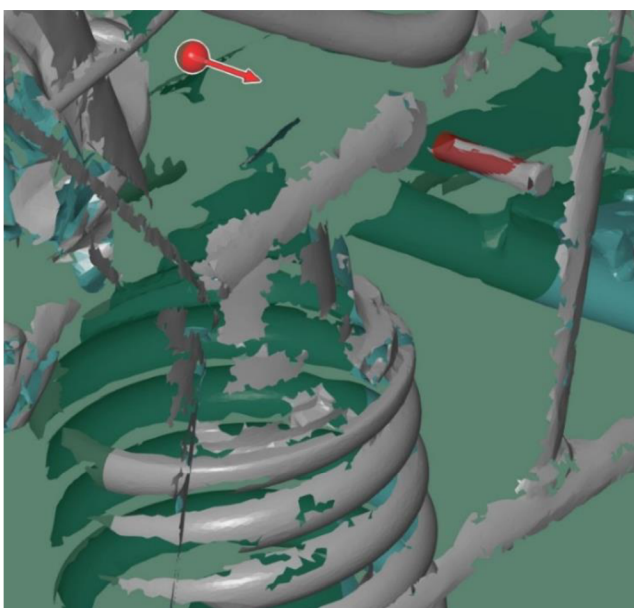
Ve vytvořeném 3D skenu motocyklu byl softwarem GOM nadefinován počáteční souřadný systém, který však nebyl vázaný na geometrii, ale vycházel z prvních nasnímaných pohledů. Nejen pro případ dalších měření na motocyklu pomocí 3D skeneru tak bylo potřeba zvolit souřadný systém nazvaný CS_1 a to tak, aby byl určen pevnou konstrukcí motocyklu, resp. pevnými konstrukčními prvky na rámu motocyklu. Následně byl 3D sken zarovnán do tohoto souřadného systému. Tím byla zajištěna možnost kdykoliv na motocyklu doměřit další body a jednoznačně vyjádřit jejich vzájemnou polohu.

Počátek nového souřadného systému CS_1 byl proto uvažován v průsečíku osy kyvné vidlice a již nalezené roviny souměrnosti CTR_PLANE. Orientace osy Y kolmo k této rovině, její směr vlevo ke směru jízdy, osa Z orientovaná směrem k hornímu uchycení zadní kyvné vidlice, osa X poté leží v CTR_PLANE a její směr je zhruba ve směru jízdy. Praktické provedení proběhlo následujícím způsobem:

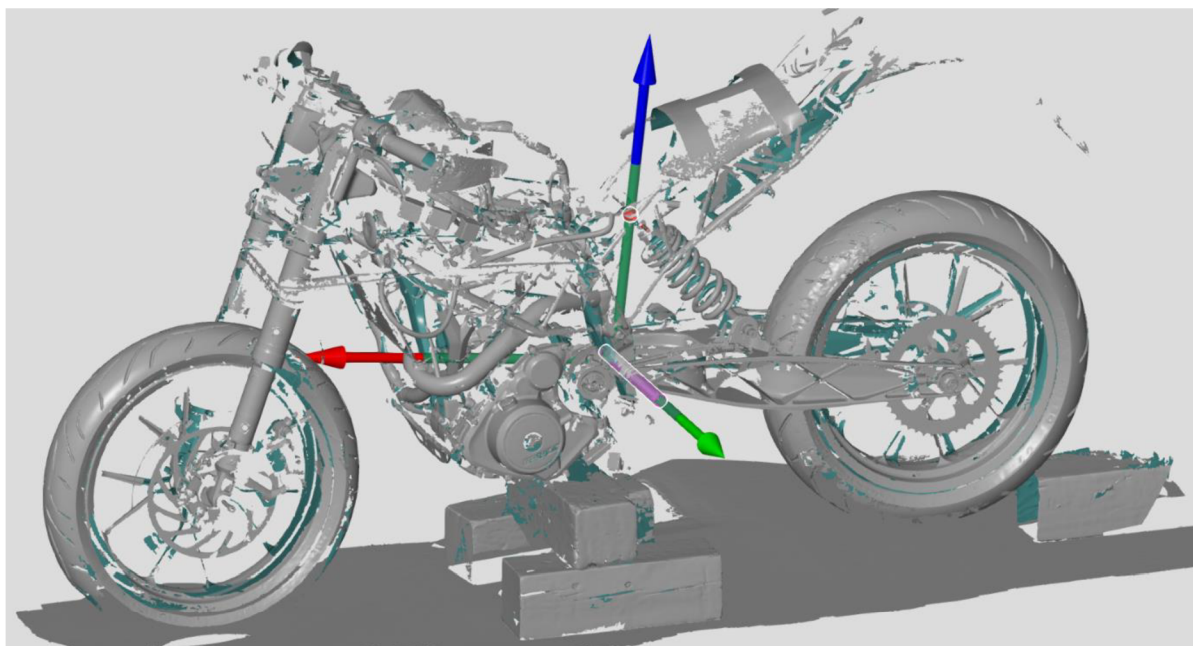
- 1) Byla nalezena osa kyvné vidlice a sice proložením naskenovanou plochou rámu válcem. Osa válce představuje osu kyvné vidlice viz Obr. 2.8.
- 2) V průsečíku osy válce z kroku 1) a již definované CTR_PLANE byl vytvořen bod *swingarm_center* viz Obr. 2.8. Dále značen jako AR_BODY.
- 3) Naskenovaným šroubem našroubovaným do oka horního uložení zadního tlumiče byl proložen válec, jehož osa byla promítnuta do roviny CTR_PLANE. Vznikl bod horního uložení tlumiče BR_BODY viz Obr. 2.9.
- 4) Byl vytvořen souřadný systém CS_1, počátek v bodě AR_BODY, osa Y kolmá k CTR_PLANE, orientace osy Z směrem k bodu BR_BODY. Model byl zarovnán podle tohoto nového souřadného systému viz Obr. 2.10.



Obr. 2.8 Počátek souřadného systému



Obr. 2.9 BR_BODY Horní uložení zadního tlumiče, orientace osy Z



Obr. 2.10 Souřadný systém CS_1 určený pevnými body na motocyklu

VÝSLEDNÉ SOUŘADNICE

Principiálně stejným způsobem, jakým byly nalezeny body ve výše popsaných krocích, byly určeny i všechny další potřebné. Jejich názvy a souřadnice jsou přehledně tabelovány v Tabulka 2.4 a Tabulka 2.5 v kapitole 2.2.

2.1.2 MĚŘENÍ POLOHY TĚŽIŠTĚ

Měření polohy těžiště bylo provedeno volným zavěšením motocyklu ve dvou různých místech a následného 3D skenování v těchto polohách.

Poloha těžiště může být stanovena ve směru horizontálním i vertikálním, avšak důležitější než její sledování u samotného stroje je posuzování polohy těžiště celého celku sestávajícího z jezdce a stroje [1]. Větší vliv na změnu polohy těžiště celku má v této soustavě řidič. Z tohoto důvodu, a také z důvodu časového, byly při zjišťování polohy těžiště zanedbány vlivy na přesun těžiště, které nastávají při jízdě. Zejména stlačení přední a zadní vidlice, potažmo pohyb kol a řetězu, přelévání benzínu v nádrži a oleje v motoru. Zvláště poslední dva zmíněné vlivy jsou obtížně modelovatelné, v rámci měření byly zohledněny následovně.

Celková náplň oleje v motoru je 1,6 litru, při běhu motoru je v olejové vaně pouze malá část celkového množství oleje. Případné přelévání tohoto malého množství za jízdy tak bylo uvažováno za zanedbatelné. Stejně tak i při měření se vliv přelítí olejové náplně zanedbal. Palivová nádrž motocyklu pojme 10 litrů benzínu, vzhledem k zvolené metodě měření těžiště bylo nutné nádrž zcela vypustit. Do matematického modelu byla hmotnost paliva dodána dodatečně.

Aby bylo proti výše zmíněným zjednodušením dosaženo alespoň částečného zpřesnění měření, bylo těžiště měřeno se stlačenými vidlicemi jako by na motocyklu seděl jezdec. Za klidového stavu na zemi na motocykl sedl jezdec o hmotnosti 78 kg, v pozici nohama na stupačkách a rukama na řídítkách. Jezdec motocykl několikrát vlastní vahou propružil pro překonání statického tření v tlumičích. Druhá osoba opatrně pomáhala udržovat rovnováhu tak, aby netlačila na motocykl. Třetí osoba změřila stlačení vidlic následujícím způsobem:

- Stlačení přední vidlice: měřeno posuvným měřítkem na pravém kluzáku mezi guferem a koncovým odlítkem - 112,6 mm (vyvěšeno 162,5 mm; rozdíl 49,9 mm).
- Stlačení zadní vidlice: měřeno svinovacím metrem od osy zadního kola k hraně držáku SPZ – dále značený jako REF_BODY - 513 mm (vyvěšeno 538,7 mm; rozdíl 25,7 mm).

V těchto polohách byly vidlice zafixovány upínacími pásy. Při měření byl odmontován řetěz a kola.

PŘÍPRAVA A REALIZACE 3D SKENOVÁNÍ

Motocykl byl zkompletován do stavu, v jakém byla naplánována budoucí měření za jízdy. Byly tedy opět namontovány zrcátka, světlo, palubní deska, blatník, nádrž, kryt nádrže, tlumič výfuku, sedlo, zadní stupačky a akumulátor s výjimkou kol, která byla při měření odmontována z důvodů popsaných v kapitole 2.3. Při skenování musel být motocykl umístěn tak, aby bylo možné naskenovat plochy motocyklu, ze kterých se dal určit souřadný systém CS_1. Zároveň musel být zavěšen tak, aby bylo možné naskenovat i závěs, za který motocykl visel.

Motocykl byl zavěšen přes ocelovou kulatinu na nůžkovém hydraulickém zvedáku pro automobily. Pro manipulaci bylo nutno dvou osob. Mírné kývání motocyklu způsobovalo komplikace při skenování, avšak kývání bylo pouze v jedné ose a bylo je možné dostatečně utlumit, aby skener úspěšně zachytil potřebné plochy. Zem pod zavěšeným motocyklem byla vyčištěna. Pomocí elektronické vodováhy kalibrované na rovinné ploše v laboratoři bylo zjištěno, že zem pod zavěšeným motocyklem je vodorovná.

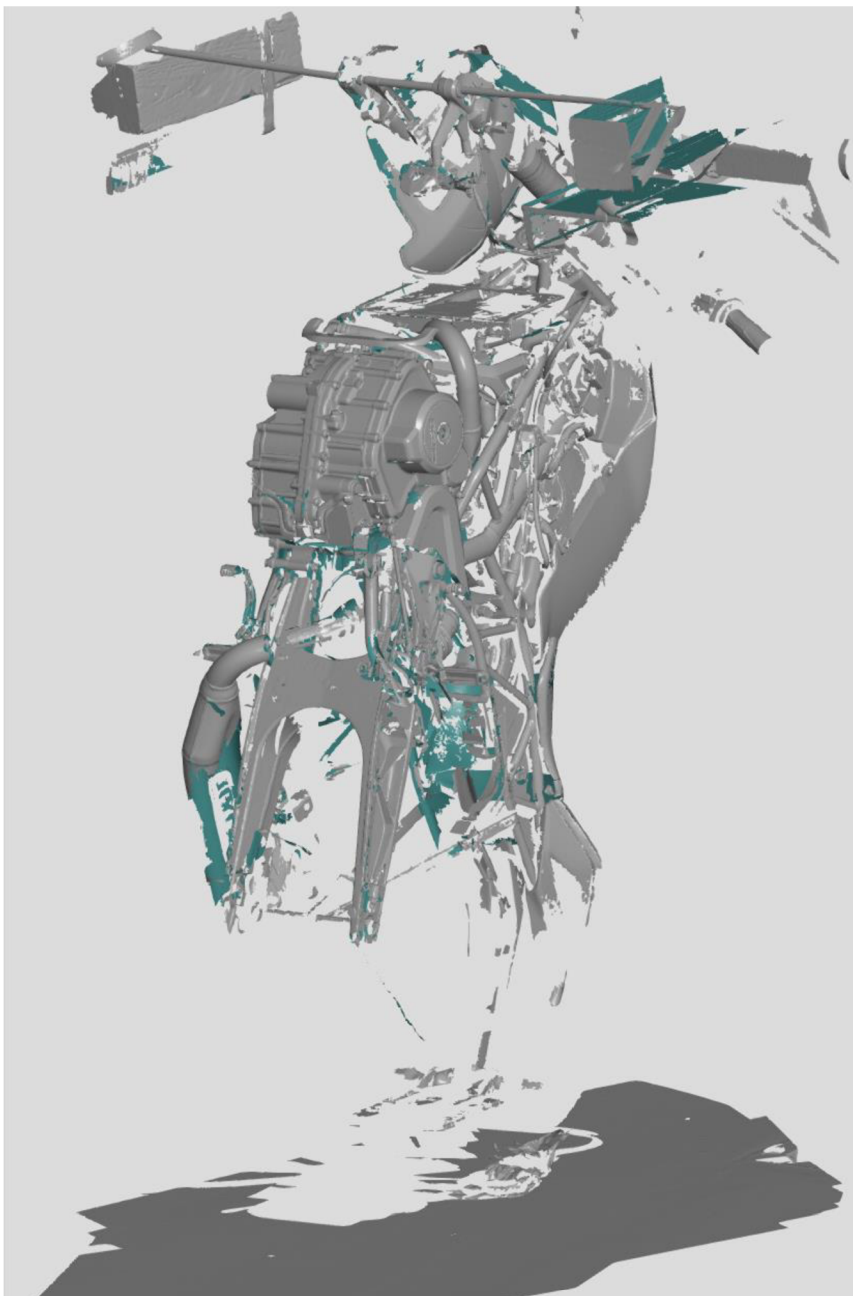
ZAVĚŠENÍ ZA OSU PŘEDNÍHO KOLA

Motocykl byl zavěšen přes ocelovou kulatinu za přední vidlici. Kulatina byla vidlicí prostrčena místo hřídele osy předního kola. Průměr hřídelí osy předního i zadního kola, stejně tak i kyvné vidlice je 15 mm. Situace je zachycena na Obr. 2.11.



Obr. 2.11 Měření těžiště, zavěšení za osu předního kola

Motocykl byl skenovacím zařízením zachycen z různých úhlů celkem 65krát, bylo nalepeno celkem 87 referenčních terčků pro orientaci. Důraz byl kladen na ty oblasti motocyklu, kde se nacházely plochy, ze kterých se později vycházelo při určování souřadného systému a zavěšení motocyklu. Výsledkem byla síť polygonů s 1 933 027 uzly, kterou bylo možné prokládat matematickými prvky, viz Obr. 2.12.

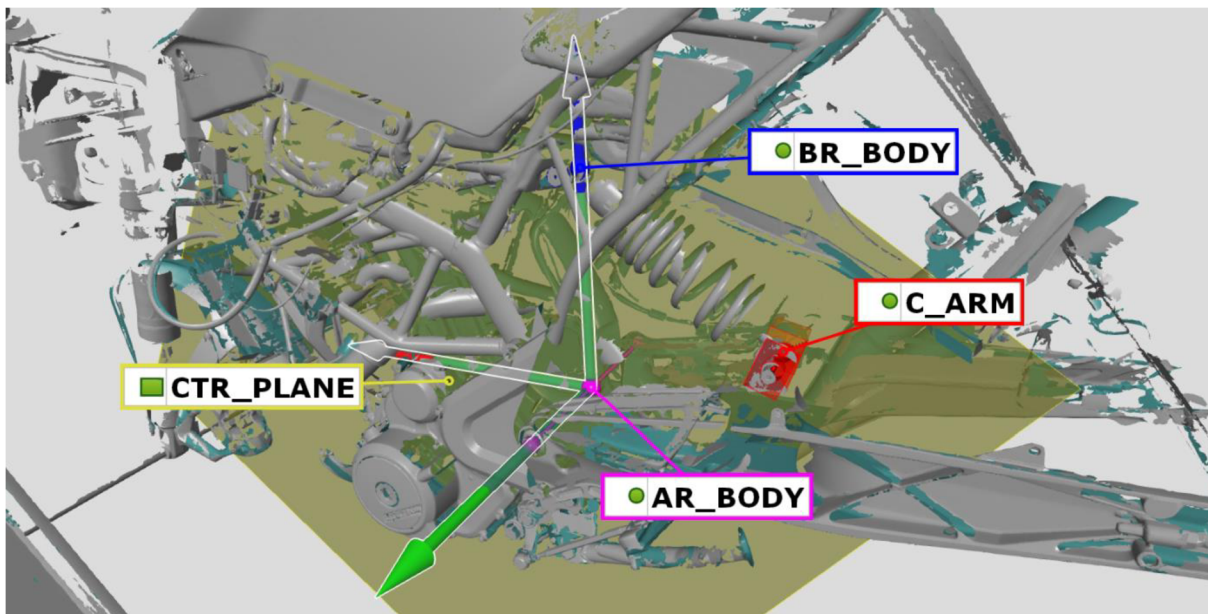


Obr. 2.12 Měření těžiště, zavěšení za osu předního kola, naskenovaná síť

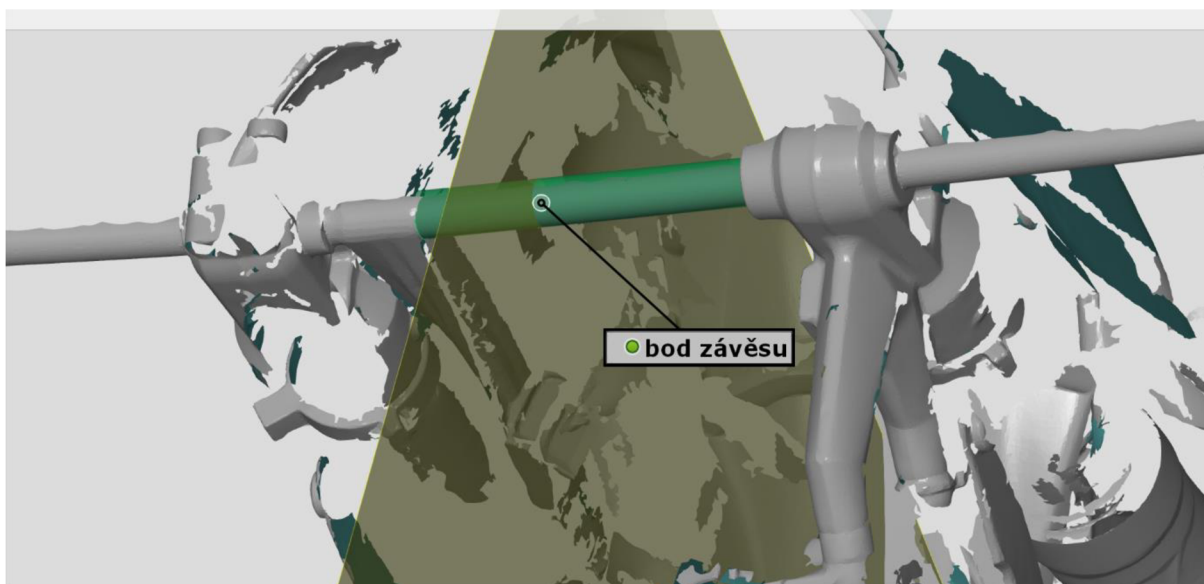
Cílem bylo nyní v souřadném systému shodném se systémem při předchozím skenování určit přímku, která vychází ze závěsu a je kolmá k zemi. Toho bylo dosaženo následujícím způsobem:

- 1) Nalezeny body C_ARM, BR_BODY, AR_BODY a rovina CTR_PLANE, viz Obr. 2.13.
- 2) Vytvořen souřadný systém CS_1, viz Obr. 2.13.
- 3) Určen bod závěsu. Naskenovanou ocelovou tyčí mezi kluzáky přední vidlice proložen válec. Průsečík osy tohoto válce s rovinou CTR_PLANE je bodem závěsu, viz Obr. 2.14.

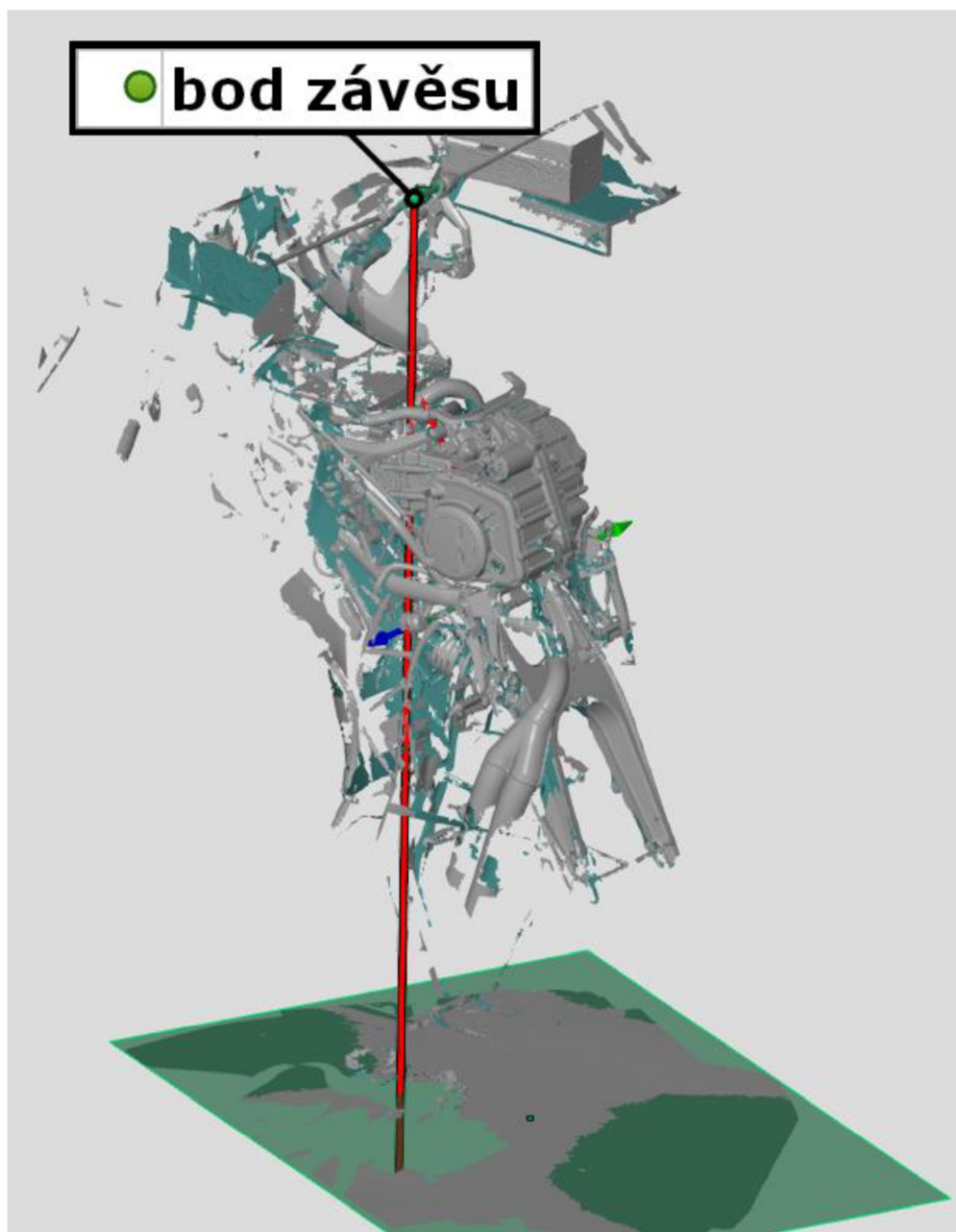
- 4) Proložena rovina GROUND naskenovanou částí podlahy.
- 5) Vytvořena přímka *závěs_1* kolmá na rovinu GROUND procházející bodem závěsu, viz Obr. 2.15.



Obr. 2.13 Měření těžiště, zavěšení za osu předního kola, souřadný systém a CTR_PLANE



Obr. 2.14 Měření těžiště, zavěšení za osu předního kola, bod závěsu



Obr. 2.15 Měření těžiště, Zavěšení za osu předního kola, přímka závěs_1

ZAVĚŠENÍ ZA OSU KYVNÉ VIDLICE

Pro určení polohy těžiště bylo potřeba získat další přímku, která by byla v kolmém průmětu do roviny CTR_PLANE, v ideálním případě kolmá na přímku *závěs_1*. Poloha těžiště byla odhadnuta v oblasti motoru, dále bylo tedy rozhodnuto zavěsit motocykl za osu kyvné vidlice, ježto dané řešení se zároveň jeví jako výhodné z hlediska manipulace.

Samotný princip a postup při skenování a následném zpracování naskenovaných dat byl obdobný přechodným měřením. Pohled na zavěšený motocykl je na Obr. 2.16.

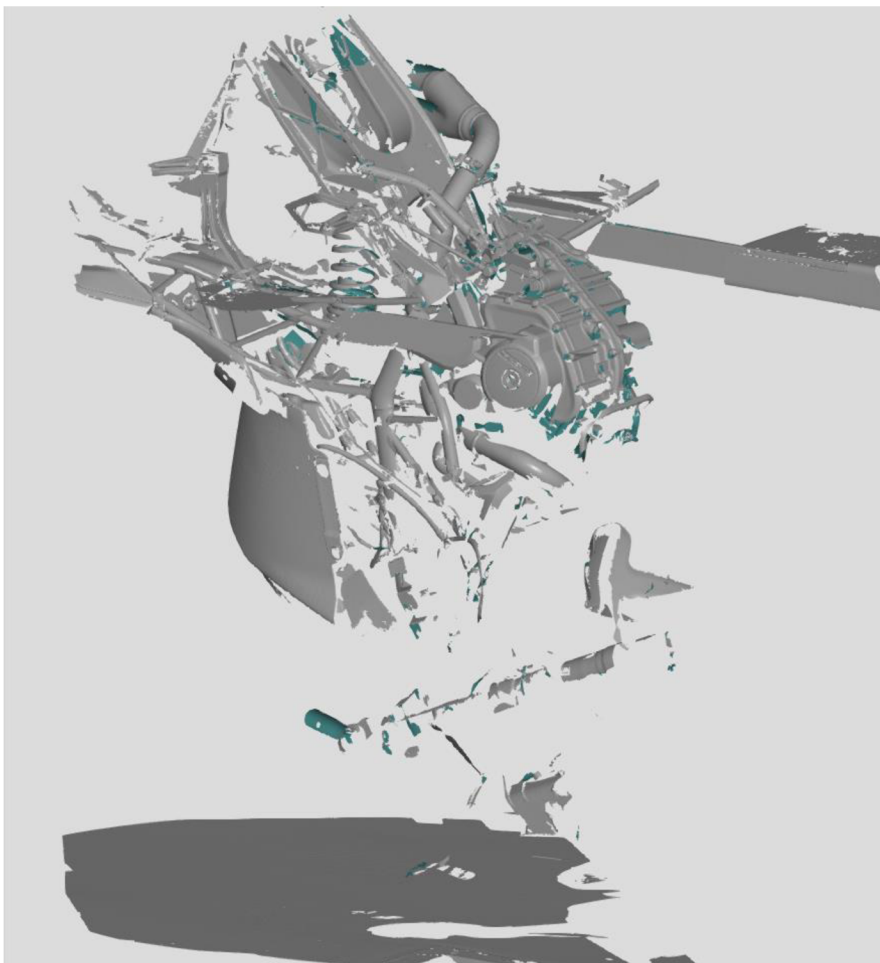


Obr. 2.16 Měření těžiště, zavěšení za osu kyvné vidlice

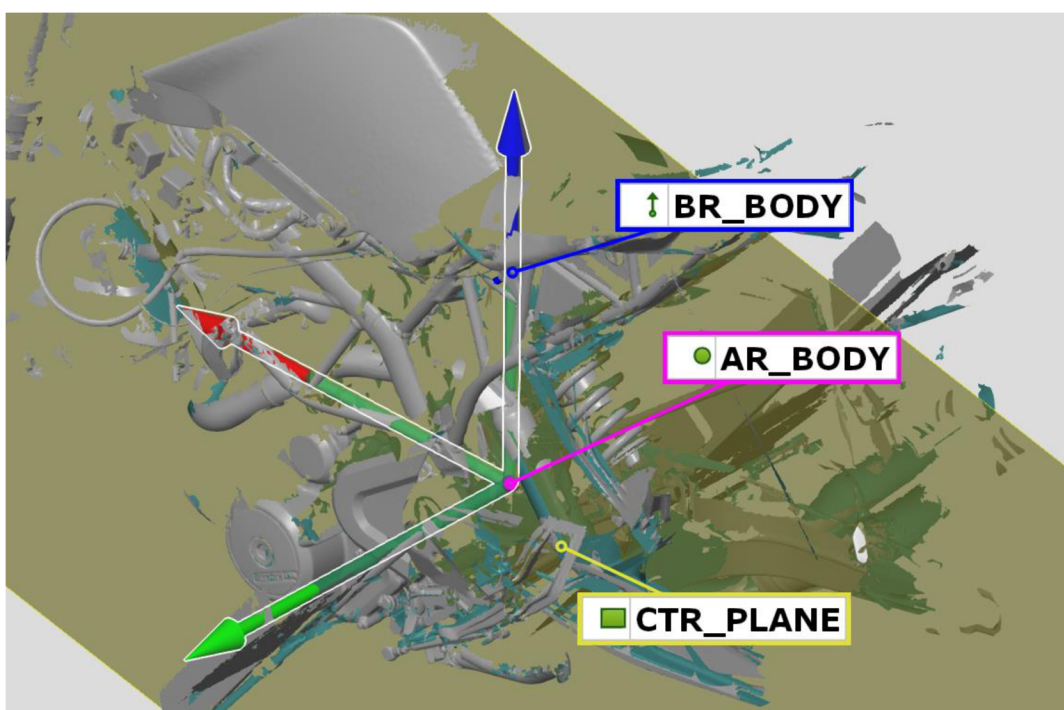
Motocykl byl skenovacím zařízením zachycen z různých úhlů celkem 47krát, bylo nalepeno celkem 61 referenčních terčů pro orientaci. Důraz byl kladen na ty oblasti motocyklu, kde se nacházely plochy, ze kterých se později vycházelo při určování souřadného systému a zavěšení motocyklu. Výsledkem byla síť polygonů s 1 343 810 uzly, kterou bylo možné prokládat matematickými prvky, viz Obr. 2.17.

Cílem bylo opět v souřadném systému CS_1 určit přímku, která vychází ze závěsu a je kolmá k zemi. Toho bylo dosaženo následujícím způsobem:

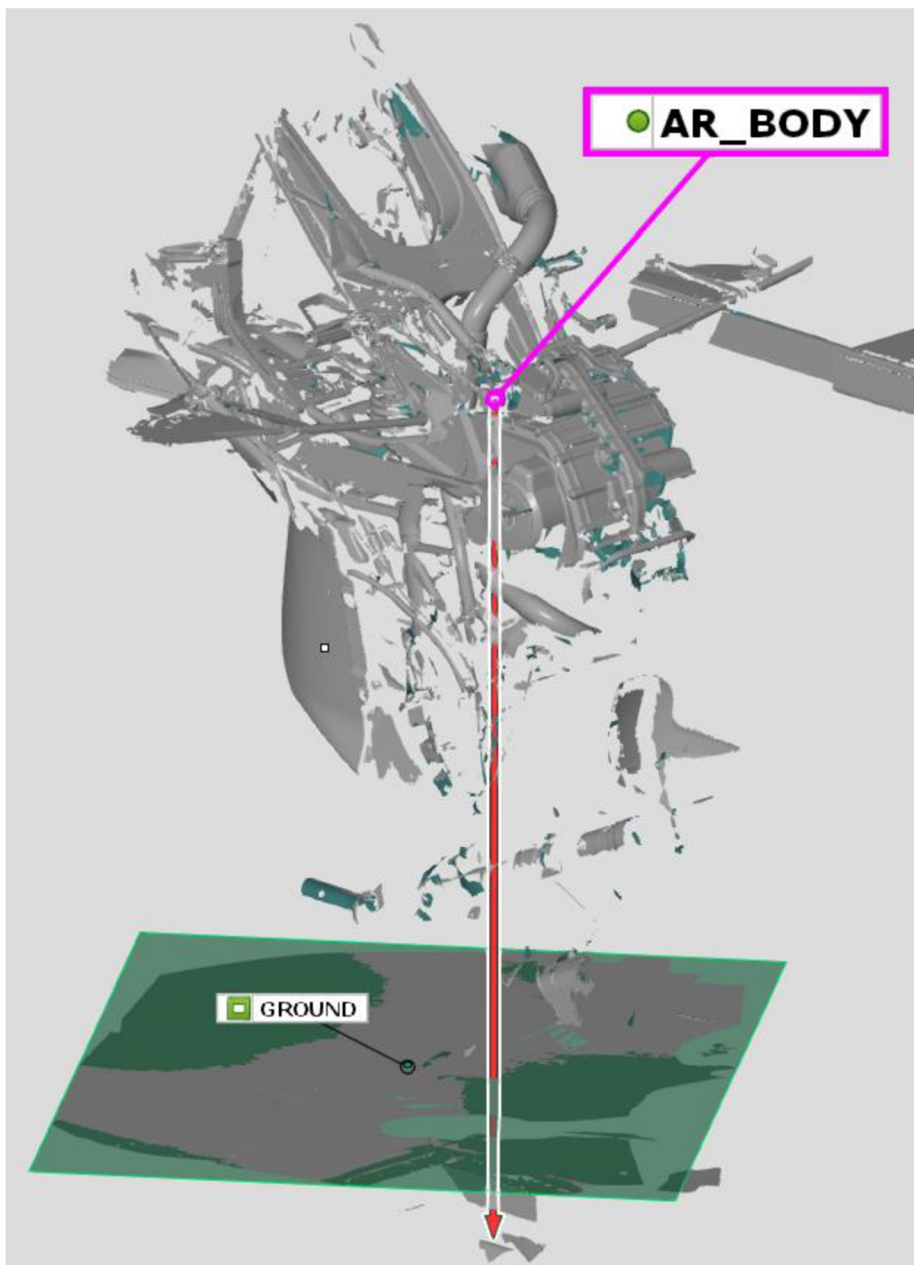
- 1) Nalezeny body BR_BODY, AR_BODY a rovina CTR_PLANE, viz Obr. 2.18.
- 2) Vytvořen souřadný systém CS_1, viz Obr. 2.18.
- 3) Určen bod závěsu. Motocykl zavěšen za osu kyvné vidlice, proto za bod závěsu považován přímo body AR_BODY.
- 4) Proložena rovina GROUND naskenovanou částí podlahy.
- 5) Vytvořena přímka *závěs_2* kolmá na rovinu GROUND procházející bodem závěsu, viz Obr. 2.19.



Obr. 2.17 Měření těžiště, zavěšení za osu kyvné vidlice, naskenovaná síť



Obr. 2.18 Měření těžiště, zavěšení za osu kyvné vidlice, souřadný systém a CTR_PLANE

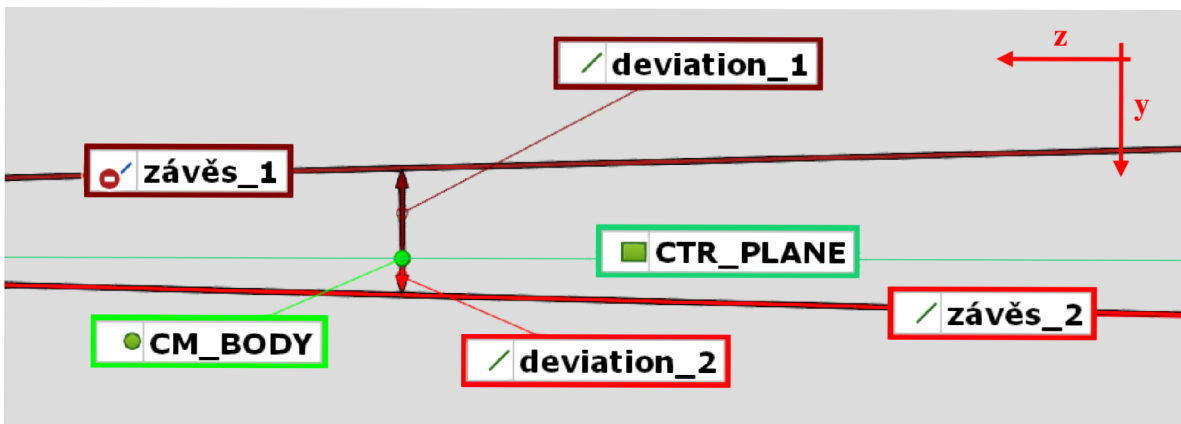


Obr. 2.19 Měření těžiště, zavěšení za osu kyvné vidlice, přímka závěs_2

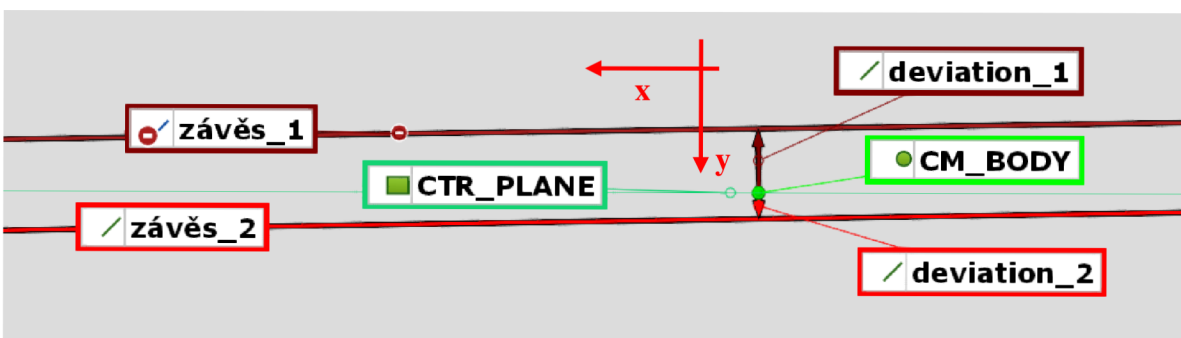
URČENÍ POLOHY TĚŽIŠTĚ

Skutečná poloha těžiště motocyklu se nachází přibližně v podélné rovině souměrnosti motocyklu. Jak bylo zmíněno již výše, pro účely vytvoření matematického modelu v rámci této práce bylo stanoveno, že těžiště modelu bude ležet přímo v této rovině.

Do původní naskenované sítě motocyklu byly přidány přímky *závěs_1* a *závěs_2*. Pokud by měření bylo dokonale přesné, protnul by se tyto přímky v jednom bodě, čímž by bylo těžiště určeno. V důsledku především způsobu zavěšení, však byly mimoběžné, viz Obr. 2.20 a Obr. 2.21.

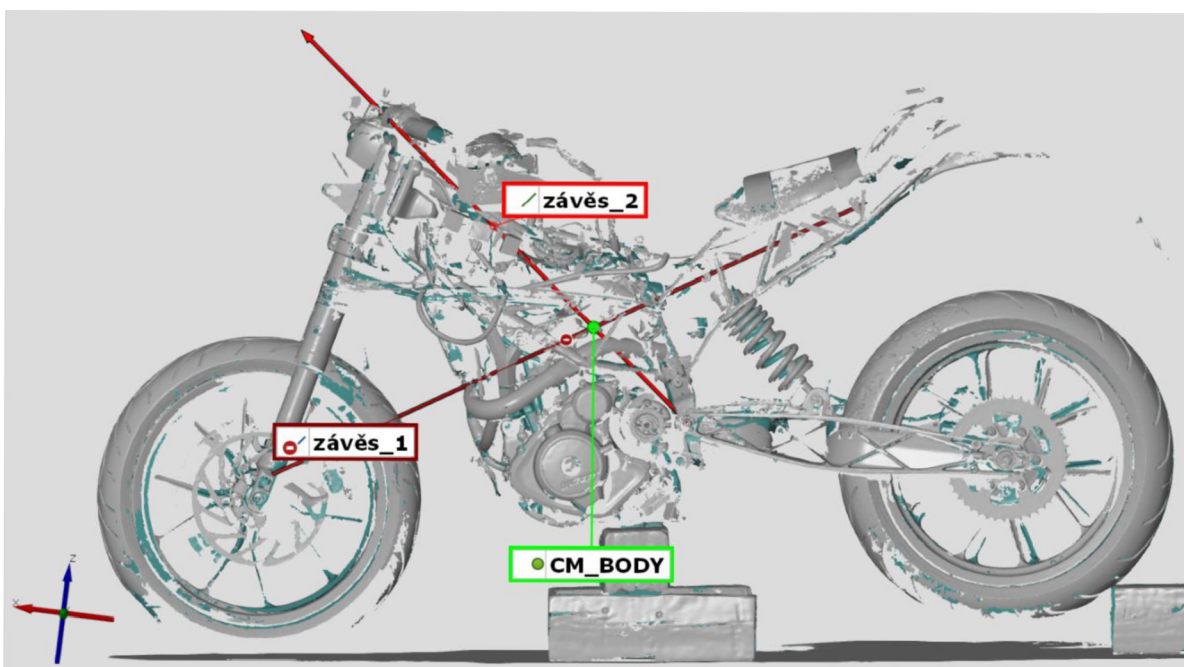


Obr. 2.20 Mimoběžky, pohled v ose X



Obr. 2.21 Mimoběžky, pohled v ose Z

Těžiště motocyklu bez kol, označené **CM_BODY** bylo tedy určeno jako průsečík přímek *závěs_1* a *závěs_2* v kolmém průmětu do roviny **CTR_PLANE**. Jinými slovy, při pohledu v ose Y byl průsečík těchto přímek vynesena do roviny **CTR_PLANE**, viz Obr. 2.22.



Obr. 2.22 Těžiště motocyklu

Poloha motocyklu při zavěšení na tyči není zcela shodná s polohou, která by odpovídala zavěšení motocyklu na vlákno. Vzdálenost od krajů závěsů (okraje přední vidlice, rámu) k zemi byla kontrolována svinovacím metrem, jakožto jediná v daný moment dostupná metoda kontroly. Zde předpokládám, že došlo k největší chybě. Dále mohly přispět nepřesnosti při skenování a následném zpracování naskenovaných dat, ty však vůči chybě zavěšení považuji za zanedbatelné.

Bohužel zavěšení za vlákno, byť prakticky proveditelné, nebylo možné provést v kombinaci s 3D skenováním. To vyžaduje, aby snímáný předmět byl nehybný, což nelze prakticky zajistit, aniž by se výrazně ovlivnilo měření. I při způsobu zavěšení, který byl zvolen, docházelo ke kmitání motocyklu, které však díky tření tyče o podporu bylo možné dostatečně uklidnit.

Kolmé vzdálenosti od roviny CTR_PLANE z nalezeného bodu těžiště CM_BODY k osám zavěšení byly nazvány *deviation_1* a *deviation_2*, viz Obr. 2.20 a Obr. 2.21. Jejich velikosti jsou 8,24 mm a 3,34 mm.

Pro přesnější určení polohy těžiště bylo v plánu zavěsit motocykl v ještě alespoň jednom dalším místě. Nejvýhodněji z hlediska manipulace se nabízelo motocykl zavěsit za osu zadního kola. Vznikla by tak třetí přímkou *závěs_3*, která by v kolmém průmětu do osy Y vytvořila s přímkami *závěs_1* a *závěs_2* trojúhelník, v jehož těžišti by byl určen bod CTR_PLANE.

Vzhledem k tomu, že už při samotném vynucení polohy těžiště přímo do roviny CTR_PLANE se dopouštím malé chyby proti skutečnosti, další přidávání závěsů by již měření pravděpodobně nijak výrazně nezpřesnilo.

Polohu těžiště by se také dalo určit vážením motocyklu. Tato metoda však nebyla dostupná, neboť v laboratoři byly k dispozici pouze váhy vážící s přesností na celé kilogramy. U tělesa vážícím přibližně 120 kg by měření bylo nepřesné. Případné využití této metody by s těmito vahami bylo dobré pouze jako ověřovací měření pro provedenou metodu 3D skenování.

Naměřená poloha těžiště tedy platí pro těleso o hmotnosti 120 kg v kapitole 2.3 nazvané BODY, kterému byly změřeny i hodnoty momentů setrvačnosti. Jedná se o motocykl bez kol a paliva s vidlicemi stlačenými do poloh odpovídajících těm, které vyvolá zasednutí motocyklu za klidového stavu jezdce o hmotnosti 78 kg. Jezdec a palivo byli v následně vytvořeném matematickém modelu motocyklu popsaném v kapitole 3 nahrazeni dalšími tělesy s vlastními těžišti a momenty setrvačnosti izolovanými od tělesa BODY.

2.1.3 DOPLŇUJÍCÍ MĚŘENÍ

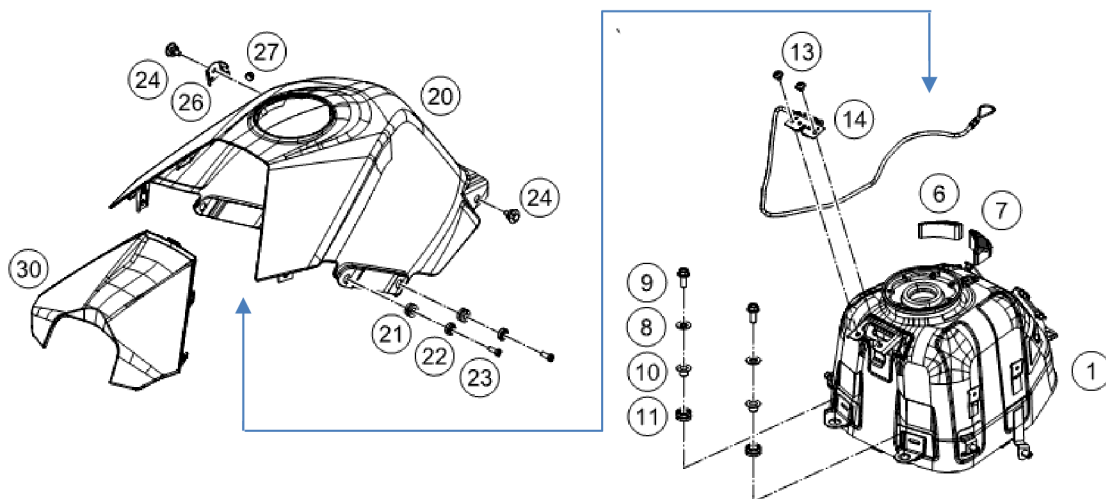
Pro vytvoření matematického modelu byly kromě doposud naměřených a popsáných parametrů motocyklu doplněny některé další.

PALIVO

Nezanedbatelným parametrem při vytváření matematického modelu je palivo v nádrži. A sice jeho vliv na polohu těžiště, a to jak statickou (výškovou i podélnou, např. vliv na rozložení hmotnosti mezi přední a zadní kolo, při ustáleném průjezdu zatáčkou), tak dynamickou, resp. jeho přelévání při brzdění a akceleraci. Ve zjednodušeném

matematickém modelu vytvořeném v této práci bylo rozhodnuto nahradit hmotnost paliva pevným hmotným bodem.

Nádrž motocyklu je z oceli, přibližně tvaru krychle, pod plastovým krytem, který ji zcela zakrývá. Situaci lze pochopit z katalogu dílů, viz Obr. 2.23, nádrž na pozici č.1, kryt na pozici č.20.



Obr. 2.23 Katalog ND, KTM RC 390, nádrž [6]

Nádrž pojme 10 litrů paliva – benzínu. Pro omezení vlivu přelévání paliva bylo předpokládáno, že jízdní měření budou probíhat s plnou, resp. téměř plnou nádrží. Průměrné množství paliva při těchto testech bylo odhadnuto na 8 litrů. Při hustotě benzínu 750 kg/m^3 a objemu 8 litrů vychází hmotnost paliva na 6 kg.

Při žádném z provedených 3D skenování nebyla nádrž přímo zachycena. Poloha těžiště paliva označena bodem TANK_CM, ležícím v rovině CTR_PLANE je tak určena pouze odhadem založeným na znalosti tvaru nádrže a její přibližné polohy. Zde je tedy prostor pro zlepšení do budoucna.

TĚŽIŠTĚ JEZDCE

Jak již bylo zmíněno výše, poloha těžiště jezdce je při zkoumání dynamiky motocyklu zcela zásadním parametrem. V rámci splnění dlouhodobých cílů projektu, kterých je tato diplomová prvním krokem, je řešení této problematiky tématem samostatné diplomové práce. Pro doplnění matematického modelu je tak jezdec nahrazen nepohyblivým hmotným bodem, označeným RIDER_CM s definovanou hmotností 78 kg. Těžiště člověka, jak je známo, nachází se přibližně v oblasti břicha, v případě sedu na motocyklu lze předpokládat jeho přesun mírně dopředu a nahoru. Poloha těžiště jezdce podobně jako v případě paliva určena orientačně, na základě zmíněných předpokladů v rovině CTR_PLANE.

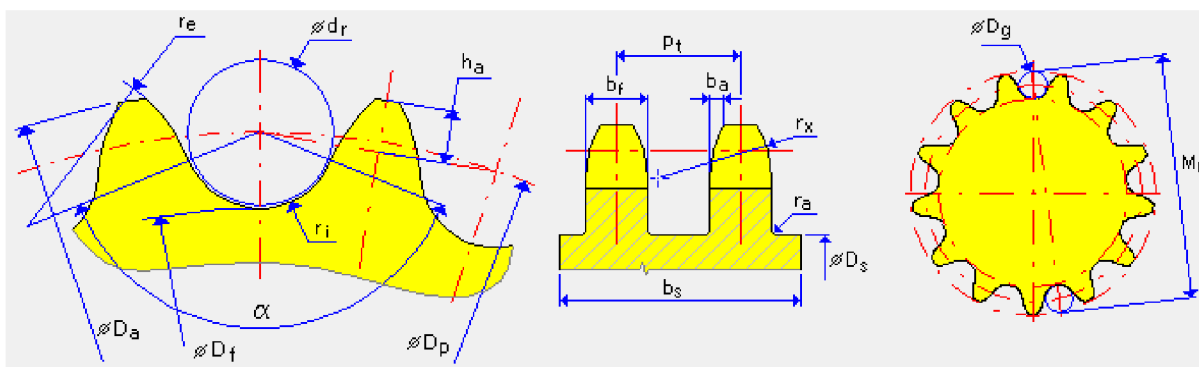
ŘETĚZOVÁ SADA

Pro účely budoucího vylepšování matematického modelu byly zjištěny i rozměry řetězového převodu. Na motocyklu je namontován řetěz DID 520 ZVMX, X-ring, počet článků řetězu 118, sekundární kolečko 15 zubů, rozeta 45 zubů. Rozměry řetězu a řetězových kol vychází z normy ISO 606:2004, viz Tabulka 2.3 a Obr. 2.24. Tyto údaje byly získány v programu Autodesk

Inventor Professional – v licenci pro studijní účely. Průměr roztečných kružnic D_p byl ověřen z tabulkových hodnot na motocyklu posuvným měřítkem.

Tabulka 2.3 Rozměry řetězu a řetězových kol

Zuby	k	Zuby	k
15 ul	1,000 ul	45 ul	1,000 ul
D_p	P_t	D_p	P_t
76,355 mm	16,590 mm	227,577 mm	16,590 mm
d_r	b_f	d_r	b_f
10,160 mm	9,168 mm	10,160 mm	9,168 mm
SC	h_a	SC	h_a
0,051 mm	4,763 mm	0,051 mm	4,763 mm
b_s	b_a	b_s	b_a
9,168 mm	2,064 mm	9,168 mm	2,064 mm
D_s	r_x	D_s	r_x
50,497 mm	15,875 mm	202,834 mm	15,875 mm
r_a	r_e	r_a	r_e
0,635 mm	20,726 mm	0,635 mm	57,302 mm
D_a	r_i	D_a	r_i
84,211 mm	5,131 mm	236,548 mm	5,131 mm
D_f	α	D_f	α
66,093 mm	134,00 deg	217,316 mm	138,00 deg



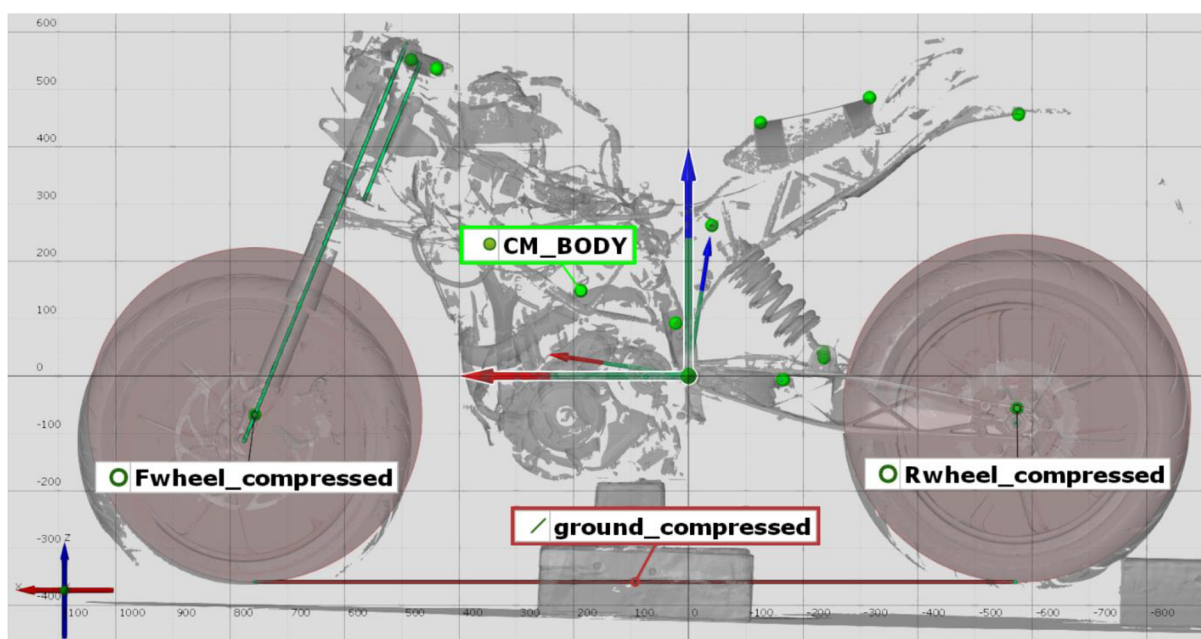
Obr. 2.24 Doplnění k Tabulka 2.3

2.1.4 SOUŘADNÝ SYSTÉM CS_2

Po dohodě s vedoucím práce bylo rozhodnuto, že bude vytvořen nový souřadný systém CS_2. Ten musí být proti původnímu, určenému pomocí pevných konstrukčních prvků motocyklu přizpůsoben tak, aby lépe odpovídal stavu za jízdy. Tedy pootočen okolo osy Y tak, aby osa X směřovala po směru jízdy rovnoběžně s vozovkou. To vše ve stavu, kdy byla motocyklu

změřena poloha těžiště, tedy při odpovídajícím stlačení vidlic při zasednutí jezdce o hmotnosti 78 kg, jak je popsáno v úvodu kapitoly 2.1.2.

Příslušné body, přímky a kružnice, které byly získány v programu GOM Inspect byly pomocí formátu IGES přeneseny do programu Autodesk Inventor Professional. V něm byly provedeny úpravy, resp. přesunutí příslušných geometrií. Nové vzdálenosti a úhly byly následně odměřeny a nově vytvořeny v původním souboru v programu GOM Inspect, viz Obr. 2.25. Následně byl vytvořen nový souřadný systém a exportovány souřadnice požadovaných geometrických prvků v obou těchto souřadných systémech.



Obr. 2.25 Nový souřadný systém, CS_2

2.2 VÝSLEDKY MĚŘENÍ KINEMATIKY MOTOCYKLU

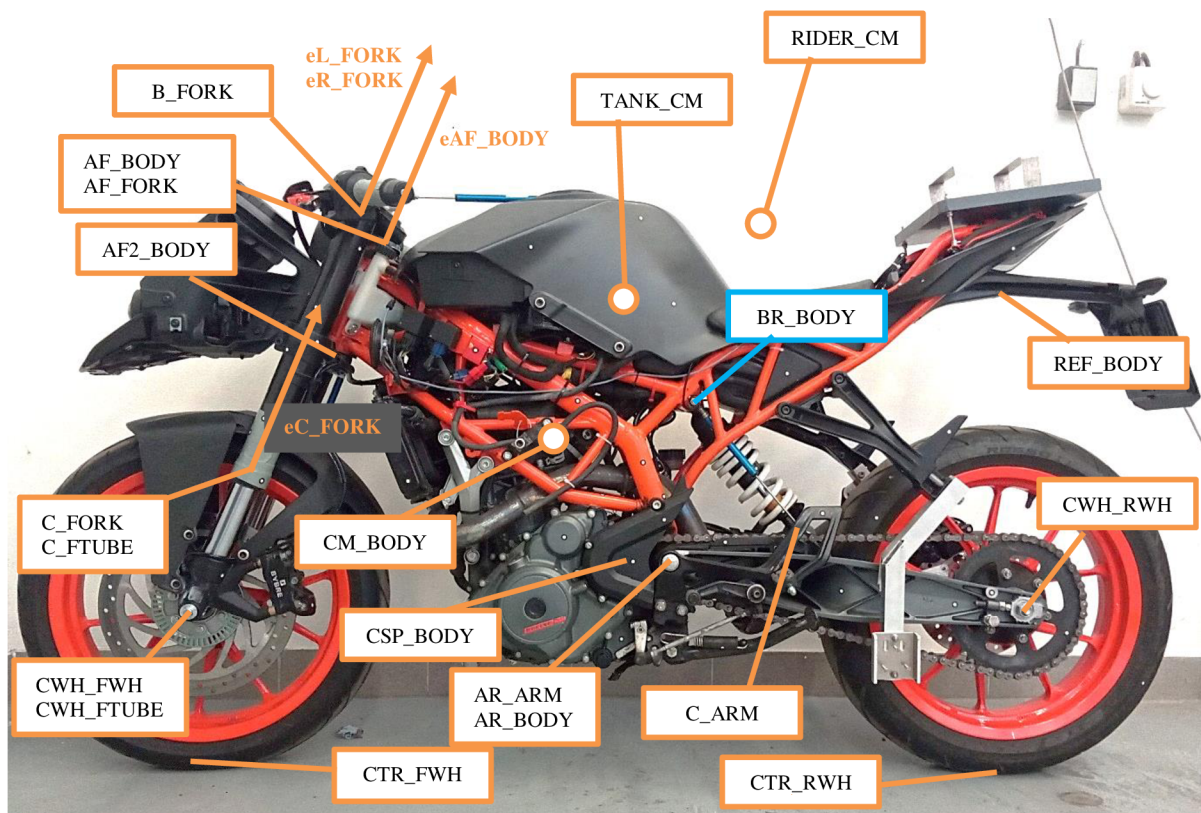
Souřadnice změřených bodů v souřadném systému CS_1 jsou v



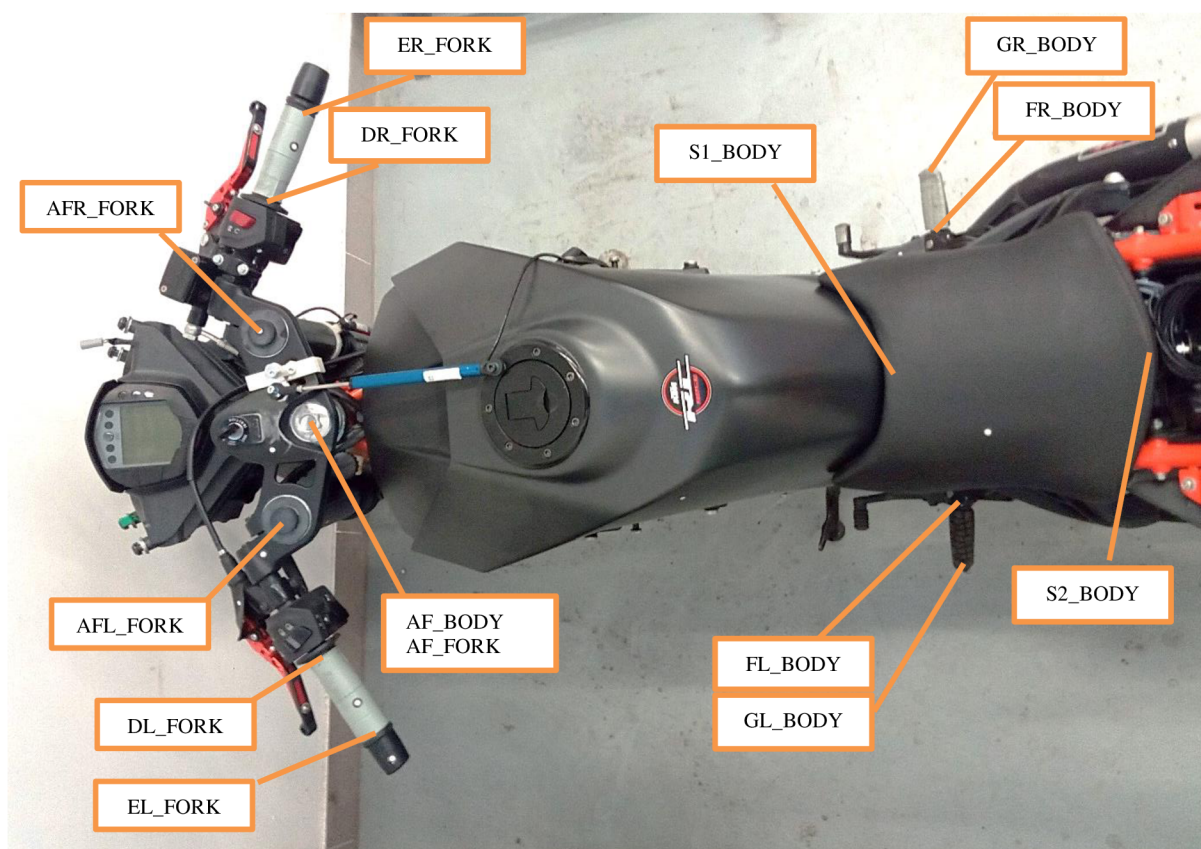
Obr. 2.27 KTM RC 390, Názvy měřených bodů, pohled 2

Tabulka 2.4 a Tabulka 2.5. V souřadném systému CS_2 v Tabulka 2.6 a Tabulka 2.7, zároveň jsou v těchto tabulkách uvedeny navíc některé body, které byly přidány během dalších měření na motocyklu. Výhodou zjišťování poloh bodů pomocí 3D skenování, je mimo jiné také možnost kdykoliv se ke skenovanému objektu vrátit a určit si podle potřeby další body, přímky aj.

Názvy bodů byly vybrány po dohodě s vedoucím práce, pro přehlednost jsou popsány na následujících obrázcích.



Obr. 2.26 KTM RC 390, Názvy měřených bodů, pohled 1



Obr. 2.27 KTM RC 390, Názvy měřených bodů, pohled 2

Tabulka 2.4 CS_1, souřadnice bodů

Název bodu	Souřadnice [mm]		
	osa-x	osa-y	osa-z
REF_BODY	-499,38	0	539,5948
BR_BODY	0	0	266,1394
FL_BODY	-164,484	194,1453	19,06017
ER_FORK	516,5324	-339,215	462,8895
AF2_BODY	606,3506	0	218,3579
DR_FORK	562,7972	-250,96	471,2948
GL_BODY	-161,883	270,4078	18,48933
AF_BODY	546,0524	0	470,7936
C_ARM	-229,261	0	67,96234
DL_FORK	562,7972	250,9598	471,2948
AR_ARM	0	0	0
CWH_RWH	-576,254	0	6,39028
FR_BODY	-164,484	-194,145	19,06017
CM_BODY	187,7939	0	148,8287
EL_FORK	516,5324	339,2146	462,8895
CWH_FLTUBE	749,4001	100,2464	-231,35
CWH_FWH	749,4001	0,00037	-231,35
GR_BODY	-161,883	-270,408	18,48933
CSP_BODY	72,5788	96,34018	-12,8328
S2_BODY	-56,5533	0	456,4011
AFL_FORK	575,3852	100,2464	497,1547
S1_BODY	-237,965	0	528,7015
AFR_FORK	575,3852	-100,246	497,1547

Tabulka 2.5 CS_1, souřadnice polopřímek

název polopřímky	počátek [mm]			směr [mm]		
	osa-x	osa-y	osa-z	osa-x	osa-y	osa-z
eL_FORK	575,3852	100,2464	497,1547	0,23	0	-0,97
eR_FORK	575,3852	-100,246	497,1547	0,23	0	-0,97
eAF_BODY	546,0524	0	470,7936	0,23	0	-0,97

Tabulka 2.6 CS_2, souřadnice bodů

Název bodu	Souřadnice [mm]		
	osa-x	osa-y	osa-z
REF_BODY	-576,108	0	456,7739
BR_BODY	-40,7479	0	263,0015
CTR_RWH	-571,309	0	-359,345

C_ARM	-235,285	0	42,66628
FL_BODY	-165,463	194,1453	-6,34825
CWH_RARM	-573,541	0	-56,2197
CWH_RWH	-573,541	0	-56,2197
CTR_FWH	757,1007	0	-359,345
CWH_FWH	757,0989	0	-67,6984
CWH_FTUBE	757,0989	0	-67,6984
ER_FORK	439,5705	-339,215	536,5167
AF2_BODY	565,7693	0	308,6201
DR_FORK	484,0029	-250,96	551,9064
GL_BODY	-162,805	270,4078	-6,5141
AF_BODY	467,5323	0	548,8473
AF_FORK	467,5323	0	548,8473
DL_FORK	484,0029	250,9598	551,9064
AR_BODY	0	0	0
AR_ARM	0	0	0
FR_BODY	-165,463	-194,145	-6,34825
CM_BODY	187,7939	0	148,8287
EL_FORK	439,5705	339,2146	536,5167
GR_BODY	-162,805	-270,408	-6,5141
CSP_BODY	73,68785	96,34018	-1,56912
S2_BODY	-125,765	0	442,3612
S1_BODY	-316,107	0	486,0337
FL_BODY	-165,463	194,1453	-6,34825
CWH_RARM	-573,541	0	-56,2197
TANK_CM	149,9843	0	425,4674
RIDER_CM	-126,618	0	617,7879
CSP_RWH	-573,541	96,34018	-56,2197
REF_BODY	-576,108	0	456,7739
BR_BODY	-40,7479	0	263,0015
CTR_RWH	-571,309	0	-359,345
C_ARM	-235,285	0	42,66628
Kružnice	Poloměr [mm]		
Přední kolo FWH	303,134		
Zadní kolo RWH	291,647		

Tabulka 2.7 CS_2, souřadnice polopřímek

název polopřímky	počátek [mm]			směr [mm]		
	osa-x	osa-y	osa-z	osa-x	osa-y	osa-z
eC_Fork	679,66369	0	121,66039	0,38	0	-0,93
eAF_Body	467,53228	0	548,84734	0,38	0	-0,93

2.3 MĚŘENÍ MOMENTŮ SETRVAČNOSTI

Dalším z nutných parametrů, které je potřeba v matematickém modelu motocyklu nadefinovat jsou momenty setrvačnosti. Obecně v případech, kdy jsou k měřeným tělesům dostupné 3D modely, je nejefektivnější metodou zjišťování momentů setrvačnosti výpočet softwarový. Každý dnes běžně používaný modelovací software má i tuto funkci. Výrobci vozidel však tyto modely třetím stranám běžně neposkytují. Tak tomu bylo i v případě měřeného motocyklu. Bylo tedy nutné změřit momenty setrvačnosti experimentálně.

Motocykl se skládá z mnoha drobných součástí, které vůči sobě při jízdě konají pohyb. Experimentálně změřit momenty setrvačnosti všech těchto komponent je v mnoha případech velmi komplikované. Z praktických i časových důvodů bylo proto překročeno k určitým zjednodušením. Po dohodě s vedoucím práce bylo stanoveno zjednodušení připravovaného matematického modelu pouze na modelování jízdy v přímém směru, včetně akcelerace a brždění. Jinými slovy model, byť poskládaný z prvků v prostoru se bude chovat jako rovinný.

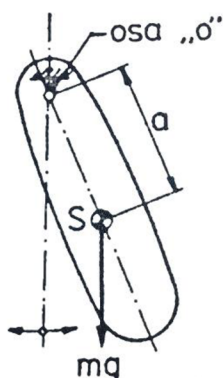
Základním tělesem matematického modelu motocyklu bude celek nazvaný **BODY** reprezentující motor s rámem, na který budou napojena další tělesa. Z hlediska momentů setrvačnosti (a těžiště) ale bude zahrnovat také přední a zadní vidlici. Vzhledem k rovinné povaze modelu je úhel natočení řízení neměnný, a tedy při zanedbání neodpružených hmot vidlic je možné model tímto způsobem zjednodušit.

Při měření momentů setrvačnosti byl tedy motocykl na základě výše zmíněných předpokladů měřen ve stejné konfiguraci, jako při měření polohy těžiště, včetně stlačení vidlic, viz 2.1.2. Při výpočtech byla hodnota gravitačního zrychlení volena $9,81 \text{ m/s}^2$, hmotnost zvažena 122 kg. Při měření založených na principu fyzikálního kyvadla bylo nutné změřit periodu kmitání co možná nejpřesněji.

2.3.1 BODY – OSA X

Pro měření momentu setrvačnosti celku **BODY** vůči ose X (osa podélná) souřadného systému CS_2 byl využit princip fyzikálního kyvadla, viz Obr. 2.28. Tato metoda je založena na principu závislosti mezi momentem setrvačnosti tělesa a frekvencí vlastního kmitání. Při měření se předpokládalo, že kmitání má konstantní frekvenci a měří se doba kmitu (perioda). [1]

fyzikální kyvadlo



$$J_0 = \frac{mga}{4\pi^2} T^2; \quad J_S = J_0 - ma^2$$

Obr. 2.28 Princip fyzikálního kyvadla [1]

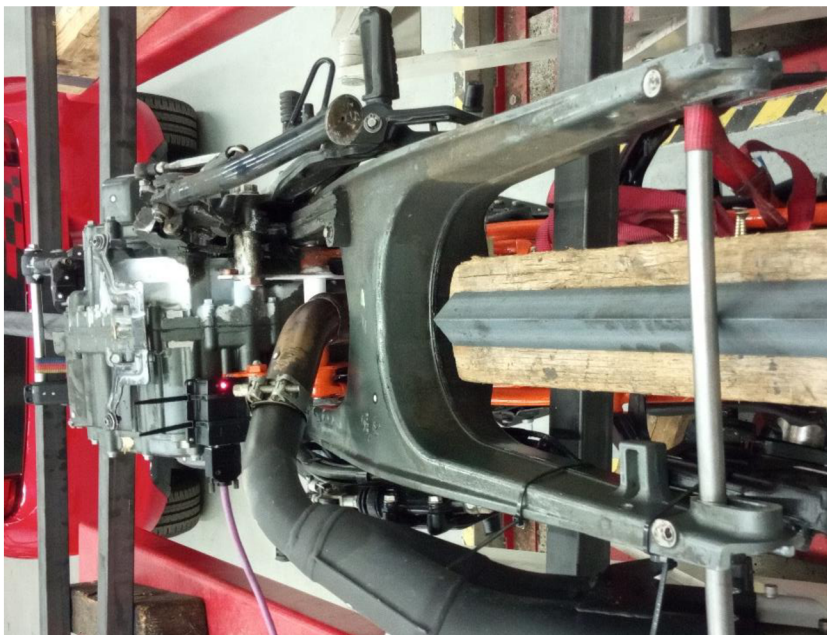
kde:

J_0	[kg·m ²]	moment setrvačnosti tělesa k ose „o“
J_S	[kg·m ²]	moment setrvačnosti tělesa v těžišti
T	[s]	perioda kmitání
m	[kg]	hmotnost tělesa
g	[m·s ⁻²]	tíhové zrychlení
a	[m]	vzdálenost osy „o“ od těžiště

Praktické provedení měření bylo opět pomocí plošinového zvedáku. Motocykl byl převrácen „vzhůru nohama“, přičemž byl podepřen pod středy hřídelí os kol na hřbetě L-profilu. Tím byl zajištěn minimální útlum a orientace osy kmitání. Viz Obr. 2.29 a Obr. 2.30.



Obr. 2.29 Měření momentu setrvačnosti, osa X, pohled 2



Obr. 2.30 Měření momentu setrvačnosti, osa X, pohled 1



Obr. 2.31 Upevnění gyroskopického snímače

Perioda kmitání byla měřena elektronicky. Měřicí řetěz sestával z gyroskopu, měřícím stáчивé rychlosti v příslušných osách, zapojený do měřicí ústředny CRONOSflex 400 německého výrobce imc Meßsysteme GmbH. Dále v softwaru imc Studio, téhož výrobce, byl měřený signál proložen funkcí sinus se zmenšující se amplitudou odpovídající konstantnímu tlumení a konstantní periodou. Na základě tohoto proložení byla přímo v tomto softwaru určena doba periody. Upevnění gyroskopického snímače na motocyklu bylo provedeno stahovacími pásky na vhodném místě pod motorem, viz Obr. 2.31.

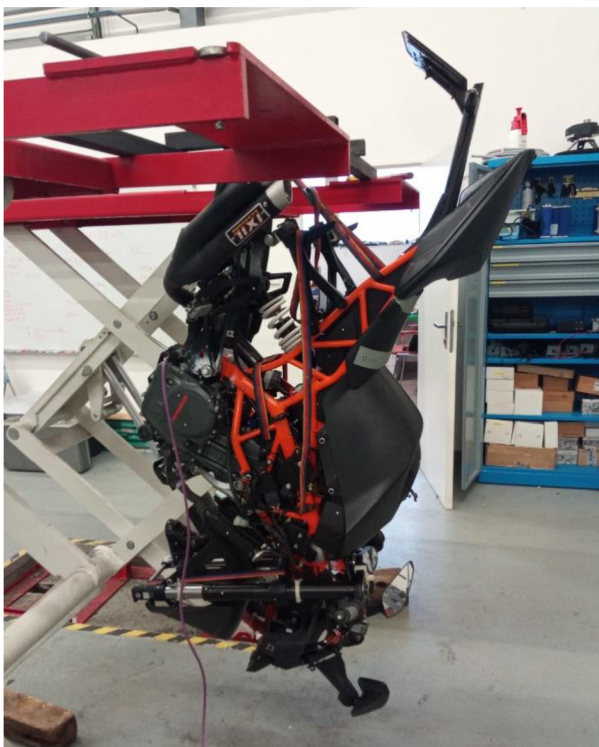
Motocykl byl vychýlen z rovnovážné polohy ručně tak, aby kmital s co nejmenší výchylkou. Tlumení v místech podepření bylo dostatečně malé, motocykl po vychýlení samovolně kmital 7 minut, poté kmitání vlivem tlumení v kontaktu hřídelí s L-profilem zaniklo. Každá jednotlivá hodnota periody byla zprůměrována ze 40 kmitů. Bylo celkem provedeno 16 jednotlivých měření. Kmitání motocyklu bylo mezi nimi několikrát ručně ustáleno a opět vyvoláno. Výsledné hodnoty period jsou v Tabulka 2.8. v kapitole 2.4.

Vzdálenost k těžišti a , potřebná pro výpočet hodnoty momentu setrvačnosti, byla změřena v programu Autodesk Inventor Professional. V něm již byla k dispozici potřebná geometrie z předchozího 3D skenování a zpracování dat. Výsledný vypočítaný moment setrvačnosti, spočtený dle matematického vzorce na Obr. 2.28, je uveden v Tabulka 2.8. v kapitole 2.4. Soubor s výpočty příloha A.

2.3.2 BODY – OSA Y

Pro měření momentu setrvačnosti celku BODY vůči ose Y (osa příčná) souřadného systému CS_2 byl využit stejně jako při měření v ose X princip fyzikálního kyvadla, viz Obr. 2.28.

Praktické provedení měření bylo i v tomto případě pomocí dvojitého nůžkového plošinového zvedáku. Motocykl byl zavěšen za ocelovou tyč, prostrčenou zadní kyvnou vidlicí místo hřídele osy zadního kola. Tyč byla volně položena na ocelové trubky čtvercového průřezu co nejbližší kyvné vidlici, aby se zamezilo prohnutí tyče, viz Obr. 2.32 a Obr. 2.33. Zároveň tak bylo docíleno správné orientace osy kmitání.



Obr. 2.32 Měření momentu setrvačnosti, osa Y, pohled 1



Obr. 2.33 Měření momentu setrvačnosti, osa Y, pohled 2

Měřicí řetězec zůstal stejný jako v předchozím případě, viz kapitola 2.3.1.

Motocykl byl vychýlen z rovnovážné polohy ručně, tak aby kmital s co nejmenší výchylkou. Tlumení v místech podepření bylo velice malé, motocykl po vychýlení samovolně kmital více než 7 minut, aniž by kmitání bylo příliš utlumené. Každá jednotlivá hodnota periody byla zprůměrovaná ze 40 kmitů. Bylo celkem provedeno 14 jednotlivých měření. Kmitání motocyklu bylo mezi nimi několikrát ručně ustáleno a opět vyvoláno. Výsledné hodnoty period jsou v Tabulka 2.8. v kapitole 2.4.

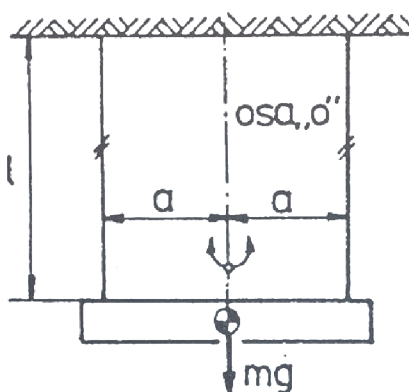
Vzdálenost k těžišti a , potřebná pro výpočet hodnoty momentu setrvačnosti, byla změřena v programu Autodesk Inventor Professional. V něm již byla k dispozici potřebná geometrie z předchozího zpracování dat. Výsledný vypočítaný moment setrvačnosti, je uveden v Tabulka 2.8. v kapitole 2.4. Soubor s výpočty příloha A.

2.3.3 BODY – OSAZ

Pro měření momentu setrvačnosti celku BODY vůči ose Z (osa svislá) souřadného systému CS_2 byl opět využit princip fyzikálního kyvadla ve dvojvláknovém provedení, viz Obr. 2.34.

Motocykl byl zavěšen za dvě ocelová lanka průměru 3 mm a délky 3,52m, za středy hřídelů os kol, viz Obr. 2.35 a Obr. 2.36. Všechna měřená kmitání tak probíhala ve vzájemně kolmých osách.

bifilární závěs



$$J_0 = \frac{mga^2}{4\pi^2l} T^2$$

Obr. 2.34 Fyzikální kyvadlo, bifilární závěs [1]

kde:

J_0	[kg·m ²]	moment setrvačnosti tělesa k ose „o“
T	[s]	perioda kmitání
m	[kg]	hmotnost tělesa
g	[m·s ⁻²]	tíhové zrychlení
a	[m]	poloměr závěsu
l	[m]	délka závěsu



Obr. 2.35 Měření momentu setrvačnosti, osa Z, pohled 1



Obr. 2.36 Měření momentu setrvačnosti, osa Z, pohled 2

Měřicí řetězec zůstal stejný jako v předchozích případech, viz kapitola 2.3.1 a 2.3.2.

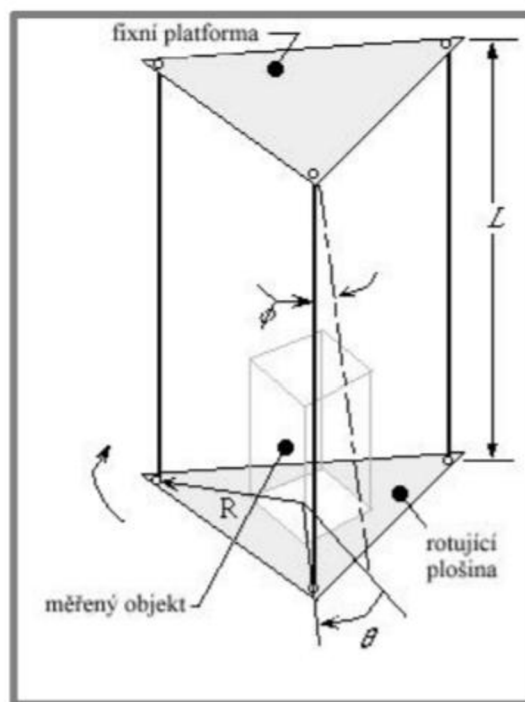
Motocykl byl vychýlen z rovnovážné polohy ručně tak, aby kmital s co nejmenší výchylkou, okolo svislé osy procházející těžištěm. Tlumení bylo neznatelné. Každá jednotlivá hodnota periody byla zprůměrována ze 40 kmitů. Bylo celkem provedeno 16 jednotlivých měření. Kmitání motocyklu bylo mezi nimi několikrát ručně ustáleno a opět vyvoláno. Výsledné hodnoty period jsou v Tabulka 2.8. v kapitole 2.4.

Vzdálenost k těžišti a , potřebná pro výpočet hodnoty momentu setrvačnosti, byla změřena v programu Autodesk Inventor Professional. V něm již byla k dispozici potřebná geometrie z předchozího zpracování dat. Výsledný vypočítaný moment setrvačnosti, je uveden v Tabulka 2.8. v kapitole 2.4. Soubor s výpočty příloha A.

2.3.4 KOLA – OSA ROTACE

Měření momentů setrvačnosti kol v ose rotace, opět metodou fyzikálního kyvadla, bylo provedeno v laboratoři Ústavu konstruování na FSI, VUT. Zde se nacházel pro daný účel vhodně zkonstruovaný přípravek, trifilární závěs, vyrobený v rámci týmového projektu

pod vedením Ing. Jakuba Roupce, Ph.D., který se zabýval měřením momentů setrvačnosti komponent pračky. Podrobná písemná zpráva o tomto měření, [7], laskavě poskytnutá Ing. Ondřejem Machálkem, Ph.D., posloužila jako návod pro realizaci měření. Fyzikální princip měření je na Obr. 2.37. Délka lan závěsu byla 3,048 m, moment setrvačnosti plošiny 0,153 kg·m² (převzat z poskytnuté zprávy), poloměr závěsu 0,43 m.



Obr. 4.2 Trifilární závěs [4]

Výsledný moment setrvačnosti se poté vypočítá dle následujícího vztahu:

$$J = \frac{T^2 \cdot m \cdot g \cdot r^2}{4 \cdot \pi \cdot l} - J_p$$

kde:

J	[kg·m ²]	moment setrvačnosti měřeného tělesa
T	[s]	perioda kmitání
m	[kg]	hmotnost tělesa
g	[m·s ⁻²]	tíhové zrychlení
r	[m]	poloměr uchycení závěsu
l	[m]	délka lan
J _p	[kg·m ²]	moment setrvačnosti plošiny

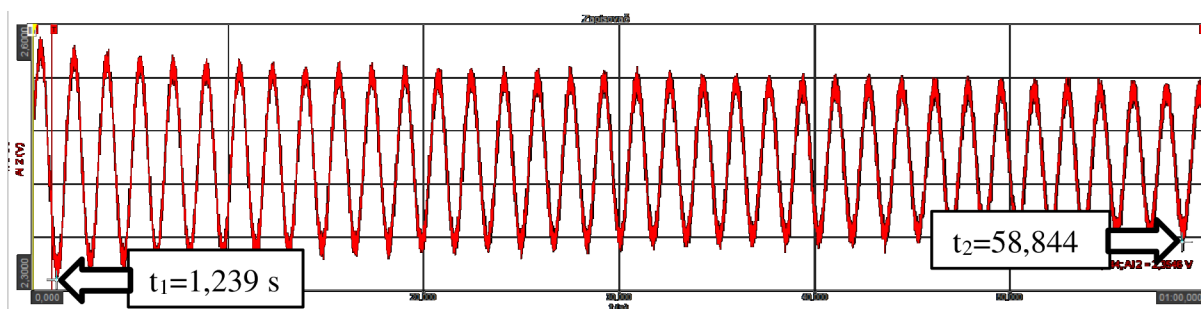
Obr. 2.37 Fyzikální kyvadlo, trifilární závěs [7]

Předpokladem při měření momentu setrvačnosti v ose rotace bylo dokonalé statické i dynamické vyvážení kol, tedy že těžiště kol leží na ose rotace a tato je shodná s osou hlavního momentu setrvačnosti. Kola byla proto umístěna na středovou značku plošiny a vystředěna pohledem skrze otvor pro hřídele os kol. Pro kompenzaci nepřesnosti vystředění os kol se středem plošiny byla mezi jednotlivými měřeními kola pootočena a znovu vystředěna,

zhruba v polovině měření bylo kolo převráceno. Kmitání bylo vyvoláno ručně, mezi jednotlivými měřeními ustáleno a opět vyvoláno pro každé jednotlivé měření.

Měřicí řetězec byl k danému měření nachystán z dřívějšího měření komponent pračky. Měření momentů setrvačnosti bylo zajištěno pomocí gyroskopu. Ten byl napájen pomocí laboratorního zdroje napětím 5 V. Protékající proud byl nastaven na hodnotu 0,1 A. Gyroskop byl přilepen ze spodní strany plošiny v ose kmitání. Signál z gyroskopu byl analyzován pomocí zařízení DEWE-50-USB2-8. Gyroskop byl zapojen do nízkonapěťového vstupu. [7]

Perioda kmitání byla vyhodnocena v programu Dewesoft ve freeware licenci. Vzorkovací frekvence byla 1000 Hz a byl vždy měřen 60sekundový záznam experimentu. Data se začala automaticky zapisovat 10 sekund po vyvolání kmitání z důvodu ustálení kmitání. Na Obr. 2.38 je záznam kmitání předního kola.



Obr. 2.38 Dewesoft, záznam kmitání

Časy začátku prvního a konce posledního měřeného kmitu byly ručně přepsány do programu Microsoft Excel. Hodnota periody záznamu byla vypočtena dělením rozdílu těchto časů počtem kmitů, které mezi nimi nastaly (opět ručně odečteným). V případě ukázky na Obr. 2.38 byly tedy časy $t_1=1,239$ s; $t_2=58,844$ s; počet kmitů 34. Výsledky jednotlivých měření jsou v Tabulka 2.9. v kapitole 2.4. Soubor s výpočty příloha B.

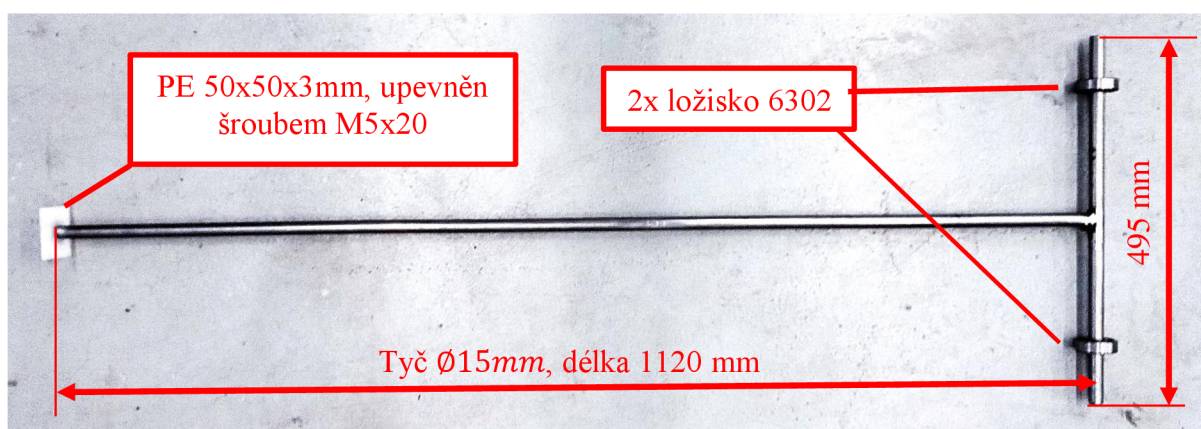
Celkem bylo tímto způsobem zaznamenáno kmitání a vypočtena hodnota periody celkem osmkrát pro přední a sedmkrát pro zadní kolo. Hmotnost kol byla zvážena na elektronické váze T-Scale QHW-30++, hodnoty viz Tabulka 2.9. Kola byla měřena včetně přídavných rotačních neodpružených hmot, resp. s brzdovými kotouči a v případě zadního kola i s rozetou. Náhled na měřená kola je na Obr. 2.39.



Obr. 2.39 Kola, moment setrvačnosti, osa rotace, měření

2.3.5 KOLA – OSY KLOPENÍ

Předpokladem při měření momentu setrvačnosti v osách kolmých na osu rotace bylo dokonalé statické i dynamické vyvážení kol. Tedy hodnoty momentů setrvačnosti v osách kolmých na osu rotace (nazvaných osy klopení) jsou stejné. Toto měření nebylo možné bez příslušného přípravku pro pevné uchycení a vystředění kol na plošinu trifilárního závěsu realizovat. Vzhledem ke složitosti konstrukce takového přípravku bylo rozhodnuto o výrobě přípravku jednoduššího a použitelného v laboratoři Ústavu automobilního a dopravního inženýrství. Vyrobený přípravek na Obr. 2.40 svařený z tyče použité při předchozích měřeních využívá v rámci předchozích měření této práce již osvědčený a vyzkoušený princip a matematické vztahy fyzikálního kyvadla na Obr. 2.28 a zkušeností nabytých v přechozím měření popsaném v kapitole 2.3.2.



Obr. 2.40 Kola, přípravek pro měření v osách klopení

Moment setrvačnosti přípravku vzhledem k ose rotace byl zjištěn více způsoby. Nejprve vypočten analyticky pomocí známých vzorců pro výpočet momentů setrvačnosti, nahrazením přípravku třemi válci a hmotným bodem (místo tyčí, ložisek a gyroskopu). Poté v programu Autodesk Inventor Professional vymodelováním přípravku a vyčtení hodnoty z automaticky generovaných fyzikálních údajů sestavy. Nakonec samotným experimentem. Výsledek analyticky vypočtené hodnoty potvrdil správnost hodnoty získané z 3D modelu sestavy přípravku. Porovnáním hodnoty z modelu s hodnotou získanou z experimentu byla potvrzena funkčnost metody, jelikož hodnota momentu setrvačnosti z experimentu byla jen nepatrně menší než z 3D modelu, průměrně o 0,85%. Pro následný výpočet momentů setrvačnosti kol byla použita hodnota získaná z 3D modelu.

Měřicí řetězec byl shodný s měřením momentů setrvačnosti celku BODY, popsaným v kapitolách 2.3.1, 2.3.2 a 2.3.3. Gyroskop byl pevně uchycen stahovacími pásky v místě napojení krátké a dlouhé části tyče. Přípravek s nasazeným kolem byl vychýlen z rovnovážné polohy ručně tak, aby kmital s co nejmenší výchytkou. Tlumení bylo malé, přípravek po vychýlení samovolně kmital více než 5 minut, aniž by kmitání bylo příliš utlumené. Každá jednotlivá hodnota periody byla zprůměrována ze 40 kmitů. Bylo celkem provedeno 5 měření samotného přípravku a 11 samostatných měření pro každé kolo. Kmitání bylo mezi nimi několikrát ručně ustáleno a opět vyvoláno. Periody byly vypočítány podle jednoduchého vzorce na Obr. 2.28. Výsledné hodnoty period jsou v Tabulka 2.10. Provedení experimentu je zachyceno na Obr. 2.41. Soubor s výpočty příloha C.



Obr. 2.41 Kola, moment setrvačnosti, osa klopení, měření

2.4 VÝSLEDKY MĚŘENÍ MOMENTŮ SETRVAČNOSTI

Tabulka 2.8 BODY, periody, momenty setrvačnosti

Hodnoty period v osách motocyklu [s]		
X - podélná	Y - příčná	Z - svislá
1,400152564	1,987126827	1,97824657
1,397411823	1,984860301	1,978168368
1,395883679	1,983511329	1,978273749
1,394842505	1,981715918	1,977540374
1,401274085	1,978813887	1,979580283
1,3983742	1,985466599	1,97908318
1,396542788	1,984222651	1,978682756
1,395426393	1,98296988	1,978312254
1,394326448	1,981765866	1,97800374
1,393624544	1,987939477	1,978114128
1,399645329	1,986460924	1,977645397
1,397313952	1,985452175	1,977527976

1,395678997	1,983894229	1,979538679	
1,394527674	1,9826864	1,978837371	
1,393694282		1,97851181	
1,392975688		1,978072762	
Průměrné hodnoty period [s]			
1,396355934	1,984063319	1,978383712	
Hodnoty proměnné a [m]		a [m]	b [m]
0,204108	0,8038	0,571	0,759
Vypočtené momenty setrvačnosti [kg·m ²]			
6,588101287	18,56471292	13,0088739	

Tabulka 2.9 Kola, momenty setrvačnosti, osa rotace

Přední kolo	Zadní kolo
Hodnoty period v osách rotace [s]	
1,694765	1,633257
1,692235	1,637114
1,645647	1,632971
1,696824	1,640229
1,696758	1,6408
1,694	1,639235
1,694182	1,632941
1,694265	
Průměrné hodnoty period [s]	
1,688584	1,63665
Hmotnost kol [m]	
10,873	14,5992
Vypočtené momenty setrvačnosti [kg·m ²]	
1,315305	1,698925

Tabulka 2.10 Kola, momenty setrvačnosti, osy klopení

Přední kolo	Zadní kolo	Přípravek
Průměrné hodnoty period [s]		
2,0629350	2,0533424	1,7252767
Hodnoty period měření [s]		
2,0632958	2,053563356	1,72323513
2,0624378	2,053399086	1,730131507
2,0618944	2,05325222	1,714454055
2,0610936	2,052376747	1,728828907
2,0603864	2,051868916	1,729733706
2,0655084	2,053960085	Moment setrvačnosti [kg·m ²]
2,0645981	2,053653479	
2,0640841	2,053548098	Určen analyticky

2,0633492	2,053729773	0,662825235
2,0629001	2,053800821	Určen experimentálně
2,0627375	2,053613663	0,660090291
Vypočtené momenty setrvačnosti [$\text{kg}\cdot\text{m}^2$]		Určen z 3D modelu
1,536791013	1,743211919	0,665764291

Tabulka 2.11 Kola, přepočtené momenty setrvačnosti, pro osy klopení

Přepočítané hodnoty momentů setrvačnosti [$\text{kg}\cdot\text{m}^2$]	
Přední kolo	Zadní kolo
0,677397963	0,874966564
Vypočtený posun těžišť kol [mm]	
36,48	28,40

2.4.1 ZHODNOCENÍ A POZNATKY K MĚŘENÍ MOMENTŮ SETRVAČNOSTI

MĚŘENÍ CELKU BODY

Prvním provedeným měřením bylo kmitání okolo osy Y, poté okolo X a naposledy okolo Z, přičemž v ose zadního kola zůstala ocelová tyč (průměr 15mm, délka 1,6m) nutná pro první měření – v ose Y. Nebyla vyjmuta, aby bylo zajištěno neměnné stlačení zadní vidlice mezi měřeními v různých osách, resp. upínací pás udržující kyvnou vidlici ve stlačené pozici byl zachycen právě za tuto tyč. Vliv tyče na výsledky měření byl zahrnut ve výpočtu, resp. pomocí Steinerovy věty (viz Obr. 2.28) byl moment setrvačnosti tyče (matematicky zkrácené o délku hřídele osy kyvné vidlice) odečten od momentu setrvačnosti BODY.

Provedená měření period vykazovala vynikající opakovatelnost. Naměřené hodnoty se od sebe liší zpravidla až na třetím desetinném místě, tedy v tisícinách sekund. Z těchto hodnot byly vypočítány aritmetické průměry, jejichž hodnoty byly použity ve výpočtech. Veškeré výpočty byly provedeny v programu Microsoft Excel pro Office 365 MSO, tedy v univerzitní licenci poskytované studentům VUT. Vzhledem k relativní jednoduchosti výpočtů, resp. zanedbatelnému strojovému času nutnému pro výpočty, nebyly naměřené hodnoty zaokrouhlovány a jsou uvedeny tak, jak byly naměřeny příp. vypočítány.

Při plánování a realizaci měření celku BODY bylo potřeba se co nejvíce přiblížit orientaci souřadného systému CS₂. V případě měření v ose Y bylo tomuto požadavku vyhověno, při měření v osách X a Z se tomuto požadavku podařilo dostatečně přiblížit. Bylo také dbáno na to, aby jednotlivé osy, ve kterých bylo měření realizováno, byly na sebe kolmé.

Hmotnost motocyklu, resp. celku BODY byla zvážena na digitální tenzometrické váze měřící pouze na celé kilogramy (122 kg). Přesnějším zvážením by se dosáhlo přímo úměrného zpřesnění výsledných hodnot momentů setrvačnosti.

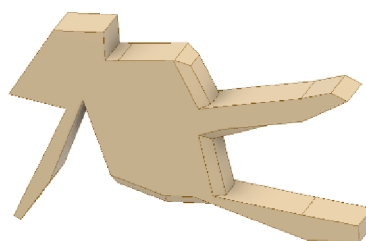
V matematických vzorcích použitých k výpočtům je kromě periody také parametr a (nejkratší vzdálenost osy kmitání od těžiště) umocněn na druhou. Z toho vyplývá, že tyto bylo nutné znát co možná nejpřesněji, neboť při odchylce měřených hodnot od skutečnosti narůstá chyba kvadraticky. V případě měření period bylo díky elektronickému záznamu pomocí gyroskopu

dosaženo dostatečné přesnosti. V případě parametru a se však vyšlo z měření popsaného v kapitole 2.1.2, které nebylo dokonalé. Chyba tohoto měření byla nicméně považována za dostatečně malou, resp. výsledky za uspokojivé.

Pro představu, zdali jsou výsledné hodnoty momentů setrvačnosti věrohodné, byly srovnány s momenty velmi zjednodušeného 3D modelu celku BODY, který byl pro daný účel vytvořen, viz Obr. 2.42. Byly srovnány pouze poměry momentů setrvačnosti vůči sobě (ne jejich hodnotu), viz Tabulka 2.12. Výsledky ukazují na správnost naměřených hodnot.

Tabulka 2.12 Ověřovací srovnání poměrů

Poměry naměřených momentů		
Y : X	Y : Y	Y : Z
0,354872242	1	0,700731218
Poměry momentů 3D modelu		
Y : X	Y : Y	Y : Z
0,306	1	0,736



Obr. 2.42 Velmi zjednodušený 3D model BODY

MĚŘENÍ BODY, OSA X

Toto měření, byť obtížně realizovatelné, se podařilo provést prakticky bezchybně. Nedostatkem měření byla nedokonalá souosost osy kmitání s osou X souřadného systému CS_2. Směr této osy je dán tečnou ke kružnicím představujícím kola motocyklu, zatímco osa kmitání byla dána tečnou k povrchu hřídelí, na kterých byl motocykl zavěšen. Poloměr obvodových kružnic kol je 303,134 mm, pro zadní kolo a 291,647 mm pro kolo přední. Při naměřeném rozvoru 1,33 m je tedy úhel mezi těmito osami 0,49°. Tento rozdíl byl považován za dostatečně malý a výsledky měření tím pádem za přijatelné.

MĚŘENÍ BODY, OSA Y

Při měření momentu setrvačnosti BODY vůči ose Y je nutné zmínit nedokonalé splnění podmínek fyzikálního kyvadla při experimentu. Měřené těleso musí kmitat okolo pevné osy. Ocelová tyč, na které byl motocykl zavěšen se na svých podporách odvalovala. Tento nedostatek byl vykompenzován odvozením následujících vztahů pro výpočet momentu setrvačnosti zahrnujícím tuto skutečnost.

$$J_0 = \frac{mga}{4\pi^2} \cdot T^2 ; \quad J_s = J_0 - m(a - r)^2 \quad [8]$$

kde:

J_0	[kg·m ²]	moment setrvačnosti tělesa k ose „o“
J_s	[kg·m ²]	moment setrvačnosti tělesa v těžišti
T	[s]	perioda kmitání
m	[kg]	hmotnost tělesa
g	[m·s ⁻²]	tíhové zrychlení
a	[m]	vzdálenost osy „o“ od těžiště
r	[m]	poloměr tyče

Při zanedbání výše zmíněného nedostatku a výpočtu podle neupraveného vztahu na Obr. 2.28 by naměřené hodnoty byly zatíženy chybou. Vypočtený moment setrvačnosti podle něj je o 7,89 % menší než moment vypočítaný podle upraveného vztahu. Uložení tyče na podporách ve valivých ložiscích by byly splněny podmínky fyzikálního kyvadla na Obr. 2.28. Tento poznatek byl využit při pozdějším měření momentů setrvačnosti kol.

MĚŘENÍ BODY, OSA Z

V tomto případě také nebyly zcela dokonale splněny podmínky fyzikálního kyvadla popsané na Obr. 2.34. Těleso měřené tímto způsobem musí být uchyceno tak, aby jeho těžiště leželo přesně uprostřed mezi závěsy. Těžiště motocyklu v ose X systému CS_2 posunuto poněkud blíže k ose předního kola. Nicméně tento nedostatek bylo i zde možné matematicky kompenzovat, odvozením následujícího vztahu fyzikálního kyvadla, pro tento případ.

$$J_0 = \frac{mgab}{4\pi^2 l} \cdot T^2 \quad [8]$$

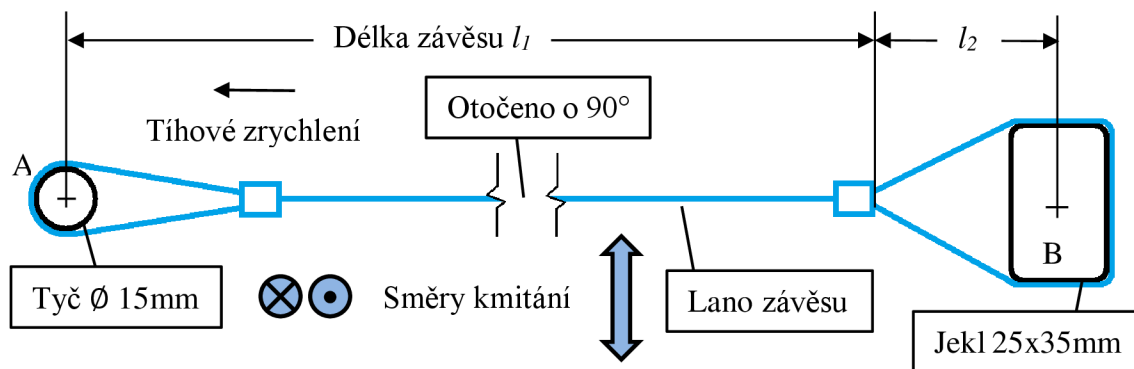
kde:

J_0	[kg·m ²]	moment setrvačnosti tělesa k ose „o“
T	[s]	perioda kmitání
m	[kg]	hmotnost tělesa
g	[m·s ⁻²]	tíhové zrychlení
a	[m]	první vzdálenost osy „o“ k závěsu
b	[m]	druhá vzdálenost osy „o“ k závěsu
l	[m]	délka závěsu

Při zanedbání výše zmíněného nedostatku a výpočtu podle neupraveného vztahu pro bifilární fyzikální kyvadlo na Obr. 2.34 (a dosazení hodnoty a jako poloviny rozvoru) by naměřené hodnoty byly zatíženy chybou. Vypočtený moment setrvačnosti podle něj je o 3,64 % větší než moment vypočítaný podle upraveného vztahu.

Použitá metoda fyzikálního kyvadla v provedení bifilárního závěsu vykazovala v rámci času, po který měření probíhalo téměř nezatelné tlumení kmitů. Vzhledem k velikosti laboratoře bylo možné volit poměrně velkou délku lan závěsu, viz Obr. 2.36. Nahoře byla lana uchycena na vhodně se nabízejícím obdélníkovém ocelovém profilu. Výchylky lan z rovnovážné polohy byly při kmitání natolik malé, že se lana při kmitání kolem míst úchytů nesmýkala. K pohybu tedy docházelo dle Obr. 2.43.

Z něj je patrné i jakým způsobem byla určena délka závěsu. Ta byla ve výpočtu dosazena jako součet délek l_1 a l_2 . V případě dosazení pouze hodnoty l_1 je výsledná hodnota momentu setrvačnosti o 1,32% vyšší. Rozdíl mezi takto volenými délkami závěsu je 42,5 mm. Vzhledem ke tvaru ocelového profilu nebylo možné jednoznačně určit délku závěsu, nicméně jak bylo ukázáno, tento parametr není na malou nepřesnost příliš citlivý. Montáž závěsu na profil kruhového průřezu nebo ještě lépe přes valivá ložiska by byla ideálním řešením, nicméně velké zpřesnění měření momentu setrvačnosti by nepřinesla.



Obr. 2.43 Náčrt závěsu, měření BODY, osa Z

MĚŘENÍ KOL V OSE ROTACE

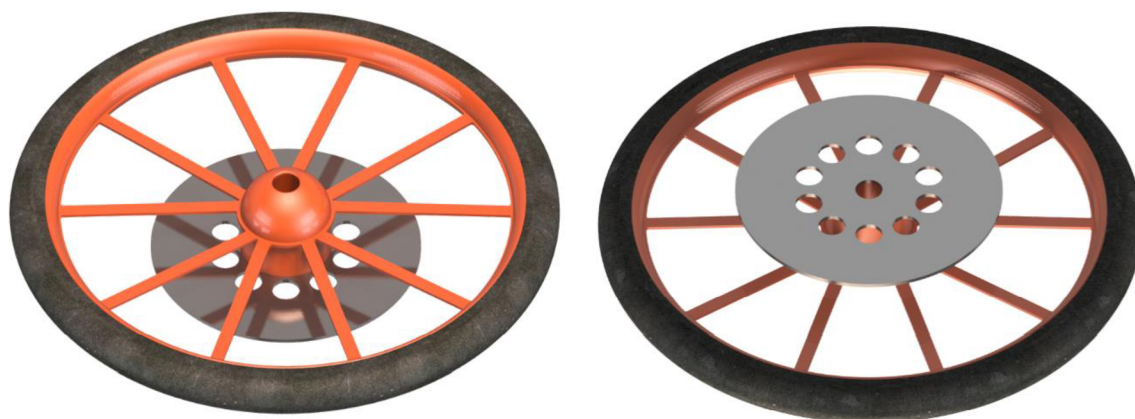
Plošina trifilárního závěsu byla vyvážena s pomocí vodováhy. Z časových důvodů nebylo možné uskutečnit více měření. Opakovatelnost však byla vynikající, hodnoty period se od sebe liší řádově v tisícinách sekund. Dle citlivostní analýzy provedené konstruktéry přípravku, uvedené v poskytnuté dokumentaci [7], bylo možné dosáhnout přesnějšího měření zvolením menšího poloměru uchycení plošiny. Při zmenšení poloměru z hodnoty 0,43 m na 0,33 m by tak dle výše zmíněné analýzy odchylka vypočtené hodnoty momentu setrvačnosti byla přibližně 0,45 % namísto 0,6 %. Vzhledem k malému procentuálnímu rozdílu, časovému omezení použití laboratoře a obtížné realizovatelnosti (nebyl k dispozici žebřík a potřebné nářadí) byl poloměr ponechán na hodnotě 0,43 m.

Veškeré výpočty byly provedeny v programu Microsoft Excel pro Office 365 MSO, tedy v univerzitní licenci poskytované studentům VUT. Vzhledem k relativní jednoduchosti výpočtů, resp. zanedbatelnému strojovému času nutnému pro výpočty nebyly naměřené hodnoty zaokrouhlovány a jsou uvedeny tak, jak byly naměřeny příp. vypočítány.

MĚŘENÍ KOL V OSÁCH KLOPENÍ

Dle základních analytických vzorců vychází momenty setrvačnosti kotoučů v osách klopení velmi lehce nadpoloviční oproti momentům v osách rotace. Tato závislost platí u všech těles s podobným rozložením hmot, což bylo potvrzeno vytvořením zjednodušeného 3D modelu předního kola motocyklu na Obr. 2.44, jehož poměr těchto momentů je 51,5 %. Výsledné hodnoty momentů setrvačnosti v Tabulka 2.10 z měření v kapitole 2.3.5 jsou tedy chybné.

Poloha těžišť kol byla při výpočtech uvažována, na základě předpokladu dokonalého statického a dynamického vyvážení, v jejich geometrickém středu. Tedy v průsečíku osy rotace s kolmou rovinou dělicí souměrně ráfek. Ve skutečnosti však těžiště leží na ose rotace, avšak mimo tuto rovinu vlivem nesouměrně rozložených hmot vůči této rovině (kotouče, rozeta, šrouby, tvary středů kol a nesouměrnosti pneumatiky). V rovnici, na Obr. 2.28, dle které byly momenty setrvačnosti počítány, je vzdálenost těžiště tělesa od osy rotace, parametr a , umocněn na druhou. Při nepřesném dosazení tedy roste chyba výpočtu kvadraticky. Při přípravě experimentu nebyl tento fakt zohledněn.



Obr. 2.44 Zjednodušený 3D model předního kola motocyklu

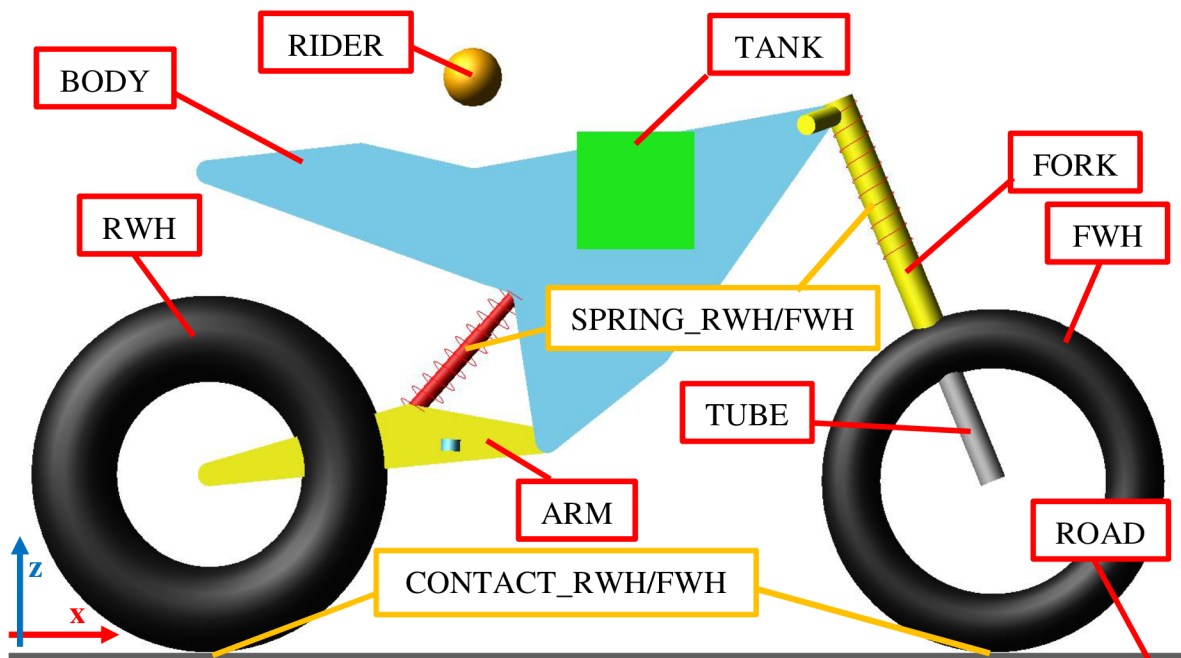
Na základě zjištěného, obecného, výše zmíněného poměru mezi velikostí momentů setrvačnosti diskových těles tak byla hodnota momentů pro osy klopení stanovena pomocí něj. Čili hodnoty momentů setrvačnosti změřených v ose rotace, viz kapitola 2.3.4 a Tabulka 2.9, byly vynásobeny konstantou 0,515 získanou pomocí 3D modelu a jsou uvedeny v Tabulka 2.11.

Tyto nové hodnoty byly použity k přepočítání posunu těžiště, potřebného pro jejich získání, při výpočtech pomocí naměřených period. U předního kola bylo tímto způsobem odhadnut skutečný posun těžiště o 36,48 mm, v případě zadního kola o 28,40 mm od osy kmitání.

Takto stanovené hodnoty jsou dobrým přiblížením ke skutečnosti. Nicméně pro skutečně věrohodné výsledky měření tímto způsobem by bylo potřeba určit nejprve přesné polohy těžišť kol. Například metodou vážení pomocí přesných vah.

3 MATEMATICKÝ MODEL MOTOCYKLU

Hlavním cílem této práce bylo na základě naměřených parametrů motocyklu vytvořit jeho základní matematický model, jenž v rámci dlouhodobého projektu analýzy měřených dynamických stavů motocyklu bude sloužit jako základ pro další diplomové práce. Před započítím prací tak byl po společném zvážení časové náročnosti zadaných úkolů s vedoucím práce, panem doc. Ing. Petrem Portešem, Ph.D., stanoven rozsah měření a úroveň detailů výsledného modelu. Na základě naměřených parametrů motocyklu (kinematika, těžiště, hmotnosti a momenty setrvačnosti) byl vytvořen matematický model motocyklu v program MSC Adams View. Jedná se o tzv. multi-body model, s omezeným počtem stupňů volnosti redukcující motocykl na 8 tuhých těles. Boční pohled na model s popisky je na Obr. 3.1 a základní údaje o tělesech v Tabulka 3.1.



Obr. 3.1 Model motocyklu, Adams View, pohled 1

Tabulka 3.1 Model motocyklu, Adams View

těleso	název	Vazba, zavazbeno k		Hmotnost [kg]	momenty setrvačnosti
jezdec	RIDER	Pevná	BODY	78	geometrií a hustotou
nádrž	TANK	Pevná	BODY	6	geometrií a hustotou
přední kolo	RWH	Rotační	ARM	10,873	zadefinováno z měření
zadní kolo	FWH	Rotační	TUBE	14,5992	zadefinováno z měření
kluzák	TUBE	Translační	FORK	0	0
Vidlice, řídítka	FORK	Rotační	BODY	0	0
kyv. Vidlice	ARM	Rotační	BODY	0	0
rám a stupačky	BODY	Rovinná	ground	120	zadefinováno z měření
vozovka	ROAD	Pevná	ground	-	-

3.1 POPIS MATEMATICKÉHO MODELU

Tělesa byla vytvořena v prostoru pomocí souřadnic získaných z měření uvedených v kapitole 2.2. Celý model motocyklu, přestože je vytvořen ze souřadnic ve třech osách, chová se jako model rovinný. Těleso BODY je totiž vázáno rovinnou vazbou k rovině XZ. Pro převedení matematického modelu z rovinného na prostorový stačí tuto vazbu uvolnit.

Veškerá měření na motocyklu byla prováděna tak, aby bylo možné model sestavit daným způsobem. Fyzikální vlastnosti tělesa BODY byly měřeny společně s přední vidlicí a zadní kyvnou vidlicí. Tedy tyto dva modelované prvky motocyklu proto mají v modelu nulovou hmotnost a momenty setrvačnosti, neboť jsou zahrnuty v parametrech tělesa BODY (poloha těžiště, hmotnost, momenty setrvačnosti).

Další zjednodušení modelu proti skutečnosti, které je třeba zmínit, bylo provedeno na přední vidlici. Ta je tvořena dvěma samostatnými tlumícími a pružícími jednotkami, rotujícími okolo osy eAF_BODY. Zjednodušení spočívá v jejich nahrazení jedinou, kinematicky ekvivalentní samostatnou pružící a tlumící jednotkou, umístěnou symetricky mezi nimi na ose eC_FORK.

Tuhosti a tlumení přední a zadní tlumící a pružící jednotky byly v modelu určeny odhadem. Jejich charakteristiky nebyly po dohodě s vedoucím měřeny, neboť předpokládaným řešením do budoucna je při jízdách zkoušek snímat přímo síly na uložení těchto jednotek tenzometricky. Pro správný popis dynamického chování přední a zadní vidlice, bude po uvolnění modelu z rovinného stavu v navazujících pracích, bude potřeba tyto položky samostatně změřit z hlediska momentů setrvačnosti, hmotností a těžišť.

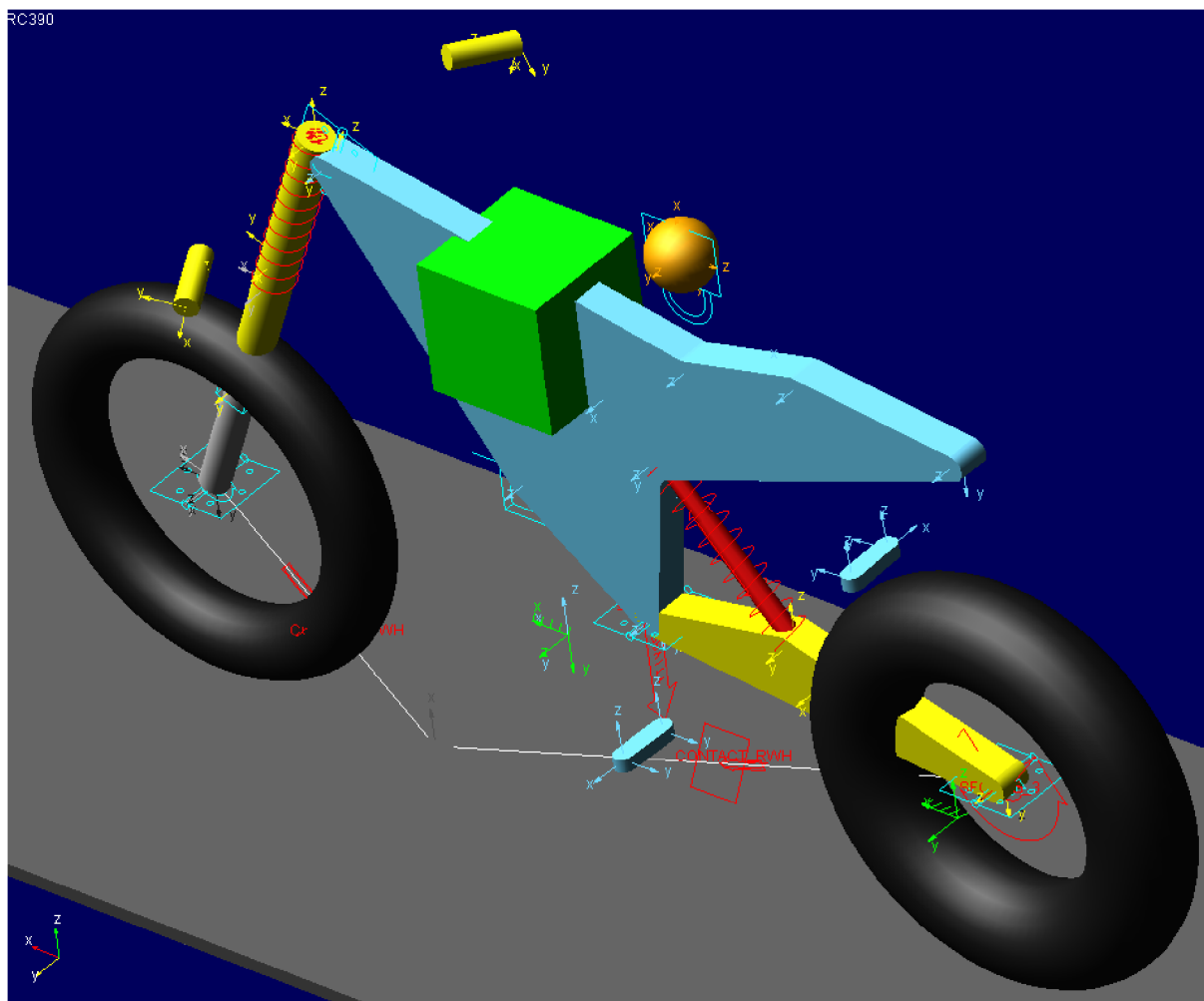
Kola byla v modelu nahrazena dvěma torusy (tělesa vytvořená rotací kružnic okolo os ležících v rovinách těchto kružnic, avšak kružnice neprotínající), nazvanými FWH pro přední kolo a RWH pro zadní. Vnější průměry torusů jsou stejné jako naměřené průměry obvodových kružnic pneumatik. Průměr kružnice tvořící torusy odpovídá naměřené šířce běhounů pneumatik. Kontakt těles FWH a RWH s vozovkou je modelován výpočtovým typem „Solid to Solid“ s koeficienty a nastavením zachyceným na Obr. 3.2.

Contact Name	CONTACT_FWH	Damping	12.0
Contact Type	Solid to Solid	Penetration Depth	0.1
I Solid(s)	TORUS_38	<input type="checkbox"/> Augmented Lagrangian	
J Solid(s)	BOX_29	Friction Force	Coulomb
<input checked="" type="checkbox"/> Force Display	Red	Coulomb Friction	On
Normal Force	Impact	Static Coefficient	1.2
Stiffness	1000.0	Dynamic Coefficient	1.0
Force Exponent	1.0	Stiction Transition Vel.	100.0
		Friction Transition Vel.	1000.0
		OK	Apply
			Close

Obr. 3.2 kontakt FWH-ROAD, Adams View

Jezdec je reprezentován v modelu koulí se středem ve stanovených souřadnicích nazvané RIDER. Koule RIDER má poloměr 50 mm, hmotnost 78 kg. Nádrž, resp. hmotnost paliva je reprezentována krychlí nazvanou TANK se středem ve stanovených souřadnicích, o hraně délky 200 mm, hustotě 750 kg/m^3 a tím odpovídající hmotnosti 8 litrů benzínu (6 kg). Krychle je základním tělesem nejlépe připomínajícím skutečný tvar nádrže, viz kapitola 2.1.3.

Pohled na model je na obr Obr. 3.3.



Obr. 3.3 Model motocyklu, Adams View, pohled 2

Profily pneumatik modelu motocyklu jsou tvaru kružnic. Pro analýzu jízdy v náklonu bude nutné tento profil nahradit tvarem naměřeným z 3D skenování. Pro analýzu jízdy v přímém směru zvolené řešení postačuje. Soubor s modelem motocyklu příloha D.

4 NÁVRH MĚŘÍCIHO SYSTÉMU

K analýze měřených dynamických jízdních stavů motocyklu se v rámci navazujících diplomových prací plánuje nasazení multi-body softwaru SAMS (Symbolická Analýza Mechanických Systémů), vyvinutého doc. Ing. Petrem Portešem, Ph.D. tvořícím jádro systému SADT (System of Automotive Development Tools), vyvinutém a používaném na Ústavu automobilního a dopravního inženýrství, fakulty FSI na VUT. Multi-body software SAMS slouží k vytvoření matematických modelů obecných mechanických systémů. Umožňuje rychle sestavit rovnice pro řešení řady speciální úloh v oblasti jízdních vlastností vozu, od kinematiky zavěšení kol až po plnou dynamiku vozidla. Software umožňuje sestavit rovnice i pro problémy kombinující přímé a inverzní úlohy. [9]

Tato práce vede právě k sestavení inverzních úloh, pomocí kterých budou analyzovány měřené dynamické stavy motocyklu. Bude tak možné např. přímo vypočítat síly mezi pneumatikami a vozovkou, charakteristiku tlumičů aj. První analýza jízdních stavů motocyklu pomocí vytvořeného modelu v MSC Adams View a SAMS bude sloužit k ověření funkčnosti tohoto modelu a samotného měřicího systému. K tomu bude potřeba při jízdě zaznamenávat:

- 1) Rychlost a zrychlení motocyklu:
 - 3 translační rychlosti + 3 úhlové rychlosti
 - 3 translační zrychlení + 3 úhlová zrychlení
- 2) Polohu motocyklu v prostoru a jeho orientaci:
 - 3 translační souřadnice + 3 úhly (stáčení Z, klonění Y, klopení X)
- 3) Otáčky kol
- 4) Polohy přední a zadní vidlice, resp. stlačení tlumičů
- 5) Natočení přední vidlice kolem osy řízení
- 6) Relativní polohu vozovky vůči motocyklu

VOLBA SNÍMAČŮ A JEJICH MONTÁŽ

Měřicí systém bude napájen vlastním akumulátorem. Základem měřicího systému byla zvolena měřicí ústředna CRONOSflex 400 na Obr. 2.41 použitá při měření v kapitole 2.3, jež bude sbírat data ze senzorů. K zaznamenání údajů v bodech 1) a 2) byla zvolena jednotka OxTS RT3002 na Obr. 4.1, ve vlastnictví ÚADI FSI VUT, která snímá potřebné veličiny kombinací údajů z vestavěného 3osého gyroskopu, 3osého akcelerometru a navigačního satelitního systému. Přípravek pro montáž těchto prvků měřicího systému je zachycen na Obr. 4.1.



Obr. 4.1 Měřicí ústředna a její upevnění [10]

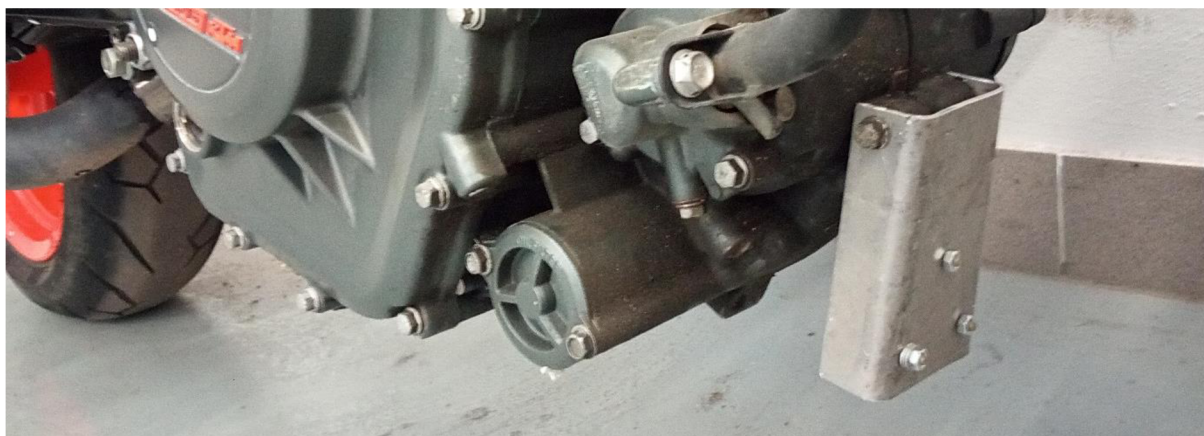
Údaje o otáčkách kol lze získat z řídicí jednotky motocyklu ze sběrnice CAN-BUS, na kterou se lze připojit pomocí konektoru umístěného pod sedlem motocyklu. Tyto údaje řídicí jednotce poskytují senzory systému ABS. Tím je splněn požadavek na záznam veličin popsanych v bodě 3).

Pro záznam veličin v bodech 4) a 5) byly na motocykl namontovány lineární potenciometry výrobce Penny & Giles typ SLS130 a 2x SLS095. K motocyklu jsou přichyceny přes vhodné umístěné šrouby a vytištěné plastové přípravky, viz Obr. 4.2.



Obr. 4.2 Lineární snímače polohy

Pro snímání veličin definovaných v bodě 6) bylo rozhodnuto použít trojici výškových senzorů Texys RHS 50-400, které fungují na bázi pulsní bodové LED-diody. Jejich umístění bylo provedeno tak, aby snímače byly chráněny před poškozením v případě pádu motocyklu. Zároveň byly úchyty vyrobeny tak, aby umožnily značný náklon motocyklu a přitom aby vzdálenost snímačů od vozovky nebyla mimo jejich měřicí rozsah. Držáky byly zhotovené z duralových profilů a plechu, jejich provedení je zachyceno na Obr. 4.4 a Obr. 4.4.

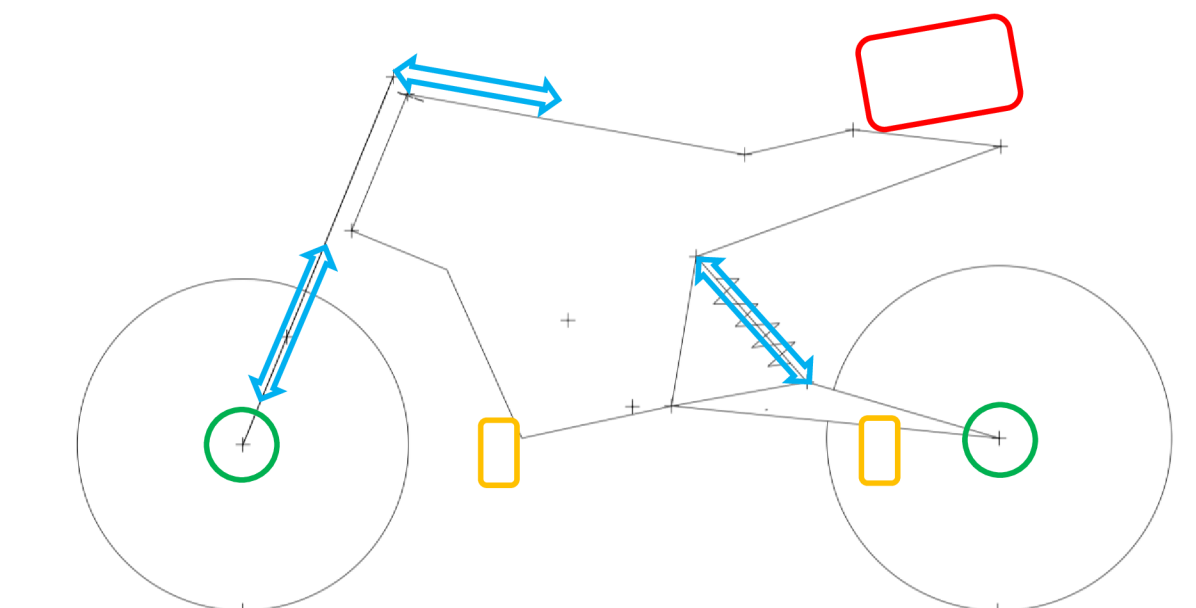






Obr. 4.3 držák snímače vzdálenosti, přední



Obr. 4.4 držáky snímačů vzdálenosti zadní, levý a pravý

Rozmístění prvků měřicího systému na motocyklu je znázorněno na Obr. 4.5.



-  3x Potenciometry Penny & Giles typ SLS – natočení řízení + stlačení vidlic
-  2x Snímače ABS – otáčky kol
-  3x LED Snímače vzdálenosti RHS 50-400 – poloha vozovky vůči motocyklu
-  Měřicí ústředna CRONOSflex 400, jednotka RT3002, akumulátor

Obr. 4.5 Rozmístění prvků měřicího systému

5 ZÁVĚR

Tato diplomová práce se věnuje přípravě motocyklu k analýze jeho dynamických jízdních stavů pomocí softwarových nástrojů vyvinutých na Ústavu automobilního a dopravního inženýrství Fakulty strojního inženýrství VUT.

Na úvod byla vypracována krátká rešerše matematických modelů v oblasti jízdní dynamiky. Rešerše se zaměřuje především na modely, problematiku a způsoby simulování jízdní dynamiky, souvisejícími s realizací dalších cílů práce.

Dále byly identifikovány a změřeny parametry vybraného motocyklu KTM RC 390, nutné k sestavení jeho matematického modelu. Jednalo se o měření jeho kinematiky a nalezení těžiště využitím technologie 3D skenování. Následně byly experimentálně změřeny hodnoty momentů setrvačnosti příslušných komponent motocyklu. V textu je uveden popis veškerých měření, včetně doplňujících obrázků a také výsledky měření včetně jejich zhodnocení.

Na základě naměřených parametrů motocyklu byl sestaven jeho matematický model v programu MSC Adams View. Jedná se o multi-body model s omezeným počtem stupňů volnosti redukující motocykl na 8 tuhých těles. Model je omezen rovinnou vazbou základního tělesa BODY do roviny XZ a odpovídá požadavkům, které byly stanoveny po konzultacích se školitelem.

Na závěr byl navržen měřicí systém, pro snímání stanovených veličin při jízdních zkouškách. Byly vybrány příslušné senzory a vyrobeny jejich montážní úchyty na motocykl. Z důvodů souběžného využití měřicí ústředny jinými projekty však nebylo možné tento systém kompletně sestavit a realizovat zkušební měření.

Postupným plněním cílů zadání, byl položen základ pro navazující výzkumné a vývojové práce.

SEZNAM POUŽITÝCH INFORMAČNÍCH ZDROJŮ

- [1] VLK, František. *Teorie a konstrukce motocyklů I*. 1. vydání. Brno: fvlk, 2004. ISBN 80-238-1601-7.
- [2] COSSALTER, Vittore. *Motorcycle dynamics*. 2. vydání. USA: LULU, 2006. ISBN 978-1-4303-0861-4.
- [3] VI-motorcycle.jpg. In: *Driving simulation | Dynamic driving simulator | VI-grade* [online]. Marburg: VI-grade GmbH, 2017 [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: https://www.vi-grade.com/resources/Oggetto/Database.Products/Allegati/Gallery/___619360ad0146475885c9aa7c17d3f7eb_/vi-motorcycle.jpg
- [4] Pho_bike_90_re. In: *KTM - READY TO RACE* [online]. b.r. [cit. 2019-04-27]. Dostupné z: https://www.ktm.com/globalassets/products-pim-data/ke2-motorcycles/supersport/rc-3902/rc-390-2019/f5303s1/pho_bike_90_re.png
- [5] KTM RC 390 2019. *KTM - READY TO RACE* [online]. b.r. [cit. 2019-04-27]. Dostupné z: <https://www.ktm.com/en/supersport/rc-390/>
- [6] KTM - RC 390 BLACK EU (2017). In: *Partsdepot* [online]. Liberec: bitworks, 2019 [cit. 2019-05-09]. Dostupné z: <https://partsdepot.cz/picown/572512.png>
- [7] MĚCHURA, Lukáš, Filip JENIŠ, Štěpán HRDONKA a Vít ŠREBR. *Měření momentů setrvačnosti pračky*. Brno, 2016. Týmový projekt. Vysoké učení technické, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí práce Ing. Jakub Roupec, Ph.D.
- [8] *Konzultace s vedoucím práce, školitelem*. Brno, 2019.
- [9] Výzkum, Dynamika vozidel, SADT, ÚADI FSI VUT. *Ústav automobilního a dopravního inženýrství* [online]. Brno: PSoIT Pavel Schauer, 2019 [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <http://www.iae.fme.vutbr.cz/vyzkum-dynamika-vozidel-sadt>
- [10] RT3000_product.png. In: *OxTS INS/GNSS navigation experts since 1998* [online]. Middleton Stoney: rare form, 2019 [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: https://www.oxts.com/app/uploads/2017/07/RT3000_product.png

ELEKTRONICKÉ PŘÍLOHY

- A. Momenty setrvačnosti BODY.xlsx
- B. Momenty setrvačnosti kol, osa rotace.xlsx
- C. Momenty setrvačnosti kol, osy klopení.xlsx
- D. RC390.cmd

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1 Základní parametry motocyklu [1].....	10
Obr. 1.2 Dynamický model odpružení motocyklu [1].....	12
Obr. 1.3 Jednoduchý model kmitání motocyklu [1].....	12
Obr. 1.4 Jednoduchý model pro posouzení stability [1].....	13
Obr. 1.5 Komplexní model pro simulování kmitání motocyklu [1].....	14
Obr. 1.6 Snímek obrazovky VI-motorcycle [3].....	15
Obr. 2.1 KTM RC 390 [4].....	16
Obr. 2.2 KTM RC 390, 3D skenování, pohled 1.....	19
Obr. 2.3 KTM RC 390, 3D skenování, pohled 2.....	19
Obr. 2.4 KTM RC 390, naskenovaná síť.....	20
Obr. 2.5 Osa hlavy řízení, zvýrazněna fialově.....	21
Obr. 2.6 Střed dolního uložení zadního tlumiče, znázorněn červeně.....	21
Obr. 2.7 Středová rovina - CTR_PLANE, znázorněna zeleně.....	22
Obr. 2.8 Počátek souřadného systému.....	23
Obr. 2.9 BR_BODY Horní uložení zadního tlumiče, orientace osy Z.....	23
Obr. 2.10 Souřadný systém CS_1 určený pevnými body na motocyklu.....	24
Obr. 2.11 Měření těžiště, zavěšení za osu předního kola.....	26
Obr. 2.12 Měření těžiště, zavěšení za osu předního kola, naskenovaná síť.....	27
Obr. 2.13 Měření těžiště, zavěšení za osu předního kola, souřadný systém a CTR_PLANE..	28
Obr. 2.14 Měření těžiště, zavěšení za osu předního kola, bod závěsu.....	28
Obr. 2.15 Měření těžiště, Zavěšení za osu předního kola, přímka závěs_1.....	29
Obr. 2.16 Měření těžiště, zavěšení za osu kyvné vidlice.....	30
Obr. 2.17 Měření těžiště, zavěšení za osu kyvné vidlice, naskenovaná síť.....	31
Obr. 2.18 Měření těžiště, zavěšení za osu kyvné vidlice, souřadný systém a CTR_PLANE ..	31
Obr. 2.19 Měření těžiště, zavěšení za osu kyvné vidlice, přímka závěs_2.....	32
Obr. 2.20 Mimoběžky, pohled v ose X.....	33
Obr. 2.21 Mimoběžky, pohled v ose Z.....	33
Obr. 2.22 Těžiště motocyklu.....	33
Obr. 2.23 Katalog ND, KTM RC 390, nádrž [6].....	35
Obr. 2.24 Doplnění k Tabulka 2.3.....	36
Obr. 2.25 Nový souřadný systém, CS_2.....	37
Obr. 2.26 KTM RC 390, Názvy měřených bodů, pohled 1.....	38
Obr. 2.27 KTM RC 390, Názvy měřených bodů, pohled 2.....	38
Obr. 2.28 Princip fyzikálního kyvadla [1].....	42
Obr. 2.29 Měření momentu setrvačnosti, osa X, pohled 2.....	42
Obr. 2.30 Měření momentu setrvačnosti, osa X, pohled 1.....	43
Obr. 2.31 Upevnění gyroskopického snímače.....	43
Obr. 2.32 Měření momentu setrvačnosti, osa Y, pohled 1.....	44
Obr. 2.33 Měření momentu setrvačnosti, osa Y, pohled 2.....	45
Obr. 2.34 Fyzikální kyvadlo, bifilární závěs [1].....	46
Obr. 2.35 Měření momentu setrvačnosti, osa Z, pohled 1.....	46
Obr. 2.36 Měření momentu setrvačnosti, osa Z, pohled 2.....	47
Obr. 2.37 Fyzikální kyvadlo, trifilární závěs [7].....	48
Obr. 2.38 Dewesoft, záznam kmitání.....	49
Obr. 2.39 Kola, moment setrvačnosti, osa rotace, měření.....	49
Obr. 2.40 Kola, přípravek pro měření v osách klopení.....	50

Obr. 2.41 Kola, moment setrvačnosti, osa klopení, měření	51
Obr. 2.42 Velmi zjednodušený 3D model BODY	54
Obr. 2.43 Náčrt závěsu, měření BODY, osa Z	56
Obr. 2.44 Zjednodušený 3D model předního kola motocyklu	57
Obr. 3.1 Model motocyklu, Adams View, pohled 1	58
Obr. 3.2 kontakt FWH-ROAD, Adams View	59
Obr. 3.3 Model motocyklu, Adams View, pohled 2	60
Obr. 4.1 Měřicí ústředna a její upevnění [10]	61
Obr. 4.2 Lineární snímače polohy	62
Obr. 4.3 držák snímače vzdálenosti, přední	62
Obr. 4.4 držáky snímačů vzdálenosti zadní, levý a pravý	63
Obr. 4.5 Rozmístění prvků měřicího systému	63

SEZNAM TABULEK

Tabulka 2.1 [5] KTM RC 390, vybrané technické parametry	16
Tabulka 2.2 Údaje z kalibrace	18
Tabulka 2.3 Rozměry řetězu a řetězových kol	36
Tabulka 2.4 CS_1, souřadnice bodů	39
Tabulka 2.5 CS_1, souřadnice polopřímek	39
Tabulka 2.6 CS_2, souřadnice bodů	39
Tabulka 2.7 CS_2, souřadnice polopřímek	40
Tabulka 2.8 BODY, periody, momenty setrvačnosti	51
Tabulka 2.9 Kola, momenty setrvačnosti, osa rotace	52
Tabulka 2.10 Kola, momenty setrvačnosti, osy klopení	52
Tabulka 2.11 Kola, přepočtené momenty setrvačnosti, pro osy klopení	53
Tabulka 2.12 Ověřovací srovnání poměrů	54
Tabulka 3.1 Model motocyklu, Adams View	58