



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA DOPRAVNÍ

Bc. Roman Dáňa

SYSTÉM ZADNÍHO ODPRUŽENÍ
ZÁVODNÍHO MOTOCYKLU

Diplomová práce

2021

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

děkan

Konviktská 20, 110 00 Praha 1



K616.....Ústav dopravních prostředků

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Bc. Roman Dáňa

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

B 3710 – DS – Dopravní systémy a technika

Název tématu (česky): **System zadního odpružení závodního motocyklu**

Název tématu (anglicky): Rear suspension system of the racing motorcycle

Zásady pro vypracování

Při zpracování diplomové práce se řiďte následujícími pokyny:

- Prostudujte současná řešení zadního odpružení motocyklu.
- Proveďte popis geometrie a odpružení motocyklu v souvislosti s dynamikou.
- Porovnejte a zhodnoťte různé mechanismy odpružení na základě Vámi zvolených kritérií.
- Proveďte vlastní návrh geometrie zadního odpružení motocyklu, popis návrhu a vývoje včetně výstupů. V návrhu zohledněte možnosti nastavení geometrie mechanismu za účelem přizpůsobování zadního odpružení a popište vlivy.
- Vhodným způsobem ověřte vliv navrženého řešení pérování na vlastnosti podvozku motocyklu.



Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucích

Rozsah průvodní zprávy: minimálně 55 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)

Seznam odborné literatury: FIRST, Jiří a kol. Zkoušení automobilů a motocyklů: příručka pro konstruktéry. Vyd. 1. Praha: S&T CZ, 2008. 348 s. ISBN 978-80-254-1805-5.
COSSALTER, Vittore Motorcycle dynamics. 2nd Edition. Lulu, 2006. 372 s. ISBN 978-1-4303-0861-4.

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Josef Mík, Ph.D.
Ing. Přemysl Toman

Datum zadání diplomové práce:

22. června 2020

(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání diplomové práce:

17. května 2021

- a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia

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



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

Potvrzuji převzetí zadání diplomové práce.

Bc. Roman Dáňa
jméno a podpis studenta

V Praze dne 22. června 2020

Poděkování

Zde bych chtěl nejprve poděkovat vedoucím této diplomové práce, panu Ing. Josefu Míkovi, Ph.D. a především také Ing. Přemyslu Tomanovi za obzvláště užitečné rady, připomínky, odborné vedení a konzultace. Děkuji i dalším kolegům z týmu CTU Lions, zejména Ing. Ondřeji Pokornému za předání dosavadních zkušeností s návrhem zadního odpružení motocyklu, Ing. Ondřeji Paprčkovi a Ing. Josefu Svobodovi za ochotu poradit a pomoci se zpracováním simulací. Díky také všem blízkým kolegům, kamarádům, se kterými jsem měl během studia možnost spolupracovat a vzájemně si pomoci. Velké díky patří rodině a přítelkyni za podporu po celou dobu studia.

Prohlášení

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

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

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

V Praze dne 17.5.2021

.....

podpis

Abstrakt

Název práce: System zadního odpružení závodního motocyklu

Autor: Bc. Roman Dáňa

Typ práce: Diplomová práce

Univerzita: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta dopravní
Ústav dopravních prostředků K616

Vedoucí práce: Ing. Josef Mík, Ph.D.

Ing. Přemysl Toman

Rok vydání: 2021

Klíčová slova: CTU Lions, Motostudent, závodní motocykl, geometrie, odpružení motocyklu, zadní přepákování, tlumič, pružina, předpětí, zdvih, simulace

Anotace:

Diplomová práce se zabývá návrhem geometrie zadního odpružení pro nový prototyp závodního motocyklu CTU Lions EVO 2.0 Electric vyvíjen univerzitním týmem CTU Lions. V úvodní teoretické části jsou popsány a vysvětleny související technické parametry, ovlivňující faktory, prvky a v praxi používané mechanismy zadního odpružení a v neposlední řadě vliv systému odpružení na jízdní projev motocyklu. V rámci praktické části je pak od počátku popsán samotný proces návrhu, včetně požadavků a podmínek, které návrh limitují. Jedním z cílů je i navrhnout možnosti pro nastavení geometrie mechanismu za účelem přizpůsobení podvozku různým potřebám a podmínkám. Předmětem praktické části je rovněž pomocí počítačových simulací navržená řešení podrobněji posoudit z hlediska vlivů na vlastnosti podvozku motocyklu. Závěrem práce jsou zhodnoceny výsledky a diskutovány možnosti využití různých konfigurací zadního zavěšení.

Abstract

Title: Rear suspension system of the racing motorcycle

Author: Bc. Roman Dáňa

Document type: Master thesis

University: Czech Technical University in Prague

Faculty of Transportation Sciences

Institute of Vehicles K616

Supervisor: Ing. Josef Mík, Ph.D.

Ing. Přemysl Toman

Year of publication: 2021

Key words: CTU Lions, Motostudent, racing motorcycle, geometry, motorcycle suspension, rear linkage suspension, shock absorber, spring, preload, stroke, simulations

Annotation:

The master thesis deals with the rear suspension geometry design for the new CTU Lions EVO 2.0 Electric racing motorcycle prototype developed by the CTU Lions university team. The introductory theoretical part describes and explains the related technical parameters, affecting factors, rear suspension elements and mechanisms used in practice and the effect of the suspension system on the motorcycle driving performance. In the practical part, the design process itself is described from the beginning, including the requirements and conditions that limit the design. One of the goals is also to design options for adjusting the geometry of the mechanism to adapt the chassis to different needs and conditions. The object of the practical part is also to use the computer simulations to assess designed solutions in more detail in terms of the effects on the properties of the motorcycle chassis. At the end of the work, the results are evaluated and the possibilities of using different configurations of the rear suspension are discussed.

Obsah

Úvod	11
1 Technické parametry motocyklu	13
1.1 Statické parametry	13
1.1.1 Geometrické parametry	13
1.1.1.1 Rozvor	15
1.1.1.2 Úhel hlavy řízení	15
1.1.1.3 Závlek předního kola	15
1.1.1.4 Ergonomický trojúhelník posedu	16
1.1.2 Rozložení hmotnosti	16
1.2 Dynamické parametry	17
1.2.1 Stabilita motocyklu	17
1.2.1.1 Gyroskopický moment	18
1.2.1.2 Směrová stabilita	19
2 Systém zavěšení	20
2.1 Funkce pružení a tlumení	20
2.2 Pružiny	21
2.3 Tlumiče	22
3 Mechanismy zadního odpružení	23
3.1 Historický vývoj	23
3.2 Dvouramenná kyvná vidlice	24
3.3 Konzolová konstrukce	24
3.4 Jednoramenná kyvná vidlice	25
3.5 Pákové mechanismy	25
3.6 Porovnání mechanismů	26
3.6.1 Konvenční kyvná vidlice	26
3.6.2 Konzolová vidlice	26
3.6.3 Jednoramenná kyvná vidlice	27

3.6.4	Pákové systémy s centrálním tlumičem	27
3.7	Možnosti nastavení	28
3.7.1	Předpětí pružiny	28
3.7.2	Seřízení tlumení	28
4	Návrh geometrie zadního odpružení	30
4.1	Požadavky, podmínky a pravidla soutěže	30
4.2	První verze odpružení	31
4.3	Druhá verze odpružení	35
4.3.1	Výchozí varianta odpružení	36
4.3.2	Druhá alternativa odpružení	38
4.3.3	Výsledné charakteristiky navržených variant	39
4.3.3.1	Výchozí varianta odpružení	40
4.3.3.2	Druhá alternativa odpružení	41
5	Analýza zadního odpružení	43
5.1	Příklady reálných zkoušek	43
5.1.1	Zkouška brzd	43
5.1.2	Gymkhana	44
5.1.3	Zkouška akcelerace	44
5.2	Potenciometry	44
5.3	Kritéria k posouzení odpružení	45
5.3.1	Průběh zdvihu odpružení a squat	45
5.3.2	Anti-Squat	46
5.3.3	Histogramy	47
5.4	Příprava modelu motocyklu a prostředí	47
5.4.1	Výchozí model a úprava	48
5.4.2	Doplnění modelu a nastavení parametrů	50
5.4.2.1	Náhrada bateriových boxů a ovládací jednotky	50
5.4.2.2	Jezdec a rovnováha	50
5.4.2.3	Tvorba vazeb	51

5.4.2.4	Nastavení pružících a tlumících prvků	53
5.4.2.5	Hmotnost a těžiště	54
5.4.3	Síly a odpory působící na motocykl	55
5.5	Simulace a testy	57
5.5.1	Statické prověření	57
5.5.2	Dynamické testy	58
6	Vyhodnocení simulací	60
6.1	Výsledky statických testů	60
6.1.1	Validace výpočtů	64
6.2	Výstupy z dynamického testu	64
6.3	Shrnutí	67
6.3.1	Schéma nastavení	70
	Závěr	71
	Seznam zdrojů a literatury	74
	Přílohy	76
	Seznam obrázků	81
	Seznam tabulek	83

Seznam veličin a jednotek:

v	rychlost
t	čas
s	dráha
F	síla
m	hmotnost
c	tuhost pružiny
y	stlačení tlumiče
Δy	předpětí pružiny
k	tlumení
r	poloměr kola
ω	úhlová rychlost kola
[km/h]	kilometr za hodinu
[s]	sekunda
[m]	metr
[N]	Newton
[kg]	kilogram
[N/m]	Newton/metr
[N/mm]	Newton/milimetr
[mm]	milimetr
[N*m]	Newton*metr

Seznam použitých zkratk:

CTU	Czech Technical University
MEF	Moto Engineering Foundation
MSC	MacNeal-Schwendler Corporation
QFD	Quality function deployment
ADAMS	Automated Dynamic Analysis of Mechanical Systems
GPS	Global Positioning System
2D/3D	dvojměrný (Two-Dimensional) / tříměrný (Three-Dimensional)

Úvod

Studium kinematiky a dynamiky motocyklu je důležitým předpokladem ke zdokonalení jeho jízdních vlastností. Nové moderní motocykly i díky detailům dnes znatelně zlepšují své výkony. S rostoucími výkony jdou ale ruku v ruce i větší nároky nejen na konstrukci a provedení podvozku. Systém odpružení má zásadní vliv na kvalitu jízdy vozidla například z hlediska ovládání, pohodlí, bezpečnosti nebo právě i přenosu trakce.

Předmětem diplomové práce je především návrh geometrie zadního odpružení u nového prototypu závodního motocyklu CTU Lions EVO 2.0 Electric. Práce byla tedy zpracována pro účely sestavení tohoto motocyklu, vyvíjeného univerzitním týmem CTU Lions z fakulty dopravní ČVUT v Praze. Náš tým se bude již potřetí s tímto, v pořadí druhým elektrickým motocyklem účastnit mezinárodní soutěže MotoStudent. Soutěž je ve spolupráci s TechnoPark MotorLand organizována španělskou nadací MEF pro studentské týmy z univerzit z celého světa. Cílem soutěže je dle daných pravidel vyvinout a sestavit závodní motocykl kategorie Moto3 buď s benzínovým, či elektrickým motorem. Organizátorem soutěže jsou dodány základní komponenty jako motor, brzdy, pneumatiky a vybrané prvky odpružení. Završením je závěrečná událost ve španělském Aragónu, kde je motocykl prezentován a při technických přejímkách podroben statickým a dynamickým zkouškám. Poté co úspěšně projde všemi testy je motocykl připraven na závěrečný závod s hromadným startem na oficiálním okruhu MotoGP, MotorLand Aragón. V jednotlivých fázích lze získat určitý počet bodů a vítězem soutěže je tým s největším počtem celkových bodů.

Cílem práce je novému prototypu navrhnout vhodnou geometrii mechanismu zadního odpružení, která vyhovuje pravidlům soutěže a požadavkům stanoveným na základě dosavadních zkušeností týmu. Záměrem je při návrhu zohlednit a zahrnout možnosti variability geometrie a nastavení odpružení za účelem přizpůsobení podvozku potřebám jezdce, jízdnímu stylu, dynamickým testům soutěže či samotné trati okruhu. Posléze navržená řešení vhodným způsobem analyzovat z hlediska vlivu na celkové chování podvozku a prověřit, zda varianty vyhovují požadavkům.



Obrázek č. 1 – Logo univerzitního závodního týmu CTU Lions [21]

I. TEORETICKÁ ČÁST

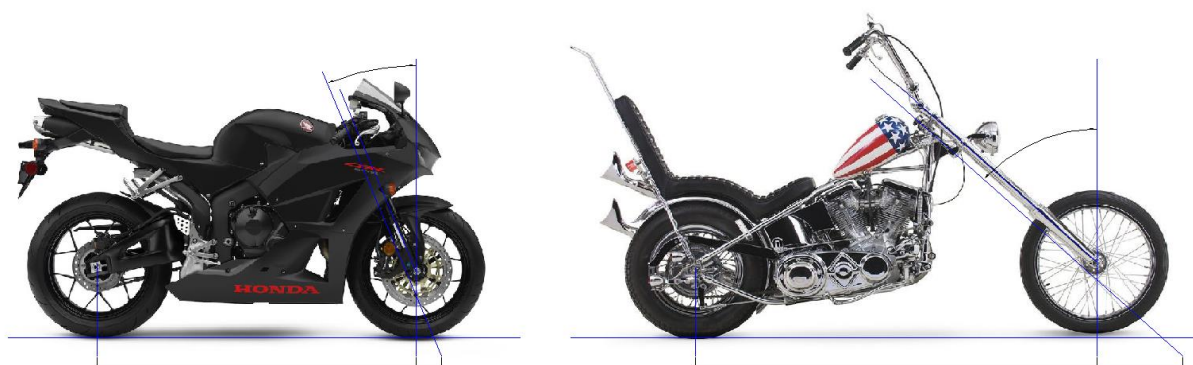
1 Technické parametry motocyklu

Parametrem se rozumí veličina nebo soubor veličin, které charakterizují například nějaký předmět nebo stav a lze je zpravidla určitým způsobem měřit či dopočítat. Kromě popisu mohou parametry sloužit k porovnávání a rozdělení do kategorií. Určité parametry a okrajové podmínky je rovněž potřeba znát již ve fázích návrhu a vývoje, například stroje nebo procesu. K popisu technických vlastností motorových vozidel lze parametry rozdělit do dvou základních skupin. Jednou skupinou jsou parametry statické a druhou parametry dynamické. [6] V následujícím textu jsou podrobněji popsány typy parametrů, které jsou považovány za relevantní vzhledem k tématu diplomové práce.

1.1 Statické parametry

1.1.1 Geometrické parametry

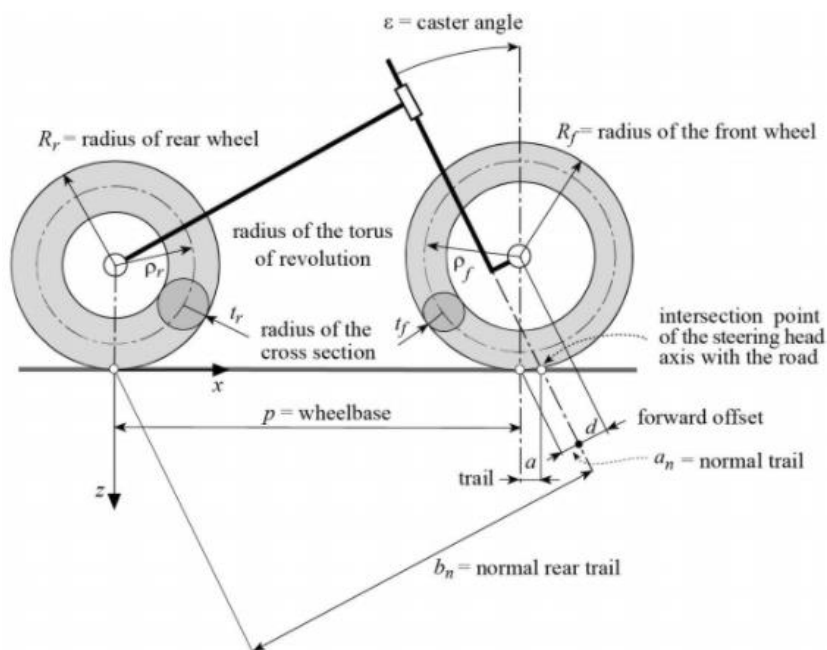
Geometrické parametry souvisí s konkrétními rozměry motocyklu a geometrií řízení, která je důležitá při definování manévrovatelnosti a jízdní stability vnímané samotným jezdcem. Různé typy motorek mají tedy i různé geometrické parametry. [3] Očividné rozdíly v rozměrech jsou například mezi malým sportovním motocyklem a chopperem na obrázku č. 2 – Rozměry sportovního motocyklu a chopperu. Již na první pohled je oproti typickému chopperu sportovní motocykl kratší a má mnohem menší úhel přední vidlice. Sedlo je naopak vyšší. Choppery mají obvykle i mnohem rozdílnější velikost předních a zadních kol, nežli tomu je u ostatních typů motocyklů. Zadní kola mívají oproti předním menší poloměr, zato jsou však širší a mají větší profil pneumatiky.



Obrázek č. 2 – Rozměry sportovního motocyklu a chopperu [autor, 2021]

Obecně lze geometrii motocyklu popsat pomocí následujících geometrických parametrů (viz Obrázek č. 3 – Obecná geometrie motocyklu):

- a stopa/závlek předního kola (trail)
- ε úhel přední vidlice (caster angle)
- p rozvor (wheelbase)
- R_f poloměr předního kola
- R_r poloměr zadního kola
- d offset vidlice



Obrázek č. 3 – Obecná geometrie motocyklu [3]

Tyto parametry se měří, když je motocykl ve výchozí svislé poloze a úhel natočení řídicích tyčí je roven nule, tj. když přední kolo směřuje přímo. Délka motocyklu závisí ve své podstatě na rozvoru a na velikosti kol. Dalšími často uváděnými rozměry u motorových vozidel jsou šířka a světlá výška. Šířka je už ale více dána samotnou konstrukcí rámu a případně kapotáží motocyklu. Rovněž světlá výška motocyklu, měřená pod motorem, je krom konstrukce rámu dána také velikostí kol a použitými tlumiči. Šířka a světlá výška už tedy přímo souvisí s konkrétním typem motocyklu.

Geometrie řízení je spjata se třemi důležitými parametry, a to závlekiem předního kola, úhlem řízení a rozvorem. Tyto parametry jsou na sobě silně závislé a zásadním způsobem ovlivňují chování motocyklů. Na celkovou ovladatelnost a jízdní vlastnosti stroje má bezpochyby vliv mnoho dalších parametrů jako například poloha těžiště, velikost kol, hmotnost apod. Existují motocykly, které mají do jisté míry nastavitelnou geometrii, kdy lze měnit například úhel řízení, posunout přední vidlici a některé moderní motocykly mají i zadní tlumiče s nastavitelnou délkou. [3] [5] [8]

1.1.1.1 Rozvor

Rozvor je podélná vzdálenost mezi středy, respektive příčnými osami kol a jak již bylo zmíněno výše, společně se samotnou velikostí kol určují délku motocyklu. Čím delší je rozvor, tím snáze motocykl drží přímý směr, lépe snáší nerovnosti vozovky a není tak citlivý na pohyb jezdce v sedle. Naopak v případě krátkého rozvoru je motocykl sám o sobě méně stabilní, citlivý na nerovnosti a pohyby řidiče. [5] [8]

1.1.1.2 Úhel hlavy řízení

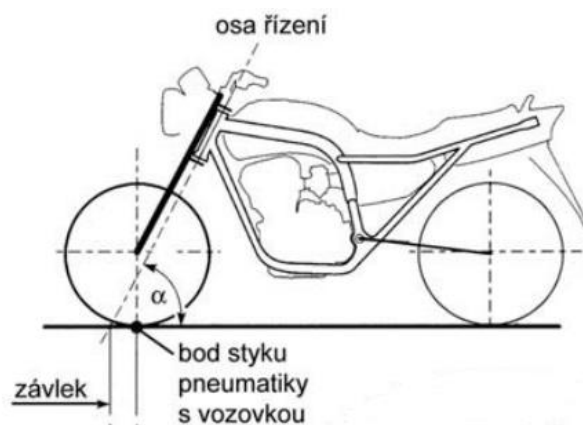
Úhlem (hlavy) řízení se rozumí úhel, který svírá osa otáčení přední vidlice označována jako hlava řízení se svislou přímkou, která je kolmá k podložce. Úhel řízení má významný vliv na stabilitu při rychlejší jízdě. Sportovní motocykly s ostřejším úhlem, neboli s předním kolem blíže k oblasti motoru, jsou méně stabilní, citlivé na pohyb v sedle a nerovnosti vozovky. O to lépe ale reagují, když je potřeba rychle změnit směr jízdy nebo měnit náklon (viz Obrázek č. 4 – Závodní motocykly ve směrovém oblouku). U motocyklů s velkým úhlem řízení, jako jsou například choppery je to právě naopak. Rozdíl v úhlu řízení lze pozorovat na obrázku č. 2 – Rozměry sportovního motocyklu a chopperu. Úhel hlavy řízení úzce souvisí s třetím parametrem, a to závlekiem předního kola neboli stopou. [3] [5] [6] [8]



Obrázek č. 4 – Závodní motocykly ve směrovém oblouku [motorcyclesports.net, 2020]

1.1.1.3 Závlek předního kola

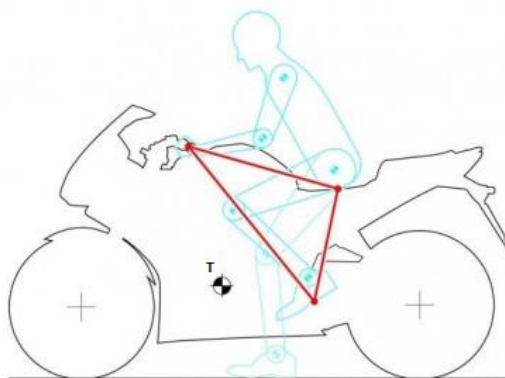
Závlek předního kola, častěji označovaný jako stopa (anglicky trail), je vůbec nejdůležitějším faktorem směrové stability. Stopa je vzdálenost průsečíku vozovky s prodlouženou osou řízení a bodem kontaktu předního kola s vozovkou (viz Obrázek č. 5 – Závlek předního kola). [8] Hlavním přínosem stopy je vznik středícího momentu, který automaticky vyrovnává a vrací řízení do přímého směru. Malé hodnoty stopy generují malé vyrovnávací momenty. Naopak vyšší hodnoty zvyšují stabilitu v přímém pohybu motocyklu, ale zásadně snižují manévrovatelnost. Hodnotu stopy ovlivňuje úhel řízení a délka offsetu čili odsazení osy přední vidlice od osy hlavy řízení. [3] [6] [8] [10]



Obrázek č. 5 – Závlek předního kola [8]

1.1.1.4 Ergonomický trojúhelník posedu

Trojúhelník posedu je pomyslný trojúhelník, jehož vrcholy definují, mezi třemi body na motocyklu, pozici jezdce. Trojúhelník je určen řídítky, sedlem a stupačkami (viz Obrázek č. 6 – Ergonomický trojúhelník). Tvar trojúhelníka je dán typem motocyklu, tudíž logicky platí, že pro různé kategorie motocyklů jsou i různé trojúhelníky. [6] [8]



Obrázek č. 6 – Ergonomický trojúhelník posedu [6]

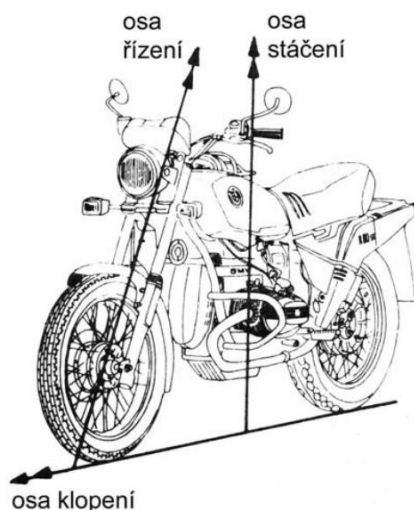
1.1.2 Rozložení hmotnosti

Obecně u motorových vozidel je hmotnost sledovaným parametrem, jelikož jde o podstatnou konstrukční vlastnost ovlivňující velkou část provozních parametrů. Hmotnost kompletního motocyklu, je taková hmotnost, při které je motocykl provozuschopný tzn. včetně potřebných provozních kapalin (palivo, olej, chladicí kapaliny, brzdové kapaliny, maziva). Takovou hmotnost nazýváme pohotovostní. Celková hmotnost motocyklu zahrnuje krom všech provozních kapalin, navíc ještě případnou výbavu. Zároveň je evidentní, že příliš vysoká hmotnost bude mít negativní vliv na dynamické vlastnosti motocyklu a sníží tak jeho výkonost. [6] Je tedy žádoucí, aby byl motocykl co nejlehčí, jednak z důvodu lepší akcelerace, ale rovněž kvůli lepší ovladatelnosti. Rozložení hmotnosti přímo souvisí s polohou těžiště a momenty

setrvačnosti. Těžiště, též hmotný střed (označené písmenem T v obrázku č. 6 – Ergonomický trojúhelník posedu), je další významný pojem při návrhu konstrukce motocyklů. Zpravidla se určují dvě polohy těžiště. Poloha těžiště samotného motocyklu ve stavu, kdy je schopen provozu a poloha těžiště motocyklu i s jezdcem. V případě, kdy je těžiště příliš vpředu může při akceleraci dojít k prokluzu zadního kola a během brzdění může být způsobeno nadměrné zdvižení zadního kola. V opačném případě, když je těžiště příliš vzadu dochází při akceleraci ke zdvihu předního kola a během brzdění k prokluzu předního kola. Nízká poloha těžiště společně s menší hmotností usnadňují jezdcům udržet motocykl v rovnováze. [6] [8] [10]

1.2 Dynamické parametry

Do skupiny dynamických parametrů motocyklu zahrnujeme výkonnostní parametry včetně hnací síly, jízdních odporů, parametrů brzd, stability, odpružení a případně lze zařadit i emisní parametry. [6] Při studiu dynamiky je motocykl považován za pružně zavěšené tuhé těleso. Celý systém (motocykl) má tak mechanické kmitavé vlastnosti a je schopný tlumit rychlé výkyvy. V případě špatného tlumení výkyvů může od určité rychlosti dojít k nebezpečnému podélnému rozkývání motocyklu. [3] Vzhledem k zaměření diplomové práce je v následujícím textu pojednáno výhradně o zmíněné stabilitě a odpružení, jež spolu značně souvisí. Samo odpružení je ústředním tématem této práce, tudíž mu jsou ve zbytku teoretické části věnovány dvě podrobné kapitoly.



Obrázek č. 7 – Osy motocyklu a pohyby při jízdě [8]

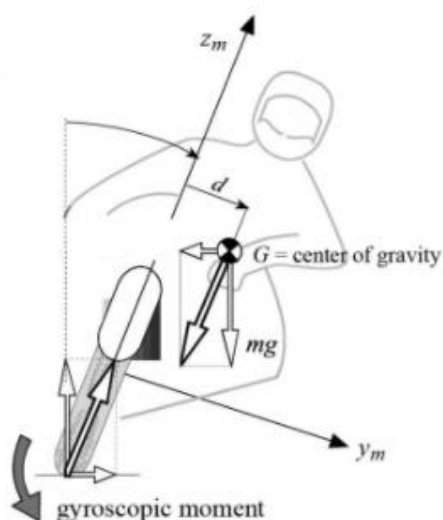
1.2.1 Stabilita motocyklu

V předchozích odstavcích již byly zmíněny termíny jako manévrovatelnost, ovladatelnost a stabilita. Manévrovatelnost a ovladatelnost popisují v jaké míře je motocykl schopen reagovat na jezdce požadované manévry. Na druhé straně stabilita znamená schopnost

samočinně udržet rovnováhu, odolat pádu při jízdě po nerovné komunikaci, nerovném povrchu nebo při poryvech větru. Mít motocykl neustále pod kontrolou je samozřejmost. Na stabilitu motocyklů mají nepochybně vliv setrvačné vlastnosti motocyklu, jízdní rychlost, odpružení a tlumení, geometrické parametry hlavy řízení (především závlek, popsány v podkapitole 1.1.1.3 Závlek předního kola), gyroskopické efekty či vlastnosti pneumatik. [3] Před rozvinutím tématu stability je zapotřebí ještě objasnit již zmíněný gyroskopický moment.

1.2.1.1 Gyroskopický moment

Gyroskop je zařízení se setrvačnickem (rychle rotujícím kolem) které má velmi silnou tendenci, zachovávat si polohu své osy rotace v prostoru. Roztočeným setrvačnickem lze bez obtíží pohybovat ve směru své osy rotace, avšak klade odpor při snaze naklopit jej do určitého směru. Kola motocyklu jsou rotující tělesa o nezanedbatelné hmotě a lze je tedy považovat za gyroskopy, které se snaží udržet stroj ve vzpřímené poloze a přímém směru. [6] V momentě, kdy jsou řídítka točena doprava, snaží se gyroskopický moment naklopit motocykl v opačném směru doleva. Když je motocykl klopen vpravo, jsou gyroskopickým momentem natáčena doprava také řídítka. V obou zmíněných případech vzniká výsledný gyroskopický moment, který se snaží stroj uvést do rovnováhy, jak je patrné z obrázku č. 8 – Gyroskopický moment při klopení. V nízkých rychlostech se ještě gyroskopické momenty tolik neprojevují a rovnováha závisí především na schopnostech řidiče, geometrii podvozku, poloze těžiště a hmotnosti motocyklu. Naopak ve vyšších rychlostech je rovnováha více udržována gyroskopickými účinky kol. [3] Díky tomuto jevu mohou jezdcí do oblouku naklopit svůj stroj pod opravdu velkými úhly, jak je známo z motocyklových závodů (viz Obrázek č. 4 – Závodní motocykly ve směrovém oblouku). Gyroskopický moment generuje například i běžící motor v závislosti na počtu otáček klikového hřídele. [3] [6] [8] [10]



Obrázek č. 8 – Gyroskopický moment při klopení [3]

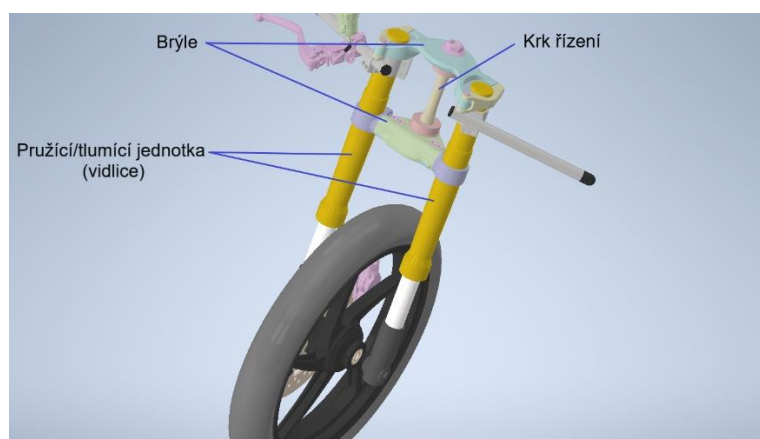
1.2.1.2 Směrová stabilita

V přímém pohybu je motocykl tzv. směrově stabilní, pokud je snadno ovladatelný nebo má přirozenou tendenci udržovat rovnováhu a držet přímý směr. [3] Zde se však dostáváme do rozporu požadavků na motocykl. Pokud totiž chceme co nejvíce směrově stabilní motocykl, znamená to pro jezdce obtížné ovládání při průjezdu směrovými oblouky a nemožnost rychlých manévrů. Na jednostopé vozidlo mohou při jízdě působit různé vlivy snižující jeho stabilitu. Jedním z faktorů možné ztráty stability je působení boční síly na motocykl způsobující klopení motocyklu kolem podélné osy. Klopení do strany může být ať už úmyslně či neúmyslně způsobeno jezdce nebo vlivem bočního větru. V situaci, kdy je jezdec vystaven poryvu bočního větru, stabilizuje motocykl především gyroskopický moment předního kola, ale nezbytná je i snaha jezdce situaci ustát. Kdyby při silnějším proudu vzduchu řidič motocykl neklopil proti větru, boční síly způsobí stočení motocyklu případně i jeho pád. Dalším faktorem ovlivňujícím stabilitu je natočení samotného předního kola, respektive řídítek. Natočení kola může ovlivnit objekt na vozovce, nerovnost povrchu nebo sám řidič vozidla. Při řízení pak může v kombinaci s například podhuštěnými pneumatikami či špatně nastaveným podvozkem dojít až k rozkmitání kola a celé přední vidlice. Aby nedošlo k nadměrnému rozkmitání řídítek, používá se u některých motocyklů tlumič řízení, který kmity přední vidlice tlumí. [3] [6] [8] [10]

Na závěr této kapitoly bych chtěl zdůraznit vliv odpružení na celkovou stabilitu motocyklu. Nerovnosti a poruchy pojížděného povrchu jsou hlavním zdrojem kmitání, rázů a vibrací přenášených na samotné vozidlo, potažmo řidiče. Takový povrch by pro řízení motocyklu bez jakéhokoliv odpružení představoval značné problémy. Odpružení totiž zajišťuje především stálou přilnavost kol a tím pádem stabilitu. Například při brzdění může špatný návrh tuhosti přední vidlice způsobit prudké rozkmitání kola. Málo tuhá vidlice se může při velkém brzdícím momentu na předním kole prohnout a způsobit rozkmitání vlivem změny geometrie. [6] Následující kapitoly se již věnují právě systému odpružení. [3]

2 Systém zavěšení

Zavěšení, označováno rovněž jako odpružení, je neodmyslitelnou součástí podvozku každého motorového vozidla. Jak už bylo uvedeno na konci předchozí kapitoly, nerovnosti a poruchy povrchu způsobují svislá kmitání, rázy a vibrace, které se dále přenáší na vozidlo i posádku. Malé hrboly jsou snadno absorbovány pneumatikami, ale pro přiměřené pohlcení větších nerovností je potřeba vhodný systém zavěšení. Zavěšení jsou pružné části spojující samotná kola s karoserií, rámem v případě motocyklu. Skládá se zpravidla z pružící a tlumící jednotky a lze ho rozdělit na přední a zadní odpružení. Při řešení odpružení vozidla je nutné uvažovat i pružné vlastnosti pneumatik. Systém zadního odpružení je podrobněji rozebrán v samostatné třetí kapitole. Součástí předního odpružení jsou tzv. brýle a přední vidlice (viz Obrázek č. 9 – Model přední vidlice motocyklu CTU Lions EVO 2.0 Electric). Brýle představují dvojici sousých pouzder, která pevně drží těla teleskopických tlumičů. Součástí brýlí je tzv. krk řízení a ložiska umožňující otáčení vidlice v hlavě řízení a tím zatáčení celého motocyklu. Popsané konstrukční řešení je nejčastějším uspořádáním předního odpružení motocyklu. [3] [6] [8] [14]



Obrázek č. 9 – Model přední vidlice motocyklu CTU Lions EVO 2.0 Electric
[archiv CTU Lions, 2021]

2.1 Funkce pružení a tlumení

Princip fungování zavěšení spočívá ve schopnosti pružení a tlumení. Funkcí odpružení je pomocí pružin umožnit kmity náprav a tím umožnit kolům sledovat profil vozovky. Péry jsou také zachycovány případné rázy. Vyvolané kmity, rázy a vibrace jsou následně tlumeny tlumiči, aby nedocházelo k nežádoucímu rozkmitání celé soustavy. Pružiny a tlumiče zajišťují tedy trvalé přitlačení pneumatik k rovině vozovky. Styk pneumatik s povrchem vozovky je nezbytný k přenosu požadovaných podélných a příčných sil. Ztráta styku kol znamená ztrátu kontroly nad řízením motocyklu či smyk. Obecně bez systémů zavěšení kol by nebyl zajištěn stálý kontakt pneumatik s vozovkou, který má klíčový vliv na jízdní vlastnosti. Současně by bylo vozidlo vlivem nerovností značně namáháno rázy a vibracemi. Díky odpružení je zaručena

určitá životnost, nezávadnost a bezpečnost vozidla. Nejen konstrukce, ale i posádka je vystavena těmto vlivům. Avšak komfort posádky není vždy důležitým požadavkem při návrhu odpružení, například právě u závodních strojů. Nutno dodat, že co nejlepší přilnavost kol vyžaduje tvrdší podvozek, který zas není pohodlný pro posádku. [3] [6] [8] [14]

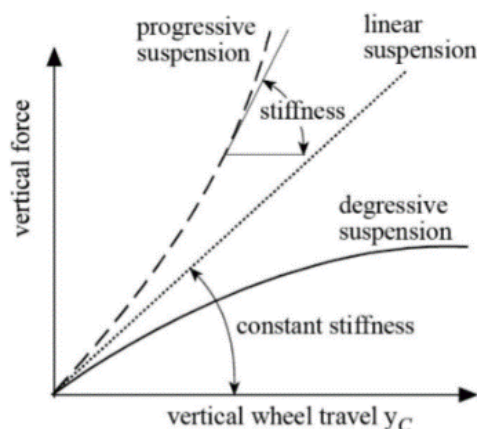
2.2 Pružiny

Význam pružin byl již vysvětlen. Pružící jednotky jsou strojní součásti, jejichž účelem je zachycení, akumulace a přenos mechanické energie. Toto je umožněno díky pružné deformaci materiálu, ze kterého je pružina vyrobena. Po vychýlení pružiny vzniká v její ose síla, která tlačí kolo zpět do výchozí polohy, aby byl zajištěn stálý styk s vozovkou. Typů pružících jednotek je v dnešní době několik, u motocyklů se však nejvíce používají ocelové vinuté pružiny (viz Obrázek č. 10 – Lineárně a nelineárně vinutá pružina). Ty se využívají i u osobních vozů nebo předních náprav užitkových vozidel.



Obrázek č. 10 – Lineárně (vlevo) a nelineárně (vpravo) vinutá pružina [ohlins.com, 2021]

Z hlediska konstrukce jde o pružinu vytvořenou vinutím ocelového drátu do šroubovice a je charakterizována tuhostí c [N/m]. Tuhost lze definovat jako závislost síly potřebné ke stlačení (deformaci) pružiny o určitou délku. Dle průběhu této deformace určujeme, zda se jedná o lineární nebo nelineární charakteristiku tuhosti (viz Obrázek č. 11 – Průběhy funkcí tuhosti). Nelineární charakteristiku lze ještě rozlišit na progresivní a degresivní, přičemž degresivní je u motocyklů nežádoucí.



Obrázek č. 11 – Průběhy funkcí tuhosti [3]

Deformace lineárně vinutých pružin je přímo úměrná působící síle. V případě progresivní vinuté pružiny je pro stlačení potřeba násobně větší síly. Odpružení s progresivním průběhem charakteristiky je tzv. měkké v případě malých výchylek kola, zatímco při velkém zdvihu kola je tzv. tuhé. O jakou maximální délku lze pružinu stlačit vyjadřuje hodnota jejího zdvihu. Například terénní motocykly mají oproti závodním mnohem delší dráhy pružení, jelikož musí překonat výrazné nerovnosti terénu či skoky, zatímco silniční závodní motocykly se pohybují po výrazně rovnější ploše. Progresivní průběh charakteristiky lze u pružin dosáhnout například proměnným stoupáním, proměnným průměrem závitů pružiny nebo proměnným průměrem samotného drátu. Pružiny jsou konstrukčně jednoduché, lehké, nevyžadují údržbu a dají se snadno upevnit. Nevýhodou je nemožnost přenášet podélné a příčné síly. Vinuté pružiny je možno použít pouze v kombinaci s tlumiči pérování, které lze v určitých případech uchytit skrze pružinu. [11] [12] [13] [14]

2.3 Tlumiče

Tlumičí jednotky jsou zařízení, která zabraňují rozkmitání pružící soustavy a odskokům kol během jízdy po nerovném povrchu. Tlumiče spolu s pružinami zajišťují přenos požadovaných adhezních sil a jízdní stabilitu. Míra tlumení kmitů je vyjádřena součinitelem tlumení k . Existují tlumiče, u kterých lze v určitém rozmezí tento parametr pozměnit. Typů tlumičů je opět celá řada, ovšem v dnešní době jsou u motocyklů nejpoužívanější teleskopické jednočinné (pracují jen v jednom směru) kapalinové tlumiče. Principem teleskopického kapalinového tlumiče je přetlačování oleje z jedné komory do druhé, takový tlumič se dodatečně nazývá jednoplášťový. Druhým typem teleskopického kapalinového tlumiče je dvouplášťový, kde je olej protlačován mezi vnitřním a vnějším válcem. Hustá kapalina jako olej pak při pohybu pístu ztěžka protéká rovnoměrně rozmístěnými pracovními ventily a kanálky. Účinnost tlumení závisí na počtu těchto kanálků a viskozitě oleje, která ovlivňuje odpor proudění kanálky. Vzniklý odpor (tlumicí síla) je úměrný rychlosti stlačení pístu. U motocyklů se využívá teleskopických pružinových tlumičů, které zajišťují jak pružící, tak i tlumicí funkci. Některé mají navíc expanzní nádobku na vyrovnávání tlaku. Ve zbytku diplomové práce se slovem tlumič myslí právě zmíněný pružinový (viz Obrázek č. 12 – Teleskopický pružinový tlumič). [11] [12] [13] [14] [15]



Obrázek č. 12 – Teleskopický pružinový tlumič [ohlins.com, 2021]

3 Mechanismy zadního odpružení

Pro popis jednotlivých typů zadního odpružení je potřeba zmínit jednu podstatnou dílčí část, a to zadní kyvnou vidlici. Kyvná vidlice je součástí podvozku každého motocyklu. Slouží k uchycení zadního kola a jeho odpružení k rámu. Od kola vyvolané rázy a vibrace jsou přenášeny přes vidlici do pružic, potažmo tlumící jednotky, kde jsou utlumeny. [11] [16]



Obrázek č. 13 – Zadní kyvná vidlice terénního motocyklu [yamahamotorsports.com, 2021]

3.1 Historický vývoj

První podoby odpružení kol motocyklu se začaly objevovat ve 30. a 40. letech 20. století. Ještě předtím však měly původní motocykly kola uložená v pevném rámu a jediným pružícím prvkem byly pneumatiky a odpružené sedlo. S rozvojem motocyklů po výkonnostní stránce se začaly vyrábět rámy s odpružením přední vidlice. Rovněž zadní kola byla odpružena pomocí tzv. kluzákového odpružení, kde bylo kolo uloženo ve svislých kluzácích umožňující absorpci pouze drobných kmitů kvůli nízkému zdvihu. Z tohoto mechanismu vzniklo dnešní konvenční odpružení zadní kyvné vidlice. V 50. letech 20. století už měla většina vyráběných motocyklů kyvnou vidlici. Avšak již před začátkem 30. let existovala obdoba kyvné vidlice trojúhelníkové konstrukce, kterou dnes známe jako konzolovou. Původní měla dvě samostatné pružiny a jeden centrální tlumič. V polovině 40. let se objevil první závodní motocykl s konvenční dvouramennou zadní vidlicí, opět se samostatnou pružinou a tlumičem. Od roku 1955 se začaly rozsáhle používat jednotné tlumiče s vestavěnou pružinou. Zároveň se z důvodu vyšších technických nároků postupně využívalo tužších pružin a tlumičů. O něco později v 70. letech 20. století začal konkrétně výrobce Suzuki u svých motocyklů využívat zpravidla konzolovou konstrukci kyvné vidlice. Současně značka Kawasaki pracovala na vývoji zcela nového mechanismu odpružení. Jednalo se o pákový mechanismus s centrální pružicí a tlumící jednotkou, jenž se v dnešní době značně využívá pro zadní odpružení u moderních motocyklů. [14] [16]

3.2 Dvouramenná kyvná vidlice

Konvenční dvouramenná vidlice je stále často využívaným typem zadního odpružení, který nahradil již zmíněné kluzákové zavěšení. Vidlice sestává ze dvou vlečných ramen, která jsou mezi kolem a uložením vidlice spojena tzv. mostem. Obě ramena jsou v blízkosti osy kola osazena pružinovými tlumiči (viz Obrázek č. 14 – Konvenční dvouramenná vidlice). Tlumiče jsou k bokům zadní části rámu uchycené pod určitým úhlem. Pro správné fungování tohoto typu odpružení je nezbytné, aby tlumiče působily na obou ramenech stejně velkou reakční silou. Při větším zatížení, například při prudké jízdě, pak dochází k nadměrnému torznímu namáhání vidlice. Z tohoto důvodu se dvouramenná kyvná vidlice lépe uplatní u motocyklů pro spíše nenáročné užívání. [8] [14] [16] [17]



Obrázek č. 14 – Konvenční dvouramenná vidlice [ready2ride.cz, 2021]

3.3 Konzolová konstrukce

Toto provedení ve své podstatě vychází z konvenční dvouramenné vidlice. Dvě ramena jsou navíc vyztužena vlastní trojúhelníkovou konstrukcí a tím je zároveň umožněno nahradit dvojici postranních tlumičů jedním centrálním s větší tuhostí (viz Obrázek č. 15 – Konzolová kyvná vidlice). Konzolová zadní vidlice tak řeší nedostatek rozdílných tlumících účinků konvenčního uspořádání. Centrální tlumič může být druhým koncem uchycen v oblasti pod sedlem nebo horizontálně směrem pod prostor nádrže. [8] [14] [16] [17]



Obrázek č. 15 – Konzolová kyvná vidlice [archiv CTU Lions, 2021]

3.4 Jednoramenná kyvná vidlice

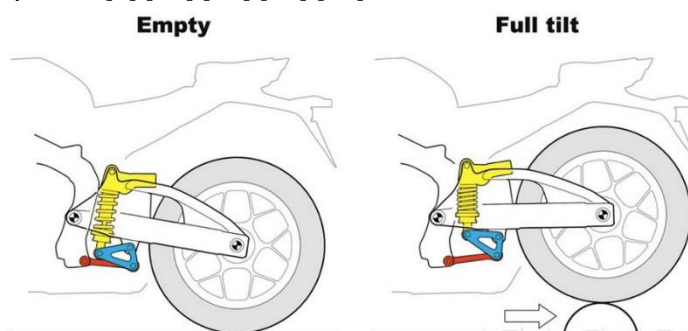
Ojediněným způsobem zadního odpružení je pomocí jednoramenné vidlice (viz Obrázek č. 16 – Motocykl s jednoramennou kyvnou vidlicí). Tlumič bývá uchycen obdobně jako u konzolové konstrukce a ve své podstatě je stejný i princip fungování. Na samotné rameno jsou kladeny značné pevnostní požadavky. Musí být dimenzováno tak, aby sneslo veškeré působící zatížení, a proto bývá i vcelku mohutné. Avšak kvůli hmotnostním úsporám bývá rameno duté a je zde možnost namísto řetězu využít k přenosu točivého momentu kardanovou hřídel, vedenou právě skrze rameno. [8] [16] [17]



Obrázek č. 16 – Motocykl s jednoramennou kyvnou vidlicí [ultimatemotorcycling.com, 2019]

3.5 Pákové mechanismy

Do 80. let 20. století byl tento způsob odpružení výhradou závodních motocyklů, ale poté došlo k jeho velkému rozšíření a stal se populární u terénních, rychlých silničních a supersportovních motocyklů. Stylů provedení existuje celá řada. Jeden ze známějších systémů je systém značky Honda, tzv. Pro-Link (viz Obrázek č. 17 – Princip pákového mechanismu Pro-Link). Jednotlivá řešení se mimo rozměrů liší v uspořádání, uchycení a počtu komponent, nicméně princip fungování se nemění. Základem je dvouramenná kyvná vidlice a centrální tlumič. Tlumič je standardně jedním koncem uchycen k rámu motocyklu, ale k mostu vidlice je nepřímou připevněn právě pomocí částí přepákování. Díky pákovému mechanismu může být dosaženo progresivního průběhu tuhosti, přestože pružící jednotkou je tlumič s lineárně vinutou pružinou. Návrhu a následnému posouzení geometrie zadního přepákování jsem se věnoval v praktické části této diplomové práce. [8] [14] [15] [16] [17]



Obrázek č. 17 – Princip pákového mechanismu Pro-Link [motorcycle.com, 2021]

3.6 Porovnání mechanismů

3.6.1 Konvenční kyvná vidlice

Výhody dvouramenné vidlice jsou následující:

- Konstrukce je jednoduchá a nenákladná na výrobu.
- Na celý podvozek a rám nepůsobí nikterak velké reakční síly.
- Snadný odvod tepla tlumiče. Při pružení a tlumení se totiž přenesená kinetická energie v tlumiči mění na teplo.
- Rychlá odezva odpružení díky uložení tlumičů v blízkosti osy kola.

Nevýhody:

- Maximální svislý zdvih kola je přímo omezen maximálním zdvihem tlumičů.
- Progresivní průběh tuhosti pouze za použití progresivně vinutých pružin.
- Značnou nevýhodou je riziko vzniku torzních momentů, které pak velice namáhají ramena vidlice. Momenty jsou generovány nerovnoměrným odpružením tlumičů, respektive odlišným předepnutím nebo různými tuhostmi pružin.
- Nerovnoměrné odpružení zároveň snižuje stabilitu jízdy.
- Dvojice tlumičů se projevuje také větší hmotností.
- Možné komplikace při manipulaci s kolem, kvůli uložení tlumičů na koncích ramen.

3.6.2 Konzolová vidlice

Konzolová konstrukce má oproti konvenční vidlici tyto výhody:

- Konstrukce je vysoce odolná vůči zkrutu a ohybu.
- Centrální tlumič umožňuje vysokou stabilitu a lepší nastavitelnost podvozku.
- Uložení tlumiče a vidlice dovoluje velký zdvih zadního kola.

Nevýhodami jsou:

- Progresivní průběh tuhosti pouze za použití progresivně vinuté pružiny.
- Horší odvod tepla z tlumiče.
- Hlavní nevýhodou je hmotnost konstrukce a celková prostorová náročnost.

3.6.3 Jednoramenná kyvná vidlice

Jednoramenná vidlice funguje v zásadě obdobně jako konzolové kyvné vidlice, avšak z důvodu konstrukční odlišnosti je uvedena a porovnána zvlášť. Výhodami jednoramenných vidlic jsou:

- Velmi snadný přístup a manipulace se zadním kolem.
- Možnost využití hřídele k pohonu, namísto řetězu či řemenu.

Nevýhody:

- Kyvné rameno je dosti robustní, což se projevuje vyšší hmotností.
- Složitá konstrukce a velká hmotnost ramene v případě pohonu pomocí hřídele.
- Vysoké pevnostní požadavky.

3.6.4 Pákové systémy s centrálním tlumičem

Pákové systémy mají následující výhody:

- Tento způsob zavěšení umožňuje ze všech zmíněných variant nejvíce progresivní charakteristiky.
- Minimální nároky na prostor z hlediska uložení tlumiče i samotného mechanismu.
- Oproti ostatním systémům dovoluje rovněž největší možné zdvihy zadního kola.
- Variabilita nastavení vlastností podvozku. Možnost adaptace zavěšení různým podmínkám či jízdním režimům. Různých nastavení je docíleno výměnou některých dílů mechanismu za jinak velké nebo tvarované.
- Reakční síly jsou přenášeny přes dílčí komponenty přepákování a snižuje se tak namáhání rámu.

Nevýhodami jsou:

- Systémy přepákování mají vcelku složitou konstrukci.
- Z důvodu působení nemalých sil je nutné dílčí části vyrobit z kvalitních materiálů.
- Nákladnější výroba kvůli vysokým nárokům na materiál a uložení.

[3] [8] [14] [15] [16] [17]

3.7 Možnosti nastavení

Existují způsoby, kterými lze upravit vlastnosti zavěšení a tím ovlivnit celkovou odezvu podvozku a jízdní projev motocyklu dle potřeb jezdce. Možnost pozměnit nastavení podvozku se hodí například v situacích, kdy se řidič za jízdy necítí komfortně či bezpečně anebo chceme lépe přizpůsobit podvozek technice jízdy či charakteru trati. Nejdůležitějším parametrem pro nastavení je tuhost pružící jednotky, která jak již bylo zmíněno závisí na typu a materiálu pružiny. Výsledná charakteristika odpružení pak určitě závisí ještě na zvoleném systému odpružení. Mnohdy bývá u motocyklů žádoucí progresivní průběh tuhosti.

3.7.1 Předpětí pružiny

Pomocí předpětí je možné změnit činnou délku zdvihu pružiny a tím tak ovlivnit tuhost pružinového tlumiče. Předepnutím dojde k prověšení kol a tím se de facto změní i základní geometrie motocyklu. Nastavuje se podle poklesu motocyklu (anglicky „sag“) ve stavu při zatížení pouze vlastní vahou a při zatížení i s vahou jezdce. Nejčastěji se předpětí nastavuje prostřednictvím dvojice matic na samotném tlumiči, které jsou viditelné na obrázku č. 12 – Teleskopický pružinový tlumič. Druhý způsob je pomocí dvou vnějších válců nasazených na tlumič. Jeden válec je s drážkami a dosedací plochou pro pružinu. Druhý má dvě zarážky, o které se první válec drážkami zapře.

3.7.2 Seřízení tlumení

Účinnost tlumení lze ovlivnit díky specifickým šroubům a maticím. V zásadě u každého tlumiče je možné nastavit kompresi a odskok. Jsou dvě možnosti nastavení komprese neboli stlačení. Pomalé stlačení je vhodné pro trasy s častými směrovými oblouky, kterými motocykl projíždí. Naopak rychlé stlačení se nastavuje pro úseky s větším množstvím nerovností a ostrých hran. Nastavení odskoku neboli tlumení má vliv na to, jak se tlumič vrátí do výchozí polohy. U tlumičů, které jsou doplněny ještě o expanzní nádobky lze eventuelně změnit hladinu oleje a tlak vzduchu v nádobce a tím i jeho charakteristiku. Expanzní nádobky jsou však velmi citlivé na změny, nesprávný tlak může vést k poškození tlumiče.

Na závěr je třeba dodat, že na výsledné chování odpružení má vliv i nahuštění pneumatik, kvalita zpracování pružin a tlumičů či kvalita oleje v tlumiči.

[3] [14] [15] [18]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 Návrh geometrie zadního odpružení

Praktická část diplomové práce se zabývá návrhy a posouzením geometrie systému zadního odpružení pro nový model motocyklu CTU Lions EVO 2.0 Electric. Předmětem je návrh vhodné konfigurace zadního odpružení splňující dané požadavky a pravidla, a kterou lze z hlediska jízdní dynamiky přizpůsobit trati, testům na soutěži, potřebám jezdce či způsobu jízdy. V této kapitole jsou popsány stanovené požadavky, podmínky návrhu, proces vývoje geometrie mechanismu až do finálních variant včetně jejich výpočetního ověření a výstupů.

4.1 Požadavky, podmínky a pravidla soutěže

Celý projekt, vývoj a stavba motocyklu je limitována a regulována předpisy soutěže MotoStudent. V první řadě jsou uvedena pravidla, která platí pro přední i zadní zavěšení. Systémy zavěšení mohou mít jakoukoli konfiguraci, ale zároveň musí splňovat uvedené body:

- Všechny aktivní, semi-aktivní či jakékoli elektronické ovládací prvky pro odpružené systémy, které ovlivňují uspořádání zavěšení či výšku, jsou zakázány.
- Odpružení lze nastavit pouze manuálně mechanickým či hydraulickým seřízením.
- Prototyp, jehož systém odpružení bude považován za nebezpečný se nesmí účastnit testovacích jízd a závodu.

Pro výhradně zadní systémy odpružení platí následující:

- Jsou povoleny vlastně navržené, komerční i upravené druhy zavěšení.
- Sestava zadního zavěšení může být mechanicky nebo hydraulicky seřízena (např. regulace předpětí pružiny, stlačení, vysunutí či odskok tlumiče), avšak bez použití přídatné expanzní nádoby.
- Pneumatické tlumiče (přední i zadní) nejsou povoleny.

Na základě předchozích zkušeností týmu CTU Lions byly pro vývoj konceptu zadního odpružení nastaveny další technické požadavky a kritéria:

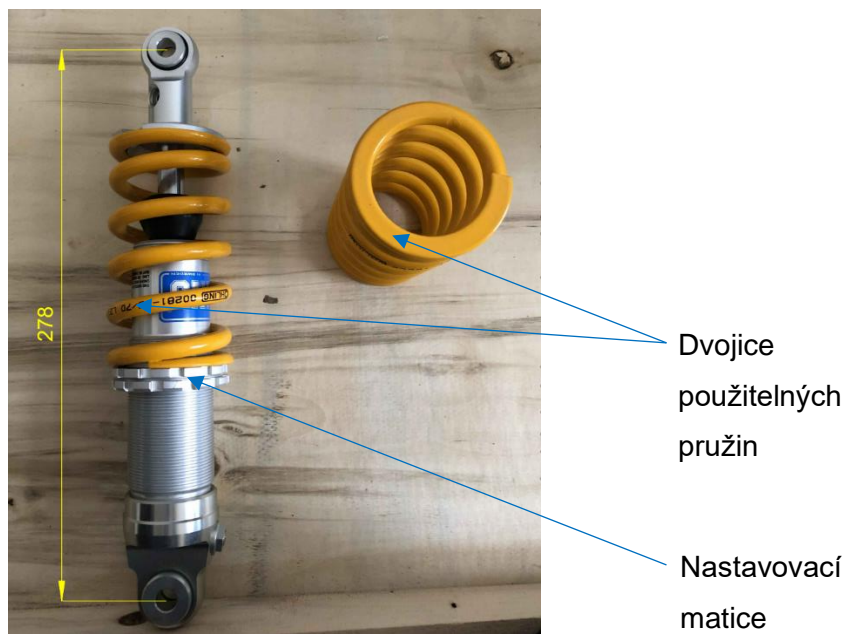
- Při zatížení je propružení (vpředu a vzadu) motocyklu rovnoměrné.
- Maximální zdvih zadního kola je v toleranci 110 – 120 mm.
- 30% zdvih odpružení při zatížení vahou motocyklu i s jezdce
- 5 – 10% zdvih odpružení při zatížení pouze vahou motocyklu
- Progresivní průběh charakteristiky tuhosti.
- Délka kyvného ramene je nastavena na délku 520 mm.

[21] [22]

Prvním krokem bylo definování konstrukce a designu zadního odpružení. Pro většinu úvodních rozhodnutí se v týmu provádí QFD analýza. Tato metoda byla rovněž využita pro porovnání a výběr vhodné konstrukce odpružení. Na základě požadavků zmíněných na předchozí straně byl namísto konzolové konstrukce zvolen pákový mechanismus. K odpružení zadní vidlice byl již předem, podle předešlých zkušeností, pořízen teleskopický pružinový tlumič značky ÖHLINS s 59 mm zdvihem a délkou 278 mm (viz Obrázek č. 18 – Pořízený tlumič značky ÖHLINS). Pro tlumič jsou k dispozici dvě lineárně vinuté pružiny:

- ÖHLINS 00281 L2118 o tuhosti 70 N/mm
- ÖHLINS 00281 L3816 o tuhosti 75 N/mm

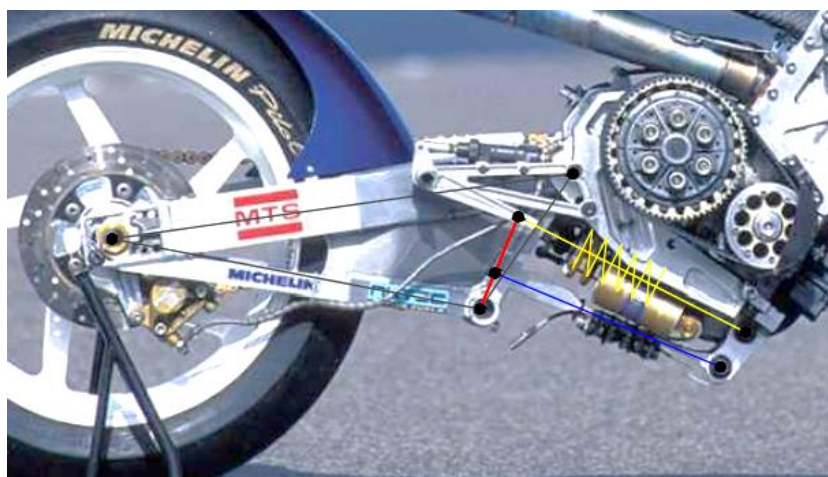
Tlumič umožňuje základní nastavení tlumení a maximální předeprnutí pružiny o 16 mm.



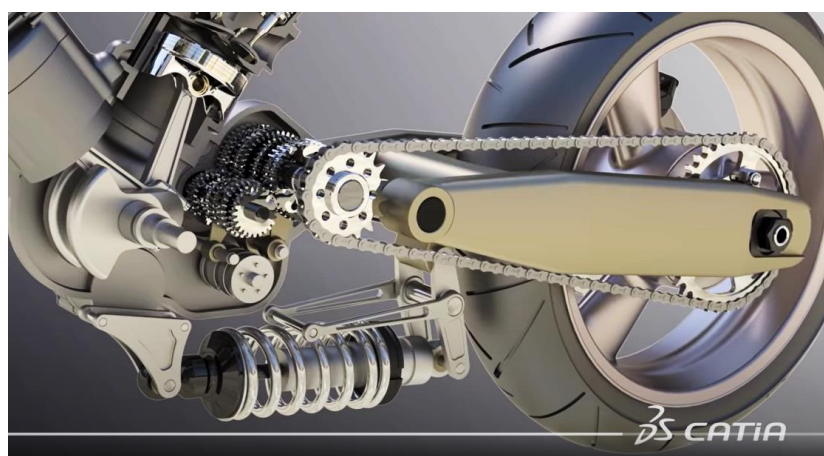
Obrázek č. 18 – Pořízený tlumič značky ÖHLINS [autor, 2020]

4.2 První verze odpružení

V rámci inovace vznikl nápad pokusit se navrhnout horizontální mechanismus zadního přepákování. Tento nekonvenční způsob odpružení se u motocyklů v zásadě nepoužívá, jedná se spíše o mimořádný pokus nebo změnu. Jedna z inspirací byl například zajímavý závodní motocykl Tularis 800 (viz Obrázek č. 19 – Motocykl Tularis 800) či 3D model od neznámého autora vytvořený v softwaru CATIA (viz Obrázek č. 20 – Koncept vodorovného přepákování). Na základě počátečních parametrů jsem v softwarové CAD aplikaci Inventor navrhl dvě jednoduché geometrie zadního zavěšení, které byly potenciálně vhodné pro nový motocykl (viz Obrázek č. 58 – Koncept geometrie VA a Obrázek č. 59 – Koncept geometrie VB – Tularis v příloze).

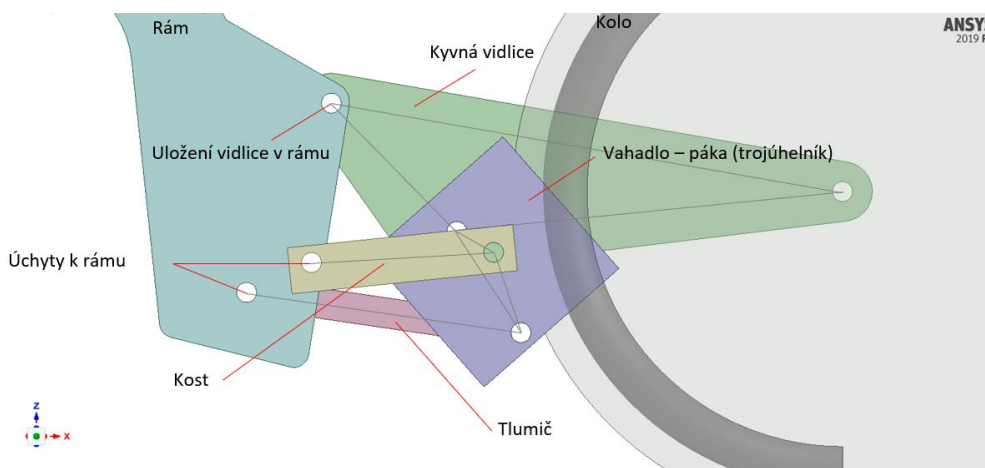


Obrázek č. 19 – Motocykl Tularis 800 [archiv CTU Lions, 2021]

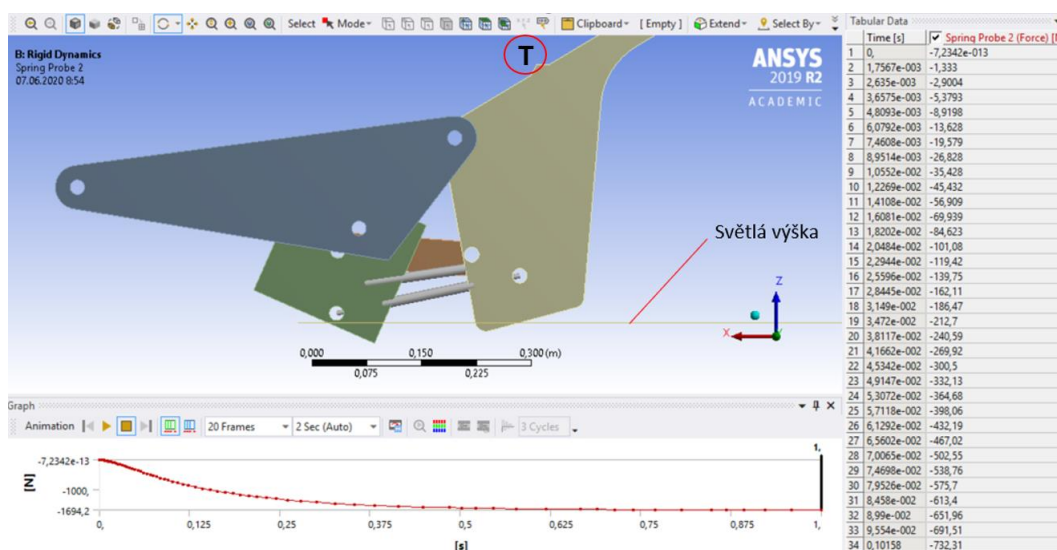


Obrázek č. 20 – Koncept vodorovného přepákování [youtube.com, 2021]

S týmovými kolegy jsme se rozhodli pro atraktivnější variantu vycházející z 3D modelu na obrázku č. 20. Konstrukce je založena na čtyřčlenném mechanismu (celkově u pákových mechanismů nejčastější sestava), tvořena kyvnou vidlicí, jedním centrálním tlumičem v téměř vodorovné poloze, vahadlem a dvojicí tzv. kostí (viz Obrázek č. 21 – Geometrický 2D model přepákování). Zvolená varianta byla v inženýrském modelovacím softwaru ANSYS Spaceclaim převedena na hrubý geometrický 2D model, který plně postačil pro mé účely návrhu a optimalizace. Zde jsem opakovaně upravoval velikost, polohu a místo uložení všech dílčích komponent. Zajisté bylo nutné zachovat délku tlumiče, souřadnice uložení kyvné vidlice a její délku. Aby nedošlo k případné kolizi s jinými objekty či překročení dané hranice světlé výšky, byla součástí modelu i plocha představující dostupný prostor pro uložení jednotlivých čepů (z důvodu přehlednosti není tato plocha v obrázku č. 20 zobrazena). S provedenými úpravami jsem paralelně nový design podrobil semi-statickému posouzení v simulačním prostředí ANSYS Mechanical (viz Obrázek č. 22 – Simulace zatížení a analýza tuhosti v ANSYS Mechanical).



Obrázek č. 21 – Geometrický 2D model přepákování [autor, 2020]



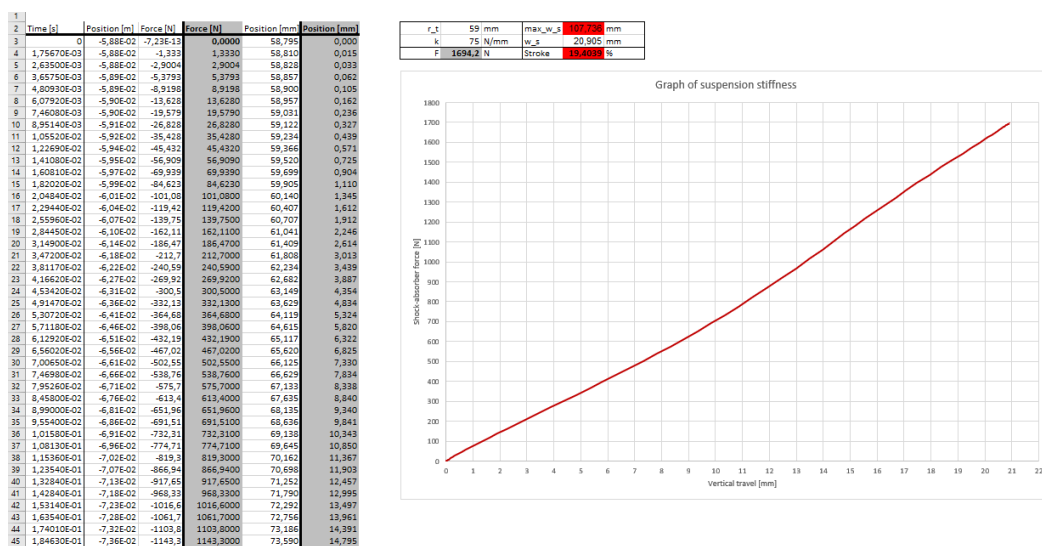
Obrázek č. 22 – Simulace zatížení a analýza tuhosti v ANSYS Mechanical [autor, 2020]

Cílem bylo navrhnout konfiguraci odpružení s nejlepší možnou progresivní charakteristikou tuhosti, která současně za daných podmínek splňuje již zmíněné požadavky:

- Maximální zdvih zadního kola je v toleranci 110 – 120 mm.
- 30% zdvih odpružení při zatížení vahou motocyklu i s jezdcem
- 5 – 10% zdvih odpružení při zatížení pouze vahou motocyklu

V prostředí ANSYS Mechanical bylo simulováno působení svislého zatížení koncentrované v těžišti (situováno v hrotu označeném písmenem *T* v obrázku č. 22). V této fázi návrhu prototypu motocyklu je poloha těžiště uvažována přesně uprostřed rozvoru. Výšku těžiště není při semi-statickém posuzování svislým zatížením třeba znát. Předpokládaná hmotnost motocyklu je 130 kg s rovnoměrným rozložením váhy mezi obě kola a očekávaná hmotnost vybaveného jezdce je 80 kg. Při každé úpravě geometrie jsem zároveň analyzoval změny

chování odpružení pomocí grafů průběhu síly na tlumiči v závislosti na svislém pohybu zadního kola (viz Obrázek č. 23 – List s daty a průběhem tuhosti odpružení při celkovém zatížení 210 kg). Grafy jsem tvořil z exportovaných a převedených dat z prostředí ANSYS Mechanical. Celkem jsem prováděl tři typy simulací zátěže, a to bez jezdce (pouze s vlastní hmotností motocyklu), s jezdce (hmotnost motocyklu + hmotnost jezdce) a zatížení s ještě větší hmotností navíc (250 kg). V rámci technických přejímek před samotnými závody je totiž vahou 250 kg motocykl svisle zatížen při statickém testu.



Obrázek č. 23 – List s daty a průběhem tuhosti odpružení při celkovém zatížení 210 kg
[autor, 2020]

Bohužel se mi i přes veškerou snahu a nespočet pokusů nepodařilo navrhnout konfiguraci, která by splňovala všechny stanovené požadavky současně. Jedním z důvodů byla nedostatečná tuhost pružin již pořízeného tlumiče. Geometrie, které umožnily zdvih zadního kola v mezích 110 – 120 mm zas nesplňovaly podmínku 5 – 10% zdvihu s vlastní vahou motocyklu (130 kg) nebo 30% zdvihu s vahou motocyklu a jezdce (210 kg). Pokles motocyklu byl při daném zatížení vždy příliš hluboký, což bylo ihned patrné i z vysoké hodnoty reakční síly na tlumiči. Při snaze pak snížit působící sílu na tlumiči, respektive stlačení tlumiče, došlo ale zároveň k výraznému omezení možného zdvihu kola. Některé verze geometrie nevykazovaly ani souvislý progresivní průběh charakteristiky. Občas byla charakteristika dokonce degresivní. Splnění všech požadavků najednou jsem se nejvíce přiblížil s téměř poslední z předložených a dokumentovaných variant, nicméně i tak nebyla geometrie optimální. Návrh a analýza této varianty je zobrazena na předchozích obrázcích č. 21, 22, 23. Maximální zdvih kola činil 107,7 mm, při kterém byl tlumič stlačen na 100%, čili o 59 mm. Z obrázku č. 23 je navíc patrný spíše lineární, a především nekonzistentní průběh charakteristiky, který je nežádoucí. V každém případě k nalezení použitelné varianty by bylo zapotřebí tlumiče s výrazně tužší pružinou a také více prostoru v oblasti kyvné vidlice,

převodovky a motoru. Horizontální řešení pákového mechanismu se navíc jeví být citlivé na přírůstek hmotnosti motocyklu a změny geometrie. Vodorovná varianta zkrátka nebyla kompatibilní se všemi stanovenými požadavky a podmínkami. V příloze jsou další obrázky z vývoje první verze odpružení.

4.3 Druhá verze odpružení

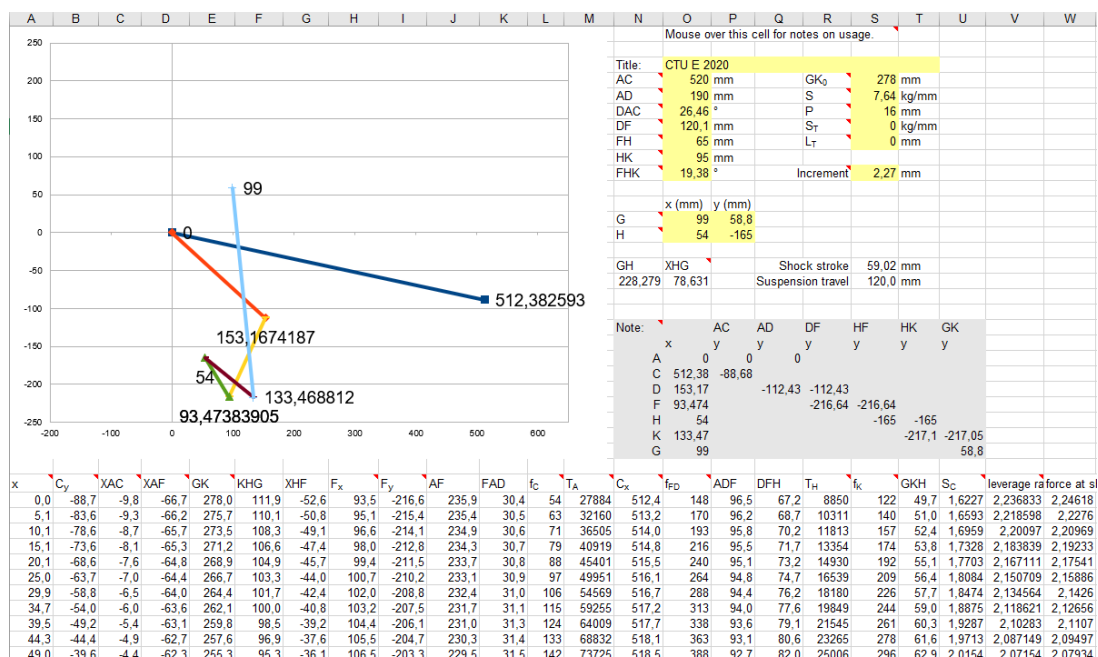
První verze s vodorovným uchycením tlumiče nebyla zcela kompatibilní s našimi podmínkami a požadavky, proto jsem postupně začal s pokusy o návrh varianty, kde je tlumič uchycen v obvyklé svislé poloze. Svislá varianta pákového mechanismu měla o poznání lepší výsledky. Ostatně jedná se o běžně používané a vcelku rozšířené řešení, tudíž jej lze i logicky považovat za více osvědčený způsob odpružení. Po dohodě s týmovými kolegy jsem tedy zcela přešel k práci na návrhu svislé varianty pákového mechanismu. Nejvhodnější a nejjednodušší konstrukce jsou sestaveny opět ze čtyř členů, a to kyvné vidlice, centrálního tlumiče, vahadla a dvojící kostí. Variací takových pákových mechanismů s vertikální polohou tlumiče je mnoho. Při výběru nové konfigurace jsem se inspiroval odpružením, které má například motocykl Honda NC700X (viz Obrázek č. 24 – Pákový mechanismus motocyklu Honda NC700X). Požadavky na odpružení zůstaly stejné, stále tedy platí:

- Maximální zdvih zadního kola je v toleranci 110 – 120 mm.
- 30% zdvih odpružení při zatížení vahou motocyklu i s jezdcem
- 5 – 10% zdvih odpružení při zatížení pouze vahou motocyklu
- Nejlepší možná progresivita tuhosti odpružení.



Obrázek č. 24 – Pákový mechanismus motocyklu Honda NC700X [motorcycle.com, 2021]

Začal jsem opět návrhem prvotní geometrie v softwaru Inventor. Tentokrát jsem ale ke zjištění průběhu odpružení a další optimalizaci využil propracovaný výpočetní excelovský soubor (viz Obrázek č. 25 – Výpočetní MS Excel) z archivu našeho týmu [21]. Soubor pochází z internetu, nicméně byl již použit pro návrh zadního přepákování u modelu motocyklu CTU Lions Petrol EVO 2 pro sezónu 2017/2018. Je tedy osvědčenou a spolehlivou metodou pro návrh geometrie. Metoda výpočtů je postavena především na základě vektorových propočtů sil a působících momentů. Podrobné vzorce k výpočtům jsou uvedeny v příloze na obrázku č. 62 – Metoda výpočtů pro návrh pákového mechanismu.



Obrázek č. 25 – Výpočetní MS Excel [autor, 2021]

Princip návrhu byl v zásadě stejný jako u první verze. Upravoval jsem velikosti všech dílčích komponent a souřadnice uložení vahadla a kyvné vidlice v rámu. Poloha těžiště je stále uvažována přímo uprostřed rozvoru, mezi osami kol. Po několika pokusech jsem dosáhl první geometrie, která splňovala podmínku zdvihu zadního kola a také souvislý progresivní průběh charakteristiky, a to dokonce i se slabší pružinou o tuhosti 70 N/mm. Nadále jsem se však snažil geometrii vylepšit tak, abych dosáhl právě maximální přípustné hodnoty zdvihu 120 mm, zachoval progresivní trend a více se přiblížil požadovaným hodnotám zdvihu odpružení při zatížení vahou motocyklu s jezdcem a bez něj.

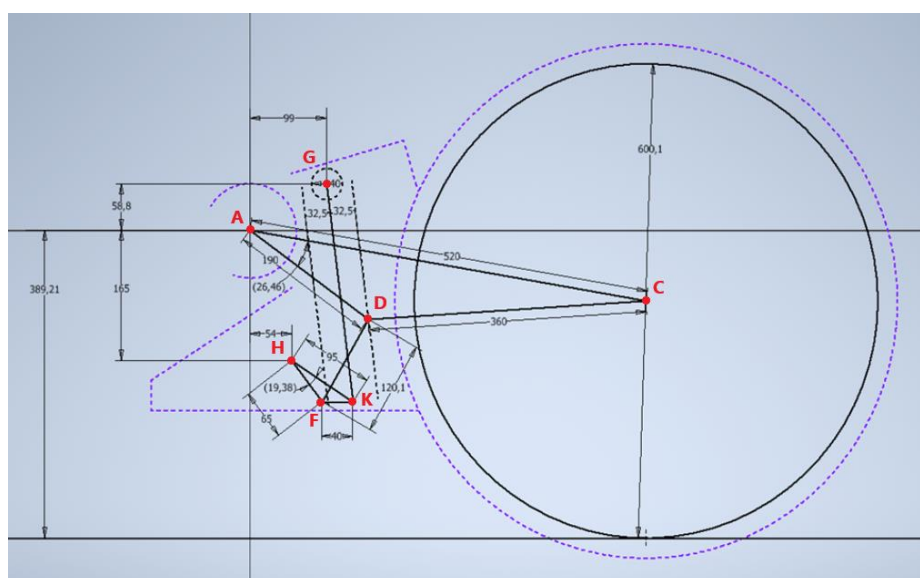
4.3.1 Výchozí varianta odpružení

Dospěl jsem k variaci geometrie se zdvihem kola přesně 120 mm (viz Tabulka č. 1 – Rozměry výchozí varianty odpružení a Obrázek č. 26 – Geometrie výchozí varianty odpružení), progresivním průběhem tuhosti a přijatelnými hodnotami konečného zdvihu při jednotlivých

zatíženích. Toho jsem docílil s druhou pružinou o tuhosti 75 N/mm, a především díky možnosti předeptnutí pružiny, konkrétně o 14 mm. V následující tabulce jsou uvedeny geometrické parametry výchozí varianty.

Tabulka č. 1 – Rozměry výchozí varianty odpružení [autor, 2020]

AC	520 mm	Délka kyvného ramene	
AD	190 mm	Rozměr kyvného ramene	
DAC	26,46°	Vrcholy kyvného ramene - A je uložení kyvného ramene (počátek souřadnic), D je uchycení vahadla k vidlici a C je osa zadního kola	
GK	278 mm	Délka tlumiče	
DF	120,1 mm	Délka kostí	
FH	65 mm	Rozměr vahadla	
HK	95 mm	Rozměr vahadla	
FHK	19,38°	Vrcholy vahadla - K je uchycení tlumiče k vahadlu a F je uchycení kostí k vahadlu	
G	99	58,8	Souřadnice x,y uchycení tlumiče k rámu od bodu A [mm]
H	54	-165	Souřadnice x,y uchycení vahadla k rámu od bodu A [mm]



Obrázek č. 26 – Geometrie výchozí varianty odpružení [autor, 2020]

Červeně vyznačené body v obrázku č. 26 a č. 27 vyjadřují jednotlivé příčné osy uložení čepů. V Inventoru jsem překontroloval, zda nedochází k žádným kolizím mechanismu s dalšími částmi motocyklu či překročení světlné výšky (modré přerušované obrysy). Navržená geometrie byla uznána za vyhovující. Svislá varianta oproti vodorovné lépe pasuje do prostoru za převodovkou, celkově není tak prostorově náročná a umožňuje lepší optimalizaci charakteristiky odpružení.

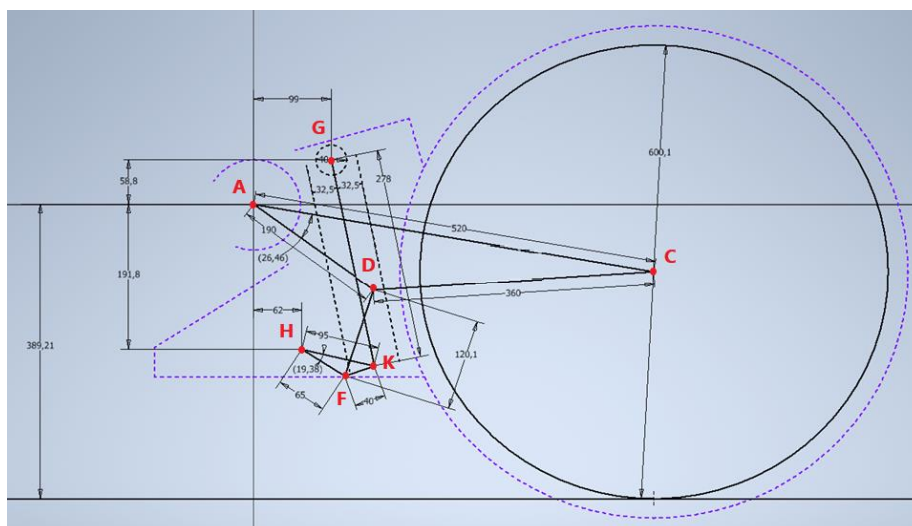
Dále jsem začal řešit možnosti nastavení odpružení za účelem jeho přizpůsobení potřebám jezdce a způsobu jízdy. V našem případě lze charakteristiku navrženého odpružení upravit výměnou pružiny, jejich předepnutím a nastavením odskoku tlumiče. Dalším způsobem je modifikace samotné geometrie mechanismu pomocí různě dlouhých kostí nebo dalších dostupných otvorů pro uložení tlumiče či vahadla.

4.3.2 Druhá alternativa odpružení

Opět jsem tedy upravoval délky kostí a body pro uchycení tlumiče a vahadla. Rozměry kyvné vidlice a vahadla jsem však již zachoval. Jako nejpřínosnější způsob se ukázala pouhá změna místa pro uložení vahadla v rámu. Výrazné zlepšení by přineslo rovněž přiblížit uchycení tlumiče směrem k uložení kyvné vidlice, čímž by došlo ke změně úhlu tlumiče. To bohužel nebylo možné kvůli kolizi s převodovkou motocyklu (viz Obrázek č. 27 – Geometrie druhé alternativy odpružení). V opačném případě, při napřímení tlumiče, docházelo k nežádoucímu poklesu progresivity. Změny délky kostí, a tím i místa pro uchycení vahadla k rámu, neměly nijak zásadní přínosy. Prodloužení délky kostí mělo za následek zvýšení zdvihu kola nad toleranci a tím zmírnění průběhu odpružení a naopak. Pro naše účely nemá příliš měkké odpružení význam. Navíc výchozí varianta umožňuje v případě potřeby snížit tuhost menším předpětím pružiny. Výhradně změnou polohy vahadla vznikla tedy druhá alternativa (viz Tabulka č. 2 – Rozměry druhé alternativy odpružení a Obrázek č. 27 – Geometrie druhé alternativy odpružení), která zachovává progresivní tuhost, avšak charakteristika je strmější. Odpružení je tedy tvrdší a zdvih kola zákonitě klesl, a to na hodnotu 112,2 mm což je ale stále v toleranci. Ostatní rozměry zůstaly zachovány. V následující tabulce jsou uvedeny geometrické parametry druhé alternativy. Poslední řádek (podbarvený světle modrou barvou) se týká právě místa uložení vahadla v rámu (bod H), které je rozdílné od výchozí varianty.

Tabulka č. 2 – Rozměry druhé alternativy odpružení [autor, 2020]

AC	520 mm	Délka kyvného ramene	
AD	190 mm	Rozměr kyvného ramene	
DAC	26,46°	Vrcholy kyvného ramene - A je uložení kyvného ramene (počátek souřadnic), D je uchycení vahadla k vidlici a C je osa zadního kola	
GK	278 mm	Délka tlumiče	
DF	120,1 mm	Délka kosti	
FH	65 mm	Rozměr vahadla	
HK	95 mm	Rozměr vahadla	
FHK	19,38°	Vrcholy vahadla - K je uchycení tlumiče k vahadlu a F je uchycení kostí k vahadlu	
G	99	58,8	Souřadnice x,y uchycení tlumiče k rámu od bodu A [mm]
H	62	-191,8	Souřadnice x,y uchycení vahadla k rámu od bodu A [mm]



Obrázek č. 27 – Geometrie druhé alternativy odpružení [autor, 2020]

4.3.3 Výsledné charakteristiky navržených variant

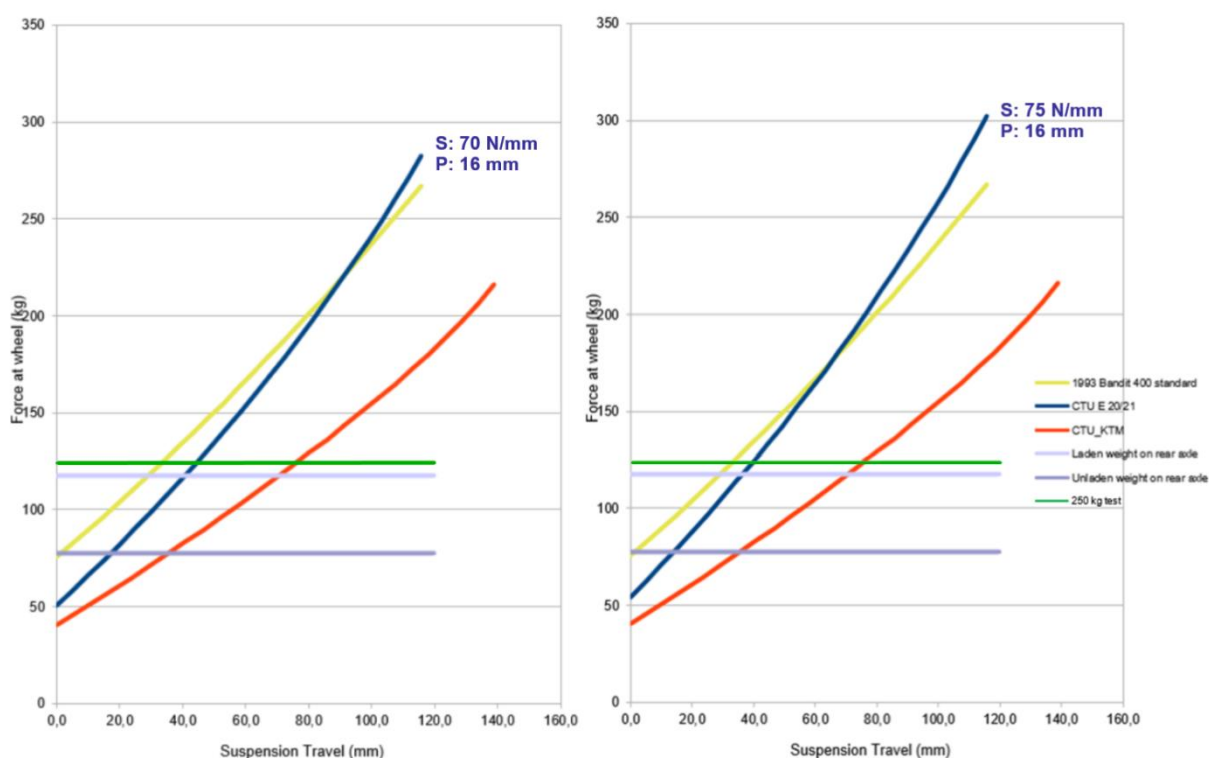
Obě navržené konfigurace byly předány dále týmovým kolegům, kteří tak mohli začít pracovat na tvorbě podrobných modelů kyvné vidlice, vahadla, kostí a implementovat řešení do celkové konstrukce motocyklu. Mezitím však nastala změna v očekávané hmotnosti motocyklu. Předpokládaná hmotnost se navýšila o 25 kg, celkem tedy na 155 kg. Tento přírůstek se samozřejmě projevil na výsledcích a průběhu charakteristiky tuhosti u obou variant. Nárůst se mi ale podařilo vykompenzovat předpětím pružiny o 16 mm (z původních 14 mm). Tudíž nebylo nutné upravovat navržené geometrie či dimenzovat zcela nové uspořádání mechanismu. Stejně tak členové týmu, kteří již pracovali na konkrétních modelech jednotlivých součástí odpružení, nemuseli zahodit svou dosavadní práci. Je evidentní, jak zásadní vliv má předepnutí pružiny na průběh charakteristiky odpružení. V konečném důsledku se osvědčilo i samotné svislé řešení, na které neměl přírůstek hmotnosti takový dopad jako by tomu bylo u vodorovného mechanismu.

Na následujících obrázcích č. 28 a č. 29 jsou výsledné grafy závislosti síly (vyjádřené v kg), působící na zadní kolo vlivem celkového zatížení a hodnotě zdvihu kola při propružení. Výsledná charakteristika navrženého odpružení je zobrazena tmavě modrou křivkou (CTU E 20/21) a pro srovnání je v grafu i charakteristika odpružení již zmíněného motocyklu CTU Lions Petrol EVO 2 (oranžová křivka CTU_KTM) a dalšího stejné komerční značky Suzuki (žlutá křivka 1993 Bandit 400 Standard).

Velikost působícího zatížení je v diagramu vyjádřena trojicí vodorovných čar:

- Unladen weight on rear axle – hmotnost působící na zadní osu kola při zatížení pouze vlastní vahou motocyklu. Při ideálním rozložení hmotnosti motocyklu (155 kg), působí na zadní kolo polovina této váhy, tedy 77,5 kg.
- Laden weight on rear axle – hmotnost působící na zadní osu kola při zatížení vahou motocyklu (155 kg) + hmotností jezdce (80 kg). Při ideálním rozložení celkové hmotnosti 235 kg, působí na zadní kolo polovina této váhy, tedy 117,5 kg.
- 250 kg test – Při technických přejímkách je motocykl podroben statickému testu svislého zatížení vahou 250 kg. Váha působící na zadní osu kola při ideálním rozložení hmotnosti je poloviční, tedy 125 kg.

4.3.3.1 Výchozí varianta odpružení



Obrázek č. 28 – Charakteristiky tuhosti výchozí varianty (modře) [autor, 2020]

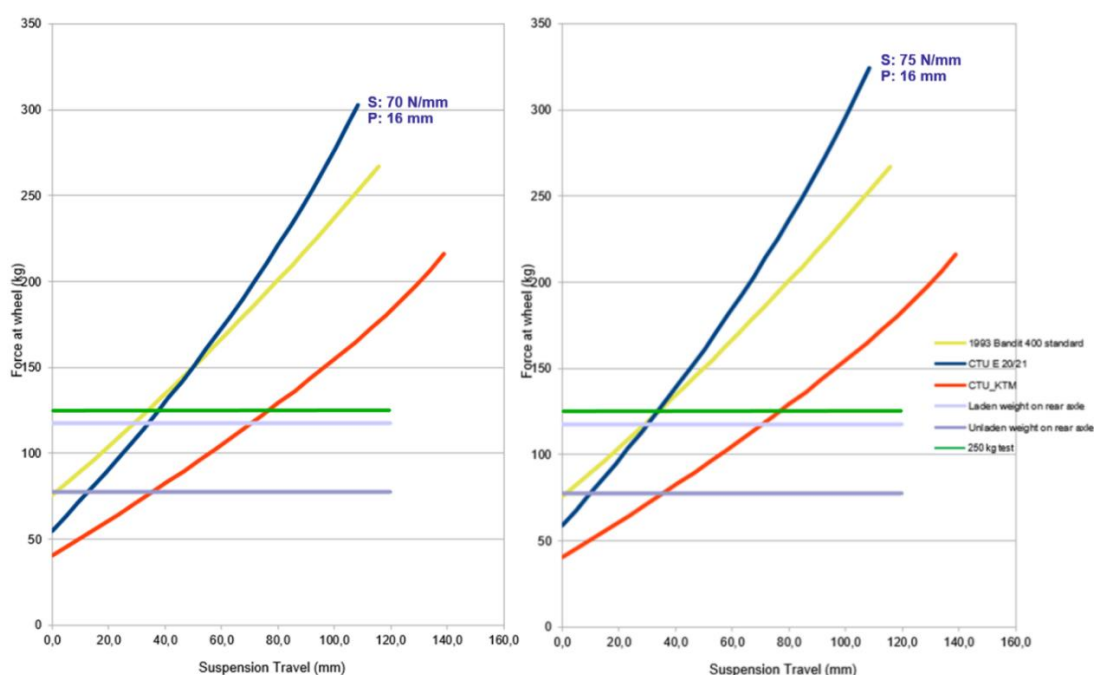
Na obrázku č. 28 jsou výsledné průběhy charakteristik u výchozí varianty odpružení za použití obou pružin předepnutých o 16 mm. Hned na první pohled je vidět strmější průběh charakteristiky při použití pružiny o tuhosti 75 N/mm. Z diagramů je tedy zřejmý fakt, že s rostoucí hodnotou tuhosti pružiny zákonitě roste i její výsledná odporová síla. Strmější křivka charakteristiky totiž znamená tvrdší odpružení podvozku, které je u závodních strojů žádoucí.

Tabulka č. 3 – Hodnoty zdvihu výchozí varianty [autor, 2020]

V: Výchozí_120mm			Předpětí 0 mm		Předpětí 14 mm		Předpětí 16 mm	
	Zatěžovací scénáře		Zdvih [mm]	Zdvih [%]	Zdvih [mm]	Zdvih [%]	Zdvih [mm]	Zdvih [%]
70 N/mm	155 kg	M (5 - 10%)	48	40,7%	21	17,5%	17	14,3%
	155 + 80 kg	M + J (30%)	70	58,5%	44	36,8%	41	34,3%
	250 kg	125 kg na kolo	>120.0	100%	110	98,0%	106	88,7%
75 N/mm	155 kg	M (5 - 10%)	46	38,3%	18	15,2%	15	12,7%
	155 + 80 kg	M + J (30%)	67	55,2%	40	33,5%	36	30,0%
	250 kg	125 kg na kolo	>120.0	100%	56	46,5%	52	43,8%

V tabulce č. 3 je přehled hodnot zdvihu výchozí varianty za různých hodnot předpětí u obou pružin. Uvedené hodnoty hmotnosti (155 kg, 155 + 80 kg, 250 kg) vyjadřují váhu působící při statickém zatížení motocyklu. Hmotnost 155 kg je váha samotného motocyklu, kdy požadavek na zdvih zadního kola je 5 – 10%. Suma 155 + 80 kg je váha působící při zatížení motocyklu i s jezdce, kdy je podmínka 30% zdvihu. Hodnota 250 kg je hmotnost působící v místě sedla při statickém testu na soutěži. Již z obrázku č. 28 bylo patrné, že tužší odpružení výchozí varianty bude s druhou pružinou o tuhosti 75 N/mm předepnutou o 16 mm. Právě tato variace rovněž vyhovuje uvedeným požadavkům zdvihu odpružení při zatížení bez jezdce a s jezdce. Bez jezdce činí hodnota zdvihu 14 mm, což je téměř 12%. Požadavek je sice 5 – 10%, ale výsledek byl i tak uznán za uspokojivý. Při zatížení motocyklu s jezdce je hodnota zdvihu 36 mm, což přesně splňuje podmínku 30% zdvihu. Maximální možný zdvih kola u výchozí varianty je 120 mm. Na těchto hodnotách zdvihů se ukazuje vliv předepnutí pružiny na výsledný průběh odpružení.

4.3.3.2 Druhá alternativa odpružení



Obrázek č. 29 – Charakteristiky tuhosti druhé alternativy [autor, 2020]

Na předchozím obrázku č. 29 jsou výsledné průběhy charakteristik u druhé alternativy odpružení za použití obou pružin předepnutých o 16 mm. Opět je zřejmé tužší odpružení podvozku u variace s pružinou o tuhosti 75 N/mm, což potvrzují i konkrétní hodnoty zdvihu uvedené v následující tabulce č. 4 s přehledem hodnot zdvihu pro druhou alternativu. Uvedené hodnoty hmotnosti (155 kg, 155 + 80 kg, 250 kg) opět vyjadřují váhu působící při statickém zatížení motocyklu. Maximální možný zdvih zadního kola je u druhé alternativy 112,2 mm. Druhá alternativa má celkově oproti výchozí variantě strmější charakteristiku což znamená i celkově tužší odpružení.

Tabulka č. 4 – Hodnoty zdvihu druhé alternativy [autor, 2020]

V: Alternativa_112,2mm			Předpětí 0 mm		Předpětí 14 mm		Předpětí 16 mm	
	Zatěžovací scénáře		Zdvih [mm]	Zdvih [%]	Zdvih [mm]	Zdvih [%]	Zdvih [mm]	Zdvih [%]
70 N/mm	155 kg	M (5 - 10%)	43	38,3%	17	14,9%	13	11,3%
	155 + 80 kg	M + J (30%)	62	55,5%	38	33,7%	34	30,2%
	250 kg	125 kg na kolo	>112.2	100%	99	88,2%	94	83,9%
75 N/mm	155 kg	M (5 - 10%)	40	36,0%	14	12,3%	10	9,4%
	155 + 80 kg	M + J (30%)	59	52,3%	34	30,2%	30	27,5%
	250 kg	125 kg na kolo	109	97,5%	48	42,6%	44	39,4%

V příloze jsou ukázky průběhů charakteristik bez předpětí pružin. Obě navržené varianty odpružení byly implementovány do konstrukce motocyklu. Kombinovaně lze zadní odpružení nového motocyklu ladit dvěma možnými konfiguracemi geometrie, výměnou samotné pružiny, pomocí předpětí pružin a případně i seřízením odskoku tlumiče. Konečné nastavení předpětí a tlumení bude záležet ještě i na pocitech a potřebách jezdce. Přínosy a využití těchto možností variability jsou zhodnoceny v 6. kapitole a potažmo i závěru práce.

5 Analýza zadního odpružení

Dnes se obecně ve strojírenství často při vývoji a prověření prototypu využívá nejrůznějších výpočetních a simulačních softwarů. Pomocí počítačových simulací je možné modelovat navrhovaný systém a hypotetické situace a následně vypočítat potřebné parametry či posoudit například fungování a vlastnosti systému bez nutnosti častého prototypování. Ovšem stále nejvhodnějším způsobem, jak prototyp celkově posoudit jsou nepochybně reálné zkušební testy. Skutečné jízdní zkoušky k prověření navrženého řešení odpružení již však nebylo možné v rámci diplomové práce uskutečnit, jelikož motocykl nebyl ještě v době odevzdání práce zkonstruován. Z tohoto důvodu byly v rámci práce provedeny alespoň základní dynamické simulace. Nicméně analýzy odpružení, ať už na základě reálně naměřených dat či podrobných simulací, jsou velmi užitečné při studiu skutečných dynamických vlastností stroje a chování podvozku během jízdy. Výsledky těchto analýz pak slouží nejen k ověření, zda vypočtené hodnoty a charakteristiky odpružení splňují určené podmínky ale později také k ladění odpružení za účelem dosažení optimálního nastavení podvozku.

5.1 Příklady reálných zkoušek

U motocyklů je nejdůležitější bezpečnost, stabilita a ovladatelnost. Bezpečný provoz motocyklu z hlediska nastavení podvozku souvisí především se silou, kterou jsou kola přitlačována k vozovce. Ovladatelnost a částečně i stabilita motocyklu jsou ve své podstatě subjektivní záležitosti. Lze říct, že stejně tak i bezpečnost motocyklu je do jisté míry subjektivní. Neexistují tedy jednoznačně definované meze a zkoušky, které by otestovaly tato kritéria. K posouzení odpružení obou náprav motocyklu není v praxi vyloženě potřeba speciálních zkoušek. Účinky odpružení se projevují při jakémkoli pohybu motocyklu, ať už se jedná o akceleraci, deceleraci, průjezd oblouky nebo přejezd přes nerovnosti povrchu. Na celý podvozek působí různé síly a momenty zmíněné v teoretické části, a proto je vhodné posoudit odpružení spíše jako celek. V rámci soutěže MotoStudent musí motocykl před samotným závodem projít sérií připravených dynamických testů, které provádí zkušební jezdec.

5.1.1 Zkouška brzd

Prvním testem je test brzdění motocyklu. Test probíhá tak, že se motocykl nejprve na dráze o délce 200 m rozjede na minimální rychlost 80 km/h a hned potom musí začít brzdit. Měří se konečná brzdná dráha do zastavení motocyklu. [22]

5.1.2 Gymkhana

Druhou zkouškou v pořadí je tzv. gymkhana. Test spočívá v průjezdu vymezenou slalomovou tratí. Jedná se o subjektivní zkoušku ovladatelnosti a chování motocyklu při proměnných rychlostech a v obloucích o různých poloměrech. Kromě toho se otestují schopnosti jezdce. Výsledek testu je ohodnocen na základě nejkratšího času potřebného k projetí celé trati. [22]

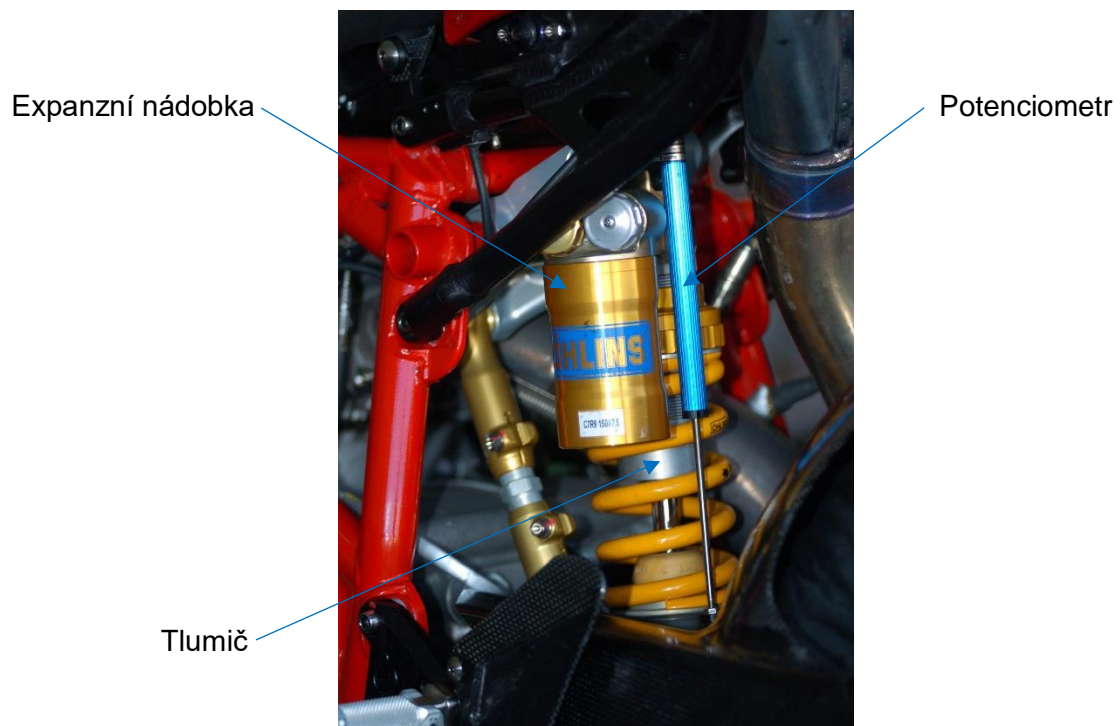
5.1.3 Zkouška akcelerace

Posledním testem je test akcelerace. Na dráze 150 m se zkouší největší možná akcelerace motocyklu. Poté má jezdec dalších 200 m na zpomalení a bezpečné zajetí do depa. Hodnotí se opět výsledný čas, za který motocykl projede 150 m. [22]

Účelem zkoušek je předvést a vyhodnotit chování a výkonnost finálního prototypu. Odpružení motocyklu hraje při těchto testech rovněž významnou roli. První a druhý test byl použit jako inspirace k posouzení navržených konfigurací zadního odpružení pomocí dynamických simulací v softwaru MSC ADAMS (viz kapitola 5.5 Simulace a testy).

5.2 Potenciometry

V praxi se ke sběru potřebných dat k analýze odpružení skutečného motocyklu používají lineární potenciometry. Ty mohou být navíc doplněny ještě o systémy GPS, které se obecně často vyskytují při získávání dat, jelikož poskytnuté údaje umožňují mnohem důkladnější analýzy. Lineární potenciometr je zařízení na snímání poloh a úhlů. Pomocí potenciometrů lze zaznamenat a získat údaje o změnách poloh částí odpružení, zdvihu tlumiče nebo rychlost a frekvenci těchto změn v čase. Pro přesná a použitelná data je ale důležité použít vysoce kvalitní a správně kalibrované potenciometry určené speciálně pro sběr dat. Potenciometry jsou totiž při měření vystaveny extrémně vysokému namáhání, prudkým změnám délky a také vlivům okolního prostředí. Existuje mnoho možností, kde a kam potenciometr uchytit. U zadního zavěšení je obvykle instalován přímo na tlumič, kde tak může měřit jeho zdvih v průběhu času (viz Obrázek č. 30 – Lineární potenciometr přichycený k tlumiči). Jinou možností je uchytit potenciometr ke kyvné vidlici a rámu.



Obrázek č. 30 – Lineární potenciometr přichycený k tlumiči [1]

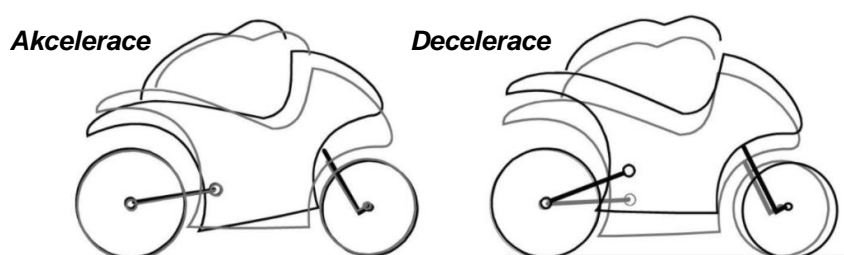
5.3 Kritéria k posouzení odpružení

Díky znalosti průběhů veličin zaznamenaných potenciometrem, základních parametrů tlumiče, geometrie a polohy potenciometru lze pak dopočítat například ještě zdvih zadního kola či sílu působící na kolo a podrobně posoudit účinnost odpružení. Nejčastějšími výstupy analýz těchto dat jsou charakteristiky tuhosti, průběhy hodnot zdvihu částí odpružení, výpočet tzv. squatu a anti-squatu či specifické histogramy. Takové výstupy jsou velice přínosné. Používají se totiž k optimalizaci odpružení, což může v našem případě vést i ke zlepšení výsledného času zajetího okruhu. [1]

5.3.1 Průběh zdvihu odpružení a squat

Pomocí údajů o poloze tlumičů a vidlic v čase je jednoduše možné přesně sledovat, jak odpružení motocyklu reaguje v jednotlivých situacích. Navíc se záznamem o rychlosti svislého pohybu těchto komponent dají získat charakteristiky odpružení a s tím i vodítka k provedení úprav nastavení. Jedním z důležitých hledisek nastavení odpružení motocyklu, obzvláště když jsou motocykly stále výkonnější, je odezva na zrychlení a zpomalení motocyklu. Typicky během brzdění bude přední odpružení stlačováno dosahovat maximálního zdvihu, zatímco zadní odpružení dosáhne maximálních hodnot zdvihu při zrychlování. Tento přenos zatížení se označuje jako tzv. squat (dřep). Squat je definován jako rozdíl ve svislém posunu zadního kola a posunu předního kola a vyjadřuje právě dřepnutí zadní části motocyklu vůči přední. Squat je významným aspektem pro nastavení odpružení podvozku motocyklu. Při hlubokém

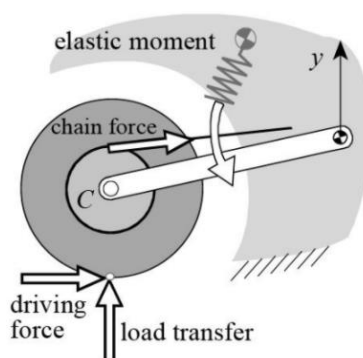
dřepnutí se podstatně mění i geometrie, sklon a závlek (viz Obrázek č. 31 – Schematicky naznačená distribuce hmotnosti). Squat je ovlivněn samotnou geometrií motocyklu, rozložením hmotnosti, tlumením, tuhostmi a předpětím pružin, rychlostí pohybu pružiny a celou řadou dalších parametrů a proměnných. Při použití měkké zadní pružiny bude dřep mnohem výraznější než s tužší pružinou. Změna nastavení tlumení ovlivní, jak rychle se daná část motocyklu nakloní. Typicky při silné akceleraci je žádoucí, aby nebyl dřep zadní části motocyklu až příliš hluboký, v opačném případě totiž hrozí odlehčení předku a ztráta kontaktu mezi předním kolem a vozovkou. Obdobně během prudkého brzdění je naopak nežádoucí příliš hluboký pokles přední části a tím zákonitě odlehčení zadního kola a možná ztráta styku s vozovkou. Optimální nastavení však nelze přesně definovat. [1]



Obrázek č. 31 – Schematicky naznačená distribuce hmotnosti [3]

5.3.2 Anti-Squat

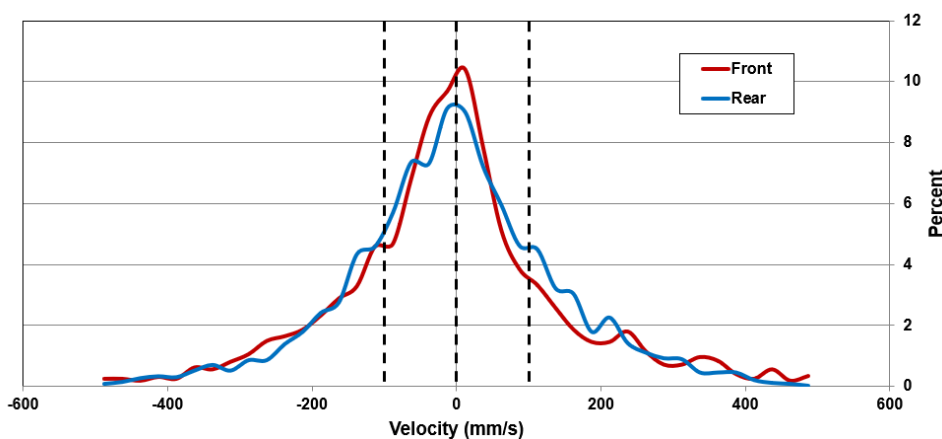
Jak bylo zmíněno na předchozí stránce, při akceleraci se váha motocyklu přenáší na zadní část a zvyšuje se tak i zatížení na zadní odpružení a dochází ke squatu. Zvláště u silnějších motocyklů se projevuje tzv. anti-squat. Anti-squat je tendence ke vzpružení, respektive omezení hloubky dřepu, v důsledku dvou sil (viz Obrázek č. 32 – Síly působící při jízdě vpřed). Jednou je tažná síla řetězu, která táhne nápravu směrem vpřed a zároveň tlačí kolo proti podložce. Druhou silou je hnací síla přenášená pneumatikou, která taktéž tlačí nápravu v přímém směru. Kompenzuje se tedy stlačení od přenosu zatížení a v konečném důsledku se zlepšuje i jízdní projev při průjezdu zatáčkou a akceleraci motocyklu. Anti-squat je tedy při akceleraci pozitivní efekt, díky kterému nedojde k tak hlubokému poklesu zádě motocyklu. [1]



Obrázek č. 32 – Síly působící při jízdě vpřed [3]

5.3.3 Histogramy

Velice užitečným způsobem, jak zobrazit data vyjadřující aspekty odpružení, je pomocí histogramu. Histogram je graf, který rozděluje data do segmentů či přírůstků a zobrazuje například jaké procento daných hodnot do vymezeného intervalu spadá (viz Obrázek č. 33 – Histogram vertikální rychlosti obou kol motocyklu). Jakýkoli datový kanál lze zobrazit ve formě histogramu. V souvislosti s odpružením uvádějí, kolik času je tlumič aktivní v určitém rozsahu odpružení nebo jak jsou rozložena data o vertikální rychlosti kola. Chod systému odpružení lze dle vertikální rychlosti pohybu kola teoreticky rozdělit do čtyř základních fází, a to na vysokorychlostní stlačení, stlačení při nízké rychlosti, odskok při nízké rychlosti a vysokorychlostní odskok. Nejdůležitější informací je pak celkové procento času v každé zóně. V teoreticky ideálním nastavení odpružení je histogram symetrický, to znamená stejné hodnoty pro vysokorychlostní stlačení a odskok a stejně tak u stlačení a odskoku při nízké rychlosti. Ideální distribuce dat ovšem nemusí v praxi nutně znamenat dokonalé nastavení. Stále však histogramy poskytují velice užitečné informace pro nastavení odpružení náprav, zejména v kombinaci se zpětnou vazbou jezdce. Kupříkladu tvrdší pružina zkrátí čas ve vysokorychlostních zónách a prodlouží čas v zónách nízké rychlosti. Obecně platí, že když jezdec jede rychleji, čas ve vysokorychlostních zónách se zvyšuje a čas v zónách s nízkou rychlostí se naopak snižuje. To naznačuje, že při vyšších rychlostech motocyklu je vhodnější tužší pružina. [1]



Obrázek č. 33 – Histogram vertikální rychlosti obou kol motocyklu [1]

5.4 Příprava modelu motocyklu a prostředí

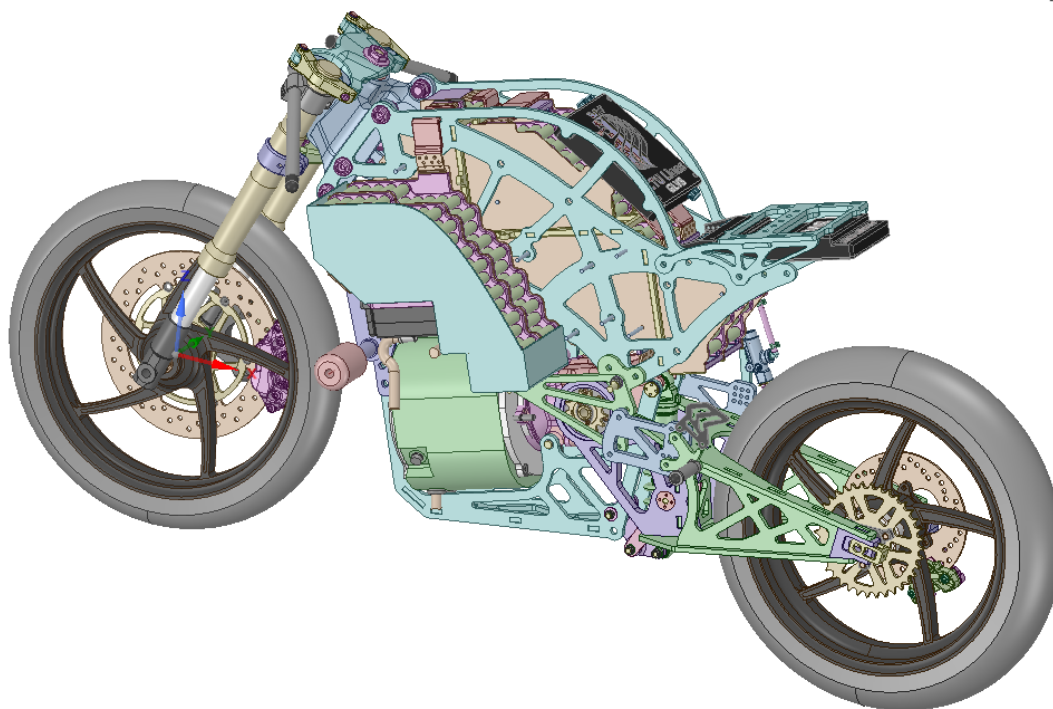
Na následujících stránkách jsou popsány postupné kroky k prověření navržených variant odpružení pomocí aplikací MSC Apex a MSC ADAMS. Účelem je ověřit vhodnost navržených variant zadního odpružení a porovnat je na základě některých z popsaných kritérií. Výstupní data budou použita pro další analýzu a pomohou nám s budoucím laděním celého systému

odpružení motocyklu. K přípravě modelu nového prototypu na simulace jsem jako návod využil část diplomové práce bývalého týmového kolegy Ing. Ondřeje Paprčky. Aplikoval jsem obdobné kroky a vytvořil vlastní model nového motocyklu k posouzení navrženého zadního odpružení. [2]

5.4.1 Výchozí model a úprava

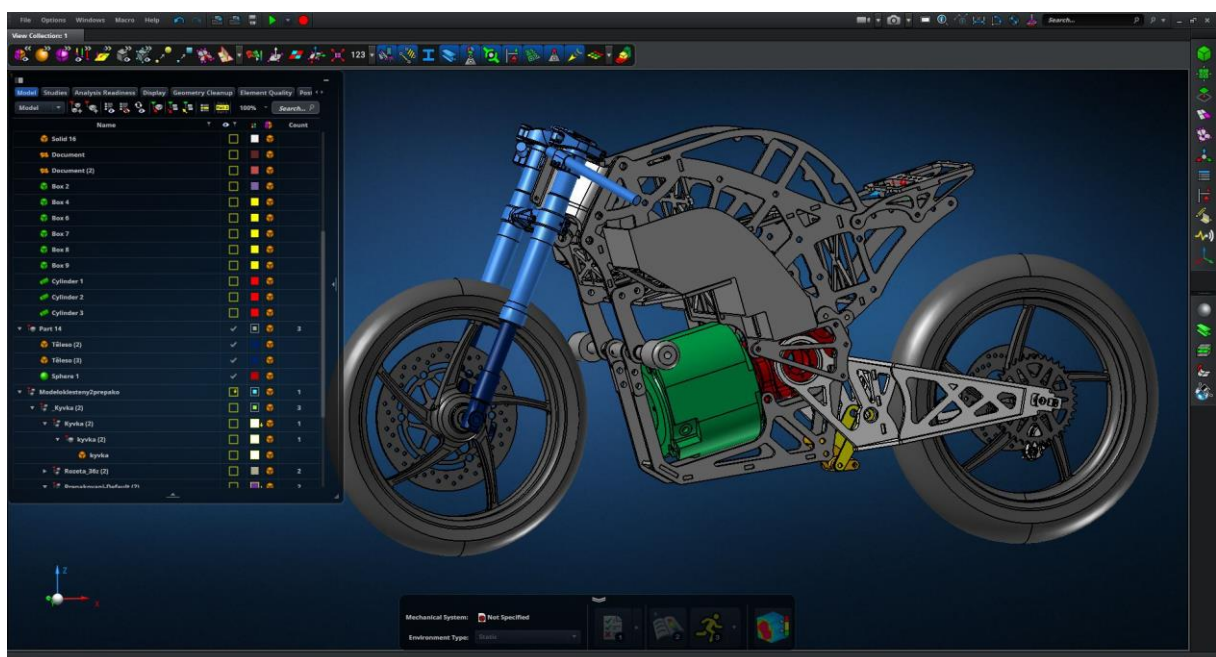
Před prováděním dynamických simulací a testů jsem nejdříve potřeboval vhodný model motocyklu. Nejprve jsem v modelovacím programu ANSYS Spaceclaim sjednocením či odstraněním jednotlivých součástí značně zjednodušil, v tu dobu nejaktuálnější a poměrně detailní, model prototypu motocyklu CTU Lions EVO 2.0 Electric (viz Obrázek č. 34 – Výchozí model prototypu v programu ANSYS Spaceclaim, bez kapotáže). Kompletní model byl poskytnut týmovými kolegy, kteří se na jeho tvorbě podílejí. Přestože byl už model prototypu podrobný, stále se v této fázi uvažovala poloha těžiště na základě vývoje předchozích modelů. Poloha těžiště má značný vliv na dynamiku jízdy a chování podvozku. Z toho důvodu mi k simulacím stačil základní model s prostými reprezentacemi hlavních částí a komponent motocyklu. Poloha těžiště byla později manuálně upravena, více v podkapitole 5.4.2.5 Hmotnost a těžiště. Takový model je také mnohem vhodnější pro úkony pospané v podkapitole 5.4.2.3 Tvorba vazeb, a navíc i méně náročný na výpočetní výkon počítače při simulacích.

ANSYS
2019 R2

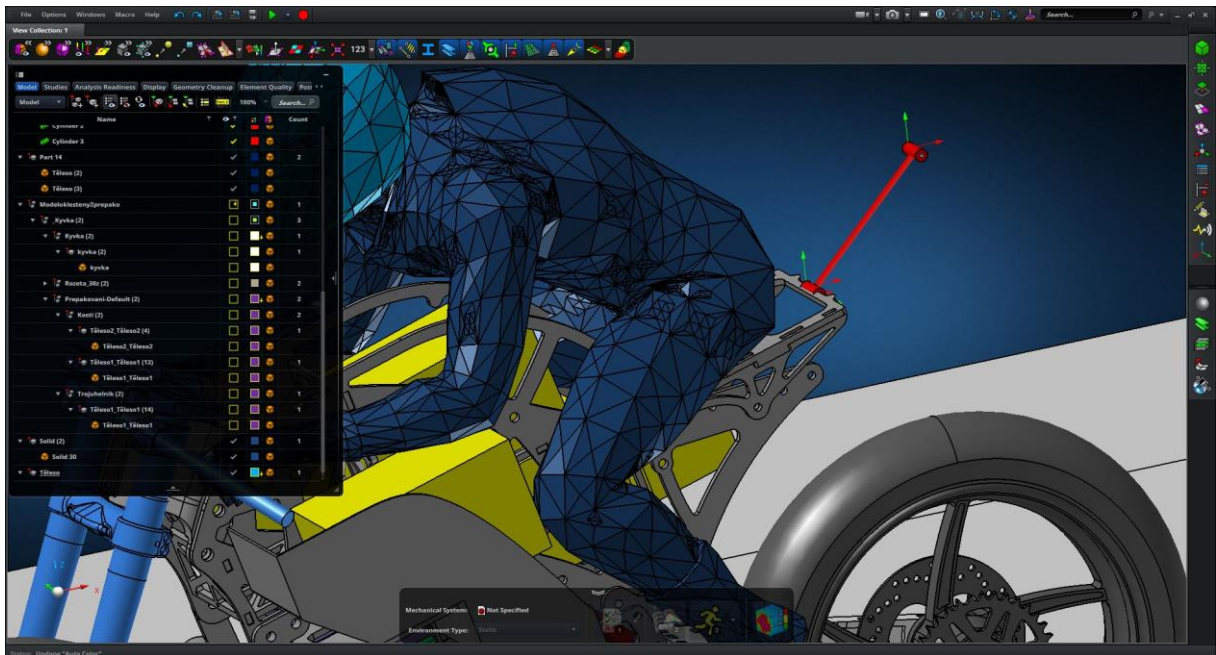


Obrázek č. 34 – Výchozí model prototypu v programu ANSYS Spaceclaim [autor,2021]

Zjednodušený model (viz Obrázek č. 35 – Zjednodušený model prototypu v MSC Apex) tedy sestával z obou kol včetně brzdových kotoučů, předního odpružení (přední vidlice) včetně brýlí i řídítek, rámu, motoru, převodovky, zadního odpružení včetně pákového mechanismu a kyvné vidlice. Tyto hlavní části jsem získal především sjednocením dílčích komponent do jednoho tělesa. Součástky jako různé vložky, ložiska, podložky, šrouby, matice, elektrická spojení a moduly, také hřídele a mnoho dalších nebylo nutné zachovávat, tudíž byly smazány. Při prvním pohledu na předchozí obrázek č. 34 si lze všimnout, že již výchozí model postrádá řetěz k přenosu výkonu na zadní kolo. K provedení dynamických simulací však není řetěz potřeba (více v podkapitole 5.5.2 Dynamické testy). Odstranil jsem rovněž ovládací jednotku a bateriové boxy, jelikož se skládají z velkého množství drobných prvků a dílů. Například dílčí bateriové boxy sestávají ze stovek bateriových článků a několika podkladových vrstev. Později jsem tyto komponenty nahradil prostými tělesy ve tvaru kvádrů, viz podkapitola 5.4.2.1 Náhrada bateriových boxů a ovládací jednotky. Dále jsem smazal i model zadního tlumiče, což je ale pro mé účely analýzy odpružení nezbytná součást. Zadní tlumič byl totiž v pozdějších fázích příprav na simulace nahrazen specifickým prvkem v rámci prostředí MSC ADAMS (viz podkapitola 5.4.2.4 Nastavení pružících a tlumících prvků). Teleskopické části přední vidlice nebylo potřeba mazat, protože jej lze uvažovat pouze jako “kryt” skutečné pružiny a tlumiče, které byly dále také vytvořeny pomocí zmíněného prvku. Celkem jsem měl dva modely. Jeden s výchozím geometrickým uspořádáním přepákování a jeden s alternativní variantou (viz Obrázek č. 42 – Obě konfigurace odpružení v softwaru MSC ADAMS). Modely jsem po zjednodušení importoval do aplikace MSC Apex, kde jsem prováděl další úpravy.



Obrázek č. 35 – Zjednodušený model prototypu v MSC Apex [autor,2021]

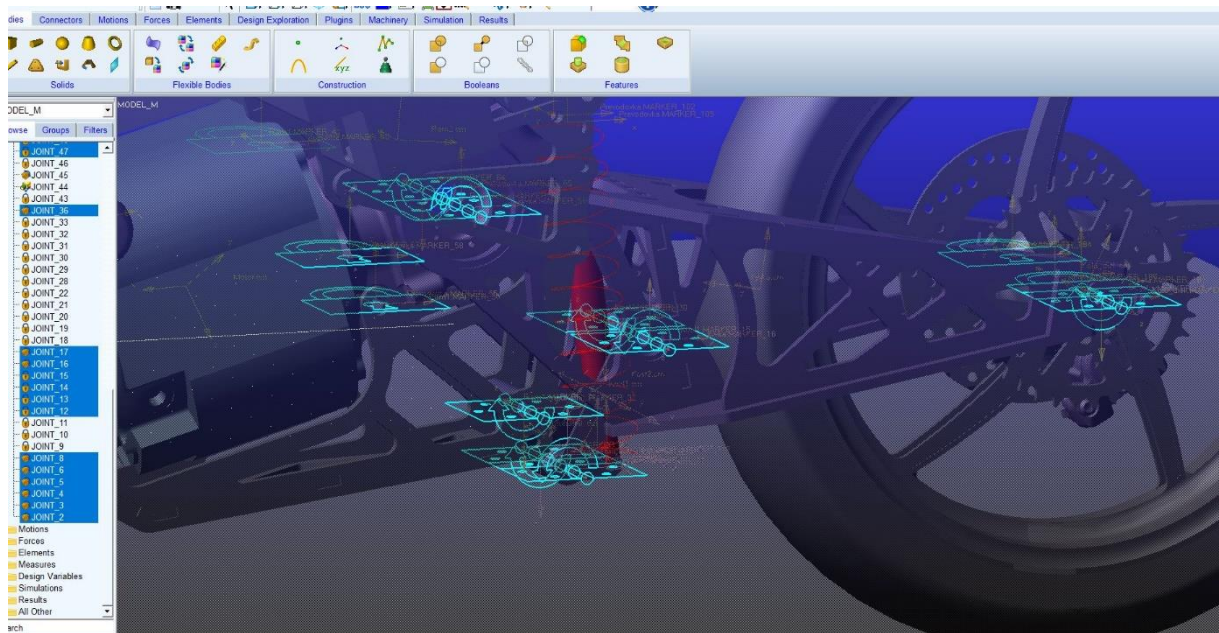


Obrázek č. 37 – Jezdec (modře) a prvek rovnováhy (červeně) [autor,2021]

V neposlední řadě jsem v aplikaci MSC Apex vytvořil přímý úsek vozovky jakožto budoucí pojižděný podklad. Světle šedé vozovky si lze všimnout na některých uvedených snímcích obrazovky. Z hlediska potřebných součástí pro simulace byl takto model kompletní. Následně jsem z modelovacího prostředí MSC Apex postupně všechny objekty přenesl do aplikace MSC ADAMS, ve kterém bylo dále potřeba definovat a nastavit nezbytné vazby a parametry k realizaci finálních dynamických simulací.

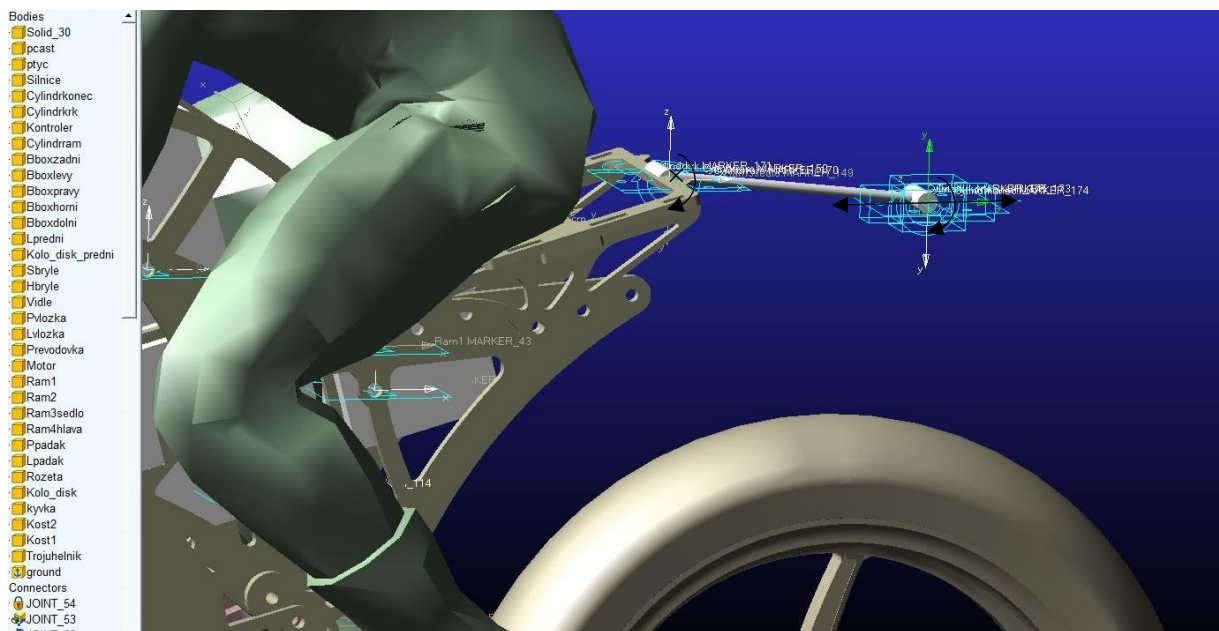
5.4.2.3 Tvorba vazeb

Po importu jsem jednotlivé objekty jeden po druhém spojoval adekvátními vazbami. Vazby slouží k nadefinování možných vzájemných pohybů částí motocyklu. Pro správné fungování modelu je nezbytné propojit všechny komponenty. Ve výsledku tak vznikl propojený celek odpovídající skutečným závislostem pohybu jako u reálného motocyklu. Pro mé účely postačily pevné, translační a rotační vazby. Pevné vazby fixují k sobě dvě části ve stanoveném bodě. Tyto vazby zamezují jakémukoli pohybu daných objektů. Příkladem jsou vazby bateriových boxů s rámem. Translační vazby umožňují posun dvou částí vůči sobě, ale pouze v rámci jedné určené osy. Posunům ve všech ostatních směrech je tak zabráněno. Těchto vazeb je v modelu pouze pár. Jsou například v přední vidlici, aby bylo umožněno odpružení teleskopických částí vidlice, které se do sebe zasouvají. Rotační vazby umožňují vzájemné otáčení obou spojovaných částí kolem určené osy. Typickým příkladem rotačních vazeb je uchycení kol ve vidlích či uložení všech přidružených částí zadního odpružení. Tyto vazby jsou zobrazeny na obrázku č. 38 na další straně.



Obrázek č. 38 – Ukázka rotačních vazeb zadního odpružení v MSC ADAMS [autor,2021]

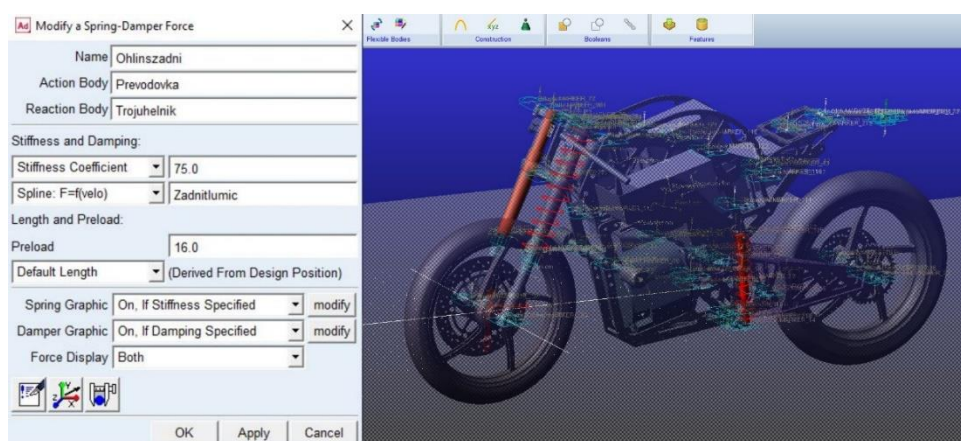
V předchozí podkapitole byl zmíněn stabilizující prvek udržující přímý směr jízdy motocyklu. Prvek je tvořen třemi válci. První je uchycen rotační vazbou k rámu v místě sedla. Druhý pomocí pevné a rotační vazby de facto spojuje první s třetím válcem. Třetí válec je s rovinou země spojen posuvnou vazbou v přímém směru. Popsané vazby jsou zachyceny na obrázku č. 39 níže. Prvek nemá žádnou hmotnost a nemá tak žádný vliv na výsledky. Slouží pouze k udržení rovnováhy motocyklu.



Obrázek č. 39 – Vazby prvku k zajištění rovnováhy [autor,2021]

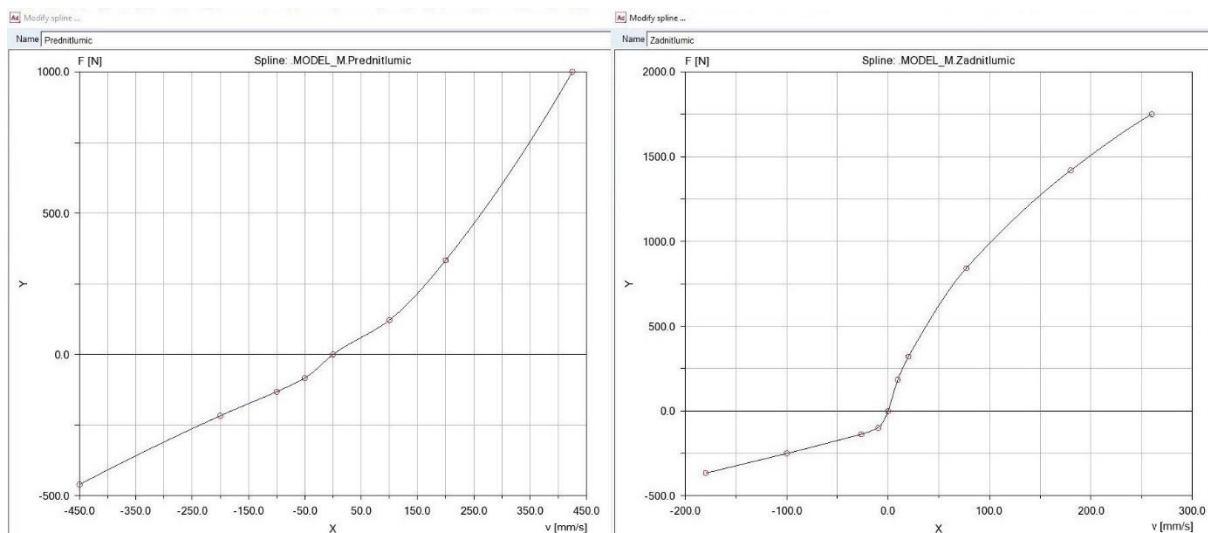
5.4.2.4 Nastavení pružících a tlumících prvků

Dále bylo potřeba vytvořit ještě samotný systém odpružení motocyklu. Zrovna pro takové účely je v softwaru MSC ADAMS funkce, pomocí které lze mezi dvěma body vytvořit v podstatě translační vazbu. Vznikne prvek, kterému lze navolit charakteristiky tlumení, pružení či další proměnné jako třeba předpětí. Volba těchto parametrů jak u předního, tak i zadního odpružení závisí na mnoha aspektech. Geometrie motocyklu, výkon, brzdná síla, hmotnost jezdce a motocyklu, vlastnosti pneumatik, rozložení váhy mezi kola a poloha těžiště, trať či technika jízdy, to vše jsou specifika mající vliv na výsledné chování podvozku. Já jsem však odpružení nastavil dle možných kombinací parametrů a hodnot (viz kapitola 5.5 Simulace a testy). Zjistit změny v průběhu a vliv různých konfigurací navrženého mechanismu na celkové odpružení podvozku nového prototypu je záměrem analýzy a jeden z cílů diplomové práce. Funkce odpružení a tlumení je u přední vidlice rozdělena. Pravá teleskopická část funguje pouze jako tlumič a levá pouze jako pružina. Zadní tlumič disponuje oběma funkcemi. Na obrázku č. 40 lze vidět červeně zvýrazněné jednotky odpružení motocyklu a možnosti nastavení konkrétně zadního tlumiče.

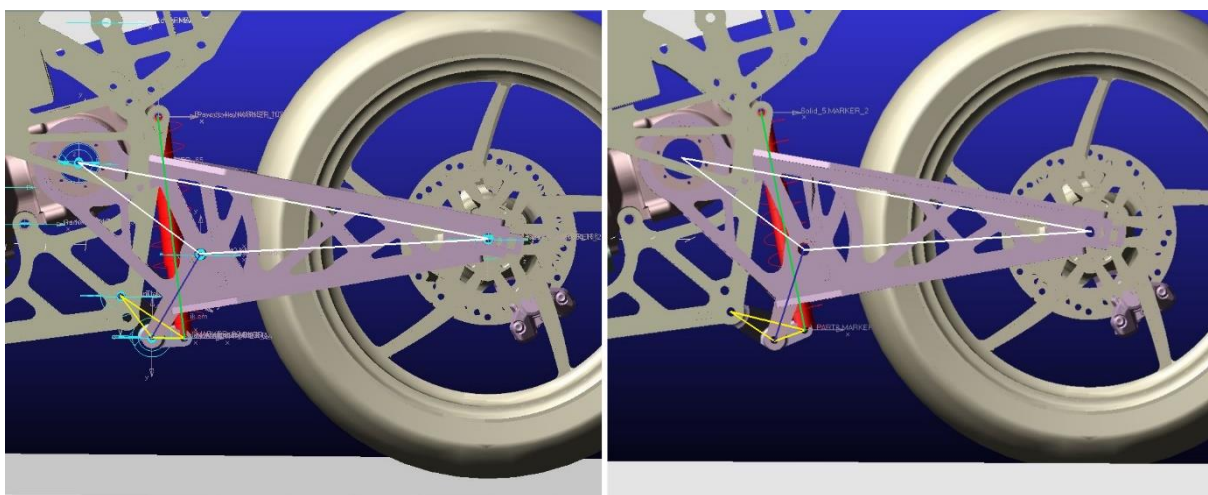


Obrázek č. 40 – Odpružení podvozku motocyklu [autor,2021]

Hodnoty tuhosti pružin a grafy tlumení tlumičů jsem měl k dispozici z katalogu od výrobce daných dílů a od organizátora soutěže, dostupného z archivu týmu [21]. Pro přední pružinu je možnost tuhostí 35/40/45/50/55/60/65 N/mm. Jak již bylo zmíněno, zadní pružiny jsou dvě, a to s tuhostí 70 a 75 N/mm. Jako výchozí tuhost přední pružiny jsem uvažoval hodnotu 60 N/mm a pro zadní pružinu hodnotu 75 N/mm s tím, že je navíc předepnutá o 16 mm. Co se týče nastavení průběhu tlumení, tak v dostupných grafech v katalogu jsou závislosti tlumící síly na rychlosti stlačení. V jednom grafu je několik křivek, jelikož je i více úrovní nastavení. Do MSC ADAMS byly zadány nejstrmější křivky pro nejsilnější tlumící účinky. Na následující straně jsou na obrázku č. 41 vidět zadané průběhy tlumící síly obou tlumičů. Protože jsem navrhl dvě konfigurace zadního odpružení, musel jsem popsaná nastavení provést zvlášť pro obě varianty (viz Obrázek č. 42 – Obě konfigurace odpružení v softwaru MSC ADAMS).



Obrázek č. 41 – Průběhy tlumení předního (vlevo) a zadního tlumiče (vpravo) [autor,2021]

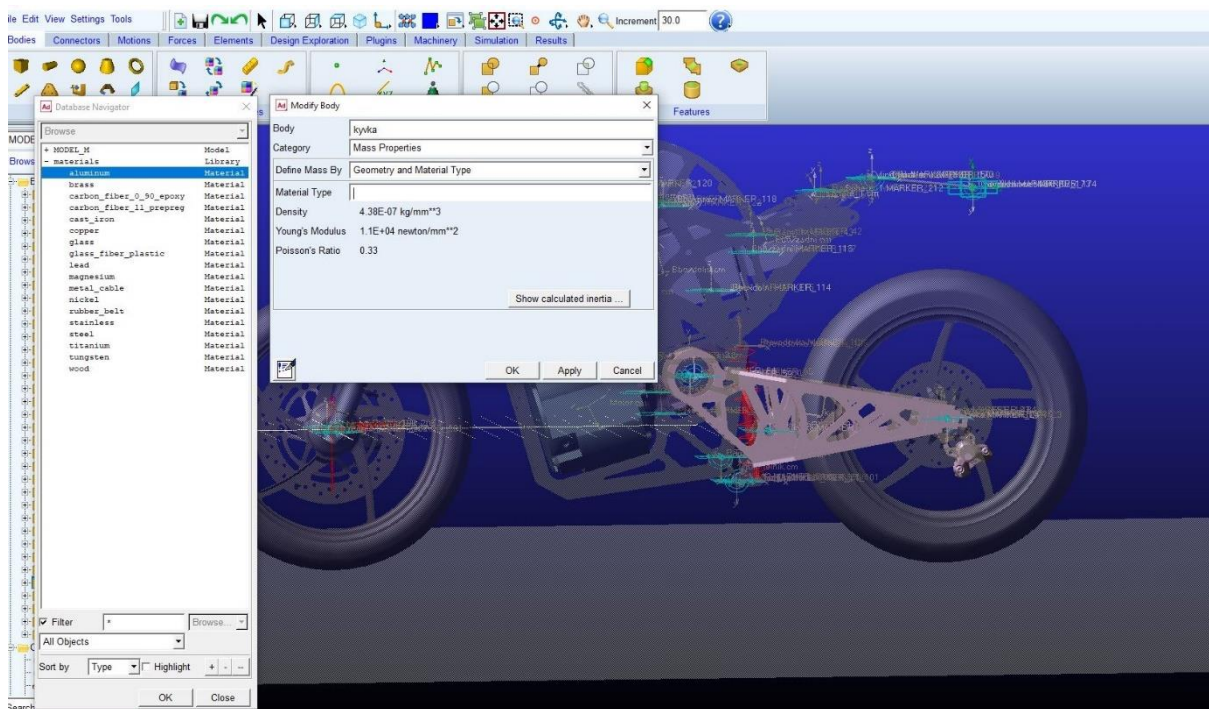


Obrázek č. 42 – Obě konfigurace odpružení v softwaru MSC ADAMS [autor,2021]

5.4.2.5 Hmotnost a těžiště

Nikoli posledním, nicméně velmi zásadním krokem bylo jednotlivým součástem nastavit hmotnost za účelem definování polohy těžiště. Nedříve však bylo zapotřebí těmto částem motocyklu přidělit odpovídající materiál (viz Obrázek č. 43 – Definování materiálu a hmotnosti kyvné vidlice). V rámci MSC ADAMS je knihovna základních materiálů. Převážně je konstrukce našeho prototypu z hliníku a nerezové oceli. Po zadání informace o materiálu byla programem na základě tvaru daného tělesa automaticky dopočítána jeho hmotnost a momenty setrvačnosti. Program uvažuje objekty s homogenním rozložením hmoty v celém svém objemu. Dopočtené proměnné je možné ovšem upravit. Jelikož jsem od kolegů znal předpokládané hmotnosti hlavních částí motocyklu, mohl jsem tak hmotnost těchto objektů modelu více přiblížit reálným hodnotám. U zbylých dílů jsem ponechal hodnoty vypočtené programem. Již jsem uvedl, že jsem drobné součástky motocyklu pro nadbytečnost z modelu

odstranil. Jejich hmotnost jsem však kompenzoval ve hmotnosti rámu. Návrhová hmotnost motocyklu je 155 kg a hmotnost jezdce i s vybavením činí 80 kg.



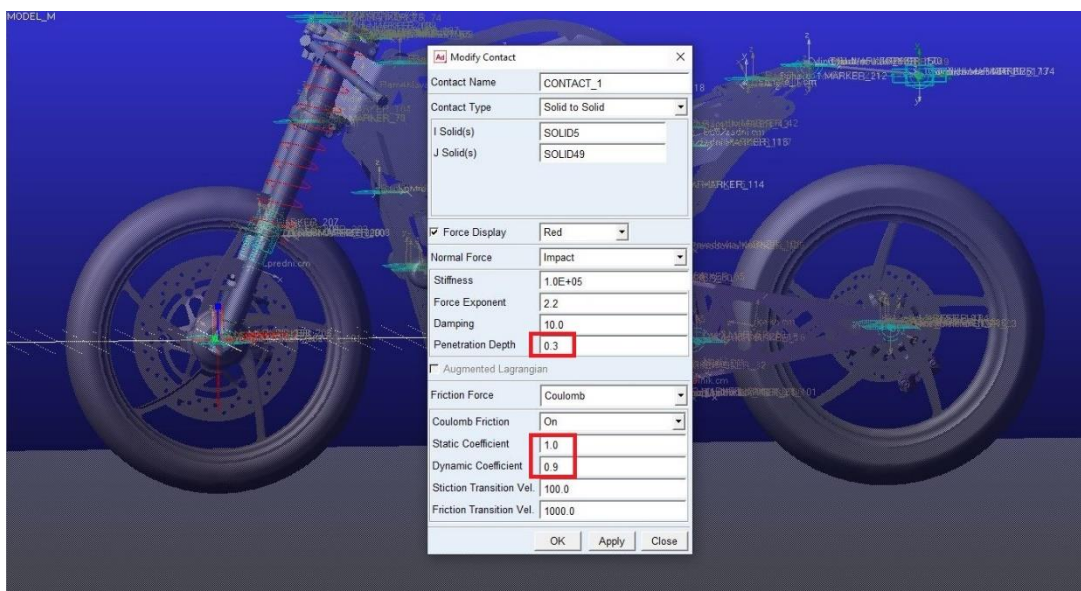
Obrázek č. 43 – Definování materiálu a hmotnosti kyvné vidlice [autor,2021]

Po nastavení materiálů a hmotností zbývalo upřesnit výslednou polohu těžiště. Nepřesnosti v poloze jsem manuálně přizpůsobil tak, aby umístění těžiště modelu korespondovalo s uvažovanou polohou vycházející z dat z vývoje přechozích modelů. Těžiště je tedy předpokládáno přesně uprostřed rozvoru ve výšce 442 mm od země pro motocykl bez jezdce. Pro motocykl s jezdce je výsledné těžiště umístěno ve vodorovné vzdálenosti 677 mm od osy předního kola a 447 mm kolmo od země.

5.4.3 Síly a odpory působící na motocykl

V neposlední řadě bylo pro zpřesnění simulací nutné definovat podmínky některých silových účinků. Základní silou působící na motocykl je síla zemské přitažlivosti. Gravitace je v prostředí MSC ADAMS automaticky generována. Model motocyklu je zpočátku v nezátíženém stavu a podložky se dotýká pouze ve dvou bodech (na každé pneumatice jeden). Po spuštění simulace začne již "hmotný" model vlivem gravitace padat. Aby ale podložkou pouze nepropadl a došlo skutečně k odpružení odpružené hmoty motocyklu, bylo nutné kontakt kola s vytvořenou vozovkou definovat. Mimo jiné na motocykl působí různé síly jízdních odporů (valivý, zrychlení, vzduchu, tření mechanismů, stoupání), které působí vždy proti směru jízdy vozidla. K tomu, aby vytvořený úsek fungoval jako skutečný podklad, lze v softwaru MSC ADAMS nastavit vznik normálových reakčních sil při styku kol se svrchní plochou objektu

vozovky. Tyto síly jsou pak programem automaticky počítány v reakci na působící zatížení. Reálně však styk pneumatiky s vozovkou není pouze v bodě, ale v rámci plochy. Stlačení, respektive deformaci pneumatik by bylo možné, na základě radiální tuhosti pneumatiky, počítat například metodou konečných prvků, takovou funkcí ale prostředí MSC ADAMS nedisponuje. Modely kol motocyklu jsou navíc pouze geometrická tělesa. Skutečný odpor valení tak nemohl být uvažován. Lze ovšem stanovit průnik kol do podložky, aby byl alespoň styk určen plochou, nikoli bodem. Aby se ve skutečnosti jakékoli vozidlo mohlo rozjet a zastavit je zapotřebí přenosu tečných sil tření mezi koly a podložkou. Schopnost přenášet tyto síly se nazývá adheze a v softwaru byla definována pomocí statického a dynamického koeficientu tření, které udávají závislost třecí a normálové síly působící na podložku. Situace, kdy nedochází ke smyku kola se označuje jako statické tření a v případě, kdy ke smyku dojde se označuje jako dynamické tření. Na obrázku č. 44 jsou vyznačeny zmíněné parametry v nastavení funkce umožňující kontakt kol s pojižděnou plochou. [2]



Obrázek č. 44 – Definování styku kol s vozovkou [autor,2021]

Odpor zrychlení nebo také odpor setrvačnosti je programem automaticky počítán. Tento odpor vzniká vlivem setrvačnosti tělesa (vozidla) při jeho zrychlení i zpomalení. Jelikož se v mých simulacích odpor stoupání nemá jak projevit a odpor tření mechanismů se zanedbává, zbývá už jen odpor vzduchu, který je v rámci prostředí MSC ADAMS třeba určit. Graf závislosti síly odporu vzduchu na rychlosti motocyklu jsem převzal z výsledků simulací aerodynamiky motocyklu, dostupných z archivu týmu CTU Lions. Výsledná síla odporu působí na model v daném bodě na hlavě řízení. Síla odporu vzduchu stoupá s rostoucí rychlostí motocyklu.

5.5 Simulace a testy

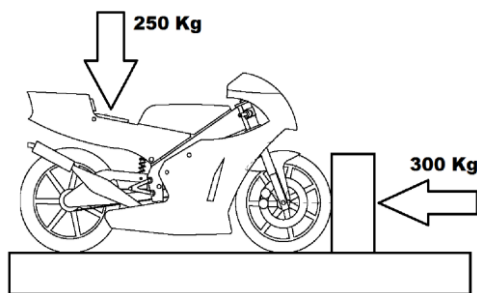
V rámci simulací byly prověřeny obě varianty navrženého odpružení v kombinaci s oběma pružinami (70 N/mm a 75 N/mm) a jejich předpětím o hodnotách 8 mm a 16 mm. Již z předchozích výpočtů bylo zřejmé, že pružina musí být určitě předepnutá. Z tohoto důvodu jsem ani neprováděl simulace, u kterých není nastaveno předpětí pružiny zadního tlumiče. Předpětí o 16 mm se z vektorových výpočtů u výchozí varianty odpružení projevilo jako účinné. Pro pozorování vlivu předpětí byly simulacím podrobeny i konfigurace s polovičním předpětím pružiny, tedy o hodnotu 8 mm. Veškeré simulované kombinace jsou tedy následující (c – tuhost pružiny, Δy – předpětí pružiny):

- Výchozí – Δy : 16 mm – c: 75 N/mm
- Výchozí – Δy : 8 mm – c: 75 N/mm
- Výchozí – Δy : 16 mm – c: 70 N/mm
- Výchozí – Δy : 8 mm – c: 70 N/mm
- Alternativa – Δy : 16 mm – c: 75 N/mm
- Alternativa – Δy : 8 mm – c: 75 N/mm
- Alternativa – Δy : 16 mm – c: 70 N/mm
- Alternativa – Δy : 8 mm – c: 70 N/mm

Výchozí pozicí před spuštěním simulace je model v nezátíženém stavu, který se povrchu vozovky těsně dotýká pouze ve dvou bodech. Po spuštění simulace je model zatížen působící vahou, motocykl dosedne a dojde k odpružení hmoty do ustálené pozice. Tento děj v případě odpružení motocyklu i s jezdcem netrvá déle než necelou 1 vteřinu.

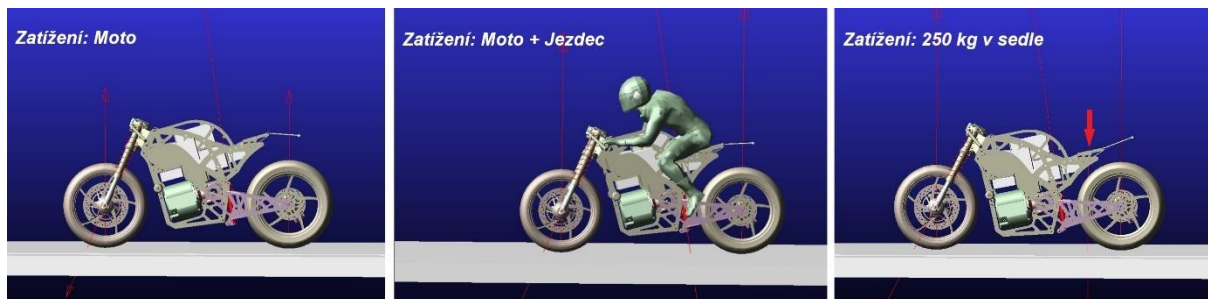
5.5.1 Statické prověření

Odpružení bylo nejprve posouzeno z hlediska zatížení vlastní vahou motocyklu, vahou motocyklu spolu s jezdcem a zatížení vahou 250 kg v místě sedla. Statickému testu zatížení 250 kg bude motocykl dle pravidel soutěže MotoStudent podroben při technické kontrole před závodem (viz Obrázek č. 45 – Schéma statického testu při technické kontrole). Pro simulace byla uvažována síla o velikosti 2500 N. Při tomto zatížení by nemělo dojít k plnému vyčerpání zdvihu tlumiče, tzn. stlačení o 59 mm, kdy se jednotlivé závity pružiny navzájem dotýkají. Záměrem těchto simulací je ověřit výsledky vektorové analýzy, případně výsledky upřesnit a prověřit zda navržené odpružení skutečně splňuje technická kritéria popsána v předchozím textu, například v kapitole 4.1 Požadavky, podmínky a pravidla soutěže.



Obrázek č. 45 – Schéma statického testu při technické kontrole [22]

Na obrázku č. 46 jsou zobrazeny ustálené polohy motocyklu při dílčích zatíženích. Největší a rovněž nejvíce patrný pokles zádě modelu je na třetím snímku zleva, kdy je po ustálení samotného motocyklu aplikována svisle působící síla o velikosti 2500 N, čili obdobně jako tomu bude při technických přejímkách.



Obrázek č. 46 – Ukázky ze simulací statickým zatížením [autor,2021]

5.5.2 Dynamické testy

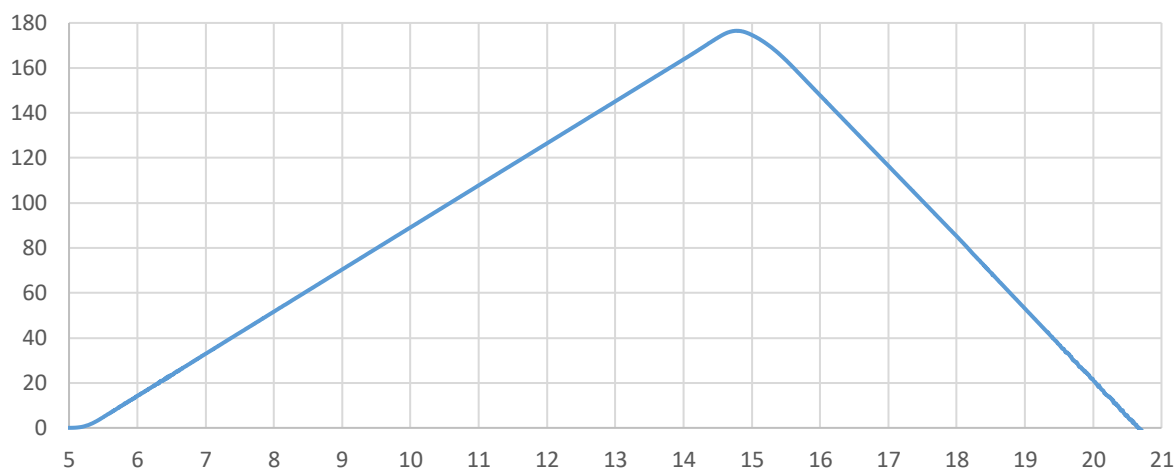
Pro podrobnější analýzu chování odpružení jsem provedl dynamické simulace přímé jízdy motocyklu. K tomu aby mohl motocykl zrychlit a následně zpomalit bylo potřeba znát hnací moment motoru přenesený na zadní kolo a brzdové momenty. K tomu jsem využil výsledky simulací pohonu elektrického motoru nového motocyklu od týmové kolegyně Jolany Heřmanové. Výhoda, která zjednodušila nastavení momentů pro můj model v prostředí MSC ADAMS je konstantní převod hnacího momentu z elektromotoru jehož maximální krouticí moment je 95 N*m. Na zadním kole pak hodnota momentu činí 412 N*m. Motocykl zrychluje na základě udávání hodnoty momentu motoru pomocí “plynové” rukojeti na pravém říditku. Pomocí převodovky je moment přenášen na zadní kolo. Výsledné průběhy hnacího a brzdových momentů na kolech jsou v rámci simulací aplikovány přímo v příčných osách kol. Tímto způsobem je u modelu nahrazen řetěz a brzdové třmeny. Skutečná reprezentace těchto komponent a jejich funkce by byla totiž pro simulace příliš složitá. Záměrem dynamických testů je zkoumat vliv a reakce vybraných konfigurací zadního odpružení na akceleraci a deceleraci, respektive analyzovat chování podvozku motocyklu z hlediska průběhů hodnot zdvihu a působících sil.

Na základě výsledků simulací pohonu motoru byl tedy pro vybrané konfigurace zadního odpružení proveden dynamický test akcelerace a následného brzdění motocyklu. Při testu motocykl zrychluje na rychlost 176 km/h. Této rychlosti dosáhne za 9,5 s a následně začne brzdit do zastavení. Test lze připodobnit ke zkoušce akcelerace později na soutěži (viz podkapitola 5.1.3 Zkouška akcelerace). Jak již bylo zmíněno, při rozjezdu motocyklu dochází k přenosu váhy na zadní kolo. Při použití různých konfigurací zadního odpružení by se tedy

kromě změn zdvihu měly projevit i rozdíly v působící síle tlumiče. Dále je nutno podotknout, že motocykl nebrzdí plnou silou. V rámci simulací musel být brzdný moment na předním kole omezen téměř na třetinovou hodnotu 330 N*m, jinak totiž docházelo k nekontrolovatelným prokluzům kol. Brzdý moment na zadním kole bývá oproti přednímu ještě menší, v mém případě 260 N*m. Brzdící moment je zadán jako konstantní hodnota, avšak jeho náběh je pomocí funkce lineární extrapolace v MSC ADAMS lineární. Náběh hnacího momentu musel být také lehce zmírněn tak, aby při akceleraci nedocházelo k prokluzu. Vzhledem k těmto omezením nelze test brát jako zkoušku maximální akcelerace a maximálního brzdění. Zda při zrychlení nedochází k prokluzu kol lze kromě pozorování simulace také ověřit výpočtem dle následujícího vztahu:

$$\kappa = -\frac{V - \omega R}{V} \quad [3]$$

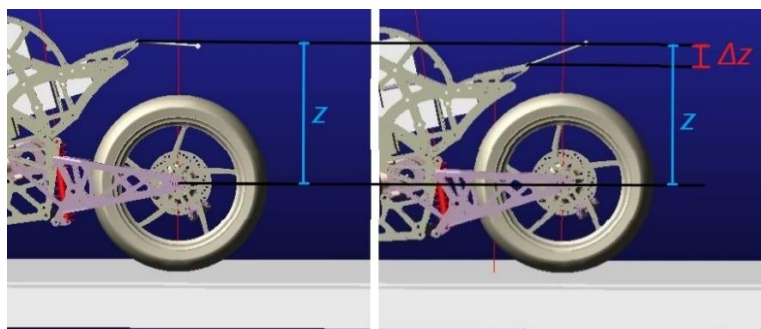
Uvedený vzorec vyjadřuje podélný skluz. "V" značí dopřednou rychlost vozidla, "ω" úhlovou frekvenci kola a "R" značí poloměr daného kola. Součinem úhlové rychlosti a poloměru kola dostaneme obvodovou rychlost kola. Poměr těchto veličin vyjadřuje hodnotu skluzu. Kladná hodnota vyjadřuje trakci a záporná hodnota je v případě brzdění. Na obrázku č. 47 je vidět průběh rychlosti motocyklu při dynamickém testu. Prvních 5 vteřin po spuštění simulace je doba určená k ustálení odpružení motocyklu s jezdcem do výchozího stavu.



Obrázek č. 47 – Průběh rychlosti motocyklu při dynamickém testu [autor,2021]

6 Vyhodnocení simulací

V této kapitole jsou představeny výsledné průběhy hodnot zdvihu a sil všech posuzovaných kombinací zadního odpružení, včetně závěrečné diskuse nad výsledky. V předešlé kapitole 5.5 Simulace a testy jsou tyto kombinace uvedeny. Před samotným představením výsledků je třeba vysvětlit jak je uvažován zdvih zadního kola. Vzhledem například k rámu se kola při pružení pohybují. Zdvihem zadního kola (Δz) se rozumí relativní posun kola ve svislé ose vůči tělu motocyklu. Tento relativní pohyb schematicky znázorňuje obrázek č. 48.



Obrázek č. 48 – Zdvih zadního kola [autor,2021]

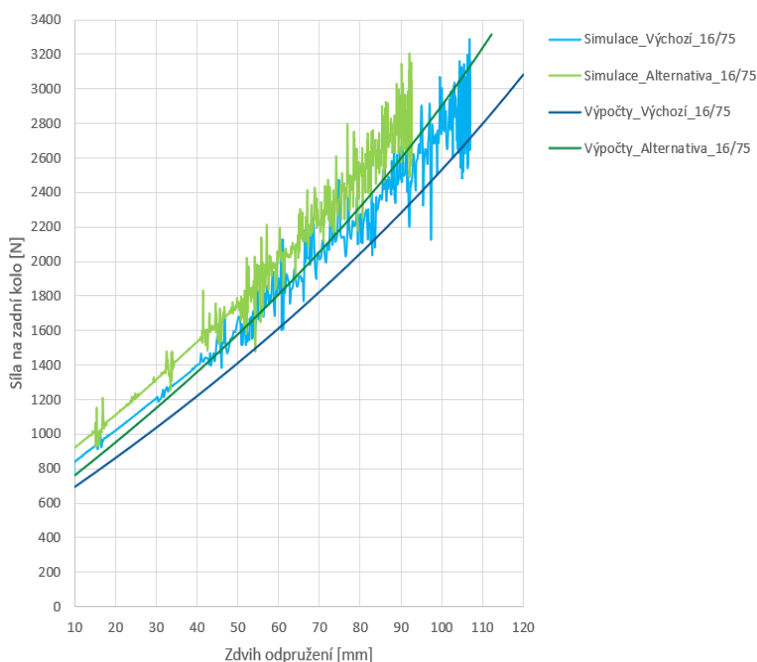
6.1 Výsledky statických testů

V následující tabulce č. 5 jsou uvedeny výsledné hodnoty zdvihu zadního kola při simulacích statickým zatížením, respektive při zatížení vahou motocyklu s nebo bez jezdce a zatížení silou o velikosti 2500 N v místě sedla (viz podkapitola 5.5.1 Statické prověření). Kvůli požadavku rovnoměrného odpružení přední a zadní části motocyklu bylo na základě prvotních simulací statického zatížení nakonec použito nejslabší nastavení předního pružení, konkrétně tedy 35 N/mm tuhost přední vidlice.

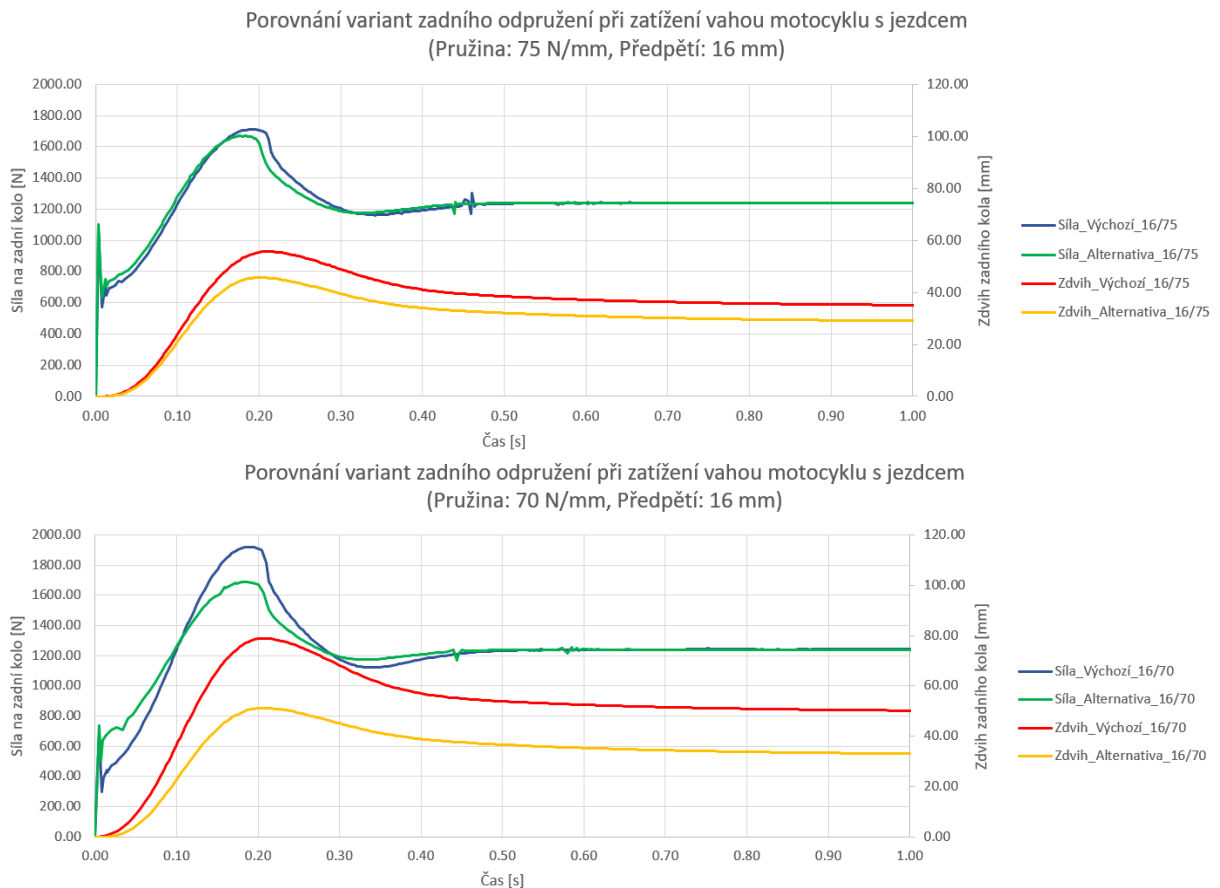
Tabulka č. 5 – Souhrn hodnot zdvihu odpružení při statickém zatěžování [autor, 2021]

V: Výchozí_Simulace_120.0			Předpětí 0 mm		Předpětí 8 mm		Předpětí 16 mm	
			Zdvih [mm]	Zdvih [%]	Zdvih [mm]	Zdvih [%]	Zdvih [mm]	Zdvih [%]
70 N/mm	155 kg	Moto (5 - 10%)	42.2	35.1%	26.4	22.0%	10.0	8.4%
	155 + 80 kg	Moto + Jezdec (30%)	68.5	57.1%	54.1	45.1%	39.2	32.7%
	250 kg	2500 N na sedlovku	>120.0	100.0%	>120.0	100.0%	112.0	93.3%
75 N/mm	155 kg	Moto (5 - 10%)	39.6	33.0%	23.7	19.7%	14.9	12.4%
	155 + 80 kg	Moto + Jezdec (30%)	64.6	53.8%	50.1	41.7%	35.0	29.2%
	250 kg	2500 N na sedlovku	>120.0	100.0%	116.2	96.8%	104.9	87.4%
V: Alternativa_Simulace_112.2			Předpětí 0 mm		Předpětí 8 mm		Předpětí 16 mm	
			Zdvih [mm]	Zdvih [%]	Zdvih [mm]	Zdvih [%]	Zdvih [mm]	Zdvih [%]
70 N/mm	155 kg	Moto (5 - 10%)	37.0	33.0%	21.8	19.4%	6.2	5.5%
	155 + 80 kg	Moto + Jezdec (30%)	61.3	54.7%	47.3	42.2%	32.9	29.3%
	250 kg	2500 N na sedlovku	>112.2	100.0%	108.8	97.0%	97.7	87.1%
75 N/mm	155 kg	Moto (5 - 10%)	34.8	31.0%	19.4	17.3%	7.5	6.7%
	155 + 80 kg	Moto + Jezdec (30%)	57.8	51.5%	43.6	38.9%	28.9	25.8%
	250 kg	2500 N na sedlovku	>112.2	100.0%	102.8	91.6%	92.0	82.0%

Z výsledků simulací plyne, že podmínky 5 – 10% zdvihu samotného motocyklu a 30 % zdvihu motocykl i s jezdce na první pohled nejlépe splňuje druhá alternativa odpružení s pružinou o tuhosti 70 N/mm a jejím předepnutím o 16 mm. Hodnoty zdvihu uvedené konfigurace jsou v tabulce podbarveny zelenou barvou. Je však důležité uvést, že maximální zdvih kola druhé alternativy odpružení dosahuje 112,2 mm, což je ale stále v toleranci požadavku na maximální zdvih 110 – 120 mm. Oproti tomu výchozí varianta s pružinou o tuhosti 75 N/mm předepnutou o délku 16 mm umožňuje požadavek maximálního zdvihu kola 120 mm, splňuje rovněž kritérium 30% zdvihu s jezdce a 12% zdvih při zatížení vlastní vahou motocyklu je také akceptovatelný výsledek. Tyto hodnoty jsou podbarveny oranžovou barvou. V šedě zabarvených buňkách jsou pro popisované konfigurace hodnoty zdvihu zadního kola při zatížení zmíněnou silou 2500 N v místě sedla. Při tomto zatížení má výchozí varianta v daném nastavení odpružení rezervu ještě 15,1 mm do úplného zdvihu kola a druhá alternativa má rezervu 14,5 mm. Z uvedených hodnot v tabulce můžeme pozorovat významný vliv předpětí pružin na zdvih zadního kola. Čistě na základě těchto výsledků lze konstatovat, že vzhledem k požadavkům není menší předpětí pružiny vhodné. Pro požadovaný průběh zadního odpružení je předpětí zcela zásadní a nutné. Předpětí pružiny o délku 16 mm se z hlediska statického zatížení prokázalo jako účinné a vyhovující požadavkům. Jedním z požadavků na zadní odpružení byla i pokud možno progresivní charakteristika tuhosti. Na obrázku č. 49 jsou pro porovnání výsledných charakteristik znázorněny charakteristiky pro obě varianty. V grafu jsou vidět i tmavší barvou zvýrazněné křivky vyjadřující původní charakteristiky získané pomocí výpočetního excelu. Progresivní tendence charakteristik je patrná i z dat naměřených při simulacích. Potvrdila se i strmější charakteristika druhé alternativy. Tužší odpružení druhé alternativy je dáno především celkově menší hodnotou maximálního zdvihu kola, tj. 112,2 mm.

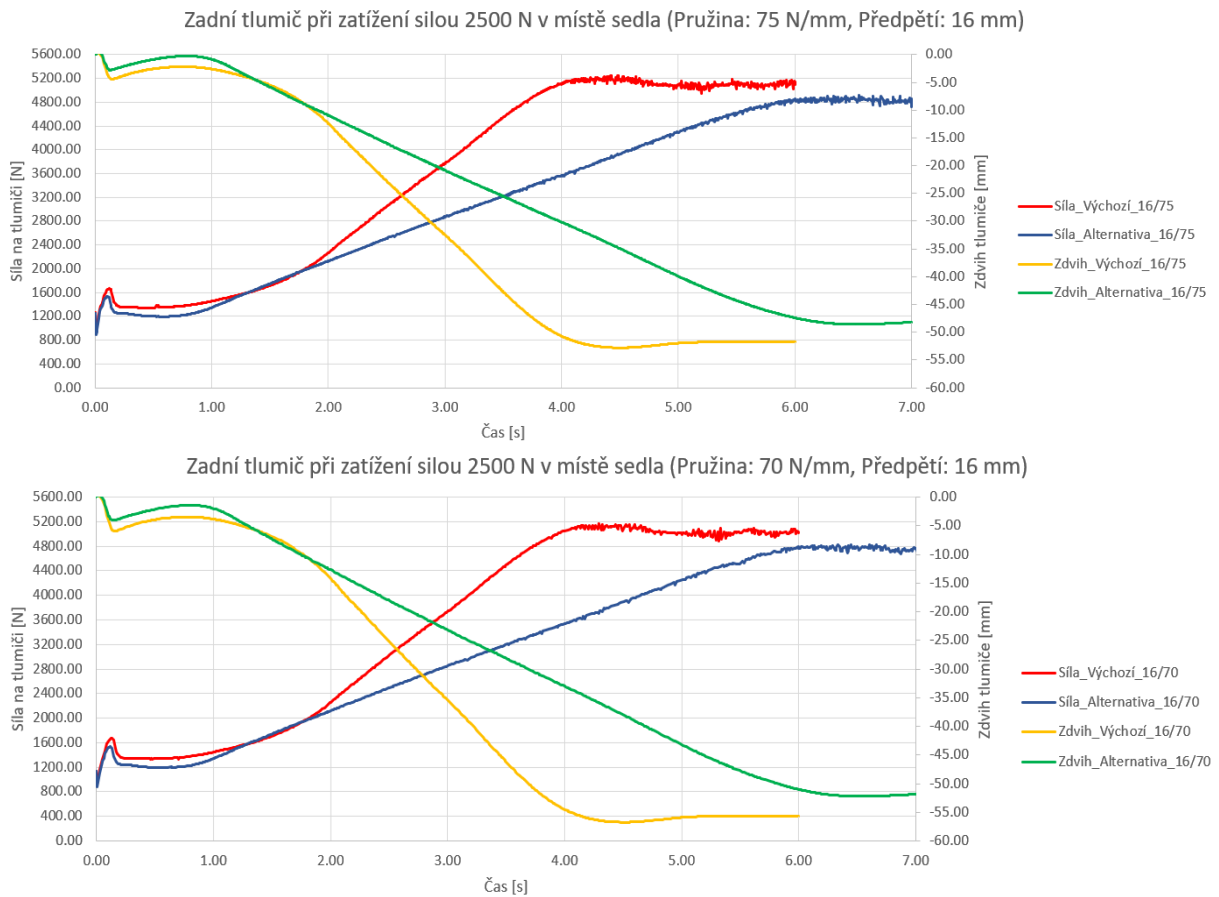


Obrázek č. 49 – Srovnání charakteristik tuhosti při zatížení silou 2500 N [autor,2021]



Obrázek č. 50 – Průběhy zdvihu a reakčních sil zadního kola – moto + jezdec [autor,2021]

Na obrázku č. 50 je dvojice diagramů znázorňující jednotlivé časové průběhy sil působících na zadní kolo vlivem zatížení vahou motocyklu spolu s jezdcem a zároveň průběhy svislého zdvihu kol vůči tělu motocyklu. Diagramy v obrázku zvláště pro obě navržené varianty reprezentují jednu ze dvou dostupných pružin předepnutou o 16 mm. Před spuštěním simulace je motocykl ve výchozím nezatíženém stavu, kdy jsou tlumiče nestlačené. Okolo 0,2 s od spuštění simulace je vidět nárůst hodnot do maxima. V tomto momentě motocykl pod vlastní a jezdcovou vahou dosedl, v dané situaci dojde k maximálnímu zdvihu kola, respektive k maximálnímu stlačení zadního tlumiče, tudíž je i v tento okamžik kolo přitlačováno do podložky největší silou. Poté je vidět pokles a následné ustálení. V předchozí tabulce č. 5 jsou uvedeny právě hodnoty zdvihu po ustálení motocyklu. Z diagramů na obrázku č. 50 je možné pozorovat, že na zadní kolo působí větší síla při použití méně tuhé pružiny (70 N/mm). Vlivem slabší pružiny totiž dojde k většímu stlačení tlumiče, což se projeví právě větší reakční silou jak na tlumiči, tak i na zadním kole. U výchozí varianty, v momentě maximálního dosednutí, je při použití slabší pružiny síla na zadním kole o 10,99% větší a zdvih o 29,39% větší, nežli je tomu v případě použití pružiny s tuhostí 75 N/mm. U druhé alternativy je rozdíl v silách působících na zadní kolo o necelou třetinu procenta a zdvih kola je se slabší pružinou větší o 10,7%.



Obrázek č. 51 – Průběhy reakčních sil a stlačení tlumiče – 250 kg test [autor,2021]

Obrázek č. 51 je rovněž rozdělen do dvou diagramů reprezentující dané konfigurace stejným způsobem jako předchozí obrázek č. 50. Na tomto obrázku jsou však znázorněny časové průběhy zdvihu a odporové síly zadního tlumiče při působení síly o velikosti 2500 N, svisle v místě sedla. Záporné hodnoty zdvihu tlumiče značí stlačení pružiny o danou délku. Při tomto testu je po spuštění simulace odpružení motocyklu zatíženou pouze vlastní odpruženou hmotou a až poté je aplikována svislá síla 2500 N v místě sedla. Po první vteřině kdy už postupně začíná působit dané zatížení je zvětšující se reakční síla tlumiče již zřejmá. Z průběhů lze mimo jiné pozorovat, že druhá alternativa při tomto testu vzdoruje působícímu zatížení o zhruba necelé 2 s déle než výchozí varianta. Vlivem menší tuhosti 70 N/mm je opět u slabší pružiny zřejmé větší stlačení tlumiče. Na základě výsledků však můžeme konstatovat, že při statických testech na soutěži nedojde za daných konfigurací k maximálnímu stlačení tlumiče o 59 mm. V tabulce č. 5 na začátku 6. kapitoly jsou uvedeny konečné hodnoty zdvihu zadního kola po ustálení motocyklu, při statickém zatěžování.

6.1.1 Validace výpočtů

V tabulce č. 6, jsou uvedeny rozdíly výsledků simulací statickým zatížením od původních výpočtů zdvihu kola (označených jako „VV“). Tyto kalkulace však neuvažují například odpruženou a neodpruženou hmotu (brzdové kotouče, pneumatiky, ráfky, apod) motocyklu. Právě odpružená a neodpružená hmota a rozložení váhy jsou faktory, které mají v tomto směru velký vliv na konečné výsledky a průběhy zdvihu odpružení. Odchyšky jsou tedy přisuzovány faktu, že pro předchozí výpočty byla uvažována celková předpokládaná hmotnost motocyklu 155 kg. Do této hmotnosti je avšak zahrnuta mimo jiné i hmotnost kol včetně brzdových kotoučů, což celkem činí téměř 14 kg. V případě dalšího budoucího použití výpočetního excelu je možné brát v potaz i tento fakt a zpřesnit tak úvodní výpočty.

Tabulka č. 6 – Rozdíly výpočtů od simulací při statickém zatížení [autor, 2021]

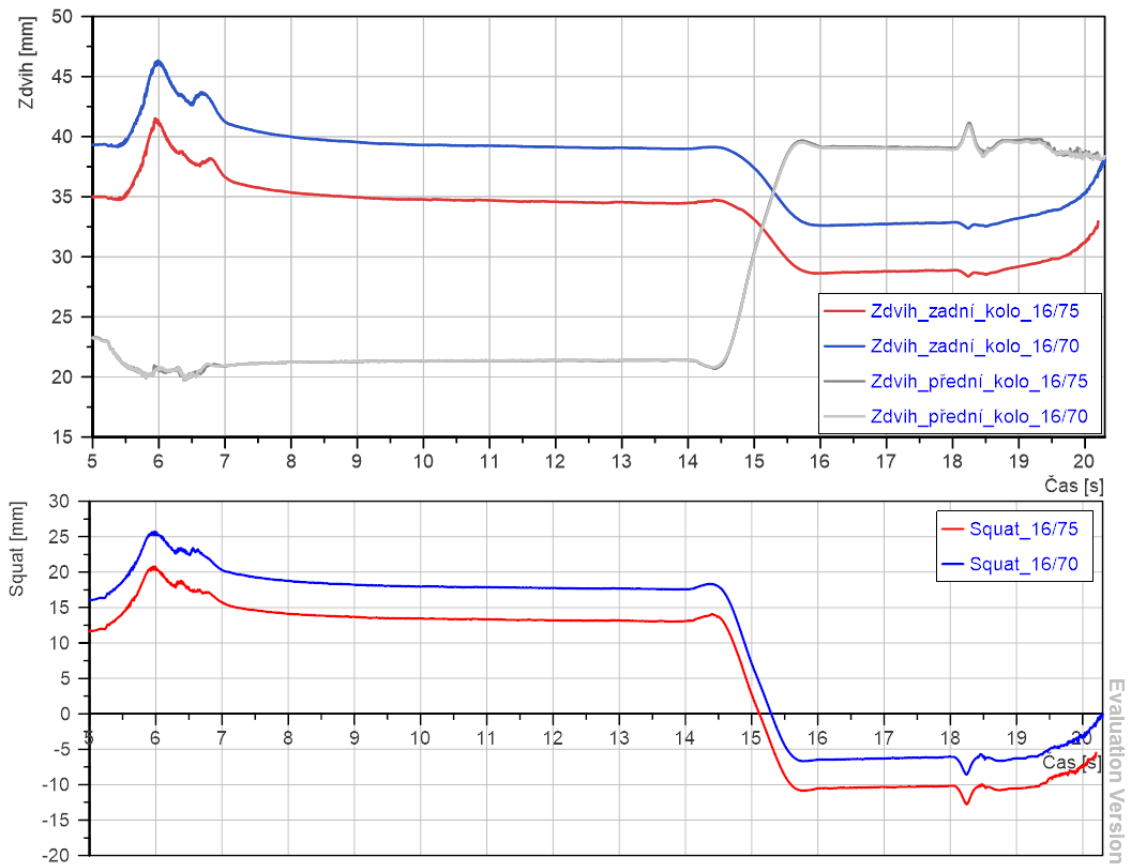
Výchozí_Rozdíl výpočtů od simulací			Předpětí 0 mm		Předpětí 8 mm		Předpětí 16 mm	
			VV [mm]	Rozdíl [mm]	VV [mm]	Rozdíl [mm]	VV [mm]	Rozdíl [mm]
70 N/mm	155 kg	Moto (5 - 10%)	48.8	6.64	33.1	6.75	17.1	7.08
	155 + 80 kg	Moto + Jezdec (30%)	70.2	1.71	60.1	5.91	41.2	1.98
	250 kg	2500 N na sedlovku	>120.0	-	118.4	-	106.4	-5.6
75 N/mm	155 kg	Moto (5 - 10%)	45.9	6.28	30.0	6.33	15.2	0.3
	155 + 80 kg	Moto + Jezdec (30%)	66.2	1.59	52.5	2.44	36.0	0.96
	250 kg	2500 N na sedlovku	>120.0	-	112.2	-3.97	52.5	-52.36
Alternativa_Rozdíl výpočtů od simulací			Předpětí 0 mm		Předpětí 8 mm		Předpětí 16 mm	
			VV [mm]	Rozdíl [mm]	VV [mm]	Rozdíl [mm]	VV [mm]	Rozdíl [mm]
70 N/mm	155 kg	Moto (5 - 10%)	43.0	5.97	28.0	6.18	12.7	6.51
	155 + 80 kg	Moto + Jezdec (30%)	62.3	0.98	48.2	0.87	33.9	1.03
	250 kg	2500 N na sedlovku	>112.2	-	105.0	-3.78	94.1	-3.59
75 N/mm	155 kg	Moto (5 - 10%)	40.4	5.65	25.4	5.96	10.5	3
	155 + 80 kg	Moto + Jezdec (30%)	58.7	0.91	44.6	1	30.9	2
	250 kg	2500 N na sedlovku	109.4	-	99.1	-3.65	44.2	-47.8

6.2 Výstupy z dynamického testu

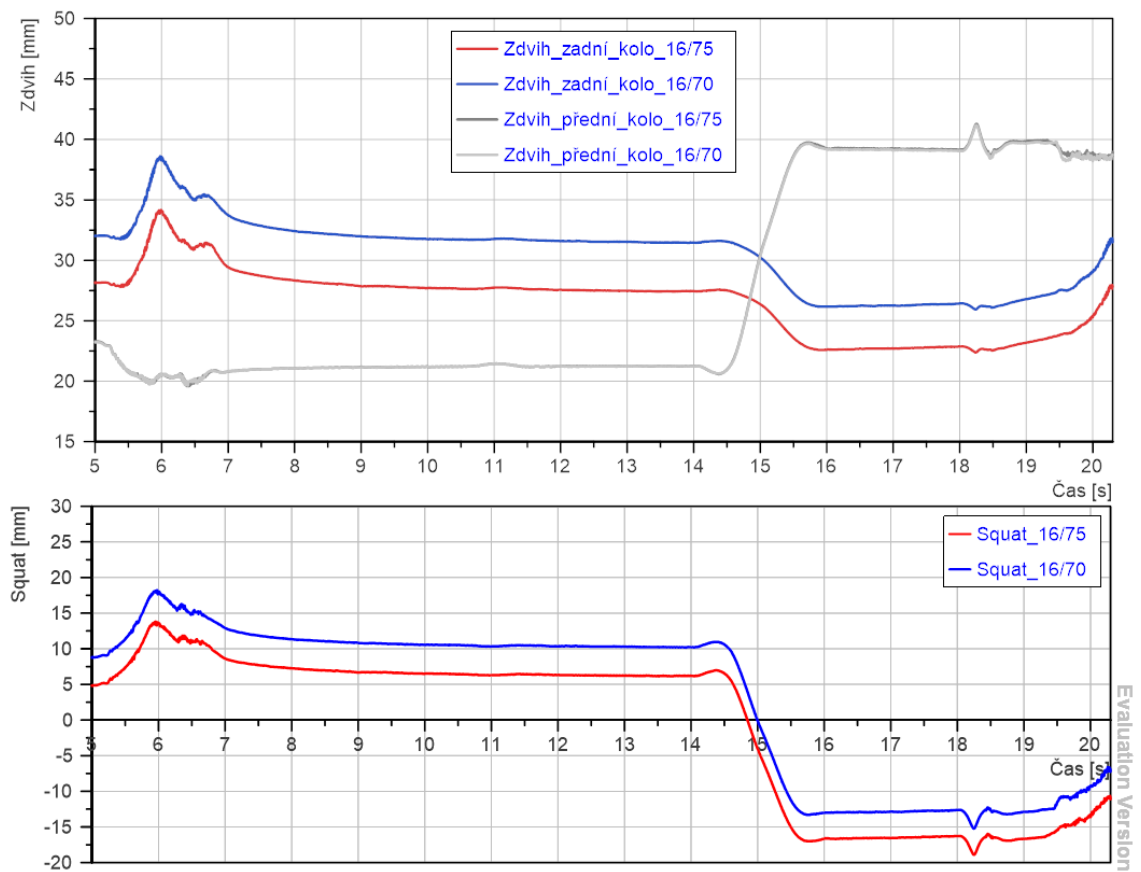
Na základě výsledků ze simulací statickým zatížením, jsem provedl dynamické testy motocyklu s následujícími konfiguracemi zadního odpružení (c – tuhost pružiny, Δy – předpětí pružiny):

- Výchozí – Δy : 16 mm – c : 75 N/mm
- Alternativa – Δy : 16 mm – c : 75 N/mm
- Výchozí – Δy : 16 mm – c : 70 N/mm
- Alternativa – Δy : 16 mm – c : 70 N/mm

Pro vzájemné porovnání jsem vybral právě tato konkrétní nastavení, protože při statických testech nejlépe splňovala definované podmínky. Jak jsem již avizoval, záměrem testů je zkoumat rozdíly především v průběhu zdvihu zadního kola a tlumiče a vyhodnotit možné důsledky a vlivy při různých nastaveních zadního zavěšení. Nastavení předního odpružení již nebylo dále měněno. Je však potřeba dodat, že vlivem absence řetězu, který přenáší hnací kroutící moment z převodovky na zadní kolo, nebylo možné zcela uvažovat popsany anti-squat efekt. Síly působící v řetězu mají při akceleraci pozitivní účinek v podobě tendence působit proti dřepu a omezit tak výsledný zdvih, jinými slovy hloubku dřepu zádě motocyklu.



Obrázek č. 52 – Průběh zdvihů kol a squat u výchozí varianty [autor,2021]



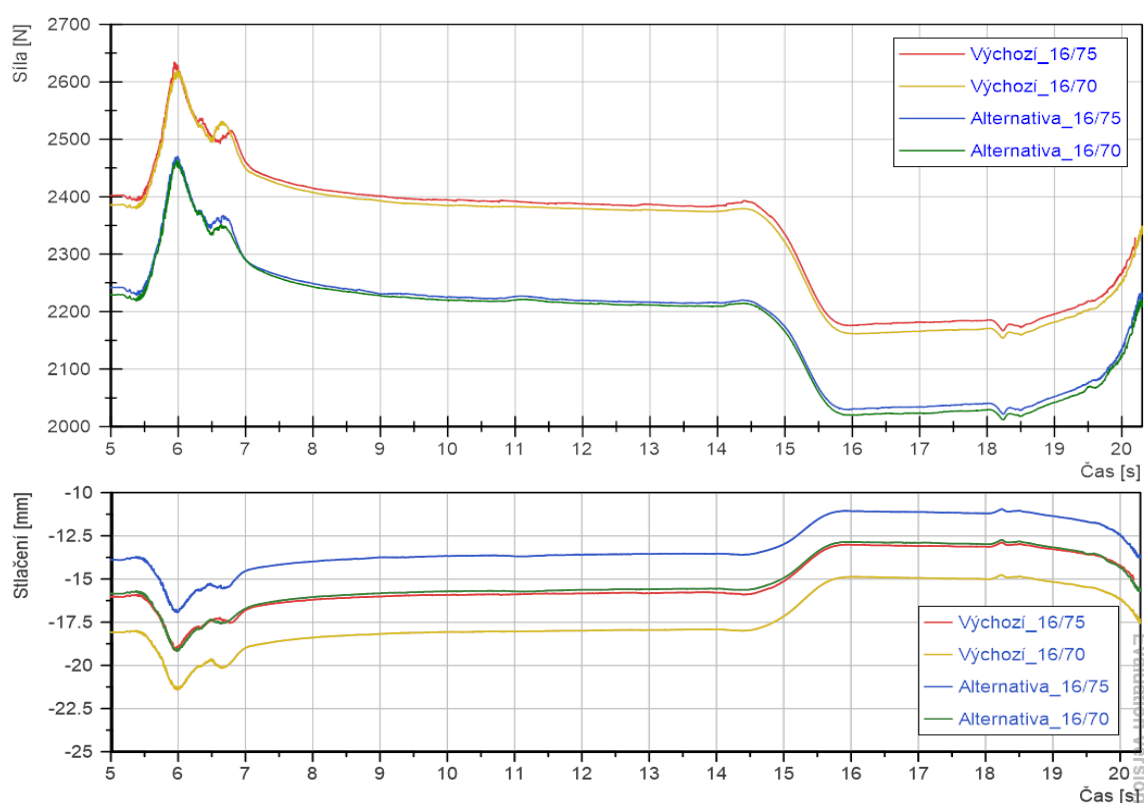
Obrázek č. 53 – Průběh zdvihů kol a squat u druhé alternativy [autor,2021]

Silné zrychlení a brzdění se zřetelně projeví na zdvihu odpružení a tím i na celkové geometrii motocyklu. Mimo sklonu motocyklu se mění i závlek předního kola. Když motocykl zrychluje, závlek se zvyšuje a naopak při prudkém brzdění se závlek zmenšuje. Na předešlé stránce jsou zvláště pro obě varianty zadního odpružení zobrazeny časové průběhy zdvihu obou kol, včetně diagramů průběhu squatu. Jak jsem již zmínil dříve, prvních 5 s simulace je doba určená k ustálení odpružení motocyklu s jezdcem. Časové osy v rámci všech čtyř diagramů proto začínají v čase 5 s, kdy motocykl začíná akcelerovat a končí v polovině dvacáté vteřiny, v momentě zastavení motocyklu. Výkyv hodnot vlivem prvotního dosednutí motocyklu z nezatíženého stavu tedy není na obrázcích č. 52 a č. 53 zobrazen. Při akceleraci se váha přenáší na zadní část motocyklu a velká část tohoto zatížení působí na zadní tlumič a postupně také na zadní kolo. Dochází ke stlačení zadního tlumiče a hodnota zdvihu zadního kola roste. Přenos váhy rovněž způsobí vysunutí přední vidlice, čili zdvih předního kola naopak klesá. Nehledě na variantu a nastavení zadního zavěšení můžeme pozorovat, že maximálního zdvihu je dosaženo již na počátku 6 s a následně dochází k vyrovnávání přestože motocykl dále zrychluje. Za 9,5 s dosáhl motocykl rychlosti 176 km/h a v čase 14,5 s začíná brzdit. Během brzdění dochází k přenosu váhy naopak na přední část. Zadní tlumič se opět roztahuje a z diagramů můžeme pozorovat jak v čase 14,5 s vlivem odlehčení zadní části klesá i hodnota zdvihu zadního kola. Zároveň si lze všimnout značného nárůstu zdvihu předního kola. Vlivem setrvačnosti motocyklu dochází totiž k opravdu výraznému stlačení předních tlumičů a zasunutí přední vidlice. Ke konci simulace, kdy motocykl pomalu zastavuje je patrné jak se zdvih kol, respektive podvozek začíná opět vyrovnávat.

Dále jsou v rámci popisovaných obrázků znázorněny i diagramy squatu, vyjadřující pokles zadní části motocyklu vůči přední. Kladné hodnoty průběhu značí stav, při kterém je zadní část motocyklu níže nežli přední a naopak záporné hodnoty vyjadřují, že přední část je níže oproti zadní části. Pokud tedy průběh roste a je v kladných hodnotách, znamená to, že motocykl zrychluje. Záporné hodnoty jsou naopak během prudkého brzdění. Průběh squatu de facto indikuje sklon motocyklu, tudíž i hypotetickou míru odlehčení kol. Při odlehčení kola se zmenšuje síla, kterou je kolo přitlačováno k podložce. U diagramů na předchozí straně jsou v průběhu squatu mezi výchozí variantou a druhou alternativou viditelné rozdíly. Squat se v případě výchozí varianty pohybuje více ve vyšších kladných hodnotách a důsledkem brzdění v čase 14,5 s klesne do segmentu záporných hodnot až během 15 vteřiny. Z toho plyne, že oproti druhé alternativě je při akceleraci pokles zadní části hlubší, avšak nedochází k tak velkému odlehčení zadního kola. Kdežto u druhé alternativy dochází už před začátkem 15 vteřiny ke zřetelnějšímu odlehčení zadního kola, což je u této varianty nepochybně dáno i celkově menším zdvihem kola.

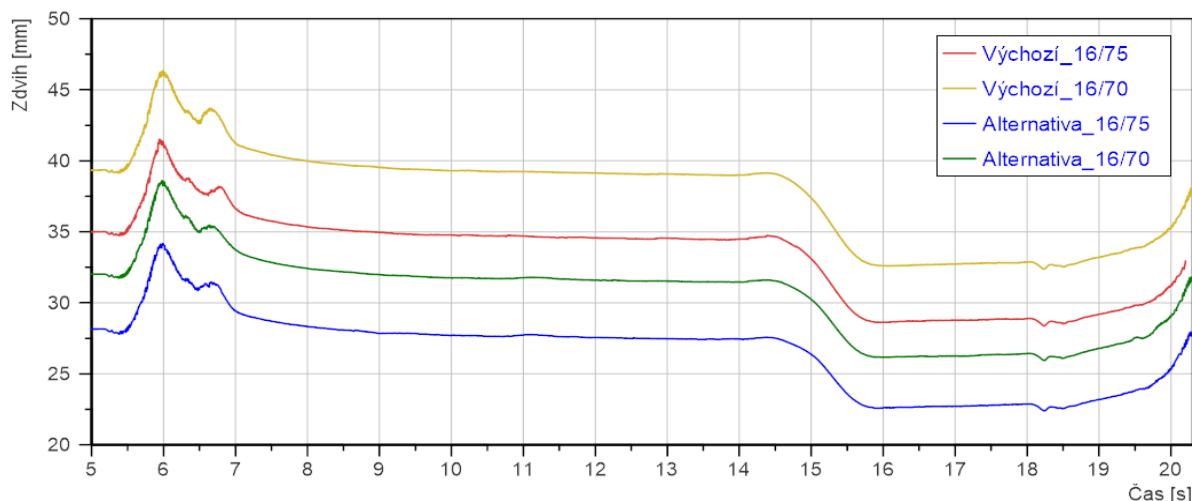
6.3 Shrnutí

V této závěrečné kapitole jsou předložena vzájemná porovnání výstupů ze simulací, shrnutí a úvahy nad možnými důsledky použití daných konfigurací navrženého zadního odpružení. Předpětí pružiny o délku 16 mm se z hlediska statického zatížení prokázalo jako účinné a vyhovující stanoveným požadavkům. Celkově jsou představeny čtyři možnosti nastavení zadního odpružení. Jako nejvíce vhodné se však na základě výsledků simulací statickým zatížením jeví výchozí varianta s pružinou o tuhosti 75 N/mm, předepnutou o 16 mm a druhá alternativa se slabší pružinou o tuhosti 70 N/mm, předepnutou o 16 mm. Právě tato konkrétní nastavení splňují nejlépe definované podmínky zdvihu. Menší hodnoty předpětí pružin už však požadované hodnoty zdvihu nezajišťují.



Obrázek č. 54 – Srovnání průběhů stlačení a reakční síly tlumiče [autor,2021]

Na obrázku č. 54 je dvojice diagramů zobrazující průběhy síly a stlačení zadního tlumiče jednotlivých konfigurací při dynamickém testu. Maximální síla, které je dosaženo na tlumiči na začátku zrychlení je u výchozí varianty v průměru o 6,4% vyšší. Během následného brzdění dojde k odlehčení zadní části motocyklu čili i zadního tlumiče, který se roztahuje a tím klesá také jeho reakční síla. U výchozí varianty v tento moment síla poklesne v průměru o 8,5% a u druhé alternativy o 8,2%. Z obrázku lze také pozorovat jak se v průběhu síly na tlumiči odráží i vlastní stlačení tlumiče. Od míry stlačení zadního tlumiče se odvíjí zdvih i zadního kola (viz Obrázek č. 55 – Srovnání průběhů zdvihu zadního kola) a tím i velikost síly, kterou je kolo tlačeno do podložky.

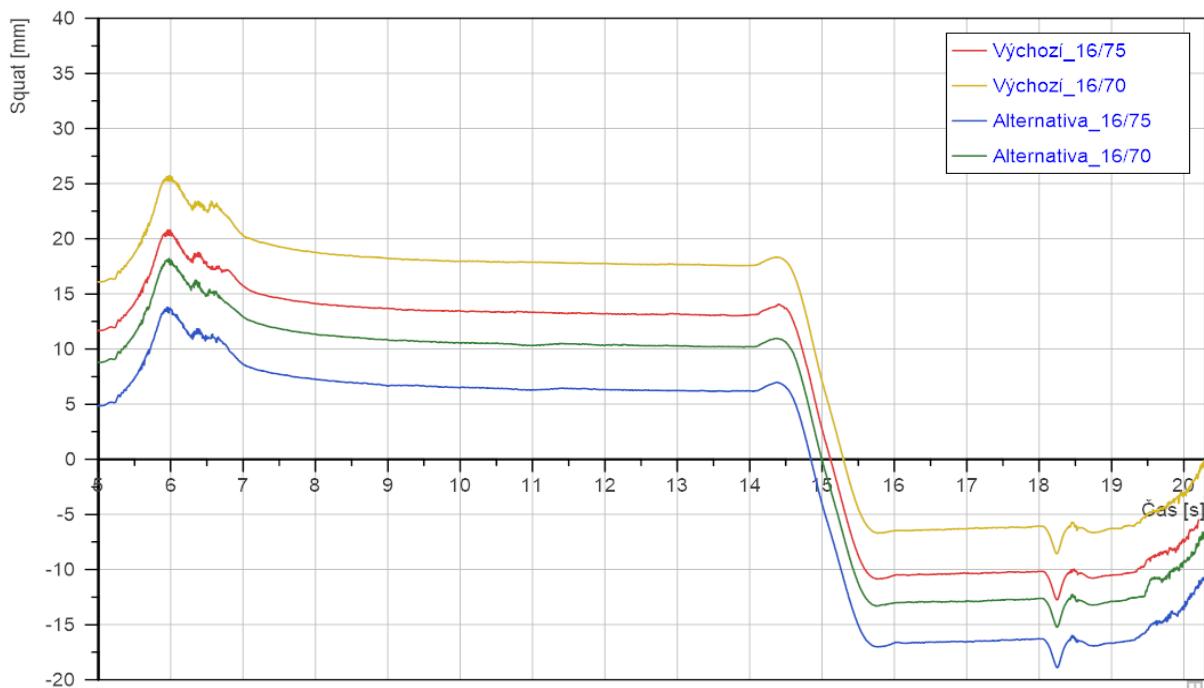


Obrázek č. 55 – Srovnání průběhů zdvihu zadního kola [autor,2021]

Když dojde k nadměrnému odlehčení ať už předního či zadního kola, zmenší se velikost přítláčné síly tak, že může dojít ke ztrátě kontaktu s vozovkou a smyku. Mohlo by se tedy zdát, že čím tvrdší podvozek tím lépe. Avšak použití až příliš tuhých zadních pružin, nebo celkově tvrdšího nastavení vede ke snížení poddajnosti zadního odpružení a omezení zdvihu kol, čímž je de facto omezena i schopnost trakce. Naopak v případě moc měkkého zadního odpružení hrozí v důsledku odlehčení přední části ztráta styku předního kola s vozovkou. Na obrázku č. 55 jsou zobrazeny výsledné průběhy zdvihu zadního kola u vybraných konfigurací zadního odpružení. Dle nastavení mají mezi sebou vzájemné rozestupy, čímž je i v podstatě vymezen jakýsi prostor pro budoucí, přímo jezdce prováděné, reálné zkoušky na trati. Diagram dokazuje, že druhá alternativa s tužší pružinou (modrá křivka) je nejtvrdějším nastavením zadního odpružení. Hodnoty v průběhu zdvihu kola jsou totiž nejnižší, což značí skutečnost, že oproti ostatním konfiguracím nedochází až k takovému stlačení tlumiče. Rovněž změna zdvihu kola při brzdění je vzhledem k ostatním nastavením nejmenší. Zároveň je jasně vidět, že výchozí varianta s měkčí pružinou (žlutá křivka) naopak dosahuje vlivem většího stlačení i největších hodnot zdvihu kola. Změna zdvihu zadního kola při brzdění je tak vzhledem k ostatním nastavením největší. V následující tabulce č. 7 jsou uvedeny relativní číselné rozdíly mezi danými variantami v podstatných segmentech průběhu.

Tabulka č. 7 – Souhrn relativních procentuálních rozdílů pro dynamický test [autor, 2021]

V: Výchozí_Dtest		Síla na tlumiči				Zdvih zadního kola			
		Nárůst zrychlení		Pokles brzdění		Nárůst zrychlení		Pokles brzdění	
		[N]	[%]	[N]	[%]	[mm]	[%]	[mm]	[%]
Pružina	c = 75 N/mm, Δy = 16 mm	230.22	9.58	200.43	8.41	6.28	17.94	5.64	16.37
	c = 70 N/mm, Δy = 16 mm	233.51	9.79	206.33	8.68	6.95	17.67	6.21	15.92
V: Alternativa_Dtest		Síla na tlumiči				Zdvih zadního kola			
		Nárůst zrychlení		Pokles brzdění		Nárůst zrychlení		Pokles brzdění	
		[N]	[%]	[N]	[%]	[mm]	[%]	[mm]	[%]
Pružina	c = 75 N/mm, Δy = 16 mm	228.32	10.18	1960.9	8.08	5.79	20.56	4.69	17.09
	c = 70 N/mm, Δy = 16 mm	234.28	10.51	184.35	8.34	6.51	20.32	5.14	16.33

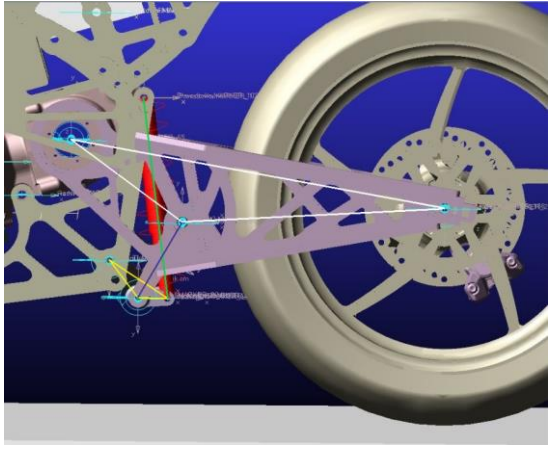
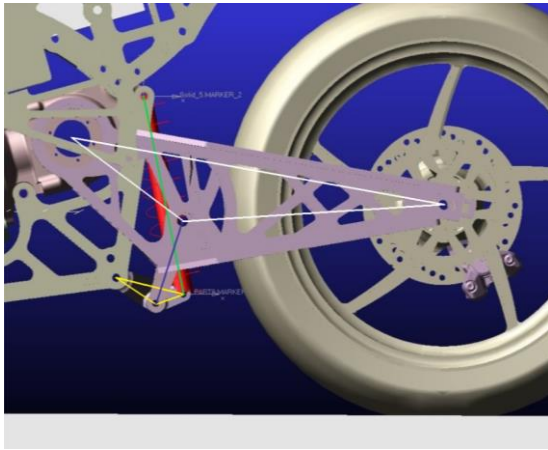


Obrázek č. 56 – Srovnání průběhů squatu [autor,2021]

Na obrázku č. 56 je diagram znázorňující všechny výsledné průběhy squatu jednotlivých variant zadního odpružení. Squat je významný faktor pro nalezení “ideálního” nastavení podvozku motocyklu, navíc můžeme opět pozorovat rozestupy vymežující prostor pro budoucí ladění. Čím více jsou hodnoty squatu záporné, tím více je odlehčeno zadní kolo a může hrozit ztráta kontaktu s vozovkou, viz modrá křivka reprezentující druhou alternativu s tužší pružinou (75 N/mm). Naopak čím více je v kladných hodnotách, tím více je odlehčeno přední kolo, viz žlutá křivka označující výchozí variantu se slabší pružinou (70 N/mm). Někde mezi těmito dvěma extrémy je požadované výchozí nastavení s optimální mírou squatu, které nemá při jízdě negativní vliv na polohu těžiště. Optimální nastavení udržuje v daném okamžiku stabilní geometrii pro dobré řízení, dostatečný styk kol s vozovkou a efektivně přenáší váhu mezi přední a zadní částí motocyklu. Při odlehčení kola se zmenšuje síla, kterou je kolo přitlačováno k podložce a právě v důsledku rychlé akcelerace či prudkého brzdění může v extrémních případech dojít ke ztrátě styku pneumatiky s vozovkou. Taková situace stojí závodníka drahocenné sekundy jelikož motocykl ztrácí schopnost trakce a tím ztrácí i rychlost. Především je však ztráta kontaktu nebezpečná kvůli značnému riziku smyku či rozkmitání řídicích v případě odlehčení předního kola. V našem případě lze squat mimo jiné ovlivnit právě díky různým možnostem nastavení tuhosti, ale i geometrie zadního odpružení. Z diagramu průběhu squatu se opět nejvíce potvrzuje vhodnost výchozí varianty se silnější pružinou (červená křivka) a druhé alternativy s měkčí pružinou (zelená křivka). Kvůli požadavku stejnoměrného odpružení přední a zadní části motocyklu bylo při dynamických testech použito nejslabší nastavení předního odpružení. Během silného brzdění je ale částečný problém v tom, že zatížení na přední vidlici může být až dvojnásobné. Je tedy pravděpodobné, že se budoucí

nastavení vidlice bude lišit. Jelikož lze v našem případě ovlivnit tuhost nejen zadního, ale i předního odpružení, můžeme průběh squatu lépe přizpůsobit dle jízdních scénářů, ale především také dle požadavků jezdce.

6.3.1 Schéma nastavení

Výchozí varianta		Druhá alternativa	
			
Max. zdvih zadního kola: 120 mm		Max. zdvih zadního kola: 112.2 mm	
1	Pružina: ÖHLINS 00281 L3816 - 75 N/mm Předpětí: 16 mm	3	Pružina: ÖHLINS 00281 L2118 - 70 N/mm Předpětí: 16 mm
	Zdvih - motocykl 12.40%		Zdvih - motocykl 5.50%
	Zdvih - motocykl s jezdcem 29.20%		Zdvih - motocykl s jezdcem 29.30%
	Zdvih - statický test 250 kg 87.40%		Zdvih - statický test 250 kg 87.10%
2	Pružina: ÖHLINS 00281 L2118 - 70 N/mm Předpětí: 16 mm	4	Pružina: ÖHLINS 00281 L3816 - 75 N/mm Předpětí: 16 mm
	Zdvih - motocykl 8.40%		Zdvih - motocykl 6.70%
	Zdvih - motocykl s jezdcem 32.70%		Zdvih - motocykl s jezdcem 25.80%
	Zdvih - statický test 250 kg 93.30%		Zdvih - statický test 250 kg 82.00%

Obrázek č. 57 – Souhrnné schéma navržených konfigurací zadního odpružení [autor,2021]

Na obrázku č. 57 je zobrazeno přehledové schéma navržených konfigurací zadního odpružení. Barevná označení odpovídají barvám jednotlivých průběhů z diagramů na obrázcích č. 54, č. 55 a č. 56. Základní konfigurací je varianta číslo 1 s pružinou o tuhosti 75 N/mm, která je předepnuta o délku 16 mm. Nejtužším nastavením zadního odpružení je konfigurace číslo 4 a nejměkčím naopak konfigurace číslo 2. K jednotlivým variantám jsou uvedeny i výsledné procentuální hodnoty zdvihu zadního kola při jednotlivých scénářích statického zatížení, tzn. vlastní vahou motocyklu, vahou motocyklu i s jezdcem, svislým zatížením vahou 250 kg v místě sedla. Ze snímků kyvné vidlice lze vidět rozdíl v místě uložení vahadla v rámu, který právě dané varianty geometrie mezi sebou odlišuje.

Závěr

Podstatou této diplomové práce bylo zpracovat návrh geometrie mechanismu zadního odpružení u prototypu nového závodního motocyklu CTU Lions EVO 2.0 Electric. Navržený mechanismus musel odpovídat pravidlům soutěže MotoStudent a požadavkům ze strany týmu CTU Lions. Cílem bylo zohlednit možnosti nastavení geometrie a vlastností zadního odpružení a zahrnout je do návrhu. Záměrem bylo mít více možností konfigurace zadního odpružení, a to za účelem přizpůsobení podvozku potřebám jezdce a způsobu jízdy, testům na soutěži či samotné trati závodního okruhu.

V úvodu teoretické části jsem představil technické parametry motocyklu související se systémem odpružení. Popsal jsem základní komponenty tvořící zavěšení kol včetně jejich charakteristik a funkčnosti. Poté jsem stručně vylíčil historický vývoj zadních mechanismů odpružení až do současné podoby. Zároveň jsem používané mechanismy popsal a navzájem mezi sebou porovnal z hlediska výhod a nevýhod. Dále jsem se také zabýval možnostmi nastavení prvků odpružení. V neposlední řadě jsem v teoretické části vysvětlil princip fungování a důležitost systému odpružení ve vztahu na jízdní projev motocyklu, a to především po stránce stability a bezpečnosti.

Praktickou část jsem uvedl pravidly soutěže týkající se zadního odpružení, požadavky omezující návrh a danými výchozími podmínkami. Jedním z kritérií byla progresivní charakteristika tuhosti. Proto byl jasnou volbou pákový mechanismus zadního odpružení. Na základě inspirace během řešení k zadnímu odpružení jsem se nejdříve pokoušel navrhnout variantu s nekonvenční horizontální polohou tlumiče. K tomu jsem využil prostý geometrický model s reprezentacemi dílčích částí zadního odpružení. V patřičných aplikacích softwaru ANSYS jsem opakovaně upravoval velikost, polohu a místo uložení jednotlivých komponent. Nově vzniklé variace jsem paralelně podrobil semi-statickému posouzení a analyzoval změny v průběhu odpružení. Tato varianta však nebyla ve finále slučitelná s našimi podmínkami a kombinací daných parametrů. Vyhovující vodorovné řešení pákového mechanismu by v našem případě vyžadovalo výrazně tužší pružinu a také více místa v oblasti kyvné vidlice, převodovky a motoru. Navíc se toto řešení jevílo jako citlivé na změny geometrie a přírůstek hmotnosti motocyklu či jezdce. Vodorovná varianta zkrátka nebyla kompatibilní se stanovenými požadavky a podmínkami, tudíž jsem ve výsledku přešel k navrhování geometrie, při které je tlumič uchycen ve svislé poloze. Taková uspořádání jsou ostatně obvyklým, dá se říct i osvědčeným, řešením pákového mechanismu. Navíc oproti vodorovné variantě lépe pasuje do prostoru za převodovkou, není tak prostorově náročné a lze mnohem lépe

optimalizovat charakteristiku odpružení a dosáhnout potřebných hodnot zdvihu. Návrh svislé varianty přepákování už jsem ale prováděl metodou vektorové analýzy v MS Excel. Na základě zadaných geometrických a technických parametrů byly dopočítány vektory působících sil a momentů, které jsou potřeba k získání výsledné charakteristiky tuhosti a zdvihu zadního kola. Opět jsem opakovaně upravoval velikosti a pozice jednotlivých komponent až jsem nakonec docílil geometrie splňující všechny požadavky. V návaznosti na to jsem se dál zabýval možnostmi přizpůsobení zadního odpružení a ladění charakteristiky. Pro tyto účely můžeme u navrženého odpružení zvolit jednu ze dvou různě tuhých pružin, nastavit předpětí pružiny či případně upravit odskok (tlumení) tlumiče. Pro více možností variability jsem navrhl ještě druhou alternativu mechanismu, která vychází z předchozí varianty. Rozdíl je v místě uložení vahadla (trojúhelníku) v rámu. Celkově jsem tedy navrhl dvě vyhovující geometrie zadního odpružení, obě byly implementovány do celkového návrhu motocyklu a bude možné je na finálním motocyklu používat. Klíčové je předepnutí obou pružin o 16 mm. Bez předpětí jsou jinak překročeny stanovené podmínky zdvihu zadního kola. V rámci praktické části jsem se rovněž okrajově zabýval možnostmi analýzy systému odpružení motocyklu v praxi. Ideálním způsobem jak prověřit účinnost a funkčnost navrženého mechanismu je za pomoci reálných dat naměřených při skutečných jízdách zkušákách. Avšak to v mém případě nebylo možné, jelikož v době zpracovávání této práce nebyl motocykl ještě zkonstruován. Proto jsem tedy za účelem podrobnějšího posouzení a také ověření správnosti předchozích výpočtů provedl v softwaru MSC ADAMS statické a dynamické simulace modelu motocyklu. Hlavními výstupy jsou závislosti síly a stlačení tlumiče, průběhy zdvihu zadního kola a diagramy squatu znázorňující vliv přenosu zatížení na chování podvozku ve vztahu k daným konfiguracím. Simulacím jsem zvláště podrobil obě navržené varianty zadního odpružení v kombinaci s oběma předepnutými pružinami. Celkově se jedná o čtyři možnosti nastavení, která jsem navrhl jako vhodná k použití, protože nejlépe splňovala dané požadavky a podmínky. Ve výstupních diagramech z dynamických testů jsou mezi těmito nastaveními vidět užitečné rozestupy poskytující prostor pro budoucí ladění odpružení na základě reálných jízdých testů na dané trati a především přímé konzultace s jezdcem.

Stále je třeba myslet na to, že výstupy dynamického testu vychází z počítačových simulací modelu, kde jsou do jisté míry zanedbány některé skutečnosti, například anti-squat efekt, který má také vliv na zdvih zadního odpružení. Také poloha těžiště, která má značný vliv na celkovou jízdni dynamiku motocyklu, je v této fázi vývoje stále uvažována na základě dat naměřených u předchozích prototypů. Teprve data získaná z reálných testů a zpětná vazba od samotného jezdce přesně určí konečné nastavení odpružení. Volba konfigurace a případné ladění parametrů navrženého odpružení (tuhost, tlumení, předpětí) závisí na mnoha kritériích

jako jsou typicky potřeby daného jezdce, hmotnost jezdce, technika a způsob jízdy, charakter trati atd. Konzultace pocitů a potřeb jezdce je stejně důležitá jako naměřená data. Základní konfigurací zadního odpružení je výchozí geometrie s tužší pružinou předepnutou o 16 mm. Není ale zcela vyloučeno, že nastane situace, kdy bude žádoucí i o něco menší hodnota předpětí pružiny. Pokud nebude jezdcovi dané nastavení vyhovovat například kvůli velké tvrdosti podvozku, snížit tuhost lze vždy, a to právě ubráním na hodnotě předpětí. Naopak přidat na tvrdosti zadního odpružení lze pomocí druhé alternativy s tužší pružinou. Důvodem k takovým úpravám nastavení může být snaha maximalizovat trakci při testu akcelerace, redukovat nežádoucí odlehčení kol například při silnější akceleraci či brzdění nebo zkrátka přizpůsobení dle pocitů jezdce. Výhodou proto je, že v našem případě lze měnit jak charakteristiku tuhosti zadního, tak ale i předního odpružení.

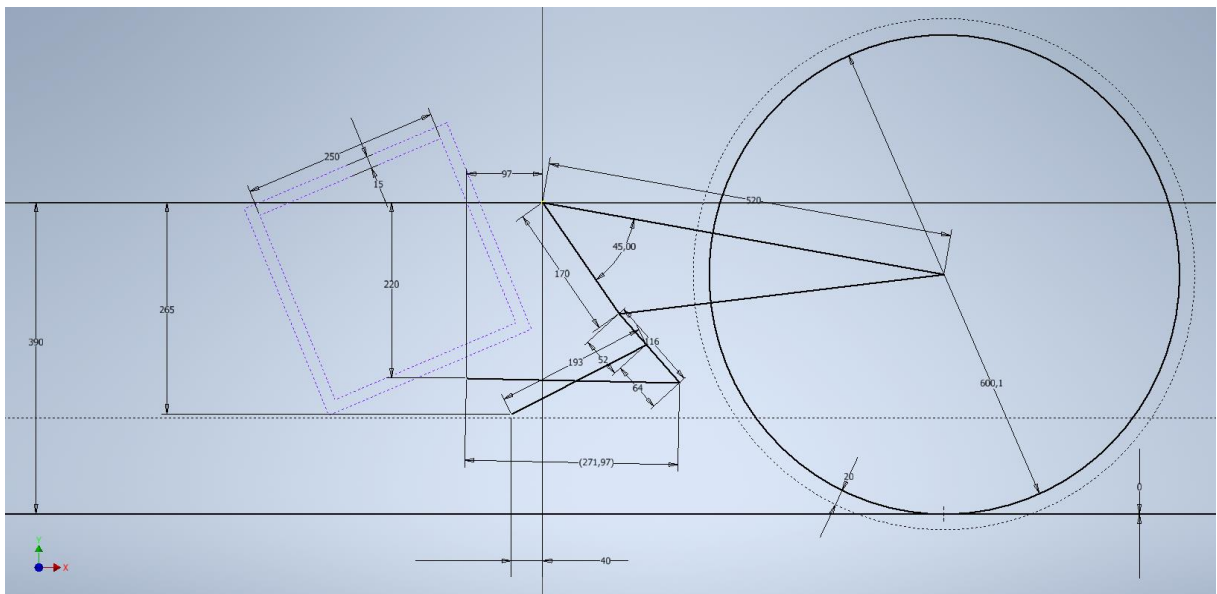
Tato diplomová práce poslouží především jako podklad pro nastavení chystaného motocyklu. Zároveň ale může sloužit jako inspirace pro návrh zadního odpružení budoucích prototypů. Jakožto poměrného nováčka týmu CTU Lions mě práce nejen na problematice zadního odpružení, ale celková činnost v rámci týmu velice obohatila o zkušenosti ze zákulisí vývoje závodního motocyklu a o poznatky z motocyklového prostředí. Cením si především všech zkušeností, které jsem nabyl a věřím, že je využiji i ve své budoucí činnosti.

Seznam zdrojů a literatury

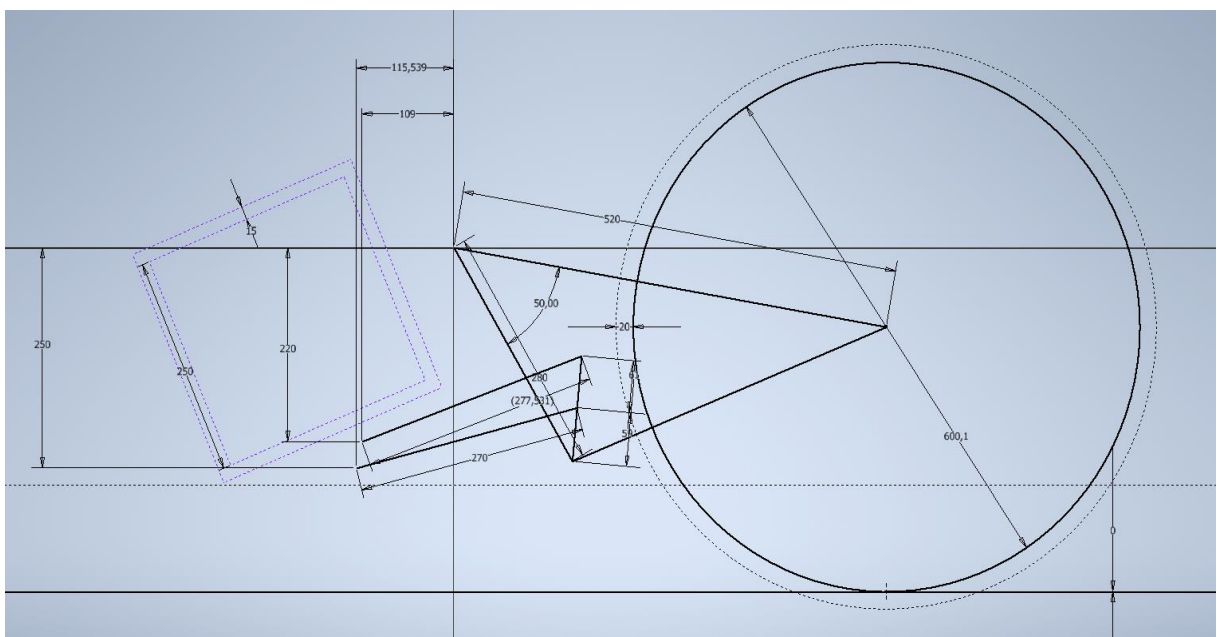
- [1] DATA FOR MOTORCYCLES. [online]. © 2021 [cit. 2021-03-20]. Dostupné z: <https://www.datamc.org/>
- [2] PAPERKA, Ondřej. Simulace jízdní dynamiky soutěžního motocyklu MotoStudent. Fakulta dopravní ČVUT v Praze, 2019. Diplomová práce. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/83710>
- [3] COSSALTER, Vittorio. Motorcycle dynamics. 2nd Edition. Lulu, 2006. 372 s. ISBN 978-1-4303-0861-4.
- [4] FIRST, Jiří a kol. Zkoušení automobilů a motocyklů: příručka pro konstruktéry. 1. vyd. Praha: S&T CZ, 2008. 348 s. ISBN 978-80-254-1805-5.
- [5] MOTOLIFE. [online]. © 2021 [cit. 2021-02-07]. Dostupné z: https://www.motolife.cz/icmn/technika/geometrie-je-vzdy-kompromisem-a-zmenou-jednoho-parametruovlivnite-dva-dalsi_5589.
- [6] ŠTĚRBA, Jan. Konstrukce motocyklu pro soutěž MotoStudent – Analýza parametrů. Fakulta dopravní ČVUT v Praze, 2015. Bakalářská práce. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/63922>
- [7] Cvičení z předmětu: *Dynamika jízdy vozidla. Výukové materiály ke stažení.* [online]. Dostupné z: <https://k616.fd.cvut.cz/>
- [8] VLK, František. Teorie a konstrukce motocyklů. 1. vyd. Brno: František Vlk, 2004. 355 s. ISBN 80-239-1601-7.
- [9] VLK, František. Dynamika motorových vozidel. 2. vyd. Brno: František Vlk, 2003. 432 s. ISBN 80-239-0024-2.
- [10] VLK, František. Ovladatelnost a stabilita motocyklu. [online] 2004 [cit. 2021-02-07]. Dostupné z: <http://www.sinz.cz/archiv/docs/si-2004-06-303-311.pdf>
- [11] VLK, František. Podvozky motorových vozidel. 3. aktualizované vyd. Brno: František Vlk, 2006. 464 s. ISBN 80-239-6464-X.
- [12] FRÜHAUF, Ondřej. Měření parametrů na odpružení sportovního vozidla. Fakulta strojní ZČU v Plzni, 2016. Bakalářská práce. Dostupné z: <https://dspace5.zcu.cz/handle/11025/25261>

- [13] BUCEK, Michal. Návrh a zhotovení výukového panelu pérování a tlumičů pérování. Univerzita Pardubice, 2010. Bakalářská práce. Dostupné z: https://dk.upce.cz/bitstream/handle/10195/38440/BucekM_Perovani%20tlumice_MB_2010.pdf.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [14] KŘEŠŤAN, Petr. Návrh kyvné vidlice zadního kola motocyklu. Fakulta strojní ZČU v Plzni, 2017. Bakalářská práce. Dostupné z: <https://dspace5.zcu.cz/handle/11025/26923>
- [15] KŘIVÁNEK, Tomáš. Zadní odpružení motokrosového motocyklu. Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně, 2019. Bakalářská práce. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=193438
- [16] ADLOF, Michal. Návrh varianty motocyklové konvenční kyvné vidlice z hliníkových slitin. Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně, 2020. Bakalářská práce. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=217735
- [17] HAVRÁNEK, Lukáš. Pevnostní analýza a optimalizace rámu s kyvnou vidlicí motocyklu s víceválcovým motorem o objemu 1200ccm. Fakulta strojní TUL v Liberci, 2007. Diplomová práce. Dostupné z: <https://dspace.tul.cz/handle/15240/8371>
- [18] MOTORKÁŘI [online]. © 2021 [cit. 2021-03-09]. Dostupné z: <https://www.motorkari.cz/clanky/jak-na-to/nastaveni-podvozku-1-pruziny-a-predpeti-41543.html>
- [19] SVOBODA, Josef. Měření a analýza jízdní dynamiky silničních závodních motocyklů. Fakulta dopravní ČVUT v Praze, 2020. Diplomová práce. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/87873>
- [20] KOVANDA, Jan. Bezpečnostní aspekty návrhu dopravních prostředků. 1. vyd. Praha: ČVUT, 2016. ISBN 978-80-01-05893-0.
- [21] Archiv týmu: *CTU Lions – MS 2018–2020*. [online]. Sdílené online uložení. Dostupné z: <https://drive.google.com/drive/>
- [22] MOTOSTUDENT [online]. © [cit. 2021-03-15]. Dostupné z: http://www.motostudent.com/assets/files/MS1920_Regulations_V4_ENG.pdf
- [23] FOALE, Tony. *Motorcycle Handling and Chassis Design: The Art and Science*. Tony Foale, 2006. 546 s. ISBN 978-8-4933-2863-4.

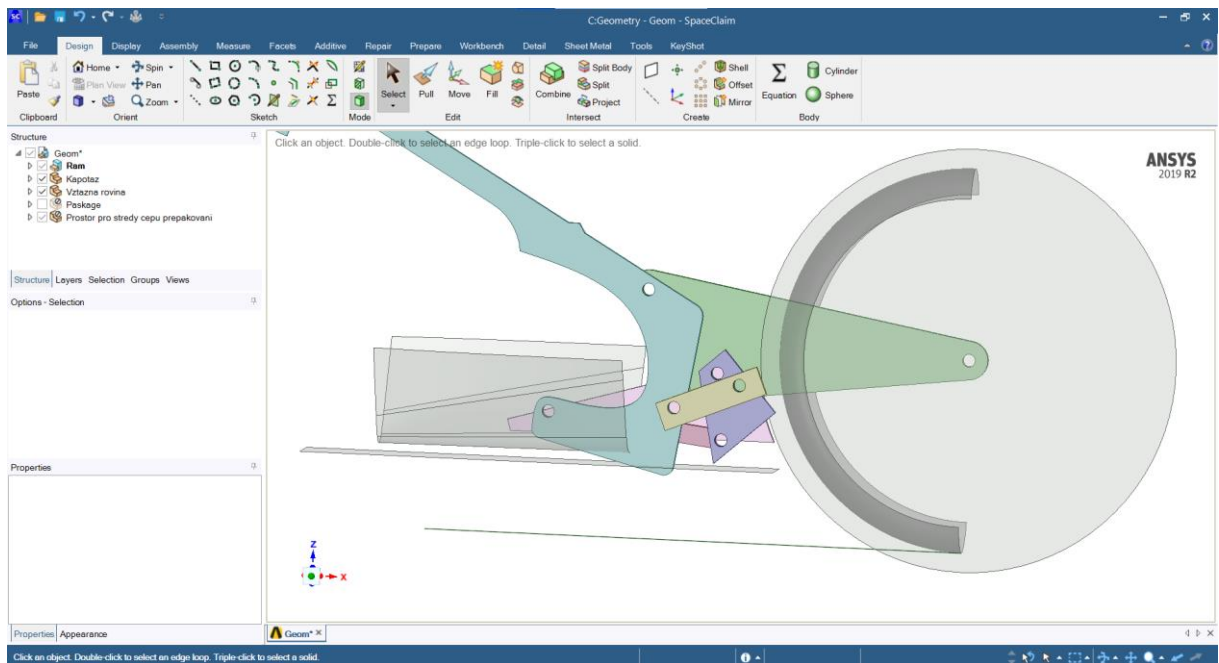
Přílohy



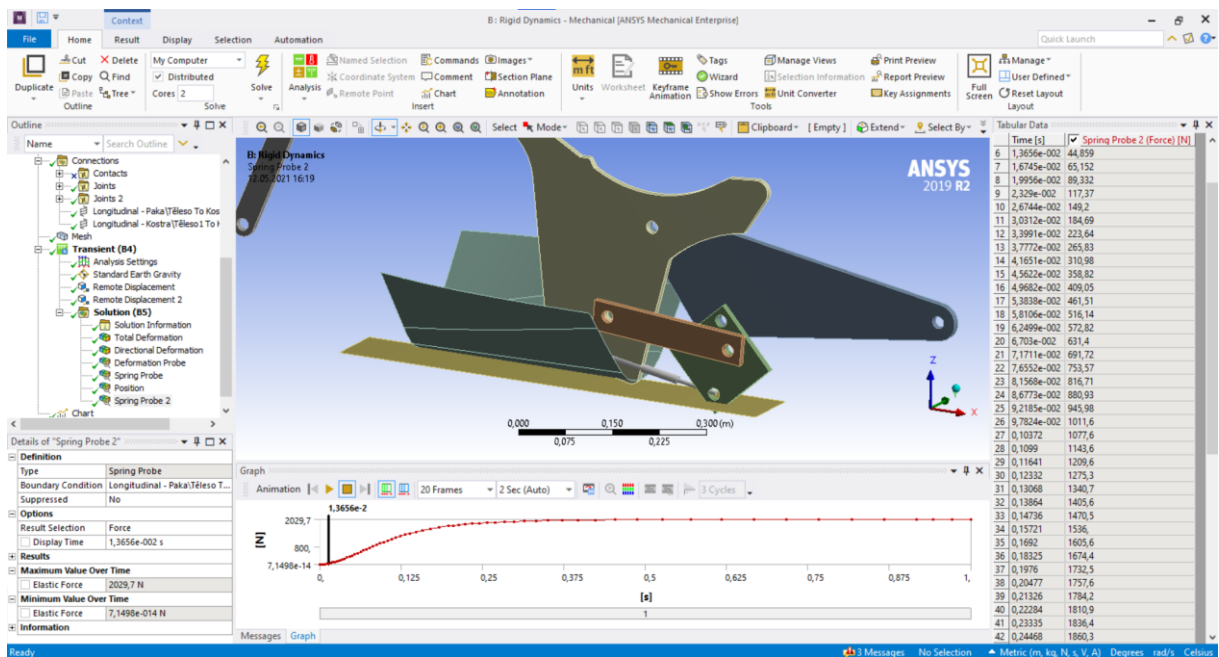
Obrázek č. 58 – Koncept geometrie VA



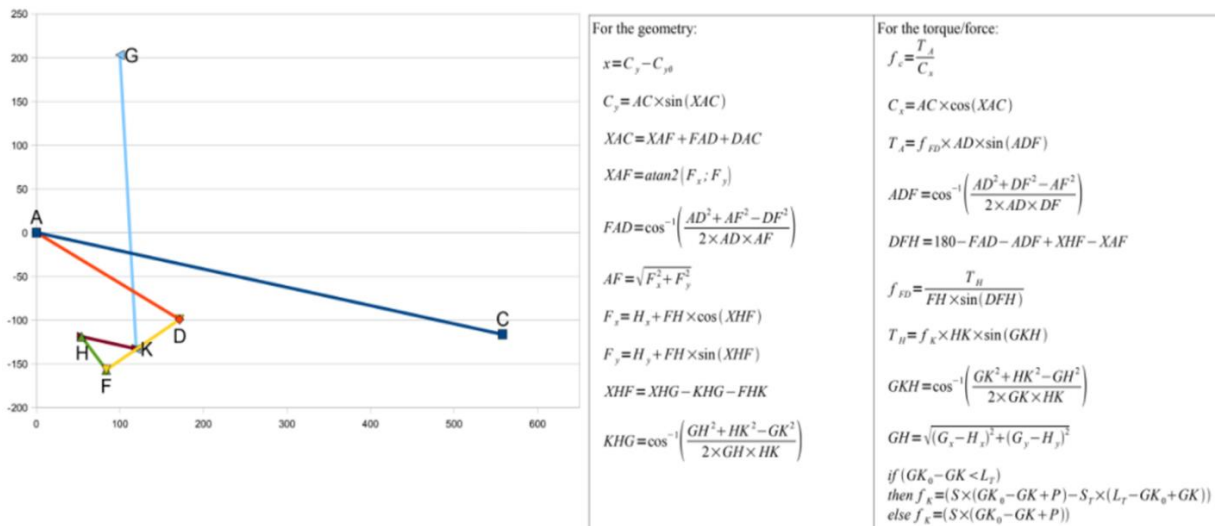
Obrázek č. 59 – Koncept geometrie VB – Tularis



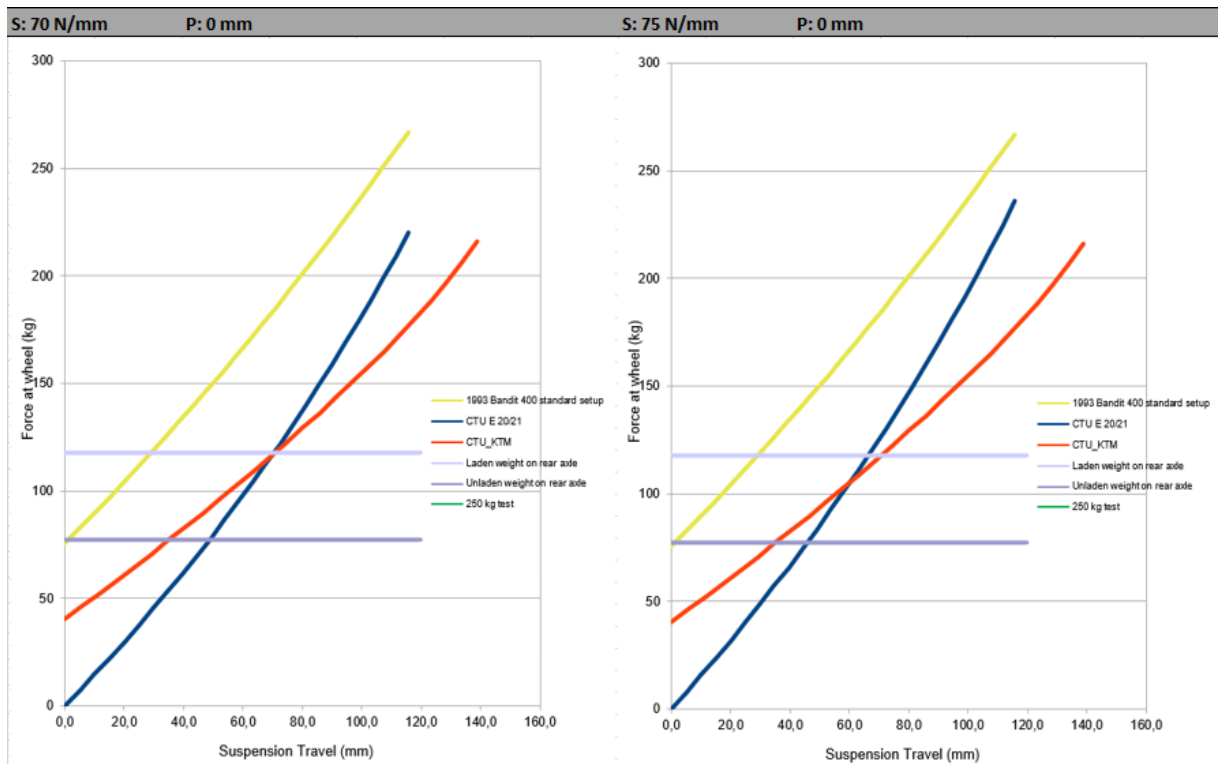
Obrázek č. 60 – Jeden z pokusů o vodorovnou variantu, ANSYS Spaceclaim



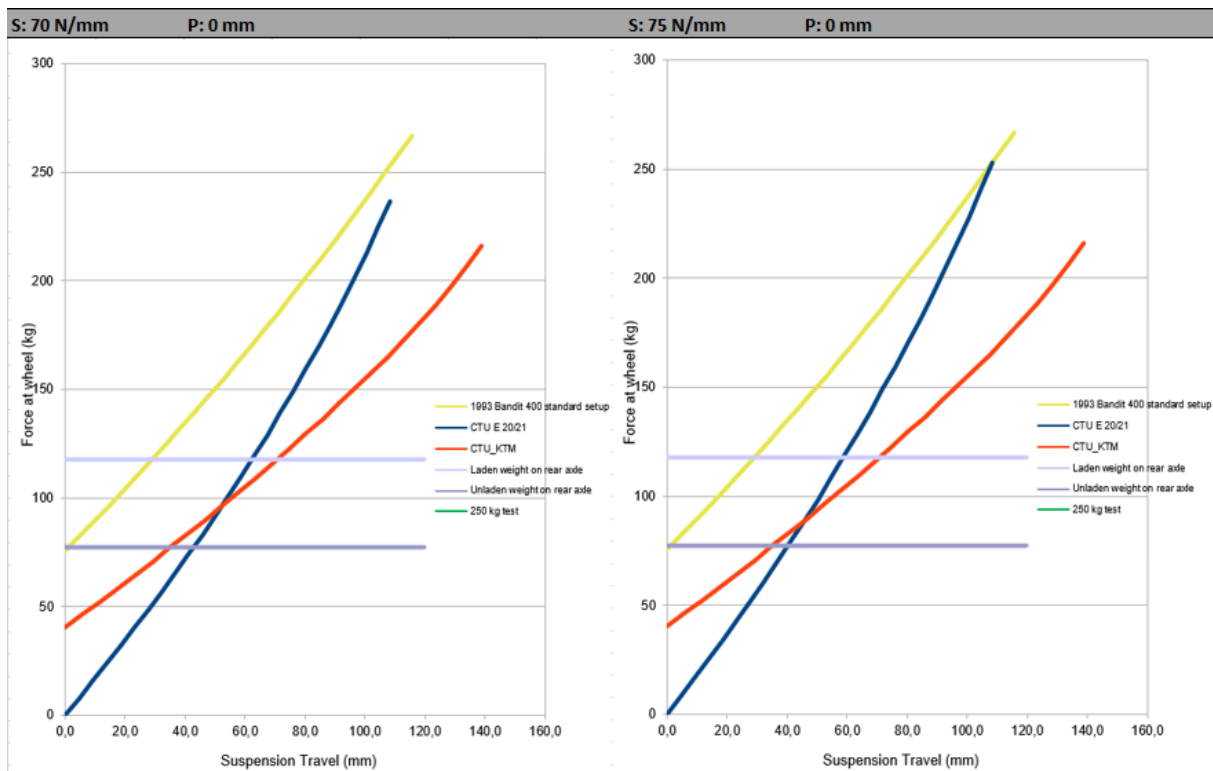
Obrázek č. 61 – Snímek při semi-statickém posouzení jedné z vodorovných variant, ANSYS Mechanical



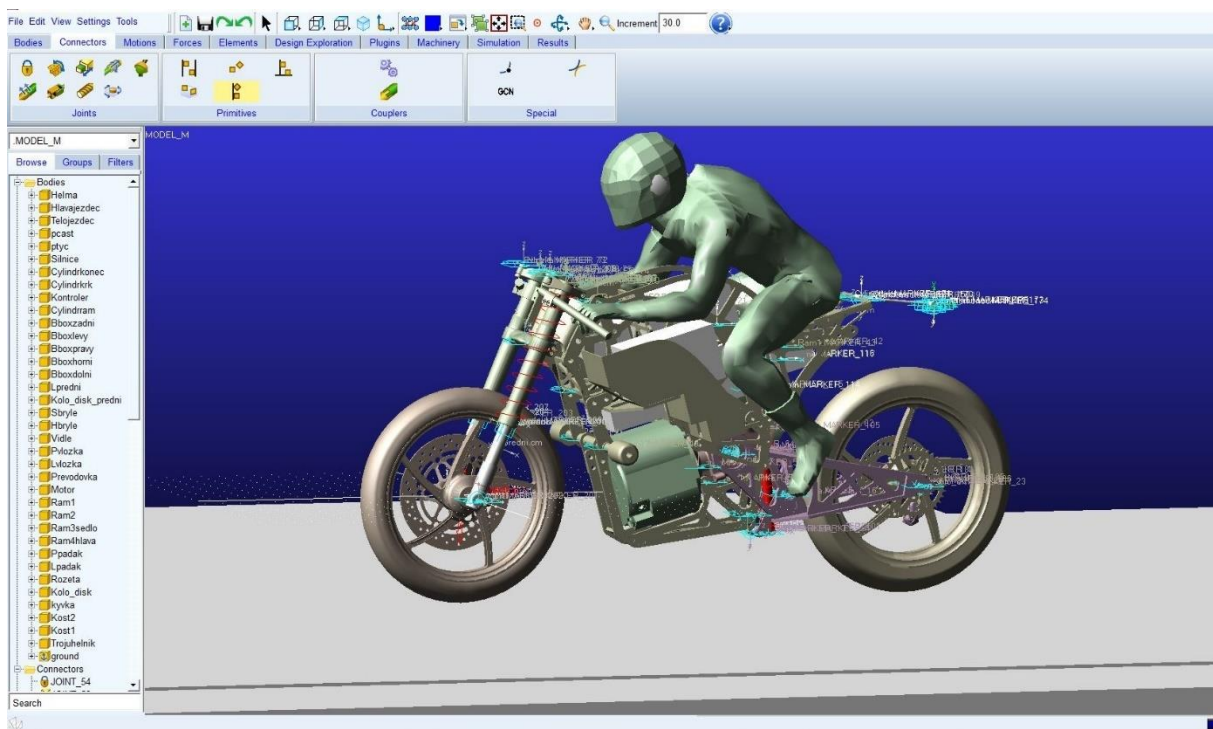
Obrázek č. 62 – Metoda výpočtů pro návrh pákového mechanismu



Obrázek č. 63 – Charakteristiky výchozí varianty při použití pružin bez předpětí



Obrázek č. 64 – Charakteristiky druhé alternativy při použití pružin bez předpětí



Obrázek č. 65 – Model motocyklu s jezdcem v softwaru MSC ADAMS



Obrázek č. 66 – Snímky vyrobeného vahadla (trojuhelníku)



Obrázek č. 67 – Tlumič s pružinami a vahadlo

Seznam obrázků

Obrázek č. 1 – Logo univerzitního závodního týmu CTU Lions	11
Obrázek č. 2 – Rozměry sportovního motocyklu a chopperu	13
Obrázek č. 3 – Obecná geometrie motocyklu	14
Obrázek č. 4 – Závodní motocykly ve směrovém oblouku	15
Obrázek č. 5 – Závlek předního kola.....	16
Obrázek č. 6 – Ergonomický trojúhelník posedu	16
Obrázek č. 7 – Osy motocyklu a pohyby při jízdě.....	17
Obrázek č. 8 – Gyroskopický moment při klopení	18
Obrázek č. 9 – Model přední vidlice motocyklu CTU Lions EVO 2.0 Electric.....	20
Obrázek č. 10 – Lineárně (vlevo) a nelineárně (vpravo) vinutá pružina	21
Obrázek č. 11 – Průběhy funkcí tuhosti	21
Obrázek č. 12 – Teleskopický pružinový tlumič.....	22
Obrázek č. 13 – Zadní kyvná vidlice terénního motocyklu.....	23
Obrázek č. 14 – Konvenční dvouramenná vidlice	24
Obrázek č. 15 – Konzolová kyvná vidlice	24
Obrázek č. 16 – Motocykl s jednoramennou kyvnou vidlicí	25
Obrázek č. 17 – Princip pákového mechanismu Pro-Link	25
Obrázek č. 18 – Pořízený tlumič značky ÖHLINS	31
Obrázek č. 19 – Motocykl Tularis 800	32
Obrázek č. 20 – Koncept vodorovného přepákování.....	32
Obrázek č. 21 – Geometrický 2D model přepákování	33
Obrázek č. 22 – Simulace zatížení a analýza tuhosti v ANSYS Mechanical.....	33
Obrázek č. 23 – List s daty a průběhem tuhosti odpružení při celkovém zatížení 210 kg.....	34
Obrázek č. 24 – Pákový mechanismus motocyklu Honda NC700X.....	35
Obrázek č. 25 – Výpočetní MS Excel.....	36
Obrázek č. 26 – Geometrie výchozí varianty odpružení	37
Obrázek č. 27 – Geometrie druhé alternativy odpružení	39

Obrázek č. 28 – Charakteristiky tuhosti výchozí varianty (modře)	40
Obrázek č. 29 – Charakteristiky tuhosti druhé alternativy.....	41
Obrázek č. 30 – Lineární potenciometr přichycený k tlumiči.....	45
Obrázek č. 31 – Schematicky naznačená distribuce hmotnosti	46
Obrázek č. 32 – Síly působící při jízdě vpřed	46
Obrázek č. 33 – Histogram vertikální rychlosti obou kol motocyklu	47
Obrázek č. 34 – Výchozí model prototypu v programu ANSYS Spaceclaim.....	48
Obrázek č. 35 – Zjednodušený model prototypu v MSC Apex	49
Obrázek č. 36 – Reprezentace boxů a jednotky.....	50
Obrázek č. 37 – Jezdec (modře) a prvek rovnováhy (červeně)	51
Obrázek č. 38 – Ukázka rotačních vazeb zadního odpružení v MSC ADAMS	52
Obrázek č. 39 – Vazby prvku k zajištění rovnováhy	52
Obrázek č. 40 – Odpružení podvozku motocyklu	53
Obrázek č. 41 – Průběhy tlumení předního (vlevo) a zadního tlumiče (vpravo).....	54
Obrázek č. 42 – Obě konfigurace odpružení v softwaru MSC ADAMS	54
Obrázek č. 43 – Definování materiálu a hmotnosti kyvné vidlice.....	55
Obrázek č. 44 – Definování styku kol s vozovkou	56
Obrázek č. 45 – Schéma statického testu při technické kontrole.....	57
Obrázek č. 46 – Ukázky ze simulací statickým zatížením	58
Obrázek č. 47 – Průběh rychlosti motocyklu při dynamickém testu	59
Obrázek č. 48 – Zdvih zadního kola.....	60
Obrázek č. 49 – Srovnání charakteristik tuhosti při zatížení silou 2500 N	61
Obrázek č. 50 – Průběhy zdvihu a reakčních sil zadního kola – moto + jezdec.....	62
Obrázek č. 51 – Průběhy reakčních sil a stlačení tlumiče – 250 kg test	63
Obrázek č. 52 – Průběh zdvihů kol a squat u výchozí varianty.....	65
Obrázek č. 53 – Průběh zdvihů kol a squat u druhé alternativy	65
Obrázek č. 54 – Srovnání průběhů stlačení a reakční síly tlumiče	67
Obrázek č. 55 – Srovnání průběhů zdvihu zadního kola	68
Obrázek č. 56 – Srovnání průběhů squatu.....	69

Obrázek č. 57 – Souhrnné schéma navržených konfigurací zadního odpružení	70
Obrázek č. 58 – Koncept geometrie VA	76
Obrázek č. 59 – Koncept geometrie VB – Tularis.....	76
Obrázek č. 60 – Jeden z pokusů o vodorovnou variantu, ANSYS Spaceclaim.....	77
Obrázek č. 61 – Snímek při semi-statickém posouzení jedné z vodorovných variant, ANSYS Mechanical	77
Obrázek č. 62 – Metoda výpočtů pro návrh pákového mechanismu	78
Obrázek č. 63 – Charakteristiky výchozí varianty při použití pružin bez předpětí ...	78
Obrázek č. 64 – Charakteristiky druhé alternativy při použití pružin bez předpětí...	79
Obrázek č. 65 – Model motocyklu s jezdcem v softwaru MSC ADAMS.....	79
Obrázek č. 66 – Snímky vyrobeného vahadla (trojuhelníku)	80
Obrázek č. 67 – Tlumič s pružinami a vahadlo.....	80

Seznam tabulek

Tabulka č. 1 – Rozměry výchozí varianty odpružení.....	37
Tabulka č. 2 – Rozměry druhé alternativy odpružení.....	38
Tabulka č. 3 – Hodnoty zdvihu výchozí varianty	41
Tabulka č. 4 – Hodnoty zdvihu druhé alternativy	42
Tabulka č. 5 – Souhm hodnot zdvihu odpružení při statickém zatěžování	60
Tabulka č. 6 – Rozdíly výpočtů od simulací při statickém zatížení.....	64
Tabulka č. 7 – Souhm relativních procentuálních rozdílů pro dynamický test	68