TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta strojní

OPTIMALIZACE ZADNÍ NÁPRAVY STUDENTSKÉ FORMULE TUL

Bakalářská práce

Studijní program: B2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojní Inženýrství

Autor práce: **Martin Kolomazník**
Vedoucí práce: doc. Ing. Michal Petrů, Ph.D.

Liberec 2018

TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC
Faculty of Mechanical Engineering

OPTIMIZATION OF THE REAR AXLE OF THE STUDENT FORMULA TUL

Bachelor thesis

Study programme: B2301 Mechanical Engineering
Study branch: Mechanical Engineering

Author: **Martin Kolomazník**
Supervisor: doc. Ing. Michal Petrů, Ph.D.

Liberec 2018

Technická univerzita v Liberci
Fakulta strojní
Akademický rok: **2017/2018**

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení:	**Martin Kolomazník**
Osobní číslo:	**S15000084**
Studijní program:	**B2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor:	**Strojní inženýrství**
Název tématu:	**Optimalizace zadní nápravy studentské formule TUL**
Zadávající katedra:	**Katedra částí a mechanismů strojů**

Zásady pro vypracování:

Navrhnout a vypracovat optimalizované konstrukční řešení zadní nápravy studentské formule TUL. Řešení bude vycházet z původního návrhu současného řešení a navrhů nových koncepčních řešení zadní nápravy, provedení pevnostních výpočtů a vyhotovení optimalní varianty prostřednictvím 3D modelu s technickou dokumentací.

Obsah bakalářské práce:

1. Stav techniky u současného provedení zadních náprav studentstkých formulí.
2. Průzkum trhu a rešerše
3. Navrhnout min. 3 koncepty řešení zadní nápravy
4. Provést zatěžující výpočty / simulace (kinematiky, namáhání, životnosti)
5. Vyhotovení 3D modelu a technické dokumentace vybrané optimalizované varianty zadní nápravy
6. Ekonomické posouzení

Rozsah grafických prací:	**přílohy dle potřeby**
Rozsah pracovní zprávy:	**50**
Forma zpracování bakalářské práce:	**tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

[1] Pešík, L.: Části strojů. 1. díl. Liberec, TU 2005. ISBN 80-7083-938-4
[2] Pešík, L.: Části strojů. 2. díl. Liberec, TU 2005. ISBN 80-7083-939-2
[3] Moravec V.: Konstrukce strojů a zařízení 2. čelní ozubená kola. Vysoká škola báňská, Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, 2001, 291 s.
[4] Mrkvica I.: Současné trendy v obrábění ozubených kol. Vysoká škola báňská, Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, 2011, 120 s.
[5] Leinveber, J., Vávra, P.: Strojnické tabulky. Albra, Úvaly 2005. ISBN 80-736-01-6
[6] Bureš M.: Návrh a pevnostní výpočet čelních a kuželových ozubených kol. Skriptum TU Liberec Ediční středisko 2006.
[7]Normy pro návrh a pevnostní výpočet čelních a kuželových ozubených kol ČSN 014686-4 nebo ČSN ISO 6336-5 (014687) Výpočet únosnosti čelních ozubených kol s přímými a šikmými zuby - několik dílů, nebo ANSI/AGMA 20010B88, 2001-C95 nebo normou 2001-D04, nebo ANSI/AGMA 908-B89.
[8]Normy pro mezní úchylky a tolerance ozubených kol a soukolí ČSN 014682 nebo novější ČSN ISO 1328-1 Čelní ozubená kola - Soustava přesnosti ISO a ČSN 01 4676 - Ozubená kola - Měření ozubených kol čelních se šikmými zuby.
[9]Výpočetní programy AutoDESK- Mechsoft, KISS SOFT, MITCAlc,
[10] Databáze knihovny TUL

Vedoucí bakalářské práce:	**doc. Ing. Michal Petrů, Ph.D.** Katedra částí a mechanismů strojů
Datum zadání bakalářské práce:	**12. února 2018**
Termín odevzdání bakalářské práce:	**12. srpna 2019**

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan

L.S.

prof. Ing. Ladislav Ševčík, CSc.
vedoucí katedry

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/200 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomé, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mích autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Současně četně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

V Liberci dne: ……. podpis: ……..

Poděkování

Rád bych poděkoval týmu Studentské formule Technické univerzity v Liberci za možnost podílet se při tvorbě nového projektu studentské formule. Dále děkuji panu doc. Ing. Michalovi Petrů, Ph.D. za obětavou pomoc a podmětné připomínky, které mi během tvorby bakalářské práce poskytoval. Za umožnění finančních prostředků a odlehčení od velkých nervů bych moc rád poděkoval rodině, která pro mě byla velkou podporou po celou dobu studia.

Anotace (Resumé)

Bakalářská práce se zabývá optimalizací zadní nápravy studentské formule TUL. Obsahuje teoretickou část, která popisuje projekt Studentské formule, konstrukční uložení náprav, stávající zadní část a inspiraci na novou zadní část studentské formule TUL. Zároveň je součástí i praktická část, která se zabývá vstupními hodnotami, volbou zatížení, koncepčními postupy, výpočty, simulací, vyhodnocením celého výsledku práce se stávající zadní částí a porovnaní CAD modelu s reálnou sestavou. Cílem této práce je vytvoření optimalizované zadní nápravy studentské formule TUL se zlepšením jízdních ale i estetických vlastností formule včetně technické dokumentace.

Klíčová slova:

bakalářská práce, optimalizace zadní nápravy, studentská formule, uložení náprav, řetězový převod, simulace zadní části, odpružení

Summary

The bachelor thesis deals with the optimization of the rear axle of the student formula TUL. It includes a theoretical part which describes the project of the student formula, design mounting of the axles, existing rear part and the inspiration for the new rear part of the student formula TUL. At the same time the bachelor thesis includes a practical part, which deals with the input values, the choice of the loading, the conceptual procedures, calculations, simulation, and evaluation of the whole outcome of work with the existing rear section and comparison of the CAD model with the real composition. The aim of this work is the creation of an optimized rear axle of the student formula TUL with the improvement of the on road and also the aesthetical performance of the formula including the technical documentation.

Key words:

bachelor thesis, the optimization of the rear axle, the student formula, mounting the axles, a chain transfer, the simulation of the rear part, suspension

Obsah

1 Úvod 10

2 Cíle bakalářské práce 10

3 Teoretická část a rešerše stavu techniky současného provedení zadních náprav 10

3.1 Studentská formule [2] 10

3.2 Konstrukční řešení uložení náprav 11

3.2.1 Závislé zavěšení kol – tuhá náprava 11

3.2.2 Nezávislé zavěšení kol 12

3.3 Původní zadní část a inspirace na nové uložení 13

4 Konstrukční návrh a řešení zadní nápravy 15

4.1 Souřadnicový systém studentské formule 15

4.2 Vstupní hodnoty pro zadní část 15

4.3 Postup modelování zadní části studentské formule 16

4.4 Výpočty 20

4.4.1 Volba a rozbor zatěžujících sil 20

4.4.2 Řetězový převod 24

4.4.3 Výpočet sil působících na diferenciál v uložení 26

4.4.4 Pevnostní výpočet jednotlivých šroubových spojení včetně dílů 27

4.4.5 Simulace celé zadní části studentské formule 28

4.5 Finální verze zadní nápravy studentské formule TUL – Markétka 30

4.5.1 Výroba zadní nápravy studentské formule TUL – Markétka 32

5 Závěr 34

6 Literatura 36

7 Seznam obrázků 37

8 Seznam tabulek 38

9 Seznam příloh 38

Seznam zkratek pro výpočty, jednotky

$F_{n1.1}, F_{n1.2}$	[N]	Normálové síly pro levé a pravé kolo při stavu akcelerace
$F_{n2.1}, F_{n2.2}$	[N]	Normálové síly pro levé a pravé kolo při stavu akcelerace + zatáčení
$F_{t1.1}, F_{t1.2}$	[N]	Tečné síly pro levé a pravé kolo při stavu akcelerace
$F_{t2.1}, F_{t2,2}$	[N]	Tečné síly pro levé a pravé kolo při stavu akcelerace + zatáčení
F_o	[N]	Síla na push-rod odpružení
F_h	[N]	Síla pro hodní bod uložení na těhlici
F_s	[N]	Síla pro spodní bod uložení na těhlici
$F_{hp}\ F_{hz}\ F_{sp}\ F_{sz}$	[N]	Síly na rámu v místě uložení pro horní a spodní body a přední a zadní body
$Mk_{akcelerace}$	[Nm]	Hodnota krouticího momentu při stavu akcelerace
$Mk_{zataceni+akcelerace}$	[Nm]	Hodnota krouticího momentu při stavu akcelerace+ zatáčení
D_1, D_2	[mm]	Roztečný průměr kružnice pastorku a rozety
j	[mm]	Počet článků řetězu
$F_{\check{r}}$	[N]	Síla od řetězového převodu
F_1, F_2	[N]	Síla v místě uložení od řetězového převodu
τ	[MPa]	Smykové napětí
p	[MPa]	Tlakové napětí
σ	[MPa]	Tahové, tlakové napětí

1 Úvod

Vytvořením Bakalářské práce s názvem Optimalizace zadní nápravy studentské formule TUL je snaha dosáhnout lepšího konstrukčního uspořádání jednotlivých částí zadního celku studentské formule, zlepšit jízdní vlastnosti, design a využít lehčích slitin materiálu.

Práce se dělí na dvě části, teoretickou a praktickou. Teoretická část se zabývá projektem studentské formule, konstrukčním řešením uložení náprav a rozborem původní zadní části studentské formule a nové inspirace. Praktická část je zaměřená na projekt druhé studentské formule Technické univerzity v Liberci s názvem Markétka. Práce obsahuje vstupní parametry, postup modelování, výpočty, simulace jak nově optimalizované zadní části, tak i stávající zadní části, ukázku finální verze a porovnáním 3D modelu s reálně vyrobenou sestavou zadní části. Závěrem je připraveno porovnání zadní části druhé studentské formule s první studentskou formulí TUL a finanční zhodnocení práce. Součástí práce je také technická dokumentace, výrobní výkresy desek včetně tolerancí a drsností a také sestava celé zadní části studentské formule TUL.

2 Cíle bakalářské práce

Cílem Bakalářské práce je navrhnout a vypracovat optimalizované řešení zadní nápravy studentské formule TUL. Řešení bude vycházet ze současného provedení studentské formule a návrhu nových konstrukčních uspořádání zadní nápravy. Práce obsahuje stav techniky u současného provedení zadních náprav, průzkum trhu, návrh koncepčních řešení zadní nápravy studentské formule. V další části proběhne volba zatěžujících sil převedených na pevnostní výpočty a simulace zadní části jak současného řešení, tak i optimalizovaného řešení. Vyhotovení technické dokumentace včetně výkresu hlavní sestavy optimalizované zadní nápravy a následné ekonomické zhodnocení.

3 Teoretická část a rešerše stavu techniky současného provedení zadních náprav

3.1 Studentská formule [2]

Studentská formule (též ang. Formula Student) je mezinárodní soutěž s účastí převyšující 500 týmů univerzit z celého světa. Cílem tohoto projektu je navrhnout a sestrojit formuli, se kterou se následně soutěží proti ostatním týmům v různých disciplinách a závodech, kde se testují vlastnosti celého vozu, ale i schopnosti týmu. Soutěže se pořádají po celém světě. Ukázkové foto ze závodů na obr. 1.

Tým má za úkol postavit jednomístní formuli dle vlastní představivosti s dosažením co nejlepších jízdních vlastností s velkým důrazem na závodní pravidla, které jsou nutnou

podmínkou v technické přejímce před závody kontrolovaná odbornou porotou. Závody se dělí do dvou kategorií. První kategorie je Statická. Zde má celý tým za úkol odprezentovat konstrukční řešení své formule, ale i technickou vyspělost vozu a ekonomickou stránku. Druhá kategorie je Dynamická, do níž lze vstoupit až po splnění bezpečnostních pravidel a testů vstupní přejímky. Bezpečnost pilota je nejdůležitější, proto je vozidlo při vstupní přejímce zkontrolováno úplně celé, např. brzdný systém, těsnost motoru a palivového systému, rozměry kokpitu, kvalita vyrobených svárů a další. Dynamická část již obsahuje akcelerační souboje známé jako drag race, tj. průjezd okruhu ve tvaru osmičky, a autokrosu, kde se testuje ovladatelnost formule. Hlavním vrcholem této soutěže je pak vytrvalostní závod o délce 22 kilometrů s výměnou pilotů a sledováním spotřeby paliva formule. Tým, který získá za celou soutěž největší počet bodů z 1000 možných, je vítězem těchto závodů.

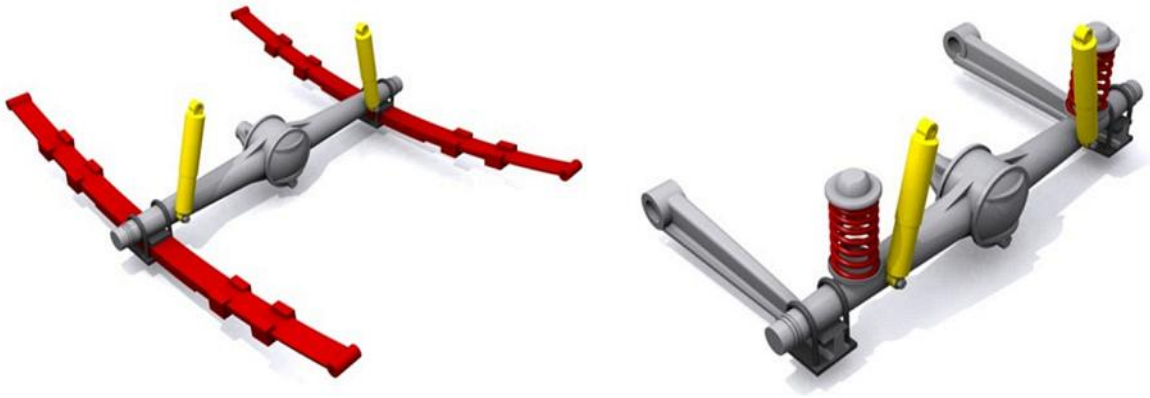
Obr. 1: Foto Studentská formule [2]

3.2 Konstrukční řešení uložení náprav

3.2.1 Závislé zavěšení kol – tuhá náprava

Patří mezi jedno z nejstarších provedení zavěšení kol. Pevná hřídel spojující levé a pravé kolo, osazená brzdovými kotouči, hnacím převodem a ložisky pro uložení. U motokár, kde není zadní náprava odpružená, je tato hřídel přes ložiska pevně spojená k základnímu rámu. U odpružené nápravy vozidla (obr. 2), je tato hřídel uložena pomocí listových pružin (zobrazeno v levé části), nebo vinutých pružin (zobrazeno v pravé části) včetně tlumících prvků. Velkou výhodou závislého zavěšení kol je velká jednoduchost veškerých prvků, které jsou použity. Tím je tento druh i velice levný, a proto se používá na spoustě různých vozidel i v dnešní době. Nevýhoda tohoto uložení spočívá v pevném, neboli závislém zavěšení kol.

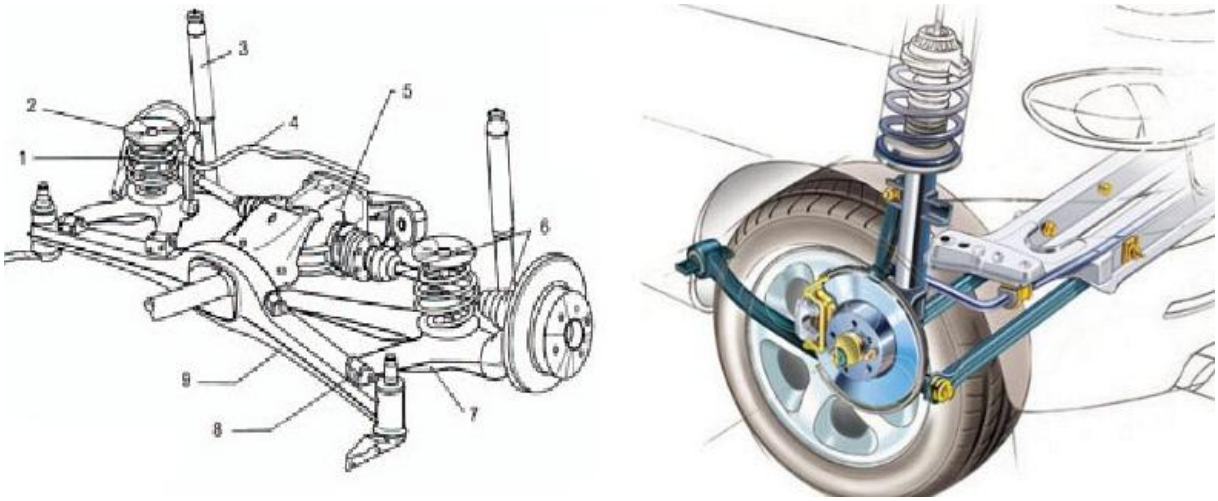
Celková geometrie zavěšení kol je konstantní, bez odklonů a dalších vhodných úhlů nastavení kola.



Obr. 2: Závislé zavěšení – tuhá náprava [3]

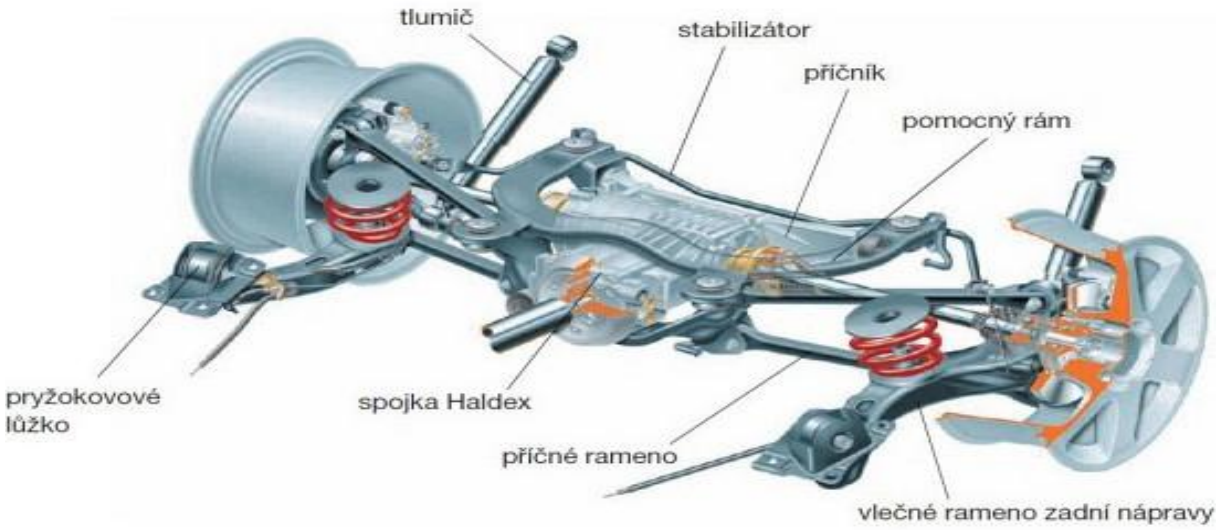
3.2.2 Nezávislé zavěšení kol

Hlavním rozdílem oproti předchozímu druhu zavěšení nápravy je vlastnost, kde levé a pravé uložení kol nejsou pevně spojená, ale pouze propojená například stabilizačními, nebo torzními prvky (obr. 3). Jako nezávislé zavěšení kol je kyvadlová, neboli úhlová náprava, (zobrazena v levé části), používána převážně pro zadní nápravy. Body pro uložení nápravy nejsou ve stejné rovině, a proto při chodu odpružení kola dochází k šikmému pohybu, a tím i ke změně odklonu a rozchodu kol. Proto je třeba zajistit u zadní hnané nápravy proměnnou délku hnací hřídele. V pravé části obrázku je zobrazeno zavěšení kol s použitím vzpěry MacPherson. Tento druh je častěji používán u přední nápravy, kde je třeba zajistit i natáčení kol, ale je možné použít i na zadní nápravu, kde tlumič není uchycen v axiálním uložení. Jedná se o velice jednoduchou sestavu, která v tomto provedení má malé zástavbové prostory. Pomocí této vzpěry je zajištěna přesnější kontrola pohybu kol. Dochází i k utlumení klepání a vibrací, a tím zvyšuje pohodlí jízdy.



Obr. 3: Nezávislé zavěšení kol [3]

Složitějším typem nezávislého zavěšení kol je možnost použití víceprvkové nápravy (obr. 4). Konstrukce tohoto provedení je tvořena použitím více ramen a díky vzájemné nezávislosti všech ramen je možné dosáhnout optimálního kinematického pohybu kola. V současnosti patří mezi nejsložitější zavěšení kol. Vhodným kinematickým uspořádáním je možné dosáhnout namáhání náprav v důsledku zatížení pouze tahem nebo tlakem. Konce náprav je proto nutné opatřit bud pryžovým, nebo kloubovým uložením. Účelem tohoto provedení je snaha o dosažení pohybu kola při propružení pouze ve svislém směru. Kvůli většímu počtu potřebných dílů jsou větší i náklady na výrobu tohoto druhu uložení, ale také i větší prostorová zástavba. Velký důraz je kladen i na zvýšenou tuhost rámu v místech, kde jsou ramena uložena.

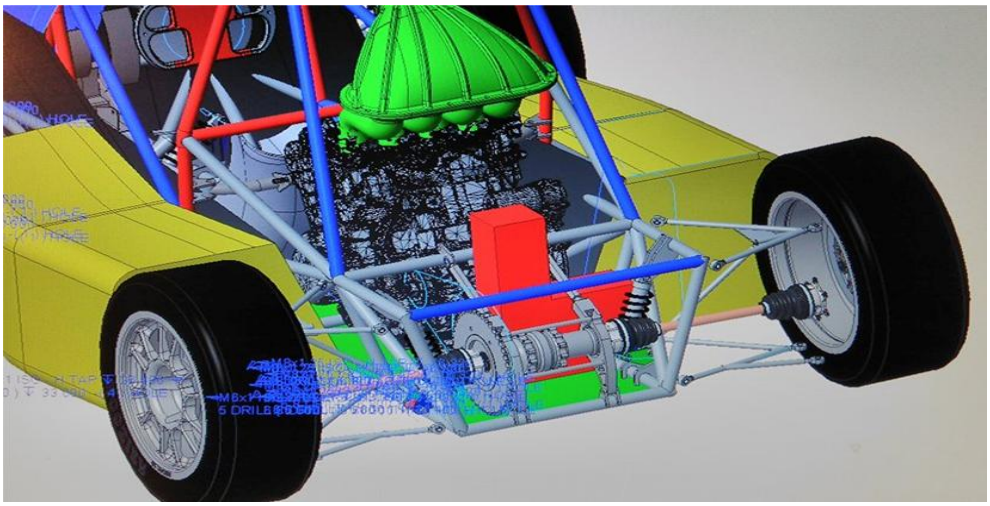


Obr. 4: Víceprvková zadní náprava [3]

3.3 Původní zadní část a inspirace na nové uložení

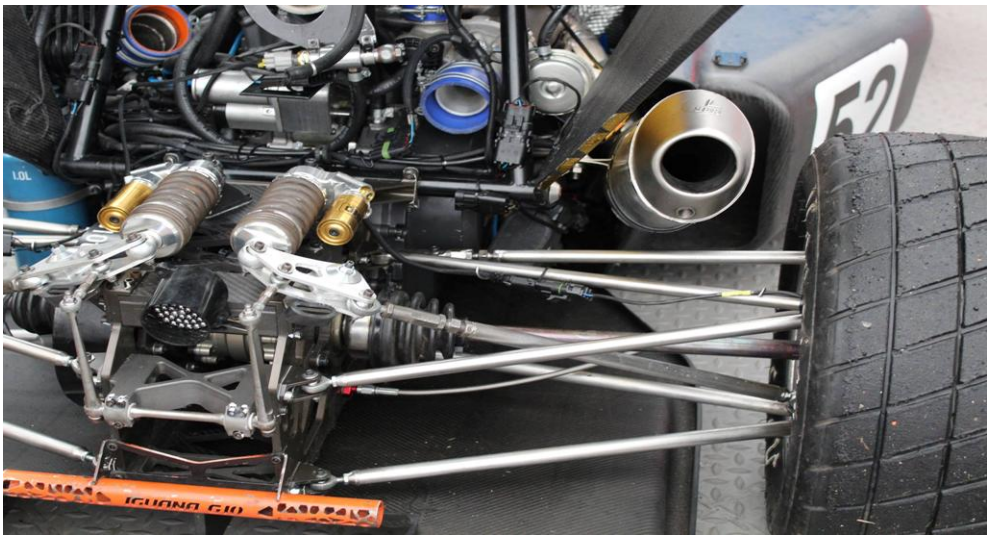
Původní zadní část první vyrobené studentské formule TUL s názvem Eliška. Konstrukční uspořádání zadní části je tvořeno svařenými trubkami do daného tvaru zobrazené na obr. 5. Na trubky byla použita ocel třídy 11 353 o průměru 25mm s tloušťkou stěny 2mm. Celá zadní část byla přivařená ke zbytku rámu, který tvořil zbylou část studentské formule. Pro vhodnou geometrii zadních kol, aby docházelo k správnému naklonění kol při celém chodu odpružení zadní nápravy, byly zvoleny body pro uložení náprav, a svařovaný trubkový rám následně tyto body propojil v uzlových bodech. Konstrukční úchyty pro uložení náprav, diferenciálu, odpružení a vahadel jsou přivařené k trubkovému rámu na místech, kde jsou potřeba, aby plnily svou funkci. Jedná se jednoduché provedení, které spočívá ve správném usazení trubek tak, aby bylo možné následně úchyty přivařit na daná místa. Jelikož není možné dosáhnout vhodného uspořádání trubek, aby se namáhaly pouze tahem nebo tlakem, jsou některé části trubek namáhané také na ohyb. Proto je třeba použít větších rozměrů trubek, aby vydržely dané namáhání i na případný ohyb a nedošlo k deformaci rámu studentské formule. Uchycení kol k rámu zajišťují

dvě trubky v horní části a dvě v dolní části. Odpružení kola je uloženo jako pull-rod tj. tyč spojující vahadlo s nápravou je namáháno na tah.



Obr. 5 Ukázka první zadní části studentské formule TUL

Inspirací pro zadní část druhé studentské formule TUL s názvem Markétka se stala formule, zkonstruovaná jiným týmem (obr. 6). Základem řešení zadní části studentské formule bylo využití desek, které jsou mezi sebou propojené vyztužením. Na desky je možné přidělat úchyty na různá místa (dle potřeby), jak na uložení náprav, tak i na stabilizační a tlumící prvky. Desky tvoří kompletní zadní část studentské formule, která je následně přidělána za pomoci šroubových spojů k trubkovému rámu, který tvoří zbylou část studentské formule. Hlavní výhoda tohoto provedení spočívá v tom, že je možné dosáhnout delších rozměrů nápravy propojující rám s těhlicí na kole. Větší vzdálenost sice způsobuje menší tuhost náprav, ale dojde k výraznému zlepšení geometrie kola v celé oblasti chodu odpružení zadní nápravy. Jedná se o velice komplexní soustavu, obsahující velký počet dílů, bez kterých se formule nemůže obejít, ale také je možné rozšířit o prvky, které pomohou ve zlepšení, jak jízdních, tak i konstrukčních vlastnosti studentské formule.

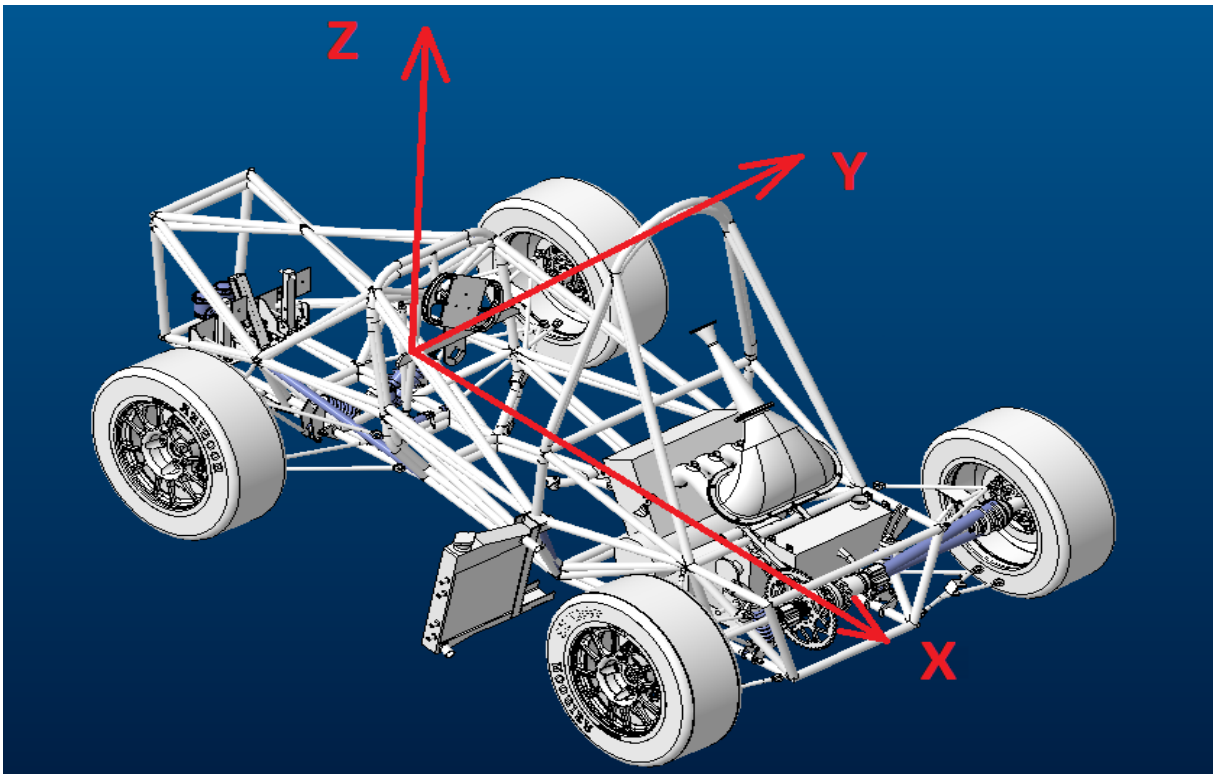


Obr. 6 Ukázka inspirace zadní části studentské formule

4 Konstrukční návrh a řešení zadní nápravy

4.1 Souřadnicový systém studentské formule

Souřadnicový systém je zobrazený na rozpracovaném modelu studentské formule TUL s názvem Eliška (obr. 7). Počátek je vložený do místa osy předních kol. Osa Y je orientovaná ve směru osy kol s kladnou orientací doprava ve směru jízdy studentské formule. Osa X vede středem studentské formule vodorovně se zemí s kladnou orientací dozadu. Osa Z je orientována kolmo k zemi s kladnou orientací vzhůru od osy předních kol. Díky tomuto centrálnímu souřadnicovému systému je možné snazší zavazbení jednotlivých částí studentské formule v jeden velký celek.



Obr. 7: Souřadnicový systém studentské formule TUL Eliška

4.2 Vstupní hodnoty pro zadní část

Jelikož se jedná o úplně nový projekt zadní části studentské formule, která nemá téměř nic společného se stávající verzí, bylo třeba vycházet alespoň z některých vstupních parametrů (tab. 1) kvůli předběžné představě o konstrukci jednotlivých částí. Některé díly není třeba měnit za jiné modely, jelikož se osvědčily, že plní svou funkci velmi dobře, a proto budou použité i v novém projektu studentské formule, například: diferenciál, tlumiče, ložiska na uložení diferenciálu, řetězový převod a také úchyty na bloku motoru, za které bude uchycena celá zadní část. Body pro uložení zadní nápravy na rámu se také využijí jako vstupní parametry, ale hodnoty bude vhodné pozměnit z důvodu lepšího konstrukčního uspořádání

jednotlivých dílů a také ke zlepšení jízdních vlastností a potřebných úhlů odklonu na uložení kola. Body pro uložení náprav jsou uvedeny dle lokálního systému s počátkem v bodě 1. Obdobným stylem jsou také kótovány montážní otvory na motoru pro uchycení zadní části s počátkem ve spodním bodě.

Součást:	Rozměry [mm]			
diferenciál	délka:	235	Max. průměr:	100
ložiska	typ:	61811_2rz , 61810_2rz		
tlumiče	zdvih:	45	délka:	200
	šířka:	55	výška:	90
hodnoty bodů uložení naprav (symetrické rovina X Z)				
1	X	0	Z	0
2	X	250	Z	-23
3	X	217	Z	237
4	X	0	Z	244
Montážní otvory motoru pro uchycení zadní části				
Horní	X	-15	Z	235
Dolní	X	0	Z	0

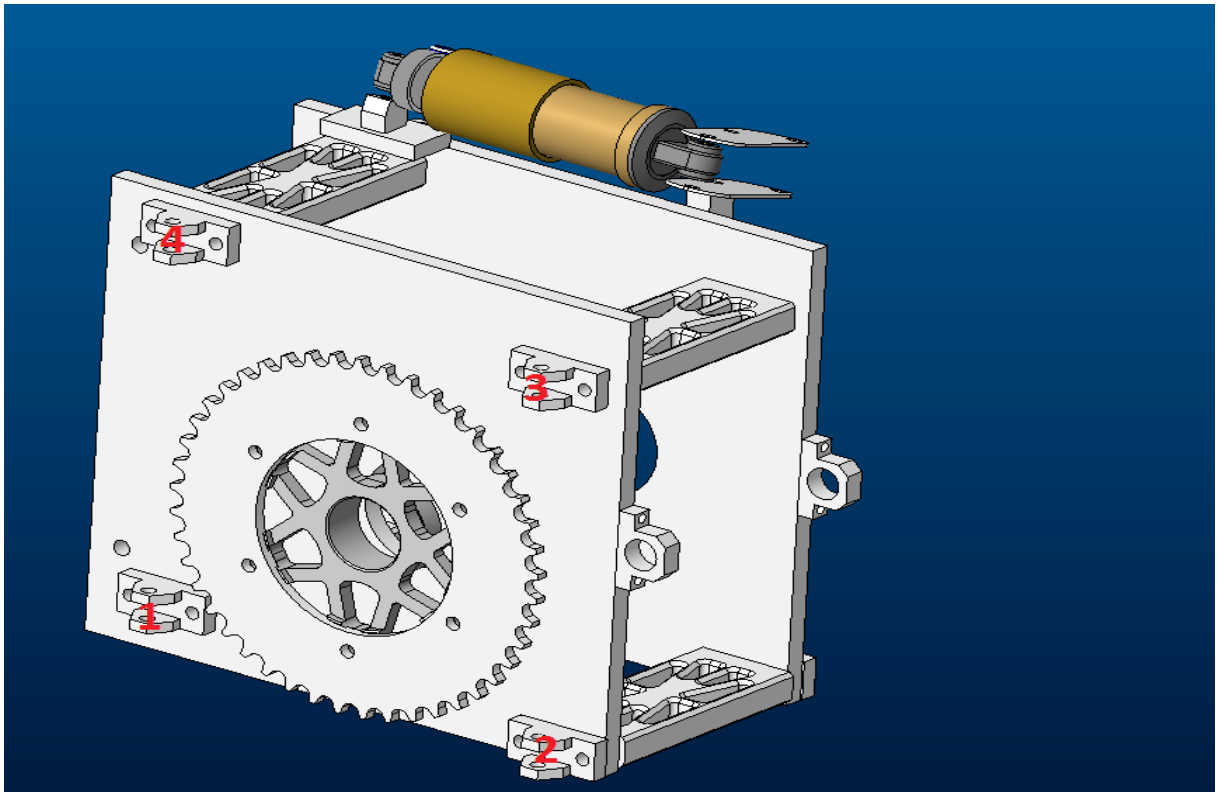
Tab. 1: Vstupní hodnoty

Hodnoty bodů uložení náprav jsou symetrické podle roviny X Z, a proto je možné použít pouze hodnoty z jedné strany. Velikost ve směru Y je momentálně nepoužitelná, protože nové zadní uložení bude tvořeno dvěma deskami vzdálené od sebe o rozměru menším, než se použilo v prvním projektu studentské formule.

4.3 Postup modelování zadní části studentské formule

Pro modelování druhé studentské formule TUL, bylo dohodnuto použít program na modelování s názvem PTC Creo Parametric 3.0 M050, díky snadnému přístupu se školní licencí a vyučováním v tomto programu.

Při prvním návrhu realizace nové zadní části studentské formule (obr. 8), se vycházelo z provedení studentské formule konkurenčního týmu, a také hodnot pro uložení náprav, velikosti řetězového převodu, tlumičů a diferenciálu ze stávajícího projektu studentské formule TUL. Uložení tlumičů je v horní části s funkčním zapojením jako push-rod odpružení, tj. tyč, spojující kolo s vahadlem, je namáhaná na tlak. Propojení desek mezi sebou je zajištěno vzpěrami, které se nachází v úrovni bodů uložení zadní nápravy, protože v těchto místech působí reakční síly od kol. Díky tomu dojde k rozložení zatěžujících sil vzájemně na obě desky. V novém projektu studentské formule TUL je snaha o zlepšení jízdních vlastností, a proto je vhodné zakomponovat také torzní i stabilizační prvky, díky kterým je možné dosáhnout lepší stability formule.

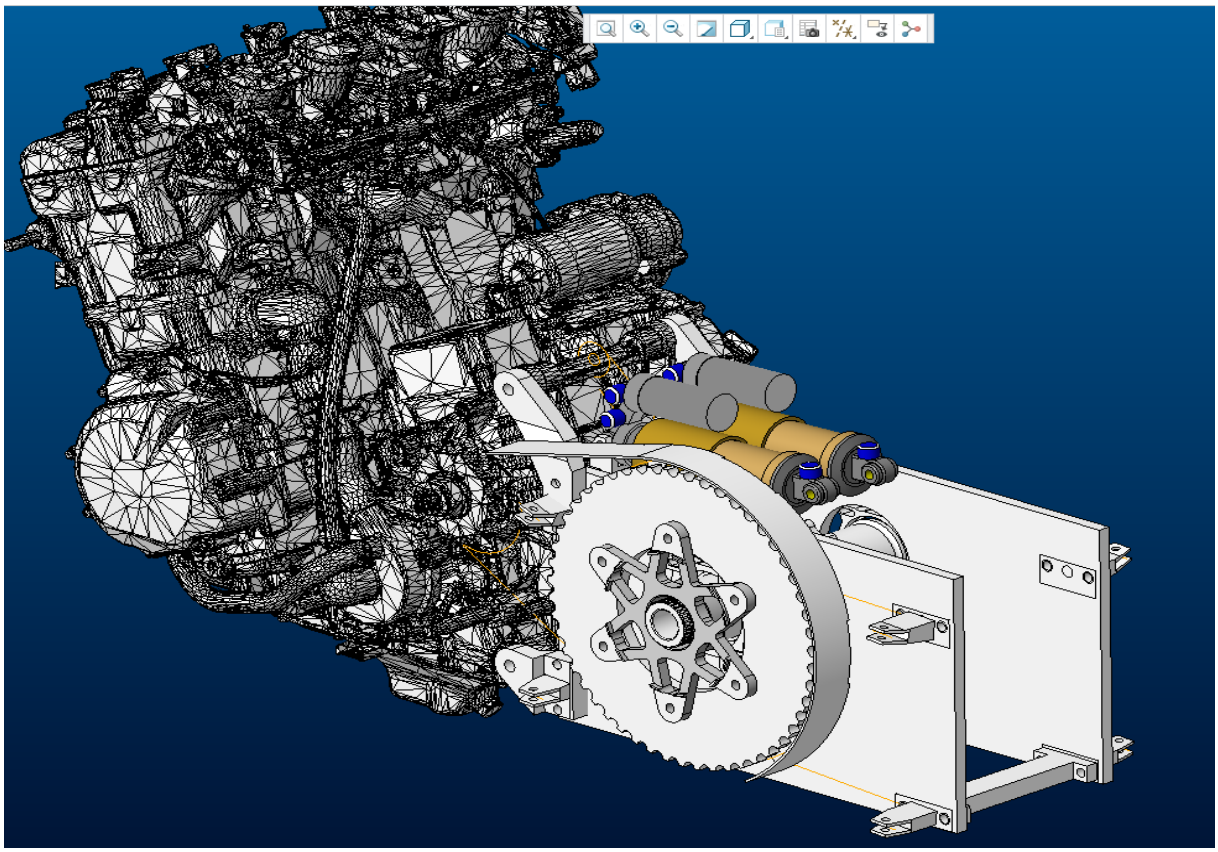


Obr. 8: První návrh zadní části ze vstupních hodnot

Při dalším postupu optimalizace zadní části studentské formule bylo zapotřebí tento celek spárovat se zbytkem nového projektu studentské formule (obr. 9). Jelikož dochází k uložení desek částečně k motoru, a také i ke zbytku rámu, proběhla domluva o uložení polohy motoru na rozložení hmotnosti a lepší polohu těžiště celé formule. Kvůli snaze o jednoduchou demontáž a snadný přístup k motoru je možné zadní část modelovat a párovat pouze k motoru bez ohledu na zbylý rámu studentské formule.

Po připojení a ustanovení polohy zadních desek vůči motoru začala optimalizace bodů pro uchycení zadní nápravy. Pro využití většího počtu rychlostních stupňů motoru, a tím dosáhnutí vhodného rozsahu otáček při rychlostech na závodním okruhu, byla tato vlastnost dosažena změnou převodového poměru u řetězového převodu tím, že počet zubů na rozetě vzrostl ze 46 na 52 zubů. Díky této úpravě došlo ke změně velikost rozety, ale i ochranného krytu, a tak při návrhu je již velikost rozety potřeba zavrhnout do polohy bodu uložení, aby nevznikly možné kolize. Pro zlepšení geometrie kol bylo potřeba dodržení určitých vlastností bodů pro uložení náprav (přímkové propojení horních i spodních bodů, náklony bodů uložení), a také byla snaha o co nejmenší změnu geometrie v důsledku zadního propružení studentské formule. Na odpružení zadní části jsou použity tlumiče z předchozí studentské formule. Kvůli tomuto provedení tlumičů, je potřeba vytvořit uložení jinak, než je naznačeno při prvním návrhu. Uchycení horního oka tlumiče musí být provedeno z obou stran, aby se předešlo deformaci tlumiče. Pro napínání řetězového převodu je použita technika z motocyklu, kde je napínání zajištěno polohou šroubu s aretačními prvky. Ložiska pro uložení diferenciálu budou uchycena v domečcích, které umožní použití této technologie

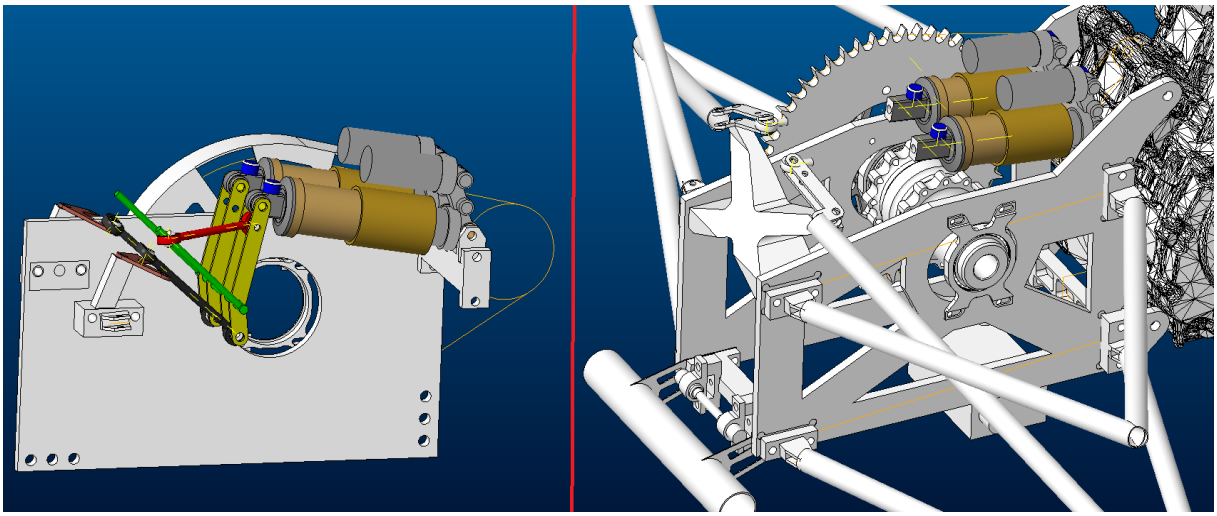
napínání řetězového převodu. Uložení diferenciálu lze také udělat v provedení pevném a následovně je dopínání řešeno pomocí třetího řetězového kolečka, které dopíná řetězový převod.



Obr. 9: Druhý návrh zadní části včetně motoru

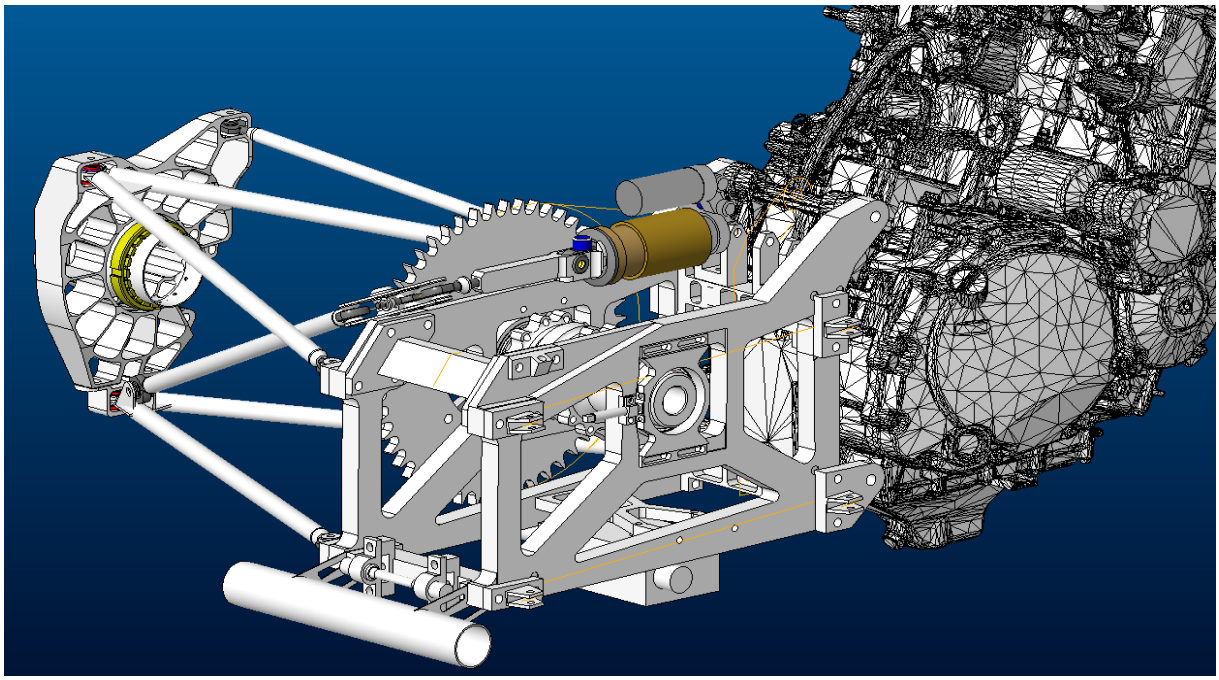
Velkým problémem, který navazoval při návrhu dalšího postupu modelování, bylo spodní oko tlumiče na odpružení, jelikož potřebná délka rozteče ok byla krátká. Postupovaly návrhy možných konstrukčních uspořádání odpružení (obr. 10), aby bylo dosaženo všech potřebných vlastností ke správné funkci odpružení. První návrh, zobrazený v levé části, spočíval ve dvojitém přepákování kvůli správnému natočení vahadel a tím i vyrušením vzniku axiálních sil na uložení a zlepšení geometrických vlastností. Dále již byl zavedený torzní a stabilizační prvek do osy hřídele otáčení vahadel. Tato metoda je konstrukčně možná, ale velice náročná na výrobu. Kvůli velkému počtu potřebných dílů je zde velké riziko poruch, a také vznik vůlí. Druhá metoda, zobrazená v pravé části, je mnohem jednodušší, obsahuje pouze jedno vahadlo, a proto se snižuje možnost výskytu poruch. Jediným velkým problémem je to, že spodní oko je třeba konstrukčně upravit tak, aby byla zvětšena osová vzdálenost mezi úchyty tlumiče, aby tlumič správně fungoval. Vahadla již jsou konstrukčně uchycena na rámu prvkem v podobě písmene X. Torzní a stabilizační tyč je uchycena na zadním spodním propojení desek, které se následně propojí s vahadly. V neposlední řadě je také již zobrazena podoba náprav, kvůli lepší představě a názornosti. V zadní části se nachází

trubka, která slouží ke zvednutí studentské formule a následné montáži či demontáži kol a jiných dílů.



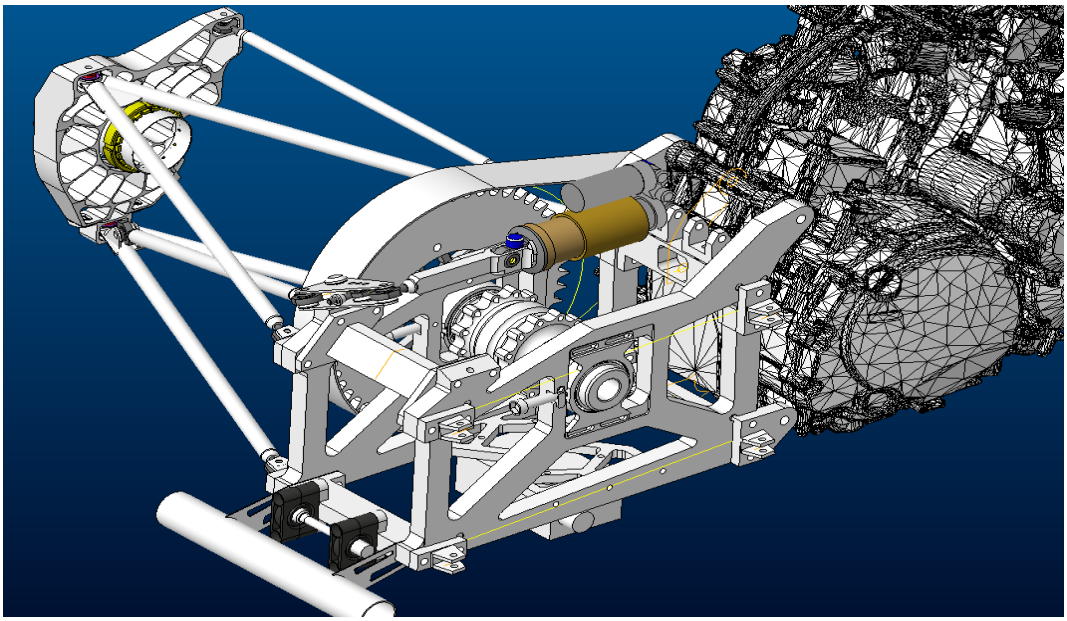
Obr. 10: Volba odpružení zadní nápravy

Při návrhu třetího postupu vzniklo propojení s dalšími prvky studentské formule TUL a to s těhlicí a nápravami (obr. 11). Proběhla kontrola kolizí jednotlivých dílů, ke kterým by mohlo docházet. Prvek pro uložení vahadel již byl také zoptimalizován na co nejlehčí a nejjednodušší díl kvůli snížení výrobních nákladů a zaručení stejné funkce daného dílu. Desky již bylo možné předběžně odlehčit, z důvodu velkého množství již uzavřených hodnot, které se už nebudou měnit, aby se snížila hmotnost celé zadní části studentské formule. Ve spodní části je vytvořen úchyt pro servo, sloužící na řazení rychlostních stupňů, které slouží ke vzájemnému propojení obou desek ve spodní části a zvýšení tuhosti.



Obr. 11: Třetí postup návrhu zadní části

V předposlední verzi (obr. 12), proběhla změna v tloušťce desek z 16mm na 20mm, tím došlo ke zlepšení hodnot určitých částí na modelu, např. uchycení vahadel je přímo vytvořeno na desce a není třeba dalších dílů navíc. Další úpravou je vytvoření drážky a závitu na posouvání polohy diferenciálu. Téměř celá zadní část je již hotová, stačí některé části technologicky upravit, nebo zoptimalizovat, aby díly šli lépe vyrobit, a přitom vydrželi daná namáhání při provozu.



Obr. 12: Před finální verze zadní části druhé studentské formule TUL

4.4 Výpočty

4.4.1 Volba a rozbor zatěžujících sil

Při návrhu jednotlivých prvků bylo třeba určit maximální, kritickou velikost zatěžujících sil, které vzniknou při jízdě studentské formule, jak na závodním okruhu, tak i při běžné tréninkové, nebo zkušební jízdě. Tyto síly se následně transformují a působí na jednotlivé díly zadní části studentské formule. Při špatném návrhu může dojít k deformaci a poškození jednotlivých dílů.

Jelikož nejsou dosud žádné reálné záznamy velikostí sil, které působí na jednotlivé díly studentské formule v provozu, bylo třeba tyto síly navrhnout. Při návrhu zatěžujících sil se vycházelo z rozložení hmotnosti studentské formule na jednotlivá kola při provozních stavech (obr. 13), tj. akcelerace a zatáčení. Usoudilo se, že při těchto situacích dochází při běžném provozu k největšímu výskytu působících sil na jednotlivá kola. Přesnost výsledných sil ovlivňuje spousta okolních faktorů, kterými jsou například: stav vozovky, případné nerovnosti, proměnná přilnavost pneumatik k povrchu vozovky, ale také i špatný styl jízdy při vyjetí z vozovky, nebo najetím do pevných překážek. Tyto nepříznivé děje se braly v potaz. Částečně jsou zahrnuty patřičnou bezpečností, ale nedošlo k celému pokrytí všech

nepříznivých dějů, které mohou vzniknout. Pro určení velikosti sil na jednotlivá kola, se vycházelo z maximálního rozložení do určité míry tak, že nedojde k překlopení vozidla v důsledku nízkého celkového těžiště studentské formule. Proběhlo zvolení hodnot pro rozložení hmotnosti jak přední a zadní nápravu při akceleraci, tak i na levou a pravou stranu při zatáčení. Dále pro kritickou hodnotu se použil stav, kde dochází současně k akceleraci a k zatáčení studentské formule. Tento stav je považován za maximální možný děj, kterému se zadní část studentské formule může vystavit. Na obrázku jsou ukázány 4 různé stavy rozložení hmotnosti celé studentské formule na jednotlivá kola. První stav statický, studentská formule je v klidu. Při tomto stavu se hmotnost celé formule rovnoměrně rozděluje na jednotlivá kola. Při druhém stavu dochází k akceleraci a uvedení studentské formule do pohybu vpřed. Při tomto ději je zvoleno rozložení hmotnosti v poměru přední náprava ku zadní nápravě 10 : 90. Kvůli tomuto rozložení dojde k odlehčení přední nápravy a přesunutí hmotnosti na zadní nápravu, ale nedochází k celkovému odlehčení přední nápravy, tj. studentská formule se nedokáže převrátit, protože dříve dojde k utržení zadních kol od vozovky a následnému prohrábnutí. Třetí stav je zaměřen na zatáčení, neboli průjezd zatáčkou, kde dochází k přesunutí hmotnosti převážně na pravou, nebo levou stranu kol studentské formule. Zde také z důvodu nízkého těžiště se zvolilo rozložení hmotnosti při zatáčení na jednu a druhou stranu v poměru nižším o velikosti 20 : 80. Při větším poměru rozložení hmotnosti dojde ke smyku studentské formule a tím k zamezení překlopení formule na bok. Pro čtvrtý stav došlo ke spojení kombinace zatáčení a akcelerace. Tento stav se muže vyskytnout při opouštění zatáčky na závodním okruhu se snahou o rychlé dosažení větší rychlosti studentské formule. Hmotnost formule je v daných poměrech rozložena na jednotlivá kola a tím je i určeno maximální možné rozložení sil na jednotlivá kola.

Obr. 13: Rozložení hmotnosti studentské formule na jednotlivá kola

Následují jednotlivé výpočty sil, které působí na jednotlivá kola v důsledku možného rozložení hmotnosti studentské formule. Pro určení potřebných sil na jednotlivé díly zadní části, je třeba kontrolovat stav akcelerace a stav akcelerace se zatáčením. Tyto stavy jsou největším zatížením pro zadní část studentské formule, a také pro jednotlivé prvky. Jako celková hmotnost studentské formule, včetně řidiče a hmotnosti vytvořené přítlakem aerodynamických prvků, je zvolena velikost 330Kg. Pro výpočet jak tečných sil na zadní kola pro stav akcelerace (4.4.1.1) a stav zatáčení + akcelerace pro levé kolo (4.4.1.2), pro pravé kolo (4.4.1.3), tak i normálových sil pro stav akcelerace (4.4.1.4), a stav zatáčení + akcelerace levé kolo (4.4.1.5) a pravé kolo (4.4.1.6) ve směru jízdy, které působí na styku pneumatiky s vozovkou, je třeba zvolení třecího koeficientu. Tato velikost je zvolena f = 2, protože jsou použity závodní slicky. Tyto pneumatiky se používají na závodní okruhy, mají vysokou přilnavost k vozovce, kde dochází k tzv. přilepení pneumatiky k povrchu vozovky.

$$F_{n1.1} = F_{n1.2} = m * g * \frac{0.9}{2} = 330 * 9.81 * \frac{0.9}{2} = 1\,460\ N \quad (4.4.1.1)$$

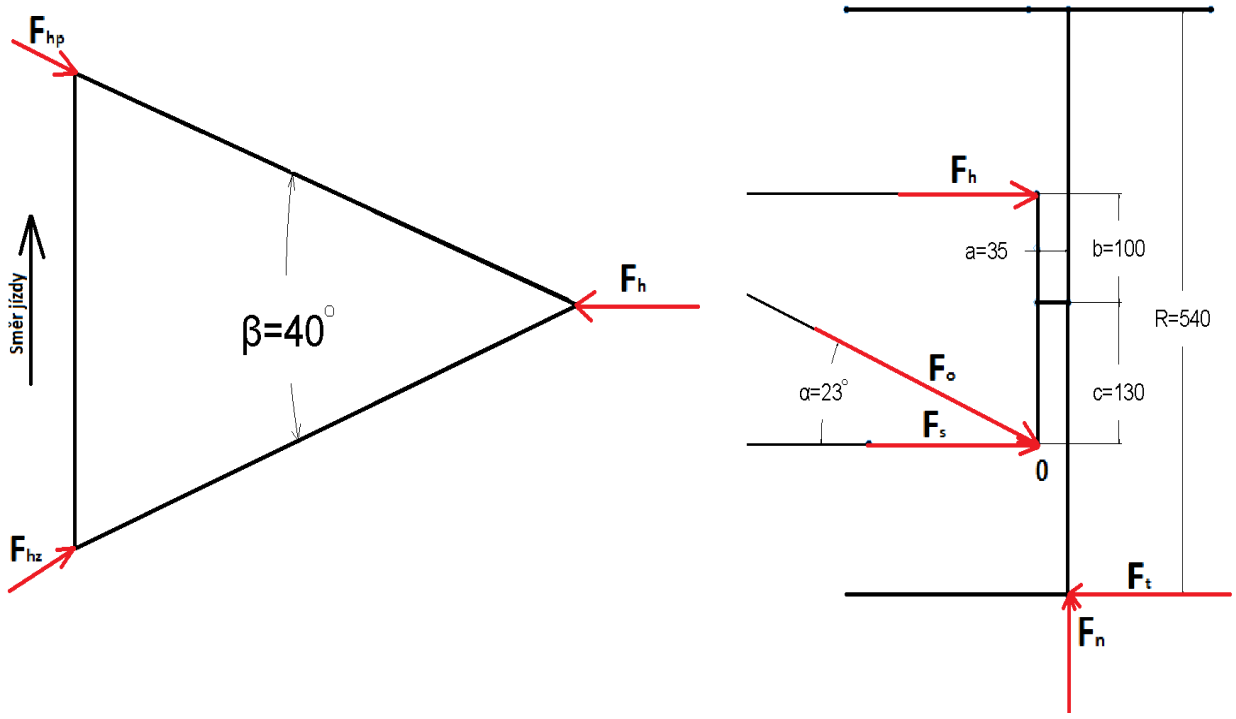
$$F_{n2.1} = m * g * 0.18 = 330 * 9.81 * 0.18 = 583\ N \quad (4.4.1.2)$$

$$F_{n2.2} = m * g * 0.72 = 330 * 9.81 * 0.72 = 2\,330\ N \quad (4.4.1.3)$$

$$F_{t1.1} = F_{t1.2} = F_{n1.2} * f = 1\,460 * 2 = 2\,920\ N \quad (4.4.1.4)$$

$$F_{t2.1} = F_{n2.1} * f = 583 * 2 = 1\,170\ N \quad (4.4.1.5)$$

$$F_{t2.2} = F_{n2.2} * f = 2\,330 * 2 = 4\,660\ N \quad (4.4.1.6)$$



Obr. 14: Výpočetní schéma uchycení zadního kola

Pro výpočet sil, které působí v jednotlivých bodech uložení zadní nápravy na deskách rámu, je třeba silové schéma pro určení velikosti ramen a těhlice, tím i momentová a silová rovnováha pro rozložení působících sil na jednotlivé body uložení. Na obr. 14 je na levé straně zobrazená skica ramen spojující zadní desku s těhlicí v rovině XY a na pravé straně je zobrazená skica těhlice, kola a znázorněných bodů uložení náprav v rovině ZY. Jednotlivé velikosti jsou uvedené v milimetrech.

Rovnice rovnováhy pro kolo, jsou vypsané pro jednotlivé směry působení X (4.4.1.7), Y (4.4.1.8) a moment kolem bodu 0 (4.4.1.9).

$$\uparrow X: \quad F_n - F_o * \sin\alpha = 0 \tag{4.4.1.7}$$

$$Y^{\rightarrow}: \quad F_h + F_o * \cos\alpha + F_s - F_t = 0 \tag{4.4.1.8}$$

$$M_O^{\rightarrow}: \quad F_h * (c + b) + F_t * (R - c) - F_n * a = 0 \tag{4.4.1.9}$$

Pokračuje vyjádření jednotlivých složek sil na spodní bod uložení kola (4.4.1.10), horní bod uložení (4.4.1.11) a odpružení nápravy (4.4.1.12).

$$F_s = F_t - \frac{F_n * a - F_t * (R - c)}{(c + b)} - \frac{F_n}{\sin\alpha} * \cos\alpha \tag{4.4.1.10}$$

$$F_h = \frac{F_n * a - F_t * (R - c)}{(c + b)} \tag{4.4.1.11}$$

$$F_o = \frac{F_n}{\sin\alpha} \tag{4.4.1.12}$$

Pro výpočet sil působící v místech uložení na rámu, je potřeba vytvoření rovnic pro hodní body a spodní body uložení. Jelikož uložení náprav je symetrické, přední a zadní body mají stejnou velikost síly jak nahoře (4.4.1.13), tak i dole (4.4.1.14). Následují vzorce pro výpočet velikosti sil horního uložení (4.4.1.15) a spodního uložení (4.4.1.16).

$$F_{hp} = F_{hz} \tag{4.4.1.13}$$

$$F_{sp} = F_{sz} \tag{4.4.1.14}$$

$$F_{hp} = \frac{F_h}{2} * \cos\left(\frac{\beta}{2}\right) \tag{4.4.1.15}$$

$$F_{sp} = \frac{F_s}{2} * \cos\left(\frac{\beta}{2}\right) \tag{4.4.1.16}$$

V tab. 2 je přehled jednotlivých sil na uložení zadních kol z předchozích vzorců pro stav akcelerace a stav zatáčení + akcelerace. Je zde i rozdělení sil na levou stranu (značené číslem 1) a na pravou stranu (značené číslem 2).

Stav	Jednotlivé síly na těhlici	Velikost síly na těhlici [N]	Jednotlivé síly na rámu	Velikost sil na rámu [N]
Akcelerace	Fs1	-4086	Fs1.p	-1943
			Fs1.z	-1943
	Fs2	-4086	Fs2.p	-1943
			Fs2.z	-1943
	Fh1	223	Fh1.p	106
			Fh1.z	106
	Fh2	223	Fh2.p	106
			Fh2.z	106
	Fo1	4130		
	Fo2	4130		
Zatáčení + akcelerace	Fs1	1625	Fs1.p	773
			Fs1.z	773
	Fs2	6448	Fs2.p	3066
			Fs2.z	3066
	Fh1	-1997	Fh1.p	-950
			Fh1.z	-950
	Fh2	-7952	Fh2.p	-3782
			Fh2.z	-3782
	Fo1	1650		
	Fo2	6592		

Tab. 2: Přehled působících sil v bodech uložení při jednotlivých stavech

Další potřebný důležitý výpočet je velikost maximálního krouticího momentu, který je studentská formule schopná přenést přes kola k vozovce. Tato velikost je vyjádřena ve vzorcích (4.4.1.17) pro akceleraci a (4.4.1.16) pro zatáčení + akceleraci, kde je třeba počítat s nejmenší velikostí třecí síly.

$$Mk_{akcelerace} = F * R = F_{t1.1} * R = 2\,920 * 0.54 = 1\,580\ \text{Nm} \quad (4.4.1.17)$$

$$Mk_{zataceni+akcelerace} = F * R = F_{t1.1} * R = 1\,170 * 0.54 = 632\ \text{Nm} \quad (4.4.1.18)$$

4.4.2 Řetězový převod

Vstupními parametry pro výpočet řetězového převodu, jsou hodnoty zapsané v tab. 3. Hlavním parametrem a požadavkem je počet zubů rozety a řetězového kolečka, kvůli využití většího počtu převodových poměrů na závodním. Dalším parametrem je poloha výstupní hřídele z motoru a diferenciálu, na kterém je uchycena rozeta. Použití řetězu pro tento převod je zvolen typ, který se používá k tomuto motoru v originálním stavu a také v první verzi studentské formule TUL. Jako další vstupní parametry jsou velikosti přenášeného krouticího momentu a také i volba maximální možné délkové deformace řetězu způsobené vytaháním o přípustné velikosti do 3%.

	souřadnice uložení [mm]		počet zubů	rozteč řetězu [mm]
	X	Z		
Pastorek	1337	52	13	15,875
Rozeta	1560	15	52	

Tab. 3: Vstupní parametry pro řetězový převod

Z počtů zubů jsou vypočteny roztečné průměry jak pastorku (4.4.2.1) tak i rozety (4.4.2.2). Pro výpočet délky řetězu a následně počet článků je třeba koeficient Beta (4.4.2.3) a osovou vzdálenost (4.4.2.4), která se následně dosadí do vztahu pro výpočet délky řetězu (4.4.2.5). Počet článků (4.4.2.6), je vždy celé nejlépe sudé číslo. Diferenciál, který drží rozetu, je uložen v posuvném nastavovacím uložení. Proto je potřeba odhadnout velikost souřadnice posunutí rozety ve směru X, aby byl řetěz správně předepnut, i po jeho vytažení určující konečnou polohu pro dopínání. Tyto výsledky jsou znázorněné v tab. 4.

$$D_1 = \frac{p * Z_1}{\pi} = \frac{15{,}875 * 13}{\pi} = 65{,}73\ mm \tag{4.4.2.1}$$

$$D_2 = \frac{p * Z_2}{\pi} = \frac{15{,}875 * 52}{\pi} = 262{,}90\ mm \tag{4.4.2.2}$$

$$\beta = \operatorname{asin} \frac{D_2 - D_1}{2 * a} \tag{4.4.2.3}$$

$$a = \sqrt{(X_{pastorek} - X_{rozeta})^2 + (Y_{pastorek} - Y_{rozeta})^2} \tag{4.4.2.4}$$

$$L = \left(\pi - \frac{\beta}{2}\right) * \frac{D_1}{2} + \left(\pi + \frac{\beta}{2}\right) * \frac{D_2}{2} + a * \cos\frac{\beta}{2} \tag{4.4.2.5}$$

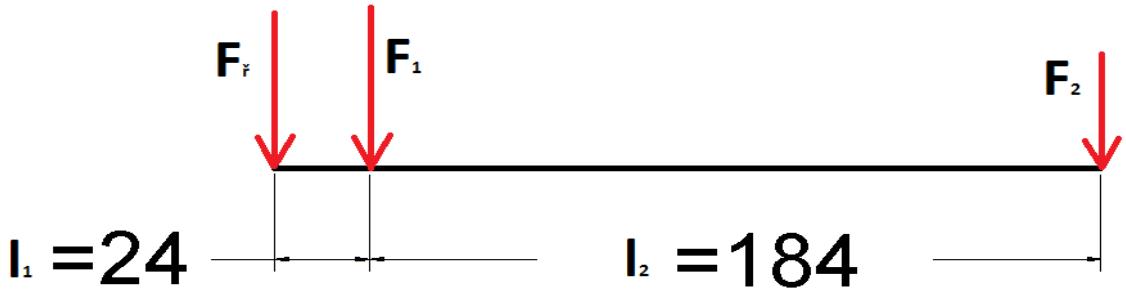
$$j = \frac{L}{p} \tag{4.4.2.6}$$

Délka řetězu L [mm]	984,25
Počet článků j	62
Souřadnice X	
Nový stav [mm]	1569
Prodloužený stav [mm]	1583
Délka nastavovacího prostoru [mm]	24

Tab. 4: Parametry řetězového převodu

4.4.3 Výpočet sil působících na diferenciál v uložení

Nedílnou součástí výpočtu jsou síly, působící v místech uložení hřídele diferenciálu k deskám, které vznikají od řetězového převodu. Tyto síly se využijí při návrhu výpočtu simulace celé zadní části studentské formule, pro stav akcelerace a stav akcelerace + zatáčení. Na obr. 15, je zobrazené silové schéma hřídele pro výpočet. Uvedené rozměry jsou v milimetrech.



Obr. 15: Silové schéma hřídele

Z krouticího momentu při jednotlivých stavech je určena velikosti síly, působící v místě rozety (4.4.3.1). Dalším krokem je již přepočet této síly z obecné rovnice vektorové (4.4.3.2) a momentové (4.4.3.3) do pravého uložení (4.4.3.4) a levého uložení (4.4.3.5) ve směru jízdy. Velikosti těchto působících sil při jednotlivých stavech jsou uvedené v tab. 5.

$$F_{\check{r}} = \frac{Mk}{\frac{D}{2}} \tag{4.4.3.1}$$

$$\uparrow X: F_{\check{r}} + F_1 + F_2 = 0 \tag{4.4.3.2}$$

$$M_1^{\rightarrow}: -F_{\check{r}} * l_1 + F_2 * l_2 = 0 \tag{4.4.3.3}$$

$$F_2 = F_{\check{r}} * \frac{l_1}{l_2} \tag{4.4.3.4}$$

$$F_1 = -F_{\check{r}} * (1 + \frac{l_1}{l_2}) \tag{4.4.3.5}$$

Stav	Akcelerace	Akcelerace + Zatáčení
M_k [Nm]	1 580	632
$F_{\check{r}}$ [N]	6010	2404
F_2 [N]	784	314
F_1 [N]	-6794	-2718

Tab. 5: Velikosti sil v místech uložení hřídele diferenciálu

4.4.4 Pevnostní výpočet jednotlivých šroubových spojení včetně dílů

Jelikož zadní část studentské formule je z velké části spojena pomocí šroubového spojení, je třeba tyto šroubové spoje správně navrhnout tak, aby při dosažení maximálních možných sil nedošlo k překročení dovolených napětí a tím destrukci šroubového spoje. Při výpočtu jsou kontrolovány šroubové spoje na síly, které se odvodily a výše uvedly, pro jednotlivá místa na uložení.

V první řade, je třeba zkontrolovat šroubové spojení náprav jak na střih (4.4.4.1), tak i na otlačení styčných ploch (4.4.4.2). Velikost sil je zvolena největší možná síla, která na uložení zadní nápravy v místě uložení bude působit. Šroubové spoje, které propojují uložení náprav s deskou a propojovacími členy, je možné kontrolovat pouze na tah (4.4.4.3), jelikož jinému namáhání nejsou vystaveny.

$$\tau = \frac{F}{2 * \frac{\pi * d^2}{4}} = \frac{3782}{2 * \frac{\pi * 6^2}{4}} = 66{,}88\ MPa \tag{4.4.4.1}$$

$$p = \frac{F}{s} = \frac{F}{d * t * 2} = \frac{3782}{6 * 4 * 2} = 78{,}8\ MPa \tag{4.4.4.2}$$

$$\sigma = \frac{F}{s} = \frac{F}{2 * \frac{\pi * d_3^2}{4}} = \frac{3782}{2 * \frac{\pi * 6{,}46^2}{4}} = 57{,}7\ MPa \tag{4.4.4.3}$$

Šrouby jsou voleny z materiálu pevnostní třídy 10.9 se smluvním napětím na mezi kluzu o velikosti 900 MPa. Šroubové spoje vyhovují na dané namáhání. Domečky pro uložení náprav se kontrolují také na otlačení styčných ploch (4.4.4.2), ale i na tah v nejužším místě průřezu (4.4.4.4).

$$\sigma = \frac{F}{s} = \frac{F}{s * t * 2 * 2} = \frac{3782}{6 * 4 * 2 * 2} = 39.4\ MPa \tag{4.4.4.4}$$

Dalším výpočet je uložení tlumiče otočného šroubu na střih (4.4.4.5), kde i je pákový poměr pro přepočet velikosti síly a horní uložení tlumiče také na střih (4.4.4.6). Uložení vahadla je také namáháno na střih, zanedbáváme ohyb v důsledku velké styčné dosedací plochy pro uložení (4.4.4.7).

$$\tau = \frac{F * i}{\frac{\pi * d^2}{4}} = \frac{6592 * 1{,}2}{\frac{\pi * 8^2}{4}} = 157{,}37\ MPa \tag{4.4.4.5}$$

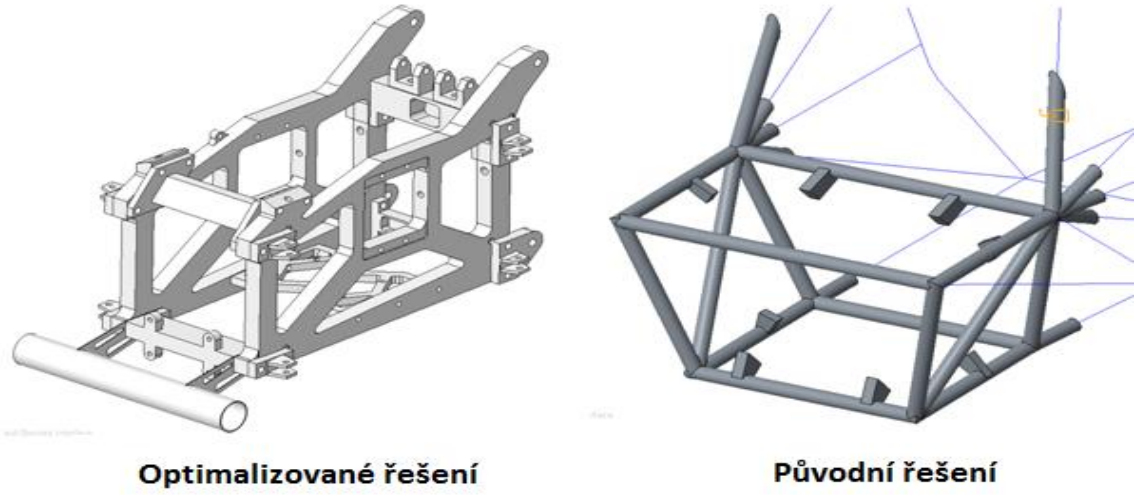
$$\tau = \frac{F * i}{2 * \frac{\pi * d^2}{4}} = \frac{6592 * 1{,}2}{2 * \frac{\pi * 8^2}{4}} = 78{,}69 MPa \tag{4.4.4.6}$$

$$\tau = \frac{\sqrt{(F * i)^2 + F^2}}{\frac{\pi * d^2}{4}} = \frac{\sqrt{(6592 * 1{,}2)^2 + 6592^2}}{\frac{\pi * 8^2}{4}} = 204{,}85\ MPa \qquad (4.4.4.7)$$

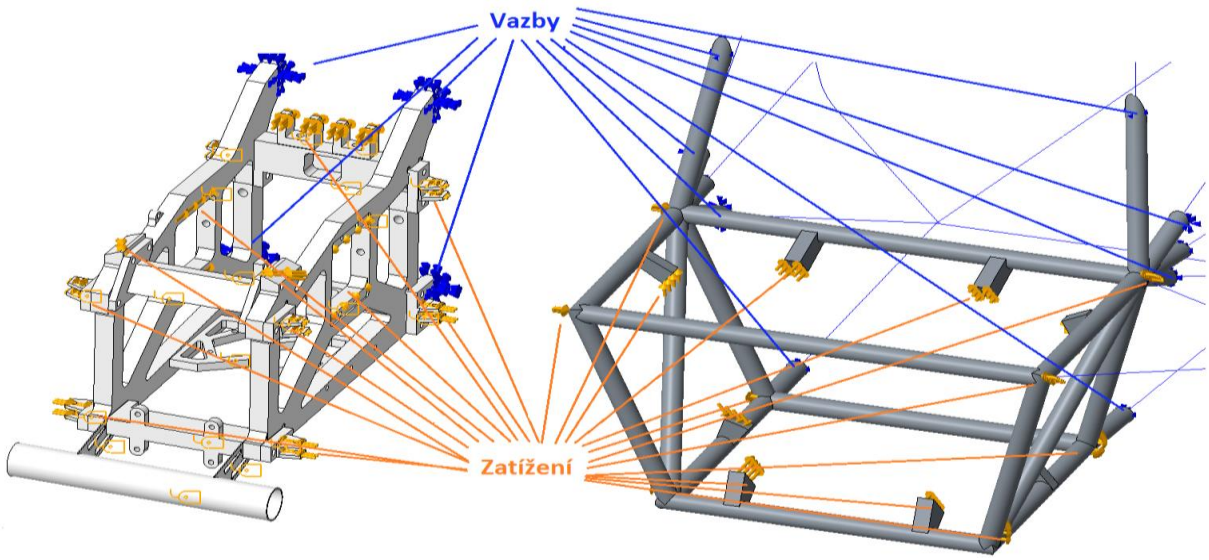
Z výše uvedených výpočtů, veškeré šroubové spoje i domečky pro uložení náprav vydrží kritické největší dovolené namáhání.

4.4.5 Simulace celé zadní části studentské formule

Simulace zadní části studentské formule byla provedena v programu PTC Creo Simulate 3.0 M050 na zjednodušeném modelu celé zadní části (obr. 16). Model původního řešení (zobrazené v pravé části) a optimalizovaného řešení (zobrazené v levé části) obsahuje pouze důležité prvky ovlivňující výsledek výpočtu. Díly, například vahadla, odpružení, diferenciál atd., již v modelu jsou zahrnuty pouze jako silové působení těchto dílů na zadní část formule.

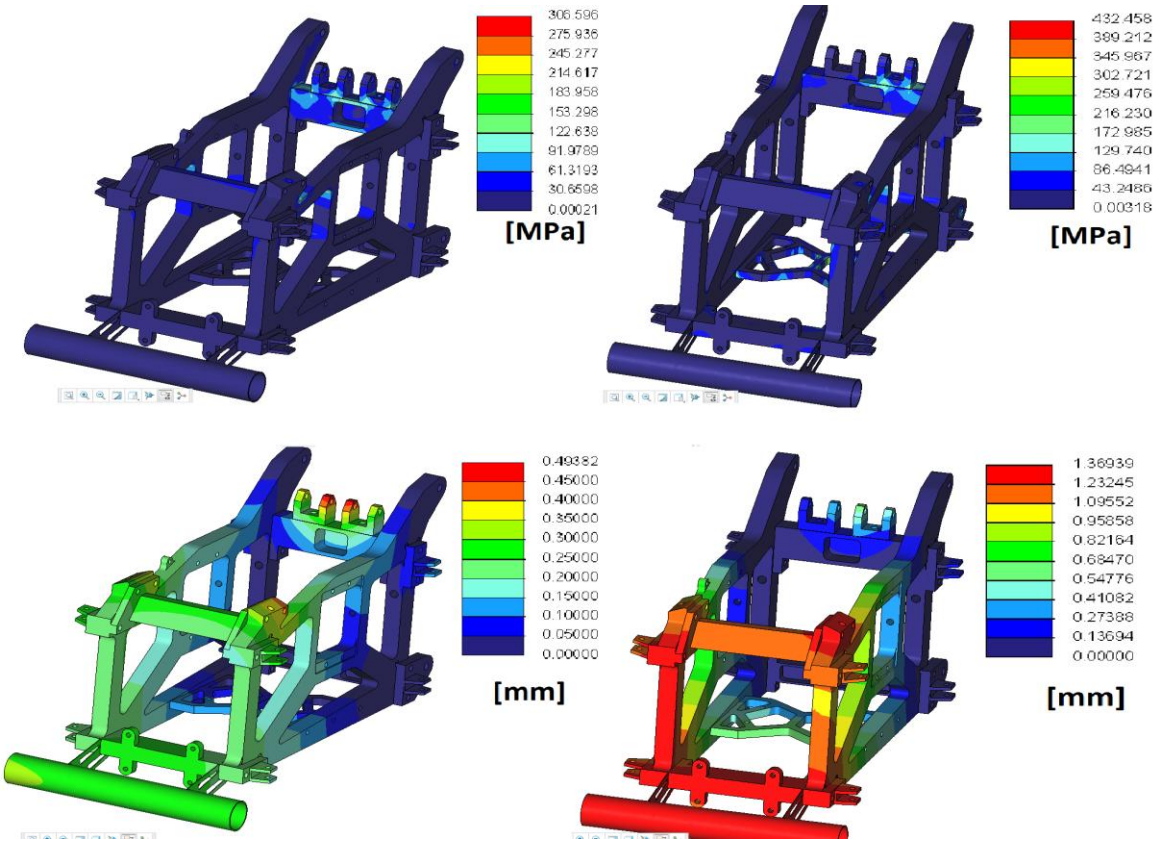


Obr. 16: Zjednodušený model pro simulaci



Obr. 17: Okrajové podmínky modelu včetně zatížení pro jednotlivé stavy

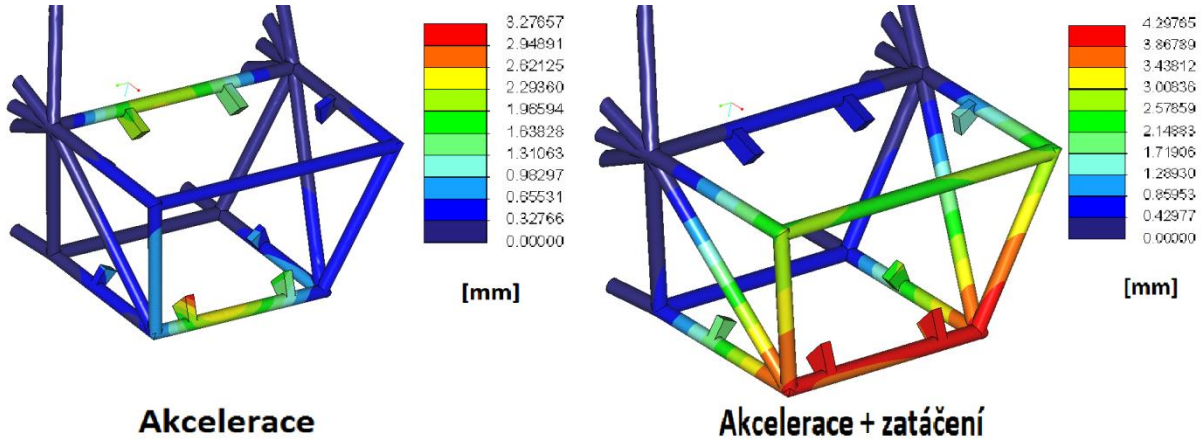
Modely budou kontrolovány při stavu akcelerace a stavu akcelerace + zatáčení. Pro tyto dva stavy jednotlivé síly působí ve stejných místech, ale s různou velikostí. Jednotlivé modely včetně zakomponovaných sil, vazeb a zadaných materiálů jsou zobrazeny na obr. 17, kde v levé části je zobrazeno optimalizované řešení a v pravé části je zobrazené původní řešení. Při dalším postupu simulace zadní části, již bylo možné spustit výpočet a poté vyhodnotit výsledky z daného simulování. Výsledky pro optimalizované řešení (obr. 18), kde výsledky jsou pro stav akcelerace zobrazené na levé straně a stav akcelerace + zatáčení zobrazené na pravé straně. V horní části obrázku jsou zobrazená napětí a ve spodní části deformace na dané namáhání. Pro stav akcelerace, je možné si povšimnout symetrického rozložení namáhání zadní části, krom uložení diferenciálu. Velké namáhání vzniká v místě uložení horního uchycení odpružení a také v blízkosti vahadel. Při tomto stavu zadní část je vystavována napětí, která dosahují hodnoty okolo 110 MPa, ve špičkách až 300 MPa s maximální deformací v místě uložení ok tlumiče okolo 0.5mm. Při stavu akcelerace + zatáčení vlevo, je zadní část namáhána převážně na vnější stranu, a proto je více namáhané horní uložení oka tlumiče na vnější straně. Jelikož dochází k tzv. kroucení zadní části, dochází k velkému namáhání propojovacího členu mezi deskami ve spodní části, kde je uloženo servo řazení. Při tomto stavu dochází k většímu namáhání zadní části studentské formule, jelikož dochází k nesymetrickému zatížení. Zadní část je vystavována napětí okolo 140 MPa, na spodním držáku serva kolem 170 Mpa a v lokálních bodech až 430 MPa. Deformace bodů uložení nápravy v zadní části dosahuje velikosti 0.8mm a v úrovni trubky velikost 1.4mm.



Obr. 18: Simulace pro stav akcelerace (vlevo) a stav akcelerace + zatáčení (vpravo): rozložení napětí (nahoře), rozložení deformace (dole)

Materiál použitý na zadní část studentské formule je dural s názvem EN AW 7022 T6 [5] o minimální mezi pevnosti o velikosti 480 MPa, kde smluvní mez kluzu je na hodnotě 410 MPa a mez únavy kolem 160 MPa. Zadní část studentské formule pro stav akcelerace vyhovuje s velkou bezpečností, ale pro stav akcelerace + zatáčení již tato bezpečnost klesá. Zadní část je podle simulace lokálně vystavena napětí převyšující smluvní mez kluzu, ale nedochází k překročení zaručené mezi pevnosti pro tento vybraný druh materiálu.

V dalším kroku byla provedena také simulace stávající zadní části studentské formule (obr. 19), kde se vycházelo ze stejných velikostí sil na jednotlivá kola, ale následně došlo k přepočítání sil v důsledku jiného geometrického uspořádání. Velikost napětí při těchto stavech nehrála zásadní roly pro jednotlivé propojovací trubky, hlavní kritickým problémem bylo nevhodné uložení odpružení a diferenciálu, které trubku následně namáhaly nejenom na tah, nebo tlak, ale také převážně na ohyb. Deformace součastné zadní části při stavu akcelerace (zobrazené v levé části), lokálně v uložení diferenciálu, přesahovala velikost 3 mm a při stavu akcelerace + zatáčení (zobrazené v pravé části), se hlavní deformace nacházela v místě uložení zadních spodních bodů nápravy o velikosti 4.3mm.



Obr. 19: Simulace stávající zadní části studentské formule TUL s názvem Eliška

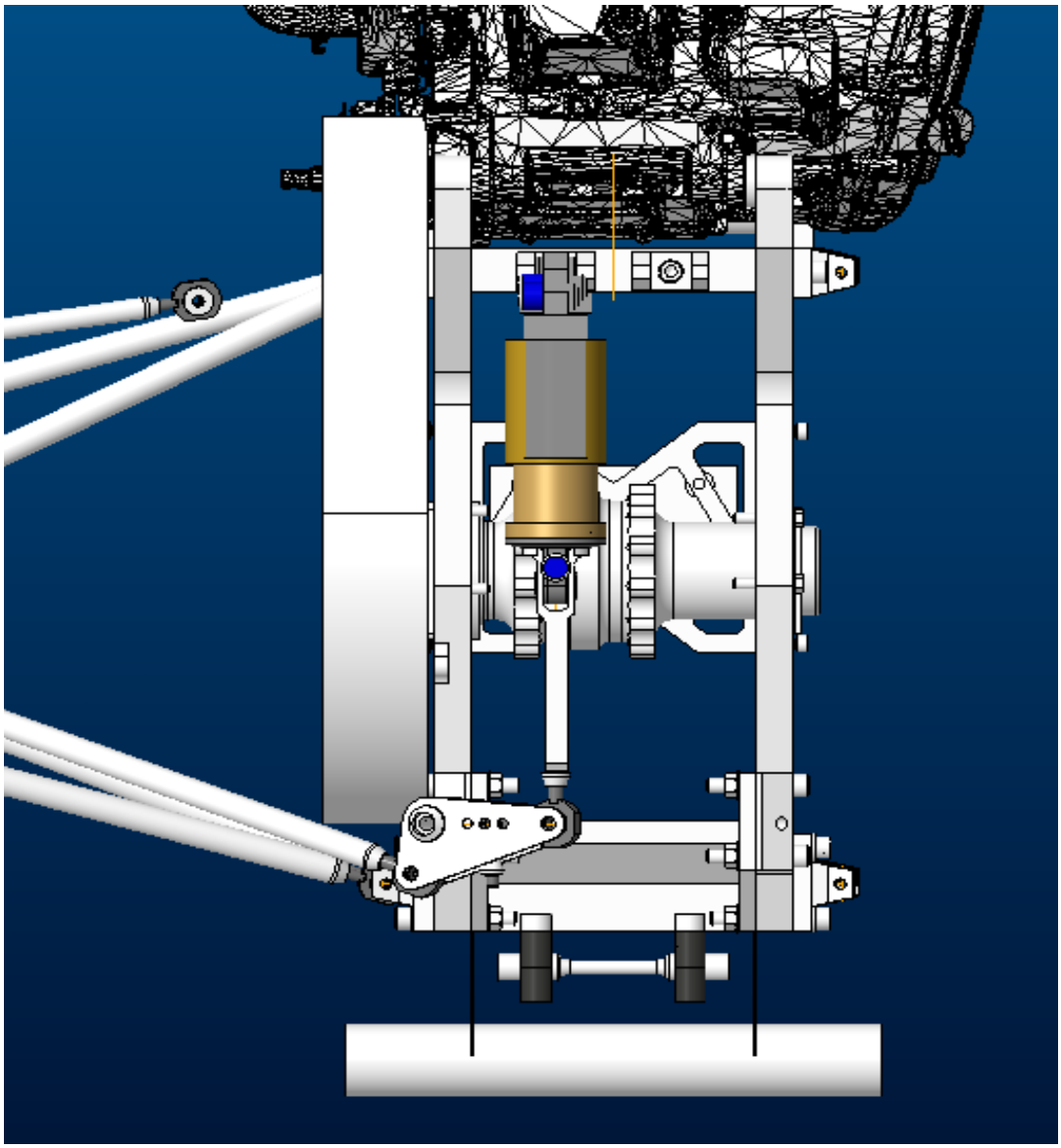
4.5 Finální verze zadní nápravy studentské formule TUL – Markétka

Finální verze optimalizované zadní nápravy druhé studentské formule TUL s názvem Markétka (obr. 20 pohled shora) a (obr. 21 ISO pohled), již obsahuje všechny konstrukční náležitosti, které bylo v plánu udělat. Základ zadní části studentské formule je tvořen pomocí dvou hlavních duralových desek, na které jsou následně jednotlivé prvky zadní nápravy, odpružení, uložení diferenciálu a uložení serva řazení uchycené pomocí šroubových spojů.

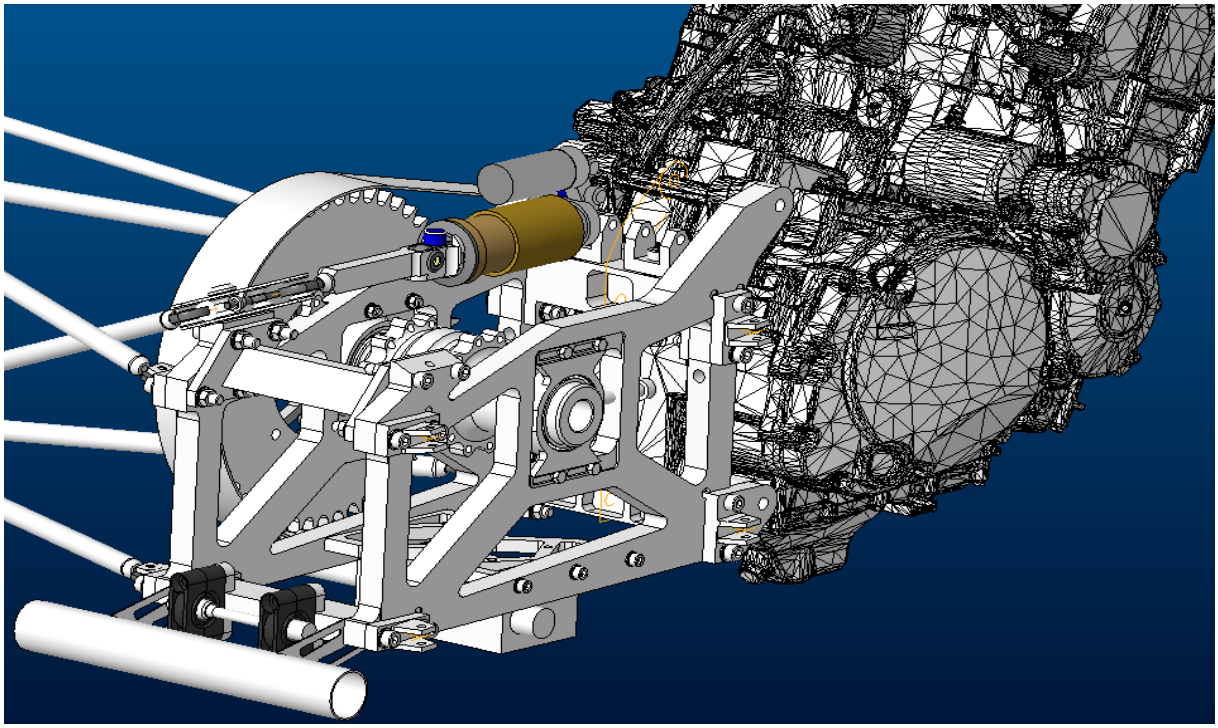
Jednotlivé domečky pro uchycení náprav obsahují úhly odpovídající směru jednotlivých náprav v klidové poloze, aby bylo dosaženo optimálního stavu namáhání a kloub se pohyboval v co nejmenším vychýlení od střední polohy. Diferenciál je uložen v kuličkových ložiskách vložených ve vodícím posuvném uložení, které umožňuje nastavovacím šroubem dopínání řetězového převodu. Nastavovací šroub byl v poslední chvíli přemístěn z důvodu

levnějšího provedení zepředu, a tak šroub se již přímo opírá o uložení diferenciálu. Odpružení zadní části studentské formule bylo zkonstruováno v provedení push-rod, kde dochází k namáhání propojovací tyče na tlak. Jsou použity tlumiče z první studentské formule TUL, a pro zvětšení volné délky tlumiče je použita vzpěra propojující spodní oko tlumiče s okem uloženém na vahadle. Horní oko tlumiče je uloženo v otočném domečku na propojovacím prvku desek. Uložení vahadel je vytvořeno v horní zadní části desek pod potřebným úhlem, aby docházelo k eliminaci axiálních sil na vahadlo. Ve spodní části je uchycené servo na řazení pomocí propojovacího prvku, které zvyšuje tuhost zadní části studentské formule. Obě desky v místech uložení náprav jsou vzájemně propojeny vzpěrami, vyztužující desky mezi sebou a také slouží jako úchyty pro další potřebné konstrukční prvky zadní části.

Materiál použitý na většinu dílů vyráběné pro zadní část, se zvolil dural s názvem EN AW 7022 T6, jelikož má výborné vlastnosti, velkou pevnost s malou hmotností.



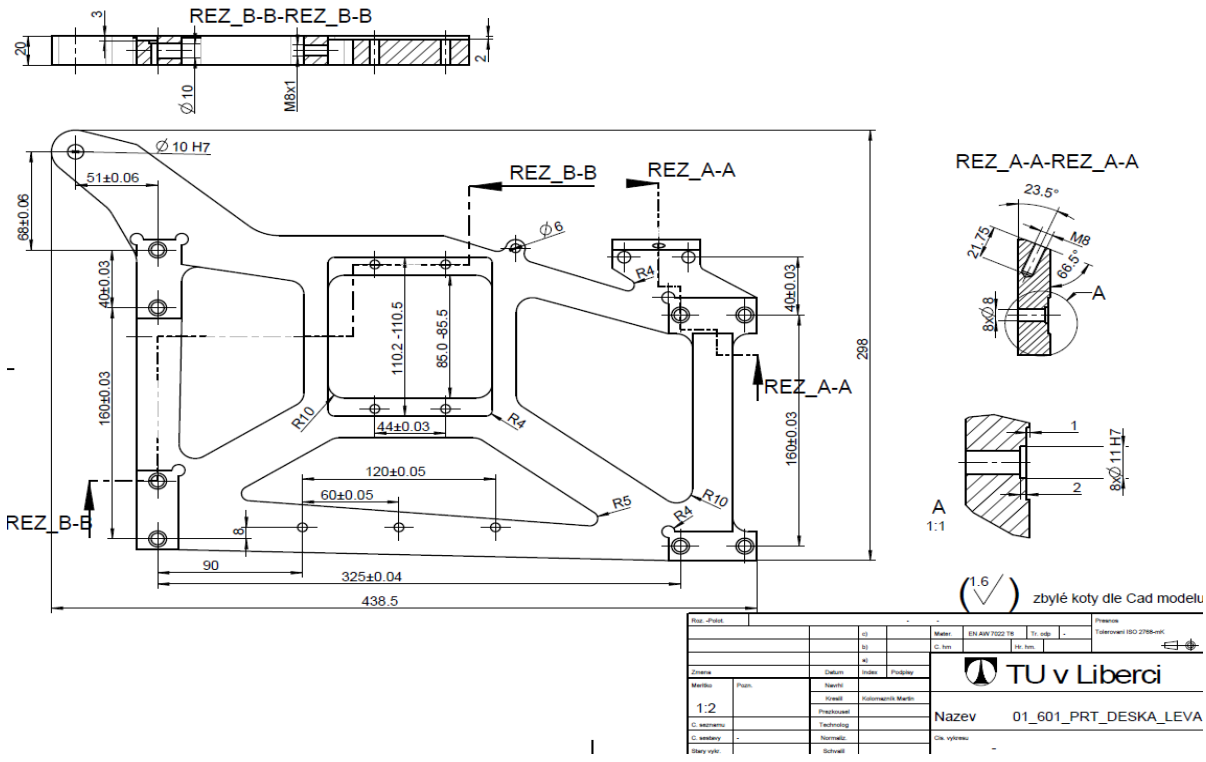
Obr. 20: Finální verze zadní části studentské formule TUL pohled shora



Obr. 21: Finální verze zadní části studentské formule TUL ISO pohled

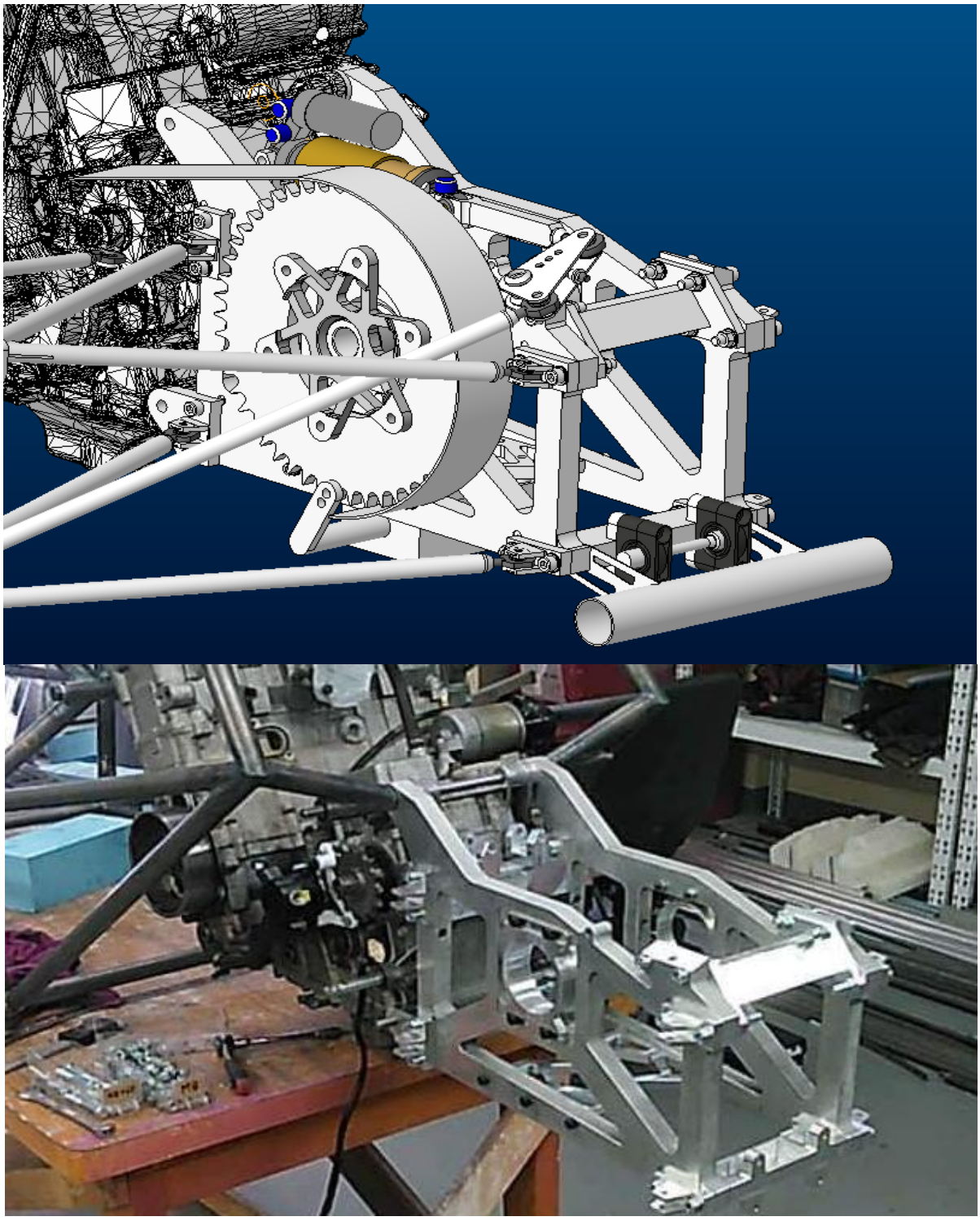
4.5.1 Výroba zadní nápravy studentské formule TUL – Markétka

Jednotlivé díly zadní části se zadaly do výroby, kam bylo potřeba zaslání 3D modelů včetně výkresů s toleranční hodnoty a hlavními rozměry daných součástí např. deska (obr. 22).



Obrázek 22: Výkres desky včetně tolerancí

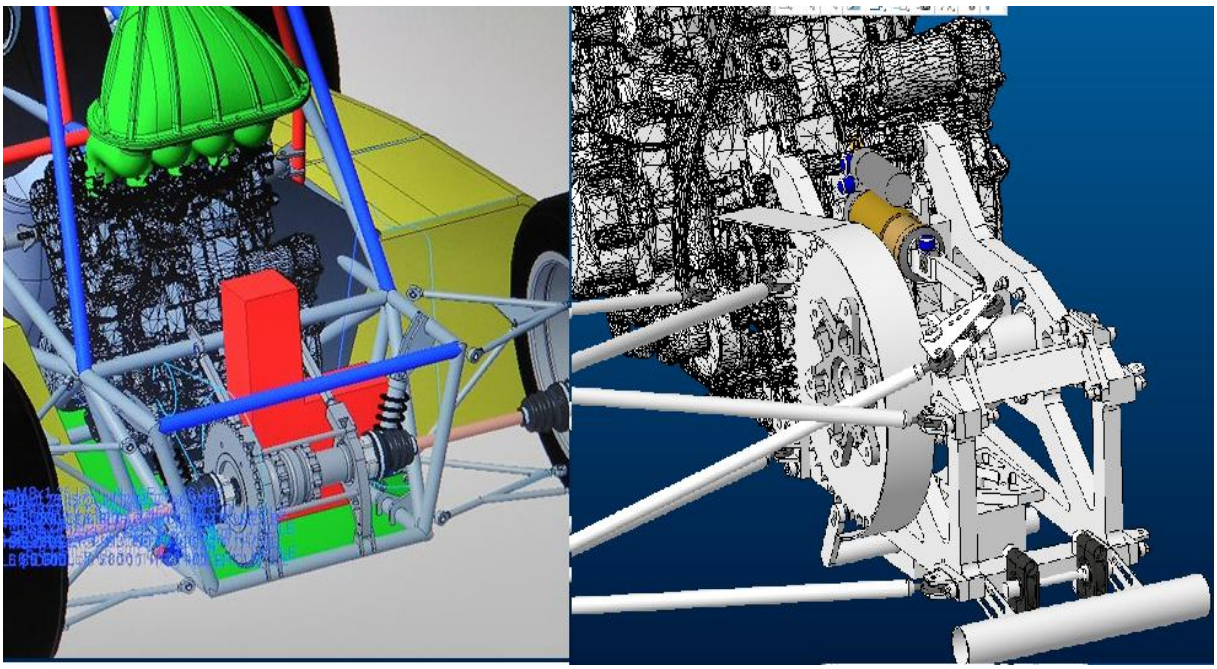
Některé z potřebných výkresů pro výrobu jsou zobrazené v přiložených dokumentech včetně hlavní sestavy zadní části. Na obr. 23 je ukázka nové optimalizované zadní části studentské formule TUL s názvem Markétka jako 3D model (v horní části), tak ale i jako vyrobená sestava (ve spodní části), kde ještě některé díly nebyly vyrobené. Je možné si všimnout faktu, že vyrobená sestava má reálnou podobu zadní části, která bude součástí studentské formule. Veškeré díly vyrobené na zadní část budou dále povrchově barveny.



Obr. 23: Ukázka 3D modelu (nahoře) a reálného modelu (dole)

5 Závěr

Na obr. 24 je zobrazena ukázka stávající zadní části studentské formule s názvem Eliška (na levé straně), a ukázka nové optimalizované zadní části studentské formule s názvem Markétka (na pravé straně). Velkou výhodou optimalizované zadní části je delší rozměr ramen propojující rám s kolem, kde při propružení dochází k mnohem vhodnějším a menším nežádoucím odklonům kol. Dále došlo k vhodnějšímu uspořádání bodů uložení nápravy, a tím i ke zlepšení geometrie zavěšení kol. Zadní část je spojena se zbytkem rámu formule pomocí šroubových spojů, které umožňují po demontáži snadný a rychlý přístupu k motoru. Veškeré díly zadní části jsou propojeny mezi sebou za pomoci šroubových spojů, což je velkou výhodou pro snadnou montáž a demontáž jednotlivých dílů, a také nedochází k tepelnému ovlivnění materiálu při spojování, jako docházelo u svařování rámu stávající studentské formule. Kvůli pravidlům pro závodění, je třeba tyto šroubové spoje pojistit proti povolování. Nová zadní část obsahuje i stabilizační a torzní prvky, které zlepšují jízdní vlastnosti studentské formule. Nevýhodou optimalizované zadní části studentské formule, je vyšší dosažená hmotnost, jelikož veškeré optimalizování se provádělo pouze na teoretickém zatížení studentské formule při daných stavech. Pro přesnější optimalizaci zadní části je třeba naměření reálných hodnot zatížení zadní části studentské formule, které se plánuje při testování druhé studentské formule TUL. Poté bude možné dosáhnout přesnější optimalizace jak tvaru zadní části, tak i použitích materiálů s lepšími vlastnostmi o vyšší ceně.



Obr. 24: Stávající zadní část (vlevo), optimalizovaná zadní část (vpravo)

Po stránce ekonomické bylo třeba zvážit veškeré operace, které jsou potřeba udělat při výrobě optimalizované zadní části studentské formule. Odhadovaná cena za materiál na zadní část formule je 5 000 Kč. Kvůli složitému zpracování některých dílů je cena za výrobu některých dílů těžko odhadující. Odhadovaný čas na výrobu všech potřebných dílů pro zadní

část je kolem 25 hodin. Celková odhadovaná cena pro výrobu optimalizované zadní části studentské formule TUL je okolo 35 000 Kč.

V neposlední řadě bych rád podotknul, že optimalizace zadní nápravy studentské formule TUL byla vytvořena a splnila veškeré mé cíle práce, které byly předem určeny. Optimalizovaná zadní část oproti stávající má vhodnější geometrii zavěšení kol i při propružení nápravy. Došlo k vhodnějšímu a lepšímu uspořádání veškerých dílů např. tlumiče, stabilizátor, servo řazení, domečků pro uložení nápravy, řetězového převodu. Byla vytvořena i výpočtová stránka namáhaných dílů a spojení v této sestavě. Dále proběhla simulace jak optimalizované zadní části na daná namáhání, kterým je zadní část teoreticky vystavována, ale také i stávající zadní části. Došlo ke zvýšení tuhosti celé zadní části v místech uložení nápravy, a tím i zachování geometrie zavěšení kol při daných namáhání. Dále také došlo k estetickému zbarvení zadní části formule, a také ke zmenšení zástavbového prostoru celé zadní části, a tím umožnění vyplnit zbylý volný prostor důležitějšími věcmi např. aerodynamickými prvky. V příloze je také ukázka některých výkresů s tolerancemi, které se poslali do výroby a také i sestava celé zadní části studentské formule včetně kusovníku. Jelikož se jedná o zadní část studentské formule, u které došlo i k výrobě, celkové náklady pro tuto zadní část dosáhly odhadované hodnoty okolo 35 000 Kč včetně materiálu.

6 Literatura

[2] Studenská formule. *Student Formula Liberec* [online]. V Liberci: Nezmáné, 2017 [cit. 2018-04-08]. Dostupné z: http://studentformula.tul.cz/

[3] Zadní náprava. *CAD.CZ* [online]. neznámé: neznámé, 2012 [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: https://www.cad.cz/strojirenstvi/38-strojirenstvi/3457-zadni-naprava-osobniho-automobilu.html

[4] Spojovací materiál. *Faspoj Spojovací materiál* [online]. neznámé: Copyright faspoj, ;2011, 2011 [cit. 2018-06-03]. Dostupné z: http://www.faspoj.cz/pevnost%20sroubu.html

[5] *Tabulky slitin* [online]. eBRÁNA s.r.o.: neznámé, nezmáné [cit. 2018-06-09]. Dostupné z: http://www.strojmetal.cz/tabulka-slitin

[6] Ložiska. *SKF online* [online]. neznámí: neznámí, neznámí [cit. 2018-06-17]. Dostupné z: http://www.skf.com/cz/products/bearings-units-housings/ball-bearings/deep-groove-ball-bearings/deep-groove-ball-bearings/index.html?designation=61911-2RZ&unit=metricUnit

7 Seznam obrázků

Obr. 1: Foto Studentská formule [2] 11
Obr. 2: Závislé zavěšení – tuhá náprava [3] 12
Obr. 3: Nezávislé zavěšení kol [3] 12
Obr. 4: Víceprvková zadní náprava [3] 13
Obr. 5 Ukázka první zadní části studentské formule TUL 14
Obr. 6 Ukázka inspirace zadní části studentské formule 14
Obr. 7: Souřadnicový systém studentské formule TUL Eliška 15
Obr. 8: První návrh zadní části ze vstupních hodnot 17
Obr. 9: Druhý návrh zadní části včetně motoru 18
Obr. 10: Volba odpružení zadní nápravy 19
Obr. 11: Třetí postup návrhu zadní části 19
Obr. 12: Před finální verze zadní části druhé studentské formule TUL 20
Obr. 13: Rozložení hmotnosti studentské formule na jednotlivá kola 21
Obr. 14: Výpočetní schéma uchycení zadního kola 22
Obr. 15: Silové schéma hřídele 26
Obr. 16: Zjednodušený model pro simulaci 28
Obr. 17: Okrajové podmínky modelu včetně zatížení pro jednotlivé stavy 28
Obr. 18: Simulace pro stav akcelerace (vlevo) a stav akcelerace + zatáčení (vpravo): rozložení napětí (nahoře), rozložení deformace (dole) 29
Obr. 19: Simulace stávající zadní části studentské formule TUL s názvem Eliška 30
Obr. 20: Finální verze zadní části studentské formule TUL pohled shora 31
Obr. 21: Finální verze zadní části studentské formule TUL ISO pohled 32
Obrázek 22: Výkres desky včetně tolerancí 32
Obr. 23: Ukázka 3D modelu (nahoře) a reálného modelu (dole) 33
Obr. 24: Stávající zadní část (vlevo), optimalizovaná zadní část (vpravo) 34

8 Seznam tabulek

Tab. 1: Vstupní hodnoty 16
Tab. 2: Přehled působících sil v bodech uložení při jednotlivých stavech 24
Tab. 3: Vstupní parametry pro řetězový převod 25
Tab. 4: Parametry řetězového převodu 25
Tab. 5: Velikosti sil v místech uložení hřídele diferenciálu 26

9 Seznam příloh

Příloha 1: Výkres desky levé včetně tolerancí pro výrobu
Příloha 2: Výkres vystřeďujících válečků včetně tolerance
Příloha 3: Výkres hlavní sestavy optimalizované zadní části studentské formule TUL
Příloha 4: Kusovník hlavní sestavy optimalizované zadní části studentské formule TUL
Příloha 5: Výkres sestavy uložení diferenciálu
Příloha 6: Výkres sestavy torzní tyče
Příloha 7: Výkres spodní uchycení tlumiče