



**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

Ústav automobilů, spalovacích motorů
a kolejových vozidel

Stanovení namáhání mechanismu řízení vozu
Formula Student

Determination of strain of Formula Student
steering mechanism

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
2020

Lukáš KOLBABA

Studijní program: B2342 TEORETICKÝ ZÁKLAD STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Studijní obor: 2301R000 Studijní program je bezoborový

Vedoucí práce: Ing. Jan BANĚČEK, Ph.D.

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Kolbaba Jméno: Lukáš Osobní číslo: 474839
Fakulta/ústav: Fakulta strojní
Zadávací katedra/ústav: Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel
Studijní program: Teoretický základ strojního inženýrství
Studijní obor: bez oboru

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Stanovení namáhání mechanismu řízení vozu Formula Student

Název bakalářské práce anglicky:

Determination of strain of Formula Student steering mechanism

Pokyny pro vypracování:

Navrhněte metodu stanovení namáhání řízení vozu Formula Student.

1. Proveďte rešerši problematiky měření zatížení mechanismu řízení. Prozkoumejte prostředky pro statické řešení mechanismů vhodné pro tento problém.
2. Proveďte výpočetní odhad zatížení prvků mechanismu řízení.
3. Navrhněte uspořádání měřicího zařízení a jízdních zkoušek pro praktické měření.
4. Popište postup zprovoznění zkušebního zařízení

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Jan Baněček, Ph.D., ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **26.04.2020**

Termín odevzdání bakalářské práce: **15.07.2020**

Platnost zadání bakalářské práce:


Ing. Jan Baněček, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce


doc. Ing. Oldřich Vitek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

23.6.2020
Datum převzetí zadání

Kolbaba
Podpis studenta



Anotační záznam

Jméno autora: Lukáš Kolbaba

Název práce: Stanovení namáhání mechanismu řízení vozu Formula Student

Anglický název: Determination of strain of Formula Student steering mechanism

Rozsah práce: 57 stran
44 obrázků
8 tabulek
4 grafy

Akademický rok: 2019/2020

Ústav: 12 120 Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel

Studijní program: Teoretický základ strojního inženýrství

Vedoucí práce: Ing. Jan Baněček, Ph.D.

Klíčová slova: namáhání, mechanismus řízení, tenzometrické měření, Formule Student

Key words: strain, steering mechanism, strain gauges, Formula Student



Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem stanovení namáhání v mechanismu řízení studentské formule pomocí odporových tenzometrů. V první části byla provedena rešerše předchozích prací na toto téma a dále se v práci uvádějí možnosti pro statické řešení dané problematiky pomocí výpočetních programů. Následně byl proveden výpočetní odhad výsledků měření pomocí LSA. Poté bylo navrženo uspořádání měřícího zařízení a byl připraven podrobný plán praktických jízdních zkoušek. V práci je také popsán postup zprovoznění měřícího zařízení a příprava vozu na testování.

Abstract

This bachelor thesis is about the design of determining the stress in the steering mechanism of Student Formula using resistance strain gauges. In the first part, was done the research of previous work on this topic, and further presents possibilities for static solution of the given problem using computer programs. Subsequently, was performed a computational estimate of the measurement results using LSA. Then was designed the arrangement of the measuring device and a detailed plan of practical driving tests was prepared. The work also describes the procedure of commissioning of measuring equipment and preparation of the vehicle for testing.



Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma: " Stanovení namáhání mechanismu řízení vozu Formula Student ", vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu zdrojů, jenž tvoří poslední kapitulu této práce.

V Praze dne: 15.07.2020

.....

(podpis autora)



Poděkování

Rád bych poděkoval panu Ing. Janu Baněčkovi, Ph.D. za poskytnutí odborného vedení, za vstřícný přístup při konzultacích a za cenné rady při vypracování mé bakalářské práce.

Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Vojtěchu Klírovi, Ph.D. za odborné konzultace a pomoc se samotnou přípravou měření. Nakonec bych chtěl poděkovat celému týmu eForce za pomoc a rady při přípravě tohoto měření.



Obsah

1 Návrh metody.....	9
2 Rešerše.....	10
2.1 Odporový tenzometr	10
2.2 Dominik Andrýsek - Tenzometrické měření náprav studentské formule	17
2.2.1 Přínos pro práci.....	17
2.2.2 Použité přístroje	17
2.2.3 Průběh měření.....	17
2.2.4 Vyhodnocení.....	19
2.3 Jan Kříž – Tenzometrické měření náprav závodního vozu	20
2.3.1 Přínos pro práci.....	20
2.3.2 Použité přístroje	20
2.3.3 Průběh měření.....	21
2.3.4 Vyhodnocení.....	22
2.4 Ondřej Plíhal - Určení zatížení závěsu kola na voze formule Student.....	23
2.4.1 Přínos pro práci.....	23
2.4.2 Použité přístroje	23
2.4.3 Průběh měření.....	23
2.4.4 Vyhodnocení.....	25
2.5 Ing. Pavel Švager- Konstrukce zařízení pro měření tuhosti řízení.....	26
2.5.1 Přínos pro práci.....	26
2.5.2 Měřicí přístroje	26
2.5.3 Průběh měření.....	27
2.5.4 Vyhodnocení.....	28
2.6 František Klupal - Měření parametrů na volantu osobního automobilu.....	29
2.6.1 Přínos pro práci.....	29
2.6.2 Měřicí přístroje	29
2.6.3 Průběh měření.....	30
2.6.4 Vyhodnocení.....	31
2.7 Výpočetní programy pro statické řešení zatížení	32
3 Výpočet zatížení pomocí LSA.....	33
4 Formula Student monopost FSE.08.....	39

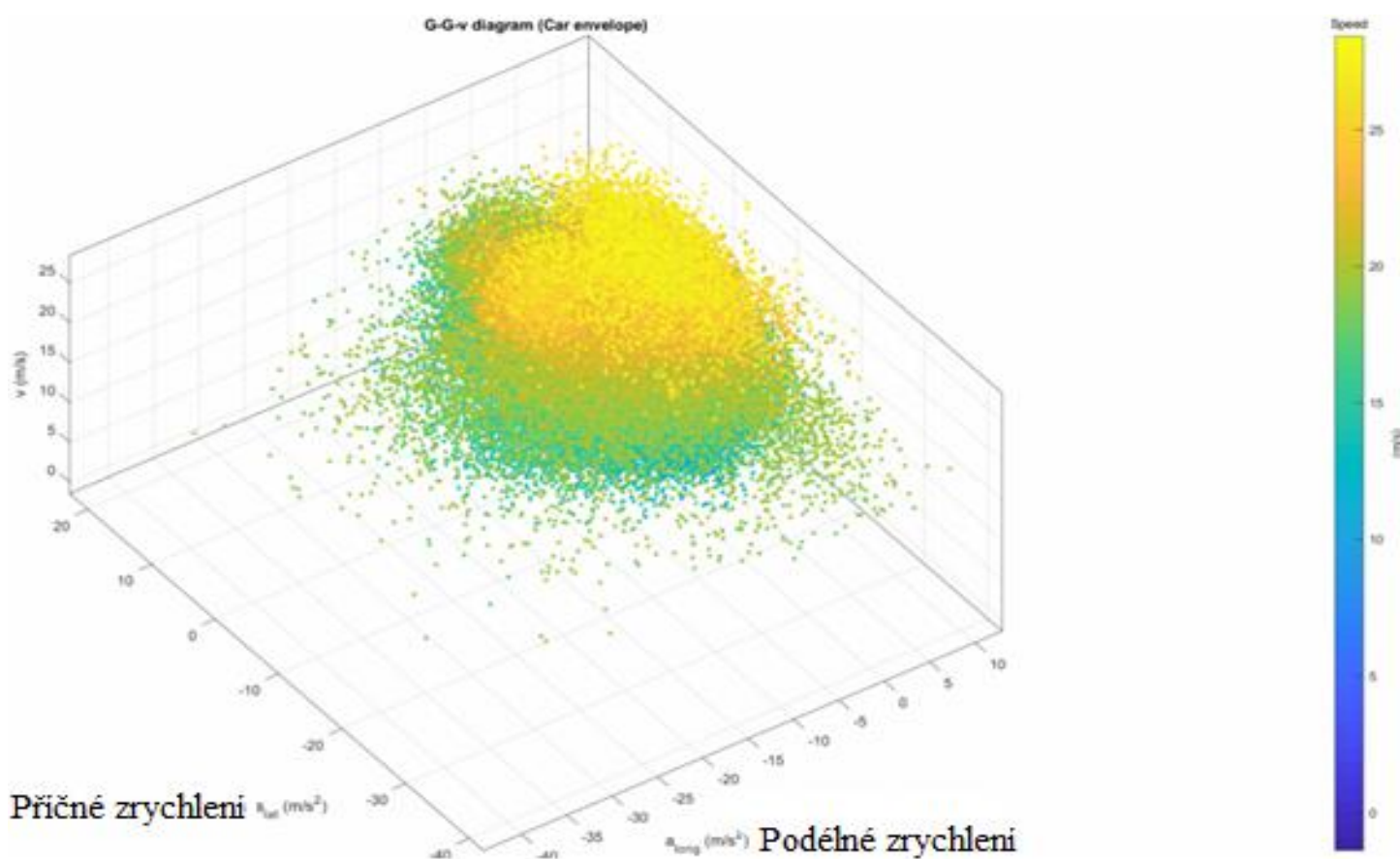


4.1 Místa měření sil v řízení.....	40
4.1.1 Volantová tyč.....	41
4.1.2 Spojovací tyč.....	41
4.1.3 Uchycení hřebenu.....	42
4.1.4 Vnitřní průměr rychlospojky.....	43
5 Testování.....	44
5.1 Příprava na testování.....	44
5.2 Přepoččet odhadu výsledku.....	47
5.3 Statické testování v laboratoři.....	50
5.4 Dynamické testování ve venkovním prostředí.....	51
5.5 Hlavní testování.....	52
6 Závěr.....	55



1 Návrh metody

Určení namáhání v řízení je pro tým eForce FEE Prague Formula velmi přínosné pro další vývoj a optimalizaci mechanismu. Měření na této konkrétní formuli student FSE.08 totiž ještě nikdy neproběhlo, a proto je důležité návrhové výpočty validovat i fyzickým testováním. Pro toto měření byla vybrána metoda měření namáhání pomocí odporových tenzometrů. Cílem celého testování je změřit zatížení mechanismu řízení v co nejvíce možných stavech vozidla, kterých by mohlo dosáhnout při závodech Formula Student. Aktuální stav vozidla nejlépe popisuje G-G diagram, viz Obr. 1, kde je G-G diagram ze závodu Baltic Open 2018 naší formule.



Obr. 1 G-G diagram [autor: člen týmu eForce]

Toto měření umožní zjistit poměrnou deformaci měřených prvků při zatížení a z těchto hodnot je možné vypočítat zatížení jednotlivých elementů mechanismu. Tato metoda je velmi používaná pro její přesnost a dostupnost. Dále bude tato metoda popsána v kapitole 2.1.



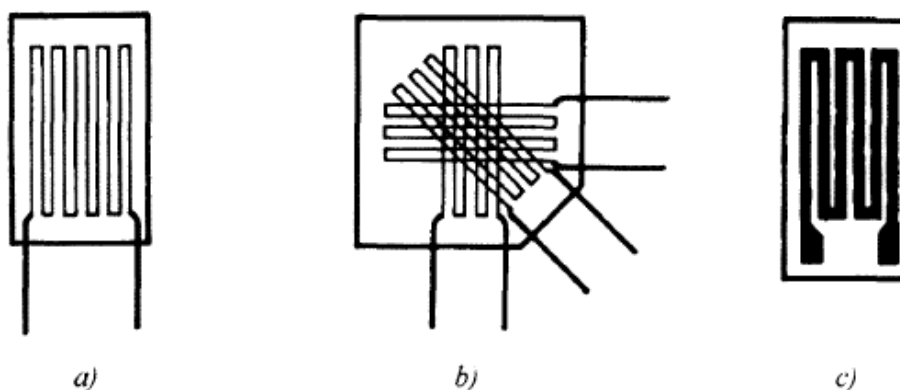
2 Rešerše

2.1 Odporový tenzometr

Tenzometry jsou důležitým prvkem měření zatížení. V této kapitole jsou přiblíženy jednotlivé druhy odporových tenzometrů, základní výpočtové vztahy a kompenzace nežádoucích vlivů při měření.

Tenzometr je odporový senzor, u kterého se mění odpor v závislosti na jeho deformaci, tedy změnách geometrických rozměrů nebo změnách krystalografické orientace tenzometru. Vzhledem k tomu, že je tenzometr malých rozměrů, tak bude uvažována pouze deformace tahem nebo tlakem v mezích Hookova zákona.

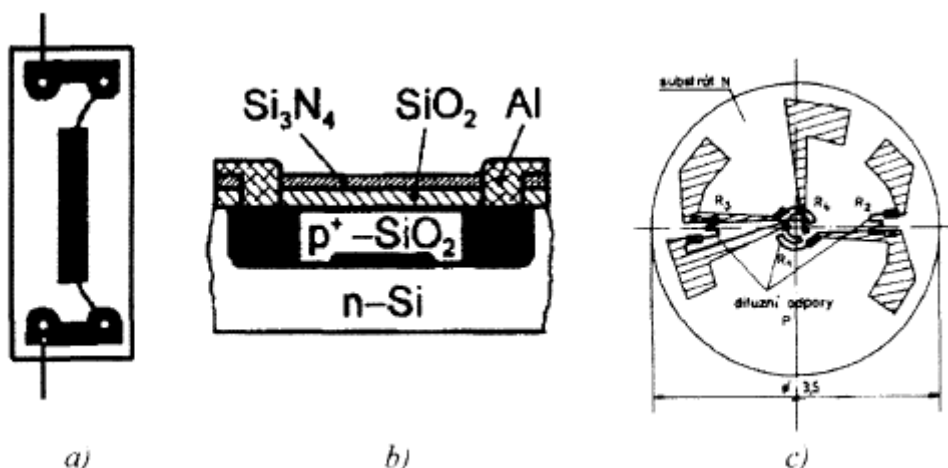
Tenzometry jsou rozděleny podle použitých materiálů na polovodičové a kovové. Kovové pak podle provedení na drátkové a foliové, viz Obr. 2. Drátkový tenzometr je tvořen meandrem z drátku o průměru 0,01 až 0,03 mm. Foliové tenzometry se vyrábí stejně jako plošné spoje odleptáním folie tlusté 5 až 10 μm . Foliový tenzometr je vhodnější kvůli lepšímu odvodu tepla, menší příčné deformaci a jednodušší výrobě. Pro měření deformací v různých směrech se vyrábí tenzometrické růžice. Skládají se z různého počtu tenzometrů (2 až 4), které mezi sebou svírají různé úhly, nejčastěji 45°, 60° nebo 90°. Tyto tenzometry, drátkové nebo foliové, jsou poté přitmeleny na podložku, buď tenký papírek, nebo umělohmotná folie, a tento celek se poté přilepí na měřené místo, bohužel se nedá před ani po nalepení kalibrovat, a tak je nutné se spoléhat na údaje udávané výrobcem.



Obr. 2 Odporové kovové tenzometry

a) drátkový b) drátková tenzometrická růžice c) foliový [1, str. 102]

Polovodičové tenzometry, viz Obr. 3, mohou stejně jako kovové mít podložku nebo můžou být i bez ní. Aktivní délku mají 3 až 6 mm, šířku 2 mm a tloušťku 0,02 až 0,06 mm. Příčné rozměry dovolují použití i na zakřivené plochy. [1]



Obr. 3 Polovodičové tenzometry a) monokrystalický difuzní b) řez strukturou c) křemíková tenzometrická membrána s difuzními tenzometry [1, str. 103]

Nyní bude odvozena rovnice popisující tenzometrický jev. Na začátek rovnice pro poměrné prodloužení ε :

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \quad (1)$$

kde

l délka vodiče (drátku) tenzometru [mm]

Δl prodloužení vodiče [mm]

U drátkových tenzometrů pro měření poměrných prodloužení ε se využívá změna odporu drátku. Pro změnu platí:

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (2)$$

kde

ρ měrný odpor materiálu vodiče [$\Omega \cdot mm$]

l délka vodiče [mm]

S plocha průřezu vodiče [mm^2].

Poměrná změna odporu se vyjádří:



$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{l}{\rho \bar{S}} \left[\Delta l \frac{\rho}{S} - \rho l \frac{\Delta S}{S^2} + \frac{l}{S} \Delta \rho \right] = \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta S}{S} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad (3)$$

v důsledku osového tahu vodiče je:

$$\frac{\Delta S}{S} = -2\mu \frac{\Delta l}{l} \quad (4)$$

kde

μ Poissonova konstanta (pohybuje se v rozmezí 0,2 až 0,5).

Vztah pro poměrnou změnu odporu je:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l}{l} + 2\mu \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta \rho}{\rho} = \frac{\Delta l}{l} \left(1 + 2\mu + \frac{\frac{\Delta \rho}{\rho}}{\frac{\Delta l}{l}} \right) \quad (5)$$

Výraz v závorce lze nazvat součinitelem deformační citlivosti vodiče K .

Vztah se poté zjednoduší:

$$\frac{\Delta R}{R} = K \frac{\Delta l}{l} = K \varepsilon \quad (6)$$

Pro kovové tenzometry je $K \cong 2$. Kovové i polovodičové tenzometry mají ve stavu bez zatížení obvykle 120 Ω , 350 Ω , a 1000 Ω . Deformační citlivost polovodičového tenzometru je možné též určit ze vztahu (6), pro konstantu K se častěji používá vztah:

$$K = 1 + 2\mu + \pi_i \cdot E_d \quad (7)$$

kde

π_i podélný piezorezistenční součinitel

E_d modul pružnosti materiálu polovodiče.

U polovodičových tenzometrů je $K > 100$. Poměrná změna odporu je na rozdíl od drátkových a foliových tenzometrů nelineární, má kvadratický průběh a lze ji linearizovat



pouze v úzké oblasti. Pro měření velkých deformací je nutné použít buď speciálně linearizované tenzometry, nebo je předeprnout. Měření polovodičovými tenzometry je velmi ovlivněno teplotou, mnohem více než u kovových a hůře se kompenzuje.

Odporové změny při použití kovových tenzometrů v běžném rozsahu měření ($\varepsilon = 10^{-5}$ až 10^{-3}) jsou v rozsahu jednotek až stovek $m\Omega$. Měření takto malých změn vyžaduje stabilní a citlivé měřicí elektronické obvody. Jako vstupní obvod se nejčastěji používá Wheatstonův můstek, viz Obr. 4, napájený buď stejnosměrným, nebo střídavým napětím. Výstupní napětí bývá zesíleno přesným a kompenzovaným zesilovačem, který obvykle tvoří operační zesilovače.

Jak bylo uvedeno výše odpor všech tenzometrů je teplotně závislý. Tuto závislost je nutné kompenzovat. Jednou z možností kompenzace teplotního vlivu je použití samokompenzačního tenzometru, viz Obr. 5. Ten má na stejné podložce v sérii s měřicím vinutím zapojené vinutí s opačnou teplotní charakteristikou. Výsledná změna odporu vlivem změny teploty by měla být rovna nule, v určitém rozsahu teplot udávaných výrobcem.

Nejčastěji se však pro kompenzaci teploty využívá zapojení měřicích a kompenzačních tenzometrů v můstku. Pro rovnováhu můstku, tzn. pro $\Delta U = 0$ musí platit vztah (8).

U můstků volíme tenzometry:

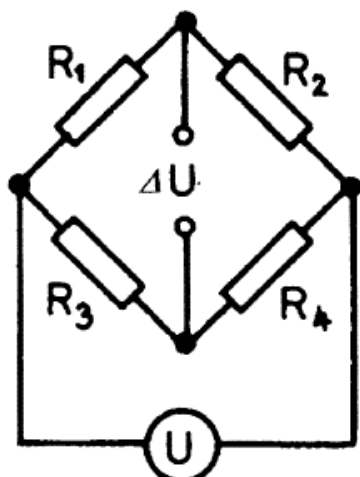
$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_0 \quad (8)$$

kde

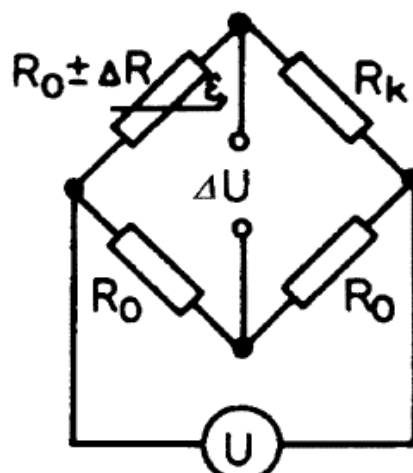
R_0 odpor měřicího tenzometru bez namáhání.



Jestliže měřící tenzometr R_0 bude zapojen místo R_1 (čtvrtmůstek), lze použít pro kompenzaci teploty tenzometr R_k . Ten však nesmí být namáhán a musí být umístěn ve stejných podmínkách jako měřící tenzometr. Může být zapojen buď místo odporu R_2 nebo R_3 , viz Obr. 5.



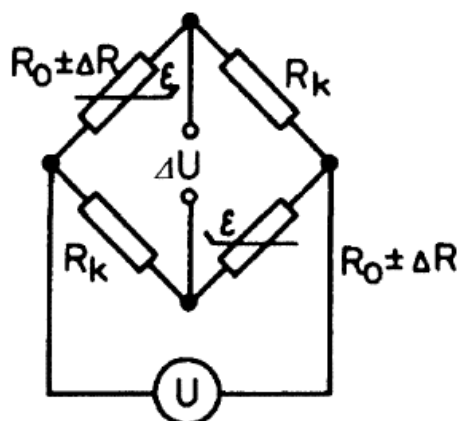
Obr. 4 Wheatstonův můstek
[1, str. 105]



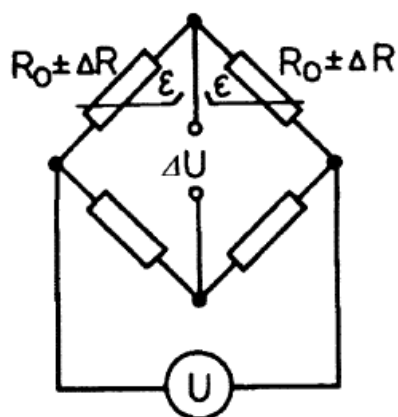
Obr. 5 Zapojení kompenzačního tenzometru bez namáhání [1, str. 105]

Pokud to situace dovolí použít pro měření dva tenzometry, zvýší se citlivost na dvojnásobek. jedná se o zapojení do tzv. půlmůstku.

Mohou nastat dvě situace. Buď oba měřící tenzometry, jsou namáhány souhlasně a jsou zapojeny místo odporů R_1 a R_4 , kompenzační tenzometry musí být zapojeny do opačných větví můstku, jak je ukázáno na Obr. 6. Nebo jsou měřící tenzometry namáhány nesouhlasně (jeden tahem, druhý tlakem) a jejich změny jsou tedy opačné. Měřící tenzometry je nutné zapojit do sousedních větví, viz Obr. 7. Vliv teploty se v tomto uspořádání neprojeví na výstupním napětí.

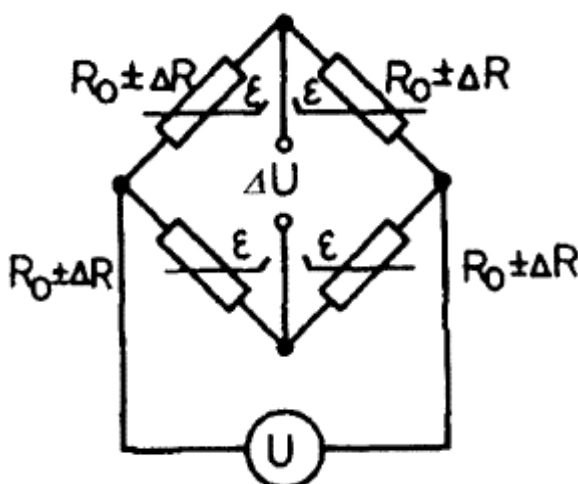


Obr. 6 Shodně namáhaný kompenzační tenzometr [1, str. 105]



Obr. 7 Zapojení opačně namáhaného tenzometru [1, str. 105]

Pokud je možné pro měření použít 4 tenzometry (plný můstek), je nutné umístit je tak, aby byly dva namáhány na tah a dva na tlak. Zapojení, viz Obr. 8.



Obr. 8 Plný můstek [1, str. 106]

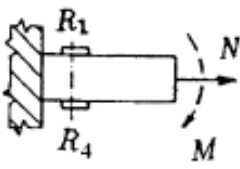
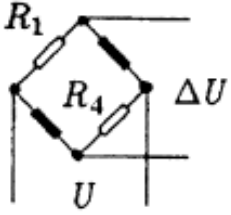
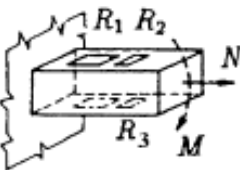
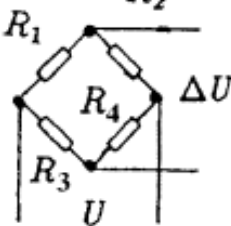
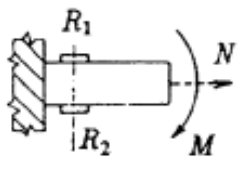
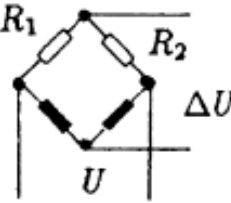
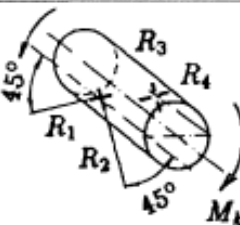
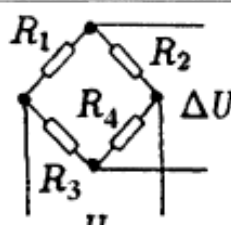
Citlivost se zvýší na čtyřnásobek a vliv teploty se tímto zapojením neprojeví. Při měření deformací měřícího členu se můžou projevit nežádoucí složky, které nevhodně ovlivňují měření. Mezi tyto složky patří ohybový moment při měření osová síly nebo naopak osová síla při měření ohybového momentu. Ty se musí též jako vliv teploty eliminovat vhodným umístěním tenzometrů, opět s využitím můstkového zapojení. Eliminace nevhodných namáhání je zde shrnuta v Tab. 1.

Legenda:

- index T změny způsobené teplotou
- index A změny způsobené osovou silou A



index M změny způsobené momentem M
 U napájení můstku
 ΔU výstupní elektrické napětí z můstku
 ostatní proměnné jsou patrné z textu.[1]

Měřená veličina	Uspořádání tenzometrů	Zapojení tenzometrů	Výstupní elektrické napětí z můstku
Osová síla N			<p>Vliv ohyb. momentu M eliminován. Teplotní vlivy nekompensovány.</p> $\Delta U = \frac{U}{4R} (\Delta R_1 - \Delta R_4) =$ $= \frac{U}{4R} K [(\varepsilon_N + \varepsilon_M + \varepsilon_T) +$ $+ (\varepsilon_N - \varepsilon_M + \varepsilon_T)] =$ $= \frac{U}{4R} 2K (\varepsilon_N + \varepsilon_T)$
Osová síla N	 <p>$\varepsilon_{1N} = \varepsilon_{4N}$ $\varepsilon_{2N} = \varepsilon_{3N} = k_1 \varepsilon_{1N}$</p>		<p>Vlivy ohybového momentu, resp. příčné síly F eliminovány. Teplotní vlivy kompenzovány.</p> $\Delta U = \frac{U}{4R} (\Delta R_1 - \Delta R_2 + \Delta R_4 - \Delta R_3)$ $= \frac{U}{4R} K [(\varepsilon_{11N} + \varepsilon_{1M} + \varepsilon_T) -$ $- (-\mu\varepsilon_{2N} - \mu\varepsilon_{2M} + \mu\varepsilon_T) +$ $+ (\varepsilon_{41N} - \varepsilon_{41M} + \varepsilon_T) -$ $- (-\mu\varepsilon_{3N} - \mu\varepsilon_{3M} + \mu\varepsilon_T)] =$ $= \frac{U}{4R} 2K (\varepsilon_{1N} + \mu\varepsilon_{2N}) =$ $= \frac{U}{4R} 2K (1 + k_1 \mu) \varepsilon_N$
Ohybový moment M			<p>Vliv osové síly N eliminován. Teplotní vlivy kompenzovány.</p> $\Delta U = \frac{U}{4R} (\Delta R_1 - \Delta R_2) =$ $= \frac{U}{4R} K [(\varepsilon_N + \varepsilon_M + \varepsilon_T) -$ $- (\varepsilon_N - \varepsilon_M + \varepsilon_T)] =$ $= \frac{U}{4R} 2K \varepsilon_M$
Krouticí moment M_k			<p>Vliv ohybového momentu M a osové síly N eliminován. Teplotní vlivy kompenzovány.</p>

Tab. 1 Eliminace nevhodných vlivů [1, str. 107]



2.2 Dominik Andrysek - Tenzometrické měření náprav studentské formule

Jednotlivé rešerše prací, které se zabývají touto tematikou, jsou rozděleny na 4 části. V první části je zhodnocen přínos pro naše měření. V druhé části jsou vypsány použité přístroje na měření sil, vyhodnocování a programy na zpracování dat. Ve třetí části je rozepsáno, jak probíhalo měření sil. Ve čtvrté části je vyhodnocení celého testování a určení chyb.

2.2.1 Přínos pro práci

Měření je velmi podobné tomu našemu, je potřeba vybrat měřící zařízení, které bude kompaktní a může být umístěno přímo ve formuli. Měřící zařízení je nutno před testováním řádně vyzkoušet. Je potřeba se vyvarovat umístění kabelů vedle kabelů napájení motorů. Autor naměřil v tyči řízení největší zatížení tahem 13526,3 N a tlakem 9700,5 N, vzhledem k tomu, že autor uvedl v práci pouze jedno měření a v měření se objevil šum právě u řízení, tak těmto výsledkům nelze přisuzovat velkou váhu.

2.2.2 Použité přístroje

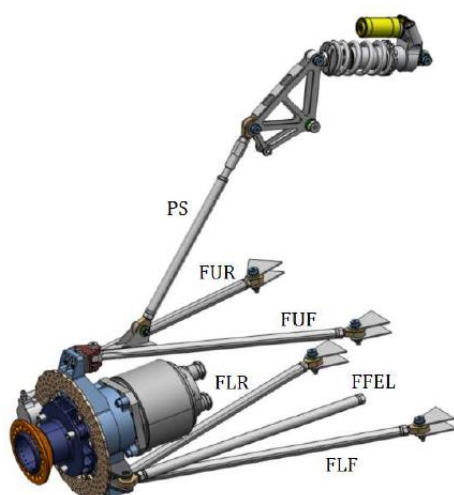
Autor použil měřící jednotku CompactDAQ, která je malá, přenosná a programovatelná. Program NI DIAdem na vyhodnocení dat, jednotku vždy připojil po testování k PC pomocí USB. Tenzometry zapojil do půl můstku, aby kompenzoval vliv teploty. Použité tenzometry jsou v Tab. 2

Parametr	Hodnota	
Typ	Křížový tenzometr	Jednoosý tenzometr
Výrobce	HBM	HBM
Označení	1-XY91-3/120	1-LY11-6/120
Nominální odpor	120 $\Omega \pm 0,5\%$	120 $\Omega \pm 0,35\%$
Součinitel deformační citlivosti k	2,03 $\pm 1\%$, 1,99 $\pm 1\%$	2,05 $\pm 1\%$
Maximální napětí můstku	3,5 V	7,5 V

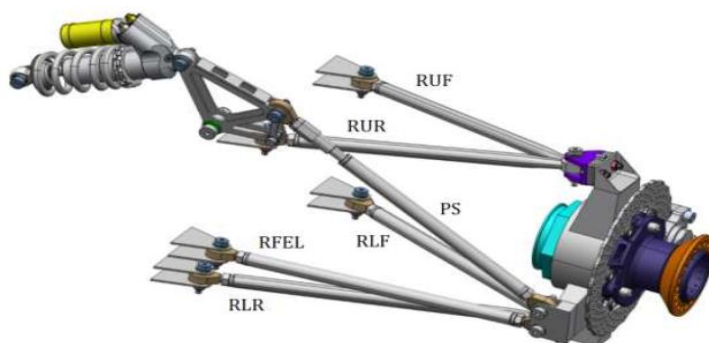
Tab. 2 Datasheet použitých tenzometrů [2, str. 27]

2.2.3 Průběh měření

Na Obr. 9 a Obr. 10 jsou schémata přední a zadní nápravy, které autor tenzometricky měřil. Jednotlivé prvky jsou označeny zkratkami, které jsou následně vysvětleny v Tab. 3.



Obr. 9 Přední náprava [2, str. 14]



Obr. 10 Zadní náprava [2, str.14]

Název	Zkratka	Název	Zkratka
Přední horní přední tyč	FUF	Zadní horní přední tyč	RUF
Přední horní zadní tyč	FUR	Zadní horní zadní tyč	RUR
Přední dolní přední tyč	FLF	Zadní dolní přední tyč	RFL
Přední dolní zadní tyč	FLR	Zadní dolní zadní tyč	RLR
Řídící prvek	FFEL	Pátý element	RFEL
Push-rod	PS		

Tab. 3 Vysvětlivky zkratk [2, str. 15]

Přesné umístění tenzometrů na tyčích autor ve své práci neuvádí. Kabeláž byla pevně přichycena k nápravám a vedena dovnitř monokoku. Měřící jednotka byla umístěna pod nohama řidiče. Nejprve testoval funkčnost měřícího aparátu v dílně na statické formuli, aby předešel problémům přímo při testování dynamickém na Strahově. Poté provedl testování vedle Strahovského stadionu. Byla provedena dvě měření. Z prvního měření je 40 s záznamu zatížení, při druhém měření selhal měřící program a už se jej nepodařilo zprovoznit.



2.2.4 Vyhodnocení

Vyhodnocení proběhlo pomocí programu NI DIAdem. Neproběhlo vynulování před začátkem měření, a proto se neprojevila v měření celková váha formule s pilotem. Váha pilota s formulí byla prý zanedbatelná oproti působícím silám. U tenzometru připojeném na spojovací tyč se projevil velký parazitní šum, který se při testování na statické formuli neprojevil. Hodnoty zatížení spojovací tyče, viz Tab. 4 Naměřené výsledky, jsou až desetkrát vyšší než naměřené hodnoty u ostatních měřených prvků, což je nepravděpodobné. Vznik šumu mohl být způsoben buď blízkostí vedení kabelů od tenzometru vedle napájení předního motoru, nebo studeným spojem vzniklým špatným pájením kabelů k tenzometru. Autor v práci zmiňuje i výpočetní program Lotus Suspension Analysis, ve kterém má model zavěšení kol, avšak má jej pouze pro odhad maximálního zatížení bez uvedení číselných hodnot a sil přenášených do řízení.[2]

Ocelová tyč	Maximální zatížení [N]	
	Tah	Tlak
FUF	není si jistý	není si jistý
FUR	není si jistý	není si jistý
FLF	1610,2	3584,8
FLR	3789,8	1826,6
FFEL	13526,3	9700,5
RUF	511,1	2065,0
RUR	721,8	1586,3
RFL	523,6	926,1
RLR	1340,1	513,1
RFEL	1113,8	622,2

Tab. 4 Naměřené výsledky [2, str. 39]



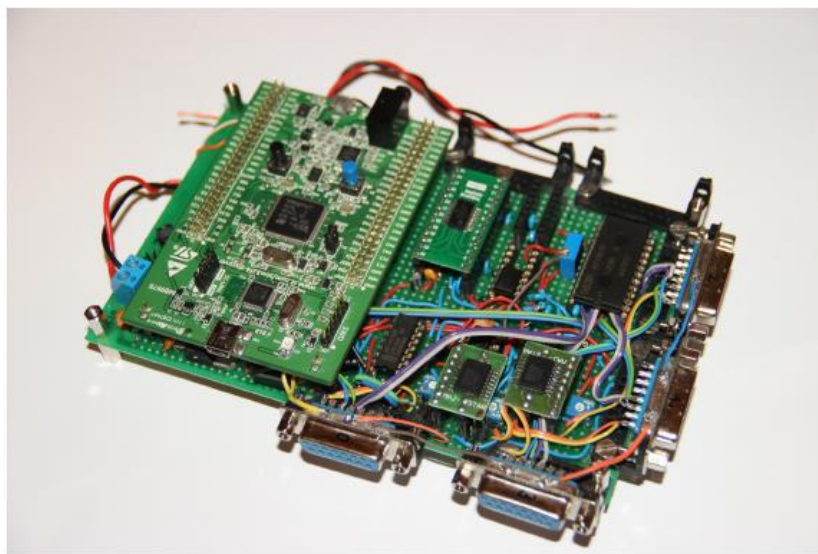
2.3 Jan Kříž – Tenzometrické měření náprav závodního vozu

2.3.1 Přínos pro práci

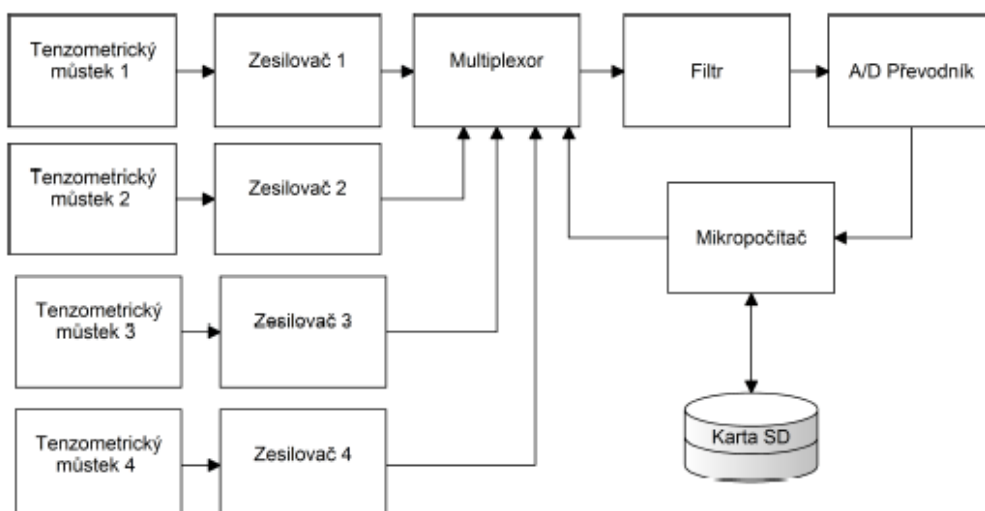
Autor se v práci zabýval hlavně návrhem měřící jednotky. Návrhem měřící jednotky se tato práce zabývat nebude. Je vhodné tenzometry před samotným testováním zkalibrovat, aby byla zjištěna chyba. Použil zapojení do plného můstku, což je mnohem přesnější, a bylo by vhodné ho také použít. Je nutné mít testování detailně připravené a vědět, jaké hodnoty by měly dané můstky měřit, aby bylo ihned možné odhalit chybu.

2.3.2 Použité přístroje

Autor použil zesilovač pro každý můstek z mikrovoltů na milivoly z důvodů lepšího měření. Navrhl také vlastní zařízení pro měření sil. Pro vyhodnocení sil a zobrazení grafů použil program Matlab. Na Obr. 11 je vlastní zařízení, dále na Obr. 13 je schéma zapojení měřícího aparátu a na Obr. 12 jsou data k použitým tenzometrům.



Obr. 11 Zařízení bez připojených tenzometrů [3, str. 40]



Obr. 13 Schéma měřícího aparátu [3, str. 20]

parametr	hodnota
Typ	křížový (dvě mřížky ortogonálně nad sebou)
Výrobce	Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH (HBM)
Označení	1 – XY91 – 3/120
Nominální odpor	$120 \Omega \pm 0,5\%$
Součinitel deformační citlivosti K	$2,00 \pm 1\%$
Teplotní kompenzace pro materiál	ocel
Rozměry měřící mřížky	$3 \times 3 \text{ mm}$
Rozměry tenzometru	$6,2 \times 7,2 \text{ mm}$
Maximální napájecí napětí můstku	$3,5 \text{ V}$

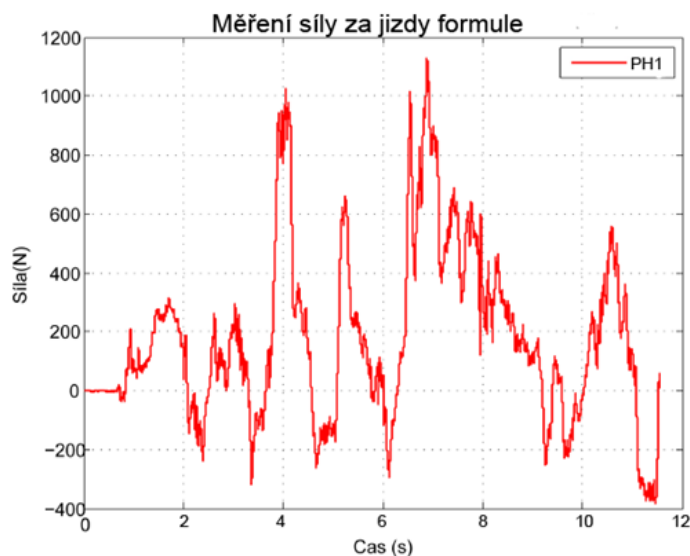
Obr. 12 Datasheet použitých tenzometrů [3, str. 23]

2.3.3 Průběh měření

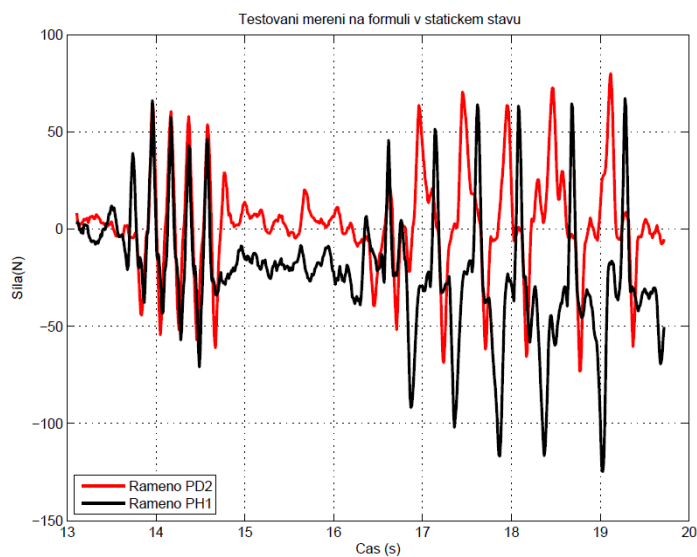
Autor použil 4 tenzometry na každou tyč náprav, měl tedy zapojení do plného můstku. Kalibroval tenzometry, postupným zatěžováním a zjistil chybu do 5 %. Kalibroval zhotovený přípravek, nastavil zesílení pomocí potenciometru, tím tam, ale vnesl další chyby, neví spolehlivě, jak moc zesilovač zesiluje. Provedl testování pro závody, ale neuvedl přesně, jakým způsobem zkouška probíhala. Z mnoha měření bylo zjištěno, že měří pouze jeden kanál, nepoznal to, kvůli nepřehledné situaci na polygonu, viz Graf 1. Další měření proběhlo na statické formuli, kde se objevila neočekávaná chyba na tenzometrickém můstku, a dvě tyče se nepodařilo změřit. Byl velký rozdíl mezi napětím můstku a rameny v řádu milivoltů, vyřešil to snížením zesílení. Důvod neobjevení této chyby při kalibraci byla robustnost centrály, která byla naddimenzována, aby chyby tohoto typu kompenzovala. Nejdříve



formuli rozhoupali, viz Graf 2 (14. sekunda), pak simulovali brzdění a akceleraci 16. -19. sekunda.



Graf 1 Měření zatížení [3, str. 42]



Graf 2 Měření zatížení [3, str. 43]

2.3.4 Vyhodnocení

V závěru autor navrhl přidat ještě jeden zesilovač za stávající a tím by vrátil rozsah zpět na původní měřicí rozsah. Vyskytl se příliš velký šum napájecího napětí. K analýze dat použil autor Matlab. Zkonstruovaný přístroj není podle autora dostatečně robustní pro měření ramen. Přístroj má malý počet kanálů. [3]



2.4 Ondřej Plíhal - Určení zatížení závěsu kola na voze formule Student

2.4.1 Přínos pro práci

Je nutné testování detailně připravit, podobně jako připravil autor této práce. Je vhodné použít některé části z průběhu testování akcelerace, stálá zatáčka a slalom. Zkalibroval tenzometry na trhacím stroji. Autor však neměřil žádný z prvků řízení.

2.4.2 Použité přístroje

Autor použil měřící stanici CompactRio na Obr. 14.

Zařízení má dostatečnou paměť a kompaktní rozměry, takže může být umístěno mezi nohy řidiče.



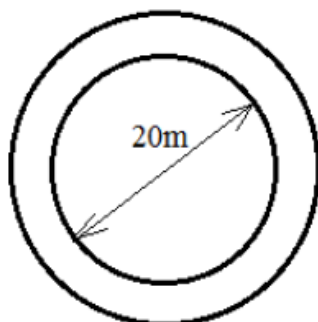
Obr. 14 Měřící stanice CompactRio [4, str. 40]

Bylo použito zapojení tenzometrů do plného mostu. Byly použity křížové tenzometry, které kalibroval na trhacím stroji. Byly zatěžovány silou 300 N, 600 N, 1000 N a 1300 N. Naměřené hodnoty z testování zpracoval a analyzoval v programu LabView. Jednotlivé kabely od tenzometrů byly svedeny dovnitř vozu pod nohy řidiče a připojeny do měřícího zařízení.

2.4.3 Průběh měření

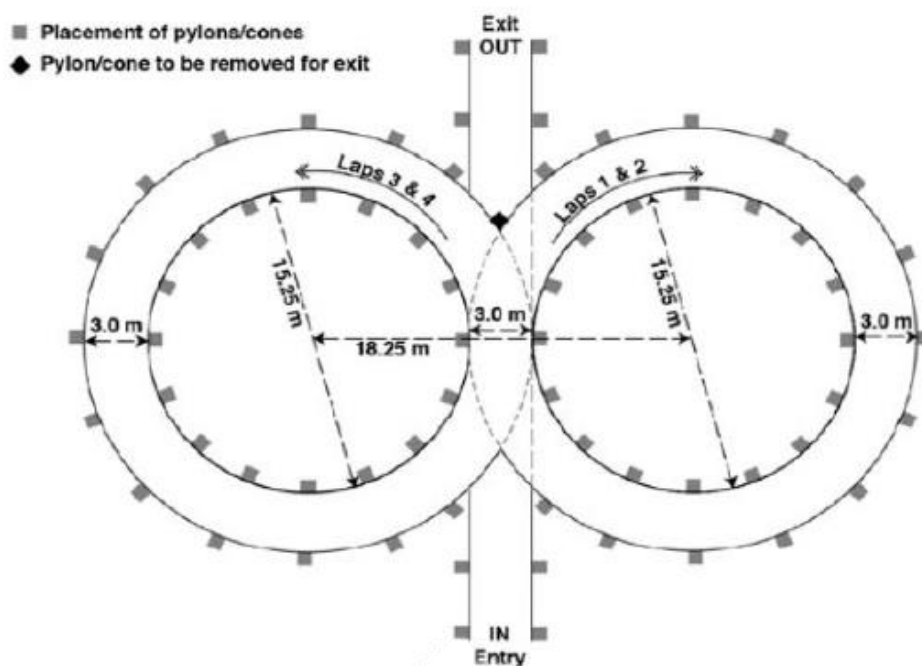
Měření probíhalo v Panenském Týnci na vojenském letišti. Nejprve provedl zkoušku měřícího aparátu a poté zahřál vozidlo. Samotnou zkoušku autor rozdělil do 5 částí: akcelerace, stálá zatáčka, jízda osmičkou, slalom, celý okruh.

1. akcelerace na 100 km/h + následné brzdění (5x na první rychlostní stupeň a 5x na druhý rychlostní stupeň) testovaná formule je se spalovacím motorem
2. stálá zatáčka - na Obr. 15 - 3 kola jedním směrem a poté 3 kola druhým směrem rychlostí 40 km/h poté znovu rychlostí o 5 km/h rychleji až do 55 km/h



Obr. 15 Stálá zatáčka [4, str. 49]

3. jízda osmičkou - na Obr. 16 - nejprve třikrát projet osmičku a poté třikrát projet osmičku agresivnějí jízdou

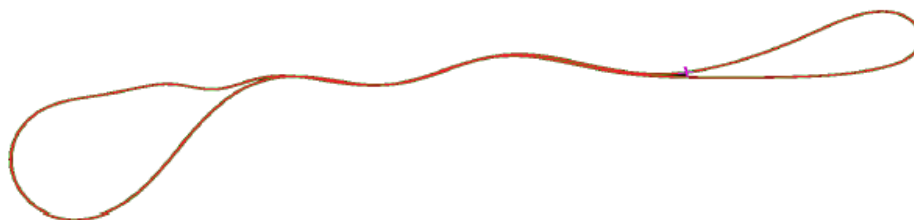


Obr. 16 Náskres tratě [4, str. 50]

4. slalom - jinak nespecifikovaná jízda mezi kužely, autor neuvádí vzdálenost ani počet kuželů, naplánoval pětkrát průjezd slalomem



5. celý okruh – ve své práci popisuje zkoušku jako spojení všech jízdních režimů, plánuje deset kol , viz Obr. 17



Obr. 17 Celý okruh [4, str. 50]

2.4.4 Vyhodnocení

Maximálních hodnot zatížení ramen nápravy bylo dosaženo v režimu zatáčka. Naměřené hodnoty porovnal s výpočty. Porovnával závislost síly na rychlosti, vyhodnocoval aritmetické průměry, max. a min. síly, směrodatné odchylky. Vyhodnotil frekvence vibrace vozidla 10 Hz, 50 Hz a 90 Hz. Nejvíce namáhaná tyč zadního zavěšení kola spodní (RT) má živostnost 3877 km. [4]



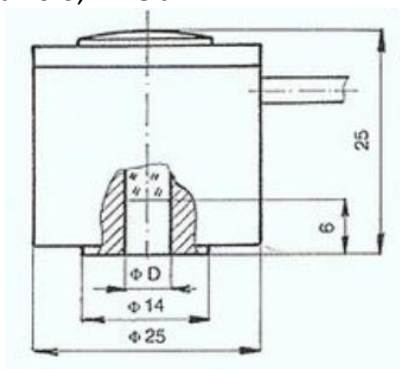
2.5 Ing. Pavel Švager- Konstrukce zařízení pro měření tuhosti řízení

2.5.1 Přínos pro práci

V této práci autor vybíral metodu a navrhoval experimentální určení tuhosti mechanismu řízení osobního automobilu. Jelikož se tato práce zabývá pouze návrhem měření bez samotného experimentu, nelze zde zhodnotit funkčnost celého měření. Autor sice v poslední kapitole shrne všechny možné zdroje chyb, avšak z toho nelze posoudit funkčnost ani validitu případného experimentu. Je to však měření, které je oproti dynamickému testování mnohem méně závislé na aktuálním stavu vozu, z hlediska pojízdnosti a je mnohem méně náročné na personál a na počasy.

2.5.2 Měřicí přístroje

Autor používal tenzometrický siloměr LUKAS TENZO S-30, viz Obr. 18, tím autor měřil sílu, kterou tlačil posuvný šroub na kolo, viz Obr. 22.



Obr. 18 Siloměr LUKAS TENZO S-30 [5, str. 50]

Vyhodnocovací zařízení F-11, viz Obr. 19, malé rozměry a hmotnost, bateriové napájení, jednoduchou obsluhu.



*Obr. 19 Vyhodnocovací zařízení F-11
[5, str. 51]*

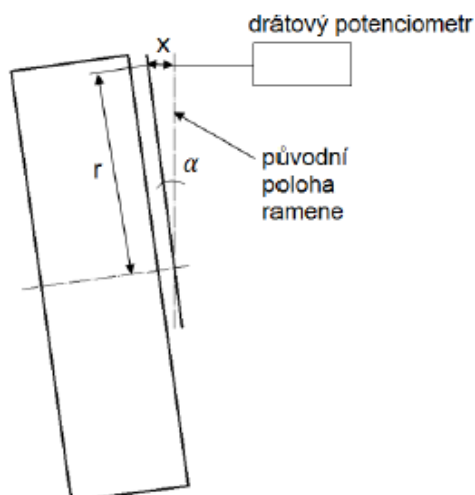
Drátový potenciometr, viz Obr. 20, který používá jako jednoduché zařízení pro měření vzdálenosti, zaznamenává vzdálenost kontinuálně, umístěno rovnoběžně s ramenem kola a drát se připojí ke kolu pomocí magnetu. Autor práce také mezi možnosti měření uvedl měření úhlu pomocí systému TRITOP. Jedná se o technologii bezkontaktního měření přesných prostorových souřadnic měřeného objektu pomocí digitálního fotoaparátu.



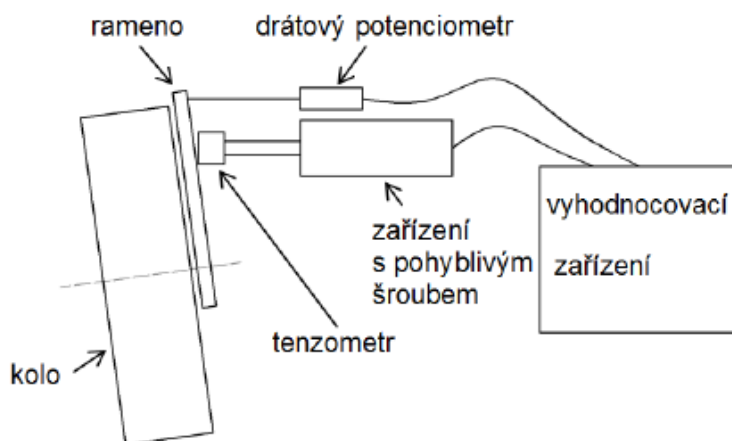
Obr. 20 Drátový potenciometr [5, str. 53]

2.5.3 Průběh měření

Autor v této práci pouze navrhoval měření, fyzicky měření neprováděl. Navrhl dva měřicí řetězce. První řetězec, viz Obr. 22, dokáže měřit sílu kontinuálně pomocí tenzometrického siloměru a úhel natočení pomocí drátkového potenciometru, viz Obr. 21.



Obr. 21 Měření úhlu potenciometrem [5, str. 54]



Obr. 22 Schéma měřícího řetězce [5, str. 54]

Druhý řetězec se skládá z tenzometrického siloměru a poté se využívá systému TRITOP pro měření úhlu. Tento řetězec nedokáže měřit kontinuálně, protože pokaždé musíme kvůli systému TRITOP udělat fotografie, aby systém vyhodnotil deformace. Tato metoda je však velmi přesná.

2.5.4 Vyhodnocení

Autor na závěr své práce popsal možné chyby měření. Vedle systematických, náhodných a hrubých chyb popisuje i chyby obecné jako například špatně proškolený personál nebo zkeslení výsledku v důsledku deformace zařízení blokující volant. [5]



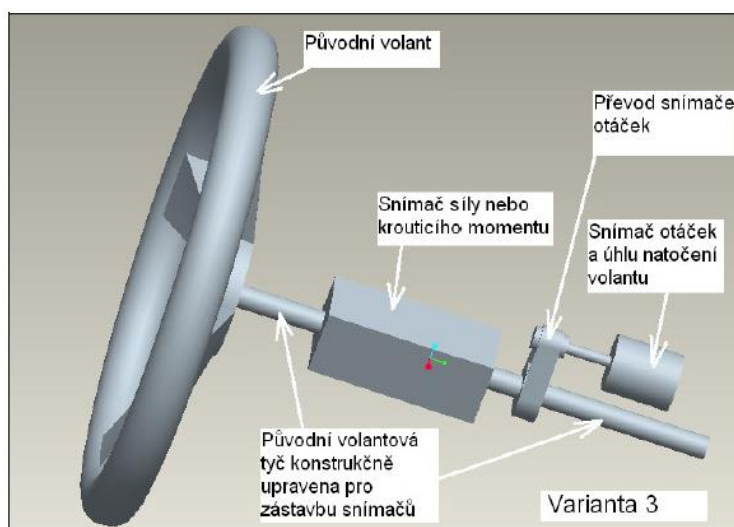
2.6 František Klapal - Měření parametrů na volantu osobního automobilu

2.6.1 Přínos pro práci

Autor se v této práci zabýval konstrukčním řešením měřícího zařízení pro měření parametrů na volantu osobního automobilu Škoda Roomster. Nahrazuje původní sloupek na volantu měřícím zařízením. Získaná data budou sloužit pro vývoj a naladění mechanismu řízení s ohledem na rychlost jízdy. Práce se zabývá pouze návrhem a sestrojením měřícího aparátu a tím poslouží pouze jako inspirace v měření sil v řízení. Kvůli tomu, že je práce bez fyzického testování nepomůže odhalit možné chyby ve vlastním měření. Návrh mechanismu měření je však navíc uzpůsoben na osobní automobil, kde je mechanismus řízení v některých věcech odlišný. Snímač natočení volantu je již součástí naší měřené formule.

2.6.2 Měřící přístroje

Autor použil tenzometrický snímač kroutícího momentu Hottiger, T5 50 Nm a snímač polohy RLS RMB 30. Navrhl 3 varianty využití měřícího zařízení, které se od sebe lišily polohou měřících prvků. Variantu 3, kterou autor použil, vidíme na Obr. 23.



Obr. 23 3. Varianta měření [6, str. 30]

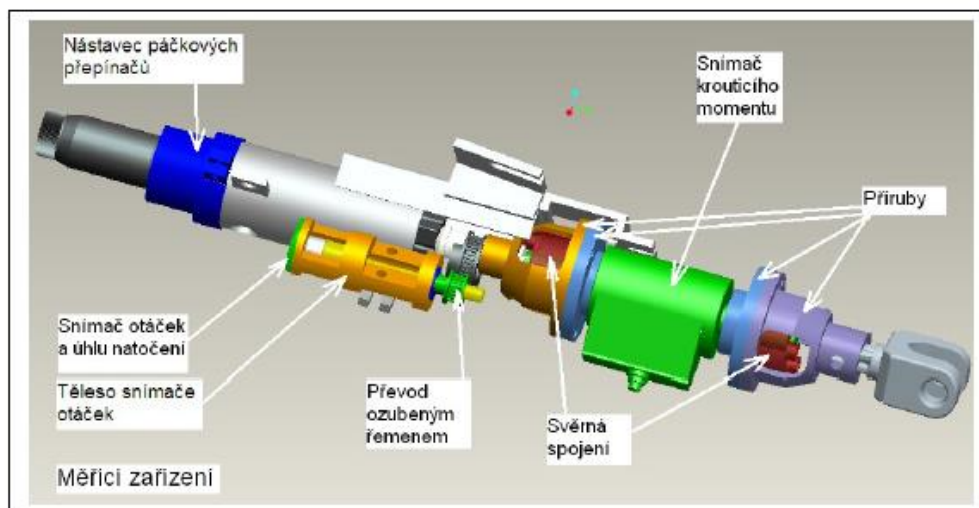
Tato varianta je jednodušší v uchycení snímače otáček, snímač kroutícího momentu je pevně přimontován, signál je veden jednoduchým kabelem. V této variantě použijeme původní volant (airbag). Nevyžaduje změnu prostoru mezi sedadlem řidiče a volantem.



Naopak nevýhoda této varianty je ve větší konstrukční úpravě původního sloupku volantu a složitější připojení snímače kroučícího momentu a hnacího kola ozubeného řemene snímače otáček.

2.6.3 Průběh měření

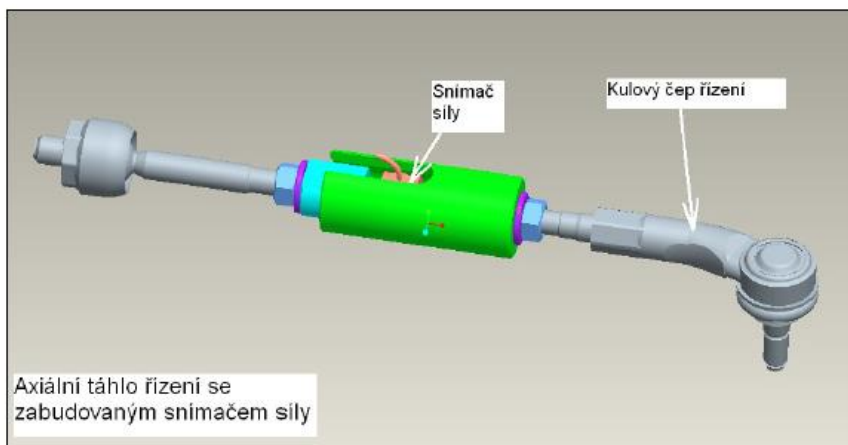
Autor práce by podle posouzení výhod a nevýhod zvolil variantu 3. Poté podrobně popisuje výrobu volantové tyče, viz Obr. 24.



Obr. 24 Model měřícího zařízení [6, str. 36]

Měření bude prováděno kontinuálně po celou dobu testu. Délka testu bude záviset na samotném zadání testu, rozdílné pro jízdu na dálnici a pro měření bez posilovacího účinku mimo dálnici.

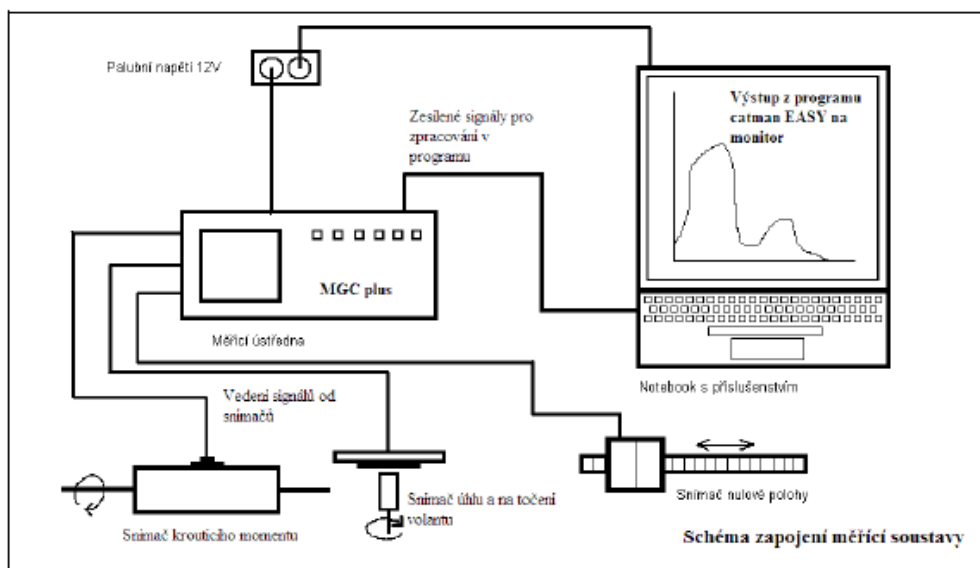
Jako podpůrné měření autor označil měření axiální síly v táhle řízení, viz Obr. 25, které bylo konstrukčně upraveno a byl tam přidán snímač síly od firmy Hottiger s označením U9B pro sílu 10 kN. Při měření neuvažuje sílu vyšší než 5 kN.



Obr. 25 Model axiálního táhla řízení [6, str. 49]



Na Obr. 26 vidíme schéma měřicí soustavy.



Obr. 26 Schéma měřicí soustavy [6, str. 46]

2.6.4 Vyhodnocení

Autor celé navržené zařízení podrobil pevnostnímu výpočtu pomocí MKP, kvůli bezpečnosti. Celé měření by bylo zpracováno v programu Catman easy. Vlastní měření na reálném vozu neprováděl. [6]



2.7 Výpočetní programy pro statické řešení zatížení

Existuje mnoho výpočetních programů, které pomáhají konstruktérům při návrhu různých komponent. Návrh zavěšení kol je však specifický, souvisí s ním totiž také návrh mechanismu řízení. Proto většina programů na simulaci a výpočty náprav zahrnuje i prvky řízení. Zahrnují vždy minimálně spojovací tyč a hřeben.

Simpack od firmy Dassault Systemes, která stojí taky mimo jiné za konstruktérským programem Catia, se používá pro dynamickou analýzu různých mechanismů včetně náprav a řízení. Používá 3D model se všemi vazbami a simuluje různé způsoby reálného zatížení. Velmi věrohodně simuluje například průjezd vozů výmolem a různé jiné stavy, které mohou nastat při provozu.

Adams je dalším programem, který simuluje chování mechanismů v reálných podmínkách. Stejně jako Simpack umožňuje simulaci chování zavěšení při průjezdu autem přes různé překážky a vyhodnocuje zatížení v jednotlivých prvcích mechanismů.

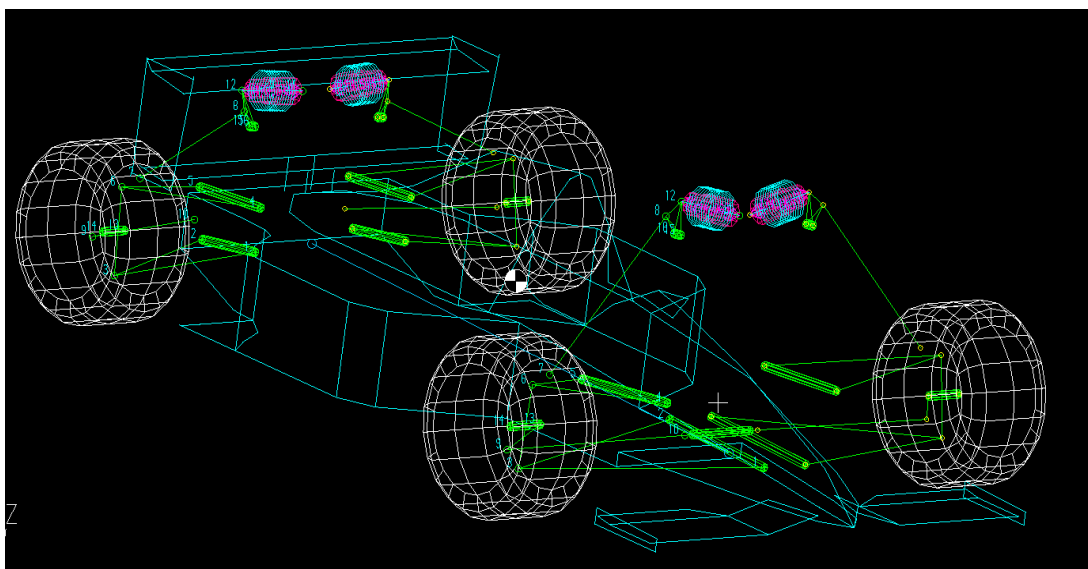
Lotus Suspension Analysis je program automobilové značky Lotus, který se zabývá pouze simulací chování náprav a části řízení. Je velmi jednoduchý, jednotlivé komponenty nahrazuje čarami místo 3D modelu. Dokáže simulovat zatáčení, což je pro tento výpočet důležité.

Pro výpočetní odhad bude bohatě stačit Lotus Suspension Analysis (LSA), ostatní jsou pro tento výpočet příliš podrobné a náročné na přípravu. Navíc použití LSA je výhodnější z toho důvodu, že se používá běžně v týmu studentské formule eForce pro návrh náprav.



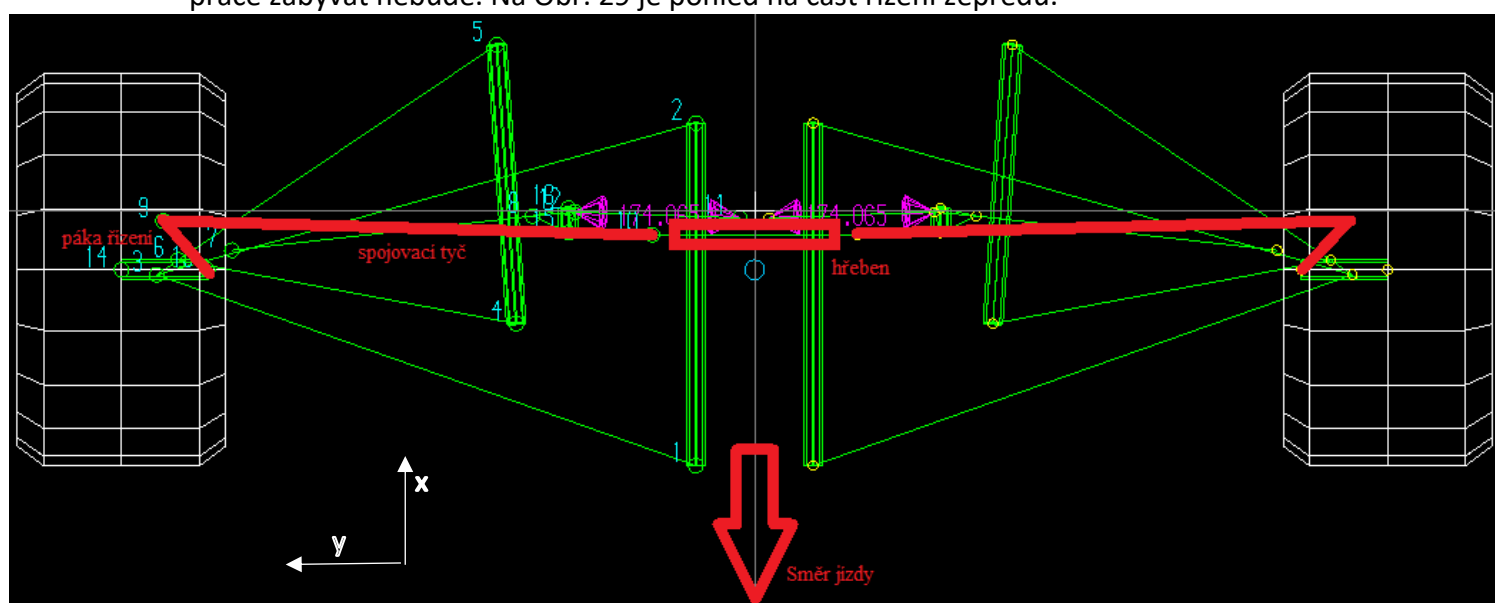
3 Výpočet zatížení pomocí LSA

Při testování je vhodné porovnat aktuální výsledky z měření s výpočetním odhadem a snadněji odhalit možnou chybu. Pro tento odhad byl použit program LSA, kde je připravený model zavěšení kol a části řízení, podle kterého bylo navrženo zavěšení studentské formule FSE.08, tedy té, na které bude provedeno měření, viz Obr. 27.

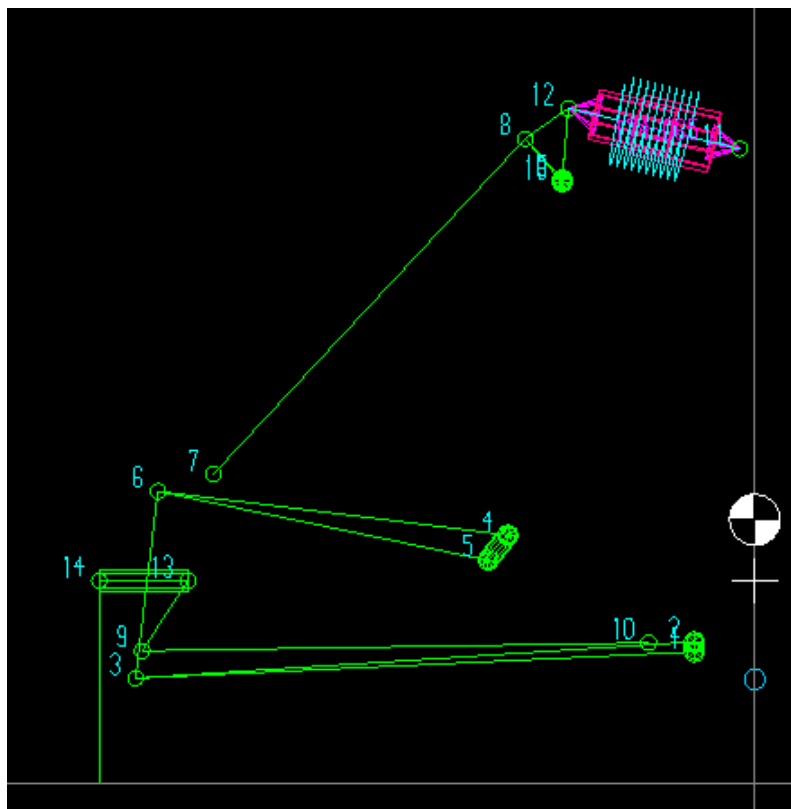


Obr. 27 Lotus Suspension Analysis [autor]

Z mechanismu řízení je v programu pouze páka řízení a spojovací tyč od kola k hřebenu, na Obr. 28 jsou vyznačeny červeně. Páka řízení je však součástí těhlice a jejím zatížením se práce zabývat nebude. Na Obr. 29 je pohled na část řízení zepředu.



Obr. 28 LSA půdorys s vyznačenými prvky řízení [autor]



Obr. 29 LSA levá přední část zepředu [autor]

V programu je možnost zadat externí síly, které působí na mechanismus. Byly tam tedy zadány síly na mezi adheze v místě dotyku kola s vozovkou. Síla na mezi adheze závisí na součiniteli tření mezi pneumatikou a vozovkou, na váze vozidla a v našem případě i na rychlosti, protože je formule vybavena aerodynamickými prvky, které vytváří přítlak v závislosti na rychlosti. Síla na mezi adheze F_A byla spočítána dle vztahu (9)

$$F_A = (G + F_P) \cdot f \quad (9)$$

kde

G je tíhová síla formule s pilotem [N]

F_P je síla způsobená přítlakem [N]

$f = 1,3$ je součinitel tření mezi pneumatikou a vozovkou, známe z výpočtů pro nápravy.

Tíhová síla byla spočítána dle vztahu (10):



$$G = (m_{\text{vozidla}} + m_{\text{pilota}}) \cdot g \quad (10)$$

kde

$m_{\text{vozidla}} = 204 \text{ kg}$ je váha vozidla

$m_{\text{pilota}} = 80 \text{ kg}$ je váha pilota, se kterou bylo počítáno

$g = 9,81 \text{ m/s}^{-2}$ je tíhové zrychlení

po dosažení byla hodnota tíhové síly $G = 2786,04 \text{ N}$.

Síla způsobenou přitlakem F_p byla spočítána pomocí vztahu (11):

$$F_p = 0,5 \cdot \rho \cdot C_S \cdot v^2 \quad (11)$$

kde

$\rho = 1,225 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ je hustota vzduchu

$C_S = 3,9 \text{ m}^2$ je součinitel přitlaku, $C_S = c_y \cdot S$, známe ze simulací

v je rychlost, kterou jede vozidlo v m/s.

V Tab. 5 jsou hodnoty aerodynamické přitlakové síly v závislosti na rychlosti vozu.

Rychlost [km/h]	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
Aerodynamická síla [N]	0	18,4	73,7	165,9	294,9	460,8	663,5	903,2	1179,6	1493,0	1843,2	2230,2	2654,2

Tab. 5 Aerodynamická síla v závislosti na rychlosti

V LSA bylo hledáno maximální zatížení mechanismu. Bylo tedy nutné nejprve zjistit, v jakém směru je třeba zadat sílu na dotykový bod pneumatiky s vozovkou, aby se přeneslo do řízení největší zatížení. Bylo zadáno 12 různých směru působení síly na kolo v rovině vozovky, rozdělených po 30°. Byla zadávána vždy stejná referenční síla 1600 N a tím byla zjištěna síla, která se přenesla do řízení. Tento postup byl důležitý pro zjištění nejhoršího způsobu namáhání. LSA má 3 režimy simulace reálného provozu, v prvním se vozidlo pohybuje v odpružení nahoru a dolů na obou stranách stejně, poté je možnost vozidlo rozhoupat tak, že se pohybuje ze strany na stranu a poslední režim je natáčení kol jako při řízení. Bylo využito posledního zmiňovaného režimu. Na Obr. 30 je vidět část výsledků, které program vypočítá. V červeném kroužku nahoře je pozice hřebenu v mm vůči počáteční středové pozici. Poté v prvním sloupci je označení jednotlivých bodů modelu v LSA. Bod 10 v kroužku



odpovídá spojovací tyči, na stejném řádku jsou síly v této tyči. Důležitá síla ve směru osy y je pro přehlednost opět v kroužku.

INCREMENTAL FORCE VALUES

BUMP ROLL/RACK TRAVEL ANGLE TRAVEL (mm) (deg) (mm)	POINT No.	FX GLOBAL (N)	FY GLOBAL (N)	FZ GLOBAL (N)	FX LOCAL (N)	FY LOCAL (N)	FZ LOCAL (N)
0.00/0.00/5.00	1	-35.32	982.26	-57.73	-35.32	982.26	-57.73
	2	-34.49	1484.50	-86.70	-34.49	1484.50	-86.70
	3	-69.81	2466.76	-144.43	-69.81	2466.76	-144.43
	4	-12.32	-275.25	-93.60	-12.32	-275.25	-93.60
	5	-27.60	-5.82	-52.29	-27.60	-5.82	-52.29
	6	61.26	-1170.98	808.20	61.26	-1170.98	808.20
	10	8.55	304.22	-4.68	8.55	304.22	-4.68
	9	8.55	304.22	-4.68	8.55	304.22	-4.68
	7	-101.18	889.91	-954.10	-101.18	889.91	-954.10
	8	-101.18	889.91	-954.10	-101.18	889.91	-954.10
	15	69.96	11.16	609.53	69.96	11.16	609.53
	16	65.96	80.32	576.18	65.96	80.32	576.18
Tyre1		0.00	0.00	-659.09	0.00	0.00	-659.09
Spring1		-34.67	-979.54	-231.14	34.67	979.54	231.14

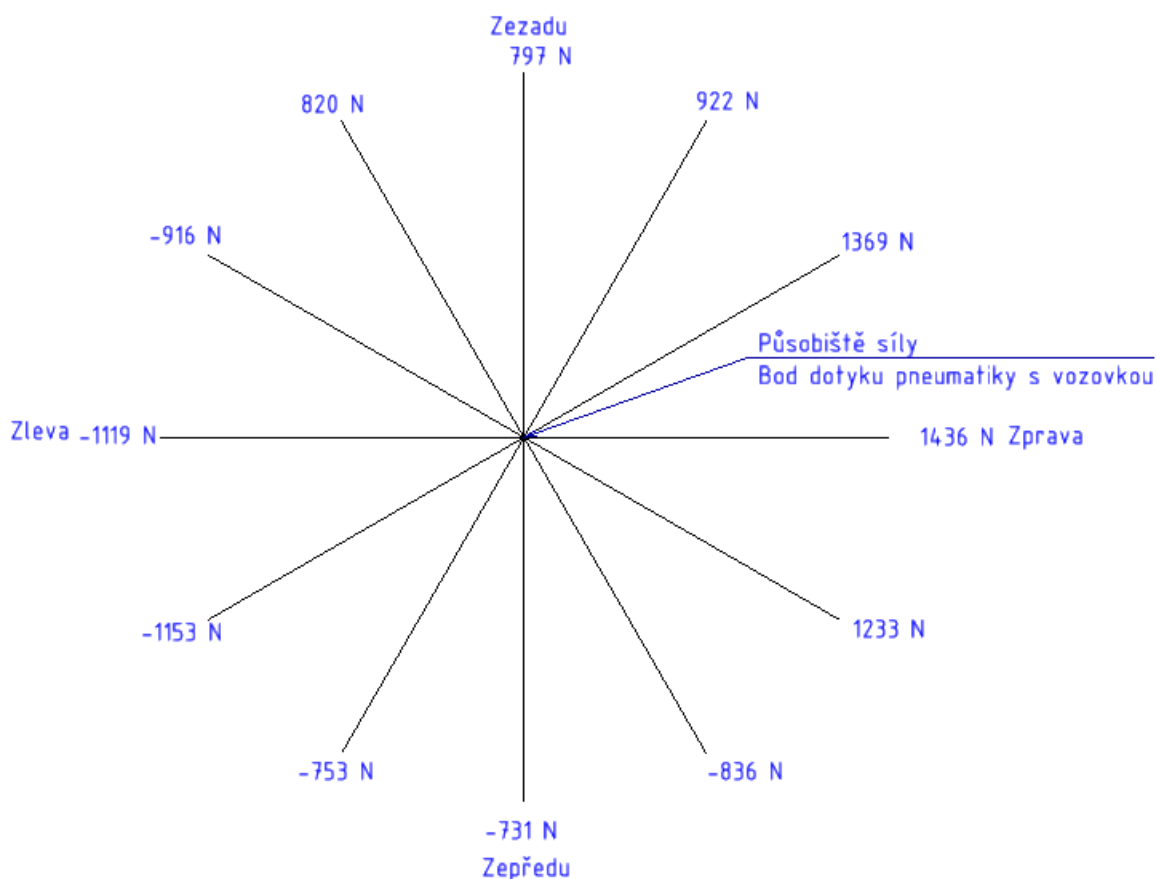
Obr. 30 Ukázka výsledků z LSA [autor]

Výsledek zatížení pro pozici hřebene 5 mm ve směru osy y, viz Obr. 28. Stejně bylo postupováno pro všechny ostatní pozice a tím bylo zjištěno maximální zatížení v jednom směru působení síly, viz Tab. 6 v kroužku.

posun hřebene [mm]	30	25	20	15	10	5	0	-5	-10	-15	-20	-25	-30
síla ve spojovací tyči[N]	-571,5	-366,8	-181,8	-10,7	150,3	304,2	453,5	600,5	748,0	899,1	1058,3	1233,0	1436,4

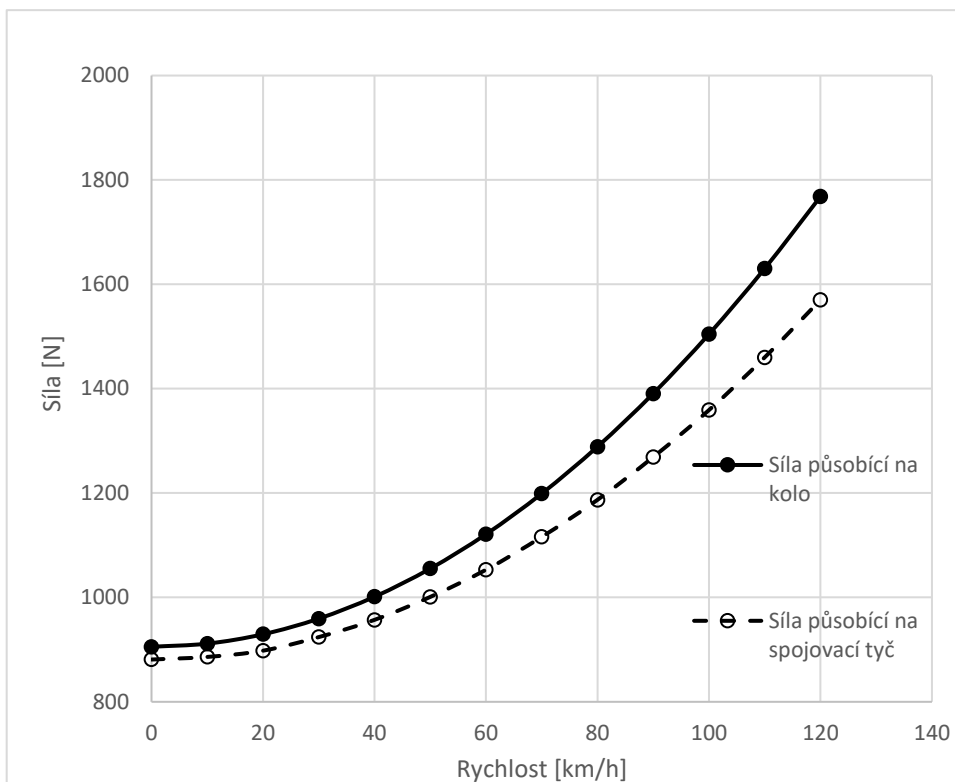
Tab. 6 Závislost síly na pozici hřebene [autor]

Stejně tak bylo postupováno pro všechny ostatní z 12 pozic. Na Obr. 31 je vidět, že největší zatížení do řízení se přeneso, pokud síla působí na levé kolo zprava vzhledem k podélné ose vozu. Největší hodnoty zatížení dosáhne, pokud je hřeben v maximální pozici tedy 30 mm proti směru osy y, viz Tab. 6. Levé kolo je tedy v maximálním natočení směrem doprava. Jelikož se na našem vozu měří i natočení volantů, můžeme jednoduše při testování zjistit natočení kol.



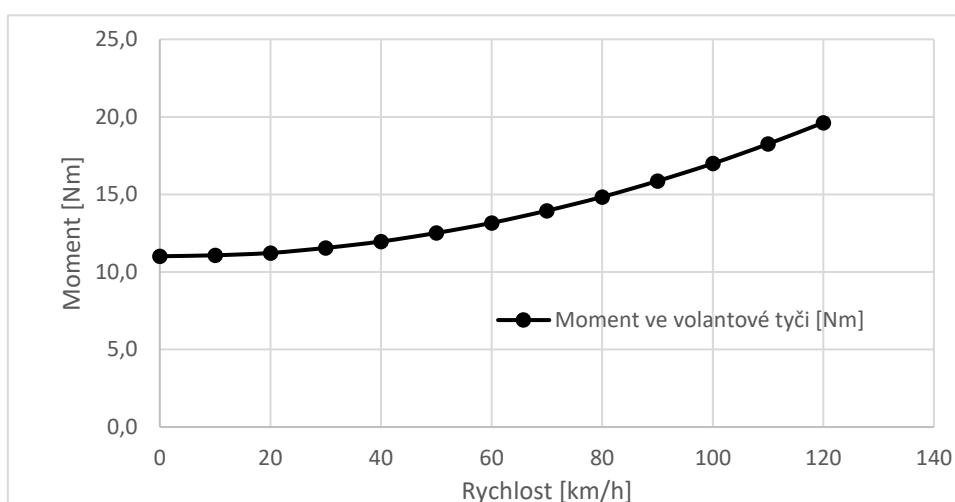
Obr. 31 Síly přenesené do řízení podle směru síly působící na levé kolo [autor]

Síla na mezi adheze je podle vztahu (9) spočítána pro celý vůz. Pro náš odhad bylo uvažováno, že rozložení sil na jednotlivá kola je rovnoměrné a výsledná adhezní síla celého vozu byla vydělena čtyřmi. Ve směru zprava, tedy směrem od monokoku, byla zadávána do programu čtvrtina síly na mezi adheze celého vozu v různých rychlostech. Výslednou maximální předpokládanou sílu ve spojovací tyči v závislosti na rychlosti vozu lze vidět v Graf 3 přerušovanou čarou.



Graf 3 Závislost síly na rychlosti [autor]

Síla ve spojovací tyči byla jednoduše přepočítána na moment, který by měl být naměřen ve všech částech od pastorku hřebenového soukolí přes volantovou tyč až po volant. Síla ve spojovací tyči byla vynásobena poloměrem roztečné kružnice ozubeného kola, které přenáší moment z volantové tyče na hřeben. Výsledky, viz Graf 4.



Graf 4 Závislost momentu na rychlosti [autor]



4 Formula Student monopost FSE.08

Na tomto voze bude probíhat testování, viz Obr. 32. Celý vůz je navržen studenty z týmu eForce FEE Prague Formula, většinu komponent si studenti sami vyrábí v dílně. Jedná se o elektrický vůz s pohonem všech 4 kol a maximálním výkonem 87,8 kW (omezeno dle pravidel Formula Student na 80 kW). Má kompozitní monokok sendvičové struktury z uhlíkových vláken s hliníkovou voštinou a pěnovým jádrem ROHACELL®. Celý vůz váží bez řidiče 202 kg a má rozvor 1540 mm. Rozložení hmotnosti vozidla je 50 : 50 % mezi přední a zadní nápravu. Má nezávislé zavěšení všech kol, každé kolo je spojeno s vlastním motorem a výkon každého z motorů je možné řídit zvlášť. Na každý motor je připojena planetová převodovka se stálým převodem (6,95 vpředu a 6,71 vzadu). Kola mají hořčíkové ráfky 10" OZ Formula Student Magnesium a pneumatiky Hoosier R10". Akumulátor vozu je sestaven z článků SONY VTC5A a celková energie 8,1 kWh a jmenovité napětí 346 V a maximální napětí 403 V. Maximální naměřená rychlost vozu byla 120 km/h a zrychlení z 0 km/h na 100 km/h za 2,5 s. Systém vozu je schopen za jízdy měřit a zaznamenávat akceleraci ve třech osách, rychlost vozu, otáčky před převodovkou tzn. otáčky, které jsou výstupem z motoru, stlačení tlumičů zavěšení kol, natočení volantu, tlak v brzdových okruzích a další data, ty však pro naše měření nejsou důležitá.



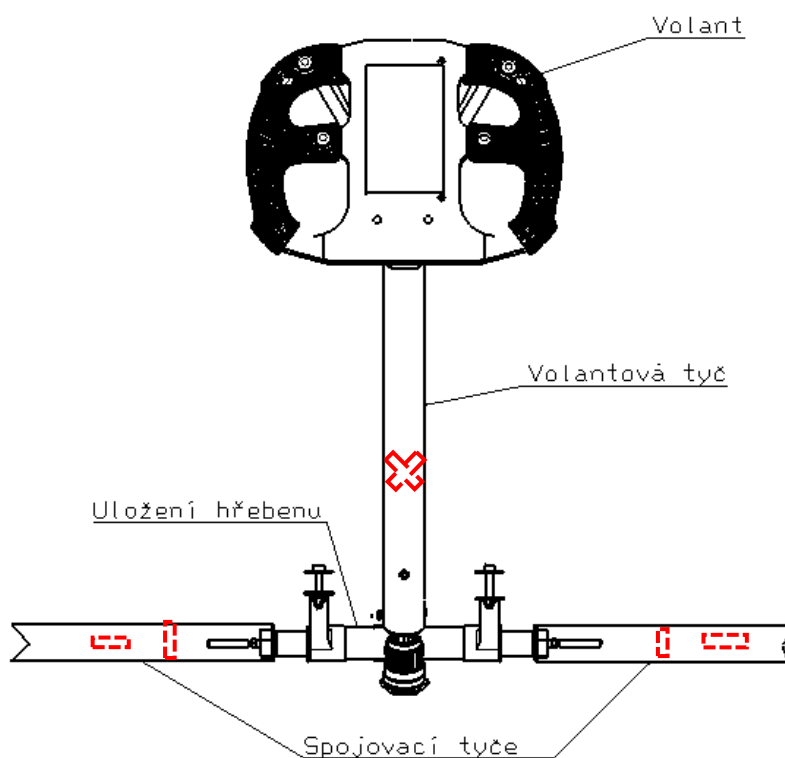
Obr. 32 FSE.08 [autor: člen týmu eForce]



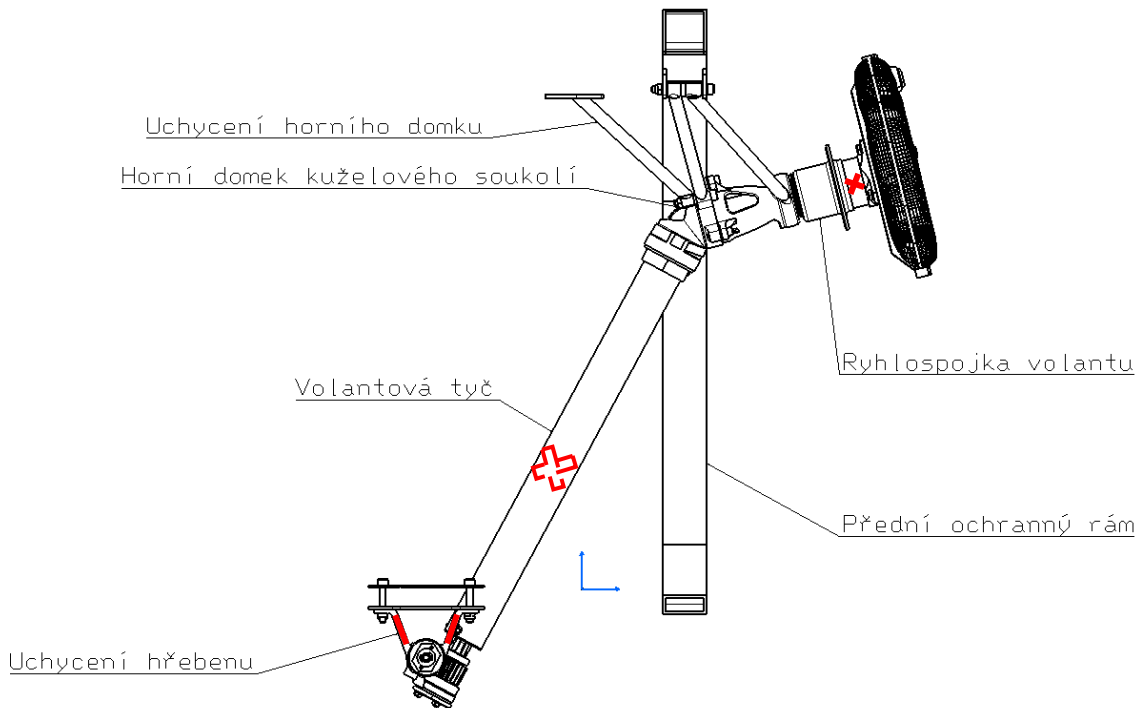
4.1 Místa měření sil v řízení

Je několik možností, kde lze měřit namáhání mechanismu řízení, viz Obr. 33 a Obr. 34.

Řízení formule je z velké části složeno z kompozitních komponent. Tenzometrické měření na kompozitních součástech je velmi problematické, protože pro určení přesného zatížení z deformace je potřeba znát přesnou skladbu a orientaci vláken z důvodů různého modulu pružnosti v závislosti na směru zatížení. Proto je vhodné vybrat pro měření části, které jsou z oceli nebo hliníku. Pro měření byla vybrána čtyři umístění na různých komponentech. Některé komponenty jsou však vyrobené z uhlíkových vláken, bylo rozhodnuto, že nahradí novými díly vyrobenými z kovu. Tento problém se týká konkrétně spojovací tyče a volantové tyče.



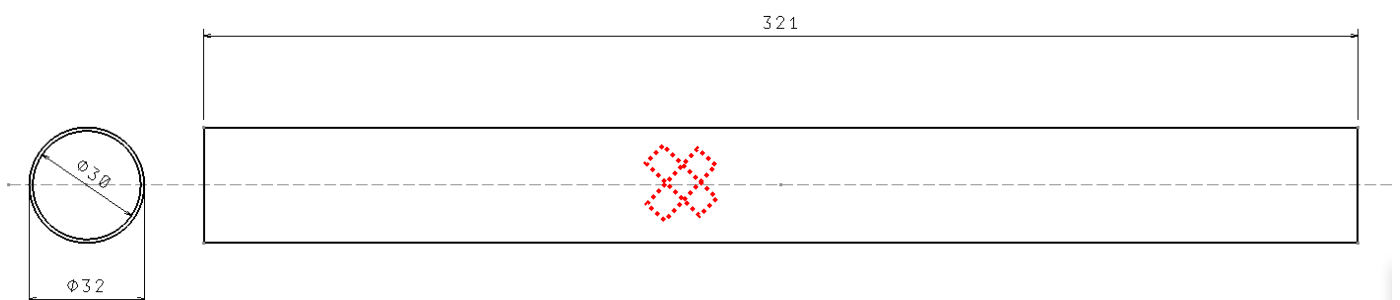
Obr. 33 Schéma části řízení směrem od řidiče [autor]



Obr. 34 Schéma části řízení zleva [autor]

4.1.1 Volantová tyč

Zde bude měřeno tenzometry uspořádanými do měření kroutícího momentu. To znamená, že budou vůči sobě pootočený o 90° a vůči ose tyče o 45°, viz Obr. 35 a budou zapojeny do plného můstku. Jelikož je měřená volantová tyč umístěna uvnitř monokoku, kde bude umístěna i měřicí jednotka, kabeláž bude svedena rovnou k ní. Jelikož je trubka vyrobena z kompozitního materiálu bude vyměněna za trubku z hliníku. Výměna je podrobněji popsána v kapitole 5.1.



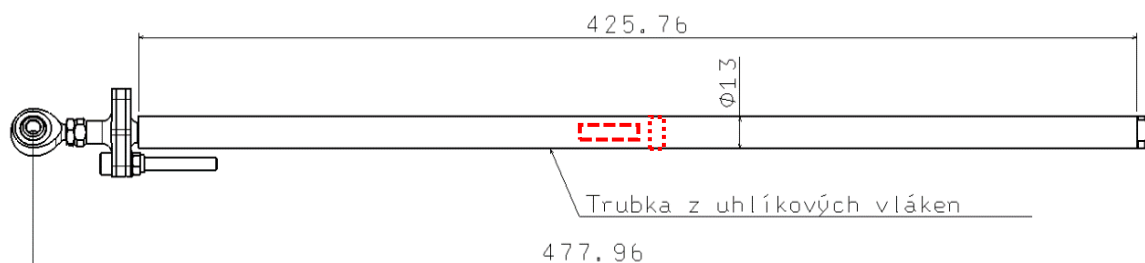
Obr. 35 Volantová tyč [autor]

4.1.2 Spojovací tyč

Zde bude měřeno čtyřmi tenzometry zapojenými do plného můstku podle uspořádání, viz Obr. 36. Toto uspořádání by mělo kompenzovat vliv ohybu a teploty. Kabeláž bude odtud vedena podél tyčí až ke spodnímu domku řízení a kolem něj dírou v monokoku dovnitř



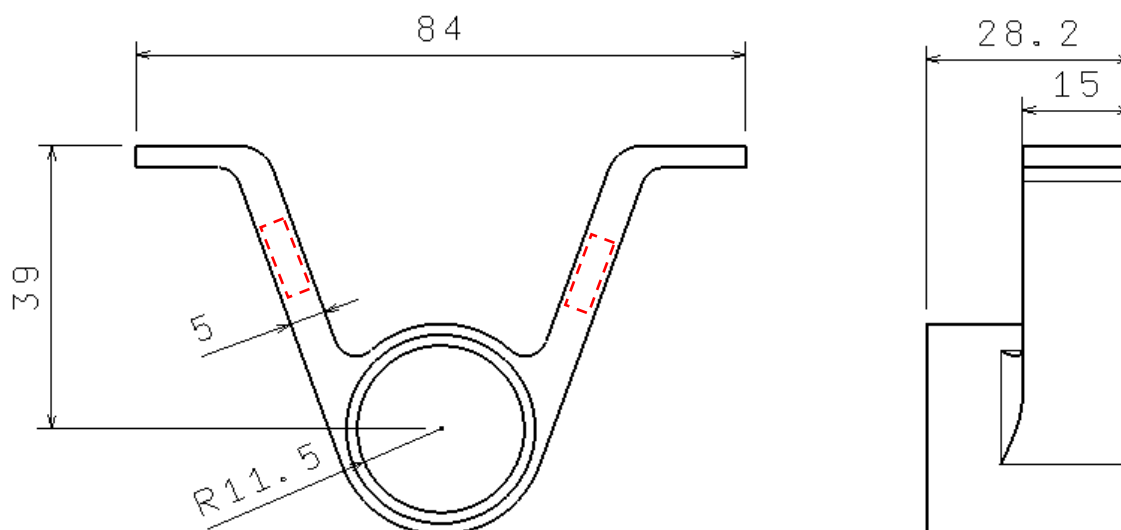
vozu až k měřicí jednotce. Jelikož je trubka řízení, na které bude probíhat tenzometrické měření zatížení, vyrobena z uhlíkových vláken, bude nahrazena trubkou ocelovou. Výměna bude provedena pro obě kola, jelikož se bude měřit namáhání na obou stranách.



Obr. 36 Spojovací tyč [autor]

4.1.3 Uchycení hřebenu

Zde bude měřena síla, která působí na uchycení spodního domku při zatáčení. Budou k tomu použity tenzometry na každé straně uchycení zapojené do půlmůstku. Na Obr. 37 jsou znázorněny přerušovanou červenou čarou. Kabeláž bude vedena podél domku a spojovací tyče otvorem v monokoku dovnitř formule k měřicí jednotce.

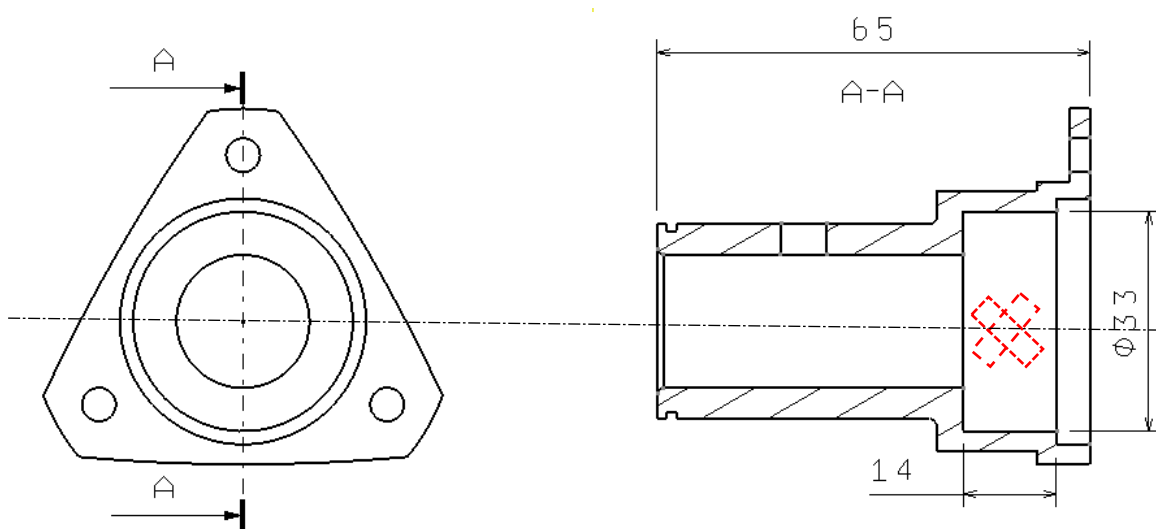


Obr. 37 Uchycení hřebenu [autor]



4.1.4 Vnitřní průměr rychlospojky

Na vnitřním průměru rychlospojky bude měřen přímo moment, kterým řidič namáhá mechanismus řízení. Bude měřen tenzometry potočenými o 90° vůči sobě a vůči ose o 45°, podle Obr. 38 a tenzometry budou zapojeny do plného můstku. Kabeláž od tenzometrů bude svedena dovnitř volantu k ostatní elektronice a spolu s ní vyvedena z volantu ven až k měřicí jednotce.



Obr. 38 Rychlospojka [autor]



5 Testování

5.1 Příprava na testování

Protože tým studentské formule eForce nedisponuje žádnými tenzometry ani zařízením pro vyhodnocení dat z tenzometrů. Bylo nutné vyjednat podporu s měřením někde jinde. Byl požádán o podporu technický ředitel Centra vozidel udržitelné mobility v Roztokách pan Ing. Vojtěch Klír Ph.D., který byl vstřícný a slíbil podporu tomuto měření.

Primárně bude snaha změřit zatížení na volantové tyči a na spojovací tyči, protože jsou největšími elementy a bude tak měření méně náročné na výběr tenzometrů a méně ovlivněné například změnou průměru. Tyto tyče jsou však z důvodů úspory váhy vyrobeny z kompozitních materiálů, jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole. Volantová tyč tedy bude vyměněna za tyč hliníkovou a tyč spojovací za ocelovou. Spojovací tyče budou vyměněny za trubky, které se používají na nápravy tedy z chrom-molybdenové oceli průměru 16 mm a tloušťky stěny 1 mm. Trubky byly zkráceny na přesné rozměry podle modelu na soustruhu a byly k nim svařeny ocelové vložky s metrickým závitem M6. Do závitů byly našroubovány Aurory M6. Aurory jsou spojovací prvky s metrickým závitem na jedné straně a na straně druhé je koule s otvorem pro lícovaný šroub, která se může téměř volně otáčet v pouzdře a tím zajišťuje sférickou vazbu.

Pro výměnu volantové tyče byla objednána hliníková trubka průměru 32 mm a tloušťkou stěny 1,5 mm. Původní uhlíková trubka měla průměr 33 mm a tloušťku stěny 1,5 mm, proto bylo nutné u hliníkové trubky vysoustružit vnitřní průměr 30 mm, aby do ní bylo možné vlepit část horního kuželového soukolí, viz Obr. 39. Nejdříve bylo nalisováno ložisko na kolo kuželového soukolí a poté byly vyvrtány do hliníkové trubky díry pro nýty, kterými se zajistil tento spoj po slepení.

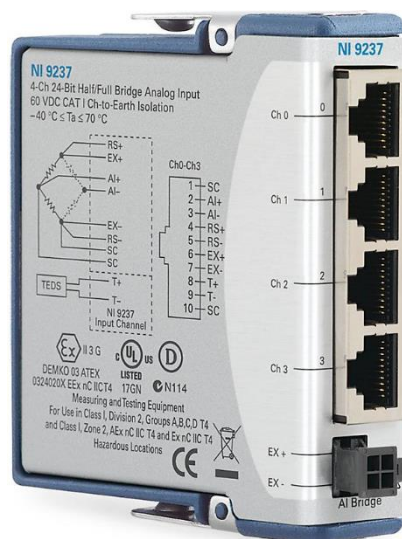


*Obr. 39 Volantová tyč s horní částí kuželového soukolí
[autor]*



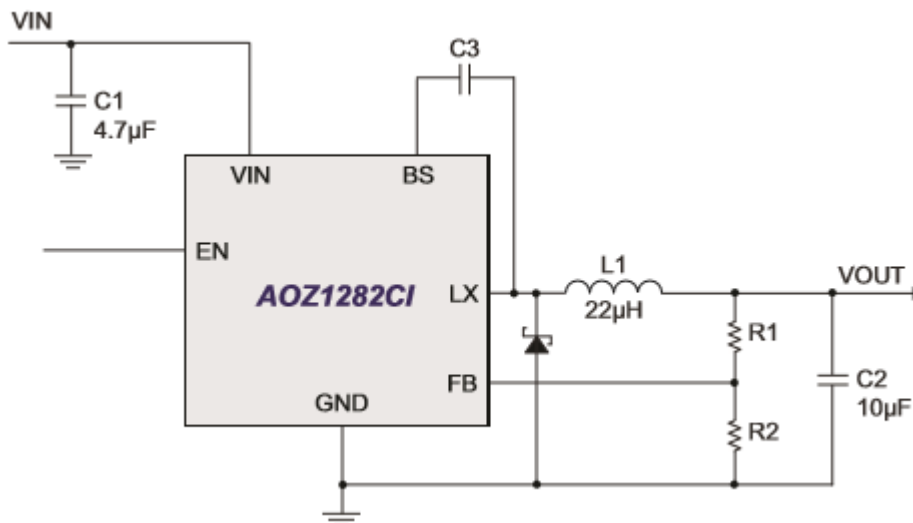
Po zanáytování a vytvrnutí spoje byly předány tyče panu doktoru Klírovi. S ním bylo domluveno, že na součásti nalepí tenzometry podle toho, jak jsme se domluvili a jak uvádíme v kapitole 4.1. Na hliníkové části budou použity tenzometry s označením 1-XY13-3/120. Obsahují dvě měřicí mřížky, které jsou vůči sobě pootočené o 90° a odpor v nezátíženém stavu je 120 Ω . Pro měření na ocelových částech se použijí jednoosé tenzometry s označením 1-LY11-3/120, který má odpor 120 Ω , a 1-LY11-3/350, který má odpor 350 Ω . Poté se použijí tenzometry dvouosé s označením 1-XY21-3/120, které mají opět dvě měřicí mřížky pootočené o 90° a odpor 120 Ω . Tenzometry se přilepí na měřený materiál pomocí lepidla na kov Z70, připájí se k nim potřebná napájecí a měřicí kabeláž. Celý tenzometr se poté překryje silikonem, který zajistí odolnost proti mechanickému opotřebení. Po vyzkoušení základní funkčnosti bude možné takto připravené díly vyměnit ve studentské formuli. Spojovací tyče budou rovnou připravené na výměnu, ale volantová tyč se bude muset ještě upravit. Nejprve bude vyndána původní volantová tyč a změří se přesně velikost a podle ní se zkrátí tyč nová. Stejně jako na druhém konci bude vysoustružen vnitřní průměr na 30 mm. Vložku s vnitřním drážkováním do trubky bude vlepena přímo ve formuli, aby bylo zajištěno, že bude volant i kola rovně. Poté bude spoj opět zajištěn kolíkem.

Elektronika formule není připravena pro měření tenzometrických můstků. Pro toto měření by se musela navrhnout a zkonstruovat speciální jednotka, která by byla schopna čtyřsvorkově měřit malé změny odporu měřicích tenzometrů. Zároveň by musel být vytvořen potřebný software pro zpracování analogových hodnot a jejich odeslání na sběrnici CAN. Z toho důvodu bude použito zařízení NI Compact DAq s modulem 9237 od pana doktora Klíra. Zařízení má 4 analogové vstupy a je schopno měřit čtvrtmůstkové, půlmůstkové i zapojení do plného můstku, viz Obr. 40.



Obr. 40 Modul NI 9237 [7, str. 1]

Jednotka NI Compact DAq se připevní do formule a připojí se k ní veškerá kabeláž od tenzometrických můstků pomocí RJ-45 konektorů. Napájení tohoto zařízení bude z Low-voltage baterie formule, která má napětí 24 V. Měřicí jednotka potřebuje napájení 12 V. Snížení napětí se realizuje spínaným zdrojem s pomocí čipu AOZ1282CI na desce plošných spojů podle Obr. 41.

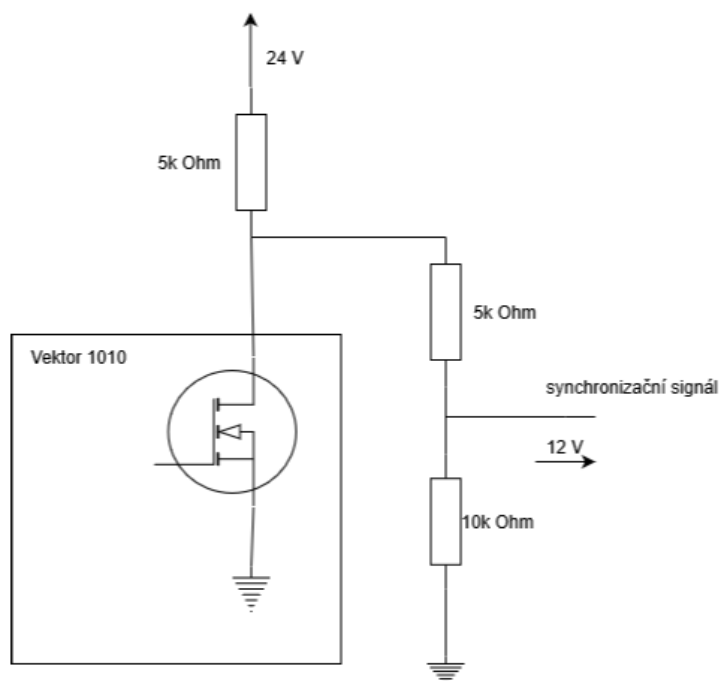


Obr. 41 Schéma transformátorového zapojení z 24 V na 12 V [8, str. 1]

Tato měřicí jednotka bude zaznamenávat a ukládat svorkové napětí jednotlivých můstků. Data se poté přesunou pomocí USB do PC, kde budou exportována do formátu mathfile, aby mohla být dále zpracována v Matlabu.



Pro měření budou také potřeba data o rychlosti a natočení volantu z palubní diagnostiky vozu, která používá logovací zařízení Vector GL1010. Toto zařízení je vybaveno USB konektorem pro přesun dat do PC, dále má dvě sběrnice CAN přes, které je připojena veškerá diagnostika vozu. Disponuje také dvěma LIN kanály, dvěma digitálními vstupy i výstupy a čtyřmi analogovými vstupy. Z tohoto zařízení se veškerá data obvykle v řádech stovek MB pomocí programu exportují do formátu mathfile, který je poté rovnou možno zpracovat v Matlabu. Bude nutná časová synchronizace obou měřících zařízení. Využije se proto jednoho digitálního výstupu z logovacího zařízení vozu, který bude propojen se zařízením NI Compact DAq. V logovacím zařízení se nastaví, aby se po 10 s od zapnutí změnila na digitálním výstupu logická hodnota z 0 na logickou hodnotu 1, která bude sloužit jako impuls pro synchronizaci. Na Obr. 42 je schéma řešení problému rozdílu napětí mezi jednotkami, které synchronizuje impuls.[9]



Obr. 42 Schéma obvodu pro synchronizaci [autor]

5.2 Přepočet odhadu výsledku

V kapitole 3, byl pomocí LSA proveden odhad zatížení prvků. Z měřící jednotky budou získány rozdíly napětí a z nich pomocí vztahů v kapitole 2.1 poměrné prodloužení. Je vhodné si odhad zatížení přepočítat podle geometrie tyčí na poměrné prodloužení, aby bylo možné rovnou porovnávat výsledky. Výsledky jsou očekávány v mezích platnosti Hookova zákona, proto pro přepočet namáhání ve spojovací tyči byl použit vztah:



$$\sigma = \varepsilon \cdot E \quad (12)$$

kde

E je Youngův modul pružnosti v tahu [MPa]

σ je napětí [MPa]

ε je poměrné prodloužení [-].

Pro chrom-molybdenovou trubku, z níž je vyrobena spojovací tyč je $E = 210\,000$ MPa.

Napětí se spočítá podle vztahu:

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (13)$$

kde

F [N] je normálová síla působící na plochu o průřezu S [mm²].

Poměrné prodloužení v závislosti na osově síle ve spojovací tyči je v Tab. 7.

Osová síla [N]	Napětí σ [MPa]	Poměrné prodloužení ε
881	4,673850162	2,2256E-05
886	4,700375986	2,2383E-05
898	4,764037963	2,2686E-05
924	4,901972247	2,3343E-05
957	5,077042685	2,4176E-05
1001	5,310469934	2,5288E-05
1053	5,586338503	2,6602E-05
1116	5,920563883	2,8193E-05
1187	6,297230582	2,9987E-05
1269	6,732254093	3,2058E-05
1359	7,209718922	3,4332E-05
1460	7,745540564	3,6884E-05
1570	8,329108688	3,9662E-05

Tab. 7 Prodloužení pro spojovací tyč [autor]

Přepočet z poměrného prodloužení na moment ve volantové tyči je poněkud složitější. Bylo využito vztahu (14):

$$\tau = \frac{M_K}{W_K} \quad (14)$$

kde

τ je smykové napětí [MPa]

M_K je krouticí moment [MPa]

W_K je průřezový modul v krutu [mm³], ten závisí na geometrii a vypočítá se dle vztahu (15):



(15)

$$W_K = \frac{\pi \cdot D^3}{16} \cdot \left[1 - \left(\frac{d}{D} \right)^4 \right]$$

kde

D je vnější průměr trubky [mm]

d je vnitřní průměr trubky [mm].

Pro výpočet smykového napětí byl použit vztah (16):

$$\tau = G \cdot \gamma_z = G \cdot (\varepsilon_a + \varepsilon_b) \quad (16)$$

kde

G je modul pružnosti v krutu [MPa]

γ_z je zkos vzhledem k umístění tenzometrů [-]

$\varepsilon_a, \varepsilon_b$ jsou poměrná prodloužení tenzometrů a, b [-].

Součet poměrných prodloužení v závislosti na krouticím momentu je v Tab. 8.

Krouticí moment M_K [N.mm]	Smykové napětí τ [MPa]	Součet poměrných prodloužení $\varepsilon_a + \varepsilon_b$
11012,5	5,258672006	0,000115575
11075,0	5,288516909	0,000116231
11225,0	5,360144678	0,000117805
11550,0	5,515338176	0,000121216
11962,5	5,71231454	0,000125545
12512,5	5,974949691	0,000131318
13162,5	6,285336688	0,000138139
13950,0	6,661382473	0,000146404
14837,5	7,085180103	0,000155718
15862,5	7,574636522	0,000166476
16987,5	8,111844786	0,000178282
18250,0	8,714711837	0,000191532
19625,0	9,371299715	0,000205963

Tab. 8 Hodnoty pro volantovou tyč [autor]



5.3 Statické testování v laboratoři

- při tomto měření se využije přípravek na měření torzní tuhosti monokoku, kde se místo kol připevní na náboj kolové soustavy přípravek, který znemožní pohyb náboje a tím je zablokuje, viz Obr. 43



*Obr. 43 Přípravek na měření torzní tuhosti monokoku
[autor: člen týmu eForce]*

- poté bude připevněna na volant ocelová tyč minimální délky 1,2 m
- zapne se měřící jednotku
- na tyč připevněnou k volantu ve vzdálenosti 1 m od osy otáčení volantu, se bude přidávat závaží začátek bude 1 kg a bude se postupně zvyšovat po 200 g až na 2 kg
- poté se tyč opět odlehčí
- vypne se měření
- data z měření se přesunou do PC a zpracují se v programu Matlab
- hmotnost závaží je zvolena podle předpokladu zatížení momentem při jízdě mezi 10 až 20 Nm
- stejné jednotlivé hodnoty podle zatížení na páce připevněné k volantu by měly být změřeny i na tenzometrech, přičemž bude zaznamenáno svorkové napětí, které bude přepočítáno na moment nebo osovou sílu
- pokud budou hodnoty naměřené oproti vstupním vycházet o více než 20 % rozdílně, bude nutné najít a opravit chybu a poté test opakovat



5.4 Dynamické testování ve venkovním prostředí

- testování proběhne nejspíše na Strahově
- pro přesun a manipulaci formule jsou vždy potřeba minimálně 4 lidé
- bude potřeba minimálně jeden člen mechanické skupiny, který má zkušenosti se servisem a testováním formule
- bude potřeba minimálně jeden člen elektrické skupiny, který rozumí systémům a elektrickým obvodům formule, má zkušenosti se servisem formule při testování a je schopen vyhodnotit diagnostiku vozu
- bude potřeba minimálně jeden člověk, který je způsobilý a umí pracovat s měřícím zařízením NI Compact DAq
- je nutné, aby do testovacího prostoru nemohl nikdo vstoupit, bude tedy ohraničen kužely
- kolem prostoru budou v době jízdních zkoušek stát minimálně 2 lidé s hasicími přístroji
- v testovacím prostoru budou umístěny dva kužely cca 30 m od sebe
- zapne se měřící jednotka
- sundají se z kol formule návleky a zapne se low voltage systém formule
- poté se spustí měření namáhání a všichni odstoupí od formule
- pilot zapne HV systém
- vyzkouší funkčnost samotné formule, několikrát zrychlí a brzdí, vyzkouší zatáčení
- projede třikrát osmičku kolem těchto dvou kuželů, které jsou v prostoru rozmístěny, pokusí se projet v různých rychlostech (např.: 20, 30, 40 km/h)
- pilot zastaví, vypne HV systém
- vypne se měření, přenesou se naměřená data z jednotky do PC, bude použit program Kalman pro vyhlazení dat od šumu způsobeným vibracemi při jízdě
- svorkového napětí se přepočítá na poměrnou deformaci a ta bude porovnána s předpokladem v sobě si odpovídajících rychlostech podle záznamu z diagnostiky vozu



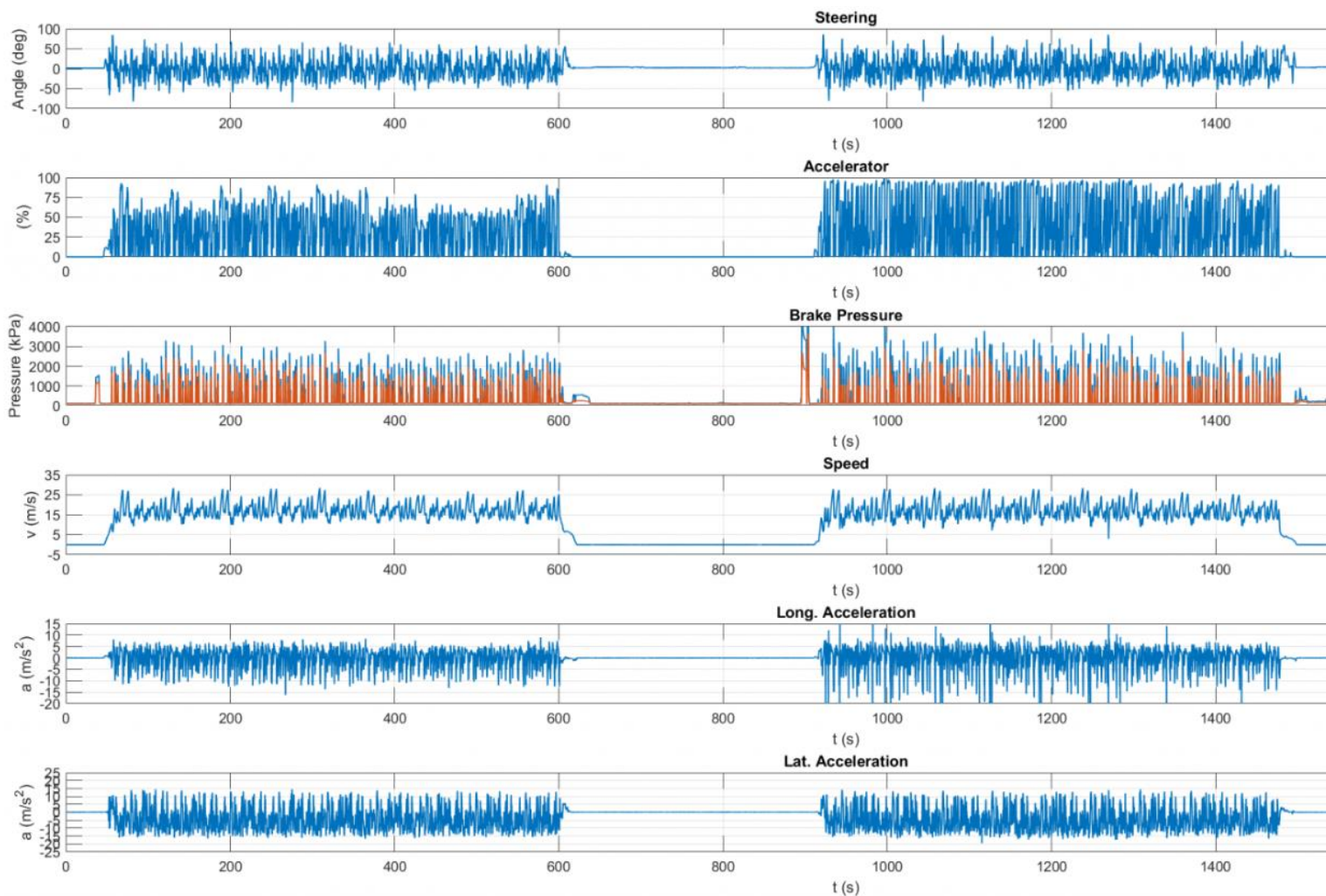
- zaměříme se hlavně na to, jestli se na některém z měřících můstků neobjeví výrazný šum s amplitudou překonávající řádově odhad, který by mohl být způsoben ostatní kabeláží v blízkosti kabeláže měřícího zařízení

5.5 Hlavní testování

- testování proběhne v Panenském Týnci nebo v Milovicích na letišti
- bude potřeba stejný počet a složení lidí jako na testování na Strahově a proběhne i stejná příprava
- kolem testovacího prostoru se rozmístí členové týmu s hasicími přístroji
- před testováním se vytvoří ze čtyř kuželů dvě brány vzdáleny od sebe 75 m, které budou sloužit pro testování namáhání při akceleraci
- zapne se měření a pilot otestuje funkčnost formule a zahřeje pneumatiky
- když bude formule připravena na testování, začne se s testem při akceleraci
- zastaví za první branou naproti druhé, která bude vzdálena 75 m, na pokyn vyrazí co nejrychleji vpřed do druhé brány a po projetí bránou se pokusí co nejrychleji zatočit v co nejvyšší možné rychlosti, tím by se mělo simulovat nejvyšší zatížení z výpočetního odhadu, otočí se a provede ten samý test z druhé strany
- poté se vrátí formule k týmu a pilot vypne HV systém, přesunou se data z měřící jednotky do pc a formule se připojí na diagnostiku
- data z měřící jednotky se zpracují v programu Kalman, který vyhledá data od šumu způsobeným vibracemi při jízdě
- přepočítají se napětí na poměrné deformace
- budou porovnány 4 hodnoty poměrné deformace s odhadem v odpovídajících rychlostech, pokud se budou řádově shodovat, pokračujeme v testování, pokud ne, tak budeme hledat možnou chybu, případně opakujeme měření
- mezi tím zbytek týmu přestaví trať na další test, na který bude potřeba udělat z kuželů stálou zatáčku s vnitřním poloměrem 20 m
- zapneme měření a HV, pojedou stálou zatáčkou proti směru hodinových ručiček v různých rychlostech



- první dvě kola v 30 km/h, druhá dvě kola 50 km/h a poslední dvě kola co nejrychleji tak, aby se co nejvíce držel u vnitřního okraje zatáčky
- opět se vypne měření a přesunou se data do PC a zkontroluje se, zda nedošlo k nějaké chybě v měření
- zbytek týmu mezitím přestaví kužely do jedné řady 9 m od sebe (11 kuželů)
- pilot projede slalom mezi kužely třikrát v různých rychlostech, poprvé tam a zpět 15 km/h, podruhé 25 km/h a potřetí co nejvyšší rychlostí
- pokud se v některém měření objevila chyba, tak je potřeba jej zopakovat
- při dalším testování bude simulována trať Endurance, která také bývá na závodech Formula Student
- trať Endurance je uzavřené kolo, které má podle pravidel FS:
 - a) rovné úseky kratší než 80 m
 - b) stálé zatáčky průměru až 50 m
 - c) zatáčky rychle za sebou musí mít minimální vnější průměr 9 m
 - d) kužely při slalomu musí mít mezi sebou rozstup od 9 m do 15 m
 - e) šířka trati nesmí být méně než 3 m
 - f) délka jednoho kola musí být cca 1 km
 - g) délka celého Endurance musí být cca 22 km [10]
- budou zpracována data, vyhodnotí se chyby měření, stanoví se hodnota maximálního zatížení a jízdní režim ve, kterém ji bylo dosaženo
- jízdní režim získáme z dat palubní diagnostiky, viz Obr. 44



Obr. 44 Výsledná data z palubní diagnostiky [autor: člen týmu eForce]

- první je vidět natočení volantu v průběhu měření, následuje hodnota stlačení plynového pedálu, poté tlak v brzdových okruzích modře je znázorněn tlak v předním brzdovém okruhu a oranžově tlak v zadním okruhu
- dále je vidět aktuální rychlost vozu a zrychlení vozu nejprve v podélné ose a poté v příčné
- z těchto dat je možné zjistit, zda pilot ve chvíli největšího zatížení v řízení, brzdil a zároveň zatáčel nebo zda například akceleroval ven ze zatáčky
- poté co se zjistí režim ve kterém je největší reálné zatížení v řízení je možné tento stav uměle simulovat pro získání přesnějších výsledků o maximálním zatížení



6 Závěr

V této práci bylo nejprve navrženo tenzometrické měření jako metoda stanovení namáhání za účelem optimalizace mechanismu řízení. Poté byly provedeny rešerše předchozích prací, které se touto problematikou zabývaly. U každé práce byly vybrány informace, které jsou přínosné pro naši práci. Například bylo zjištěno, že je nutné dát brát zřetel na umístění kabeláže od tenzometrů. Zejména se vyhnout kabelům napájení motorů, kvůli možnému vzniku šumu. Práce Ondřeje Plíhala byla inspirativní průběhem jízdních zkoušek. Byly také prozkoumány možnosti statického řešení pomocí výpočetních programů a nakonec byl využit program LSA.

V tomto programu byl poté vytvořen výpočetní odhad zatížení v závislosti na rychlosti, který bude možné porovnávat s naměřenými hodnotami, a tak snadněji odhalit chybu při dynamickém měření.

Následně jsou v práci uvedeny technické údaje měřeného vozu a bylo popsáno schéma mechanismu řízení. Bylo navrženo umístění a orientace tenzometrů. Bylo popsáno vedení kabeláže od tenzometru k měřící jednotce, která bude umístěna mezi nohama řidiče.

Před samotným testováním je nutná příprava, která byla popsána v kapitole 5.1. Bylo rozhodnuto, že pro měření bude vhodné vyměnit kompozitní volantovou a spojovací tyč za tyče kovové. Byl navržen a popsán postup zprovoznění měřícího zařízení a časové synchronizace. Výpočetní odhad byl přepočítán na konkrétní měřené prvky, aby bylo možné přímo porovnávat naměřené prodloužení s odhadem.

Byl vytvořen podrobný plán testování a jízdních zkoušek pro stanovení namáhání. Testování bylo připraveno tak, aby co možná nejvíce přiblížilo chování vozu na závodech Formula Student.



Použitá literatura

- [1] VOLF, Jaromír a Josef JENČÍK. Technická měření. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000. ISBN 8001021386.
- [2] ANDRÝSEK, Dominik. Tenzometrické měření náprav studentské formule. Praha, 2016. Bakalářská práce. České vysoké učení technické. Vedoucí práce Ing. Karel Doubrava, PhD.
- [3] KŘÍŽ, Jan. Tenzometrické měření náprav závodního vozu. Praha, 2014. Bakalářská práce. České vysoké učení technické. Vedoucí práce Ing. Jan Sobotka.
- [4] PLÍHAL, Ondřej. Určení zatížení závěsu kola na voze formule Student. Praha, 2012. Diplomová práce. České vysoké učení technické. Vedoucí práce prof. Ing. Milan Růžička CSc.
- [5] ŠVAGER, Pavel. Konstrukce zařízení pro měření tuhosti řízení. Brno, 2014. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Petr Hejtmánek, PhD.
- [6] KLAPAL, František. Měření parametrů na volantu osobního automobilu. Liberec, 2008. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce Ing. Robert Voženílek.
- [7] NI 9237 Datasheet - National Instruments [online]. In: . s. 1-15 [cit. 2020-07-14]. Dostupné z: https://www.ni.com/pdf/manuals/374186a_02.pdf
- [8] AOZ1282CI datasheet [online]. In: . s. 1 [cit. 2020-07-12]. Dostupné z: http://aosmd.com/res/data_sheets/AOZ1282CI.pdf
- [9] User Manual GL1000 Series [online]. , 10-24 [cit. 2020-07-12]. Dostupné z: https://assets.vector.com/cms/content/products/gl_logger/Docs/GL1000_Manual_EN.pdf
- [10] Formula Student Rules 2020, Version: 1.0, Rev-1fcc153 [online]. In: . s. 125 [cit. 2020-07-12]. Dostupné z: https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2020/rules/FS-Rules_2020_V1.0.pdf



Seznam obrázků

Obr. 1 G-G diagram [autor: člen týmu eForce]	9
Obr. 2 Odporové kovové tenzometry	10
Obr. 3 Polovodičové tenzometry a) monokrystalický difuzní b) řez strukturou c) křemíková tenzometrická membrána s difuzními tenzometry [1, str. 103]	11
Obr. 4 Wheatstonův můstek [1, str. 105]	14
Obr. 5 Zapojení kompenzačního tenzometru bez namáhání [1, str. 105]	14
Obr. 6 Shodně namáhaný kompenzační tenzometr [1, str. 105]	15
Obr. 7 Zapojení opačně namáhaného tenzometru [1, str. 105]	15
Obr. 8 Plný můstek [1, str. 106]	15
Obr. 9 Přední náprava [2, str. 14]	18
Obr. 10 Zadní náprava [2, str. 14]	18
Obr. 11 Zařízení bez připojených tenzometrů [3, str. 40]	20
Obr. 12 Schéma měřícího aparátu [3, str. 20]	21
Obr. 13 Datasheet použitých tenzometrů [3, str. 23]	21
Obr. 14 Měřicí stanice CompactRio [4, str. 40]	23
Obr. 15 Stálá zatáčka [4, str. 49]	24
Obr. 16 Nákres tratě [4, str. 50]	24
Obr. 17 Celý okruh [4, str. 50]	25
Obr. 18 Siloměr LUKAS TENZO S-30 [5, str. 50]	26
Obr. 19 Vyhodnocovací zařízení F-11 [5, str. 51]	27
Obr. 20 Drátový potenciometr [5, str. 53]	27
Obr. 21 Měření úhlu potenciometrem [5, str. 54]	28
Obr. 22 Schéma měřícího řetězce [5, str. 54]	28
Obr. 23 3. Varianta měření [6, str. 30]	29
Obr. 24 Model měřícího zařízení [6, str. 36]	30
Obr. 25 Model axiálního táhla řízení [6, str. 49]	30
Obr. 26 Schéma měřící soustavy [6, str. 46]	31
Obr. 27 Lotus Suspension Analysis [autor]	33
Obr. 28 LSA půdorys s vyznačenými prvky řízení [autor]	33
Obr. 29 LSA levá přední část zepředu [autor]	34
Obr. 30 Ukázka výsledků z LSA [autor]	36
Obr. 31 Síly přenesené do řízení podle směru síly působící na levé kolo [autor]	37
Obr. 32 FSE.08 [autor: člen týmu eForce]	39
Obr. 33 Schéma části řízení směrem od řidiče [autor]	40
Obr. 34 Schéma části řízení zleva [autor]	41
Obr. 35 Volantová tyč [autor]	41
Obr. 36 Spojovací tyč [autor]	42
Obr. 37 Uchycení hřebenu [autor]	42
Obr. 38 Rychlospojka [autor]	43
Obr. 39 Volantová tyč s horní částí kuželového soukolí [autor]	44
Obr. 40 Modul NI 9237 [8, str. 1]	46
Obr. 41 Schéma transformátorového zapojení z 24 V na 12 V [8, str. 1]	46
Obr. 42 Schéma obvodu pro synchronizaci [autor]	47
Obr. 43 Přípravek na měření torzní tuhosti monokoku [autor: člen týmu eForce]	50
Obr. 44 Výsledná data z palubní diagnostiky [autor: člen týmu eForce]	54