

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV MECHANIKY, BIOMECHANIKY

A MECHATRONIKY

Odbor pružnosti a pevnosti



BAKALÁRSKA PRÁCA

Experimentálne určenie namáhania prvku zavesenia kola

vozu Formula Student

Praha, 2018

Filip Hudaček



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Hudaček** Jméno: **Filip** Osobní číslo: **452805**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Experimentální určení namáhání prvku zavěšení kola vozu Formula Student

Název bakalářské práce anglicky:

Experimental Determination of Loading of the Formula Student Wheel Suspension

Pokyny pro vypracování:

- 1) Formula Student
- 2) Rešerše odporové tenzometrie
- 3) Instrumentace a kalibrace kompozitového táhla zavěšení
- 4) Změření a vyhodnocení namáhání táhla
- 5) Zhodnocení

Seznam doporučené literatury:

F. Valenta a kol.: Pružnost a pevnost III, 2003, ČVUT v Praze
K. Hoffmann: An Introduction to Stress Analysis using Strain Gauges, 1987, HBM GmbH, Darmstadt

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Karel Doubrava, Ph.D., odbor pružnosti a pevnosti FS

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


Datum zadání bakalářské práce: **21.04.2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: **17.08.2018**

Platnost zadání bakalářské práce: _____


Ing. Karel Doubrava, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce



prof. Ing. Milan Růžička, CSc.
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.

30.4.2018
Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Pod'akovanie

Chcel by som poďakovať vedúcemu mojej bakalárskej práce Ing. Karlovi Doubravovi, Ph.D. za odborné vedenie, konzultácie a dôležité rady pri vypracovaní. Ďalej by som chcel poďakovať projektu CTU CarTech, ktorý umožnil meranie. Poďakovanie patrí tiež členom tímu CTU CarTech za rady a pomoc pri zapojení a manipulácii so zosilňovačom Texense XN4-V2.

Prehlásenie o autorstve

Prehlasujem, že som celú svoju bakalársku prácu vypracoval sám, bez cudzej pomoci, len za poskytnutia konzultácii a za pomoci podkladov a zdrojov uvedených v zozname použitej literatúry.

.....
V Prahe dňa

.....
Podpis

Anotačný list

Meno autora:	Filip Hudaček
Názov bakalárskej práce:	Experimentální určení namáhání prvku zavěšení kola vozu Formula Student
Anglický názov:	Experimental Determination of Loading of the Formula Student Wheel Suspension
Akademický rok:	2017/2018
Obor štúdia:	TZSI
Ústav/odbor:	Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky Odbor pružnosti a pevnosti
Vedúci bakalárskej práce:	Ing. Karel Doubrava Ph.D.
Bibliografické údaje:	Počet strán: 33 Počet obrázkov: 26 Počet príloh: 0
Kľúčové slová:	Nápravy, tenzometer, tenzometrické meranie
Keywords:	Axle, strain gauge, strain gauge measurement

Abstrakt:

Táto práca je zameraná na skúmanie namáhania prvkov nápravy závodného vozidla FS.10 tímu CTU CarTech tenzometrickým meraním kompaktnou meracou sústavou umiestnenou vo vozidle. Pomocou tohto merania má byť získaný prehľad o silách pôsobiacich na merané prvky počas jazdy vozidla. Práca má slúžiť k overeniu vypočítaných hodnôt a umožniť v budúcich rokoch úpravu týchto prvkov.

Abstract:

This work is focused on examining the stress of the FS.10 racing vehicle's strain of the CTU CarTech team by means of a strain gauges measurement using a compact measuring set in the vehicle. This measurement should provide an overview of the forces acting on the measured elements while driving. The work is intended to validate the calculated values and allow them to be modified in the following years by editing these elements.

Zoznam použitých jednotiek

F	сила	[N]
ε	pomerné predĺženie	[-]
E	modul pružnosti	[Pa]
σ	mechanické napätie	[Pa]
l	dĺžka vodiča	[m]
Δl	zmena dĺžky vodiča	[m]
A	plocha prierezu súčiastky	[m ²]
R	elektrický odpor	[Ω]
ΔR	zmena elektrického odporu	[Ω]
ρ	špecifický odpor	[Ωm]
$\Delta\rho$	zmena špecifického odporu	[Ωm]
S	plocha prierezu vodiča	[mm ²]
ΔS	zmena plochy prierezu vodiča	[mm ²]
ν	Poissonovo číslo	[-]
τ	piezorezistívny súčiniteľ	[-]

Obsah

1	Úvod	8
2	Nápravy vozidla FS.10	9
3	Tenzometrické meranie	11
3.1	Delenie podľa typu odporového tenzometra	12
3.2	Princíp merania pomocou elektrických odporových tenzometrov	13
3.3	Kritéria voľby tenzometrov	16
3.4	Wheastonov mostík	16
4	Experimentálne meranie	19
4.1	Inštalácia tenzometrov	19
4.2	Zapojenie tenzometrov	22
4.2.1	Meracia jednotka	22
4.2.2	Merací reťazec	23
4.3	Kalibrácia	24
4.3.1	Výsledky kalibrácie	27
5	Meranie	30
5.1	Vyhodnotenie merania	30
6	Záver	32

1 Úvod

Formula Student/SAE je študentská konštrukčná súťaž organizovaná pod záštitou Institution of Mechanical Engineers. Vznikla v roku 1981 v USA a do Európy sa dostala v roku 1998. Každý rok sa organizuje niekoľko súťaží po celom svete. Zúčastňujú sa ich univerzitné tímy z celého sveta. Cieľom projektu Formula Student/SAE je umožniť študentom vysokých škôl podieľať sa na vývoji a stavbe súťažného vozidla a zlepšiť tým svoje znalosti a schopnosti nie len pri výrobe, ale aj pri navrhovaní, finančnom plánovaní a získavaní prostriedkov na stavbu vozidla. Študent sa vďaka Formula Student/SAE môže oboznámiť s tým, čo všetko predstavuje výroba závodného vozidla.



Obr. 1.1: Formula student Španielsko 2017 [14]

Pri stavbe vozidla treba brať do úvahy viac faktorov. Súťažné vozidlo musí zvládnuť okrem dynamických aj statické disciplíny. Medzi dynamické disciplíny patrí akcelerácia (Acceleration) na 75 metrov s pevným štartom, autokros (autocross) s dĺžkou 1 km a Endurance o dĺžke 22 km. V rámci poslednej dynamickej disciplíny sa tiež hodnotí spotreba paliva. Medzi statické disciplíny patrí Konštrukčný návrh (Engineering design), Správa o nákladoch pre sériovú výrobu (Cost report) a Podnikateľský plán (Business plan).

Tím vysokej školy Českého vysokého učení technického v Prahe, ktorý spadá pod Fakultu strojnícku pozostáva zo študentov bakalárskeho a magisterskeho programu

predovšetkým z Fakulty strojníckej. Tím bol založený v roku 2009, od kedy každoročne pracuje na vývoji a stavbe nového súťažného vozidla so spaľovacím motorom, v súlade s pravidlami Formula Student/SAE. Vozidlo podľa tohtoročnej špecifikácie na Obr. 1.2.



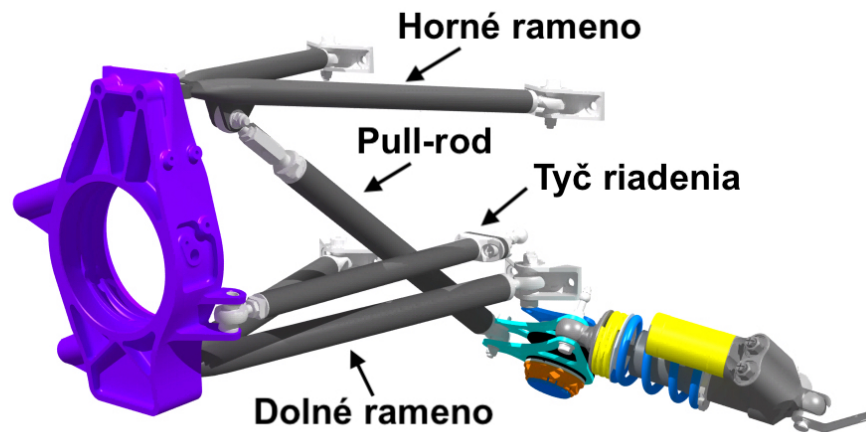
Obr. 1.2: Formula Student FS.10 tímu CTU CarTech

Snaha o zdokonalenie vozidla vedie k zvyšovaniu výkonu ale aj zlepšeniu jeho jazdných vlastností pričom značný vplyv má hmotnosť vozidla. Zníženie hmotnosti je možné dosiahnuť náhradou ťažkých oceľových prvkov ľahšími, vyrobenými z kompozitných materiálov a správnym nadimenzovaním súčastí na čo sa využívajú numerické simulácie. Tie je potrebné preveriť zistením skutočného namáhania pôsobiaceho na jednotlivé prvky zavesenia kolesa. Vďaka výsledkom z meraní je možné súčasti správne nadimenzovať.

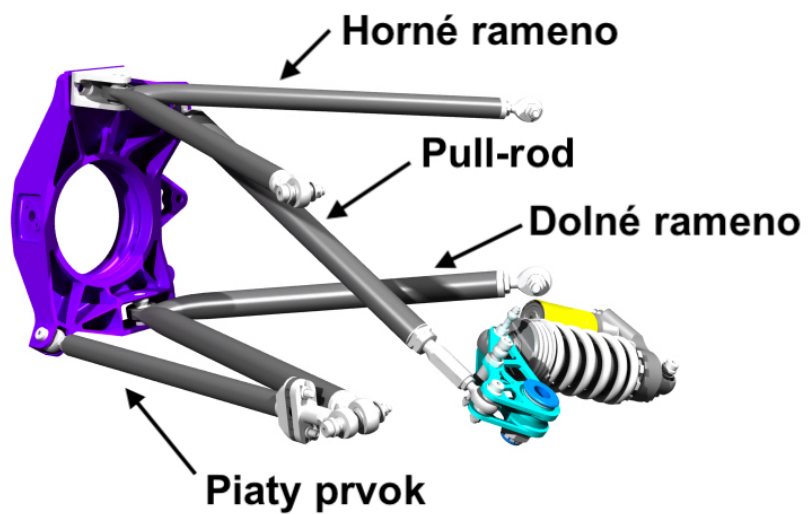
Cieľom tejto práce je namerať skutočné pnutie v prvkoch nápravy, konkrétne v tzv. Pull-rodoch, ktoré prenášajú silu z ramien nápravy a kolies na tlmič. Na základe výsledkov merania je možné v budúcnosti dimenzovať tieto prvky a prispôbiť ich namáhaniu, ktoré na prvky pôsobí. [3]

2 Nápravy vozidla FS.10

Nápravy vozidla FS.10 na Obr. 2.1 a Obr. 2.2 pozostávajú z horného a dolného ramena v tvare „A“, piateho prvku alebo tyče riadenia, tyčí pripojených k stabilizátoru a Pull-rodov z jednej strany uchytených k hornému ramenu a druhým koncom pripevnených cez páku k tlmiču.



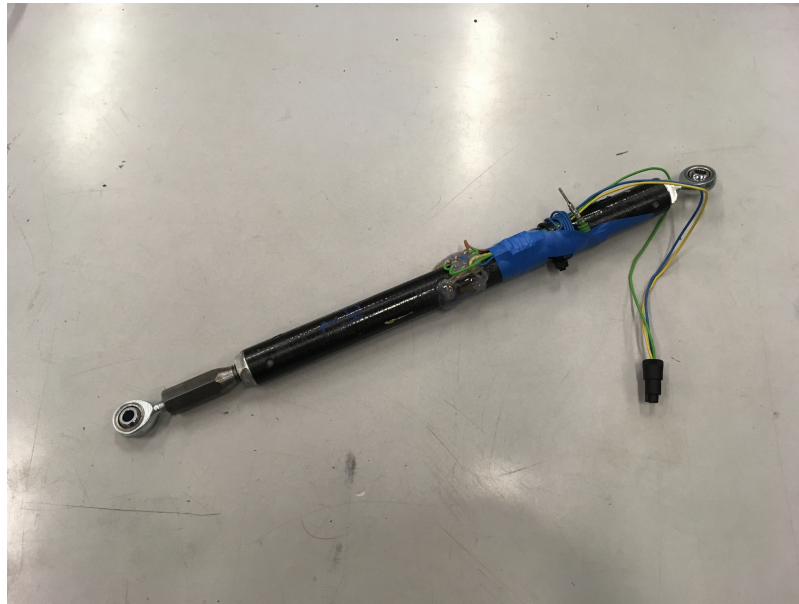
Obr. 2.1: Model prednej nápravy vozidla FS.10



Obr. 2.2: Model zadnej nápravy vozidla FS.10

Merané prvky nápravy na Obr. 2.3 sú vyrobené z uhlíkových trubiek a hliníkových vložiek. Vložky sú na koncoch tyčí prilepené pomocou lepidla Loctite EA 9466. Vo

vložkách sú závitý s ľavým stúpaním na jednej strane tyče a s prvým stúpaním na druhej strane. Závitý slúžia k uchyteniu kĺbových ložísk.



Obr. 2.3: Pull-rod

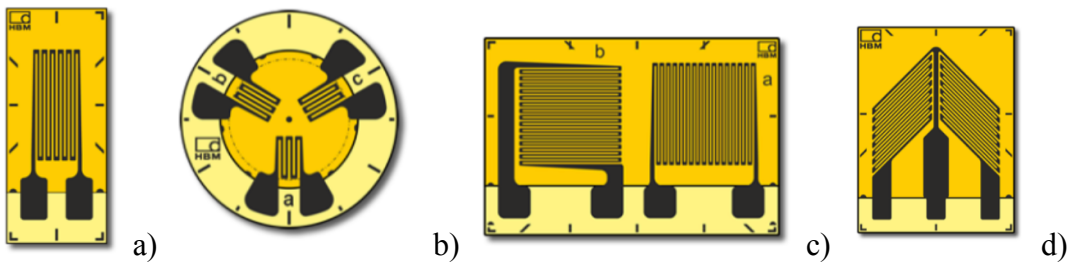
Pri riešení technického problému je možné použiť viacero experimentálnych metód a zariadení. Jedná sa prevažne o nedeštruktívne metódy merania. Na základe predpokladu, že namáhanie pôsobiace na tieto prvky bude iba v ťahu a tlaku a tiež z dôvodu, že meranie bude vykonané v priebehu pohybu vozidla pomocou vstavanej techniky, bol zvolený spôsob merania pomocou odporových tenzometrov [2].

3 Tenzometrické meranie

Analýza pnutia je založená na princípe merania deformácie. Táto deformácia sa prejavuje na povrchu skúmaného telesa. Snímače slúžiace k meraniu deformácii alebo inej veličiny určenej z deformácie sa nazývajú tenzometre. Pre toto meranie boli zvolené kovové tenzometre. Tie sú nainštalované k súčasti a prevádzajú mechanickú deformáciu na zmenu elektrického odporu.

Tenzometrické snímače sú vyrábané v rôznych tvaroch, rozmeroch a s rozličnými dĺžkami meracej mriežky. Najčastejšie využívané tvary tenzometrov sú lineárne, zapojené do tenzometrickej ružice a tenzometrického kríža a tenzometre zapojené na meranie krutu a šmyku. Veľký výber rozmerov a tvarov umožňuje prispôbenie rôznym

aplikáciám [1] [2]. Príklady často používaných tenzometrických snímačov sú zobrazené na Obr. 3.1.



Obr. 3.1.: a) Lineárny tenzometer, b) Tenzometrická ružica, c) Tenzometrický kríž, d) Tenzometer na meranie krutu a šmyku [9]

3.1 Delenie podľa typu odporového tenzometra

Odporové tenzometre je možné rozdeliť na :

- kovové:
 - drôťkové,
 - fóliové,
 - vrstvomé,
- polovodičové:
 - monokryštalické,
 - polykryštalické.

S ohľadom na ďalšie použitie v bakalárskej práci sú podrobnejšie popísané kovové tenzometre.

Kovové tenzometre

Výhodou kovových tenzometrov je lineárna závislosť deformácie na zmenu elektrického odporu. Všeobecne je možné kovové tenzometre rozdeliť na drôtové, vrstvomé a fóliové. V dnešnej dobe sa najčastejšie používajú fóliové snímače vyrábané v rôznych tvaroch a skupinách vhodných pre meranie rôzne tvarovaných predmetov a zaznamenávanie síl pôsobiacich z rôznych smerov.

Tenzometer je tvorený izolačnou vrstvou zväčša obdĺžnikového tvaru vyrobenej z polyamidu alebo sklom vystuženého fenolového filmu. Na nej je umiestnená meracia odporová mriežka s určitou dĺžkou, šírkou a pokojovým odporom R . Snímač je na povrchu pokrytý krycou vrstvou, z ktorej sú vyvedené malé spájkovacie plôšky alebo vodiče. Pri meraní zaťaženia pôsobiaceho na objekt je potrebné správne orientovať

tenzometer a to do smeru jeho pôsobenia. V prípade, že je potrebné súčasne merať sily pôsobiace v rôznych smeroch, sa používajú tenzometre obsahujúce viac odporových mriežok natočených v rôznych smeroch [13] [1].

3.2 Princíp merania pomocou elektrických odporových tenzometrov

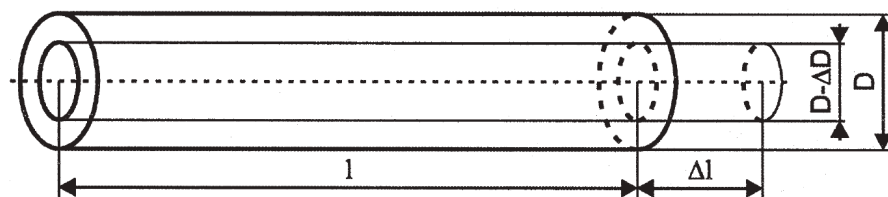
Odporový tenzometer predstavuje snímač, ktorého zmena elektrického odporu je závislá od mechanickej deformácie na povrchu telesa spôsobenej silami pôsobiacimi na toto teleso. Zmena odporu je určená geometrickými zmenami rozmerov a kryštalografickej orientácie tenzometra.

Deformácia je spôsobená ťahom alebo tlakom v rámci Hookovho zákona vzhľadom na malé rozmery snímača. Hookov zákon opisuje lineárnu oblasť závislosti mechanického napätia od relatívneho predĺženia prípadne skrátania. Vyjadruje ho vzťah:

$$\sigma = \varepsilon \cdot E, \quad (1)$$

kde E je modul pružnosti a vyjadruje vzťah medzi napätím σ a pomerným predĺžením ε , pre ktoré platí vzťah:

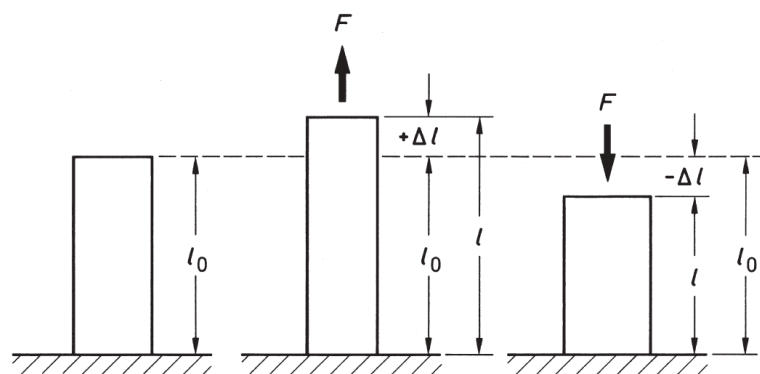
$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}. \quad (2)$$



Obr. 3.2: Deformácia vodiča [4]

Mechanické namáhanie je definované ako namáhanie v materiáli v dôsledku pôsobenia sily. Súvislosť medzi pôsobiacou silou F a plochou A vyjadruje vzťah:

$$\sigma = \frac{F}{A}. \quad (3)$$



Obr. 3.3: Znáznornenie deformácie prvku vplyvom sily [4]

Mechanickým namáhaním vodiča ťahom dochádza ku geometrickým deformáciám a mikroštruktúrnym zmenám materiálu s vplyvom na odpor vodiča. Je nutné zabezpečiť, aby nenastala nevratná deformácia za hranicou pružnosti Hookovho zákona a tak nevznikli nereverzibilné mikroštruktúrne zmeny, ktoré vedú k znehodnoteniu snímača. Pre homogénny vodič s dĺžkou l , plošným prierezom S a odporom ρ vyjadruje vzťah (4) odpor vodiča R .

$$R = \frac{\rho \cdot l}{S} . \quad (4)$$

Totálny diferenciál dR za predpokladu diferencovateľných funkcií možno vyjadriť

$$dR = \frac{\partial R}{\partial \rho} \partial \rho + \frac{\partial R}{\partial l} \partial l + \frac{\partial R}{\partial S} \partial S , \quad (5)$$

a následne upraviť pre konečné zmeny odporu $\Delta R/R$

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta \rho}{\rho} - \frac{\Delta S}{S} . \quad (6)$$

Pomernú zmenu prierezu je možné vyjadriť vzťahom

$$\frac{\Delta S}{S} \cong -2 \nu \frac{\Delta l}{l} , \quad (7)$$

kde ν vyjadruje Poissonovo číslo.

Dosadením výrazu (7) do rovnice (6) vychádza

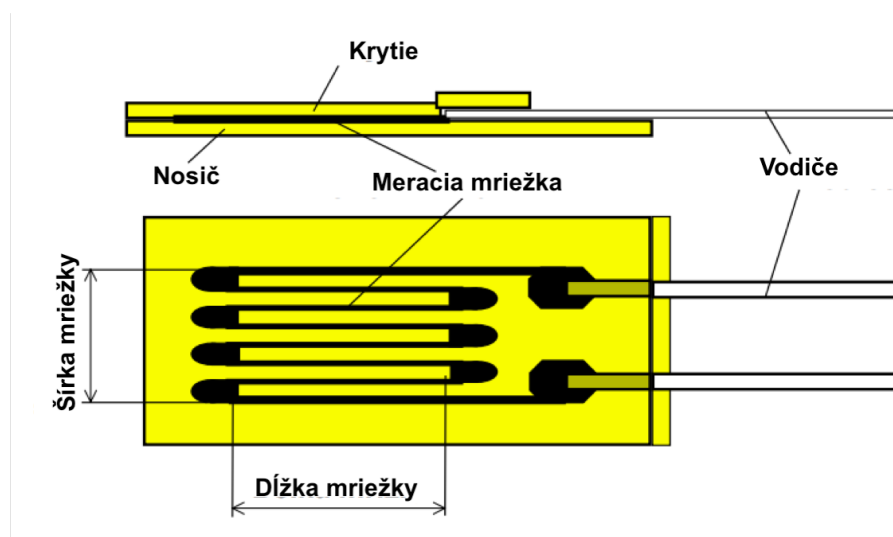
$$\frac{\Delta R}{R} = \varepsilon (1 + 2\nu) + \frac{\Delta\rho}{\rho} . \quad (8)$$

Pri vhodných materiáloch pre tenzometrické snímače je možné posledný člen rovnice (8) považovať úmerný pomernému predĺženiu $\frac{\Delta\rho}{\rho} \cong \tau \cdot \varepsilon$ z čoho vychádza vzťah

$$\frac{\Delta R}{R} = (1 + 2\nu + \tau) \cdot \varepsilon = k \cdot \varepsilon , \quad (9)$$

kde τ je piezorezistívny súčiniteľ, k predstavuje súčiniteľ deformačnej citlivosti a vyjadruje závislosť relatívnej zmeny odporu od relatívnej deformácie. Jedná sa o všeobecný parameter pre vhodné katalógové usporiadanie tenzometrov.

U kovových zliatin nadobúda konštanta k hodnotu 2 až 4, pre čisté kovy -12 až +6. Konštanta k sa u štandardných tenzometrov pohybuje okolo hodnoty 2. Snímače z polovodičových materiálov môžu dosiahnuť až 100-krát väčšiu hodnotu konštanty k . Citlivosť kovových tenzometrov je úmerná relatívnemu predĺženiu, t.j. deformácii a nie absolútnemu predĺženiu. Z toho vyplýva, že absolútna dĺžka tenzometru nemá vplyv na jeho citlivosť [4] [1] [7]. Na Obr. 3.4 sú popísané časti lineárneho tenzometra.



Obr. 3.4: Lineárny tenzometer s popisom častí [12]

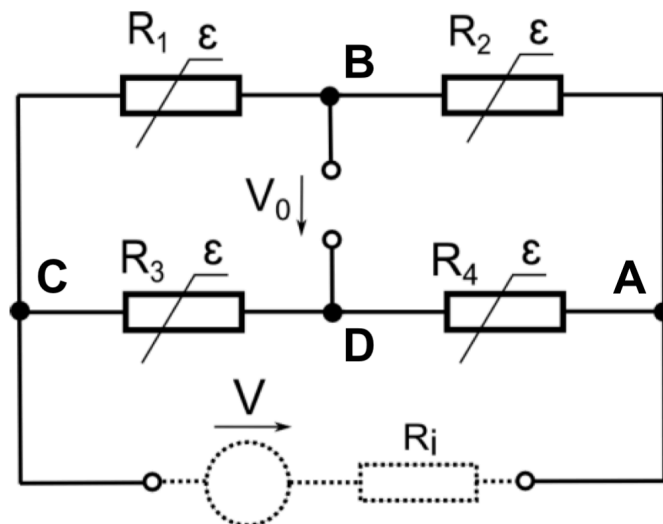
3.3 Kritéria voľby tenzometrov

Pri voľbe tenzometrov je dôležitým faktorom namáhanie, ktoré chceme zmerať. Podľa toho je možné zvoliť správny tvar snímača. Ďalším kritériom je oblasť, v ktorej bude snímač umiestnený na meranom objekte. Na základe toho je možné zvoliť jeho rozmery. Pre dostatočne veľké predmety sa často používajú tenzometre s dĺžkou meracej mriežky 3 a 6 mm pre jednoduchosť ich použitia. Príliš malé meradlá by sa mali používať iba z nutných technických dôvodov, napr. pre vyšetrenie napätia v zle dostupných a úzkych miestach. Napätie je prenášané lepenou vrstvou a nosičom meracej mriežky na samotnú mriežku [1].

3.4 Wheastonov mostík

Na meranie elektrického odporu je možné použiť viac rôznych metód. S ohľadom na malé zmeny odporu sa najčastejšie využíva zapojenie do mostíku. Do tejto metódy spadá najčastejšie sa vyskytujúci Wheastonov mostík podľa Obr. 3.5.

Zapojenie do Wheastonovho mostíku patrí k najčastejšie používaným metódam merania odporu pre jeho presnosť a spoľahlivosť. Vysokú presnosť dosahuje vďaka presnosti odporových dekád a citlivosti indikátoru nuly. Z časti majú na citlivosť vplyv aj kontakty mostíka a to veľkosti ich prechodových odporov.



Obr. 3.5: Schéma Wheastonovho mostíka [5]

Elektrický obvod pozostáva z elektrických odporov, v tomto prípade tenzometrov. V bode A a C je obvod pripojený k zdroju elektrického napätia. Spojnica bodov D a B tvorí vlastný mostík s citlivým galvanometrom.

Zapojenie do štvrt'-mostíka

Toto zapojenie sa využíva pri menej náročných meraniach. Zapojený je len jeden tenzometer. Zvyšné odpory sú zvyčajne nahradené priamo v zosilňovači. Nevýhodou tohto zapojenia je nižšia citlivosť.

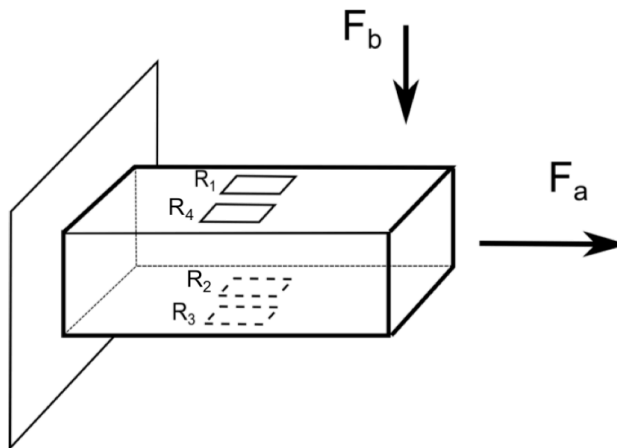
Zapojenie do pol-mostíka

Pri tomto zapojení použijeme dva tenzometre a zvyšné dva sú nahradené do plného mostíka v zosilňovači pomocou odporov. V prípade jednoosého namáhania nainštalujeme jeden z tenzometrov do smeru hlavného namáhania a druhý kolmo naňho. Druhý tenzometer bude merať priečnu deformáciu a zároveň bude slúžiť ako kompenzačný pre teplotné vplyvy.

Zapojenie do plného mostíku

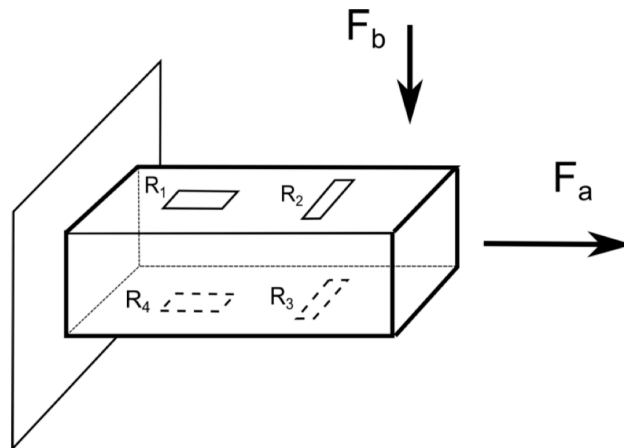
Pri plnom mostíku využijeme štyri tenzometre. Vďaka tomuto zapojeniu sa dokážeme zbaviť parazitných vplyvov. Umiestnenie tenzometrov pri tomto zapojení závisí od silových účinkoch na teleso napr. zobrazených na Obr. 3.6, Obr. 3.7 a Obr. 3.8. Pri tomto zapojení sme schopní dosiahnuť najpresnejšie výsledky merania z dôvodu väčšej citlivosti. Vďaka nemu je možné odstrániť vplyv parazitických namáhaní a teplôt pôsobiacich na merané prvky.

Jednou z možností je zapojenie tenzometrov podľa Obr. 3.6, kde je jedna dvojica senzorov R_1 a R_4 rovnobežná s axiálnym namáhaním umiestnená na jednej strane prvku a druhá dvojica je umiestnená oproti prvej dvojici. Pri tomto zapojení sú potlačené parazitické axiálne namáhanie a vplyv teploty.



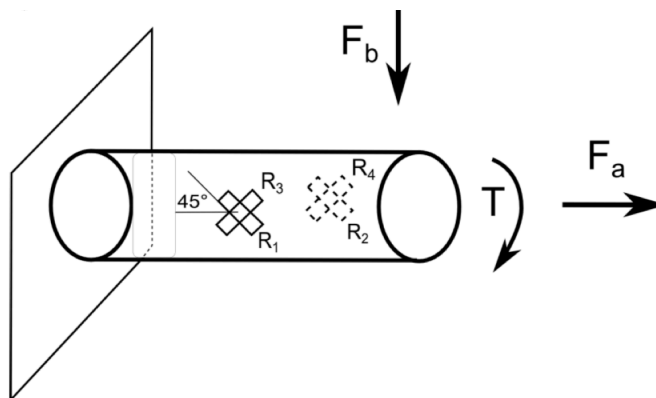
Obr. 3.6: Umiestnenie tenzometrov pri ohybovom namáhaní [5]

Ďalšou možnosťou zapojenia tenzometrov do plného mostíku je podľa Obr. 3.7, kde jednu dvojicu tenzometrov umiestnime do tvaru „T“ s jedným tenzometrom rovnobežným s axiálnym namáhaním. Druhá dvojica bude rovnako zapojená na druhej strane prvku. Vďaka tomuto spôsobu rozmiestnenia tenzometrov bude vylúčený vplyv ohybového namáhania a teploty.



Obr. 3.7: Umiestnenie tenzometrov pri axiálnom namáhaní [5]

Na Obr. 3.8 sú tenzometrické snímače zapojené do kríža pod uhlom 45° k osovému namáhaniu. Tento spôsob sa využíva na zaznamenávanie krútiaceho momentu a parazitné vplyvy ohybového, axiálneho a teplotného namáhania sú potlačené.



Obr. 3.8: Umiestnenie tenzometrov pri krútiacom momente [5]

S ohľadom na požiadavku vyšetriť osové namáhanie prvku zavesenia bolo ako najvhodnejšie zapojenie pre problematiku tejto práce zvolené rozmiestnenie senzorov podľa Obr. 3.7. Zapojenie do plného mostíku bude v tomto prípade spôsobovať teplotnú kompenzáciu pri meraní a odstráni prípadne parazitné ohybové účinky na prvok [5] [1] [10].

4 Experimentálne meranie

4.1 Inštalácia tenzometrov

Pri výbere použitých senzorov bolo brané do úvahy predpokladané namáhanie prvku, zvolený spôsob zapojenia a tiež rozmery meranej súčasti. S ohľadom na tieto parametre bol zvolený snímač popísaný v Tab. 4.1.

Parameter	Hodnota
Výrobca	HBM
Typ	Jednoosý tenzometer
Označenie	6/350 LY11
Odpor	$350 \Omega \pm 0,35 \%$
Súčiniteľ citlivosti	$2,04 \pm 1,0 \%$
Maximálne napätie na mostíku	13,0 V

Tab. 4.1: Parametre zvolených snímačov

a) Príprava meranej súčastky

V prvom kroku bolo potrebné súčiastku dôkladne očistiť od hrubých nečistôt, hlavne v oblasti inštalácie tenzometrov. Miesto inštalácie bolo volené s ohľadom na funkčnosť a ochranu snímača pred mechanickým poškodením.

b) Približné zameranie polohy

V ďalšom kroku bola zaznačená poloha kde budú tenzometre inštalované. Povrch bolo potrebné skontrolovať aby nebol žiadnym spôsobom narušený.



Obr. 4.1: Zameranie polohy pre tenzometre

c) **Brúsenie**

Povrch prvkov bol pokrytý ochrannou vrstvou a nerovnosťami vzniknutými pri výrobe, ktoré by mohli meranie znehodnotiť. Preto bolo potrebné povrch v zameranej oblasti nahrubo očistiť pomocou brúsneho papiera. V prípade kompozitových prvkov je potrebné pri brúsení dbať na to, aby nedošlo k poškodeniu vlákien.



Obr. 4.2: Brúsenie vyznačenej plochy

d) **Príprava pred lepením**

Pred procesom lepenia bolo pripravené všetko potrebné vybavenie. Keďže je potrebné pri lepení dosiahnuť čo najväčšiu čistotu je vhodné aby v priebehu tohto procesu nedochádzalo k prerušovaniu. K samotnému lepeniu bol potrebný brúsny papier, lepiaca páska, odmasťovací roztok HBM RMS1, niečo na poznačenie polohy, pravítko, pinzety, malý kalíšok, miešadlo, prípravok na vytlačenie lepidla, tampóny, 2-zložkové lepidlo HBM X60.

e) **Konečné čistenie povrchu**

V tejto fáze už bola vyznačená oblasť obrúsená a zbavená hrubých nečistôt. Následne bolo potrebné povrch dôkladne vyčistiť a zbaviť mastnoty pomocou tampónov a odmasťovacieho roztoku HBM RMS1. Pri čistení sa prechádzalo tampónom po povrchu stále v jednom smere a na každé pretrenie bol použitý vždy nový tampón.

f) **Príprava tenzometrov**

V tomto prípade bolo potrebné zapojiť jednoosé tenzometre do kríža. Na čistú a odmastenú fóliu boli uložené tenzometre do polohy, v akej budú inštalované na prípravok a spojené pomocou malých kúskov lepiacej pásky. Následne pomocou lepiacej pásky prilepenej z jednej strany bola zostava tenzometrov prenesená a napolohovaná na súčasť.

g) Lepenie

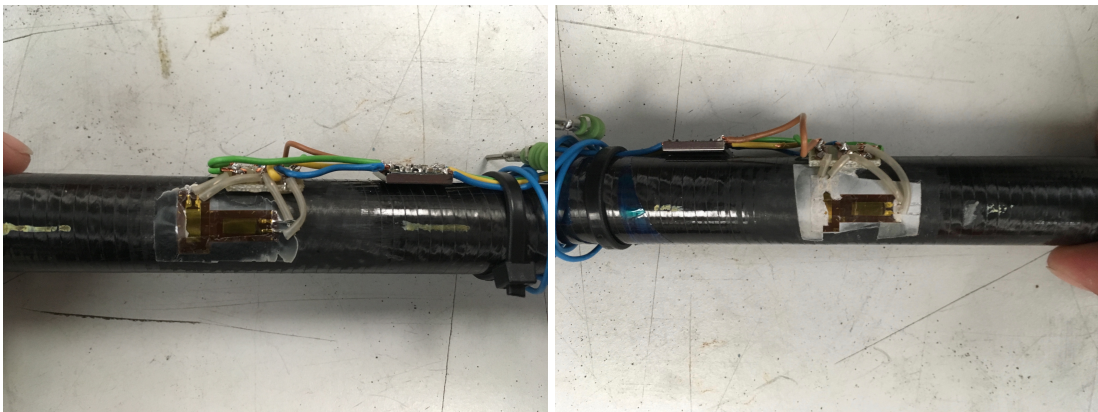
V kalíšku bolo namiešané rýchlo tvrdnúce 2-zložkové lepidlo HBM X60 a dôkladne rozmiešané pomocou miešadla. Následne bolo lepidlo v malej vrstve aplikované na súčasť a tenzometre boli od už prilepenej strany dolepené. Pomocou prípravku boli tenzometre pevne dotlačené kým lepidlo nevytvrdlo.

h) Zabezpečenie vodičov

Vodiče tenzometrov môžu byť citlivé na mechanické poškodenie a je potrebné ich zabezpečiť voči mechanickému poškodeniu. Boli k tomu využité spájkovacie doštičky, pri ktorých sa v prípade poškodenia nepoškodia tenzometre ale len kontakty na tejto doštičke. Spôsob inštalácie je rovnaký ako u tenzometrov.

i) Zapojenie mostíku

Posledným krokom bolo zapojiť tenzometrické snímače do plného mostíku podľa Obr. 4.7 a Obr. 3.5. Nainštalované tenzometre sú zobrazené na Obr. 4.3.

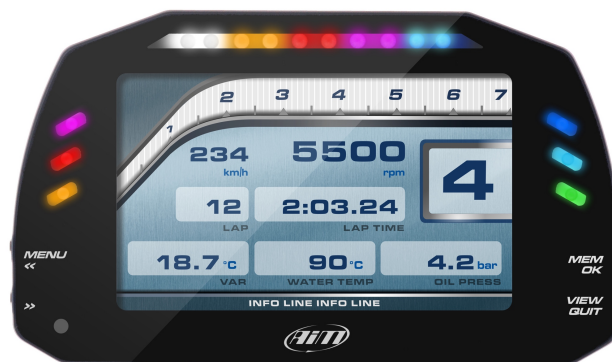


Obr. 4.3: Zapojenie tenzometrov do Wheastonovho mostíku

4.2 Zapojenie tenzometrov

4.2.1 Meracia jednotka

Na zaznamenávanie merania bol zvolený palubný prístroj Aim MXS Strada umiestnený vo vozidle, slúžiaci na zaznamenávanie, zobrazovanie a ukladanie signálov zo snímačov. Po pripojení externého modulu Aim Channel Expansion bolo možné pripojiť meracie prvky cez konektory. Vďaka tomu bolo možné zaznamenávať merané dáta v priebehu pohybu závodného vozidla. Zariadenie umožňuje uloženie kalibračnej krivky a priamy prevod nameraného napätia na silu pôsobiacu na meraný prvok.



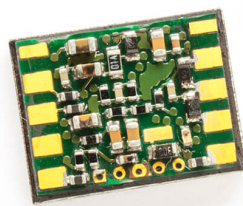
Obr. 4.4: Aim MXS Strada [6]



Obr. 4.5: Aim Channel Expansion [6]

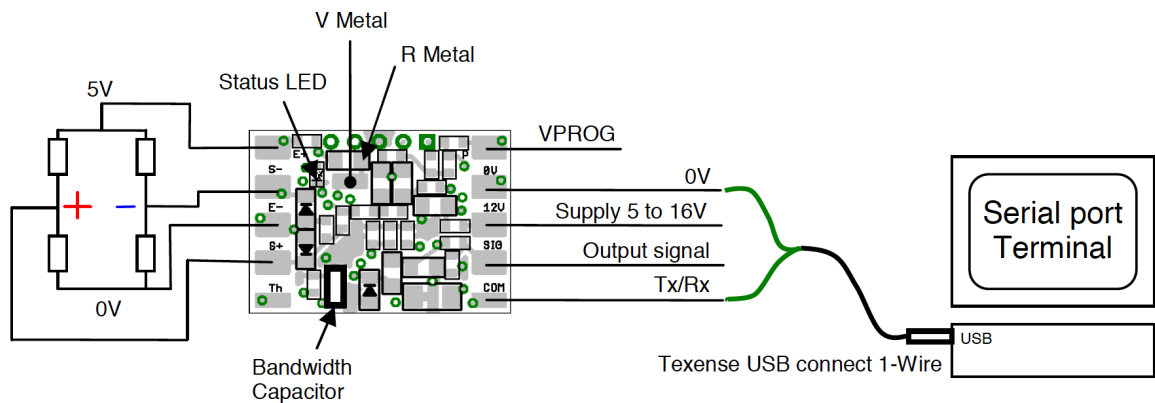
4.2.2 Merací reťazec

Pred samotným meraním bolo potrebné na tenzometroch vykonať kalibráciu. Počas kalibrácie bolo vyskúšané, že prvky zvládnu zaťaženie, na ktoré boli navrhnuté, aby nedošlo k mechanickému alebo inému poškodeniu počas samotného merania na závodnom vozidle. Taktiež bol zaznamenaný rozsah napätia od nulového až po maximálne zaťaženie. K prepojeniu tenzometrov a palubného prístroja bol zvolený analógový zbernicový zosilňovač Texense XN4-V2 s vysokým rozlíšením a rýchlosťou. Pomocou tohto zosilňovača bolo možné nastaviť citlivosť a posunutie nuly.



Obr. 4.6: Texense XN4-V2 [6]

Pripojenie bolo vykonané na základe schémy na Obr. 4.7.



Obr. 4.7: Schéma zapojenia zosilňovača Texense XN4-V2 [11]

K nastaveniu citlivosti a posunutia nuly slúži pripojenie Tx/Rx pomocou sériového terminálu. Pripojenie bolo vykonané pomocou zariadenia tAST V2 texense Android Smart Tool. Zapojenie prebehlo podľa priloženého návodu, kde k tAST Connection Board bol pripojený k Tx/Rx a regulovateľnému jednosmernému zdroju, ktorý bol nastavený na napätie 12 V a prúd približne 1,5 A. USB konektor bol pripojený k pevnému zdroju na napätie 12 V a prúd 500 mA. Cez konektor USB bola zostava pripojená

k zariadeniu s operačným systémom Android a pomocou aplikácie Texense Android Smart Tool bola nastavená citlivosť a posunutie nuly podľa návodu.

4.3 Kalibrácia

Kalibrácia bola vykonaná na tracom zariadení TIRA 2300 s nainštalovaným silomerom s rozsahom 20 kN, kde boli prvky uchytené pomocou kĺbových hlavíc. Pre optimálnu kalibráciu bolo potrebné zapojiť sústavu rovnako, ako bude zapojená počas merania. Keďže palubný počítač Aim MXS Strada dokáže zobrazovať aktuálnu hodnotu napätia s časom, bol použitý na vytvorenie kalibračnej krivky. K prepojeniu palubného počítača, externého modulu Aim Channel Expansion a zosilňovača mimo vozidla bola použitá kabeláž na Obr. 4.8.

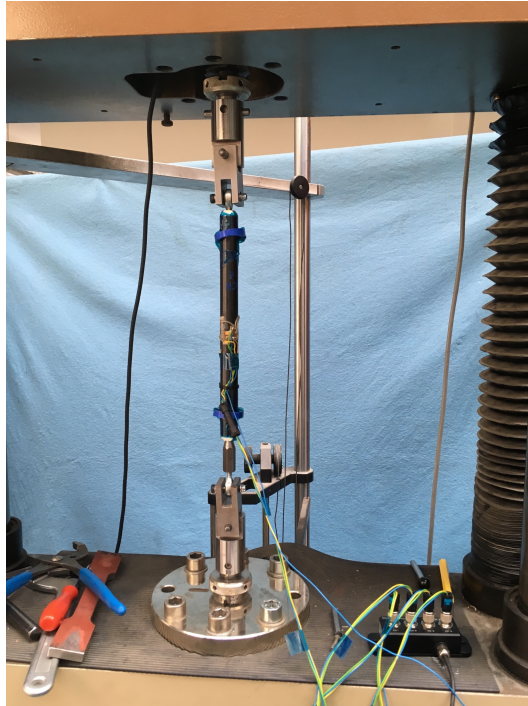


Obr. 4.8: Aim kábelová zostava pre externé pripojenie [6]

Táto kabeláž nám tiež poskytuje pripojenie k jednosmernému laboratórnemu zdroju EP-603.

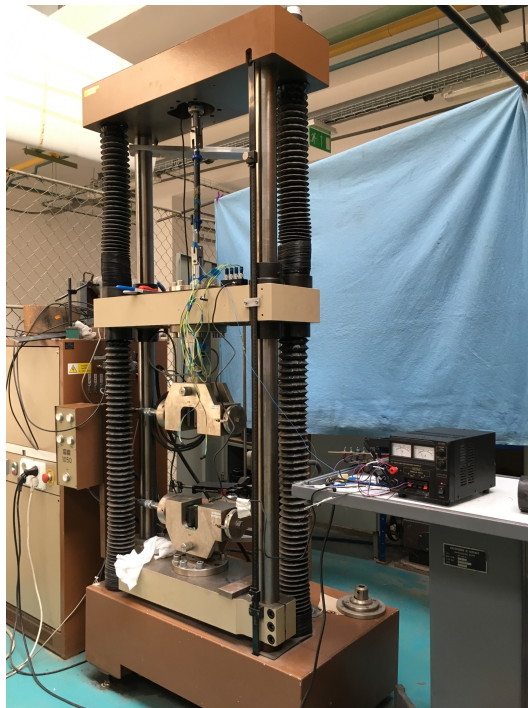
Postup kalibrácie:

- a) Prípravok bol uchytený do skúšobného stroja tak aby bolo zaťaženie nulové.



Obr. 4.9: Prípravok uchytý v trhacom zariadení

- b) Zostava na meranie pozostávajúca z laboratórneho zdroja a zariadenia Aim MXS Strada bola pripojená k prípravku so zosilňovačom. Ak bolo zapojenie správne, LED svetlo na zosilňovači začalo prerušovane svietiť.



Obr. 4.10: Prípravok uchytý v trhacom zariadení a pripojený k meracej zostave

- c) Po pripojení zariadenia Aim k počítaču prostredníctvom Wi-Fi a programu Race Studio 3, kde v zložke Configurations bol pridaný Channel Expansion. V zložke

Custom Sensors bol zvolený prvok, ktorý sa kalibroval a následne bola vytvorená kalibračná krivka vyjadrujúca napätie v jednotkách mV na osy X a silu pôsobiacu na prvok v jednotkách N na osy Y. Hodnoty napätia v čase sa zobrazia v zložke Devices pod kolónkou Live Measurements. V tomto prípade by sa mal rozsah sily od 0 do 10 kN nachádzať v rozsahu napätia 1 až 4,5 V, čím bude zabezpečená dostatočná rezerva ak sa prvok dostane pri meraní do oblasti tlaku alebo presiahne hodnotu sily 10 kN.

- d) Ak to tak nie je, je potrebné zmeniť citlivosť prípadne posunutia nuly. K tomuto úkonu je nutné odpojiť od prvku so zosilňovačom zostavu na meranie aktuálnej hodnoty napätia a pripojiť zostavu so zariadením tAST V2 texense Android Smart Tool popísanú v sekcii 4.2.2. Pri správnom zapojení sa opäť prerušované rozsvieti LED svetlo umiestnené na zosilňovači. Po zapnutí aplikácie je zvolená ikona Serial Link a nastavená na hodnotu 38400 bps. Zmena citlivosti a posunutie nuly sa vykonáva pomocou príkazov v Obr. 4.11.

	command	value	min	max	
offset	'o'	2500	0	5000	to set offset (mV)
gain	'g'	4995	700	12500	to set gain (tenth)
ppm	'p'	-335	-1000	1000	ppm/°C (DIG).
ppm_dig	'u'	0	0	1	ppm DIG or ANA.
out_dig	'd'	0	0	1	DIG output 100Hz.
timeout	't'	5	2	12	for self learning.
compens	'c'	(5hours max)	Start of a self learning in oven.		
table	'x'	Displays the compensation table.			
erase	'e'	To erase the compensation table.			
check	'v'	To enter in Check mode.			
header	'h'	Displays this header.			
reboot	'!'	Reboot the XN4.			

Obr. 4.11: Zoznam príkazov k nastaveniu zosilňovača Texense XN4-V2 [11]

- e) Po opätovnom pripojení meracej zostavy budú hodnoty citlivosti a posunutie nuly zmenené. Ak rozsah sily a napätia stále nevyhovuje je nutné postup zopakovať. V prípade že nastavenie vyhovuje požiadavkám, je vytvorená kalibračná krivka z dát získaných postupným zaťažovaním a odľahčovaním prvku. V ideálnom prípade by mala byť výsledná kalibračná krivka lineárna.

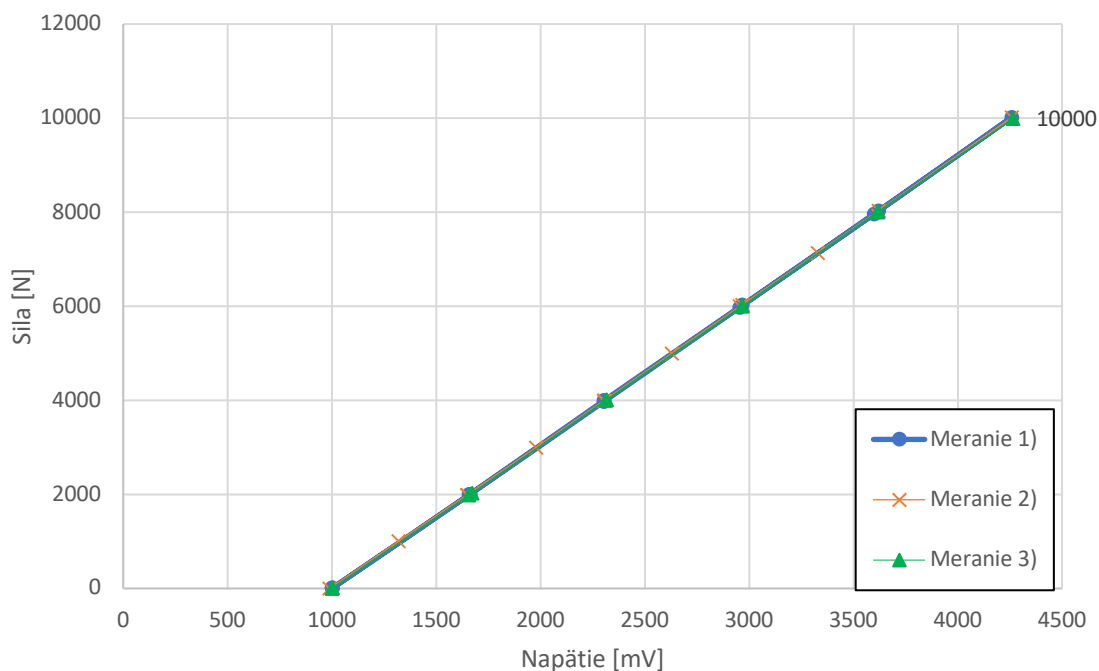
4.3.1 Výsledky kalibrácie

Výsledné hodnoty určené počas kalibrácie prvku s označením Pullrod_1 sú zobrazené v Tab. 4.2. Počas kalibrácie bola zvolená hodnota citlivosti (gain) na 5000 a hodnota posunutia nuly (offset) na 1000 mV. Meranie bolo opakované 3-krát z nezaťaženého stavu na maximálne zaťaženie a späť. Výsledky merania boli spracované do grafu a porovnané a pomocou lineárnej regresie bola vytvorená výsledná kalibračná krivka.

č.	1)		2)		3)	
	F[N]	U[mV]	F[N]	U[mV]	F[N]	U[mV]
1	1	990	11	1004	12	1004
2	1006	1320	2000	1660	2030	1673
3	1995	1650	4000	2306	4020	2318
4	3000	1980	6030	2970	6020	2970
5	4000	2306	8030	3622	8020	3620
6	5000	2630	10020	4260	10000	4268
7	6040	2970	7965	3600	8010	3620
8	7140	3332	5980	2956	6000	2970
9	8030	3622	3980	2306	4000	2316
10	10020	4262	2010	1665	1990	1660
11	7986	3606	12	1003	2	1002
12	6000	2958				
13	3990	2306				
14	1990	1653				
15	11	1004				

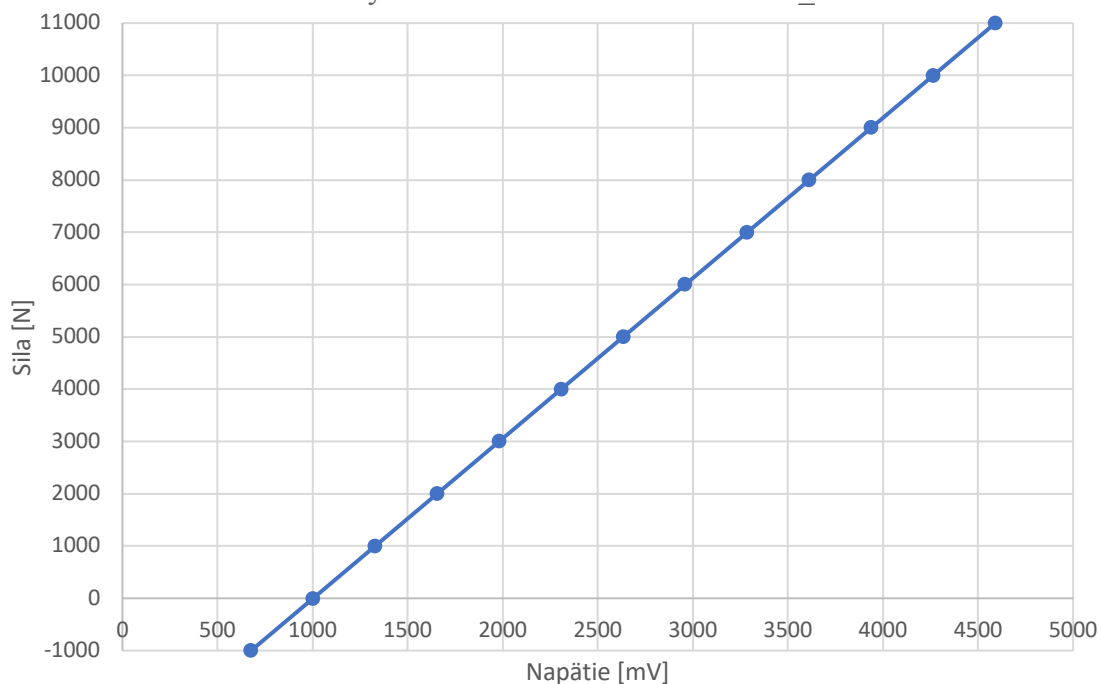
Tab. 4.2: Namerané hodnoty kalibrácie prvku Pullrod_1

Porovnanie meraní Pullrod_1



Graf 4.1: Porovnanie kalibračných kriviek meraní pre Pullrod_1

Výsledná kalibračná krivka Pullrod_1



Graf 4.2: Výsledná kalibračná krivka pre Pullrod_1

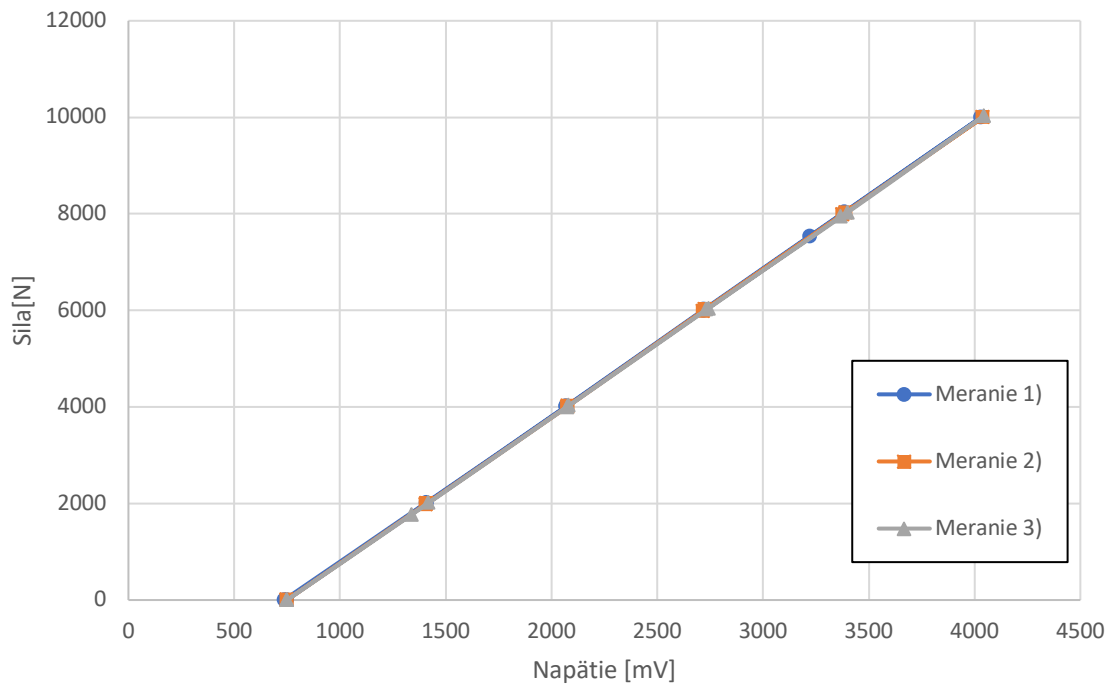
Hodnoty určené počas kalibrácie prvku s označením Pullrod_2 sú zobrazené v Tab. 4.3. Kalibrácia druhého prvku prebehla rovnako s nastavením citlivosti na hodnotu 5000

a offset s hodnotou 1000 mV. Meranie bolo znova opakované 3-krát od stavu bez zaťaženia do maximálneho zaťaženia prvku.

č.	1)		2)		3)	
	F[N]	U[mV]	F[N]	U[mV]	F[N]	U[mV]
1	5	736	5	750	1	750
2	2020	1408	2000	1410	2016	1418
3	4020	2070	4020	2078	4030	2082
4	6020	2720	6020	2726	6020	2732
5	8040	3384	8030	3390	8030	3400
6	10000	4030	10000	4040	10030	4044
7	7530	3220	7987	3376	7945	3366
8	5997	2718	5980	2716	6040	2742
9	4010	2070	4000	2074	4000	2074
10	2010	1410	1980	1406	1770	1340
11	5	750	1	750	1	750

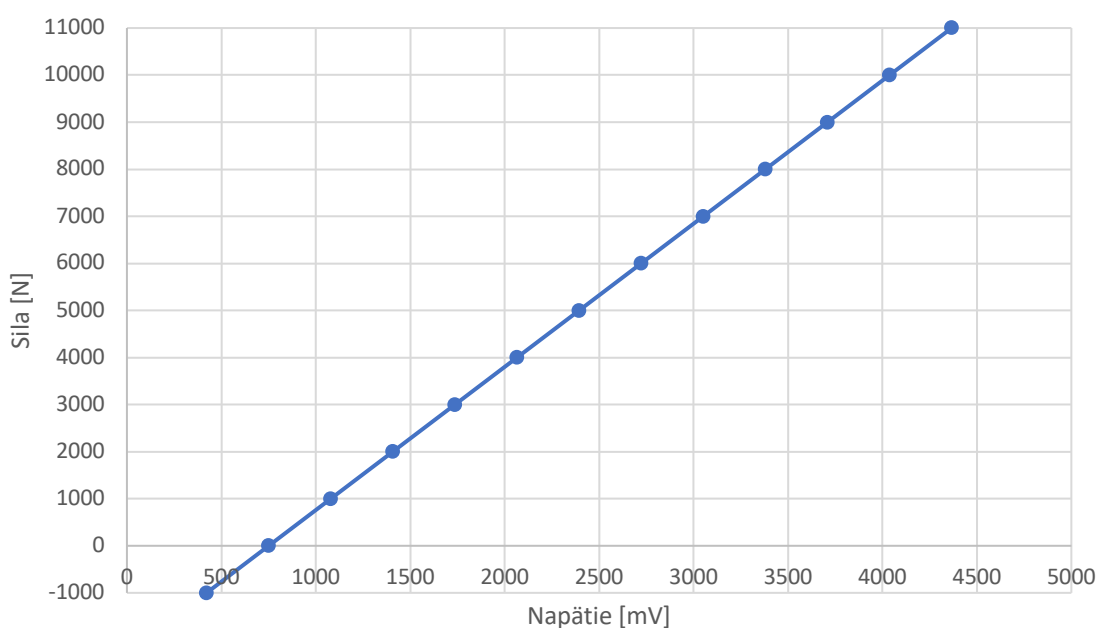
Tab. 4.3: Namerané hodnoty kalibrácie prvku Pullrod_2

Porovnanie meraní Pullrod_2



Graf 4.3: Porovnanie kalibračných kriviek meraní pre Pullrod_2

Výsledná kalibračná krivka Pullrod_2



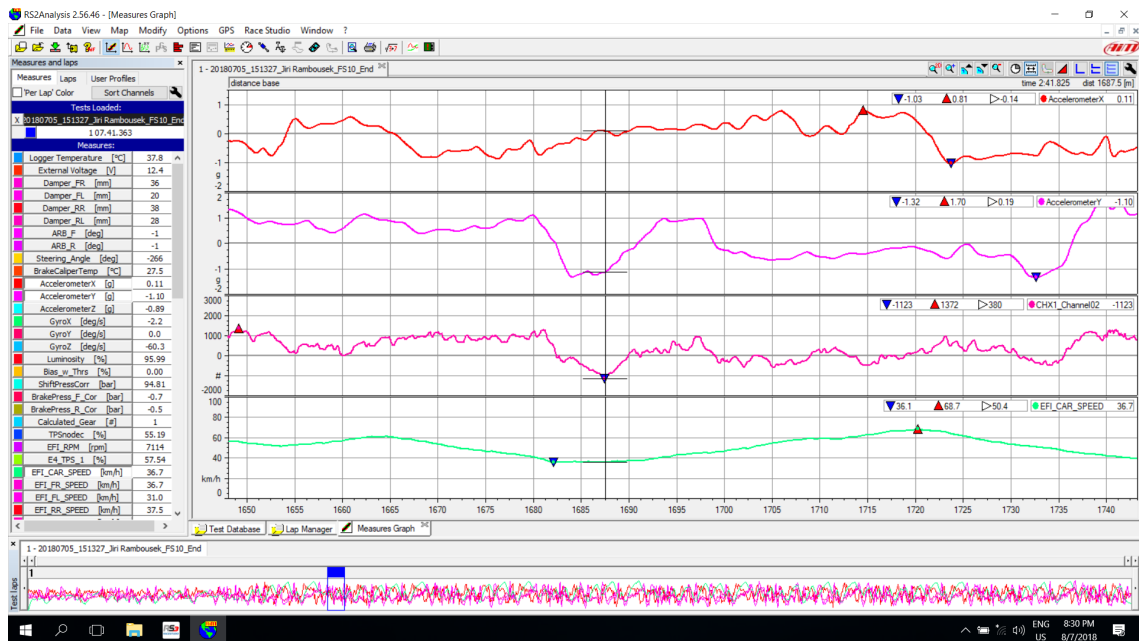
Graf 4.4: Výsledná kalibračná krivka pre Pullrod_2

5 Meranie

Meraný prvok bol umiestnený v zavesení ľavého predného kolesa a zapojený rovnako ako počas kalibrácie. Údaje boli zaznamenávané počas testovacej jazdy na skúšobnej trati. Počas merania došlo k poškodeniu jedného z prvkov. Funkčný prvok bol po testovacej jazde znova premeraný na skúšobnom zariadení, kde bolo zistené posunutie od nuly o 250 N. Túto chybu bolo potrebné brať do úvahy pri vyhodnocovaní merania a pripočítať ju k výslednému pnutiu v ťahu a od výsledného pnutia v tlaku ju bolo potrebné naopak odpočítať.

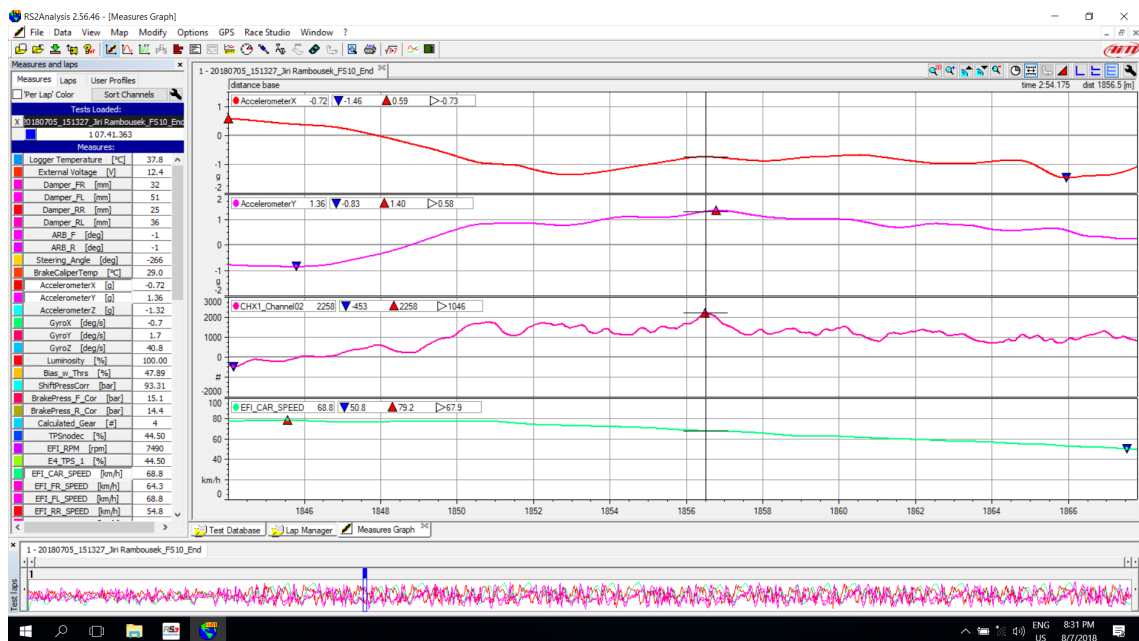
5.1 Vyhodnotenie merania

Na vyhodnotenie nameraných dát bol použitý program Race Studio 2. Aby bolo možné z údajov vyčítať kedy a za akých okolností boli hodnoty namerané, boli využité hodnoty ostatných snímačov umiestnených vo vozidle.



Obr. 5.1: Namerané hodnoty pre maximálny ťah

Maximálna nameraná hodnota v ťahu na prvku umiestnenom na ľavom prednom zavesení bola 2258 N. Po prepočte bola výsledná hodnota 2508 N. Táto hodnota bola nameraná v momente, keď vozidlo prechádzalo z ľavotočivej zákruty do pravotočivej a miernom brzdení pri rýchlosti 68,8 km/h.



Obr. 5.2: Namerané hodnoty pre maximálny tlak

Hodnota maximálneho tlaku v prvku umiestneného na ľavom prednom zavesení bola nameraná 1123 N. Po prepočítaní bola výsledná hodnota v tlaku stanovená na 873 N. K tomuto stavu došlo podľa hodnôt akcelerometra v osi Y pri prechode z pravotočivej do ľavotočivej zákruty za mierneho zrýchľovania. Rýchlosť vozidla bola v danom momente 36,7 km/h.

6 Záver

Cieľom práce bolo zistenie osového namáhania kompozitných prvkov zavesenia vozidla Formula Student. Zvolené bolo meranie pomocou tenzometrických snímačov, ktoré boli v práci popísané a na základe ich kritérií boli zvolené lineárne tenzometrické snímače vhodné pre danú problematiku so zapojením do plného Wheastonovho mostíku. Tenzometrické snímače s výstupnými drôtikmi sa ukázali ako menej vhodné z dôvodu väčšej náchylnosti na mechanické poškodenie. Vhodnejším variantom na meranie tejto problematiky by boli snímače s výstupnými spájkovacími doštičkami. V ďalšej časti bol popísaný postup inštalácie tenzometrických snímačov na merané prvky a následne bol opísaný merací reťazec využitý pri tomto meraní. Nevýhodou tohto reťazca bola malá frekvencia zaznamenávania dát, kedy maximálna hodnota, ktorú bolo možné nastaviť bola 200 Hz, čo mohlo spôsobiť, že niektoré rýchle výkyvy pnutia neboli zaznamenané. Na meraných prvkoch bola vykonaná kalibrácia, počas ktorej bola nastavená citlivosť, posunutie nuly v zosilňovači a bola vytvorená kalibračná krivka. Po kalibrácii boli merané prvky umiestnené na vozidlo. Po testovacej jazde boli prvky premerané na trhacom zariadení, kde bolo zistené posunutie nuly. Táto odchýlka bola pri vyhodnocovaní vzatá do úvahy. Počas testovania bol jeden zo snímačov mechanicky poškodený a aj napriek snahe o opravu a prekalibrovanie ho nebolo možné dostať do funkčného stavu. Výsledné maximálne hodnoty po vyhodnotení merania boli 2508 N v ťahu a 873 N v tlaku. Vypočítaná hodnota, na základe ktorej boli prvky dimenzované pri plnom zatočení vozidla je 2326 N v ťahu čo je o 182 N menej ako sila nameraná počas testovania. Z toho vyplýva, že výpočty sa dajú v porovnaní s nameranými hodnotami považovať za pomerne správne. Taktiež sa podarilo overiť možnosť použitia meracieho reťazca s využitím prvkov elektroniky používaných vo vozidle a pomocou snímačovej techniky na prvkoch zavesenia v budúcnosti pri určovaní prevádzkového namáhania podvozku Formula Student aj v prípade inej geometrie podvozku alebo iného charakteru jazdy súťažného vozidla.

Zoznam použitej literatúry

- [1] HOFFMANN, Karl. An Introduction to Measurements using Strain Gages. Darmstadt: HBM, 1987
- [2] VALENTA, František. Pružnosť a pevnosť III. Vyd. 2. přeprac. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002. ISBN 80-01-02480-6.
- [3] CTU CarTech [online]. [cit. 2018-05-04]. Dostupné z: <http://www.carttech.cvut.cz>
- [4] ŠTURCEL, Ján [online]. [cit. 2018-05-04]. Dostupné z: <https://www.atpjournal.sk/buxus/docs/atp-2003-08-17.pdf>
- [5] NOVÁK, Martin. Measurement in Engineering [online]. [cit. 2018-08-06]. Dostupné z: https://moodle.fs.cvut.cz/pluginfile.php/14533/mod_tab/content/8/Ch4%20-%20Force%20sensors.pdf
- [6] Aim [Online]. [cit. 2018-05-04]. Dostupné z : <http://www.aim-sportline.com/en/documentation-pictures.htm>
- [7] MICHALEC, Jiří. Pružnosť a pevnosť I. 3. vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 2009. ISBN 978-80-01-04224-3.
- [8] MICHALEC, Jiří. Pružnosť a pevnosť II. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-01-02375-3.
- [9] HBM [online]. [cit. 2018-08-06]. Dostupné z: <https://www.hbm.com>
- [10] Wheatstonov mostík [online]. [cit. 2018-06-08]. Dostupne z: https://www.spseke.sk/sb/elm_3/elemerania/va_mer_mostikmi_whetstonov.htm
- [11] Strain gauge amplifier XN4 operating manual V1.1 [online]. [cit. 2018-08-04]. Dostupné z: <http://www.renvale.com/wp-content/uploads/2014/04/XN4-Operating-manual-v1-1.pdf>
- [12] WASGESTIAN, Petr. Tenzometre HBM [online]. [cit. 2018-08-06]. Dostupné z: [http://bacula.nti.tul.cz/~petr.sidlof/vyuka/LA1/Materialy%20k%20prednaskam%20\(cesky\)/tenzometryHBM_CZ.pdf](http://bacula.nti.tul.cz/~petr.sidlof/vyuka/LA1/Materialy%20k%20prednaskam%20(cesky)/tenzometryHBM_CZ.pdf)
- [13] Odporové tenzometre [online]. [cit. 2018-08-06]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/foliove-odporove-tenzometry-princip-provedeni-pouziti-historie.html>
- [14] Formula Student Spain [online]. [cit. 2018-08-6]. Dostupné z: <http://formulastudent.es/wp-content/uploads/2017/08/FSS-teams-photo-2017.jpg>