

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA ŘÍDICÍ TECHNIKY



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Tenzometrické měření náprav závodního vozu

Autor: Jan Kříž

Vedoucí práce: Ing. Jan Sobotka

Praha, 2014

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra řídicí techniky

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: Jan Kříž

Studijní program: Kybernetika a robotika
Obor: Systémy a řízení

Název tématu: **Tenzometrické měření náprav závodního vozu**

Pokyny pro vypracování:

Navrhněte a realizujte systém umožňující provést tenzometrické měření sil na nápravách vozu kategorie Formula Student/SAE.

1. Vyberte vhodný typ tenzometrů pro umístění na jednotlivá ramena náprav vozu.
2. Vyberte vhodnou hardwarovou platformu pro sběr a záznam signálů z tenzometrů.
3. Pro zvolenou platformu navrhněte elektroniku umožňující připojení tenzometrů.
4. Realizujte navržený měřicí systém v kompaktní formě použitelný v reálném voze FS.05.
5. Implementujte software pro prezentaci a případně analýzu naměřených dat (např. metoda stékajícího deště).

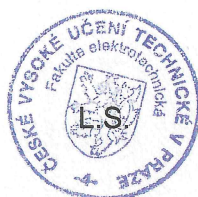
Seznam odborné literatury:

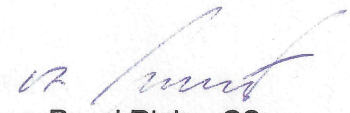
- [1] PUNČOCHÁŘ, Josef. Operační zesilovače v elektronice. 5. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2002, 495 s. ISBN 80-7300-059-8.
- [2] VALENTA, František. Pružnost a pevnost III. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002, 293 s. ISBN 80-010-2480-6.
- [3] DOUTNÁČ, Jan. Měření deformací na součásti pomocí tenzometrického měření a ověření výsledků metodou MKP. Pardubice, 2010. Bakalářská práce. Univerzita Pardubice. Vedoucí práce Ing. Michal Musil, Ph.D.

Vedoucí: Ing. Jan Sobotka

Platnost zadání: do konce letního semestru 2014/2015


prof. Ing. Michael Šebek, DrSc.
vedoucí katedry




prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 24. 2. 2014

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

V Praze dne

.

Podpis autora práce

Název práce: Tenzometrické měření náprav závodního vozu

Autor: Jan Kříž

Abstrakt Tato bakalářská práce se zabývá měřením silového napětí ramen náprav studentské formule pomocí odporových tenzometrů. Klade si za cíl navrhnout měřicí řetězec, realizovat měření a analyzovat naměřená data. V úvodní kapitole je popsána motivace pro takovéto měření, dále je rozebrána principiální podstata měření odporovými tenzometry. Třetí kapitola se věnuje návrhu samotného měřicího řetězce. Jeho řízení a vyhodnocení naměřených dat je popsáno v kapitole čtvrté. V následující experimentální části je popsána aplikace odporových tenzometrů na ramena náprav a jejich kalibrace. Tato část je doplněna o měření provedené na formuli.

Klíčová slova: tenzometrie, odporový tenzometr, CTU CarTech, metoda stékajícího deště

Title: Strain Gauge Measurement of Race Car Axles

Author: Jan Kříž

Abstract This bachelor's thesis is concerned about measuring strain of axles on a student formula using strain gauges. Its goal is to design a data acquisition, realize measurement and analyze measured data. The first chapter contains what is the motivation for this measurement and the following one analyzes nature of measurements done with strain gauges. The third chapter is about designing the data acquisition itself the control of which is explained in chapter 4 as well as evaluation of the collected data. Then follows an experimental part where the application and calibration of strain gauges on axles of the student formula is described. This part is completed with measurements done on the student formula.

Keywords: tensometry, strain gauge, CTU CarTech, rainflow-counting algorithm

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Janu Sobotkovi za odborné vedení, za pomoc a rady při zpracování této práce. Dále mé poděkování patří Ing. Ivanu Jeřábkovi, Ph.D. za pomoc při kalibraci nápravových ramen a mé rodině za trpělivost a podporu.

Obsah

Obsah	b
1 Úvod	1
1.1 Motivace měření deformací v ramenech zavěšení závodního vozu	2
1.2 Popis zavěšení závodního vozu a vymezení měřených veličin	2
1.3 Tenzometrické měření	6
1.4 Předpoklady měření	7
2 Tenzometrie pomocí odporových tenzometrů	8
2.1 Odporové tenzometry	9
2.2 Princip funkce odporových tenzometrů	10
2.3 Měření tenzometry - základní zapojení	13
2.4 Omezení parazitních vlivů	14
2.4.1 Čtvrtinový Wheatstonův můstek	16
2.4.2 Poloviční Wheatstonův můstek	16
2.4.3 Plný Wheatstonův můstek	17
2.5 Výpočet napětí v materiálu z naměřených poměrných prodloužení	18
3 Měřicí řetězec	20
3.1 Zvolené tenzometry a můstkové zapojení	21
3.2 Zesilovač	23
3.2.1 Zesílení	25
3.2.2 Kompenzace offsetu můstku	26
3.3 Přepínání kanálů - multiplexing	26
3.4 Digitalizace signálu	26
3.4.1 Vzorkovací frekvence	27
3.5 Mikropočítač	28
4 Software	29
4.1 Řídicí program mikropočítače	29
4.1.1 Ukládání dat na paměťovou kartu SD	29
4.1.2 Komunikace s A/D	30
4.2 Vyhodnocení měření v programu Matlab	31
4.2.1 Metoda stékajícího deště	31

Obsah

5 Experimentální část	36
5.1 Lepení tenzometrů	36
5.2 Kalibrace tenzometrů	37
5.2.1 Kalibrace ramen	37
5.2.2 Kalibrace zhotoveného přípravku	39
5.3 Ověření funkčnosti navrženého zařízení na formuli	39
5.3.1 Testování	41
6 Závěr	45
Literatura	48
Seznam obrázků	50
Seznam tabulek	51
Seznam zkratk	52
A Obsah přiloženého CD	I

1 Kapitola 1

Úvod

Cílem této bakalářské práce je navrhnout měřicí řetězec pro získání dat o jízdních deformacích ramen podvozku formule FS.05 týmu CTU CarTech (viz Obrázek 1.1) .

Tento tým se zabývá stavbou studentské formule pro soutěž Formula student SAE. Projektu se účastní zejména studenti strojní a elektrotechnické fakulty ČVUT v Praze. Samotná soutěž je celosvětově rozšířená, má třicetipětiletou tradici a může se pyšnit 470 startujícími týmy v seriálu závodů [1].

Výstupy a poznatky této práce jsou žádány konstruktéry pro validaci výpočetních modelů a zdokonalení stávajícího podvozku pro další generace formule a další ročníky soutěže.



Obrázek 1.1: Formule FS.05 týmu CTU CarTech pro sezónu 2013[1]

1.1 Motivace měření deformací v ramenech zavěšení závodního vozu

Konstrukce podvozku je velmi komplikovaná úloha, která má zásadní vliv na jízdní vlastnosti téměř jakéhokoliv dopravního prostředku. Jedná-li se o formuli, je na správný návrh kladen o to větší důraz a kromě perfektních jízdních vlastností je upřednostňována zejména minimální váha konstrukce za předpokladu nepřekročení bezpečnostních limitů.

Jednou z opor pro konstruktéra je numerická simulace jím vytvořeného modelu, která do jisté míry řekne, zda konstrukce vydrží předpokládanou zátěž. Realita však mnohdy ukazuje, že počítačový model vykazuje nedostatky vlivem mnoha nutných zanedbání a návrh bývá nutné předimenzovat. Aby se tomuto kroku předcházelo, je výhodné provést měření deformací na již existující podobné konstrukci.

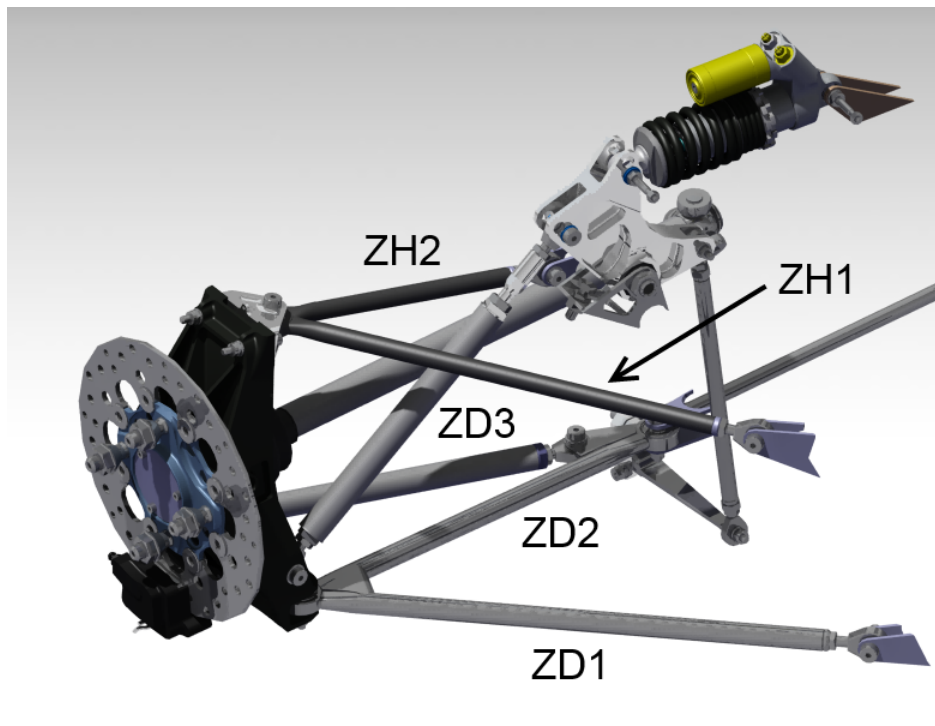
V případě podvozku formule jsou jedny z nejzajímavějších informace o silách působících na tyče ramen závěsu. Naměřená data pak dávají zejména informaci o maximálních silách, které na závěsy působí a jsou dobrým podkladem pro další analýzu jako jsou například výpočty životnosti podvozku formule.

1.2 Popis zavěšení závodního vozu a vymezení měřených veličin

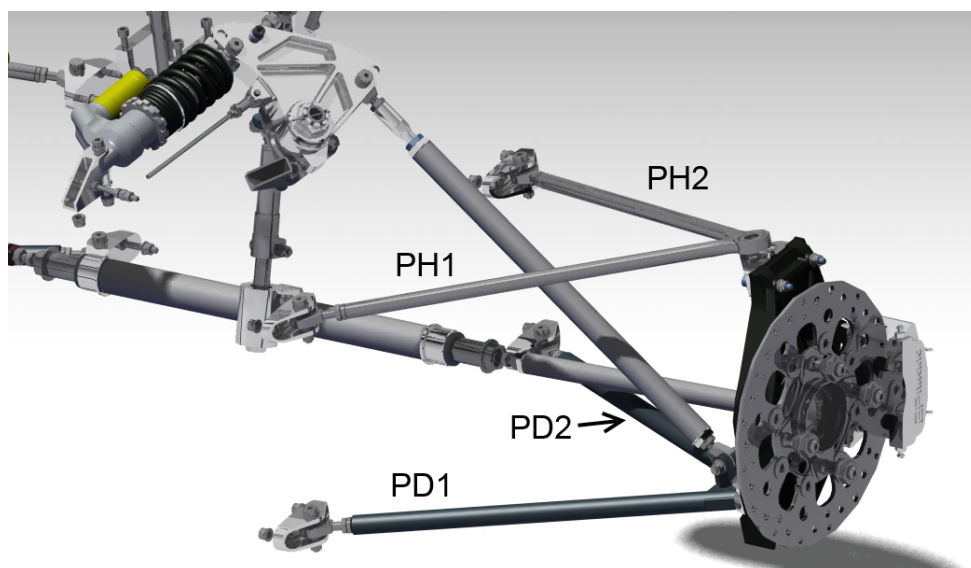
Podvozek formule FS.05 disponuje lichoběžníkovým zavěšením jehož podoba je na obrázcích 1.3 a 1.2. Charakteristickým znakem takového zavěšení jsou dvě nad sebou umístěná ramena ve tvaru písmena „A“, z nichž horní je kratší a k spodnímu je připevněn tlumič.

Výhoda takového zavěšení jsou jeho malé nároky na prostor vyplývající z jeho velmi nízkého umístění téměř v ose kola, dále pak fakt, že díky němu je jen velmi málo hmoty formule neodpruženo. [2]

V praxi se tato konstrukce chová tak, že ramena pevně spojená se zbytkem formule dovolují kolu pouze vertikální pohyb. Ten nastává například při přejetí překážky a je utlumen výše zmíněným tlumičem (viz schéma na obrázku 1.6). Klíčová zátěž ramen nastává při změně rychlosti formule v jakémkoliv horizontálním směru, což je například zrychlení, brzdění, zatačení nebo smyk.



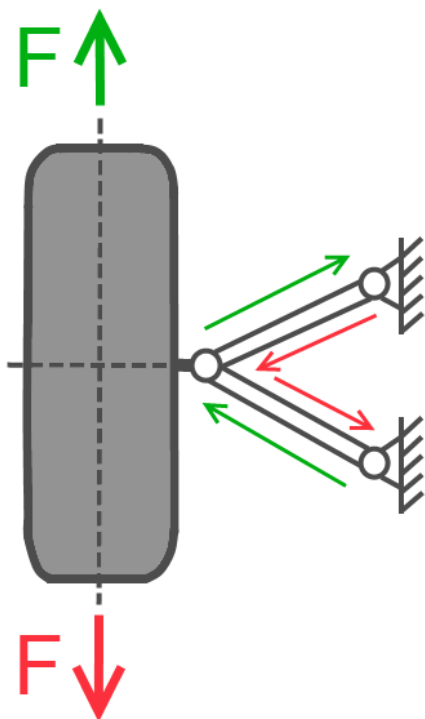
Obrázek 1.2: Model závěsu pravého zadního kola formule FS.05 v programu CATIA



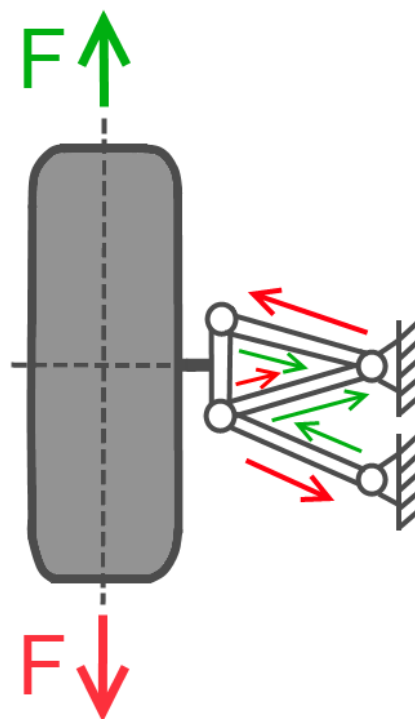
Obrázek 1.3: Počítačový model závěsu levého předního kola formule FS.05 v programu CATIA

1 Úvod

Řešení usměrnění těchto zátěží vychází z trojúhelníkové konstrukce ramen. Ta zajistí, že moment síly, který je vyvinut na horní cíp tohoto trojúhelníku se rozloží právě a jen v ose jeho odvěsen, tedy podélné ose tyčí ramen. Znamená to tedy, že jakákoliv síla působící na kolo se na trubkách ramen může deformačně projevit jen jako jejich prodloužení nebo zkrácení. Velmi idealizovaně jsou tyto procesy znázorněny kinematickými schématy na obrázcích 1.4 a 1.5, u nichž jsou naznačeny rozklady sil působící na jednotlivé tyče.



Obrázek 1.4: Schéma působení horizontálních sil na přední nápravu (pohled na kolo shora)

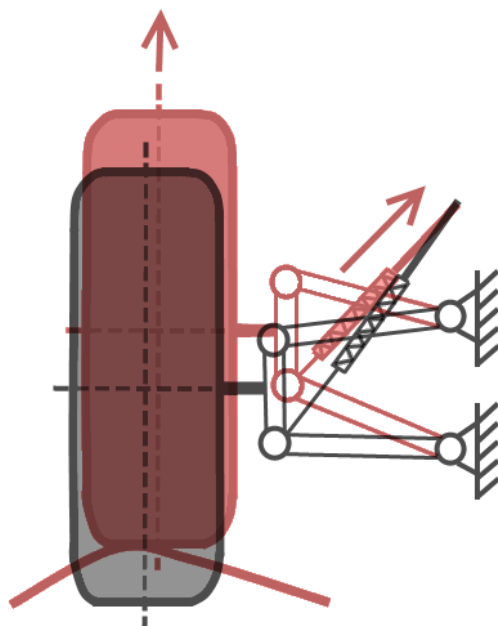


Obrázek 1.5: Schéma působení horizontálních sil na zadní nápravu (pohled na kolo shora)

Pomocí tenzometrických metod, jež jsou popsány v bodě 2, lze zjistit velikost sil, které tyto deformace způsobují, což je, jak již bylo výše napsáno, cílem této práce.

Popis tyčí je přehledně uveden v tabulce 1.1

1 Úvod



Obrázek 1.6: Schéma působení vertikálních sil na nápravu

Tabulka 1.1: Údaje o tyčích ramen náprav formule FS.05 podle dle označení tyčí na obrázcích 1.2 a 1.3

tyč	zkratka v textu
Přední náprava	
Přední tyč dolního ramene	PD1
Zadní tyč dolního ramene	PD2
Přední tyč horního ramene	PH1
Zadní tyč horního ramene	PH2
Zadní náprava	
Přední tyč dolního ramene	ZD1
Střední tyč dolního ramene	ZD2
Zadní tyč dolního ramene	ZD3
Přední tyč horního ramene	ZH1
Zadní tyč horního ramene	ZH2
Všechny tyče jsou vyrobeny z oceli 25CrMo4 dříve označované normou DIN číslem 17200. Tato ocel je charakteristická Youngovým modulem $E = 205000\text{Mpa}$ a Poissonovým číslem $\mu = 0,3$. Průměr tyčí je 18mm, tloušťka pláště 1,5mm.	

1.3 Tenzometrické měření

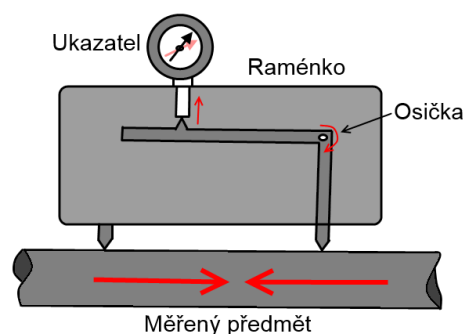
Pod pojmem deformace si můžeme například představit prohnutí nosníku mostní konstrukce, nebo například míru zkroucení hnací hřídele parní turbíny v elektrárně. V našem případě se jedná o zjištění velikosti sil vyvíjených na tyče ramen zavěšení v průběhu času jízdy formule viz 1.2.

Měřením těchto veličin se zabývá vědní obor tenzometrie, pod kterou spadá mnoho měřicích metod cílených na specifické aplikace. Všechny však v principu měří veličiny vycházející z deformace předmětu. Může to být například jeho posunutí, zkrivení, frekvence kmitání, zrychlení. V našem případě podélné poměrné prodloužení ocelové tyče, z kterého lze zjistit velikost sil, které jej způsobují[3].

Přístrojům které deformace měří se říká tenzometry. Existuje jich velké množství druhů a dají se rozdělit podle celé řady kritérií, nejčastěji ve vztahu k jejich aplikaci (např. měření prodloužení), nebo principu měření (pneumatické, akustické, indukční, mechanické, elektrické). Na obrázku 1.7 je jako příklad vyobrazen mechanický tenzometr schopný měřit napětí lanka, na obrázku 1.8 pak funkční schéma mechanického tenzometru měřícího prodloužení tyče [3].



Obrázek 1.7: Tenzometr měřící napětí lanka



Obrázek 1.8: Schéma mechanického tenzometru měřícího poměrné prodloužení tyče

V případě měření napětí ocelové tyče válcovitého tvaru se možnost výběru metody velmi zužuje, obzvláště je-li uvažováno, že přístroj musí měřit danou veličinu během jízdy formule, což je stav, který se dá ke klidným laboratorním podmínkám velmi ztěžka přirovnat.

V dané situaci je jediným technologicky realizovatelným řešením užití elektrické odporové tenzometrie. Ta je dále popsána v kapitole 2. Tenzometry této technologie se v praxi dají nalepit na měřený objekt a jsou v průmyslu hojně používány z důvodu jejich

malé hmotnosti, velikosti a jednoduchosti aplikace a následného zpracování výstupních údajů.

1.4 Předpoklady měření

U některých měření nelze vědět dopředu přesný rozsah hodnot, zejména pak charakter chování měřené veličiny v čase, což jsou parametry, které mají zásadní vliv pro přípravu měření. Mnohdy tedy bývá jedinou informací pouze odhad zadavatele, doplněný o jeho přání na míru přesnosti měřené veličiny.

Při tomto měření jsou zadavateli konstruktéři podvozku formule. Jejich požadavky na měření přehledně shrnuje tabulka 1.2. Podle těchto dat byl navržen měřicí řetězec pro tuto práci.

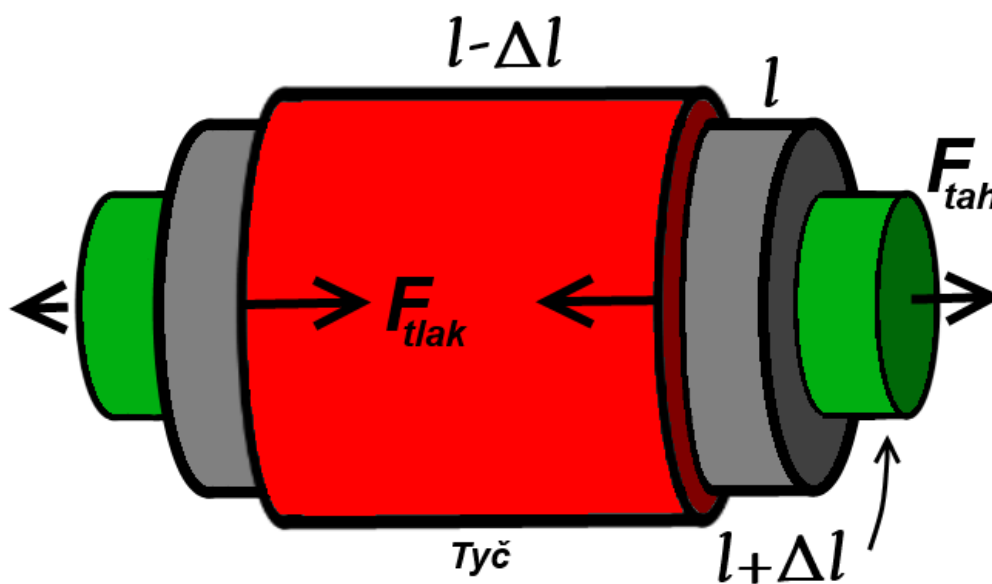
Tabulka 1.2: Tabulka požadavků konstruktérů týmu CTU CarTech na měření deformace ramen závěsu formule

požadavek	hodnota
Frekvence změny síly na tyči ramene	$< 0 ; 100 >$ Hz
Maximální měřená síla	$< -2500 ; 2500 >$ N
Přesnost měření	≈ 10 N
Počet kanálů	≥ 4

Kapitola 2

2 Tenzometrie pomocí odporových tenzometrů

Rozkladem situace v bodě 1.2 bylo zjištěno, že síly - tah (F_{tah}) a tlak (F_{tlak}) na podélnou osu tyče nápravy způsobují deformace, které lze definovat jako rovnoměrné zkrácení ($-\Delta l$) či prodloužení tyče ($+\Delta l$) v celé její délce viz obrázek 2.1.



Obrázek 2.1: Znázornění sil působících na tyč závěsu

Právě tento jev dokáží změřit elektrické odporové tenzometry. Ty měří deformaci skrze vodivou měřicí mřížku s definovaným odporem R_0 nalepenou k měřenému objektu. Vlivem pevné fixace mřížky se mění její rozměry shodně s rozměry měřeného objektu,

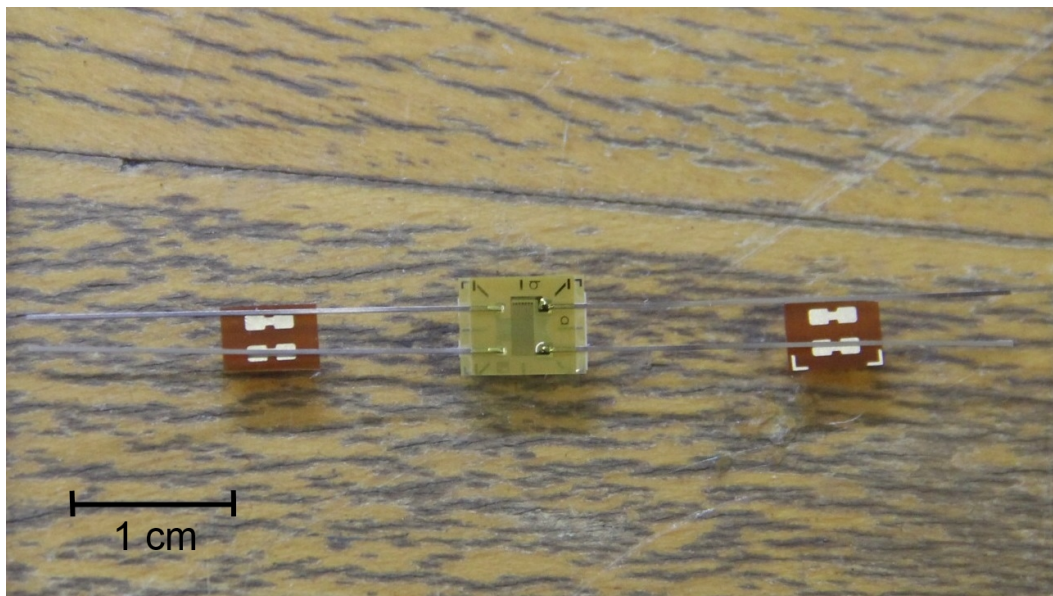
což má za následek změnu odporu $R_0 \pm \Delta R$ mřížky dle vztahu 2.2, která dále vede k měřitelné změně průtoku proudu touto mřížkou vyplývající z Ohmova zákona

$$I = \frac{R}{U}, \quad (2.1)$$

kde R ... odpor vodiče (mřížky) (Ω),
 I ... proud protékající mřížkou (A),
 U ... napětí přiložené na mřížku (V).

2.1 Odporové tenzometry

Na trhu se lze setkat s velkým množstvím, dle aplikace specifických, odporových tenzometrů. Nejvíce rozšířeným typem je tenzometr foliový vyobrazený na obrázku 2.2. Základem takového tenzometru je mřížka z vodivého materiálu, který má přibližně podobné fyzikální vlastnosti jako měřený materiál. Tato mřížka je vyleptána na nosnou fólii a shora překryta další vrstvou fólie. Z tohoto sendviče jsou vyvedeny ven tenké přívodní vodiče.



Obrázek 2.2: Foliový tenzometr při přípravě na nalepení

Kromě foliových tenzometrů se lze setkat se starším typem odporového tenzometru - drátkovým tenzometrem. Jeho mřížka není vyleptána, nýbrž je zde použit velmi tenký

vodič. Nevýhodou tohoto řešení je horší odvod tepla, které tenzometr produkuje, což je oproti foliovému tenzometru dáno nepříznivějším poměrem vnější plochy vodiče a jeho průřezem [3].

Dalším typem je polovodičový tenzometr. Ten se od předešlých dvou liší diametrálně svojí konstrukcí i vlastnostmi. Z těch je to zejména velká nelinearita vztahu mezi prodloužením a změnou odporu, dále pak vyšší náchylnosti na změnu okolní teploty. Výhoda naopak tkví ve vysoké citlivosti [3].

Pro měření jež popisuje tato práce byl shledán jako nejvíce vhodný tenzometr foliový. Z tohoto důvodu se odvození a další popis prováděný v následujících kapitolách váže právě k tomuto typu tenzometru.

2.2 Princip funkce odporových tenzometrů

Následující sekce je volně převzata z [3]. Z popisu konstrukce foliového tenzometru z bodu 2.1 vyplývá, že tenzometr je tvořen příhodným vodivým materiálem - vodičem. Tomu je leptáním udělen vhodný tvaru tak, aby se odpor tohoto vodiče měnil ideálně pouze vlivem měřeného prodloužení objektu.

Výchozímu odporu vodiče odpovídá následující vztah

$$R = \varrho \frac{l}{A}, \quad (2.2)$$

kde ϱ ... měrný odpor materiálu vodiče ($\Omega \cdot mm^{-1}$),

l ... délka vodiče (mm),

A ... plocha průřezu vodiče (mm^2).

Z tohoto vzorce je odvozena poměrná změna odporu

$$\frac{dR}{R} = \frac{1}{\varrho \frac{l}{A}} \left[dl \frac{\varrho}{l} - \rho l \frac{dA}{A^2} + \frac{l}{A} d\varrho \right] \quad (2.3)$$

V důsledku osového tahu na vodič se poměrné prodloužení vodiče promítne na zmenšení poměrné plochy jeho průřezu jako

$$\frac{dA}{A} = -2\mu \frac{dl}{l}, \quad (2.4)$$

kde μ značí Poissonovo číslo pro daný materiál a udává vztah mezi změnou příčného rozměru v závislosti na změně rozměru podélného.

2 Tenzometrie pomocí odporových tenzometrů

Dosažením tohoto vztahu do vzorce (2.3) docházíme k finálnímu vztahu pro poměrnou změnu odporu

$$\frac{dR}{R} = \frac{dl}{l} + 2\mu \frac{dl}{l} + \frac{d\rho}{\rho} = \frac{dl}{l} \left(1 + 2\mu + \frac{d\rho}{\rho} \frac{l}{dl}\right). \quad (2.5)$$

Výraz v závorce se nazývá součinitel deformační citlivosti přímého vodiče K_0 , přepsáno jako

$$\frac{dR}{R} = K_0 \frac{dl}{l}. \quad (2.6)$$

Pro vyjádření konečných odporových změn ΔR , je integrován výraz (2.6) v příslušných mezích

$$\int_{R_0}^{R_0+\Delta R} \frac{dR}{R} = K_0 \int_{l_0}^{l_0+\Delta l} \frac{dl}{l}, \quad (2.7)$$

$$\ln \frac{R_0 + \Delta R}{R_0} = K_0 \ln \frac{l_0 + \Delta l}{l_0}. \quad (2.8)$$

Dosažením symbolu pro střední hodnotu poměrného prodloužení $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$, dostáváme výraz

$$\frac{\Delta R}{R_0} = -1 + (1 + \varepsilon)^{K_0}, \quad (2.9)$$

který lze upravit pomocí Taylorova rozvoje na

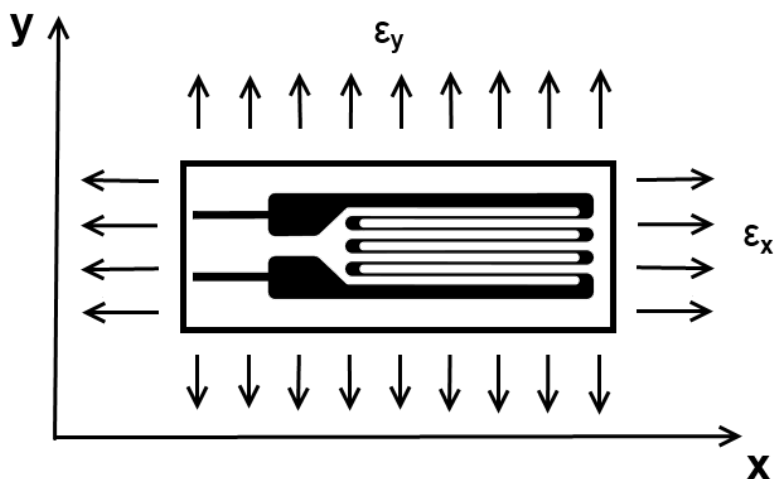
$$\frac{\Delta R}{R_0} = K_0 \varepsilon + \frac{K_0(K_0 - 1)}{2!} \varepsilon^2 + \frac{K_0(K_0 - 1)(K_0 - 2)}{3!} \varepsilon^3 + \dots \quad (2.10)$$

Jelikož druhý a další členy výrazu (2.10) mají na výsledek řádově nižší vliv, bývají v praxi zanedbávány.

Mřížka tenzometru se skládá z přímých úseků a přechodových ohybů, které tyto přímé úseky spojují. Výsledná změna odporu je pak součtem změny odporu ΔR_x v podélném směru a směru příčném ΔR_y , což je vyobrazeno na obrázku 2.3 a vyjádřeno ve vztahem

(2.11)

$$\Delta R = \Delta R_x + \Delta R_y \quad (2.11)$$



Obrázek 2.3: Schéma popisující směry podélných prodloužení [3]

Rozepsáním výrazu (2.11) pomocí vztahu (2.10) docházíme k

$$\frac{\Delta R}{R_0} = \frac{\Delta R_x}{R_0} + \frac{\Delta R_y}{R_0} = K_x \varepsilon_x + K_y \varepsilon_y, \quad (2.12)$$

$$\frac{\Delta R}{R_0} = K_x (\varepsilon_x + \kappa \varepsilon_y), \quad (2.13)$$

kde K_x ... součinitel podélné deformační citlivosti,

K_y ... součinitel příčné deformační citlivosti,

$\kappa = K_x/K_y$... součinitel příčné citlivosti.

Finální úpravou vztahem

$$\varepsilon_y = -\mu \varepsilon_x, \quad (2.14)$$

se ze vzorce (2.13) dobíráme k

$$\frac{\Delta R}{R_0} = K_x \varepsilon_x (1 - \kappa \mu) = K \varepsilon_x, \quad (2.15)$$

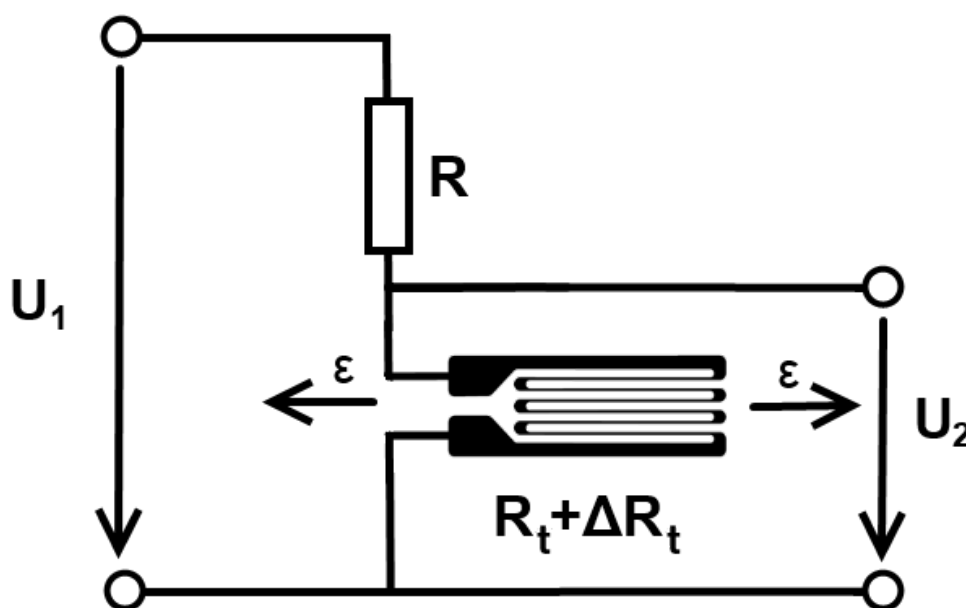
kde koeficient K je již standardně výrobcem uváděný parametr součinitele deformační

citlivosti.

2.3 Měření tenzometry - základní zapojení

Základní obvod, kterým lze provést tenzometrické měření je napěťový dělič, jehož schéma je na obrázku 2.4. Z rovnice (2.16) vyplývá, že změní-li se odpor tenzometru R_t o ΔR_t , nutně se musí změnit i výstupní napětí U_2 o ΔU_2 .

$$\Delta U_2 = U_1 \left(\frac{R_t}{R + R_t} - \frac{R_t + \Delta R_t}{R + R_t + \Delta R_t} \right) \quad (2.16)$$



Obrázek 2.4: Tenzometr zapojený do napěťového děliče

V praxi se takto triviální zapojení využívají jen minimálně, nebo pro velmi krátká měření. Nedokáží totiž kompenzovat rušení a parazitních vlivy. Ty mají obecně hlavní dvě příčiny.

1. Parazitní namáhání, jakožto důsledek toho, že tenzometr reaguje na jakoukoliv deformaci nosného předmětu, na kterém je nalepen. Ta může být u tyče vyvolána osovým natahováním, jejím ohýbáním, nebo torzí (kroucením opačnými konci tyče v ose v opačných směrech). Ve většině případů je měřena právě jedna z těchto

deformací, zbylé nelze použitím jednoho tenzometru odlišit a zanáší se takto do měření chyba [3].

2. Vlivy vnějšího prostředí, mezi které patří zejména rušení okolním elektromagnetickým zářením, které se indukuje do vodičů vedoucích signál z tenzometru. Dále pak změna teploty prostředí, která vede ke změně odporu tenzometru vlivem tepelné roztažnosti měřeného předmětu (α_p), tepelné roztažnosti materiálu mřížky tenzometru (α_t) a teplotnímu součiniteli odporu materiálu této mřížky (β_t). Výslednou změnu odporu tenzometru lze popsat následujícím vztahem

$$\Delta R_t = [(\alpha_p - \alpha_t)K + \beta_t]R_t\Delta T, \quad (2.17)$$

kde ΔT odpovídá změně teploty okolního prostředí, R_t je pak nominální hodnota tenzometru. Výše zmíněné koeficienty α a β lze najít v dokumentaci tenzometru a materiálu měřeného předmětu. [3]

2.4 Omezení parazitních vlivů

Pro odstranění parazitních vlivů vlivů popsaných v bodě 2.3 se nejčastěji používá Wheatstonova můstku. Toto zapojení pro svou jednoduchost a výhodné vlastnosti našlo uplatnění v mnoha aplikacích, zejména pak v odporové tenzometrii.

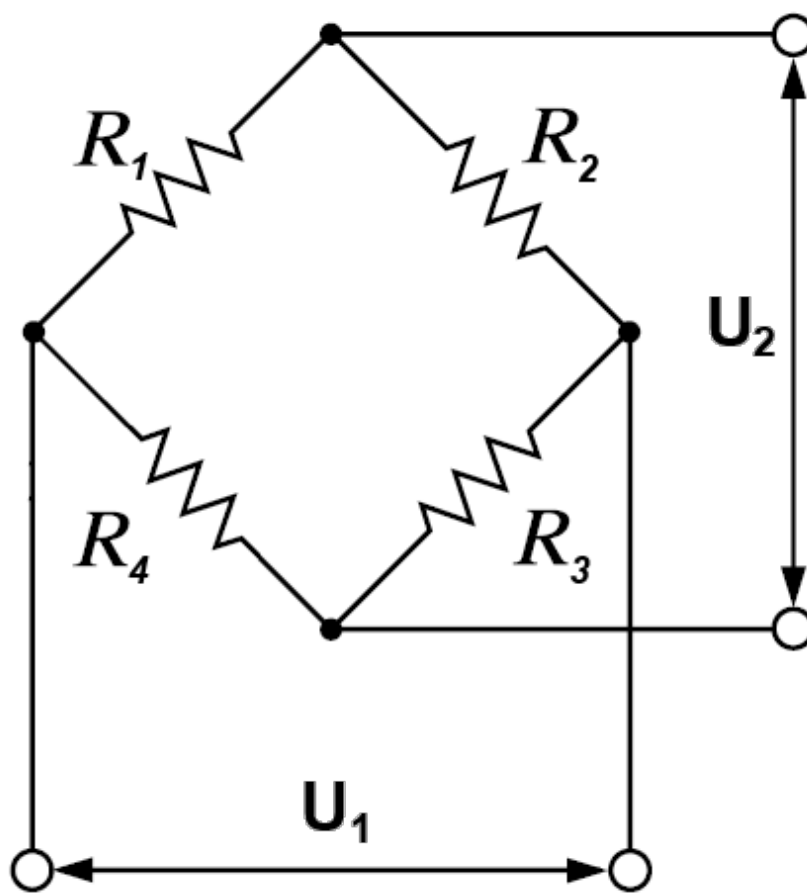
Důvodem je fakt, že při vhodné kombinaci zapojení tenzometrů do tohoto můstku dokáže kompenzovat vliv parazitního namáhání a v jistých případech i chybu vyvolanou změnou teploty okolního prostředí. Daň za tyto výhody je nutnost použití více tenzometrů, jejichž cena není zanedbatelná.

Můstek se skládá ze čtyř odporových prvků rozmístěných dle schématu na obrázku 2.5. Výstupnímu napětí U_2 lze popsat následujícím vztahem

$$U_2 = U_1 \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right), \quad (2.18)$$

kde U_1 je napájecí napětí můstku. Pokud pro hodnoty všechny odporů v můstku platí, že $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$, nebo poměr $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_4}{R_3}$, pak lze říci, že poměr vstupního napětí a výstupního napětí je nula, tedy $\frac{U_2}{U_1} = 0$. V takovém případě se říká, že můstek je vyvážený, a za předpokladu, že změna odporu ΔR kteréhokoliv členu je velmi malá, což u tenzometrů platí, lze napsat

$$\frac{U_2}{U_1} = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) \equiv \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}. \quad (2.19)$$



Obrázek 2.5: Wheatstonův můstek

Pokud se změní odpor jakéhokoliv z prvků R_1 až R_4 , na svorkách U_2 můstku je možné detekovat napětí. Za podmínek uvedených pro vzorec (2.19) lze zapsat závislost

$$U_2 = \frac{U_1}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right), \quad (2.20)$$

z které je pomocí vzorce (2.15) možné vyjádřit závislost výstupního napětí na poměrném prodloužení jednotlivých tenzometrů

$$U_2 = U_1 \frac{1}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad (2.21)$$

[5].

Z obecného vztahu (2.21) lze pro měření osového napětí tyče odvodit a použít následující tři můstkové varianty 2.4.1, 2.4.2 a 2.4.3. Ty se liší poměrem ceny a vlastností,

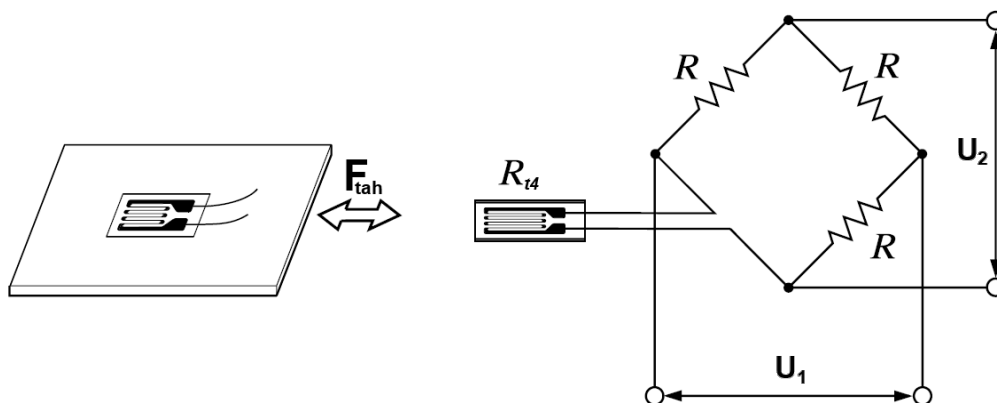
pro přehlednost uvedených v tabulce 2.1. Existují i další variace a možnosti jak můstek zapojit. Ty v tomto případě svými výhodami nepředčí uvedené můstky, proto zde nejsou uvedeny.

2.4.1 Čtvrtinový Wheatstonův můstek

Tento můstek (viz obr.(2.6) a (2.7)) obsahuje pouze jeden tenzometr (R_t). Zbylé odporové členy jsou nahrazeny kompenzačními odpory (R) o hodnotě odporu shodné s tenzometrem. Výhodou takového zapojení je jeho nízká cena vykoupená neduhy jako je nelineární vztah měřeného poměrného prodloužení a výstupního napětí, dále pak fakt, že nekompensuje výše zmíněnou parazitní námahu ani teplotní vliv okolí. Vztah mezi deformací a výstupním napětím je

$$U_2 = U_1 \frac{K \cdot \varepsilon}{4} \quad (2.22)$$

[5].



Obrázek 2.6: Schematické umístění jediného tenzometru na měřený objekt [6]

Obrázek 2.7: Obvodové schéma čtvrtičního Wheatstonova můstku [6]

2.4.2 Poloviční Wheatstonův můstek

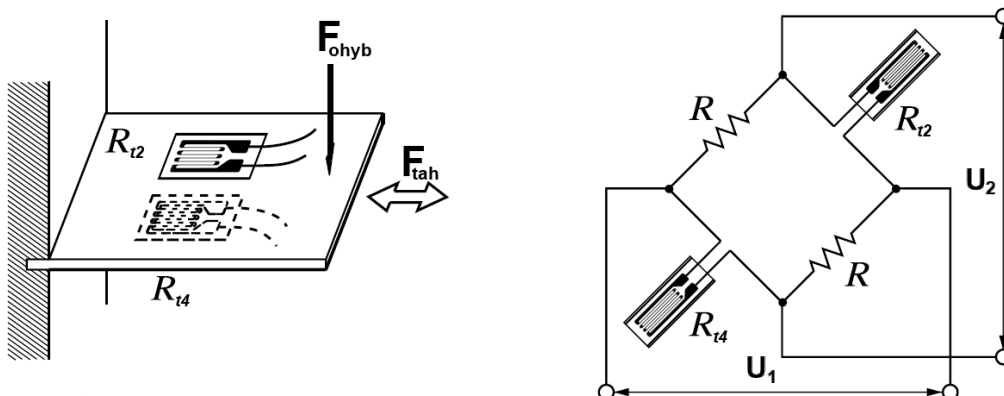
Takto zapojený můstek (obr. 2.9) získává oproti zapojení 2.4.1 výhodu kompenzace parazitní námahy. To se děje „spoluprací“ obou tenzometrů připevněných na protilehlé straně měřeného předmětu, jak je tomu na obrázku (2.8).

Při ohybu tyče se odpor jednoho z tenzometrů zvyšuje a druhého snižuje. Díky můstkovému zapojení se tyto rozdíly navzájem anulují. Pokud je na tyč vyvíjena síla v po-

délném směru (F_{tah}), signály z tenzometrů se naopak sčítají a měření je tedy dvakrát citlivější. Zbylé dva odporové prvky jsou doplněny obdobně jako v bodě (2.4.1). Vztah pro výstupní napětí je definován

$$U_2 = U_1 \frac{K \cdot \varepsilon}{2}. \quad (2.23)$$

[5]



Obrázek 2.8: Schematické umístění dvou tenzometrů na měřený objekt [6]

Obrázek 2.9: Obvodové schéma polovičného Wheatstonova můstku [6]

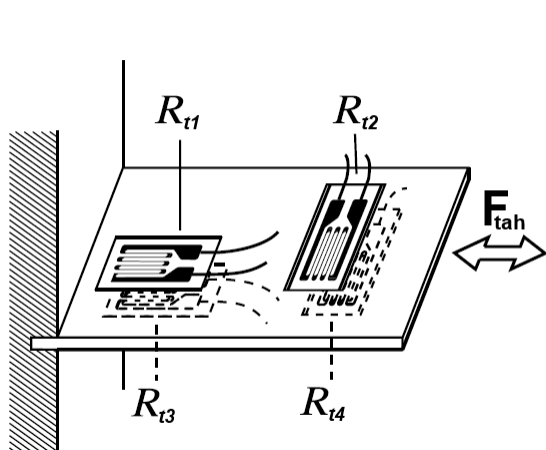
2.4.3 Plný Wheatstonův můstek

Disponuje nejvíce výhodami na úkor použití velkého množství tenzometrů. K zapojení (2.7) přibývají další dva ortogonálně umístěné tenzometry. Jejich primární úlohou je teplotní kompenzace, kterou postrádá poloviční můstek (2.4.2), u kterého změna teploty tenzometrů vyvolávala dvojnásobně velkou chybu měření (stav podobný podélnému napětí).

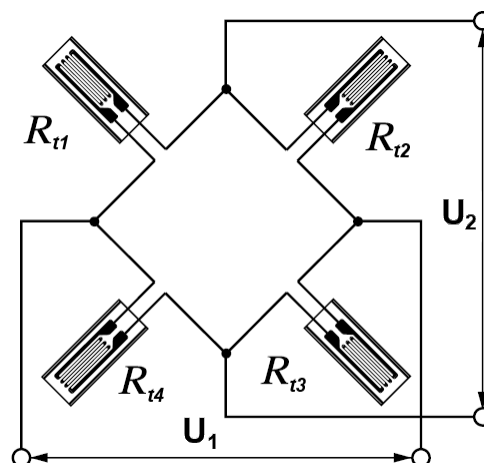
Kompenzace probíhá anulováním odporových změn se stejným znaménkem v tenzometrických párech R_4, R_3 a R_1, R_2 , jaké zapříčiňují právě teplotní změny. Sekundární úlohou tenzometrů R_2 a R_4 je rovněž měřit napětí. Jelikož je jejich poloha kolmá k měření, využívá se zde opět Poissonova čísla μ obdobně jako ve vzorci (2.14) k převodu podélného prodloužení na příčné. Vzorec pro výstupní napětí plného Wheatstonova můstku má tedy tvar

$$U_2 = U_1 \frac{K \cdot (1 + \mu) \cdot \varepsilon}{2}. \quad (2.24)$$

[5]



Obrázek 2.10: Schematické plného tenzometrického můstku na měřený objekt [6]



Obrázek 2.11: Obvodové schéma plného Wheatstonova můstku [6]

Shrnutí vlastností můstkových zapojení

typ můstku	citlivost	cena	linearita	kompensace teplotního vlivu	kompensace parazitního namáhání
čtvrtinový	1	1×	—	×	×
poloviční	2	2×	—	×	✓
plný	2	4×	+	✓	✓

Tabulka 2.1: Shrnutí vlastností můstkových zapojení

2.5 Výpočet napětí v materiálu z naměřených poměrných prodloužení

K výpočtu výsledné síly působící na tyč uijeme hodnot naměřených na výstupních svorkách můstku U_2 a známé hodnoty napájení můstku (svorky U_1). Vyjádřením poměrného prodloužení ε ze vzorce pro výstupní napětí můstku (například pro plný můstek (2.24)) získáme následující vztah

$$\varepsilon = \frac{U_2}{U_1} \cdot \frac{2}{K \cdot (1 + \mu)} \quad (2.25)$$

2 Tenzometrie pomocí odporových tenzometrů

Dále uijeme vzorců, jež dávají do souvislosti právě poměrné zesílení ε a výslednou sílu F skrze napětí v materiálu

$$\sigma = \frac{F}{S}, \quad (2.26)$$

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E}, \quad (2.27)$$

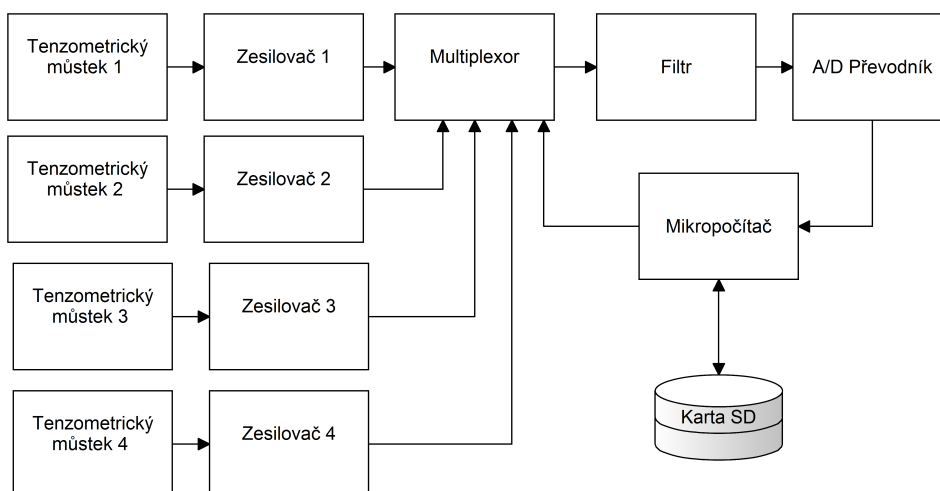
$$F = E \cdot \varepsilon \cdot S, \quad (2.28)$$

kde	σ	...	napětí v materiálu,
	ε	...	poměrné prodloužení,
	F	...	výsledná síla,
	E	...	Youngův modul pružnosti (parametr měřeného materiálu),
	S	...	plocha normálová (kolmá) k působení síly.

3 Kapitola 3

Měřicí řetězec

Je obvod skládající se zpravidla z několika elektronických prvků užitých a navržených dle potřeb měření, zejména pak dle podstaty měřeného signálu. S ohledem na požadavky uvedené v bodě 1.4, byl navržen měřicí řetězec znázorněný diagramem na obrázku 3.1.



Obrázek 3.1: Schéma navrženého měřicího řetězce

Měření začíná u senzoru, za který v tomto případě můžeme brát celý tenzometrický můstek. Změna napětí vyvolaná tenzometry se obecně pohybuje v řádech mikrovoltů až milivoltů. V praxi není zcela výhodné měřit takto malá napětí, proto se užívá zesilovač, který signál z tohoto důvodu několikanásobně zesílí ideálně tak, aby se očekávané hodnoty měření pohybovaly po celém napěťovém rozsahu, který je schopen digitalizovat analogově digitální převodník (zkr. A/D). Ten má za úkol převést napětí signálu na binární informaci, kterou dále zpracovává mikro počítač a ukládá ji na kartu SD.

K tomuto základnímu řetězci je dále před A/D umístěn přepínač (multiplexor), který umožňuje přepínání mezi měřenými kanály - měřenými tyčemi. Z důvodů možnosti výskytu signálu s kmitočtem vyšším než dokáže vzorkovat převodník (aliasing 3.4.1) například naindukováním na kabely vedoucí k tenzometrům, je před převodník umístěn antialiasingový filtr uvedený v dokumentaci převodníku, což je zapojení, které propouští signál do určené frekvence. Jednotlivé součásti měřicího řetězce jsou popsány v následujících bodech.

Celý obvod je schématicky vyobrazen na obrázku 3.2.

3.1 Zvolené tenzometry a můstkové zapojení

Jelikož se formule pohybuje zejména ve venkovních prostorech s nestálou teplotou a existuje zde možnost, že ramena mohla být nedokonale svařena, což může mít za následek ohýbání tyčí náprav, bylo pro měření vybráno zapojení tenzometrů do plného můstku.

Na trhu s tenzometry lze nalézt celou řadu tvarů a velikostí. Od nejjednodušších jednoosých tenzometrů s jednou měřicí mřížkou až po různé typy tenzometrických růžic obsahujících více mřížek schopných měřit napětí ve více směrech. Právě toho bylo při měření využito, jelikož zvolené můstkové zapojení předpokládá dva tenzometry v ose napětí a dva umístěné ortogonálně. Tomu vyhovují takzvané tenzometrické kříže (viz obrázek 2.2) obsahující dva tenzometry s mřížkami kolmými na sebe, čímž odpadá nutnost pracného lepení každého tenzometru zvlášť.

Kromě tvaru a počtu mřížek jsou dalšími parametry tenzometrů jejich nominální odpor a velikost mřížky. Dále je výhodné vybrat tenzometr, jehož tepelná roztažnost mřížky α_t se shoduje s koeficientem tepelné roztažnosti měřeného předmětu α_p .

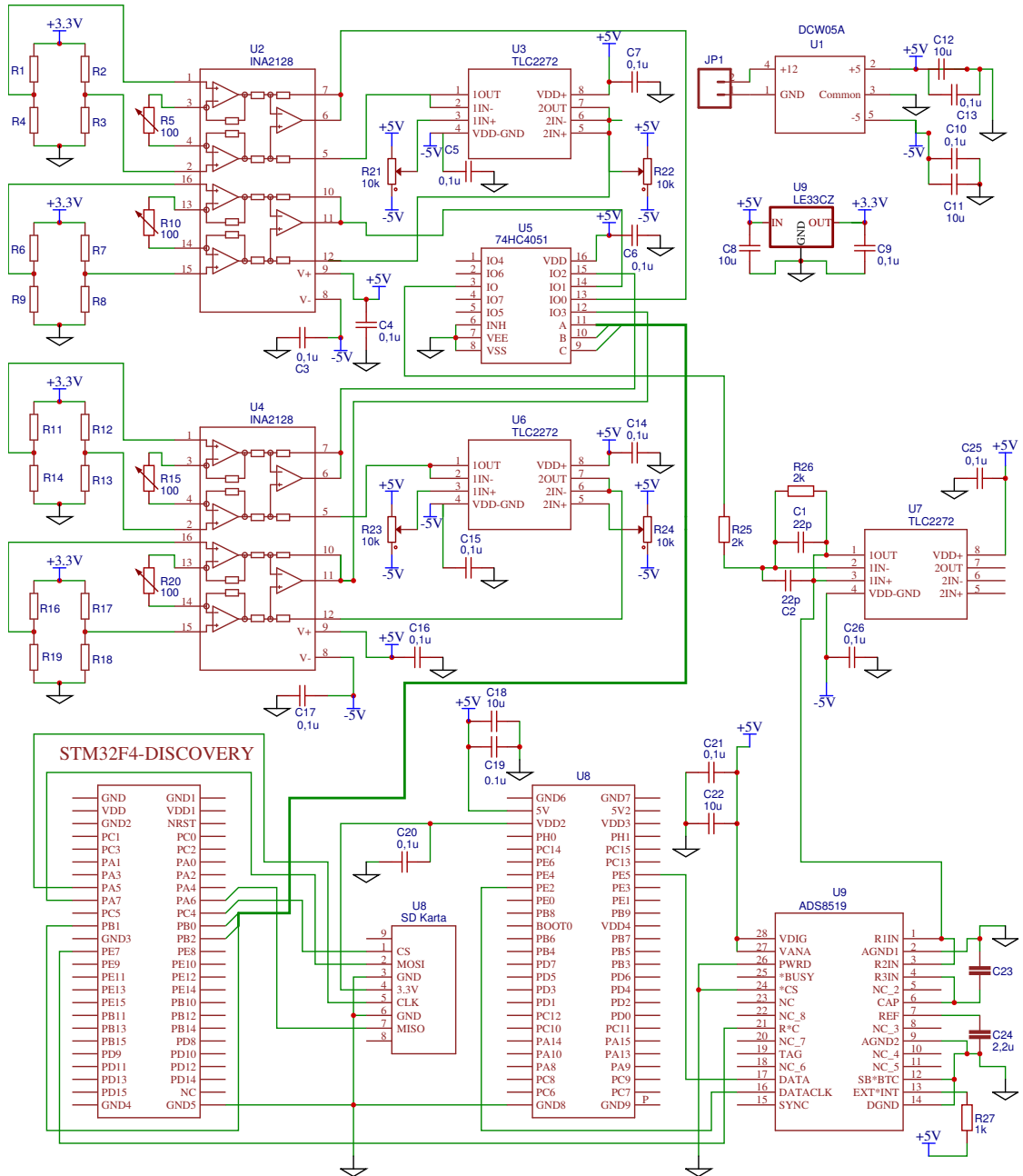
Nominální odpor je volen podle možností odvodu tepla od mřížky. To vzniká průtokem proudu vodičem, jehož velikost je závislá právě na odporu. Čím větší odpor mřížka má, tím se méně zahřívá, méně sama sebe ovlivňuje, avšak to vše na úkor menší citlivosti (menší změna napětí). Jelikož je měřeným podkladem ocel, lze si díky její tepelné vodivosti dovolit měřit tenzometry s nominální hodnotou odporu 120Ω .

Velikost mřížky byla zvolena s ohledem na průměr tyče (ohyb tenzometru vlivem malého poloměru tyče by také mohl vnést do měření chybu). I zde platí pravidlo vzorců pro tenzometrii, z kterých vyplývá, že čím delší mřížka je, tím lépe změří dané napětí. Parametry vybraného tenzometru jsou shrnuty v tabulce 3.1.

Poloha umístění tenzometrů se odvíjí od rozprostření deformace v daném objektu. Při osově námaze je napětí v tyči rozloženo rovnoměrně a má v každém místě stejnou velikost. Z tohoto důvodu můžeme tenzometry instalovat kdekoliv po celé její délce. Střed tyče byl vybrán z důvodů ochrany tenzometrů před mechanickým poškozením

3 Měřicí řetězec

vlivem montáží a prací v okolí kol, sekundárně pro případnou možnost měření ohybu tyče za rekonfigurace tenzometrů (viz obrázek 3.3). Ohybem tyče, na rozdíl od osového tahu, je rozkládáno napětí nerovnoměrně s maximem v jejím středu.

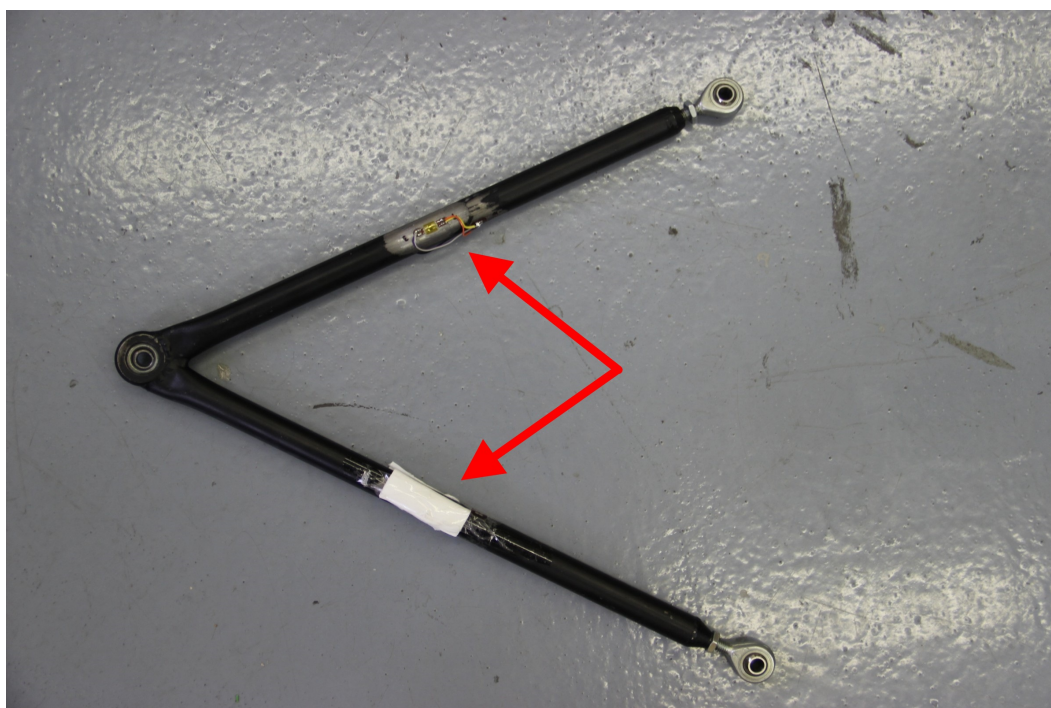


Obrázek 3.2: Schéma obvodu měřicího přípravku

3 Měřicí řetězec

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 měřicí mřížky	$3 \times 3 \text{ mm}$
Rozměry tenzometru	$6,2 \times 7,2 \text{ mm}$
Maximální napájecí napětí můstku	$3,5 \text{ V}$

Tabulka 3.1: Parametry a vlastnosti vybraného tenzometru



Obrázek 3.3: Rameno formule s instalovanými tenzometry

3.2 Zesilovač

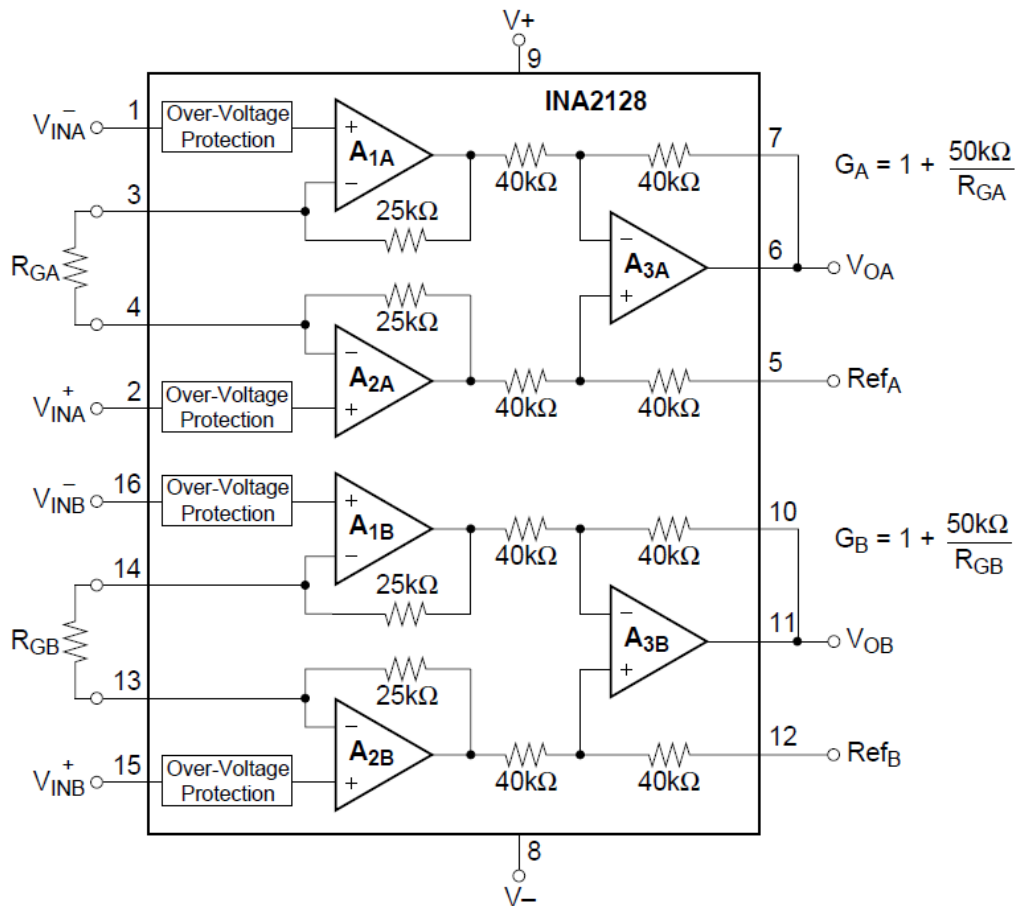
Při použití můstkového zapojení je vhodné použít přístrojový symetrický operační zesilovač, jehož blokové schéma je na obrázku 3.4.

Tento typ zesilovače, je uzpůsoben měření velmi malých rozdílových napětí se stejnosměrnou napěťovou složkou. Připojení zesilovače k signálu je patrné ze schématu 3.2.

3 Měřicí řetězec

Z něho je zřejmé, že na každé z větví můstku bude zhruba poloviční napětí oproti napětí napajecímu. Tím je míněna právě stejnosměrná složka, kterou dokáže přístrojový zesilovač potlačit a zesílit pouze rozdíl napětí mezi jednotlivými větvemi můstku.

Poměru mezi zesílením těchto dvou složek se říká činitel potlačení souhlasného napětí označovaného zkratkou CMRR (common mode rejection ratio) či jen CMR. Ten by měl být ideálně co nejvyšší.



Obrázek 3.4: Blokové schéma vnitřního uspořádání vybraného zesilovač INA2128

Dalšími parametry seřazenými dle důležitosti při výběru jsou:

- maximální zesílení, které může zesilovač poskytnout
- šířka frekvenčního pásma
- míra šumu, který zesilovač generuje
- vstupní napěťová nesymetrie (offset)

- vstupní napěťový drift udávající změnu napěťové nesymetrie vlivem změny teploty zesilovače

Těmto porovnávacím parametrům nejlépe vyhověl zesilovač s kódovým označením INA2128 společnosti Texas Instruments, který navíc integruje dva takovéto zesilovače do jednoho pouzdra. Jeho parametry jsou shrnuty v tabulce 3.2.

parametr	hodnota	jednotka
zesílení G	$< 1 ; 10000 >$	$[V/V]$
šum (při frekvenci signálu 1 kHz)	8	nV/\sqrt{Hz}
šířka pásma (při zesílení $G = 10000$)	2	kHz
CMRR (při zesílení $G = 10000$)	130	dB
vstupní napěťová nesymetrie	< 50	μV
vstupní napěťový drift	0,5	$\mu V/^\circ C$
počet kanálů	2	$[-]$
rozsah napájecího napětí U_{nap}	± 18	V
hodnoty saturace	$-U_{nap} + 0.8, +U_{nap} - 0.9$	V

Tabulka 3.2: Parametry symetrického operačního zesilovače INA2128

3.2.1 Zesílení

Rozvaha zesílení vychází z tabulky požadavků konstruktérů 1.2, vzorců potřebných pro výpočet výstupního napětí z tenzometrického můstku 2.24, 2.28 a maximálního výstupního napětí zesilovače - saturaci, kterou lze dohledat v jeho datovém listu. Užitím těchto vzorců a dat dostáváme vztah

$$U_{m\ddot{u}stek,max} = U_1 \frac{K \cdot (1 + \mu) \cdot \frac{F}{E \cdot S}}{2}, \quad (3.1)$$

pro maximální napětí měřitelné na můstku při maximálním očekávaném zatížení a porovnání této hodnoty s maximální výstupní hodnotou zesilovače $U_{OZ,max}$ dostáváme nutné zesílení

$$G = \frac{U_{OZ,max}}{U_{m\ddot{u}stek,max}}. \quad (3.2)$$

Postupným dosazením do vzorců (3.1) a (3.2) vychází zesílení

$$G = \frac{4,5}{3,3 \cdot \frac{2 \cdot (1+0,3) \cdot \frac{2400}{205 \cdot 10^9 \cdot 7,7754 \cdot 10^{-5}}}{2}} = 6390 \quad (3.3)$$

Nastavení zesílení je realizováno pomocí 100Ω odporového trimru na obrázku 3.4 známého pod značkou R_{GA} (popř. R_{GB}), ve schématu 3.2 pak pod značkami R5, R10, R15, R20. Přesná hodnota odporu trimru k příslušnému zesílení je dána vztahem

$$R_g = \frac{50k\Omega}{G-1}, \quad (3.4)$$

po dosazení

$$R_g = 7,825\Omega. \quad (3.5)$$

3.2.2 Kompenzace offsetu můstku

V ideálním případě je po připojení můstku k zesilovači naměřeno nulové napětí. V praxi však nulové nebývá z důvodu napěťové nesymetrie a driftu zesilovače, samotnou vahou auta, dále pak zejména špatně nalepenými tenzometry, nebo odchylkami nominálních hodnot tenzometrů, které mají být z výroby stejné.

Vlivem velkého zesílení se poslední dva vlivy projeví na výstupu zesilovače mnohdy i markantně. Z tohoto důvodu byl zesilovač opatřen nastavitelnou hodnotou reference skládající se z potenciometru připojeného na póly napájecího napětí a výstupem do napěťového sledovače (ve schématu (3.2) $U3$ a $U6$). Ten je zde umístěn kvůli na referenčním vstupu zesilovače očekávanému nízkému impedančním zdroji, kterým potenciometr není. Nastavováním hodnoty potenciometru lze výstupní napětí zesilovače nastavit na libovolnou hodnotu až do hodnoty saturace. [7]

3.3 Přepínání kanálů - multiplexing

Přepínání kanálů lze realizovat několika způsoby. Jednou možností je využít vícekanálový A/D, který má přepínač integrován přímo v čipu. Druhou je užití čipu přímo k tomu určenému. Při návrhu byla vybrána právě tato možnost a byla realizována osmi-kanálovým multiplexorem CD74HCT4051 firmy Texas Instruments (využity jsou pouze 4 kanály). Přepínání mezi kanály tohoto čipu řídí mikropočítač pomocí tří binárních logických výstupů.

3.4 Digitalizace signálu

Je realizována pomocí analogově digitálního převodníku. Mezi aktuálně nejběžněji používané převodníky pro tenzometrická měření můžeme zařadit dva druhy lišící svou architekturou, a to buď postupně aproximační převodník, označovaný jako SAR (successive

approximation register), nebo Sigma-Delta převodník. Jejich hlavní atributy jsou stručně shrnuty v tabulce 3.3

Tabulka 3.3: Porovnání převodníku SAR a Sigma-Delta [8]

Typ převodníku		
SAR		Sigma Delta
Převáděné napětí je vzorkováno před každým převodem	×	Převod napětí probíhá kontinuálně
Maximální rozlišení 16bit	×	Rozlišení až 24bit
Vhodný pro jakýkoliv typ signálu	×	Není vhodný pro rychlé změny napětí

Z důvodu nevhodnosti převodníku typu Sigma-Delta vzorkování rychlé změny napětí, kterými by mohlo být přepínání signálů multiplexorem, byl zvolen převodník typu SAR. Jeho atributy jsou shrnuty v tabulce

Tabulka 3.4: Významné hodnoty vybraného číslicově analogového převodníku typu SAR ADS8519 firmy Texas Instruments

parametr	hodnota	jednotka
rozlišení	16	bit
vstupní napěťový rozsah	0 – 8, 192; ±5; ±10	V
maximální rychlost vzorkování	250	<i>kHz</i>
výstupní datové rozhraní	<i>SPI</i>	–
odstup signál-šum (SNR)	93	<i>dB</i>
interní napěťová reference	4, 096	V

3.4.1 Vzorkovací frekvence

Vzorkovací frekvence udává, kolikrát je daný signál změřen během vteřiny. Abychom zaručili, že po interpretaci digitalizovaných dat získáme zpět původní signál, musíme užít tzv. vzorkovací teorém [8]

$$f_{\text{vzorkovací}} < 2 \cdot f_{\text{signálu}} \quad (3.6)$$

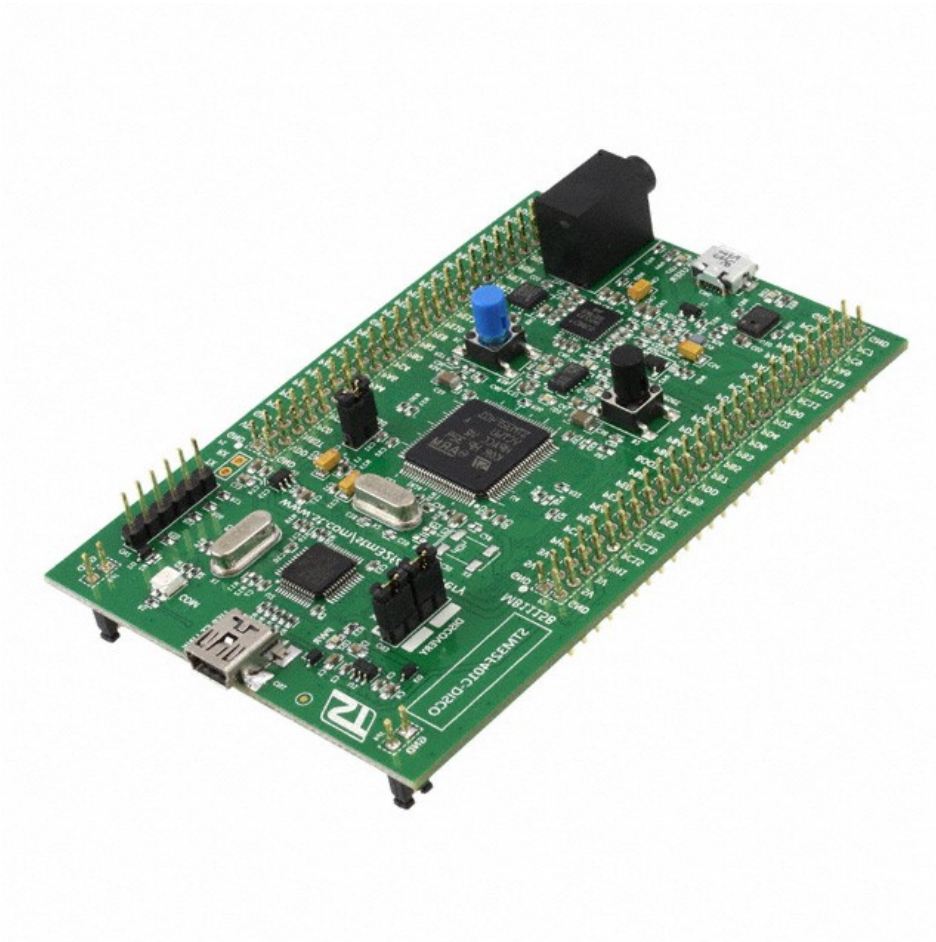
Při nedodržení tohoto pravidla se může stát, že tvar digitalizovaného signálu bude diametrálně odlišný od originálního, neboli podlehne tzv. aliasingu. Dle zadání by měl měřený signál dosahovat maximální frekvence 100Hz. Dosazením této frekvence do vzorkovacího teorému docházíme k tomu, že by měřený signál měl být vzorkován alespoň

200 Hz , tedy dvěstěkrát za sekundu pro každý kanál. Vybraný převodník zvládá vzorkovat signál několika řádově rychleji, byla tedy s rezervou zvolena vzorkovací frekvence 500 Hz pro každý kanál.

3.5 Mikropočítač

Jako vyhodnocovací jednotka byl vybrán mikropočítač s STM32F401VC s architekturou ARM firmy ST Microelectronics osazený na vývojovém kitu vyobrazeném na obrázku 3.5. Jeho výhodou je velký počet funkcionalit čipu a díky vývojovému kitu snadnější fyzický přístup k jednotlivým periferiím bez nutnosti návrhu dalšího hardwaru.

Pro komunikaci a záznam dat bylo zvoleno rozhraní SPI popsané v bodě 4.2.1. Dále vývojový kit komunikuje skrze logické binární výstupy s multiplexorem



Obrázek 3.5: Vývojový kit STM32F401VC-Discovery [9]

4 Kapitola 4

Software

4.1 Řídicí program mikropočítače

Řízení měření bylo rozloženo do třech fází. První, inicializační fáze má za cíl nakonfigurovat veškerou komunikaci s periferiemi. Pokud se toto nezdaří (například vlivem absence karty SD), vykonávání programu se ukončí, což je indikováno červenou LED diodou.

Po dokončení konfigurace program vyčkává ve druhé fázi do stisknutí tlačítka, jež vyvolá přerušení. To zavolá proceduru, která vytvoří nový soubor pro měření na kartě SD a začne s měřením. To probíhá cyklicky opakujícím se přepínáním vstupů do multiplexoru, přičemž je vždy změřeno aktuální napětí na daném vstupu.

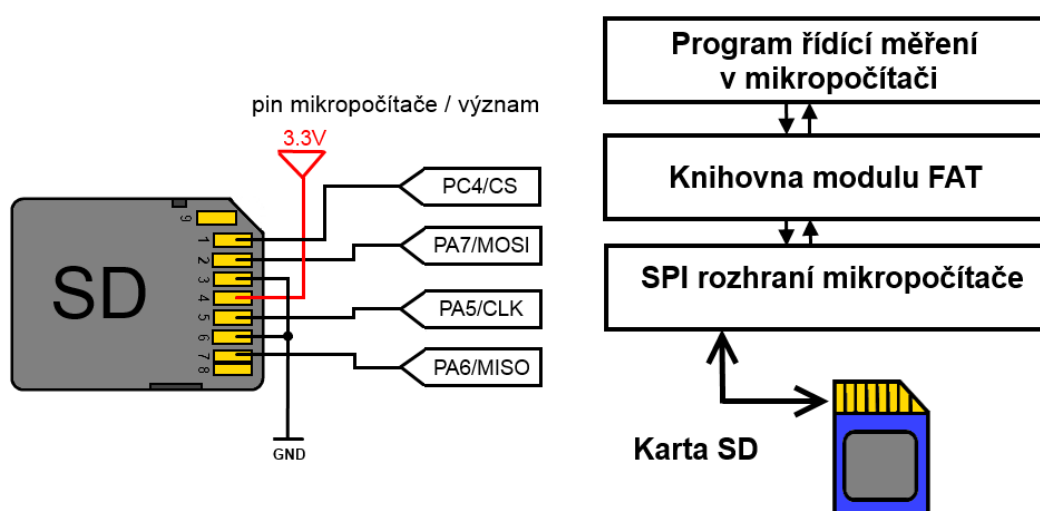
Frekvence tohoto přepínání je dána návrhem vypočtenou vzorkovací frekvencí, z které je vypočítáno, jak často má přijít z procesoru přerušení oznamující nutnost změny kanálu.

Při opětovném zmáčknutí tlačítka je proces měření ukončen, procedura uzavírá soubor s daty měření a program se vrací do fáze 2.

4.1.1 Ukládání dat na paměťovou kartu SD

Zápis a čtení z paměťových karet typu SD je možný dvěma způsoby. Buď pomocí protokolu SD card, nebo pomocí rozhraní SPI. Protokol SPI byl vybrán kvůli své snadné implementaci. Připojení karty k mikropočítači je znázorněno na obrázku 4.1. Význam datových vodičů je vysvětlen v tabulce 4.1.

Aby byl umožněn přístup k zapsaným datům po přenosu karty na osobní počítač, byla použita knihovna pro podporu souborového systému FAT - Generic FAT File System Module [10]. Ta funguje dle schématu 4.2 jako mezivrstva mezi protokolem SPI a samotným programem běžícím na mikropočítači.



Obrázek 4.1: Připojení karty SD k mikro počítači

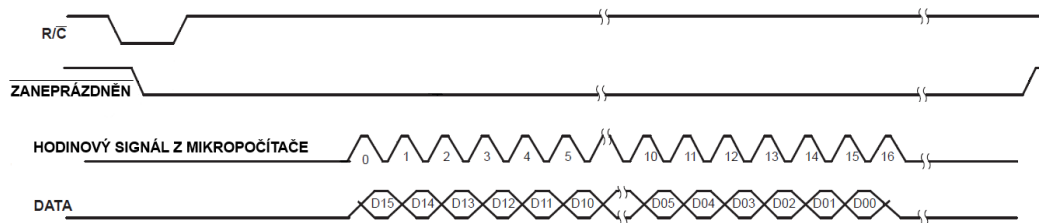
Obrázek 4.2: Schéma implementace modulu FAT

Tabulka 4.1: Význam datových vodičů karty SD

vodič	význam
CLK	Hodinový signál mikro počítače
CS	Signál aktivující zařízení na sběrnici SPI
MOSI	Datový proud z mikro počítače do karty SD
MISO	Datový proud z karty SD do mikro počítače

4.1.2 Komunikace s A/D

Číslicově analogový převodník popsáný v bodě 3.4 využívá pouze jednosměrného spojení SPI s mikro počítačem, který pouze přijímá data z převodníku. Převod je kontrolován pomocí logického signálu RC (Read/Convert), který přepnutím stavu do logické nuly sejme vzorek napětí na vstupu převodníku. Po uvození RC signálu zpět do logické jedničky je zahájena konverze, po jejímž ukončení zůstává převedená hodnota ve výstupním registru převodníku, kde čeká na hodinový signál generovaný mikro počítačem, s jehož spádovými hranami odesílá sled 16 bitů naměřené hodnoty. Celkový diagram této transakce je na obrázku 4.3.



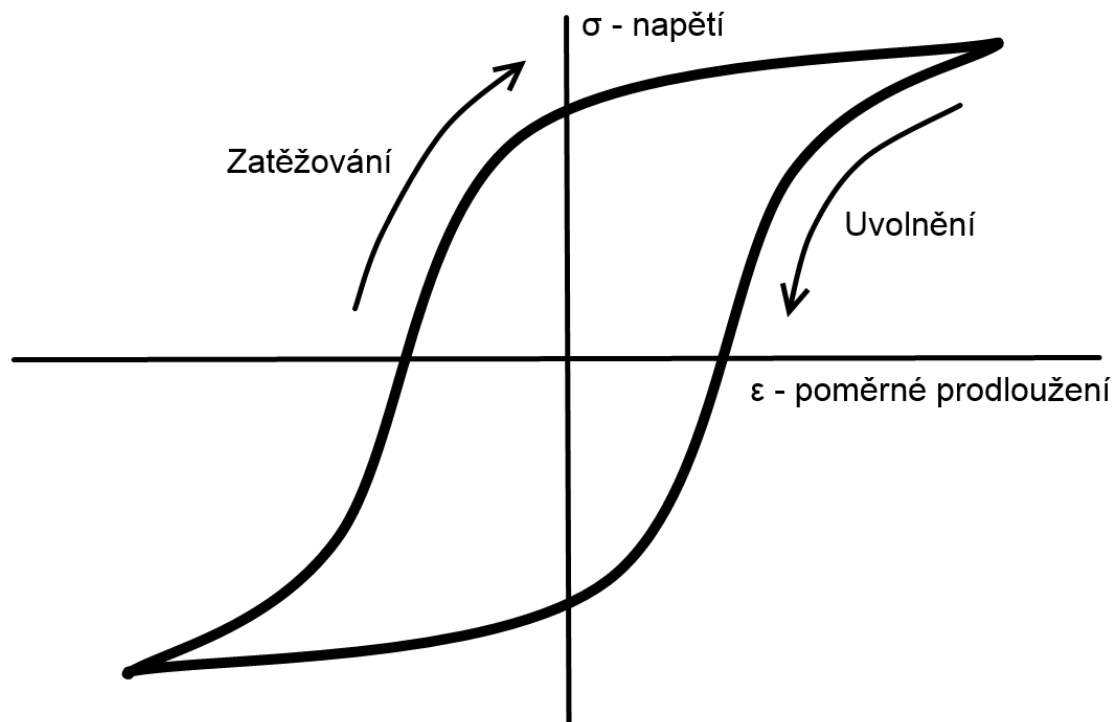
Obrázek 4.3: Časový diagram transakce dat z převodníku

4.2 Vyhodnocení měření v programu Matlab

K vyhodnocení naměřených výsledků byl naprogramován skript v programu Matlab načítající soubor s naměřenými daty a umožňující vykreslení grafu časového průběhu veličin. Zároveň volá další implementovaný skript provádějící analýzu dat metodou stékajícího deště popsanou v bodě (4.2.1).

4.2.1 Metoda stékajícího deště

Je jednou z hojně využívaných metod k predikci únavového poškození vlivem cyklického zatěžování. Tím je pro tyče náprav neustálé zrychlování, brzdění, nebo zatáčení. Vstupem k takovéto analýze zpravidla bývají naměřená data o namáhání, jakými je třeba záznam z tenzometrického měření. Tato metoda nedává přímo konkrétní výsledek, jak dlouho daná komponenta vydrží, nýbrž jde o jakýsi prvotní rozbor, takzvanou schematizaci, tedy detekci četnosti předem definovaných jevů v záznamu, jež se dále podle konkrétních požadavků aplikují. V tomto případě jsou to hysterezní smyčky závislosti napětí na poměrném prodloužení, jak je znázorněno na obrázku 4.4.



Obrázek 4.4: Průběh poměrného prodloužení tyče při střídavém zatěžování a uvolnění (hysterezní smyčka)

U nich se zkoumá nejen jejich četnost a amplituda, nýbrž informace o tom, při jaké zátěži proběhly. Je tedy rozdíl, zda je rameno cyklicky zatíženo v klidovém stavu, nebo například při jistém v ten moment předchozím zatížení. Nutně to tedy znamená, že v průběhu jedné hysterezní smyčky se může objevit další. Takovými smyčkám se říká půlcykly, které se metoda snaží spojovat do celých smyček - cyklů. Vzhledem k tomu, že dokáže identifikovat všechny cykly a půlcykly, je tato metoda zároveň v porovnání s ostatními metodami nejvíce přesná.

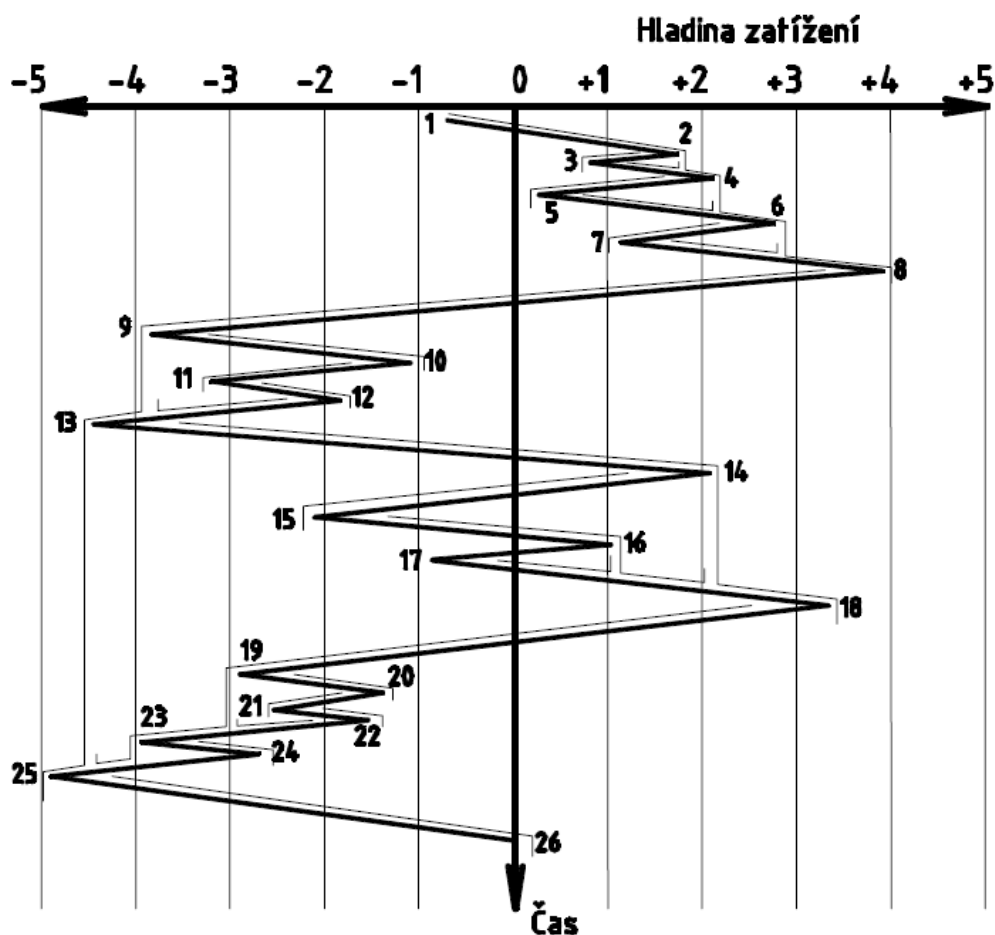
Princip vychází z představy stékání deště po nad sebou uspořádaných střechách jak může být vidět na náhodných datech obrázku 4.5 (pro vysvětlení principu metody je otočen o 90° vpravo, než je pro zobrazení zátěžného procesu obvyklé) [11].

Při analýze je nutno dodržet následující zásady [11]:

- a) proud stékajícího deště začíná na každém vrcholu (kladný i záporný lokální extrém);
- b) jestliže je tento vrchol napětovým minimem (např. bod 1), zastaví se proud vody na takovém vrcholu (zde např. bod 8), za kterým následuje vrchol s minimem, které má nižší hodnotu (zde např. bod 9), než výchozí minimum (bod 1). Tímto je

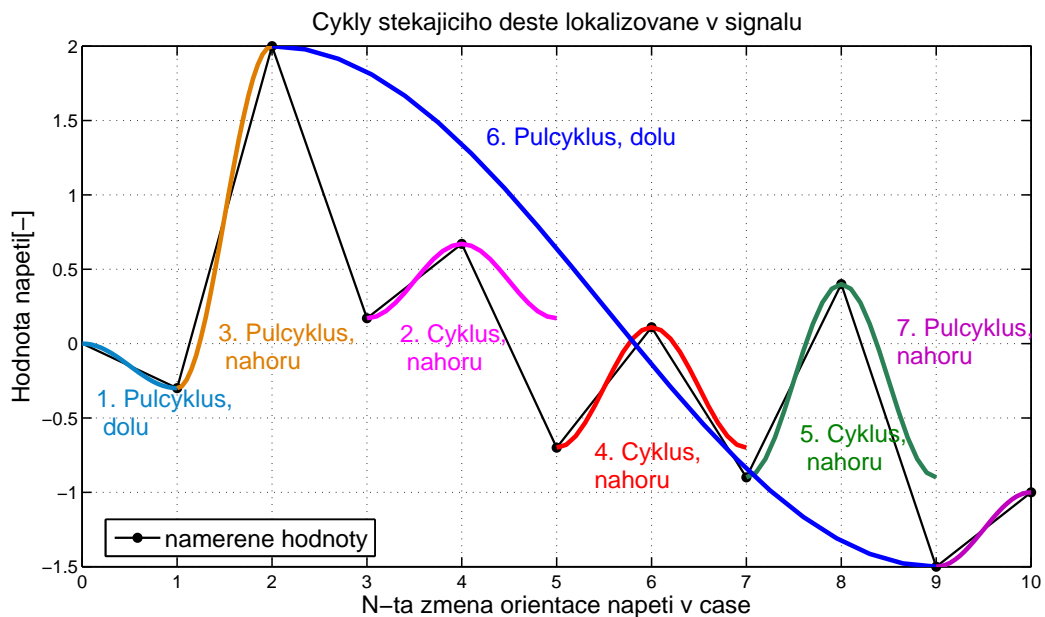
definována jedna amplituda půlcyklu (zde mezi body 1 a 8). Podobně je-li proud deště iniciován v maximu (např. v bodě 2), zastaví se, když dosáhne polohy (zde bod 3), za kterým následuje vrchol s vyšší hodnotou maxima (zde bod 4), než mělo maximum výchozí (takže se započte půlcyklus s amplitudou 2-3);

- c) proud deště se musí zastavit, jestliže se setká s proudem, který stéká z vyšší střechy (např. proud stékající z bodu 5 se zastaví, narazí-li na proud stékající z vrcholu 4 - v tom případě se započítává půlcyklus s amplitudou 5-4).

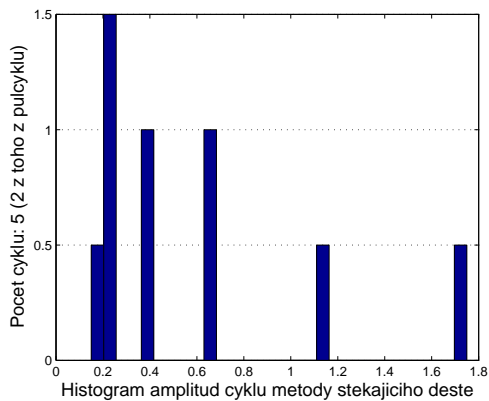


Obrázek 4.5: Znázornění principu metody stékajícího deště na náhodných datech[11]

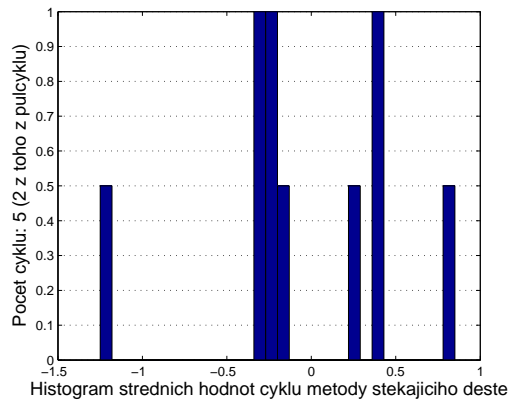
Implementace této metody do prostředí Matlab byla provedena skrze jeho volně přístupný balík metod nazvaný Rainflow Counting Algorithm (RCA) jehož autorem je Adam Niesłony[12]. Ukázka funkcionality na náhodných datech je na obrázcích (4.7), (4.8) a (4.9).



Obrázek 4.6: Názorná vizualizace principu počítání metody stekajícího deště balíkem RCA

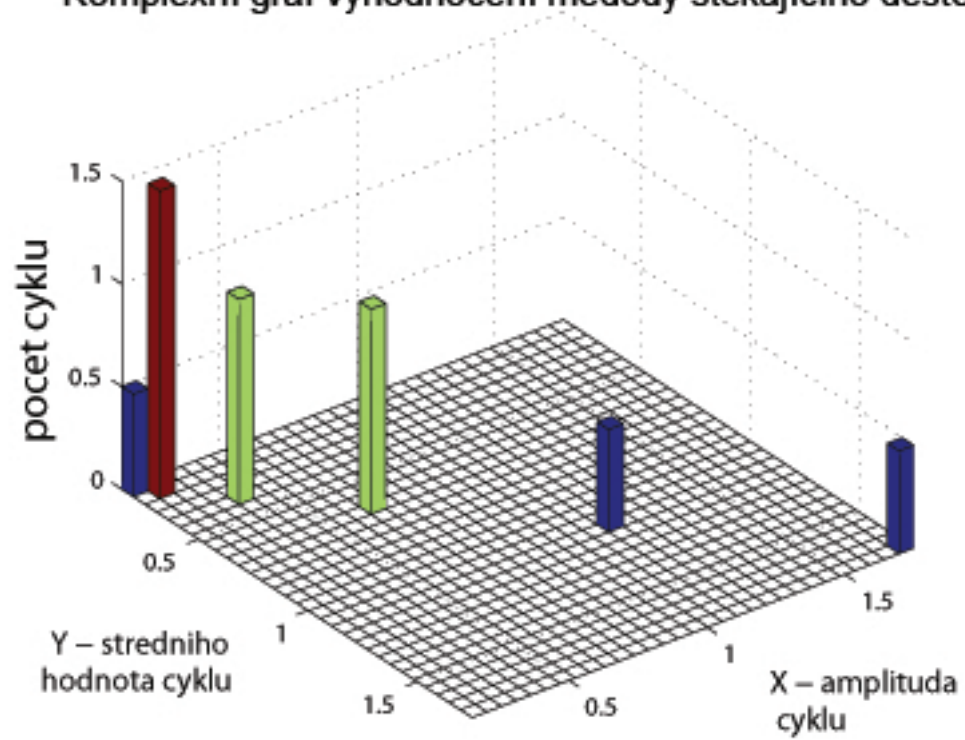


Obrázek 4.7: Ukázka výstupu balíku RCA na datech z obrázku 4.6



Obrázek 4.8: Ukázka výstupu balíku RCA na datech z obrázku 4.6

Komplexní graf vyhodnocení metody stékajícího deště



Obrázek 4.9: Ukázka komplexnějšího pohledu složením grafů 4.7 a 4.8

5 Kapitola 5

5 Experimentální část

5.1 Lepení tenzometrů

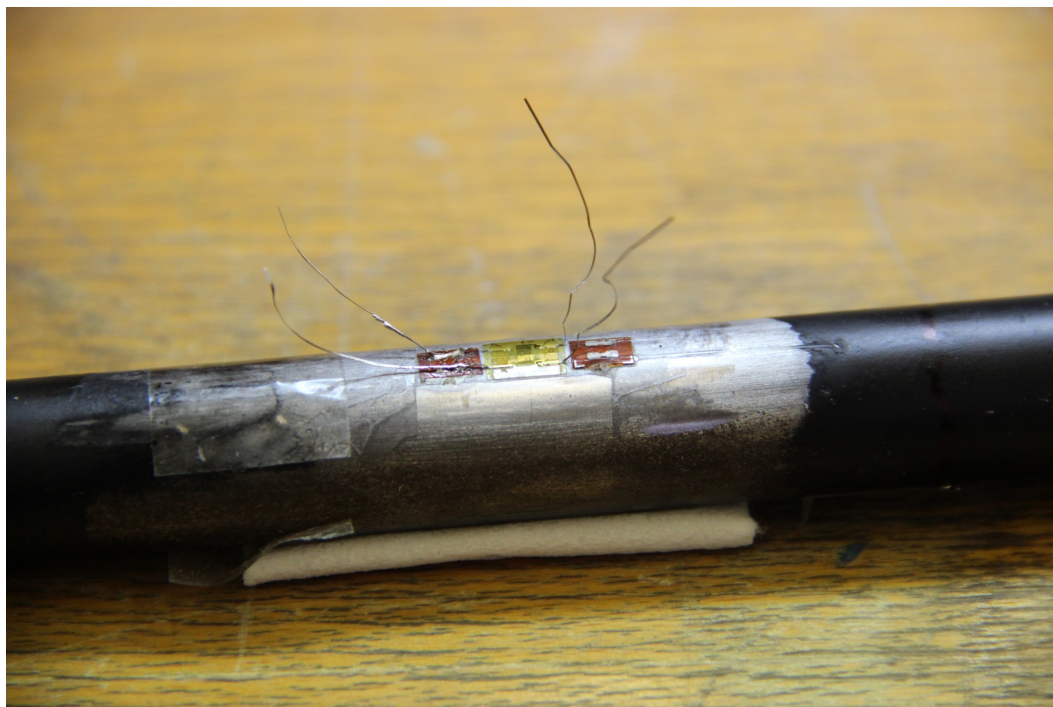
Přesnost aplikace tenzometrů na tyče náprav velkou měrou ovlivňuje přesnost měření. Už velmi malé směrové vychýlení od předpokládaného směru deformací vede k chybě měření. Tu lze po kalibraci popsané v bodě (5.2) do jisté míry kompenzovat.

Tenzometr je k podkladu přilepen speciálním druhem vteřinového lepidla, které zajišťuje velmi pevnou vazbu s nosným materiálem (deformace tenzometru musí být naprosto shodná s deformací nosného materiálu). Dalším nárokem na lepidlo je dosažení tzv. minimálního tečení tenzometru, což je jev, kdy tenzometr vlivem stálého zatížení ztrácí citlivost z důvodu slábnoucí fixace na podložku.

Lepení zahrnuje následující procedury:

1. Odstranění laku a rzi z nosného materiálu.
2. Vybroušení poruch povrchu materiálu jemným brusným papírem.
3. Dokonalé odmaštění přípravkem RMS.
4. Vyměření a označení přesné budoucí polohy tenzometru.
5. Zafixování rozložení tenzometru a pájecích kontaktů na lepicí pásku, pomocí níž je tenzometr nejdříve přechodně připevněn na vytyčené místo na povrchu tyče, posléze z části odlepen pro možnost aplikace lepidla.
6. Aplikace nutného vteřinového lepidla pod tenzometr.
7. Pevné stlačení tenzometru na lepené místo po několik minut.
8. Odstranění lepicí pásky, očištění okolí tenzometru od zbytků lepidla.

9. Připájení přívodních vodičů ke kontaktům tenzometru.



Obrázek 5.1: Fotografie zachycená v průběhu lepení tenzometru

5.2 Kalibrace tenzometrů

Jak bylo v části 5.1 zmíněno, přesnost tenzometrů se odvíjí zejména od jejich nalepení. To však není nikdy směrově optimální, proto je nutné tenzometry zkalibrovat. Dalším důvodem kalibrace je možná odchylka velikosti nominálního odporu tenzometrů.

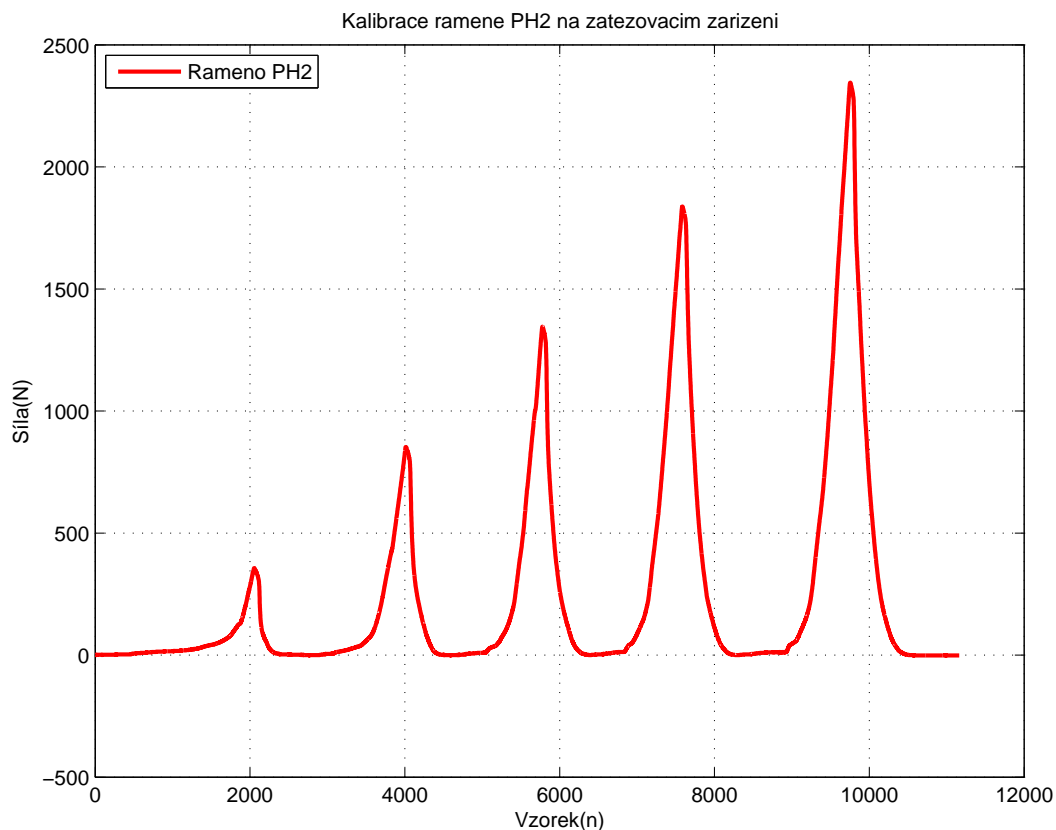
Kalibrace probíhá na zatěžovacích strojích (žargonem: trhačka), které daný předmět zatíží přesně změřenou silou. Porovnáním výstupních hodnot z tenzometrů a síly vynaložené na tyč zjistíme chybu měření, kterou lze posléze softwarově kompenzovat.

5.2.1 Kalibrace ramen

Kalibrace jednotlivých ramen má za cíl zjistit chybu měření tenzometry. Průběh kalibrace spočívá v umístění daného ramena do zatěžovacího zařízení, připojením signálního kabelu jdoucího od ramene do měřicí stanice (jako referenční stanice byla využita měřicí centrála Spider 8 společnosti HBM), jeho zatížením a porovnáváním naměřených dat s referenční hodnotou do zařízení integrovaného siloměru.

5 Experimentální část

Ramena byla kalibrována v několika cyklech vždy s zvětšující se intenzitou na ně vyvíjené síly až po požadovanou maximální hodnotu (2400N). Pro příklad je uveden záznam kalibrace ramene PH2 na obrázku (5.2).



Obrázek 5.2: Ukázka kalibračního záznamu ramene PH2 na zatěžovacím zařízení

Porovnáním naměřených pěti hodnot (vždy v maximu) s hodnotami z referenčního siloměru byla stanovena odchylka pro jednotlivá ramena. Naměřené odchylky a zesílení shrnuje tabulka (5.1).

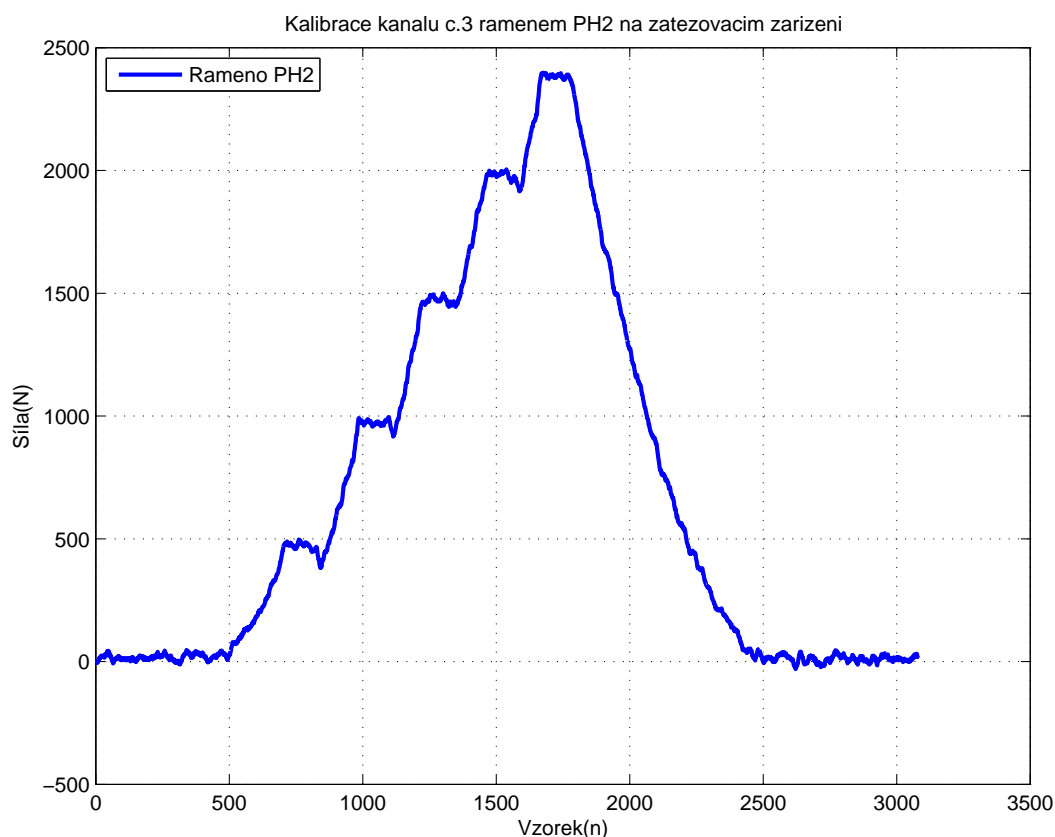
rameno	odchylka měření [%]
PH1	4,1
PH2	2,3
PD1	3,5
PD2	2,5

Tabulka 5.1: Výsledek kalibrace ramen

5.2.2 Kalibrace zhotoveného přípravku

Pro ověření funkcionality a správného nastavení byla provedena kalibrace navrženého přípravku. Kritickým bodem je nastavení zesílení, které je prováděno otočným potenciometrem připojeným k zesilovači nastavováním tabulkových hodnot uvedených v datovém listu zesilovače. Úskalí spočívá v nepřesném nastavení tohoto zesílení a kalibrace je tedy možností jisté korekce skrze referenční hodnotu potenciometru, z čehož vyplývá fakt, že zesilovač zesiluje signál jinak než je předpokládáno, což vede k chybě.

Tato kalibrace proběhla obdobně jako v bodě (5.1) rovněž pro všechny kanály (byla pouze změněna zatěžovací charakteristika na zatěžování bez odlehčení).



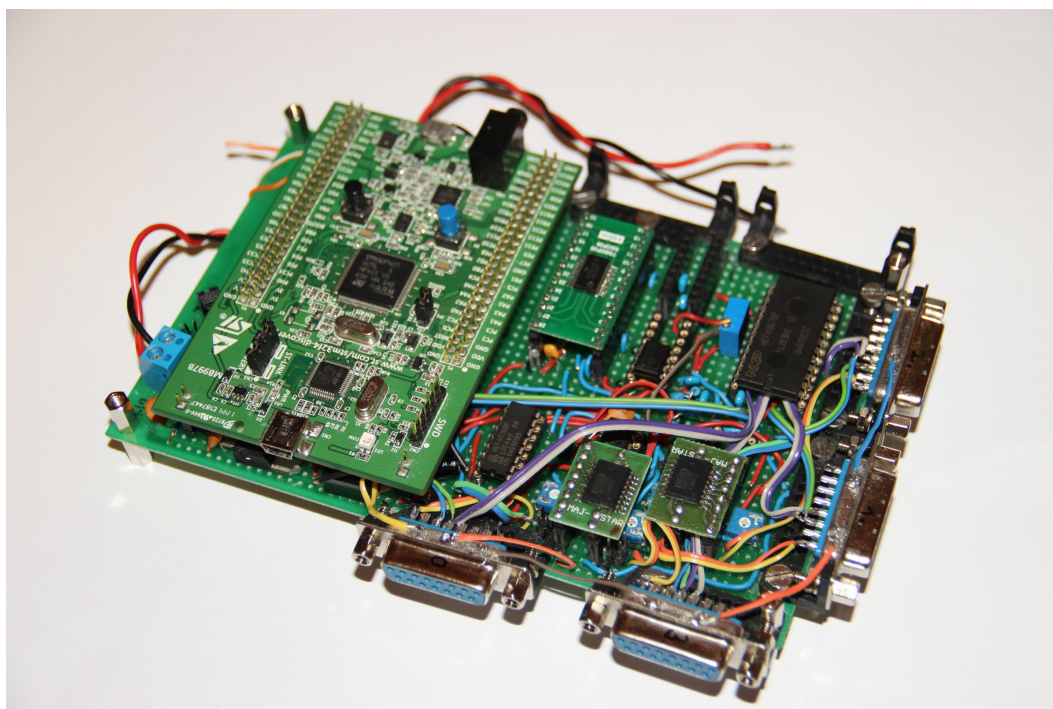
Obrázek 5.3: Ukázka kalibrace přípravku

5.3 Ověření funkčnosti navrženého zařízení na formuli

Přípravek sestavený dle schématu (3.2) byl realizován na univerzálním pájivém poli (viz obrázek (5.4), jež nevyžaduje výrobu konkrétní desky plošných spojů. Spoje jsou zde

5 Experimentální část

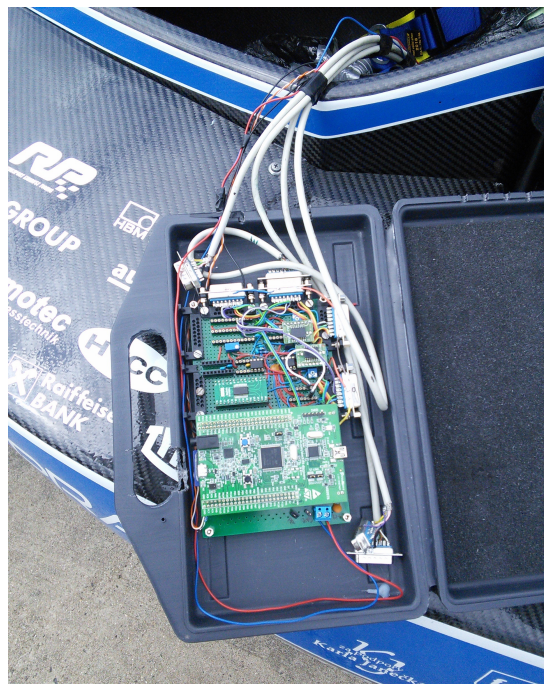
realizovány pomocí vodičů, které jsou taženy po povrchu desky mezi jednotlivými součástkami. Výhodou takového řešení je možnost okamžité realizace zapojení a snadná aplikace dílčích úprav návrhu. Nevýhodou je pak vyšší náchylnost k elektromagnetickému rušení a zejména větší velikost celého zařízení.



Obrázek 5.4: Hotový přípravek instalovatelný do formule (bez připojených tenzometrů)



Obrázek 5.5: Finální instalace - ramena s tenzometry levého předního kola

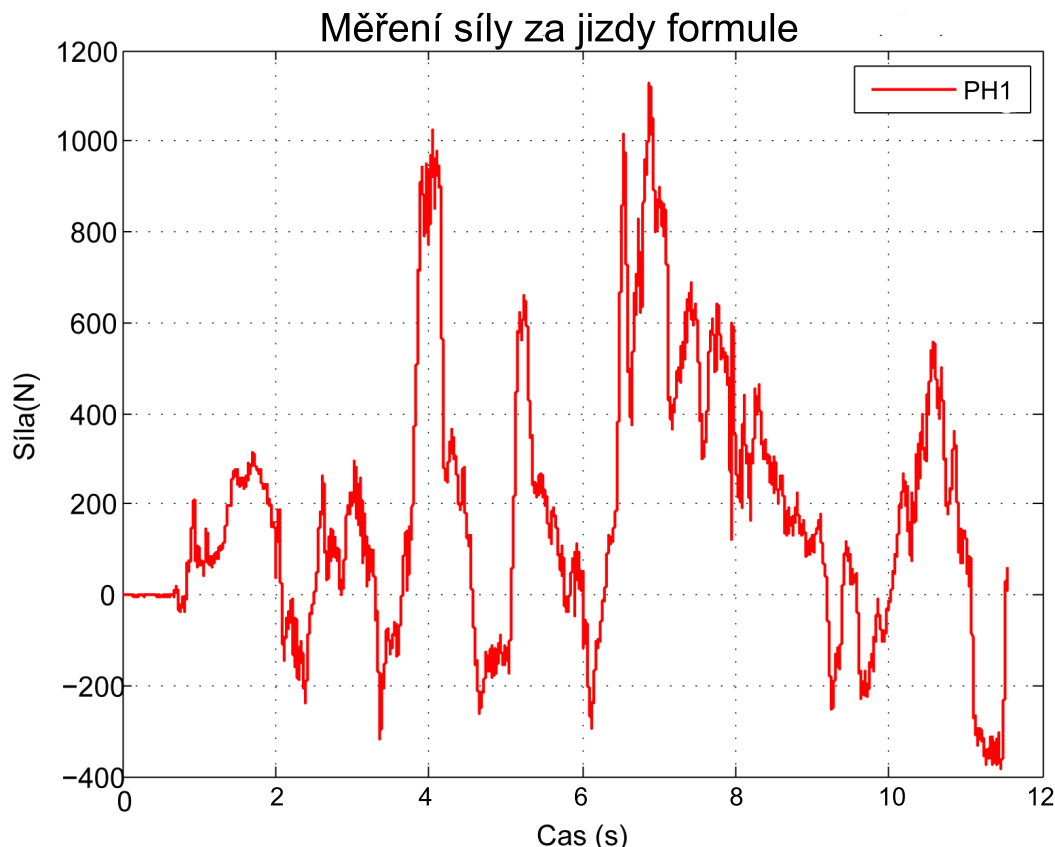


Obrázek 5.6: Přípravek při instalaci do kokpitu

Tento přípravek byl vsazen do ochranného boxu, který byl umístěn na dno kokpitu do vyhrazeného prostoru mezi hřebenem řízení a sedačkou pilota, tak aby pilot nebyl při jízdě nikterak omezován. Kabeláž jdoucí od měřené nápravy byla protažena montážním otvorem v monokoku formule až k umístění přípravku. Přípravek byl posléze připojen k dvanáctivoltové palubní síti.

5.3.1 Testování

Testování přípravku bylo umožněno během rutinního testování automobilu pro závody. Z velkého množství měření, která byla provedena, bylo zjištěno, že přípravek správně měří pouze jeden kanál, což nebylo ihned možno identifikovat vlivem nepřehledné situace na testovacím polygonu. Reprezentativní výsledek z tohoto měření je vyobrazen v grafu na obrázku 5.7



Obrázek 5.7: Fragment naměřených hodnot při testování přípravku na formuli

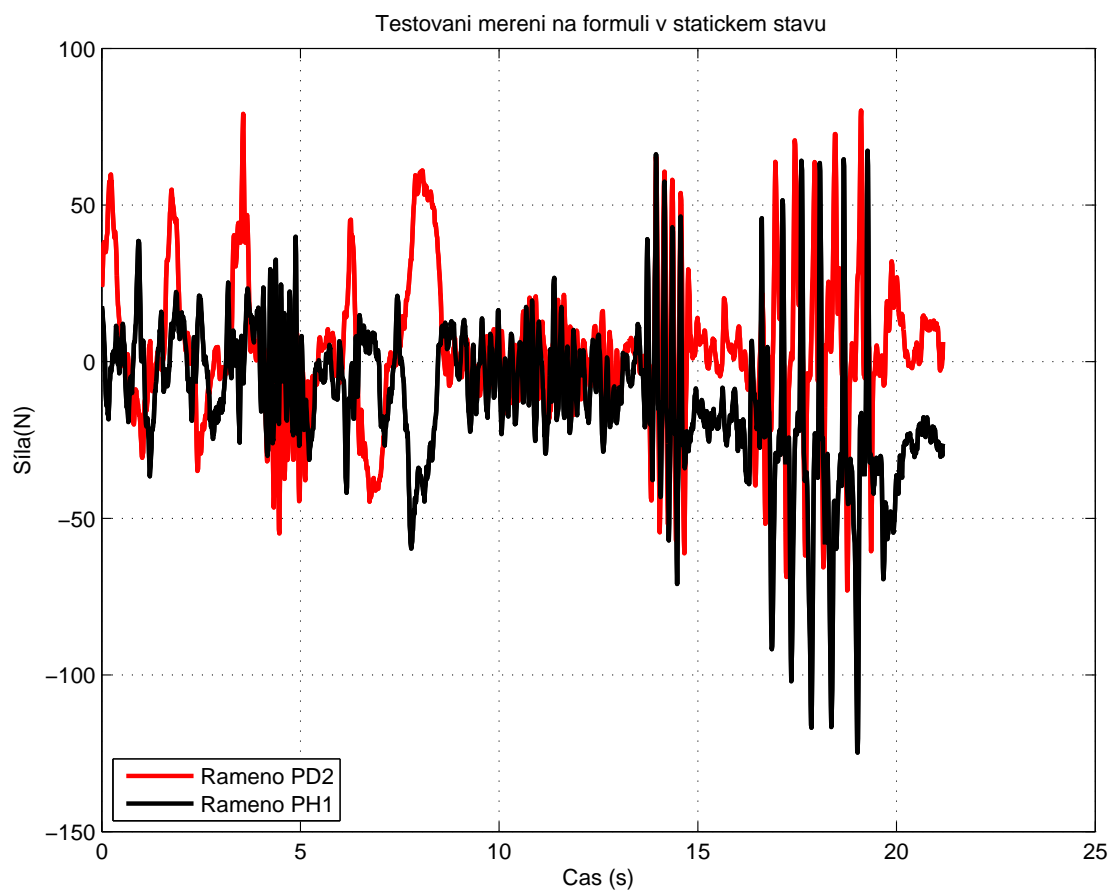
Pro ověření bylo rozhodnuto realizovat měření na statické formuli v jejím zázemí. Toto měření probíhalo při zabrzdění formule, jehož záznam je na obrázku 5.8. Z důvodu objevení neočekávané chyby na tenzometrickém můstku se nepodařilo změřit dvě z tyčí. Tato chyba je způsobená velkým rozdílem napětí mezi rameny měřeného Wheatstonova můstku, jež se pohybuje v řádu milivoltů, což je nad očekávaný rozsah měření. Důsledkem je fakt, že přípravek hlásí, že je daná tyč zcela zatížena. Rozsah tohoto jevu se nepodařilo vykompenzovat posunutím reference zesilovače. Další možnost - snížení zesílení, chybu vyřešila. Následně se nepodařilo formuli dostatečně zatížit, aby tato činnost byla patrna v naměřených datech.

Důvodem neobjevení této chyby při kalibraci je robustností měřicí centrály, která kalibraci vyhodnocovala a je podstatně naddimenzována, aby chyby tohoto typu automaticky kompenzovala. Řešení tohoto problému je rozebráno v závěrečné kapitole.

Na detailu měření zbylých dvou tyčí (obrázek 5.9 - přední tyč horního ramene, zadní tyč dolního ramene) je patrné, že formule byla nejdříve zatěžována jejím rozhoupáním

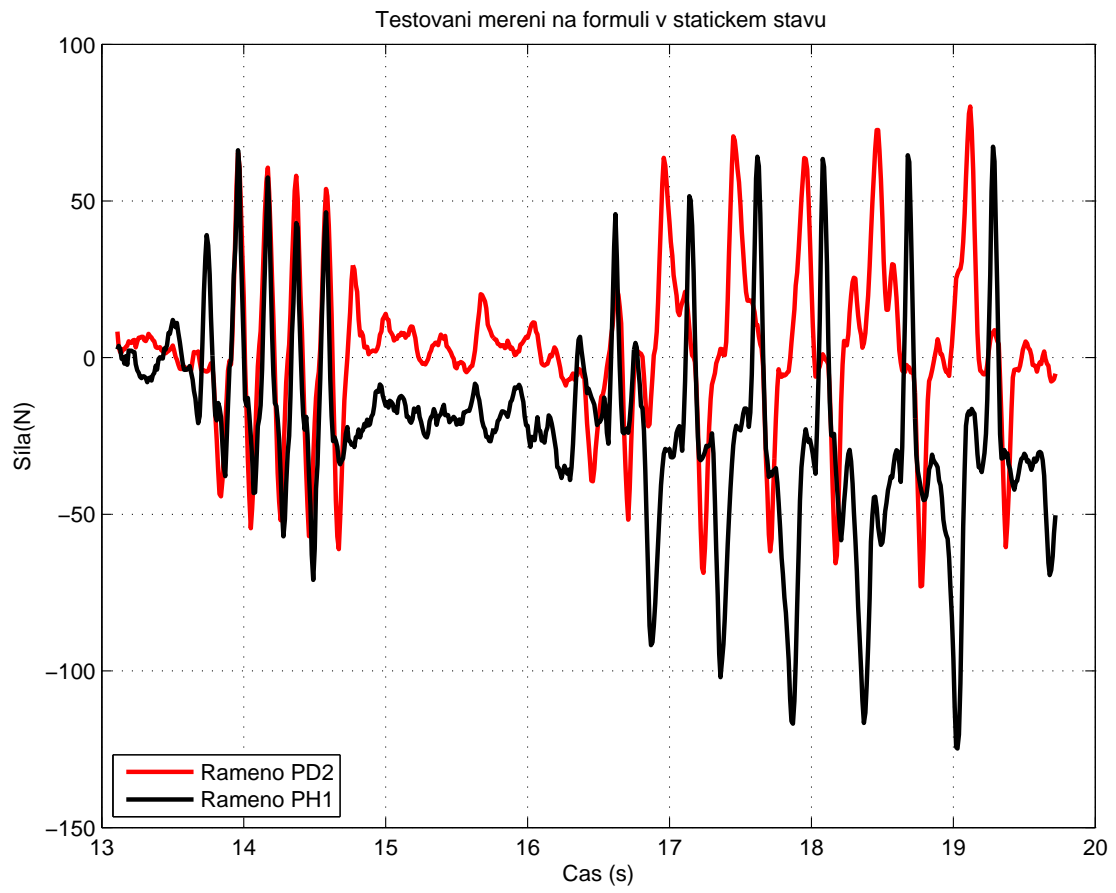
5 Experimentální část

(14. sekunda). Důsledkem je, že se záznam sil z dolní tyče a horní tyče shodují, což je způsobeno změnou síly, kterou formule působí tímto kolem na podklad a která se rozkládá mezi všechny tyče. Během 16. až 19. sekundy graf znázorňuje simulaci brzdění a akcelerace, protože mají síly opačné znaménko, což je jev vysvětlený na obrázku 1.4.



Obrázek 5.8: Měření na statické formuli

5 Experimentální část



Obrázek 5.9: Měření na statické formuli - detail

6 Kapitola 6

Závěr

Experimentální ověření návrhu konstrukce jejím měřením při provozu je důležitým nástrojem pro její zlepšení. Pro týmu CTU Cartech je to jedna z dalších možností, jak takto svůj koncept formule zdokonalit a být tak o krok napřed před konkurencí.

Na počátku byla provedena analýza kinematiky náprav nutná k rozhodnutím o poloze a počtu snímačů nutných k změření zadavatelem určených veličin, tedy osově síly působící na jednotlivé tyče náprav. Bylo shledáno, že nejvhodnější řešení bylo užití čtyř tenzometrů instalovaných na každou z tyčí měřené nápravy, které pak bylo nutné zapojit do Wheatstonova můstku. Ten při dobře zvolené kombinaci zapojení a směrové konfiguraci tenzometrů dokáže zvýšit citlivost měření, kompenzovat parazitní napětí, které je v tomto případě způsobeno ohyby tyčí, a kompenzovat teplotní vlivy okolí, které by jinak vnášely do měření chybu.

Po uvedení do problematiky bylo provedeno nalepení tenzometrů na ramena jednoho z kol, po němž byla provedena kalibrace na zkušebním deformačním zařízení k zjištění chyb vzniklých nedokonalým nalepením tenzometrů a chyb vlivem dílčích nedokonalostí samotných tenzometrů.

K samotnému měření byla zkonstruována čtyřkanálový měřící přípravek, jehož cílem bylo zesílit signál jdoucí z tenzometrických můstků, digitalizovat ho a uložit. Jádrem přístroje je mikropočítač STM32F401VC používající architekturu ARM. Ten řídil celé měření a ukládal výsledky na paměťovou kartu SD. Aby bylo možno snadno manipulovat s naměřenými daty, byl do programu mikropočítače implementován modul pro souborový systém FAT. Díky němu bylo možné ukládat jednotlivé měření jako textové soubory s posloupnostmi naměřených hodnot.

K analýze naměřených dat byl využit program Matlab, v němž byl napsán skript, který data extrahuje ze souboru, aby z nich mohl vygenerovat graf závislosti sil na jednotlivá ramena v čase. Dále skript využívá předprogramovanou knihovnu, která z naměřených

dat provede únavovou analýzu pomocí metody stékaajícího deště. Ta dává konstruktérům informaci, jak moc bylo dané rameno během jízdy poškozeno vlivem cyklických zátěží, kterými jsou například často opakující se zrychlování a zpomalování formule.

K ověření funkčnosti navrženého měřicího řetězce bylo provedeno testování, které odhalilo několik dílčích nedostatků v návrhu. Zásadním je fakt, že zkonstruovaný přístroj není dostatečně robustní k měření ramen, která vykazují vysoký offset. Toto by mohlo být vyřešeno užitím dalšího operačního zesilovače, který by byl umístěn za stávajícím přístrojovým zesilovačem, který by nemusel mnohonásobně zesilovat rozdílové napětí můstku, které je v dané situaci řádově větší než rozdílové napětí vyvolané měřenou deformací. Přídavný zesilovač by pak svým zesílením vrátil zpět původní měřicí rozsah. Nedostatkem byl shledán také přílišný šum napájecího napětí, které poskytuje 1W spínaný zdroj.

Dalšími možnostmi vývoje tohoto přístroje je zvýšení počtu kanálů na 12, aby bylo možné změřit veškeré prvky podvozku alespoň na jedné straně formule. Zároveň s tím bude muset být zefektivněn zápis na kartu SD, který momentálně nevyužívá maximální možnou rychlost a další možnosti této periferie. Pro zvýšení výpovědní hodnoty měření by bylo vhodné synchronizovat přípravek s datovou sběrnici CAN formule, ze které je možné vyčíst pro měření velmi zajímavé referenční hodnoty její rychlosti a míry sešlápnutí plynového pedálu a tím spojené akcelerace. Dále je na formuli měřeno otočení volantů, míry stlačení tlumičů. Tyto informace by dávaly spolu s daty z tenzometrického měření velmi komplexní obrázek o chování podvozku. Celý zdokonalený návrh by měl být dále realizován na plošném spoji. Díky tomu by bylo možné dostatečně oddělit nulovou referenci pro logické prvky zapojení, kterým je například multiplexor, a referenci pro analogové prvky, kterými jsou zesilovače. S tímto návrhem počítá analogově digitální převodník, který díky tomu dokázal pracovat přesněji.

Literatura

- [1] CTU CarTech. [online]. [cit. 2014-05-04]. Dostupné z: <http://www.carttech.cvut.cz/>
- [2] ŠAMAJ, Vojtěch. Návrh zavěšení náprav experimentálního vozidla skupiny B. Brno, 2008. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [3] VALENTA, František. Pružnost a pevnost III. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002, 293 s. ISBN 80-010-2480-6.
- [4] Check line [online]. [cit. 2014-05-15]. Dostupné z: www.checkline.com
- [5] HOFFMANN, Karl. Applying the Wheatstone Bridge Circuit. Experimental Stress Analysis [online]. 2013 [cit. 2014-04-27]. Dostupné z: www.hbm.com.pl/pdf/w1569.pdf
- [6] SOLTEC. How to form Strain-gage Bridges. [online]. 2009 [cit. 2014-05-2]. Dostupné z: <http://solteccorp.com/Images/PDF/kyowa/SOLTEC-Kyowa%20How%20to%20Form%20Strain-Gage%20Bridges.pdf>
- [7] HANN, Gina. Selecting the right op amp: Three of the most common design considerations prevent op-amp afterthought. [online]. 2008 [cit. 2014-04-15]. Dostupné z: http://www.electronicproducts.com/Analog_Mixed_Signal_ICs/Standard_Linear/Selecting_the_right_op_amp.aspx
- [8] VEDRAL, Josef. Elektronické obvody pro měřicí techniku. 1. vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1999, 340 s. ISBN80-010-1950-0.
- [9] DigiKey Electronics - Electronic Components Distributor [online]. 2014 [cit. 2014-04-10]. Dostupné z: <http://www.digikey.com/>
- [10] CHAN. FatFs - Generic FAT File System Module. ELM Chan [online]. 2014 [cit. 2014-05-2]. Dostupné z: http://elm-chan.org/fsw/ff/00index_e.html
- [11] FOLTA, Zdeněk. Příspěvek k navrhování strojních součástí na základě vyhodnocení provozního zatížení. Ostrava, 2004. Dostupné z:

Literatura

http://www.347.vsb.cz/staff/folta/Veda_a_vyzkum/Habilitacni_prace.htm.
Habilitationální práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.

- [12] Rainflow Counting Algorithm. [Http://www.mathworks.com/](http://www.mathworks.com/)
[online]. 2003, 2010 [cit. 2014-05-16]. Dostupné z:
<http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/3026-rainflow-counting-algorithm>

Seznam obrázků

1.1	Formule FS.05 týmu CTU CarTech pro sezónu 2013[1]	1
1.2	Model závěsu pravého zadního kola formule FS.05 v programu CATIA	3
1.3	Počítačový model závěsu levého předního kola formule FS.05 v programu CATIA	3
1.4	Schéma působení horizontálních sil na přední nápravu (pohled na kolo shora)	4
1.5	Schéma působení horizontálních sil na zadní nápravu (pohled na kolo shora)	4
1.6	Schéma působení vertikálních sil na nápravu	5
1.7	Tenzometr měřící napětí lanka	6
1.8	Schéma mechanického tenzometru měřícího poměrné prodloužení tyče	6
2.1	Znázornění sil působících na tyč závěsu	8
2.2	Foliový tenzometr při přípravě na nalepení	9
2.3	Schéma popisující směry podélných prodloužení [3]	12
2.4	Tenzometr zapojený do napěťového děliče	13
2.5	Wheatstonův můstek	15
2.6	Schematické umístění jediného tenzometru na měřený objekt [6]	16
2.7	Obvodové schéma čtvrtěčního Wheatstonova můstku [6]	16
2.8	Schematické umístění dvou tenzometru na měřený objekt [6]	17
2.9	Obvodové schéma polovičního Wheatstonova můstku [6]	17
2.10	Schematické plného tenzometrického můstku na měřený objekt [6]	18
2.11	Obvodové schéma plného Wheatstonova můstku [6]	18
3.1	Schéma navrženého měřícího řetězce	20
3.2	Schéma obvodu měřícího přípravku	22
3.3	Rameno formule s instalovanými tenzometry	23
3.4	Blokové schéma vnitřního uspořádání vybraného zesilovač INA2128	24
3.5	Vývojový kit STM32F401VC-Discovery [9]	28

Seznam obrázků

4.1	Připojení karty SD k mikropočítači	30
4.2	Schéma implementace modulu FAT	30
4.3	Časový diagram transakce dat z převodníku	31
4.4	Průběh poměrného prodloužení tyče při střídavém zatěžování a uvolnění (hysterezní smyčka)	32
4.5	Znázornění principu metody stékajícího deště na náhodných datech[11] . .	33
4.6	Názorná vizualizace principu počítání metody stékajícího deště balíkem RCA	34
4.7	Ukázka výstupu balíku RCA na datech z obrázku 4.6	34
4.8	Ukázka výstupu balíku RCA na datech z obrázku 4.6	34
4.9	Ukázka komplexnějšího pohledu složením grafů 4.7 a 4.8	35
5.1	Fotografie zachycená v průběhu lepení tenzometru	37
5.2	Ukázka kalibračního záznamu ramene PH2 na zatěžovacím zařízení	38
5.3	Ukázka kalibrace přípravku	39
5.4	Hotový přípravek instalovatelný do formule (bez připojených tenzometrů)	40
5.5	Finální instalace - ramena s tenzometry levého předního kola	41
5.6	Přípravek při instalaci do kokpitu	41
5.7	Fragment naměřených hodnot při testování přípravku na formuli	42
5.8	Měření na statické formuli	43
5.9	Měření na statické formuli - detail	44

Seznam tabulek

1.1	Údaje o tyčích ramen náprav formule FS.05 podle dle označení tyčí na obrázcích 1.2 a 1.3	5
1.2	Tabulka požadavků konstruktérů týmu CTU CarTech na měření deformace ramen závěsu formule	7
2.1	Shrnutí vlastností můstkových zapojení	18
3.1	Parametry a vlastnosti vybraného tenzometru	23
3.2	Parametry symetrického operačního zesilovače INA2128	25
3.3	Porovnání převodníku SAR a Sigma-Delta [8]	27
3.4	Významné hodnoty vybraného číslicově analogového převodníku typu SAR ADS8519 firmy Texas Instruments	27
4.1	Význam datových vodičů karty SD	30
5.1	Výsledek kalibrace ramen	38

Seznam zkratek

ARM	Advanced RISC Machine
CMRR	Common-mode rejection ratio
CTU	Czech Technical
D/A	Digitálně analogový převodník
DIN	Deutsche Industrie-Norm
HBM	Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH
SAE	the Society of Automotive Engineers
SAR	Successive approximation register
SD	Secure Card
SNR	Signal to Noise Ratio
SPI	Serial Peripheral Interface

Příloha A

Obsah přiloženého CD

- Bakalářská práce ve formátu PDF
- Datové listy
- Zdrojové kódy
 - Vývojové prostředí Atollic (přípravek)
 - Matlab (vyhodnocení)