



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

MĚŘENÍ TEPLOTY BRZDOVÉHO KOTOUČE ZA JÍZDY VOZIDLA

BRAKE DISC TEMPERATURE MEASUREMENT ON MOVING VEHICLE

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. JAROSLAV MUŽÁK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. ONDŘEJ BLAŽÁK

BRNO 2008

Abstrakt :

Jaroslav Mužák

Měření teploty brzdového kotouče za jízdy vozidla

DP, ÚADI, 2008, str. 67, obr. 61

Zpracováváme úvodní studii problematiky snímání teploty brzdového kotouče jedoucího vozidla. Je nutné vybrat nejvhodnější snímač teploty, sestavit celý měřicí řetězec, vyřešit uchycení snímače na vozidle. Po provedení jízdních manévřů, kdy budeme sledovat teplotu je třeba vyhodnotit naměřená data a zhodnotit, zda je použitý snímač k takovému druhu měření vhodný.

Klíčová slova: snímač teploty, kalibrace, termometrie, termočlánek, brzdový manévr

Abstract :

Jaroslav Muzak

Brake Disc Temperature Measurement on Moving Vehicle

DP, UADI, 2008, 67 pp., 61 fig.

Subject of this diploma work is to complete preliminary report of possibilities and problems with brake disks monitoring on moving vehicle. A vital condition is to choose appropriate temperature sensor as well as assembling complete measuring set and it's fastening to the vehicle. Temperature readings from driving tests, after specific brake maneuvers, will be evaluate and according to them a sensor will be determined as appropriate or inappropriate for this kind of tests.

Key words : temperature sensor, calibration, thermometry, thermocouple, braking manoeuvre

Bibliografická citace :

MUŽÁK, J. *Měření teploty brzdového kotouče za jízdy vozidla*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 67 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Ondřej Blatňák.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, pod vedením vedoucího diplomové práce pana Ing. Ondřeje Blatáka a s použitím uvedené literatury.

V Brně dne 20. května 2008

Jaroslav Mužák

Poděkování

Za účinnou podporu a obětavou pomoc, cenné připomínky a rady při zpracování diplomové práce tímto děkuji vedoucímu diplomové práce panu Ing. Ondřeji Blatňákově.

Ústavu konstruování za zapůjčení měřících zařízení a za pomoc při vlastní realizaci měření.

Panu Ing. Petru Novákovi za podporu a cenné připomínky v oblasti měření teploty.

V neposlední řadě bych chtěl poděkovat své rodině za trpělivost a podporu během studia na vysoké škole.

1. Úvod	10
2. Teoretická východiska pro snímání teploty brzdového kotouče	11
2.1. Teorie měření teploty	11
2.1.1 Teplota	11
2.1.2. Teploměr	11
2.1.2.1 Podle principu fungování se v současnosti setkáváme s těmito druhy teploměrů:	12
2.1.2.2 Speciální teploměry :	12
2.2. Metody měření teploty	13
2.2.1. Kontaktní metody měření teploty	13
2.2.1.1. Snímače teploty se změnou odporu	13
2.2.1.2. Termoelektrické snímače teploty	15
2.2.1.3. Teploměry se změnou stavu	16
2.2.1.4. Teploměry s roztažitelnými kapalinami	16
2.2.2. Bezkontaktní metody měření teploty	17
2.2.2.1. Pyrometry celkového záření	17
2.2.2.2. Pásmové pyrometry	18
2.2.2.3. Optický pyrometr	18
2.2.2.4. Termovizní měření	19
2.2.2.4.1. Snímání v daleké IR oblasti :	19
2.2.2.4.2. Fotografování v blízké IR oblasti :	20
2.3 Závěrečné shrnutí problematiky měření teploty	21
2.4 Kotoučová brzda	22
2.4.1. Kotouč	22
2.4.2 Brzdové obložení	24
2.5. Problematika měření teploty kotoučové brzdy	25
2.5.1 Měření pomocí pyrometru	26
2.5.2 Teploměr se změnou stavu	27
2.5.3 Termočlánek	28
3. Použitý snímač	29
3.1 Problematika termočlánekové termometrie	30
3.1.1 Měření pomocí termočláneků	31
3.1.2 Materiály termoelektrických snímačů	33
4. Měřicí řetězec	34
4.1 Snímač teploty	35
4.2 Digitální palubní deska Falcon	36
4.3 M-Box	37
4.4 Correvit S-400	39
4.5 Zapisovač dat Cobra	43
5. Konstrukční návrh držáků snímačů teploty	45
6. Měření	48
6.1 Kalibrace snímačů teploty	48
6.1.1 Vliv vlastního tření snímače	48

6.3 Jízdní zkoušky	50
6.3.1 Brzdňý manévř (decelerace)	52
6.3.2 Výběř zkušební dráhy	52
6.3.2 Popis vlastního měření	53
6.4 Vyhodnocení jízdní zkoušky	53
6.4.1 Program pro zpracování dat	53
6.4.2 Vyhodnocení brzdňého manévř	54
6.4.3 Porovnání M-Box/Correvit	59
6.4.4 Průběh chladnutí brzd	62
7. Závěr	64
Seznam použitých zdrojů	65
Seznam použitých zkratek a symbolů	66
Seznam příloh	67

1. Úvod

Jedním z nejdůležitějších prvků ovlivňující bezpečnost provozu motorových vozidel je jejich brzdový systém. Plní funkci snížení rychlosti vozidla, jeho úplné zastavení a nebo zajištění stojícího vozidla. Brždění vozidla se dosahuje záměrně vyvolaným třením mezi rotujícími a pevnými částmi motorového vozidla, např. mezi brzdovým kotoučem a brzdovým obložením. Tím se pohybová energie mění ve třecích částech v energii tepelnou, kterou je nutno odvádět do odvodu, aby nedošlo k poškození brzd. Brzdy jsou nejvýkonnějším zařízením na vozidle. Uvádí se, že u nákladních automobilů jejich výkon dosahuje až 300 kW a brzdy se zahřejí až na teplotu 500 °C. U kotoučových brzd na osobních vozidlech není např. při sjezdu dlouhého klesání žádnou výjimkou svítící-rozžhavený kotouč, čili teplota vysoko přes 600 °C.

U brzd se zkouší hlavně intenzita brzdění a stálost působení brzdícího efektu. V tomto směru jsou využívány tzv. „Alpské testy“, tj. testování vozidla a brzd na prudkých svazích, či speciální testy na brzdových stolicích, simulujících extrémní provozní podmínky. Jsou porovnávány výsledky měření na začátku a na konci zkoušky. Jedním z hlavních faktorů ovlivňujících účinnost brzdové soustavy je teplota. S nárůstem teploty se mění vlastnosti materiálu jako je například koeficient tření, který je z hlediska účinnosti brzd nejdůležitějším fyzikálním hlediskem. Právě tento fakt nás přivedl na myšlenku, zmapovat a zvládnout problematiku měření teploty brzd za jízdy. Jeho zvládnutí nám otevírá zajímavé možnosti pro další praktické využití při navrhování nových materiálů brzdových elementů, zvláště pro sportovní či závodní vozidla, kde je vhodné kvůli přenosu velkých sil a momentů využívat brzdy při teplotách, kdy je využito největšího koeficientu tření. Další uplatnění bude mít naše práce také při navrhování běžných brzdových systémů, kde je jedno z nejdůležitějších hledisek životnost a spolehlivost brzdové soustavy.

Jak je z předchozího náhledu patrné, problematika měření teploty brzd jedoucího vozidla bude mít v dnešní době určitě široké uplatnění a jistě má smysl se tímto problémem hlouběji zabývat.

2. Teoretická východiska pro snímání teploty brzdového kotouče

2.1. Teorie měření teploty

2.1.1 Teplota

Teplota je základní fyzikální veličinou dále také mírou kinetické energie pohybujících se částic. Například v plynu je teplota úměrná střední kinetické energii molekul a frekvenci jejich srážek. Stupeň Celsia (značený $^{\circ}\text{C}$) je jednotka teploty, kterou v roce 1742 vytvořil švédský astronom Anders Celsius. Celsius stanovil dva pevné body : 0°C pro teplotu tání vody a 100°C pro teplotu varu vody (obojí při tlaku vzduchu 1013,25 hPa). Carl Linné stupnici později otočil a proto je dnes bod tání 0°C a bod varu 100°C . Dnes je Celsiova stupnice (jako vedlejší jednotka soustavy SI) definována pomocí trojného bodu vody, kterému je přiřazena teplota $0,01^{\circ}\text{C}$ a tím, že absolutní velikost jednoho dílku teplotní stupnice (1°C) je rovna 1 K. Za 0K (kelvinů) se považuje absolutní nula, což je teplota, při které ustává veškerý pohyb všech částic (atomů) v látkách. K této teplotě se lze libovolně přiblížit, avšak nelze ji dosáhnout. V současné době nejsou známy žádné fyzikální zákony, které by omezovaly horní hranici teploty. Pro měření teploty se užívalo v minulosti několika stupnic, založených na vlastnostech základní teploměrné látky. Protože je však potřebné, aby teplotní stupnice byla nezávislá na teploměrné látce, vycházíme obvykle z termodynamické stupnice založené na účinnosti ideálního Carnotova cyklu. Jsou-li dva systémy v termodynamické rovnováze (tj. ve stavu, kdy se nemění) do doby, pokud se nemění vnější podmínky, nedochází mezi nimi k výměně tepla. Pak říkáme, že oba systémy mají stejnou teplotu. Pokud máme několik systémů v termodynamické rovnováze, pak kterýkoli můžeme označit jako standard pro měření teploty.

2.1.2. Teploměr

Teploměr (správněji asi teploto-měr) je zařízení sloužící k měření teploty a s jeho pomocí sestavit stupnici stavů. Většinou je princip teploměru založen na tepelné roztažnosti jednotlivých látek, kdy je objem měrné látky závislý na její teplotě. Tyto teploměry se pak nazývají dilatační. V současnosti však existují i další metody zjišťování teploty. Obor zabývající se měřením teploty se nazývá termometrie. Teploměry rozdělujeme na skleněné (zdravotní teploměr), odporové (Pt 100), termoelektrické (Fe - Cu) a pyrometry (bezdotykové měření teploty). Pro Měření a regulaci jsou zajímavé pouze odporové, termoelektrické teploměry a pyrometry. Skleněné nemají pro regulaci žádný význam. Teplotním intervalem pak nazýváme dělení mezi dvěma rozdílnými stavy. Základem každé teplotní stupnice jsou její základní body dané určitými teplotními stavy.

Nejznámějšími jsou např.:

- Rovnovážný stav mezi ledem a vodou při normálním tlaku, tzv. trojný bod vody, označovaný jako bod mrazu,
- Rovnovážný stav mezi vodou nasycenou vodní parou za normálního tlaku, označovaný jako bod varu.

Těmto stavům jsou pak přiřazeny určité číselné hodnoty podle různých autorů. Známá celsiova stupnice těmto bodům přiřazuje 0° a 100° . Farenheitova stupnice pak $+32^{\circ}$ a 212° . Gay-Lusacův zákon stanoví, že všechny plyny při stejném zahřátí, za stálého tlaku zvětšují

svůj objem ve stejném poměru – tj. stejně se roztahují. Teplotu pak můžeme definovat podle roztažnosti libovolného plynu, kdy platí

$$V_t = V_0(1 + \alpha \cdot \Delta t) \quad (2.1),$$

Kde: V_t ... objem tělesa po zahřátí

V_0 ... objem tělesa před zahřátím

α ... součinitel tepelné roztažnosti

Δt ... rozdíl teplot před a po zahřátí

Zavedeme-li absolutní teplotu T jako:

$$T = t_t + (1/\alpha) \quad (2.2)$$

Kde: T ... absolutní teplota

t_t ... teplota tělesa

Pak dostane Gay – Lussacův zákon zvláště jednoduchý tvar:

$$V = V_0 \cdot (T / T_0) \quad (2.3)$$

Kde: T_0 ... počáteční teplota

Součinitel tepelné roztažnosti pro ideální plyny se dá stanovit jako $\alpha = 3,66 \cdot 10^{-3}$, ($^{\circ}\text{C}^{-1}$), pak platí:

$$T = t_t + 273,16 \quad (2.4)$$

což označíme jako absolutní teplotu Kelvinovu. Základní jednotkou termodynamické teploty je 1K – Kelvin, definovaný jako 273,16 díl teploty trojného bodu vody. Zavedením absolutní teplotní stupnice odpadá označování záporných hodnot, jako je tomu u stupnice Celsiovy. Pro praktické měření teplot lze využít libovolného měřitelného fyzikálního procesu.“

2.1.2.1 Podle principu fungování se v současnosti setkáváme s těmito druhy teploměrů:

Kapalinový teploměr - Teploměr, ve kterém se k měření teploty využívá teplotní roztažnosti teploměrné kapaliny (rtuť, líh apod.).

Bimetalový teploměr - Teploměr, ve kterém se k měření teploty využívá bimetalový (dvojkový) pásek složený ze dvou kovů s různými teplotními součiniteli délkové roztažnosti. Při změně teploty se pásek ohýbá a tento pohyb se přenáší na ručku přístroje.

Plynový teploměr - Teploměr, ve kterém se k měření teploty využívá závislost tlaku plynu na teplotě při stálém objemu plynu, popř. závislost objemu plynu na teplotě při stálém tlaku.

Odporový teploměr - Teploměr, ve kterém se k měření teploty využívá závislost elektrického odporu vodiče nebo polovodiče na teplotě.

Termoelektrický teploměr (také termočlánek) - Teploměr, ve kterém se k měření teploty využívá termoelektrický jev (elektrony, které jsou nositeli elektrického proudu se významně podílejí na vedení tepla). Změnou teploty spoje dvou různých kovů se mění vzniklé termoelektrické napětí.

Radiační teploměr (Infrateploměr) - Teploměr určený k měření vysokých teplot založený na zákonech tepelného záření (Planckův vyzařovací zákon, Wienův zákon, Stefanův-Boltzmannův zákon). Měří záření vysílané tělesy do okolí (na stejném principu pracují i světelná infračidla či naváděné střely).

2.1.2.2 Speciální teploměry :

Kontaktní teploměr - Sepne kontakt při dosažení nastavené teploty. Používá se v regulaci a automatizaci, např. termostat pro klimatizaci nebo akvárium.

Maximo-minimální teploměr - Teploměr ve tvaru „U“, který si pamatuje maximální a minimální dosaženou teplotu za sledované období (od posledního nulování). Používá se např. v meteorologii.

2.2. Metody měření teploty

Jak lze měřit teplotu? Teplota může být měřena řadou rozmanitých snímačů. U všech snímačů se odvozuje teplota z citlivosti na změnu fyzikální veličiny. Inženýr se obvykle dostává do kontaktu se šesti typy snímačů teploty: termočláanky, odporové teploměry a termistory, infračervené teploměry, bimetalové teploměry, snímače s roztažitelnými kapalinami a snímače se změnou stavu.

2.2.1. Kontaktní metody měření teploty

Měření teplot kontaktními čidly (termočláanky, odporové teploměry) patří k základům experimentální analýzy tepelných procesů.

2.2.1.1. Snímače teploty se změnou odporu

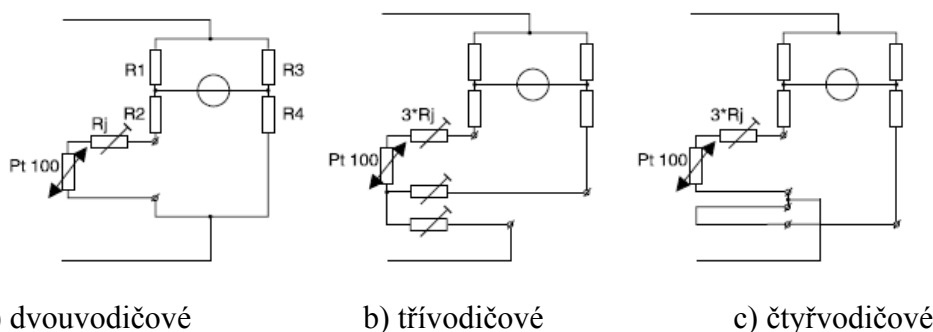
Snímače teploty se změnou odporu využívají změny elektrického odporu materiálu v závislosti na jeho teplotě. Dva klíčové typy jsou odporové teploměry a termistory. Odporové teploměry jsou založeny na změně odporu v kovu, který s teplotou více nebo méně lineárně vzrůstá. Termistory jsou založeny na změně odporu v keramickém polovodiči, odpor klesá nelineárně s rostoucí teplotou.

Odporové snímače teploty využívají vlastnosti kovů a polovodičů, u kterých se elektrický odpor mění s teplotou. U průmyslových snímačů teploty se používají zejména měděné, niklové a platinové vodiče. Platinové vodiče vykazují nejvyšší stabilitu a přesnost, proto jsou dnes nejvíce používány. Poměr hodnoty odporu při 100°C a při 0°C se nazývá odporový poměr. Tento poměr současně vyjadřuje jakost odporu odporového čidla (platina 1,385).

Stabilita měřicího odporu vyjadřuje dovolené kolísání hodnoty základního odporu při změně teploty. Udává, o kolik se změní odpor, když jej vystavíme maximální teplotě, pro kterou má být použit, a pak změříme, o kolik se změnil základní odpor při 0°C. Odchylku pak označujeme jako nestabilita měřicího odporu. Základní odpor je hodnota odporu při 0°C.

Důležitým parametrem odporových snímačů teplot je otřesu vzdornost. Je to odolnost snímače vůči mechanickému chvění, které by mohlo mít za následek mechanické poškození měřicího odporu a tím by vneslo do měření nepřesnost.

U měřicích odporů se dále udává maximální měřicí proud, aby nedocházelo k vlastnímu ohřátí měřicího odporu v závislosti na tomto měřicím proudu. Toto ohřátí by mělo za následek zanesení chyby do měření.



Obr. 2.1 Příklady zapojení měřicího odporu [7]

Snímače teploty se změnou odporu využívají změny elektrického odporu materiálu v závislosti na jeho teplotě. Dva klíčové typy jsou odporové teploměry a termistory. Odporové teploměry jsou založeny na změně odporu v kovu, který s teplotou více nebo méně lineárně vzrůstá. Termistory jsou založeny na změně odporu v keramickém polovodiči; odpor klesá nelineárně s rostoucí teplotou. Odpor vedení mezi přístrojem a odporovým snímačem se vlivem změny teploty okolí mění a způsobuje chybu měření, neboť je zapojen spolu s měřicím odporem ve stejné větvi můstku. Proto se tohoto zapojení využívá pro kratší vzdálenosti mezi měřicím místem a vyhodnocovacím přístrojem a pro větší rozsahy teplot, aby relativní chyba byla v poměru k velikosti rozsahu menší. Odpor vedení mezi přístrojem a odporovým snímačem se vlivem změny teploty okolí mění a způsobuje chybu měření, neboť je zapojen spolu s měřicím odporem ve stejné větvi můstku. Proto se tohoto zapojení využívá pro kratší vzdálenosti mezi měřicím místem a vyhodnocovacím přístrojem a pro větší rozsahy teplot, aby relativní chyba byla v poměru k velikosti rozsahu menší.

Přesnost měření teploty odporovými snímači :

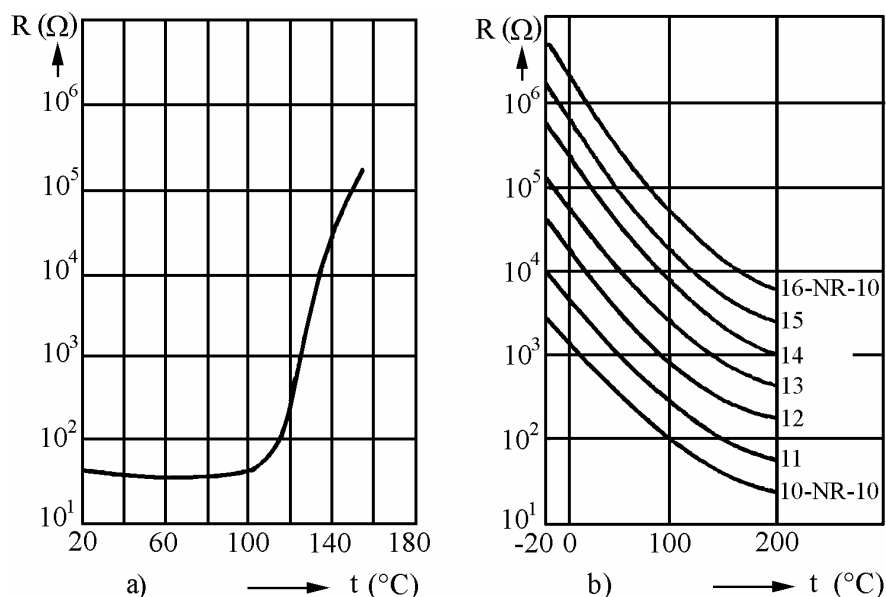
Na přesnost měření teploty snímačem má obecně vliv více činitelů a chyby jimi způsobené můžeme zařadit do tří hlavních skupin :

- a) Chyby způsobené umístěním snímače a tepelnými vlastnostmi prostředí, jímky, armatury, apod.
- b) Chyby způsobené dynamickými vlastnostmi samotného snímače.
- c) Chyby jednotlivých členů elektrického obvodu, které mají vliv na výslednou chybu měření teploty.

Hlavním předpokladem správného měření teploty je vhodné umístění snímačů teploty, aby byl zajištěn správný přestup tepla a dokonalý styk s měřeným prostředím. Přesto se mohou vyskytnout chyby způsobené:

1. změnou odporu vedení vlivem teploty
2. základní chyba vyhodnocovacího přístroje
3. nesprávným vyrovnáním vedení
4. měřicím odporem jako odchylkou od cejchovní řady
5. odchylkou kompenzačního vedení od cejchovní řady
6. termočlánkem jako odchylkou od normalizované cejchovní řady
7. odchylkou korekčního napětí
8. dalšími ovlivňovacími veličinami, např. okolní teplotou, napájecím napětím, apod. a jejich vlivem na přístroje.

Termistorové snímače , což jsou polovodičové snímače teploty s kladným nebo záporným součinitelem změny teploty. Jedná se o polykrystalická čidla, vyrobená technologií práškové metalurgie – spékáním oxidů kovů; v posledních letech se začínají využívat také monokrystalické odporové teploměry. Jejich výhodou je 5 – 50krát vyšší koeficient teplotní závislosti odporu termistoru oproti kovovým odporům. Jejich předností je také velká citlivost, malá hmotnost a rozměry. Nevýhodou je nelinearita závislosti odporu na teplotě a rozptyl vlastností termistorů ve výrobní sérii. Teplotní charakteristika polovodičového termistoru s kladnou orientací je na obr. 2.2a) a se zápornou orientací na obr. 2.2b).

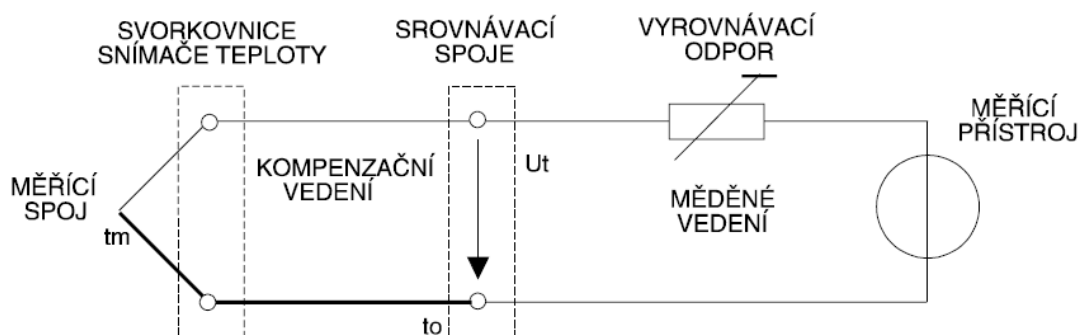


Obr. 2.2 Charakteristiky termistorů s kladnou (a) a zápornou orientací (b) [7]

2.2.1.2. Termoelektrické snímače teploty

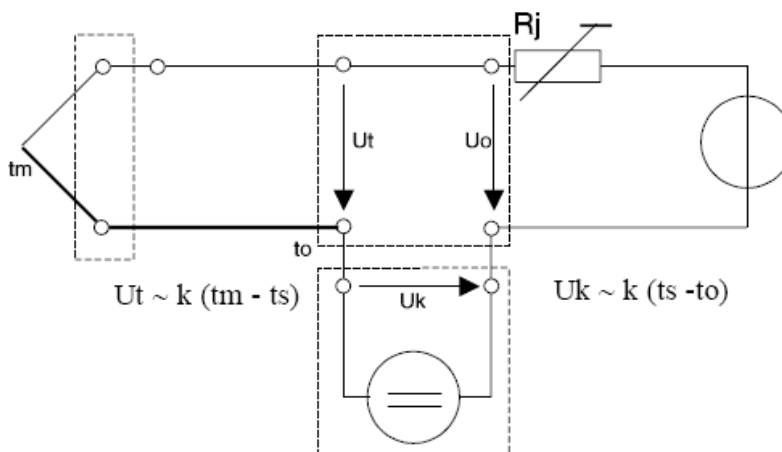
Měření teploty termočlánky je založeno na jevu, že v obvodu složeném ze dvou na konci spojených kovů z různých materiálů vzniká elektromotorická síla. Jestliže spojené konce, které se vkládají do měřené teploty, nazýváme měřící spoj, volné konce, na kterých měříme termoelektrické napětí, se nazývají srovnávací spoje. Tyto snímače teploty jsou určeny k měření vysokých teplot $-600 \dots +2\,800^{\circ}\text{C}$.

Na obr. 2.3. jsou vyznačena jednotlivá funkční místa obvodu. Termoelektrické napětí U_t , jehož hodnota je úměrná rozdílu teploty T_m v místě měřícího spoje (teplý konec) a teploty t_0 v místě srovnávacích spojů (studený konec) se přivádí kompenzačním vedením a měděným vedením na měřicí přístroj. Aby bylo možno každé hodnotě termoelektrického napětí přiřadit určitou teplotu, je třeba udržovat srovnávací spoje na známé a konstantní teplotě, tzv. teplotě vztažné.



Obr. 2.3 Schéma obvodu termoelektrického článku [7]

Teplota hlavice může dosahovat značně vysokých teplot, teplota svorkovnice dosahuje někdy až 200°C. Srovnávací spoje se proto posouvají kompenzačním vedením do míst s příznivou teplotou okolí, kde se srovnávací spoje udržují v konstantní teplotě, anebo se provádí kompenzace vlivu teploty okolí na srovnávacích spojích obvodem.



Obr. 2.4. Schéma obvodu termoelektrického článku s elektrickou korekcí [7]

kde je t_s teplota v místě srovnávacích spojů
 t_o vztažná teplota
 t_m ... teplota v místě měřícího spoje

2.2.1.3. Teploměry se změnou stavu

K těmto snímačům patří nálepky, peletky, tužky (krajony), laky nebo tekuté krystaly, u nichž se projeví změna, když se dosáhne určité teploty. Jsou používány např. na parních sifonech, uzávěrech, kdy překročí určitou teplotu, pak se bílé políčko na snímači změní na černé. Doba odezvy je obvykle několik minut, takže nezachycují přechodné teplotní změny. Jejich přesnost je nižší než u jiných typů snímačů. Navíc změna stavu je nevratná, kromě provedení políček s tekutými krystaly. I tak se mohou tyto snímače hodit, když je potřeba potvrdit, že teplota části zařízení nebo materiálu nepřesáhla určitou hodnotu, např. pro technické a právní důvody při zasílání výrobku.

2.2.1.4. Teploměry s roztažitelnými kapalinami

Přístroje s roztažitelnými kapalinami, např. v domácnosti používaný teploměr, jsou rozděleny do dvou hlavních skupin: rtuťové a s organickou náplní. Jsou také využívány náplně plynové. Rtuť je však považována za velmi škodlivou životnímu prostředí a jsou zavedena přísná pravidla i pro transport přístrojů a zařízení obsahující rtuť. Přístroje obsahující roztažitelné kapaliny (plyny) nevyžadují elektrické napájení, nehrozí nebezpečí výbuchu a jsou stabilní, zejména při opakovaném cyklování. Na druhé straně však nepředávají informace ke snadnému záznamu nebo přenosu a nelze s nimi provádět plošná nebo bodová měření.

2.2.2. Bezkontaktní metody měření teploty

Bezdotykové teploměry doznaly v poslední době značného pokroku a rozšíření díky pokroku v elektronice a optice. Přístroje byly původně označovány jako radiační pyrometry nebo radiační teploměry, nyní často jako Infračervené-teploměry. Radiační pyrometry nacházely původně uplatnění v takových provozech a aplikacích, kde bylo třeba měřit vysoké teploty často v malém prostoru, kde nebylo možno použít dotykový teploměr. Jednalo se zejména o aplikace v metalurgii, chemickém a zejména silikátovém průmyslu (sklářství, cementárny, vápenky, keramický průmysl). V průběhu posledních let se aplikace IČ-teploměrů posunula k nižším teplotám, včetně měření teplot nižších než $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, takže se s nimi setkáváme v potravinářství, elektronice, průmyslu papírenském, farmaceutickém, textilním, gumárenském, při zpracování plastických hmot apod. Přenosné IČ-teploměry nacházejí široké uplatnění při detekci tepelných ztrát a poruch, při kontrole potrubních systémů, nádrží apod. Měření teploty bezdotykovými teploměry je založeno na vyhodnocování tepelného záření těles. Část tepelné energie látek se neustále přeměňuje v energii, kterou tyto látky vysílají ve formě elektromagnetického záření. Při rovnováze mezi energií přijímanou a vysílanou může být stav zářiče charakterizován určitou teplotou. Vysílané záření se nazývá tepelné a je složeno z různých vlnových délek.

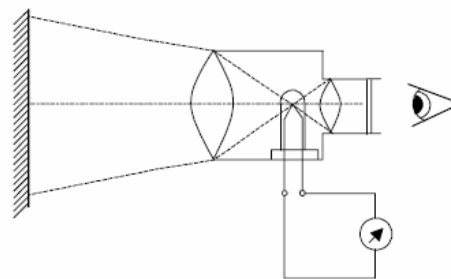
Dokonale černé těleso maximálně vyzařuje i maximálně pohlcuje záření. Intenzita vyzařování a pohltivost jsou si úměrné podle tzv. Kirchhoffova zákona. Je-li teplota tělesa větší než teplota okolí, převažuje intenzita vyzařování nad pohltivostí.

Emisivita je definována jako poměr energie vyzařované objektem při dané teplotě k energii ideálně černého tělesa při stejné teplotě. Emisivita černého tělesa je rovna 1,0. Emisivita je velmi důležitým faktorem IČ-termometrie a její vliv není možno zanedbávat. Emisivita závisí na materiálu, úpravě povrchu, oxidaci povrchu.

2.2.2.1. Pyrometry celkového záření

Pyrometry celkového záření, označované též jako širokopásmové přístroje, pracují v oblasti vlnových délek od $0,3\text{ }\mu\text{m}$. Někdy se tyto přístroje označují jako radiační pyrometry nebo úhrnné pyrometry, protože měří v široké oblasti vyzařovaného teplotního záření.

Radiační pyrometr je schematicky znázorněn na obr. 2.5. Využívá výchylkové měřicí metody. Spojná čočka (nebo duté zrcadlo) zachycuje záření z určité oblasti žhavého tělesa a soustřeďuje je na začerněný terčík s termočlánkem (nebo jiným teplotním čidlem), umístěným v ohnisku. Dopadající záření se mění na teplo a zvyšuje teplotu terčíku až se dosáhne ustálený stav, charakterizovaný určitou teplotou terčíku. Termoelektrické napětí článku je pak úměrné čtvrté mocnině teploty žhavého tělesa. Statická charakteristika radiačního pyrometru bude přímka v logaritmických souřadnicích.



Obr. 2.5 Radiační pyrometr [7]

Údaj radičního pyrometru nezávisí na vzdálenosti od zdroje, pokud zdroj zaujímá celé zorné pole. Intenzity záření sice ubývá se čtvercem vzdálenosti, avšak plocha v zorném poli stejně narůstá. Za tímto účelem je pyrometr opatřen okulárem, pro jeho zaměření na žhavý předmět a pro kontrolu, zda předmět zaujímá celé zorné pole. Zorné pole je vymezeno clonou, kterou lze nastavit rozsah pyrometru.

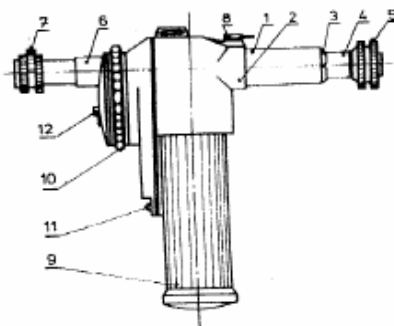
Úhrnné pyrometry užívají tepelných snímačů. Tepelné záření je zde optickou soustavou koncentrováno na snímač (termočlánek, termistor apod.), jehož teplota v důsledku toho roste. Na základě následných změn elektrických parametrů snímače hodnotíme výši teploty. Vyhodnocení je zde neselektivní, přibližně z celého vlnového rozsahu záření. Časová konstanta měření je poměrně značná.

2.2.2.2. Pásmové pyrometry

Tyto přístroje pracují v relativně úzkém rozmezí vlnových délek, přičemž volba tohoto rozmezí souvisí s požadovaným účelem měření. V poslední době bylo vyvinuto mnoho různých úzkopásmových přístrojů pro specifické aplikace. Měřicí rozsahy jsou značně proměnné a jako příklad lze uvést (-50 až +600) °C, (0 až 1 000) °C, (600 až 3 000) °C, (500 až 2 000) °C aj. Požadované pásmo vlnových délek se vymezuje aplikací vhodné optiky, optického filtru a vhodnou spektrální citlivostí detektoru. Jako čidla pásmových pyrometrů se využívá fotoelektrických detektorů, tj. fotonek, fotočláneků, fotodiod, fototranzistorů a fotoodporů. Jejich výhodou je velmi rychlá reakce na změny teploty a možnost měření teploty i malých objektů. Spektrální citlivost je závislá na typu čidla; např. selenové fotočlánky jsou citlivé v oblasti viditelného záření, křemíkové fotočlánky jsou citlivé v rozsahu 0,6 μm až 1,8 μm, fotoodpory PbS mezi 0,5 μm až 3,6 μm apod.

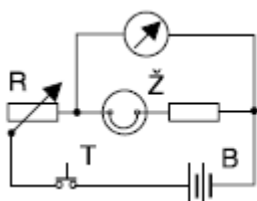
2.2.2.3. Optický pyrometr

Optický pyrometr „Pyrometr 1“ n.p. Metra provádí měření teploty při vlnové délce 0,65 μm. Je založen na nulové měřicí metodě tím, že v optickém systému se srovnává zář měřeného tělesa se zářím vlákna pyrometrické žárovky.



Obr. 2.6 Optický pyrometr [7]

Optický pyrometr (Obr. 2.6.) je dalekohled s výsuvným objektivem 4, jímž se vytváří obraz měřeného tělesa v rovině vlákna žárovky, a s výsuvným okulárem, zaostřujícím vlákno žárovky. Okulár obsahuje červený filtr 7, který vymezuje vlnovou délku záření. Zařazuje se při teplotách nad 900°C. Pro zvýšení měřicího rozsahu se vřadí mezi objektiv a žárovku šedý filtr páčkou 8.



Obr. 2.7 Elektrické schéma optického pyrometru [7]



Obr. 2.8 Seřízení pyrometru [7]

Elektrická část (Obr. 2.7.) se skládá z pyrometrické žárovky Ž, žhavené proudem 3V baterie přes otočný reostat R a tlačítko T. Paralelně k žárovce je připojen magnetoelektrický měřicí přístroj s teplotní stupnicí. Účelem manipulace s přístrojem je nastavit odpor R tak, aby se konec smyčky vlákna žárovky svou září ztrácel v záři měřeného tělesa (Obr. 2.16.). Vlevo má vlákno žárovky nižší teplotu, vpravo vyšší a uprostřed správnou teplotu. Pyrometr I má rozsahy 700°C až 1 500°C s chybou $\pm 22^\circ\text{C}$ a 1 200°C až 2 300°C s chybou $\pm 35^\circ\text{C}$. Při měření do 900°C bez záření červeného filtru vzniká doplňková chyba na nemonochromatickosti, která může být maximálně $\pm 20^\circ\text{C}$. Stupnice pyrometru je pro záření dokonale černého tělesa, které má emisivitu $A_\lambda = 1$. Reálná tělesa vyzařují méně energie, a proto bude jejich naměřená teplota vždy nižší než skutečná. Proto je nutno použít korekční tabulky a grafu pro výpočet korekce. V tabulce 2.17. jsou uvedeny emisivity A_λ pro některé látky. I přes korekce může docházet u pyrometrů k chybám, způsobeným absorpcí záření v prostředí. Sklo, dým a kouř, ale také CO₂ a páry H₂O absorbují tepelné záření. Naměřený údaj bude proto nižší.

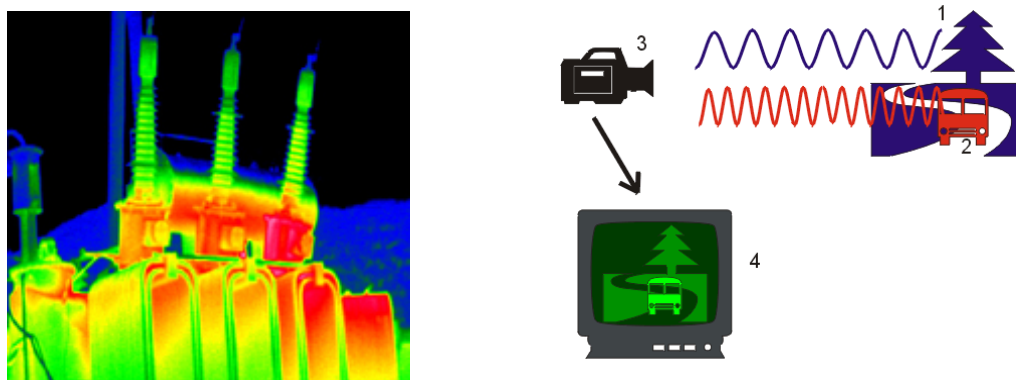
2.2.2.4. Termovizní měření

Termovizní systém umožňuje bezkontaktně měřit dynamické teplotní pole. Rozložení a průběh teploty se zobrazuje a zaznamenává prostřednictvím termovizní kamery. Termovizní systémy mají široké uplatnění v elektrotechnice, průmyslu a stavebnictví. Obrazový signál se zobrazuje na monitoru v řadě barevných odstínů, z nichž každý znamená určitý teplotní rozsah. Na základě vyhodnocování zobrazených teplotních polí lze pak získat řadu cenných informací o nejrůznějších jevech, které nějakým způsobem souvisejí se změnou teploty, případně o jejich průběhu.

Snímací kamery mohou pracovat na principu tepelných snímačů, kde dochází při absorpci fotonů k oteplení citlivé části senzoru a pohlcená energie se vyhodnocuje nepřímo přes senzory teploty nebo v provedení jako kvantové snímače s vyhodnocením infračerveného záření cestou fotoelektrického jevu v polovodičích. Obrazový záznam umožňuje zachytit okamžité rozložení teplotních polí využitím citlivosti speciálních fotografických emulzí na různé délky dopadajícího infračerveného záření.

2.2.2.4.1. Snímání v daleké IR oblasti :

Provádí se vizualizace se vlastního IR záření těles s teplotou vyšší než absolutní nula. Používaná elektronická zařízení složitými detektory zachycují vlastní IR záření teplých těles, převádějí je na elektrické signály a digitalizují. Snímače IR záření musí být chlazené na teplotu podstatně nižší, než je teplota těles, která mají být zobrazena, jinak by snímač sám sebe „závojoval“, zahltil by se svým vlastním tepelným zářením, zařízení jsou velmi drahá.



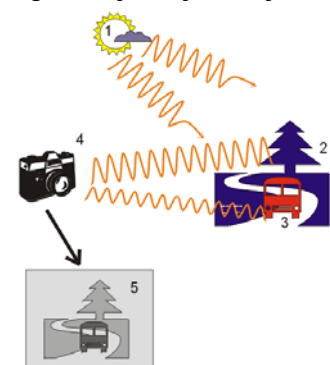
Obr. 2.9 Snímání v daleké IR oblasti [10]

Na obrázku je snímek rozvodného transformátoru pořízený v daleké IR oblasti, falešné barvy odpovídají jeho povrchové teplotě. Další obrázek schematicky naznačuje princip snímání vlastního tepelného záření těles v daleké IR oblasti: studené pozadí (1) vydává dlouhovlnné IR záření. O něco teplejší těleso (2) vydává také dlouhovlnné záření, ale s kratší vlnovou délkou. IR kamera (3) je schopna toto záření zachytit a vizualizovat ve falešných barvách (4).

2.2.2.4.2. Fotografování v blízké IR oblasti :

Druhou možností jak využít IR záření k fotografování je použití principu známého z klasické fotografie ve viditelném světle. Fotografované předměty jsou ozářeny IR zářením. Předměty odráží IR záření v různé míře, takže získáme obraz ve stupních šedé, odstín šedé odpovídá odrazivosti předmětu v IR oblasti.

Snímače použité při tomto uspořádání mohou být podstatně jednodušší. Při ozařování snímáné scény velmi krátkovlnným IR zářením s vlnovou délkou řádově kratší, než vlnová délka vlastního IR záření vydávaného snímanými tělesy, nemusí být snímače chlazené. Pro obrazovou IR fotografii se vyrábějí fotografické emulze, zcitlivěné pro velmi krátkovlnnou IR oblast (oblast za červeným koncem viditelného spektra). Princip snímání v krátkovlnné IR oblasti: zdroj IR záření (1) ozařuje snímanou scénu krátkovlnným IR zářením (vlnová délka blízká červenému světlu - cca 650 nm), IR záření používané v této technice bývá v rozmezí 750 – 1000 nm. Snímané objekty (2, 3) se liší svou odrazivostí pro IR záření. Intenzita odraženého záření je tedy modulována odrazivostí snímaných předmětů, vlnová délka dopadajícího a odraženého záření se však nemění! Modulované IR záření dopadá na detektor (film) (4) a je vizualizováno vyvoláním (5). Na fotografii odpovídají nejsvětlejší místa objektům nejvíce odrážejícím dopadající záření. Pomocí termografie lze zabránit mnoha závadám, ke kterým by mohlo u různých zařízení v provozu dojít. Termografická technika (termovize) je dnes už nepostradatelná v různých průmyslových odvětvích, ale i v energetice, stavebnictví dopravě a v medicíně.



Obr. 2.10 blízka IR oblast [10]

2.4 Kotoučová brzda

Kotoučové brzdy se v současnosti nejčastěji používají jako přední, nebo přední a zadní brzdy osobních automobilů (obr. 2.12). Za jejich největší přednost oproti bubnovým brzdám se považuje stálost brzdného účinku, jež je dosažena lepším odvodem tepla z kotouče (obr. 2.15, 2.16), větší účinností a plynulejší regulace brzdné síly. Kotoučová brzda může být na rozdíl od bubnové brzdy opatřena systémem ABS. Na druhou stranu jsou dražší a náchylnější na poruchy vzniklé znečištěním. Proto se používají u většiny levnějších aut jen na přední nápravě.



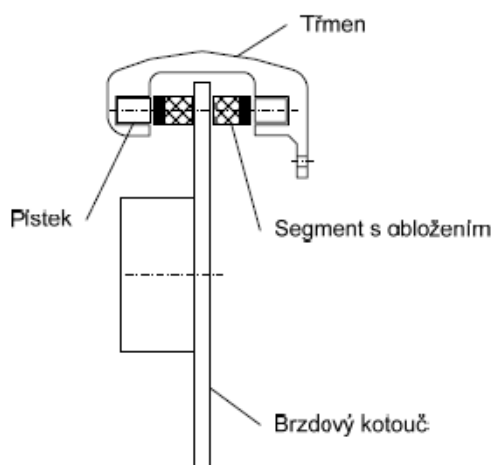
Obr. 2.12 Kotoučová brzda [10]

2.4.1. Kotouč

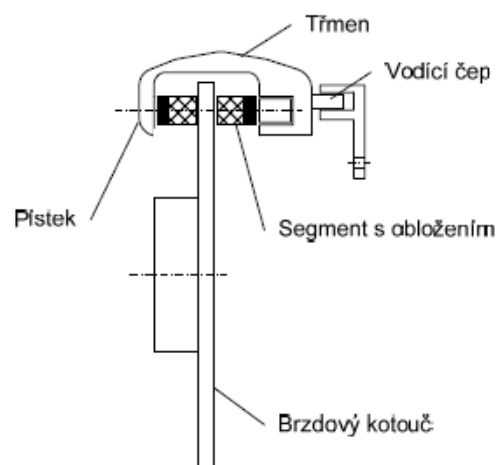
Konstrukční provedení kotoučové brzdy se liší v realizaci jejího třmenu obr. 2.13. Z tohoto pohledu rozlišujeme kotoučové brzdy :

- S pevným třmenem
- S plovoucím třmenem

Výsledkem řešení s plovoucím třmenem je úspora místa a menší zális vlastního kotouče.



a) pevný třmen



b) plovoucí třmen

Obr. 2.13 Konstrukční řešení kotoučové brzdy

Silové účinky :

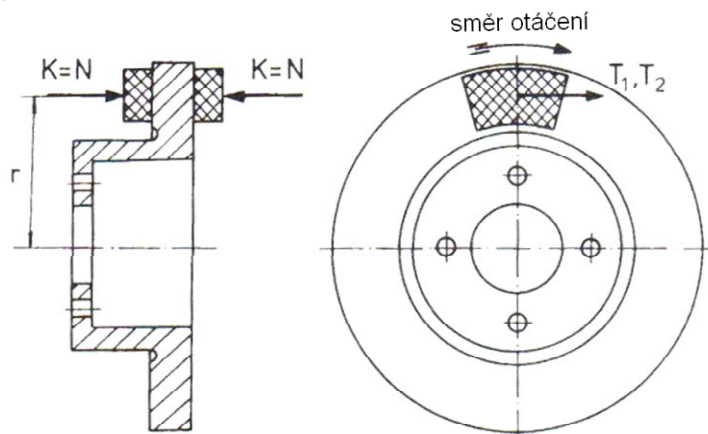
$$M_B = (T_1 + T_2) \cdot r \quad (2.5)$$

$$M_B = 2 \cdot \mu \cdot N \cdot r \quad (2.6)$$

$$M_B = 2 \cdot \mu \cdot N \cdot r \quad (2.7)$$

$$c^* = \frac{\sum T_i}{K} = 2 \cdot \mu \quad (2.8)$$

$$\mu = \frac{M_B}{2 \cdot N \cdot r} [-] \quad (2.9)$$



Obr. 2.14 Silové účinky působící na kotoučovou brzdu [6]

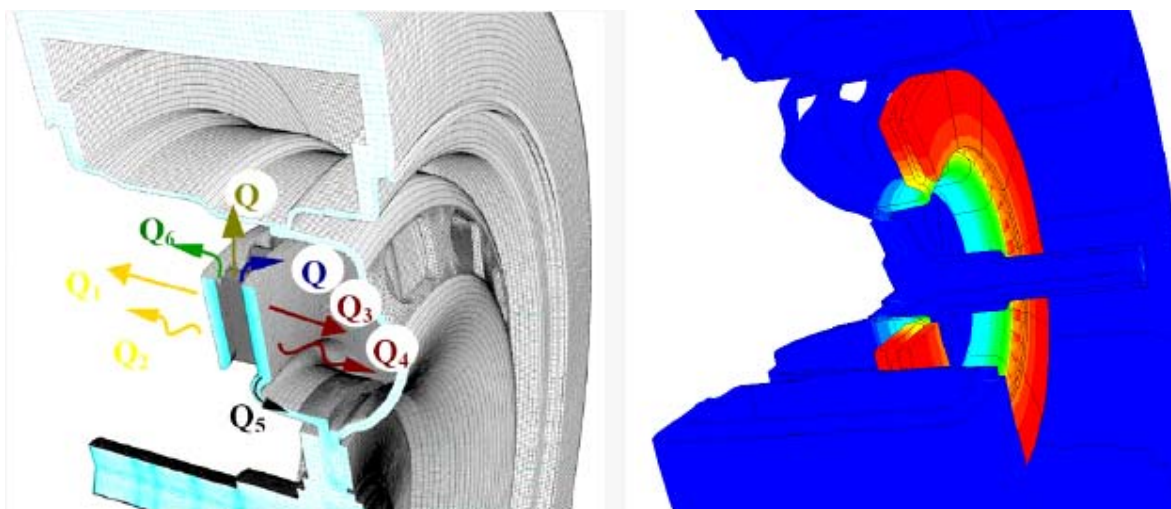
Požadavky kladené na brzdový kotouč:

- vysoká odolnost vůči opotřebení
- odolnost vůči korozi
- teplotní odolnost
- tvarová stálost
- optimální odvod tepla

Materiály používané na brzdové kotouče :

- Litina (šedá, grafitová, tvárná)
- Keramika

V současné době zaujímá první místo pro výrobu kotoučů a to hlavně z důvodu nízké ceny oproti keramice. Pro zlepšení materiálových vlastností se používají přídatné složky jako např. : molybden, měď, chrom nebo titan. Taková slitina se pak vyznačuje velmi homogenní strukturou bez vzduchových bublinek a napětím. Tím je bezpečně zabráněno vibracím a „skřípání“ brzd. Pro vozidla se silnějšími motory jsou k dispozici vysoce kvalitní karbonové brzdové kotouče z šedé litiny s vysokým obsahem uhlíku, která ještě lépe odvádí teplo vznikající během brždění.



Obr. 2.15 Ukázka teplotního rozložení a odvodu tepla brzdového kotouče [12]

U kotoučových brzd vyrobených z keramiky (obr. 2.16) patří k největším výhodám, vedle čtyřnásobné životnosti oproti konvenčním ocelovým kotoučům, především vyšší brzdný výkon a odolnost proti tzv. vadnutí brzd, což je snižování brzdného účinku při několikanásobném intenzivním zpomalení. Ke zvýšení komfortu i stability jízdy vozu s keramickými brzdami přispívá i jejich asi o 50 procent nižší hmotnost, takže tím dochází ke snížení hmotnosti neodpružených hmot. Keramické brzdy jsou vyrobeny z tzv. kompozitu - uhlíkovými vlákny zpevnovaného keramického materiálu, ve kterém má největší podíl karbid křemíku, jež vyniká vysokou odolností proti otěru. Životnost keramických brzd činí při běžném používání vozu až 300 000 km, což je asi čtyřikrát více, než kolik lze očekávat od konvenčních ocelových brzd. Úbytek tloušťky keramického brzdového kotouče činí během celé jeho životnosti jen asi 0,5 mm. Keramické brzdy jsou také naprosto odolné vůči korozi.



Obr. 2.16 Keramický brzdový kotouč [10]

2.4.2 Brzdové obložení

Brzdové destičky jsou tvořeny kovovými pláty s brzdnou látkou připevněnou na povrch protilehlý brzdovému disku (obr. 2.17). Brzdové destičky převádí pomocí tření kinetickou energii vozidla na tepelnou energii. Když se destička kontaktem s bubnem nebo kotoučem zahřeje, dochází k přenosu malého množství brzdného materiálu na buben, destička a disk k sobě přilnou, přitlakem vzniká brzdná síla. Existuje mnoho druhů, podle zamýšleného využití vozidla, od velmi měkkých a agresivních (např. u závodních vozů), po tvrdší, trvanlivější a méně agresivní. Destičky mohou mít různé pracovní teploty, použití nesprávného typu může způsobovat vadnutí brzd.

Požadavky kladené na brzdové obložení :

- Velmi vysoký koeficient statického tření
- Nízká abrazivita ve styku s materiálem brzdového kotouče
- Minimální rozdíl mezi brzdným výkonem za mokra a sucha
- Dobrá odolnost proti otěru
- Vysoká účinnost brzd do 550°C (max.800°C)
- Stálý brzdný účinek

Provozní parametry materiálu:

- Specifický tlak:..... $p < 5,0 \text{ Mpa}$
- Kluzná rychlost:..... $V < 30 \text{ m/s}$
- Maximální teplota při dlouhodobém provozu:.....550°C
- Maximální teplota při krátkodobém ohřevu:800°C

Materiály používané na brzdové obložení:

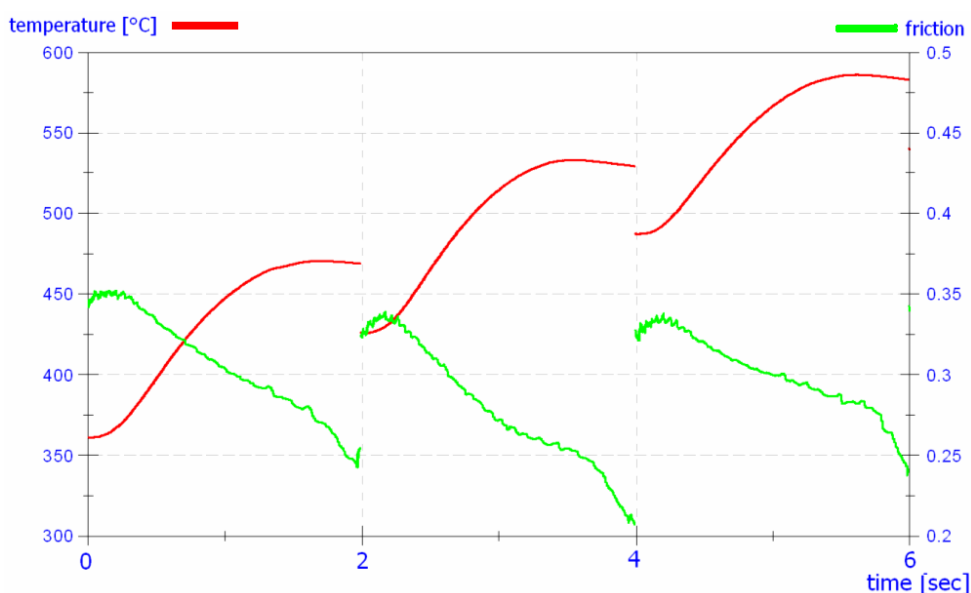
- Pět hlavních prvků u třecího materiálu : (pryskyřice, vlákna, lubrikanty, plnidla, brusidla)
- Pro svoji odolnost proti vysokým teplotám byl dříve používán azbest, ale kvůli své toxicitě se nyní nahrazuje aramidovými vlákny.
- Materiály vyráběné na bázi sintrovaných kovo-keramických třecích materiálů pomocí práškové metalurgie. Takový materiál zaručuje vysoký a stálý součinitel tření s minimálním stupněm otěru, nízkou hmotnost a vysokou cenu.
- speciální směsi kovu, organických materiálů se základem uhlíku



Obr. 2.17 Brzdové destičky [9]

2.5. Problematika měření teploty kotoučové brzdy

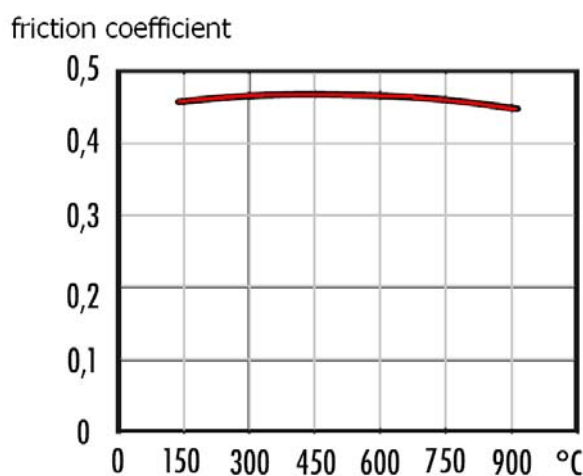
Z předchozích kapitol je zřejmé, že vliv teploty na účinnost brzdové soustavy je značný. Vyplývá to i ze závislosti koeficientu smykového tření na teplotě z rovnice (2.7), kde je patrné, jak ovlivňuje snižující se koeficient smykového tření brzdný moment. Pro různé materiály brzdných kotoučů a obložení, je různý koeficient tření. Na obr. 2.18 vidíme závislost teploty a smykového tření na čase, pro sériově vyráběné brzdy. Pro tyto účely, kde je rozhodující



Obr. 2.18 Závislost teploty a smykového tření na čase [10]

cena, se koeficient tření pohybuje kolem hodnot 0,3 – 0,4. Jak je patrné z obr. 2.18. S narůstající teplotou se koeficient tření snižuje a tudíž se zmenšuje i brzdný moment, což je nežádoucí. Pro stejný brzdný účinek, musí obsluha při vyšších teplotách brzd, vyvolat mnohem větší sílu na pedál, aby se dostavil „očekávaný brzdný efekt“.

Pro sportovní účely se navrhují speciální materiály a slitiny, které tento efekt téměř eliminují a koeficient tření se u takových brzd pohybuje okolo 0,5 - 0,8 podle stanovených požadavků (obr. 2.19). Takové obložení po té zaručuje maximální výkon brzdové soustavy téměř za všech teplot a rychlostí, nevyžaduje extrémní tlak na brzdový pedál, díky čemuž se lze snáze vyvarovat např. přebrzdění vozidla a díky tomu přispívá i k nižší teplotě destičky a kotouče, což v konečném důsledku znamená i vyšší životnost. Takové to brzdové elementy jsou však určeny jen pro speciální použití, kde se předpokládá „pracovní“ režim brzd v oblasti vyšších teplot. Dalším aspektem, proč se tyto materiály nevyužívají i u sériových automobilů je cena.



Obr. 2.19 Závislost koeficientu tření na teplotě pro sportovní účely [9]

Abychom byly schopni problematiku vlivu teploty na brzdném účinku lépe zmapovat, je tedy nutné se zabývat otázkou, jak měřit teplotu kotoučových brzd za jízdy. Nabízí se hned několik možností měření teploty pomocí:

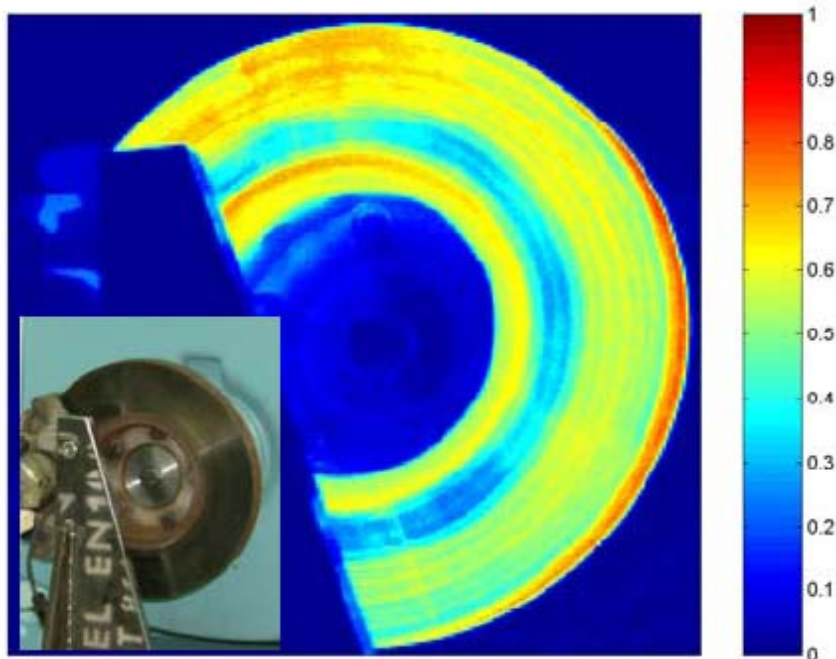
- Pyrometru
- Teploměru se změnou stavu (teplotně závislé barvy)
- Termočlánu

2.5.1 Měření pomocí pyrometru

Tato metoda se z počátku jeví jako nejlepší a to z několika důvodů:

- 1) možnost měření bezdotykově
- 2) jednoduchá montáž a umístění snímače (kompaktní rozměry)
- 3) teplotní rozsah dle potřeby

Bohužel i přes tuto řadu výhod, je tento způsob pro naši aplikaci nevhodný a to hlavně z důvodu měnící se emisivity vlivem ohřevu materiálu (Obr. 2.20). Tento problém se dá



Obr. 2.20 Ukázka měnící se emisivity brzdového kotouče [12]

vyřešit dynamickým infračerveným kalibrováním. Nevhodnost této metody spočívá v tom, že by jsme pracně získali kalibrační křivku pouze pro konkrétní materiál brzdového kotouče, pro jiný by se již tato kalibrační křivka lišila.

2.5.2 Teploměr se změnou stavu

Použití teplotně citlivých barev je metoda pouze orientační a používá se spíše pro kontrolní účely v jaké oblasti teplot se přibližně pohybujeme. Princip je jednoduchý, nanese se barvu na část brzdového kotouče, kde nehrozí setření barvy brzdovým obložení a změní-li barva během testu barvu, víme že jsme překročili teplotu, pro kterou byl teploměr určen.



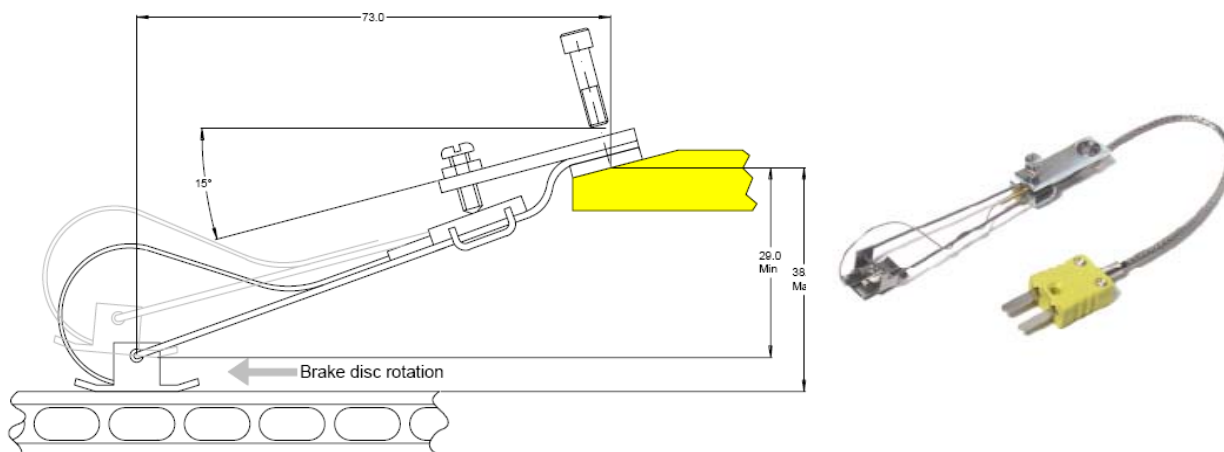
Obr. 2.21 Teplotně citlivé barvy [4]

2.5.3 Termočlánek

Jako nejvhodnější se ukázalo, pro naše účely prvotní studie problematiky snímání teploty brzd, použití termočlánu a to z několika aspektů :

- cenová dostupnost
- jednoduchost
- teplotní rozsah
- přesnost

Navíc se tato metoda používá i v praxi a to přímo ve vývoji brzdových systémů, např. firmou TRW Automotive Lucas Varity. Dále se můžeme s touto metodou potkat i v oblasti motorsportu, kde se používá tato metoda přímo na snímání teploty povrchu brzdového kotouče třecím způsobem viz obr. 2.22 , kde je vyobrazen snímač od firmy MM Competition Systems.



Obr. 2.22 Termočlánekový snímač teploty brzdového kotouče [8]

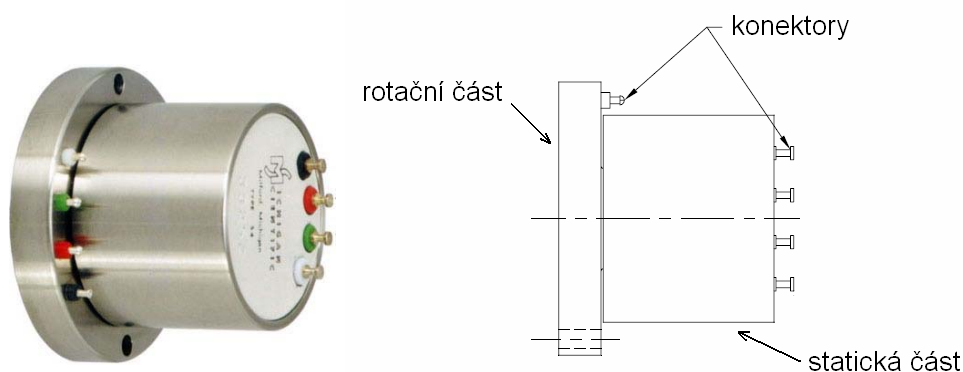
3. Použitý snímač

Pro aplikaci, kterou má řešit tato diplomová práce je nutné použití dotykového snímače teploty. Využití bezdotykových infračervených pásmových pyrometrů OS100 od firmy Omega, které má ústav automobilního a dopravního inženýrství k dispozici, není možné použít z důvodu měnící se emisivity kotouče vlivem zahřívání a nadále také z důvodu nedostačujícího rozsahu měřené teploty (viz kapitola 2.5). Jako nejvhodnější řešení se tedy ukázalo použití dotykového termoelektrického snímače teploty 4-WF-170, NiCr-Ni typu „K“ od firmy Elektronik-Gerätebau viz. Obr.3.1.



Obr. 3.1 Termoelektrický snímač teploty

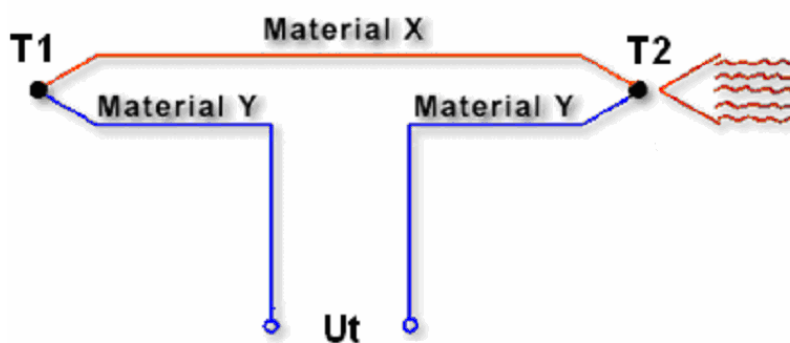
Při měřeních jsme omezeni prostorem a také z tohoto hlediska snímač odpovídá našim požadavkům. Jedním z důvodů, proč jsme se pro snímač rozhodli je ten, že jsme snímače získali od firmy TRW Automotive Lucas Varity, kde tyto snímače také používali pro měření teploty kotoučových brzd. Pro základní studii našeho problému vychází snímač jako dostačující. Pro profesionální řešení této problematiky se již nepoužívá třecí metoda snímání teploty, ale termočlánek se přímo vloží do navrtaného kotouče a stane se tak jeho součástí a nedochází zde k problémům s vlastním třením snímače, odsakováním od nerovností povrchu kotouče, tepelné přechody atd.. Pro tento způsob měření je zapotřebí pomocného zařízení „Slip Rings“ (viz obr.3.2), které má za úkol převést signál termočlánu z otáčejícího se kotouče. Princip tohoto zařízení je podobný jako sběrné kartáče komutátoru s tím rozdílem, že zde se pomocí „kartáčů“ převádí data z rotační části na statickou.



Obr. 3.2 Slip Rings [13]

3.1 Problematika termočláňkové termometrie

Termočlánek je snímač pro měření teploty. Sestává ze dvou různorodých kovů, spojených do jednoho bodu. Když je tento spoj dvou kovů zahříván nebo chlazen, vzniká napětí souvztažné k teplotě. Přeměna teplotních rozdílů přímo na elektrický proud je Seebeckův jev viz obr.3.1.1. Tento jev byl poprvé náhodně objeven v roce 1821 německým fyzikem Thomasem Johannem Seebeckem, který zjistil, že existuje elektrické napětí mezi dvěma konci kovové tyčky, pokud mezi těmito konci existuje teplotní gradient ΔT . Zjistil také, že kompasová střílka je odkloněna, pokud je vytvořena uzavřená smyčka ze dvou různých kovů s teplotním rozdílem mezi spoji. Je tomu tak z důvodu rozdílné odezvy kovů na teplotní rozdíly, což vytváří proudovou smyčku, která způsobuje vznik magnetického pole. Jev je vznik napětí, který nastává při teplotních rozdílech mezi dvěma rozdílnými kovy nebo polovodiči. To způsobuje nepřetržité proudění elektronů, pokud vodiče vytvoří uzavřený obvod. Vzniklé napětí je v řádu několika mikrovoltů na stupeň Celsia. V následujícím obvodu může být měřené napětí U_t níže uvedeným vzorcem.



Obr. 3.3 Seebeckův jev

$$U_t = \int_{T_1}^{T_2} (S_B(T) - S_A(T)) dT \quad [mV] \quad (3.1)$$

S_A a S_B jsou Seebeckovy koeficienty kovů A a B, T_1 a T_2 jsou teploty spojů. Seebeckovy koeficienty jsou nelineární a závisí na teplotě vodičů, použitém materiálu a jeho molekulární struktuře. Pokud jsou Seebeckovy koeficienty v daném rozsahu teplot přibližně konstantní, může být výše uvedená rovnice linearizována.

$$U_t = (S_B - S_A) \times (T_2 - T_1) \quad [mV] \quad (3.2)$$

Termočlánek je k dispozici v různých kombinacích kovů nebo kalibrací. Nejpoužívanější kalibrace jsou J, K, T a E. Pro vysoké teploty to jsou pak kalibrace R, S, C a GB. Každý typ kalibrace má různý teplotní rozsah a pracovní podmínky, ačkoliv se maximální teplota mění dle průměru drátu použitého na termočlánek. I když typ kalibrace termočláňku určuje rozsah teploty, je maximum rozsahu také omezeno průměrem termočláňkového drátu. To znamená, že s velmi tenkým termočláňkovým drátem nelze dosáhnout plný rozsah teploty.

Protože termočlánek měří v širokém rozsahu teplot a může být relativně robustní, jsou termočláňky používány velmi často v průmyslu. Pro výběr termočláňku se používají následující kritéria:

Teplotní rozsah :

- Chemická odolnost termočlánku nebo materiálu pláště
- Odolnost proti abrazi a vibracím
- Požadavky instalace (potřeba kompatibility s existujícím přístrojem, existující otvory mohou určovat průměr sondy)

Termočlánky produkují napěťový výstup, který může být korelován s teplotou měřenou termočlánkem. Následující tabulka ukazuje rozsahy teploty a přesnosti pro J, K, E a T termočlánky.

Teplotní rozsahy běžných termočlánků			
Kalibrace	Teplotní rozsah	Standardní přesn.	Výběrová přesn.
J	0°C až 750°C (32°F až 1382°F)	Více než 2.2°C nebo 0.75%	Více než 1.1°C nebo 0.4%
K	-200°C až 1250°C (-328°F až 2282°F)	Více než 2.2°C nebo 0.75%	Více než 1.1°C nebo 0.4%
E	-200°C až 900°C (-328°F až 1652°F)	Více než 1.7°C nebo 0.5%	Více než 1.0°C nebo 0.4%
T	-250°C až 350°C (-328°F až 662°F)	Více než 1.0°C nebo 0.75%	Více než 0.5°C nebo 0.4%

Obr.3.4 Tabulka rozsahů termočlánků [4]

3.1.1 Měření pomocí termočlánků

Měření teploty termočlánkem je založeno na termoelektrickém jevu. Zahřeje-li se spoj dvou různých kovů, vznikne na tomto spoji elektrické napětí, které závisí (nikoli přímo úměrně) na teplotě a materiálu kovů. Kdybychom chtěli toto napětí přímo měřit (např. milivoltmetrem), vznikla by na spojích milivoltmetru s termočlánkem další termoelektrická napětí, která by závisela na teplotě spojů a materiálu vodičů. Kdybychom připojili měřicí přístroj takovýmto způsobem, vznikla by příliš velká nedefinovatelná chyba, která by celé měření znehodnotila. Navíc je samotný termočlánek zpravidla těžko přístupný. Abychom mohli napětí termočlánku měřit, musíme měřicí přístroj připojit takovým způsobem, který uvedenou chybu vylučuje nebo alespoň minimalizuje. Proto výrobci obvykle vybavují termočlánky tzv. kompenzačním vedením obr.3.5, které má definované vlastnosti a umožňuje přivést napětí termočlánku do místa, kde jej lze bez větších obtíží měřit. Toto vedení bývá z kovů podobných termoelektrických vlastností jako je materiál termočlánku, takže spojením vedení s termočlánkem termoelektrické napětí nevzniká. Spoj kompenzačního vedení s termočlánkem bývá nerozebíratelný (svar) a bývá hermeticky uzavřen. Někdy je celé vedení vlastně pokračováním termočlánku.

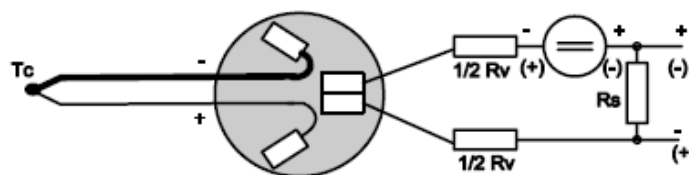


Obr. 3.5 Kompenzační vedení [4]

Častěji je však kompenzační vedení provedeno tak, aby bylo co nejodolnější a zároveň při dostatečné délce co možná nejlevější. Kompenzační vedení vlastně "posune" místo připojení měřicího přístroje a tedy vznik chyby měření do přístupnějšího místa a navíc do prostředí, jehož vlastnosti (teplotu) lze bez větších obtíží měřit, případně přímo definovat. Vedení tak "kompenzuje" chybu měření, která by vznikla přímým propojením termočlánku s měřicím přístrojem. Podrobnějším rozбором bychom zjistili, že měření teploty se takto převádí na

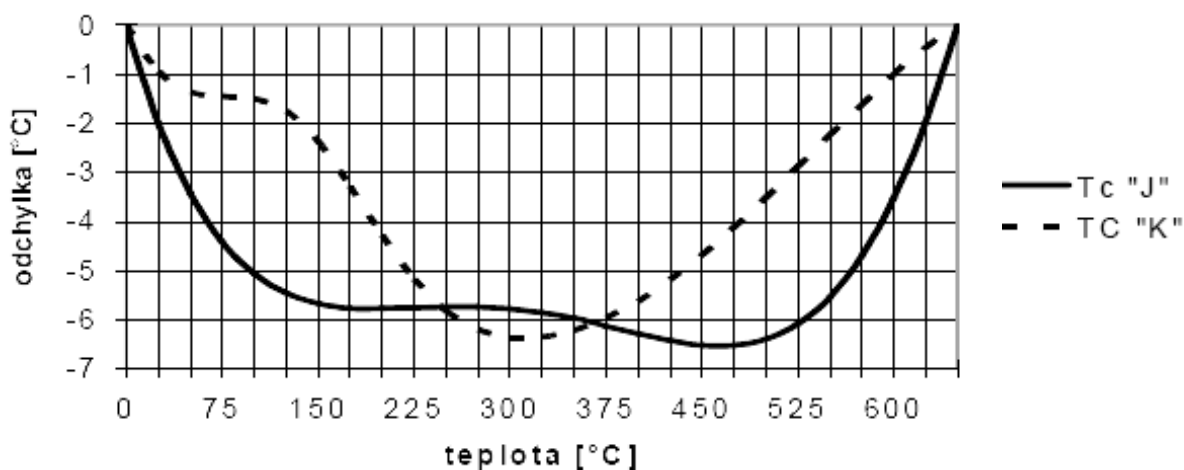


Obr. 3.6 Převodník signálu [11]



Obr. 3.7 Schéma zapojení převodníku [11]

měření rozdílu teplot termočlánku a "studeného" konce kompenzačního vedení. V případech, kdy je nutné signál termočlánku přenést na větší vzdálenost by kompenzační vedení bylo příliš dlouhé a tudíž i drahé, proto se zde používají moduly k převodu signálu termočlánku na unifikovaný výstupní signál. Dále je modul znázorněn na obr. 3.6 schopen linearizovat převodní charakteristiky s teplotou. Provádí kompenzaci teploty studeného konce termočlánku v místě svorek převodníku. Na obr. 3.8 průběh nelinearity pro termočlánek „K“ a „J“. Kompenzační napětí pro „K“ články :



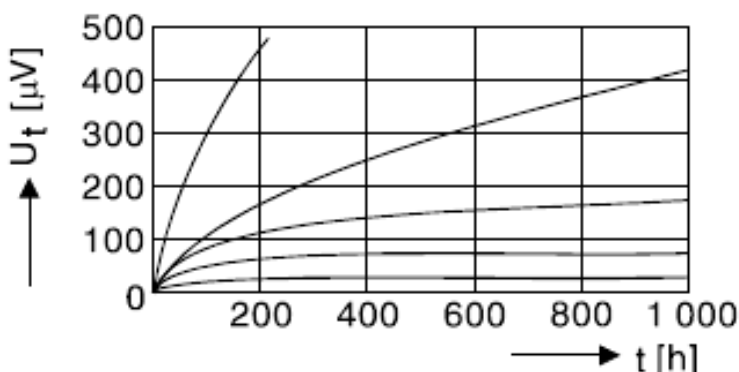
Obr. 3.8 Průběh nelinearity termočlánku „K“ a „J“ [11]

Pro vyšší teploty používáme termoelektrického článku NiCr-Ni. Pro měření teploty se používá tato dvojice déle než 50 let (Hoskins). Niklová větev má 95% Ni zbytek tvoří dezoxidační a jiné přísady. Větev niklochromová má mít 85% Ni, 10% Cr a zbytek tvoří opět dezoxidační a jiné přísady. Zachování předem stanoveného složení, zvláště obsahu chromu je velmi obtížné. Odchyly ve složení přirozeně vedou k odchylkám termoelektrických vlastností snímačů, vyrobených z různých materiálů, různých taveb nebo různými výrobci. Ve snaze po sjednocení byla proto stanovena mezinárodní srovnávací stupnice termoelektrických napětí pro různé teploty pro snímač NiCr-Ni. Optimální množství chromu, pokud jde o

termoelektrické napětí je 0,8%. Při tomto obsahu chromu je však doba života chromniklové větve kratší než větve niklové. Volí se proto větší přísada chromu, aby se doba životnosti obou větví přibližně vyrovnala.

Při teplotě 600°C se pokrývá povrch termoelektrického článku vrstvou okují, která sice na povrchu pevně drží, nechrání však vnitřní jádro drátu před další oxidací. Větší je toto působení u niklové větve při oxidaci vzduchu. Niklochromová větev je napadena podstatně méně, neboť souvislá vrstva oxidů, vytvořená na povrchu drátu, zabraňuje dalšímu okysličování. Také v prostředí sirnatých plynů je větev NiCr odolnější než větve Ni. Odolnost niklové větve může být sice zlepšena přidáním manganu, avšak přesto se škodlivý vliv síry při vyšších teplotách projeví zkrácením materiálu. V neutrální a redukční atmosféře, zvláště je-li zároveň zvětšena vlhkost prostředí, podléhá větev NiCr zvláštnímu druhu koroze, který se projevuje tím, že dochází k ochuzení této větve o chrom, a tím k nevratné změně termoelektrického napětí.

Na obr. 3.9 je uvedena závislost termoelektrického napětí snímače NiCr-Ni na čase pro různé hodnoty měřené teploty. Z grafu je patrné, že odchylky se nemění ani při dlouhodobém provozu, nepřestoupí-li teplota snímače 900°C. Zajímavé z provozního hlediska jsou snímače s dvojicí NiCu 6 - NiCu 30 nebo termoelektrický článek NiCo-Ni. Jde o tzv. termoelektrické články s potlačenou nulou. Závislost termoelektrického napětí na teplotě má takový průběh, že téměř do 200°C je napětí nulové, teprve pak stoupá, přičemž v rozsahu 400 až 900°C je téměř lineární. Význam této skupiny termoelektrických článků spočívá v tom, že parazitní vliv srovnávacího spoje je minimální a nepotřebuje zvláštní řešení.



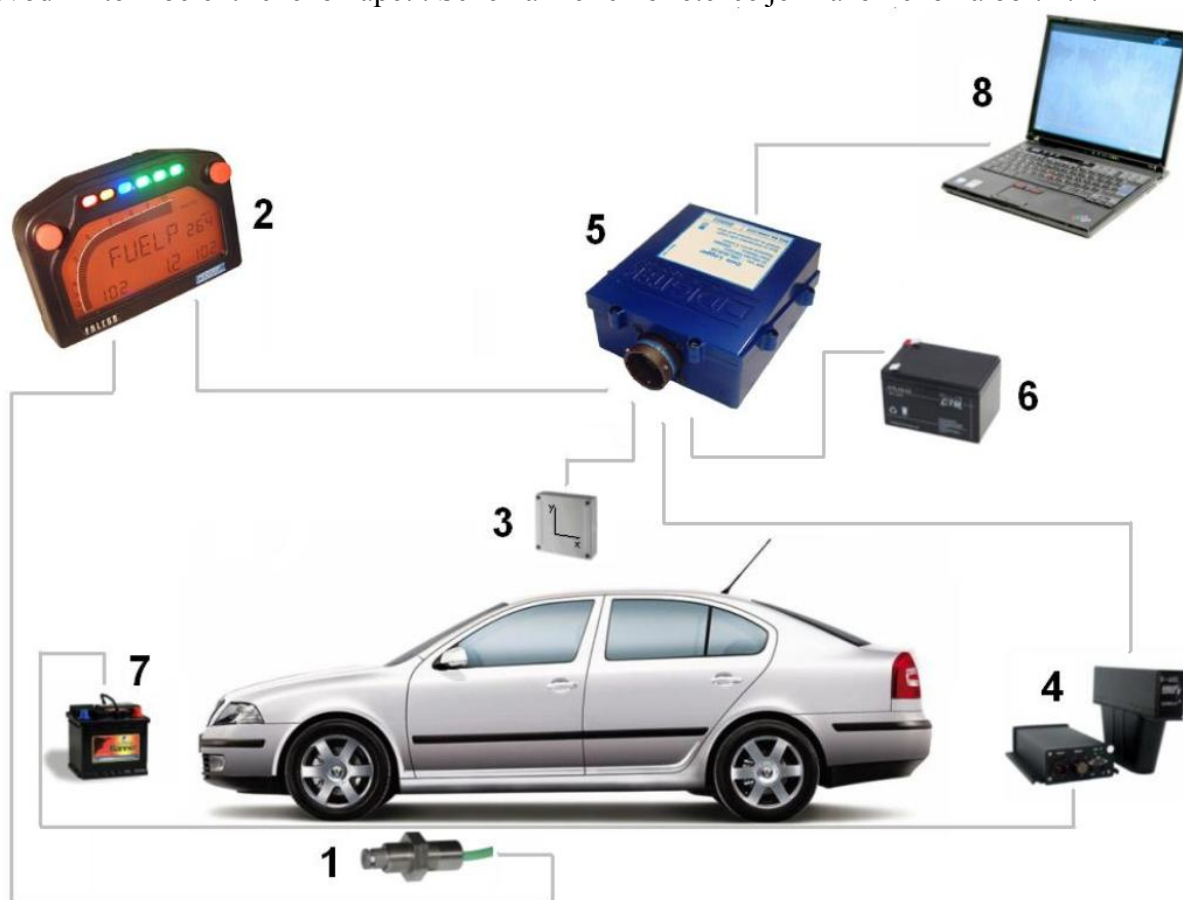
Obr. 3.9 Závislost U_t na čase t pro snímač NiCr-Ni [11]

3.1.2 Materiály termoelektrických snímačů

Při výběru materiálu pro termoelektrický snímač se snažíme splnit některé základní požadavky. Především, aby se závislost termoelektrického napětí na teplotě blížila lineárnímu průběhu. Materiál má být odolný proti chemickým, mechanickým a korozním vlivům. Výstupní termoelektrické napětí má být co největší. Čím je hodnota napětí menší, tím je menší přesnost, měřicí přístroj musí být citlivější, a tím je choulostivější. Materiál volíme z hlediska požadovaného rozsahu teplot a požadované přesnosti měření. Důležitá je též časová stálost, popř. střední doba životnosti snímače. Stálost charakteristiky má být s časem neproměnná. Tato podmínka se dá obzvlášť za vyšších podmínek těžko dodržet. Dochází k rekrytalizaci v místě spoje, popř. ke stárnutí. Snímače se pak musí obnovovat a občas přecejchovat. Byly sestaveny dvojice materiálů, které se ke konstrukci termoelektrických snímačů používají. Jejich parametry jsou uvedeny v normách. U termoelektrických snímačů je třeba počítat s tím, že i snímače téhož druhu mohou mít různý původ a tedy i různé cejchovní řady, takže jejich charakteristiky jsou poněkud rozdílné. Rozdíl je dán složením použitých materiálů.

4. Měřicí řetězec

Pro sestrojení měřicího řetězce bylo nejprve nutné stanovit, které veličiny chceme snímat a měřit. Jelikož jde o úvodní studii této problematiky, rozhodlo se porovnat teploty v závislosti na zpomalení a rychlosti vozidla. Dále se vycházelo z měřících zařízení, které má fakulta k dispozici. Teplota brzdového kotouče je snímána dotekovým termočlánkem o kterém pojednává předchozí kapitola. Abychom získali závislost teploty na zpomalení vozidla, bylo nutné použití M-Boxu, který je určen přímo pro měření zrychlení a úhlové rychlosti. Pro měření rychlosti vozidla byly k dispozici dvě měřící zařízení, páte kolo a víceúčelový měřící systém Correvit S-400. Páte kolo pracující na principu snímání otáček pomocí Hallova snímače, je již zastaralý systém a proto jsme se rozhodli pro použití Correvitu. Pro sběr dat byl použit data logger Cobra a pro připojení termočlánků dashboard Falcon, který má integrovaný převodník termoelektrického napětí. Schéma měřicího řetězce je znázorněno na obr. 4.1.



Obr. 4.1 Měřicí řetězec

- 1) snímač teploty
- 2) digitální palubní deska Falcon
- 3) M-Box
- 4) Correvit S-400
- 5) zapisovač dat Cobra
- 6) napájení zdroj 12V DC pro data logger Cobra
- 7) napájecí zdroj 12 DC (autobaterie)
- 8) přenosný počítač

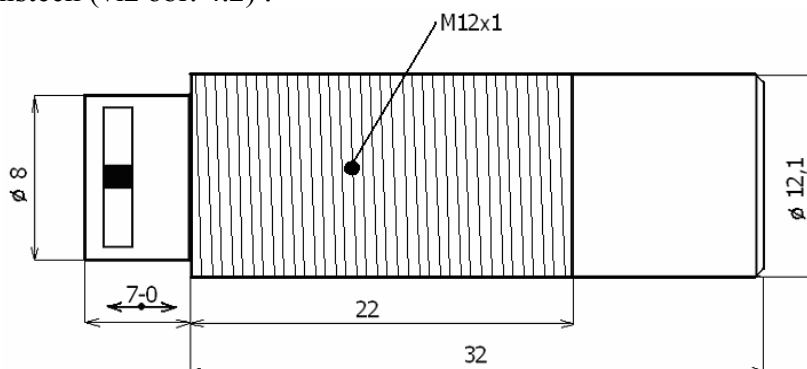
4.1 Snímač teploty

Měření teplot brzdových kotoučů bude realizováno dotykovým termočlánkem 4-WF-170 od firmy Elektronik-Gerätebau (viz obr. 4.1).



Obr. 4.1 Termoelektrický snímač teploty

Snímač se skládá z tří částí, z hlavy, pružiny a hlavního tělesa. Hlava snímače ve které se nachází termočlánek typu „K“ je spolu s pružinou vložena do hlavního tělesa tvaru válce se závitem M12x1. Tělo snímače je z oceli, válcového průřezu o rozměrech : průměr 12,1mm a délka 32mm. Jak je z rozměrů patrné, snímač je vhodný pro měření v prostorově a těžce přístupných místech (viz obr. 4.2) .



Obr. 4.2 Tělo snímače

Tab 4.1 Technické parametry snímače

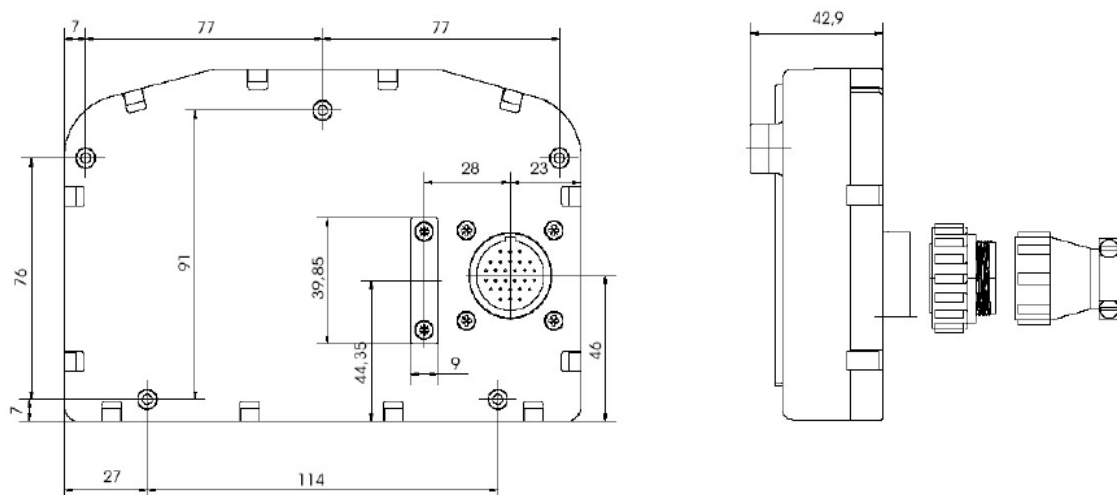
Termočlánek	Typ „K“
Teplotní rozsah	-200 až 1250 °C (328 – 2282 °F)
Přesnost (při 22 °C)	Větší než 2.2°C nebo 0.75%
Materiál termočláčku	NiCr-Ni
Opakovatelnost	± 1 %
Materiál pouzdra	Nerezová ocel 17.255
Materiál pružiny	Nerezová ocel 17.022
Max. pracovní teplota	1000°C
Rozměry těla snímače	Ø 12,1 x 32 mm
Váha	40g

4.2 Digitální palubní deska Falcon

Jedná se o multifunkční palubní LCD zobrazovací zařízení („dashboard“), které je schopno přímo pracovat s deseti analogovými kanály plus zobrazovat otáčky, rychlost vozidla a čas kola (viz obr. 4.3). Komunikace mezi Falconem a data loggerem Cobra je přes CAN linku, která umožňuje řídit a zobrazovat veškeré vstupy do dashboardu. Uživateli dále nabízí možnost konfigurace různých automatických alarmů, minima/maxima rychlosti, času kola apod., dále je možná individuální „závodní předvolba“ ve třech úrovních trénink, zahřívací kolo, závod (PRACTICE, WARM-UP, RACE). Dashboard je dále vybaven dvěma vstupy pro termoelektrický článek, které jsme k měření využili. Na obr. 4.4 jsou vyobrazeny základní rozměry dashboardu.



Obr. 4.3 Dashboard Falcon [8]



Obr. 4.4 Dashboard Falcon - základní rozměry [8]

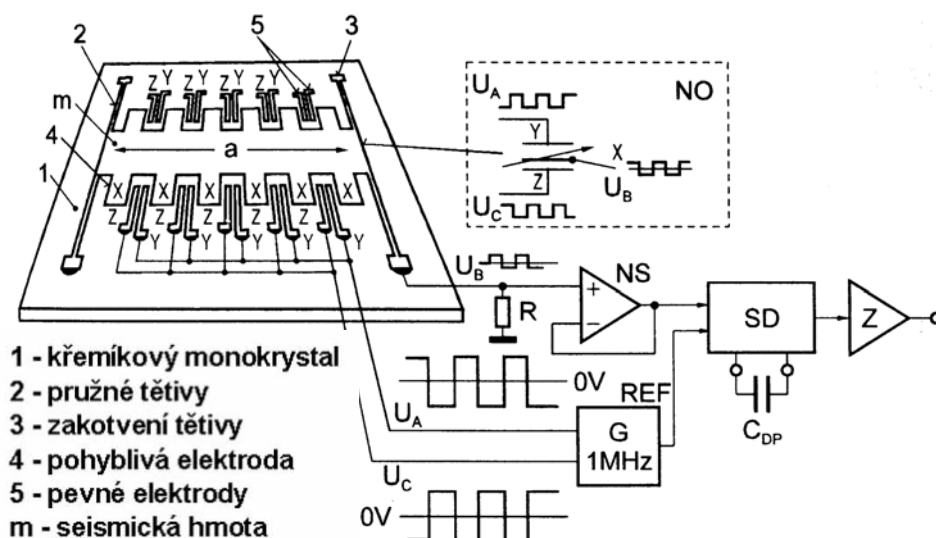
Tab 4.2 Technické parametry dashboardu

Základní data			
Napájecí napětí	9 - 16 V DC	Max proud	200 mA
Provozní teplota	20 > 70 °C	Analogové vstupy	
Rozměry	168 x 111 x 34 mm	Celkem	10
Ochrana krytím	IP64	Použitelné jak termočlánek	2
RPM vstup		Vstupní napětí	0-5V
Kmitočtový rozsah	0 > 3000 Hz	Rozlišení	10Hz
Rozlišení	4 μ s	CAN – TX	10 Hz
Senzory druhu	Hall / magnetic / Coil	Trat'ový ukazatel	
CAN – TX	10 Hz	TTL kompatibilní	Ano
Rychlostní vstup		Detekce hrany	rostoucí
Kmitočtový rozsah	0 > 3000 Hz	Filtrování	EMI
Rozlišení	4 μ s	Ukazatel času kola	Min/sec/Hun
Senzory druhu	Hall / magnetic / Coil	CAN mapování	
CAN – TX	10 Hz	Standartně primární adresu	0x26C(108)
Přepínatelné výstupy		Standart	CAN zavřen
Počet	2		

Dashboard Falcon byl zapůjčen od ústavu konstruování.

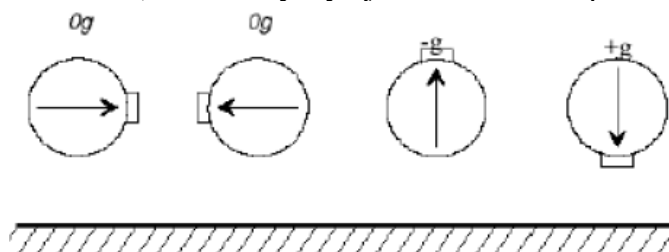
4.3 M-Box

M-Box je zařízení, které má za úkol snímat dynamické parametry za jízdy vozidla (viz obr. 4.10). V tomto případě jde o tři osí snímač zrychlení. Snímače zrychlení jsou od firmy Analog Devices typ ADXL 05. M-Box byl pevně připevněn na desku v kufru experimentálního vozidla. Čidlo ADXL pracuje jako diferenciální kondenzátor, který se skládá ze střední pohyblivé elektrody. Ta je tvořena pružným nosníkem a dvěma pevnými elektrodami (viz obr. 4.5). Kalibraci akcelerometru lze pro hodnoty zrychlení 0 g, +g a -g provádět ručně, jak je ukázáno na obr. 4.6. Ke kalibraci ve větším rozsahu se využívá odstředivého zrychlení. ADXL05 je kompletní systém pro měření kladného i záporného zrychlení v rozsahu ± 5 g.



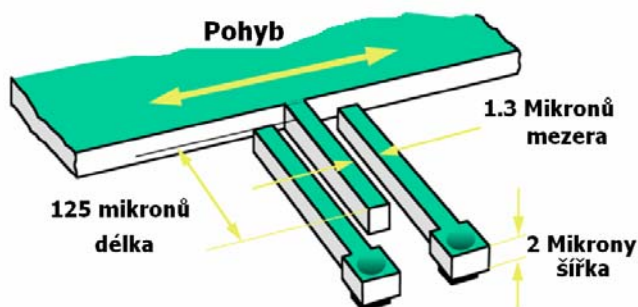
Obr. 4.5 Schéma ADXL [14]

Obsahuje tenkovrstvý polovodičový senzor, který je znázorněn na obr. 4.7 a obvody pro další úpravu signálu. Na obr. 4.8 je zjednodušený náčrt senzoru v klidovém stavu - při nulovém zrychlení. Celý senzor se skládá ze společného nosníku a z 42 diferenčních kapacitních snímačů, které mají dvě pevné destičky, mezi nimiž je jedna pohyblivá "plovoucí" spojená s nosníkem, která se vychyluje v závislosti na působícím zrychlení.



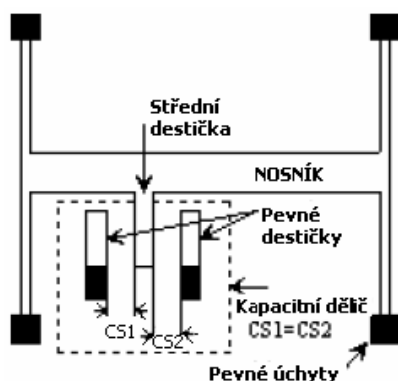
Obr. 4.6 Kalibrace ADXL 05 [14]

Jde tedy o kapacitní dělič, tvořený dvěma kondenzátory zapojenými v sérii. Pevné kapacitní destičky senzoru jsou buzeny obdélníkovými signály 1 MHz vzájemně posunutými o 180° .

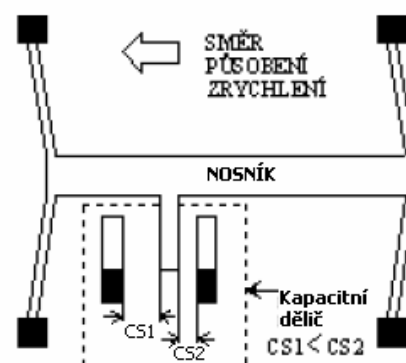


Obr. 4.7 Polovodičový senzor ADXL [14]

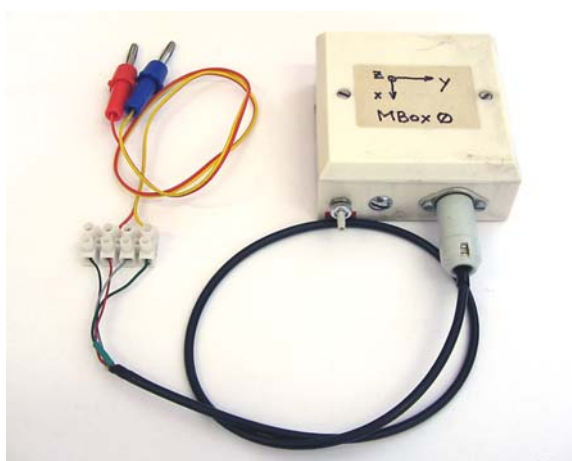
V klidovém stavu (obr. 4.8) jsou kapacity obou kondenzátorů stejné, a proto je napětí v jejich elektrickém středu (tj. na střední destičce) nulové. Na obr. 4.9 je ukázáno, jak se vlivem zrychlení změní poloha nosníku senzoru. Střední destička se přiblíží k jedné z pevných destiček a zároveň se oddálí od druhé. Kapacity kondenzátorů budou rozdílné a na střední destičce se objeví obdélníkový signál, jehož amplituda je úměrná hodnotě zrychlení a fáze nese informaci směru pohybu nosníku, ta se vyhodnocuje pomocí synchronního demodulátoru.



Obr. 4.8 Senzor v klidu [14]



Obr. 4.9 Senzor pod vlivem zrychlení [14]



Obr. 4.10 M-Box

Tab. 4.2 Technické parametry M-Boxu

Snímač zrychlení :	
výrobce	Analog Devices
typ	ADXL 05
rozsah	$\pm 5 \text{ g}$
Napájení	12 V
Výstupní signál	$\pm 10 \text{ V}$

M-box byl zapůjčen od ústavu konstruování.

4.4 Correvit S-400

Jedná se o bezkontaktní optický senzor určený pro volné měření podélné a příčné dynamiky vozidla v rozsáhlém pracovním rozmezí. Optimalizace dynamiky pohybu vozidla je zaměřena hlavně na rozvoj automobilového průmyslu. A právě v tomto odvětví hraje velmi důležitou roli přesné měření vzdáleností a rychlostí jak v podélném, tak i v příčném směru (bráno vzhledem k podélné ose vozidla). Pomocí Correvitu je možno realizovat celou řadu měření. Od nejjednodušších, jako jsou například různé zkoušky zrychlování či zpomalování až po složitější, mezi které patří například vyhýbací nebo předjížděcí manévry. Možnosti použitelnosti jsou víceméně neomezené a uplatnění Correvitu lze nalézt i v analýze dopravních nehod. Correvit S-400 je kompaktní, lehký bezkontaktní optický senzor (viz obr. 4.11) je navržený pro testování dynamiky vozidel, což vyžaduje vysoce přesné měření následujících veličin:

- Vzdálenost (ujetou dráhu)
- Rychlost
- Podélnou a příčnou rychlost
- Úhel směrové úchylny pneumatiky (úhel mezi rovinou kola a skutečným směrem)
- Smykový úhel

Díky rozšířenému měřicímu rozsahu je Correvit vhodný pro použití na jakémkoliv typu vozidla: osobní automobily, nákladní automobily, autobusy, sportovní speciály, Terénní vozidla, atd.



Obr. 4.11 Correvit S-400 [15]

Velkou výhodou je možnost použití na různých druzích povrchu:

- Asfalt
- Beton
- Led
- Sníh
- Kolejnice, atd.

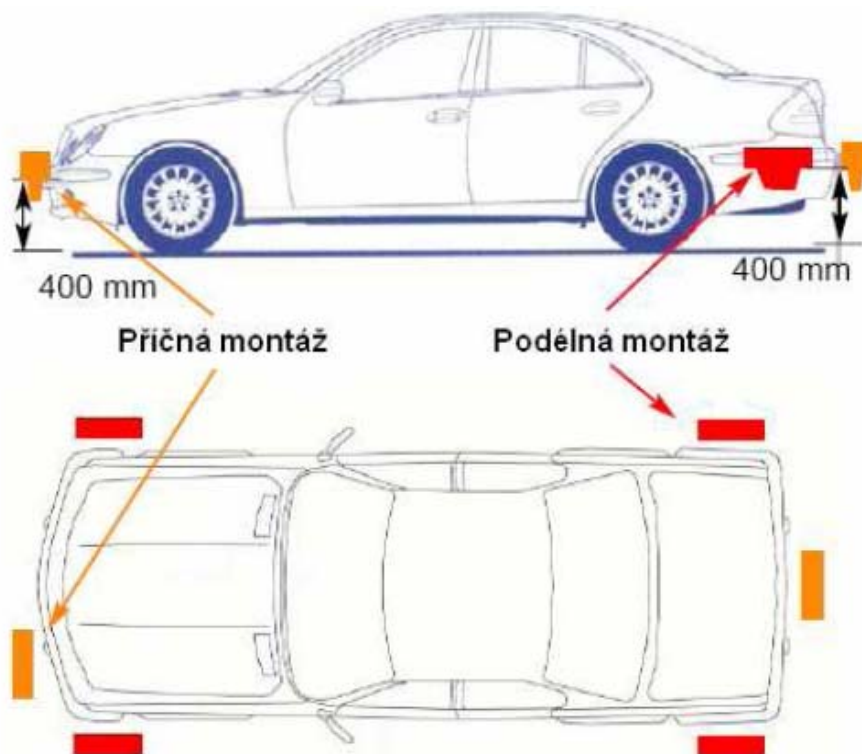
K dosažení dvojrozměrného měření dynamiky pohybu vozidla používá Correvit opracovaný systém složený z precizní optiky a elektronických součástek. Na měřený povrch (nejčastěji vozovka) se vysílá dvojice paprsků vysoce intenzivního zdroje světla, který tento testovací povrch osvětluje. Paprsek světla produkuje projektorová lampa s rozsáhlou šířkou vlnové délky. Maximální citlivost foto přijímače leží poblíž infračerveného rozsahu. Tato skutečnost dovoluje použití standardního halogenového osvětlení. Tento druh světla má nižší výkonnost vztahující se k viditelnému rozsahu než části infračervených paprsků, což je lépe použitelné. Systém čočky produkuje obraz měřeného objektu a soustředí ho do roviny mřížky, kde je opticky rozpoznám senzorem.



Obr. 4.12 Correvit S-400 na voze VUT

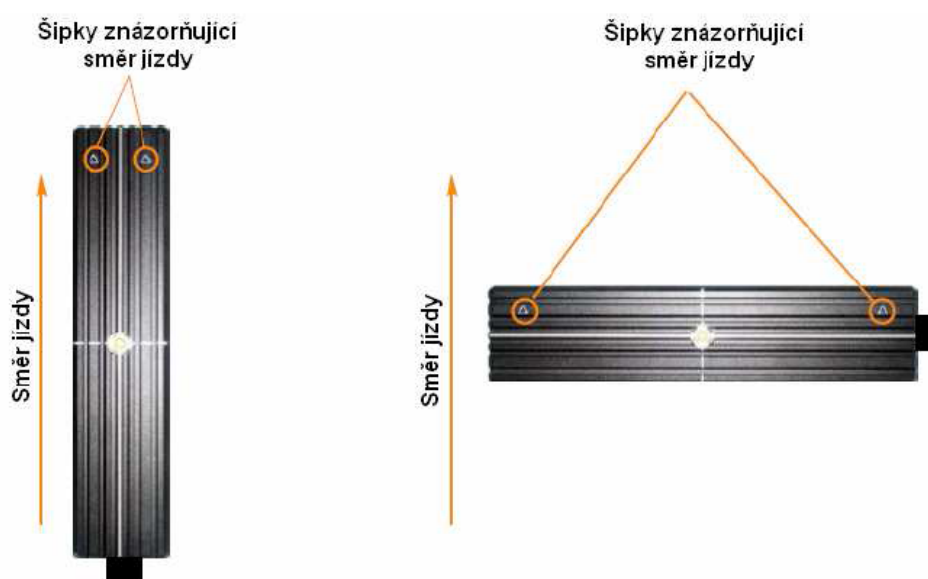
Pohyb senzoru nebo měřeného povrchu způsobí pohyb struktury bodů na mřížce.

V případě připevnění Correvitu na vozidlo musí být vzdálenost mezi spodním povrchem těla snímače (nezahrnuje ochranný kryt snímače) a povrchem vozovky 400mm (viz obr. 4.13). V první řadě se na vozidlo nainstaluje nosná konstrukce senzoru. Ta je pomocí přísavek připevněna na karoserii vozidla. Pro minimalizaci vibrací a pevnější uchycení se celá konstrukce dále připevní pomocí magnetické podložky. Z bezpečnostních důvodů se navíc celá sestava ještě připevní pomocí bezpečnostního lanka.



Obr. 4.13 Podélná a příčná montáž Correvitu [15]

Na konstrukci se připevní senzor Correvitu, který se pomocí přiložených kabelů propojí s datovou sběrní. Ta je propojena s počítačem (nejlépe přenosným počítačem), kde pomocí vhodného softwaru můžeme vyhodnocovat naměřené hodnoty. Celý systém je napájen z palubního napětí vozidla. Samotný Correvit můžeme na testované vozidlo připevnit buď v podélném nebo příčném směru (vzhledem k podélné ose vozidla). Dále je velmi důležité, aby směr roviny čidla byl stejný jako směr jízdy vozidla (viz obr. 4.13). Každý snímač musí být namontovaný ve směru naznačených šipek zobrazených na vrchní části snímače (viz obr. 4.14). Sensory mohou být nastaveny buď v podélném nebo příčném směru.



Obr. 4.14 Orientace Correvitu S – 400 v případě podélné nebo příčné montáže na vozidlo

Tab. 4.3 Technické parametry Correvitu S-400

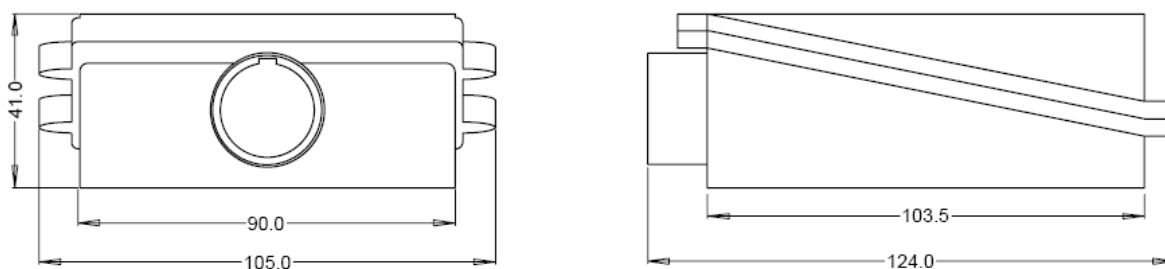
Měřicí rozsah rychlostí	0,5 až 250km/h	Teplotní rozmezí – pracovní	-25 až 50°C
Rozlišení vzdálenosti	1,9mm	Teplotní rozmezí – paměti	-40 až 85°C
Měřicí odchylka	$\leq \pm 0,1\%$	Relativní vlhkost vzduchu	5 až 80%
Měřicí rozsah úhlu	$\pm 40^\circ$	Ochrana systému	IP 67
Úhlová odchylka	$\leq \pm 0,1^\circ$	Délka senzoru	247mm
Pracovní vzdálenost a rozmezí	$400 \pm 100\text{mm}$	Šířka senzoru	52mm
Digitální výstup 1 - interval	1 až 1000pulsů/m	Výška senzoru	171mm
Digitální výstup 2 - přepínatelný	Výstup jako frekvence	Váha senzoru	1350g
Frekvence úhlu nebo příčné rychlosti	FCENTER= 5kHz	Délka elektronické krabičky	212mm
Analogový výstup 1 – podélná rychlost	0 až 10V	Šířka elektronické krabičky	144mm
Analogový výstup 2 – příčná rychlost	10 až +10V	Výška elektronické krabičky	53mm
Analogový výstup 3 – úhel	10 až +10V	Váha elektronické krabičky	940g
Zdroj napětí	11,5 až 14,5V DC; 80W	Otřesy	50g; 6ms
Vibrace	10g; 10 až 150Hz		

4.5 Zapisovač dat Cobra

Cobra je systém určený pro zapisování naměřených hodnot z příslušných snímačů a měřících prvků. Zjednodušeně slouží pro sběr naměřených dat (data logger). Cobra je data logger schopný měřit až 288 signálů s frekvencí až 1kHz. Kromě přímého připojení pomocí kabelového svazku, kde jsou již připravené jednotlivé vstupy, je možné připojení s externími jednotkami pomocí sériových linek nebo linky CAN. Systém je hermeticky uzavřen ve skříni kompaktních rozměrů (viz obr. 4.16), která je vyrobena z hliníku z důvodu použití data loggeru i v extrémních a těžko dostupných podmínkách. Komunikace s osobním počítačem probíhá pomocí Ethernetové linky standardního TCP/IP protokolu. Vyhodnocování zapsaných dat je prováděno pomocí programu Data View 1.4. Data logger Cobra byl při měření pevně připevněn na desku v kufru automobilu.



Obr. 4.15 Data logger Cobra [8]



Obr. 4.16 Základní rozměry data loggeru Cobra [8]

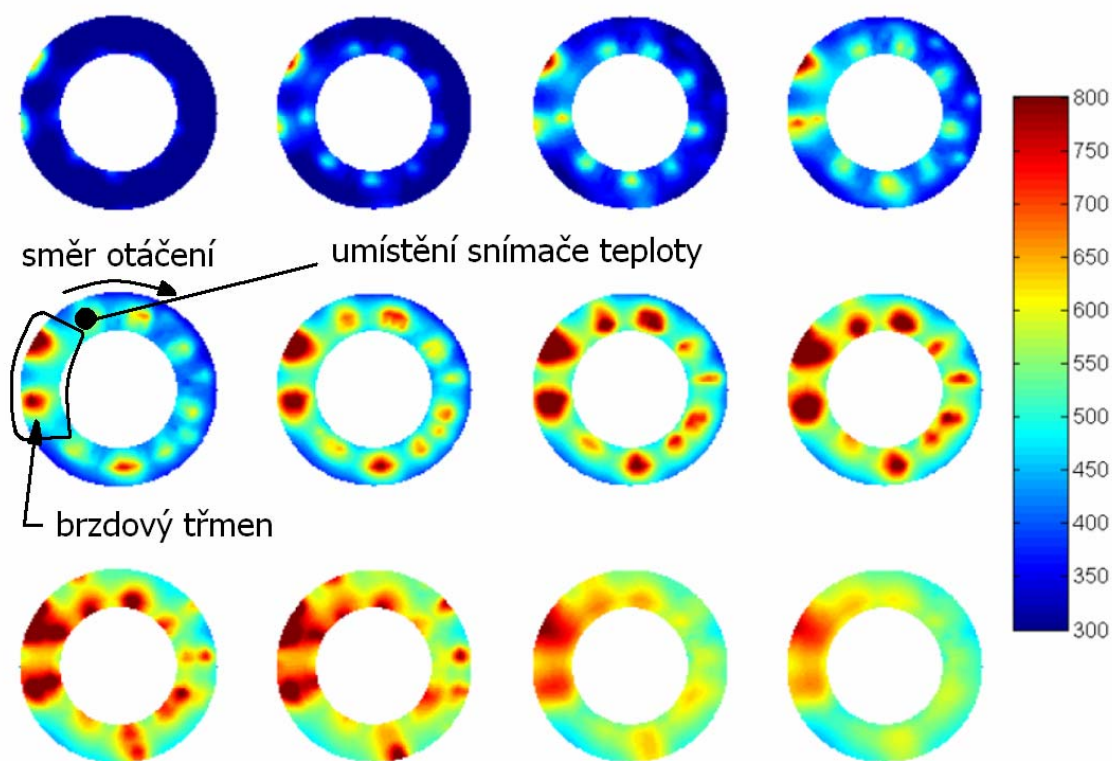
Tab. 4.4 Technické parametry data loggeru Cobra

Zápis		Komunikace	
paměť	64 Mb	CAN 1 mbps - 11 bit	2
Automaticky limit kola	3 Mb	RS232	1
Propustnost dat	40 kB/s	RS485	1
Rozsah vzorkovací frekvence	1-1000 Hz	Ethernet 10 base T / TCP/IP	1
Kanály (max. přípustné)	288	Telemetrie	
Analogové vstupy		Propustnost dat	500 Byte/sec
Tx vnitřní vstupy přes CAN	ano	rozsah	1-200 Hz
rozlišení	12 bit	Max množství kanálů	64
přesnost	± 1 LSB	Rozhraní	RS232 – 9600
vstup anti aliasing filter	500 Hz	Mechanické / elektrické	
Digitální vstupy		napájení	7-18 V DC
TTL	4	zátěž (bez senzorů)	160 mA
prahové napětí	3.35 V	Ochrana	IP67
max. frekvence	1.5 kHz	rozsah provozní teploty	40 + 85°C
doba	2 μs	náraz -50g	10 ms
přesnost	± 1 bit	chvění - 10g	1500 Hz
ON/ OFF vstupy		materiál	Al
počet	2	hmotnost	380g
detekce hrany (rostoucí / klesající)	programovatelný	box konektor	SJT00RT 0 16 35 PN

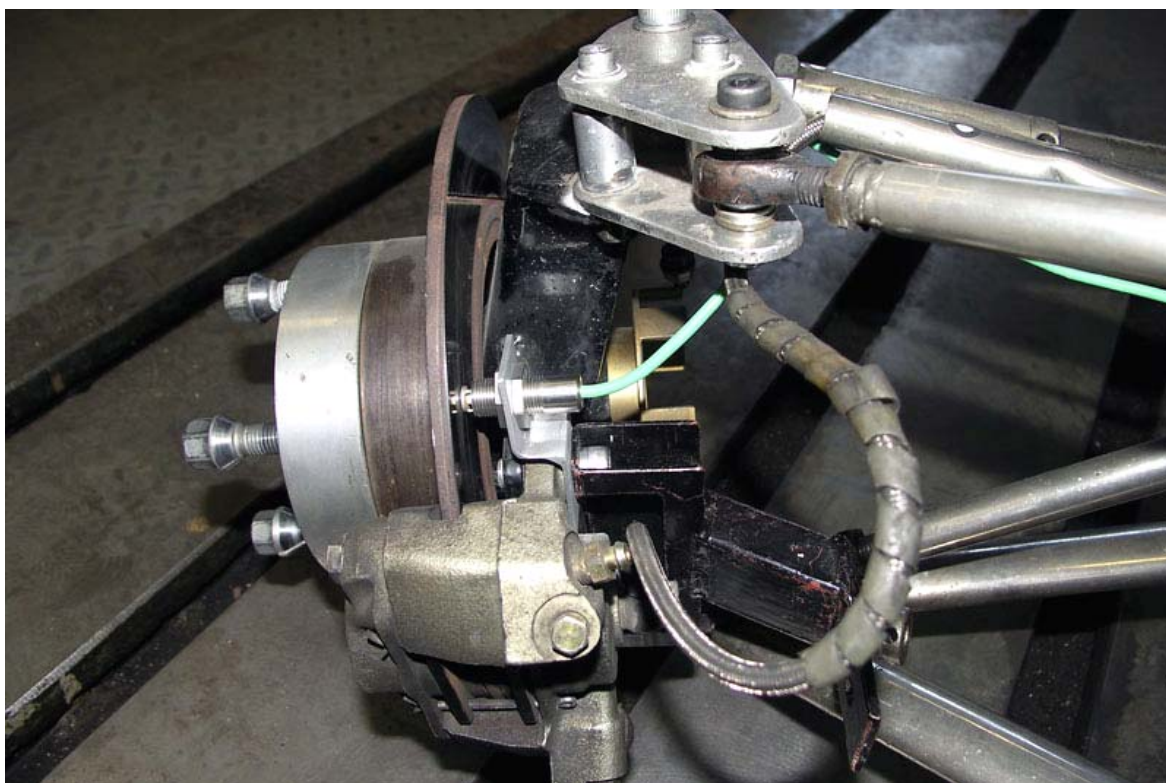
Data logger Cobra byl zapůjčen od ústavu konstruování.

5. Konstrukční návrh držáků snímačů teploty

Před vlastním měřením bylo nutné snímače umístit na vozidlo, což znamenalo navrhnout vhodné konstrukční řešení pro experimentální vozidla ÚADI. Pro běžný provoz bylo vybráno vozidlo Škoda Octavia RS druhé generace a pro speciální použití, závodní automobil formule Ford 1600. Podmínkou konstrukčního řešení, byla snadná a rychlá montáž, která by nevyžadovala další technické úpravy na vozidle. Dále bylo nutné zajistit u přední nápravy, aby se snímač natáčel spolu s kolem (kotoučem přední brzdy). Jako nejvhodnější řešení, se u obou experimentálních vozidel ukázalo, využití stávajícího konstrukčního řešení uchycení brzdového třmene, k němuž bylo snímací zařízení připevněno. Snímače pro přední kolo byly umístěny na vnitřní stranu kotouče, kde je vyšší teplota z důvodu horšího odvodu tepla do okolí. Tento jev, že se více opotřebovává vnitřní brzdové obložení i povrch kotouče, je známý i z praxe. Snímače byly uchyceny tak, aby měřil teplotu kotouče hned na výstupu z brzdíče, kde ještě není kotouč ochlazen proudem vzduchu jak je vidět z obr. 5.1, kde je znázorněno teplotní pole brzdového kotouče během brzdění. Takto umístěné snímače jsou na formuli Ford 1600 (viz obr. 5.2,5.3). U druhého experimentálního vozidla Škoda Octavia RS druhé generace, byly zadní snímače umístěny z vnější strany kotouče a to z důvodu nutných větších technických úprav na vozidle (viz obr. 5.4,5.5). Výkresy držáku jsou součástí přílohy diplomové práce.



Obr. 5.1 Ukázka teplotního pole brzdového kotouče snímaného termokamerou během brzdného testu [12]



Obr. 5.2 Držák snímače levého předního kola formule Ford



Obr. 5.3 Držák snímače pravého zadního kola formule Ford



Obr. 5.4 Držák snímače levého předního kola Škody Octavie RS



Obr. 5.5 Držák snímače levého zadního kola Škody Octavie RS

6. Měření

6.1 Kalibrace snímačů teploty

Před tím než byly termočláňkové snímače nainstalovány na zkušební vozidlo, bylo nutné udělat několik prvotních laboratorních měření, abychom ověřili správnou činnost a funkčnost snímačů. Nejprve jsme jednotlivé snímače připojili na digitální přístroj Omega HH11A, který je určen přímo pro měření teploty pomocí termočláňkových sond typu „K“ a ověřili jejich funkčnost. Zobrazené teplotní informace jsme porovnávali s měřicí ústřednou OMU 408UNI. Teplota jednotlivých snímačů zobrazená na digitálním přístroji Omega se lišila od teplot měřicí ústředny v řádu desetin z čehož vyplývá, že termočláňky měří s odchylkou stanovenou výrobcem. Dalším krokem bylo ověřit snímače připojené přes kompenzační vedení. Výsledky naměřených teplot byly stejné jako v zapojení bez kompenzačního vedení, z čehož vyplývá, že kompenzační vedení nevnáší do měřicího řetězce žádnou chybu.



Obr. 6.1 Ověření správné funkce termočláňků

6.1.1 Vliv vlastního tření snímače

Jelikož se naše měření bude provádět dotykovým způsobem, je nutné se zabývat myšlenkou, jaký vliv má na snímání teploty vlastní tření snímače. Tuto skutečnost jsme ověřili experimentálním laboratorním měřením. Do soustruhu jsme upnuli brzdový kotouč a k němu pomocí magnetického stojánu umístili snímač teploty tak, jak bude snímač umístěn i na experimentálních vozidlech. Na soustruhu jsme nastavili 560 ot/min, což odpovídalo přibližně rychlosti vozidla 60 km/h viz. výpočet. Měření jsme provedli pro tři stlačení pružiny o hodnotu 2, 4 a 6 mm což odpovídalo přitlačné síle (0.3 N, 0.8 N a 1.4 N) (viz obr. 6.2). Výsledná grafická závislost nám ukázala, že i při největším možném přitlačení snímače vzrostla teplota vlivem vlastního tření přibližně o 12 °C což je pro naší aplikaci téměř zanedbatelná chyba (viz graf 6.1). Při vlastním měření jsem nastavil snímače na druhou hodnotu přitlaku. Menší přitlačení by mohlo zapříčinit přílišné odsakování snímače od nerovností povrchu brzdového kotouče, což by mohlo způsobit větší chybu měření, než je způsobena třením snímače. Tento fakt, nám byl potvrzen i firmou TRW, kde s tímto typem

snímačem přímo měřili. Při brzdění mají odskoky a přestup tepla větší vliv, než je chyba způsobená vlastním třením snímače a ve výsledku je snímaná teplota nižší než skutečná teplota povrchu brzdového kotouče.

Výchozí parametry:

$$n = 560 \text{ ot / min}$$

$$r_d = 0,28 \text{ m}$$

$$n = 560 / 60 = 9,4 \text{ ot/s} \quad (6.1)$$

čas jedné otáčky :

$$t = 1 / n = 1 / 9,4 = 0,1064 \text{ s} \quad (6.2)$$

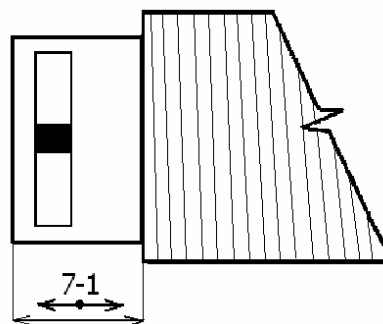
dráha kola za jednu otáčku :

$$s = 2\pi r_d = 2 * \pi * 0,28 = 1,759 \quad (6.3)$$

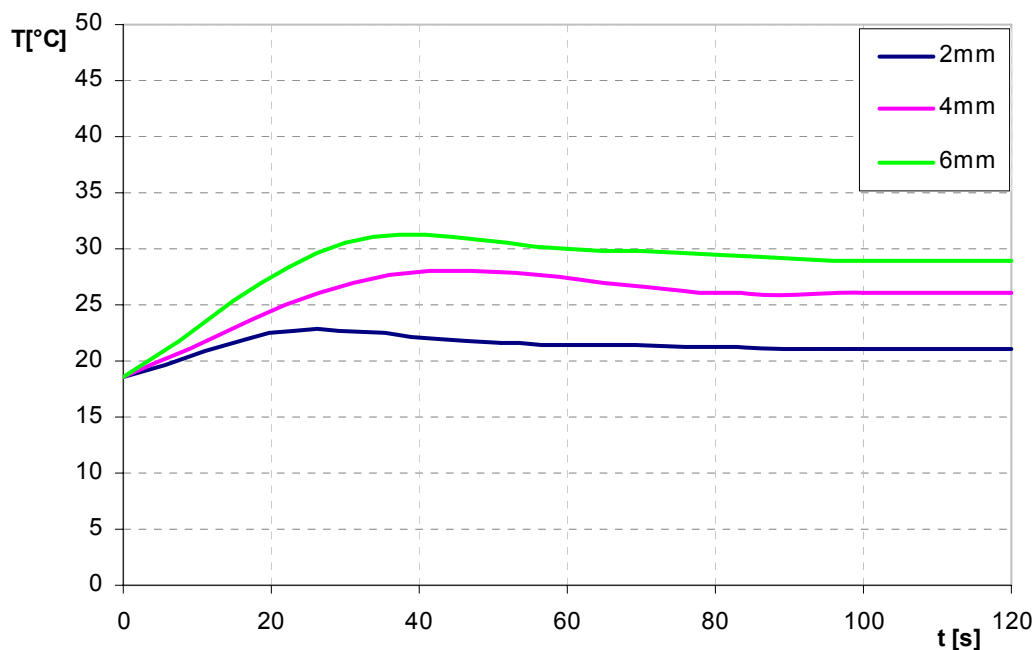
rychlost vozidla :

$$v = \frac{s}{t} = \frac{1,759}{0,1064} = 16,53 \text{ m/s} \quad (6.4)$$

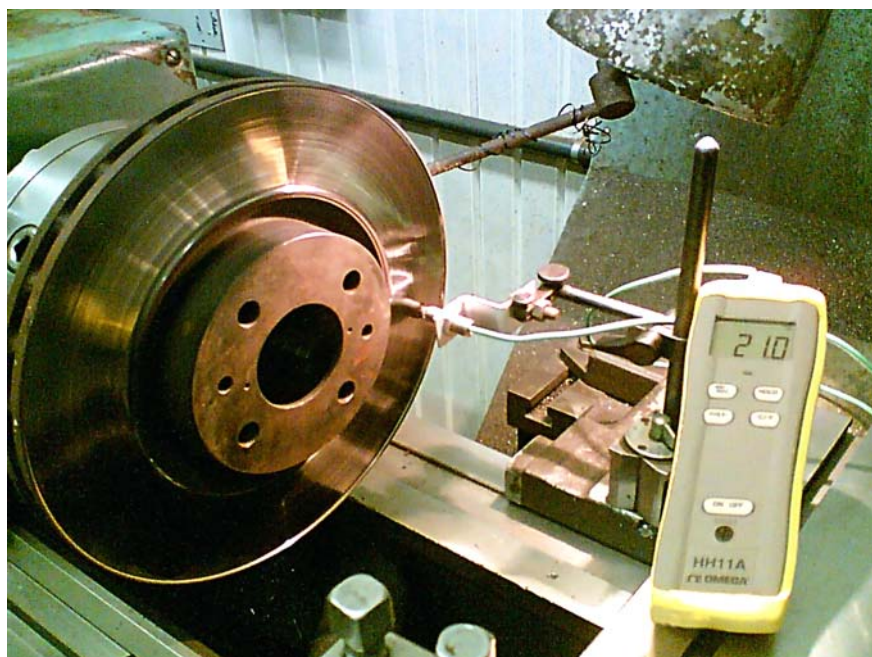
$$v = 16,53 * 3,6 = \underline{\underline{59,5 \text{ km/h}}} \quad (6.5)$$



Obr. 6.2 Nastavení přitlaku snímače



Graf 6.1 Závislost teploty, vzniklé třením snímače stlačení pružiny



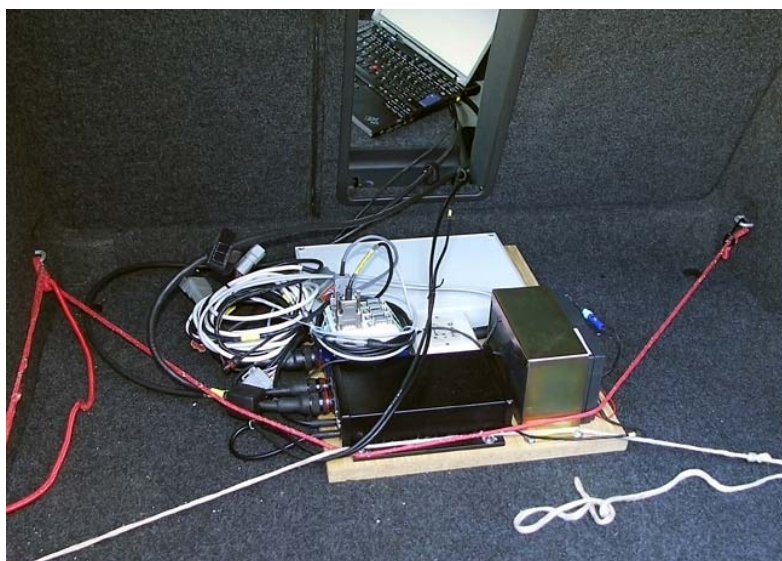
Obr. 6.3 Měření teploty vzniklé třením snímače

6.3 Jízdní zkoušky

K měření bylo použito experimentální vozidlo Škoda Octavia RS druhé generace. Na vozidlo byly připevněny snímače, jak je znázorněno v měřicím řetězci (viz kap. 4.). Na desku, která byla pevně připevněna v kufru vozidla, byla umístěna tato zařízení (viz obr. 6.4):

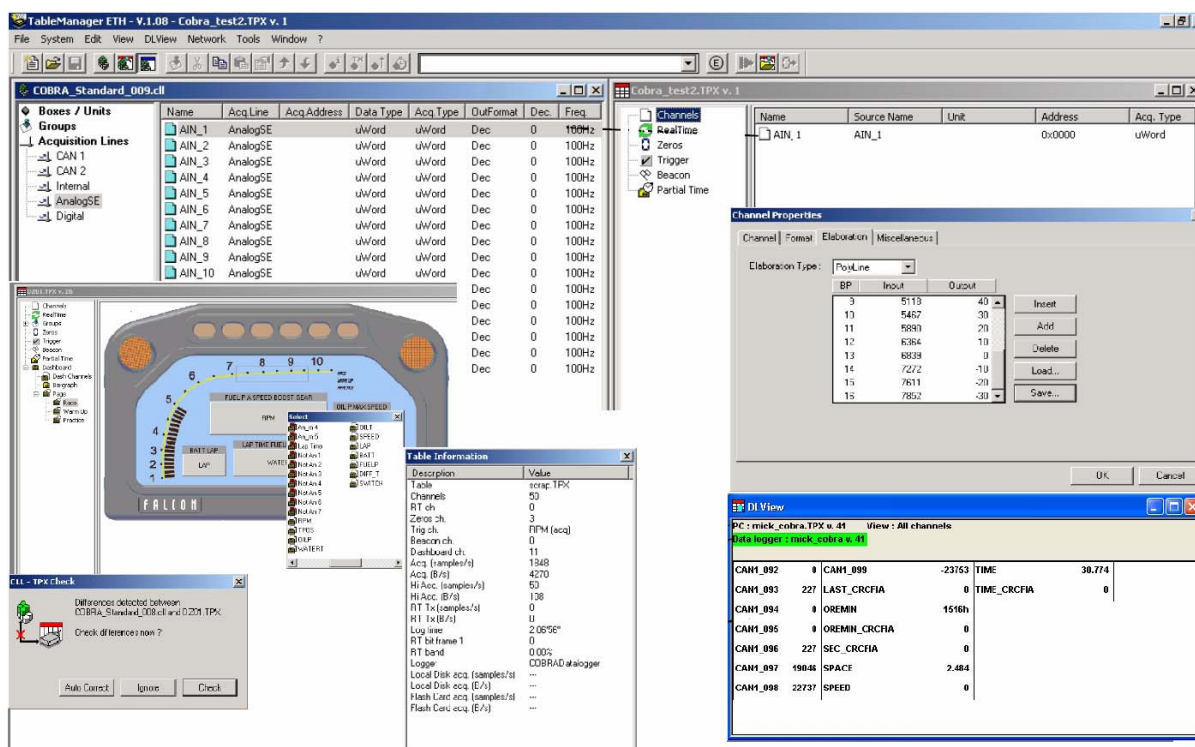
- Data logger Cobra
- 12V akumulátor
- MBOX1
- řídicí jednotka Correvitu
- CAN rozdvójka

Dírou pro lyže byl protažen dopředu na přední sedadlo dashboard Falcon, který poskytoval kontrolní informace o snímané teplotě brzd a rychlosti vozidla. Konektory pro kontrolní připojení Notebooku k data loggeru a Correvitu byly protaženy na zadní sedadlo. Pozor! Correvit se nesmí zapínat bez připojené zátěže (senzoru). Pro specifikaci vstupních dat, nastavení kanálů data loggeru a monitoring pomocí dashboardu, jsme použili program Table Manager v1.15 (viz obr. 6.5). Akcelerometry byly připojeny do data loggeru na AIN1 a AIN2, přes CAN Bus se zaznamenávala rychlost z Correvitu. Termočlánky pro snímání teploty byly připojeny do dashboardu odkud se následně přenášely data po CAN1 do data loggeru. Rychlost i zrychlení vozidla byly vzorkovány vysokou frekvencí 100Hz, teplota stačila vzorkovat frekvencí 10Hz. Jelikož jsme byli omezeni pouze dvěma převodníky termoelektrického napětí, které jsou součástí dashboardu, snímali jsme teplotu brzdových kotoučů pouze pro levé přední a levé zadní kolo.



Obr. 6.4 Zařízení umístěná na desce v kufru vozu

Pro úvodní studii, kde je cílem ověření funkce zvoleného snímání teploty, je toto zapojení postačující. V budoucnu má v plánu ústav automobilního a dopravního inženýrství rozšíření laboratorního vybavení o jednotný systém CompactRIO, který bude schopen měřit teploty na všech čtyřech kolech, plus ostatní veličiny související s jízdní dynamikou vozidla.



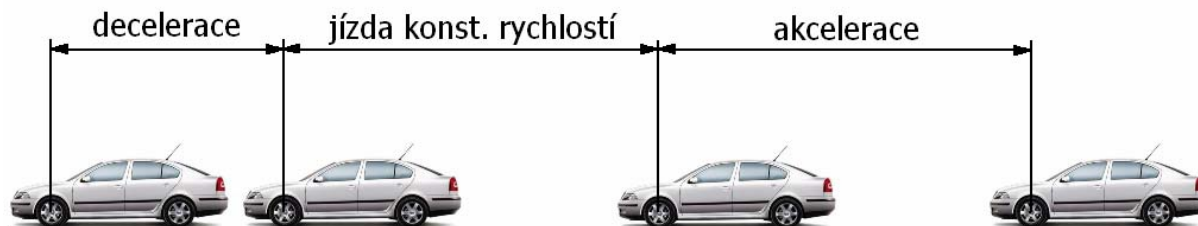
Obr. 6.5 Table Manager

Barometrické podmínky při měření : teplota vzduchu 17°C, vlhkost vzduchu: 58%,
atmosférický tlak: 996 hPa

6.3.1 Brzdný manévr (decelerace)

Měření brzdného manévru musí být navrženo s ohledem na zaručenou opakovatelnost měření. Proto zde je nutná přesná definice parametrů zkoušky. Požadavky na zkušební dráhu jsou uvedeny zde :

- dostatečně dlouhý měřicí úsek (závisí na zvolené nájezdové rychlosti)
- povrch dráhy čistý suchý asfalt s dobrou adhezí
- rovný úsek se sklonem maximálně 2,5 %
- úsek chráněný proti silnému bočnímu větru, maximální rychlost větru 5 m/s



Obr. 6.6 Průběh měření decelerace

Na obr. 6.6 jsou znázorněny jednotlivé etapy při provádění brzdného manévru. Měření lze rozdělit na tři části. V prvním úseku se stojící vozidlo rozjíždí a akceleruje na předem definovanou rychlost. Po dosažení požadované nájezdové rychlosti pokračuje k vyznačené čáře konstantní rychlosti. Poslední úsek začíná čarou udávající počátek brzdění, od které vozidlo deceleruje s co možná největším zpomalením. Tuto zkoušku provedeme opakovaně pro různé nájezdové rychlosti.

6.3.2 Výběr zkušební dráhy

Původní plán, kdy měly jízdní zkoušky probíhat na Masarykově okruhu v Brně, jsme museli pozměnit z důvodu opravy stávajícího povrchu. Jelikož naše experimentální vozidlo nemá oprávnění jezdit po veřejných komunikacích, bylo nutné se zabývat otázkou, kde brzdný manévr realizovat. Nakonec jsme rozhodli po dohodě s vedoucím diplomové práce využít prostor v areálu FSI VUT Brno. Jde o prostor za budovou C (viz obr. 6.7). Zvolená dráha splňuje požadavky, na provedení měření brzdného manévru, stanovené předchozí kapitolou, pro maximální nájezdovou rychlost 60km/h.



Obr. 6.7 Zkušební úsek pro brzdný manévr

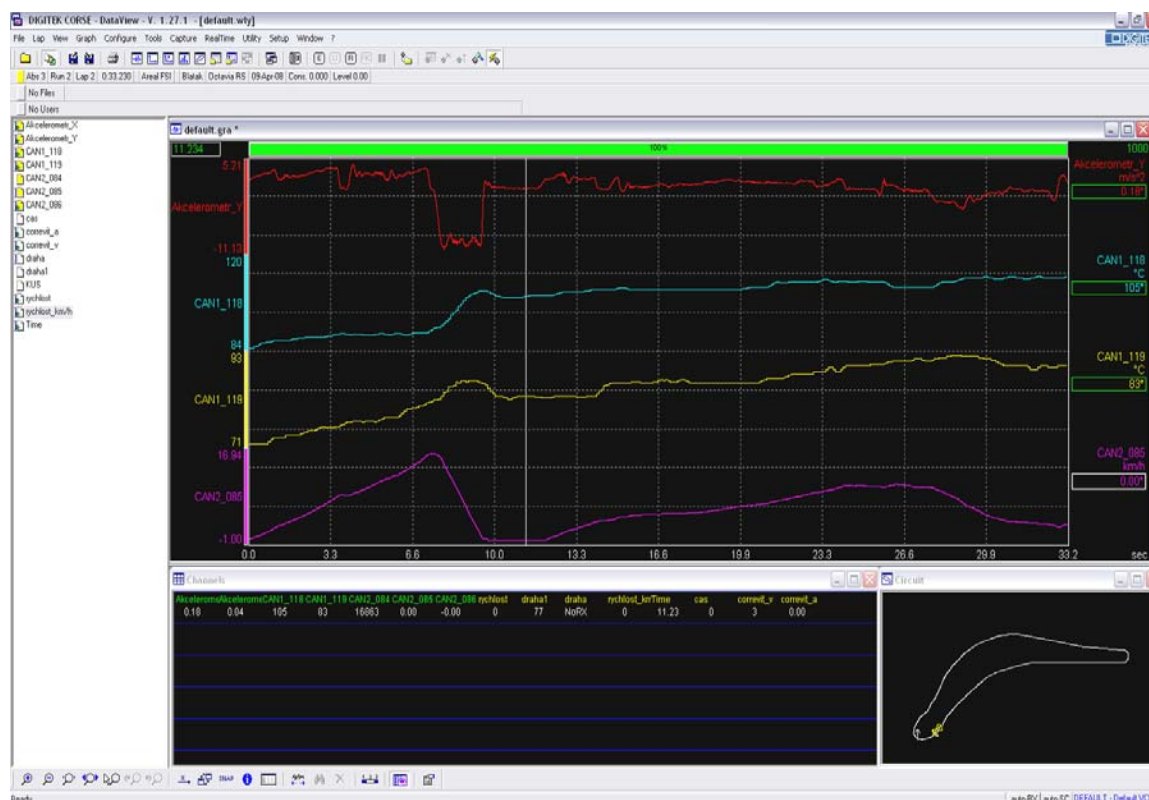
6.3.2 Popis vlastního měření

Jelikož jsme měření prováděli v areálu FSI VUT, museli jsme zabezpečit měřicí úsek, tak aby nemohlo dojít ke zranění osob a škodě na majetku. To jsme provedli rozmístěním poučených osob z řad pracovníků VUT. Před zahájením vlastního měření brzdného manévru se nejprve provedlo pár jízd, kde se zkalibrovala data z Correvitu a zkontrolovaly se termočláanky. Teplota brzd se porovnávala s hodnotami zobrazenými na dashboardu a z dotykového teplotního čidla Omega HH11A. Hodnoty seděly. Po té se provedlo několik rozjezdů na rychlost 60 km/h a zastavení s maximální intenzitou brždění. Protože byla rychlost příliš nízká, brzdy se zahřály pouze na 130°C. Proto se provedlo „umělé zahřátí brzd“ pomocí zároveň sešláplého brzdového a plynového pedálu. Tím se brzdy ohřáli na 285°C a po té jsme provedli ještě jedno zastavení z rychlosti 60 km/h. Před ukončením měření jsme ještě sledovali chladnutí brzd při rychlosti 15 km/h a v klidovém stavu vozidla.

6.4 Vyhodnocení jízdní zkoušky

6.4.1 Program pro zpracování dat

Tato část diplomové práce nesouhlasí přímo se zadáním dle třetího bodu. V době kdy se zadání zadávala, nebylo ještě zřejmé jak se bude teplota snímat a jelikož termočlánek není možné připojit přímo k měřicí kartě, kterou má ÚADI k dispozici, zvolila se pro ověření úvodní studie měření teploty možnost zapůjčení měřicího systému z ústavu konstruování, kde je využíván pro zpracování naměřených dat software Data View 1.4. Dalším aspektem pro zapůjčení měřicího systému byl fakt, že ÚADI uvažuje do budoucna o pořízení nového systému CompactRio od National Instruments, kde bude program pro sběr dat řešen profesionálně, přímo pro konkrétní systém.



Obr. 6.8 Data View 1.4

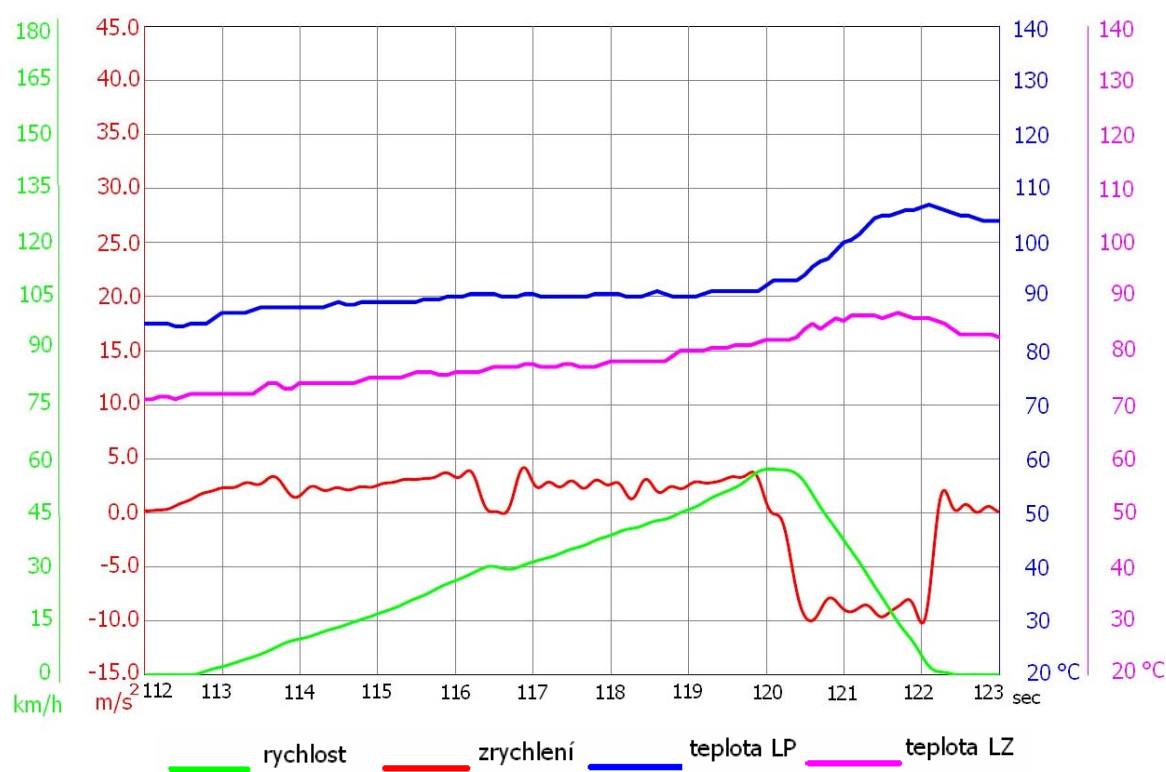
Data View 1.4 je software pro analýzu dat na vyšší úrovni, určený pro data logger Cobra, dále je použitelný pro kontrolu telemetrie v reálném čase a export dat. Data View 1.4 nabízí širokou škálu informací a možností práce s daty. Kromě reálných měřicích kanálů lze nakonfigurovat i virtuální kanály. Tuto možnost jsem využil a pomocí derivace kanálu podélné složky rychlosti (CAN2_85), kterou jsme snímali pomocí Correvitu, byl vytvořen virtuální kanál podélného zrychlení. Tento virtuální kanál jsem použil pro porovnání se složkou podélného zrychlení M-Boxu. Další zajímavostí tohoto programu je funkce pro vykreslení tratě z naměřených údajů (podélného a příčného zrychlení, rychlosti vozidla a dráhy) viz obr. 6.8.

6.4.2 Vyhodnocení brzdného manévru

Měření proběhlo podle parametrů uvedených v kapitole 6.3.1. Uskutečnilo se několik rozjezdů na rychlost 60km/h a provedl se brzdný manévř s maximální zpomalením na hranici blokování kol, kterou kontroloval systém ABS. Z grafů 6.2 - 6.5 jsou patrné následující průběhy závislé na čase:

- rychlost
- zrychlení - (Akcelerometr_y)
- teplota levého předního kola - (CAN1_118)
- teplota levého zadního kola - (CAN1_119)

Jelikož jsou všechny čtyři grafy brzdného manévru srovnatelné, popíšu detailně pouze brzdný manévř č.1. Z časového úseku (112s – 116s) je patrná akcelerace vozidla z nulové rychlosti s přibližně konstantním zrychlením 3m/s^2 . V čase (116s - 117s) je vidět přechod z prvního rychlostního stupně na druhý, je to doprovázeno klesnutím zrychlení, až na 0 hodnotu a konstantní rychlostí 30km/h. Časový úsek (117s – 120s) reprezentuje pokračování akcelerace, až do dosažení rychlosti 60km/h, což se nám nepodařilo pokaždé přesně dodržet. Po té následuje krátký okamžik jízdou konstantní rychlostí a v čase 120.5s přichází decelerace s maximálním možným zpomalením. Do této doby je na teplotách přední i zadní brzdy patrný pouze vliv vlastního tření snímače a tření brzdového obložení, který se během akcelerace projeví nárůstem teploty přibližně o 10°C jak na předním, tak i na zadním brzdovém kotouči. V časovém úseku (120.5s – 122s) probíhá decelerace s brzdným účinkem 8.86 m/s^2 . Přední brzdový kotouč se zahřál na teplotu 106°C a zadní na teplotu 86°C . V časovém úseku (122s – 123s) můžeme pozorovat zakmitání signálu akcelerometru, to je způsobeno dynamickým účinkem („zhoupnutím“) vozidla při zastavení. Hodnoty min/max/avg, pro jednotlivé měřené veličiny, jsou uvedeny pro každý brzdný manévř v tabulce pod grafem. Pro porovnání teplotních přírůstků jednotlivých zastavení, jsem vytvořil tabulku 6.1 a výsledek znázornil v grafu 6.6. Z grafu jsou patrné větší přírůstky teploty pro přední brzdový kotouč, což vyplývá z konstrukce automobilu s motorem v předu, kde jsou umístěny účinnější brzdy na přední nápravu. Teplotní přírůstky se pohybují v průměru okolo 20°C pro přední brzdový kotouč a 14°C pro zadní. Je to dáno malou nájezdovou rychlostí, kterou jsme bohužel nebyli schopni v námi vybraném měřicím prostoru ovlivnit.

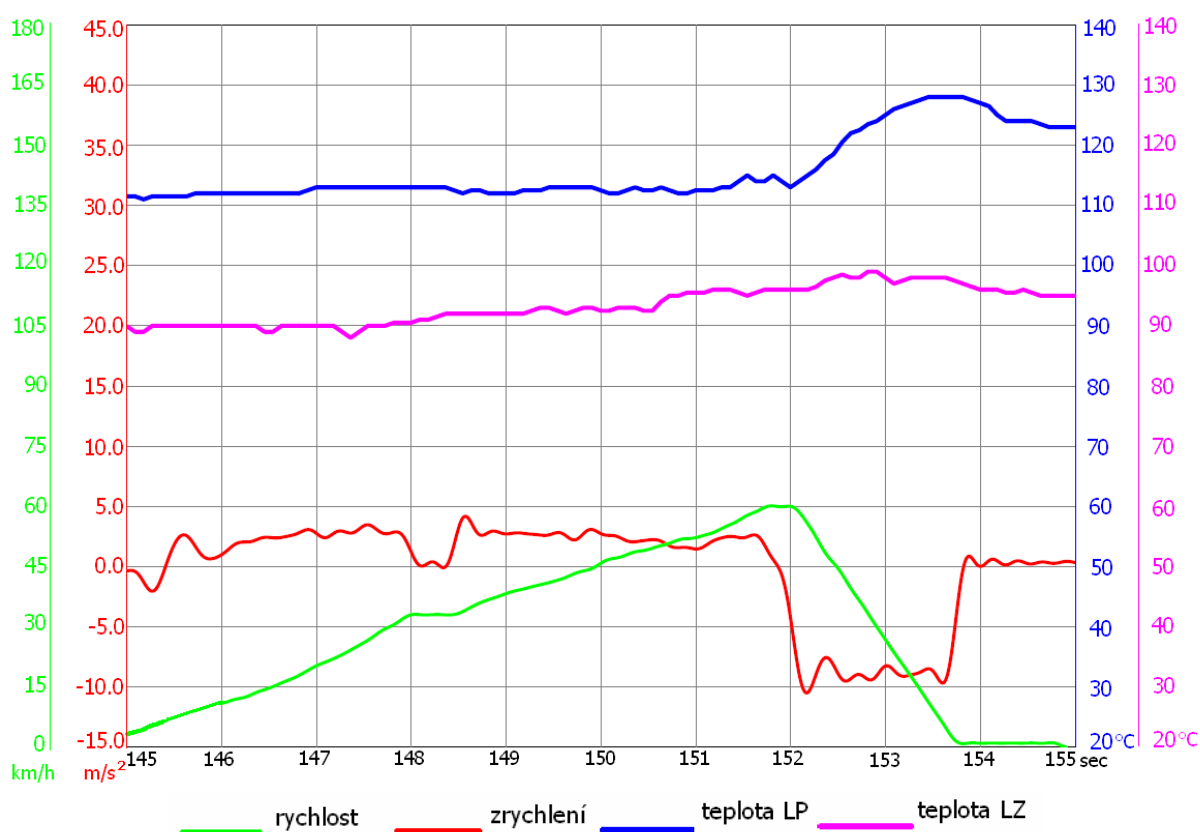


Graf 6.2 Brzdňý manévr č.1

Hodnoty min/max pro měření č.1 :

Time range: 1:52.397 .. 2:02.512

Name	Min	Min ×	Max	Max ×	Avg
Akcelerometr_Y	-4.38	1:56.907	10.22	2:02.057	-0.28
CAN1_118	85	1:52.397	106	2:01.997	92
CAN1_119	72	1:52.397	86	2:01.397	78
rychlost	-0	1:52.497	57	2:00.157	27

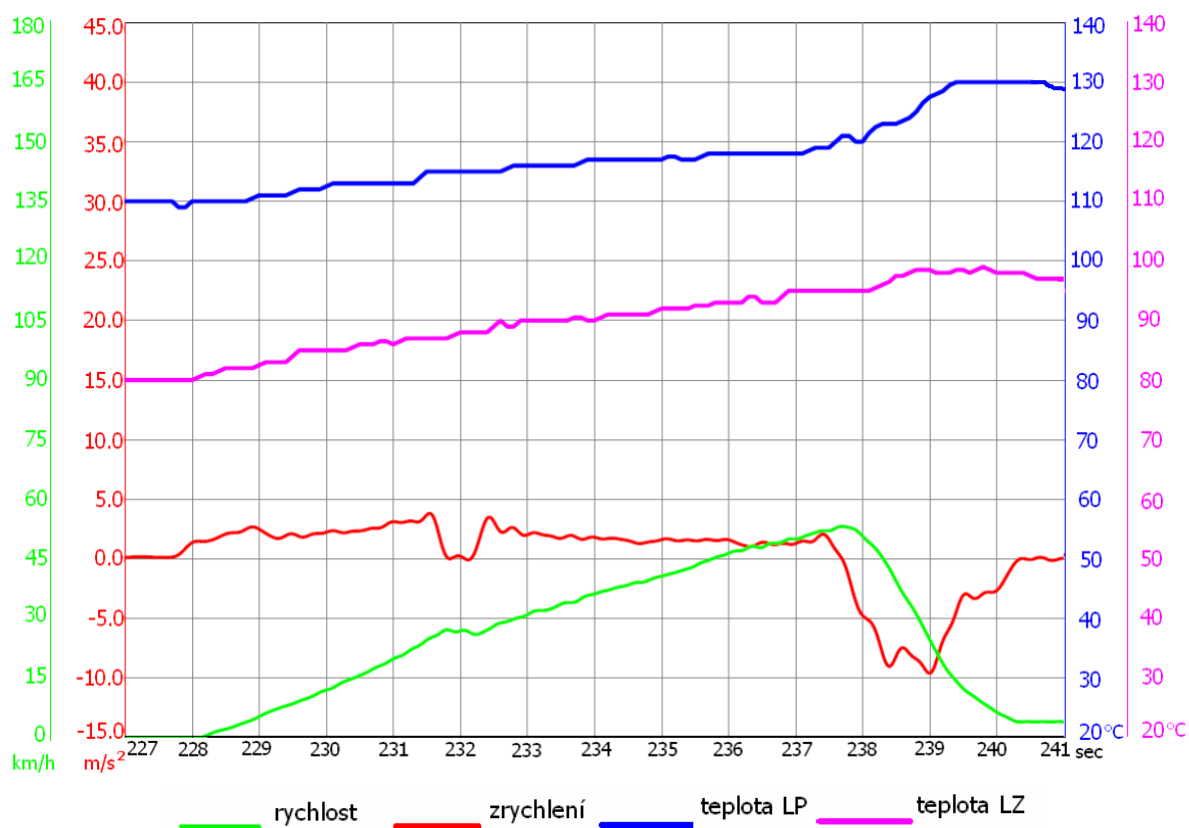


Graf 6.3 Brzdňý manévř č.2

Hodnoty min/max pro měření č.2 :

Time range: 2:25.180 .. 2:35.206

Name	Min	Min X	Max	Max X	Avg
Akcelerometr_Y	-4.70	2:28.950	10.60	2:32.900	0.16
CAN1_118	111	2:25.280	128	2:34.580	115
CAN1_119	90	2:27.180	98	2:33.680	93
rychlost	1	2:34.780	60	2:32.610	32

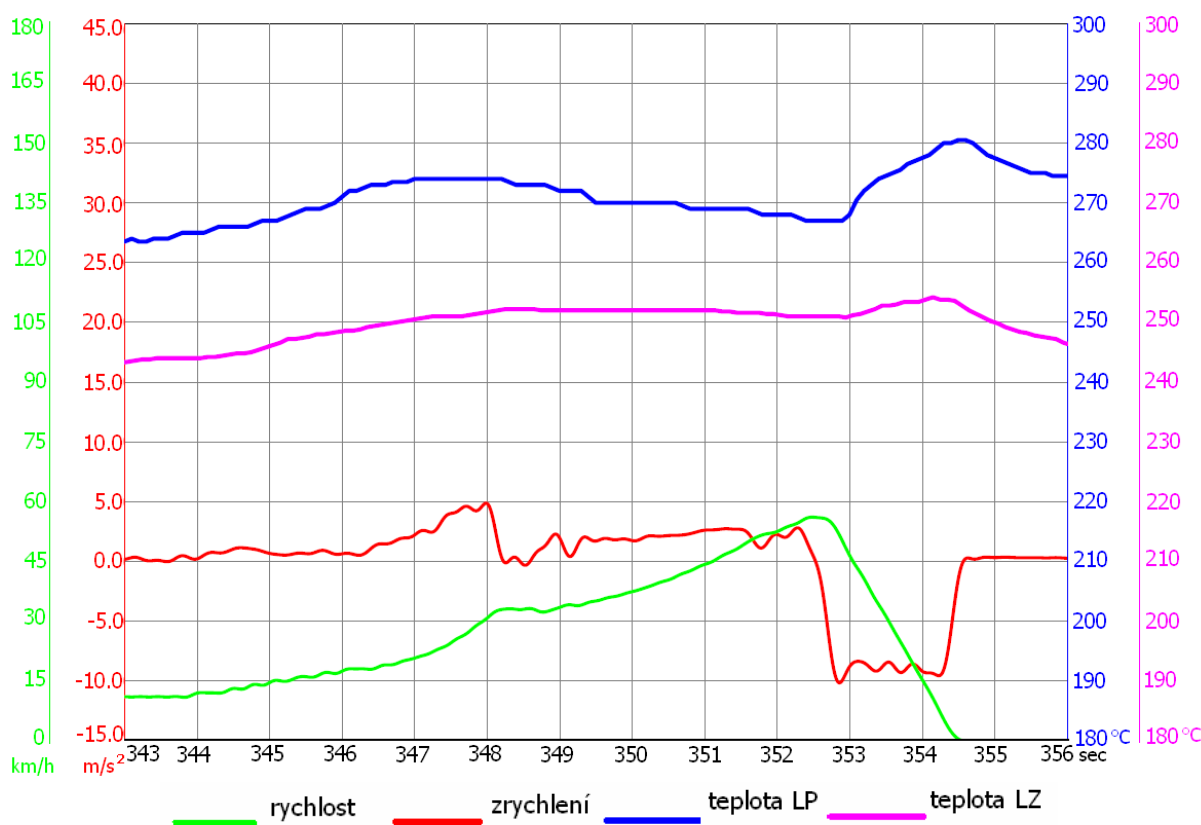


Graf 6.4 Brzdný manévr č.3

Hodnoty min/max pro měření č.3 :

Time range: 3:46.471 .. 4:07.386

Name	Min	Min X	Max	Max X	Avg
Akcelerometr_Y	-3.81	3:52.461	9.79	3:59.011	-0.29
CAN1_118	110	3:47.471	135	4:07.371	122
CAN1_119	80	3:47.471	103	4:06.971	93
rychlost	-0	3:47.991	53	3:57.721	20



Graf 6.5 Brzdňý manévř č.4

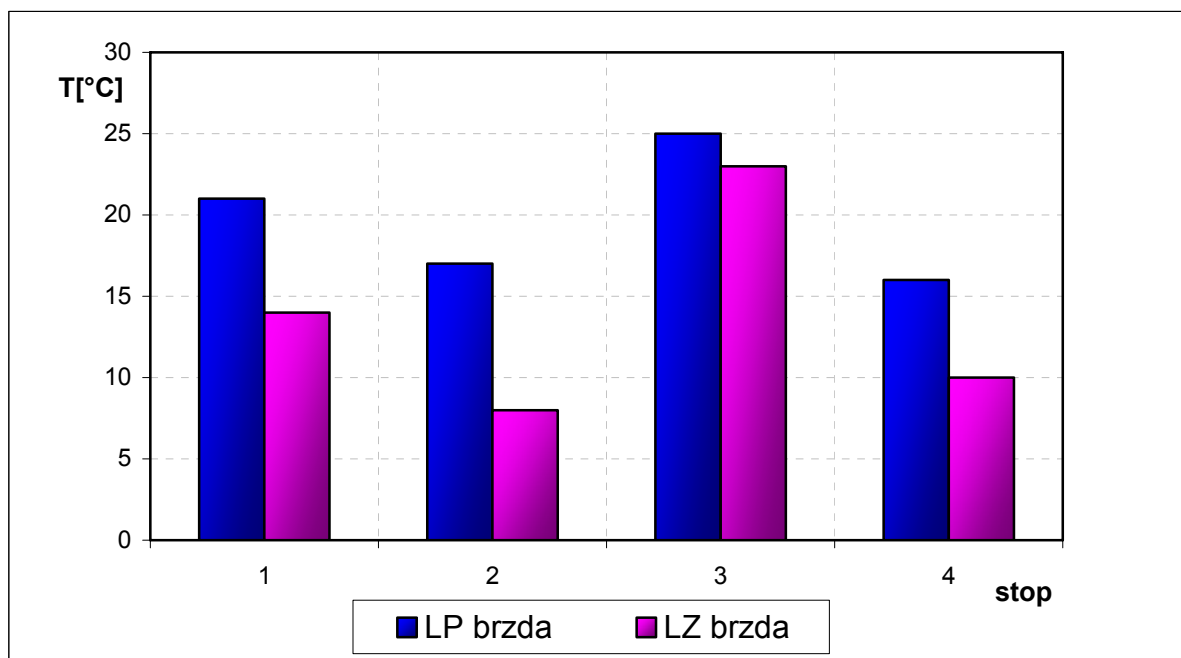
Hodnoty min/max pro měření č.4 :

Time range: 5:42.994 .. 6:00.323

Name	Min	Min X	Max	Max X	Avg
Akcelerometr_Y	-4.82	5:48.024	10.28	5:52.864	-0.24
CAN1_118	263	5:42.994	279	5:54.594	272
CAN1_119	243	5:42.994	254	5:53.994	249
rychlost	-0	5:54.644	56	5:52.564	21

Tab. 6.1 Vyhodnocení brzdňého manévřu

č. měření	snímač	T min	T max	ohřev	Zrychlení M-Box m·s ⁻²
		°C	°C	°C	
1. měření	LP kolo	85	106	21	-8,91
	LZ kolo	72	86	14	
2. měření	LP kolo	111	128	17	-8,90
	LZ kolo	90	98	8	
3. měření	LP kolo	110	135	25	-8,40
	LZ kolo	80	103	23	
4. měření	LP kolo	263	279	16	-8,99
	LZ kolo	244	254	10	

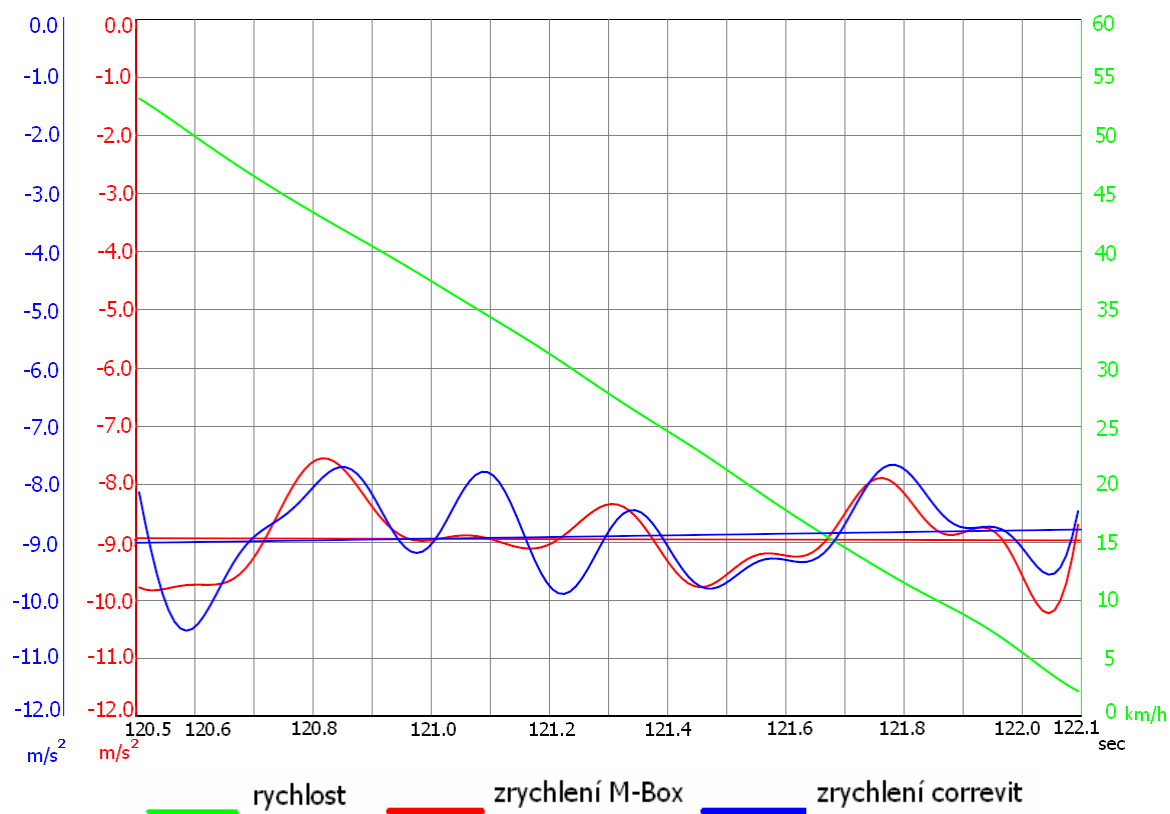


Graf 6.6 Porovnání přírůstků teplot pro jednotlivá zastavení

6.4.3 Porovnání M-Box/Correvit

V této části vyhodnocení jsme se rozhodli pro porovnání dvou měřících zařízení a to M-boxu, který snímá akceleraci vozidla a Correvitu, který měří směrovou úchylku vozidla. Abychom mohli porovnání uskutečnit, bylo nutné derivovat naměřené hodnoty rychlosti. Tím jsme získali hodnoty zrychlení, které jsme po té mohli porovnat s hodnotami z M-boxu. Dále bylo ještě nutné oba signály vyfiltrovat, aby tím nebylo porovnání zkresleno, použil jsem na hodnoty z obou měřících zařízení stejnou filtraci a to FFT dolní propust 5Hz. Tyto filtrované hodnoty jsou vykresleny v grafu 6.7 a 6.8. Jak je z obou grafů na první pohled patrné, obě metody měření se téměř shodují, což je vidět i ze středních hodnot zrychlení, které jsou vypsané pod grafem. Rozdíl středních hodnot, který činí pro první měření $0,4\text{m/s}^2$ a pro druhé měření $0,7\text{m/s}^2$, je způsoben dynamickým projevem setrvačných hmot automobilu při brzdění, kdy se automobil nakloní. Tento náklon se projeví chybou měření M-boxu, kde se promítne do výsledného zpomalení i tíhové zrychlení, proto je střední hodnota zrychlení z M-boxu vyšší než u Correvitu. Na základě tohoto faktu by se dala metoda derivace rychlosti z Correvitu považovat za přesnější.

Důvod této zkoušky byl prostý a to snížit počet měřících zařízení, která se musí instalovat při měření na vozidlo. Tuto úsporu, by jsme nejvíce uvítali, při měření s experimentálním vozidlem ÚADI formulí Ford 1600. Pro určení lepší vypovídací schopnosti (přesnosti) měřících zařízení, by bylo vhodné tyto dvě metody porovnat ještě s třetí metodou, jako je např. systém GPS.

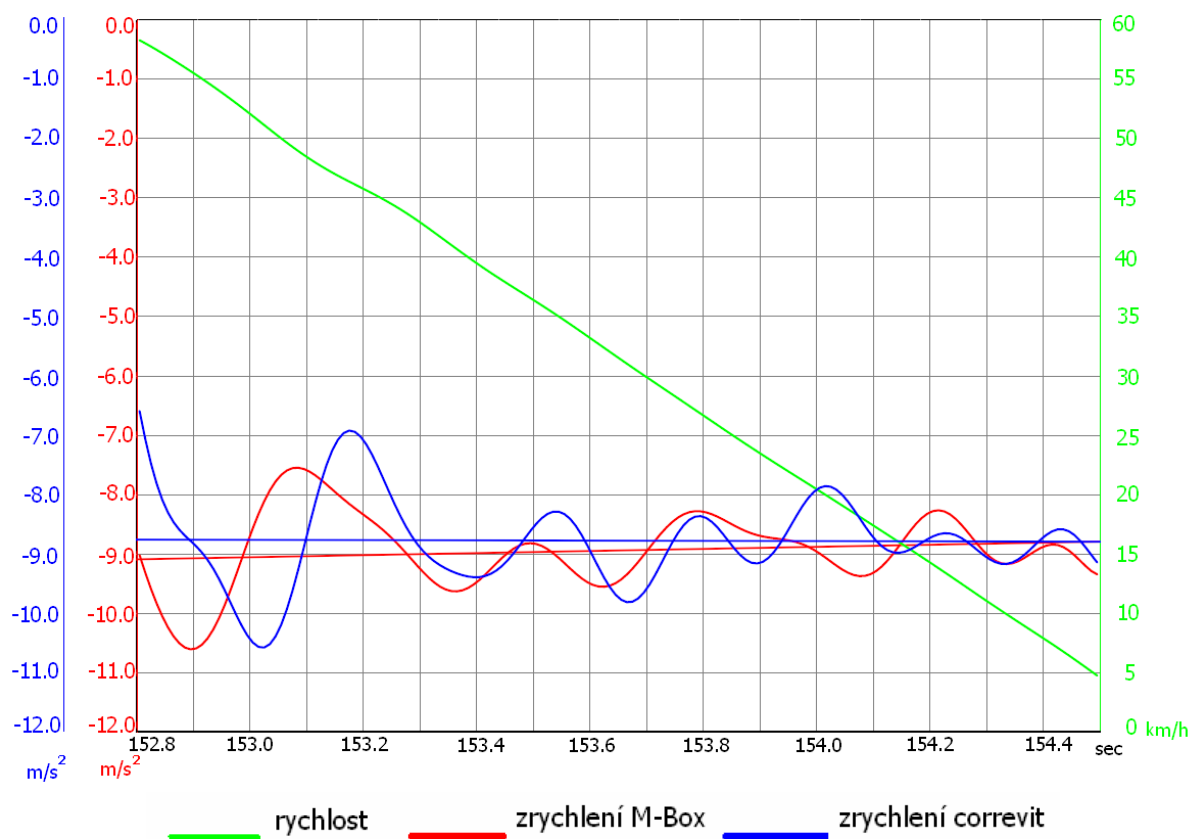


Graf 6.7 Porovnání hodnot zrychlení pro měření č.1

Hodnoty min/max/avg pro měření č.1

Time range: 2:00.589 .. 2:02.117

Name	Min	Min X	Max	Max X	Avg	Avg(abs)
Akcelerometr_Y	-10.22	2:02.059	-7.55	2:00.829	-8.91	8.91
correvit_a	-10.52	2:00.599	-7.67	2:01.799	-8.87	8.87



Graf 6.8 Porovnání hodnot zrychlení pro měření č.2

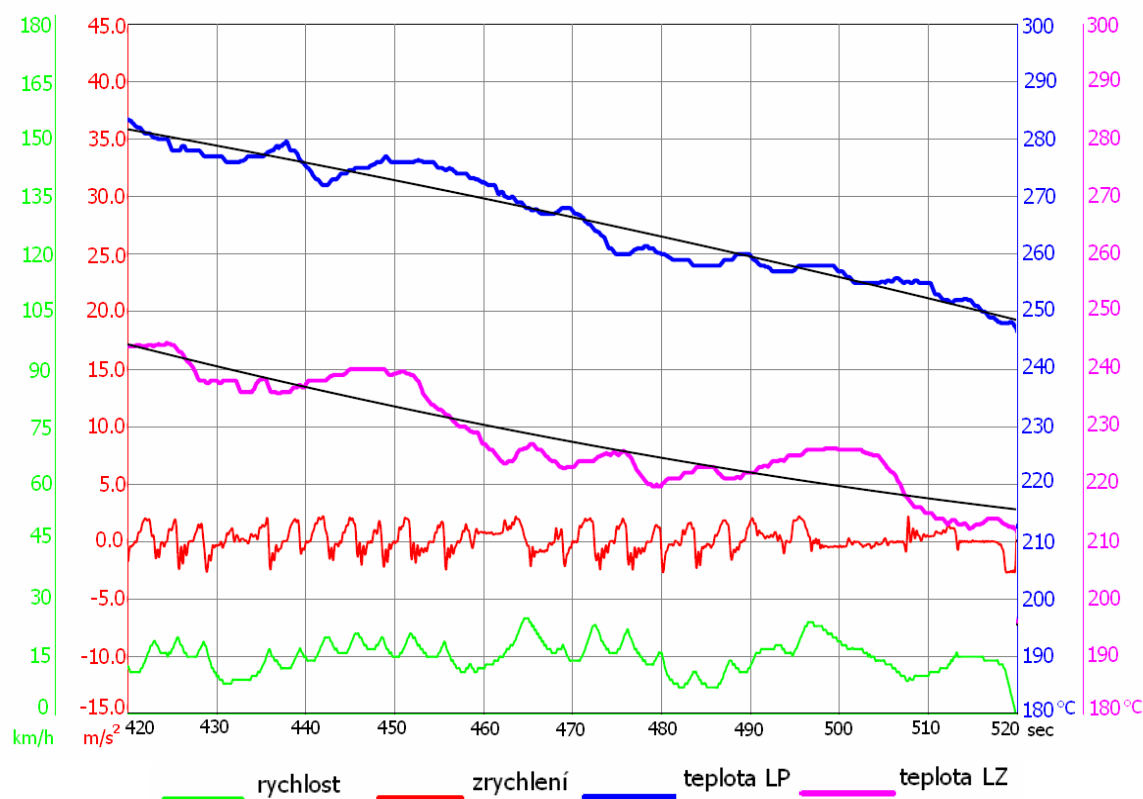
Hodnoty min/max/avg pro měření č.2

Time range: 2:32.894 .. 2:34.560

Name	Min	Min X	Max	Max X	Avg	Avg(abs)
Akcelerometr_Y	-10.60	2:32.904	-7.54	2:33.094	-8.90	8.90
correvit_a	-10.57	2:33.034	-6.92	2:33.184	-8.83	8.83

6.4.4 Průběh chladnutí brzd

V samotném závěru měření, jsme ještě sledovali průběh chladnutí brzd. Nejprve za jízdy vozidla a posléze v klidovém stavu. Tyto hodnoty jsem vynesl do grafů 6.9 a 6.10. Průběhy jsem proložil spojnicí trendu a nechal vypsát rovnice regrese pro jednotlivé průběhy. Z rovnic přímky, které jsou vypsány pod příslušnými grafy, je vidět větší klesající charakter pro chladnutí za jízdy. Tento výsledek je shodný se skutečností, kdy je kotoučová brzda za jízdy chlazena navíc proudem vzduchu.

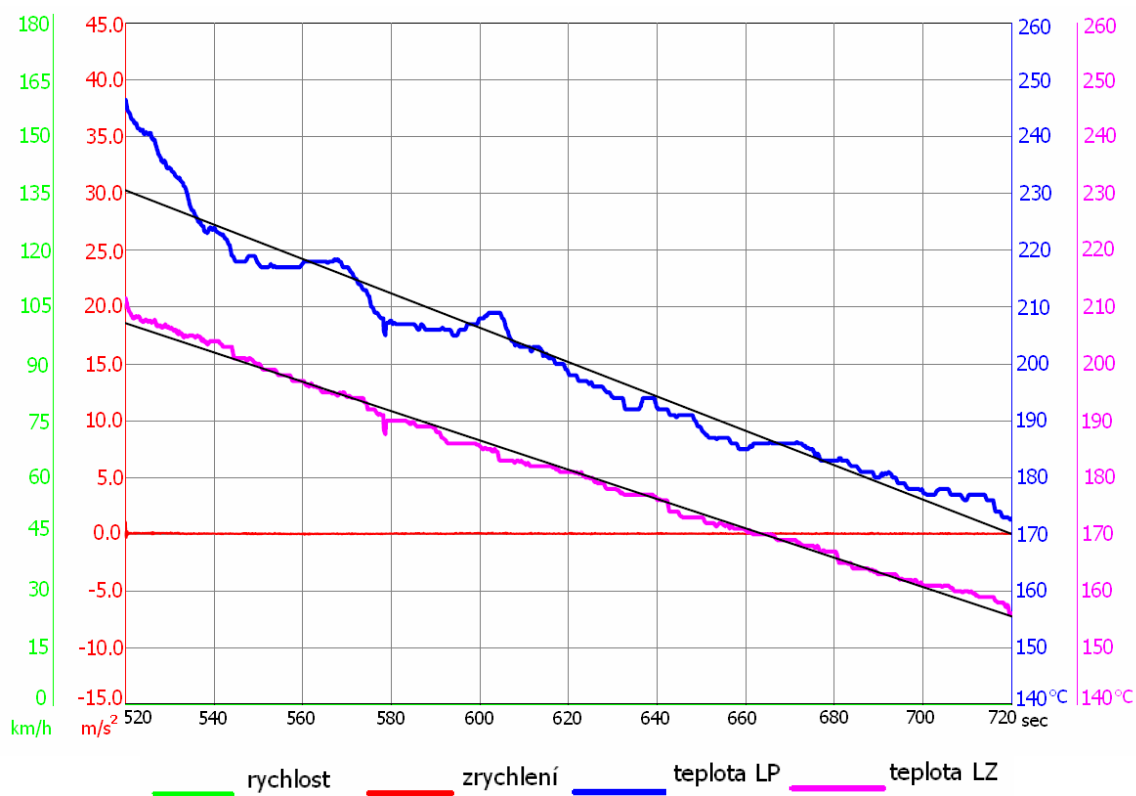


Graf 6.9 Průběh chladnutí brzd za jízdy

Rovnice regrese:

Pro levé přední kolo : $y = -0,3077x + 410,77$

Pro levé zadní kolo : $y = -0,2857x + 362,86$



Graf 6.10 Průběh chladnutí brzd v klidovém stavu vozidla

Rovnice regrese:

Pro levé přední kolo : $y = -0,3x + 386$

Pro levé zadní kolo : $y = -0,275x + 351,5$

7. Závěr

V závěrečném shrnutí je v první řadě třeba zdůraznit, že hlavní cíle, které byly stanoveny zadáním této práce, se podařilo splnit. Podařilo se komplexně zmapovat problematiku snímání teploty brzdového kotouče za jízdy.

Pro náš případ měření teploty, byl vybrán dotykový termočlánekový snímač. Dále následovalo konstrukční řešení upevnění snímače na experimentální vozidlo ÚADI a to na Škodu Octavii RS a závodní automobil formuli Ford 1600. Je však velká škoda, že jsem nemohli využít pro měření formuli z důvodu rekonstrukce povrchu na Masarykově okruhu. Měření na formuli slibovalo dosažení zajímavějších výsledků oproti sériovému vozu. Měřicí řetězec byl nainstalován na vozidlo Škoda Octavia RS a otestována jeho funkčnost. Po té bylo provedeno několik jízdních zkoušek decelerace s maximálním zpomalením, které se pohybovalo okolo 8.9 m/s^2 . Brzdňý manévr se provedl pro nájezdovou rychlost 60 km/h. Bohužel pro získání lepších teplotních závislostí, byla tato rychlost příliš nízká a proto jsme zaznamenali největší teplotní nárůst pouze 25°C. Nízká nájezdová rychlost byla z důvodu výběru náhradního zkušebního úseku v areálu FSI VUT.

Dále se provedlo porovnání dvou měřících zařízení a to M-boxu a Correvitu. Porovnání se provedlo z důvodu snížení počtu měřících zařízení instalovaných na vozidle. Tuto úsporu, by jsme nejvíce uvítali, při měření s experimentálním vozidlem ÚADI formulí Ford 1600. Jako přesnější se jeví měření pomocí Correvitu, který není zatížen chybou náklonu vozidla při brzděném manévru. Pro určení lepší vypovídací schopnosti (přesnosti) měřících zařízení, by bylo vhodné tyto dvě metody porovnat ještě s třetí metodou, jako je např. systém GPS.

Vhodnost navrženého snímání teploty je spíše pro oblast motorsportu, jelikož je tento způsob snímání zatížen hned několika chybami a to vlastním třením, odskoky od nerovností povrchu kotouče a v neposlední řadě tepelnými přechody. Jelikož teplota brzd není žádná aktivní veličina, není nutné ji snímat s přesností na stupně. V motorsportu je důležitý monitoring teploty brzd z hlediska následně se měnícího koeficientu tření. Pro tyto účely je tento způsob měření vyhovující.

Je nutno podotknout, že se jednalo o úvodní studii této problematiky a hlavním úkolem, bylo ověřit funkčnost navrženého snímání teploty, což se podařilo. V řešené problematice se stále najdou oblasti, které by bylo vhodné dále rozvíjet. Jednou z nich je provedení většího počtu měření, pro vyšší nájezdové rychlosti, aby byl patrný moment, kdy se začne snižovat koeficient tření a brzdy začnou „vadnout“. Dále by bylo zajímavé do měřícího řetězce zařadit měření tlaku v brzdové soustavě. Tím by se nám otevřela další zajímavá možnost porovnání, jak se v závislosti měnícího se koeficientu tření, mění potřeba vyvinutí tlaku v brzdové soustavě, pro dosažení stejného brzděného momentu.

Jak je již výše uvedeno, základy snímání teploty brzdového kotouče za jízdy byly úspěšně položeny, zbývá stále ještě dost úkolů ke zpracování do budoucna.

Seznam použitých zdrojů

- [1] VLK, F. Dynamika motorových vozidel. ISBN 80-234-5273-6, Brno 2000.
- [2] VLK, F. Zkoušení a diagnostika motorových vozidel. ISBN 80-238-6573-0, Brno 2000.
- [3] VLK, F. Podvozky motorových vozidel. ISBN 80-238-5274-4, Brno 2000.
- [4] OMEGA ENGINEERING <http://www.omegaeng.cz/>
- [5] STODOLA, J. : Sylaby k přednáškám Diagnostika motorových vozidel. Brno, 2003
- [6] BLAŽÁK, O.: Sylaby k přednáškám Diagnostika motorových vozidel. Brno, 2008
- [7] KREIDL, M.: Měření teploty, ISBN 80-7300-145-4 , BEN technická literatura 2005 .
- [8] <http://www.mmcompsys.com>
- [9] <http://www.renovak.cz/>
- [10] <http://cs.wikipedia.org/>
- [11] <http://www.rawet.cz/>
- [12] <http://www.ttp.zcu.cz/>
- [13] <http://www.michsci.com>
- [14] <http://www.measure.feld.cvut.cz>
- [15] <http://www.corrsys-datron.com>

Seznam použitých zkratek a symbolů

a	$[m/s^2]$	zrychlení
n	$[ot/min]$	jmenovité otáčky
r_d	$[m]$	dynamický poloměr kola
s	$[m]$	dráha
M_B	$[Nm]$	brzdňý moment
N	$[N]$	normálová síla
K	$[N]$	působící síla
r	$[m]$	poloměr
t	$[sec]$	čas
Δt	$[-]$	rozdíl teplot po a před zahřátím
t_t	$[^{\circ}C]$	teplota tělesa
t_o	$[^{\circ}C]$	vztažná teplota
t_m	$[^{\circ}C]$	teplota v místě měřicího spoje
t_s	$[^{\circ}C]$	teplota v místě srovnávacích spojů
T_i	$[N]$	třecí síla
T	$[K]$	absolutní teplota
ΔT	$[K]$	teplotní gradient
T_m	$[K]$	teplota teplého konce
T_0	$[K]$	počáteční teplota
U_t	$[mV]$	termoelektrické napětí
v	$[m/s]$	rychlost
V_0	$[m^3]$	objem tělesa před zahřátím
V_t	$[m^3]$	objem tělesa po zahřátí
V	$[m^3]$	výsledný objem
α	$[-]$	součinitel tepelné roztažnosti
μ	$[-]$	koeficient tření

Seznam příloh

- CD-ROM s diplomovou prací
- Výkresová dokumentace:
 - o 5 – S31 – 01/01 Držák snímače – přední OCTAVIA RS
 - o 5 – S31 – 02/01 Držák snímače – zadní OCTAVIA RS
 - o 5 – S31 – 03/01 Držák snímače – přední formule
 - o 5 – S31 – 04/01 Držák snímače – zadní formule