

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

---

**FAKULTA STROJNÍ**

**12120 ÚSTAV AUTOMOBILŮ, SPALOVACÍCH MOTORŮ A KOLEJOVÝCH VOZIDEL**

**Měření kotoučových brzd  
na setrvačnickovém stanovišti**

**Measurement of disc brakes  
on the inertia test stand**

**Bakalářská práce**

**Studijní program:** TZSI (teoretický základ strojního inženýrství)

**Vedoucí práce:** Doc. Dr. Ing. Gabriela Achtenová

**Vojtěch Hujňák**

---

**Praha 2015**

## **Poděkování**

Touto cestou bych rád poděkoval především vedoucí bakalářské práce Doc. Dr. Ing. Gabriele Achtenové a odbornému konzultantovi Ing. Vojtěchu Klírovi, Ph.D. za cenné rady a věcné připomínky k práci. Dále bych rád poděkoval pracovníkům Ústavu automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel Ing. Jiřímu Pakostovi, Ing. Michalu Strapkovi a Ing. Ondřeji Miláčkovi za cenné rady a technickým pracovníkům laboratoře na Julisce panu Břetislavu Bezouškovi a Bedřichu Sedlákovvi za spolupráci při výrobě nově navržených komponent setrvačnickového stanoviště.

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu. Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 18. 6. 2015

.....  
Vojtěch Hujňák

Název práce: Měření kotoučových brzd na setrvačnickovém stanovišti  
Autor: Vojtěch Hujňák  
Studijní obor: TZSI (teoretický základ strojního inženýrství)  
Druh práce: Bakalářská práce  
Vedoucí práce: doc. Dr. Ing. Gabriela Achtenová

## **Abstrakt**

Práce se zabývá experimentální úlohou zjištění součinitele tření kotoučové brzdy na setrvačnickovém stanovišti umístěném v laboratořích Ústavu automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel na ČVUT v Praze. Základem práce je návrh a provedení změn komponent setrvačnickového stanoviště a jejich integrace do funkčního celku. Dále práce obsahuje detailní popis komponent setrvačnickového stanoviště a schémata jejich zapojení.

## **Klíčová slova**

Setrvačnickové stanoviště, kotoučová brzda, součinitel tření, vliv teploty na součinitel tření, snímač, měřicí karta, schéma zapojení.

Title: Measurement of Disc Brakes on the Inertia Test Stand  
Author: Vojtěch Hujňák  
Branch: TZSI (the theoretical basis of the Mechanical Engineering)  
Document type: Bachelor thesis  
Thesis advisor: doc. Dr. Ing. Gabriela Achtenová

## **Abstract**

This bachelor thesis deals with the measurement of the coefficient of friction between a disc brake and a brake pad on the inertia test stand located in the laboratories of the Department of Automotive, Combustion Engine and Railway Engineering at CTU in Prague. The basis of the thesis is to design and make changes to the components of the inertia test stand and their integration into a functional unit. The work also includes a detailed description of the components of the inertia test stand and their connection diagrams.

## **Keywords**

Inertia test stand, disc brake, coefficient of friction, influence of temperature on friction coefficient, sensor, module, connection diagram.

## Obsah

Poděkování.....	1
Prohlášení.....	1
Abstrakt.....	2
Klíčová slova.....	2
Abstract.....	3
Keywords.....	3
Obsah.....	4
Úvod.....	7
1. Cíle práce.....	8
1.1 Zadání bakalářské práce.....	8
1.2 Hlavní a dílčí cíle bakalářské práce.....	8
1.3 Měřítko splnění cílů bakalářské práce.....	9
2. Popis zařízení.....	10
2.1 Princip měření brzd na setrvačnickovém stavu.....	10
2.2 Popis setrvačnickového stavu.....	10
3. Navržené a realizované úpravy.....	12
3.1 Návrh a realizace nového držáku ovládacích prvků.....	12
3.1.1 Výchozí stav.....	12
3.1.2 Nový stav.....	12
3.2 Návrh a realizace nové svorkovnice.....	13
3.2.1 Výchozí stav.....	13
3.2.2 Nový stav.....	14
3.3 Nové vedení kabelů.....	14
3.3.1 Výchozí stav.....	15
3.3.2 Nový stav.....	15
3.4 Integrace komponent nového setrvačnickového stanoviště.....	15
4. Popis jednotlivých komponent.....	16
4.1 Setrvačnick.....	16
4.2 Kotoučová brzda.....	18
4.2.1 Brzdový kotouč.....	19
4.2.2 Brzdové destičky.....	20

4.3	Termočláňkové čidlo teploty.....	20
4.4	Infračervené snímače teploty.....	23
4.5	Snímač teploty brzdové kapaliny.....	25
4.6	Snímač tlaku brzdové kapaliny.....	27
4.7	Snímač otáček.....	29
4.8	Snímač momentu.....	31
4.9	Odbrzd'ovač a ventilátor.....	32
4.10	Asynchronní motor.....	32
4.11	Frekvenční měnič.....	34
4.12	Měřicí karty.....	35
4.12.1	Karta NI 9201.....	36
4.12.2	Karta NI 9472.....	37
4.12.3	Karta NI 9211.....	38
4.12.4	Karta NI 9402.....	39
4.13	Nastavení jednotlivých karet ve virtuálním prostředí.....	40
5.	Virtuální měřicí přístroj.....	41
5.1	Popis ovládacích prvků a indikátorů měřicího přístroje.....	42
5.2	Vztahy pro převody měřených napětí na požadované veličiny.....	43
6.	Schémata setrvačnickového stanoviště.....	44
6.1	Schéma setrvačnickového stavu.....	44
6.2	Schéma zapojení.....	44
7.	Pokyny k provedení zkoušky kotoučové brzdy.....	46
7.1	Příprava měření.....	46
7.2	Postup měření.....	46
7.3	Po měření.....	46
8.	Zkouška kotoučové brzdy.....	47
9.	Závěr – splnění cílů práce.....	50
9.1	Splnění hlavního cíle práce.....	50
9.2	Splnění dílčího cíle č. 1.....	50
9.3	Splnění dílčího cíle č. 2.....	51
9.4	Splnění dílčího cíle č. 3.....	51
9.5	Splnění dílčího cíle č. 4.....	52
9.6	Další dosažené výsledky bakalářské práce.....	52

Použitá literatura.....	53
Použité symboly a zkratky.....	55
Seznam obrázků.....	57
Seznam tabulek.....	59
Přílohy.....	60

## Úvod

Setrvačnickový stav je obecně zařízení, které simuluje část setrvačných účinků pohybujícího se vozidla, které můžeme jednoduše měnit vhodným rozmístěním závaží na hřídeli. Tím se dokážeme v experimentálních úlohách co nejvíce přiblížit reálným podmínkám provozu. Na hřídeli setrvačnicku jsou upevněny komponenty, které následně měříme. V této bakalářské práci se jedná o zkoušku kotoučové brzdy osobního automobilu prováděnou na setrvačnickovém stanovišti umístěném v laboratořích na Julisce v Ústavu automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel na ČVUT Praha, který je součástí Výzkumného centra spalovacích motorů a automobilů Josefa Božka (dále též setrvačnickové stanoviště). V současné době slouží setrvačnickové stanoviště na Julisce především k výuce, kdy se pomocí názorné ukázky měření kotoučových brzd studenti seznámí s touto problematikou a následně provedou vyhodnocení naměřených dat.

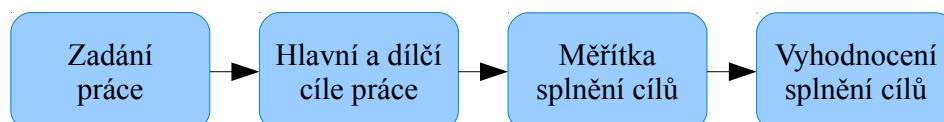
Na setrvačnickovém stanovišti proběhly v rámci rekonstrukce laboratoří na Julisce a několika diplomových prací četné změny v jeho zapojení a neexistuje žádná ucelená dokumentace, která by popisovala výchozí stav stanoviště a jeho jednotlivých částí. Některé komponenty nebyly plně funkční a bylo potřeba provést řadu změn v zapojení komponent a jejich integraci do funkčního celku.

Zadání bakalářské práce *Měření kotoučových brzd na setrvačnickovém stanovišti* proto směřuje k dosažení opětovné funkčnosti měřicího stanoviště po provedených změnách a demonstraci úspěšného provedení experimentální úlohy zjištění součinitele tření kotoučové brzdy. Podrobné stanovení cílů na základě rozboru zadání je uvedeno v následující kapitole č. 1 *Cíle práce*.



# 1. Cíle práce

Ke stanovení cílů práce jsem přistoupil tak, abych zachoval jejich návaznost v řetězci od zadání až po závěrečné vyhodnocení jejich splnění. Tato kapitola postupuje od zadání k cílům a jejich měřítkům. Závěrečná kapitola této práce (9. Závěr – splnění cílů práce) pak hodnotí splnění cílů podle zadaných měřítek.



Obr. 1 – Řetězec zadání – stanovení cílů – měřítko splnění – vyhodnocení cílů práce

## 1.1 Zadání bakalářské práce

Bakalářská práce mi byla zadána dne 30. dubna 2015 s následujícím názvem a zásadami pro vypracování (zadání je uvedeno v plném znění v úvodní části práce):

Zadaný název práce	Měření kotoučových brzd na setrvačnickovém stanovišti
Zadané zásady pro vypracování práce	Seznamte se s původním zapojením a s experimentálním měřením kotoučových brzd na setrvačnickovém stanovišti na Julisce.
	Vzhledem k proběhlé rekonstrukci laboratoří na Julisce, proveďte změny ve vedení kabelů a vedoucími navržené změny v zapojení stanoviště.
	Proveďte detailní popis zapojení stanoviště a jeho ovládacího programu, tak aby bylo možné stav kdykoliv znovu zapojit.
	Opětnou funkčnost měřicího stanoviště demonstруйте na úspěšném provedení experimentální úlohy zjištění součinitele tření kotoučové brzdy.

Tab. 1 – Zadání bakalářské práce

## 1.2 Hlavní a dílčí cíle bakalářské práce

Ze zadání bakalářské práce jsem stanovil hlavní cíl a dílčí cíle práce tak, aby zcela odpovídaly zadání práce:

HC	Hlavní cíl práce	
DC1	Dílčí cíl č. 1	Detailně se seznámit s výchozím stavem setrvačnickového stanoviště.
DC2	Dílčí cíl č. 2	Navrhnout a zrealizovat nové zapojení setrvačnickového stanoviště včetně požadovaných změn jeho komponent.
DC3	Dílčí cíl č. 3	Detailně popsat komponenty a zapojení setrvačnickového stanoviště.
DC4	Dílčí cíl č. 4	Provést experimentální zkoušku kotoučové brzdy se zjištěním součinitele tření mezi brzdovým kotoučem a destičkou.

Tab. 2 – Hlavní a dílčí cíle bakalářské práce

### 1.3 Měřítko splnění cílů bakalářské práce

Pro posouzení dosažení cílů bakalářské práce jsem si stanovil měřítko, ze kterých bude zřejmé splnění daného cíle:

HC	Hlavní cíl práce	Experimentální měření prokazuje funkčnost všech snímačů a řídicího programu a jejich vzájemné propojení do celku způsobilého k měření veličin pro výpočet součinitele tření kotoučových brzd.
DC1	Dílčí cíl č. 1	Získaná znalost původního zapojení a výchozích podmínek pro experimentální měření součinitele tření kotoučových brzd umožňuje provést nový upravený návrh zapojení setrvačnickového stanoviště.
DC2	Dílčí cíl č. 2	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) Navržen nový držák pro připojení ovládacích prvků. Následně zadán k výrobě v laboratoři a zasazen do ovládacího stanoviště.</li> <li>b) Navržena nová svorkovnice se sjednoceným napájením všech prvků a tento návrh zrealizován na setrvačnickovém stanovišti. Signály z čidel propojeny s měřicími kartami a z měřicích karet do řídicího počítače setrvačnickového stanoviště.</li> <li>c) Navrženo nové vedení kabelů v laboratoři a provedeny jejich nové rozvody.</li> <li>d) Všechny nové a stávající komponenty setrvačnickového stanoviště integrovány do funkčního celku.</li> </ul>
DC3	Dílčí cíl č. 3	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) Experimentálně naměřeny odchylky teploty v kotouči mezi etalonovou hodnotou získanou pomocí přesné měřicí sondy a hodnotou naměřenou termočlánkem umístěným v brzdovém kotouči.</li> <li>b) Naměřené odchylky teploty zkorigovány pomocí korekční funkce umístěné ve virtuálním řídicím programu LabVIEW.</li> <li>c) Proveden detailní popis všech komponent setrvačnickového stanoviště a způsobu jejich zapojení.</li> </ul>
DC4	Dílčí cíl č. 4	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) Graf získaný z hodnot zkoušky kotoučové brzdy prokazuje průběhem měřených hodnot teploty, momentu, tlaku a otáček plnou funkčnost setrvačnickového stanoviště.</li> <li>b) Provedeno více měření prokazujících stabilitu funkčnosti setrvačnickového stanoviště.</li> </ul>

Tab. 3 – Měřítko dosažení cílů bakalářské práce

Vyhodnocení splnění cílů práce s využitím uvedených měřítek je uvedeno v kapitole č. 9 *Závěr – splnění cílů práce.*

## 2. Popis zařízení

V této kapitole jsou popsány základy měření brzd na setrvačnickovém stanovišti a popis jeho základních komponent.

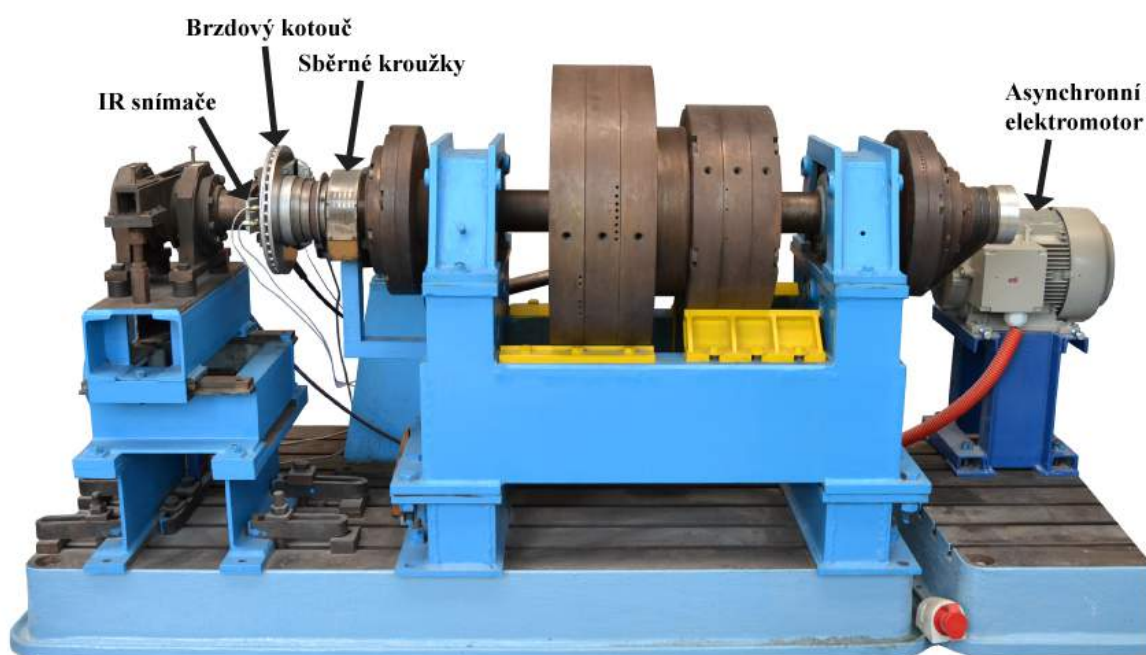
### 2.1 Princip měření brzd na setrvačnickovém stavu

Princip měření kotoučových brzd na setrvačnickovém stanovišti spočívá ve snímání veličin, na jejichž základě dokážeme následně pomocí výpočtů stanovit součinitel tření mezi brzdovým kotoučem a obložením. Podmínkou pro správné provedení zkoušky je přítomnost senzorů, které v reálném čase vyhodnocují měřené veličiny a převádí je pomocí měřicích karet do počítače, ve kterém se pomocí vhodného softwaru zobrazují výsledky testu. Nutností je také možnost ovládní komponent stejně, jako by se jednalo o zkoušku v reálném provozu. Tím je myšlena především regulace otáček brzdového kotouče a nastavení brzdového tlaku, který je aplikován na brzdové destičky. Samotné měření probíhá následovně: Nejprve je nutno rozběhnout setrvačnick pomocí elektromotoru na předem stanovené otáčky, které budou odpovídat požadované rychlosti automobilu. Po dosažení požadovaných otáček dojde k vypnutí elektromotoru a zahájení brzdění. V této chvíli jsou již počítačem zaznamenávána data pomocí virtuálního měřicího programu až do kompletního zastavení setrvačnicku.

### 2.2 Popis setrvačnickového stavu

Setrvačnickový stav je základní součástí celého setrvačnickového pracoviště. Slouží především k názorné demonstraci zjištění součinitele tření mezi brzdovým kotoučem a brzdovou destičkou, kdy studenti na základě známých a naměřených hodnot vyhodnocují součinitel tření.

Na následujícím obrázku se nachází setrvačnickový stav s popisem jeho částí.



Obr. 2 – Setrvačnickový stav v laboratořích Ústavu automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel

Měřicí zařízení se skládá z těchto částí:

- Setrvačnicku simulujícího čtvrtinu hmotnosti osobního automobilu. Moment setrvačnosti setrvačnicku je  $J = 42,13 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ . Celková hmotnost představovaná setrvačnickem je  $m = 505,09 \text{ kg}$ . Jedná se o 30,17 % celkové hmotnosti automobilu Škoda Fabia II, která činí 1674 kg.
- Kotoučové brzdy s plovoucím třmenem a kotoučem o průměru 288 mm. Tato jednopístková kotoučová brzda je používána na modelech automobilky Škoda a na tomto zkušebním zařízení simuluje brzdu použitou na automobilu Škoda Fabia II.
- Poháněcího elektromotoru.
- Odbrzďovače.
- Snímačů, měřicích karet, ovládacího počítače a dalších komponent, kterými se budu podrobněji zabývat v další části této práce.

### 3. Navržené a realizované úpravy

V této kapitole jsou uvedeny hlavní změny provedené na setrvačnickém stanovišti včetně jejich výchozích stavů, tj. stavů dosažených před úpravami setrvačnického stanoviště v rámci bakalářské práce.

#### 3.1 Návrh a realizace nového držáku ovládacích prvků

Základním požadavkem pro úspěšné zapojení setrvačnického stanoviště bylo navržení nového držáku pro upevnění ovládacích prvků stanoviště. V následujících podkapitolách je popsán výchozí stav pro tuto úpravu a dále nový stav s již realizovaným držákem.

##### 3.1.1 Výchozí stav

Jelikož se doposud ovládací prvky setrvačnického stanoviště nacházely ve stavu vyobrazeném na obrázku č. 3, bylo nutné navrhnout jejich nové umístění.



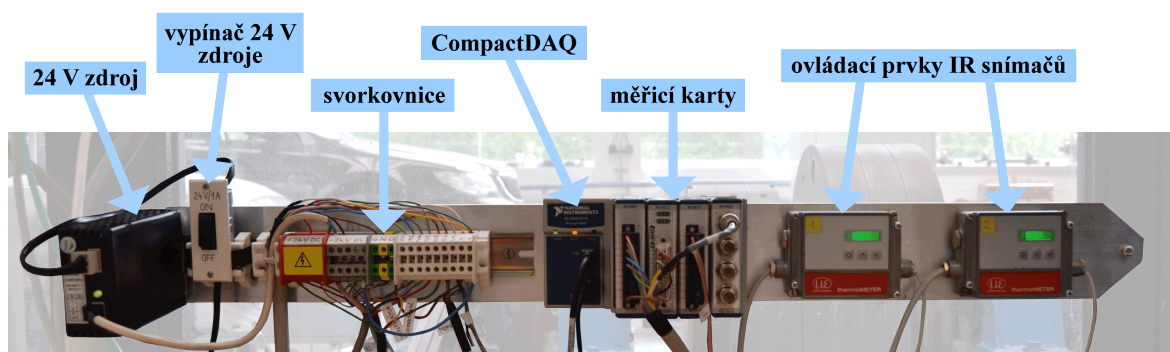
Obr. 3 – Setrvačnickový stav před úpravami

##### 3.1.2 Nový stav

Provedl jsem návrh nového držáku, který integruje všechny potřebné komponenty na jednom místě a zároveň umožňuje snadný přístup k těmto komponentům. Důležitým



kritériem při návrhu držáku bylo jeho umístění, jelikož musel být umístěn v ovládací místnosti kryté skleněnou výplní a dále musel splňovat požadavek na vhodné ukrytí všech přívodních i výstupních kabelů. Zvolil jsem tedy umístění do okenního prostoru v ovládací místnosti. Tímto způsobem jsem dosáhl snadného ukrytí všech kabelů, kterým se dále zabývám v kapitole č. 3.3 *Nové vedení kabelů*. Rozmístění prvků na držáku je následující: Zleva je na držáku přišroubována DIN lišta, na kterou je připevněn 24V zdroj. Vedle něj je umístěna nově navržená svorkovnice. Následuje modul pro uchycení měřících karet CompactDAQ a dva ovládací prvky od infračervených snímačů.



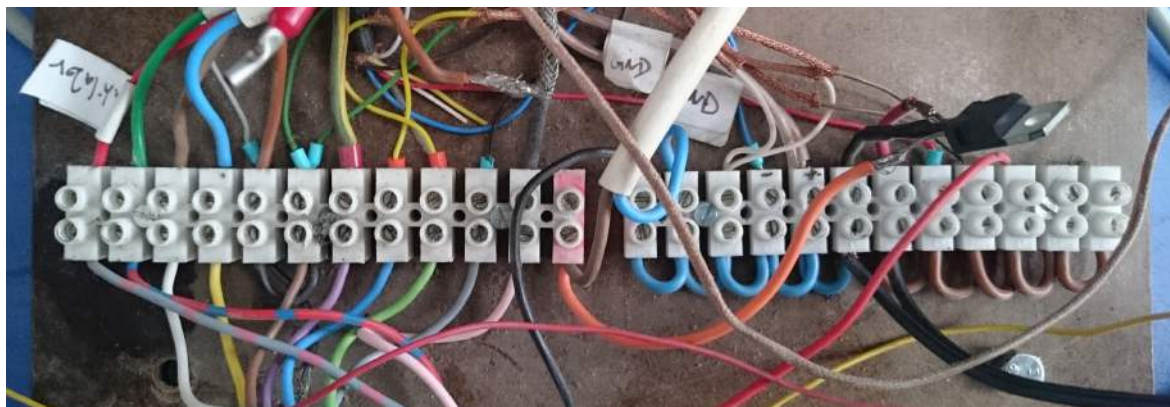
Obr. 4 – Držák s popisem jednotlivých komponent

## 3.2 Návrh a realizace nové svorkovnice

V rámci této práce jsem provedl návrh nové svorkovnice se sjednoceným napájením všech prvků a tento návrh jsem na setrvačnickovém stanovišti následně zrealizoval. Současně jsem nově propojil signály z čidel na měřící karty a z měřících karet do řídicího počítače setrvačnickového stanoviště.

### 3.2.1 Výchozí stav

Výchozí stav této úpravy je zobrazen na následujícím obrázku.

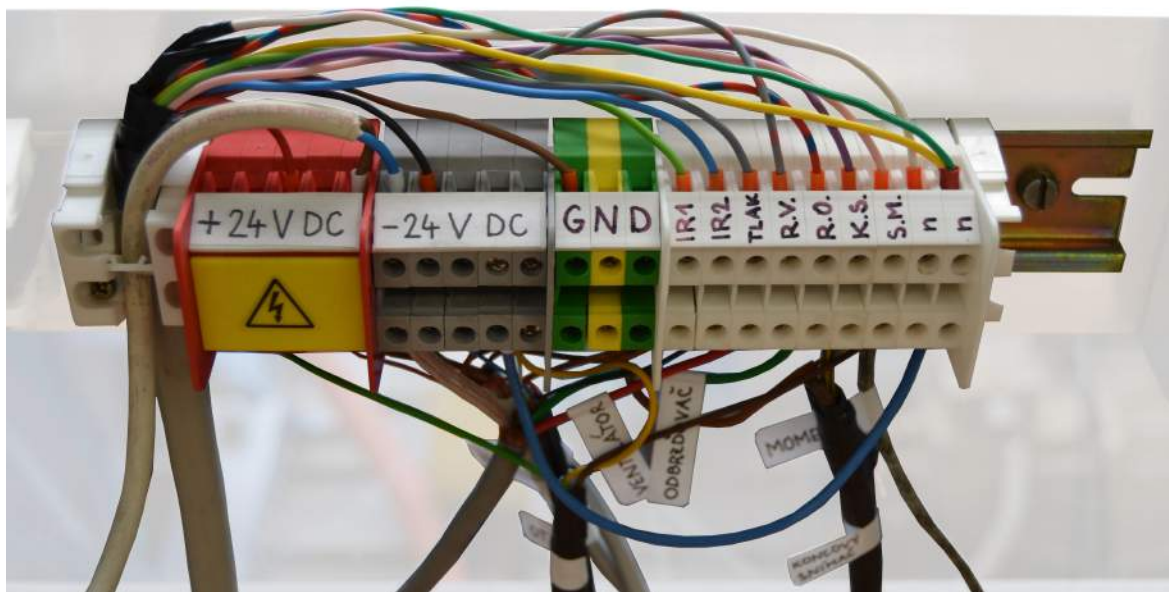


Obr. 5 – Původní svorkovnice

Jedná se o svorkovnici, ke které neexistovalo žádné aktuální schéma zapojení, a tudíž bylo před návrhem nové svorkovnice nutné důkladné seznámení s původním zapojením. Je důležité zmínit, že napájení snímačů bylo provedeno pomocí dvou různých zdrojů napětí, které jsem ve finálním provedení nahradil pouze jedním 24V zdrojem umístěným na svorkovnici.

### 3.2.2 Nový stav

Po seznámení se s výchozím zapojením a jeho podrobným zaznamenáním jsem přistoupil k návrhu nové svorkovnice. Rozvržení svorek do jednotlivých oblastí je nejlépe zřetelné z obrázku č. 6. Počet svorek jsem zvolil podle počtu vodičů vedoucích od jednotlivých snímačů s tím, že u každé oblasti pro +24 V, -24 V a GND jsem přidal jednu svorku pro možnost budoucího snadného připojení případných dalších komponent. Pro napájení snímačů jsem nově použil pouze jeden 24V zdroj umístěný na DIN liště, která je přišroubována k držáku a kromě zdroje napětí je na ní umístěna nová svorkovnice. Na následující fotografii je vyobrazen detail nové svorkovnice.



Obr. 6 – Nová svorkovnice

### 3.3 Nové vedení kabelů

Z obrázku č. 3 je patrné, že původní vedení kabelů bylo velmi nešikovně řešeno a mohlo tak snadno dojít k jejich poškození. V následujících podkapitolách se blíže zabývám vzniklou problematikou a jejím řešením.

### 3.3.1 Výchozí stav

V původním provedení byly kabely vedeny dveřním prostorem a nebyly nijak chráněny (viz obrázek č. 3). Velmi jednoduše tak mohl kdokoli o kabely zavazit a poškodit je. Bylo tedy nutné navrhnout nové umístění kabelů pro jejich bezpečnější ukrytí.

### 3.3.2 Nový stav

V rámci této práce jsem provedl nové rozvedení kabelů od čidel umístěných na setrvačnickovém stavu do ovládací místnosti. Ty jsou nově vedeny sklepním prostorem a ústí pod stolem v ovládací místnosti, odkud jsou přivedeny do komponent umístěných na novém držáku. V případě dodržování pokynů pro bezpečnou práci v laboratoři již nemůže dojít k porušení nově vedených kabelů, a tudíž tuto úpravu považuji za přínosnou.

## 3.4 Integrace komponent nového setrvačnickového stanoviště

Všechny nové a stávající komponenty setrvačnickového stanoviště byly v rámci této bakalářské práce integrovány do funkčního celku, který bude v současném stavu bezproblémově sloužit k provádění experimentálních měření kotoučové brzdy umístěné na hřídeli setrvačnicku. Plná funkčnost je demonstrována v kapitole č. 8 *Zkouška kotoučové brzdy*. Výsledná podoba setrvačnickového stanoviště včetně všech jeho komponent a ovládacího počítače je zobrazena na následující fotografii.



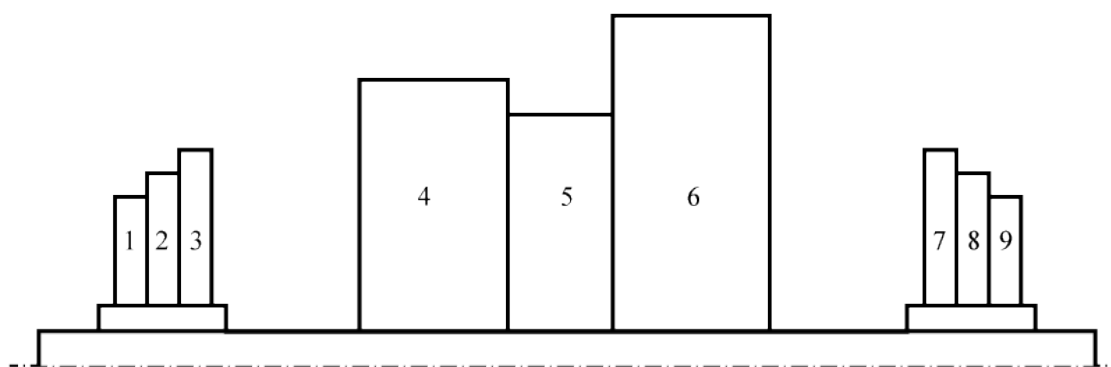
Obr. 7 – Nové setrvačnickové stanoviště



## 4. Popis jednotlivých komponent

### 4.1 Setrvačnick

Na hřídeli setrvačnickového stavu je umístěno 9 samostatných závaží, která simulují určitou setrvačnou hmotu vozidla. Je však poměrně jednoduché změnit moment setrvačnosti soustavy, a to povolením několika šroubů a přemístěním závaží na hřídeli. Na následujícím obrázku je schématicky zobrazeno rozmístění závaží na hřídeli. Parametry jednotlivých závaží jsou shrnuty v tabulce pod obrázkem.



Obr. 8 – Rozmístění závaží na hřídeli setrvačnicku [1]

setrvačnick	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$r_1$ [mm]	72	72	72	50	50	50	72	72	72
$r_2$ [mm]	107	142	187	240	194	328	191	147	107
$b$ [mm]	33	33	65	185	79	216	65	32	11
$m$ [kg]	5,1	12,2	47,7	251,4	68,5	559,8	50,2	13,0	1,7
$J$ [kg·m <sup>2</sup> ]	0,0424	0,1545	0,9586	7,5542	1,3737	30,8109	1,0451	0,1736	0,0141

Tab. 4 – Parametry jednotlivých setrvačnicků [1]

Pro výpočet hodnot v tabulce byly použity následující vztahy [1]:

$$m_i = \rho \cdot V_i = \rho \cdot \pi \cdot (r_2^2 - r_1^2) \cdot b,$$

$$J_i = \frac{1}{2} \cdot m_i \cdot (r_1^2 + r_2^2).$$

Při výpočtu byla uvažována hustota oceli  $\rho = 7850 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  a byl zanedbán vliv nosné hřídele. Celkový moment setrvačnosti  $J_{stavu}$ :

$$J_{stavu} = \sum_{i=1}^9 J_i$$

$$J_{stavu} = 0,0424 + 0,1545 + 0,9586 + 7,5543 + 1,3737 + 30,8109 + 1,0451 + 0,1736 + 0,0141$$

$$J_{stavu} = 42,1272 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

Pro zjištění, kterému typu vozidla odpovídá nastavený moment setrvačnosti stavu, vyjdeme z rovnosti kinetických energií:

$$\frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega^2,$$

kde:

$$v = \omega \cdot r_{pneu}.$$

Potom platí [1]:

$$J = m \cdot r_{pneu}^2,$$

kde  $J$  je moment setrvačnosti stavu a  $r_{pneu}$  je poloměr pneumatiky zvoleného vozidla. Jelikož neznáme přesný moment setrvačnosti kola a dalších rotačních hmot, bylo nutné zavést součinitele rotačních hmot  $\delta$ , který redukuje vliv rotačních hmot za jízdy vozidla. Jeho hodnota též závisí na zvoleném převodovém stupni. Pro naše výpočty však postačí zvolená střední hodnota  $\delta = 1,1$ . Pro další výpočty je třeba také znát celkovou hmotnost automobilu a poloměr jeho kola. V následující tabulce jsou uvedeny všechny potřebné hodnoty pro modely vozů, které mohou být vzhledem k použité brzdě na stavu simulovány.

Model	Fabia II	Roomster	Octavia II	Superb II
$m_{vozu}$ [kg]	1674	1777	2070	2297
$\delta$	1,1			
$m_{setrvačná}$ [kg]	1841,4	1954,7	2277	2526,7
Pneumatika	185/60 R14	175/70 R14	195/65 R15	205/55 R16
$r_{pneu}$ [mm]	288,80	300,30	317,25	315,95
$m_{simul}$ [kg]	505,09	467,15	418,56	422,01
% $m_{simul}$	30,17	26,29	20,22	18,37
% $m_{simul}$ při uvažování $\delta$	27,43	23,90	18,38	16,70

Tab. 5 – Zastoupené modely vozů [2]

Pro výpočet hodnot v tabulce byly použity následující vztahy [1]:

setrvačná hmotnost:

$$m_{setrvačná} = m_{vozu} \cdot \delta,$$

simulovaná hmotnost:

$$m_{simul} = \frac{J_{stavu}}{r_{pneu}^2}.$$

Jelikož je při výuce setrvačnickový stav přiřazován k modelu Škoda Fabia II, můžeme z tabulky vyčíst, že při uvažování součinitele rotačních hmot je na něm simulováno právě 27,43 % setrvačné hmotnosti vozidla. Jedná se tedy zhruba o čtvrtinu hmotnosti vozidla. Je však nutné zdůraznit, že v případě reálného zatížení kotoučové brzdy se poměry mezi

přední a zadní nápravou liší. Brzdy na předních kolech jsou zatíženy více, na zadních méně. Pro zjištění momentu setrvačnosti konkrétního vozidla, které chceme na setrvačnicku simulovat za použití přesného poměru zatížení brzdy, použijeme následující vztah [1]:

$$J_v = k \cdot \left( m_{\text{vozu}} \cdot \frac{\sum J_k}{r_k^2} \right) \cdot r_k^2,$$

kde  $k$  je koeficient zatížení brzdy,  $m_{\text{vozu}}$  je hmotnost vozidla,  $J_k$  je moment setrvačnosti kola a  $r_k$  je poloměr kola. V současnosti je na setrvačnickovém stavu umístěno brzdové soustrojí, které je používáno u více modelů vozů z koncernu VW. Vzhledem k rozložení setrvačné hmoty je však měření vztahováno k modelu Škoda Fabia II. Jeho parametry nutné k výpočtu jsou následující:

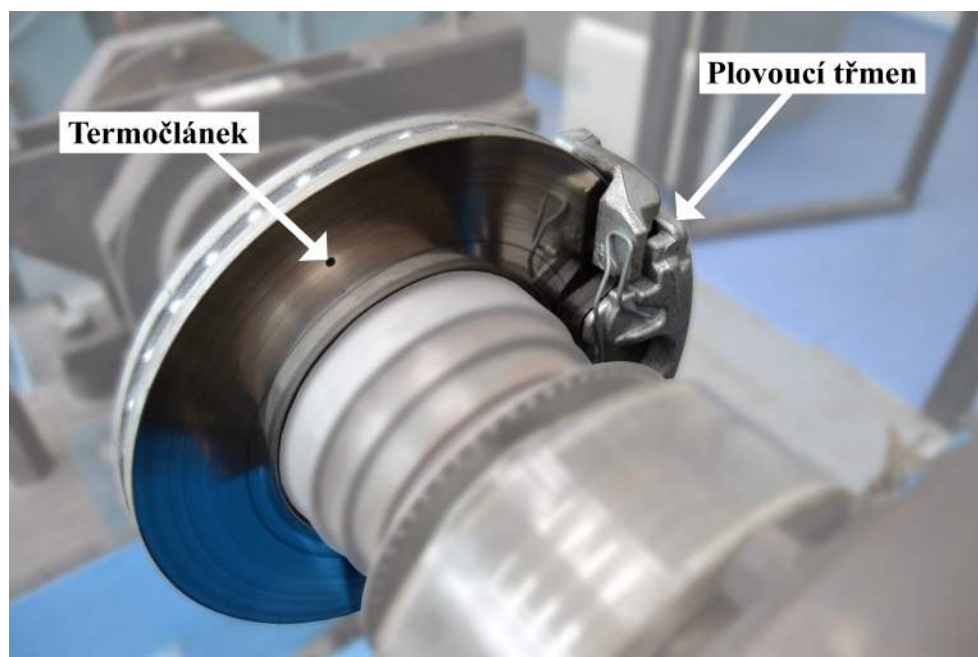
$$\begin{aligned} k &= 0,25, \\ r_k &= 290 \text{ mm}, \\ J_k &= 0,603 \text{ kg} \cdot \text{m}^2, \\ m_{\text{vozu}} &= 1674 \text{ kg}. \end{aligned}$$

Po dosazení výše zmíněných hodnot do vztahu pro výsledný moment setrvačnosti vychází jeho hodnota  $J_v = 35,79 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ . Je zřejmé, že moment setrvačnosti pro  $\frac{1}{4}$  setrvačné hmotnosti vozidla Škoda Fabia II je menší než moment setrvačnosti setrvačnicku  $J = 42,13 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ . Ve skutečnosti však vycházíme z výše zmíněné korekce pomocí součinitele rotačních hmot  $\delta$  a dále uvažujeme, že poměr mezi brzdnými účinky na jednotlivá kola nebude stejný, tudíž by koeficient zatížení brzdy  $k$  nebyl roven  $\frac{1}{4}$ .

V současnosti je tedy moment setrvačnicku nastaven na  $J_{\text{stavu}} = 42,13 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ . Celková hmotnost představovaná setrvačnickem je  $m = 505,09 \text{ kg}$ . Jedná se o 30,17 % celkové hmotnosti automobilu Škoda Fabia II, která činí 1674 Kg.

## 4.2 Kotoučová brzda

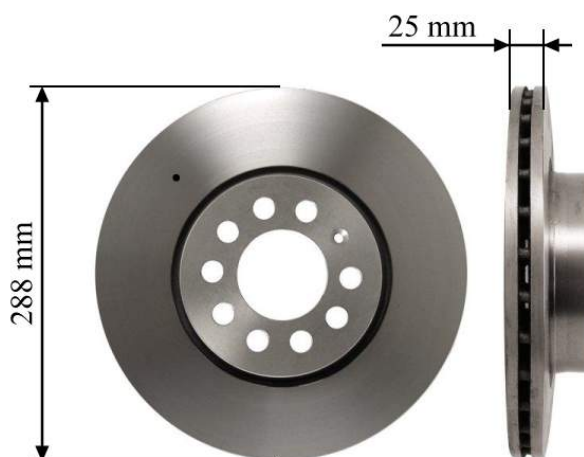
Na zkušebním zařízení je umístěna jednopístková kotoučková brzda s plovoucím třmenem a kotoučem o průměru 288 a tloušťce 25 mm. Jedná se o brzdu od společnosti Škoda, která je používána u více modelů značky. Vzhledem k rozložení setrvačné hmoty je však měření vztahováno k modelu Škoda Fabia II. Na následující straně je fotografie, zobrazující umístění brzdy na hřídeli setrvačnicku s vyznačeným umístěním termočládku. Ten je umístěn v brzdovém kotouči a více o něm pojednávám v kapitole č. 4.3 *Termočládkové čidlo teploty*.



Obr. 9 – Brzdový kotouč s termočlánkem

#### 4.2.1 Brzdový kotouč

V současné konfiguraci je na hřídeli setrvačnicku umístěn litinový kotouč, který je používán u řady automobilů od roku výroby 1998 (Škoda Octavia I) až po současnost (nová Škoda Rapid). Obrázek č.10 popisuje jeho rozměry:



Obr. 10 – Brzdový kotouč použitý na hřídeli setrvačnicku [3]

Původně však byla na stavu namontována brzda s plovoucím třmenem a kotoučem o průměru 236 mm a tloušťce 13 mm. Jednalo se o brzdu z vozu Škoda Felicia a v případě potřeby je možné opět tuto brzdu namontovat s tím, že by se pouze odstranily redukční díly, které drží současný kotouč a třmen.

## 4.2.2 Brzdové destičky

V současné době jsou na setrvačnickém stavu umístěny destičky od výrobce ICER s kódovým označením **181567**. Jsou vyobrazeny na následujícím obrázku včetně popisu jejich základních rozměrů, kde  $d_v = 54$  mm,  $R_e = 143$  mm a  $R_i = 84$  mm.



Obr. 11 – Brzdové destičky

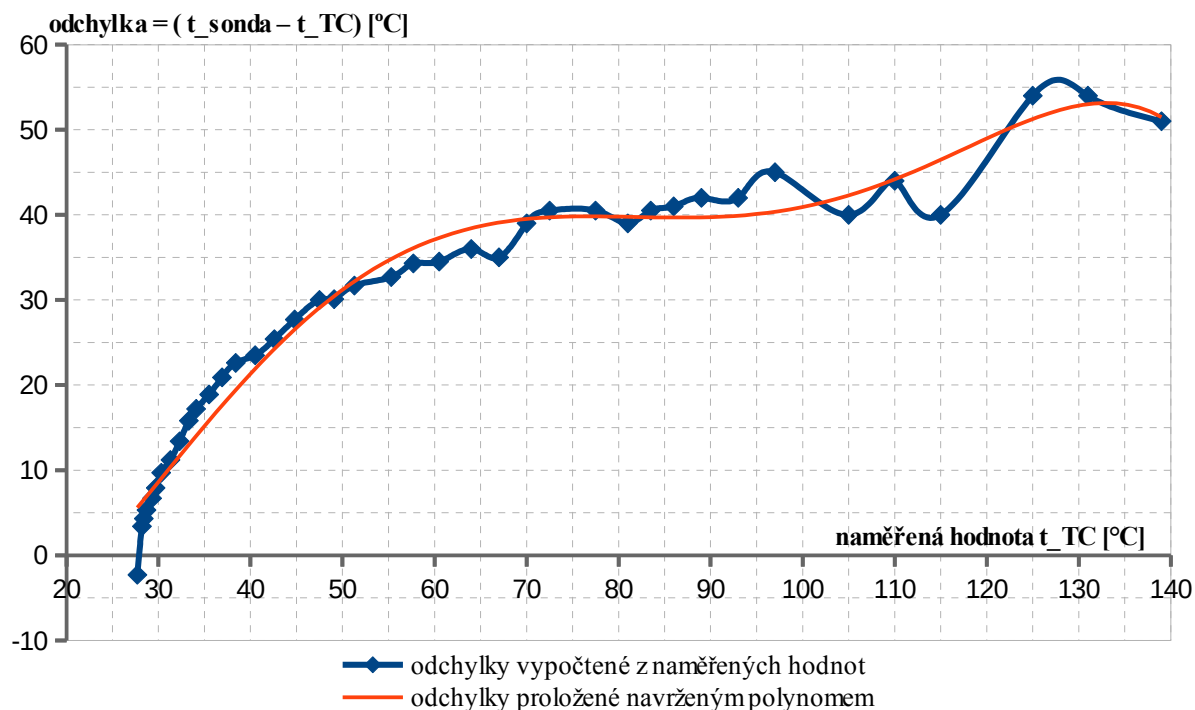
## 4.3 Termočláňkové čidlo teploty

Toto čidlo je umístěno v otvoru vyvrtaném do brzdového kotouče, aby se nacházelo co nejbližše třecí ploše a tím bylo zajištěno co nejpřesnější měření. Jedná se o termočlánek typu K. Jelikož je nutné přenést signál z rotující součásti na součást nerotující, je zapotřebí přítomnost stříbrných sběrných kroužků, které toto umožňují. Z těch je signál přenášen pomocí sběracích uhlíkových kartáčů. Tento systém přenosu signálu ale generuje jistý přechodový odpor, který výrazně ovlivňuje signál z termočláňku. Jelikož jde o napěťový signál v řádech mV, způsobuje přechodový odpor na stříbrných kroužcích takové ovlivnění signálu, které by činilo jakákoli naměřená data nepoužitelnými. Je tedy nutná přítomnost korekční funkce, která kalibruje získaný signál vůči požadované hodnotě. V původním zapojení byla tato korekční funkce polynomem čtvrtého stupně. V novém zapojení však tato funkce poskytovala velmi nepřesné hodnoty a bylo tedy nutné provést kalibraci.

Tuto kalibraci jsem provedl tak, že jsem nejprve kotouč několika brzděními zahřál na teplotu převyšující 160 °C. Následně jsem pomocí kontaktní termočláňkové sondy připojené k multimetru OMEGA TrueRMS SUPERMETER HHM290 měřil teplotu kotouče a současně jsem zapisoval teplotu z termočláňku v brzdovém kotouči. Tato měření jsem třikrát opakoval a každé z nich jsem provedl pro třicet a více teplotních hodnot

rovnoměrně rozložených mezi maximální a konečnou teplotou brzdového kotouče, což byla teplota rovná teplotě okolí. Změřená data jsem na závěr zpracoval a proložil polynomem n-tého stupně v závislosti na konkrétním případě naměřených dat. Pro závěrečné vyhodnocení jsem tedy vycházel ze tří teplotních hodnot, kterými byla teplota  $t_{TC}$  naměřená termočlánkem před korekcí, teplota  $t_{sonda}$  naměřená ruční kontaktní sondou a výsledná teplota  $t_{TCkorig}$  po korekci.

V následujícím grafu je zobrazena závislost teploty  $t_{TC}$  naměřené termočlánkem před korekcí na odchylce od skutečné hodnoty teploty  $t_{sonda}$  naměřené termočlávkovou sondou. Tuto závislost jsem pomocí matematických funkcí programu *LibreOffice* proložil polynomem n-tého stupně (ve dvou případech se jednalo o polynom pátého stupně, v jednom o polynom šestého stupně), ze kterého jsem následně po přičtení výchozí teplotní hodnoty  $t_{TC}$  získané z termočláčku dostal výslednou korekční funkci. Jak je však z grafu zřejmé, nepřesnost hodnoty naměřené termočlánkem v kotouči před zavedenou korekční funkcí při rostoucí teplotě strmě stoupá. Při skutečné teplotě okolo 190 °C ( $t_{TC}$  + odchylka) dosahuje odchylka více než 50 °C. Graf zobrazuje pouze data získaná z jednoho ze tří uskutečněných měření. Zbylé grafy mající obdobný průběh je možné najít v souboru *Korekcni funkce.ods* přiloženém na disku DVD.



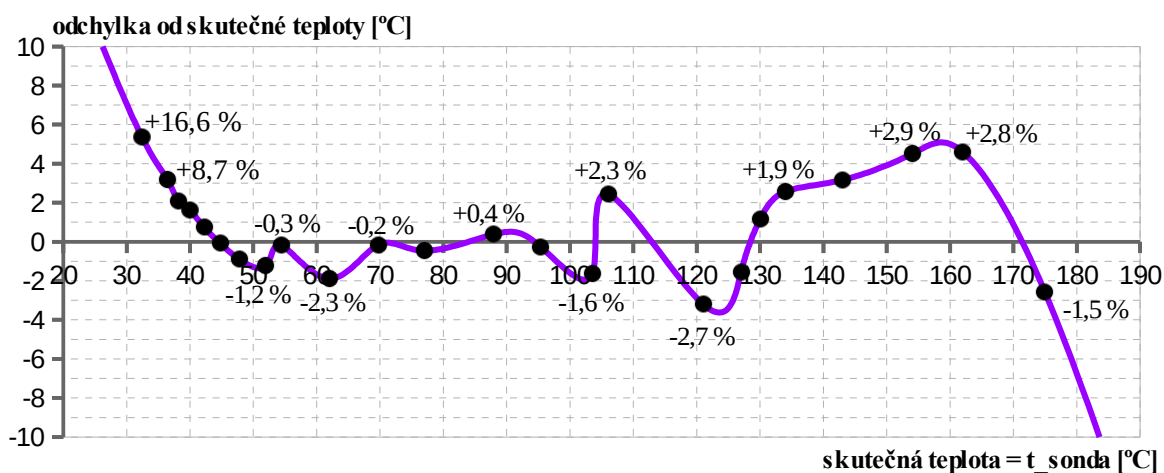
Obr. 12 – Odchylky měření mezi skutečnou (naměřenou) teplotou kotouče a teplotou termočláčku zobrazenou v ovládacím programu *LabVIEW* před zavedenou korekcí

Z těchto grafů vykazujících u všech tří měření obdobný průběh jsem následně vyjmul získané křivky popsané polynomy n-tých stupňů a přičetl k nim nekorigovanou teplotu  $t_{TC}$  pro získání výsledných průběhů funkcí popisujících závislost skutečné teploty  $t_{sonda}$  a zobrazené (korigované) teploty termočlásku  $t_{TCkorig}$ . Po zprůměrování těchto tří funkcí jsem získal výslednou korekční funkci, která má následující tvar:

$$t_{skut} = 4,3 \cdot 10^{-10} \cdot t_{TC}^6 - 2,3129 \cdot 10^{-7} \cdot t_{TC}^5 + 4,701516 \cdot 10^{-5} \cdot t_{TC}^4 - 4,52354320 \cdot 10^{-3} \cdot t_{TC}^3 + 2,040980731 \cdot 10^{-1} \cdot t_{TC}^2 - 1,9533403899 \cdot t_{TC} - 1,00492740363 \cdot 10^{-11}$$

Korekční funkci jsem zadal přímo do virtuálního měřicího přístroje v programu LabVIEW.

Pro větší přehlednost a porovnání skutečných hodnot  $t_{sonda}$  naměřených ruční sondou od výsledných hodnot  $t_{TCkorig}$  upravených korekční křivkou jsem data umístil do následujícího grafu, který zobrazuje závislost průběhu odchylky mezi skutečnou teplotou kotouče  $t_{sonda}$  a výslednou zkorigovanou teplotou  $t_{TCkorig}$  zobrazenou na termočlásku ovládacím programem LabVIEW. U lokálních extrémů a významných bodů této funkce jsou zobrazeny procentuální odchylky mezi teplotami  $t_{sonda}$  a  $t_{TCkorig}$ .



Obr. 13 – Odchylky mezi skutečnou (naměřenou) teplotou kotouče a teplotou termočlásku zobrazenou v ovládacím programu LabVIEW po aplikaci navržené korekční funkce

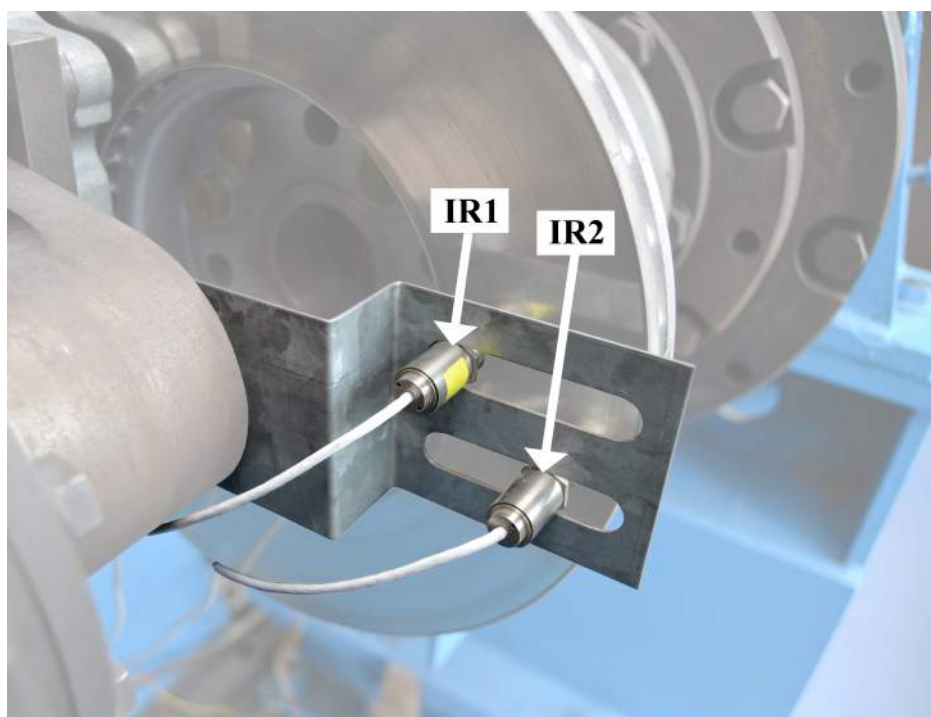
Jak je z grafu patrné, korekční funkce napravuje zobrazené hodnoty ve virtuálním měřicím programu změřené termočláskem v kotouči v oblasti skutečných hodnot od cca 30 °C do 180 °C. Aplikace výsledné korekční funkce formou polynomu šestého stupně koriguje odchylky teploty  $t_{TC}$  změřené termočláskem jako hodnoty v intervalu od cca 30 do 140 °C od skutečných hodnot teploty  $t_{sonda}$ , které jsou až o 50 °C vyšší (což je zřejmé z grafu na obrázku č. 12). V oblasti nižších a vyšších teplot se korekční funkce rozchází od



požadovaných hodnot, a není tak možné považovat přepočtenou hodnotu za zcela správnou. Z tohoto důvodu je pro laboratorní měření prováděná na setrvačnickovém stanovišti brána jako výsledná teplota kotouče průměrná hodnota vypočtená ze tří snímačů zjišťujících tuto veličinu. Těmi je termočlánekový snímač popsáný v této kapitole a dva infračervené snímače teploty, kterými se zabývám v následující kapitole č. 4.4 *Infračervené snímače teploty*.

#### **4.4 Infračervené snímače teploty**

Infračervené snímače teploty slouží stejně jako termočlánekové čidlo teploty ke zjištění teploty povrchu brzděného kotouče. Oproti termočláneku měřícímu teplotu pouze v jednom bodě, jsou na stavu umístěna dvě tato čidla, která jsou jednoduše polohovatelná vůči průměru brzděného kotouče. Jejich další výhodou je to, že odpadá potřeba nutnosti řešení přenosu signálu z rotujícího kotouče na nerotující části stavu. Měření bezkontaktním způsobem také nijak mechanicky neovlivňuje stav kotouče a při měření z něj není odebírána žádná energie. V reálu se však tato čidla setkávají s řadou nevýhod, které úzce souvisí s principem bezkontaktního měření teploty.



*Obr. 14 – Infračervené snímače teploty*





Obr. 15 – Vyhodnocovací jednotky IR snímačů

Na setrvačnickovém stavu jsou použity dva stejné snímače **Micro-Epsilon CT-SF22**. Tato infračervená čidla se skládají z měřicí hlavy s optikou a dále z vyhodnocovací jednotky, která umožňuje pomocí tlačítek nastavování všech důležitých parametrů měření včetně nastavení požadovaného rozsahu měření a parametrů výstupního signálu. V tabulce č. 6 jsou uvedeny parametry tohoto snímače.

Snímač Micro-Epsilon CT-SF22	
Napájení	8 – 36 V; max 100 mA
Výstup	0/4 – 20 mA, 0/5 – 10 V, termočlánek J, K
Rozsah teplot	50 – 950 °C
Spektrální rozsah	8 to 14 μm
Teplotní rozlišení	< 0.1°C
Doba odezvy	150 ms (95%)
Emisivita	0,100 – 1,100
Rozměry sondy	Ø 14 – 28 mm

Tab. 6 – Parametry IR snímače [4]

Jelikož jsou však měřené hodnoty pomocí bezkontaktních snímačů i přes provedenou kalibraci snímačů [2] a nastavení emisivity pro námi použitý kotouč poměrně vzdálené získaným hodnotám z termočlánu, je nutné nastínit důvod tohoto problému.

### Princip bezkontaktního měření teploty [5]

Každé uskupení hmoty o teplotě vyšší než absolutní nula ( $0\text{ K} = -273,15\text{ °C}$ ), vysílá infračervené záření, odpovídající jeho teplotě. Příčinou je vnitřní mechanický pohyb molekul. Intenzita tohoto pohybu závisí na teplotě objektu. Pro účely měření termální radiace se pohybujeme v rozsahu vlnových délek od 0,7 do 14 μm. Intenzita tohoto záření je úměrná druhu materiálů, který chceme měřit. Konstantní faktor materiálu nazýváme

emisivita  $\varepsilon$ . Jedná se o známou hodnotu pro většinu materiálů [6], která popisuje schopnost tělesa vydávat infračervenou energii. Může nabývat hodnot v rozmezí od 0 do 100 %, kdy 0 % představuje dokonale lesklý povrch a 100 % představuje ideální zdroj záření, tzv. černé těleso. Pokud má měřený povrch vysokou emisivitu a je teplejší než jeho okolí, infračervený teploměr může zobrazit teplotní hodnotu, která je podstatně nižší než teplota skutečná. V opačném případě, kdy uvažujeme nízkou emisivitu povrchu, je problémem získání nepřesných dat především díky interferenci rušivého infračerveného záření, které je vydáváno předměty v pozadí. Z tohoto důvodu je bezdotykové měření teploty u lesklých předmětů zatíženo velkými chybami v řádech desítek procent, a tudíž se nedoporučuje tuto metodu u lesklých povrchů používat [7]. Emisivita je dále silně závislá na teplotě, geometrii povrchu, tloušťce materiálu a úhlu měřících sond vůči měřenému povrchu.

V našem případě je největším problémem skutečnost, že brzdový kotouč má lesklý povrch. Dále je také velmi těžké určit přesnou závislost emisivity na teplotě. Otázkou tedy je, zda-li je použití bezkontaktních snímačů u setrvačnickového stavu přínosem, právě díky podávání nepřiliš přesných údajů o teplotě souvisejících s proměnnou emisivitou u lesklých materiálů. Vzhledem k tomu, že ani termočlánek umístěný v kotouči neposkytuje konzistentní údaje o jeho teplotě v celém rozsahu měřitelných teplot, bereme jako výslednou teplotu kotouče průměrnou hodnotu vypočtenou ze všech tří snímačů zjišťujících tuto veličinu. Těmi jsou dva infračervené snímače teploty, kterými se zabývám v této kapitole a termočlánekový snímač popsáný v kapitole č. 4.3 *Termočlánekové čidlo teploty*.

## **4.5 Snímač teploty brzdové kapaliny**

V předchozím zapojení byl snímač umístěn přímo ve vyrovnávací nádržce hydraulického okruhu. Bohužel měřená hodnota neodpovídala hodnotě, kterou bychom si od měření teploty brzdové kapaliny představovali, a to z toho důvodu, že pro rovnoměrné zahřátí celé kapaliny bychom potřebovali několik po sobě následujících brzdění. I tak nikdy nebylo zajištěno dokonalé prohřátí celé kapaliny, a proto měla takto naměřená hodnota téměř nulovou vypovídající hodnotu.

V rámci bakalářské práce jsem tedy navrhl jiné vhodnější umístění snímače teploty brzdové kapaliny, který bude nově umístěn v otvoru pro přívod brzdové kapaliny do brzdového třmene. V tomto místě dochází k téměř okamžitému ohřátí brzdové kapaliny.

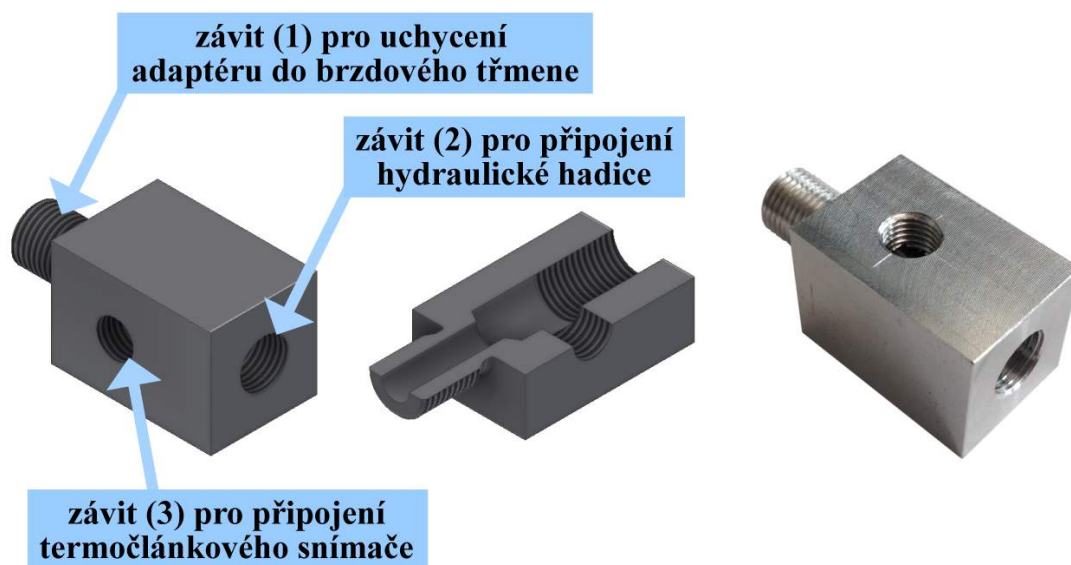
Pro tento účel bylo nutné navrhnout nový termočlánekový snímač. Po zvážení rozhodujících parametrů, kterými bylo především provedení snímače, jeho rozměr a cena, jsem vybral průmyslový termočlánekový snímač **K-M-A-2-5-M8-P** od společnosti Omega. Jeho parametry jsou v následující tabulce:



Snímač Omega	
Typ snímače	Termočlánek K
Provedení	M = Uzavřený konec
Přesnost	Pt100
Průměr sondy	2 mm
Délka sondy	5 mm
Montážní závit	M8x1

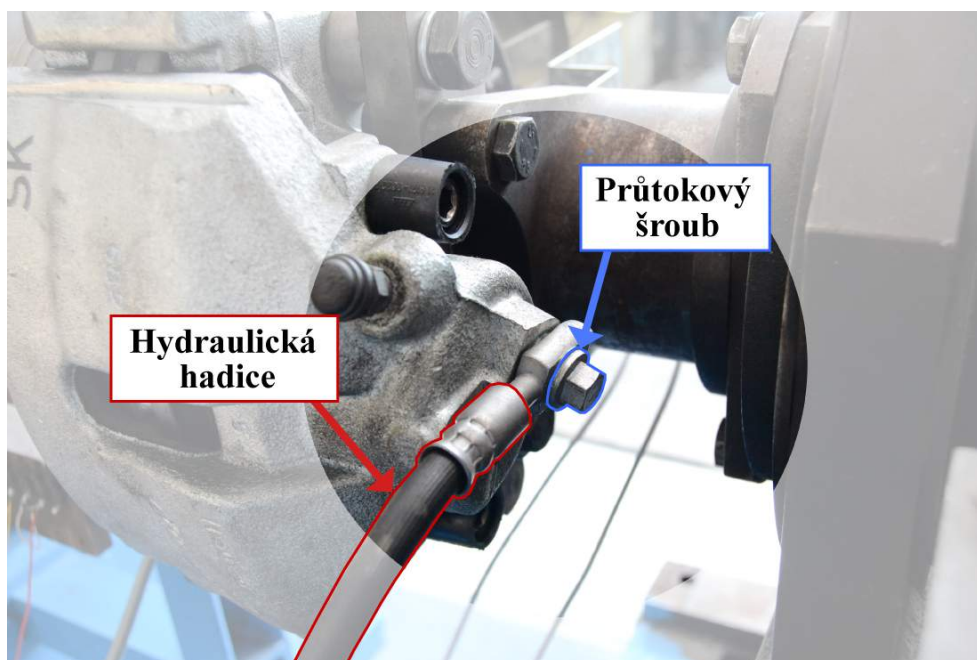
Tab. 7 – Snímač teploty brzdové kapaliny [8]

Dále jsem navrhl a nechal zhotovit adaptér, do kterého bude tento snímač umístěn (viz příloha č. 3 *Výkres č. BP2015-02 – adaptér*). Na následujícím obrázku je zobrazen model tohoto adaptéru včetně popisu přípojovacích závitů a na pravé straně obrázku je fotografie již vyrobeného adaptéru.



Obr. 16 – Adaptér pro připojení nového termočlánekového snímače

Jelikož je dodací lhůta termočlánekového snímače delší než datum odevzdání této práce, nemohu přiložit fotografii finálního řešení a otestovat jeho funkčnost. Následuje tedy podrobný popis umístění nového snímače pro jeho snadnou montáž. Pro pochopení umístění nového snímače vkládám obrázek, kde je popsáno stávající připojení hydraulické hadice, do kterého bude umístěn adaptér pro připojení termočlánekového snímače.



Obr. 17 – Připojení hydraulické hadice bez adaptéru pro nový termočlánekový snímač

Adaptér bude připojen do brzdového třmene pomocí závitu (1) vyobrazeném na obrázku č. 16. Hydraulická hadice bude pomocí stávajícího průtokového šroubu našroubována do závitu (2). Zakoupený termočlánekový snímač bude upevněn v závitu (3). Výstupní kabel termočláneku bude obsahovat dva vodiče, které budou připojeny k portům TC1+ a TC1- měřicí karty NI 9211. Ve virtuálním měřicím programu už je umístěno pole, které po připojení snímače k měřicí kartě zobrazí teplotu brzdové kapaliny.

#### 4.6 Snímač tlaku brzdové kapaliny

Tento snímač slouží k získávání hodnoty tlaku v brzdové kapalině. Jedná se o snímač od firmy ZPA Nová Paka, konkrétně o model **UNIPRES 81**. Jeho konkrétní parametry jsou uvedeny v tabulce č. 8.



Obr. 18 – Snímač tlaku

Snímač ZPA UNIPRES 81			
Napájení	15 – 36 V; Max 100 mA	Doba ustálení po připojení napájecího napětí	10 s
Výstup	0 – 5/10 V		
Rozsah tlaků	0 – 16 Mpa	Připojovací rozměr	M20x1,5/ G1/2 / G1/4
Přesnost	0,4 %, 0,25 %		
Rozměry	Ø 38 – 80 mm		

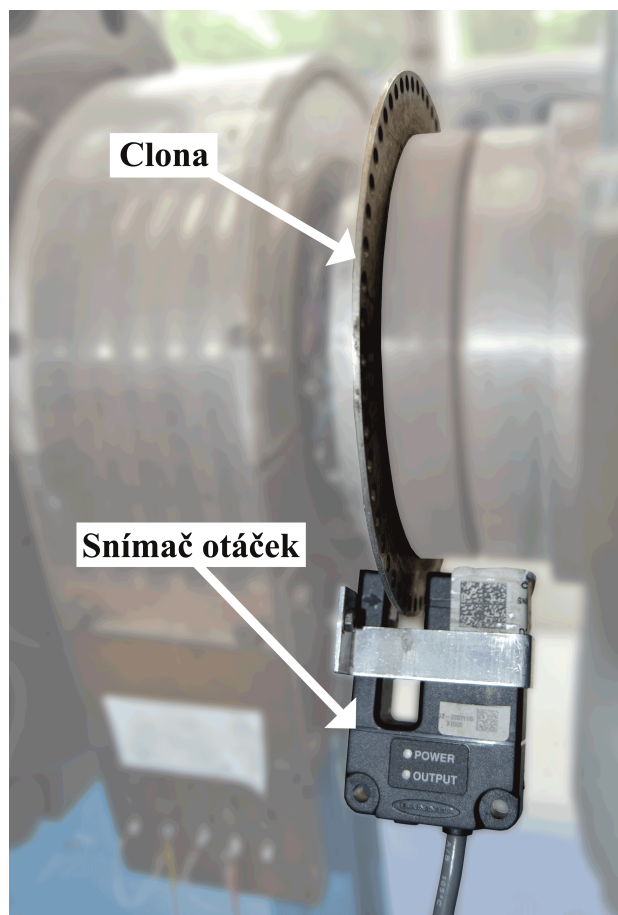
Tab. 8 – Parametry snímače tlaku [9]

Snímač je napájen pomocí 24V laboratorního zdroje. Výstupní signál ze snímače je přiveden na analogovou měřicí kartu NI 9201.

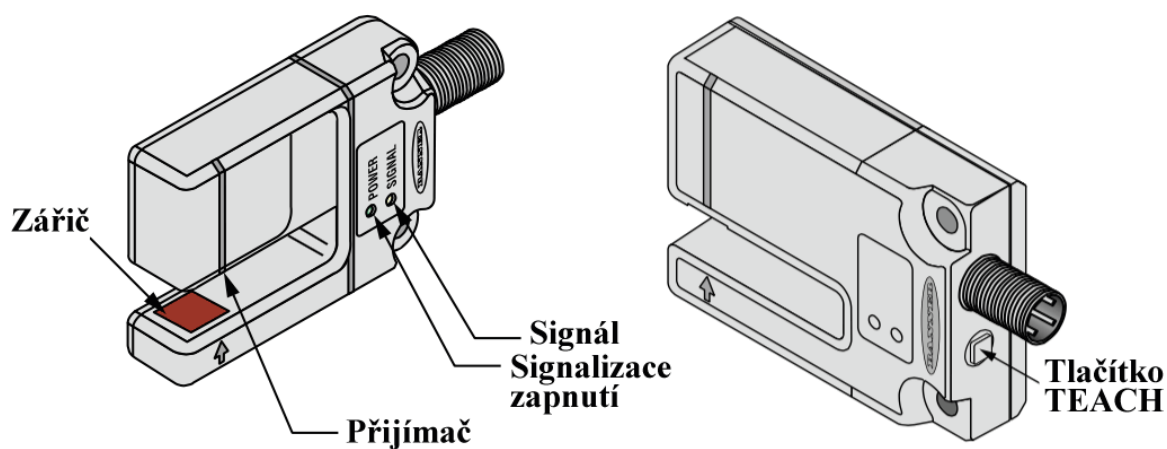


## 4.7 Snímač otáček

Pro snímání otáček je použit snímač **SLE10B6VY**. Paprsek světla vysílaný snímačem je přerušován clonkou s 60 otvory, která je upevněna na hřídeli setrvačnicku.



Obr. 19 – Snímač otáček



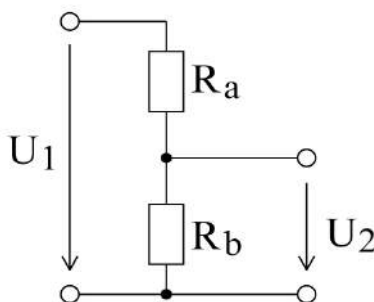
Obr. 20 – Popis snímače otáček [10]

V následující tabulce jsou uvedeny parametry použitého snímače otáček

Snímač SLE10B6VY	
Napájení	10 – 30 V;
Výstup	Bipolární NPN nebo PNP
Spektrální rozsah	8 to 14 $\mu\text{m}$
Rozměry slotu	10 mm

Tab. 9 – Parametry snímače otáček [10]

Jelikož ze snímače vede pouze 1,6 m dlouhý kabel a nepodařilo se mi tělo snímače otevřít a napojit nový kabel uvnitř snímače, provedl jsem jeho prodloužení pomocí 5-ti pinového připojovacího konektoru. Dále bylo nutné vyřešit problém, který se vyskytl s připojením digitálního výstupu snímače na kartu NI 9402. Jelikož výstupní napětí tohoto snímače činilo 24 V a maximální přípustná hodnota vstupního napětí na tuto kartu činí 5 V, bylo třeba snížit výstupní napětí. To jsem provedl pomocí dvou rezistorů, umístěných do svazku kabelů mezi svorkovnicí a měřicí kartou. Schéma tohoto zapojení je následující:



Obr. 21 – Schéma zapojení rezistorů ke snížení výstupního napětí snímače otáček

Výpočet velikosti odporů jsem provedl podle vztahu:

$$U_2 = U_1 \cdot \left( \frac{R_b}{R_a + R_b} \right)$$

Pro potřebně výstupní napětí  $U_2 = 5 \text{ V}$  jsem zvolil rezistory  $R_a = 2 \text{ k}\Omega$  a  $R_b = 560 \Omega$ .

## 4.8 Snímač momentu

Měření krouticího momentu vyvozovaného brzdou je zajištěno pomocí tenzometrického snímače síly **Hottinger Baldwin Messtechnik U1A** s odporem 120  $\Omega$ .



Obr. 22 – Snímač síly

Jelikož známe rameno, na kterém síla působí, není problém pomocí snímače síly určit výsledný moment vyvozovaný brzdou. Snímač je připojen do můstku 3 tenzometrické aparatury Mikrotechna. Před měřením, kdy nejsou snímače zatíženy žádnou silou, je třeba měřící můstek vyvážit pomocí změny odporu proměnných rezistorů a kapacit proměnných kondenzátorů tak, aby výstupní napětí z měřícího můstku bylo nulové. Nastavení tenzometrické aparatury Mikrotechna je následující:

- zapojení do celého můstku (1/1)
- Bridge Voltage 2 V
- Range 0,2 mV/V

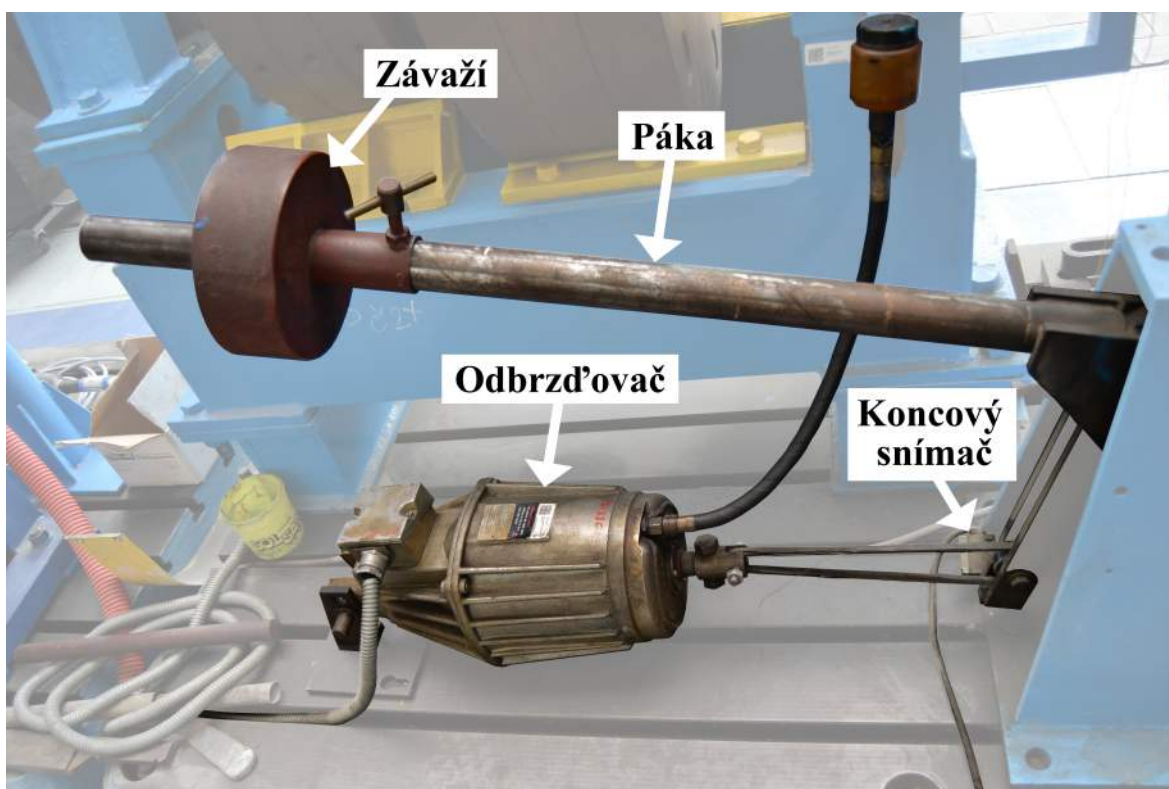


Obr. 23 – Tenzometrická aparatura Mikrotechna



## 4.9 Odbrzďovač a ventilátor

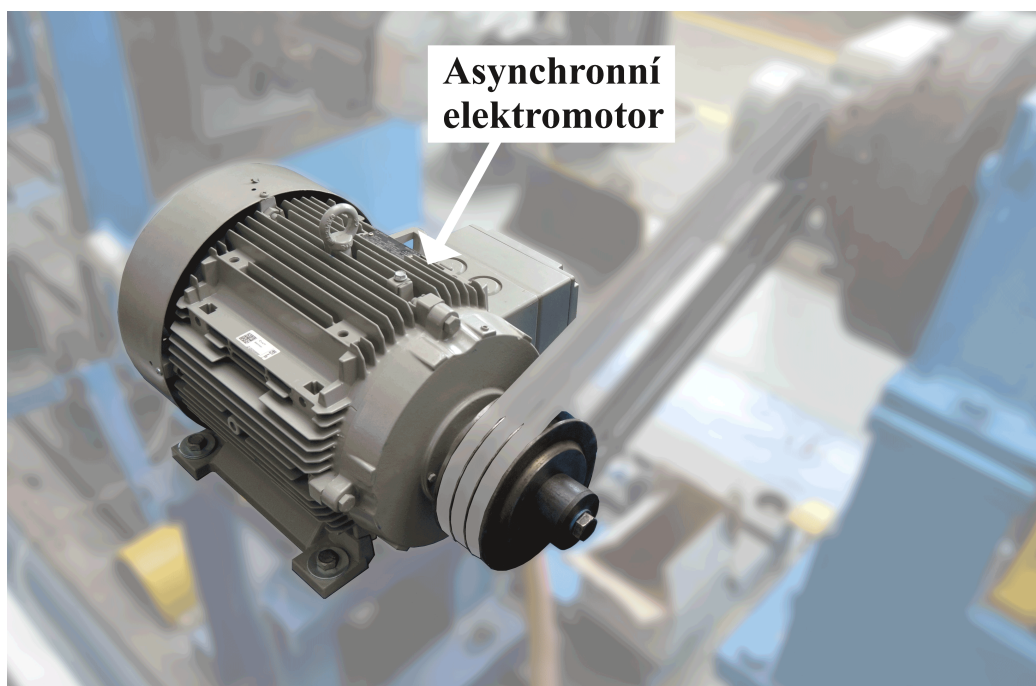
Odbrzďovač slouží k uvolnění závaží na páce, které následně vyvodí v brzdové soustavě tlak působící přes brzdovou kapalinu na pístek brzdových destiček. Změnou polohy závaží na páce dojde ke změně výsledného tlaku. Relé odbrzďovače i ventilátor jsou napájeny napětím 380 V a jsou ovládány pomocí dvou stykačů, které toto napětí spínají. Pro ovládání stykačů je použita měřicí karta NI 9472, která umožňuje na základě požadavku z virtuálního přístroje spínat napětí až 24 V, které je přivedeno na její vstupní svorky. K odbrzďovači náleží také koncový snímač indikující odbrzďení případně zabrzdění setrvačnickového stavu.



Obr. 24 – Odbrzďovač s koncovým snímačem

## 4.10 Asynchronní motor

V současnosti je setrvačnickový stav poháněn pomocí 4-pólového asynchronního motoru **ELEKTRA** typ: **7AA160L04**. Ovládání elektromotoru je provedeno tak, že je z virtuálního přístroje předán požadavek na spuštění či zastavení motoru a také se zde nastavují jeho otáčky pro následné ovládání frekvenčního měniče za využití OPC serveru. Elektromotor pohání hřídel setrvačnicku pomocí řemene. Fotografie elektromotoru je umístěna na další straně.



Obr. 25 – Asynchronní elektromotor

V následující tabulce jsou zmíněny parametry tohoto motoru při zapojení trojúhelník/hvězda ( $\Delta/Y$ ) a při zapojení do trojúhelníku ( $\Delta$ ).

3 ~ motor typ: 7AA160L04			
napětí	400 / 690 V, 50 Hz	napětí	460 V, 60 Hz
zapojení	$\Delta/Y$	zapojení	$\Delta$
proud	29 / 15,9 A	proud	28,5 A
otáčky	1460 min <sup>-1</sup>	otáčky	1760 min <sup>-1</sup>
výkon	15 kW	výkon	17,3 kW
cos $\varphi$	0,84	cos $\varphi$	0,85
účinnost	88,70 %	účinnost	90,50 %

Tab. 10 – Parametry elektromotoru [11]

Elektromotor byl navržen dle následujících požadavků a parametrů [2]:

- roztočení na otáčky 1 000 min<sup>-1</sup> za 60 s;
- roztočení na otáčky 1 700 min<sup>-1</sup> za 120 s;
- zachování řemenového převodu s převodem  $i = 0,8$  a účinnosti 92 %;
- odporový moment setrvačnickového stavu  $M_o = 8,63$  Nm

Pro výpočet elektromotoru se vycházelo z těchto vztahů [2]:

$$M_o = \frac{(\pi \cdot J \cdot n)}{(30 \cdot t)},$$

$$P_m = \frac{M \cdot \omega}{\eta} = \frac{i \cdot \omega_m}{\eta} = \frac{(J \cdot \varepsilon_s + M_o) \cdot \omega_m}{\eta \cdot i},$$

$$M_m = \frac{P_m}{\omega_m},$$

kde  $n$  jsou počáteční otáčky,  $J$  je moment setrvačnosti zkušebnímu stavu a  $t$  je doba doběhu.

V následující tabulce jsou uvedeny přehledy návrhových výpočtů:

převod. poměr řemene $i$	otáčky [ $\text{min}^{-1}$ ]		úhlová rychlost [ $\text{s}^{-1}$ ]		
	$n_s$	$n_m$	$\omega_s$	$\omega_m$	
0,8	1000	800	104,72	83,78	
0,8	1700	1360	178,02	142,42	
doba roztáčení $t$ [s]	úhlové zrychlení [ $\text{s}^{-2}$ ]		odporový moment $M_o$ [Nm]	potřebný výkon motoru $P_m$ [kW]	potřebný moment motoru $M_m$ [Nm]
	$\varepsilon_s$	$\varepsilon_m$			
60	1,75	1,4	8,63	9,35	111,63
120	1,48	1,19	8,63	13,76	96,64

Tab. 11 – Návrh elektromotoru [2]

## 4.11 Frekvenční měnič

V současnosti nejpoužívanější metodou pro ovládání asynchronních motorů je řízení motoru pomocí frekvenčního měniče, který pomocí změny frekvence napájení motoru reguluje jeho otáčky. Tato metoda je tedy použita pro ovládání asynchronního motoru setrvačnickového stavu. V laboratoři je umístěn frekvenční měnič od společnosti **ABB** typu **ACS800-01-0016-3**. Jeho parametry jsou uvedeny v následující tabulce:

měnič <b>ABB ACS800-01-0016-3</b>	
napětí $U_N$	400 V
proud $I_N$	25 A
proud $I_{max}$	32 A
výkon $P_N$	11 kW

Tab. 12 – Parametry frekvenčního měniče [12]

„Frekvenční měnič je ovládán z virtuálního měřicího přístroje v prostředí LabVIEW, kde jsou zadávány požadavky na otáčky zkušebnímu zařízení, na rozběh a zastavení motoru.

Odtud jsou předávány povely do frekvenčního měniče. Povely jsou předávány pomocí OPC serveru, který je nainstalován do operačního systému Windows jako dll knihovna. Tento OPC server umožňuje aplikacím běžícím v operačním systému Windows odesílat a získávat data ze zařízení podporujících tento typ komunikace.“ [2, str. 34]

V aplikaci na setrvačnickovém stavu slouží pro komunikaci PCMCIA karta NDPA-02 od společnosti ABB, která předává signály z OPC serveru pomocí optických kabelů do frekvenčního měniče.

„S frekvenčním měničem lze komunikovat pomocí programu DriveWindow, což je aplikace přímo od společnosti ABB. V případě setrvačnickového stavu je však pro komunikaci s měničem použit virtuální měřicí přístroj v prostředí LabVIEW, který v sobě sdružuje jak ovládání zařízení, tak i sběr dat ze všech použitých snímačů.“ [2, str. 34]

## **4.12 Měřicí karty**

Měřicí karty slouží k ovládání a získávání dat ze snímačů. Nastavení všech měřicích karet je provedeno v prostředí Measurement and Automation Explorer (dále jen MAX). Pro nastavení je použito tři úloh - jedné pro analogové signály, druhé pro digitální signály a třetí pro výstupy. Po spuštění programu MAX se uživatel k nastavení úloh dostane pomocí stromu v levé části okna:

**My System → Data Neighborhood → NI-DAQmx Tasks.**

V seznamu úloh lze dohledat tři, které se týkají nastavení snímačů pro setrvačnickový stav.

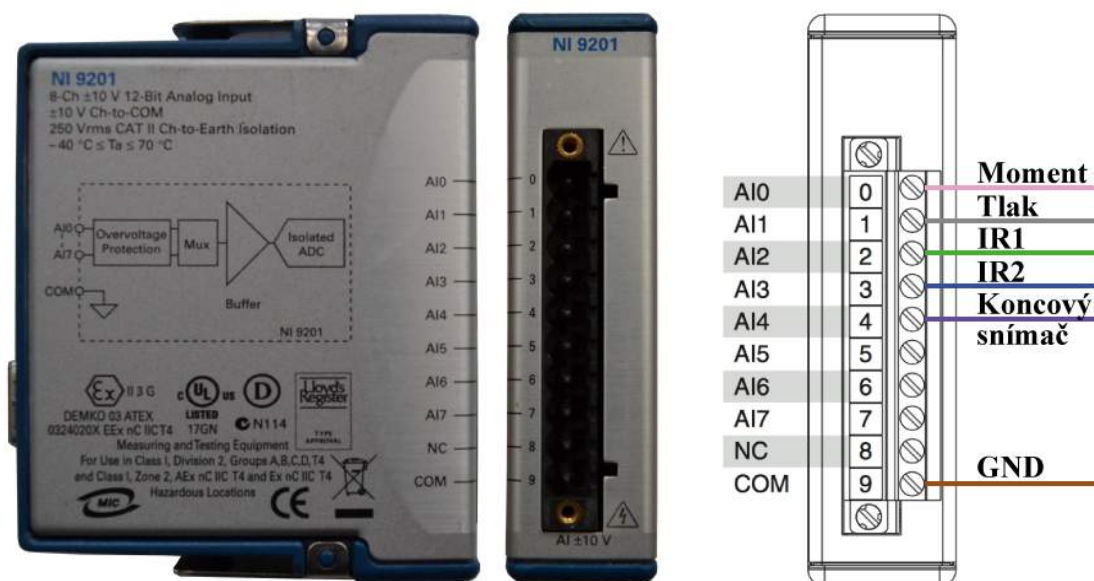
Jedná se o tyto úlohy:

- „setrvacnik,“
- „otacky,“
- „setrvacnik-DIO.“

Pro správnou funkci všech snímačů je nutné, aby byly úlohy nastaveny dle tabulky č. 13 (viz kapitola č. 4.13 *Nastavení jednotlivých karet ve virtuálním prostředí*) a aby měřicí karty byly vloženy do správných pozic v modulu.

Následuje popis jednotlivých karet včetně pokynů k jejich zapojení.

### 4.12.1 Karta NI 9201



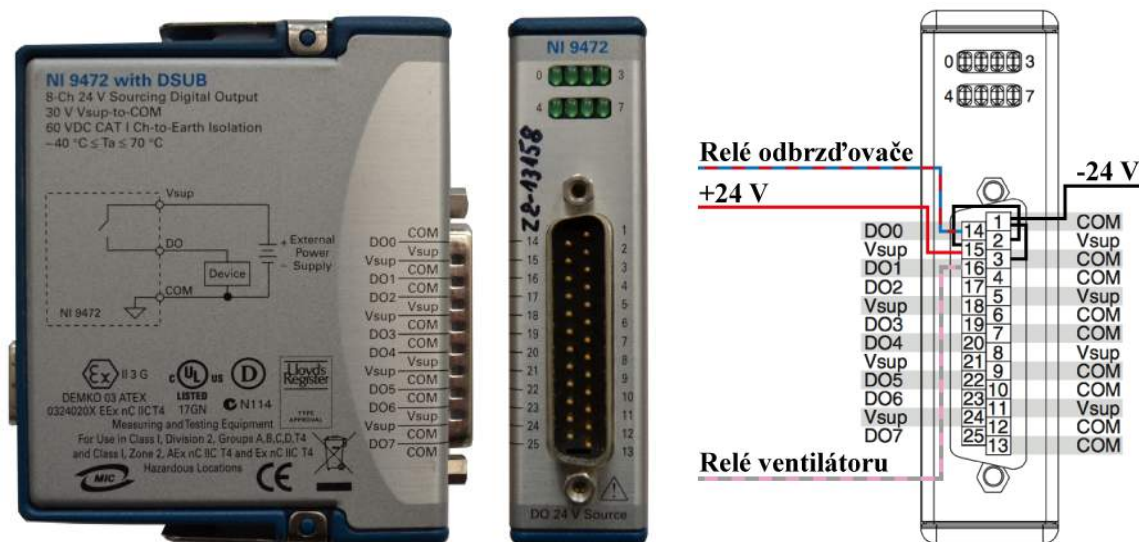
Obr. 26 – Karta NI 9201 a její zapojení

Karta slouží pro příjem analogového signálu v rozsahu 0 – 10 V. Pro správnou funkčnost virtuálního přístroje musí být karta umístěna do pozice 1 – cDAQ4Mod1. V jiném případě je nutné změnit nastavení v prostředí MAX. Karta přijímá signál od těchto snímačů:

- **snímač momentu:** AI0,
- **snímač tlaku:** AI1,
- **IR snímač teploty č. 1:** AI2,
- **IR snímač teploty č. 2:** AI3,
- **koncový snímač:** AI4.

Svorka COM slouží k připojení uzemnění.

## 4.12.2 Karta NI 9472



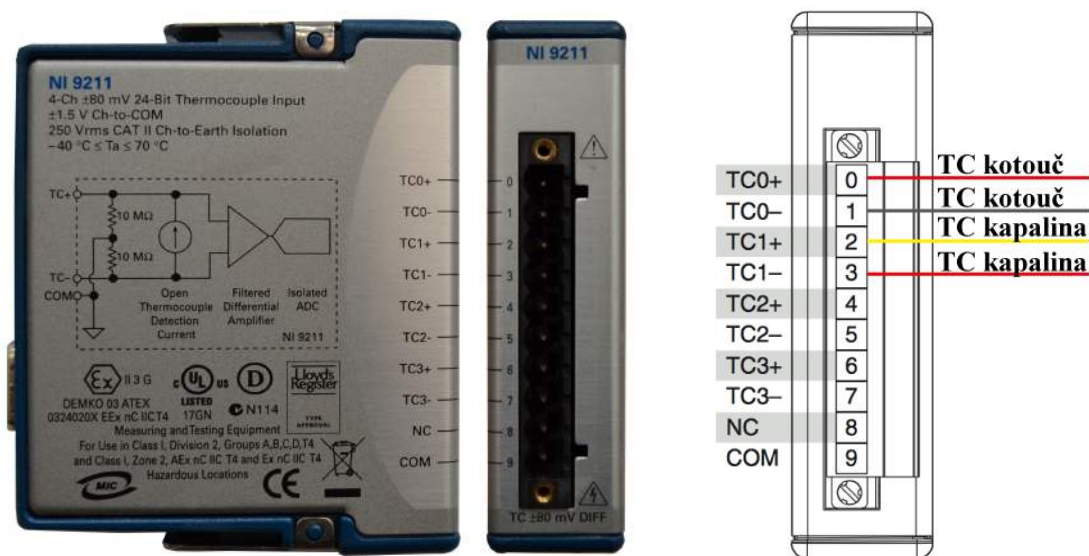
Obr. 27 – Karta NI 9472 a její zapojení

Karta slouží pro spínání výstupního napětí, které je přivedeno na její vstupní svorky. Jeden port karty může spínat maximálně 0,75 A. Karta je použita pro spínání napětí 24 V, které slouží jako ovládací napětí stykačů pro spínání relé odbrzdovače a ventilátoru. Musí být umístěna do pozice 2 – cDAQ4Mod2. V jiném případě je nutné změnit nastavení v prostředí MAX. Připojení jednotlivých výstupů je následující:

- **relé odbrzdovače:** DO0 (pin 14),
- **relé ventilátoru:** DO1 (pin 16),
- **zdrojové napětí +24 V:** Vsup (pin 15), Vsup (pin 2),
- **uzemnění:** COM (pin 1), COM (pin 3),



### 4.12.3 Karta NI 9211



Obr. 28 – Karta NI 9211 a její zapojení

Karta slouží pro příjem analogového signálu z termočlávkových snímačů teploty. Musí být umístěna do pozice 3 – cDAQ4Mod3. V jiném případě je nutné změnit nastavení v prostředí MAX. Připojení jednotlivých snímačů ke konektorům měřicí karty je následující:

- **teplota kotouče:** TC0+, TC1-,
- **teplota brzdové kapaliny:** TC1+, TC1-.

#### 4.12.4 Karta NI 9402



Obr. 29 – Karta NI 9402 a její zapojení

Karta slouží pro příjem digitálního signálu TTL, tzn.  $0 \div 5$  V. V případě setrvačnickového stavu se jedná pouze o snímač otáček, u kterého bylo výstupní napětí sníženo právě kvůli této kartě. Způsob snížení výstupního napětí je popsán v kapitole č. 4.7 *Snímač otáček*. Měřicí karta by měla být umístěna do pozice 4 – cDAQ4Mod4. V jiném případě je nutné změnit nastavení v prostředí MAX. Připojení snímače ke konektoru měřicí karty je následující:

- **snímač otáček:** DIO1 + GND pomocí konektoru.



### 4.13 Nastavení jednotlivých karet ve virtuálním prostředí

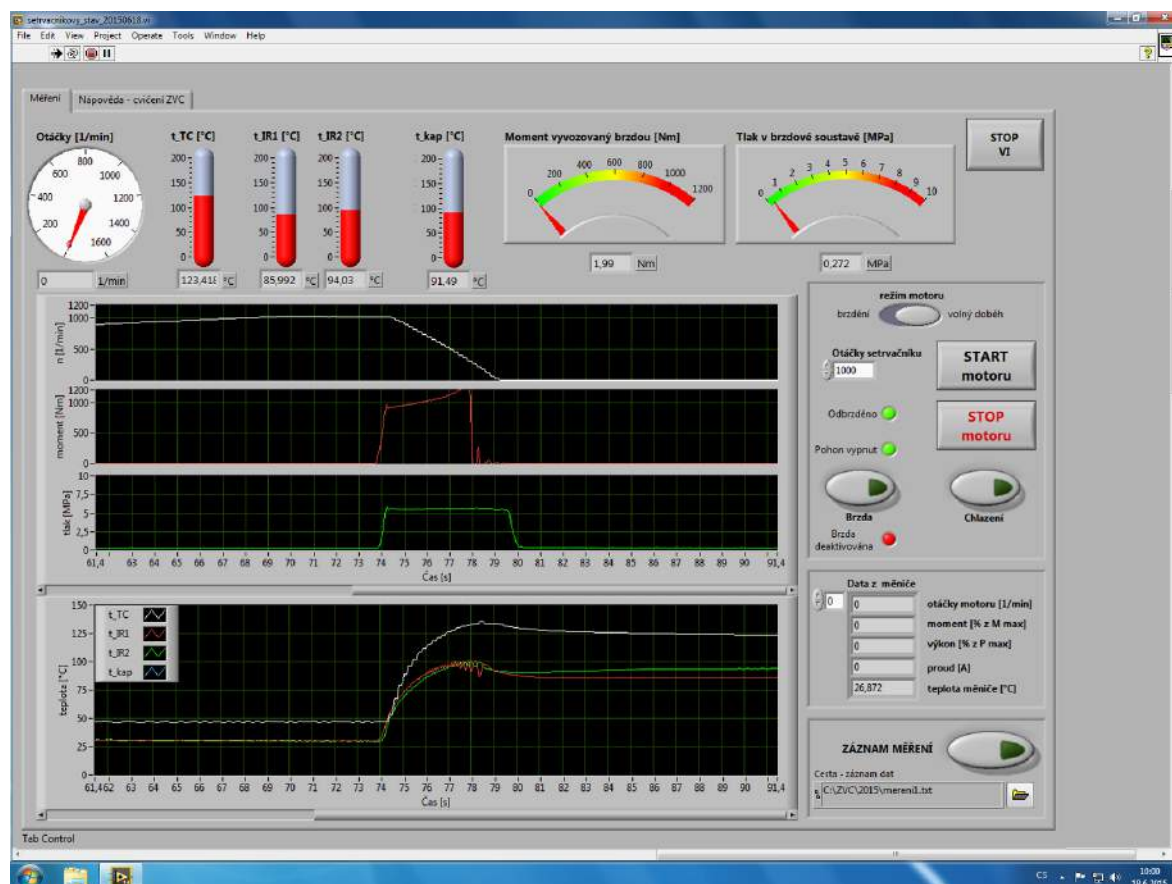
Pro správnou funkci všech snímačů je nutné, aby byly úlohy v programu MAX nastaveny dle následující tabulky a také, aby byly měřicí karty vloženy do správných pozic v modulu CompactDAQ.

Task: setrvacnik								
Channel	Order	Physical Channel	Device Type	Signal Input Range		Scaled Units	Thermo-couple Type	CJC Source
				Min	Max			
teplota_kot	0	cDAQ4Mod3/ai0	NI 9211	0	600	deg C	K	Built In
teplota_kap	3	cDAQ4Mod3/ai1	NI 9211	0	600	deg C	K	Built In
Channel	Order	Physical Channel	Device Type	Signal Input Range		Scaled Units	Terminal Config.	Custom Scaling
				Min	Max			
moment	1	cDAQ4Mod1/ai0	NI 9201	-10	1	Nm	RSE	Moment
tlak	2	cDAQ4Mod1/ai1	NI 9201	-1	15	MPa		tlak_novy
IR1-volt	4	cDAQ4Mod1/ai2	NI 9201	0	500	C		IR010V
IR2-volt	5	cDAQ4Mod1/ai3	NI 9201	0	500	C		IR010V
KS	6	cDAQ4Mod1/ai4	NI 9201	-1	6	V		<No Scale>
Acquisition Mode			Samples to Read			Rate (Hz)		
Continuous Samples			2k			1k		
Task: otacky								
Channel	Order	Physical Channel	Device Type	Signal Input Range		Scaled Units	Starting Edge	Measurement Method
				Min	Max			
RPM	0	cDAQ4Mod4/ctr3	NI 9402	2	100	Hz	Rising	1 Counter
Acquisition Mode			Samples to Read			Rate (Hz)		
Continuous Samples			1k			1k		
Task: setrvacnik-DIO								
Channel	Order	Physical Channel		Device Type				
odbrzdovac-1	0	cDAQ4Mod2/port0/line0		NI 9472 (DSUB)				
odbrzdovac-2	1	cDAQ4Mod2/port0/line1		NI 9472 (DSUB)				
odbrzdovac-3	2	cDAQ4Mod2/port0/line2		NI 9472 (DSUB)				
odbrzdovac-4	3	cDAQ4Mod2/port0/line3		NI 9472 (DSUB)				
ventilator-1	4	cDAQ4Mod2/port0/line4		NI 9472 (DSUB)				
ventilator-2	5	cDAQ4Mod2/port0/line5		NI 9472 (DSUB)				
ventilator-3	6	cDAQ4Mod2/port0/line6		NI 9472 (DSUB)				
ventilator-4	7	cDAQ4Mod2/port0/line7		NI 9472 (DSUB)				

Tab. 13 – Nastavení Measurement and Automation Explorer

## 5. Virtuální měřicí přístroj

Všechny funkce setrvačnickového stavu jsou v současnosti ovládány pomocí virtuálního měřicího přístroje v prostředí LabVIEW. Pouze velikost tlaku v brzdové soustavě je nutné nastavit pomocí polohy závaží na páce. Programové prostředí je zobrazeno na následujícím obrázku:



Obr. 30 – Virtuální měřicí přístroj

Měřicí přístroj slouží také ke zobrazení všech měřených veličin v reálném čase. Ty jsou následně uloženy do zvoleného textového souboru. Zobrazování a případný záznam hodnot probíhá s krokem 0,05 sekundy, přičemž každá zobrazená a zaznamenaná hodnota je vypočtena jako průměrná z dvaceti po sobě jdoucích hodnot získaných z měřicí karty. Tímto způsobem dochází k minimalizaci ovlivnění signálu šumem.

„Po spuštění virtuálního přístroje je možné zadat požadované otáčky setrvačnicku a pokud jsou splněny všechny požadavky na spuštění pohonu (tzn. zařízení je odbrzděné a brzda je deaktivována), je možné spustit elektromotor pomocí tlačítka *START motoru*. Pokud je motor roztočen, je dále možné měnit požadované otáčky v příslušném textovém poli.

Po dosažení požadovaných otáček je před brzděním nutné vypnout elektromotor tlačítkem *STOP motoru* a následně je možné zahájit brzdění tlačítkem *Brzda*.“ [2, str. 35]

„Virtuální měřicí přístroj slouží také pro ovládání odbrzdovače, který umožňuje aktivaci brzdy. Součástí programu je také ochrana, která znemožňuje brzdění, pokud je pohon aktivní a naopak neumožňuje pohon, pokud je zařízení zabrzděné. Tato ochrana využívá signál z koncového snímače, který je umístěn u odbrzdovače a indikuje, zda je závaží vyvozující tlak v brzdové soustavě zvednuté a nedochází tak k brzdění. Z měřicího přístroje je také možné aktivovat ventilátor, který chladí kotoučovou brzdu.“ [2, str. 35]

## 5.1 Popis ovládacích prvků a indikátorů měřicího přístroje

Pro ovládání setrvačnickového stavu slouží následující ovládací prvky a indikátory:

- **Otáčky [1/min]** – zobrazuje aktuální otáčky setrvačnicku,
- **t<sub>TC</sub> [°C]** – zobrazuje teplotu termočlánu v kotouči,
- **t<sub>IR1</sub> [°C]** – zobrazuje teplotu naměřenou prvním infračerveným snímačem,
- **t<sub>IR2</sub> [°C]** – zobrazuje teplotu naměřenou druhým infračerveným snímačem,
- **t<sub>kap</sub> [kap]** – zobrazuje teplotu kapaliny pomocí termočlánu umístěného v brzdovém třmenu,
- **STOP VI** – slouží k vypnutí chodu měřicího přístroje,
- **Otáčky setrvačnicku** – pole pro zadání požadovaných otáček setrvačnicku,
- **START motoru** – tlačítko pro spuštění pohonu,
- **STOP motoru** – tlačítko pro vypnutí pohonu,
- **Odbrzděno/Zabrzděno** – dioda sloužící k indikaci, zda je brzda deaktivována a zároveň je tento stav potvrzen koncovým snímačem,
- **Pohon vypnut** – dioda sloužící k indikaci, zda je pohon deaktivován a je možné aktivovat brzdu,
- **Brzda** – tlačítko pro aktivaci brzdy,
- **Chlazení** – tlačítko pro aktivaci ventilátoru,
- **Brzdění/Brzda deaktivována** – dioda slouží k indikaci, zda je aktivována brzda (svítí zeleně pokud je pohon deaktivován a zároveň je aktivní tlačítko *Brzda*),
- **Záznam měření** – tlačítko sloužící k záznamu všech měřených dat do předem zvoleného souboru. Jeho opětovným stiskem dojde k zastavení záznamu.

## 5.2 Vztahy pro převody měřených napětí na požadované veličiny

Zde jsou uvedeny vztahy pro přepočítání měřeného napětí na měřenou veličinu, které jsou zadány u jednotlivých kanálů v prostředí MAX viz kapitola č. 4. 13 *Nastavení jednotlivých karet ve virtuálním prostředí*. Tyto vztahy jsou nezbytné pro správné zobrazení měřených veličin a jejich hodnoty byly získány pomocí kalibrací dle [1][2].

### **Moment:**

- Použitý vztah zjištěný z kalibrace snímače:  $M = -402,059787 \cdot U + 0,877932$
- Custom scaling:
  - název: Moment
  - vztah:  $Y = -402,059787 \cdot X + 0,87793$

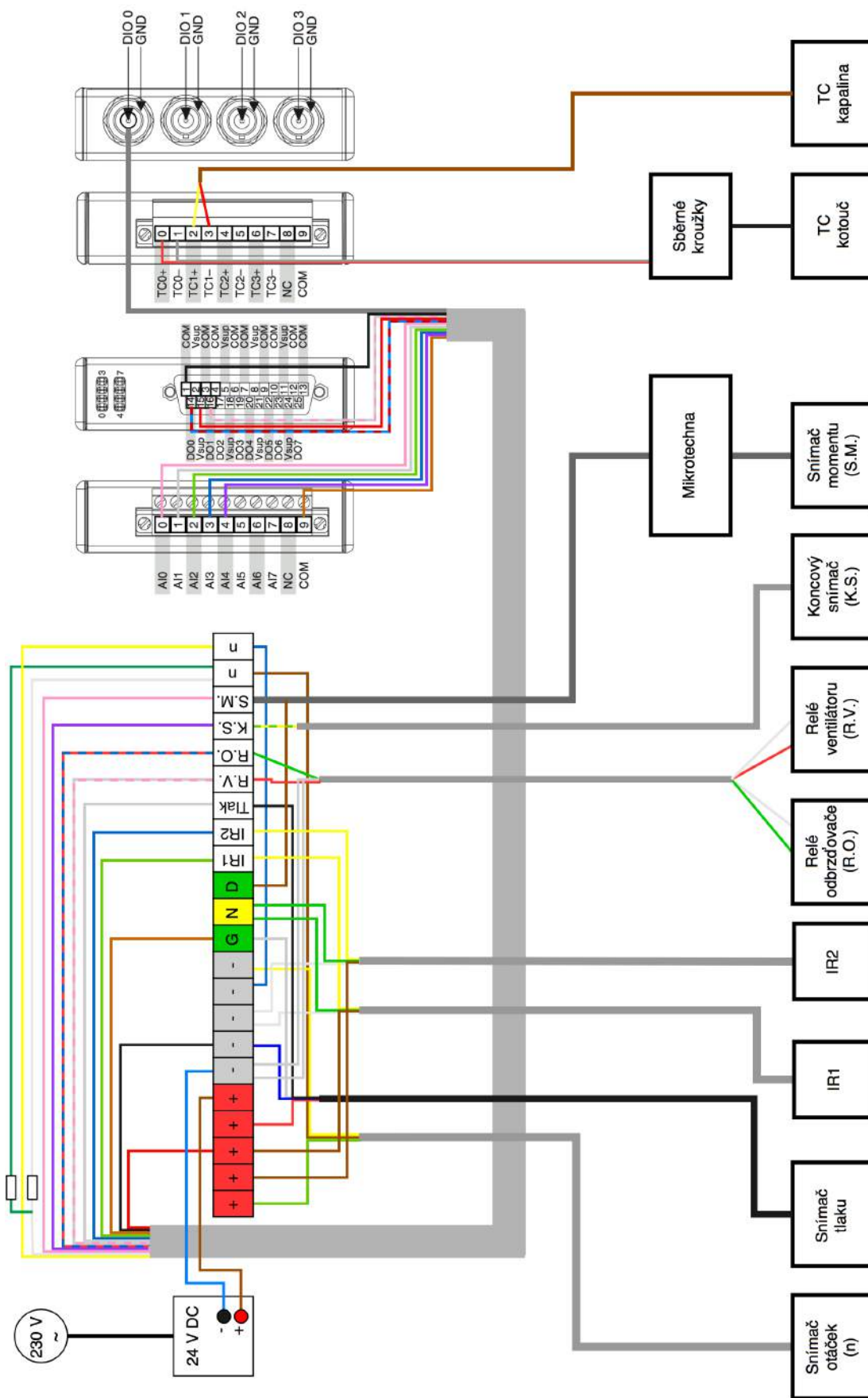
### **Tlak:**

- Použitý vztah zjištěný z kalibrace snímače:  $p = 1,6 \cdot U$
- Custom scaling:
  - název: tlak\_novy
  - vztah:  $Y = 1,6 \cdot X + 0$

### **Infračervené snímače teploty:**

- Použitý vztah:  $t = 50 \cdot U$
- Custom scaling:
  - název: IR010V
  - vztah:  $Y = 50 \cdot X + 0$






Obr. 32 – Schéma zapojení setrvačnickového stavu

## 7. Pokyny k provedení zkoušky kotoučové brzdy

### 7.1 Příprava měření

1. Zapojte všechny snímače dle schématu zapojení, případně dle popisků na vodičích.
2. Zapněte 24V laboratorní zdroj pro napájení snímačů pomocí vypínače na DIN liště.
3. Zapněte tenzometrickou aparaturu Mikrotechna. Zkontrolujte správné vyvážení můstku na tenzometrické aparatuře a v případě rozvážení jej vylad'ete.
4. Odstraňte krytky měřicích senzorů infračervených teploměrů a umístěte senzory na požadovaný průměr kotouče.
5. Vyčkejte 10 minut, než dojde k zahřátí infračervených teploměrů a tenzometrické aparatury Mikrotechna.

### 7.2 Postup měření

1. Spus'te program *setrvacnikovy\_stav\_20150618.vi* umístěný v adresáři *C:\Setrvacnik\BP\_Hujnak*,
2. Spus'te virtuální měřicí přístroj pomocí bílé šipky  umístěné v levém horním rohu programu.
3. Zadejte do příslušného pole požadované otáčky setrvačnicku a spus'te motor pomocí tlačítka „**START MOTORU**.“
4. Spus'te ventilátor pomocí tlačítka „**Chlazení**.“
5. V pravém dolním rohu programu zvolte soubor, do kterého má probíhat ukládání měřených dat (název souboru musí obsahovat i příponu .txt).
6. Po roztočení setrvačnicku na požadované otáčky spus'te záznam měření tlačítkem „**ZÁZNAM MĚŘENÍ**.“
7. Vypněte motor tlačítkem „**STOP MOTORU**“ a zahajte brzdění tlačítkem „**Brzda**.“
8. Po zastavení setrvačnicku vypněte záznam měření tlačítkem „**ZÁZNAM MĚŘENÍ**“ a deaktivujte brzdu tlačítkem „**Brzda**.“
9. Opakujte body 3), 4), 5), 6), 7) a 8), dokud neprovedete dostatečný počet měření.
10. Ukončete virtuální měřicí přístroj tlačítkem „**STOP VI**.“

### 7.3 Po měření

1. Vra'te zpět na své místo krytky senzorů infračervených snímačů teploty, aby nedocházelo ke znečišťování optiky senzorů a tím ke zhoršení přesnosti měření.



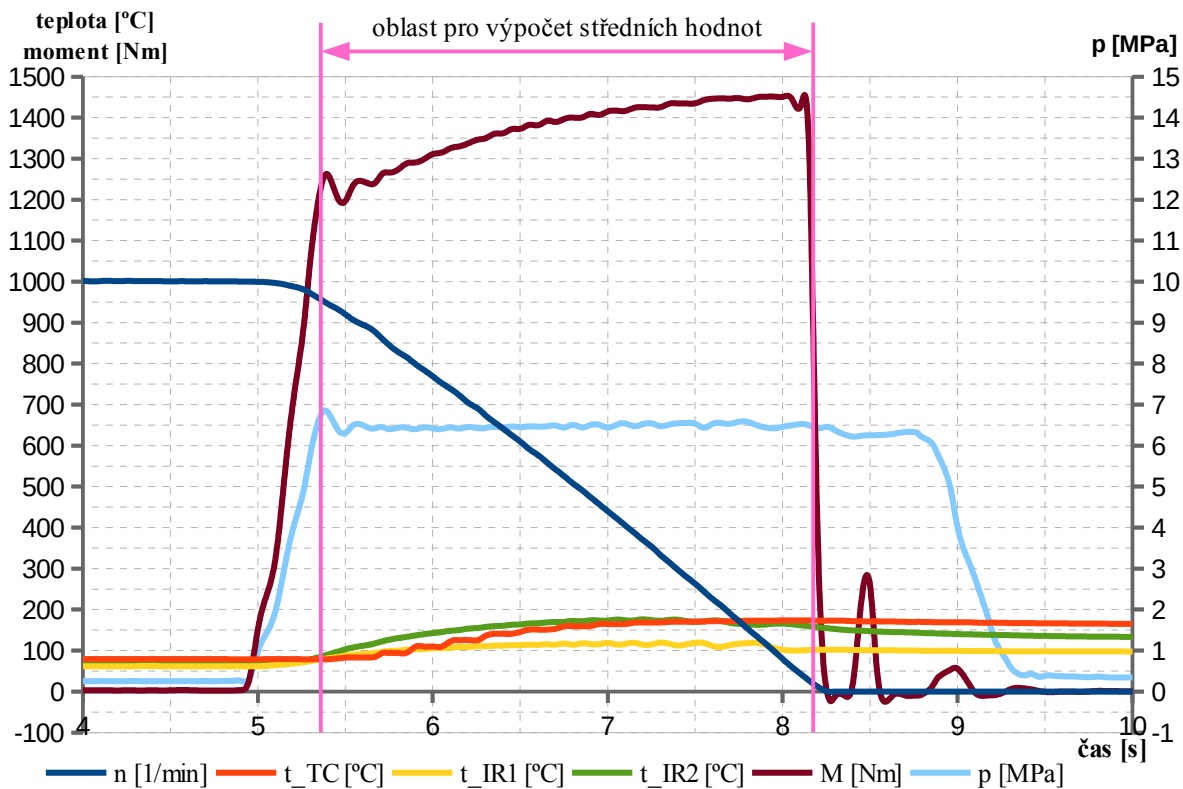
## 8. Zkouška kotoučové brzdy

Tato kapitola obsahuje výsledky experimentální zkoušky kotoučové brzdy se zjištěním součinitele tření mezi brzdovým kotoučem a destičkou a realizuje tak dílčí cíl práce č. 4 (viz kapitola č. 1.2 *Hlavní a dílčí cíle bakalářské práce*), který demonstruje plnou funkčnost setrvačnickového stanoviště po provedených změnách jeho komponent.

Nad rámec zadání bakalářské práce, podle kterého měla být demonstrována funkčnost úspěšným provedením experimentální úlohy zjištění součinitele tření kotoučové brzdy, jsem si vytyčil za cíl provést dvacet experimentálních měření a zjistit pomocí těchto měření závislost součinitele tření na výchozí teplotě brzdového kotouče při stejných počátečních podmínkách měření, tzn. při stejném tlaku a otáčkách setrvačnicku. Nastavení tlaku na setrvačnickovém stanovišti se provádí pomocí závaží, které bylo ponecháno ve stejné výši pro všech dvacet měření. Vlivem úniku oleje z hydromotoru odbrzdovače však docházelo k mírnému pravidelnému poklesu tlaku (u každého měření o cca 0,5 %) a hodnota posledního měření byla provedena při tlaku sníženém o cca 0,6 MPa (což je téměř 9% pokles oproti původní hodnotě). Nepodařilo se tak zcela udržet požadované počáteční podmínky měření. Tato chyba by však neměla mít velký vliv na výsledný průběh grafu závislosti součinitele tření na počáteční teplotě.

Pro demonstraci funkčnosti setrvačnickového stanoviště uvádím vybraný vzorový graf získaný z naměřených hodnot pomocí virtuálního měřicího programu, který zobrazuje průběh měření č. 7. (Další naměřené hodnoty včetně jejich grafického zpracování příkládám na disk DVD do souboru s názvem *Výhodnoceni\_zavislosti\_soucinitel\_treni\_na\_teplote.ods*. Ten je spustitelný ve volně dostupném programu *LibreOffice*.)

Všech dvacet provedených měření probíhalo dle postupu uvedeného v kapitole č. 7 *Pokyny pro provedení zkoušky kotoučové brzdy*. Výchozí teplota kotouče pro první měření byla rovna teplotě okolí v danou chvíli, která činila 33 °C. Počáteční teplota posledního měření byla rovna 172 °C. Zbylá měření jsem teplotně rozložil mezi tyto dvě mezní hodnoty, což je patrné z dále uvedené tabulky č. 14., zobrazující hodnoty ze zkoušky kotoučové brzdy.



Obr. 33 – Zkouška brzdy pro prokázání plné funkčnosti setrvačnickového stanoviště

Těchto grafů jsem získal celkem dvacet (pro každé měření jeden) a z nich jsem následně provedl odečet hodnot. Ze získaných hodnot uvedených v tabulce č. 14 jsem spočetl výsledný součinitel tření  $\mu$  pro každé měření dle vzorce:

$$\mu = \frac{M_{avg}}{\frac{\pi \cdot d_v^2}{2} \cdot \frac{(R_e + R_i)}{2} \cdot p_{avg}},$$

kde  $M_{avg}$  je výsledný moment vyvozený brzdou, vypočtený jako průměrná hodnota získaná z oblasti středních hodnot vyznačených na obrázku č. 33,  $p_{avg}$  je tlak v brzdové kapalině, vypočtený též jako průměrná hodnota z této oblasti,  $d_v$  je průměr pístku brzdové destičky,  $R_e$  je vnější třecí poloměr a  $R_i$  je vnitřní třecí poloměr brzdové destičky. Pro brzdu použitou na setrvačnickovém stavu platí tyto vztahy:

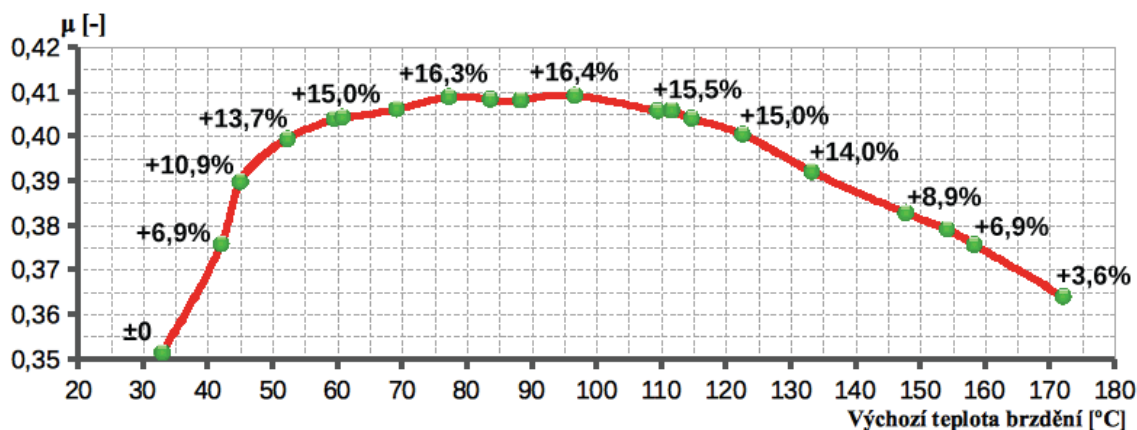
$$d_v = 54 \text{ mm}; R_e = 143 \text{ mm}; R_i = 84 \text{ mm}.$$

V tabulce č. 14 jsou uvedeny vypočtené hodnoty součinitele tření  $\mu$  pro všech 20 měření včetně hodnot, z kterých byly dopočítány.

číslo měření	Počáteční podmínky		Naměřené hodnoty		Vypočtená hodnota součinitele tření $\mu$ [-]
	$n$ [min <sup>-1</sup> ]	$t_{avg}$ [°C]	$M_{avg}$ [Nm]	$p_{avg}$ [MPa]	
1	1000	32,96	1212,05	6,63	0,3514
2	1000	42,05	1280,58	6,55	0,3758
3	1000	45,02	1322,58	6,53	0,3898
4	1000	52,30	1348,45	6,49	0,3994
5	1000	59,49	1358,97	6,47	0,4039
6	1000	60,78	1356,48	6,45	0,4043
7	1000	69,13	1368,09	6,48	0,4061
8	1000	77,21	1370,75	6,45	0,4088
9	1000	83,59	1372,17	6,46	0,4083
10	1000	88,31	1365,71	6,44	0,4081
11	1000	96,64	1356,33	6,38	0,4091
12	1000	109,44	1326,32	6,29	0,4057
13	1000	111,61	1331,38	6,31	0,4058
14	1000	114,69	1317,49	6,27	0,4040
15	1000	122,54	1298,63	6,24	0,4004
16	1000	133,23	1253,45	6,15	0,3920
17	1000	147,77	1214,89	6,11	0,3827
18	1000	154,13	1214,13	6,16	0,3791
19	1000	158,34	1180,43	6,04	0,3756
20	1000	172,07	1146,48	6,06	0,3640

Tab. 14 – Přehled hodnot ze zkoušky kotoučové brzd

Na závěr jsem všechny vypočtené hodnoty součinitelů tření  $\mu$  vložil do grafu, který zobrazuje jejich závislost na počáteční teplotě brzdění.

Obr. 34 – Graf závislosti součinitele tření  $\mu$  na počáteční teplotě brzdění

Křivka závislosti součinitele tření kotoučových brzd na teplotě má konkávní charakter. Z grafu je vidět počáteční rychlý nárůst součinitele tření při relativně malém nárůstu teploty brzdového kotouče. Zvýšení teploty z výchozí hodnoty (teplota v laboratoři byla

33 °C) o 20 °C způsobilo navýšení koeficientu tření o cca 13 % oproti výchozímu stavu. Další průběh vykazoval při postupném navyšování teploty o dalších 80 °C poměrně plochý tvar s extrémem navýšení součinitele tření o 16,4 % výchozí hodnoty. Následné zvyšování teploty již způsobovalo téměř lineární snižování součinitele tření a to až na konečnou hodnotu navýšení oproti výchozímu stavu o 3,6 %, při které už nebylo možno dále počáteční teplotu měření v laboratorních podmínkách navyšovat.

Zjištěný graf průběhu součinitele tření na teplotě ukazuje podle mne na kombinaci převážně abrazivního (brusného) a částečně rovněž adherentního (přilnavého) tření mezi brzdovými destičkami a kotoučem. Podle Carroll Smith [13] se abrazivní a adherentní druh brzdového tření uplatňuje při brzdění současně a v závislosti na teplotě brzdové destičky a kotouče odlišně.

U převládajícího abrazivního tření jsou přerušeny krystalické vazby v materiálu brzdové destičky a v menší míře i v litině brzdového kotouče, který jako tvrdší materiál obrušuje měkčí destičku. Rozbíjení krystalických vazeb generuje teplo vzniklé třením brzdové destičky a kotouče [13]. Destičky, které fungují primárně na abrazi, se zahřívají a mají tendenci při vysokých teplotách tzv. vadnout. Tento efekt je nežádoucí. Nejdříve tedy podle grafu dochází vlivem teploty k nárůstu součinitele tření a to až k teplotě, která překračuje stanovený limit materiálu destičky pro abrazivní tření. Tato teplota odpovídá v experimentální zkoušce extrémní hodnotě konkávní křivky.

Po dosažení použitelného teplotního limitu pro adhezivní tření začnou destičky náhodně a nepravidelně ukládat svůj materiál na povrch kotouče, což nemusí být opticky patrné. Tím dochází k nárůstu adherentního (přilnavého) tření, u něž přechází materiál mezi destičkou a kotoučem, což ve výsledku představuje nejen ztrátu účinnosti brzdění, ale i vznik vrstvičky materiálu destičky na kotouči. Řidiči popisují tento jev jako „házení“ kotouče [13]. Známým důsledkem lokálního přehřívání a adherentního tření při zvýšených teplotách brzdění je vznik nepravidelné tloušťky brzdového kotouče, na kterém nepravidelnost způsobuje přenesení materiálu z brzdové destičky. V praxi je nezbytné takové brzdové kotouče přebrousit na stejnou tloušťku.

Výsledek zjištěné závislosti součinitele tření na teplotě je s přihlédnutím k výše zmíněným faktům potvrzením snahy výrobců o udržení hodnoty součinitele tření co nejbližší oblasti jeho nejvyšší hodnoty. Z tohoto důvodu jsou vyráběny brzdové kotouče a brzdové destičky z mnoha různých materiálů, které dokáží posunout ideální hodnotu součinitele do potřebné oblasti teplot dle podmínek použití brzdového soustrojí.

## 9. Závěr – splnění cílů práce

Cíle bakalářské práce *Měření kotoučových brzd na setrvačnickovém stanovišti* byly stanoveny v kapitole č. 1 *Cíle práce* včetně měřítek pro vyhodnocení jejich dosažení. Tato závěrečná kapitola vyhodnocuje splnění hlavního cíle a dílčích cílů bakalářské práce s využitím těchto měřítek.

### 9.1 Splnění hlavního cíle práce

Provedené experimentální naměření hodnot pro určení součinitele tření kotoučových brzd podrobně rozebrané v kapitole č. 8 *Zkouška kotoučové brzdy* prokazuje plnou funkčnost navržených a zrealizovaných změn setrvačnickového stanoviště. Hlavní cíl práce *Funkčně zapojit a provést požadované úpravy setrvačnickového stanoviště pro experimentální měření součinitele tření kotoučových brzd* byl prokázán měřením a beze zbytku splněn.

### 9.2 Splnění dílčího cíle č. 1

Výsledek dílčího cíle č. 1 *Detailně se seznámit s výchozím stavem setrvačnickového stanoviště* byl popsán a zdokumentován zejména v kapitolách č. 2 *Popis zařízení* č. 3 *Navržené a realizované úpravy* (v podkapitolách *Výchozí stav*), č. 4 *Popis jednotlivých komponent* a č. 5 *Virtuální měřicí přístroj*.

### 9.3 Splnění dílčího cíle č. 2

Dílčí cíl č. 2 *Navrhnout a zrealizovat nové setrvačnickové stanoviště včetně požadovaných změn jeho komponent a nového zapojení* byl splněn změnami na setrvačnickovém stanovišti, které mají charakter inovace stavu. V rámci bakalářské práce byly uskutečněny tyto úpravy:

- a) Navržen nový držák pro připojení ovládacích prvků (viz příloha č. 2 – *Výkres č. BP2015-01 – držák*), který byl zadán k výrobě v laboratoři a zasazen do stanoviště.
- b) Navržena nová svorkovnice se sjednoceným napájením všech prvků a tento návrh byl na zrealizován na setrvačnickovém stanovišti. Propojeny signály z čidel na měřicí karty a z měřicích karet do řídicího počítače setrvačnickového stanoviště.
- c) Navrženo nové vedení kabelů v laboratoři a provedeny jejich nové rozvody.
- d) Všechny nové a stávající komponenty setrvačnickového stanoviště byly integrovány do funkčního celku.

Popis navržených a provedených změn komponent setrvačnickového stanoviště je uveden v kapitole č. 3. *Navržené a realizované úpravy* (v podkapitolách *Nový stav*) a pro řídicí program jsou změny popsány v kapitole č. 5 *Virtuální měřicí přístroj*. Celková integrace setrvačnickového stanoviště je popsána v kapitole č. 6 *Schémata setrvačnickového stanoviště*.

### 9.3 Splnění dílčího cíle č. 3

Splnění dílčího cíle č. 3 *Detailně popsat komponenty a zapojení setrvačnickového stanoviště* prokazují následující kapitoly obsahující podrobné popisy, schémata a pokyny:

4. *Popis jednotlivých komponent*
5. *Virtuální měřicí přístroj*
6. *Schémata setrvačnickového stanoviště*
7. *Pokyny k provedení zkoušky kotoučové brzdy.*

Nutnou podmínkou dosažení dílčího cíle č. 3 bylo rovněž:

- a) Provedení experimentálního naměření odchylek teploty v kotouči mezi etalonovou hodnotou získanou pomocí přesné měřicí sondy a hodnotou naměřenou termočlánkem.
- b) Zavedení naměřených odchylek teploty novou korekční funkcí do řídicího programu LabVIEW.

### 9.4 Splnění dílčího cíle č. 4

Řádné splnění dílčího cíle č. 4 *Provést experimentální zkoušku kotoučové brzdy se zjištěním součinitele tření mezi brzdovým kotoučem a destičkou* popisují dosažené výsledky experimentální zkoušky uvedené v kapitole č. 8 *Zkouška kotoučové brzdy*. Naměřené výsledky prokazují rovněž využitelnost nového setrvačnickového stanoviště pro další laboratorní práci:

- a) Graf získaný z hodnot zkoušky kotoučové brzdy prokazuje průběhem měřených hodnot teploty, momentu, tlaku a otáček plnou funkčnost setrvačnickového stanoviště.
- b) Bylo provedeno dvacet měření prokazujících stabilitu funkčnosti setrvačnickového stanoviště. Výsledky těchto měření jsou uvedeny v navazující podkapitole.

## **9.5 Další dosažené výsledky bakalářské práce**

V rámci provádění experimentálních zkoušek kotoučové brzdy se zjišťováním součinitele tření mezi brzdovým kotoučem a destičkou (viz dílčí cíl č. 4) jsem opakovaným měřením zjistil, že v reálných podmínkách je výpočet součinitele tření (viz kapitola č. 8 *Zkouška kotoučové brzdy*) závislý na teplotě kotoučové brzdy. Experimentálně byl zjištěn konkávní charakter průběhu součinitele tření kotoučových brzd v závislosti na počáteční teplotě brzdění s tím, že do jisté teploty (v mém případě do teploty cca 97 °C) docházelo k navýšení účinnosti brzdy. Od tohoto maxima (v mém případě se jednalo o 16,4% navýšení součinitele oproti výchozímu stavu) začalo docházet při zvyšování teploty k postupnému snižování součinitele tření, jak je patrné z *grafu závislosti součinitele tření  $\mu$  na počáteční teplotě brzdění* uvedeném na obrázku č. 34 (str. 49). Tento průběh vychází z uplatněných typů abrazivního a adherentního tření a rovněž z materiálových vlastností kotouče a brzdového obložení popsaných v kapitole č. 8. *Zkouška kotoučové brzdy*.



## Použitá literatura

- [1] NERAD, Tomáš. *Ovládání setrvačnickového stavu*. Praha, 2010. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní. Vedoucí práce Doc. Dr. Ing. Gabriela Achtenová.
- [2] NERAD, Tomáš. *Měření kotoučových brzd na setrvačnickém stanovišti*. Praha, 2012. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní. Vedoucí práce Doc. Dr. Ing. Gabriela Achtenová.
- [3] JZW615301D. *SKparts eshop* [online]. © 2015 [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: <http://www.eskoda-shop.cz/Kotoucova-brzda-PREDNI-76716/4012-Kotouč-brzdový-ECO-288x25mm-JZW615301D>
- [4] NON-CONTACT IR temperature sensors. *Micro-epsilon USA* [online]. © 2015 [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: [http://www.micro-epsilon.com/download/products/\\_temperature/dax--thermoMETER-CT--en-us.html](http://www.micro-epsilon.com/download/products/_temperature/dax--thermoMETER-CT--en-us.html)
- [5] HUŠEK Miloš. *Princip bezdotykového měření teploty. QTEST – Měřicí a přístrojová technika* [online]. © 2009-2014 [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: <http://www.qtest.cz/bezdotykove-teplomery/bezdotykove-mereni-teploty.htm>
- [6] THE ENGINEERING TOOLBOX. *Emissivity Coefficients of some common Materials* [online]. © 2015 [cit. 2015-05-17]. Dostupné z: [http://www.engineeringtoolbox.com/emissivity-coefficients-d\\_447.html](http://www.engineeringtoolbox.com/emissivity-coefficients-d_447.html)
- [7] SNELL John. *Emissivity: Understanding How it Affects Your Thermal Images*. Thermal Imaging blog from Fluke Thermography [online]. © 2015 [cit. 2015-05-17]. Dostupné z: <http://thermal-imaging-blog.com/index.php/2010/09/01/emissivity-understanding-how-it-affects-your-thermal-images/#.VYLaA2BN3II>
- [8] P, J, K, T, N Série. *Jakar Electronics, spol. s.r.o.* [online]. © 1995-2011 [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: <http://www.omegaeng.cz/ppt/pptsc.asp?ref=t3probes&Nav=tema09>
- [9] UNIPRES 82 11482. *ZPA Nová Paka, a.s.* [online]. © 2012 [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: <http://www.zpanp.cz/files/doc/snimac-tlaku-relativniho-a-absolutniho-unipres-4.pdf>
- [10] SLE10 Expert Series Slot Sensor. *Banner Engineering Corp.* [online] © 2015 [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: <http://info.bannerengineering.com/cs/groups/public/documents/literature/60378.pdf>

- [11] Technische Liste ELEKROMOTOREN. *Elektra Handelsgesellschaft m.b.H.* [online]. © 2015 [cit. 2015-05-29]. Dostupné z:  
[http://www.elektra-dillingen.de/downloads/Katalog\\_MEZ\\_NEU\\_2008.pdf](http://www.elektra-dillingen.de/downloads/Katalog_MEZ_NEU_2008.pdf)
- [12] ACS 800. ABB - technologie pro energetiku a automatizaci [online]. © 2015 [cit. 2015-05-25]. Dostupné z:  
[http://www05.abb.com/global/scot/scot239.nsf/veritydisplay/5255334c1e97fc94c2256faa003dd552/\\$file/ACS%20800.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot239.nsf/veritydisplay/5255334c1e97fc94c2256faa003dd552/$file/ACS%20800.pdf)
- [13] Carroll Smith. *The "Warped" Brake Disc and Other Myths of the Braking System.* [online] © 2004 [cit. 2015-06-17]. Dostupné z:  
<http://www.stoptech.com/technical-support/technical-white-papers/-warped-brake-disc-and-other-myths>

## Použité symboly a zkratky

AI	analog input – analogový vstup
$b$ [mm]	šířka setrvačnicku
$\cos \varphi$ [1]	účinník
DI	digital input – digitální vstup
DO	digital output – digitální výstup
$d_v$ [mm]	průměr pístku brzdové destičky
$d_v$ [mm]	průměr pístku brzdové destičky
GND	ground – uzemnění
$i$ [1]	převodový poměr
$I_{max}$ [A]	maximální proud elektromotoru
$I_{max}$ [A]	maximální proud elektromotoru
$I_N$ [A]	nominální proud elektromotoru
$I_N$ [A]	nominální proud elektromotoru
IR1	infračervený snímač 1
IR2	infračervený snímač 2
$J$ [kg·m <sup>2</sup> ]	moment setrvačnosti
$J_k$ [kg·m <sup>2</sup> ]	moment setrvačnosti kola
$J_{stavu}$ [kg·m <sup>2</sup> ]	celkový moment setrvačnosti setrvačnickového stavu
$J_v$ [kg·m <sup>2</sup> ]	moment setrvačnosti vozu
$k$	koeficient zatížení brzdy
KS	koncový snímač
$m$ [kg]	hmotnost
$M$ [Nm]	točivý moment vyvozovaný brzdou
$M_{avg}$ [Nm]	průměrný moment vyvozený brzdou vypočtený z oblasti středních hodnot
MAX	Measurement and Automation Explorer
$M_m$ [Nm]	potřebný točivý moment motoru
$M_o$ [Nm]	odporový moment
$m_{setrvačná}$ [kg]	setrvačná hmotnost vozu
$m_{simul}$ [kg]	simulovaná hmotnost vozu na setrvačnickém stavu
$m_{vozu}$ [kg]	celková hmotnost vozu
$n$ [min <sup>-1</sup> ]	otáčky
NI	National Instruments
$n_m$ [min <sup>-1</sup> ]	otáčky motoru
$n_s$ [min <sup>-1</sup> ]	otáčky setrvačnicku
OPC	Open Platform Communications
$p_{avg}$ [MPa]	průměrný tlak vypočtený z oblasti střední hodnot
$P_m$ [kW]	potřebný výkon elektromotoru
$R$ [Ω]	elektrický odpor
$r_1$ [mm]	vnitřní poloměr setrvačnicku
$r_2$ [mm]	vnější poloměr setrvačnicku
$R_e$ [mm]	vnější třecí poloměr brzdové destičky
$R_i$ [mm]	vnitřní třecí poloměr brzdové destičky
$r_k$ [mm]	poloměr kola
$r_{pneu}$ [mm]	poloměr pneumatiky
$t_{avg}$ [°C]	průměrná teplota vypočtená z hodnot $t_{TC}$ , $t_{IR1}$ a $t_{IR2}$
$t_{sonda}$ [°C]	teplota změřená ruční termočlávkovou sondou

$t_{TC}$ [°C]	teplota termočlánu v kotouči
$t_{TCkorig}$ [°C]	korigovaná teplota termočlánu v kotouči pomocí korekční funkce
TC	thermocouple – termočlánek
TTL	tranzistor-tranzistor logic – tranzistorově-tranzistorová logika
$U$ [V]	elektrické napětí
$U_N$ [V]	nominální napětí elektromotoru
$v$ [m·s <sup>-1</sup> ]	rychlost
Y	zapojení do hvězdy
$\Delta$	zapojení do trojúhelníku
$\delta$ [1]	součinitel rotačních hmot
$\varepsilon$ [1]	emisivita
$\varepsilon_m$ [s <sup>-1</sup> ]	úhlové zrychlení motoru
$\varepsilon_s$ [s <sup>-1</sup> ]	úhlové zrychlení setrvačnicku
$\mu$ [1]	součinitel tření mezi brzdovým kotoučem a brzdovou destičkou
$\rho$ [kg·m <sup>2</sup> ]	hustota
$\omega$ [s <sup>-1</sup> ]	úhlová rychlost

## Seznam obrázků

Obr. 1 – Řetězec zadání – stanovení cílů – měřítka splnění – vyhodnocení cílů práce.....	8
Obr. 2 – Setrvačnickový stav v laboratořích Ústavu automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel.....	11
Obr. 3 – Setrvačnickový stav před úpravami.....	12
Obr. 4 – Držák s popisem jednotlivých komponent.....	13
Obr. 5 – Původní svorkovnice.....	13
Obr. 6 – Nová svorkovnice.....	14
Obr. 7 – Nové setrvačnickové stanoviště.....	15
Obr. 8 – Rozmístění závaží na hřídeli setrvačnicku [1].....	16
Obr. 9 – Brzdový kotouč s termočlánkem.....	19
Obr. 10 – Brzdový kotouč použitý na hřídeli setrvačnicku [3].....	19
Obr. 11 – Brzdové destičky.....	20
Obr. 12 – Odchyšky měření mezi skutečnou (naměřenou) teplotou kotouče a teplotou termočlánku zobrazenou v ovládacím programu LabVIEW před zavedenou korekcí.....	21
Obr. 13 – Odchyšky mezi skutečnou (naměřenou) teplotou kotouče a teplotou termočlánku zobrazenou v ovládacím programu LabVIEW po aplikaci navržené korekční funkce.....	22
Obr. 14 – Infračervené snímače teploty.....	23
Obr. 15 – Vyhodnocovací jednotky IR snímačů.....	24
Obr. 16 – Adaptér pro připojení nového termočládkového snímače.....	26
Obr. 17 – Připojení hydraulické hadice bez adaptéru pro nový termočládkový snímač.....	27
Obr. 18 – Snímač tlaku.....	28
Obr. 19 – Snímač otáček.....	29
Obr. 20 – Popis snímače otáček [10].....	29
Obr. 21 – Schéma zapojení rezistorů ke snížení výstupního napětí snímače otáček.....	30
Obr. 22 – Snímač síly.....	31
Obr. 23 – Tenzometrická aparatura Mikrotechna.....	31
Obr. 24 – Odbrzdovač s koncovým snímačem.....	32
Obr. 25 – Asynchronní elektromotor.....	33
Obr. 26 – Karta NI 9201 a její zapojení.....	36
Obr. 27 – Karta NI 9472 a její zapojení.....	37
Obr. 28 – Karta NI 9211 a její zapojení.....	38

Obr. 29 – Karta NI 9402 a její zapojení.....	39
Obr. 30 – Virtuální měřicí přístroj.....	41
Obr. 31 – Schéma setrvačnickového stavu.....	44
Obr. 32 – Schéma zapojení setrvačnickového stavu.....	45
Obr. 33 – Zkouška brzdy pro prokázání plné funkčnosti setrvačnickového stanoviště.....	47

## Seznam tabulek

Tab. 1 – Zadání bakalářské práce.....	8
Tab. 2 – Hlavní a dílčí cíle bakalářské práce.....	8
Tab. 3 – Měřítko dosažení cílů bakalářské práce.....	9
Tab. 4 – Parametry jednotlivých setrvačníků [1].....	16
Tab. 5 – Zastoupené modely vozů [2].....	17
Tab. 6 – Parametry IR snímače [4].....	24
Tab. 7 – Snímač teploty brzdové kapaliny [8].....	26
Tab. 8 – Parametry snímače tlaku [9].....	28
Tab. 9 – Parametry snímače otáček [10].....	30
Tab. 10 – Parametry elektromotoru [11].....	33
Tab. 11 – Návrh elektromotoru [2].....	34
Tab. 12 – Parametry frekvenčního měniče [12].....	34
Tab. 13 – Nastavení Measurement and Automation Explorer.....	40
Tab. 14 – Přehled hodnot ze zkoušky kotoučové brzdy.....	48



## **Přílohy**

Příloha č. 1 DVD disk s bakalářskou prací, na kterém jsou uloženy tyto přílohy:

- všechny mnou pořízené fotografie včetně jejich upravených verzí použitých v textu práce
- návody ke všem použitým snímačům a zařízením setrvačnickového stavu
- obrázky a schémata použitá v této práci včetně jejich zdrojových souborů pro usnadnění budoucí návaznosti na tuto práci
- tabulkové soubory obsahující všechna naměřená a vyhodnocená data

Příloha č. 2 Výkres č. BP2015-01 – držák

Příloha č. 3 Výkres č. BP2015-02 – adaptér