



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

MĚŘENÍ TEPLOTNÍHO ZATÍŽENÍ U OBRÁBĚCÍCH STROJŮ

TEMPERATURE MEASUREMENT OF A MACHINE TOOL

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Tomáš Sloboda

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Dominik Hermanský

BRNO 2017

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Ústav:	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Student:	Tomáš Sloboda
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Kvalita, spolehlivost a bezpečnost
Vedoucí práce:	Ing. Dominik Hermanský
Akademický rok:	2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Měření teplotního zatížení u obráběcích strojů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Měření rozložení teplot se využívá v oblasti predikce teplotního chování obráběcích strojů. Snímače se liší vlastní konstrukcí, způsobem zpracování signálu, přesností měření atd. Předmětem práce bude rešerše v oblasti snímání teploty a jednoduchá praktická úloha.

Cíle bakalářské práce:

1. Seznámení se s řešenou problematikou.
2. Rešerše v oblasti měření teplot obráběcího stroje
3. Měření s využitím vhodných snímačů
4. Vyhodnocení výsledků měření

Seznam odborné literatury:

VAVŘIČKA, Roman. Bezkontaktní způsoby měření teploty. 1. vyd. Praha: Společnost pro techniku prostředí, 2013. Sešit projektanta – pracovní podklady. ISBN 978-80-02-02515-3.

PAVELEK, Milan. Termomechanika. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. MM speciál. ISBN 978-80-214-4300-6.

INCROPERA, Frank P. Fundamentals of Heat Transfer. 1. vyd. New York: John Wiley, 1981. MM speciál. ISBN 978-80-214-4300-6.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku
2016/17

V Brně, dne

L. S.

.....
doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

.....
doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Cieľom tejto práce je zoznámiť sa s problematikou merania teploty, s rôznymi druhmi dotykových a bezdotykových meradiel, ich konštrukciou a presnosťou. Taktiež je snahou vysvetliť základné poznatky z oblasti obrábacích strojov a ich teplotného zaťaženia. Súčasťou práce je vyskúšanie týchto poznatkov pomocou meraní v spoločnosti Intemac Solutions s.r.o. a na pôde Fakulty strojného inžinierstva Vysokého učenia technického v Brne. Získané výsledky sú ďalej vyhodnotené a porovnávané pomocou grafov a tabuliek. Na spracovanie dát zo senzorov slúžil program LabView a na snímky z termokamery program FLIR Tools. Pri vyhodnocovaní bolo nutné brať do úvahy aj chyby meraní spôsobené faktormi, ktoré vyplývajú z popísaných fyzikálnych zákonov v tejto práci.

ABSTRACT

The aim of this thesis is to get acquainted with the theory of temperature measurement, various kinds of contact and non-contact gauges, their construction and accuracy. It also tries to explain the basic knowledge of machine tools and their thermal load. Part of the work is to test this knowledge with experiments in the company Intemac Solutions s.r.o. and Faculty of Mechanical Engineering at Brno University of Technology. The obtained results are further evaluated and compared with the help of graphs and tables. To process the obtained data from the sensors, program Labview was used and FLIR Tools was used for thermal pictures taken with thermal camera. During evaluation, it was also necessary to consider measurement errors caused by the factors resulting from the physical laws described in this work.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

Bezkontaktné meranie teploty, guľôčkové skrutky, obrábací stroj, FLIR, termálna kamera.

KEYWORDS

Non-contact temperature measurement, ball screws, machine tool, FLIR, thermographic camera.

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

SLOBODA, T. *Měření teplotního zatížení u obráběcích strojů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 51 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Dominik Hermanský.

POĎAKOVANIE

Týmto spôsobom by som sa chcel poďakovať pánovi Ing. Dominikovi Hermanskému za jeho rady a pripomienky, ktoré mi pomohli pri písaní tejto bakalárskej práce. Ďalej by som chcel poďakovať mojím rodičom a kamarátom, ktorí ma podporovali počas celého štúdia.

ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že som bakalársku prácu na tému: Měření teplotního zatížení u obráběcích strojů vypracoval samostatne, pod vedením Ing. Dominika Hermanského a s využitím poznatkov získaných zo zdrojov uvedených v zozname na konci tejto práce.

V Brne dňa

.....

Sloboda Tomáš

OBSAH

1	ÚVOD	10
2	NAJDÔLEŽITEJŠIE POJMY Z TEPLOTNEJ DIAGNOSTIKY	11
2.1	Základné stupnice termodynamickkej sústavy	12
3	SPÔSOBY MERANIA TEPLOTNÉHO STAVU OBJEKTU	15
3.1	Senzor teploty	15
3.2	Statické vlastnosti senzorov teploty	15
3.3	Dynamické vlastnosti senzorov teploty	16
4	ROZDELENIE SPÔSOBOV MERANIA TEPLoty	17
4.1	Dotykové meranie teploty	17
4.1.1	Dilatačné teplomery	17
4.1.2	Odporové teplomery	17
4.2	Bezdotykové meranie	18
4.2.1	Terminológia bezkontaktného merania teploty	18
4.2.2	Teória zdieľania tepla žiarením	19
5	SENZORY PRE BEZDOTYKOVÉ MERANIE TEPLÔT	23
5.1	Pyrometre	23
5.2	Termovízie	24
6	OBRÁBACIE STROJE	27
6.1	Základné pojmy z oboru obrábacích strojov	27
6.2	Základné rozdelenie obrábacích strojov	28
6.3	Delenie podľa pracovného použitia	28
6.4	Delenie obrábacích strojov podľa rozhodujúcej technológie	28
6.5	Delenie obrábacích strojov podľa riadenia	29
6.6	O CNC strojoch	29
6.7	Tepelné deformácie	30
7	MERANIE TEPLOTNÉHO ZAŤAŽENIA	31
7.1	Zadanie	31
7.2	Popis merania	31
7.3	Postup prípravy experimentu	33
7.4	Postup merania	33
7.5	Použité vybavenie	34
7.6	Namerané hodnoty	35
7.6.1	Rám	35
7.6.2	Skrutka	40
7.6.3	Chyby meraní	43
8	ZÁVER	44
9	ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV	45
10	ZOZNAM SKRATIEK, TABULIEK A OBRÁZKOV	46
10.1	Zoznam skratiek	46
10.2	Zoznam tabuliek	46
10.3	Zoznam obrázkov	46
11	ZOZNAM PRÍLOH	48

1 ÚVOD

Využitie predikcie teplotného chovania obrábacích strojov súvisí so zvyšovaním bezpečnosti, kvality a znižovaním výrobných nákladov. Tieto faktory sú v dnešnej dobe hlavnými prioritami podnikov v strojárskvej výrobe. Výber vhodnej metódy merania je veľmi dôležitý, nakoľko existujú mnohé rozdiely medzi dotykovým a bezdotykovým meraním. Napríklad také dotykové meranie vyniká väčšou možnosťou získavania dát a využíva na to základné fyzikálne javy, ktoré je menej náročné reprodukovat'. Oproti tomu bezdotykové meranie čerpá z iných výhod, ako napríklad z možnosti sledovania pohybujúcich sa objektov, záberu väčšej plochy stroja, taktiež je možná aplikácia na širokú škálu materiálov a jedná sa o nedeštruktívnu metódu, ktorá nezasahuje do konštrukcie strojov.

Táto bakalárska práca sa sústreďí na zoznámenie čitateľa s tematikou merania teploty a teplotného zaťaženia obrábacích strojov. Skladá sa z dvoch hlavných častí. Prvá, rešeršná, vymedzuje základné termíny z termodiagnostiky, popisuje fyzikálne zákony a rozdelenie merania teploty podľa kontaktu s meraným objektom. Ďalej sa sústreďí na samotné bezkontaktné meranie teploty a jednotlivé meracie prístroje. Taktiež ujasňuje základnú terminológiu a rozdelenie obrábacích strojov, konkrétnejšie približuje problematiku CNC strojov. Jadrom druhej časti je overenie získaných poznatkov z rešeršnej časti na praktickom meraní. Toto bolo realizované s využitím vhodných snímačov a termokamery vo výskumnom centre spoločnosti Intemac Solutions s.r.o. a na pôde Fakulty strojného inžinierstva Vysokého učenia technického v Brne. Vďaka tomuto boli získané prvé reálne skúsenosti pri príprave meraní, kritickom riešení vzniknutých problémov a so spracovaním získaných poznatkov.

Výstupom práce bude vyhodnotenie výsledkov a porovnanie silných a slabých stránok merania pomocou termokamery a tepelných snímačov.

2 NAJDÔLEŽITEJŠIE POJMY Z TEPLOTNEJ DIAGNOSTIKY

Využitím základných veličín, ktorými sú dĺžka, hmota a čas, dokážeme odvodiť a jednoznačne určiť ostatné čisto mechanické veličiny. Avšak pre jednoznačné vyjadrenie tepelného stavu mechanických veličín je nutné zaviesť aj ďalšiu veličinu, ktorá by nám presne tento stav vymedzila. Touto novou veličinou sa pre nás stáva teplota. Pre ľudí je to pojem relatívny, nakoľko je vnímaná zmyslami, a teda pre každého jednotlivca subjektívny. Sama o sebe je však teplota pojem absolútny. Práve podľa zmyslových vnemov sú tepelné stavy rozdeľované na teplé alebo naopak chladné, líšiac sa tým, či majú vyššiu teplotu ako je teplota ľudského tela alebo nižšiu. Problém nastáva pri výrazných rozdieloch v teplote. Vtedy nie sme schopní využívať túto skutočnosť vo výrobnjej praxi, kde je potrebné presné určenie teploty. [1]

Každá veličina musí byť presne definovaná nejakým konvenčným spôsobom, v prípade teploty je definícia nasledovná: „*Je makroskopickým projevem tepelného pohybu molekul a vyjadřuje míru střední energie tohoto pohybu.*“ [2, s. 12]

Pre meranie teploty je nutné poznať takzvaný nultý zákon termodynamiky, ktorý je formulovaný takto: „*Jsou-li různé soustavy A a B v tepelné rovnováze se soustavou C, pak je i soustava A v tepelné rovnováze se soustavou B.*“ [2, s. 12] Pre zjednodušenie je uvedený aj matematický zápis: ak $T_A = T_C$ a $T_B = T_C$ tak je $T_A = T_C$.

Využitím znalosti tohto zákona sme schopní merať teplotu ďalšou sústavou alebo látkou, ako meradlom, bez priameho styku. Ináč by nám pri porovnávaní teploty iných sústav mohla vzniknúť nepresnosť merania. [2]

Ďalšou dôležitou pomôckou pri meraní teploty je skutočnosť, že s meniacou sa teplotou taktiež nastáva zmena všetkých hlavných fyzikálnych vlastností sledovaných telies a okolia. Práve preto máme možnosť tieto fyzikálne zmeny rozdeliť nasledovne do kategórií:

1. zmena rozmeru (prírastok alebo úbytok) vo všetkých troch skupenstvách,
2. zmena tlaku látky v uzavretom priestore,
3. zmena odporu elektrického vodiča,
4. vznik alebo zmena elektromotorickej sily pri spojení dvoch rozličných látok,
5. kvantitatívne alebo kvalitatívne zmeny tepelnej emisivity meraného telesa,
6. ostatné fyzikálne zmeny.

Pre meranie teploty je možné využiť každú z uvedených zmien ale niektoré z vyššie uvedených boli tak významné, že sa stali štandardnými metódami tepelnej diagnostiky, a to vďaka svojej jednoduchej opakovateľnosti. [1]

Potreba presného zápisu nameraných hodnôt viedla k vzniku teplotných stupníc. Prvou a najdôležitejšou je termodynamická teplotná stupnica. Tá je definovaná pomocou účinnosti Carnotovho vratného cyklu. Táto účinnosť cyklu funguje na princípe práce s rovnakými roztokmi a s rozličnými teplotami, a je závislá iba na týchto teplotách ale nie na použitej teplomernej látke. [3]

Ďalej je uvedený matematický zápis tohto vzťahu. Pre $T_2 > T_1$ platí:

$$\eta = \frac{Q_H - Q_C}{Q_H} = \frac{T_2 - T_1}{T_2}, \quad (1)$$

kde η je účinnosť cyklu,

T je termodynamická teplota,

Q_H je odobrané teplo teplomerovou látkou z roztoku s teplotou T_2 ,

Q_C je odovzdané teplo teplomerovou látkou do roztoku s teplotou T_1 .

Zo vzťahu vyplýva skutočnosť, že

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{Q_H}{Q_C}. \quad [3] \quad (2)$$

Nie sme však schopní zostrojiť ideálny tepelný stroj využívajúci princípu Carnotovho cyklu. Je ale možné ako teplomernú látku použiť ideálny plyn, pre ktorý platí v súlade s Carnotovým cyklom stavová rovnica:

$$pV = R_m T, \quad (3)$$

kde R_m je molárna plynová konštanta ($R_m = 8,3143 \text{ J} \cdot \text{kmol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$),

V objem plynu.

Pre konštantný objem V vyplýva zo vzťahu rovnica pre plynový teplomer

$$T = T_0 \frac{p}{p_0}, \quad (4)$$

kde $p_0 = 101\,325 \cdot 10^5 \text{ Pa}$,

$T_0 = 273,15 \text{ K}$. [3]

2.1 Základné stupnice termodynamickej sústavy

Základné stupnice termodynamickej sústavy delíme na termodynamickú (absolútnu) teplotu T , ktorá má jednotku v kelvinoch [K] a Celziovu teplotu t , ktorá sa udáva v stupňoch Celzia [$^{\circ}\text{C}$]. Jednotka kelvin je definovaná ako 276,16-ta časť termodynamickej teploty trojného bodu vody, teda stavu kedy sa nachádzajú v rovnováhe všetky tri skupenstvá H_2O (pevné, kvapalné a plyné). Voda slúži ako referenčný a dobre reprodukovateľný tepelný bod termodynamickej stupnice. Termodynamickej teplote trojného bodu vody tak bola pevne priradená hodnota $T = 273,16 \text{ K}$. Stupeň Celzia je definovaný ako jedna stotina rozdielu teploty varu vody (100°C) a teploty tuhnutia vody (0°C) pri tlaku $101\,325 \text{ Pa}$. Na prepočet medzi termodynamickou teplotou a Celziovou teplotou sa využíva vzťah:

$$t (^{\circ}\text{C}) = T - T_0 = T - 273,15 \text{ K}, \quad (5)$$

Ďalšou teplotnou stupnicou je napríklad Fahrenheitova, kde pre teplotu t_F platí vzťah:

$$t_F (^{\circ}\text{F}) = \frac{9}{5}T - 459,67 = \frac{9}{5}t - 32. \quad (6)$$

Následne pre teplotný rozdiel platí vzťah: $\Delta t = \Delta T$. [3] [2]

(7)

V roku 1927 vznikla Medzinárodná praktická teplotná stupnica. Táto stupnica bola upravovaná a zdokonaľovaná generálnymi konferenciami pre váhy a miery až po jej posledné znenie, ktoré bolo vydané v roku 1990 a je nazývané ITS-90. [3]

„ITS-90 je empirickou teplotní stupnicí stanovenou na 17 pevně definovaných teplotních bodech (tab 1), které odpovídají rovnovážným stavům mezi fázemi vybraných látek a na interpolačních rovnicích a interpolačních přístrojích.“ [3, s. 17]

Stupnica ITS-90 sa delí podľa interpolačných rozsahov prístrojov do štyroch rozmedzí:

a) Rozsah od 0,65 K do 5,0 K

Teplota T_{90} je definovaná tlakom pary látok ${}^3\text{He}$ alebo ${}^4\text{He}$, a to vzťahom

$$T_{90} = A_0 + \sum_i^9 A_i \left[\frac{\ln(p - B)}{C} \right], \quad (8)$$

kde konštanty polynómov sú uvedené v [4] a [5].

b) Rozsah od 3 K do 24,556 K

Teplota T_{90} je definovaná tlakom plynového teplomeru (za konštantného objemu) vzťahom

$$T_{90} = \frac{a + bp + cp^2}{1 + B_x(T_{90}) \frac{N}{V}}, \quad (9)$$

kde konštanty a , b , c obdržané po kalibrácii pri teplote trojného bodu neónu a trojného bodu rovnovážneho vodíka, a pri teplote medzi 3 K a 5

K podľa (9),

konštantu B_x je uvedená v [4] [5] a je závislá na tom, či sa použije ${}^3\text{He}$ alebo ${}^4\text{He}$, člen (N/V) je hustota plynu v teplomere dosadená v móloch na m^3 .

c) Rozsah od 13,8033 K do 961,8 °C je definovaný rovnicami pre platinový odporový teplomer.

Vyššie uvedený rozsah je ďalej delený do štyroch rozsahov v pásme od 13,8033 K do 273,16 K a do ďalších šiestich rozsahov v pásme od 0 °C do 961,8 °C. Pre výpočet týchto rozsahov je nutné definovať odporový pomer $W(T_{90})$ vzťahom

$$W(T_{90}) = \frac{R(T_{90})}{R(273,16 \text{ K})}, \quad (10)$$

kde $R(T_{90})$ je odpor platinového teplomeru.

Vzťah pre prepočet meranej teploty T_{90} a odporu platinového teplomeru má tvar

$$W(T_{90}) = W_r(T_{90}) + \Delta W(T_{90}), \quad (11)$$

kde $W_r(T_{90})$ je referenčná funkcia,

$\Delta W(T_{90})$ odchýlková funkcia.

Referenčné funkcie a príslušné konštanty sú uvedené v [4] a [5].

d) Rozsah nad 961,8 °C

je definovaný Planckovým vyžarovacím zákonom (19)

$$\frac{L_{\lambda}(T_{90})}{L_{\lambda}(T_{90}(X))} = \frac{e^{\left(\frac{c_2}{\lambda(T_{90}(X))}\right)} - 1}{e^{\left(\frac{c_2}{\lambda(T_{90})}\right)} - 1}, \quad (12)$$

kde $T_{90}(X)$ je rovná teplote bodu tuhnutia striebra, zlata alebo medi v tab. 1,

$L_{\lambda}(T_{90})$ a $L_{\lambda}(T_{90}(X))$ sú spektrálne hustoty žiarenia čierneho žiaríča pri vlnovej dĺžke λ a teplote T_{90} resp. $T_{90}(X)$,

$$c_2 = (1,438769 \pm 0,000012) \cdot 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}.$$

Tab 1) Definičné pevné body ITS-90 [3]

Teplota				
T_{90} (K)	t_{90} (°C)	Látka	Stav	$W_r(T_{90})$
3 až 5	-270.15 až -268.15	He	Tlak sýtej pary	
13.8033	-259.3467	e-H ₂	Trojný bod	0.001 190 07
~17	~-256.15	e-H ₂ (He)	Tlak sýtej pary	
~20.3	~-252.85	e-H ₂ (He)	Tlak sýtej pary	
24.5561	-248.5939	Ne	Trojný bod	0.008 449 74
54.3584	-218.7916	O ₂	Trojný bod	0.091 718 04
83.8058	-189.3442	Ar	Trojný bod	0.215 859 75
234.3156	-38.8344	Hg	Trojný bod	0.844 142 11
273.16	0.01	H ₂ O	Trojný bod	1.000 000 00
302.9146	29.7646	Ga	Bod topenia	1.118 138 89
429.7485	156.5985	In	Bod tuhnutia	1.609 801 85
505.078	231.928	Sn	Bod tuhnutia	1.892 797 68
692.677	419.527	Zn	Bod tuhnutia	2.568 917 30
933.473	660.323	Al	Bod tuhnutia	3.376 008 60
1234.93	961.78	Ag	Bod tuhnutia	4.286 420 53
1337.33	1064.18	Au	Bod tuhnutia	
1357.77	1084.62	Cu	Bod tuhnutia	

pozn.: e-H₂ je vodík v rovnovážnej koncentrácii s orthovodíkom alebo parovodíkom, body topenia resp. tuhnutia sú body pri skupenskej premene za tlaku $p = 101\,325$ Pa. [3]

3 SPÔSOBY MERANIA TEPLOTNÉHO STAVU OBJEKTU

V tomto odstavci budú prebrané základné spôsoby merania a vyhodnocovania, využívané pri určovaní teplotného stavu objektu. Je nutné zaviesť dôležité pojmy pre správnu interpretáciu výsledkov neskorších meraní v praktickej časti tejto práce.

3.1 Senzor teploty

Senzor teploty ako funkčný prvok predstavuje vstupný blok stojaci na počiatku procesu merania teploty keďže je v priamom kontakte s meraným prostredím. Výraz senzor teploty je možné vyložiť viacerými pojmami, ako napríklad snímač teploty (samostatný komponent konštrukcie teplomerného zariadenia, ktorého súčasťou je teplotné čidlo), ďalej ako pojem čidlo teploty (súčasť snímača slúžiaca na prevod z teploty na inú vhodnú fyzikálnu veličinu). Takisto je možné senzorom označovať detektor tepelného zariadenia alebo teplomer (zariadenie na meranie teploty). V konečnom dôsledku tak vzniká situácia kedy sa v súčasnom katalógu firiem nachádza pod pojmom senzor teploty široká škála teplomerných zariadení. Tieto pomenovania upravuje platná norma ČSN 25 8005 „Názvoslovie z odboru merania teploty“ s účinnosťou od 1.8.1989.

Senzory teploty je možné deliť do troch kategórií:

Podľa fyzikálneho princípu (uvedené v 2. kapitole) sa senzory teploty delia na odporové, termoelektrické, polovodičové s PN prechodom, dilatčné, optické, radiačné, chemické, šumové, akustické, magnetické, a na ďalšie ako sú napr. kapacitné, aerodynamické.

Podľa kontaktu s meraným prostredím sa senzory teploty delia na dotykové a bezdotykové.

Podľa schopnosti premeny signálu sa delia na aktívne, ktoré sa pôsobením teploty stávajú zdrojom elektrickej energie (termoelektrické články) a na pasívne, pri ktorých je nutné dodávanie elektrickej energie (s výnimkou chemických indikátorov teplôt) pre prevod teploty na inú fyzikálnu veličinu, keďže meranie teploty je vždy meraním nepriamym. [3]

3.2 Statické vlastnosti senzorov teploty

Statickú charakteristiku senzorov teploty vyjadruje funkčná závislosť $Y = f(X)$ medzi meranou veličinou X (v našom prípade teplotou) a premenenou veličinou Y v časovo ustálenom stave.

Táto funkčná závislosť je opísateľná polynómom

$$Y = f(X) = a_0 + a_1X + a_2X^2 + \dots + a_nX^n . \tag{13}$$

Prípad ideálnej statickej charakteristiky senzoru, ktorá je však prakticky nerealizovateľná, je možné zapísať v tvare

$$Y = K X , \tag{14}$$

kde K je citlivosť senzoru a súčasne konštanta prenosu.

Vyššie spomínaná citlivosť senzoru ako premenná veličina, je definovaná prírastkami ΔY , ΔX v prípade všeobecnej funkčnej závislosti podľa vzťahu

$$K = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta Y}{\Delta X} = \frac{d f(X)}{d X}. \quad (15)$$

Prah citlivosti senzoru je určený hodnotou meranej veličiny, pri ktorej je na výstupe senzoru signál odpovedajúci strednej kvadratickej odchýlke šumu senzoru. Podľa tejto definície môžeme v prípade napät'ového výstupného signálu vyjadriť prah citlivosti senzoru teploty smerodajnou odchýlkou šumového napätia u_s vzťahom

$$u_t = \sqrt{u_s^2}. \quad (16)$$

Dynamický rozsah senzoru teploty je určený tromi veličinami, a to rozsahom prípustných hodnôt snímanej veličiny, ďalej je ohraničený prahom citlivosti senzoru (16) a maximálnou hodnotou meranej veličiny.

Reprodukovateľnosť senzoru je daná odchýlkou nameraných hodnôt pri nemeniacej sa sledovanej veličine v krátkom časovom úseku a nemenných rušivých vplyvoch okolia, v ktorom sa nachádza.

Rozlíšiteľnosť senzoru je pomer vierohodne zmeranej hodnoty a prahu citlivosti (16). [3]

3.3 Dynamické vlastnosti senzorov teploty

Pri meranej teplote neustále dochádza k zmenám plynutím času. Preto je nevyhnutné poznať dynamické vlastnosti senzorov teploty pre následnú analýzu a syntézu meracích a regulačných systémov. Je nutné používať v regulátoroch teploty alebo pri monitorovaní medzných stavov také senzory teploty, aby výstupný signál $Y = f(t)$ korešpondoval s minimálnym skreslením s teplotou t . [3]

4 ROZDELENIE SPÔSOBOV MERANIA TEPLOTY

Senzory sa podľa styku s meraným prostredím delia na dotykové a bezdotykové. V tomto odseku budú popísané oba spôsoby, avšak dotykovému meraniu teploty bude venovaný menší priestor. Je to najmä preto, že témou tejto bakalárskej práce je práve využitie bezdotykového merania teploty obrábacích strojov. Pre vytvorenie lepšej predstavy a pre porovnanie budú spomenuté ich výhody a nevýhody, ako aj niektoré z najčastejšie používaných meracích zariadení. V praktickej časti budú tieto informácie vyskúšané meraním reálnych objektov.

4.1 Dotykové meranie teploty

Pri dotykovom meraní sa senzor musí dotýkať priamo objektu či látky, ktorej teplotu chceme zmerať. Funguje na princípe prenosu tepla medzi dvoma objektmi, teda teplomerom a meraným objektom. Jeho využitie je možné pokiaľ sa meraný objekt alebo jeho okolie priamo vzájomne neovplyvňuje so senzorom, a taktiež je možné ho využívať najmä tam, kde je jednoduchý prístup k meranému objektu. Je možné uskutočňovať merania pevných telies, priložením a samotným dotykom senzoru s povrchom telesa alebo zasunutím senzoru do vnútra telesa pri meraní kvapalných a plyných telies.

Výhody dotykového merania: senzory sú nenáročné na výrobu a používanie, je možné veľmi presne merať vplyvom nízkeho okolitého rušenia a možnosť merať teplotu aj pod povrchom a vnútri telesa.

Nevýhody merania: je nevyhnutné zvoliť správny obal senzoru podľa fyzikálnych vlastností materiálu, s ktorým prichádza do styku, existuje riziko možnej kontaminácie látky alebo objektu senzorom čo má za následok ovplyvňovanie merania, rýchlosť merania závislá na tepelnej vodivosti senzoru i povrchu meraného objektu, a často len pomerne malý rozsah meranej teploty (len niekoľko stoviek °C). [6]

4.1.1 Dilatačné teplomery

Meradlá teploty nazývané dilatačné teplomery fungujú na princípe rozťažnosti látok všetkých skupenstiev, ktorá je sprievodným javu stúpajúcej teploty. Namerané hodnoty sú zobrazované buď priamo na stupnici (napr. ortuťový sklenený teplomer) alebo nepriamo (napr. monometalický stupnicový teplomer). Dilatačné teplomery sa obvykle delia podľa skupenstva použitej teplomernej látky. Toto rozdelenie nie je vždy úplne presné, keďže niektoré látky sú používané na ich skupenskom rozhraní, ako v prípade cínu, gália apod. Týmto spôsobom teda rozlišujeme tri hlavné skupiny:

a) dilatačné teplomery kvapalinové (napríklad sklenené snímače, kvapalinové tlakové snímače), ktoré sa z dilatačných používajú najčastejšie. Tieto je možné ďalej deliť podľa použitej kvapaliny na ortuťové, alkoholové, petroléterové, pentánové apod.

b) dilatačné teplomery s plynovou náplňou – plynové snímače, parné snímače. Sú vhodné pre použitie v chemickom priemysle, energetike, potravinárstve a vzduchotechnike.

c) prístroje využívajúce rozťažnosti pevných látok, najčastejšie rozdeľované na tyčové (monometalické) alebo dvojkovové (bimetalické) snímače. [1] [10]

4.1.2 Odporové teplomery

Pre meranie teploty odporovými snímačmi sa využíva meranie teplotnej závislosti odporu snímača. Pri výrobe snímačov sa používajú čisté kovy, ktorým s teplotou stúpa elektrický odpor. [10] Vzťah medzi teplotou a odporom čistých kovov s úzkym teplomerným rozsahom je približne lineárny. [1]

Je ho teda možné zapísať podľa vzťahu:

$$R = R_0 \cdot (1 + \alpha t) \quad (17)$$

kde R_0 je odpor nameraný pri teplote 0 °C,

R je odpor meraný pri konečnej teplote,

t je teplotný rozdiel medzi počiatočnou (0 °C) a konečnou teplotou,

α je teplotný súčiniteľ odporu (rozmer 1/grad). [1]

Ďalej je možné stanoviť strednú hodnotu teplotného súčiniteľa odporu α :

$$\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{100R_0}, \quad (18)$$

kde R_{100} je odpor senzoru pri teplote 100 °C.

Pre väčší rozsah teplôt už nie je možné použiť lineárne vzťahy. Najvhodnejšie materiály pre výrobu odporových kovových senzorov sú platina, nikel, zliatina Ni-Fe, meď, molybdén a pre extrémne nízke teploty od 0,5 K zliatiny Rh-Fe, Pt-Co a iné. [3]

4.2 Bezdotykové meranie

Bezdotykové meranie teploty je meranie povrchových teplôt na základe meraní elektromagnetického žiarenia vysielaného telesom. K meraniu sa používajú buď tzv. pyrometre (bezdotykové teploměry), ktoré vyhodnocujú teplotu v jednom aktuálne meranom bode, alebo infračervené termografické kamery (tzv. termovízie). Pomocou termovízie je možné vytvoriť živý infračervený obraz tzv. termogram Termogram je teplotné pole v celom záberu šošovky termovíznej kamery.

Bezkontaktné snímanie teplôt je v poslednej dobe veľmi populárnou metodikou merania povrchových teplôt. Využitie nachádza či už v strojárstve a stavebníctve, tak v ďalších a to nielen technických oboroch. Avšak zásadnými nedostatkami bezkontaktného merania sú výrazná závislosť na okrajových podmienkach meraní a tiež na stupni či už teoretického alebo i praktického poznania samotného užívateľa. [7]

4.2.1 Terminológia bezkontaktného merania teploty

Ďalší text využíva názvoslovie pochádzajúce čiastočne z normy ČSN ISO 18434-1 a terminológia všeobecných fyzikálnych princípov prenosu tepla.

Infračervené žiarenie – elektromagnetické žiarenie v rozsahu vlnových dĺžok od 0,75 μm do 1 mm.

Termografia – získavanie a spracovanie teplotných informácií pomocou bezkontaktného zariadenia pre zobrazovanie teploty.

Termogram – teplotný snímok objektu, ktorý vyjadruje rozloženie vyžarovaného infračerveného žiarenia z povrchu meraného objektu pomocou šedého tónovania alebo farebného zobrazenia.

Infračervená termografická kamera – zariadenie slúžiace na snímanie vyžarovanej infračervenej energie z povrchu objektu. Energiu reprezentuje čiernobielo alebo farebne, kedy stupne šedej alebo farebné odtiene odpovedajú rozloženiu teplôt na objekte.

Pyrometer – prístroj, ktorý sníma vyžarovanú infračervenú energiu z meraného bodu na povrchu objektu. Hodnota na displeji prístroja odpovedá teplote v meranom bode na objekte.

Absolútnne čierne teleso – ideálny zdroj a pohlcovač infračerveného žiarenia (vo všetkých vlnových dĺžkach).

Odráživosť - pomer medzi vyžarovanou energiou odrazenou od povrchu objektu a celkovou vyžarovanou energiou dopadajúcou na tento povrch.

Priepustnosť – pomer energie žiarenia, ktorá objektom prechádza k celkovej žiarivej energii dopadajúcej na tento povrch.

Pohltivosť – pomer žiarivej energie pohltenej objektom k celkovej energii žiarenia dopadajúcej na tento povrch.

Emisivita – pomer medzi energiou vyžarovanou z povrchu objektu a energiou vyžarovanou absolútnne čiernym telesom s rovnakou teplotou akú má objekt.

Žiarivá energia – je energia vyslaná, prenesená alebo prijatá formou vyžarovania. Rozkladá sa na jednotlivé vlnové dĺžky, pričom najmenšia hodnota energie (kvantum monochromatického žiarenia) je daná súčinom Planckovej konštanty (h) a vlnovej dĺžky λ tohto žiarenia.

Žiarivý tok – je daný diferenciálnym podielom žiarivej energie a času. Číselne vyjadruje žiarivú energiu prechádzajúcu určitou plochou za časovú jednotku 1s.

Intenzita vyžarovania – je definovaná diferenciálnym podielom žiarivého toku a plochy. Číselne sa rovná žiarivému toku z plochy 1 m^2 . [7]

4.2.2 Teória zdieľania tepla žiarením

Bezdotykové meranie teploty alebo tiež termografia je založená na využití vlnového pásma infračerveného žiarenia. Rozsah pásma krátkého IR žiarenia začína tam, kde končí tzv. viditeľné pásmo. Hranica, kde končí pásmo dlhového IR žiarenia leží na začiatku pásma „mikrovlnných“ vlnových dĺžok. Celé IR pásmo sa dá číselne vyjadriť v rozmedzí vlnových dĺžok $\lambda = 0,75 \text{ }\mu\text{m}$ až 1 mm . V praxi to znamená meranie teplôt v rozsahu od $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ do $+10\,000 \text{ }^\circ\text{C}$. Ešte podrobnejšie je možné rozdeliť pásmo infračerveného žiarenia na:

- blízko IR, $0,75 \text{ }\mu\text{m}$ až $1,4 \text{ }\mu\text{m}$,
- IR kratších vlnových dĺžok, $1,4 \text{ }\mu\text{m}$ až $3 \text{ }\mu\text{m}$,
- IR stredných vlnových dĺžok, $3 \text{ }\mu\text{m}$ až $5 \text{ }\mu\text{m}$,
- IR dlhých vlnových dĺžok, $5 \text{ }\mu\text{m}$ až $15 \text{ }\mu\text{m}$,
- vzdialené IR, $15 \text{ }\mu\text{m}$ až 1 mm .

Energiu žiarenia je možné, v infračervenej časti spektra, generovať tromi typmi zdrojov. Tieto zdroje môžu byť luminiscenčné, rádiové a tepelné. V prípade termografie sú tepelné zdroje najdôležitejšie. Z tohto dôvodu je niekedy IR žiarenie pre oblasti termografie považované iba za tepelné žiarenie. Avšak povrchy telies sú zahrievané pohlcovaním ľubovoľného elektromagnetického žiarenia. Napríklad objekty pri izbovej teplote najviac emitujú žiarenie v infračervenom pásme od 8 do $12 \text{ }\mu\text{m}$. Tepelné zdroje sú charakteristické tým, že energia žiarenia je generovaná na úkor tepelnej energie zdroja. Z tohoto vyplýva, že IR žiarenie bude generovať každá hmota, ktorej teplota je vyššia než absolútnej nuly (0 K). Veľkosť žiarivého toku generovaného tepelnými zdrojmi, jeho spektrálne zloženie a smer šírenia sú závislé na vlastnostiach a teplote zdroja žiarenia. Signálový radiačný tok IR systémov je pre tepelné žiariče umiestnený v jeho zornom poli a reprezentovaný je tokom fotónov v IR časti spektra. Veľkosť a spektrálne zloženie tohto spektra je možné pre špeciálne žiariče (absolútnne čierne telesá a šedé telesá) stanoviť využitím základných zákonov vyžarovania. Teória žiarenia je založená na veľkom množstve fyzikálnych zákonov, z ktorých niektoré budú uvedené nižšie. [7]

Planckov zákon

Žiarivosť čierneho telesa pre danú vlnovú dĺžku λ [m] je označovaná ako monochromatická žiarivosť $E_{0,\lambda}$, [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\mu\text{m}^{-1}$] a jej rozloženie v spektre vlnových dĺžok je na obr. 1 pre zvolenú teplotu 1922 K. Matematicky je žiarivosť definovaná Planckovým zákonom ako funkcia teploty povrchu a vlnovej dĺžky:

$$E_{0,\lambda} = \frac{2 \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5} \left[e^{\left(\frac{c \cdot h}{k_B \cdot \lambda \cdot T} \right)} - 1 \right]^{-1} \quad (19)$$

kde,

c rýchlosť svetla vo vákuu ($c = 2,9979 \cdot 10^8$) [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$],

h Planckova konštanta ($h = 6,6256 \cdot 10^{-34}$ [$\text{J}\cdot\text{s}$],

k_B Boltzmannova konštanta ($k_B = 1,3805 \cdot 10^{-23}$ [$\text{J}\cdot\text{K}^{-1}$],

T absolútna povrchová teplota zdroja [K]. [7] [2]

Stefan-Boltzmannov zákon

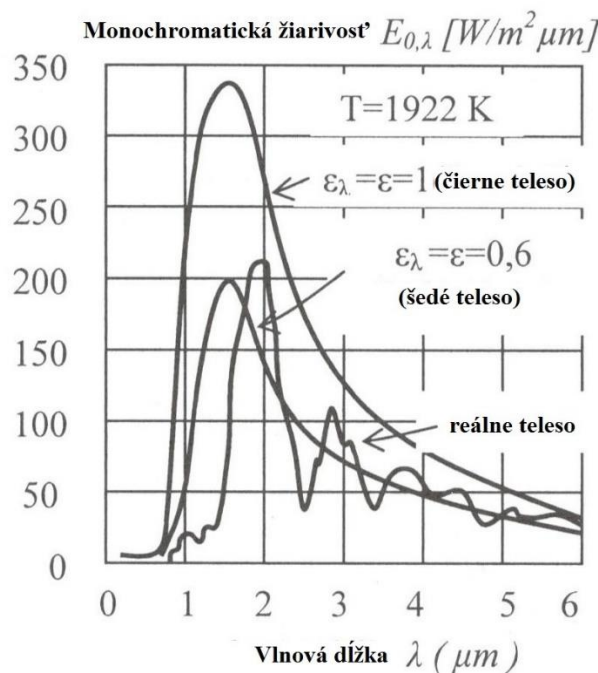
Pokiaľ by sme chceli z Planckovho zákona (19) vyjadriť celkový žiarivý výkon absolútne čierneho telesa na všetkých vlnových dĺžkach pri danej teplote a nezávisle na smere vyžarovania, je možné integráciou vzorca nájsť riešenie v tvare

$$E_0 = \int_0^{\infty} E_{0,\lambda} \cdot d\lambda = \sigma \cdot T^4 \quad (20)$$

kde,

E_0 je celkový žiarivý výkon [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$],

σ Stefan-Boltzmannova konštanta ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$) [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$]. [7] [2]



Obr. 1) Rozloženie žiarivosti čierneho, šedého a reálneho telesa [2]

Wienov zákon

Wilhem Wien preukázal, že maximum spektrálnej intenzity vyžarovania $E_0(\lambda, T)$ sa mení v závislosti na teplote absolútne čierneho telesa. Odpovedajúcu vlnovú dĺžku je možné potom ľahko stanoviť z Planckovho vyžarovacieho zákona pre energetické vyjadrenie vyhl'adaním lokálneho extrému odpovedajúcej funkcií:

$$\lambda_{max} \cdot T = 2898 [\mu\text{mK}]. \quad [7] \quad [2] \quad (21)$$

Kirchhoffov zákon

Kirchhoffov zákon je možné vo svojej podstate nazvať zákonom zachovania energie pre žiarenie. Poskytuje nám informácie o jednotlivých vlastnostiach telies. Vyjadruje vzťah medzi celkovou intenzitou vyžarovania I_i dopadajúcou na plochu telesa S a tokom I_a , telesom pohlteným, tokom I_ρ , telesom odrazených a tokom I_τ , telesom prejdeným. Tento vzťah je možné zjednodušiť zapísať v tvare:

$$I_i(\lambda, T) = I_a(\lambda, T) + I_\rho(\lambda, T) + I_\tau(\lambda, T). \quad (22)$$

Vydelením rovnice (22) celkovou intenzitou vyžarovania $I_i(\lambda, T)$ získame definíciu troch základných súčiniteľov, ktoré slúžia na popis vlastností telies ožiarených radiačným tokom

$$1 = \alpha + \rho + \tau \quad (23)$$

kde,

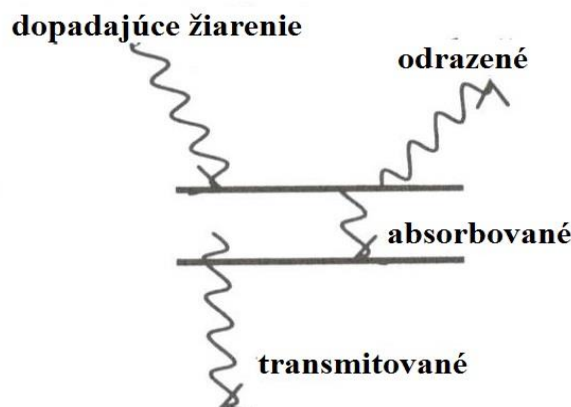
α je súčiniteľ pohltivosti (absorpcie) [-],

ρ súčiniteľ odrazivosti (reflexie) [-],

τ súčiniteľ priepustnosti (transmisie) [-].

Veľkosť týchto koeficientov potom určuje správanie telesa nasledovne:

- absolútne čierne teleso (dokonalý prijímač): $\alpha=1, \rho=\tau=0$,
- šedé teleso, $\alpha < 1$, ale $\neq f(\lambda)$, $\rho=1-\alpha, \tau=0$,
- antireflexný materiál, $\alpha + \tau = 1, \rho=0$,
- zrkadlo (dokonalý reflektor), $\rho=1, \alpha = \tau=0$,
- dokonalá priepustná (transparentný materiál), $\tau=1, \rho = \alpha = 0$,
- matný (nepriehľadný materiál), $\alpha + \rho = 1, \tau=0$,
- všeobecný materiál, $0 < (\alpha, \rho, \tau) < 1$. [7]



Obr. 2) Rozloženie dopadajúcej energie [2]

Emisivita

Modifikácie základných zákonov vyžarovania sú odvodené pre ideálny zdroj infračerveného žiarenia (tj. absolútne čierne teleso). Vlastnosti všeobecných radiačných zdrojov sa najčastejšie popisujú bezrozmerným koeficientom tzv. emisivitou ε . Číselne emisivita slúži na vyjadrenie zhoršenia vyžarovacích vlastností zdrojov v porovnaní s absolútne čiernym telesom. Všeobecne závisí na vlnovej dĺžke a teplote.

Pomerná žiarivosť má hodnoty medzi nulou a jednotkou, a vyjadruje pomer vyžarovanej energie z daného povrchu a energie vyžarovanej z čierneho telesa pri rovnakej teplote oboch povrchov. [7][2]

$$\varepsilon = \frac{E_{\lambda}}{E_{0,\lambda}} \quad [-]. \quad (24)$$

Lambertov zákon

Pri väčšine všeobecných povrchov dochádza ku smerovej závislosti vyžarovania. Lambertov zákon hovorí, že ak vyžaruje plošný žiarič dS do polopriestoru v smere, ktorý zvierá s normálou k ploche žiariča uhol φ , je žiarivý tok plošného žiariča dS úmerný kosínusu tohto uhlu. Matematicky je tento zákon formulovaný v tvare:

$$dI_{\varphi,\zeta} = dI_{\zeta} \cdot \cos\varphi = I_{\zeta} \cdot \cos\varphi \cdot dS, \quad (25)$$

kde dI_{ζ} je intenzita vyžarovania v smere normály k ploche žiariča.[7]

5 SENZORY PRE BEZDOTYKOVÉ MERANIE TEPLÔT

5.1 Pyrometre

Úhrnné pyrometre sú meracie prístroje na celkové žiarenie, merajúce teplotu využívajúc Stefan-Boltzmannov zákon (20). Vyhodnocujú teda tepelné žiarenie pre celé spektrum vlnových dĺžok od $\lambda = 0$ do $\lambda = \infty$ (obr. 1) Pre meranie v celom spektre sú použiteľné iba tepelné detektory. Zaostrenie toku na detektor žiarenia dochádza pomocou sústavy šošoviek vyrobených z materiálu s vysokým spektrom priepustnosti alebo zrkadlom majúcim široké spektrum odrazivosti. Spektrálna pohltivosť detektoru nie je ideálna a vinou toho dochádza pri technickej realizácii k spektrálnemu obmedzeniu. V prípade, že zanedbáme toto spektrálne obmedzenie a za predpokladu nulovej hodnoty odrazivosti meraného objektu $\rho = 0$ platí Stefan-Boltzmannov zákon (20) (obr. 1).

Monochromatický pyrometer je spektrálne selektívny pyrometer, fungujúci na princípe závislosti spektrálneho vyžarovania telesa pri danej vlnovej dĺžke na teplote. V prípade nekonečne úzkej šírky vlnového pásma, tj. pre diskretnú hodnotu vlnovej dĺžky, platí Planckov (19), resp. Wienov zákon (21). V praxi však nie je možné vyrobiť úplne monochromatický pyrometer. Preto sa vždy meria v úzkom vlnovom pásme $\Delta\lambda$, ktoré je dané spektrálnou citlivosťou kvantového detektoru, spektrálnou priepustnosťou optiky, ale hlavne spektrálnou priepustnosťou interferenčných filtrov, ktoré zaistia monochromatické meranie teploty.

Pásmové pyrometre sú taktiež spektrálno-selektívne pyrometre, ktoré však merajú vyžarovanie na povrchu telesa pre stanovený rozsah vlnových dĺžok. Toto znamená, že meria teplotu prostredníctvom žiarenia v úzkom pásme vlnových dĺžok. Šírka tohto pásma vlnových dĺžok sa pohybuje od 10 nm do jednotiek mikrometru. Pásmo vlnových dĺžok je rovnako ako v prípade monochromatických pyrometrov dané spektrálnou citlivosťou kvantového detektoru žiarenia, spektrálnou priepustnosťou optiky a optických filtrov, spektrálnou odrazivosťou zrkadiel, tak ako pri kvantových tak pri tepelných detektoroch žiarenia. [3]



Obr. 3) Prenosný pyrometer značky IMPAC [13]

Pyrometre s optickými vlnovodmi v infračervenej oblasti sú zariadenia k vedeniu elektromagnetických vln s vysokými frekvenciami. Pre prenos infračerveného žiarenia sú podstatné straty vlnovodu, ktoré spôsobujú pokles toku vyžarovania. Straty sú spôsobené absorpciou v prostredí, ktoré vytvára vlnovod, rozptylom na nepravidelných nehomogenitách indexu lomu materiálov vlnovodu a straty vyžarovaním na ohyboch vlnovodu. Optické vlnovody majú využitie pre prenos fotónového toku z miesta, ktoré nie je priamočiaro viditeľné z miesta pyrometru, pričom pyrometer nejde umiestniť v blízkosti meranej plochy. Toto môže nastať z dôvodu malého priestoru, vysokej alebo nízkej teploty, absorpcie prostredia (para, plyny, prach), explozívneho prostredia, silného elektromagnetického poľa (napr. pri indukčnom ohreve) apod.

Infračervené vlnovody sa delia nasledovne:

- sklenené optické vlákna,
- kryštalické optické vlákna,
- dutinové vlnovody. [3]

Tab 2) Infračervené vlnovody [3]

TYP	kategória	materiál	rozsah vlnovej dĺžky (μm)
sklo	fluoridy	ZrFM ₄ -BaF ₂ -LaF ₃ -AlF ₃ -NaF	0,25-4,0
	germanit	GeO ₂ -PbO	1-3,2
	chalkogenid	AsGeTeSe	4-11
As ₂ S ₃		1-6	
kryštalické	polykryštalické	AgBrCl	3-16
	monokryštalické	zafír	0,5-3,1
dutinové	jadro: vzduch	sklo	0,9-25
	povlak: kov/dielektrikum film	zafír	10-16,7

5.2 Termovízie

Pri experimentoch v praktickej časti práce bude použitá termokamera značky FLIR T440. Jej základné hodnoty sú uvedené v tabuľke (tab 2) a pre ilustráciu je priložený aj obrázok (obr. 4).

Rozdelenie termovíznych systémov je nasledovné:

- termovízne systémy rozkladajúce obraz opticko-mechanickým spôsobom
- termovízne systémy s maticovým detektorom.

V prípade opticko-mechanického rozkladu obrazu dochádza k snímaniu jednotlivých bodov objektu riadenou optickou osou. Okamžité zorné pole zariadenia je postupne zameriavané na všetky body snímaného objektu. Pomocou pohyblivých optických častí kamery (otočné hranoly alebo kamery) sa realizuje dráha rozkladu. Výroba týchto systémov však pre civilné účely skončila. [3]

V súčasnej dobe sa pre termovízne systémy používajú chladené a nechladené maticové mikrobolometrické a kvantové (QWIP) FPA detektory (1D-riadkové a 2D-plošné). Na chladenie FPA matice sa využíva Stirlingov chladič (vzduchotesný chladiaci systém s dvoma piestami naplnenými plynným héliom, pracujúcim na podobnom princípe ako kompresorová mikrochladička) alebo termoelektrický chladič pracujúcim na princípe Peltierovho javu. K spracovanie signálu dochádza priamo na čípe prostredníctvom multiplexerov a 14bitových A/D signálov prevodníku v každom riadku matice. [3]

Tab 3) Hodnoty kamery FLIR T440 [14]

Základné údaje	
Rozlíšenie IR detektoru	320 x 240 bodov, 60 HZ
Zorný uhol objektívu	25° x 19°, zaostrenie od 0,4 m
Teplotná citlivosť	< 0,045 °C
Rozsahy meraných teplôt	-20 °C až +1200 °C
Presnosť	±2 °C alebo ±2 %
Nastaviteľná emisivita	0,01 až 1,00

Pre termokamery sa používajú najmä dve pásma vlnových dĺžok. Sú nimi krátkovlnné (2 μm až 5 μm) a dlhovlnné (7 μm až 13 μm).

Termovízia tvorí základné meracie zariadenie určené na infračervenú diagnostiku. So znalosťou rozloženia teplotného poľa sledovaného objektu sme schopní kontrolovať funkcie zariadenia, ktoré vyvíjajú alebo spotrebúvajú teplo. Termodiagnostikou je potom možné lokalizovať či už rôzne materiálové vady alebo opotrebenie spôsobené trením a iné nedostatky vnútorných komponentov zariadenia, ktoré vplyvajú na rozloženie povrchovej teploty. [3]



Obr. 4) Termokamera FLIR T440 [14]

Na lokalizáciu porúch vo vnútri materiálu existujú dve metódy, použiteľné bez prerušenia prevádzky:

Pulzná termografia, ktorá je založená na ožarovaní diagnostikovaného objektu externým žiaričom tepelnými stimulačnými pulzmi. Následne je termovíznou kamerou snímaná teplota povrchu tohto objektu. Tepelné pulzy trvajú od niekoľko milisekúnd pri vysoko teplovodivých materiáloch až do niekoľko sekúnd pri vrstvách s malou tepelnou vodivosťou ako napríklad pri niektorých polyméroch. Takéto krátko pôsobiace oteplenie o niekoľko stupňov nezapríčiní poškodenie objektu. Po dopade tepelného pulzu na povrch materiálu sa teplo šíri tepelnou pomocou difúzie materiálom. Tepelná difúzia ξ (rozptyl tepelného žiarenia v telese) závisí na tepelnej vodivosti λ_{tep} , hustote ρ a mernej tepelnej kapacite c materiálu a je daná vzťahom:

$$\xi = \frac{\lambda_{tep}}{\rho \cdot c}. \quad (26)$$

Teplota vo vnútri testovaného materiálu narastie a po ukončení tepelného pulzu dochádza k ochladeniu vo vnútri materiálu opäť pomocou difúzie. Pokiaľ je v materiáli nehomogenita s rozdielnou mernou tepelnou kapacitou a tepelnou vodivosťou, je premietnutá v určitom časovom okamihu na tepelný obraz povrchu objektu. Potrebný ohrev je možné získať aj horúcim vzduchom. Pulzná termografie nachádza uplatnenie napríklad pri tomografií leteckých komponentov z kompozitných materiálov. [3]

Lock-in termografia je metóda založená na modulácií tepelného toku. Tepelná vlna (obvykle sínusová uhlopriečka s uhlovým kmitočtom ω) prenikne po dopade na povrch dovnútra telesa a kde sa odráža v mieste zmeny prostredia (defektu) späť k povrchu. Na povrchu potom dochádza k interferenciám s hlavným vlnením. Termovíznou kamerou snímané obrazce sú číslicovo spracované pomocou FFT, takže je možné z každého pixelu stanoviť amplitúdu signálu a fázový posun. Amplitúda je ovplyvnená pohltivosťou, emisivitou povrchu telesa a rozložením ožiarenia. Avšak vo fáze signálu sú tieto javy vylúčené. Prejavia sa tak iba informácie o teplote či už tesne pod povrchom ale aj do určitej hĺbky v materiáli. Táto diagnostikovaná hĺbka je daná tzv. hĺbkou vniku tepelného vlnenia μ , pri ktorej je pomerný pokles amplitúdy daný násobkom $1/e = 0,37$. Pre výpočet hĺbky vniku platí vzťah:

$$\mu = \sqrt{\frac{2\lambda_{tep}}{\omega\rho c}}. [3] \quad (27)$$

6 OBRÁBACIE STROJE

Obrábacie stroje je možné rozlišovať podľa jednotlivých druhov ale aj podľa rozličných rozmerov a veľkostí strojov. V oblasti strojárstva dochádza k neustálemu rozvoju, ktorý je spôsobený zvyšovaním produktivity práce a nutnosti zavádzania automatizácie. Rozvoj dáva za vznik stále novším druhom obrábacích strojov a priestor pre neustálu inováciu tých terajších. Práve preto nie je možné zaoberať sa celou škálou strojov, ktorá je skutočne rozsiahla, a preto bude tento text zameraný najmä na CNC obrábacie stroje. V krátkosti budú tiež rozobrané tepelné deformácie, ktoré sa obrábacích strojov priamo týkajú. [8]

6.1 Základné pojmy z oboru obrábacích strojov

-lôžko: pri väčšine strojov spája základné súčasti stroja v jeden celok. Na lôžku sa nachádzajú vodiace plochy (napríklad pre stôl, suport apod.), prípadne dosadacie plochy umožňujúce pripojenie ďalších základných častí,

-podstavec: má charakteristiky podobné ako lôžko ale slúži iba pre uloženie ďalších základných častí nakoľko nemá vodiace plochy,

-základová doska: nachádza sa v spodnej časti stroja a obsahuje dosadacie plochy slúžiace na uloženie ďalších základných častí, prípadne tiež obsahuje upínacie plochy s drážkami pre upnutie stolu alebo obrobku,

-stojan: sú na ňom umiestnené vodiace alebo dosadacie (prípadne upínacie) plochy pre uloženie ďalších základných častí stroja. V závislosti od ich polohy je stojan zvislý alebo šikmý;

-stĺp: slúži na uchytenie časti stroja (vretenníku, stolu, ramena),

-konzola: podľa polohy roviny dosadacích plôch na uchytenie ďalších častí sa konzola delí na vodorovnú, šikmú alebo zvislú,

-priečnik: je obvykle pohyblivo uložený na jednom alebo dvoch stojanoch a sú na ňom vodiace plochy pre vretenník alebo suport,

-rameno: jeden jeho koniec je pohyblivo uložený na stĺpe alebo stojane zatiaľ čo druhý koniec je voľný. Na jeho prednej zvislej strane sa nachádzajú vodiace plochy pre uloženie vretenníku,

-vretenník: je v ňom uložené vreteno, prípadne aj prevodové ústrojenstvo vretena pre zmenu jeho otáčok,

-sane: pohybujú sa priamočiario po vodiacich plochách základných častí,

-šmýkadlo: súčasť pohybujúca sa priamočiario po vodiacich plochách základných častí alebo saní,

-koník: časť stroja skladajúca sa zo samotného telesa koníka a posuvnej hrotovej objímky, slúžiaca na upínanie obrobkov, prípadne nástrojov pri obrábaní,

-hrotová objímka: súčasť, ktorá má v prednej časti kužeľovitú dutinu pre upnutie hrotu, prípadne nástroja,

-stôl: časť stroja, na ktorú sa upína obrobok,

-suport: je zložený zo sústavy saní, prípadne šmýkadiel, slúžiaci na nastavenie nástroja do potrebnej polohy vzhľadom k obrobku,

-vodiaca skrutka: umožňuje predovšetkým strojný pohyb suportu pri rezaní závitů,

-vodiaca hriadeľ: umožňuje strojný pohyb suportu – šmýkadla. [12]

6.2 Základné rozdelenie obrábacích strojov

Kedysi boli obrábacie stroje určené na trieskové obrábanie delené podľa hlavného pohybu, ktorý vykonávali, na obrábacie stroje s hlavným pohybom priamočiarym (hobl'ovačky, obrážačky) a s hlavným pohybom rotačným (sústruhy, vrtačky, brúsky, frézky).

Po zavedení nových pracovných metód (napr. honovanie, lapovanie) v dôsledku rozvoja strojárkej výroby nastal problém nájsť rozdiel medzi oboma druhmi pohybu a bolo náročné, kam daný stroj zaradiť.

Z tohto dôvodu sa javí výhodnejšie rozdelenie podľa:

- pracovného použitia obrábacieho stroja,
- vykonanej technologickej operácie,
- riadenia. [8] [11]

6.3 Delenie podľa pracovného použitia

Do tejto kategórie spadajú najmä univerzálne obrábacie stroje, s ktorými sa dajú obrábať súčiastky rôznych druhov a rozmerov rozličnými operáciami. Tieto stroje je ďalej možné rozdeliť na vysoko univerzálne obrábacie stroje so širokým rozsahom operácií (univerzálny hrotový sústruh, vodorovná vyvrtávačka) a na stroje so zúženým rozsahom operácií (konzolové frézky, vrtačky, produkčné sústruhy). Týmto sa dajú obrábať obrobky rôznych druhov a veľkostí, avšak počet operácií, ktoré sú schopné vykonávať je obmedzený. Po univerzálnych strojoch ďalej rozdelíme stroje špeciálne, pri ktorých je zámerom konštrukcia strojov na obrábanie jednej plochy či prvku rovnakého typu na obrobkoch rôznych druhov a veľkostí, akými sú napr. stroje na výrobu ozubenia, vačiek, nábojníc apod. Takisto existujú jednouúčelové stroje, ktoré sú konštruované pre konkrétne nemenné operácie a pre rovnaké obrobky. Medzi tieto patrí veľká skupina stavebnicových obrábacích strojov určených pre veľkosériovú a hromadnú výrobu. [8]

6.4 Delenie obrábacích strojov podľa rozhodujúcej technológie

Obrábacie stroje deliace sa podľa rozhodujúcej technológie sú nasledovné:

- sústružnícke stroje (sústruhy),
- frézovacie stroje (frézovačky),
- vyvrtávacie stroje (vyvrtávačky),
- hobl'ovacie (hobl'ovačky),
- obrážacie stroje (obrážačky),
- brúsiace stroje (brúsky),
- stroje určené na jemné dokončovacie operácie – napríklad pomocou lapovania, honovania, superfinišovania a hladenia,
- stroje na delenie materiálu – strojové píly,
- špeciálne stroje – napr. preťahovacie stroje alebo stroje na výrobu závitov a ozubení. [11]

6.5 Delenie obrábacích strojov podľa riadenia

Pri delení podľa typu riadenia poznáme:

1. Stroje s ľudskou obsluhou (konvenčné univerzálne stroje).
2. Jednouúčelové stroje, poloautomaty a automaty pracujúce v automatickom pracovnom cykle (ich riadenie je zabezpečené pomocou prvkov nepružnej automatizácie akými sú napr. nárážky, dorazy, koncové spínače, vačky,...).
3. Stroje s riadiacou jednotkou (NC stroje) – obsahujú počítač, ktorý vytvára riadiaci program. Počítač pracuje nezávisle od stroja, pričom riadiaci program vzniká na základe spolupráce s programátorom. Počítač je prepojený so strojom v systéme „off line“. Prenos informácií prebieha pomocou médií (napríklad CD, pružný disk resp. notebook).
4. Stroje s vlastným riadiacim počítačom (CNC stroje), ktorý je spojený so strojmi v systéme „on line“ – tu už je počítač priamo prepojený s riadiacim systémom stroja. V súčasnej dobe býva počítač priamo zabudovaný do stroja.
5. Stroje typu NC a CNC riadené nadradeným riadiacim systémom. Takéto stroje sú zoskupené v automatizovanom výrobnom systéme a pracujú v priamom hierarchickom spojení „on line“ so svojim nadradeným riadiacim systémom – toto riadenie sa označuje DNC. [11]

6.6 O CNC strojoch

Číslicovým riadením (CNC) je možné rozumieť v širšom zmysle slova činnosť číslicového počítača pre riadenie pohybu nástroja alebo obrobku definovanou rýchlosťou po danej trajektórii v priestore alebo rovine. Pri CNC riadení obrábacích strojov sa jedná konkrétne o riadenie procesu obrábania a pomocných funkcií využitím číselných údajov a príkazov.

Všetky informácie potrebné pre opracovanie súčiastky tvoria radu numerických znakov. Medzi informácie potrebné na obrobenie určitej súčiastky patria:

- informácie určujúce jej rozmery,
- informácie charakterizujúce rôzne funkcie (napríklad posuv, otáčky, apod.),
- pomocné informácie (zapínanie chladiacej kvapaliny, apod.).

CNC obrábací stroj je taký stroj, ktorý je číslicovo riadený a konštrukčne prispôsobený na to, aby pracoval v automatickom cykle a mal automatickú výmenu nástrojov, prípadne obrobkov.

Staršie generácie číslicovo riadených obrábacích strojov používali NC riadiace systémy. Rovnako ako v minulosti aj dnes pod označením NC rozumieme automatické riadenie obrábacieho procesu prostredníctvom zariadenia, ktoré využíva k činnosti zavedené číselné dáta. Takýto NC riadiaci systém využíval k realizácii číslicového riadenia obrábacieho stroja často jednouúčelové automaty, kde software a výkonné obvody boli tvorené pevným zapojením a nosičom dát bol napríklad dierny štítok.

Oproti tomu dnešný CNC používa k realizácii číslicového riadenia počítač. V prípade CNC systémov je časť pre spracovanie informácií tvorená vstavaným počítačom, ktorý má v pamäti uložené ako softvérové bloky všetky dôležité funkcie, na rozdiel od NC systému, ktorý má tieto funkcie a výkonné obvody pevne zapojené. Ďalšou výhodou CNC oproti NC riadeniu je to, že softvérovými blokmi je možné tento systém prispôsobiť strojom s rôznymi výpočtami riadených os, funkcií apod.

Číslicovo riadený obrábací stroj má väčšinou šesť hlavných pracovných celkov:

1. polohovanie nástroja prípadne obrobku,
2. vreteno s vretenníkom,
3. zásobník a výmenník nástrojov,
4. zásobník alebo výmenník obrobkov,
5. prívody média,
6. ochranné kryty. [12]

6.7 Tepelné deformácie

Obrábací stroj počas prevádzky, najmä počas obrábania, ale aj v kľude, môže byť vystavený nerovnomerným teplotným zmenám. Následkom čoho vznikajú tepelné deformácie, ktoré ovplyvňujú vzájomnú polohu obrobku a nástroja. Tento jav je príčinou nepresnosti práce obrábacieho stroja, čo sa prejavuje napr. nezhodou rozmerov rovnakých, presne tolerovaných súčastí v hromadnej výrobe, poprípade odchýlkami vzájomnej polohy plôch u rozmerných a dlhých súčastí, pri ktorých je nutná väčšia priebežná doba obrábania.

Dôvodom zvyšovania teploty sú zdroje tepla priamo na obrábacom stroji aj mimo neho. Jedná sa hlavne o rezný proces a pasívne odpory nachádzajúce sa v hnacích mechanizmoch. Externým zdrojom nerovnomerného teplotného zaťaženia mimo obrábací stroj je napr. systém vykurovania dielne alebo ožiarenie slnečnými lúčmi apod.

Teplo vyvíjané pri presnom obrábaní je nutné čo najintenzívnejšie odvádzať z miesta rezu, napr. pomocou odvodu trieskou alebo nástrojom. Občas však môže značná časť tepla prestupovať do obrobku, čo nastáva obzvlášť pri brúsení. Deformáciám obrobku je možné predchádzať intenzívnym chladením, napr. reznou kvapalinou.

Teplo vyvinuté pri obrábaní tiež môže prestupovať do nástroja a z neho do ďalších častí obrábacieho stroja, obzvlášť v prípadoch dlhodobého, nepretržitého obrábania týmto nástrojom, napr. pri frézovacích nástrojoch sa teplo šíri zo stopky upínacím kuželom do prednej časti pracovného vretena, kde môže nastať prehriatie predného ložiska a degradácia jeho presnosti a životnosti.

Ďalšími zdrojmi tepla v obrábacích strojoch sú hlavne brzdy, trecie spojky a ložiská vo vretenníkoch ale aj prevodovkách. Preto je nutné zaviesť výdatné obehové mazanie ložísk s riadením ich teploty pomocou termostatov. Tie slúžia na ovládanie zariadení na umelé chladenie oleja. [9]

7 MERANIE TEPLOTNÉHO ZAŤAŽENIA

7.1 Zadanie

Cieľom praktických meraní bolo overiť a preskúšať si nadobudnuté poznatky popísané v rešeršnej časti na reálnych objektoch. Vedomosti umocnené takýmto spôsobom sú ľahšie zapamätateľné a obohatené o fakty, ktoré nemusia byť uvedené vo vedeckej literatúre. Nakoľko sa jednalo o merania pod vedením odborníkov bolo možné nadobudnúť skúsenosti s prípravou a uskutočnením experimentov na vysokej úrovni, čo je možné zúročiť v ďalšom štúdiu.

Pre získanie väčšieho súboru dát boli uskutočnené dva experimenty. Prvý prebehol v sídle spoločnosti Intemac Solutions s.r.o.. Je to spoločnosť, ktorá spadá pod Juhomoravské inovačné centrum a zameriava sa na výskum a vývoj v oblasti výrobných strojov. Experiment sa zameriaval na simuláciu rámu obrábacieho stroja, ktorý je teplotne namáhaný. Druhý experiment prebehol na pôde Fakulty strojného inžinierstva Vysokého učenia technického v Brne. Jednalo sa o meranie teplotného zaťaženia guľôčkovej skrutky, ktorá slúži na pohon obrábacieho stroja. Jednalo sa taktiež o simuláciu, pretože skutočný CNC obrábací stroj by bolo náročné zmerať či už dotykovo alebo bezdotykovo.

Vďaka meraniam bolo možné naučiť sa pracovať s termokamerou a taktiež programom FLIR TOOLS, ktorý bol využitý na spracovanie vyhotovených snímok.

Z obdržaných dát prebehlo vyhodnotenie a porovnanie výsledkov kontaktného a bezkontaktného merania.

7.2 Popis merania

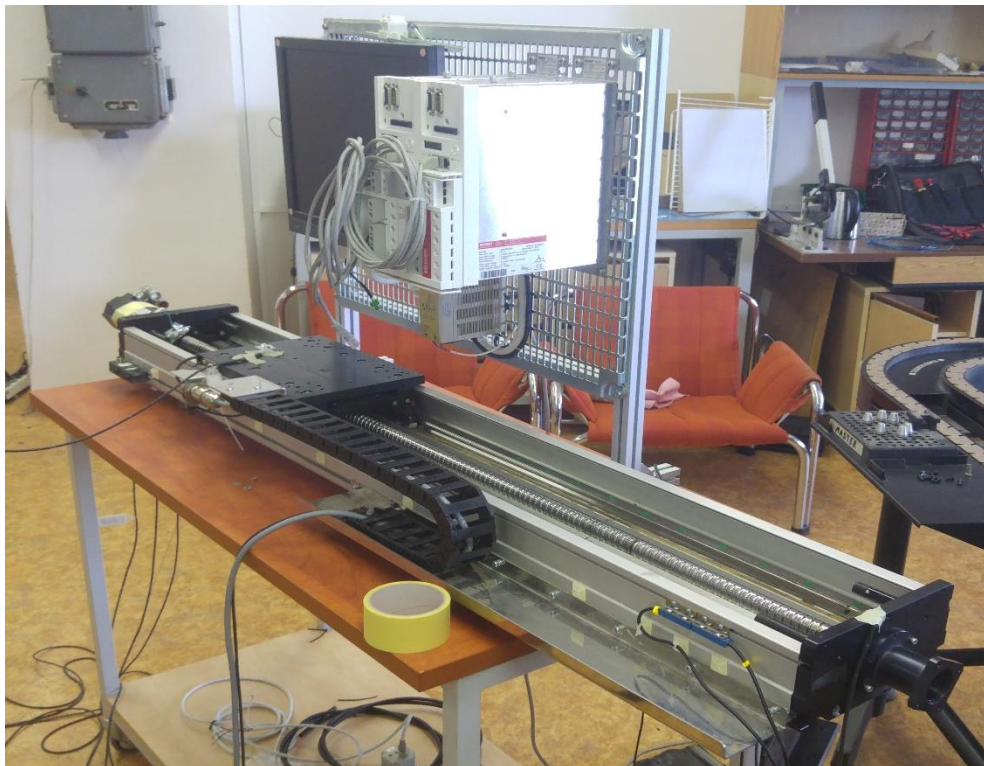
Prvý experiment bol rozdelený na dve časti, ktoré prebehli samostatne a v rozličné dni. V prvej časti prebehlo zoznámenie s termokamerou a zbytkom tímu spoluriešiteľov. Po preštudovaní manuálu boli zistené možnosti tejto kamery a tiež funkcie a režimy, ktoré obsahuje. Po prvých pokusných snímkach bol zvolený najvhodnejší režim pre nasledujúce merania. Ďalej boli testované vplyvy emisivity na presnosť výsledkov porovnaním za pomoci materiálov so známou emisivitou. Taktiež boli brané do úvahy vplyvy okolitého žiarenia, s ktorými sa počítalo pri ďalších meraniach. Po počiatočnom zoznámení s termokamerou do nej boli vložené skutočné hodnoty teploty okolia, relatívnej vlhkosti a taktiež vzdialenosť objektu od kamery a jeho emisivita. Zhotovené snímky boli následne prenesené do počítača obsahujúceho program FLIR TOOLS. Tento program obsahoval ďalšie možnosti a funkcie, ktoré boli preskúmané.

Druhá časť prvého experimentu prebehla 30.3.2017. Experiment započal o 11:20, potom nasledovalo zapnutie rezistorov o 11:25. Po zahriatí rezistorov začalo o 11:42 meranie teploty. V čase 13:17 bol spustený zbytok rezistorov. Posledná snímka bola vyhotovená 15:32.

Druhý experiment prebehol na pôde Ústavu výrobných strojov, systémov a robotiky. Meranie prebehlo 4.5.2017 v špecializovanom laboratóriu ústavu. Samotné meranie začalo o 16:17 a pokračovalo do 17:20, kedy bola zvýšená rýchlosť posuvu závažia umiestneného na guľôčkovej skrutke. Následne pokračovalo meranie do 17:30 dokiaľ sa neustálil nárast teplôt.



Obr. 5) Rám na ktorom prebehol prvý experiment



Obr. 6) Stanovisko použité pri druhom experimente

7.3 Postup prípravy experimentu

Ako prvé prebehlo očistenie samotného prípravku. Liehom boli ošetrované miesta pre nasadenie senzorov aby nedošlo ku skresleniu výsledkov nečistotami. Takisto boli očistené aj rezistory. Na rám bola nanosená teplovodivá pasta, ktorá mala za účel zvýšiť tepelnú vodivosť odstránením vzduchových kapsúl. Rezistory boli potom prichytené pomocou skrutiek a odizolované od okolia pomocou vaty aby k prenosu tepla dochádzalo len medzi rezistorom a prípravkom. Po namontovaní ochranného krytu bol natretý teplovodivou pastou aj rám. Posledným krokom bolo zmeranie výkonu rezistorov.

V prípade kontaktných snímačov bol postup obdobný, snímače a miesta, na ktoré boli umiestnené sa odmastili a natreli teplovodivou pastou. Prichytené však boli pomocou magnetov. Následne boli prepojené so zbernicou, ktorá bola pripojená k počítaču na vyhodnocovanie výsledkov programom LabVIEW. Posledným krokom bolo odizolovanie senzorov od okolitých vplyvov.

Pre termokameru bolo zvolené najvhodnejšie umiestnenie aby zaberala čo najväčšiu plochu, nebola rušená cudzími vplyvmi a nemusela byť presúvaná počas experimentu. Ďalej prebehlo jej prepojenie s počítačom, ktorý obsahoval program FLIR TOOLS, pre priame odosielanie dát a takisto zapojenie do siete aby odpadla nutnosť výmeny batérií, nakoľko experiment trval niekoľko hodín. Po sprevádzkovaní kamery do nej boli zadané parametre emisivity ($\epsilon = 0,96$), relatívnej vlhkosti (37%) a teploty okolia (22 °C). Nasledovalo zmeranie okolitých vplyvov a nastavenie sledovaných bodov, ktoré sa zhodovali s polohou dotykových senzorov. Interval na zhotovovanie snímok bol zvolený 5 minút.

Obdobne prebiehala príprava druhého experimentu. Bolo nutné očistiť miesta kontaktu teplotných senzorov a aplikovať na neho teplovodivú pastu. V tomto prípade však nebola nutná inštalácia dodatočných rezistorov generujúcich teplo nakoľko pohyb samotnej skrutky vytváral dostatok tepla svojou činnosťou. Sensory boli prichytené na pohon, maticu a ložiská guľôčkovej skrutky pomocou lepiacej pásky so známou emisivitou ($\epsilon = 0,96$). V blízkosti bol taktiež umiestnený senzor, ktorý snímal teplotu okolia pre získanie najpresnejších hodnôt. Ďalej boli senzory pripojené do zbernice a tá bola ďalej prepojená s počítačom s nainštalovaným programom LabVIEW. Termokamera bola umiestnená na vyvýšené miesto aby snímala čo najväčšiu plochu, bola prepojená s ďalším počítačom. Do kamery boli následne vložené údaje o teplote okolia (22 °C), relatívnej vlhkosti vzduchu (45%), vzdialenosti meraného objektu (2m) a tepelnej emisivity skúmaných bodov na objekte (0,96). Interval pre zhotovovanie snímok bol zvolený na 2 minúty pretože sa objekt veľmi rýchlo zahrieval a teplota sa postupne rozkladala po celej jeho ploche a stabilizovala.

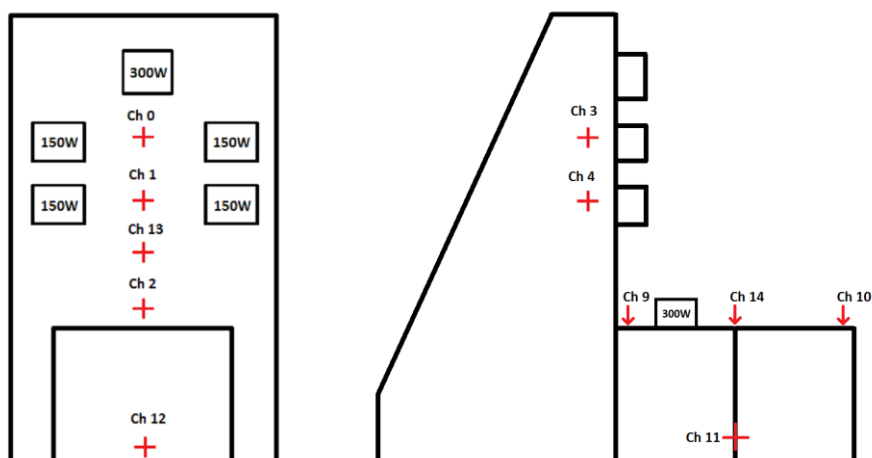
7.4 Postup merania

Prvé meranie započalo 11:20, následne po 5 minútach bol zapnutý prvý rezistor, ktorý sa nachádzal na spodnej časti prípravku. Po dostatočnom zahriatí a namierení kamery na najvhodnejšie miesto bola nasnímaná prvá snímka v čase 11:42. V 5 minútových intervaloch boli získavané ďalšie snímky. Celkovo vzniklo 20 teplotných snímok dolnej časti. V čase 13:17 došlo k zapnutiu zvyšných rezistorov a kamera bola nasmerovaná na vrchnú časť prípravku. Znova bol zvolený interval 5 minút a odfotených bolo 27 snímok vrchnej časti. Meranie bolo ukončené v čase 15:32 a získané hodnoty boli stiahnuté na prenosné médium pre neskoršiu analýzu.

Druhé meranie začalo v čase od 16:17 a po zhotovení série testovacích snímok bola o 16:20 zhotovená prvá oficiálna snímka. Boli zaznamenávané dve polohy závažia, prvá v pravidelných dvojminútových intervaloch až do času 17:18, kedy bola zvýšená posunová rýchlosť. Druhá poloha (kedy bola zreteľnejšie viditeľná guľôčková skrutka) bola fotená nepravidelne od času 16:23 až do ukončenia merania v čase 17:30. K zvýšeniu rýchlosti posunu a takisto k ukončeniu merania došlo po ustálení rastu teplôt. Celkovo bolo zhotovených 51 snímok skrutky.

7.5 Použité vybavenie

Pri meraniach bola využívaná termokamera značky FLIR rady T440, ktorej hlavné parametre sú uvedené v tabuľke 3. Termokamera bola umiestnená na stojan značky Manfrotto model 190XPROB. Na zmeranie vlhkosti slúžil vlhkomer. Na simulovanie teplotného zaťaženia boli použité rezistory v počte štyroch kusov a príkone 150W a ďalšie dva kusy mali výkon 300W. Na kontaktné meranie boli použité teplotné senzory rady Pt1000/3850 (s citlivosťou 0,1 °C) v počte 13 kusov. Teplovodivá pasta bola značky DOW CORNING DC340. Na zber dát bol použitý prenosný počítač značky HP s nainštalovaným softvérom FLIR TOOLS a druhý, taktiež značky HP s programom LabVIEW. Prepojenie bolo pomocou zbernice značky Brüel & Kjaer typu 3160 a regulátorom značky National Instruments rady NI cRIO-9022. Výkres s presnými rozmermi rámu, na ktorom boli umiestnené senzory a rezistory je uvedený v prílohe na CD. Pre lepšiu predstavu je na obr. 7 približný náčrt rozmiestnenia senzorov a rezistorov, dva senzory boli umiestnené mimo rámu na sledovanie teploty okolia. Rezistor nad sensorom Ch 0 mal simulovať zahrievanie vretena a rezistory vedľa senzorov Ch 1 a Ch 13 simulovali lineárne vedenie konzoly.



Obr. 7) Rozloženie senzorov a rezistorov prvého experimentu

Väčšina vybavenia použitá pri prvom experimente našla uplatnenie taktiež pri druhom. Rozdielom bol počet senzorov, v tomto prípade bolo použitých 6 kusov a neboli nutné žiadne rezistory. Sensor s označením Ch 11 bol určený na meranie teploty okolia a bol umiestnený mimo meraného objektu. Sensor Ch 0 meral teplotu pohonu, Ch 7 teplotu príruby, Ch 1 a 8 ložiská a Ch 4 zaznamenával teplotu matice guľôčkovej skrutky. Náčrt umiestnenia senzorov je na obr. 8. V oboch meraniach bola použitá referenčná lepiaca páska so známou emisivitou 0,96.



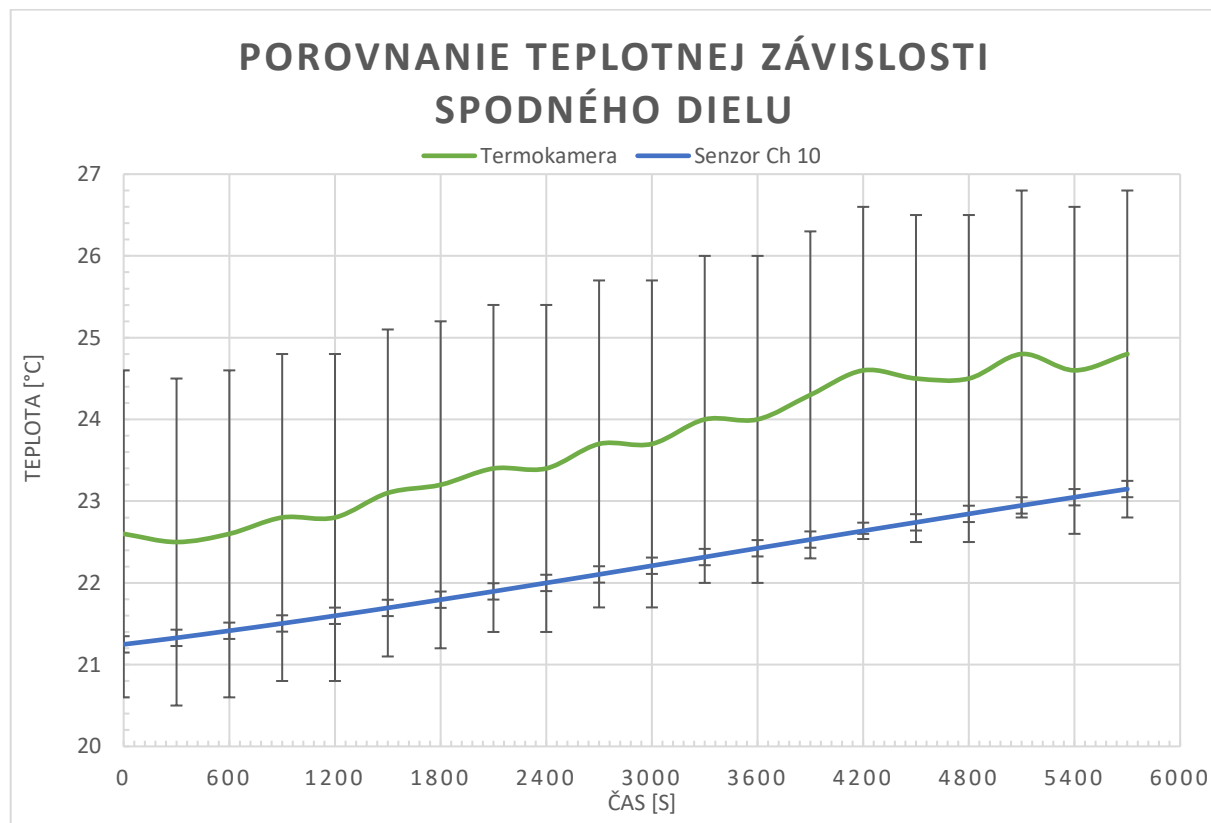
Obr. 8) Rozloženie senzorov počas druhého experimentu

7.6 Namerané hodnoty

V tejto kapitole sú predstavené hodnoty namerané pri oboch experimentoch. Nie sú však všetky keďže ich bolo získaných veľmi veľa. Teploty, ktoré neboli uvedené v tabuľkách budú uvedené v prílohe na CD. Okrem tabuliek sa tu nachádzajú aj porovnávacie grafy a výber zo zhotovených snímok.

7.6.1 Rám

Teplotné zaťaženie spodnej časti rámu je ukázané pomocou senzoru Ch 10 a termokamery zameranej na bod Sp 2. Hodnoty teplôt z termokamery a senzorov spadajú po celý čas do intervalu ich výrobnéj presnosti.

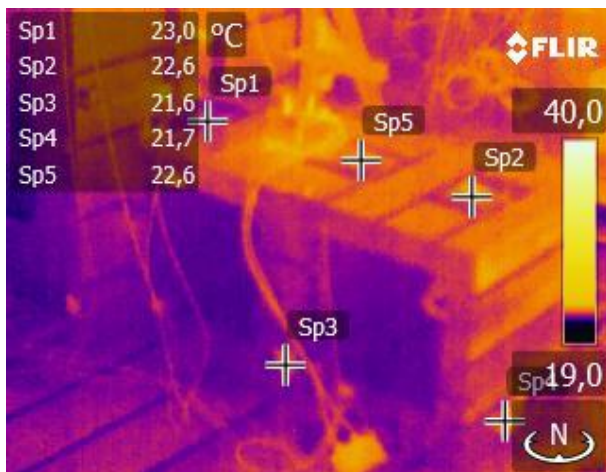


Obr. 9) Grafické znázornenie rastu teploty v spodnej časti rámu

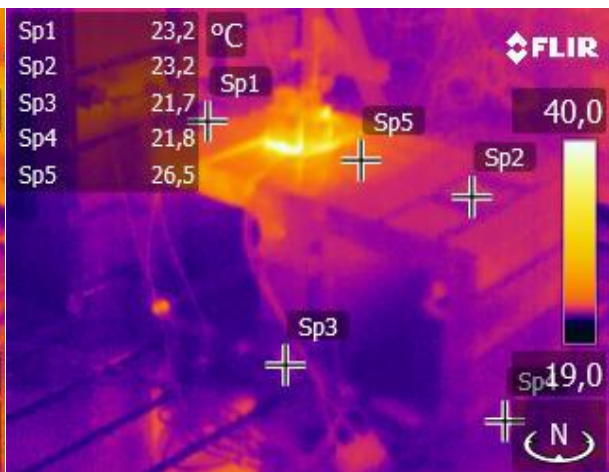
Tab 4) Hodnoty teploty spodnej časti rámu

Čas [s]	Teplota [°C]	
	Termokamera	Senzor Ch 10
0	22,6	21,248041
300	22,5	21,327793
600	22,6	21,414555
900	22,8	21,503834
1200	22,8	21,597891
1500	23,1	21,694149
1800	23,2	21,794436
2100	23,4	21,895948
2400	23,4	21,999949
2700	23,7	22,103638
3000	23,7	22,209908
3300	24	22,316338
3600	24	22,423841
3900	24,3	22,529932
4200	24,6	22,636908
4500	24,5	22,740774
4800	24,5	22,844267
5100	24,8	22,947701
5400	24,6	23,048086
5700	24,8	23,148319

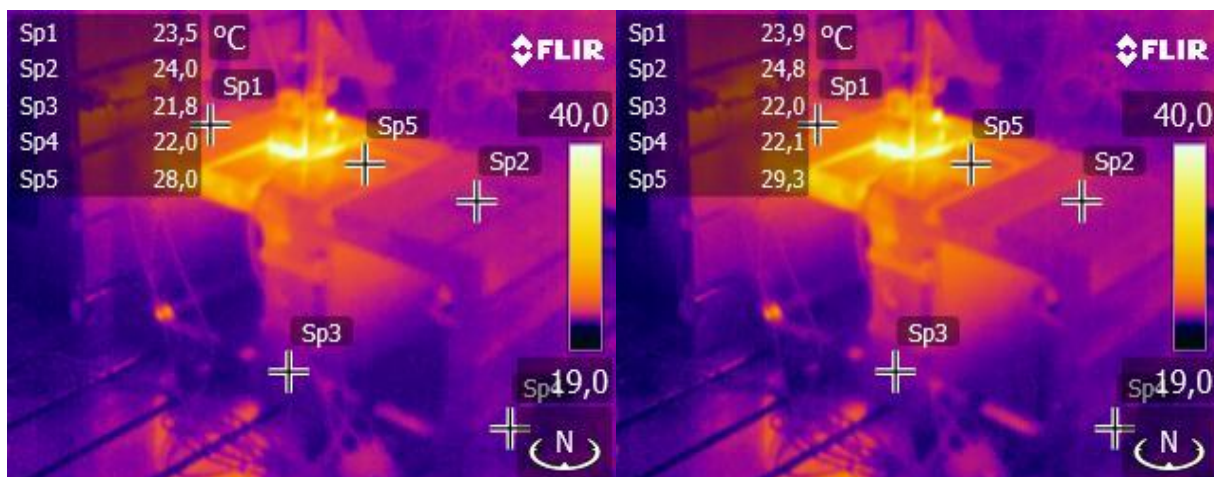
Výber zo zhotovených snímok spodnej časti:



Obr. 10) Začiatok merania v čase 11:42



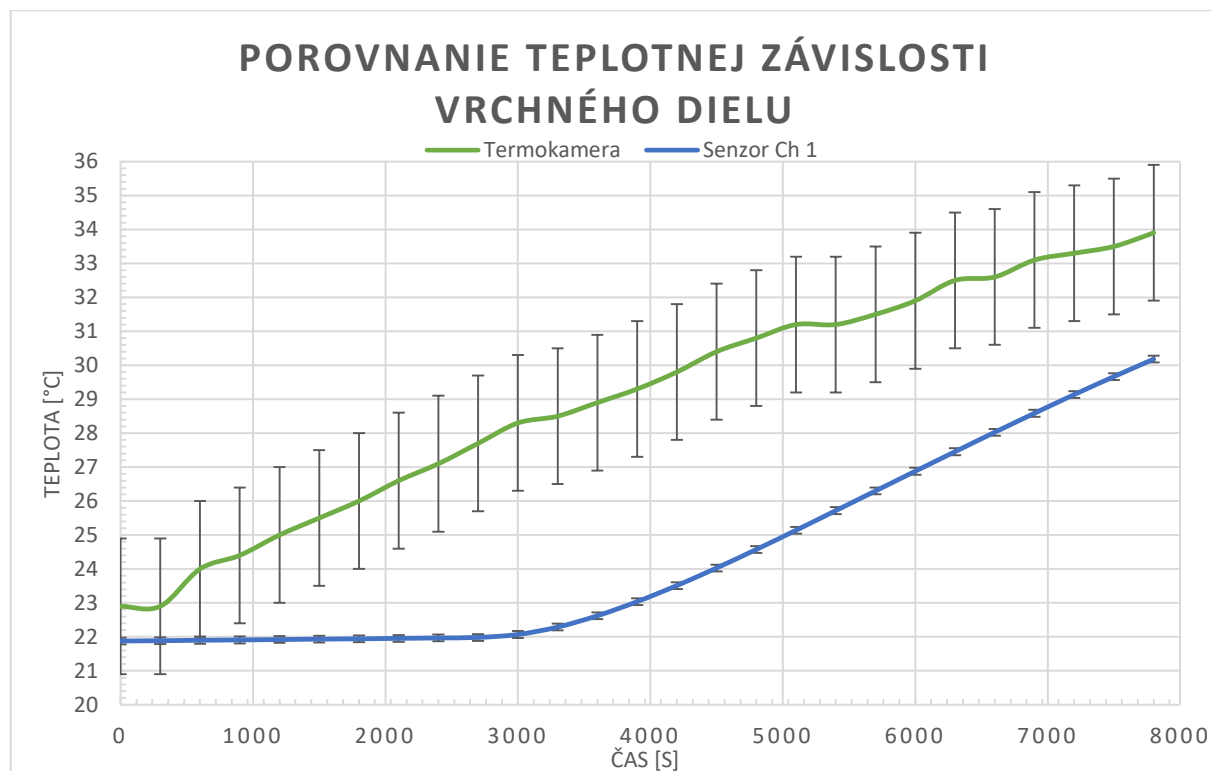
Obr. 11) Meranie v čase 12:12



Obr. 12) Meranie v čase 12:42

Obr. 13) Zapnutie zbytku rezistorov o 13:17

Nižšie je výber nameraných teplôt z vrchnej časti rámu. Teplotné zaťaženie tu znázorňuje senzor Ch 1 a z termokamery bod Sp 2, ako je možné vidieť na snímkach uvedených nižšie. Ako je možné vidieť, namerané teploty nespádajú do intervalu presnosti meradiel, čo môže byť spôsobené niektorou z chýb meraní.

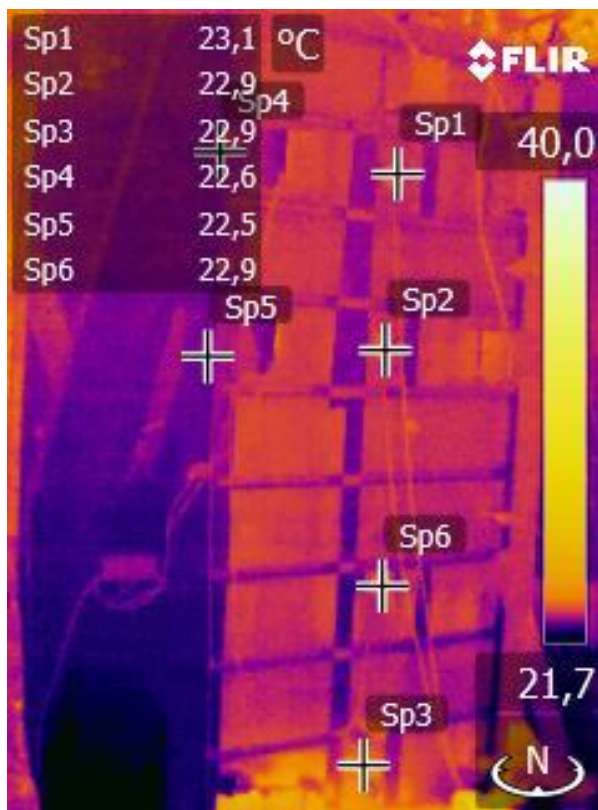


Obr. 14) Grafické znázornenie rastu teploty vrchnej časti

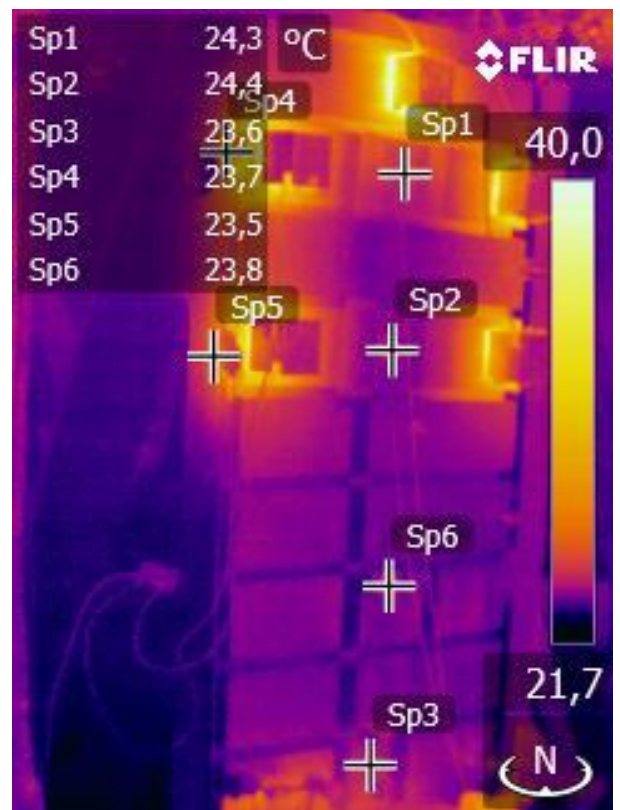
Tab 5) Hodnoty teploty vrchnej časti rámu

Čas [s]	Teplota [°C]	
	Termokamera	Senzor Ch 1
0	22,9	21,877186
300	22,9	21,886269
600	24	21,898746
900	24,4	21,909056
1200	25	21,919678
1500	25,5	21,932753
1800	26	21,941898
2100	26,6	21,954847
2400	27,1	21,96764
2700	27,7	21,983196
3000	28,3	22,069851
3300	28,5	22,287891
3600	28,9	22,620403
3900	29,3	23,036831
4200	29,8	23,510571
4500	30,4	24,028534
4800	30,8	24,573662
5100	31,2	25,140146
5400	31,2	25,718216
5700	31,5	26,297613
6000	31,9	26,878309
6300	32,5	27,453945
6600	32,6	28,026754
6900	33,1	28,586216
7200	33,3	29,135853
7500	33,5	29,665983
7800	33,9	30,180511

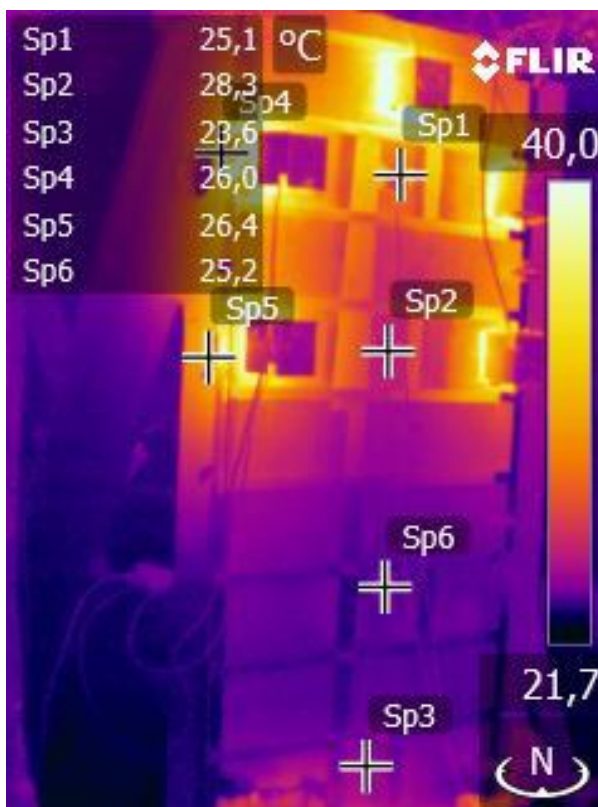
Výber zo zhotovených snímok vrchnej časti:



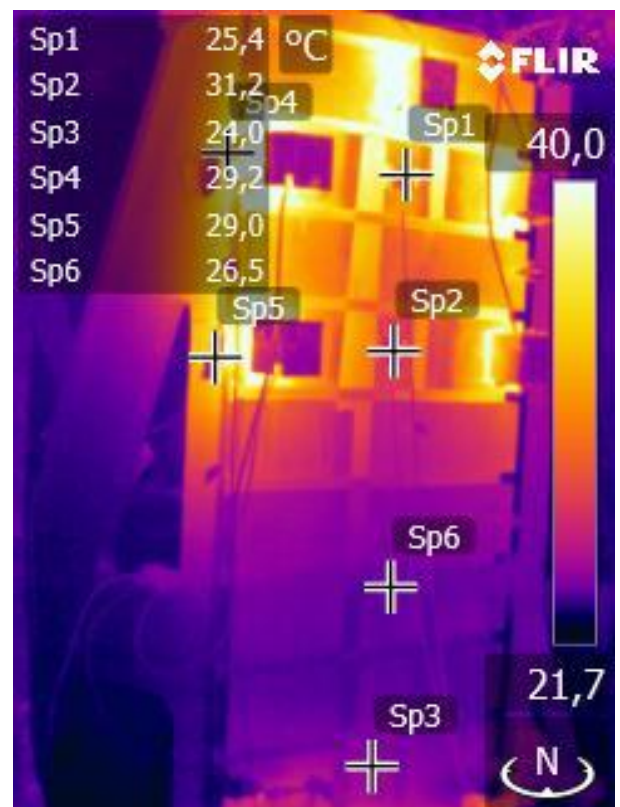
Obr. 15) Zapnutie rezistorov v čase 13:21



Obr. 16) Čas merania 13:37



Obr. 17) Čas merania 14:12



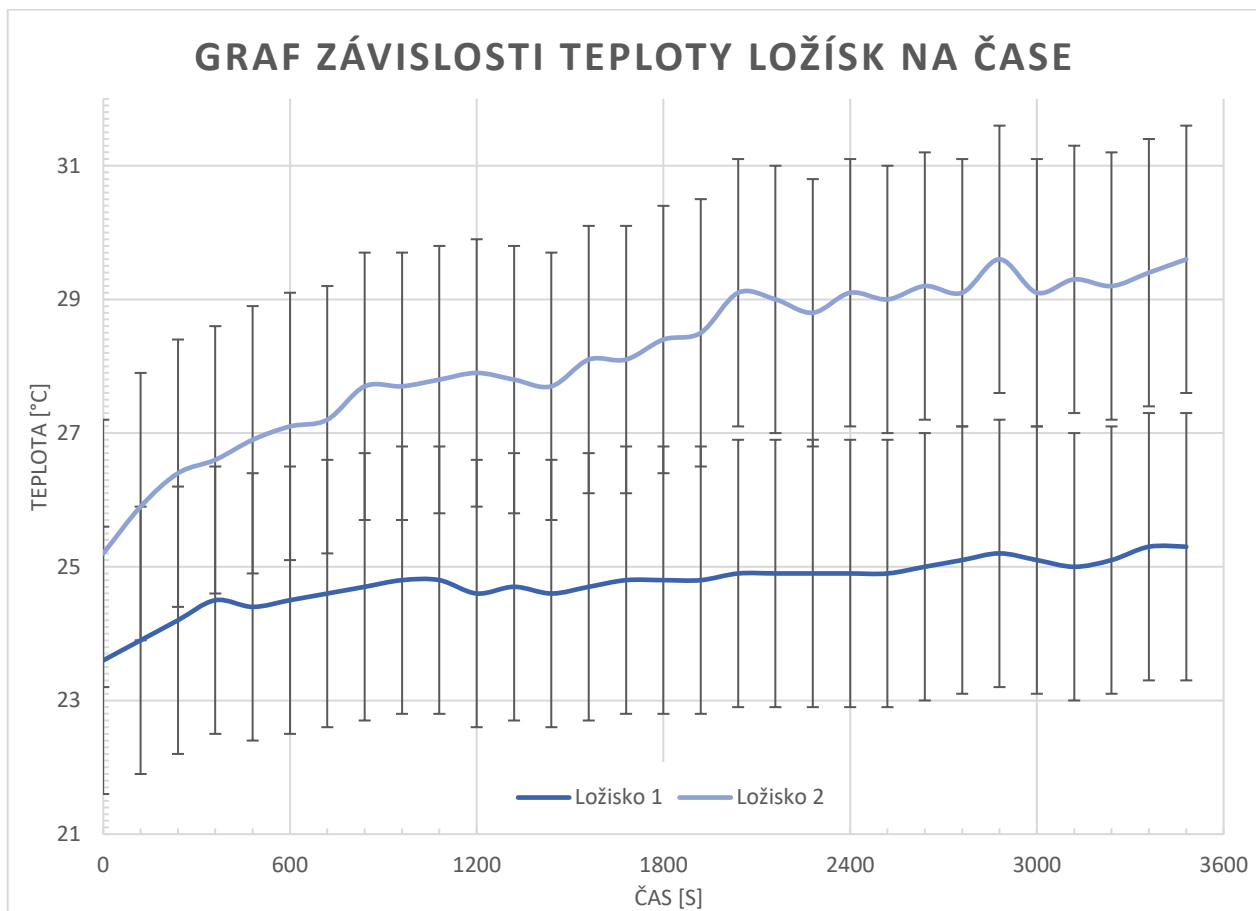
Obr. 18) Čas merania 14:47

7.6.2 Skrutka

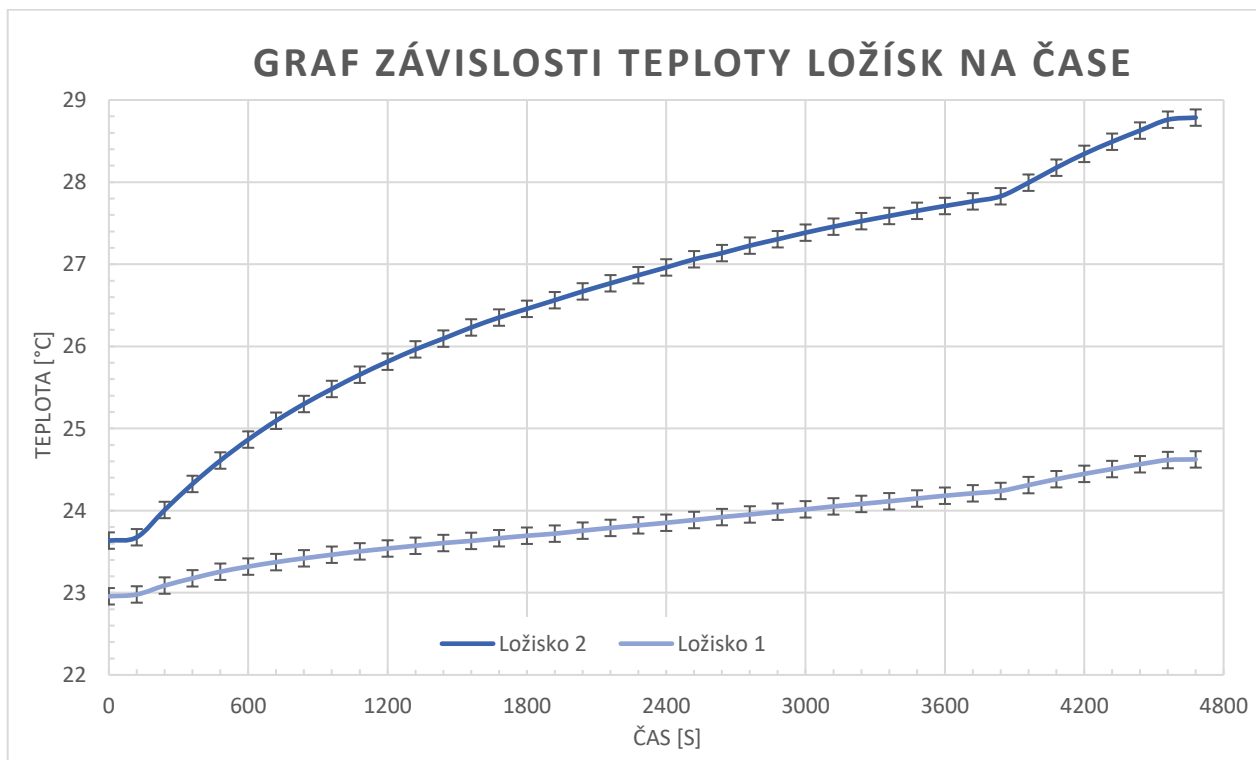
Ďalej sú uvedené teploty z druhého experimentu, a to konkrétne z oboch ložísk. Tie sa nachádzali na koncoch guľôčkovej skrutky. V tabuľke sú uvedené len hodnoty získané termokamerou keďže senzormi bolo nameraných veľmi veľa hodnôt. Sú však zobrazené v porovnávacom grafe. V grafe pre teplotné senzory je zahrnutý aj čas od zvýšenia rýchlosti posuvu. Ako je možné vidieť, hodnoty ložísk sa od seba líšia. Toto môže byť spôsobené umiestnením ložiska 2 v blízkosti pohonu, kedy mohlo dôjsť k vzájomnému prenosu tepla medzi nimi.

Tab 6) Porovnanie teploty ložísk z termokamery

Čas [s]	Teplota [°C]	
	Ložisko 1	Ložisko 2
0	23,6	25,2
120	23,9	25,9
240	24,2	26,4
360	24,5	26,6
480	24,4	26,9
600	24,5	27,1
720	24,6	27,2
840	24,7	27,7
960	24,8	27,7
1080	24,8	27,8
1200	24,6	27,9
1320	24,7	27,8
1440	24,6	27,7
1560	24,7	28,1
1680	24,8	28,1
1800	24,8	28,4
1920	24,8	28,5
2040	24,9	29,1
2160	24,9	29
2280	24,9	28,8
2400	24,9	29,1
2520	24,9	29
2640	25	29,2
2760	25,1	29,1
2880	25,2	29,6
3000	25,1	29,1
3120	25	29,3
3240	25,1	29,2
3360	25,3	29,4
3480	25,3	29,6



Obr. 19) Grafické znázornenie teplôt zmeraných termokamerou

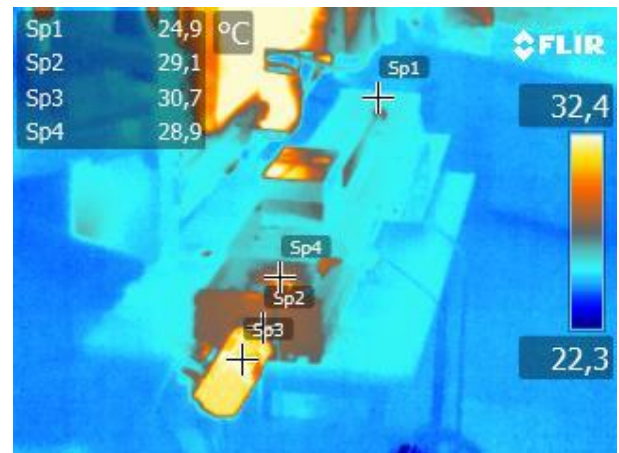


Obr. 20) Grafické znázornenie teplôt zmeraných senzormi

Výber zo zhotovených snímok merania guľôčkovej skrutky:



Obr. 21) Začiatok merania 16:20



Obr. 23) Čas merania 17:00



Obr. 22) Čas merania 16:40



Obr. 24) Čas merania 17:20



Obr. 25) Záver druhého experimentu v čase 17:30

7.6.3 Chyby meraní

Výsledky merania s termokamerou môžu byť skreslené chybami meraní. Základnými chybami sú zle určená emisivita meraného objektu, vplyv okolitej atmosféry a tiež neuvažovanie vplyvu odrazenej teploty. Nasledujúca podkapitola bude venovaná práve týmto vplyvom.

Emisivita: Nevhodne zvolená emisivita môže mať zásadný vplyv na presnosť merania. Správna hodnota sa dá určite viacerými spôsobmi.

Základným spôsobom je nájdenie emisivity pre konkrétny materiál v tabuľke. Nie je však príliš presný, pretože je nutné brať do úvahy aj úpravu povrchu objektu a vlnovú dĺžku, v ktorej pracuje termokamera. V prípade materiálu rámu použitého v prvom experimente (liatina EN-GJL-300) by sa mala emisivita pohybovať v rozmedzí od 0,6 do 0,95. [15] Tabuľkovú hodnotu emisivity skrutky nebolo možné nájsť, nakoľko sa jednalo o zliatinu chrómu a molybdénu, konkrétne 42CrMo4 a tá sa nenachádzala v bežne dostupných tabuľkách emisivity.

Ďalším spôsobom je metóda využitia materiálu s referenčnou emisivitou. V našom prípade ako referenčný materiál slúžila papierová lepiaca páska s emisivitou $\varepsilon = 0,96$. Zmerala sa jej teplota a následne sa zmerala teplota miesta susediaceho s páskou. Potom bolo nutné upravovať emisivitu tak, aby sa teplota miesta čo najviac priblížila teplote pásky. Aby tento postup fungoval, nesmie byť teplota meraného objektu blízka teplote okolitého prostredia. Týmto spôsobom bola určená emisivita rámu s hodnotou $\varepsilon = 0,95$, čo je v rámci intervalu určeného tabuľkou. Na porovnanie bol použitý spodný diel rámu, konkrétne bod Sp 2, ktorý je možné vidieť na obr. 13. Hodnota emisivity skrutky týmto spôsobom vyšla $\varepsilon = 0,68$. Nie je však možné porovnať túto hodnotu s tabuľkovou hodnotou. Na porovnanie slúžil bod Sp 5, ktorý je možné vidieť na obr. 25.

Porovnávací metóda bola realizovaná pomocou programu FLIR Tools až po skončení experimentov s využitím zhotovených snímok.

Odrazenú teplotu je možné zmerať nepriamou metódou, ktorá pozostáva z nastavenia termokamery na $\varepsilon = 1$ a vzdialenosť objektu 0 m. Kamera sa zameria na meraný objekt a pred neho sa vloží reflektor (napríklad alobalová fólia). Následne sa zmeria teplota, ktorá už vyjadruje hľadanú odrazenú teplotu. Pre väčšiu presnosť je nutné toto meranie zopakovať niekoľko krát.

Vplyv atmosféry: Prenos atmosférou ovplyvnený predovšetkým množstvom molekúl vody a oxidu uhličitého, ktoré pohlcujú IR žiarenie. Pre odstránenie chýb je preto nutné zmerať vlhkosť vzduchu, teplotu okolia a vzdialenosť meraného objektu od kamery.

8 ZÁVER

V predkladanej bakalárskej práci bolo cieľom spracovať poznatky z oblasti termodiagnostiky, so zameraním na obrábacie stroje a vyskúšať ich v praxi.

V oblasti termodiagnostiky boli zahrnuté základné stupnice termodynamiky spolu so stupnicou ITS-90 a definíciou samotného senzoru teploty. Nasledovalo rozdelenie spôsobov merania spolu s ich výhodami a nevýhodami. Pri dotykovom meraní teploty boli podrobnejšie popísané dilatčné a odporové teploměry. Súčasťou popisu bezdotykového merania bola uvedená základná terminológia a popísané základné fyzikálne zákony, ktoré sprevádzajú tento typ merania. Ďalej boli popísané rôzne druhy pyrometrov a termovíznych systémov. Ďalšia časť rešerše bola venovaná oblasti obrábacích strojov. Aj v tomto prípade boli popísané základné pojmy a rozdelenie pre získanie prehľadu v tejto problematike. Pozornosť bola venovaná tepelným deformáciami obrábacích strojov. Súčasne boli predstavené CNC stroje, ktorým sa v priemysle dostáva čoraz viac priestoru.

Druhá časť práce bola venovaná dvom experimentom, zameraným na zvládnutie práce s termokamerou, prípravu samotného merania a spracovania výsledkov. Oba experimenty boli popísané, bol pri nich uvedený postup merania a aj postup prípravy samotných experimentov. Takisto bolo spísané použité vybavenie. Ďalej bol uvedený výber z nameraných hodnôt spolu s grafmi a snímkami, slúžiacim na získanie lepšieho prehľadu. Po nameraných hodnotách bola venovaná pozornosť chybám meraní, ktoré mohli skresliť výsledky.

Ako sa dalo očakávať už z rešeršnej časti, pri experimente sa prejavili hlavné silné a slabé stránky merania pomocou oboch metód. Na prípravu merania pomocou senzorov bolo potrebného menej času, keďže bolo nutné len nájsť vhodnú polohu snímačov, prichytiť ich na očistené miesto natrené teplovodivou pastou, prepojiť so zbernicou a počítačom a experiment mohol začať. Vynikali veľkou presnosťou a schopnosťou zaznamenávať hodnoty vo veľmi krátkych intervaloch. Takto bolo možné získať rozsiahli súbor hodnôt pre ďalšie spracovanie. Nevýhodou bola obmedzená možnosť umiestnenia senzorov a ich limitácia na nepohyblivé časti stroja. Takto sa napríklad nedala priamo zmerať teplota guľôčkovej skrutky, ktorá bola neustále v pohybe. V prípade termokamery bola naopak možnosť merať aj pohybujúce sa časti stroja a zabráť veľkú plochu objektu. Vďaka tomu bolo možné pozorovať postupné rozloženie teploty po celom meranom objekte. Nevýhodou bola nutnosť aspoň minimálneho zaškolenia pre obsluhu, taktiež nutnosť poznať vzdialenosť od objektu, jeho emisivitu a teplotu a vlhkosť okolia. Nesprávne určenými parametrami merania bola spôsobená nepresnosť výsledkov. Ďalšiu nevýhodu by mohla predstavovať vysoká nákupná cena samotnej termokamery a vybavenia k nej.

Zo získaných výsledkov je možné vyvodiť záver, že pre meranie teplotného zaťaženia obrábacích strojov je výhodnejšie zvoliť vhodné snímače teploty, ktoré sú presnejšie a jednoduchšie na obsluhu. Meranie s využitím termokamery je vhodnejšie na iné aplikácie.

9 ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

- [1]ŠINDELÁŘ, Václav. Měření teploty: úvod do měření teplot pro technickou praxi a pro studium, s příklady a tabulkami. Praha: Práce, 1951. Technické příručky Práce.
- [2]PAVELEK, Milan. Termomechanika. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-214-4300-6.
- [3]KREIDL, Marcel. Měření teploty: senzory a měřící obvody. Praha: BEN - technická literatura, 2005. Senzory neelektrických veličin. ISBN 80-730-0145-4.
- [4]*The International Temperature Scale of 1990 (ITS-90)* [online]. OMEGA Engineering [cit. 2017-02-19]. Dostupné z: <http://www.omega.com/techref/intltemp.html>
- [5]*Guidelines for Realizing the ITS-90* [online]. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 1999 [cit. 2017-02-19]. Dostupné z: <http://www.omega.com/temperature/Z/pdf/z158-185.pdf>
- [6]HAMMER, M. Způsoby měření a vyhodnocení teplotního stavu objektu (cvičení). Brno: VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 30.11.2015.
- [7]VAVŘIČKA, Roman. Bezkontaktní způsoby měření teploty. Praha: Společnost pro techniku prostředí, 2013. Sešit projektanta - pracovní podklady. ISBN 978-80-02-02515-3.
- [8]BRYCHTA, Josef. Výrobní stroje obráběcí. 2. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2009. ISBN 978-80-248-1893-1.
- [9]PÍČ, Josef a Přemysl BRENÍK. Obráběcí stroje: konstrukce a výpočty. 2., opr. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1986. Technický průvodce. Dostupné také z: <http://kramerius.mzk.cz/search/handle/uuid:0df619f0-a72f-11e2-b6da-005056827e52>
- [10]KNOROVÁ, Renáta a František DROZDA. *PRÍRUČKA PRE MERANIE TEPLoty: Metodická príručka* [online]. Bratislava: Kalibračné združenie SR, 2015 [cit. 2017-03-11]. Dostupné z: http://www.unms.sk/swift_data/source/2015/om/prirucky/PRIRUCKA_TEPLOTA_na_web.pdf
- [11]VELÍŠEK, Karol. *Obrábacie stroje*. Bratislava: Slovenská technická univerzita, 2001. Edícia vysokoškolských učebníc. ISBN 80-227-1498-4.
- [12]MAREK, Jiří. *Konstrukce CNC obráběcích strojů III*. Praha: MM publishing, 2014. MM speciál. ISBN 978-80-260-6780-1.
- [13]PYROMETR IMPAC IGA 8 PRO. In: *Pyrometrcz: LUMASENSE TECHNOLOGIES, INC.* [online]. [cit. 2017-05-05]. Dostupné z: <http://www.pyrometrcz.cz/produkty/mereni-teploty/infracervene-teplomery/impac-infracervene-bezkontaktni-mereni-teploty/prenosne/pyrometrem-impac-iga-8-pro/>
- [14]Termokamera FLIR T440. *Eshop Měřící technika.cz* [online]. [cit. 2017-05-01]. Dostupné z: <http://www.mericitechnika.cz/t440>
- [15]Emissivity of Common Materials. *Omega* [online]. [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <https://www.omega.com/literature/transactions/volume1/emissivity.html>

10 ZOZNAM SKRATIEK, TABULIEK A OBRÁZKOV

10.1 Zoznam skratiek

ITS – 90	The International Temperature Scale of 1990 (Medzinárodná teplotná stupnica z roku 1990)
ČSN	Česká technická norma
ISO	International Organization for Standardization (Medzinárodná organizácia pre normalizáciu)
PN	Positive-Negative (oblasť polovodiča s kladnou a zápornou vodivosťou)
IR	Infrared radiation (infračervené vyžarovanie)
QWIP	Quantum Well Infrared Photodetector (kvantový infračervený fotodetektor)
FPD	Focal Plane Array (mikrobolometrické pole)
A/D	Analog/Digital (analógový/digitálny) prevodník
FFT	Fourierova rýchla transformácia
CD	Compact disk (kompaktný disk)
CNC	Computer numerical control (počítačom ovládané číslicové riadenie)
NC	Numerical control (číslícové riadenie)
DND	Direct numerical control (priame číslicové riadenie)

10.2 Zoznam tabuliek

TAB 1) DEFINIČNÉ PEVNÉ BODY ITS-90 [3]	14
TAB 2) INFRAČERVENÉ VLNOVODY [3]	24
TAB 3) HODNOTY KAMERY FLIR T440 [14]	25
TAB 4) HODNOTY TEPLoty SPODNEJ ČASTI RÁMU	36
TAB 5) HODNOTY TEPLoty VRCHNEJ ČASTI RÁMU	38
TAB 6) POROVNANIE TEPLoty LOŽÍSK Z TERMOKAMERY	40

10.3 Zoznam obrázkov

OBR. 1) ROZLOŽENIE ŽIARIVOSTI ČIERNEHO, ŠEDÉHO A REÁLNEHO TELESÁ [2]	20
OBR. 2) ROZLOŽENIE DOPADAJÚCEJ ENERGIE [2]	21
OBR. 3) PRENOSNÝ PYROMETER ZNAČKY IMPAC [13]	23
OBR. 4) TERMOKAMERA FLIR T440 [14]	25
OBR. 5) RÁM NA KTOROM PREBEHOL PRVÝ EXPERIMENT	32
OBR. 6) STANOVISKO POUŽITÉ PRI DRUHOM EXPERIMENTE	32
OBR. 7) ROZLOŽENIE SENZOROV A REZISTOROV PRVÉHO EXPERIMENTU	34

OBR. 8) ROZLOŽENIE SENZOROV POČAS DRUHÉHO EXPERIMENTU....	35
OBR. 9) GRAFICKÉ ZNÁZORNENIE RASTU TEPLoty V SPODNEJ ČASTI RÁMU.....	35
OBR. 10) ZAČIATOK MERANIA V ČASE 11:42	36
OBR. 11) MERANIE V ČASE 12:12	36
OBR. 12) MERANIE V ČASE 12:42	37
OBR. 13) ZAPNUTIE ZBYTKU REZISTOROV O 13:17	37
OBR. 14) GRAFICKÉ ZNÁZORNENIE RASTU TEPLoty VRCHNEJ ČASTI	37
OBR. 15) ZAPNUTIE REZISTOROV V ČASE 13:21	39
OBR. 16) ČAS MERANIA 13:37	39
OBR. 17) ČAS MERANIA 14:12	39
OBR. 18) ČAS MERANIA 14:47	39
OBR. 19) GRAFICKÉ ZNÁZORNENIE TEPLÔT ZMERANÝCH TERMOKAMEROU.....	41
OBR. 20) GRAFICKÉ ZNÁZORNENIE TEPLÔT ZMERANÝCH SENZORMI.	41
OBR. 21) ZAČIATOK MERANIA 16:20	42
OBR. 22) ČAS MERANIA 16:40	42
OBR. 23) ČAS MERANIA 17:00	42
OBR. 24) ČAS MERANIA 17:20	42
OBR. 25) ZÁVER DRUHÉHO EXPERIMENTU V ČASE 17:30	42

11 ZOZNAM PRÍLOH

Príloha 1 – namerané dáta z prvého experimentu

Príloha 2 – namerané dáta z druhého experimentu

CD-ROM:

- elektronická verzia BP *.pdf
- výkres zostavy rámu *.pdf
- hodnoty teplôt rámu *.xlsx
- hodnoty teplôt skrutky *.xlsx
- snímky z termokamery *.jpg
- fotografie z meraní *.jpg

PRÍLOHY

Príloha 1– namerané dáta z prvého experimentu

t [s]	T [°C]					
	Ch-0	Ch-1	Ch-2	Ch-3	Ch-4	Ch-13
0	23,1	22,9	22,9	22,6	22,5	22,9
300	23,2	22,9	22,8	22,5	22,5	22,8
600	24,1	24	23,5	23,5	23,4	23,6
900	24,3	24,4	23,6	23,7	23,5	23,8
1200	24,8	25	23,7	23,9	23,7	24
1500	24,7	25,5	23,6	24,2	24,2	24
1800	24,5	26	23,5	24,4	24,4	24,2
2100	24,8	26,6	23,6	24,9	25,1	24,5
2400	24,8	27,1	23,6	25,5	25,1	24,6
2700	25,1	27,7	23,7	25,6	25,9	24,9
3000	25,1	28,3	23,6	26	26,4	25,2
3300	25,1	28,5	23,6	26,4	26,7	25,2
3600	24,8	28,9	23,5	26,8	27	25,4
3900	24,8	29,3	23,6	27,1	27,3	25,5
4200	25	29,8	23,7	27,6	27,8	25,8
4500	25,3	30,4	24	28,2	28,3	26,2
4800	25,3	30,8	23,9	28,8	28,7	26,3
5100	25,4	31,2	24	29,2	29	26,5
5400	34,4	31,2	24	29,6	28,3	26,1
5700	35,8	31,5	23,9	30,1	28,5	26,3
6000	36,7	31,9	24,2	30,8	29,2	26,5
6300	37,1	32,5	24,5	31,2	29,4	26,8
6600	37,4	32,6	24,3	31,6	29,7	26,8
6900	38	33,1	24,5	32,1	30	27
7200	38,2	33,3	24,3	32,3	30,2	26,9
7500	38,6	33,5	24,4	32,7	30,6	27,2
7800	38,9	33,9	24,9	33,3	30,8	27,5

t [s]	T [°C]				
	Ch-9	Ch-10	Ch-11	Ch-12	Ch-14
0	23	22,6	21,6	21,7	22,6
300	22,8	22,5	21,5	21,5	23,6
600	22,9	22,6	21,4	21,6	24,3
900	23,3	22,8	21,7	21,9	25,2
1200	23	22,8	21,7	21,7	25,5
1500	23,2	23,1	21,7	21,8	25,9
1800	23,2	23,2	21,7	21,8	26,5
2100	23,2	23,4	21,7	21,7	26,8
2400	23,2	23,4	21,7	21,7	27
2700	23,3	23,7	21,7	21,8	27,3
3000	23,4	23,7	21,7	21,9	27,8
3300	23,5	24	21,7	21,8	27,8
3600	23,5	24	21,8	22	28
3900	23,5	24,3	21,8	21,9	28,3
4200	23,5	24,6	22	22,2	28,4
4500	23,5	24,5	21,8	21,9	28,4
4800	23,7	24,5	21,9	22,1	28,6
5100	23,8	24,8	22	22,3	29
5400	23,7	24,6	21,8	21,9	28,9
5700	23,9	24,8	22	22,1	29,3

Príloha 2 – namerané dáta z druhého experimentu

t[s]	T[°C]			
	Ch 8	Ch 7	Ch 0	Ch 4
0	23,6	25,2	26	24,3
120	23,9	25,9	26,7	24,9
240	24,2	26,4	27,1	25,5
360	24,5	26,6	27,8	25,9
480	24,4	26,9	27,9	26
600	24,5	27,1	28,2	26,4
720	24,6	27,2	28,2	25,4
840	24,7	27,7	28,5	26,8
960	24,8	27,7	28,7	27,2
1080	24,8	27,8	29	27,3
1200	24,6	27,9	28,8	27,4
1320	24,7	27,8	29	27,7
1440	24,6	27,7	29,2	27,5
1560	24,7	28,1	29,4	27,7
1680	24,8	28,1	29,4	28,1
1800	24,8	28,4	29,4	28,2
1920	24,8	28,5	29,9	28,3
2040	24,9	29,1	30,1	28,4
2160	24,9	29	30,3	28,7
2280	24,9	28,8	30,3	28,6
2400	24,9	29,1	30,7	28,9
2520	24,9	29	30,7	28,9
2640	25	29,2	31,1	29,1
2760	25,1	29,1	31,2	29
2880	25,2	29,6	31,4	29,3
3000	25,1	29,1	31,8	29,2
3120	25	29,3	31,3	29,1
3240	25,1	29,2	31,5	29,2
3360	25,3	29,4	31,8	29,2
3480	25,3	29,6	31,8	29,5
3600	25,2	29,9	32,4	27,7
3720	25,5	30	32,6	28,2
3840	25,1	29,3	32,8	28,4
3960	25,4	28,2	33,1	28,4
4080	25,1	28,3	33,3	28,7
4200	24,8	28,3	33,5	28,7