



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

BEZDOTYKOVÉ MĚŘENÍ TEPLoty

NON-CONTACT TEMPERATURE MEASUREMENT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Stefania Negrová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Dominik Hermanský

BRNO 2017

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Studentka: **Stefania Negrová**
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:

Bezdotykové měření teploty

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Bezdotykové měření se často využívá v oblasti predikce teplotního chování obráběcích strojů. Snímače se liší vlastní konstrukcí, způsobem zpracování signálu, přesností měření atd. Předmětem práce bude řešerše v oblasti bezdotykového snímání teploty a jednoduchá praktická úloha.

Cíle bakalářské práce:

1. Seznámení se s řešenou problematikou.
2. Řešerše v oblasti bezkontaktního měření teploty
3. Možností využití metody v oblasti výrobních strojů
4. Měření s využitím bezdotykových snímačů
5. Vyhodnocení výsledků měření

Seznam doporučené 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 4.11.2016

L. S.

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

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

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá bezdotykovým měřením teploty, která je v dnešní době používaným prostředkem pro termodiagnostiku a predikci teplotního chování strojů. V práci je uveden základní přehled kontaktních a bezkontaktních způsobů určení teploty. Zaměřuje se především na termografii a její důvody k používání u obráběcích strojů, přičemž součástí jsou dvě jednoduchá a názorná měření pomocí termokamery.

ABSTRACT

The bachelor thesis deals with non-contact temperature measurement, which is currently used for thermodiagnosics and prediction of temperature behavior of machines. In the thesis is described a basic overview of contact and non-contact methods of temperature determination. It focuses primarily on thermography and its uses for machine tools and includes two simple and clear measurements use of thermocamera.

KLÍČOVÁ SLOVA

Teplota, teploměry, měření teploty, emisivita, infračervené záření, pyrometr, termokamera, termografie, termogram, termodiagnostika.

KEYWORDS

Temperature, thermometers, temperature measurement, emissivity, infrared radiation, pyrometer, thermocamera, thermography, thermogram, thermodiagnosics.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

NEGROVÁ, S. *Bezdotykové měření teploty*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 64 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Dominik Hermanský.

PODĚKOVÁNÍ

Ráda bych na tomto místě poděkovala Ing. Dominiku Hermanskému za jeho pomoc, konzultace a věcné připomínky při zpracovávání mé bakalářské práce. Mé poděkování patří také mému příteli, rodině a přátelům za podporu během celého mého studia.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracovala jsem ji samostatně pod vedením Ing. Dominika Hermanského a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 26.5.2017

.....

Negrová Stefania

OBSAH

1	ÚVOD	15
2	ZÁKLADNÍ POJMY	17
2.1	Historie	17
2.1.1	První teploměry a stupnice	17
2.1.2	Historie infračervené techniky	18
2.2	Teplota a její měření	19
2.2.1	Termodynamická teplota	19
2.2.2	Celsiova teplota	19
2.2.3	Fahrenheitova teplota	19
2.2.4	Nultý zákon termodynamiky	20
2.3	Teplo, energie a práce	20
3	KONTAKTNÍ MĚŘENÍ TEPLoty	21
3.1	Dilatační teploměry	21
3.2	Elektrické teploměry	23
3.3	Speciální teploměry	24
4	BEZKONTAKTNÍ MĚŘENÍ TEPLoty	25
4.1	Černé těleso	25
4.2	Zákony vyzařování černého tělesa	26
4.2.1	Stefan - Boltzmanův zákon	26
4.2.2	Planckův vyzařovací zákon	27
4.2.3	Wienův zákon posuvu	27
4.2.4	Kirchhoffův zákon	28
4.3	Detektory (senzory) infračerveného záření	29
4.3.1	Tepelné senzory tepelného záření	29
4.3.2	Kvantové senzory tepelného záření	30
4.4	Rozdělení bezdotykového měření teploty	31
4.4.1	Využití termokamer a pyrometrů	31
4.4.2	Pyrometry	33
4.4.3	Termovize	34
5	TERMOGRAFIE	35
5.1	Pasivní termografie	35
5.2	Aktivní termografie	36
5.3	Důvody teplotních deformací u výrobních strojů	36
5.4	Techniky měření teploty termokamerou	37
5.4.1	Emisivita	38
5.4.2	Odražená zdánlivá teplota	40
5.4.3	Vliv atmosféry	40
5.4.4	Příčiny chyb při radiačním záření	41
6	PRAKTICKÁ MĚŘENÍ	43
6.1	Zadání úkolů	43
6.2	Použitá měřicí zařízení a pomůcky	43
6.3	Experiment č.1	45
6.3.1	Stanovení emisivity povrchu rámu	49
6.4	Experiment č.2	50
6.4.1	Stanovení emisivity povrchu kuličkového šroubu	54

7	ZÁVĚR.....	57
8	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	59
9	SEZNAM TABULEK A OBRÁZKŮ	63
9.1	Seznam tabulek.....	63
9.2	Seznam obrázků.....	63

1 ÚVOD

Všechna hmota, živá či neživá, ať už ve skupenství plynném, kapalném nebo v pevném, si se svým okolím neustále vyměňuje tepelnou energii ve formě elektromagnetického záření. Schopnost hmoty vyzařovat energii ve formě tepla popisujeme tzv. emisivitou. V případě, že chceme charakterizovat tepelný stav hmoty, popíšeme ji teplotou – základní fyzikální veličinou v soustavě SI. Množství záření tedy „v sobě“ nese informaci o teplotě emitujícího povrchu. Jelikož teplota je všude kolem nás a je nedílnou součástí našich životů, už od nepaměti byly snahy ji nějakým způsobem kvantifikovat – tedy popsat a změřit.

Postupem času se teplota stala jednou z nejvíce měřených fyzikálních veličin a byly vyvinuty spousty metod na její měření. Většina z nich je založena na měření fyzikálních vlastností daného materiálu, které se mění v závislosti na teplotě. V průmyslové oblasti jsou velmi časté termočlánky, které jsou široce využívány, vzhledem k tomu že jsou levné, jednoduše vyměnitelné a jsou schopné měřit široký rozsah teplot. Jejich hlavním omezením je ovšem přesnost, kdy chyby menší než jeden stupeň Celsia, je obtížné získat. V poslední době, i díky snížení kupní ceny, jsou stále více využívány pyrometry a infračervené kamery, které jsou založeny na skutečnosti, že každý subjekt emituje elektromagnetické záření, jehož intenzita závisí na teplotě. Hlavními výhodami této metody je bezdotykové měření a rychlá doba odezvy.

Tato bakalářská práce se zabývá právě bezkontaktním měřením, zejména termografií a možnostmi její aplikace v praxi, např. u výrobních strojů. Její součástí jsou také dvě experimentální měření.

2 ZÁKLADNÍ POJMY

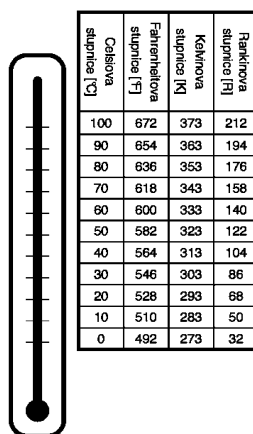
Od začátku 20.století, kdy je částicová fyzika na vzestupu a zkoumá např. složení materiálů a jejich chování, nám stále přináší nové a vzrušující technologické výzvy. Základní výzkumy, ke kterým bylo nutné vytvořit složité, ale nezbytné technologie, často vedly ke vzniku velkého počtu jejich aplikací do praxe, např. v oblasti medicíny, průmyslu, aplikované fyziky atd. a v drtivé většině nyní významně ovlivňují život a zvyklosti společnosti.

2.1 Historie

2.1.1 První teploměry a stupnice

Jednou z vlastností, které si lidé všimli už ve starověku, byla tepelná roztažnost látek při změně teploty a její určování se provádělo jen na základě empirických zkušeností lidským okem (např. barva vypálené hlíny). [3] [13]

Historie objektivního měření teploty začíná na konci 16.století, kdy byl první teploměr sestaven Galileo Galileiem. Jednalo se o vzduchový teploměr, který využíval expanzi a kontrakci vzduchu k pohybu vodního sloupce v trubici. Nevýhodou tohoto teploměru ovšem byla chybějící stupnice. S první přichází na počátku 17. století německý vědec Daniel G. Fahrenheit, který zároveň s ní zkonstruoval první dilatační rtuťový teploměr opatřený touto stupnicí, která se v některých oblastech světa využívá dodnes. Na něj navázal švédský fyzik Anders Celsius, který zavedl stejnojmennou stupnici (obr. 2.1), a nakonec britský vědec William T. Kelvin, který navrhl termodynamickou absolutní stupnici. [3] [13]



Obr. 2.1 Porovnání jednotlivých stupnic (8)

2.1.2 Historie infračervené techniky

Do roku 1800 nebyla známa existence infračervené části elektromagnetického spektra. Jejím objevitelem se stal až anglický badatel a astronom Sir William Herschel, jehož původním záměrem bylo najít materiál pro optický filtr do dalekohledu, který by snížil jas obrazu při pozorování Slunce. Jeho experiment spočíval v použití skleněného hranolu, u kterého ovšem nepozoroval rozklad viditelného spektra – světla, nýbrž se zaměřil na tepelný efekt. Použil k tomu citlivý rtuťový teploměr, díky němuž byly testovány tepelné účinky různých barev spektra vytvářených skleněným hranolem, kterým procházely sluneční paprsky. Jiné teploměry byly umístěny mimo sluneční světlo a ty sloužily k porovnání jakožto referenční. Posouváním teploměru po rozloženém světle bylo možné pozorovat teplotní nárůst od fialového konce po červený konec spektra. Teploměr Herschel posouval dále do tmavé oblasti za červený konec spektra, kde nadále tepelný efekt vzrůstal. Podařilo se mu tím nalézt bod maxima, v dnešní době nazývaný infračervené vlnové pásmo. Tehdy ho pojmenoval termometrické spektrum, až o několik desítek let později vznikl termín „infračervený“. [3] [13]

K detekování záření se teploměry používaly až do roku 1829, kdy byl vynalezen první termočlánek. Ten pak italský badatel Melloni spojil do série a vznikla tím první termoelektrická baterie, která byla až 40krát citlivější detektor záření než tehdy nejlepší teploměr. [3] [13]

Významným mezníkem ve snímání a vyhodnocování infračerveného záření byl vynález bolometru, který vynalezl americký badatel Langley. Jednalo se o začerněný proužek platiny připojený k jedné větvi Wheatstonova můstku, na který dopadal svazek paprsků infračerveného záření, a ten měnil jeho odpor, který vyhodnocoval galvanometr. Ač byl bolometr sestrojen roku 1880, jeho princip se dodnes využívá pro účely termovize a bude o něm pojednáno v dalších kapitolách. [3] [13]

Další výrazný vývoj přišel začátkem 20. století během první světové války, kdy začaly vznikat první funkční systémy. Ty byly primárně určeny k vojenským účelům. Byly využívány k detekci pronikání nepřítele, měření teploty na dálku a navádění „létajících torpéd“. Například blížící se letadlo byly schopné detekovat na vzdálenost 1,5 km nebo osobu na vzdálenost větší než 300 metrů. V meziválečném období byly vynalezeny dva nové infračervené detektory, jednalo se o konvektor obrazu a fotonový detektor. Konvektor obrazu byl zajímavý opět především pro armádu, jelikož umožňoval pozorovateli „vidět ve tmě“. Nevýhodou byla jeho citlivost, která byla omezena jen na blízké IČ vlnové délky, tudíž cíl musel být osvětlován IČ vyhledávacími paprsky. V tom ovšem skýtalo riziko prozrazení u nepřítele, který mohl být podobně vybavený, proto později zájem o tento detektor zanikl. Tyto takzvané „aktivní“ systémy se vědci po druhé světové válce snažili nahradit „pasivními“, u kterých byl využit výše zmíněný fotonový detektor. Zpočátku byl výzkum tajný a zveřejněn byl až v padesátých letech. Díky tomu mohl být další vývoj převeden i do soukromé sféry a to vedlo k aplikaci získaných poznatků do civilního sektoru, průmyslu aj. [3] [13]

2.2 Teplota a její měření

Teplota je stavová veličina, která charakterizuje termodynamický stav kterékoliv makroskopické soustavy. Kvantitativně se dá vyjadřovat různými způsoby, které vychází z výše zmiňovaných teplotních stupnic. Jedná se například o:

- Termodynamickou teplotu
- Celsiovu teplotu
- Fahrenheitovu teplotu

2.2.1 Termodynamická teplota

Termodynamická teplota byla zavedena na základě poznatků o účinnosti tepelných strojů – Carnotova cyklu. Odvodil ji W.Thomason (Lord Kelvin). Značí se T a její jednotkou je *kelvin* (značka K), stupeň Kelvinův je základní jednotkou soustavy SI. Vztah pro vratný Carnotův cyklus je následující:

$$T = \frac{Q}{Q_z} \cdot T_z \text{ [K]} \quad (2.1)$$

kde jsou Q – teplo, které látka během cyklu přijme

Q_z – teplo, které látka během cyklu odevzdá

T – vztahem definovaná termodynamická teplota

T_z – základní termodynamická teplota

T_z je tzv. základní termodynamická teplota, která byla určena na základě trojného bodu vody ($0,01^\circ\text{C}$), jejíž hodnota je stanovena na 273,16 K. Když je tedy zvolena jako výchozí hodnota, je výše uvedeným vztahem definována termodynamická teplota. [2] [16] [17]

2.2.2 Celsiova teplota

Celsiova teplota se značí písmenem t , její jednotkou je *stupeň Celsia* (značka $^\circ\text{C}$) a je definována vztahem:

$$t = T - 273,15 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (2.2)$$

kde je T – odpovídající termodynamická teplota

U teplotních rozdílů termodynamických hodnot a odpovídajících Celsiových hodnot je shoda a jejich jednotky jsou totožné, tudíž není nutné je převádět mezi sebou. [2] [16] [17]

2.2.3 Fahrenheitova teplota

Fahrenheitova teplota se značí jako t_F , její jednotkou je *stupeň Fahrenheita* (značka $^\circ\text{F}$), kde pro teplotu platí:

$$t_F = \frac{9}{5} \cdot t + 32 \text{ [}^\circ\text{F]} \quad (2.3)$$

Fahrenheitova stupnice je dnes nejvíce využívána v USA a v jeho závislých územích (např. Portoriko). V omezené míře se s ní můžeme setkat i v Kanadě. [2] [16] [17]

2.2.4 Nultý zákon termodynamiky

Znalost nultého zákona termodynamiky je důležitá při měření teploty. Jeho slovní formulace zní: Jsou-li různé soustavy A a B v tepelné rovnováze se soustavou C, pak je i soustava A v tepelné rovnováze se soustavou B. Matematicky je popsán následovně:

- Je-li $T_A = T_C$ a $T_B = T_C$, pak je také $T_A = T_B$

Zásadní význam tohoto zákona spočívá v jeho aplikaci pro měření teploty, jelikož se může zvolit třetí soustava, či látka jako standart – teploměr, díky kterému je možno porovnat teploty jiných soustav, bez toho, aby byly v přímém styku. [2]

Měření teploty je nejčastěji založeno na principu pozorování roztažnosti pevných látek, kapalin nebo plynů a na pozorování změn elektrických vlastností látek (termoelektrické napětí, odpor etc.) [2]

2.3 Teplo, energie a práce

Teplo Q [J] – jedná se o formu přenosu energie mezi soustavou a jejím okolím, nejedná se o stavovou veličinu. Nejčastěji se vyjadřuje jako tzv. předávané teplo, pro které platí tzv. kalorimetrická rovnice:

$$Q_{12} = m \cdot c \cdot (T_2 - T_1) \text{ [J]} \quad (2.4)$$

kde jsou m – hmotnost

c – měrná tepelná kapacita

T_1 – teplota soustavy na počátku

T_2 – teplota soustavy na konci [2]

Energie E [J] – jedná se o stavovou veličinu, vyjadřuje schopnost soustavy konat práci, fyzikální, chemické či jiné změny, a to buď uvnitř soustavy, či mimo ni. Energie se může rozlišovat na mechanickou, tepelnou, elektrickou, magnetickou, chemickou a jadernou. [2]

Vnitřní energie U [J] – jedná se o stavovou veličinu, která je určena součtem energií neuspořádaných pohybů částic, jak molekul tak atomů. [2]

Práce A [J] – je také forma přenosu energie mezi soustavou a okolím, není stavovou veličinou. [2]

3 KONTAKTNÍ MĚŘENÍ TEPLOTY

Teplota je velmi důležitá veličina, která ovlivňuje všechny stavy a procesy v přírodě. Proto je nezbytné umět ji změřit a zvolit k tomu ten nejvhodnější způsob. Teploměrů existuje mnoho, fungujících na různých principech, podle fyzikálního principu se dělí viz. tab. 3.1). Tahle kapitola se zabývá kontaktním způsobem měření, tedy takovým, kdy teploměr musí být v přímém kontaktu s měřeným objektem (prostředím). [11]

Tab. 3.1 Rozdělení dotykových teploměrů [11] [19]

Skupina teploměrů	Typ teploměru	Fyzikální princip	Teplotní rozsah (°C)	
Dilatační	Plynový	Změna tlaku	-250	+800
	Tenzní	Změna tenze par	-40	+230
	Kapalinový	Změna objemu	-190	+600
	Kovový	Délková roztažnost	-100	+500
Elektrické	Termoelektrické	Termoelektrický jev	-200	+1700
	Odporové kovové	Změna elektrického odporu	-250	+1000
	Odporové polovodičové, diodové	Změna prahového napětí	-200	+400
Speciální	Keramické žároměrky	Bod měknutí	+600	+2000
	Teploměrná tělíska	Bod tání	+100	+1300
	Teploměrné barvy	Změna barvy	+40	+1350

Senzor teploty

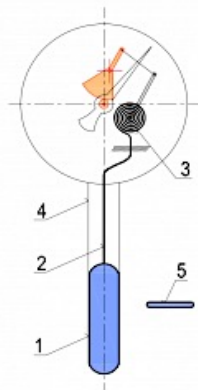
Senzor teploty je funkčním prvkem, který tvoří vstupní blok měřicího řetězce, to znamená blok, který je v přímém styku s měřeným prostředím. Jeho ekvivalentním názvem je též snímač teploty, či čidlo teploty. Jako senzor se může označovat také detektor tepelného záření nebo teploměr. [3]

3.1 Dilatační teploměry

Dilatační teploměry využívají teplotní roztažnosti látek, ať už tuhých, kapalných, či plynů. Dle tohoto principu a také dle jejich konstrukce se v základu dělí na plynové, tenzní, kapalinové a kovové. [3] [11] [19] [20]

- **Plynový teploměr**

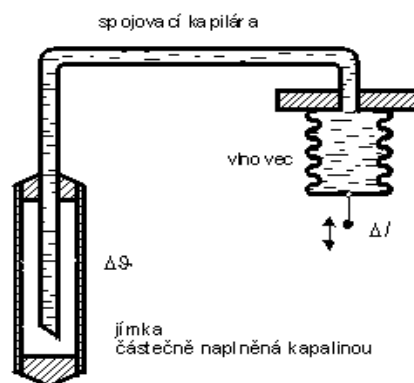
U tlakového plynového teploměru se využívá závislosti tlaku plynu na teplotě při stálém objemu, příp. závislosti objemu plynu na teplotě při stálém tlaku. Jinak řečeno tlak plynu za stálého objemu je přímo úměrný teplotě. **Výhodou** plynových teploměrů je jejich velký rozsah, vysoká přesnost (až 0,5 %), velká dlouhodobá stabilita (0,2 % za rok), možnost instalace v agresivních prostředích. **Nevýhodou** jsou především velké pořizovací náklady a velmi malý přírůstek tlaku s teplotou. [3] [11] [19] [20]



Obr. 3.1 Schéma plynového tlakového teploměru: 1 – plynové tělísko, 2 – kapilára, 3 – tlakoměrný deformační člen, 4 – stonek, 5 – průřez trubice, z níž je zhotoven deformační člen (21)

- **Tenzní teploměr**

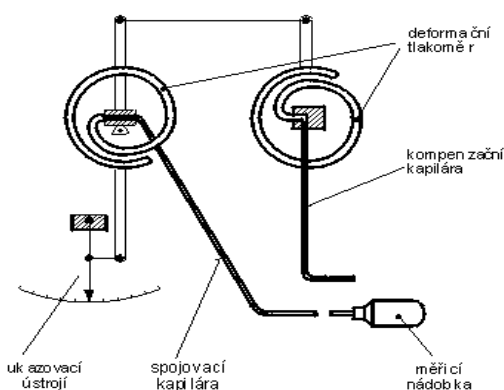
Tenzní teploměry neboli parní tlakové teploměry pracují na principu změny tenze par. Využívají závislosti mezi teplotou a rovnovážným tlakem. **Výhodou** tenzních teploměrů je jejich citlivost, menší teplotní časová konstanta a menší teploměrová nádoba. **Nevýhodou** je nelineární průběh stupnice. [3] [11] [19] [20]



Obr. 3.2 Schéma tenzního teploměru (20)

- **Kapalinový teploměr**

Kapalinový teploměr je založen na měření změny objemu kapaliny s teplotou. Běžně se jedná o skleněné teploměry, které jsou nejčastěji plněné rtutí. Jejich **výhodou** je jednoduchost, spolehlivost, přesnost, nízké pořizovací náklady. **Nevýhodou** je křehkost, za určitých podmínek i špatná čitelnost, případně obtížnost dálkového přenosu údaje. [3] [11] [19] [20]



Obr. 3.3 Kapalinový technický teploměr s kompenzačním členem (19)

- **Kovový teploměr**

Kovový teploměr neboli bimetalický teploměr je z pásky, který se skládá z dvojkovu (bimetal) o různých tepelných roztažnostech. Pásky jsou vzájemně pevně spojeny. Při zvýšené teplotě se pásek prohne na stranu toho materiálu, který má nižší součinitel roztažnosti. Jeho **výhodou** je nízká pořizovací cena, jednoduchá údržba a obsluha, robustní konstrukce. Za **nevýhodu** může být považován menší rozsah teplot, menší přesnost (do 1,5 %), či pomalá odezva na změnu teploty. [3] [11] [19] [20]

3.2 Elektrické teploměry

- **Termoelektrický teploměr**

Termoelektrické teploměry, jinak nazvané termočlánky, využívají ke své funkci termoelektrický jev (Seebeckův jev – jev, kde se tepelná energie mění na elektrickou). Jsou tvořeny termoelektrickým článkem, který sestává ze dvou vodičů z různých kovových materiálů A a B, které jsou na obou koncích vodivě spojeny. Jestliže teplota jednoho vodiče bude odlišná od teploty druhého vodiče, vznikne termoelektrické napětí a obvodem bude procházet termoelektrický proud neboli změnou teploty spoje dvou kovů se mění termoelektrické napětí. [3] [11] [19] [20]

- **Kovové odporové teploměry**

K měření teploty se využívá teplotní závislost elektrického odporu materiálu. Závislost je charakterizována teplotním součinitelem odporu α (K^{-1}). Kovy se obvykle využívají tzv. čisté, tj. platina, měď a nikl. [3] [11] [19] [20]

3.3 Speciální teploměry

- **Teploměrné barvy**

Jsou buď v práškové nebo kapalně formě. Barva se nanáší již před samotným ohřevem a při zahřívání se barevná stopa změní při dosažení teploty zvratu. [11]

- **Keramické žároměrky**

Jedná se o nevratné deformační indikátory. Jsou vyráběny v různých tvarech, jako například trojboké jehlany, kroužky, čtvercové tyčinky. [11]

4 BEZKONTAKTNÍ MĚŘENÍ TEPLoty

Teplota je jedním z nejsledovanějších parametrů ve výrobě, v diagnostice a údržbě technologií. Je to jev, který pomáhá zjistit daný fyzikální stav určitého objektu. Díky jejímu pozorování a vyhodnocování lze usměrňovat výrobní procesy.

4.1 Černé těleso

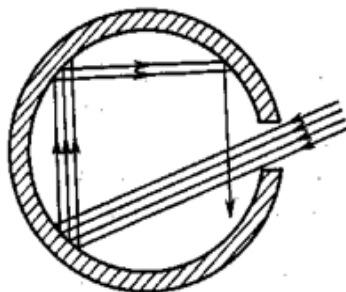
Pro popis vyzařování z povrchu reálného tělesa je užitečné zavést pojem tzv. černé těleso. Jedná se o případ ideálního tělesa, které má následující vlastnosti:

- Těleso absorbuje všechno dopadající záření bez ohledu na vlnovou délku a směr.
- Při stejné teplotě a vlnové délce žádný jiný povrch nemůže emitovat více energie než povrch černý.
- I přesto, že je emitované záření černého tělesa funkcí teploty a vlnové délky, je nezávislé na směru. To znamená, že těleso je tzv. difuzní zářič. [2] [9] [10]

Z výše uvedeného vyplývá, že černé těleso se užívá k porovnání, jak silně vyzařují ostatní tělesa. K tomuto porovnání se zavádí veličina poměrná zářivost (častěji označována jako emisivita), což je poměr energie vycházející z daného povrchu E_λ a energie vycházející z povrchu černého tělesa $E_{0,\lambda}$ při stejné teplotě (dle rovnice 4.1). [2] [9] [10]

$$\varepsilon_\lambda = \frac{E_\lambda}{E_{0,\lambda}} \quad [-] \quad (4.1)$$

Z toho poměru vyplývá, že její hodnota se nachází vždy mezi nulou a jedničkou. Je potřebné dodat, že pojem „černý povrch“ je značně zavádějící, jelikož jako černé těleso se nemusí chovat jen objekt, který má na pohled černou barvu, ale také například sníh a led, jejichž povrch je světlý, přesto však se jeví pro tepelné záření také jako blízké černému tělesu. To platí i pro množství bílých nátěrů, které jsou téměř shodné s povrchy černými. [2] [9] [10]



Obr. 4.1 Znázornění černého tělesa – absorptance záření (11)

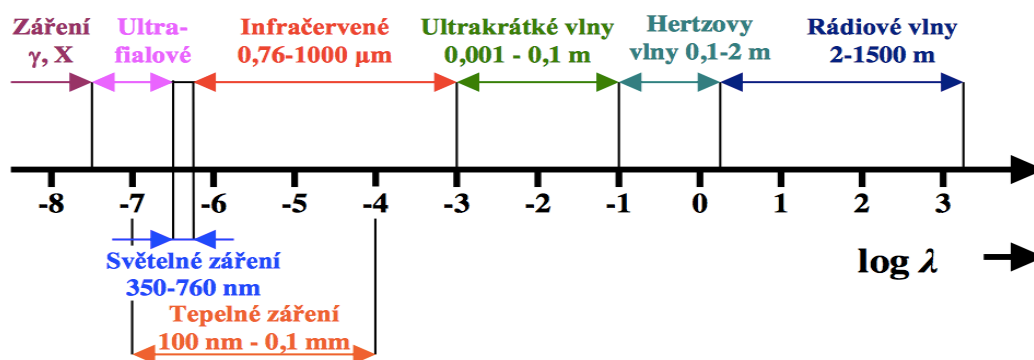
4.2 Zákony vyzařování černého tělesa

Teplo může být přenášeno nejen vedením a konvekcí, kde je zapotřebí nějaké „zprostředkující látky“, ale i tepelným zářením. To se emituje z povrchu všech těles, u kterých je teplota větší než 0 K.

Jakékoliv elektromagnetické záření se šíří rychlostí světla – $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Vypočítá se jako součin vlnové délky λ a frekvence f :

$$c = \lambda \cdot f \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (4.2)$$

V elektromagnetickém spektru se tepelné záření nachází v rozsahu vlnových délek přibližně od 0,1 μm do 100 μm , dle obr. 4.2. [2] [3] [4] [10] [11] [13]



Obr. 4.2 Elektromagnetické spektrum (7)

4.2.1 Stefan-Boltzmannův zákon

Zářením se přenáší tepelná energie ve formě diskretních kvant. V každém kvantu je ukryta určitá hodnota energie. Vyzařující těleso se skládá z molekul, které jsou plné atomů, a ty oscilují v silovém poli ostatních elementárních částic, tj. konají tepelný pohyb. Energie z uvedeného oscilujícího pohybu přechází jak na sousední částice, tak do okolí tělesa ve formě elektromagnetických vln.

Černé těleso, jak se říká ideálnímu tepelnému zářiči, emituje tepelné záření v množství, které je přímo úměrné čtvrté mocnině absolutní teploty tělesa podle Stefan-Boltzmanova zákona:

$$E_0 = \sigma T^4 \text{ [W} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (4.3)$$

kde jsou E_0 – zářivost černého tělesa

σ – Stefan-Boltzmannova konstanta, $\sigma = 5,669 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^4$

T – teplota tělesa v Kelvinech

Z výše uvedeného zákona vyplývá, že intenzita vyzařování pro určitou teplotu je v celém spektru vlnových délek. [2] [3] [4] [10] [11] [13]

4.2.2 Planckův vyzařovací zákon

Spektrální rozložení při záření černého tělesa je dnes již dobře známo. Je definováno Planckovým zákonem ve formě monochromatické zářivosti (spektrální hustota vyzařování černého tělesa) $E_{0,\lambda}$:

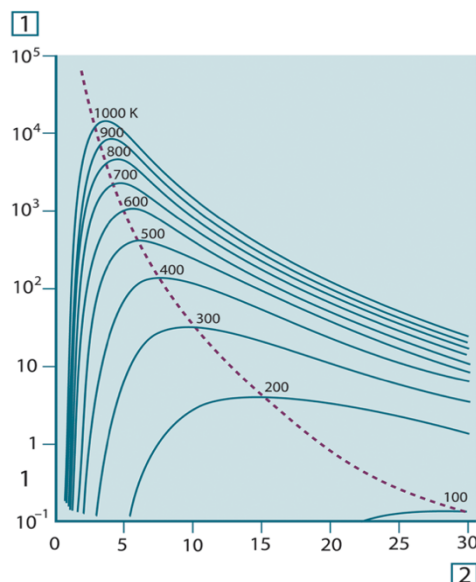
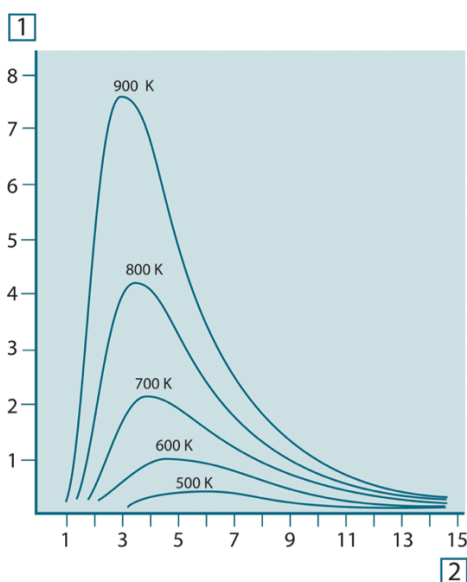
$$E_{0,\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 [\exp(\frac{hc}{kT\lambda}) - 1]} \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}] \quad (4.4)$$

kde jsou c – rychlost světla

k – Boltzmannova konstanta, $k = 1,380 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$

h – Planckova konstanta, $h = 6,625 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$

Jedná se o zářivost černého tělesa, vztaženou na jednotku vlnové délky λ . Její spektrální hustotu intenzity vyzařování můžeme vidět na obr. 4.3 a). [2] [3] [4] [10] [11] [13]



Obr. 4.3 a) Planckův zákon, osa 1: spektrální hustota intenzity vyzařování ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$), osa 2: vlnová délka (μm) (13)

Obr. 4.3 b) Wienův zákon, čárkovaná křivka je spojnici maxima vyzařování každé teploty, osa 1: spektrální hustota intenzity vyzařování ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$), osa 2: vlnová délka (μm) (13)

4.2.3 Wienův zákon posuvu

Říká nám, že vlnová délka maxima vyzařování je závislá na termodynamické teplotě T . Jinými slovy, s rostoucí teplotou se maximum spektrální hustoty intenzity vyzařování posouvá ke kratším vlnovým délkám:

$$\lambda_{max} \cdot T = 2898 [\mu m \cdot K] \quad (4.5)$$

Zmíněný jev můžeme pozorovat na obr. 4.3 b. Na základě znalosti tohoto zákona se volí čidlo podle rozsahu měřených hodnot. [2] [3] [4] [10] [11] [13]

4.2.4 Kirchhoffův zákon

Vyzařování černého tělesa je ideální případ a řídí se výše uvedenými zákony. V případě reálného objektu (tělesa) se mohou tyto zákony v určitých intervalech vlnových délek uplatnit rovněž, ale v některých případech nikoliv.

Pro rozlišení černého tělesa a reálného objektu se využívá existence tří skutečností (složek záření). Když záření dopadá na určitou plochu, mohou nastat tyto tři případy: část záření může být pohlcena (absorptance) – α , část odražena (reflektance) – ρ , a část může projít (transmitance) – τ , viz. obr. 4.4. [2] [3] [4] [10] [11] [13]

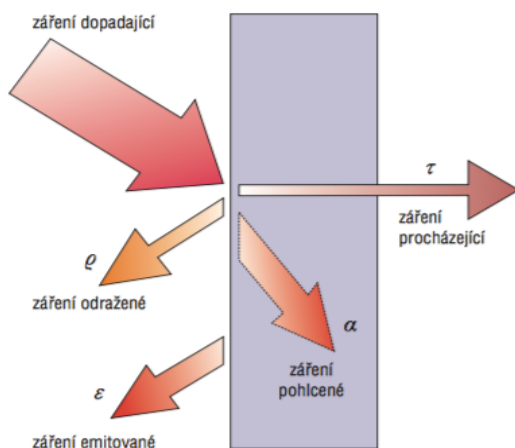
Součet všech tří faktorů se rovná jedné, bez ohledu na jejich vlnovou délku. Výsledný vztah je tedy:

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (4.6)$$

Černé těleso je dokonalý absorbér, což znamená, že pohltí všechnu dopadající energii, a tudíž platí $\alpha = 1$. V praxi je důležité znát především hodnotu poměrné pohltivosti, tj. α , jelikož na této teplotě je závislý vývoj teploty tělesa. Problém ovšem nastává při zjišťování její přesné hodnoty, protože tato hodnota je závislá na zdroji, z kterého zářívá energie pochází. To řeší použití Kirchhoffova zákona, který udává, že pro těleso, které je v tepelné rovnováze s okolím, platí rovnost mezi absorptancí α a emisivitou (poměrnou zářivostí) ε :

$$\alpha = \varepsilon \quad (4.7)$$

Nevýhodou tohoto zákona je, že není platný v případě, kdy jsou teploty těles výrazně odlišné (např. když zdrojem je solární záření etc.). [2] [3] [4] [10] [11] [13]



Obr. 4.4 Rozdělení dopadající energie (10)

4.3 Detektory (senzory) infračerveného záření

Podle interakce fotonů s daným materiálem se detektory dělí na dvě základní skupiny senzorů

- Tepelné
- Kvantové (fotodetektor)

Principiálně senzory záření patří mezi měniče zářivé (neelektrické) energie na elektrickou.

4.3.1 Tepelné senzory tepelného záření

Tepelné detektory jsou založeny na absorpci fotonů, kdy se zároveň oteplí citlivé části detektoru a pohlcená energie se vyhodnotí nepřímo prostřednictvím snímačů teploty. Jedná se neselektivní typ. Dělí se na:

- Termoelektrické
- Bolometrické
- Pyroelektrické

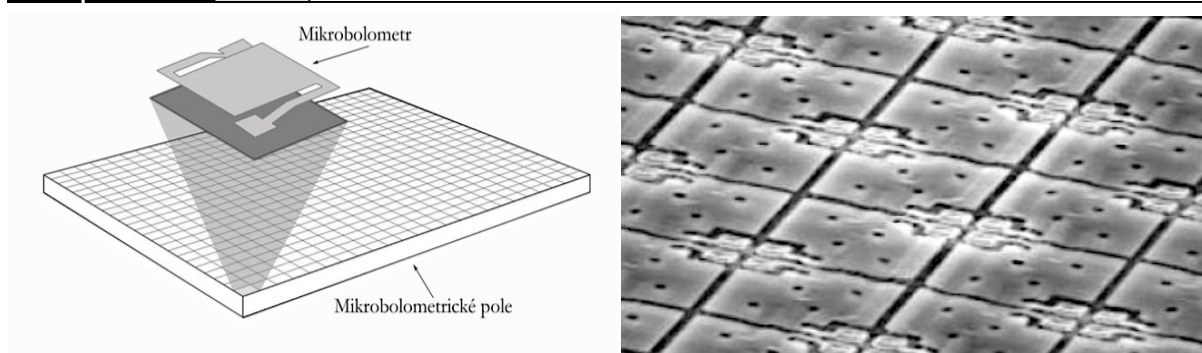
Termoelektrický senzor

Termoelektrické baterie jsou sériově řazené termočlánky, které se konstruují buď jako tenké kovové pásky tloušťky asi 0,03 mm, nebo také jako pásky zhotovené pomocí technologie tenké vrstvy. Jako materiály se nejčastěji používají např. Bi, Sb dopované Se a Te. Počet pospojovaných termočlánků je 100. [1] [3] [22]

Bolometrický senzor

Snímá oteplení detektoru teplotně závislým odporovým materiálem, to znamená že pohlcené záření způsobuje změnu teploty odporového čidla a tím i mění jeho elektrický odpor. Nejčastěji se zde uplatňují tenkovrstvé mikroelektrické technologie na bázi odporových materiálů z oxidů MgO, MnO, NiO etc. Nejčastěji se bolometry vyskytují ve formě integrovaných obvodů, které obsahují uspořádání několika desítek, stovek a tisíců bolometrů do matice (uspořádání FPA – Focal Plane Array), všeobecně označované jako mikrobolometrické senzory. Ty se mohou uspořádat jako řádkové, či plošné senzory. Plošné senzory se nacházejí nejčastěji v termovizních kamerách. [1] [3] [22]

Vlastnosti bolometru – je rychlý, velmi citlivý, má velký pracovní teplotní rozsah senzorů, měří vysoký rozsah teplot měřeného objektu, má malé rozměry (v případě mikrobolometrů pouze desítky μm), nevýhodou může být vysoká pořizovací cena a u některých typů je zapotřebí jejich chlazení. [1] [3] [22]



Obr. 4.5 Mikrobolometrické pole – detail uspořádání matice FPA (12)

Pyroelektrické senzory

Využívají pyroelektrického jevu neboli spontánní polarizace při změně teploty. Pyroelektrický jev se nachází u pyroelektrik s trvalou polarizací, či u určitých feroelektrik, u kterých se orientace domén vytvoří silným elektrickým polem. [1] [3] [22]

4.3.2 Kvantové senzory tepelného záření

Kvantové detektory neboli fotodetektory – reagují na absorbované fotony tím, že excitují volné nosiče náboje (fotoelektrický jev). Jedná se o selektivní typy, jako např. fotodiody, fotorezistory atd. [1] [3] [22]

Fyzikální podstata fotoelektrického jevu

Záření, které dopadá na povrch objektu, se skládá z kvantů energie, vztah (4.8). Po absorpci, která nastane v povrchu tělesa, se část energie využije na překonání přitažlivých sil poutajících elektrony v atomu. Zbývající energie absorbovaných kvantů se přemění na energii kinetickou oněch vyražených elektronů. Albert Einstein posléze doplnil kvantovou domněnku předpokladem, že záření se může nejen emitovat a absorbovat po kvantech, nýbrž se po kvantech může i šířit. Na tomto základě definoval vztah mezi hmotností a energií:

$$E = h \cdot \nu = m \cdot c^2 \quad [J] \quad (4.8)$$

kde jsou E – energie

h – Planckova konstanta, $h = 6,625 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$

ν – rychlost

m – hmotnost

c – rychlost světla ve vakuu

Ze vztahu, jak bylo experimentálně dokázáno, vyplývá, že foton má hmotný charakter.

[1] [3] [22]

Fotodetektory

Kvantové senzory jsou ve své podstatě polovodičové detektory (Si, Ge, PbS, Te...) a podle typu polovodiče se dělí na

- Intrinsické
- Extrinsické

Intrinsický senzor se vyrábí z vlastního (tj. čistého) polovodiče. Senzor využívá změny pohyblivosti nosičů nábojů při dopadu fotonů na vrstvu z polovodiče. Pracuje v tzv. fotokonduktivním módu, a tudíž se vyžaduje elektrické pole přivedením vnějšího napětí. [1] [3] [22]

Extrinsický senzor se zakládá na PN struktuře z nevlastních polovodičů, u kterých hustota nosičů nábojů se udává koncentrací příměsí. Atom příměsí, který má nadbytečný valenční elektron, se nazývá dotovaný polovodič typu N. V opačném případě, kdy atom příměsí váže elektron polovodiče, dotovaný polovodič bude mít jako majoritní nosiče díry a jedná se o polovodič typu P. [1] [3] [22]

4.4 Rozdělení bezdotykového měření teploty

Infračervenou pyrometrii se může nazývat samotné bezdotykové měření teploty. Jedná se o její měření vyzařované z povrchu tělesa ve formě elektromagnetického záření, které se přijímá senzorem (tj. detektorem). Využívá se rozmezí hodnot záření $0,4 \mu\text{m} - 25 \mu\text{m}$, což odpovídá teplotám od -40°C do $10\,000^\circ\text{C}$. Jedná se o rozsah, který spadá jak do viditelného spektra, tak i infračerveného. [1] [24]

Tab. 4.1 Přehled rozdělení bezdotykových teploměrů

Skupina teploměrů	Měřicí princip	Typ teploměru
Bezdotykové teploměry	Přímo měřící	Úhrnné pyrometry Monochromatické pyrometry Pásmové pyrometry Poměrové pyrometry Vícepásmové pyrometry Pyrometry s automatickou korekcí emisivity Pyrometry s optickými vlnovody v infračervené oblasti
	Zobrazovací	Termovize

4.4.1 Využití termokamer a pyrometrů

Bezdotykového měření teploty se využívá především kvůli jeho praktičnosti při měření objektu, který je v pohybu, přičemž ho nějak negativně ani pozitivně neovlivňuje. Za další jeho výhodu

se dá považovat bezpečnost, kdy je nutno měřit teplotu z určité bezpečné vzdálenosti (elektrická zařízení, hutní objekty atd.) [26]

Za nevýhody se dají pokládat vzniklé nejistoty, které vzniknou při měření, kdy se špatně určí hodnota emisivity povrchu tělesa, při neznalosti správné hodnoty prostupnosti mezi čidlem a objektem, či špatném určení odraženého záření. [26]

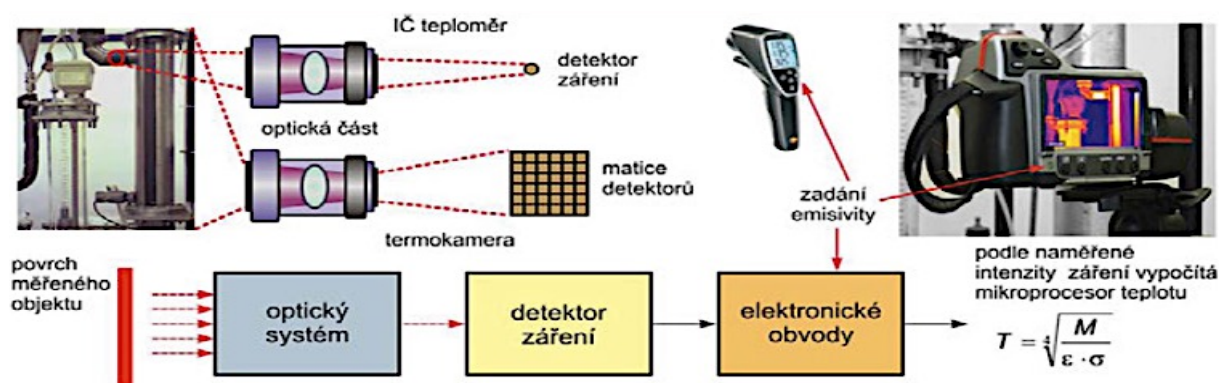
Princip měření termokamery a pyrometeru je stejný, zásadní rozdíl ovšem spočívá v tom, že pyrometer vyhodnocuje teplotu bodově (lépe řečeno zjišťuje průměrnou teplotu v určité oblasti, nejčastěji se jedná o oblast kruhovou), kdežto termokamera hodnotí na povrchu celých objektů teplotní pole, vznikne tzv. (2D) termogram. To se projevuje v samotném uspořádání senzorů v přístrojích. U IČ teploměru se používá pouze jeden sensor IČ záření, zatímco v termokameře je obsažen maticový detektor, který obsahuje velký počet jednotlivých senzorů. [23]

Pyrometry se mohou vnímat jako více specializované přístroje, lépe řečeno pro předem určenou skupinu úloh, či různých materiálů, kdežto termokamery jsou konstruovány univerzálněji. [27]

Oba bezdotykové teploměry neměří přímo teplotu, nýbrž ji stanovují výpočtem z intenzity tepelného záření, která byla naměřena. Aby byla teplota přístrojem vyhodnocena správně, je nutné zadat na začátku měření vstupní hodnoty, tzv. parametry měření, které jsou pro výpočet teploty nezbytné. Jedná se zejména o:

- Emisivitu
- Reflektovanou teplotu (odraženou teplotu)
- Teplotu okolí (atmosféry)
- Relativní vlhkost okolí
- Vzdálenost mezi měřeným objektem a bezkontaktním snímačem

Lépe vybavené termokamery umožňují nastavit všechny výše zmíněné parametry (tím se zvyšuje přesnost samotného měření), pyrometry umožňují zadání emisivity a některé modely i reflektovanou teplotu. [27]



Obr. 4.6 Blokové schéma termokamery a pyrometru (23)

4.4.2 Pyrometry

Pyrometry neboli radiační teploměry jsou měřiče teploty, které se mohou rozdělovat dle různých hledisek. Jedná se například o spektrální oblast využívaného záření, vlnovou délku záření, způsob měření, optický systém, tvar měřicí oblasti, teplotní a optické rozlišení atd. [25]

Teplotní rozlišení

Určuje nejmenší možnou změnu teploty, kterou je pyrometr schopen zaznamenat, standardně se jedná o rozmezí 0,3 – 1 K. [27]

Způsob měření

V tabulce 4.1 je rozřazení pyrometrů, jak je běžně popisováno v literatuře, v praxi se ovšem nejčastěji vyskytují přístroje jako spektrální (jednobarevný) pyrometr, poměrový (dvoubarevný) pyrometr, širokopásmový pyrometr, případně existují i univerzálnější produkty, kdy podle nastavení mohou být používány třeba jako spektrální, nebo poměrový pyrometr. [27]

Optické rozlišení

Jedná se o poměr vzdálenosti měřeného objektu D k charakteristickému průměru S plochy na povrchu objektu, která se bude promítat přímo na plochu detektoru pyrometru ($D:S$). Čím větší tento poměr bude, tím bude optické rozlišení přístroje lepší, a tudíž měřená plocha při stejné vzdálenosti může být lepší. Standardně se poměr pohybuje v rozmezí 35:1–300:1. Je zapotřebí si uvědomit, že v případě, kdy měřený objekt nevyplňuje zorné pole pyrometru, bude pozadí objektu zahrnuto do průměru výsledné teploty. [27]

Tvar měřené oblasti

Jedná se o tzv. *spot*, což je část měřeného povrchu objektu, ze které je průměr naměřené teploty. Jak již bylo zmíněno výše, nejčastěji se jedná o kruhové oblasti. Ovšem v případě, že se jedná o měření např. nějaké tekutiny, která je v pohybu (obecně se jedná o objekty, jež konají nějaký pohyb), je vhodnější použít obdélníkový tvar oblasti, ten je prakticky necitlivý na posuvy v jedné ose, tudíž výsledek je nakonec přesnější. [27]

Chyba měření, která se běžně uvádí u pyrometrů je od „ $\pm 1^\circ\text{C}$ či $\pm 1\%$ “ do „ $\pm 2^\circ\text{C}$ či $\pm 2\%$ “, někdy i více. [27]

Výhody použití pyrometru oproti termokameře:

- Nižší pořizovací cena
- Možnost pořízení pyrometru s vyšší tepelnou a mechanickou odolností (lze i u termokamery, ale v mnohem vyšší cenové hladině)
- V oblasti vyšších teplot mají pyrometry větší přesnost měření než u běžně dostupných termokamer [27]

Spektrální pyrometry

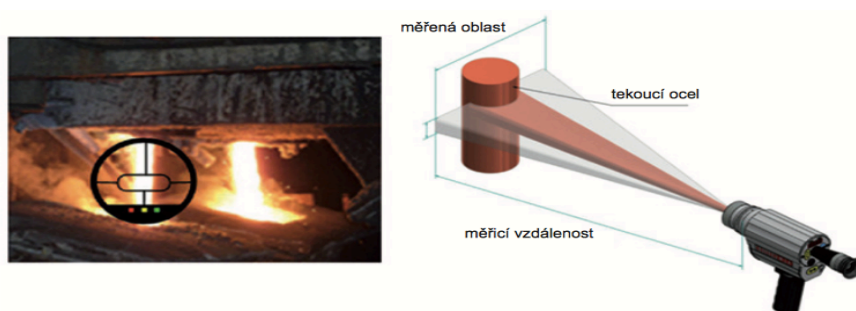
Neboli jasové či monochromatické pyrometry využívají závislosti spektrálního záření tělesa při určité vlnové délce na teplotě. Zpravidla se jedná o vlnovou délku $\lambda = 0,65 \mu m$. Princip měření spočívá v porovnání jasu od měřeného předmětu s jasem srovnávacího zdroje, zpravidla se jedná o pyrometrickou žárovku. Jasové pyrometry se řadí mezi subjektivní typ, jelikož kvalita získaného výsledku měření je závislá na vnímání pozorovatele. [3] [11]

Pásmové pyrometry

Stejně jako u spektrálních pyrometrů využívají závislosti spektrálního záření v určitém rozsahu vlnových délek, respektive určují teplotu na základě záře z povrchu tělesa v úzkém pásmu vlnových délek. Pásmo je široké od 10 nm do jednotek mikrometru. Jinak platí prakticky vše, co bylo uvedeno u předešlých pyrometrů. [3] [11]

Poměrové pyrometry

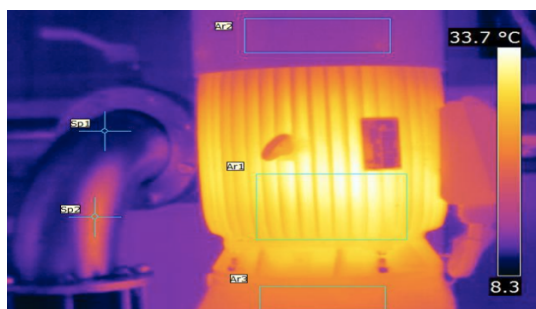
Povrchová teplota objektu je vyhodnocována na základě poměru intenzity tepelného záření na dvou různých vlnových délkách. [3] [11]



Obr. 4.7 Pyrometr měřící obdélníkovou oblast při slévání (27)

4.4.3 Termovize

Termokamera je přístroj, který určuje a zobrazuje rozložení teploty na celých plochách strojů a elektrických zařízení v termogramu (obr. 4.8), a to vcelku rychle a přesně. Nelze ovšem měřit termokamerou vnitřní teplotu objektu ani teplotu v pozadí. Podrobněji se o termografii, což je analýza rozložení teplotního pole na povrchu tělesa, pojednává v následující kapitole.



Obr. 4.8 Termogram – rozložení teploty na povrchu motoru (u bodu Sp2 lze vidět odražené záření z motoru) (12)

5 TERMOGRAFIE

Měření rozložení teplot na povrchu těles a následně jejich analýzy jsou hlavními faktory podílejícími se na infračervené termografii. Infračervená termografie se skládá z aktivních a pasivních postupů. V prvním jmenovaném případě testovaný objekt uvolňuje teplo v průběhu výrobního procesu. Pozorováním a analýzou ochlazování daného objektu je možné odhalit vadné oblasti, které jsou detekovatelné v důsledku přítomnosti tepelných anomálií. Příkladem aplikace pasivní termografie může být její použití v průmyslových přístrojích, které obsahují svařované kovové spoje. Aktivní termografií se rozumí přívod tepla z externího zdroje na zkoumaný objekt. Přítomnost významného rozdílu teplot pomůže lokalizovat případné podpovrchové anomálie. [5]

Infračervená termografie se může používat na různá následující zaměření:

- **Prediktivní údržba a diagnostika**
Dá se říci, že tato oblast má největší využití infračervených termografických systémů. Zaměřuje se především na diagnostiku strojů, rozvodů elektrické energie a stavebnictví. Převážně se jedná o pasivní, kvantitativní termografii.
Jako návod na použití infračervené termografie slouží norma ČSN ISO 18434-1 – Monitorování stavu a diagnostika objektů – Termografie – Část 1: Všeobecné postupy. Je to součást programu pro monitorování strojů a jejich diagnostiku.
- **Infračervené nedestruktivní testování**
Patří mezi základní principy nedestruktivního testování. Zde se naopak nejvíce používá aktivní termografie.
- **Výzkum a vývoj**
Ubírá se například následujícími směry: infračervená mikroskopie, lékařská termografie, rychlé změny teplotních polí atd.
- **Automatizace a požární bezpečnost**
- **Zobrazování plynů** [15]

5.1 Pasivní termografie

Zobrazují se teplotní pole elektrických či mechanických objektů, přičemž jejich činnost vychází z vývinu nebo absorpce tepla během jejich normálního provozu. Pomocí termogramu se zjišťuje opotřebení mechanických prvků, např. převodovky nebo ložiska, vlivem tření. U elektrických zařízení lze určit nechtěný ohřev ztrátovým výkonem způsobeným elektrickým proudem, např. na vinutích elektromotorů aj.

Pasivní termografie se používá k monitorování objektů v rámci preventivní údržby. Hodnotí se především teplotní gradient v určitých místech na povrchu objektu mezi teplotami zjištěnými a teplotami tzv. referenčními (přípustnými).

Výhodou metody je její nedestrukčnost, nemá jakýkoliv vliv na testovaný objekt.

Nevýhoda spočívá v chybném vyhodnocení termogramu vlivem artefaktů, pocházejících od okolního prostředí, turbulencí vzduchu, nehomogennou emisivit atd. [15] [30]

5.2 Aktivní termografie

Je založena na řízené stimulaci tzv. tepelné vlny v objektu a následném monitorování rozložení teploty termovizí na povrchu tělesa a analýzou signálu. Defekty uvnitř podpovrchové vrstvy objektu se projevují odlišnostmi v rozložení povrchové teploty. Zdroj tepla je umístěn externě. Standardně se dělí na:

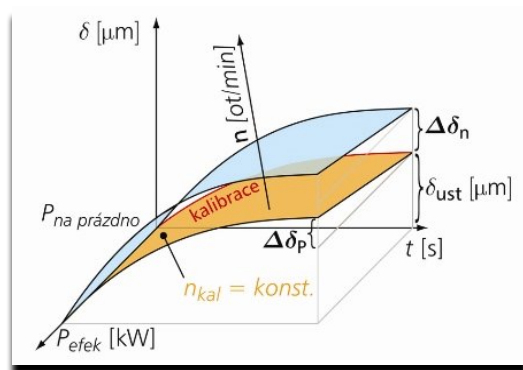
- Pulzní termografii
- Lock-in termografii

Pulzní termografie – princip je založen na rychlém (pulzním) vnějším nebo vnitřním ohřevu objektu a jeho následném sledování termokamerou a posléze vyhodnocením teplotního pole na povrchu tělesa. [15] [30]

Lock-in termografie – neboli také tzv. metoda periodického buzení. Její podstata spočívá v modulaci řízeného tepelného toku, který dopadá na diagnostikovaný objekt. Teplená vlna pronikne dovnitř tělesa a v místě změny prostředí (anomálie) ve struktuře materiálu objektu se dorazí zpět k povrchu. [15] [30]

5.3 Důvody teplotních deformací u výrobních strojů

Polohová neurčitost u obráběcích strojů silně ovlivňuje rozměrovou přesnost vyráběných produktů. Mezi typické zdroje těchto nepřesností se řadí kinematické chyby, dynamické síly, zatížení, software pro řízení a také termomechanické chyby (obr. 5.1), na které se tato podkapitola zaměřuje. Ty jsou způsobeny například okolním prostředím nebo vnitřními zdroji tepla. [19]



Obr. 5.1 Schématické znázornění vlivu na velikost teplotní chyby v místě nástroje v závislosti na otáčkách, čase a zatížení pracovního vřetena (26)

V současné době se mezi nejkritičtější vlastnosti obráběcích strojů řadí tzv. teplotní chování stroje. Ze všech zdrojů nepřesností se teplotní chyby podílí na celkové výrobní odchylce ze 40 % až 70 %. Na jejich zvýšeném výskytu se podílí více faktorů. Příčinou je

například neustálé zvětšování řezných a posuvných rychlostí a zvyšování otáček vřeten, což vede k nárůstu teplených zdrojů, kvůli kterým následně dochází i k větší teplotní deformaci na špičce nástroje (teplotní chyby). Díky výraznému zlepšení na poli statického a dynamického chování obráběcích strojů v posledních letech, ještě více vzrostl dopad teplotního chování stroje na výslednou výrobní přesnost. To vedlo k zvýšenému zájmu o teplotní účinky na obráběcí stroje a také vydání normy ISO 230-3 (2007). Ta obsahuje specifikaci na zkušební postupy pro určení teplených vlivů, které jsou způsobeny různými teplenými zdroji a podílejí se na deformaci a nepřesnosti obráběcího stroje. [19] [26]

Z výše uvedených důvodů se již při konstruování výrobního stroje dbá na minimalizaci jeho teplotních deformací. Snahou je navrhnout teplotně symetrickou konstrukci, vhodně umisťovat a současně izolovat zdroje tepla a používat materiály s nízkou tepelnou vodivostí a roztažností (např. přírodní žula). Kromě konstrukčních vlastností je třeba počítat také se zajištěním správných podmínek ve výrobní hale, která by měla být klimatizovaná. Pokud to není možné, je zapotřebí alespoň základní zásady provozu stroje ve výrobní hale, jako snižování výkyvu teplot v okolí stroje, odclonění slunečního záření a minimalizace proudění vzduchu. [19] [26]

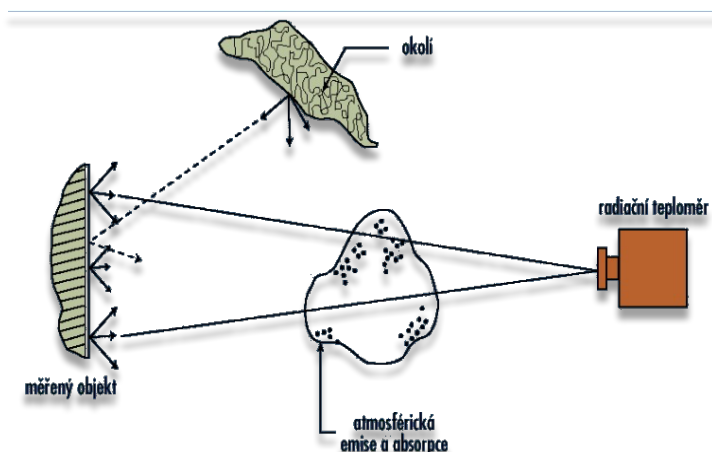
5.4 Techniky měření teploty termokamerou

Termokamera měří infračervené záření, které vychází z povrchu každého objektu. Zobrazuje teplotu objektu na základě výpočtu, který vychází ze závislosti záření na povrchové teplotě tělesa.

Důležitým poznatkem však je, že záření detekované kamerou, nezávisí pouze na samotné teplotě, ale i na dalších aspektech, které je potřeba brát v potaz a správně zadávat do termokamery, jinak dochází ke zkresleným výsledkům a chybným konečným teplotám.

Jedná se především o tyto parametry (obr. 5.2):

- Emisivita
- Zdánlivá odražená teplota
- Vliv atmosféry [12] [13] [31]



Obr. 5.2 Parametry ovlivňující bezkontaktní měření (31)

5.4.1 Emisivita

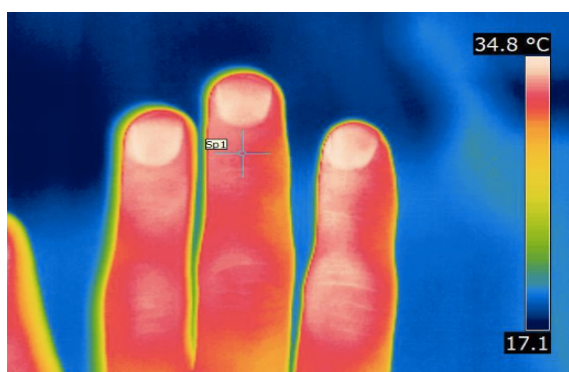
Jedná se o nejproblematictější zdroj chyby, která může být o velikosti desítek a více procent. Tudiž její špatné nastavení má zásadní vliv na přesnost měření (dle obrázku 5.3 a) a 5.3 b).

Emisivita objektu záleží na materiálu a také na jeho povrchové úpravě, mění se na základě struktury, znečištění. Velkou roli hraje, zda je povrch lesklý, hladký či matný hrubozrný, to vše má na ni velký vliv. Proto jsou tabulkové hodnoty emisivit materiálů čistě orientační záležitostí, neboť stačí povrch tělesa jinak upravit a emisivita se rázem změní (názorně na obr. 5.4). U některých typů materiálu záleží také na teplotě tělesa. Emisivita se pohybuje v rozmezí 0–1, kdy 1 má jen absolutně černé těleso, z toho vyplývá že emisivita materiálů je odlišná od 1. Nekovové materiály mají obvykle emisivitu vysokou ($\epsilon \approx 0,8–0,95$), teplotně nezávislou, naopak kovy, zejména ty s hladkým povrchem, mají obvykle nízkou, teplotně závislou emisivitu. [12] [13] [31]

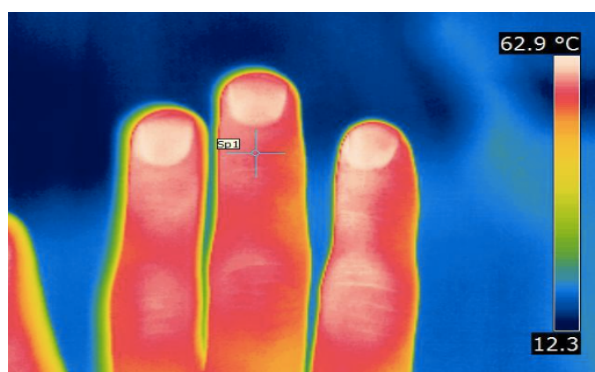
Dále je zapotřebí si při měření uvědomit, že čím je větší rozdíl teploty měřeného objektu a jeho okolí a čím menší jeho emisivita je, tím větší vznikne chyba měření, přičemž při špatně nastavené emisivitě se chyba ještě znásobí. [13]

Pokud je teplota objektu, který měříme, větší než teplota okolních objektů/okolí, způsobí to následující jevy:

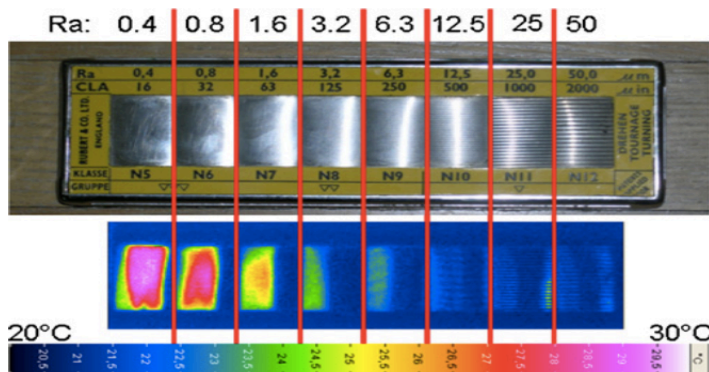
- Když je emisivita nastavena *větší* než ve skutečnosti, hodnota teploty objektu je ve výsledku *menší* (kamera 2 na obrázku 5.5)
- Když je emisivita nastavena naopak *menší* než ve skutečnosti, hodnota teploty objektu je *větší* (kamera 1 na obrázku 5.5) [13]



Obr. 5.3 a) Emisivita nastavena na $\epsilon = 0,95$, teplota na povrchu prstů v průměru 34,8°C, což se při započítání chyby ± 2 °C, kterou má běžná termokamera, blíží k teplotě lidského těla (12)



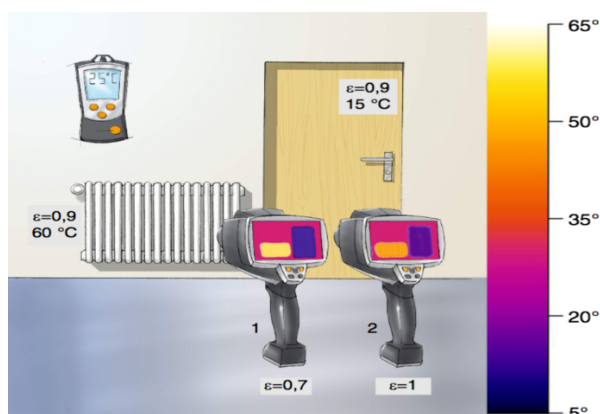
Obr. 5.3 b) Emisivita nastavena $\epsilon = 0,30$, teplota na povrchu prstů v průměru 62,9 °C, což je zjevně chybná a nepřijatelná hodnota, tudíž emisivita byla zadána chybně (12)



Obr. 5.4 Vliv drsnosti povrchu na vnímání teploty termokamerou při stejné nastavené emisivitě (19)

Pokud je teplota objektu, který měříme, menší než teplota okolních objektů/okolí, způsobí to tyto následující jevy:

- Když je emisivita nastavena *větší* než ve skutečnosti, hodnota teploty objektu je ve výsledku *větší* (kamera 2 na obrázku 5.5)
- Když je emisivita nastavena naopak *menší* než ve skutečnosti, hodnota teploty objektu je *menší* (kamera 1 na obrázku 5.5) [31]



Obr. 5.5 Ukázka chybně zvolených emisivit a jejich vliv na výslednou teplotu objektu naměřenou termokamerou (31)

Jak bylo napsáno výše, hodnoty emisivit v tabulkách jsou jen jakýmsi ukazatelem. Na určení její přesné hodnoty, která se zadává do termokamery nebo pyrometru, se u určitého tělesa využívá následujících dvou postupů:

- **Srovnávací metoda s referenčním (kontaktním) snímačem**
 Referenčním snímačem se zjistí teplota měřeného objektu. Poté se zjistí odražené záření (dle postupu, který bude zmíněn posléze), zadá se do termokamery, kterou namíříme na měřený objekt a začne se v ní měnit hodnota emisivity (jako výchozí zdroj zadávání hodnot se mohou použít tabulky emisivity základních materiálů), dokud se nám teplota v uvedená v termokameře neshoduje s teplotou z referenčního teploměru. V tu chvíli uvedená emisivita je emisivita povrchu měřeného objektu. [12] [13] [31]

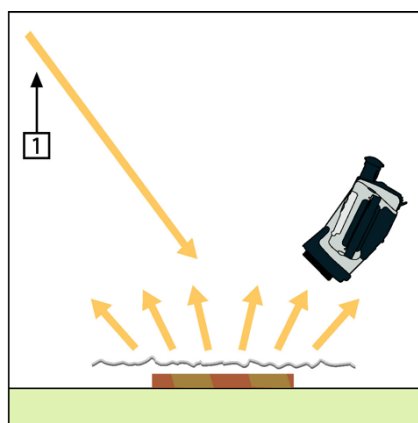
- **Srovnávací metoda pomocí termokamery**

Na povrch tělesa se nalepí páska (případně nanese barva) se známou emisivitou, ta se nastaví v termokameře a změří se teplota pásky, která je na povrchu tělesa. Tato teplota slouží jako referenční. Poté se kamera zaměří na povrch objektu bez pásky a opět se mění emisivita tak dlouho, dokud se teplota nebude shodovat s tou referenční. V tu chvíli uvedená emisivita je emisivita povrchu měřeného objektu. [12] [13] [31]

5.4.2 Odražená zdánlivá teplota

V případě, že jsou odstraněny všechny možné zdroje rušení, které by mohly ovlivňovat měření, je teplota odraženého záření stejná jako teplota okolí. V případě, že je přítomno další těleso, z něhož vychází IČ záření do okolí měřeného objektu, je potřebné tuto zdánlivou teplotu zjistit (obr. 5.6).

Měří se pomocí tzv. Lambertova zářiče (nejčastěji se jedná o hliníkovou fólii). Fólie se nejprve zmačká, potom znovu roztáhne a položí se do blízkosti měřeného objektu. Poté se změří jeho teplota při emisivitě nastavené na 1. Kamera zachytí a vypočítá pouze to záření, které dopadá přímo do ní. Změřená teplota se rovná zdánlivé odražené teplotě, kterou zadáme jako kompenzaci záření odraženého objektem. [12] [13] [31]



Obr. 5.6 Měření zdánlivé odražené teploty pomocí hliníkové fólie (13)

5.4.3 Vliv atmosféry

Přenos v atmosféře je ovlivněn množstvím molekul vody a oxidu uhličitého, jedná se o to, že pohlcují infračervené záření, a to v různých vlnových délkách. Oproti předešlým dvěma chybám se dá vliv atmosféry často úplně zanedbat, její nejistota není tak velká.

Když se mluví o vlivu atmosféry, jedná se především o:

- Relativní vlhkost
- Atmosférická teplota
- Vzdálenost

Jedná se o vzdálenost mezi měřeným objektem a objektivem kamery, je zadávána z důvodu, že záření měřeného objektu je pohlcováno atmosférou. Hodnota vzdálenosti toto kompenzuje. [12] [13] [31]

5.4.4 Příčiny chyb při radiační záření

Jak již bylo řečeno, největší chyba měření nasane při špatně zadané emisivitě, poté při špatně či vůbec nevykompenzované odražené zdánlivé teplotě, nebo vlivem atmosféry.

Jsou ale i další zdroje chyb:

- Neostrý termogram (je zapotřebí snímek zaostřit už na začátku měření, zpětně nelze obraz zaostřit)
- Malá či naopak velká vzdálenost od měřeného objektu (vždy je snaha volit co nejmenší možnou vzdálenost)
- Rušení v přenosové cestě (např. znečištěným vzduchem)
- Špatné vyhodnocení teplotních snímků vlivem reflexe (odražené teploty záření)
- Rychlá změna teploty (hrozí například orosení objektivu)
- Špatné vyhodnocení snímku kvůli neznalosti struktury měřeného objektu [12] [13] [31]

6 PRAKTICKÁ MĚŘENÍ

Součástí této bakalářské práce jsou i dvě jednoduchá a názorná měření, jejichž úkolem bylo prakticky si vyzkoušet a ukázat aplikaci výše uvedených principů a fyzikálních zákonů v praxi. První měření (Experiment č.1) se odehrávalo v Intemac Solutions, s.r.o., výzkumném a inovativním centru v Kuřimi, a druhé měření (Experiment č.2) se uskutečnilo ve zkušební laboratoři VUT na Fakultě strojního inženýrství.

6.1 Zadání úkolů

Ideí k uskutečnění těchto měření byl fakt, že od dob, kdy se začaly vyrábět a provozovat výrobní stroje, se také objevuje snaha dosahovat co nejpřesnějších výsledků. Teplota je jeden z hlavních činitelů, které tuto přesnost stroje ovlivňují (podrobněji v kapitole č.5). Standardně se teplota u výrobních strojů určuje pomocí kontaktních snímačů, např. odporových čidel či termočlánku. Tyto snímače poskytují vcelku uspokojivé a přesné výsledky. Jejich nevýhoda spočívá v časové náročnosti přípravy k samotnému měření. Je potřebné čidla nainstalovat na různá místa, ty předtím očistit, někdy je zapotřebí některé části stroje rozdělat, aby se tam čidlo mohlo umístit. Kdyby bylo možné na tato měření použít termokameru, jejíž výsledky by byly obdobně interpretovatelné, všechny tyto problémy by byly vyřešeny. Otázkou však zůstává, zda výsledky z bezkontaktního měření jsou natolik přesné, aby mohly být použity k vyhodnocení teplotního zatížení stroje.

Úkolem těchto experimentů je naučit se pracovat s termokamerou a vyhodnocovat teplotu termogramů pomocí programu Flir tools a především porovnat výsledky získané z kontaktního a bezkontaktního měření.

6.2 Použitá měřicí zařízení a pomůcky

- Termokamera FLIR T440

Jedná se o průmyslovou termokameru vyšší střední třídy, která je určena především pro technickou diagnostiku (výrobních strojů, elektrických rozvaděčů, motorů, aj.). Patří do řady přístrojů s vysokou teplotní citlivostí. [28]

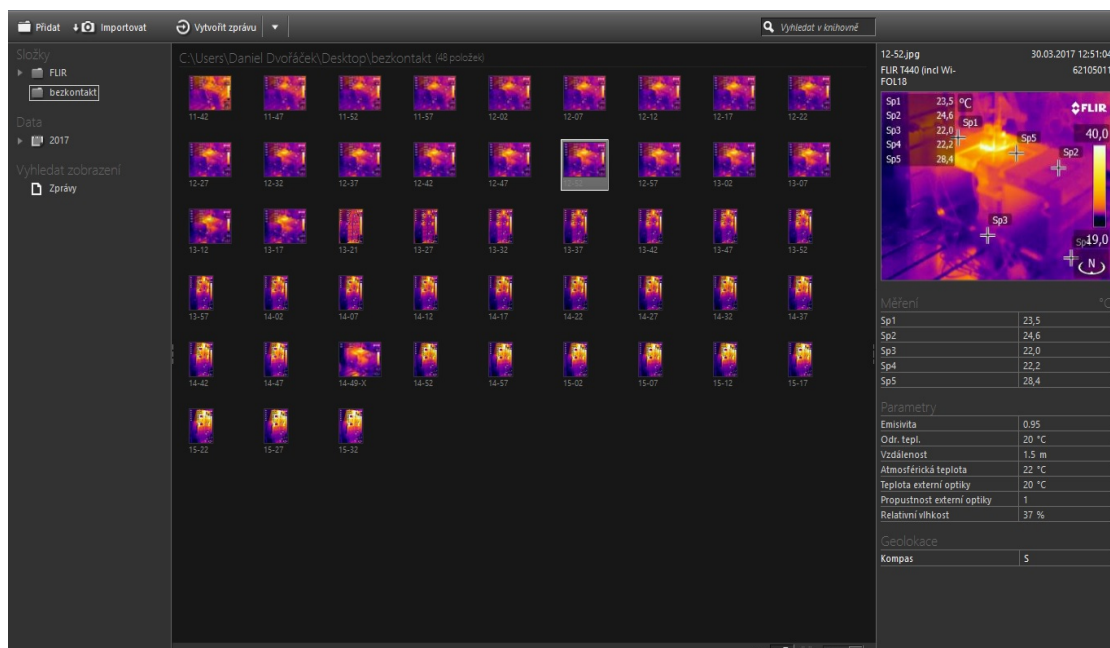


Obr. 6.1 Průmyslová termokamera FLIR T440 (28)

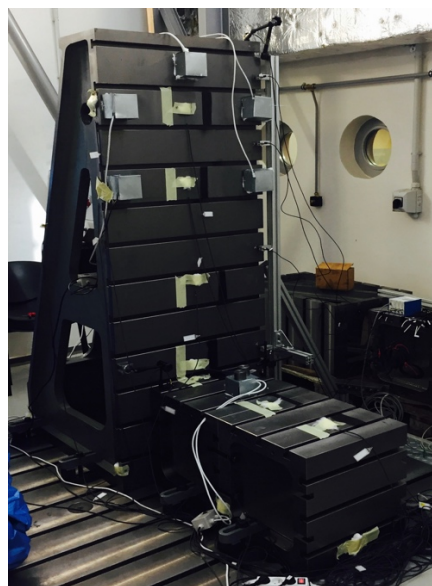
Tab. 6.1 Technické parametry termokamery [28]

Model	FLIR T440
Rozlišení senzoru	320 x 240 megapixelů
Teplotní citlivost	0,040 °C při teplotě objektu 30°C
Teplotní rozsah	-20°C až + 120°C 0°C až + 650°C +250°C až +1200°C
Přesnost měření	±2°C nebo ±2%, platí ta hodnota s vyšší chybou

- Rezistory (4 x 150 W, 2 x 300 W)
- Rám (Obr. 6.1)
- Kontaktní odporové snímače (označení Pt1000, udávaná chyba výrobcem ±0,1°C)
- Stativ pro termokameru (značky Manfrotto) (Obr. 6.3)
- Teplovodivá pasta DOW CORNING DC340
- Páska se známou emisivitou, $\varepsilon = 0,96$
- Sprej se známou emisivitou, $\varepsilon = 0,96$
- Líh na odmaštění rámu
- Digitální vlhkoměr
- Datalogger
- Počítač
- Program FLIR Tools (Obr. 6.2)



Obr. 6.2 Prostředí programu FLIR Tools



Obr. 6.3 Zkušební pracoviště – rám



Obr. 6.4 Stativ s termokamerou

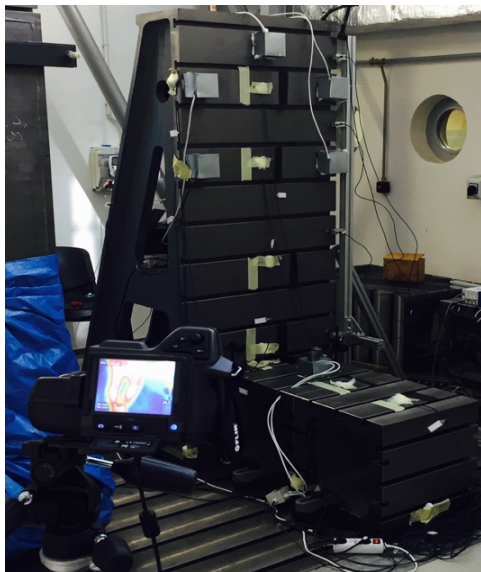
6.3 Experiment č.1

U tohoto experimentu byl teplotně zatěžován litinový rám na zkušebním pracovišti. Nejprve bylo nutné rám očistit lihem, aby na něj bylo možné nainstalovat tepelné rezistory. Při jejich upevňování na rám bylo nutné na ně nanést teplovodivou pastu, aby docházelo k lepšímu přenosu tepla. Následně se rezistor od okolí izoloval hliníkovým krytem, který byl zevnitř vystlán vatou.

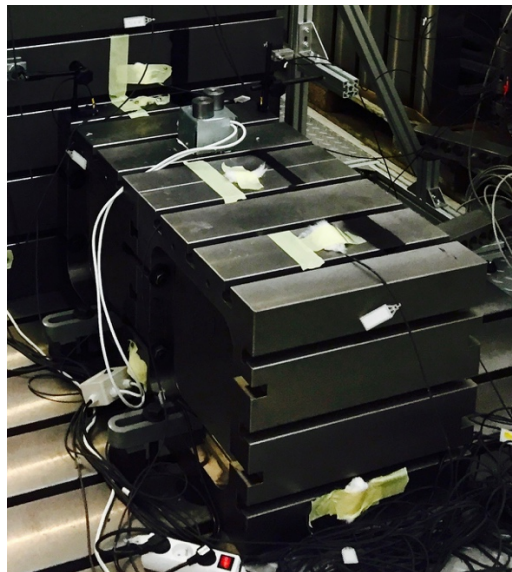
Následovalo připevnění kontaktních odporových snímačů dle schématu na obr. 6.6. Ty byly před upevněním natřeny teplovodivou pastou a poté zapojeny do dataloggeru. Ten byl propojen s počítačem. Z důvodu větší přesnosti měření bylo zapotřebí snímače odizolovat vatou, aby např. průvan vzduchu nemohl ovlivnit a zkreslit výsledky. Vedle snímačů byly umístěny referenční materiály se známou emisivitou. Zprava se jednalo o žlutou pásku a zleva o černý sprej, oba o shodné emisivitě 0,96.

Termokamera byla umístěna do vzdálenosti dvou metrů od rámu a nastavena tak, aby nejprve zabírala spodní díl rámu (obr. 6.5 a) a později zabírala horní část rámu.

Jelikož v této bakalářské práci jde o ukázkou aplikace termografie v praxi, dále se bude pracovat jen s daty ze spodní části rámu (Obr. 6.5 b).

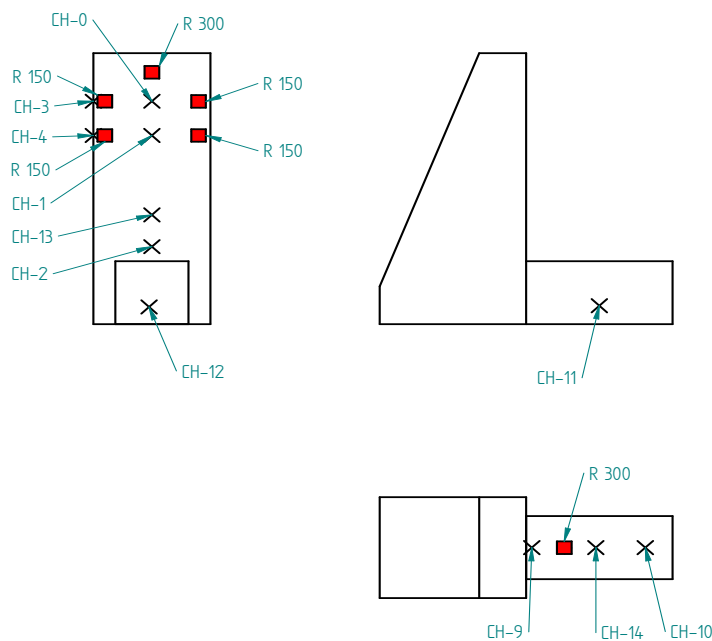


Obr. 6.5 a) Rám – jeho postavení oproti termokameře



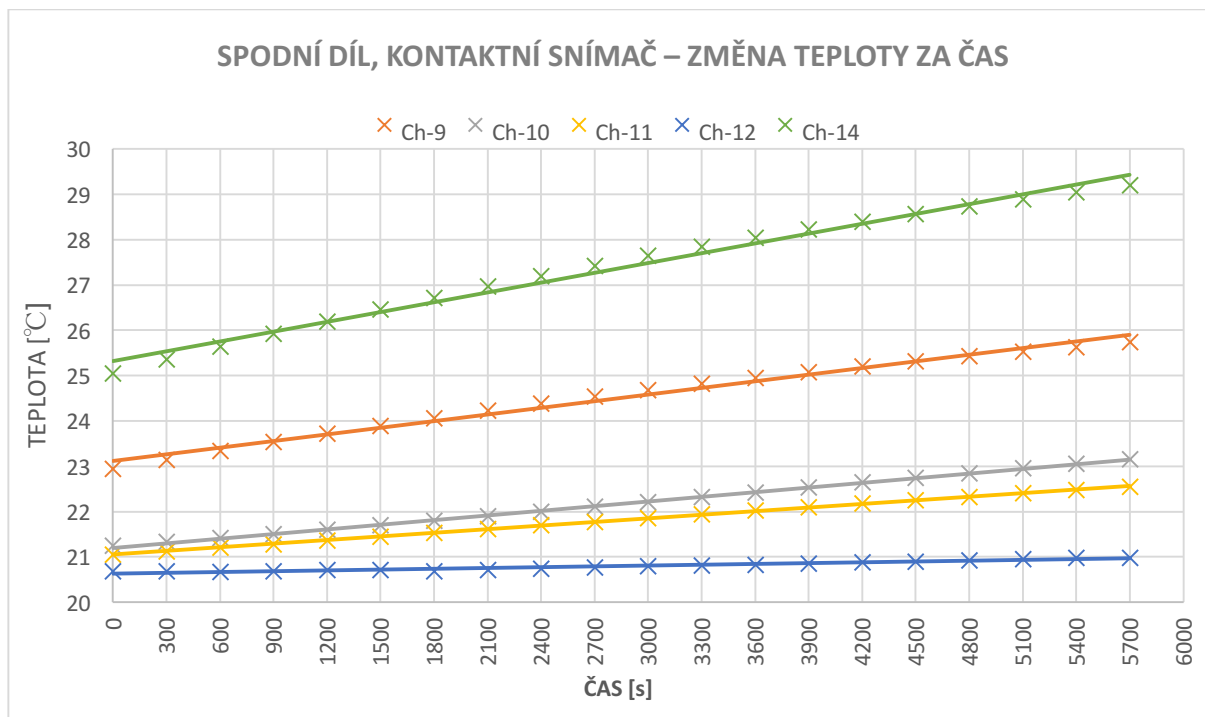
Obr. 6.5 b) Rám – detail na spodní díl a rozložení kontaktních snímačů na něm, kolem snímačů je vždy na jedné straně páska a na druhé sprej, oba se známou emisivitou

Po uvedení rezistorů do provozu, byly pořizovány snímky z termokamery každých 5 minut a data ze snímačů byla zaznamenávána každých 10 sekund.



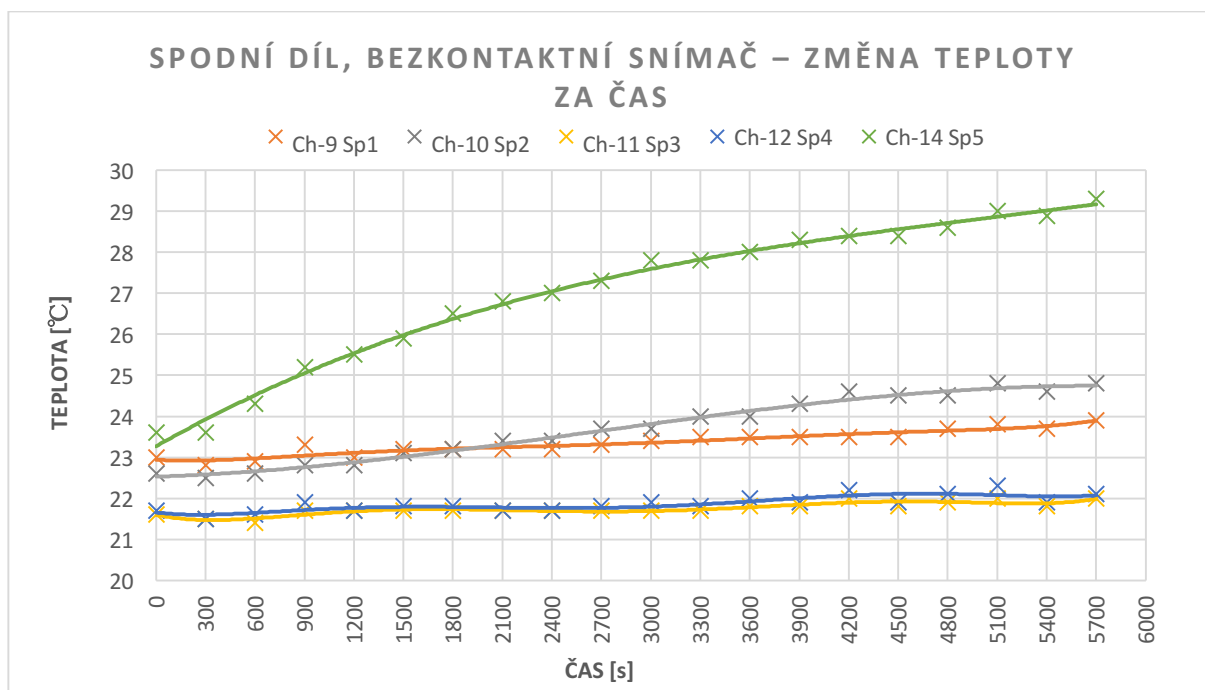
Obr. 6.6 Schéma umístění kontaktních čidel a rezistorů o příkonu 150 W a 300 W na rámu

V následujícím vyhodnocení výsledků jsou vybrány hodnoty naměřené každých 300 sekund. Jak lze vysledovat z grafu 6.1, hodnoty od kontaktního snímače rostly více méně lineárně.



Graf 6.1 Kontaktní snímač, spodní díl rámu – změna teploty za čas

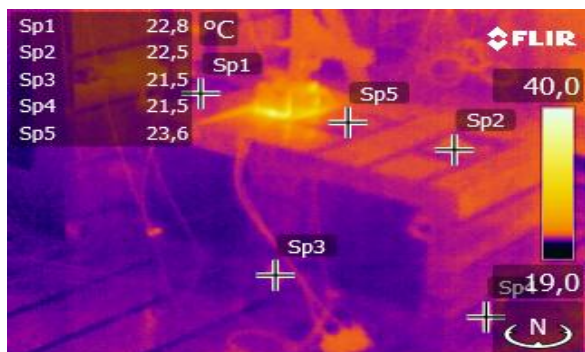
Dle grafu 6.2 je zřejmé, že u termokamery není taková pravidelnost jako u kontaktního snímače, ale přesto lze tvrdit, že trend závislosti stoupání teploty v čase je podobný.



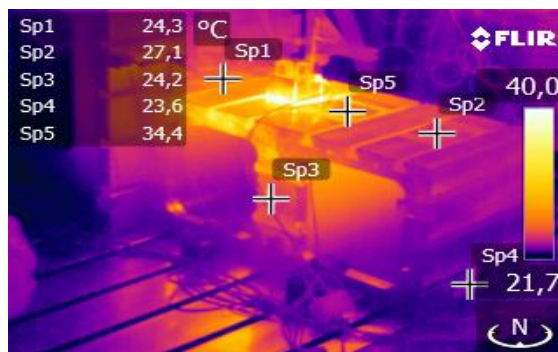
Graf 6.2 Termokamera, spodní díl rámu – změna teploty za čas

Pro lepší názornost přesnosti měření kontaktního a bezkontaktního snímače byl vybrán jen jeden snímač, v tomto případě CH – 14, ze spodního dílu rámu, a podrobněji zpracován.

V tabulce 6.2 jsou zapsány přesné teploty každých 300 sekund. Z toho byl vypočítán průměrný rozdíl hodnot mezi kontaktním a bezkontaktním měřením, který vyšel 1,4 %.



Obr. 6.7 a) Rozložení teploty u spodního dílu na začátku měření



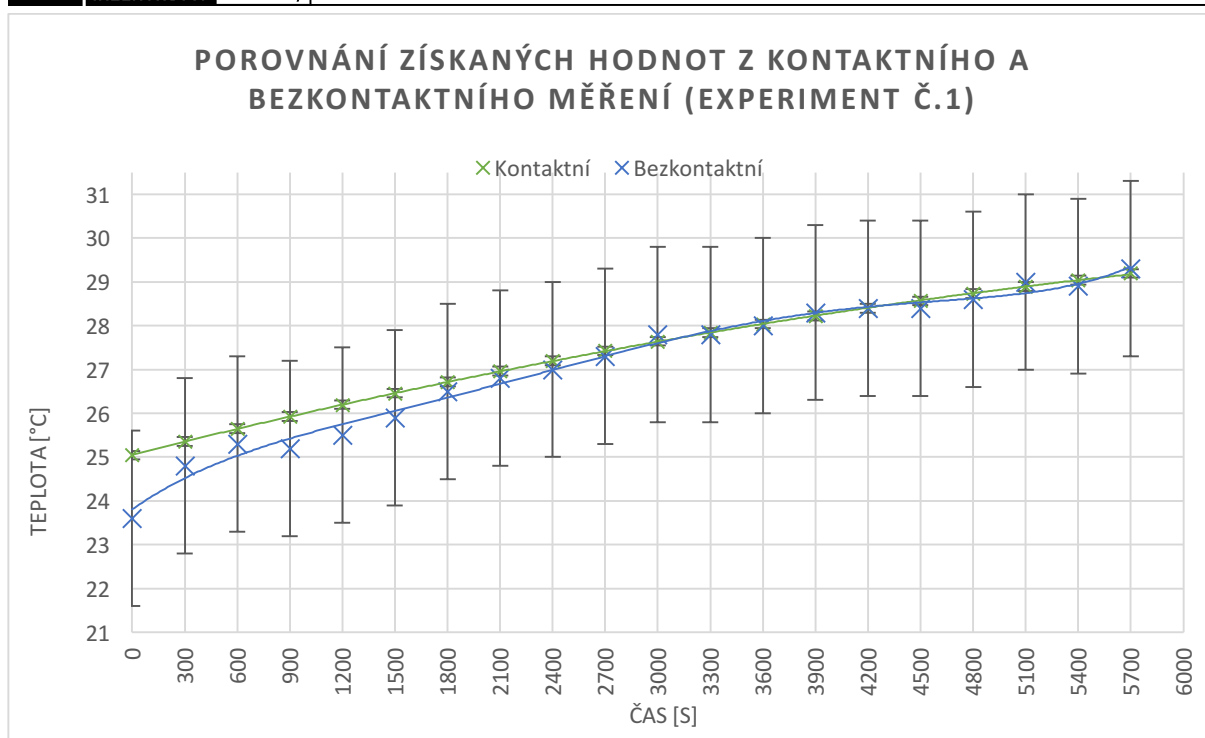
Obr. 6.7 b) Rozložení teploty u spodního dílu na konci měření

Tab. 6.2 Hodnoty teploty měřené každých 300 s, na snímači (CH – 14), z termokamery (bod Sp5) a jejich srovnání a procentuální rozdíl (chyba)

Čas [s]	CH – 14 [°C]	Sp5 [°C]	Chyba [%]	Čas [s]	CH – 14 [°C]	Sp5 [°C]	Chyba [%]
0	25,0	23,6	5,8	3000	27,6	27,8	0,6
300	25,4	24,8	2,2	3300	27,8	27,8	0,1
600	25,7	25,3	5,3	3600	28,0	28,0	0,1
900	25,9	25,2	2,8	3900	28,2	28,3	0,3
1200	26,2	25,5	2,7	4200	28,4	28,4	0,0
1500	26,5	25,9	2,1	4500	28,6	28,4	0,6
1800	26,7	26,5	0,8	4800	28,7	28,6	0,5
2100	27,0	26,8	0,6	5100	28,9	29,0	0,4
2400	27,2	27,0	0,7	5400	29,0	28,9	0,5
2700	27,4	27,3	0,5	5700	29,2	29,3	0,4
PRŮMĚRNÁ CHYBA [%]				1,4			

Při jejich grafickém srovnání v grafu 6.3 a nastavení chybových úseček, kdy u termokamery byla nastavena dle specifikace od výrobce přesnost měření $\pm 2^{\circ}\text{C}$ a u kontaktního snímače $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ lze vidět, že výsledky jsou obdobně interpretovatelné.

Z porovnání naměřených hodnot v tabulce a z grafického vyjádření lze usoudit, že použití kontaktního snímače nebo termokamery je možné a výsledky z obou budou objektivní.

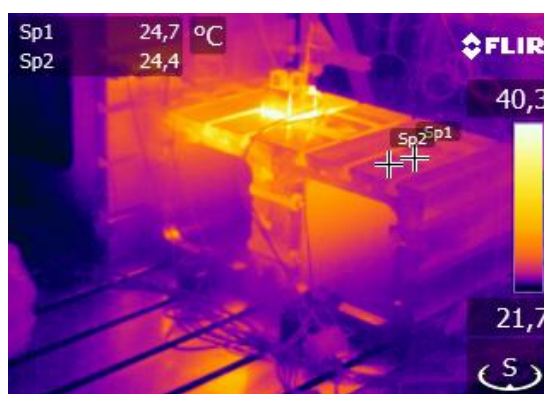


Graf 6.3 Srovnání hodnot z kontaktního snímače CH – 14 a termokamery, bod Sp2 (dle obrázku 6.7 b)

6.3.1 Stanovení emisivity povrchu rámu

Díky referenční pásce se známou emisivitou, při porovnávání teplot nebylo zapotřebí znát emisivitu rámu. V případě, že by bylo potřeba z nějakého důvodu její hodnotu znát, je možné si zjistit její tabulkovou hodnotu, ta je ovšem jen orientační a nemá přesnou vypovídající hodnotu. Při více specifickém materiálu a jeho povrchu, jako v tomto případě, kdy se jednalo o materiál EN-GJL-300 (litina s lupínkovým grafitem), je zapotřebí emisivitu určit. Zde ji bylo možné určit oběma dvěma postupy uvedenými v kapitole 6.

Porovnání termokamerou lze vidět na obr. 6.8.



Obr. 6.8 Určení emisivity rámu pomocí termokamery

V termogramu byl umístěn bod Sp1, který ležel na pásce o známé emisivitě, vedle na samotný povrch rámu byl umístěn bod Sp2. V tu chvíli byly teploty prakticky stejné, aniž by se musela nějak přenastavovat emisivita. Tudíž je zřejmé, že emisivita rámu a pásky je stejná.

Jak lze vidět v tabulce 6.3, výsledná emisivita materiálu rámu byla stanovena na 0,96. V porovnání s tabulkovou hodnotou emisivity litiny, která se běžně udává v rozmezí 0,7 – 0,95 lze usoudit, že výsledná emisivita byla stanovena správně.

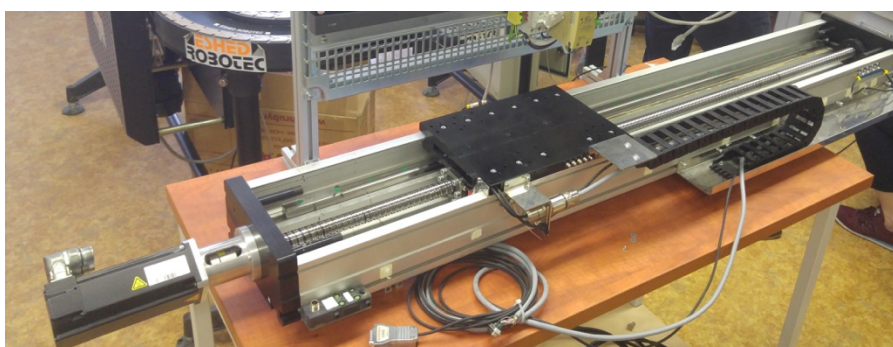
Tab. 6.3 Výsledky měření ke zjištění výsledné emisivity rámu

Referenční (kontaktní) snímač	24,7 °C
Teplota na pásce se známou emisivitou ($\epsilon = 0,96$)	24,7 °C
Teplota na samotném (očistěném) povrchu rámu s neznámou emisivitou ($\epsilon = ?$)	24,4 °C
Emisivita litiny v tabulkách	0,7 – 0,95
Výsledná emisivita materiálu rámu	0,96

6.4 Experiment č.2

U tohoto experimentu byl teplotně zatěžován kuličkový šroub (obr. 6.9), který běžně bývá u výrobních strojů.

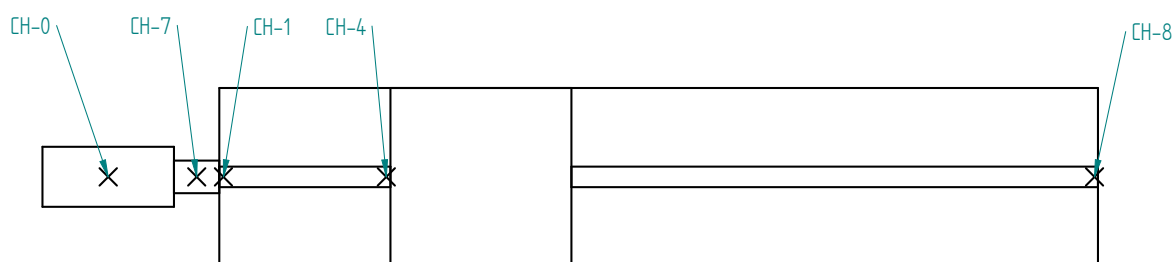
Stejně jako u experimentu č.1 byla místa kontaktu (jejich rozmístění dle schématu na obr. 6.11) s kontaktním snímačem očistěna a opět zde byly nalepeny žluté referenční pásky o známé emisivitě 0,96 (obr. 6.10) a další postup, jako napojení do počítače umístění termokamery atd. byl také obdobný.



Obr. 6.9 Model kuličkového šroubu ve výrobním stroji



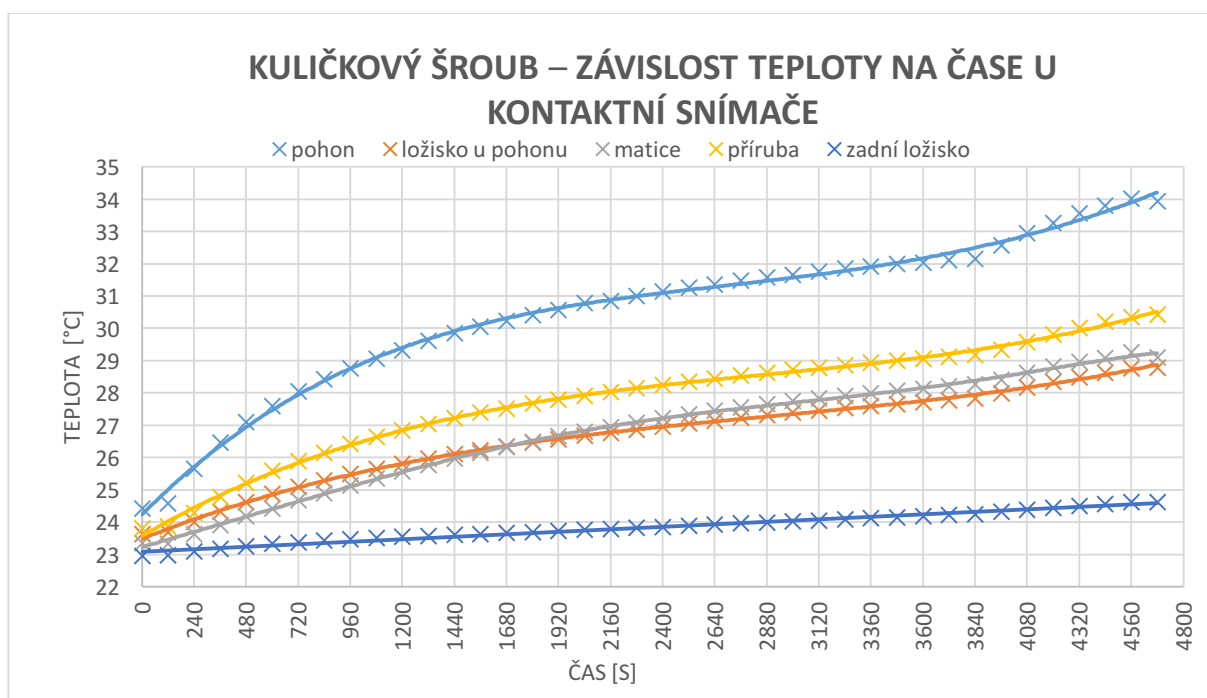
Obr. 6.10 Detail kuličkového šroubu, místa umístění čidel a referenční pásky



Obr. 6.11 Schéma umístění kontaktních čidel na kuličkovém šroubu, CH-0 – pohon, CH-7 – příruba, CH-1 – ložisko u pohonu, CH-4 – matice, CH-8 – zadní ložisko

Kuličkový šroub byl uveden do provozu v 16.17 hod., kdy zároveň začalo měření. Údaje o teplotě byly snímány kontaktním snímačem každých 10 sekund. Termogramy byly snímány přibližně každé 2 minuty. Celý proces měření trval do 17.30 hod.

V grafu 6.4 je ukázán průběh měření kontaktních snímačů každých 120 sekund. Zde lze vidět největší nárůst teploty u pohonu, který se díky přívodu elektrické energie zahřívá nejvíce.



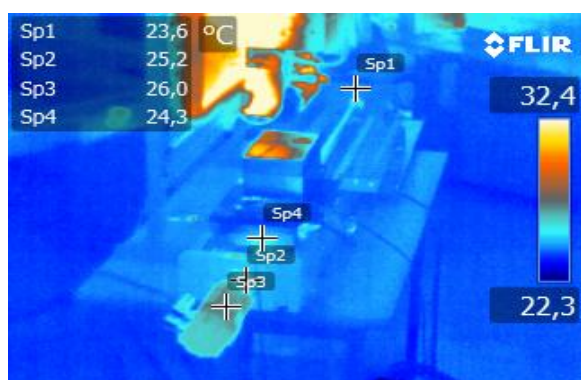
Graf 6.4 Kontaktní snímač, kuličkový šroub – změna teploty za čas

Pro lepší názornost přesnosti měření kontaktního a bezkontaktního snímače bylo opět vybrán jen jeden snímač, v tomto případě CH – 0, umístěný na pohonu, a podrobněji zpracováno.

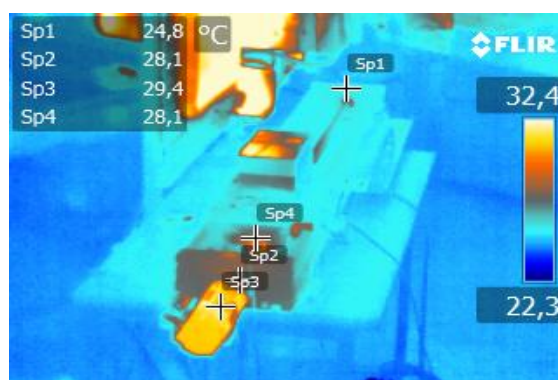
Tab. 6.4 Hodnoty teploty měřené každých 120 s, na snímači (CH – 0), z termokamery (bod Sp3) a jejich srovnání a procentuální rozdíl (chyba)

Čas [s]	CH – 0 [°C]	Sp3 [°C]	Chy- ba [%]	Čas [s]	CH – 0 [°C]	Sp3 [°C]	Chy- ba [%]	Čas [s]	CH – 0 [°C]	Sp3 [°C]	Chy- ba [%]
0	24,4	23,6	3,3	1440	29,9	29,0	3,0	2880	31,5	31,2	1,0
120	24,6	26,0	5,4	1560	30,0	29,1	3,0	3000	31,6	31,7	0,3
240	25,6	26,7	4,1	1680	30,2	29,4	2,6	3120	31,7	31,8	0,3
360	26,5	27,2	2,6	1800	30,4	29,4	3,3	3240	31,8	31,3	1,6
480	27,1	27,8	2,5	1920	30,6	29,4	3,9	3360	31,9	31,5	1,3
600	27,6	27,8	0,7	2040	30,8	29,9	2,9	3480	31,9	31,8	0,3
720	28,1	28,2	0,4	2160	30,9	30,3	1,9	3600	32,0	32,1	0,3
840	28,4	28,2	0,7	2280	31,0	30,3	2,3	3720	32,0	32,4	1,2
960	28,8	28,5	1,0	2400	31,1	30,4	2,3	3840	32,1	32,6	1,5
1080	29,0	28,7	1,0	2520	31,3	30,7	1,9	3960	32,2	32,8	1,8
1200	29,3	28,7	2,0	2640	31,4	30,7	2,2	4080	32,6	33,1	1,5
1320	29,6	28,8	2,7	2760	31,5	31,1	1,3	4200	32,9	33,5	1,8
PRŮMĚRNÁ CHYBA [%]								1,9			

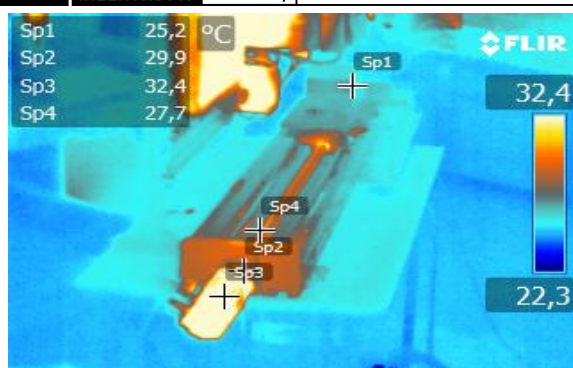
V tabulce 6.4 jsou zapsány přesné teploty každých 120 sekund. Z toho byl vypočítán průměrný rozdíl hodnot mezi kontaktním a bezkontaktním měřením, který vyšel 1,9 %.



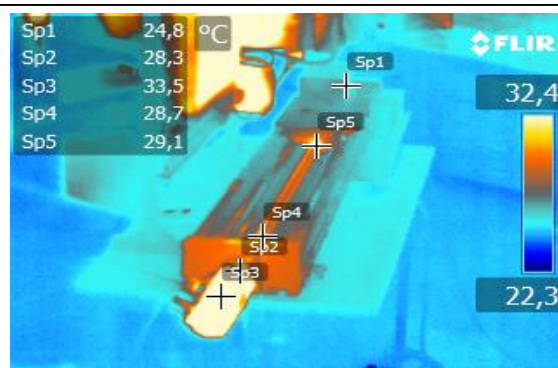
Obr. 6.12 a) Teplotní pole šroubu na začátku měření



Obr. 6.12 b) Teplotní pole kuličkového šroubu 15 minut po začátku měření



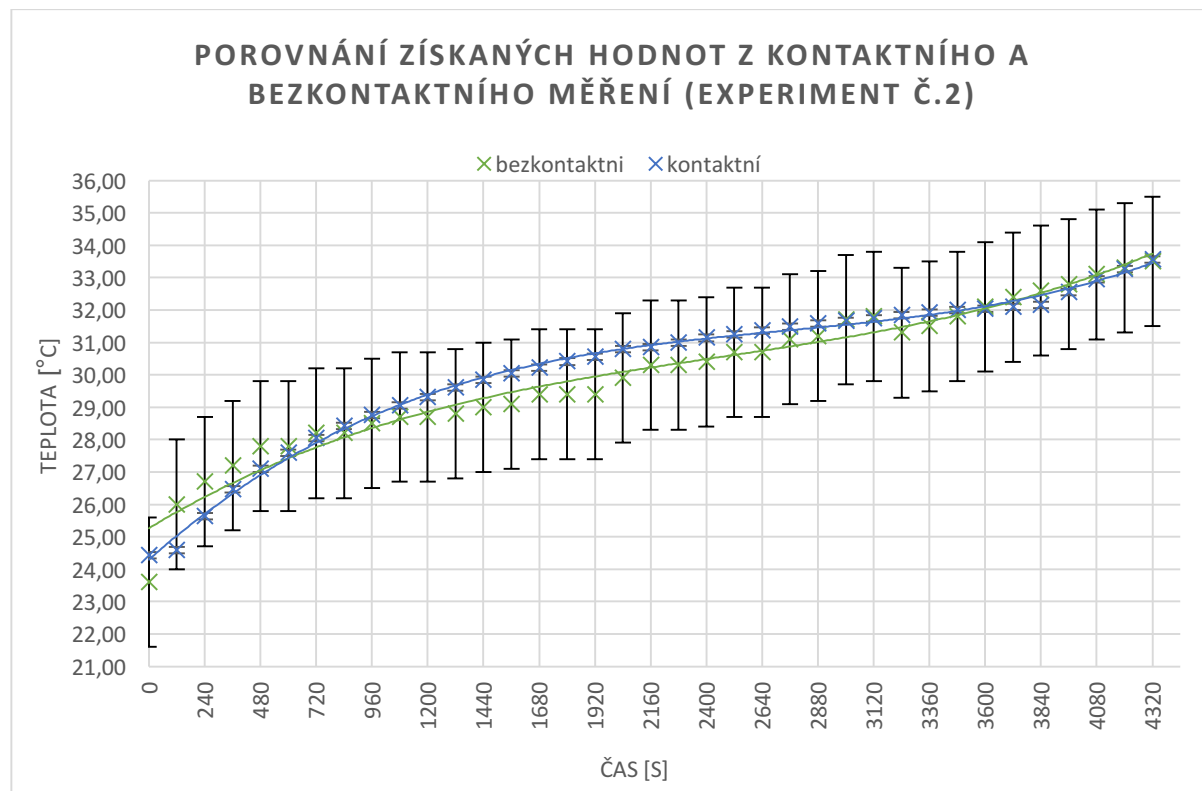
Obr. 6.13 a) Teplotní pole kuličkového šroubu 30 minut po začátku měření



Obr. 6.13 b) Teplotní pole kuličkového šroubu na konci (po 60 minutách) měření

Při jejich grafickém srovnání v grafu 6.5 a nastavení chybových úseček, kdy u termokamery byla nastavena dle specifikace od výrobce přesnost měření $\pm 2^{\circ}\text{C}$ a kontaktního snímače $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ lze vidět, že výsledky jsou obdobně interpretovatelné.

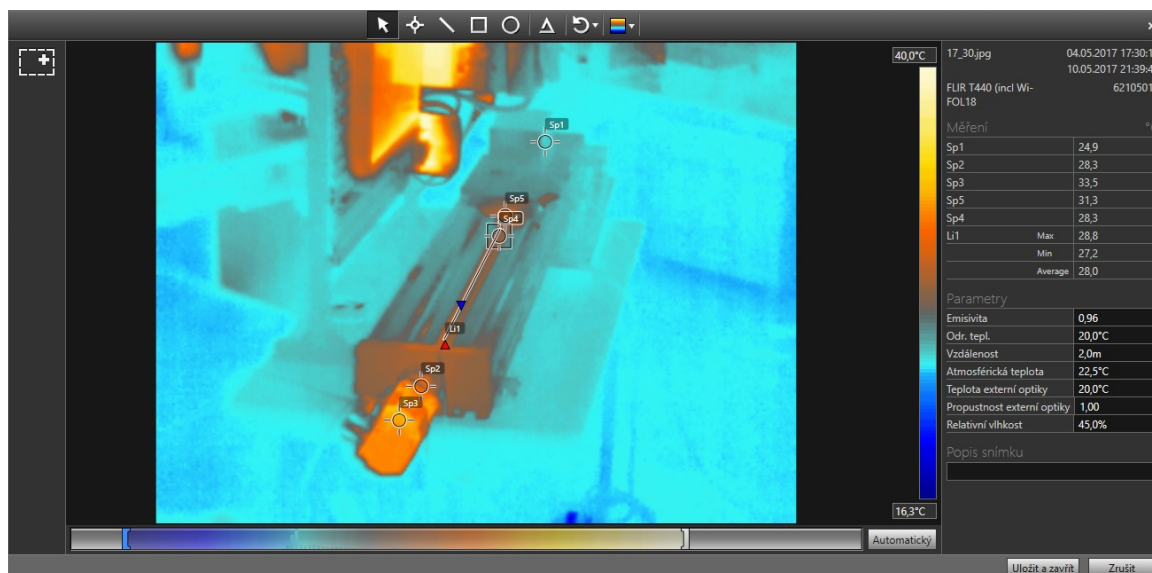
Z porovnání naměřených hodnot v tabulce a z grafického vyjádření lze usoudit, že použití kontaktního snímače nebo termokamery je opět možné a výsledky z obou byly opět objektivní.



Graf 6.5 Srovnání hodnot z kontaktního snímače CH – 0 a termokamery

6.4.1 Stanovení emisivity povrchu kuličkového šroubu

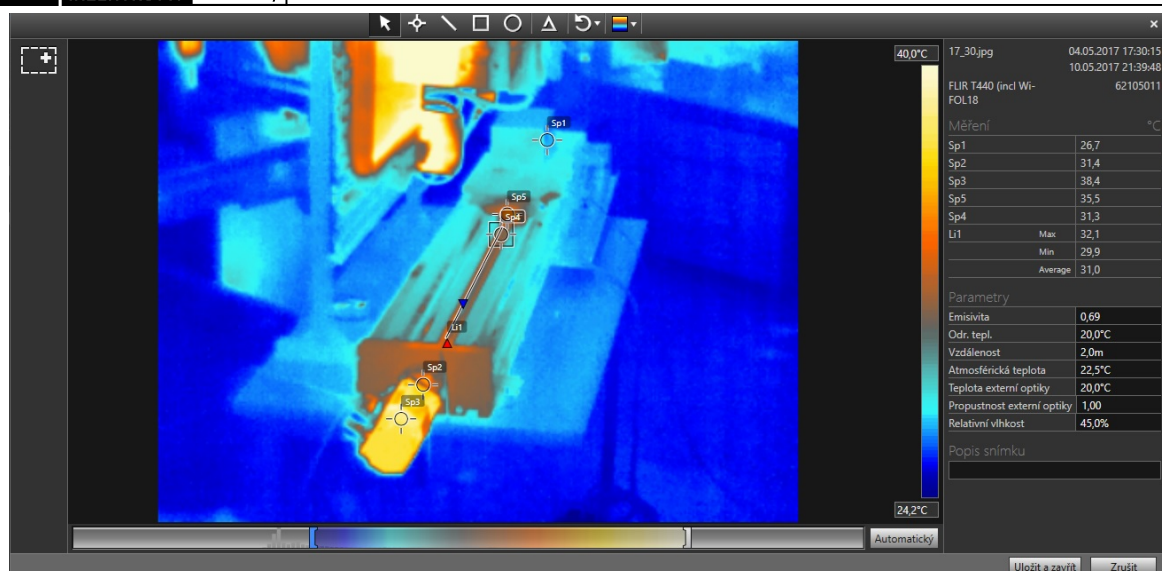
Dalším úkolem bylo určit emisivitu kuličkového šroubu, který byl z chrom-molybdenové oceli (značení: 42CrMo4) o drsnosti 0,4. V tomto případě to bylo o to složitější, že šroub byl neustále v pohybu, a tudíž nebylo možné na něm mít neustále připevněnou referenční pásku nebo kontaktní snímač.



Obr. 6.14 Zjišťování emisivity kuličkového šroubu pomocí termokamery I – zjištěná referenční teplota (bod Sp3) při emisivitě 0,96

V tomto případě se to tedy vyřešilo tak, že ihned po vypnutí pohonu, se přilepila na kuličkový šroub referenční pásky o známé emisivitě 0,96 a z termogramu, jak lze vidět na obr. 6.14, se vyčetla její teplota (bod Sp5), která byla 31,3°C. Poté se umístil bod (Sp4) přímo na povrch šroubu, kde teplota podle termogramu byla 28,3°C. To ovšem není možné, jelikož teploty v bodech Sp4 a Sp5 by měli být stejné či podobné.

Proto bylo potřeba měnit hodnoty emisivity v termogramu, lze vidět na obr. 6.15 vpravo, dokud se teplota Sp4 nerovná 31,3°C. Pro názornost byla vložena do termogramu také přímka, která ukazuje že po délce šroubu není teplota všude stejná a nejteplejší místo (32,1°C) na konci šroubu blíže k pohonu.



Obr. 6.15 Zjišťování emisivity kuličkového šroubu pomocí termokamery II – zjištění emisivity šroubu a rozložení teploty na jeho povrchu (Li1)

V tabulce 6.5 lze vidět, že výsledná emisivita šroubu byla stanovena na 0,69. Přičemž tabulková hodnota emisivity oceli je v rozmezí 0,7 – 0,9.

Tab. 6.5 Výsledky měření ke zjištění výsledné emisivity šroubu

Teplota na pásce se známou emisivitou
($\epsilon = 0,96$)

31,3 °C

Průměrná teplota na samotném
(očistěném) povrchu šroubu, s neznámou
emisivitou ($\epsilon = ?$)

28,0 °C

Průměrná teplota na samotném
(očistěném) povrchu šroubu s již
nastavenou možnou emisivitou ($\epsilon =$
0,69)

31,0 °C

Emisivita oceli v tabulkách

0,7 – 0,9

Výsledná emisivita materiálu šroubu

0,69

7 ZÁVĚR

Tato bakalářská práce se skládá ze dvou částí – teoretické, tj. rešeršní a praktické. V rešeršní části bylo cílem popsat poznatky z bezkontaktního měření teploty a následně tyto znalosti aplikovat v praktickém měření.

Na začátku práce jsou pro úplnost vysvětleny také základní pojmy týkající se teploty a jejího měření a uveden stručný přehled kontaktních snímačů. Dále jsou zde popsány fyzikální principy, potřebné k bezdotykovému měření teploty. Součástí je vysvětlení techniky měření teploty termokamerou, která se využívá v termografii. Na to navazuje praktická část, ve které byly provedeny 2 experimenty.

V experimentu č.1, který se odehrával v Intemac Solutions, s.r.o., bylo sestaveno experimentální pracoviště, které se skládalo z modelu rámu výrobního stroje. Ten byl teplotně zatížen, což mělo simulovat zahřívání rámu při reálném chodu stroje. Průběh zahřívání a změny teploty byly zaznamenávány kontaktním i bezkontaktním snímačem a následně byly porovnány jejich výstupní hodnoty. Při jejich početním a grafickém srovnání, kdy se uvažovala i přesnost měření termokamery $\pm 2^{\circ}\text{C}$ udávaná od výrobce, se zjistilo, že výstupní hodnoty byly prakticky totožné. Dále byla, pomocí dvou různých postupů uvedených v teoretické části, určena emisivita rámu.

Experiment č.2, který se odehrával v laboratoři na VUT, Fakultě strojního inženýrství, se nesl v podobném duchu, jako první experiment. Do provozu byl uveden kuličkový šroub, který bývá součástí výrobních strojů. Došlo se k obdobným výsledkům jako u prvního experimentu.

Závěrem lze tedy říci, že v případě měření povrchové teploty stroje či jeho součástí, kdy není nutné znát přesnost měření na desetiny nebo setiny stupně Celsia, je možné použít termografii k vyhodnocení teplotního pole objektu, samozřejmě za předpokladu správného určení emisivity měřeného materiálu.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] LYSSENKO, Vladimír. *Detektory pro bezdotykové měření teplot*. Praha: BEN - technická literatura, 2005. 153 s. Senzory neelektrických veličin. ISBN 80-7300-180-2.
- [2] PAVELEK, Milan. *Termomechanika*. Vyd. 3. přeprac., V Akademickém nakladatelství CERM 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003. 284 s. ISBN 80-214-2409-5.
- [3] KREIDL, Marcel. *Měření teploty: senzory a měřicí obvody*. Praha: BEN - technická literatura, 2005, 239 s. Senzory neelektrických veličin. ISBN 80-7300-145-4.
- [4] INCROPERA, Frank P a David P DEWITT. *Fundamentals of heat and mass transfer*. 4th ed. New York: Wiley, 1996. 886 s. ISBN 0471304603.
- [5] HRICOVÁ, Beata a Miriama PINOSOVÁ. THERMOGRAPHY AS A TOOL FOR IDENTIFYING OF HEAT LOSSES. *Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara* [online]. Hunedoara: Faculty of Engineering Hunedoara, 2014, 12(4), 47-50 [cit. 2017-02-07]. ISSN 15842665.
- [6] PAVELEK, Milan. *Teorie termovizních měření* [online]. 2007 [cit. 2017-02-07]. Dostupné z: <http://ottp.fme.vutbr.cz/~pavelek/optika/0700-z01.pdf>
- [7] PAVELEK, Milan. *Termomechanika 19. Přenos tepla zářením* [online]. [cit. 2017-02-07]. Dostupné z: http://ottp.fme.vutbr.cz/users/pavelek/termo/19_Zareni.pdf
- [8] KUKLOVÁ, Jana. *Historie bezdotykového měření teplot* [online]. 2009 [cit. 2017-02-07]. Dostupné z: https://www.fd.cvut.cz/projects/k611x1s/doc/works/termo_historie.pdf
- [9] *Tepelné záření. Záření absolutně černého tělesa* [online]. [cit. 2017-02-07]. Dostupné z: <http://alma.karlov.mff.cuni.cz/ufy102/Planckuv%20zakon.pdf>
- [10] KADLEC, K. Measurement of Process Variables in Sugar Industry: Non-contact Temperature Measurement.ooooo *Listy Cukrovarnické a Reparské* [online]. Prague: VUC Praha, a.s, 2016 Listy Cukrovarnicke a Reparske, 2016, 132(9-10), 303-307 [cit. 2017-02-06]. ISSN 12103306.
- [11] HELEBRANT, František. *Technická diagnostika a spolehlivost*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2008. ISBN 978-80-248-1942-6.
- [12] SOVA, Jan. *Základy práce s termokamerou* [online]. [cit. 2017-02-07]. Dostupné z: <https://www.slideshare.net/workswell/zaklady-prace-s-termokamerou>
- [13] User's manual, Flir T4xx series. *PMC-rentals* [online]. [cit. 2017-04-16]. Dostupné z: <http://www.pmc-rentals.com/wp-content/uploads/Flir-T420-User-Manual.pdf>
- [14] KADLEC, Karel a Miloš KMÍNEK. Měřicí a řídící technika: Měření teploty [online]. 2005 [cit. 2017-03-05]. Dostupné z: <http://uprt.vscht.cz/kminekm/mrt/>

- [15] SVOBODA, Jiří. Infračervené termografické (nedestruktivní) testování. Czech Society for Nondestructive Testing [online]. 2012 [cit. 2017-03-05]. Dostupné z: [http://www.allforpower.cz/UserFiles/file/2011/249_p\(1\).pdf](http://www.allforpower.cz/UserFiles/file/2011/249_p(1).pdf)
- [16] Teplota a její měření. *Artemis* [online]. [cit. 2017-03-05] Dostupné z: http://artemis.osu.cz:8080/artemis/uploaded/199_3_3%20Teplota_mereni.pdf
- [17] BARTUŠKA, Karel a Emanuel SVOBODA. *Fyzika pro gymnázia: molekulová fyzika a termika*. 4. vydání. Praha: Prometheus, 2001. ISBN 80-7196-200-7.
- [18] Využití termografie v průmyslu: Informační příručka o aplikacích termografie v průmyslu. *Flir* [online]. 2012 [cit. 2017-03-05]. Dostupné z: http://www.flirmedia.com/MMC/THG/Brochures/T820264/T820264_CZ.pdf
- [19] MAYR, Josef, Jerzy JEDRZEJEWSKI, Eckart UHLMANN, et al. Thermal issues in machine tools. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* [online]. Elsevier, 2012, 61(2), 771-791 [cit. 2017-05-20]. ISSN 0007-8506
- [20] HAMMER, M. *Úvod do termodynamiky*. Brno, 2016
- [21] VACULÍK, Jan. Plynové teploměry pro průmyslové použití. *Automa* [online]. 2013/3 [cit. 2017-03-05]. Dostupné z: <http://www.bhvsenzory.cz/pub-15-plynove-teplomery-pro-prumyslove-pouziti.html>
- [22] VOJÁČEK, Antonín. Co jsou bolometry a mikrobolometry. *Automatizace* [online]. 2005 [cit. 2017-03-05]. Dostupné z: <http://automatizace.hw.cz/clanek/2005111601>
- [23] KADLEC, Karel a Jan SOVA. Termokamery a pyrometry – měření, vlastnosti využití. *AllForPower* [online]. 2014/01 [cit. 2017-03-05]. Dostupné z: http://www.allforpower.cz/UserFiles/file/termokamery_1.pdf
- [24] KMÍNEK, M. Bezdotykové teploměry. *VŠCHT* [online]. [cit. 2017-03-05] Dostupné z: <http://uprt.vscht.cz/kminekm/mrt/predn/txt-Bc/5-FCHI09-IC-teplom.pdf>
- [25] NOVÁ, I., KRÝSLOVÁ, S. a Zdeňka KRÝSLOVÁ Z. Metody bezkontaktního měření teploty. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2004/11 [cit. 2017-03-05]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/metody-bezdotykového-mereni-teploty.html>
- [26] HOREJŠ, O., MINDL, J. a j. SMOLÍK. Pokročilé teplotní kompenzace portálového obráběcího centra. *MM průmyslové spektrum* [online]. [cit. 2017-03-05]. Dostupné z: <http://m.mmspektrum.com/clanek/pokrocile-teplotni-kompenzace-portaloveho-obrabeciho-centra>
- [27] KOVÁŘ, Jan a Jan SOVA. Termokamery a pyrometry. *Automa* [online]. 2014/2 [cit. 2017-03-05]. Dostupné z: http://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/52891.pdf
- [28] Flir T440, *Flir* [online]. [cit. 2017-03-05]. Dostupné z: <https://www.termokamery-flir.cz/termokamery-flir-t4x0/>

- [29] KREIDL, Marcel a Radislav ŠMÍD. *Technická diagnostika: senzory, metody, analýza signálu*. Praha: BEN, 2006, 406 s. ISBN 80-7300-158-6.
- [30] Průvodce termografií. *Termokamera* [online]. [cit. 2017-03-05]. Dostupné z: <http://termokamera.com/prirucka-termografie/>
- [31] ČECHOVÁ, M. Základy pyrometrie [online]. [cit. 2017-03-05]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/9987237-Zaklady-pyrometrie-pyrometrie-bezkontaktni-mereni-teploty-0-4-um-25-um-40-0-c-10-000-0-c.html>

9 SEZNAM TABULEK A OBRÁZKŮ

9.1 Seznam tabulek

Tab. 3.1 Rozdělení dotykových teploměrů [11] [19].....	21
Tab. 4.1 Přehled rozdělení bezdotykových teploměrů.....	31
Tab. 6.1 Technické parametry termokamery [28]	44
Tab. 6.2 Hodnoty teploty měřené každých 300 s, na čidle (CH – 14), z termokamery (bod Sp5) a jejich srovnání a procentuální rozdíl (chyba)	48
Tab. 6.3 Výsledky měření ke zjištění výsledné emisivity rámu	50
Tab. 6.4 Hodnoty teploty měřené každých 120 s, na čidle (CH – 0), z termokamery (bod Sp3) a jejich srovnání a procentuální rozdíl (chyba).....	52
Tab. 6.5 Výsledky měření ke zjištění výsledné emisivity šroubu.....	55

9.2 Seznam obrázků

Obr. 2.1 Porovnání jednotlivých stupnic (8).....	17
Obr. 3.1 Schéma plynového tlakového teploměru (21)	22
Obr. 3.2 Schéma tenzního teploměru (20)	22
Obr. 3.3 Kapalinový technický teploměr s kompenzačním členem (19).....	23
Obr. 4.1 Znázornění černého tělesa	25
Obr. 4.2 Elektromagnetické spektrum (7).....	26
Obr. 4.3a Planckův zákon (13)	27
Obr. 4.3b Wienův zákon (13)	27
Obr. 4.4 Rozdělení dopadající energie (10)	28
Obr. 4.5 Mikrolometrické pole (12).....	30
Obr. 4.6 Blokové schéma termokamery a pyrometru (23)	32
Obr. 4.7 Pyrometr měřící obdélníkovou oblast při slévání	34
Obr. 5.1 Schématické znázornění vlivu na velikost teplotní chyby (26).....	36
Obr. 5.2 Parametry ovlivňující bezkontaktní měření (31)	37
Obr. 5.3a Emisivita nastavena na $\varepsilon = 0,95$ (12).....	38
Obr. 5.3b Emisivita nastavena $\varepsilon = 0,30$ (12)	38
Obr. 5.4 Vliv drsnosti povrchu na vnímání teploty termokamerou (19)	39
Obr. 5.5 Ukázka chybně zvolených emisivit (31).....	39
Obr. 5.6 Měření zdánlivé odražené teploty pomocí hliníkové fólie (13).....	40
Obr. 6.1 Průmyslová termokamera FLIR T440 (28)	43
Obr. 6.2 Prostředí programu FLIR Tools.....	44
Obr. 6.3 Zkušební pracoviště – rám.....	45
Obr. 6.4 Stativ s termokamerou	45
Obr. 6.5a Rám	46
Obr. 6.5b Rám – detail na spodní díl	46
Obr. 6.6 Schéma umístění kontaktních čidel a rezistorů o příkonu 150 W a 300 W.....	46
Obr. 6.7a Rozložení teploty u spodního dílu na začátku měření	48
Obr. 6.7b Rozložení teploty u spodního dílu na konci měření	48
Obr. 6.8 Určení emisivity rámu pomocí termokamery	49
Obr. 6.9 Model kuličkového šroubu ve výrobním stroji	50
Obr. 6.10 Detail kuličkového šroubu, místa umístění čidel a referenční pásky	51
Obr. 6.11 Schéma umístění kontaktních čidel na kuličkovém šroubu.....	51

Obr. 6.12a	Teplotní pole šroubu na začátku měření	52
Obr. 6.12b	Teplotní pole šroubu 15 minut po začátku měření	52
Obr. 6.13a	Teplotní pole šroubu 30 minut po začátku měření.....	53
Obr. 6.13b	Teplotní pole šroubu na konci (po 60 minutách) měření.....	53
Obr. 6.14	Zjišťování emisivity kuličkového šroubu pomocí termokamery I	54
Obr. 6.15	Zjišťování emisivity kuličkového šroubu pomocí termokamery II	55