

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Přesnost měření teplotních polí pomocí IR termografie

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **David BRYCH**
Osobní číslo: **E11B0510P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Přesnost měření teplotních polí pomocí IR termografie**
Zadávající katedra: **Katedra technologií a měření**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Popište možnosti bezdotykového snímání teplotních polí a jejich převod na el. signál.
2. Popište Nejistoty a chyby metod bezdotykového měření teplot.
3. Porovnejte a vyhodnoťte na vzorku přesnost měření teplotních polí dotykovou a bezdotykovou metodou.



Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího
Rozsah pracovní zprávy: 20 - 30 stran
Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:


1. KREIDL M.: MĚŘENÍ TEPLoty, BEN - PRAHA 2005
2. BERAN V.; TÚMOVÁ O.: Měření veličin životního a pracovního prostředí - ZČU 2007

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Tomáš Langhammer**
Katedra technologií a měření

Datum zadání bakalářské práce: **14. října 2013**
Termín odevzdání bakalářské práce: **9. června 2014**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2013

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce se zabývá bezdotykovým snímáním teplotních polí pomocí IR termografie. Projekt vyjasní celou problematiku měření od základních pojmů a zákonů, přes výhody a zároveň nevýhody měření, které mohou naskytnout. V poslední řadě bylo snímání teplotních polí srovnáváno za použití mnoha metod s metodou dotykovou a poté vyhodnocena jejich přesnost v daných podmínkách.

Klíčová slova

Termografie, pyrometrie, bezdotykové snímání teploty, Lambertův zářič, emisivita, detektory tepelného záření, černé těleso, intenzita vyzařování, odrazivost, pohltivost, propustnost.

Abstract

This bachelor's thesis is focused on touchless temperature sensing by IR thermography. Project clarifies whole temperature measuring problematic - advantages and disadvantages measuring which can arise. In last point of the thesis was touchless sensing of temperature fields compared with touch methods and then has been evaluated precision of both approaches in predetermined conditions.

Key words

Thermography, pyrometry, non-contact temperature sensing, Lambert emitter, emissivity, thermal radiation detectors, black-body, intensity of radiation, reflectance, absorption, throughput.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....
podpis

V Plzni dne 9.6.2014

David Brych

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Tomáši Langhammerovi za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

ÚVOD	9
1.1 ZÁKLADNÍ VELIČINY	CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA.
1.2 ZÁŘIVÝ TOK	10
1.3 INTENZITA VYZAŘOVÁNÍ	10
1.4 SPEKTRÁLNÍ HUSTOTA	11
1.5 ZÁŘIVOST	11
1.6 ZÁŘ	11
1.7 SPEKTRÁLNÍ HUSTOTA ZÁŘE	11
1.8 INTENZITA OZÁŘENÍ	11
2 ZÁKLADNÍ POJMY	12
2.1 EMISIVITA	12
2.2 SPEKTRÁLNÍ EMISIVITA	12
2.3 ABSOLUTNĚ ČERNÉ TĚLESO	13
2.4 ŠEDÉ TĚLESO	14
2.5 POHLTIVOST (ABSORBANCE)	14
2.6 PROPUSTNOST (TRANSMITANCE)	15
2.7 ODRAZIVOST (REFLEKTANCE)	16
3 ZÁKLADNÍ ZÁKONY	16
3.1 PLANCKŮV ZÁKON	16
3.2 STEFAN-BOLZMANNŮV ZÁKON	17
3.3 WIENŮV POSUNOVACÍ ZÁKON	17
3.4 LAMBERTŮV ZÁKON	18
3.5 KIRCHHOFFŮV ZÁKON	19
4 VÝHODY BEZDOTYKOVÉHO MĚŘENÍ TEPLoty	19
4.1 MĚŘENÍ NA POHYBUJÍCÍCH, ROTUJÍCÍCH A VZDÁLENÝCH OBJEKTECH	20
4.2 ŠIROKÉ SPEKTRUM PROVOZŇÍCH TEPLoty	20
4.3 VELKÁ RYCHLOST ZAZNAMENÁVÁNÍ ZMĚN TEPLoty	20
4.4 MĚŘENÍ NA NEBEZPEČNÝCH, NEBO MÁLO DOSTUPNÝCH MÍSTECH	20
4.5 ŽÁDNÉ OVLIVNĚNÍ TEPLoty VLIVEM KONTAKTU	20
4.6 ŽÁDNÉ OVLIVNĚNÍ MĚŘENÝCH OBJEKTŮ	21
4.7 SPECIÁLNÍ MĚŘENÍ POVRCHOVÝCH TEPLoty	21
5 NEJISTOTY BEZDOTYKOVÉHO MĚŘENÍ TEPLoty	21
5.1 NEJISTOTA MĚŘENÍ PŘI NESPRÁVNÉM NASTAVENÍ EMISIVITY TĚLESA	21
5.1.1 <i>Jak stanovit správnou hodnotu emisivity:</i>	22
5.1.2 <i>Použitím tabulek</i>	22
5.1.3 <i>Zjištěním nebo nastavením skutečné teploty (metoda porovnání emisivity)</i>	22
5.1.4 <i>Nanesením speciálního materiálu, nebo použitím nátěru na části měřeného objektu</i>	22
5.1.5 <i>Vyvrtním otvoru</i>	23
5.2 NEJISTOTA ZPŮSOBENÁ NEPŘESNÝM ZAMĚŘENÍM MĚŘENÉHO OBJEKTU	23
5.3 ZANEDBÁNÍ VZÁJEMNÉHO ZÁŘIVÉHO TOKU	24
5.4 NEDOKONALOU KOREKCI VNĚJŠÍCH ZDROJŮ INFRAČERVENÝCH ZÁŘENÍ A PROSTUPNOSTI ATMOSFÉRY	24
6 SENZORY – DETEKTORY TEPELNÉHO ZÁŘENÍ	24
6.1 TEPELNÉ	24
6.1.1 <i>Termoelektrické</i>	24
6.1.2 <i>Bolometrické</i>	25
6.1.3 <i>Pyroelektrické</i>	25

6.2	KVANTOVÉ	25
6.2.1	<i>Intrinsické</i>	25
6.2.2	<i>Extrinsický</i>	26
7	BEZDOTYKOVÉ MĚŘENÍ.....	26
8	PYROMETRY	27
8.1	ÚHRNNÉ PYROMETRY	27
8.2	PÁSMOVÉ PYROMETRY	27
8.3	MONOCHROMATICKÉ PYROMETRY	27
8.4	POMĚROVÉ PYROMETRY	28
8.5	PYROMETRY S AUTOMATICKOU KOREKČÍ EMISIVITY	28
9	TERMOKAMERY	28
9.1	OPTICKÝ SYSTÉM.....	29
9.2	DETEKTOR ZÁŘENÍ.....	29
9.2.1	<i>Termograf</i>	29
9.3	A/D PŘEVODNÍK + ZPRACOVÁNÍ OBRAZU	29
9.4	UŽIVATELSKÉ ROZHRAŇÍ.....	29
10	PRAKTICKÁ ČÁST	29
10.1	ÚVOD	29
10.2	LAMBERTŮV ZÁŘIČ.....	30
10.2.1	<i>Náhrada lambertova zářiče</i>	30
10.3	CO SE BUDE MĚŘIT.....	31
10.4	MĚŘENÍ DOTYKOVOU METODOU.....	32
10.5	MĚŘENÍ BEZDOTYKOVOU METODOU.....	33
10.5.1	<i>Určení emisivity</i>	34
10.5.2	<i>Měření I. metoda</i>	34
10.5.3	<i>Měření II. metoda</i>	36
10.5.4	<i>Měření III. metoda</i>	37
10.5.5	<i>Vyhodnocení</i>	39
ZÁVĚR	40	
11	POUŽITÁ LITERATURA.....	1

Úvod

Toto téma bakalářské práce jsem si zvolil, protože oblast bezdotykového snímání teploty v poslední době zažívá velký rozmach v mnoha průmyslových odvětvích, například ve stavebnictví, elektrotechnice, automatizaci, lékařství nebo u záchranných složek apod. Tento rozmach je způsoben hlavně postupně snižující se finanční náročností za stále se zlepšujících technických parametrů. Metoda nabízí zároveň velmi přesné vyhodnocování, které je ovšem vykoupeno složitějšími měřicími metodami a postupy při jejím používání.

Celkový projekt se skládal z několika částí. První část byla koncipována jako teoretický rozbor a popis metod bezdotykového měření teploty a popis chyb a nejistot těchto měření. Dále jak tyto problémy eliminovat, případně se jim zcela vyhnout – v závislosti na tom, zda se jedná o chybu měření nebo o chybu metodickou. Druhou zásadní částí této práce bylo popsání možností bezdotykového snímání teplotních polí a jejich převod na elektrický signal. Teoretický rozbor byl zakončen popisem a rozdělením jednotlivých měřicích systémů a jejich snímačů.

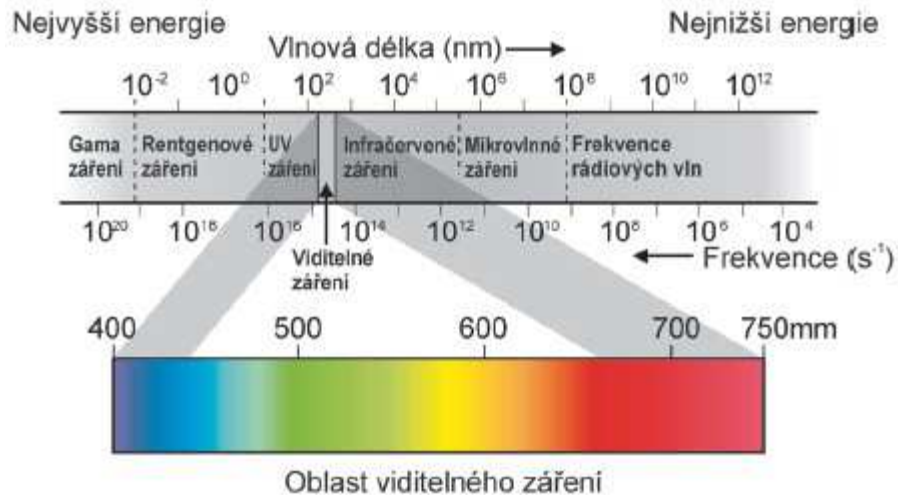
Teoretická část práce však zahrnuje daleko širší spektrum informací, od základních veličin, až k mnohým jevům a zákonům, které jsou s bezdotykovým měřením teplot spojené a ovlivňují jeho přesnost.

Problematikou bezdotykového měření teplot se hlavně zabývá česká národní norma ČSN EN 13187, podle které byla praktická část vedena. Na zvoleném příkladu se v souladu s normou měřila daná nastavení parametrů. Každá z možností byla poté zaznamenávána, aby bylo možné určit jejich jednotlivé vlastnosti v této dané situaci.

Cíl praktické části klade důraz hlavně na srovnání dotykové a bezdotykové metody měření teploty na povrchu asynchronního motoru. Vše se provádělo v laboratorním prostředí, aby bylo možné jednoduše nasimulovat různé podmínky potřebné k vyhodnocení výsledků.

1 Základní veličiny

Veličiny v oboru vyzařování elektromagnetického záření patří do skupiny tzv. Radiometrických veličin, které popisují přenášení energie zářením, v celém spektrálním rozsahu elektromagnetických vln. [24] [15]



Obr. 1.0 Elektromagnetické spektrum. Převzato z: [25]

1.1 Zářivý tok

Zářivý tok Φ_e [W] je energie vyzářená ΔE za jednotku času Δt . [24]

$$\phi_e = \frac{\Delta E}{\Delta t}, \quad (1)$$

Kde ϕ_e je zářivý tok [W],

ΔE je energie vyzářená zdrojem za dobu Δt . [24]

1.2 Intenzita vyzařování

Intenzita vyzařování M [W·m⁻²] je definovaná jako podíl zářivého toku $\Delta\Phi_e$, který je vyzařován ze zdroje o určitém obsahu a obsahu této plochy ΔS . [24]

(2)

$$M = \frac{\Delta\phi_e}{\Delta S},$$

Kde M je intenzita vyzařování [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$],

$\Delta\phi_e$ je zářivý tok vyzařován ze zdroje o určitém obsahu a obsahu této plochy ΔS .

[24]

1.3 Spektrální hustota

Spektrální hustota M_λ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$] je podíl intenzity vyzařování v malém intervalu vlnových délek a tohoto intervalu. [14]

1.4 Zářivost

Zářivost I_e [$\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$] je podíl zářivého toku $\Delta\Phi_e$ a prostorového úhlu $\Delta\Omega$, do kterého je tento tok vyzařován. [24]

$$I_e = \frac{\Delta\phi_e}{\Delta\Omega}, \quad (3)$$

Kde I_e je zářivost [$\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$],

$\Delta\phi_e$ je zářivý tok,

$\Delta\Omega$ je energie vyzářená zdrojem za dobu Δt . [24]

1.5 Zář

Zář L [$\text{W}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$] je podíl zářivosti elementu povrchu a plochy kolmého průřezu tohoto elementu do roviny kolmé k danému směru. [14]

1.6 Spektrální hustota záře

Spektrální hustota záře L_λ [$\text{W}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\text{m}^{-3}$] je podíl záře v malém intervalu vlnových délek a tohoto intervalu. [14]

1.7 Intenzita ozáření

Intenzita ozáření E [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$] je podíl zářivého toku dopadajícího na element povrchu a plochy tohoto elementu. [14]

2 Základní pojmy

2.1 Emisivita

Emisivita je bezrozměrná veličina, popisující schopnost materialu vyzařovat teplo. Je to poměr vyzařování reálného tělesa k absolutně černému tělesu o stejné teplotě. Emisivita reálného tělesa nabývá hodnot vždy v rozmezí od nuly do jedné, zatímco absolutně černého tělesa je emisivita rovná jedné. Většina organických, zoxidovaných, matně lakovaných materiálů a látek má emisivitu okolo 0,95. Z tohoto důvodu mají levnější měřicí přístroje pevně danou emisivitu na tuto hodnotu. Při měření lesklých materiálů přístrojem s takto pevně danou emisivitou je potřeba měřený materiál ošetřit matnou vrstvou barvy, lepicí pásky apod. viz. Nastavení správné hodnoty emisivity. I přesto měření těmito přístroji bývá velmi nepřesné a hodnoty by se měly brát pouze jako orientační. Dražší přístroje už mají hodnotu emisivity libovolně nastavitelnou, tak aby se dosáhlo vždy co nejpřesnějších výsledků. [3] [5] [8] [11] [12] [14]

$$\varepsilon = \frac{M}{M_0}, \quad (4)$$

Kde ε je emisivita [-],

M je intenzita vyzařování reálného tělesa,

M_0 je intenzita vyzařování absolutně černého tělesa. [14]

2.2 Spektrální emisivita

Spektrální emisivita je emisivita v určité vlnové délce. Je definovaná jako poměr spektrální hustoty vyzařování reálného zářiče, ku spektrální hustotě vyzařování absolutně černého tělesa při stejné teplotě. [12][14]

$$\varepsilon_\lambda = \frac{M_\lambda}{M_{0\lambda}}, \quad (5)$$

Kde ε_λ je spektrální emisivita [-],

M_λ je intenzita spektrálního vyzařování reálného tělesa,

$M_{0\lambda}$ je intenzita spektrálního vyzařování absolutně černého tělesa. [12]

2.3 Absolutně černé těleso

Jedná se o ideální těleso, s vlastností dokonale pohlcovat veškeré záření s libovolnou vlnovou délkou, úhlem dopadu, nebo spektrální záři, které na něj dopadne. Současně je černé těleso ideálním zářičem, kdy opět při libovolné vlnové délce vyzáří ze všech materiálů o stejné teplotě největší možné množství energie. [3] [12] [14]

Existují také tři jevy, které odlišují absolutně černé těleso od reálného. Oproti absolutně černému tělesu, které veškeré dopadající záření pohltí, u reálného tělesa se dopadající energie může chovat třemi různými způsoby v závislosti na materiálu a povrchové úpravě. Například část dopadajícího záření α může být pohlceno, nebo naopak část záření ρ může být odraženo, nebo v poslední řadě může část záření τ pronikat skrz objekt. Všechny tyto tři jevy jsou závislé na vlnové délce. Z tohoto důvodu, je k jejich vyjádření zavázány tyto tři veličiny: α_λ , ρ_λ , τ_λ . [2]

Vždy pro jakoukoliv vlnovou délku musí platit, že součet těchto spektrálních veličin, musí být roven jedné. [2]

$$\alpha_\lambda + \rho_\lambda + \tau_\lambda = 1, \quad (6)$$

Kde α_λ je spektrální pohltivost,
 ρ_λ je spektrální odrazivost,
 τ_λ je spektrální propustivost. [2]

Experimentální aproximace černého tělesa

Černé těleso lze aproximovat pomocí dutého tělesa s úzkým otvorem. Veškeré záření dopadající do otvoru je postupně pohlceno stěnami dutiny díky postupnému odražení. Naopak stěny samotné dutiny neustále vyzářejí a pohlcují záření. Záření, které se nakonec dostane z otvoru ven, má vlastnosti tzv. dutinového černého zářiče o emisivitě velmi blízké jedné ($1 > \epsilon > 0,99$). Množství vyzářené energie závisí na teplotě. Čím bude teplota vyšší, tím, bude větší množství vyzářené energie. [9]



Obr. 2.3 Dutinový černý zářič. [14]

2.4 Šedé těleso

Oproti černému tělesu, které vyzařuje ve všech vlnových délkách maximální množství energie a má emisivitu rovnou jedné, šedé těleso vyzařuje při stejné teplotě energii menší a jeho emisivita bude vždy nižší než jedna. Další vlastností, kterou šedé těleso vykazuje, je konstantnost při určitém spektrálním pásu vlnových délek. [3] [10]

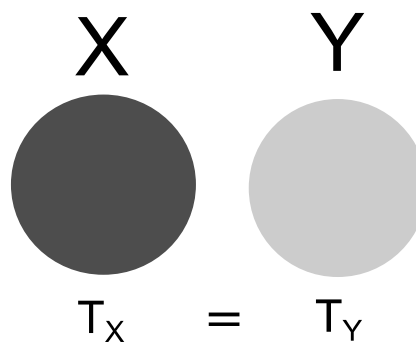
2.5 Pohltivost (absorbance) $[\alpha]$

Těleso energii nejen vyzařuje, ale může energii zároveň pohlcovat. Pohltivost $[\alpha]$ je poměr pohlcené energie k energii dopadající na těleso. Těleso s pohltivostí rovné jedné, bude pohlcovat veškeré dopadající záření a nazývá se “absolutně černé těleso”. Naopak s pohltivostí rovné nule, se veškeré dopadající záření, odrazí, nebo projde skrz objekt. [14] [2]

$$\alpha = \frac{\phi_a}{\phi_d}, \quad (7)$$

kde α je pohltivost,
 ϕ_a je pohlcený zářivý tok,
 ϕ_d je dopadající zářivý tok. [14]

Absolutně černé těleso, jak je již zmiňováno, pohlcuje veškeré dopadající záření všech vlnových délek, ale zároveň vyzařuje ze všech těles o stejné teplotě největší možné množství energie. Pro jednoduchý příklad stačí dvě tělesa: X, Y o stejné teplotě a různou pohltivostí, které si budou předávat energii pouze zářením. Těleso X s velkou pohltivostí, pohltí většinu záření od tělesa Y. Zatím co těleso Y s malou pohltivostí, většinu záření odrazí zpět k tělesu X. Z důvodu platnosti druhého zákona termodynamiky, jsou tělesa v tepelné rovnováze, ve které musí nadále přetrvávat. Z této věty plyne, že těleso X, které pohltilo hodně energie, musí opět hodně energie vyzařovat. Naopak těleso Y, bude vyzařovat pouze minimálně energie. Tudíž, čím bude těleso více záření pohlcovat, tím bude i více vyzařovat. [13]



Obr. 2.5

Ukázka pohltivosti [13]

2.6 Propustnost (transmittance) $[\tau]$

Bezrozměrná veličina vyjadřující jakou schopnost má těleso (materiál) propouštět dopadající záření. Často bývá udávána v procentech. Je vyjádřena jako poměr zářivé energie prošlé skrz objekt, k celkové dopadající energii. Vždy musí platit, že prošlá $[\tau]$, odražená $[\rho]$ a pohlcená $[\alpha]$ energie se musí rovnat jedné. U absolutně černého tělesa platí: $[\alpha]=1$, $[\rho]=0$, $[\tau]=0$. [2]

$$\tau = \frac{\phi_t}{\phi_d}, \quad (8)$$

kde τ je propustnost,
 ϕ_a je propuštěný zářivý tok,
 ϕ_d je dopadající zářivý tok. [14]

2.7 Odrazivost (reflektance) [ρ]

Jedná se opět o bezrozměrnou veličinu, která ale často bývá uváděna v procentech. Odrazivost je poměr odražené energie k celkové energii dopadající na těleso. U ideálního zrcadla platí: $[\rho]=1$, $[\alpha]=0$, $[\tau]=0$, naopak u absolutně černého tělesa: $[\alpha]=1$, $[\rho]=0$, $[\tau]=0$. [2]

$$\rho = \frac{\phi_r}{\phi_d}, \quad (9)$$

kde ρ je odrazivost,

ϕ_a je odražený zářivý tok,

ϕ_d je dopadající zářivý tok. [14]

3 Základní zákony

3.1 Planckův zákon

V roce 1900 formuloval německý fyzik Planck domněnku, že absolutně černé těleso nemůže vyzařovat a pohlcovat energii libovolně, ale pouze ve kvantech. Každému kvantu poté přiřadil určitou energii, která je úměrná frekvenci záření. [13] [16] [19]

Díky této formulaci pak ve stejném roce sestavil zjednodušený vztah popisující množství energie k vlnové délce. [14]

$$M_{0\lambda} = 2 \cdot \pi \cdot h \cdot c^2 \cdot \lambda^{-5} \cdot \left(\frac{h \cdot c}{e^{\lambda \cdot k \cdot T} - 1} \right)^{-1} = c_1 \cdot \lambda^{-5} \cdot \left(\frac{c_2}{e^{\lambda \cdot T} - 1} \right)^{-1}, \quad (10)$$

kde $M_{0\lambda}$ je spektrální hustota vyzařování absolutně černého tělesa,

h je Planckova konstanta ($h=6,6260755 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$),

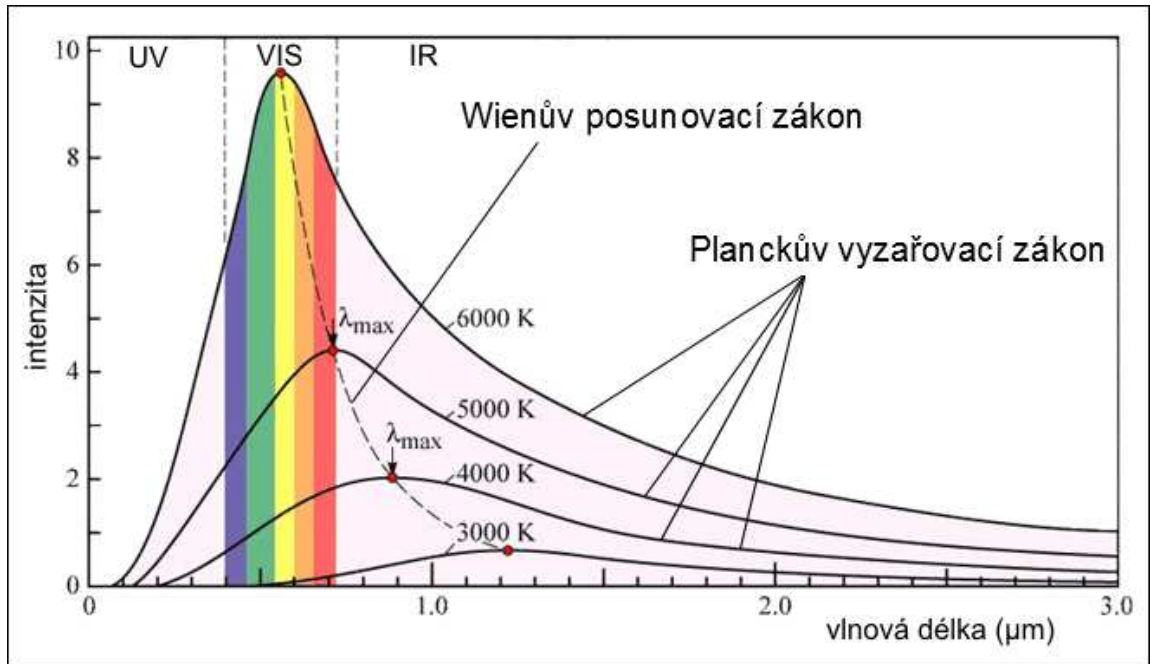
c je rychlost světla ($c=299792458 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),

λ je vlnová délka (m),

c_1 je první vyzařovací konstanta ($3,7417749 \pm 0,0000022 \cdot 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$),

c_2 je druhá vyzařovací konstanta ($1,438769 \pm 0,000012 \cdot 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$),

T je termodynamická teplota absolutně černého tělesa (K). [14]



Obr. 3.1 Závislost spektrální hustoty vyzařování absolutně černého tělesa na vlnové délce. Převzato z: [27]

3.2 Stefan-Bolzmannův zákon

Tento zákon popisuje vyzařování absolutně černého tělesa. Roku 1879 dva fyzikové Josef Stefan a Ludwig Boltzmann formulovali tento zákon, který říká, že intenzita vyzařování absolutně černého tělesa je přímo úměrná čtvrté mocnině termodynamické teploty (pro danou teplotu, v celém rozsahu vlnových délek udává intenzitu vyzařování). [13] [14] [16] [19]

$$M_0 = \delta T^4, \quad (11)$$

kde M_0 je intenzita vyzařování,
 δ je Stefan-Bolzmanna konstanta $(5,67051 \pm 0,00019) \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$,
 T je termodynamická teplota. [14]

3.3 Wienův posunovací zákon

Na sklonku 19. století rakouský fyzik Wien formuloval zákon, který je dnes znám jako Wienův posunovací zákon. Říká, že s rostoucí teplotou se maximální spektrální hustota vyzařování posouvá ke kratším vlnovým délkám, viz obr. 4.1. V praxi tato definice znamená, že pokud se například u železa bude postupně měnit jeho teplota vlivem zahřívání, bude se tak

postupně měnit i jeho barva (zkracovat vlnové délky). Wienův posunovací zákon je dán vztahem: [14] [16] [19] [26]

$$\lambda_{\max} \cdot T = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ m.K}, \quad (12)$$

kde λ_{\max} je vlnová délka, při které je spektrální hustota intenzity záření maximální za dané teploty,

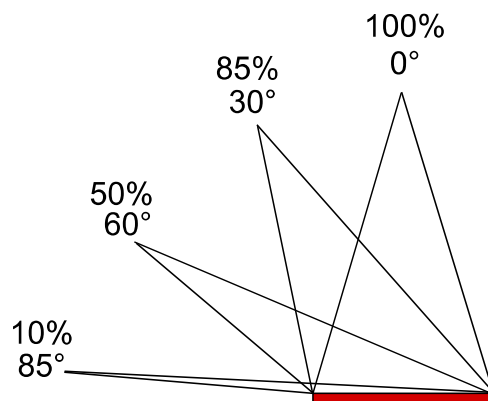
T je termodynamická teplota. [14]

560-590 nm	žlutá cca 1100°C
590-630 nm	oranžová cca 900°C
630-750 nm	červená cca 800°C

Obr. 3.3 Ukázka, že s rostoucí teplotou se spektrální hustota posouvá ke kratším vlnovým délkám. [17]

3.4 Lambertův zákon

Tento zákon formuloval rakouský fyzik a matematik Johann Heinrich Lambert a říká, že intenzita záření ideálního izotropního plošného zdroje, je ve všech směrech stejně velká. Tato definice je ovšem pouze jen zidealizovaný stav a ve skutečnosti se intenzita záření snižuje s úhlem pozorování. Takto zářící izotropní plošný zdroj nenazývá kosinový. [14] [18]



Obr. 3.4 Závislost intenzity záření na úhlu pozorování. [18]

3.5 Kirchhoffův zákon

V 19. Stolení německý fyzik Gustav Kirchhoff formuloval zákon o vyzařování těles. Podle tohoto zákona platí, že vyzařování celého spektra vlnových délek nezáleží pouze na termodynamické teplotě, ale i na absorpci tělesa (materiálu). Z tohoto důvodu se zavedl pojem tzv. černého tělesa, který udává, že veškeré dopadající záření se pouze pohltí, tudíž se žádné neodrazí ani nepropustí. Z toho je patrné, záření u absolutně černého tělesa závisí pouze na jeho termodynamické teplotě. Množství pohlcené energie velmi záleží na barvě a povrchové úpravě materiálu. [14] [16]

$$\frac{M}{\alpha} = f(T) \qquad \text{resp.} \qquad \frac{L}{\alpha} = f(T) \qquad (13)$$

kde M je intenzita vyzařování,
 α je pohltivost,
 $f(T)$ je termodynamická teplota,
 L je zář. [14]

Pro absolutně černé těleso platí ovšem vztah:

$$M = f(T) \qquad \text{resp.} \qquad L = f(T) \qquad (14)$$

kde M je intenzita vyzařování,
 $f(T)$ je termodynamická teplota,
 L je zář. [14]

4 Výhody bezdotykového měření teploty

Při správné znalosti všech pojmů a zákonů se stává z bezdotykového měření velmi dobrá, rychlá a přesná metoda pro zjištění povrchové teploty. Zde jsou pak podrobně popsány jednotlivé výhody, které sebou bezdotykové měření přináší.

4.1 Měření na pohybujiících, rotujících a vzdálených objektech

Termokamery nám umožňují měřit teplotu na velké vzdálenosti, například při hledání a záchraně osob. Dále měření teploty na rotujících částech objektů (teplota rotoru motoru). Nebo v astrofyzice se například termokamery využívají k měření efektivní teploty hvězd. [1] [3] [6] [10]

4.2 Široké spektrum provozních teplot

Velkou výhodou mají bezdotykové kamery (termokamery) v širokém spektru provozních teplot. Je velmi důležité určit v jakém prostředí a na jakou práci budeme kameru využívat. Například v průmyslu, elektroenergetice, stavebnictví nebo v prostředí pro detekování požáru se provozní teploty pohybují od $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $500\text{ }^{\circ}\text{C}$, ale i třeba až do $2000\text{ }^{\circ}\text{C}$. Velmi zde rozhoduje cena pořízení, tudíž i kvalita kamery. Při těchto vysokých teplotách je použití dotykových snímačů vyloučené nebo je použití velmi omezené z důvodu deformace a časového mechanického poškození. Naopak třeba pro lodní nebo automobilovou dopravu se teploty pohybují od $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $60\text{ }^{\circ}\text{C}$. [1] [6]

4.3 Velká rychlost zaznamenávání změn teploty

Mezi výhody určitě patří i rychlost měřících systémů. Termokamery zvládají ve velmi krátkém čase (milisekundy) zjišťovat změny teplot a vyhodnocovat je. Tato vlastnost ušetří spoustu času, díky kterému se tak zvládne daleko více měřících postupů. [1] [3] [8] [10]

4.4 Měření na nebezpečných, nebo málo dostupných místech

Bezproblémové měření na nebezpečných částech objektů, jakými jsou například části pod napětím, příliš vysoká teplota apod., nebo na fyzicky nedostupných místech, například vysoko nad zemí, za překážkami apod. [1]

4.5 Žádné ovlivnění teplot vlivem kontaktu

Při měření objektu neodebíráme žádnou tepelnou energii, což je velkou výhodou například u špatných vodičů tepla, jako jsou třeba plasty, dřevo apd. Díky tomu je bezdotykové měření oproti tomu dotykovému bez zkreslení, tudíž velice přesné. [1] [3] [10]

4.6 Žádné ovlivnění měřených objektů

Na rozdíl od dotykového měření, nemusíme instalovat různá čidla pro měření teploty. Tak zabráníme možnému mechanickému poškození na měřených objektech, jako je například znehodnocení laku apd. Dále je možné měřit například měkké materiály, kde by vlivem dotykového měření mohlo též dojít k mechanickému poškození, nebo zanedbání hygienických podmínek například v potravinářském průmyslu. [1] [3] [10]

4.7 Speciální měření povrchových teplot

Další obrovskou výhodou je měření povrchových teplot například plamene, plazmatu, skla atd. Vždy se jedná o náročné měření z pohledu na přesnost výsledku. Využití je například ve strojírenství, při zjišťování teploty plamene uvnitř pecí, nebo při kontrole žáruvzdorných obleků apd. [2]

5 Nejistoty bezdotykového měření teploty

Nejčastějších chyb, kterých se lidé dopouštějí při měření bezdotykových teplot, bývá neznalost teorie. Proto se doporučuje před měřením teorii pečlivě pročíst, aby se dosáhlo co nejpřesnějších výsledků. [3] Zde je uvedeno a popsáno několik nejistot bezdotykového snímání teplot, jež mají za následek právě vysoké ovlivnění měřených hodnot.

5.1 nejistota měření při nesprávném nastavení emisivity tělesa

Tato nepřesnost bývá nejčastější chybou, která se v bezdotykovém měření stává. Je třeba proto si na ní dávat velký pozor a těmto nepřesnostem předejít. Pouze u černého tělesa se emisivita rovná konstantě ($\epsilon=1$) při libovolné vlnové délce. Černé těleso je ovšem pouze zidealizované a v praxi vůbec neexistuje. U všech ostatních materiálů se tak emisivita mění v závislosti na vlnové délce. Z tohoto důvodu je třeba věnovat zvlášť velkou pozornost zjištění skutečné hodnoty emisivity. Jelikož při špatném určení hrozí zanesení nejistoty, jež ovlivní výsledky následujících měření. [3] [10] [12]

Dále je ovšem velmi důležité neopomenout rozsah emisivity v rozmezí mezi nulou (dokonalé zrcadlo) a jedničkou (absolutně černé těleso). Pokud bude měřený objekt opatřen lesklým povrchem nebo nátěrem, je zde vyšší riziko nejistoty oproti matně ošetřeným

povrchům, z důvodu vysoké odrazivosti. Povrch s emisivitou cca 0,3 a méně je velmi nevhodný k dalšímu měření. V těchto případech se často doporučuje opatřit měřený objekt fólií nebo nátěrem s předem známou emisivitou (vyšších hodnot). [3] [10] [12]

5.1.1 Jak stanovit správnou hodnotu emisivity:

5.1.2 Použitím tabulek

Pro mnoho běžně používaných materiálů lze vyhledat v tabulkách hodnotu emisivity, která se vždy uvádí za určité teploty. V některých tabulkách lze navíc vyhledat, pro které pásmo vlnových délek je hledaná emisivita konstantní. Díky tomu lze lépe vybrat měřicí techniku pro přesnější měření. Ovšem tabulkové hodnoty by se měly brát spíše jako orientační. Především u kovů, kde úprava povrchu (leštění, zoxidování, zdrsňení...) ovlivňuje emisivitu v některých případech více, než samotný materiál. [3] [10] [11]

5.1.3 Zjištěním nebo nastavením skutečné teploty (metoda porovnání emisivit)

Nejprve se změří teplota daného materiálu dotykovým snímačem teploty. Poté se vhodným typem pyrometru nastavuje teplota na stejnou hodnotu, při které se pak vyčte správná emisivita. Obdobným způsobem by se provádělo měření, za předpokladu zjištění emisivity při konkrétní teplotě. Při měření velmi vodivých materiálů (stříbro, měď, hliník...), nutno počítat s možným ochlazením materiálu během měření a tudíž stálost teploty kontrolovat. [3] [10] [11] [14]

5.1.4 Nanesením speciálního materiálu, nebo použitím nátěru na části měřeného objektu

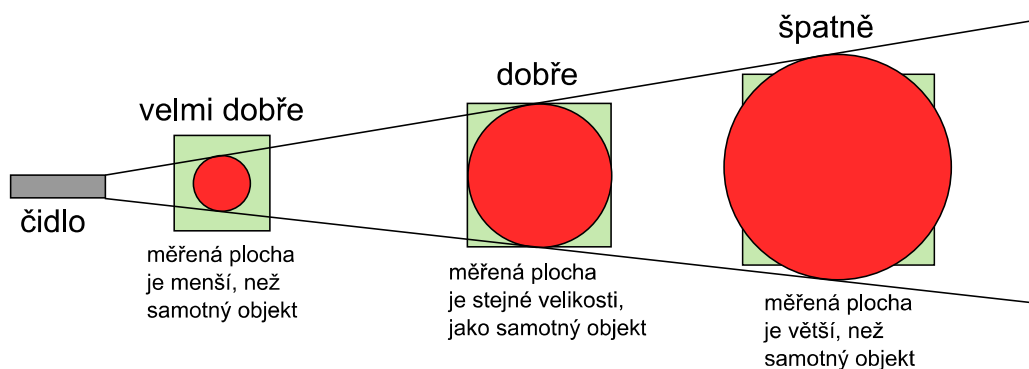
Do poměrně nízkých teplot (okolo 250 °C) lze na měřený objekt nalepit speciální plastový štítek se známou emisivitou. Poté se pyrometrem změří povrchová teplota na štítku a dále se bude provádět měření na samotném objektu. Nastavuje se na pyrometru hodnota emisivity do té doby, dokud měřicí přístroj nevykazuje na displeji stejnou hodnotu teploty, jako na štítku. Obdobně lze zjišťovat emisivitu pomocí matného černého nátěru na části objektu. Nános této barvy má opět předem známou emisivitu (cca 0,95) a tak se u měření postupuje stejně, jako u nalepení štítku. [3] [10] [14]

5.1.5 Vyvrtáním otvoru

Tato možnost se využívá, jen v případě možnosti vyvrtání otvoru do měřeného objektu. Princip této metody je velmi podobný metodě porovnání emisivit. Do objektu se vyvrtá otvor o délce asi 6 krát větší než jeho průměr. Tím se na dně otvoru vytvořilo „černé těleso“. Důležité je, aby průměr otvoru byl větší než laserový paprsek pyrometru, a tak nedocházelo ke zkreslení hodnot. Na pyrometru se nastaví hodnota emisivity rovná jedné a změří se teplota na dně otvoru. Poté se hodnota emisivity postupně snižuje, až do doby, kdy hodnota teploty je stejná jako byla uvnitř otvoru. Tato metoda se hlavně využívá u materiálů s velmi vysokou tepelnou vodivostí (stříbro, měď, hliník...), kde se předpokládá, že teplota na povrchu bude velmi podobná teplotě uvnitř vrtu. Viz. 3.3 absolutně černé těleso. [11] [14]

5.2 Nejistota způsobená nepřesným zaměřením měřeného objektu

Optický systém pyrometru snímá vyzařování energie z měřeného objektu pomocí bodů tvořící kruh, nebo rovnou celou kruhovou plochou, kterou soustřeďuje na čidlo pyrometru. Pro přesné měření musí být tento světelný kužel vždy menší, než část objektu, která je měřena. Pokud by světelný kužel přesahoval měřenou část, dopadal by tak na okolní, nechtěné plochy a zaváděl do celého měření právě zmíněnou odchylku. U pyrometru se uvádí hodnota takzvaného optického rozlišení DS. To je definované, jako poměr mezi průměrem měřeného objektu D k vzdálenosti pyrometru od měřeného objektu S . Čím bude výsledná hodnota menší, tím lepší bude optické rozlišení a lze tak měřit menší objekty. [3] [10] [12] [14]



Obr. 5.2 Znárodnění zaměření měřeného objektu čidlem. [3]

5.3 Zanedbání vzájemného zářivého toku

V měření se chyba metody projeví v případě zanedbání vzájemného zářivého toku. Tato chyba vzniká mezi detektorem pyrometru a měřeným objektem. Zářivý tok z detektoru se odrazí od objektu a při nulové propustnosti se částečně pohltí a částečně odrazí zpět. To samé se děje i se zářivým tokem, který vychází z měřeného objektu a při dopadu na detektor opět při nulové propustnosti částečně pohltí a částečně odrazí. Tyto odrazy se opakují, tudíž detektor nesnímá pouze zářivý tok z měřeného objektu, ale snímá i svůj odražený. [12] [14]

5.4 Nedokonalou korekcí vnějších zdrojů infračervených záření a prostupnosti atmosféry

Velikost infrazáření, které lze na měřeném objektu naměřit velmi ovlivňuje teplota vnějšího prostředí. Už jen intenzita a samotná teplota proudícího vzduchu značně ovlivňuje teplotu měřeného objektu, díky odebírání tepla z objektu. Dále značně ovlivňují povrchovou teplotu měřeného objektu vnější zdroje infračerveného záření, který ovlivňují buď skutečnou teplotu (součinitel absorpce), nebo relativní (součinitel reflexe). [3] [4] [10] [12] [14]

6 Senzory – detektory tepelného záření

Senzory/detektory tepelného záření se dělí na dvě základní skupiny, dle zpracování dopadajícího záření na tepelné a kvantové. [14]

6.1 Tepelné

Při dopadu záření na tepelné detektory dochází ke změně teploty (oteplení) detektoru a pohlcené záření se poté nepřímo vyhodnocuje snímači teploty.

6.1.1 Termoelektrické

Termoelektrické detektory jsou sériově řazené termoelektrické články. Každý článek je tvořen dvěma vodiči, ze dvou různých kovových materiálů, které jsou na každém konci vodivě spojeny. Pokud je na jednotlivých koncích rozdílná teplota, vznikne termoelektrické napětí a obvodem začne procházet termoelektrický proud. Termoelektrické detektory pracují na principu termoelektrického jevu. Díky jednoduchosti, nízké hmotnosti, teplotní odolnosti a širokému pásmu teplot, jsou velmi často využívány na rychlé změny teplot. [7] [14]

6.1.2 Bolometrické

U bolometrických snímačů je základem teplotně závislý odporový materiál, který při pohlcení záření, změní svojí teplotu a tím i svůj elektrický odpor. Mikrobolometrické snímače lze řadit jako plošné nebo řádkové detektory, kde plošné detektory se využívají hlavně v infračervených kamerách v maticovém uspořádání FPA. [7] [14]

6.1.3 Pyroelektrické

Pyroelektrické detektory jsou založené na principu pyroelektrického jevu, při kterém se za změny teploty deformují pyroelektrické materiály. Protože jsou pyroelektrické materiály podskupinou piezoelektrických materiálů, tak při deformaci materiálu, způsobené změnou teploty, se na povrchu deformovaného materiálu vytvoří elektrický náboj. Díky vysoké přesnosti, spolehlivosti a nízké ceně se pyroelektrické detektory v široké míře využívají hlavně v zabezpečovací technice. [7] [14] [23]

6.2 Kvantové

Hlavní rozdíl kvantových detektorů oproti tepelným je ve zpracování dopadajícího záření. U tepelných detektorů dochází k přeměně dopadajícího záření na teplo oproti kvantovým, které přeměňují dopadající fotony přímo na elektrický signál. Kvantové detektory jsou ve skutečnosti detektory tvořené polovodičovými materiály a podle typu se dělí na intrinsické (vlastní) a extrinsické (nevlastní). [7] [14]

6.2.1 Intrinsické

Intrinsickými, neboli vlastními polovodičovými prvky jsou například: Uhlík (C), křemík (Si), Germánium (Ge), Olovo (Pb) apod. Jsou to čisté prvky čtvrté skupiny periodické tabulky prvků, který se vyznačují za absolutní teploty pevně vázanými elektrony ve valenční vrstvě. Při dodávání tepla, začnou mít atomy kinetickou energii, tím dojde k porušení kovalentní vazby. Elektron se odpoutá z valenční vrstvy a vznikne „díra“. Takto vzniklý pár, elektron-díra se nazývá Generace. Tohoto jevu využívá například fotodioda. Opačný proces se nazývá Rekombinace, kdy naopak dochází k zániku páru elektron-díra a například jej využívá LEDka. [21] [28]

6.2.2 Extrinsický

Jedná se o polovodiče obohacené o příměsi dalších prvků. Podle typu příměsi se nepřímé polovodiče rozlišují na polovodiče typu N a typu P.

Polovodič N

Pokud se k čistému prvku ze čtvrté skupiny o čtyřech valenčních elektronech přidá prvek z páté skupiny o pěti valenčních elektronech, vznikne polovodič typu N. [21]

Polovodič P

Naopak pokud se k čistému prvku o čtyřech valenčních elektronech, přidá prvek ze třetí skupiny periodické tabulky o třech valenčních elektronech, vznikne polovodič typu P. [21]

7 Bezdotykové měření

Bezkontaktní měření teploty je velmi jednoduchý a efektivní způsob jak rychle a přesně získat povrchovou teplotu tělesa. Ovšem pro co nejpřesnější hodnoty, je třeba znát základní veličiny a respektovat dané zákony, které s měřením úzce souvisí.

Každé těleso o teplotě vyšší, než je absolutní nula ($0 \text{ K} = -273.15 \text{ °C}$) vyzařuje elektromagnetické záření, jehož velikost závisí na povrchové teplotě tělesa viz Planckův zákon. Z celého elektromagnetického spektra bezdotykové měření využívá pouze část. Je to spektrální pásmo vlnových délek od $0.4 \mu\text{m}$ do 1 mm . Tento rozsah je složen z viditelného spektra o vlnových délkách od $0.4 \mu\text{m}$ do $0.78 \mu\text{m}$ a infračerveného záření od $0.78 \mu\text{m}$ do 1 mm . Zároveň, ale elektromagnetické záření o vlnových délkách od $0,78 \mu\text{m}$ do 1 mm se nazývá tepelné záření. [5] [10]

K samotnému bezdotykovému měření se využívá dvou typů měřících přístrojů. První skupinou jsou jednodušší, ale zároveň daleko lacinější měřící přístroje, které se nazývají pyrometry. Další skupinou, která je o poznání složitější, ovšem daleko přesnější, ale na druhou stranu dražší jsou termokamery.

8 Pyrometry

Pyrometry jsou měřicí přístroje, které dopadající tepelné záření soustředí optickým systémem (soustava čoček) na detektor. Ovšem snímají vždy pouze jeden bod a snímanou intenzitu záření přepočítávají podle vztahu na výslednou teplotu. Hlavní výhoda pyrometrů bývá nejčastěji v malé ceně. [4]

8.1 Úhrnné pyrometry

Úhrnné neboli radiační pyrometry jsou zařízení pracující na principu Stefan-Boltzmanova zákona. Pracují téměř v celém spektrálním rozsahu vlnových délek (0,4 - 20 μm), omezené pouze spektrální citlivostí detektoru a optickou propustností pyrometru. Při dopadu tepelného záření soustředí optický systém tvořený soustavou čoček a zrcadel toto záření na detector pyrometru. U úhrnných pyrometru bývá detector nejčastěji tvořen termočlánek, bolometrem nebo termistorem. [3] [5] [10] [14]

8.2 Pásmové pyrometry

Pásmové pyrometry pracují v daleko užším spektru vlnových délek oproti těm, které měří v celém spektrálním rozsahu (úhrnné pyrometry). Pro detekci záření se využívají kvantové detektory, díky jejich vysoké rychlosti. Mezi takové detektory patří fototranzistory, fotoodpory, fotodiody, fotonky a fotočlánky. Díky různé spektrální citlivosti těchto detektorů se snáze vybírá snímač pro konkrétní měření. Například selenové fotočlánky jsou citivé ve spektru viditelného světla, germániové diody mezi 0,4 – 1,8 μm , fotoodpory mezi 0,5 - 3,6 μm apod. Díky vysoké rychlosti kvantových detektorů a široké škále konkrétních spektrálních pásem, jsou pásmové pyrometry v dnešní době nejrozšířenějšími měřicími prvky. [3] [5] [10] [14]

8.3 Monochromatické pyrometry

Monochromatické pyrometry jsou spektrálně selektivní pyrometry, založený na principu spektrálního vyzařování tělesa, při určité vlnové délce na teplotě. Jsou vybaveny kvantovými detektory, které umožňují rychlé a zároveň přesné měření v úzkém spektrálním pásmu. [3] [14]

8.4 Poměrové pyrometry

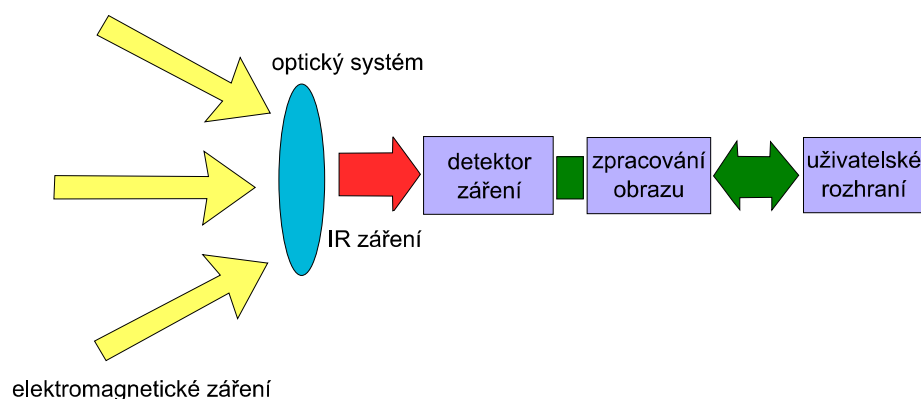
Poměrové pyrometry měří záření na dvou úzkých spektrálních pásmech vlnových délek, ze kterých poté vypočítávají poměr záře. Dříve se tyto pyrometry nazývaly dvoubarevné díky vlnovým délkám, které odpovídaly konkrétním barvám ve viditelném spektru. Díky kalibraci těchto pyrometrů na hodnotu teploty absolutně černého tělesa pro dvě vlnové délky, lze u těchto měřících přístrojů zanedbat vliv emisivity. Hlavními výhodami poměrových pyrometrů je měření v místech vysoké koncentrace kouře, mlhy, vodní páry apod, nebo například v případech, kdy celé zorné pole detektoru pyrometru není zakryto měřeným objektem, nebo se různě měří v průběhu měření. [3] [5] [14] [22]

8.5 Pyrometry s automatickou korekcí emisivity

Pyrometry s automatickou korekcí emisivity jsou dalšími pyrometry, který zvládají měřit teplotu, bez znalosti emisivity objektu. Princip spočívá v měření monochromatickým pyrometrem, kde dochází ke střídání intenzity vyzařování měřeného objektu s intenzitou vyzařování měřeného objektu, který je označen laserem (součást pyrometru) s přesně definovanou intenzitou vyzařování. [3] [14]

9 Termokamery

Termokamery jsou složité měřící přístroje například oproti pyrometrům. Přesto však lze jejich funkci popsat v tzv. čtyřech krocích (částech).



Obr. 9.0

Blokové schéma termokamery. [29]

9.1 Optický systém

Optický systém, který je nejčastěji tvořen soustavou čoček zachycuje dopadající elektromagnetické záření měřeného objektu a soustřeďuje jej na detektor záření. [29]

9.2 Detektor záření

Skládá se z mnoha tzv pixelů, což jsou vlastně jednotlivé detektory, které převádí elektromagnetické záření na elektrický signál a poté na teplotu (termograf). [29]

9.2.1 Termograf

Termograf je obraz, který je rozdělen na matici pixelů. Každý pixel pak odpovídá povrchové teplotě snímaného objektu v daném bodě. Rozlišení termografu se rovná rozlišení detektorů termokamery (320x240pixelů). [20]

9.3 A/D převodník + zpracování obrazu

A/D převodník převádí analogový signál detektoru na digitální a poté je dalšími obvody zpracováván ve výsledný termograf, který je uložen v paměti a zobrazován na obrazovce. [29]

9.4 Uživatelské rozhraní

Zajišťuje zobrazování výsledného termografu na obrazovce a zprostředkovává komunikaci s PC (uložené termografy v paměti apod.). [29]

10 Praktická část

10.1 úvod

Hlavním úkolem praktické části této bakalářské práce bylo ověřit a zjistit míru přesnosti bezdotykového měření oproti klasické dotykové metodě. Pro nasimulování tohoto projektu byl použit asynchronní motor, který se v průběhu měření nechal zahřát na konstantní (maximální) teplotu, vlivem otáček a poté se snímala za různých podmínek jeho povrchová teplota. Pro dotykovou metodu byl vybrán měřecí přístroj Testo, třídy 435 vybavený sondou s termočláňkovým teploměrem. Naopak pro bezdotykové měření byla použita termokamera FLIR i3.



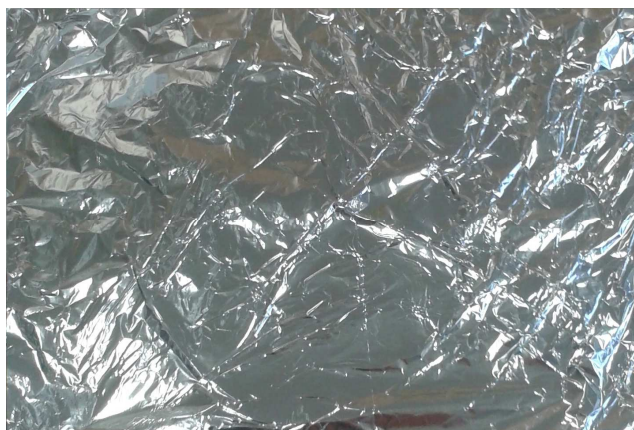
Obr. 10.1 Ukázka měřících přístrojů

10.2 Lambertův zářič

Lambertův zářič je objekt, který ideálně (izotropně) odráží dopadající záření svého okolí. Díky této vlastnosti lze tak změřit intenzitu záření nežádoucího tělesa nebo těles ovlivňující měření. [30]

10.2.1 Náhrada lambertova zářiče

Jako náhradu za Lambertův zářič lze použít zmačkanou a opět rozloženou hliníkovou fólii upevněnou například na tvrdém kartonu, plastové destičce apod. Hliníková fólie má vysoký stupeň odrazu a díky zmačkání se záření odráží téměř izotropně. Záleží ovšem na stupni zmačkání. Čím více bude fólie zmačkána a následně roztažena, tím lepší budou izotropní vlastnosti. Poté se takto uměle vytvořený Lambertův zářič přímo aplikuje na měřený objekt nebo umístí do jeho těsné blízkosti. Při nastavení emisivity na měřícím přístroji na hodnotu rovné jedné, lze při namíření detektoru na vytvořený Lambertův zářič změřit intenzitu dopadajícího záření. [30]



Obr. 10.2.1 Náhrada Lambertova zářiče s méně zmačkanou fólií



Obr. 10.2.2 Náhrada Lambertova zářiče s více zmačkanou fólií

10.3 Co se bude měřit

Úkolem praktické části této práce je ověření přesnosti dotykové a bezdotykové metody měření povrchové teploty. Z tohoto důvodu bylo vybráno laboratorní prostředí, kde lze snadno nasimulovat ideální podmínky (žádné okolní tepelné zdroje, libovolné nastavení měřeného úhlu apod.) nebo naopak tyto nežádoucí zdroje uměle vytvořit, z důvodu zanesení chyby, která je vhodně zvolenými metodami následně aliminována.

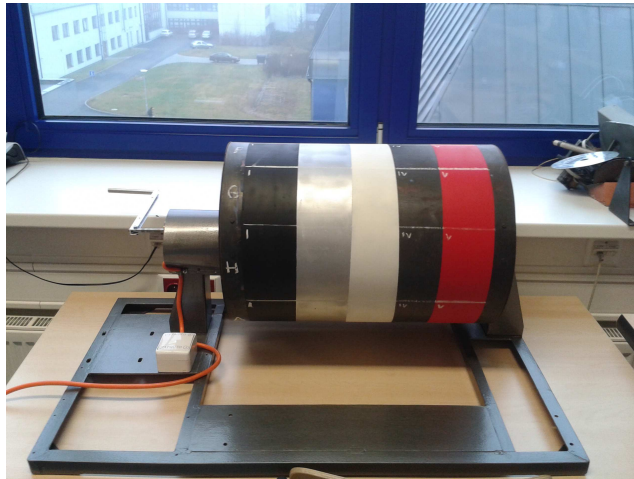
Celá práce spočívala v měření povrchové teploty na běžícím asynchronním motoru, za různých simulací nepříznivých vlivů. Pro získání co nejpřesnějších výsledků se využilo několika postupů, které se vždy několikrát opakovaly, aby se vyloučily náhodné výkyvy teplot.



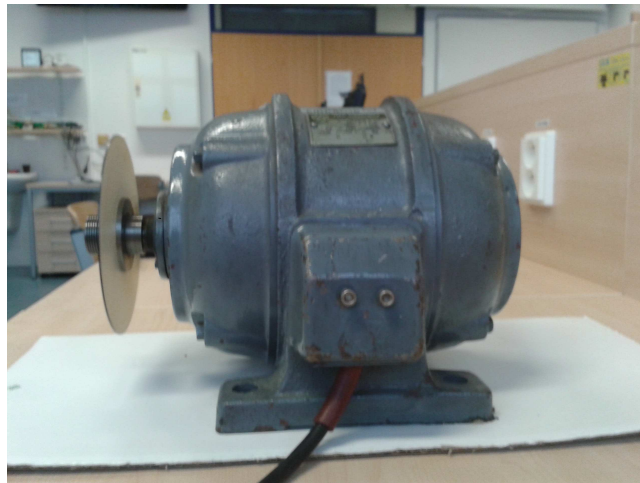
Obr. 10.3 Ukázka pracoviště

10.4 Měření dotykovou metodou

Nejprve se zapojil připravený asynchronní motor, který se uvedl do chodu. Poté se dotykovým termočlánkem Testo 435, měřila povrchová teplota z přední strany asynchronního motoru, dokud se teplota neustálila na konstantní hodnotě. Výsledná hodnota naměřena termočlánkem se rovnala teplotě $36,78\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pro nasimulování nežádoucího vnějšího tepelného zdroje se použil válec s topnou spirálou, který se připojil ke zdroji napětí. Na zdroji se nastavila hodnota napětí $U=250\text{V}$, aby se dosáhlo rychlého nárůstu teploty. Po ustálení teploty na válci, se měření termočlánkem opakovalo, aby se zjistil vliv nežádoucího zdroje tepla. Nyní se naměřila hodnota teploty $37,7\text{ }^{\circ}\text{C}$, což znamená rozdíl od původní teploty $0,92\text{ }^{\circ}\text{C}$.



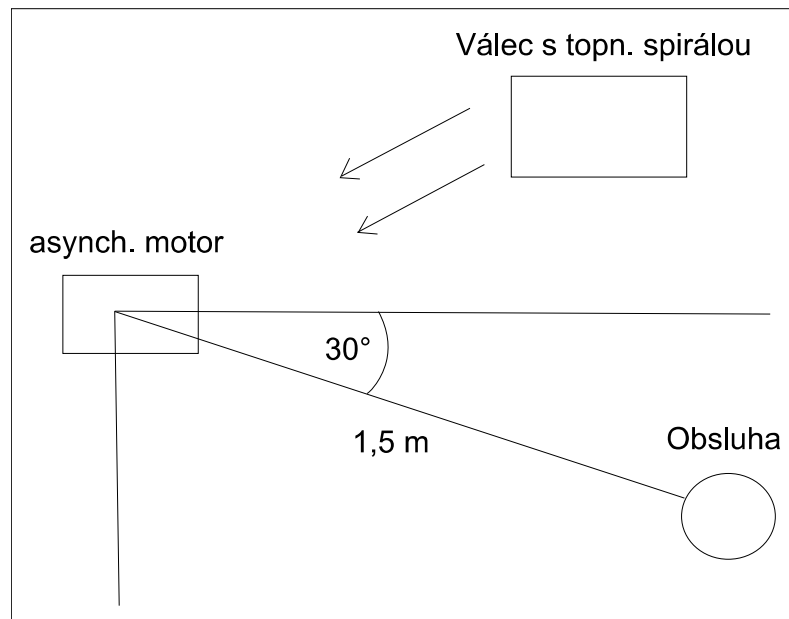
Obr. 10.4.1 Válec s topnou spirálou



Obr. 10.4.2 Asynchronní motor

10.5 Měření bezdotykovou metodou

Pro bezdotykové měření je základní kámen znalost emisivity povrchu měřeného objektu. Proto před samotným měřením, je třeba hodnotu emisivity znát, nebo jí pomocí nějaké metody získat. Poté je možné přejít k samotnému měření. Pro tuto problematiku byly vybrány tři různé metody bezdotykového měření. Vždy se proces třikrát opakoval, aby se dosáhlo co nejpřesnějších výsledků a nezanášely se tak do měření náhodné chyby.



Obr. 10.6 Schéma měřené úlohy

10.5.1 Určení emisivity

Emisivitu lze určit mnoha způsoby viz teorie: určení správné emisivity. V tomto případě díky znalosti teploty měřeného objektu, která se získala dotykovým termočlánkem, se zvolila metoda Porovnání emisivit. Na termokameře se nastavila právě zmiňovaná teplota zjištěná termočlánkem ($37,7\text{ }^{\circ}\text{C}$) a tak se získala emisivita povrchu asynchronního motoru. Toto měření se opakovalo pro zvýšení přesnosti ještě dvakrát. Po zprůměrování tří dílčích hodnot emisivity, vyšla celková hodnota $\varepsilon=0,96$. Takto vysoká hodnota emisivity vyšla díky povrchové úpravě materiálu a matné barvě, kterou byl asynchronní motor ošetřen.

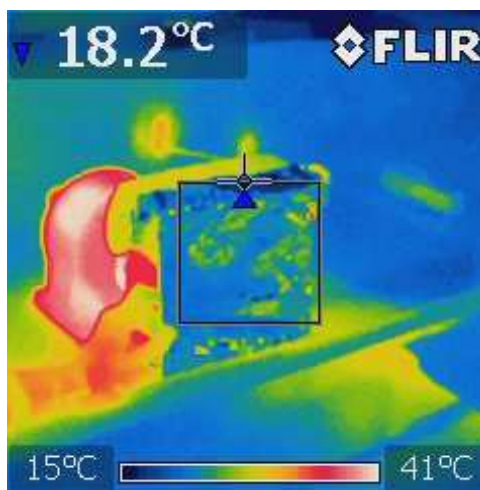
t [$^{\circ}\text{C}$]	ε [-]
37,7	0,96
37,7	0,96
37,7	0,95

Tab. 10.5.1 Určení emisivity

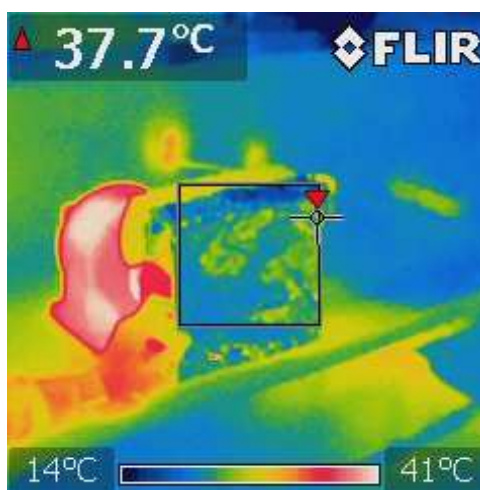
10.5.2 Měření I. metoda

První metoda spočívala ve využití uměle vytvořeného Lambertova zářiče s méně zmačkaným povrchem. Lambertův zářič se umístil přímo před asynchronní motor, aby směřoval čelem k nežádoucímu zdroji tepla. Dále se termokamerou snímal střed zářiče a zaznamenávala se tak odražená teplota. Na termokameře se poté přepínalo mezi tzv. horní a dolní mezí teploty. Horní a dolní meze jsou maximální extrémy teplot, které se na Lambertově zářiči zaznamenaly. Opět se měření opakovalo ještě dvakrát. Z naměřených

hodnot je patrný velký rozdíl teplot, který je dán právě méně zmačkaným povrchem zářiče (horší všesměrové vlastnosti). Tyto hodnoty se poté dvakrát zprůměrovaly. Tím se získala pouze jedna hodnota viz tabulky a výpočty.



Obr. 10.5.2.1 Minimální oblast teploty – válec



Obr. 10.5.2.2 Maximální oblast teploty – válec

min. oblast t [°C]	max. oblast t [°C]	průměr	průměr
18,2	37,7	27,95	27,4
19,2	36,5	27,85	
17,2	35,6	26,4	

Tab. 10.5.2.3 Seznam teplot měření – méně zmačkaný Lambertův zářič

Příklady výpočtů z Tab. 10.5.4

$$18,6 + 34,8 = 53,4 \quad (15)$$

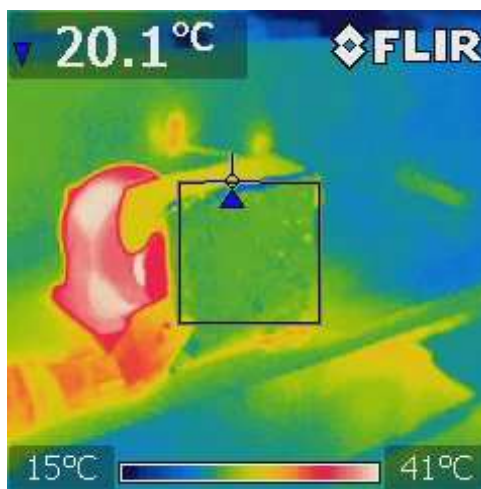
$$\frac{53,4}{2} = 26,7 \quad (16)$$

$$26,7 + 27,85 + 26,4 = 80,95 \quad (17)$$

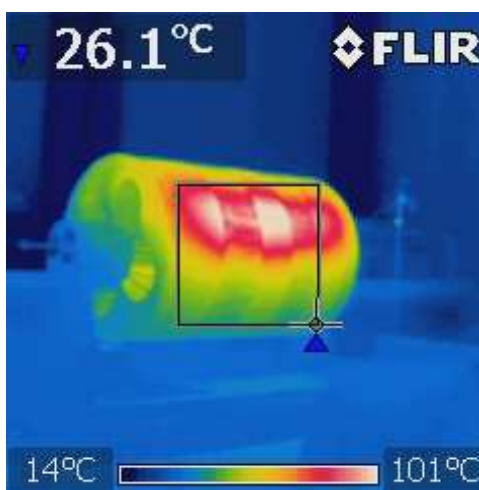
$$\frac{80,95}{3} = 26,983 \quad (18)$$

10.5.3 Měření II. metoda

Za druhé byla použita stejná metoda jako v prvním bodě. Rozdíl byl pouze v povrchové úpravě uměle vytvořeného Lambertova zářiče, který se zmačkal oproti první části daleko více. Poté se opět umístil před asynchronní motor a proběhla v zápětí série měření, tak jako v prvním bodě. Hned na první pohled jsou viditelné menší rozdíly minimální a maximální oblasti teplot. Menší rozdíly teplot jsou právě způsobené více zmuchlaným povrchem hliníkové fólie, a tak má Lambertův zářič daleko lepší izotropní vlastnosti. Tím se potvrdily teoretické předpoklady, viz Lambertův zářič.



Obr. 10.5.3.1 Minimální oblast teploty – válec



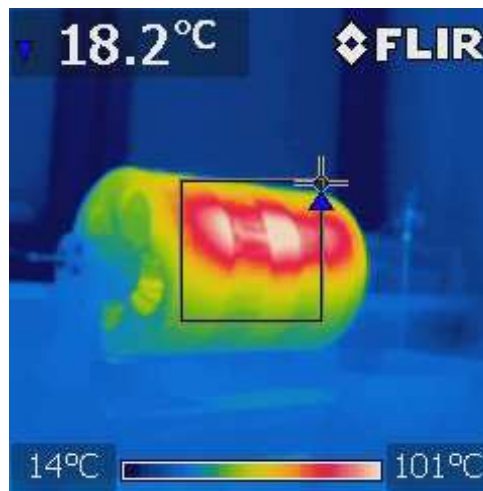
Obr. 10.5.3.2 Maximální oblast teploty – válec

min. oblast t [°C]	max. oblast t [°C]	průměr	průměr
20,1	26,1	23,1	23,3
20,1	26,5	23,3	
20,3	26,7	23,5	

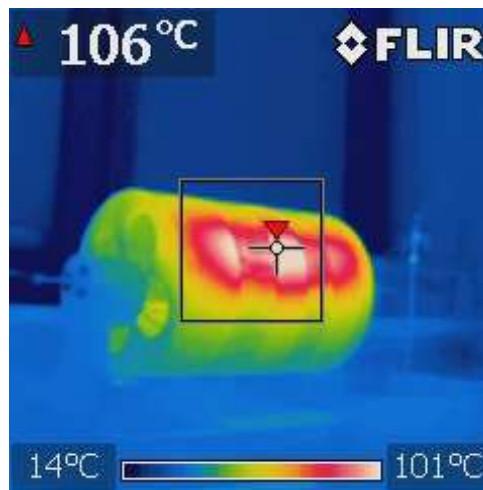
Tab. 10.5.3.3 Seznam teplot měření – více zmačkaný Lambertův zářič

10.5.4 Měření III. metoda

Pro třetí bod měření se využila metoda přímého odrazu. To znamená, že se měřila odražená tepelná energie namířením detektoru termokamery přímo na válec, z místa asynchronního motoru. I pro tuto metodu se měření opakovalo třikrát, aby se dosáhlo vyšší přesnosti. Výsledky se poté dvakrát zprůměrovaly, aby se získala pouze jedna hodnota odražené teploty. Z výsledků, viz tabulka č. 3, jsou patrné obrovské rozdíly teplot maximální a minimální hranice. To je způsobené umístěním tepelné spirály, která není přímo ve středu, ale u stěny válce. Proto část válce s topnou spirálou vykazuje vysokou teplotu a směrem od ní válec značně chladne, viz graf.



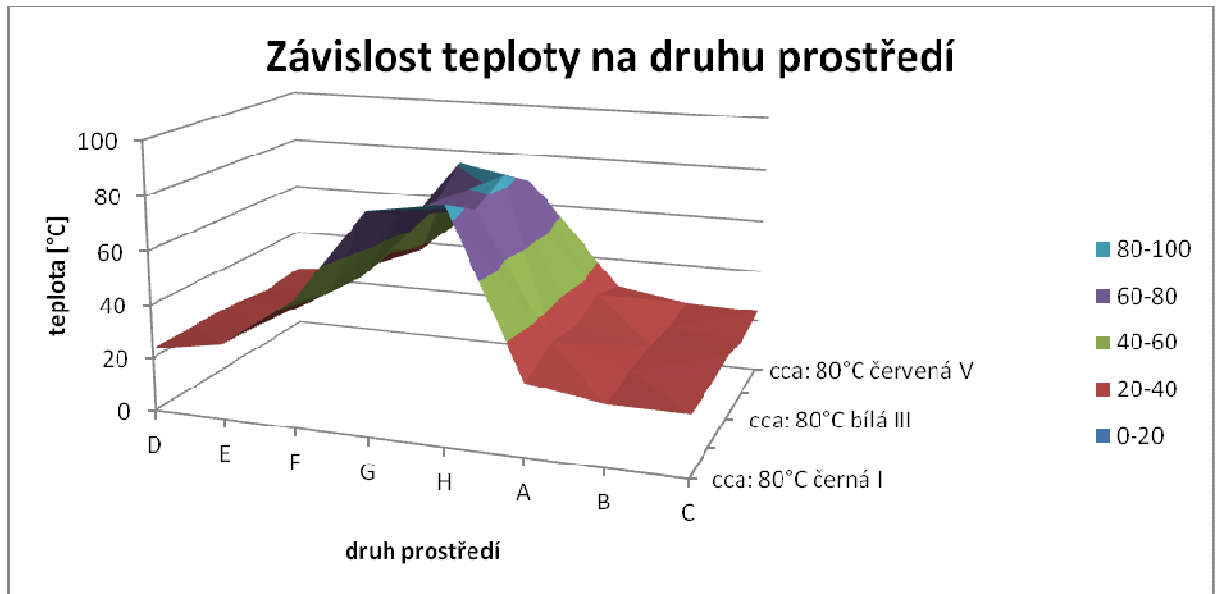
Obr. 10.5.4.1 Minimální oblast teploty – metoda přímého odrazu



Obr. 10.5.4.2 Maximální oblast teploty – metoda přímého odrazu

min. oblast t [°C]	max. oblast t [°C]	průměr	průměr
18,2	106	62,1	62,116
18,1	106	62,05	
18,4	106	62,2	

Tab. 10.5.4.3 Seznam teplot měření – metoda přímého odrazu



Graf 10.5.4.4 Intenzita teploty ve válci

10.5.5 Vyhodnocení

V závěru se zaznamenala pro každou metodu vždy jedna výsledná hodnota odražené teploty. Poté se tyto teploty nastavily postupně do kamery. Díky vlastnosti, která umožňuje přímé nastavení odražené teploty RTC a automatické vypočtení výsledné teploty se získaly tři hodnoty teplot. Tyto teploty jsou konečné výsledky jednotlivých metod měření. Po srovnání těchto teplot s teplotou získanou termočlánkem je patrné, která metoda byla nepřesnější a naopak, která byla přesná nejméně.

odražená teplota	výsledná teplota	skutečná hodnota (termočlánek)
27,4	38,4	37,7
23,416	37,9	
62,116	36,2	

Tab. 10.5.5 Seznam výsledných teplot měření

Závěr

Cílem této práce bylo popsat a vysvětlit princip bezdotykové metody měření teplotních polí.

Teoretická část práce dává ucelený nadhled nad problematikou, shrnuje bezdotykové měření teplot a jasně popisuje praktickou metodiku měření jednotlivými způsoby.

V praktické části bylo úkolem zjistit přesnost měření teplotních polí na zvoleném příkladu - tomto případě na asynchronním motoru. Bylo provedeno několik srovnávacích metod, které ukázaly různou míru přesnosti. Jako nejméně přesná se ukázala metoda přímého odrazu, kdy docházelo vlivem vysokých rozdílů teplot mezi minimální a maximální oblastí ke vzniku nejistot. Ty následně zapříčinily odklon výsledné teploty o až 1,5 °C od skutečné hodnoty. Naopak měření, u kterého míra teploty nejvíce odpovídala skutečné hodnotě, bylo uskutečněno za pomoci uměle vytvořeného Lambertova zářiče s více zmačkanou hliníkovou fólií. Zde byl odklon od skutečné teploty pouze 0,2 °C.

Hlavní problém, který se vyskytl při praktickém měření, úzce souvisí s českou národní normou ISO 18434-1 příloha A. Tato norma uvádí náhradu Lambertova zářiče, v podobě zmačkané hliníkové fólie. Norma ovšem neudává při jaké míře zmačkání hliníkové fólie má zářič vlastnosti replikující Lambertův zářič. I takto na první pohled zanedbatelný problém se v některých měřeních může stát hlavním aspektem vzniku chyby.

Bezdotykové snímání teplotních polí disponuje velkou výhodou v měření povrchových teplot. Lze měřit pohybující se, špatně dostupné a vzdálené objekty. To vše v krátkém časovém intervalu a obrovské škále teplot. Z těchto důvodů se tato metoda stále více využívá v průmyslových odvětvích. Další neopomenutelnou výhodou, jenž IR kamery umožňují je maticové zobrazování měřených ploch. Díky této vlastnosti termokamer, je možné sledovat řadu důležitých technologických procesů. Všechny výhody jsou však závislé na striktním dodržování souvisejících zákonů a předpisů, bez kterých by docházelo k šíření nejistot.

11 Použitá literatura

- [1] QVEST, Měřicí a přístrojová technika. Dostupné z WWW:
<<http://www.qtest.cz/bezdotykove-teplomery/bezdotykove-mereni-teploty.htm>>
- [2] Ing. LANGHAMMER, Tomáš. Měření a přenos teplotních polí na elektrický signál. Měření neelektrických veličin. 2013, 32s.
- [3] Ing. VAVŘIČKA Roman. Dostupné z WWW:
<<http://utp.fs.cvut.cz/vz/clanky/104.pdf>>
- [4] ELEKTRO, časopis pro elektrotechniku. Dostupné z WWW:
<http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=26549>
- [5] FUKA Miloš, Bakalářská práce. Dostupná z WWW:
<http://theses.cz/id/yaun6l/bakalarska_prace_Fuka.pdf>
- [6] TERMOGRAM, termokamery FLIR. Dostupné z WWW:
<<http://www.termogram.cz/prehled-rady-flir-B6x0>>
- [7] SVOBODA Stanislav, Bakalářská práce. Dostupné z WWW:
<<https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/9413/BP%20-%20Termovize%20a%20jeji%20vyuziti%20v%20diagnostice.pdf?sequence=1>>
- [8] PRO REVIZE, termokamery v praxi. Dostupné z WWW:
<<http://www.prorevize.cz/termodiagnostika/210-ir-teplomery-v-praxi>>
- [9] WIKIPEDIA, absolutně černé těleso. Dostupné z WWW:
<http://cs.wikipedia.org/wiki/Absolutn%C4%9B_%C4%8Dern%C3%A9_t%C4%9Bleso>
- [10] MERENDA Petr, Bakalářská práce. Dostupné z WWW:
<https://dspace.vutbr.cz/xmlui/bitstream/handle/11012/17708/bakalarka_merenda.pdf?sequence=1>
- [11] Bc. BRZOBOHATÝ Tomáš, Diplomová práce. Dostupné z WWW:
<<https://dspace.vutbr.cz/xmlui/bitstream/handle/11012/12539/DP%20Brzobohaty.pdf?sequence=1>>
- [12] ŠVESTA Jiří, Bakalářská práce. Dostupné z WWW:
<https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/167/Bakal%C3%A1%C5%99sk%C3%A1_pr%C3%A1ce_J.%C5%A0vestka.pdf?sequence=1>
- [13] FYZIKA, Gymnázium Sušice. Dostupné z WWW:
<http://fyzika.gymsusice.cz/web/data/texty/Zareni_cerneho_telesa.pdf>
- [14] KREIDL Marcel, Měření teploty - senzory a měřící obvody. 1. Vydání. Praha: BEN-Technická literatura, 14-01-2005. 239 s. ISBN 80-7300-145-4.

- [15] WIKISKRIPTA, Radiometrické veličiny. Dostupné z WWW:
<http://www.wikiskripta.eu/index.php/Radiometrick%C3%A9_veli%C4%8Diny>
- [16] WIKISKRIPTA, záření černého tělesa. Dostupné z WWW:
<http://www.wikiskripta.eu/index.php/Z%C3%A1%C5%99en%C3%AD_%C4%8Der%C3%A9ho_t%C4%Blesa>
- [17] SVARIOINFO, magazín praktického svařování. Dostupné z WWW:
<<http://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cisloclanku=2008091502>>
- [18] BIOMOLECULES, učební text. Dostupné z WWW:
<http://biomolecules.mff.cuni.cz/files/courses/Fotometrie_a_radiometrie.pdf>
- [19] VIZUALIZAČNÍ A OPTICKÉ MĚŘÍCÍ METODY, učební texty. Dostupné z WWW:
<<http://ottp.fme.vutbr.cz/~pavelek/optika/0200.htm>>
- [20] TERMOKAMERY, princip a funkce. Dostupné z WWW:
<<http://www.termokamera.cz/princip-a-funkce/>>
- [21] WIKIPEDIA, polovodič. Dostupné z WWW:
<<http://cs.wikipedia.org/wiki/Polovodi%C4%8D>>
- [22] SZERUDA, měření teploty poměrovým pyrometrem. Dostupné z WWW:
<<http://www.szeruda.cz/attachments/article/80/M%C4%9B%C5%99en%C3%AD%20teploty%20pom%C4%9Brov%C3%BDm%20pyrometrem.pdf>>
- [23] SENZORY, pasivní infračervený sensor. Dostupné z WWW:
<<http://senzory.aspone.cz/pir.htm>>
- [24] ENCIKLOPEDIE FYZIKY, Radiometrické veličiny. Dostupné z WWW:
<<http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/536-radiometricke-veliciny>>
- [25] ENERGETIKA, elektromagnetické spektrum. Dostupné z WWW:
<<http://energetika.tzb-info.cz/vytapime-plynem/5802-preventivni-opatreni-pro-spravnou-funkci-plynovych-zarizeni-ii>>
- [26] WIKIPEDIE, Wienův posunovací zákon. Dostupné z WWW:
<http://cs.wikipedia.org/wiki/Wien%C5%AFv_posunovac%C3%AD_z%C3%A1kon>
- [27] ALDEBARAN, Planckova konstanta. Dostupné z WWW:
<http://www.aldebaran.cz/lab/planck/2_cteni_2.php>
- [28] POLOVODIČE, základní pojmy a vlastnosti. Dostupné z WWW:
<<http://www.bakal06.chytrak.cz/21---Polovodice.pdf>>
- [29] Bc. SUMARA Jan, Diplomová práce. Dostupné z WWW:
<http://www.centrumtermografie.cz/wp-content/uploads/2012/07/termografie_elektroenergetika.pdf>

- [30] PROFESIONÁLNÍ TERMOKAMERY, Měření stupně emissivity a teplot odraženého záření. Dostupné z WWW:
<<http://www.termokamera.com/testo/0/0/2/16>>