



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV PROCESNÍHO A EKOLOGICKÉHO
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF PROCESS AND ENVIRONMENTAL
ENGINEERING

BEZKONTAKTNÍ METODY MĚŘENÍ TEPLoty V EKOLOGICKÉM INŽENÝRSTVÍ

CONTACTLESS METHODS TEMPERATURE OF MEASURING ENVIRONMENTAL-ENGINEER
QUANTITIES

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. TOMÁŠ VRÁNA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. ZDENĚK NĚMEC, CSc.

BRNO 2010

Abstrakt

Cílem mé diplomové práce je seznámení s problematikou bezkontaktního měření teploty. Po rozdělení druhů pyrometrů a popisu jejich částí jsem se zabýval kalibrací pyrometru a chyb při měření. Pro porovnání dotykového a bezdotykového teploměru jsem použil měření na modelu.

Klíčová slova:

bezkontaktní měření teploty, pyrometr

Abstract

The objective my diplom work is acquaint with problems non-contact temperature measuring. After division kinds pyrometers and description their part I'm deal with calibration pyrometer and errors at measuring. To comparing contacting and non-contacting thermometer I'm used measuring on model.

Keywords:

non-contact temperature measuring, pyrometer

VRÁNA, T. *Bezkontaktní metody měření teploty v ekologickém inženýrství*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 48 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Zdeněk Němec, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Bezkontaktní metody měření teploty v ekologickém inženýrství** vypracoval samostatně za použití pramenů uvedených v přehledu literatury.

V Brně dne

Podpis

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu diplomové práce Ing. Zdeňku Němcovi, CSc. za odborné vedení, rady a připomínky, které mi poskytl během řešení diplomové práce

Obsah

1	Úvod.....	10
2	Historie.....	11
3	Zákony záření.....	12
3.1	Planckův zákon.....	12
3.2	Wienův posunovací zákon.....	12
3.3	Stefan-Boltzmannův zákon.....	13
3.4	Černé těleso.....	13
4	Pyrometry.....	15
4.1	Úhrnné pyrometry.....	15
4.2	Pásmové pyrometry.....	16
4.3	Poměrové radiační teploměry.....	17
4.4	Optické pyrometry (jasové).....	18
4.5	Termovize.....	19
5	Části pyrometru.....	21
5.1	Optický systém pyrometru.....	22
5.2	Detektory.....	22
5.2.1	<i>Termální detektory</i>	22
5.2.2	<i>Fotonové detektory</i>	23
5.2.3	<i>Pyroelektrické detektory</i>	23
5.3	Elektronika.....	24
6	Kalibrace.....	25
6.1	Dutina jako absolutně černé těleso.....	25
6.2	Žárovky s wolframovým vláknem.....	26
6.3	Referenční pyrometr.....	26
7	Nejistoty a chyby metod bezdotykového měření teploty.....	27
7.1	Nejistota měření způsobená neznalostí správné hodnoty emisivity povrchu tělesa..	27
7.2	Nejistota měření způsobená neznalostí správné hodnoty propustnosti prostředí mezi čidlem a měřeným objektem.....	28
7.3	Nejistota měření způsobená nepřesnou korekcí odraženého záření z okolního prostředí na měřený objekt.....	28
7.4	Nejistota měření způsobená špatným zaměřením měřeného objektu.....	28
8	Výběr pyrometru.....	29
8.1	Propustnost atmosféry.....	29

8.2	Materiál měřeného objektu	29
8.3	Teplotní rozsah	29
8.4	Pracovní prostředí.....	30
9	Praktické využití v procesním inženýrství	31
9.1	Kontrola elektrických zařízení.....	31
9.2	Kontrola mechanických zařízení	32
9.3	Kontrola stavu žáruvzdorných hmot a izolací	32
9.4	Kontrola výměníků tepla	32
10	Popis měřících přístrojů	34
10.1	Ruční bezdotykový teploměr Fluke 574	34
10.2	Testo 935.....	35
10.3	Retigo M20	36
11	Postup měření.....	37
11.1	Zjištění emisivity	37
11.2	Index zaostření	37
11.3	Instalace zaměření.....	38
11.4	Vlastní měření	38
12	Výsledky měření	39
12.1	Měření 1	39
12.2	Měření 2	41
12.3	Měření 3	43
12.4	Měření 4	45
13	Vyhodnocení výsledků	46
14	Závěr.....	47
15	Seznam použité literatury	48

Seznam použitých symbolů

symbol	význam	jednotka
B	Wienova konstanta ($b = 2898 \text{ m.K}$)	[m.K]
c	rychlost světla ($c = 299792485 \text{ m.s}^{-1}$)	[m.s ⁻¹]
c_2	druhá vyzařovací konstanta ($c_2=1,44 \cdot 10^{-2} \text{ m.K}$)	[m.K]
E	hustota zářivého toku	[W.m ⁻²]
h	Planckova konstanta ($h = 6,6260755 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$)	[J.s]
k	Boltzmannova konstanta ($k = 1,380658 \cdot 10^{-23} \text{ J. kg}^{-1}$)	[J. kg ⁻¹]
$M_{0\lambda}$	spektrální hustota vyzařování	[W.m ⁻³]
T	termodynamická teplota tělesa	[K]
T_P	teplota udaná pyrometrem	[K]
T_S	skutečná teplota	[K]
α	absorptivita	[-]
σ	Stefanova-Boltzmannova konstanta ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W. m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$)	[W. m ⁻² .K ⁻⁴]
λ	vlnová délka záření	[m]
λ_{\max}	vlnová délka maxima vyzařování	[m]
ε	spektrální emisivita měřeného objektu	[-]

1 Úvod

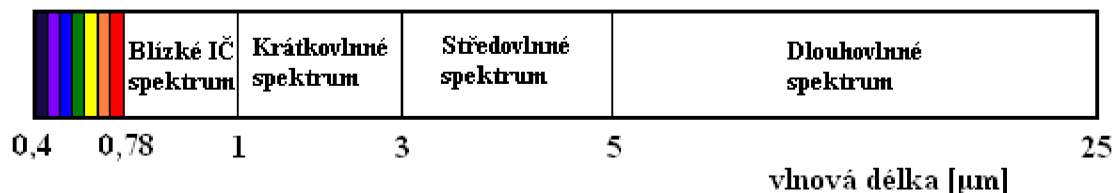
Teplota je jedním z nejdůležitějších stavových ukazatelů pro řízení téměř všech technologických výrobních procesů a její přesné a optimální monitorování je klíčem k zajištění stálé jakosti mnoha finálních produktů i k dosažení bezpečnosti, hospodárnosti a vysoké produktivity výrobních procesů. Pro průmyslové měření teploty se v poslední době stále častěji používají infračervené pyrometry umožňující měřit teplotu v širokém rozmezí přesně, bezdotykově a v reálném čase i na těžko přístupných místech nebo na rychle se pohybujících objektech. Proto ani nepřekvapuje, že v současné době představují infračervené pyrometry velmi dynamicky rostoucí segment trhu s meziročními přírůstky kolem 15 %.

V oblasti bezdotykového měření teploty se v poslední době dosáhl značný pokrok, a to zejména díky pokroku v elektronice a optice. Přístroje pro bezdotykové měření teploty (pyrometry) nacházely původně uplatnění v takových provozech a aplikacích, kde bylo třeba měřit vysoké teploty a nebylo možno použít dotykový teploměr. Jednalo se zejména o aplikace v metalurgii, chemickém a silikátovém průmyslu (sklářství, cementárny, vápenky, keramický průmysl). V průběhu posledních let se aplikace bezdotykových teploměrů posunula k výrazně nižším teplotám, včetně měření teplot nižších než 0 °C. Nyní se s bezdotykovými teploměry setkáváme v potravinářství, elektronice, průmyslu papírenském, farmaceutickém, textilním, gumárenském, při zpracování plastických hmot apod. Přenosné bezdotykové teploměry nacházejí široké uplatnění při detekci tepelných ztrát a poruch, při kontrole potrubních systémů, nádrží apod.

Princip bezdotykového měření teplot spočívá v měření povrchové teploty těles na základě elektromagnetického záření mezi tělesem a senzorem záření v rozmezí vlnové délky od 0,4 μm do 25 μm . Uvedený rozsah pokrývá měření teploty od -40 °C do +10 000°C.

Rozdělení elektromagnetického záření:

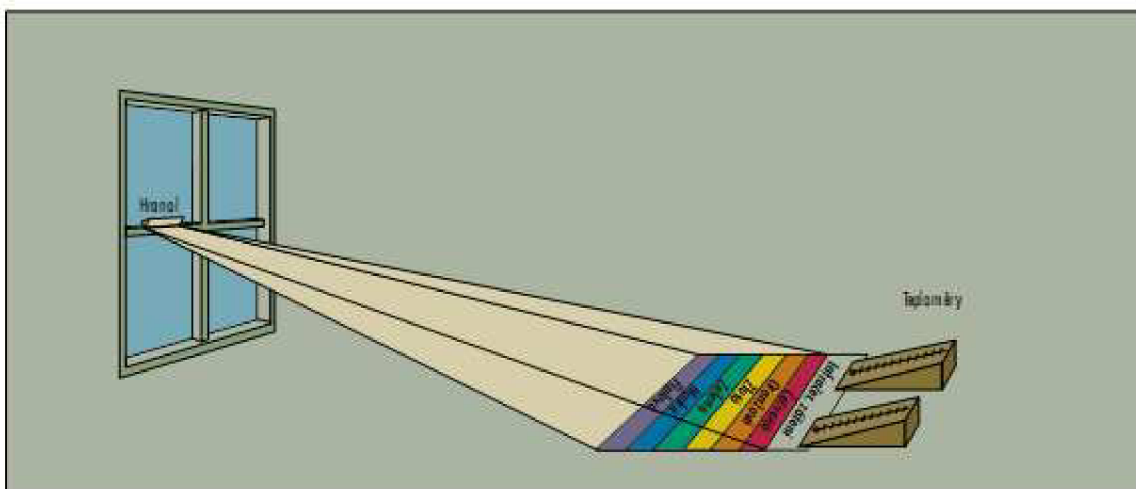
- 0,4 μm - 0,78 μm viditelné spektrum
- 0,78 μm - 1 μm blízkého infračervené spektrum
- 1 μm - 3 μm krátkovlnné infračervené spektrum
- 3 μm - 5 μm středovlnné spektrum
- 5 μm - 25 μm dlouhovlnné spektrum



Obr. 1.1 Schéma elektromagnetického spektra

2 Historie

Frederick William Herschel (1738-1822), vědec a astronom, je znám jako otec hvězdné astronomie. V roce 1800 v Anglii experimentoval se slunečním světlem. Při pozorování Slunce přes barevná skla si Herschel všiml, že tepelný vjem nebyl v souladu s viditelným světlem. To jej vedlo k provedení experimentů se rtuťovými teploměry a skleněnými hranoly a ke správné hypotéze o existenci neviditelných infračervených tepelných vln. Herschel rozložil sluneční záření na spektrum a testoval jeho různé části teploměrem, aby zjistil, jestli některé barvy nesou větší množství tepla než jiné. Zjistil, že když teploměr posouvá směrem k červené části spektra, teplota roste. Přitom zkusil posunout teploměr až za konec červené složky spektra a zjistit, zdali zde vymizí tepelný efekt. Místo toho teplota vzrostla výše než v kterémkoli místě před koncem červené složky spektra. Tato oblast byla nazvána infračervená, což znamená „pod červenou“. [8]



Obr. 2-1 Herschelův experiment

V roce 1901 byl podán první patent týkající se radiační termometrie. Přístroj používal termoelektrické čidlo, dával elektrický výstupní signál a byl schopen pracovat bez obsluhy. V roce 1931 byly na trh uvedeny první komerčně dostupné radiační termometry. Tyto přístroje byly široce používány k zaznamenávání a řízení průmyslových procesů. První moderní radiační teploměry byly dostupné až po druhé světové válce. Prvními infračervenými kvantovými detektory, široce používanými v průmyslové radiační termometrii, byly fotodetektory se selenem olovnatým, a byly původně vyvinuty pro vojenské účely. Také jiné typy kvantových detektorů byly původně vytvořeny pro vojenské aplikace a nyní jsou široce užívané v radiační termometrii a mají rozsáhlé použití u přístrojů řídicích procesy. [8]

Infračervené teploměry mají v současné době široké použití při měření teploty v průmyslu a v laboratořích. Bezdotykovým teplotním čidlem mohou být sledovány objekty, ke kterým je obtížné se přiblížit z důvodu extrémních podmínek prostředí. Dále najdou své použití například ve sklářském, chemickém, farmaceutickém a potravinářském průmyslu, kde se produkty nesmí kontaminovat dotykovým senzorem. Bezdotykové teploměry je možno použít u materiálů horkých, pohybujiících se nebo nedostupných nebo není-li žádoucí, aby materiál byl poškozen, poškrábán, nebo roztržen dotykovým teploměrem.

3 Zákony záření

Bezdotykové měření teploty je velmi jednoduchý, rychlý a přesný způsob měření teploty. Avšak pro správné a přesné stanovení měřené veličiny je zapotřebí znalosti základních fyzikálních zákonů.

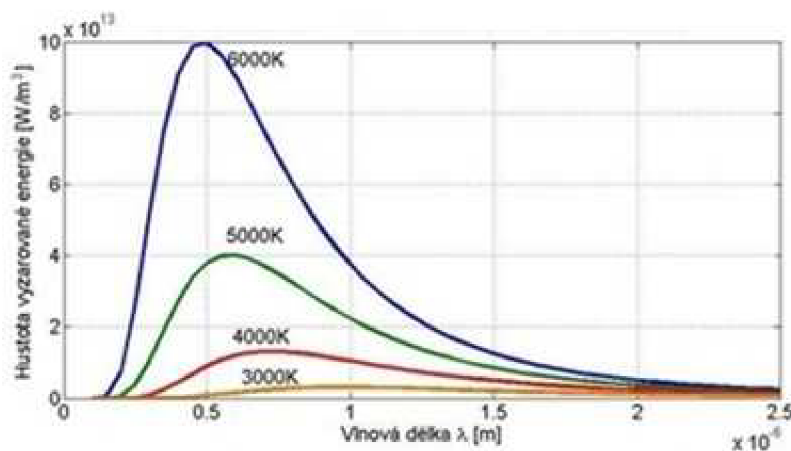
3.1 Planckův zákon

Vyjadřuje závislost spektrální hustoty vyzařování černého tělesa na vlnové délce a teplotě podle vztahu:

$$M_{0\lambda} = c^2 h \frac{2\pi\lambda^{-5}}{e^{\frac{ch}{\lambda kT}} - 1} \quad (3.1)$$

Kde

$M_{0\lambda}$	spektrální hustota vyzařování [$\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$]
c	rychlost světla [$c = 299792485 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$]
h	Planckova konstanta [$h = 6,6260755\cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$]
λ	vlnová délka záření [m]
k	Boltzmannova konstanta [$k = 1,380658\cdot 10^{-23} \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$]
T	termodynamická teplota černého tělesa [K]



Obr. 3-1 Planckův zákon

3.2 Wienův posunovací zákon

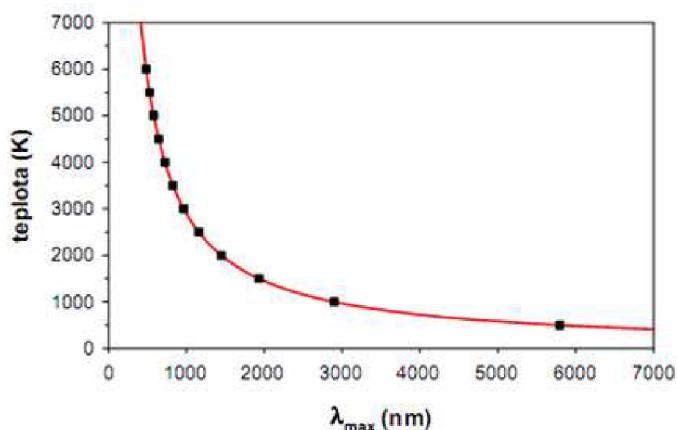
Fyzikální zákon, který konstatuje, že v záření absolutně černého tělesa je maximální energie vyzařována na vlnové délce, která se s rostoucí termodynamickou teplotou snižuje (tzn. čím teplejší je těleso, tím vyzařuje na kratších vlnových délkách, tj. vyšších frekvencích).

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T} \quad (3.2)$$

Kde

λ_{\max}	vlnová délka maxima vyzařování [m]
T	teplota tělesa [K]
B	Wienova konstanta [b = 2898 m.K]

Znalost tohoto zákona je důležitá pro volbu čidla dle rozsahu měřených teplot.



Obr. 3-2 Wienův posunovací zákon

3.3 Stefan-Boltzmannův zákon

Základním vztahem pro bezdotykové měření teploty je **Stefan-Boltzmannův zákon**. Ten říká, že hustota zářivého toku generovaná z jednotky plochy zdroje je na všech vlnových délkách úměrná čtvrté mocnině absolutní teploty tělesa.

$$E = \sigma \cdot T^4 \quad (3.3)$$

Kde

E	hustota zářivého toku [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]
σ	Stefanova-Boltzmannova konstanta [$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$]
T	teplota tělesa [K]

3.4 Černé těleso

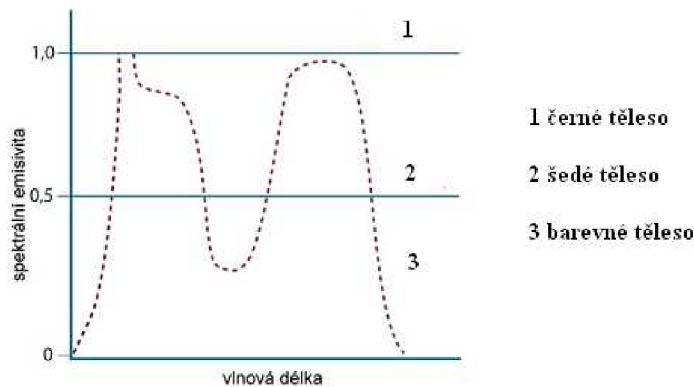
Těžištěm teorie radiační termometrie je koncepce absolutně černého tělesa. V roce 1860 definoval Kirchhoff absolutně černé těleso jako povrch, který záření neodráží ani nepropouští, ale pouze veškeré dopadající záření absorbuje, nezávisle na jeho směru a vlnové délce. U reálného tělesa se podíl pohlceného záření nazývá *absorptivita* (α). Pro absolutně černé těleso je absorptivita rovna 1,0. Pro reálná tělesa je absorpce částí tepelné radiace dopadající na povrch, a platí, že $0 \leq \alpha \leq 1$. [1]

Absolutně černé těleso nejenom pohlcuje veškeré dopadající záření, ale je také dokonale vyzařujícím tělesem. Aby popsal vyzařovací schopnosti povrchu ve srovnání s vyzařováním absolutně černého tělesa, definoval Kirchhoff *emisivitu* (ϵ) reálného povrchu jako poměr tepelné radiace při dané teplotě a radiace absolutně černého tělesa při stejné

teplotě a za stejných spektrálních a směrových podmínek. Tato hodnota musí být zvažována při měření teploty bezdotykovým teploměrem.

Ačkoliv některé povrchy se svými vlastnostmi podobají absolutně černému tělesu, všechny reálné objekty a povrchy mají emisivitu menší než 1. Reálné objekty jsou buď *šedá tělesa*, jejichž emisivita nezávisí na vlnové délce záření a tělesa *barevná*, u nichž emisivita závisí na vlnové délce záření. Většina organických objektů jsou tělesa šedá, s emisivitou 0,90 – 0,95. [1]

Koncept absolutně černého tělesa je důležitý, protože ukazuje, že energie vyzařovaná absolutně černým tělesem závisí na teplotě. Při použití bezdotykového teploměru měřícího energii vyzařovanou z objektu je třeba vzít v úvahu emisivitu. Např. objekt s emisivitou 0,6 vyzařuje jen 60 % energie ve srovnání s absolutně černým tělesem. Pokud se nezavede tato korekce, bude načtena hodnota teploty nižší, než je aktuální teplota. [8]



Obr. 3-3 Závislost emisivity na vlnové délce

4 Pyrometry

4.1 Úhrnné pyrometry

Úhrnné pyrometry se označují také jako radiační pyrometry, celkové, integrační nebo ardometry. Využívají tepelného záření ve velké oblasti vlnových délek, kterým je omezen pouze absorpční schopností detektoru a propustností optiky pyrometru. Emisivita nečerných zářičů je silně závislá na jakosti povrchu tělesa, materiálu a teplotě. Protože korekce údaje pyrometru je velmi obtížná, používají radiační pyrometry k měření teploty pouze černé zářiče, popř. zářiče jim blízké. [10]

Tepelné záření, vysílané měřeným objektem, se soustřeďuje optickým systémem na snímač radiačního pyrometru. Optický systém bývá sestaven z čoček nebo zrcadel. Snímačem bývá nejčastěji baterie termočlánků, bolometr nebo termistor. Povrch snímače bývá začerněn. Přijímač záření i optika musejí být pokud možno nezávislé na vlnové délce. Tato podmínka je splněna jak pro termočlánek, tak i pro bolometr. Volba optiky se řídí měřicím rozsahem, který bývá standardně 600 až 2000 °C a 0 až 1000 °C. V rozmezí nižších teplot je lepší pracovat jen se zrcadlovou optikou s kovovým povrchem zrcadel. Vstupní okénko takového pyrometru bývá chráněno před prachem tenkou fólií z umělé hmoty, která propouští infračervené záření.

Všechny radiační pyrometry pracují s malými chybami pouze v případech, kdy emisivita se blíží k 1. Tuto podmínku splňují dobře uzavřené prostory, objekty bez lesku apod. Při měření se často používají uzavřené keramické trubice, které jsou vloženy uzavřeným koncem do měřeného prostředí (např. pece). Na dno trubky se pak zaměří pyrometr. Aby pyrometr měřil teplotu zářiče správně, musí být zaručeno, že na přijímač záření dopadají jen tepelné paprsky zářiče. Zdrojem častých chyb je rušivě působící denní světlo; např. těleso ozářené sluncem nelze měřit. Měření je nezávislé na vzdálenosti přístroje od měřeného tělesa, pokud obraz tělesa kryje obrys přijímače záření. Kontrola se provádí vizuálně okulárem. Obsahuje-li atmosféra mezi objektem a radiačním pyrometrem složky absorbující infračervené záření, dochází k ovlivnění výstupního údaje. [10]

Radiační pyrometry jsou vyráběny v provedení pro ruční měření, jako přístroje přenosné nebo pro stacionární použití. Při stacionárním použití je nutné v hutních provozech tyto pyrometry chladit vodou nebo vzduchem.

K převodu mezi teplotou měřenou a skutečnou slouží vztah:

$$T_S = \frac{T_P}{\sqrt[4]{\epsilon}} \quad (4.1)$$

Kde

T_S	skutečná teplota [K]
T_P	teplota udaná pyrometrem [K]
ϵ	poměrná emise úhrnného pyrometru [-]

4.2 Pásmové pyrometry

Pásmové pyrometry využívají určitou část spektra tepelného záření. Mezi pásmové pyrometry se řadí většina dnes vyráběných pyrometrů, které využívají fotoelektrický detektor. Provedení pásmového pyrometru je závislé na mnoha okolnostech (na rozmezí měřené teploty, na vlastnostech měřeného objektu, na atmosféře, která je mezi objektem a pyrometrem). Pásmo vhodných vlnových délek, se kterými pyrometr pracuje, závisí na citlivosti detektoru, záření a optice použitých filtrů. Detektory se volí takové, aby jejich citlivost ležela mimo absorpční pásmo vyskytujícího se plynu. Jako detektor se používá fotonka, fotočlánek, fotodioda, fototranzistor a fotoodpor. [10]

Energie vyzařovaná povrchem měřeného objektu prochází optickým systémem a dopadá na detektor, který má požadovanou spektrální charakteristiku. Optický systém má pevnou ohniskovou vzdálenost. Ohnisková vzdálenost objektivu určuje velikost snímané plochy, kterou detektor na měřeném objektu vidí, a tím se definuje zorné pole přístroje. Některé pásmové pyrometry mají vestavěné zdroje laserového záření, které usnadňují zaměření tím, že na měřeném objektu vizuálně vyznačí snímanou plochu.



Obr. 4-1 Schéma pásmového pyrometru

Fotoelektrický detektor převádí tepelné záření na elektrické napětí, proud nebo odpor. Výstupní signál je zpracován v elektronické jednotce pyrometru. Signál se v A/D převodníku digitalizuje a zpracovává mikroprocesorem, který podle vloženého programu zajišťuje různé korekce a matematické úpravy měřených dat a jejich ukládání do paměti. Většina pásmových pyrometrů má displej, na kterém je možno číst naměřené hodnoty v požadovaných jednotkách nebo min. a max. hodnoty teploty v jistém časovém intervalu, jejich rozdíl a průměrné hodnoty. [10]

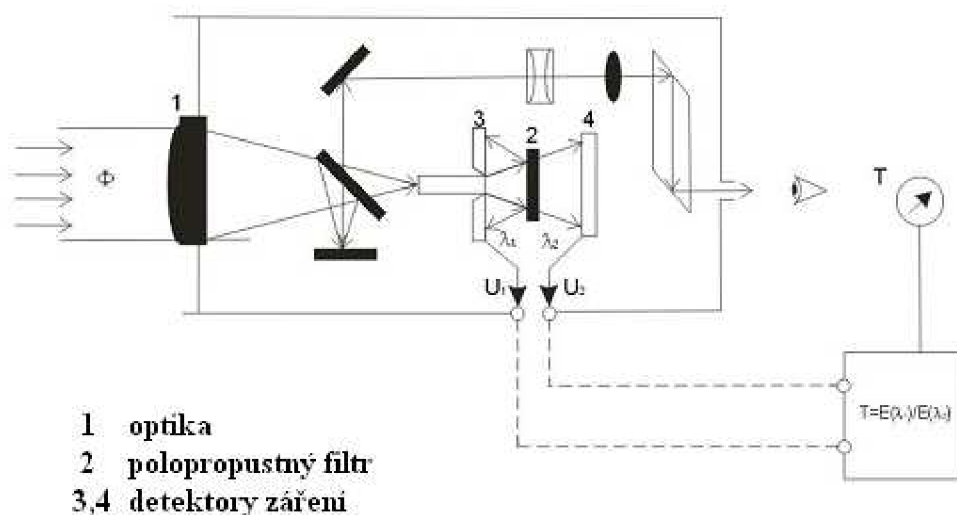
Pásmové pyrometry jsou kalibrovány na teploty absolutně černého tělesa, proto je potřeba brát v úvahu skutečnou hodnotu emisivity měřeného tělesa, která je při měření zjišťována. To se provádí pomocí korekce emisivity na obslužné klávesnici. Hlavní pole použití pásmových pyrometrů je tam, kde se mezi měřeným objektem a pyrometrem náhodně vyskytuje plyn nebo vodní pára v oblasti infračerveného záření, jako např. CO₂, vodní pára apod.

4.3 Poměrové radiační teploměry

Tyto přístroje, které se také nazývají dvoubarevné radiační teploměry, měří energii vyzařovanou objektem na dvou úzkých pásmech vlnových délek a vypočítávají poměr těchto energií, který je funkcí teploty objektu.

Měřená teplota závisí jen na poměru dvou měřených energií, a nikoliv na jejich absolutních hodnotách. Žádný parametr, který ovlivní obě pásma stejně, nebude mít vliv na výsledek měření teploty. Poměrový teploměr může eliminovat chyby v měření teploty způsobené vlivem změn emisivity, povrchovou úpravou a chyby, způsobené absorpcí záření např. vodní parou nebo jinými materiály, které se vyskytují mezi teploměrem a měřeným objektem. Tyto dynamické změny musí ovlivňovat detekci stejným způsobem na obou použitých vlnových délkách. Emisivita všech reálných materiálů se nemění na všech vlnových délkách stejně. Materiály, pro které platí, že se emisivita mění stejně na všech vlnových délkách, se nazývají šedá tělesa.

Dvoubarevné nebo mnohobarevné teploměry by měly mít své využití v těch aplikacích, kde je důležitá nejenom opakovatelnost, ale i přesnost měření anebo tam, kde měřený objekt podstupuje fyzikální nebo chemické změny. Poměrové teploměry pokrývají široké rozmezí teplot. Typické komerčně dostupné přístroje mají rozmezí mezi 900 a 3000°C a 50 až 3700°C.



Obr. 4-2 Schéma poměrového radiačního teploměru

Princip měření: pomocnou optikou se záření soustřeďuje na polopropustný filtr, který zachová pouze tepelné záření o vlnových délkách λ_1 a λ_2 . Zároveň toto záření filtr oddělí, takže může být detekováno samostatnými detektory. Tímto vzniknou dva elektrické výstupní signály U_1, U_2 , jejichž poměrem je měřená teplota.

4.4 Optické pyrometry (jasové)

Optické pyrometry měří radiaci v úzkém pásmu vlnových délek tepelného záření. Nejstarší přístroje používaly principu měření optického jasu na viditelných vlnových délkách kolem $0,65 \mu\text{m}$ (červená). Tyto přístroje se také nazývají jednobarevné pyrometry. Optické pyrometry jsou nyní dostupné pro měření energie na vlnových délkách přesahujících až do oblasti infračervené.

Uživatel nasměruje pyrometr na měřený objekt. Ve stejný okamžik vidí vnitřní žhavené vlákno přístroje v okuláru přístroje. Uživatel mění velikost příkonu, který žhaví vlákno, a tím mění barvu vlákna, až odpovídá barvě měřeného objektu. Teplota měřeného objektu se odvozuje od příkonu elektrické energie žhavicího vlákna. V jiném uspořádání se udržuje konstantní žhavicí proud vlákna a mění se jas měřeného objektu za pomoci otočné optické clony, která absorbuje energii. Teplota objektu se odvozuje od množství energie, které je absorbováno clonou. [8]

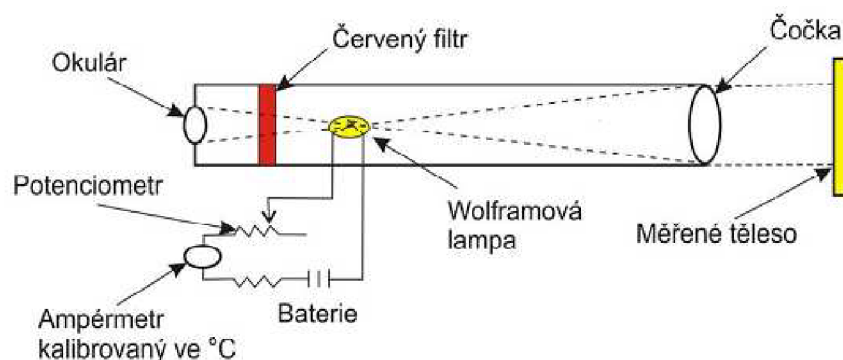
Dostupné jsou i automatické optické pyrometry, které jsou citlivé pro měření v infračerveném pásmu. Tyto přístroje používají místo lidského oka elektrický radiční detektor. Tento přístroj pracuje na principu srovnání energie záření vyzařované objektem s energií vyzařovanou vnitřním referenčním zdrojem. Výstupní hodnota přístroje je úměrná rozdílu ve vyzařování mezi měřeným objektem a referenčním zdrojem. [8]

Pro skutečnou teplotu platí vztah:

$$\frac{1}{T_s} = \frac{1}{T_p} + \frac{\lambda}{c_2} \cdot \ln \varepsilon_\lambda \quad (4.2)$$

Kde

T_s	skutečná teplota [K]
T_p	teplota na stupnici jasového pyrometru [K]
λ	použitá vlnová délka [m]
c_2	druhá vyzařovací konstanta [$c_2=1,44 \cdot 10^{-2} \text{ m.K}$]
ε	spektrální emisivita měřeného objektu [-]

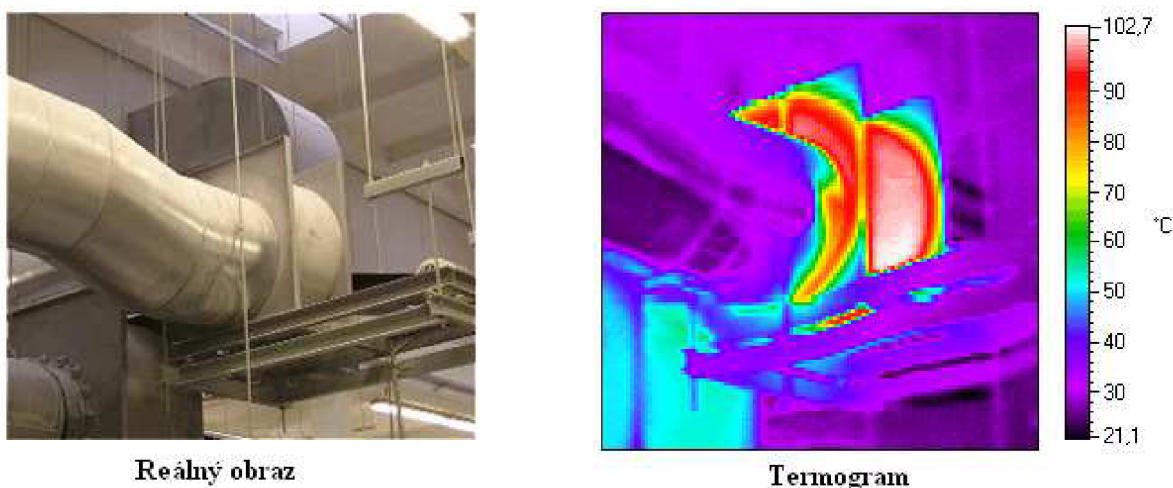


Obr. 4-3 Schéma jasového pyrometru

4.5 Termovize

Termovize je infračervený systém přenosu záznamu pomocí televizního signálu, umožňující zobrazení rozdělení teplot povrchu pozorovaného objektu. Termovizní systém pracuje velmi rychle, teplotní pole je snímáno speciální termovizní kamerou a zobrazuje se na obrazovce speciálního monitoru ve velikosti celého sledovaného objektu, což umožňuje lépe sledovat souvislosti pozorovaných jevů, případně zkoumat dynamický vývoj teplotního pole na celém objektu. [10]

Monitory termovizních systémů zobrazí teplotní pole měřeného povrchu na obrazovce pomocí termogramu. Jednotlivým rozmezím teplot jsou přiřazovány různé barvy. Po stranách obrazu jsou pak stupnice umožňující identifikaci konkrétních teplot v obraze. Při určování teplot je nutné znát a respektovat emisivitu objektu v daném místě, podobně jako u pyrometrů.



Obr. 4-4 Příklad zobrazení termogramu

V současné době se používají detektory kvantové a pyroelektrické. *Kvantové detektory* při dopadu infračerveného záření zvyšují svoji elektrickou vodivost. Jsou selektivní a vyžadují chlazení na nízkou teplotu. Nejčastěji se používá antimonit india (InSb) chlazený kapalným dusíkem. *Pyroelektrické detektory* se při dopadu infračerveného záření ohřívají a vzniká v nich elektrický náboj. Jsou neselektivní a nevyžadují chlazení.

Dalším důležitým prvkem je *snímací systém*:

- s postupným rozkladem obrazu
- přímo zobrazující

Snímací systémy s postupným rozkladem obrazu jsou používány více. Pracují s opticko-mechanickým nebo elektrickým rozkladem obrazu a kvantovým detektorem. Mezi jejich výhody patří zejména možnost pozorování termogramu i při denním světle, volba kontrastu termogramu ve velkých mezích, stejně jako teplotní rozsah, barevná reprodukce obrazu a možnost záznamu termogramu. [10]

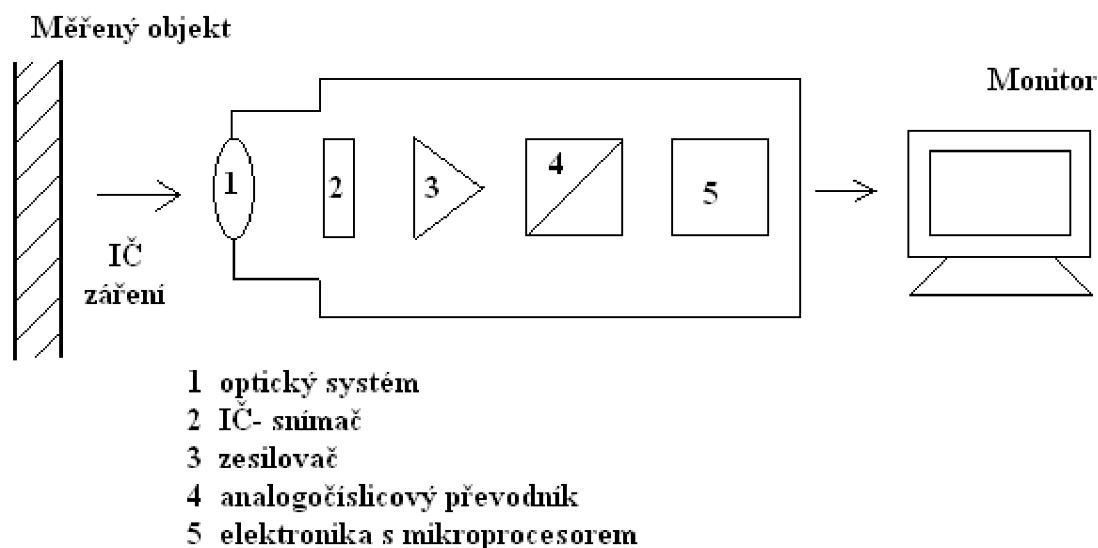
Přímo zobrazující systémy používají velkoplošné pyroelektrické detektory. Na povrchu detektoru se vytváří nábojový obraz úměrný dopadajícímu záření. Jejich použití je omezeno nižší přesností.

Termovize patří mezi nákladná, ale velmi užitečná zařízení pro měření teploty v různých oborech lidské činnosti. Hlavními oblastmi použití termovizního měření jsou: stavebnictví, průmysl, elektrotechnika. V průmyslu se termovize používá zejména pro kontroly:

- kontrola uložení rotačních součástí (ložiska, dopravníky apod.)
- kontrola přetížení motorů, elektromotorů, pohonů a převodovek
- kontrola čerpadel a ventilátorů
- kontrola tepelných vyzdívek
- kontrola tepelných izolací u teplovodů, horkovodů a parovodů
- lokalizace a intenzita poruch u rozvodů tepla
- zjišťování výšky hladiny v zaizolovaných nádobách či nádržích
- testování nových izolačních materiálů

5 Části pyrometru

Zjednodušené blokové uspořádání typického infračerveného pyrometru je na obr. 5-1. Energii vyzařovanou měřeným objektem zachycuje přes optický systém infračervený snímač (detektor) s požadovanou spektrální charakteristikou, který převádí infračervenou energii většinou na měřitelné napětí. Nejčastěji se dnes používají polovodičové snímače na bázi termočlánkových polí. Spektrální citlivost infračerveného snímače ve spojení s předřazeným optickým filtrem, propouštějícím vyzařovanou energii jen v úzkém pásmu kolem požadované vlnové délky, určuje spektrální charakteristiku pyrometru. Výstupní signál detektoru má velmi malou úroveň a musí se zesílit a upravit, aby se z něj získal použitelný údaj o měřené teplotě. Stabilní zesilovač musí rozlišit a zesilovat signály velikosti menší než 1 mV, které odpovídají změnám teploty objektu řádově 1 °C. V moderních infračervených pyrometrech se zesílený signál obvykle v převodníku A/D digitalizuje a dále zpracovává elektronikou s mikroprocesorem, signálovým procesorem apod. Mikroprocesor podle vloženého programu zajišťuje například linearizaci, různé korekce a matematické úpravy měřených dat, ukládání měřených dat do paměti, diagnostiku, kalibraci a kompenzaci vnějších vlivů, převody fyzikálních jednotek apod. [8]



Obr. 5-1 Blokové uspořádání IČ pyrometru

5.1 Optický systém pyrometru

Nedílnou součástí infračerveného pyrometru je jeho optický systém, který určuje velikost snímané neboli měřené plochy, kterou fotocitlivý snímač na měřeném objektu „vidí“ a tím vlastně definuje zorné pole přístroje. Pro posouzení pyrometru je důležitou veličinou zorný úhel, neboli index zaostření pyrometru definovaný jako poměr průměru D snímané plochy na měřeném objektu ke vzdálenosti L měřeného objektu od objektivu pyrometru. Jestliže například ve vzdálenosti 1 200 mm od pyrometru má snímaná plocha na objektu průměr 20 mm, je index zaostření 1 : 60, což odpovídá zornému úhlu asi 1° . V současné době se nabízejí infračervené pyrometry s indexem zaostření v rozpětí od 1 : 2 až přibližně 1 : 300. Čím menší je index zaostření, tím je optický systém pyrometru složitější a nákladnější. Volba velikosti indexu zaostření $D : L$ závisí na velikosti měřeného objektu a na vzdálenosti pyrometru od objektu. Důležité je, aby měřený objekt vyplňoval pokud možno celé zorné pole pyrometru. Jestliže je měřený objekt menší než zorné pole, je údaj pyrometru ovlivněn teplotou pozadí objektu. Pro zajištění správné funkce infračerveného pyrometru se obvykle doporučuje, aby měřený objekt přesahoval velikost zorného pole pyrometru nejméně o 30 až 50 %. U malých objektů, které jsou jen nepatrně větší než zorné pole, může chybné zaostření způsobit značné chyby v měření. [7]

Aby infračervené pyrometry zachytily všechno emitované tepelné záření, musí být zajištěna přímá viditelnost mezi pyrometrem a měřeným objektem a pyrometr musí být na měřený objekt co nejpřesněji zaměřen. Zaměřovací optika většiny nabízených přístrojů dovoluje uživateli hledáčkem, podobně jako u fotoaparátu, požadovanou oblast měřeného objektu vizuálně zaměřit. Některé infračervené pyrometry mají vestavěný laserový zaměřovač, který usnadňuje zaměření tím, že na měřeném objektu vyznačí kruhovou stopou snímanou plochu, což je zvláště výhodné u objektů s tmavým povrchem.

5.2 Detektory

5.2.1 Termální detektory

jsou nejčastěji používanými detektory radiačních teploměrů. Termální detektory vytvářejí výstupní signál, protože jsou zahřívány energií, kterou absorbují. Ve srovnání s jinými typy detektorů mají termální detektory nižší citlivost a jejich výstupní signály jsou méně ovlivněny změnami vlnové délky záření. Rychlost odezvy tepelných detektorů je snižována jejich hmotností. [2]

Teplotní detektory jsou černě natřeny, takže reagují na záření v širokém spektru (širokopásmové detektory). Jsou relativně pomalé, protože musí dosáhnout tepelné rovnováhy kdykoliv se změní teplota měřeného objektu. Mají časové konstanty v řádu sekund i více, i když vrstevové detektory mají odezvu rychlejší.

Termoelektrické baterie se skládají z jednoho nebo více termočlánků zapojených v sérii obvykle radiálně uspořádaných tak, že teplá spojení tvoří malý kruh a chladná spojení jsou

udržována v teplotě okolí. Technicky pokrokové tenkofilmové termočlánky dosahují doby odezvy v rozmezí od 10ms do 15ms. Vícenásobné termoelektrické články také zvyšují intenzitu výstupního signálu a jsou nejlepší volbou pro širokopásmé teploměry. Pokud se používají vícenásobné termoelektrické články, je nutná kompenzace okolní teploty. Termostatem řízená teplota skříňky teploměru se používá, aby se eliminovalo kolísání okolní teploty při práci v nízkých teplotách. [2]



Obr. 5-2 Termočlánek

5.2.2 Fotonové detektory

uvolňují elektrický náboj jako odezvu na dopadající záření. U detektorů se siričkem olovnatým a se selenidem olova se uvolnění náboje měří jako změna odporu. U antimonidu india, křemíku a germania se uvolnění náboje měří jako napěťový výstup. Fotonové detektory mají maximální vlnovou délku, za kterou nedávají odezvu. Maximální citlivost je obvykle na vlnové délce o něco kratší než mezní vlnová délka. Mnoho radiačních teploměrů používá spíše fotonové detektory než tepelné, i když měří na užším pásmu vlnových délek. Je to proto, že v pásmu vhodných frekvencí je citlivost fotonových detektorů $1 \cdot 10^3$ až $1 \cdot 10^5$ vyšší, než je citlivost tepelných detektorů. Doba odezvy fotonových detektorů je v řádu μs . Jsou nestabilní u delších vlnových délek a vyšších teplot. Často se používají u úzkopásmových teploměrů nebo širokopásmových teploměrů pro střední teploty 93 až 427°C, a často jsou vybaveny chlazením. [2]



Obr. 5-3 Fotonka

5.2.3 Pyroelektrické detektory

mění povrchový náboj v závislosti na dopadajícím záření. Když se změní teplota měřeného objektu, nemusí detektor dosáhnout tepelné rovnováhy, protože odpovídá na změny dopadajícího záření. Přicházející záření musí být přerušováno a výstup detektoru se nemůže používat přímo. Přerušovač je rotující závěrka, která má poskytnout raději střídavý než stejnosměrný výstup z čidla. Relativně slabé střídavé signály jsou s výhodou zpracovávány měřicími obvody. Změna detektoru může být měřena pomocí změny náboje kondenzátoru,

kteřá musí být načítána vysokoimpedančním obvodem. Pyroelektrické detektory mají povlaky, které absorbují záření, takže to mohou být širokopásmové detektory. Spektrální odezva může být omezena výběrem materiálu povlaku s vhodnými vlastnostmi. [2]



Obr. 5-4 Pyroelektrický detektor

5.3 Elektronika

Kalibrační křivka výstupu detektoru v závislosti na teplotě je u všech detektorů nelineární, protože rovnice popisující množství záření emitovaného objektem jsou mocninné funkce. Elektronika radiačního teploměru musí zesilovat, regulovat, linearizovat a konvertovat signál na napěťový nebo proudový výstup, který je úměrný teplotě.

Elektronika založená na mikroprocesorech je mnohem lepší než konvenční analogová elektronika, protože poskytuje možnost výpočtů, používaných pro korekci nedokonalosti detektorů, kompenzaci emisivity a dává digitální výstup pro obousměrnou komunikaci mezi teploměrem a PC nebo regulačním systémem. [8]

Nejdokonalejším a nejpřesnějším teplotním převodníkem v tomto teplotním rozsahu je termistor. Avšak výstupní hodnoty termistoru jsou vysoce nelineární a výrazně kolísají od výrobku k výrobku. Analogové obvody termistorů byly opuštěny, protože byly méně přesné a byly nahrazeny snadněji použitelným prvkem, jako je integrovaný obvod, který má lineární výstup. Vysoce nelineární odezvy nejsou pro počítač problémem, a proto mohou systémy vybavené mikroprocesory termistory používat.

Citlivost detektoru je také nelineární funkcí teploty tělesa detektoru. To bývá zhruba korigováno v analogových přístrojích s jednoduchou korekcí lineárního zesílení zajišťovanou teplotně citlivým odporem ve zpětnovazebných obvodech přes zesilovače. Mikroprocesor může používat složitější algoritmu pro detekci teploty tělesa, který koriguje změny citlivosti detektoru. Mikroprocesorem můžeme korigovat také posun nulové hodnoty detektoru vlivem kolísání okolní teploty. To eliminuje chybu několika stupňů, pokud se přístroj přenesení z jedné místnosti do druhé s různou teplotou. Vnitřní mikroprocesor může na základě údajů o teplotě provádět vnější řídicí funkce na prvcích vnější smyčky. Používá k tomu kontaktní spínače nebo releové výstupy. Řídicí zásahy provádí na základě vstupních údajů o měřených teplotách. [8]

6 Kalibrace

Protože jsou běžné variace ve vlastnostech materiálů použitých v konstrukci radiačních teploměrů, musí se nové přístroje individuálně kalibrovat, dokonce aby se dosáhlo i jen malé úrovně přesnosti. Iniciální kalibraci obvykle provádí výrobce. Pokud je potřeba provádět jiná, než zcela orientační měření, jsou nutné pravidelné recalibrace - ať již uživatelem nebo externí laboratoří nebo původním výrobcem.

Trvalá přesnost bezdotykového teploměru závisí na způsobu recalibrace, četnosti recalibrací a na rychlosti obnovy celého systému. Zajištění absolutní přesnosti bezdotykových teploměrů je složitější než u kontaktních zařízení, jako jsou termočlánky a odporové teploměry. To má částečně původ v obtížnosti přesného stanovení emisivity reálných těles. Pokud je důležitá zejména absolutní přesnost, potom je potřeba brát v potaz standardy, jako např. standard vydaný Národním úřadem pro standardy a technologie (NIST). Kompatibilita primárních a sekundárních norem je zásadní pro vyhovění standardům kvality, jako je např. ISO 9000. [8]

Obecně existují tři metody, jak kalibrovat průmyslové radiační teploměry:

- použití simulátoru absolutně černého tělesa
- porovnání se standardním termočlánkem nebo odporovým teploměrem uvnitř dutiny. Při vyšších teplotách se jako reference používají kalibrované wolframové lampy.
- použití referenčního pyrometru, který je přesně zkalibrován

6.1 Dutina jako absolutně černé těleso

Protože kalibrace bezdotykového teplotního čidla vyžaduje zdroj záření absolutně černého tělesa s přesnou regulací a měřením teploty zdroje, je vnitřní povrch zahřáté dutiny vhodnou formou. Jeho záření je v podstatě nezávislé na materiálu a stavu povrchu.

Aby dutina jako absolutně černé těleso pracovala správně, musí být izotermická. Její emisivita musí být známá, nebo dostatečně blízka jedné a standardní referenční termočlánek musí mít stejnou teplotu, jako dutina. Kalibrační reference na principu absolutně černého tělesa je v zásadě složena z vyhřívané dutiny s malým otvorem, kterým lze vidět vnitřní povrch. V zásadě platí, že s rostoucí relativní velikostí dutiny ve srovnání s otvorem se emisivita blíží stále více k jedné. Ačkoliv je tvar dutiny nejčastěji kulový, pečlivě navržené válcové nebo klínovité dutiny mohou také dosáhnout jednotkové emisivity. K dosažení izotermického prostředí obklopujícího dutinu se používají obvykle následující materiály: [8]

- lázeň s promíchávanou vodou pro teploty 30-100°C
- hliníkové jádro pro teploty 50-400°C
- ocelové jádro pro teploty 350-1000°C

Dutiny simulující absolutně černé těleso mají své výhody i nevýhody. Některé přenosné, bateriemi napájené přístroje se mohou používat i pro nízké teploty (méně než 100°C), ale většinou se jedná o poněkud těžké a drahé přístroje. Také dlouho trvá, než dosáhnou tepelné rovnováhy (30 minut a více), což významně zpomaluje proces kalibrace, zejména pokud se má provést řada měření.



Obr. 6-1 Kalibrátor typu černého tělesa

6.2 Žárovky s wolframovým vláknem

Wolframové páskové lampy jsou zdrojem vysoce reprodukovatelného záření a mohou být přesně kalibrovány na teploty v rozmezí 800-2300°C. Dávají možnost okamžitého a přesného nastavení a mohou pracovat na vyšších teplotách, než většina dutin.

Avšak lampy musí být kalibrovány podle standardů simulujících absolutně černá tělesa. Uživatel obvykle dostane vztah mezi elektrickým proudem, který prochází vláknem a jeho teplotou. Emisivita kolísá v závislosti na teplotě a vlnové délce, ale wolfram je natolik známý materiál, že je možné konvertovat zdánlivou teplotu na skutečnou. [8]

6.3 Referenční pyrometr

V případě sekundární standardní kalibrace se srovnává výstup primárního pyrometru (např. kalibrovaného v NIST) a sekundárního pyrometru, přičemž oba přístroje jsou střídavě zaměřeny na jedinou wolframovou lampu. Tímto postupem se eliminuje mnoho systematických chyb a takový způsob kalibrace je výhodnější v praxi.

7 Nejistoty a chyby metod bezdotykového měření teploty

7.1 Nejistota měření způsobená neznalostí správné hodnoty emisivity povrchu tělesa

Nejistota měření způsobená chybným definováním emisivity povrchu tělesa patří k nejčastějším nepřesnostem při měření bezdotykovým teploměrem. Pro nastavení emisivity měřeného předmětu můžeme použít celou řadu metod:

- Vyhledání emisivity v tabulkách vlastností materiálů

V některých tabulkách můžeme dokonce nalézt i pro jaké pásmo vlnových délek je takto určená emisivita konstantní a to nám může pomoci při správném výběru pyrometru. Ale bohužel je třeba brát takto určenou emisivitu hodně s rezervou, protože skutečnou emisivitu povrchu může ovlivnit celá řada dalších skutečností (např. jakým způsobem byl kov obráběn – broušením, frézováním, leštěním apod., jak je odolný vůči povrchové korozi atd.). Proto by hodnoty emisivit stanovené na základě tabulek měli být brány jako orientační, zvláště pak u kovů. [2]

Druh materiálu	Emisivita ε
černý matový lak	0,99
voda	0,95
cihly	0,85
zoxidovaný ocelový plech	0,75
zoxidovaný hliník	0,55
leštěné ocelový plech	0,25
leštěný hliník	0,13

Tab. 7.1 Emisivita některých materiálů

- Ohřátí měřeného vzorku na známou teplotu

Pokud ohřejeme měřené těleso nebo jeho vzorek na předem známou teplotu, můžeme poté na pyrometru měnit hodnotu emisivity, dokud naměřená teplota neodpovídá teplotě, na kterou jsme předmět ohřívali. Pokud je ale měřené těleso vyrobeno z nějakého velmi dobře vodivého materiálu (např. měď, hliník, mosaz, atd.), může dojít k ochlazení povrchu během doby, kdy je pyrometr nastavován a ohřátí a nastavení je tak nutno znovu opakovat. [2]

- Použitím dodatečného materiálu nebo speciálního nátěru části měřeného objektu

Při relativně nízkých teplotách (do 250 °C), lze nalepit na měřený objekt speciální plastovou samolepku o známé emisivitě. Pyrometrem se poté změří teplota samolepky s touto emisivitou a poté se nastaví emisivita povrchu měřeného objektu tak, aby změřená teplota odpovídala teplotě samolepky. Takto nastavenou emisivitu lze poté použít na všech měřených objektech z tohoto materiálu. Tento postup můžeme aplikovat také, pokud máme možnost natřít část povrchu tělesa matnou černou barvou, která má emisivitu kolem 0,95.

7.2 Nejistota měření způsobená neznalostí správné hodnoty propustnosti prostředí mezi čidlem a měřeným objektem

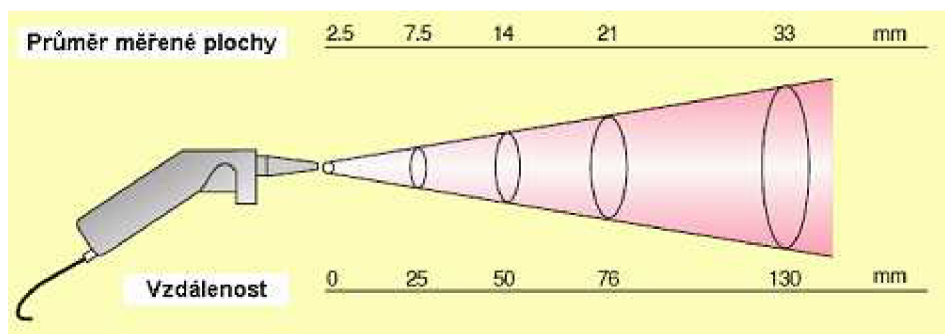
Transparence prostředí je významná zejména při dálkovém snímání zobrazovaného objektu. Zeslabení zářivého toku při průchodu atmosférou může být způsobeno jednak přímou absorpcí a jednak rozptylem infračerveného záření na molekulách plynu, aerosolech, kapkách vody, částicích kouře atd. Na snižování transparency atmosféry se podílí zejména molekuly H_2O , CO_2 , O_3 , CH_4 a CO , které vymezují ve spektrální závislosti součinitele propustnosti. [2]

7.3 Nejistota měření způsobená nepřesnou korekcí odraženého záření z okolního prostředí na měřený objekt

Teplota vnějšího prostředí ovlivňuje velikost detekovaného infra signálu a zároveň i jeho kolísání. Vnější zdroje infračerveného záření ovlivňují v závislosti na povrchových vlastnostech objektu buď jeho skutečnou povrchovou teplotu, nebo jeho zdánlivou povrchovou teplotu. Významné může být také proudění vzduchu, které ovlivňuje ztrátu tepla z povrchu tělesa, tedy i výsledný povrchový teplotní reliéf.

7.4 Nejistota měření způsobená špatným zaměřením měřeného objektu

Optický systém pyrometrů ve většině případů snímá energii vyzařovanou z povrchu tělesa z kruhové měřené plochy a soustřeďuje ji na detektor. Měřený objekt proto musí úplně vyplňovat tuto měřenou plochu, jinak je naměřená hodnota ovlivněna i zářením pozadí okolních ploch. Optické rozlišení je definováno poměrem $D:S$, což je průměru měřené plochy D k vzdálenosti měřicího přístroje od měřeného objektu S . čím menší bude tato hodnota, tím lepší je optické rozlišení měřicího přístroje a tím menší může být měřená plocha při dané vzdálenosti. [2]



Obr. 7-1 Optický diagram IČ čidla DS=1:4

8 Výběr pyrometru

Při výběru přístroje se nejdříve zaměřte na požadovanou rychlost odezvy, velikost měřeného objektu a teplotu objektu. Když se zúží seznam možných kandidátů pro danou aplikaci, zvažujte takové okolnosti, jako spektrální citlivost detektoru, prostupnost optického systému a prostupnost jakýchkoliv oken nebo atmosféry na spojnici mezi přístrojem a měřeným objektem, emisivitu měřeného objektu, okolní podmínky, dynamiku procesu. V 90 % případů se vyžaduje odezva na náhlou změnu teploty za méně než několik sekund, takže pyrometry s tepelnými detektory nevyhovují. Lepší volbou může být pyrometr s fotonovým detektorem.

8.1 Propustnost atmosféry

Jakákoliv radiace absorbovaná nebo vytvořená plyny nebo částicemi nacházejícími se ve výhledu termometru ovlivní měřenou teplotu objektu. Vliv absorbujícího media, jako je vodní pára, může být minimalizován správným výběrem vlnových délek, které bude termometr registrovat. Například pyrometr se silikonovým detektorem pracuje mimo absorpční pásmo vodních par, chyba měření je zde nulová. Vliv horkých částic může být eliminován, zajistíme-li, aby takové částice nevstupovaly do prostředí mezi termometrem a měřeným objektem, nebo průměrováním hodnot, pokud jsou zde částice přechodně přítomny. Pozorovací tuba s otevřeným koncem, která je pročištěná plynem o nízké teplotě, může zajistit pro měření prostředí, které nebude obsahovat interferující částice. [8]

8.2 Materiál měřeného objektu

Emisivita měřeného objektu, nebo množství tepelné energie, kterou měřený objekt emituje, závisí na charakteru materiálu, ze kterého je tento objekt složen. Absolutně černé těleso je ideální emitör, ohodnocen hodnotou 1,0. Hodnota emisivity u ostatních materiálů je poněkud nižší, pohybuje se v rozmezí 0,01 až 0,99. Organické materiály jsou velmi výkonnými emitory, s emisivitou 0,95, zatímco leštěné kovy jsou nevýkonnými emitory, s emisivitou 0,2 nebo nižší. Tabulky udávají hodnoty emisivity ideálních povrchů a nepočítají s korozi, oxidací, nebo nerovnostmi povrchu. U reálných objektů kolísá emisivita od 2 do 100% při změně teploty o 56°C.

8.3 Teplotní rozsah

Emisivita objektu a předpokládaný teplotní rozsah objektu určují vhodné vlnové délky pro měření. Použijte čidlo, které je senzitivní na tyto vlnové délky. Přesnost měření je uváděna v procentech. Čím přesněji lze určit měřený teplotní rozsah a jemu odpovídající čidlo, tím bude konečný výsledek měření přesnější.

8.4 Pracovní prostředí

Pokud bude přístroj měřit v nebezpečném, horkém, vlhkém, korozivním, nebo jinak nevlídné prostředí, pak je nezbytné přístroj chránit. Čočky a obaly přístrojů jsou odolné proti korozi, vzdušné chladicí systémy chrání čočky před výrobními nečistotami, a rozličné chladicí systémy chladí čočky, optiku a elektroniku.

U širokopásmových termometrů může být k ochraně optiky a k udržení čistého zorného pole použit tubus s uzavřeným koncem. Zatímco na jednom konci tubusu se načítá teplota měřeného objektu, na opačném konci tubusu je termometr pomocí chlazení chráněn před vlivem vysokých teplot. Tubusy s uzavřeným nebo otevřeným koncem zabraňují snížení emitované radiace, ke kterému by došlo vlivem přítomnosti vodních par, prachu, kouře, páry a jiných radioabsorbčních plynů v prostředí. Průmyslově se využívají při měření povrchové teploty jak volných povrchů, tak povrchů uvnitř trubek, nádob a pecí. V jiných případech je nutné měřit teplotu objektu skrze sklo.

9 Praktické využití v procesním inženýrství

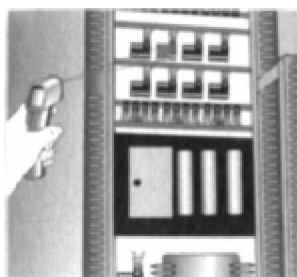
Bezkontaktní teplotní snímače umožnily technikům přesné měření tam, kde je velmi těžké nebo nemožné požit jiné teplotní snímače. Žádný jiný snímač, než je bezdotykový teploměr, není schopen provádět měření na velké vzdálenosti. To je nutné např. při hledání horkých míst nebo problematických oblastí u destilačních přístrojů, izolací, trubek, motorů nebo transformátorů. V oblasti vyhledávání a zjišťování vad jsou ruční radiační teploměry těžko překonatelné. [3]

Teplotní měření jsou v běžné údržbě závodu používána k tomu, aby se předešlo poruchám v dodávce energie, aby se zjistil výskyt vadných žáruvzdorných materiálů a k optimalizaci účinnosti procesu. Hlavním cílem je předcházení neočekávaným odstávkám. Mnoho problémů považovaných za problémy údržby jsou ve skutečnosti energetickými problémy. Teplotní prohlídka je ideálním postupem pro analýzu energetických ztrát.

Příklady využívání bezkontaktních teploměrů v praxi:

9.1 Kontrola elektrických zařízení

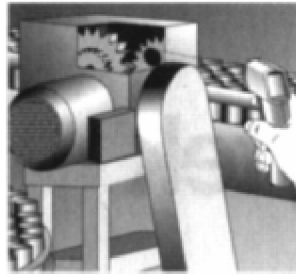
Používání infračervených teploměrů pro prohlídky elektrických zařízení je jednoduchá, rychlá a přímá aplikace. Jak elektrické součástky korodují nebo se zhoršují stárnutím, mění se také jejich elektrické vlastnosti, zejména elektrický odpor. Tyto změny jsou obvykle zjevné jako zvýšení povrchových teplot, které indikuje očekávanou poruchu. Většina součástí se zhoršuje postupně, dříve než dojde k úplné poruše. Je tedy možné provádět prohlídky elektrických zařízení v nepřítli častých intervalech, což umožní plánovanou a pravidelnou údržbu. [3]



Obr. 9-1 Kontrola elektrické skříně

9.2 Kontrola mechanických zařízení

Bezkontaktní měření teploty je používáno také ke kontrole mechanických zařízení. Rotační stroje jako jsou motory, čerpadla, kompresory a podobné mohou být kontrolovány na přehřívající se ložiska, řemeny a kontakty. Tyto prohlídky nejen že pomáhají vyhnout se poruchám, ale pomáhají také vyhnout se neočekávaným odstávkám a procesním nedostatkům.



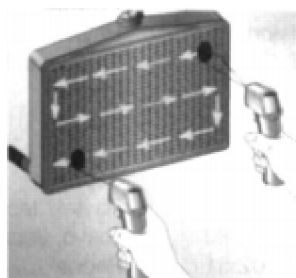
Obr. 9-2 Kontrola mechanických zařízení

9.3 Kontrola stavu žáruvzdorných hmot a izolací

Prohlídka stavu žáruvzdorných hmot a izolací je založena na teorii, že v celém objemu nádoby je stejná vnitřní teplota a odpovídající povrchová teplota je přímou funkcí vedení tepla přes izolační vrstvu a vnější stěnu. Ideální nádoba bude mít všude na svém vnějším povrchu přesně stejnou teplotu. Pokud se v izolační vrstvě vyskytuje trhлина nebo jiný závadový stav, stoupá teplota vnějšího povrchu úměrně závadě přesně v místě jejího výskytu. Prohlídky jsou rychlé a výkonné. [3]

9.4 Kontrola výměníků tepla

Při většině kontrol toku materiálu se používá povrchová teplota jako indikátor závadného stavu, který má vztah k teplotě, např. úniky, blokády, zeslabení, koroze a eroze. V každém případě však musí být provedena analýza k určení přibližného vztahu mezi tepelnou informací a závadou. Prohlídky výměníků tepla jsou obvykle prováděny proto, aby se určily celkové blokády toku nebo k určení oblastí s extrémním zeslabením. Přítomnost celkových blokády je normálně způsobena korozí v trubkách a usazeninami kolem nich. [3]



Obr. 9-3 Kontrola výměníku tepla

Praktická část

10 Popis měřících přístrojů

10.1 Ruční bezdotykový teploměr Fluke 574

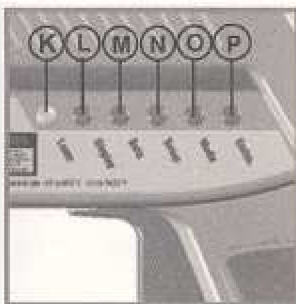
K bezdotykovému měření teploty jsem použil přenosný IČ- teploměr Fluke 574, který patří do skupiny pásmových pyrometrů. Přístroj je vybaven digitálním LCD-displejem, který zobrazuje aktuální měřenou teplotu, dále může zobrazovat minimální, maximální nebo střední hodnotu. U tohoto pyrometru lze nastavit hodnotu emisivity od 0,1 – 1 nebo vybrat ze 30 přednastavených hodnot emisivity různých materiálů. Měřící rozsah přístroje je -30 až + 900 °C s přesností ± 1 °C. K zaměření plochy slouží 3 bodový laser, ohraničující velikost zabírané kruhové plochy a optika 60:1.

Součástí je také termočlánek typ K s měřícím rozsahem -25 až +260 °C s přesností ± 2 °C,



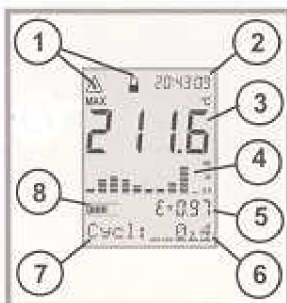
Obr. 10-1 Fluke 574

Funkční tlačítka



- (K) laser
- (L) displej
- (M) data
- (N) nastavení
- (O) mód
- (P) emise

Displej



- (1) stavové a varovné symboly
- (2) čas
- (3) měřená hodnota
- (4) grafické zobrazení hodnot
- (5) emisivita
- (6) dolní stavová řádka
- (7) indikace módu
- (8) baterie

10.2 Testo 935

Pro porovnání s teploměrem Fluke 574 jsem použil diferenční dvoukanálový teploměr Testo 935. Univerzální teploměr pro měření teploty v průmyslu. Přístroj může snímat současně ze dvou připojených sond. Obě teploty zobrazí na displeji a dokáže spočítat a zobrazit teplotní rozdíl. Má odolné pouzdro chránící přístroj před nárazem, prachem a vlhkem.

Příslušenství k přístroji je sonda s termočlánkem typu K s rozšířenou měřicí špičkou pro hladké rovinné plochy. Měřicí rozsah je od -60 až +400 °C s přesností ± 1 °C. ($t_{99}=30s$)



Obr. 10-2 sonda 1



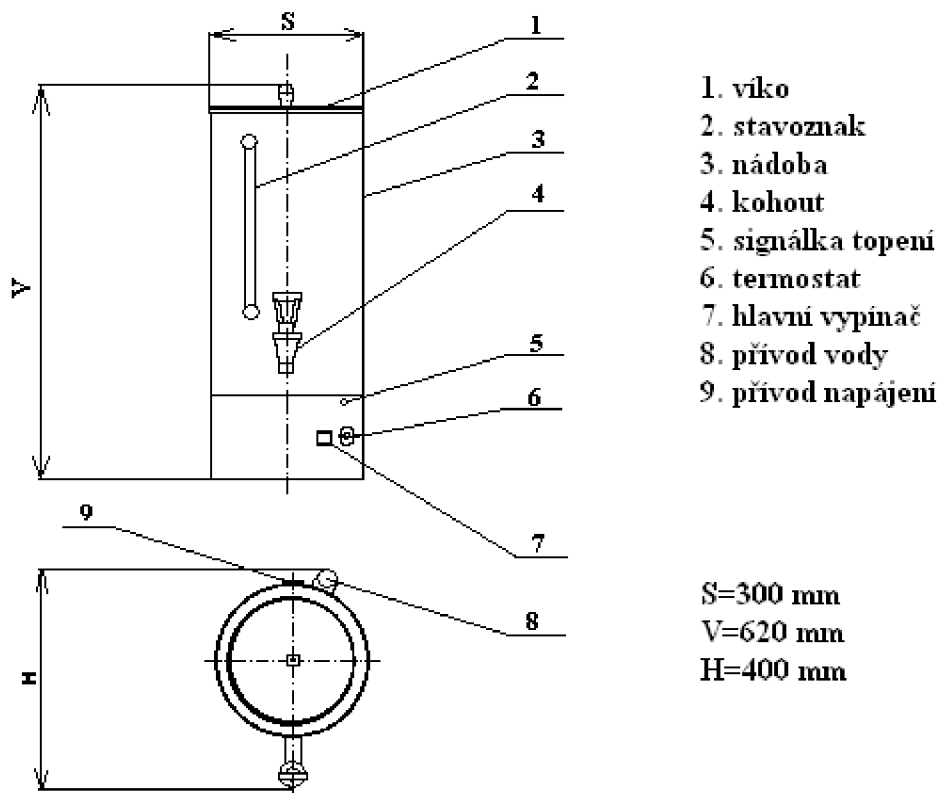
Obr. 10-4 sonda 2



Obr. 10-3 Testo 935

10.3 Retigo M20

Jako model pro měření teploty jsem použil duplicitní nádobu **Retigo M20**. Objem nádoby je 20 l, plášť je vyroben z nerezové oceli. Napájení nádoby je ze sítě 230 V, 50Hz o příkonu 3kW. Regulovat teplotu lze pomocí termostatu.



Obr. 10-5 Schéma Retigo M20

11 Postup měření

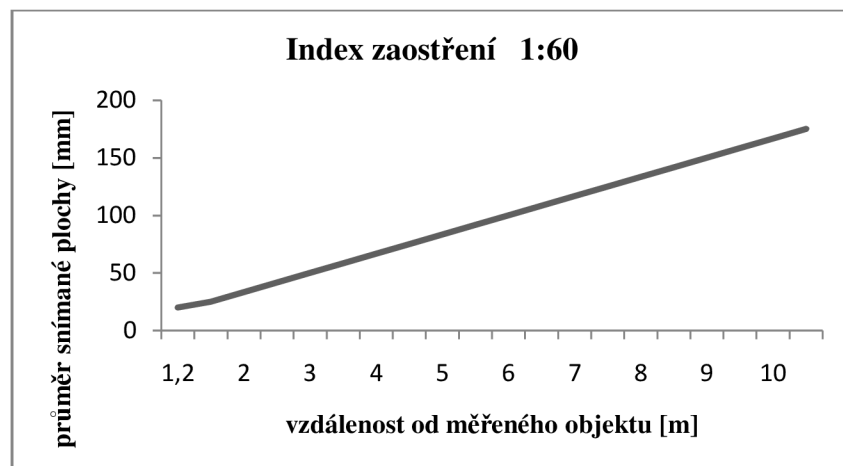
11.1 Zjištění emisivity

Důležité pro správné měření teploty pomocí IČ-teploměru je znalost emisivity měřené plochy. Protože je plášť nádoby vyroben z leštěné nerezové oceli, má emisivitu velmi malou ($\varepsilon = 0,2$) a výsledky měření by byly nepřesné. Proto je zapotřebí ji zvýšit pomocí nátěru nebo nálepky. Zvolil jsem černou papírovou nálepku a zjistil jsem k ní emisivitu tak, že jsem termostat nastavil na 40°C a počkal jsem, až se teplota celé nádoby ustálí. Teplotu jsem kontroloval pomocí rtuťového teploměru. Poté jsem ze známé teploty nastavil emisivitu na IČ-teploměru tak, aby se teploty v obou měření shodovali. Zjištěná emisivita černé nálepky je $\varepsilon=0,95$.

11.2 Index zaostření

Dalším důležitým parametrem je index zaostření pyrometru, který je definovaný jako poměr průměru D snímané plochy na měřeném objektu ke vzdálenosti L měřeného objektu od objektivu pyrometru. Aby údaj pyrometru nebyl ovlivněn teplotou pozadí objektu, musí být měřený objekt větší než zorné pole. Pro zajištění správné funkce infračerveného pyrometru se obvykle doporučuje, aby měřený objekt přesahoval velikost zorného pole pyrometru nejméně o 30 až 50 %.

U měřicího pyrometru Fluke 574 je index zaostření roven 1:60. Z toho vyplývá závislost velikosti průměru snímané plochy na vzdálenost od měřeného objektu, která je znázorněna v grafu ... Měření sem prováděl ve vzdálenosti 1,5 m od měřeného objektu a z grafu vyplývá, že minimální průměr snímané plochy je 25 mm. Fluke 574 má výhodu, že průměr snímané plochy vyznačuje pomocí 3-bodového laserového zaměřovače.



Graf 11-1 Index zaostření

11.3 Instalace zaměření

Při instalaci teplotních sond je důležité, aby byly v těsném kontaktu s měřenou plochou a aby nedocházelo k uvolnění při manipulaci. To by mělo za následek, nepřesné měření teplot.



Obr. 11-1 Připevnění dondy1



Obr. 11-2 Připevnění sondy 2

11.4 Vlastní měření

Při zapojení duplicitní nádoby do elektrické sítě jsem nastavil termostat na hodnotu 90°C. Teplotu jsem odečítal v intervalech cca 30 sec a zapisoval jsem je do tabulky. Po dosažení 90°C jsem vypustil ohřevnou vodu a při ochlazování nádoby jsem znovu zapisoval hodnoty teplot. Takto jsem postupoval ve všech druzích zapojení. Výsledné hodnoty jsem vložil do grafů a pak následně vyhodnotil.

12 Výsledky měření

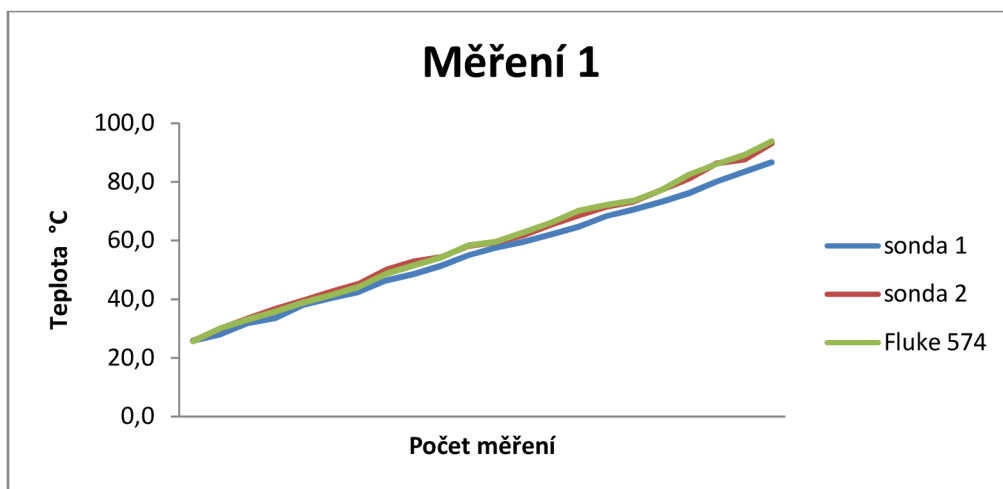
Naměřené hodnoty měřené jak bezdotykovým teploměrem Fluke 574 tak dotykovým teploměrem Testo 935 jsem zapsal do tabulek v programu Excel, následně jsem z nich vytvořil grafy a vypočítal průměrné odchylky teplotních sond od teploty naměřené bezdotykovým teploměrem Fluke 574.

12.1 Měření 1



Obr. 12-1 Zapojení 1

Ohřev:



Graf 12-1 Zapojení 1- ohřev

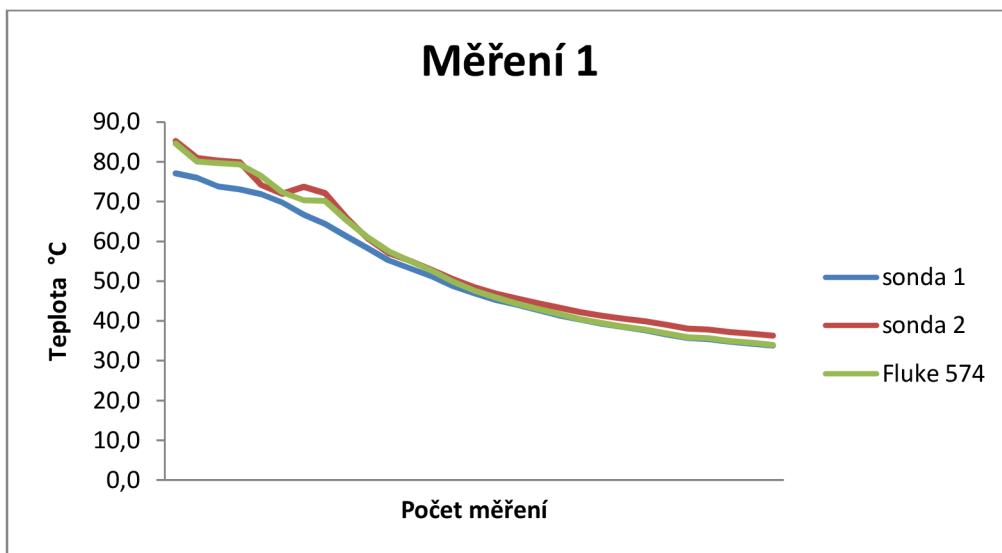
Průměrná odchylka teplotní sondy 1:

$$\Delta T_1 = \frac{\sum_{i=1}^n T_{3i} - T_{1i}}{n} = 3,25^\circ C$$

Průměrná odchylka teplotní sondy 2:

$$\Delta T_2 = \frac{\sum_{i=1}^n T_{3i} - T_{2i}}{n} = 0,69^\circ C$$

Ochlazování:



Graf 12-2 Zapojení 1- ochlazování

Průměrná odchylka teplotní sondy 1:

$$\Delta T_1 = \frac{\sum_{i=1}^n T_{3i} - T_{1i}}{n} = 2,01^\circ C$$

Průměrná odchylka teplotní sondy 2:

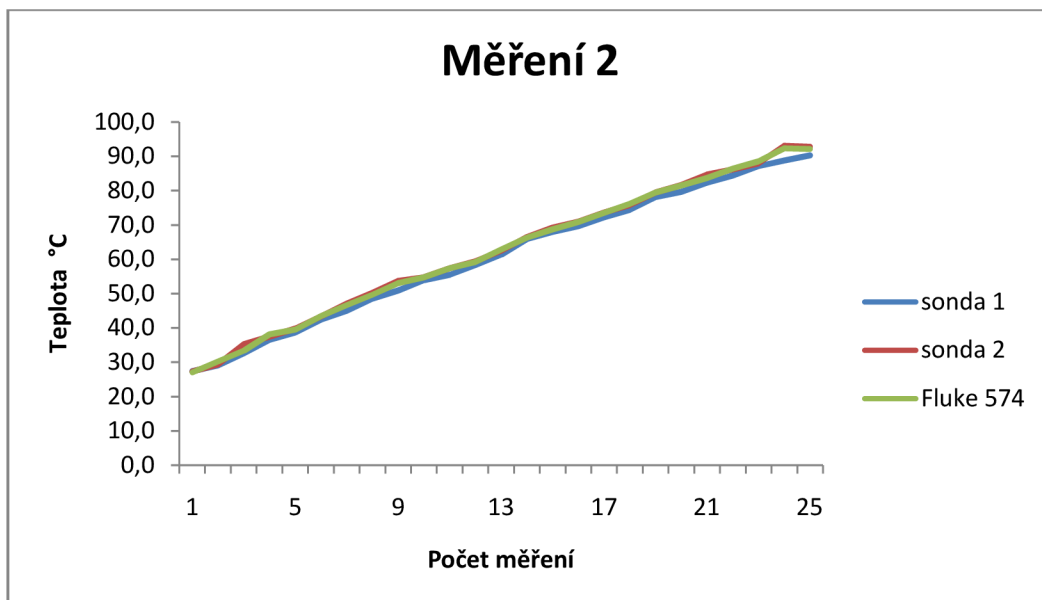
$$\Delta T_2 = \frac{\sum_{i=1}^n T_{3i} - T_{2i}}{n} = 0,79^\circ C$$

12.2 Měření 2



Obr. 12-2 Zapojení 2

Ohřev:



Graf 12-3 Zapojení 2 - ohřev

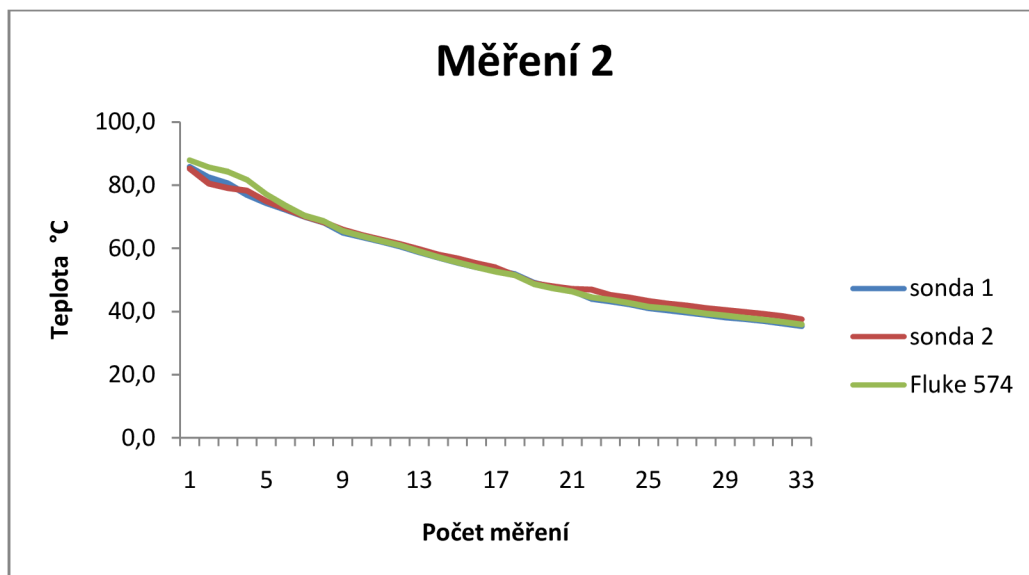
Průměrná odchylka teplotní sondy 1:

$$\Delta T_1 = \frac{\sum_{i=1}^n T_{3i} - T_{1i}}{n} = 0,78^\circ \text{C}$$

Průměrná odchylka teplotní sondy 2:

$$\Delta T_2 = \frac{\sum_{i=1}^n T_{3i} - T_{2i}}{n} = 0,44^\circ \text{C}$$

Ochlazování:



Graf 12-4 Zapojení 2 - ochlazování

Průměrná odchylka teplotní sondy 1:

$$\Delta T_1 = \frac{\sum_{i=1}^n T_{3i} - T_{1i}}{n} = 0,68^{\circ}C$$

Průměrná odchylka teplotní sondy 2:

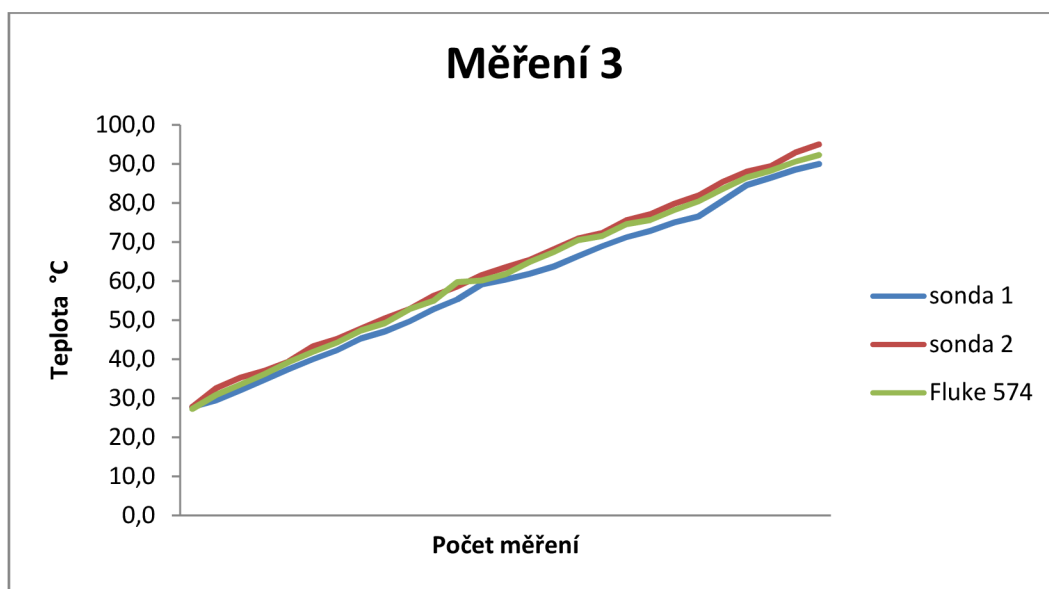
$$\Delta T_2 = \frac{\sum_{i=1}^n T_{3i} - T_{2i}}{n} = 0,62^{\circ}C$$

12.3 Měření 3



Obr. 12-3 Zapojení 3

Ohřev:



Graf 12-5 Zapojení 3 - ohřev

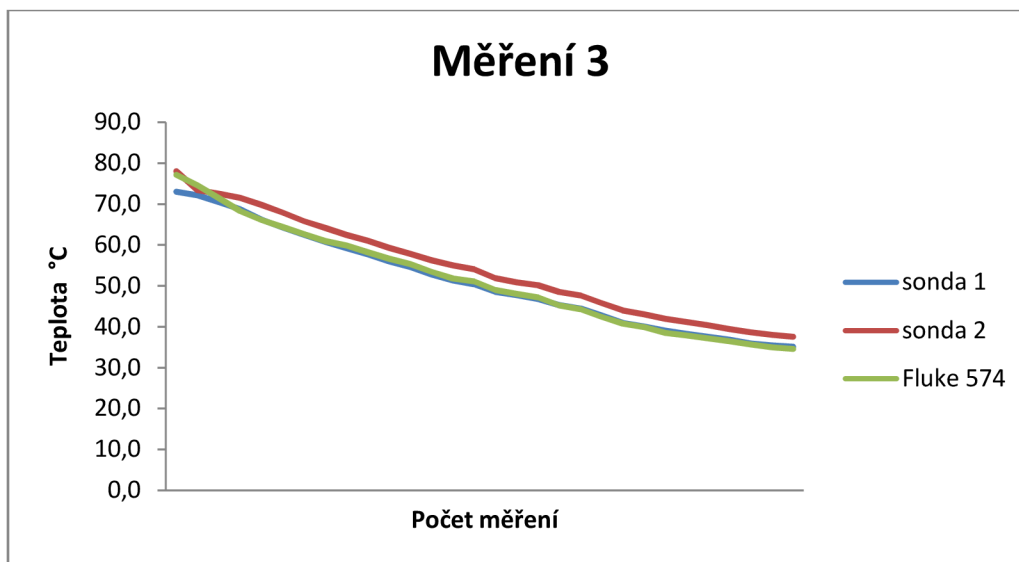
Průměrná odchylka teplotní sondy 1:

$$\Delta T_1 = \frac{\sum_{i=1}^n T_{3i} - T_{1i}}{n} = 0,73^\circ C$$

Průměrná odchylka teplotní sondy 2:

$$\Delta T_2 = \frac{\sum_{i=1}^n T_{3i} - T_{2i}}{n} = 1,48^\circ C$$

Ochlazování:



Graf 12-6 Zapojení 3 - ochlazování

Průměrná odchylka teplotní sondy 1:

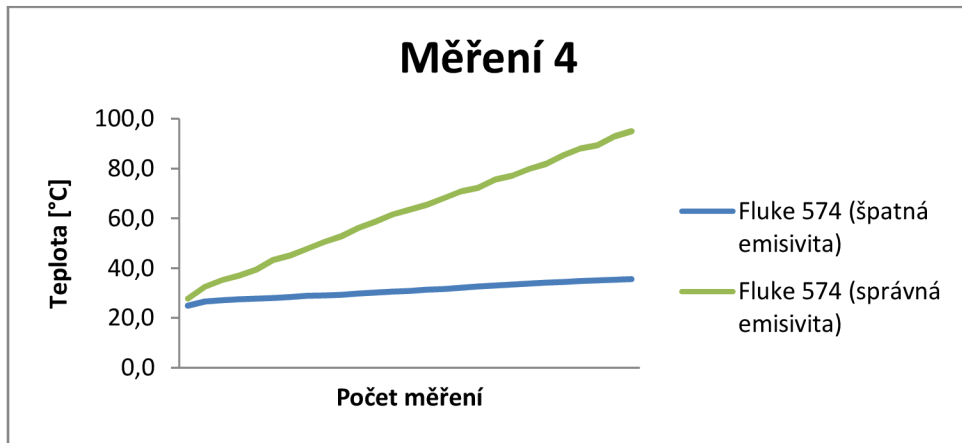
$$\Delta T_1 = \frac{\sum_{i=1}^n T_{3i} - T_{1i}}{n} = 0,57^\circ C$$

Průměrná odchylka teplotní sondy 2:

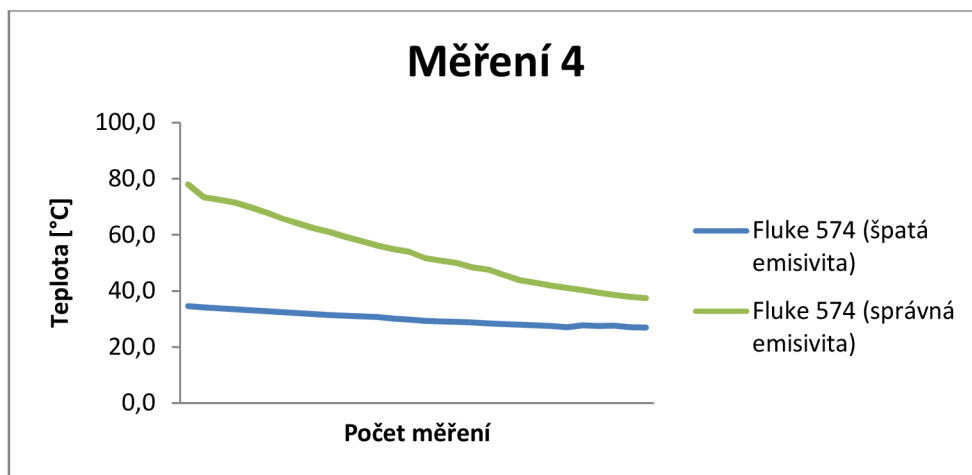
$$\Delta T_2 = \frac{\sum_{i=1}^n T_{3i} - T_{2i}}{n} = 2,85^\circ C$$

12.4 Měření 4

Pro názornou ukázkou, jak je důležitá u pyrometru správně zadaná emisivita povrchu, jsem naměřil hodnoty teplot tak, že poprvé bezdotykovým teploměrem Fluke 574 jsem měřil na místě s přesně definovanou emisivitou $\varepsilon=0,95$. A podruhé s nastavenou emisivitou v pyrometru na hodnotu $\varepsilon=0,95$, ale na povrchu z leštěné oceli. Naměřené hodnoty jsem porovnal v grafu 12-7 a 12-8.



Graf 12-7 ohřátí



Graf 12-8 ochlazení

13 Vyhodnocení výsledků

Základní rozdíl mezi dotykovým a bezdotykovým měřením teploty je hned u přípravy přístroje na měření. U bezdotykového přístroje je důležité zjistit emisivitu měřeného povrchu. V mém případě model, na kterém jsem měřil, měl povrch z leštěné nerez oceli, která se vyznačuje velmi malou emisivitou a měření by bylo nepřesné. Proto jsem na povrch nalepil černou samolepku a zjistil jsem její emisivitu ($\epsilon=0,95$). U dotykového měření teploty byl zase problém v tom, aby tepelné sondy byly v těsném kontaktu s měřenou plochou po celou dobu měření.

V prvním měření vyšla odchylka sondy 2, která byla připojena k přístroji Testo 935, od výsledku Fluke 574 $\Delta T=0,69^{\circ}\text{C}$ u ohřívání a $\Delta T=0,79^{\circ}\text{C}$ u ochlazení. Tato hodnota je docela nepatrná. Větší rozdíl teplot bylo mezi teplotami z Fluke 574 a sondou 1, která byla zapojena přímo v pyrometru. Odchylky vyšly takto: $\Delta T=3,25^{\circ}\text{C}$ u ohřevu a $\Delta T=2,01^{\circ}\text{C}$ u ochlazení.

V měření číslo 2, bylo zapojení následující. K přístroji Testo 935 byly zapojeny sondy 1 a 2 a přístrojem Fluk 574 jsem měřil samostatně. Z naměřených hodnot vyšly odchylky od pyrometru nepatrné. $\Delta T_1=0,78^{\circ}\text{C}$ a $\Delta T_2=0,44^{\circ}\text{C}$ u ohřevu a $\Delta T_1=0,68^{\circ}\text{C}$ a $\Delta T_2=0,62^{\circ}\text{C}$ u ochlazení.

Ve třetím měření jsem připojil k pyrometru sondu 2 a k přístroji Testo 935 sondu 1. Odchylka sondy 1 od pyrometru vyšla vcelku malá $\Delta T=0,73^{\circ}\text{C}$ u ohřevu a $\Delta T=0,57^{\circ}\text{C}$ u ochlazení. Větší rozdíl odchylek byl mezi sondou 2 a přístrojem Testo 935. Odchylka při ohřevu vyšla $\Delta T=1,48^{\circ}\text{C}$ a při ochlazování $\Delta T=2,85^{\circ}\text{C}$.

Z těchto tří měření vyplývá, že hodnoty teplot změřených pyrometrem a teplotními sondami se od sebe až tak moc neliší, ale záleží na zapojení teplotních sond. V prvním a třetím zapojení, když byla teplotní sonda zapojena v pyrometru Fluke 574, byla odchylka mezi měřeními značně velká. Z toho plyne, že používání přídavné teplotní sondy v pyrometru Fluke 574 je velmi nepřesné.

Pro názorné předvedení, jak je důležité nastavit v pyrometru správnou emisivitu, jsem použil měření číslo 4. Při porovnání těchto přímků z grafu 12.7 a 12.8 je patrné, že při zadání špatné emisivity materiálu do přístroje, jsou výsledné hodnoty teplot nepoužitelné.

14 Závěr

V diplomové práci jsem se snažil vysvětlit problematiku bezkontaktního měření teploty. Pro správné pochopení principu bezkontaktního měření teploty, je důležitá znalost základních fyzikálních zákonů záření. Tyto zákony jsem popisoval v úvodní kapitole.

V další kapitole jsem rozdělil typy pyrometrů na úhrnné, pásmové, poměrové, optické a termovize. Následuje popis základních částí pyrometru jako je optický systém, detektory a elektronika.

Pro správné a přesné měření teploty je potřebná kalibrace, tou jsem se zabýval v další kapitole. Následuje popis nejistot a chyb měření. V závěru teoretické části jsem se zabýval faktory pro výběr pyrometru a následně využití bezkontaktního měření v praxi.

V praktické části jsem se zabýval správným postupem pro měření teploty bezkontaktním radiačním teploměrem. Následně jsem porovnával hodnoty naměřené na modelu jak u pyrometru, tak i u dotykových sond. Změřené výsledky jsou znázorněny v grafu a dále pak vyhodnoceny.

Tato diplomová práce by měla sloužit pro objasnění problematiky bezdotykového měření teploty a pro správný výběr pyrometru dle zadaných podmínek měření.

15 Seznam použité literatury

- [1] LYSENKO, V.: *Detektory pro bezdotyková měření teplot*, BEN, Praha, 2005, ISBN 80-7300-180-2.
- [2] KREIDL, M.: *Měření teploty-senzory a měřící obvody*, BEN, Praha, 2005, ISBN 80-7300-145-4.
- [3] SZERUDA, R.: *Vybrané aplikace bezdotykového měření teploty. Měření teplot v provozu*, Ostrava, 1996.
- [4] SZERUDA, R.: *Základy bezdotykového měření teploty. Měření teplot v provozu*, Ostrava, 1996.
- [5] KABEŠ, K.: *Přehled trhu – infračervené pyrometry*, Automatizace, 1999, roč. 42, č. 4, s. 276–287, ISSN 1210-9592.
- [6] ACKLAND, K.: *Výběr správného infračerveného teploměru pro konkrétní aplikaci*, Automatizace, 1999, roč. 42, č. 4, s. 288–290, ISSN 1210-9592.
- [7] JENČÍK, J.: *Bezdotykové měření teploty pyrometry*, Automatizace, 1999, roč. 42, č. 4, s. 274–276, ISSN 1210-9592.
- [8] Soubor technických informací poskytovaných firmou Omega: *Bezdotykové měření teploty*, URL: <http://www.omegaeng.cz/>
- [9] NOVÁ, I.: *Metody bezdotykového měření teploty*, Průmyslové spektrum, 2004, č.11, s.44. ISSN 1212-2572.
- [10] NOVÁ, I.: *Metody bezdotykového měření teploty*, Průmyslové spektrum, 2004, č.12, s.78. ISSN 1212-2572.
- [11] SVOBODA, Š.: *Měření teploty – bezkontaktní teploměry a termovizní kamery*, Elektro, 2005, č12, ISSN 1210-0889.