

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AUTOMATION AND COMPUTER SCIENCE

EMISIVITA A VÝSLEDEK BEZDOTYKOVÉHO MĚŘENÍ TEPLoty

EMISSIVITY AND RESULT OF NON-CONTACTING TEMPERATURE MEASUREMENT

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

BC. MARTIN KOTRBA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. František Vdoleček, CSc.

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automatizace a informatiky

Akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Martin Kotrba

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Aplikovaná informatika a řízení (3902T001)**

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

Emisivita a výsledek bezdotykového měření teploty

v anglickém jazyce:

Emissivity and Result of Non-Contacting Temperature Measurement

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V dnešní době se stále častěji uplatňuje v praxi bezdotykové měření teplot pomocí pyrometrů a termokamer. Výsledek měření je ale velmi závislý na správném nastavení parametrů, především pak součinitele emisivity.

Cíle diplomové práce:

Analyzujte vlivy správného nastavení emisivity na výsledek měření teploty pomocí moderních bezdotykových teploměrů. Pro potvrzení těchto analýz navrhnete a realizujete jednoduché experimenty s využitím možností teploměru Raytek Compact CM.

Doporučená osnova práce:

1. Moderní metody bezdotykových měření teploty
2. Vliv správného nastavení emisivity na výsledek měření teploty
3. Návrh a realizace experimentálního pracoviště pro ověření závislosti
4. Experimentální ověření vlivu emisivity, vyvození závěrů a doporučení

Seznam odborné literatury:

CHUDÝ, V.; Palenčár, R.; Kureková, E.; Halaj, M.; Meranie technických veličín : 1.vydání Bratislava : Vydavateľstvo STU, 1999. 688s. ISBN 80-227-1275-2.

KREIDL, M.; Měření teploty – Senzory a měřicí obvody : 1. vydání Praha : BEN – technická literatura, 2005. 240 s. ISBN 80-7300-145-4.

LYSENKO,V.; Detektory pro bezdotykové měření teplot : 1. vydání Praha: BEN – technická literatura, 2005. 160 s. ISBN 80-7300-180-2.

SLÁDEK, Z.; Vdoleček, F.; Technická měření : 1.vydání Brno : Nakladatelství VUT, 1992. 220 s. ISBN 80-214-0414-0.

Časopisy AUTOMA, AUTOMATIZACE

Firemní literatura

Vedoucí diplomové práce: Ing. František Vdoleček, CSc.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/2011.

V Brně, dne

L.S.

Ing. Jan Roupec, Ph.D.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Cílem práce je bližší seznámení s bezdotykovým měřením teploty a správné nastavení emisivity, která má značný vliv na správně naměřenou hodnotu teploty. Bylo realizováno experimentální pracoviště pro ověření závislostí pomocí bezdotykového teploměru Compact CM. Z výsledků měření a jejich analýz jsou vyvozeny příslušné závěry a doporučení.

ABSTRACT

Detailed introduction of non-contact temperature measurement and correct settings of the measurement device, which has great influence on correct temperature determination, is the aim of this diploma thesis. The experimental laboratory was established to verify dependencies by Compaq CM non-contact thermometer. Conclusions and recommendations are deduced from the measurement results and their analysis.

KLÍČOVÁ SLOVA

Bezdotykové měření teploty, Emisivity, Compact CM

KEYWORDS

NoN-Contacting Temperature Measurement, Emissivity, Compact CM

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval za pomoc svému vedoucímu práce panu Ing. Františku Vdolečkovi, CSc., za jeho cenné rady a podněty, které mi pomohly při tvorbě diplomové práce.

Obsah:

Zadání závěrečné práce	3
Abstrakt	5
Poděkování	7
Obsah	9
1 Úvod	11
2 Moderní metody bezdotykového měření teploty	13
2.1 Definice teploty	13
2.1.1 Jednotky teploty	14
2.2 Principy měření teploty	14
2.3 Teploměry	15
2.4 Bezdotykové měření teploty - pyrometrie	15
2.4.1 Zákony záření - základy	16
2.4.2 Rozdělení pyrometrů	19
2.4.3 Radiční pyrometry	20
2.4.4 Fotoelektrické pyrometry	21
2.4.5 Spektrální pyrometry	22
2.4.6 Distribuční pyrometry	25
2.4.7 Chyby měření pyrometrů a jejich korekce	27
2.5 Infračervené přístroje	29
2.5.1 Infračervené pyrometry	30
2.5.2 Infračervené termočlánky	32
2.6 Měření teplotních polí	35
2.6.1 Fotografické měření teploty	35
2.6.2 Termovize	35
3 Vliv správného nastavení emisivity na výsledek měření teploty	39
3.1 Hodnoty emisivity u materiálů	40
4 Návrh a realizace experimentálního pracoviště pro ověření závislostí	43
4.1 Použitý bezdotykový teploměr - Compact CM	43
4.1.1 Základní charakteristiky a parametry teploměru Compact CM	44
4.1.2 Optický diagram - Compact CM	45
4.1.3 Zaměření	46

4.1.4 Elektrické rušení, kvalita atmosféry a emisivita	46
4.1.5 Připojení a kabel.....	47
4.2 3-bodový IR kalibrátor.....	47
4.3 Schéma zapojení a pracoviště	49
5 Experimentální ověření vlivu emisivity, vyvození závěrů a doporučení.....	53
5.1 Nastavení a naměřené hodnoty	53
5.2 Základní zpracování výsledků měření	61
5.3 Určení matematického vztahu měření na nastavení emisivity - výpočet koeficientu korekce	65
5.4 Kontrolní měření	75
6 Závěr	77
Seznam použité literatury	79

1 ÚVOD

Cílem této diplomové práce je blíže se seznámit s bezdotykovým měřením teploty a nastavením emisivity, která je pro správný výsledek měření velice důležitá. Nejprve se seznámíme s teplotou jako fyzikální veličinou a uvedeme si správnou definici teploty. Dále se budeme zabývat jak správně teplotu měřit, aby výsledek byl co nejpřesnější. Bezdotykové teploměry jsou dnes vyráběny v několika variantách a provedeních tak, abychom pro dané měření vybrali ten nejlepší přístroj. V kapitole vliv správného nastavení emisivity na výsledek měření teploty se budeme zabývat problematikou emisivity, jaký má vliv na měření teploty a uvedeme si pár příkladů emisivity u konkrétních materiálů.

Abychom si však všechny informace ověřili v praxi, provedeme sérii měření pomocí bezdotykového teploměru Compact CM. Výsledky zaznamenáme a vyhodnotíme, abychom mohli v praxi dokázat, že správné nastavení emisivity může mít podstatný vliv na výsledek měření. Vypočítáme korekce a odchylky, které při nesprávném nastavení emisivity vznikají tak, abychom byli schopni určit správnou hodnotu emisivity a získat měření s co nejlepší hodnotou. Budeme realizovat pracoviště, kdy použijeme ideálně černé těleso – kalibrátor a bezdotykový teploměr Compact CM, který budeme ovládat pomocí softwaru ve stolním počítači a zaznamenávat hodnoty měření.

Po naměření všech hodnot a vyhodnocení těchto měření, budeme vše ověřovat v praxi. Použijeme těleso s neznámou emisivitou, které nahřejeme pomocí vařiče na určitou teplotu. Provedeme měření bezdotykovým teploměrem s chybně nastavenou emisivitou a dotykovým teploměrem. Rozdíl naměřených teplot nám poukáže na nesprávně nastavenou emisivitu. Pomocí korekce odchylky se pokusíme určit správně emisivitu daného tělesa tak, aby došlo k naměření správných hodnot teploty a správného nastavení emisivity.

2 MODERNÍ METODY BEZDOTYKOVÝCH MĚŘENÍ TEPLOTY

V dnešní době se stále častěji uplatňuje v praxi bezdotykové měření teplot pomocí pyrometrů a termokamer. Výsledek měření je ale velmi závislý na správném nastavení parametrů, především pak součinitele emisivity.

2.1 Definice teploty

Teplota je stavová veličina určující stav termodynamické rovnováhy tj. stav, kdy v izolované soustavě těles od okolního prostředí neprobíhají žádné makroskopické změny a všechny fyzikální veličiny, jimiž je stav soustavy popsán nezávisí na čase. Stav termodynamické rovnováhy bývá charakterizován termodynamickou teplotou, která musí být stejná pro všechny části izolované soustavy. Fyzikální veličina teplota se nesmí zaměňovat za fyzikální veličinu teplo, neboť teplo je forma energie související s pohybem částic dané soustavy těles, ale není stavovou veličinou, neboť nezávisí na přítomném stavu soustavy, ale na celé minulosti vývoje této soustavy. Teplota je jedna z mála veličin, která se nedá měřit přímo, ale pouze prostřednictvím jiných fyzikálních veličin. Měření teploty je tedy měření nepřímé. [16]

Teplota je termodynamická stavová veličina. Definujeme ji na základě Carnotova cyklu. Účinnost vratného Carnotova cyklu závisí jen na těchto teplotách a nezávisí na použité teplotně látky. Platí vztah [2]

$$\eta = \frac{(Q_2 - Q_1)}{Q_2} = \frac{(T_2 - T_1)}{T_2} \quad (2.1)$$

kde

η – je účinnost Carnotova cyklu

Q_2 – je teplo odebrané teplotně látkou s teplotou T_2

Q_1 – je teplo odevzdané teplotně látkou s teplotou T_1

přičemž platí, že $T_2 > T_1$

V případě ideálního stavu $\eta = 1$, potom ze vztahu (2.1) platí:

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{Q_2}{Q_1} \quad (2.2)$$

Ideální tepelný stroj pracující na principu Carnotova cyklu nelze sestavit. Teplotně látkou však může být také dokonalý plyn, pro který platí v souladu s Carnotovým cyklem stavová rovnice: [16]

$$p \cdot V = R_m \cdot T \quad (2.3)$$

kde

R_m – je molární plynová konstanta ($R_m = 8,3143 \text{ J.kmol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)

V – je objem plynu

Pro konstantní objem V je vztah pro plynový teploměr:

$$T = T_0 \times \frac{p}{p_0} \quad (2.4)$$

kde

$$p_0 = 1,01325 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

$$T_0 = 273,15 \text{ K}$$

2.1.1 Jednotky teploty

Základní jednotka termodynamické teploty je K (*Kelvin*). Je to 273,16-tá část termodynamické teploty trojného bodu vody. Lord Kelvin definoval termodynamickou stupnici na základě trojného bodu vody, to znamená na základě rovnovážného stavu tří skupenství vody (ledu, vody a nasycené vodní páry). Teplota trojného bodu vody má na termodynamické stupnici hodnotu $T = 273,16 \text{ K}$. Kromě termodynamické teploty se používá také Celsiovy teploty definované rovnicí

$$\vartheta = T - T_0 \quad (2.5)$$

kde

$$T_0 = 273,16 \text{ K}.$$

Obě jednotky ($^{\circ}\text{C}$, K) lze použít pro vyjádření teplotního rozdílu. Termodynamická teplotní stupnice je teoreticky definována na základě termodynamických zákonů, nezávisle na vlastnostech reálných látek. [1]

Podle definice má stupň Celsia stejnou velikost jako Kelvin ($1 \text{ K} = 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$). Hodnoty teploty můžeme vyjádřit v kelvinech nebo stupních celsia. Platí, že $\Delta t = \Delta T$.

V anglosaských zemích se také používá pro vyjádření teploty Fahrenheitova stupnice ($^{\circ}\text{F}$), která odpovídá teplotě ledu $32 \text{ }^{\circ}\text{F}$ a teplotě varu vody $212 \text{ }^{\circ}\text{F}$. Tato stupnice se dělí mezi těmito body na $180 \text{ }^{\circ}\text{F}$.

2.2 Principy měření teploty

Při měření neznámé teploty daného objektu se využívá možnost měření rozdílných sekundárních veličin, které se různě mění od měřené teploty. Takovou veličinou může být například změna tlaku teploměrné látky nebo objemu. Všeobecně se využívá několik základních principů na měření teploty:[2]

- a) Teplotní roztažnost tuhých, plyných nebo kapalných látek. Teplotní roztažnost teploměrné látky, respektive rozdíl teplotních roztažností dvou látek poté představuje míru teploty. Měří se změna objemu teploměrné látky při konstantním tlaku (dilatační teploměry), nebo změna tlaku teploměrné látky při konstantním objemu (tlakové teploměry) [2]

- b) Změnu elektrických vlastností snímače v závislosti na změně teploty. Využíváme:
 - závislost elektrického odporu vodičů nebo polovodičů na teplotě, takové snímače teploty se nazývají odporové teploměry, respektive termistory.
 - vznik termoelektrického napětí v obvodu tvořeném dvěma různými kovovými vodiči, jejichž konce jsou spojené a vystavují se dvěma různým teplotám (Seebeckův jev). Takové snímače teploty se nazývají termočlánky.
- c) Snímání celkové energie záření. Tuhé a kapalné látky vysílají při každé teplotě $T > 0 \text{ K}$ tepelné záření. Na určení teploty se využívá tepelná závislost, kterou měří tepelné detektory [2]
- d) Využití spektrální zářivosti měřeného objektu. S růstem teploty měřeného objektu roste i jeho spektrální zářivost. [2]

2.3 Teploměry

Zařízení na měření teploty se nazývají teploměry. Teploměry využívají různé měřicí principy a existují v různých konstrukčních provedeních. Všeobecně dělíme teploměry podle umístění snímací části v měřeném prostředí do dvou základních skupin. Dotykové teploměry a bezdotykové teploměry. Dotykové teploměry mají snímanou část umístěnou přímo v měřeném prostředí, to znamená, že se přímo dotýkají měřeného objektu. Bezdotykové teploměry měří teplotu na dálku z určité vzdálenosti. Jejich snímací část je umístěna mimo měřené prostředí, to znamená, že se nedotýkají měřeného objektu.

2.4 Bezdotykové měření teploty – pyrometrie

Základ slova pyrometr tvoří řecké slovo „pyro“, což znamená oheň. Původně byl termín pyrometr užíván k pojmenování přístrojů, jež byly schopny měřit teplotu objektů, které vyzařovaly viditelné záření. Původní pyrometry byly bezdotykové optické přístroje, které zachycovaly a vyhodnocovaly viditelné záření vyzařované horkými objekty. Moderní a přesnější definice definuje pyrometry jako všechny bezkontaktní přístroje, které zachycují a měří termální radiaci emitovanou zkoumaným objektem, s cílem zjistit teplotu zkoumaného povrchu. Slovo termometr má rovněž řecký základ „termos“, což znamená „horký“. Termometry představují rozsáhlou skupinu přístrojů, které měří teplotu. Pyrometr je tedy jedním z typů termometru. [18]

Pyrometry se používají hlavně pro měření vysokých teplot. Nejpoužívanější jsou v oblasti tepelného nebo světelného záření, které tělesa vypouštějí do měřeného okolí. Mezi pyrometry však řadíme také vysokoteplotní termočlánky.

Každé těleso, které má vyšší teplotu než teplotu okolí, vyzařuje stále tepelnou energii do okolí. Tato energie je ve své podstatě elektromagnetické vlnění s určitou vlnovou délkou. Velikost energie, kterou vyzaří těleso o dané vlnové délce je závislá na teplotě tělesa a na fyzikálních vlastnostech daného tělesa. Z toho poté můžeme spočítat teplotu vyzařujícího tělesa. Je potřeba podotknout, že pyrometry dokážeme měřit jen určitou průměrnou hodnotu teploty tělesa určité plochy.

Pyrometrie se používá ve velkém rozsahu teplot. Nejčastěji v rozmezí od $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ do $3500 \text{ }^\circ\text{C}$, ve speciálních případech od $-100 \text{ }^\circ\text{C}$ do $5000 \text{ }^\circ\text{C}$. Dovolená chyba při měření se pohybuje v rozsahu 1-7%, ve speciálních případech může být chyba měření pouze 0,02%. Nejčastější použití pyrometrů je u žíhacích, kalících a vysokých pecích. Můžeme je použít při měření například vytékajícího kovu nebo roztaveného kovu, horkých bloků při kování, válcování, lisování atd.

Mezi výhody pyrometrů řadíme:

- Přímý a snadný způsob měření teploty.
 - Absence tepelného namáhání pyrometrů bezprostředním stykem s měřeným tělesem.
 - Možnost spojitého měření teploty.
 - Rychlé sledování teplotních změn.
 - Velká spolehlivost při dlouhodobém měření teplot nad $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$ (při těchto teplotách není možné použít dotykové teploměry neboť mají velice omezenou životnost).
 - Možnost měření teploty v korozním prostředí.
 - Možnost práce v automatickém režimu.
 - Možnost měření teploty pohybujících se objektů (např. rotující součásti).
- [2]

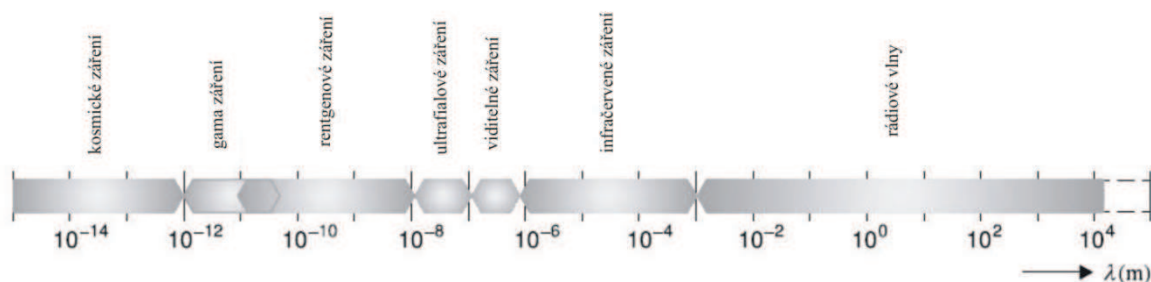
Mezi nevýhody pyrometrů řadíme:

- Správná teplota se dá určit jen tehdy, pokud známe emisivitu měřeného objektu (pyrometry se kalibrují pro záření absolutně černého tělesa), v opačném případě je potřeba udělat kalibraci pyrometru pro dané podmínky.
 - Naměřené údaje mohou podstatně ovlivňovat fyzikální vlastnosti optické cesty mezi měřeným objektem a měřidlem (pohlcení nebo rozptyl záření a podobně).
- [2]
- Nejistoty měření způsobené nepřesnou korekcí parazitního odraženého záření z okolního prostředí na měřený objekt. [16]

2.4.1 Zákony záření – základy

Pyrometrie používá při svém měření základní vyzařovací zákony. Vlnové délky, které odpovídají elektromagnetickým vlnám v oblasti tepelného záření a světelného záření se pohybují v rozmezí 10^{-8} až 10^{-3} m. Barva záření, které vydává těleso je závislá na absolutní hodnotě teploty. Čím vyšší je teplota tělesa, tím kratší jsou vlnové délky, na kterých těleso vyzařuje. [2]

Do $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ vyzařuje těleso poměrně velké vlnové délky, nazýváme je infračervené, které jsou lidským okem neviditelné. Těleso, které má teplotu vyšší než $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ vyzařuje viditelné záření, nejprve červeně zbarvené, při teplotě blízké se $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ se zbarvují do žluta, při teplotě okolo $2000\text{ }^{\circ}\text{C}$ zeleně a nad $3000\text{ }^{\circ}\text{C}$ modře. Při vysokých teplotách blízké se $6000\text{ }^{\circ}\text{C}$ vyzařují ultrafialový paprsek. Na obrázku (Obr. 2.1) je znázorněné celé spektrum elektromagnetického záření.



Obr. 2.1 – Spektrum elektromagnetického vlnění

Idealizovaný objekt, který se používá ve vyzářovacích zákonech nazýváme ideálně černé těleso. Tento objekt je pouze teoretický, který při dané teplotě vyzáří největší množství energie, a které naopak všechnu energii při dopadu na těleso pohltí.

Pohltivost (absorbance) α záření je dána vztahem:

$$\alpha_{\lambda} = \Phi_{\lambda a} / \Phi_{\lambda d} \quad (2.6)$$

kde

α_{λ} – je spektrální pohltivost pro danou vlnovou délku

Φ_a – je pohlcený zářivý tok

Φ_d – je dopadající zářivý tok

Prostupnost (transmittance) τ záření je dána vztahem:

$$\tau_{\lambda} = \Phi_{\lambda t} / \Phi_{\lambda d} \quad (2.7)$$

kde

τ_{λ} – je spektrální propustnost pro danou vlnovou délku

Φ_t – je prostupující zářivý tok

Φ_d – je dopadající zářivý tok

Odrazivost (reflektance) ρ záření je dána vztahem:

$$\rho_{\lambda} = \Phi_{\lambda r} / \Phi_{\lambda d} \quad (2.8)$$

kde

ρ_{λ} – je spektrální odrazivost pro danou vlnovou délku

Φ_r – je odražený zářivý tok

Φ_d – je dopadající zářivý tok

Pomocí Plankova zákona se může určit vlnová délka záření λ , při které je při dané teplotě T monochromatické vyzařování absolutně černého tělesa M_λ maximální. Intenzita monochromatického vyzařování M_λ podle Plankova vyzařovacího zákona: [2]

$$M_\lambda = C_1/\lambda^5 (e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1) \quad (2.9)$$

kde

c_1 – je první vyzařovací konstanta, $c_1 = 3,69 \times 10^{-16} \text{ (W.m}^2\text{)}$

c_2 – je druhá vyzařovací konstanta, $c_2 = (0,01438769 \pm 12 \times 10^{-8}) \text{ (m.K)}$

λ – je vlnová délka záření

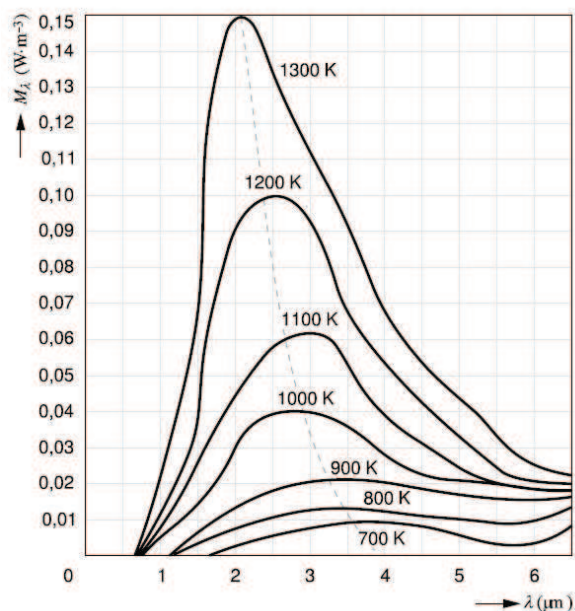
T – je absolutní teplota

Čím vyšší je teplota tělesa, tím víc se maximum záření posouvá směrem ke kratším vlnovým délkám (Obr. 2.2). Spojením maximálních hodnot na grafu (čárkovaná čára) se získá závislost, kterou vyjádřil Wien posouvacím zákonem: [2]

$$\lambda_m T = \text{konst.} = 2898 \mu\text{m} \cdot \text{K} \quad (2.10)$$

kde

λ_m – je vlnová délka odpovídající maximu závislosti $M_\lambda = f(\lambda)$



Obr. 2.2 – Spektrální záření absolutně černého tělesa v závislosti na vlnové délce a teplotě

Celkové množství intenzity vyzařování absolutně černého tělesa M_c popisuje Stefan-Boltzmannův zákon

$$M_c = \sigma \cdot T^4 \quad (2.11)$$

kde

T – je absolutní teplota zářícího tělesa
 σ – je Stefan-Boltzmannova konstanta ($\sigma = 5,6697 \times 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}\text{K}^{-4}$)

Skutečné tělesa mají menší vyzařovací schopnost. Nazýváme je nečerné tělesa a vyzařují $M < M_c$, pro které platí:

$$M = M_c \cdot \varepsilon \quad (2.12)$$

kde

ε – je emisivita

Lambertův zákon nám říká, že zář L ideálního plošného zdroje tepelného záření je stejná ve všech směrech. Příímým důsledkem tohoto zákona je závislost zářivosti I na úhlu φ , který svírá směr pozorování s kolmicí k rovině zdroje (směr normály n), takže platí: [16]

$$L_\varphi = I_n / \Delta S = I_\varphi / \Delta S \cos\varphi = I_\varphi / \Delta S_n = \text{konst.} \quad (2.13)$$

Hodnota I_n představuje maximální hodnotu zářivosti ve směru kolmice. Tělesa, pro která platí tento vztah se označují jako kosinové zářiče. [16]

Kirchhoffův zákon uvádí, že poměr intenzity vyzařování M tepelného zářiče k pohltivosti α závisí jen na termodynamické teplotě tělesa a nezávisí tedy na jeho chemickém složení, úpravě povrchu a oxidaci. Zákon lze vyjádřit rovnicí: [16]

$$M / \alpha = f(T) \quad (2.14)$$

Intenzita vyzařování a zář černého tělesa závisí jen na termodynamické teplotě.

2.4.2 Rozdělení pyrometrů

Pyrometry pracují na různých fyzikálních principech. Všeobecně snímají tepelné nebo světelné záření, které vyzařuje daný objekt. Existují ve velkém množství konstrukčního zhotovení. Můžeme je tedy třídit podle různých kritérií.

Podle rozsahu spektra rozdělujeme pyrometry na:

- monochromatické
 - úhrnné
 - pásmové
- [2]

Podle oblasti spektra rozdělujeme pyrometry na:

- ultrafialové
 - optické
 - infračervené
 - rádiové
- [2]

Podle způsobu měření rozdělujeme pyrometry na:

- radiační (úhrnné)
 - fotoelektrické (pásmové)
 - spektrální (jasové)
 - distribuční (barevné)
- [2]

2.4.3 Radiační pyrometry

Radiační pyrometr (Obr. 2.3) je bezdotykový teploměr, který se používá na měření teploty černých těles, respektive téměř černých těles. Princip měření využívá Stefan-Boltzmannova zákona, který je vyjádřený vztahem (2.11). Znamená to, že energie záření, která se vymění mezi měřenými tělesy měřicí ploškou, se rovná rozdílu čtvrtých mocnin jejich absolutních teplot. Teoreticky pracují v celé oblasti vlnových délek, teda od $\lambda = 0$ do $\lambda \rightarrow \infty$. Dopadající zářivá energie měřicí plochu ohřeje a její teplota se měří snímacím prvkem. Jen ojediněle se v takovém pyrometru uplatní energie celého spektra záření. Obyčejně prostředí mezi měřeným objektem a měřicí ploškou propustí jen záření v určitém pásmu.[2]

Radiační pyrometr může mít optickou část konstrukčně vyřešenou dvěma způsoby. Varianta první je, že hlavní prvek je konkávně pozlacený, respektive postříbřené zrcadlo 3, nebo jsou to čočky z vhodného materiálu. Jestliže skleněné čočky nepropouštějí záření s vlnovou délkou větší než $3 \cdot 10^{-6} \text{ m}$, takovým pyrometrem nelze měřit celkové množství dopadajícího záření. Použití jiných materiálů čoček většinou podstatně nerozšíří spodní hranici měřené teploty. U optické soustavy s konkávním zrcadlem toto omezení odpadá.

U obou variant se v ohnisku optického systému nachází snímací prvek 4. Používá se miniaturní termočlánek, termobaterie (tvořená až 30 termočlánky, zapojených do série na ploše 4 mm^2), bolometr (speciální fóliový odporový teploměr), termistor nebo bimetalický teploměr. Záření, které vysílá měřený objekt, se odráží od zrcadla 3 do ohniska měřicí plošky 4, kterou ohřeje. Měřicí ploška je začerněná, aby pohltila co největší část dopadajícího záření. Pomocí snímacího prvku se měří její teplota. Měřený objekt všobecně není absolutně černé těleso, údaje pyrometru je třeba korigovat podle vztahu: [2]

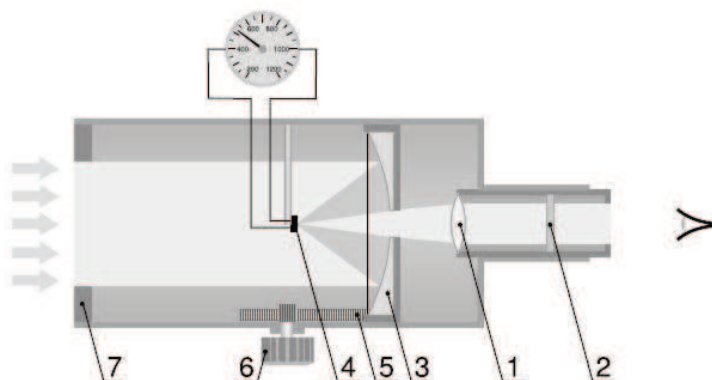
$$T_s = T_p / \sqrt[4]{\varepsilon} \quad (2.15)$$

kde

T_s – je skutečná teplota

T_p – je teplota uvedená pyrometrem

ε – je emisivita úhrnného záření



Obr. 2.3 – Radiační pyrometr [2]

Další chyby měření nastávají vlivem sálání samotného citlivého prvku, také odvodem tepla do okolí, pokud znečistíme zrcadlo měřícím zařízením, pokud záření přejde přes ochranné sklo a podobně.

Radiační pyrometry mají v nastavitelném okuláru čočku 1, na kterou dopadá část záření z měřeného objektu. Pomocí objektivu se dá pyrometr správně zaměřit. Zaostření optické soustavy se vykonává posouváním zrcadla 3. Po pootočení nastavovacího kolečka 6 se otočný pohyb převádí pomocí ozubeného převodu 5 na přímočarý a zrcadlo se posune. Jestliže se pyrometr vzdaluje od měřeného objektu, úměrně se musí zvětšit otvor vstupní clony 7. Kvůli ochraně zraku při měření je v okuláru umístěná ochranná clona 2. V případě použití bolometru se musí provést korekce naměřených hodnot na změny okolní teploty. Proto se do měřícího obvodu připájí další bolometr, na který nedopadá měřené záření. [2]

Pokud měříme teplotu radiačním pyrometrem je důležité, aby námi měřený povrch objektu překryl celé zorné pole. Pokud bychom takto neučinili, dochází k velkým chybám při měření. Rozsah teploty, který můžeme pomocí radiačního pyrometru měřit je v rozsahu od 50°C do 1500°C , pouze ve speciálních případech od -100°C do 5000°C . Povolena chyba se pohybuje v rozmezí 1 - 2% měřícího rozsahu. Časová konstanta se pohybuje v rozmezí od 0,005 s až do 5 s. V tomto případě jde o objektivní měření teploty, protože naměřené hodnoty nejsou závislé na obsluze. Tyto pyrometry používáme například pro dlouhodobé měření teploty určitého tělesa, například teploty v pecích. Radiační pyrometry se používají například na měření teploty u těles s velkou emisivitou. Nejsou však vhodné na měření povrchů, které jsou téměř černé.

2.4.4 Fotoelektrické pyrometry

Fotoelektrické pyrometry pracují na podobném principu jako radiační pyrometry. Reagují však na záření jen v určitém rozsahu vlnových délek. Tyto vlnové délky vymezuje použitá optika, citlivost snímaného objektu a filtry. Jako snímaný prvek se používají fotočlánky, fotonásobiče, fotodiody, fotoodpory, fototranzistory a podobně.

Skutečnou teplotu můžeme vypočítat podle vztahu:

$$1/T_s = 1/T_p + \lambda_p / c_2 \cdot \ln \varepsilon_p \quad (2.16)$$

kde

T_p – je teplota pyrometru

λ_p – je charakteristická vlnová délka ve vymezeném pásmu

c_2 – je druhá vyzařovací konstanta

ε_p – je pásmová emisivita měřeného objektu

Pásmová emisivita velice kolísá u reálných objektů, a proto se dá chyba jen přibližně odhadnout. Výhoda fotoelektrických pyrometrů je velmi rychlá reakce na změny teploty a možnost s nimi měřit i malé objekty. Používáme je na bezdotykové měření teploty například ve válcovnách a slévárnách. Pokud se mezi měřeným objektem a fotoelektrickým pyrometrem nacházejí plyny s absorpčními pásmy v rozsahu infračerveného záření, využíváme je jako primární etalony teploty.

2.4.5 Spektrální pyrometry

Spektrální pyrometry pracují na základě množství tepelné energie, která je vyzářena na úzkém spektru vlnové délky. Teplotu u spektrálních pyrometrů měříme tak, že porovnává jas měřeného objektu s jasnem porovnávacího zdroje pyrometru. Jas porovnávacího zdroje se mění dokud opticky nezmezí rozhraní mezi zdrojem a obrysem měřeného objektu. Porovnávání se provádí buď automaticky nebo lidským okem. Abychom měřili tepelnou energii jen na jedné vlnové délce, v přístroji je umístěn monochromatický filtr. Nejčastěji používaná vlnová délka je $\lambda = 0,65\text{m}$, která se udává u červeného světla. Tato vlnová délka je pro nás výhodná, protože při ní lidské oko je stále dostatečně citlivé a záření má vyhovující intenzitu. Pokud se použije světlo jen s jednou vlnovou délkou a porovnáváme jas měřeného objektu s jasnem porovnávacího zdroje pyrometru, vyloučíme vliv barvy měřeného objektu na přesnost měření.

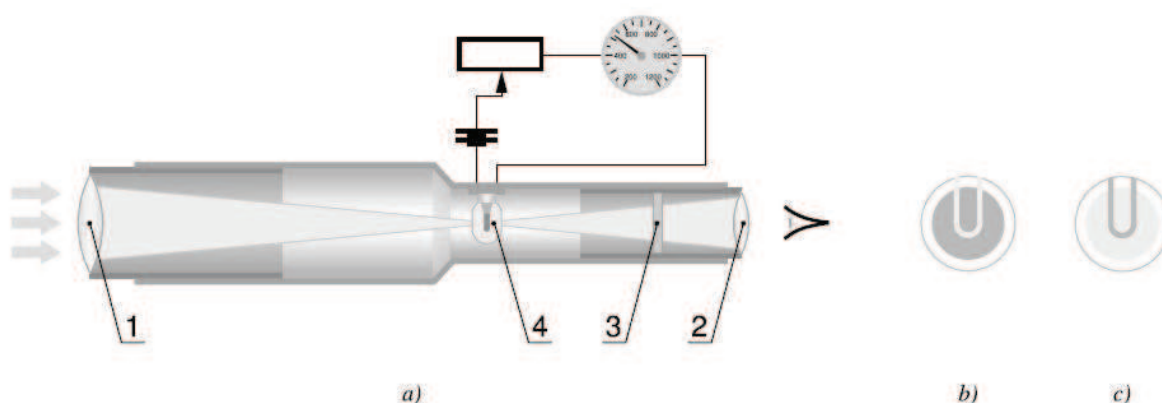
Podle konstrukce můžeme spektrální pyrometry rozdělit na:

- Přístroje s proměnlivým jasnem porovnávacího zdroje, kde se jas pyrometrické žárovky mění pomocí elektrického obvodu.
- Přístroje se stálým jasnem porovnávacího zdroje, když pyrometrická žárovka svítí stálým jasnem a mezi ně a dopadající záření se vsune filtr s nastavitelnou absorpcí.

[2]

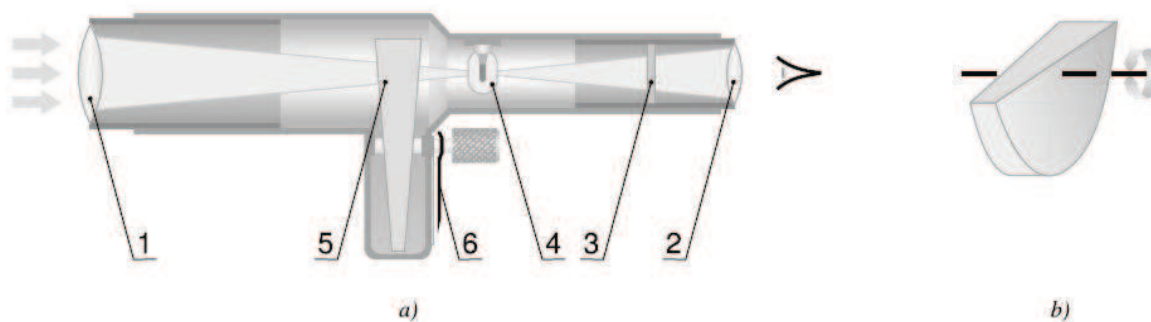
Spektrální pyrometr s proměnlivým jasnem porovnávacího zdroje porovnává intenzitu záření měřeného objektu s intenzitou záření porovnávacího zdroje. Porovnávání realizujeme nejčastěji pomocí lidského oka nebo pomocí elektrooptických metod. Porovnávacím zdrojem bývá nejčastěji kovové vlákno žárovky.

Konstrukci spektrálního pyrometru ukážeme na (Obr. 2.4). Záření z měřeného objektu vchází do pyrometru přes objektiv 1. Přečází okolo pyrometrické žárovky 4 a přes filtr 3 až do čočky okuláru 2. Pomocí proměnlivého rezistoru pozorovatel nastavuje takový žhavicí proud žárovky, aby obraz vlákna zmizel na pozadí měřeného objektu. Teplota měřeného objektu je úměrná žhavicímu proudu žárovky, který se odečítá na měřícím přístroji kalibrovaném přímo v $^{\circ}\text{C}$. Při nastavování proudu je potřeba postupovat pomalu, protože měřící vlákno reaguje na změny se zpožděním. Vlákno žárovky bývá nejčastěji z wolframu a jeho teplota může dosáhnout maximálně 1500°C . Při vyšších teplotách se nedá zaručit stálost údajů. [2]



Obr. 2.4 – Spektrální pyrometr s proměnlivým jasem žárovky
 a) konstrukce b) vlákno žárovky jasnější než měřený objekt c) měřený objekt jasnější než vlákno žárovky [2]

Při měření teplot, které jsou vyšší než $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$ používáme spektrální pyrometry se stálým jasem porovnávacího zdroje (Obr. 2.5). Nejčastěji zde používáme kovové vlákno pyrometrické žárovky. Záření z měřeného objektu přichází přes objektiv 1 do pyrometru. Dále prochází přes bod 5, který má rozdílnou tloušťku po obvodu. Potom prochází přes filtr 3 do čočky okuláru 2.

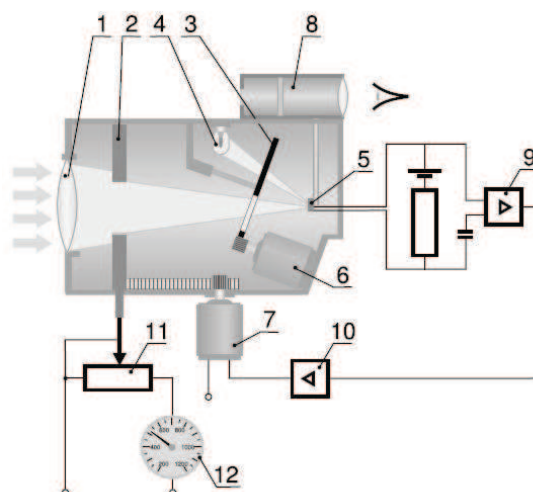


Obr. 2.5 – Spektrální pyrometr se stálým jasem žárovky
 a) konstrukční řešení b) klín s proměnlivou tloušťkou [2]

Pyrometrická žárovka 4 se žhává pomocí konstantního proudu. Pozorovatel pootáčí klínem dokud vlákno žárovky nesplyne s obrysem měřeného objektu. Jinak vlákno vypadá světleji nebo tmavěji než měřený objekt. Teplota měřeného objektu je úměrná pootočení klínu. K hřídeli klínu je upevněna ručička 6, která nám zobrazuje teplotu na stupnici, která je uvedena na pyrometru. Tuto teplotu kalibrujeme ve $^{\circ}\text{C}$.

U obou typů spektrálního pyrometru závisí přesnost měření také na obsluze pyrometru. Porovnávání jasů porovnávacího zdroje a obrysu měřeného předmětu musí být co nejpřesnější. V opačném případě přinášíme do měření chybu. Díky tomuto faktoru se hledaly možnosti, jak vyloučit lidskou chybu.

Spektrální pyrometr s automatickým provnáváním intenzity záření schématicky znázorňuje (Obr. 2.6). Měřené záření prochází přes objektiv 1, clonu 2 a dalším optickým systémem se soustřeďuje do ohniska 5.



Obr. 2.6 – Spektrální pyrometr s automatickým porovnáváním intenzity záření [2]

V ohnisku se nachází fotodioda, na kterou dopadá záření porovnávacího vlákna wolframové žárovky 4. Obě dvě záření se před dopadem na fotodiodu přerušují tou stejnou rotující clonou 3, kterou pohání motor 6. Přerušování dopadajícího záření způsobí, že obě porovnávací zařízení vyvolají na fotodiodě elektrické impulzy. Tyto impulzy jsou vzájemně posunuté o 180°C . V případě, že jsou impulzy stejné úrovně, teda záření mají stejnou intenzitu, střídavý zesilovač 9 dává na výstupu nulový signál. V opačném případě se výstupní signál vede přes zesilovač 10 do motoru 7. Převodový mechanismus představuje clonu 2 dokud se nevyrovná intenzita obou záření dopadajících na fotodiodu. Poloha clony se přes převodník 11 přenáší na stupnici 12. Na zaměření cíle pyrometru slouží okulár 8. [2]

Spektrální pyrometry ve všech variantách při odečítání na stupnici zobrazí teplotu, která by odpovídala záření absolutně černého tělesa. Jenomže ne vždy se reálný objekt chová jako dokonale černé těleso (jeho emisivita $\varepsilon < 1$), je poté potřeba naměřenou teplotu korigovat. Všeobecně platí, že teplota odečítaná na stupnici pyrometru bývá nižší než skutečná teplota tělesa.

Pro skutečnou teplotu platí vztah:

$$1/T_s = 1/T_p + \lambda/c_2 \cdot \ln \varepsilon_\lambda \quad (2.17)$$

kde

T_s – je skutečná teplota

T_p – je teplota na stupnici jasového pyrometru

λ – je charakteristická vlnová délka záření ve vymezeném pásmu

ε_λ – je spektrální emisivita měřeného objektu

c_2 – je druhá vyzařovací konstanta

Aby se v praxi usnadnilo korigování naměřené teploty, zpracovávají se tzv. normogramy, kde jsou uváděny jednotlivé hodnoty emisivity korekční teploty, kterou musíme přidat k naměřené teplotě.

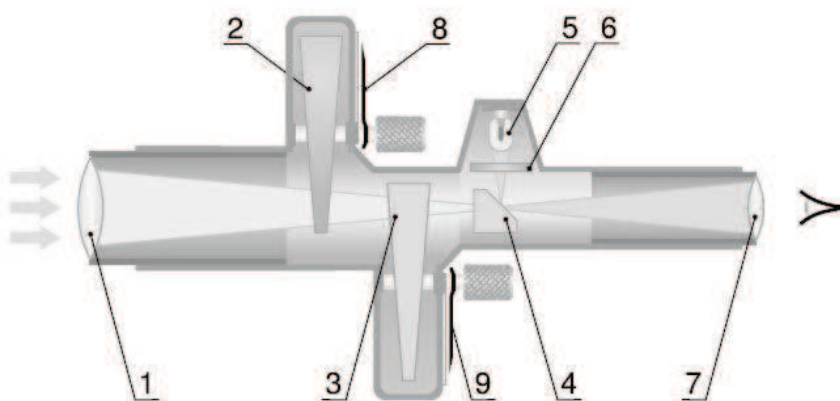
Spektrální pyrometry nejsou vhodné při měření objektů, kde neznáme emisivitu nebo se emisivita během měření mění. Chyby měření může také způsobovat samotný přístroj, prostředí, které se nachází mezi objektem a přístrojem, nesprávná obsluha přístroje a podobně.

Pyrometry pracující na principu změny proudu mají měřicí rozsah od 700°C do 1500°C . Horní měřicí rozsah ovlivňuje maximální teplota vlákna, při které se dá ještě zaručit stálost údajů. Pyrometrie pracující s rotací klínu mají měřicí rozsah až do 3500°C . Spektrální pyrometry mají v daném měřicím rozsahu poměrně velkou chybu měření, od 7 až do 9%, což při měřené teplotě například 2000°C představuje hodnotu až 180°C .

2.4.6 Distribuční pyrometry

Pracují na podobném principu jako spektrální pyrometry. Jedná se však o objektivnější měření teploty. Nepotřebujeme znát přesnou hodnotu emisivity daného tělesa, stačí nám znát pouze interval. U distribučních pyrometrů se vyskytují některé nové veličiny. Distribuční teplota T_v libovolně zářící je teplota černého tělesa, při které má jeho záření v určité oblasti spektra taky jisté poměrné spektrální rozložení jako daný zářič. Pokud je tato oblast spektra viditelná, distribuční teplota se poté nazývá distribuční teplota. To znamená, že daný zářič vyvolá v pozorovateli takový barevný vjem, jako černé těleso s teplotou T_f . Pokud se při měření pyrometrem zjišťuje poměr jasů měřeného objektu zachycených na dvou vlnových délkách, určí se tzv. poměrová teplota T_p . Poměrová teplota je teplota černého tělesa, při které je poměr jasů stejný jako poměr jasů měřeného tělesa. Pro šedá tělesa všechny tři teploty splývají. Distribuční teplota se dá určit dvěma způsoby:

- Subjektivně – z barevného vjemu vyvolaného smíšením dvou monochromatických záření.
 - Objektivně – z poměru intenzit záření na dvou různých vlnových délkách.
- [2]



Obr. 2.7 – Distribuční porovnávací pyrometr [2]

Z konstrukčního hlediska se distribuční pyrometry dělí na porovnávací a poměrové.

Distribuční porovnávací pyrometr porovnává záření měřeného objektu a pyrometrické žárovky. Toto porovnávání se vykonává při dvou vlnových délkách. Pyrometr pracuje ve viditelné části spektra, takže nejčastěji využívají vlnové délky $\lambda_1 = 0,65 \mu\text{m}$ a $\lambda_2 = 0,55 \mu\text{m}$. Obě vlnové délky jsou doplňkové. [2]

Schéma přístroje představuje (Obr.2.7). Záření, které vychází z měřeného objektu, vchází do pyrometru přes objektiv 1. Prochází přes dvoubarevný otočný klín 2. Zde se oddělí dvě barvy, červená a zelená. Pozorovatel si natáčí dvoubarevný klín dokud se mu nezdá, že dopadající záření je bílé. Záření z měřeného objektu dále prochází přes neutrální klín 3 a dopadá na polopropustný optický hranol 4. Jeho střed je postříbřený. Pyrometrickou žárovku 5 napájí konstantní proud. Její záření prochází přes filtr 6 a oko ho také vnímá jako bílou barvu. Dále se záření z pyrometrické žárovky odráží od zrcadlové části dělící plochy optického hranolu 4. Přes výstupní čočku 7 se dostává k pozorovateli. Ten vidí v přístroji současně dvě porovnávací plošky. Aby se jas vyrovnal v obou zářeních, pootáčí se šedý klín. Údaj o distribuční teplotě uvádí stupnice 8 dvojbarevného otočného klínu. Údaj o jasové teplotě se odečítá na stupnici 9 neutrálního šedého klínu. [2]

Distribuční teplota tělesa se vypočítá podle vztahu:

$$1/T_f = \frac{1}{(\lambda_1.T_1)} + \frac{1}{(\lambda_2.T_2)} / \frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \quad (2.18)$$

kde

T_f - je skutečná distribuční teplota

λ_1, λ_2 - jsou použité vlnové délky

T_1, T_2 - jsou teploty určené při příslušných filtrech

Pokud má těleso charakter šedého zářícího tělesa, výsledek není potřeba upravovat. Pokud se jeho emisivita mění při změně vlnové délky, je třeba upravit podle vztahu:

$$T_s = T_m - T_k \quad (2.19)$$

kde

T_s - je skutečná teplota

T_m - je naměřená teplota

T_k - je korekční teplota

Hodnota korekční teploty se určí ze vztahu:

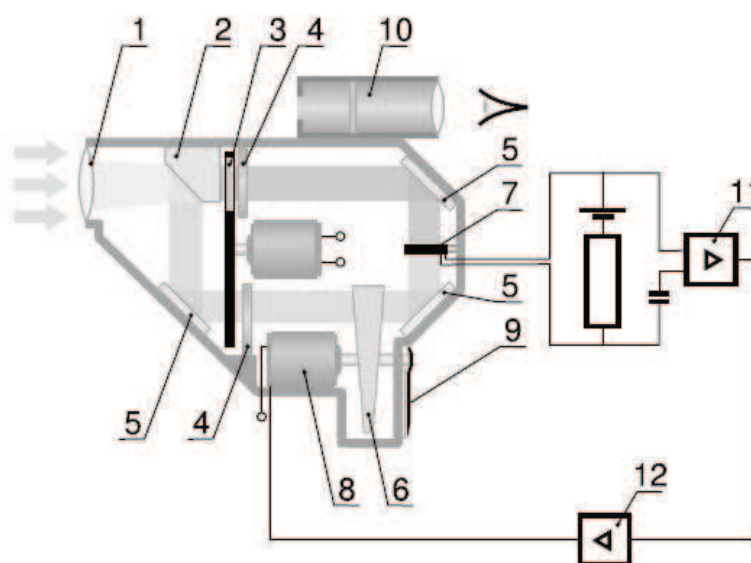
$$T_k = a \cdot T_m^2 / 1 + a \cdot T_m \quad (2.20)$$

kde

$$a = 14\,380 \mu\text{mK}.$$

Distribuční poměrový pyrometr využívá při měření poměru dvou intenzit záření při dvou vlnových délkách λ_1, λ_2 . Záření měřeného tělesa vchází do přístroje přes objektiv 1. Prochází do polopropustného hranolu 2, kde se rozdělí na dva samostatné rovnoběžné svazky. Na usměrňování svazků záření v pyrometrii slouží polostříbrné zrcadla 5. Oba dva svazky procházejí přes rotující clonu 3, poháněnou osobitým elektromotorem. Rotující clona oba dva svazky střídavě přerušuje. Dále oba svazky procházejí přes filtry 4. Jeden filtr propustí záření odpovídající zelené barvě,

druhý filtr propustí záření odpovídající černé barvě. Oba dva svazky záření se pomocí zrcadel 5 vedou na snímací prvek pyrometru 7. Často se jako snímací prvek používá fotodioda. Ve snímacím prvku vzniká vlivem přerušovaného záření různé intenzity střídavý signál a ten vyhodnocuje porovnávací člen 11. Signál prochází do zesilovače 12, kde se zesílí na takovou úroveň, aby vyvolal pootočení elektromotoru 8. Na hřídel elektromotoru 8 se upevňuje šedý klín 6. Vlivem řídicího signálu se klín pootočí a teda změní poměr dopadajícího záření. Přitom dojde ke snížení, respektive zvýšení intenzity záření v jednom svazku. Pokud je intenzita záření stejná v obou dvou svazcích, řídicí signál je nulový. Na tom stejném hřídeli elektromotoru, kde se nachází klín, je upevněná i ručička 9. Ručička umožňuje odečítat na stupnici distribuční teplotu. K zaměření pyrometru na cíl slouží okulár 10. [2]



Obr. 2.8 – Poměrový pyrometr [2]

Měřicí rozsah distribučních pyrometrů bývá od 700°C až do 2000°C . Povolená chyba při měření je od 1,5% do 2%.

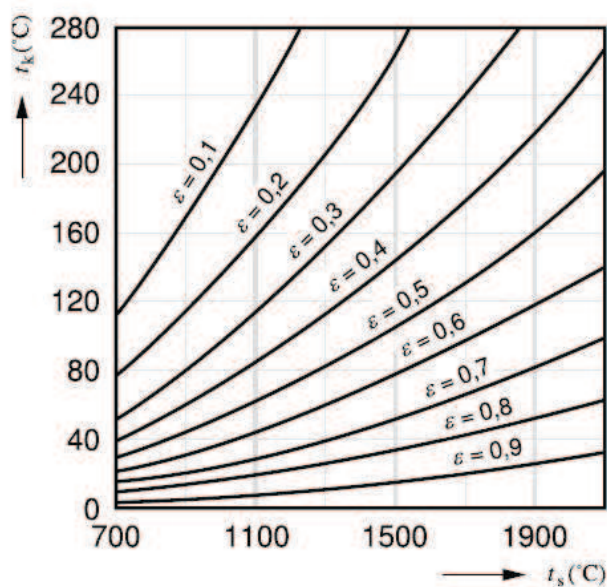
2.4.7 Chyby měření pyrometrů a jejich korekce

Při měření danými pyrometry se předpokládá, že měříme těleso, které má vlastnosti absolutně černého tělesa, u distribučních pyrometrů předpokládáme, že těleso má vlastnosti jako šedé těleso. V reálu se však počítá, že se měří teplota těles kde emisivita $\varepsilon < 1$. Proto při měření teploty je nutná korekce.

Přehled pro korekční teploty t_k můžeme nalézt na (Obr.2.9). Z obrázku vyplývá, že korekce měřené teploty musí být tím větší, čím menší je emisivita daného tělesa. Radiční a spektrální pyrometry měří nižší teplotu než ve skutečnosti je, a proto je tuto hodnotu potřeba upravit. Korekční teplota se odečítá u distribučních pyrometrů, protože teplota naměřená je vyšší než skutečná. Na přesnost měření má vliv několik faktorů:

- Velikost cíle a jeho vzdálenost.
 - Emisivní vlastnosti měřeného povrchu.
 - Druh použitého pyrometru.
 - Optické vlastnosti měřicího přístroje.
 - Citlivost snímacího prvku.
 - Typ prostředí mezi měřeným objektem a pyrometrem.
 - Zkušenosti pozorovatele při ručním měření.
- [2]

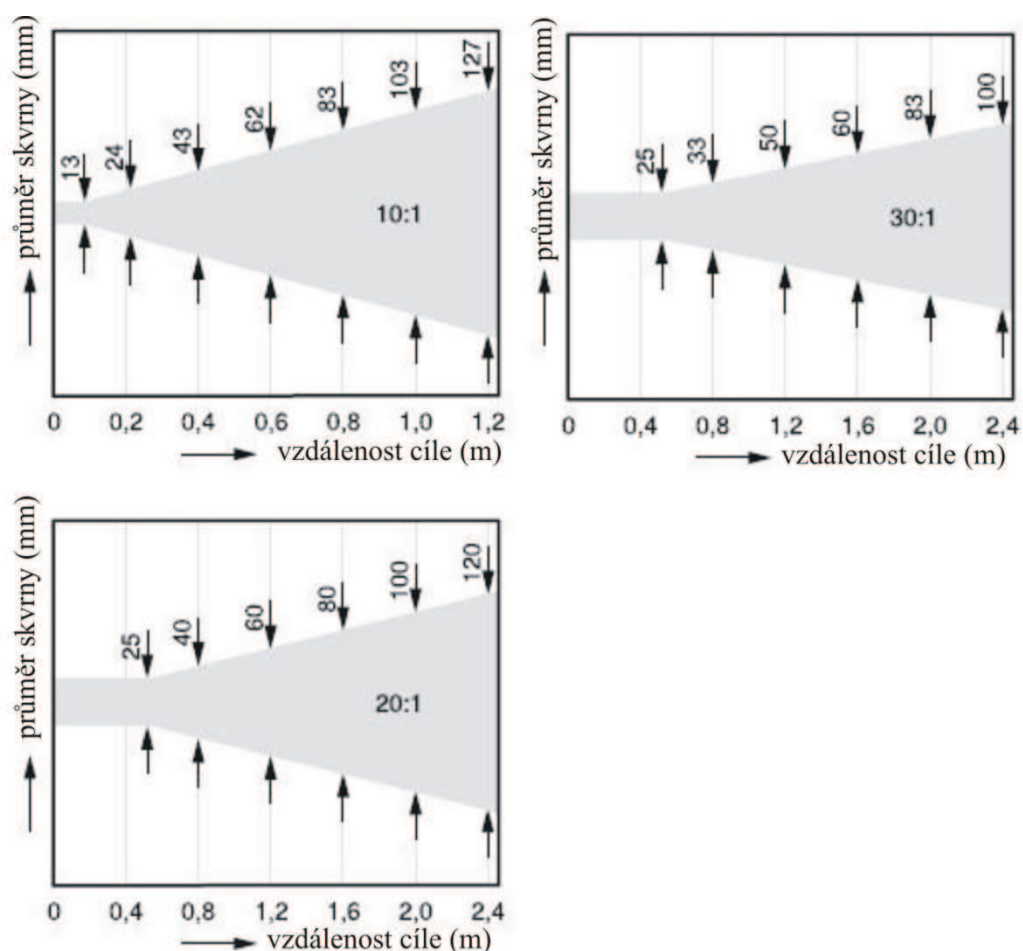
Zorné pole je úhel pohledu, se kterým pracuje přístroj a závisí na použité optice. Pyrometry ve skutečnosti jen měří určitou průměrnou hodnotu daného tělesa na jeho povrchu. Proto je velice důležité, aby v zorném poli měřicího přístroje byl jen měřený objekt. Pokud tyto podmínky nejsou splněny mohou nastat chyby při měření teploty.



Obr. 2.9 – Závislost korekčních teplot t_k na skutečné teplotě t_s a na emisivním koeficientu

Se zorným polem souvisí i ohnisková vzdálenost optiky u přístroje. Ohnisková vzdálenost je určitý bod, kde se zobrazuje nejmenší měřící skvrna. Například přístroj s poměrem mezi vzdáleností a velikostí skvrny $130:1$ a ohniskovou vzdáleností 1700 mm bude mít nejmenší vzdálenost skvrny $1700:130 = 13,08\text{ mm}$. Pyrometry určené na měření z krátkých vzdáleností, mají malou ohniskovou vzdálenost na optice. Pohybuje se v rozmezí $2,5$ až 300 mm . Přístroje na měření z velkých vzdáleností mají ohniskovou vzdálenost okolo 15 m . Vliv přístroje a její optiky na velikosti pozorovacího úhlu u infračervených pyrometrů je zobrazeno na (Obr.2.10). Velký vliv na měření teploty u objektu má povrch měřeného tělesa. Při bezdotykovém měření dosahuje nejvyšší přesnost měření u dokonale černého tělesa ($\epsilon=1$). V reálu se však tyto tělesa nevyskytují. U levnějších přístrojů se nedá nastavovat hodnota intenzity záření, od výrobce bývá standardně

nastavena na hodnotu $\varepsilon=0,95$. Lepší přístroje na měření teploty umožňují nastavovat emisivitu. V takovém případě je potřeba, abychom znali emisivitu měřeného tělesa. Lepší bezdotykové teploměry mají zabudované kompenzátory hodnot emisivity, která je pro různé materiály. Čím vyšší je emisivita objektu, tím snadnější je měření teploty tělesa. Čím nižší je emisivita měřeného tělesa, například pod 0,2, tím těžší je měření teploty tělesa. Větší vliv na přesnější měření teploty má odrazivost než propustnost tělesa.



Obr. 2.10 – Zorné pole infračerveného pyrometru

Bezdotykové teploměry, které mají v sobě zabudovány mikroprocesory, upravují naměřené hodnoty již během daného měření. Používají k tomu různé iterační metody, aby výsledek měření byl co nejpřesnější. Dosáhneme tím daleko lepšího výsledku než u teploměrů bez automatiky.

2.5 Infračervené přístroje

Infračervené přístroje měří principem bezdotykového měření teploty průměrnou teplotu povrchu daného tělesa. Při tomto měření používají určité vyzařovací zákony viz. dřívější uvedené pyrometry. Toto záření se pohybuje v rozmezí infračerveného spektra záření, to znamená mezi vlnovými délkami $0,75 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ až 10^{-3} m . Můžeme je používat na rychlé a snadné měření povrchu teploty. Nejčastěji infračervené teploměry měří hodnoty do 1000°C .

Využívají širokopásmový filtr s rozsahem vlnových délek 8 až 14 μm , který eliminuje vlivy atmosféry na měření. Na speciální účely se používají přístroje s rozsahem 8 až 20 μm . Pomocí nich se dá měřit jen z malé vzdálenosti, protože jsou náchylné na rušivé vlivy atmosféry. Při měření teplot nad 1500°C se využívá rozsah vlnových délek 2,1 μm až 2,3 μm . V tomto případě se dá infračervený přístroj použít i za sklem nebo za křemíkovým krytem. Přístroje totiž pracují na takové vlnové délce, při které se sklo zdá úplně průhledné. Do skupiny infračervených přístrojů patří také infračervené pyrometry a infračervené termočláanky. [2]

2.5.1 Infračervené pyrometry

Infračervené pyrometry můžeme používat na měření teploty v prostředí, kde není možné použít běžné bezdotykové teploměry. Jde například o případy, kdy se měřené tělesa pohybují. Infračervené pyrometry se vyrábějí jako spektrální a distribuční pyrometry. Infračervené pyrometry se skládají z elektrické a optické části. V elektrické části se zpracovává naměřená hodnota. Optická část pyrometru má za úkol zachytit a usměrnit záření objektu. Z hlediska uživatele je nejdůležitější ohnisková vzdálenost. S ohniskovou vzdáleností souvisí také zorné pole a jeho velikost. Většina infračervených pyrometrů bývá vyrobena s danou ohniskovou vzdáleností. Pyrometry, které se používají na běžné měření teploty mají ohniskovou vzdálenost mezi 500 až 1500 mm. Pokud měříme teplotu u velmi malých objektů, používáme pevnou optiku, která je pro tyto objekty vhodná. Potom jsme schopni měřit teplotu oblasti s průměrem 0,5 mm.



Obr. 2.11 – Infračervený ruční laserový pyrometr

Protože tyto pyrometry měří teplotu v zorném poli přístroje, je potřeba zaměřit na objekt s velkou přesností. Nejjednodušší řešení je umístit měřidlo na pevný objekt. Lze také tyto měřicí přístroje doplnit systémem, který přímo na měřeném objektu vykreslí objekt měřicí skvrny. Mezi nejdražší přístroje patří takové, kde mají přímo zabudovanou funkci na změnu ohniskové vzdálenosti. Používají se také oscilační zrcadla, kde se dá získat přímkový teplotní profil.

Obvody, které zpracovávají výstupní signál se také liší podle ceny daného přístroje. Nejlevnější a nejjednodušší přístroje nabízí na výstupu elektrický signál úměrný dopadajícímu záření, který se linearizuje. I běžné infračervené pyrometry využívají softwarové zpracování výstupního signálu. Programy umožňují kompenzaci teploty okolí cíle, mají zvukový a optický alarm. Na zabudovaném displeji se dá odečítat minimální a maximální teplota cíle, jeho průměrná teplota, rozdíl teplot a podobně. Naměřené hodnoty se dají uchovávat a po připojení přístroje na nadřazený systém se mohou dále zpracovávat. [2]

Infračervené pyrometry se vyrábějí jako pevné pyrometry nebo přenosné pyrometry. Pevné pyrometry jsou instalovány na jedno statické místo a měří teplotu jen daného místa. Bývají napájeny z místní sítě elektrické energie. Výstup u těchto pyrometrů bývá nejčastěji analogový. Přenosné pyrometry bývají napájeny pomocí akumulátoru. Mají stejné vlastnosti jako pevné pyrometry, pouze nemají analogový výstup.

Infračervený pyrometr lze přirovnat k lidskému oku. Oční čočka představuje optiku, skrz kterou jde záření (proud fotonů) z měřeného objektu, dopadá přes atmosféru na fotocitlivou vrstvu (oční sítnici). Zde je přeměněn na signál, který je vyslán do mozku. [3]

Infračervené pyrometry mají v měřicím rozsahu od -28°C po 870°C dovolenou chybu měření 1% měřicího rozsahu. Emisivita měřeného objektu bývá nastavitelná od $\varepsilon=0,1$ po $\varepsilon=1,0$ s krokem 0,01. Čas odezvy se pohybuje od 0,3 do 1 s. Dražší vyhotovení mají větší měřicí rozsah od -30°C do 1370°C , ve speciálních případech od 400°C až do 3000°C . Ostatní parametry jsou obdobné. [2]

Infračervených pyrometrů je dnes na trhu velké množství a podle potřeby měření lze nalézt ten správný. Níže pro představu uvádíme jeden příklad.

- 1) Ruční teploměr Testo - Infra-teploměr s označením snímané plochy - přepínání optiky pro velkou a malou vzdálenost pro optimalizaci velikosti snímané plochy. Současně je možné měřit i vlhkost – inovace v bezdotykovém měření teploty.
 - Přepínatelná optika „switch“ pro měření vzdáleného pole a pro měření na blízko.
 - Spolehlivé výsledky měření díky laserovému kříži, který označuje skutečně snímanou plochu.
 - Měřicí rozsah -35°C až $+950^{\circ}\text{C}$.
 - Referenční přesnost až $\pm 0,75^{\circ}\text{C}$ super rychlou měřicí technikou (snímání 100 ms).
 - Integrovaný vlhkovostní modul pro měření vlhkosti vzduchu v místnosti a k určení vzdálenosti rosného bodu a povrchové vlhkosti.
 - Vstup pro termočlávkovou sondu.
 - Dokumentace pomocí softwaru nebo na místě tiskárnou protokolů.
- [5]

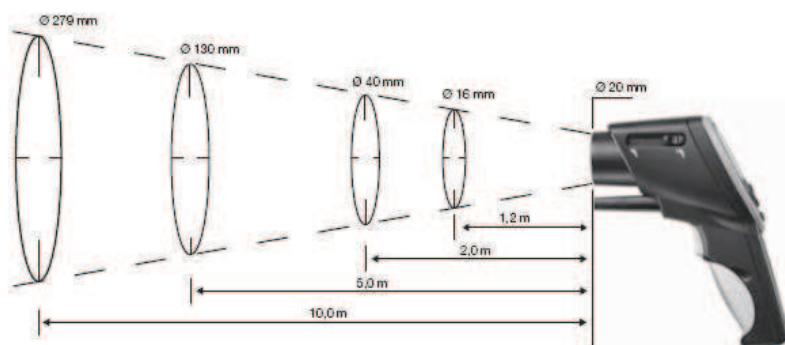
Tento infračervený teploměr má velice malou snímanou plochu při malé i velké vzdálenosti k měřenému poli díky přepínatelné optice switch. Testo 845 vytváří technologický zlom v bezdotykovém měření teploty. Můžeme měřit teplotu na povrchu až o průměru

1 mm. I při velké vzdálenosti nám garantuje malou snímanou plochu. Umožňuje to přepínatelná optika pro měření vzdáleného pole a pro měření na blízko.

Optika 75:1 pro měření vzdáleného pole s laserovým křížem:

Pro měření na větší vzdálenosti je přístroj Testo 845 vybaven optikou 75:1.

Při měření je spolehlivost výsledku měření prvořadá. Laserový kříž přesně označuje průměr snímané plochy při jakékoliv vzdálenosti. Tím je velikost snímané plochy v každém momentu měření jasně zřetelná – nesprávná měření jsou eliminována. [5]



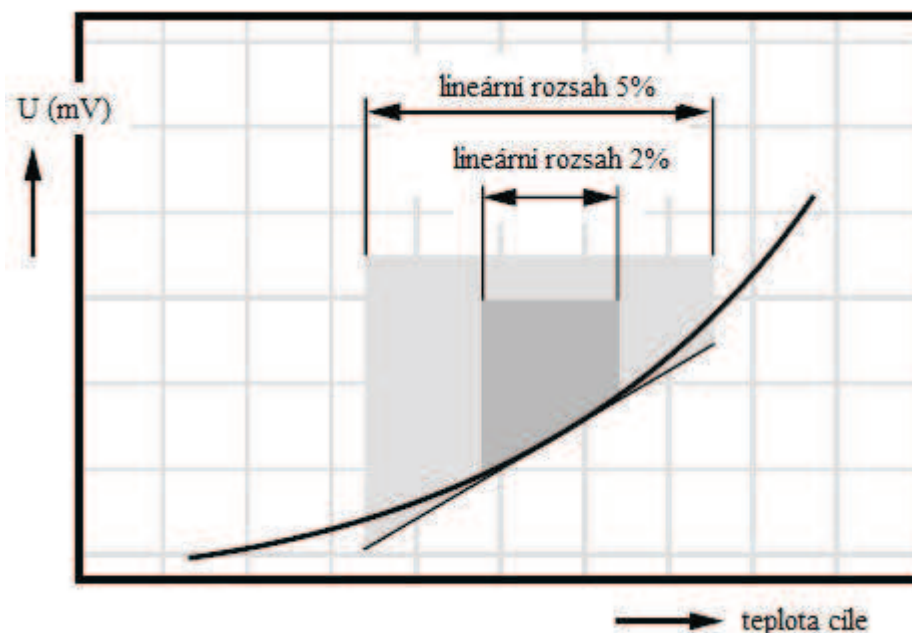
Obr. 2.12 - Průměr snímané plochy a vzdálenost od měřeného pole [6]

2.5.2 Infračervené termočlánky

Výroba infračervených termočlánků byla velká změna pro bezdotykové měření teploty. Infračervené termočlánky mají řadu výhod. Nepotřebují napájecí zdroj z vnějšího okolí, dokážou měřit teplotu na povrchu u různých materiálů a navíc jsou levné. Jedna z dalších výhod je, že je lze připojit přímo k vyhodnocovacím jednotkám, které jsou určeny pro termočlánky. Jsou také vhodné na bezdotykové měření absolutně černého tělesa. Pokud je emisivita $\varepsilon < 0,8$, musí být použita korekce naměřených hodnot. Infračervený termočlánek využívá spojení s termočlánkem typu *J*, *K*, *T* a *E*. Všechny infračervené termočlánky mají systém snímání detekující energii teploty vyzářenou z měřeného tělesa.

Využitím Seebeckova termoelektrického efektu převádějí tuto energii na elektrický signál. Výstupem je napěťový signál v milivoltech. Ten je poté dále upravován pomocí podle dané charakteristiky termočlánku. Tyto signály jsou ovlivněny nelinearitou vyplývající ze způsobu měření. Pokud omezíme na určitý teplotní rozsah použití termočlánku, výstupní signál je lineární. Poté jej můžeme snadno upravit jako běžný signál z infračerveného pyrometru.

Například při stanovení možné dvouprocentní odchylky od linearity konvenčního termočlánku se získá teplotní rozsah, ve kterém se bude signál infračerveného termočlánku lišit jen rozsahu 2% od signálu konvenčního termočlánku. V praxi se běžně definuje možná *odchylka 2% nebo 5%* (zde bude měřicí rozsah větší). Vyobrazení je na (Obr. 2.13). Proto jsou jednotlivé typy infračervených termočlánků určeny jen na měření v určitém rozsahu teplot. [2]



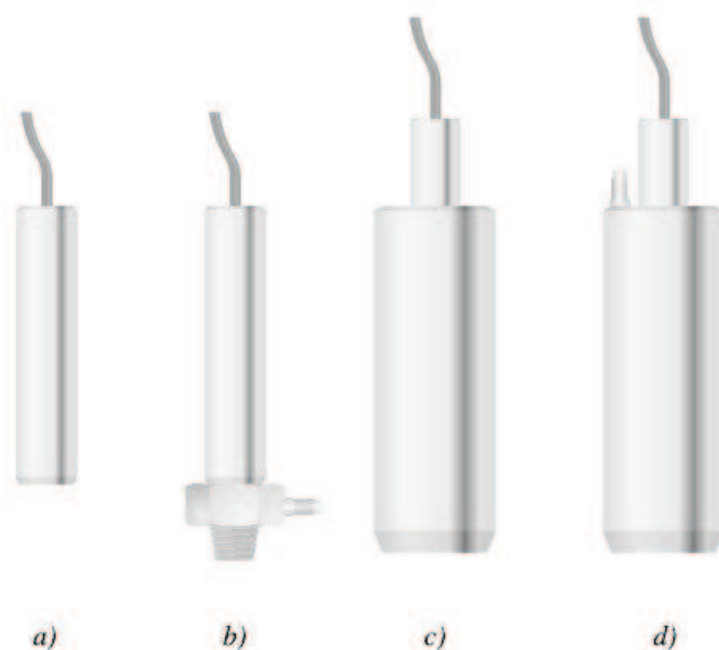
Obr. 2.13 – Odchylka termočlánků

Vystupující signál je na svém celém rozsahu hladký a spojitý. U dlouhodobého použití se signál nemění. Na celém měřicím rozsahu je chyba maximálně 1%. Vychází to z konstrukčního hlediska infračerveného termočlánku. Jelikož jde o pevné těleso, které je hermeticky uzavřené jehož metalurgické a mechanické vlastnosti se během jeho životnosti nemění. Tím se liší od klasických termočlánků, které mohou při mechanické změně vykazovat změny při kalibraci. Infračervené termočlánky neobsahují žádný zdroj energie ani elektronické prvky.

Klasické infračervené termočlánky se používají v rozsahu teplot -73°C až 2800°C . Jeden termočlánek sám o sobě nemá takový teplotní rozsah, většinou dokáže měřit teplotu v rozmezí 30°C až 80°C . Termočlánky, které používáme k měření vyšších teplot mohou mít měřicí rozsah až 1400°C . Chyba při měření bývá od 1% až do 5%. Mají také velmi malou časovou konstantu.

Infračervené termočlánky se vyrábějí v několika konstrukčních provedeních. Jedno z provedení jsou infračervené termočlánky s volitelnou vzdáleností od povrchu měřeného tělesa. Druhé provedení je například infračervený termočlánek s pevnou vzdáleností od měřeného povrchu. Infračervené termočlánky s volitelnou vzdáleností od povrchu měřeného tělesa se přikládají přímo k povrchu. Vzdálenost od snímače bývá 0 až 10 mm. Tyto termočlánky mají malou ohniskovou vzdálenost. Většinou je používáme na měření nižších teplot. Termočlánky s pevnou vzdáleností od měřeného povrchu tělesa mají velkou ohniskovou vzdálenost. Používáme je na měření vysokých teplot. Vzdálenost infračerveného termočlánku od objektu může být v rozmezí 0 až 2000 mm.

Infračervené termočlánky můžeme také dělit podle toho, jestli mají nastavitelný nebo pevný měřicí rozsah. Termočlánky s pevným měřicím rozsahem obsahují zařízení, kterým se dá v rámci měřicího rozsahu nastavit rozsah s chybou měření 2%. Infračervené termočlánky (Obr.2.14) se vždy dodávají v ochranném pouzdře. Základní vyhotovení tohoto termočlánku zobrazujeme na (Obr. 2.14a). Ochranné pouzdra můžeme upravovat podle způsobu použití.



Obr. 2.14 – Infračervené termočlánky

- a) Standardní vyhotovení b) Se vzduchovým čištěním optické cesty c) S vodním chlazením
d) S vodním chlazením i vzduchovým čištěním optické cesty*

Pokud je infračervený termočlánek používán ve znečištěném prostředí, mohou se na termočlánek i měřené těleso dostat nečistoty, které značně změní měřenou hodnotu teploty. Proto používáme na čištění termočlánků se vzduchovým čištěním optické cesty. Můžeme nastavit, aby se čistilo jen tělo snímače nebo celá dráha optické cesty. Pokud měříme vysoké teploty je velmi důležité, abychom zajistili chlazení na povrchu snímače. Chladíme kapalinou nebo vzduchem. Tento způsob chlazení můžeme také kombinovat se vzduchovým čištěním optické cesty.

Jestliže měříme ve stísněném prostředí, můžeme použít zrcadlo, které je nastavené pod úhlem 45° k ose snímače – viz. (Obr 2.15). Zrcadlo velmi dobře odráží infračervené záření. Vše je vyrobeno z nerezové oceli.



Obr. 2.15 – Zrcadlo na použití ve stísněném prostoru při měření infračerveným termočlánkem

Infračervené termočlánky se stále daří vylepšovat a tím je častější jejich využití. Pomocí optického kabelu se nám podařilo snadno propojit infračervený snímací prvek a optiku termočlánku. Díky tomu můžeme měřit teplotu i na nepřístupných místech. Optika, která je použita nám umožňuje měřit teploty v oblasti s průměrem menším než $0,1 \text{ mm}$. U měřícího rozsahu například 800°C až 1600°C dosahuje dovolená chyba měření jen 1% měřícího rozsahu. Infračervené termočlánky se používají na měření teploty pohybujících se těles nebo rotujících těles. Můžeme je použít například i na měření teploty pneumatiky za jízdy. Používají se také na měření teploty u integrovaných obvodů. Mají velkou výhodu, že jsou poměrně levné, a že můžeme bezdotykově měřit teplotu na poměrně velkou vzdálenost.

2.6 Měření teplotních polí

Nyní jsme se zabývali pouze bezdotykovými teploměry, kterými lze měřit teplotu pouze v určitém bodě. Pokud potřebujeme znát teplotní rozložení na větším povrchu tělesa, musíme použít několik teplotních snímačů a poté vyhodnotit průběh izotermů. Na toto měření bylo vyvinuto několik způsobů měření.

2.6.1 Fotografické měření teploty

Nejjednodušší metodou zjištění teplotního pole je vyfotografování infračerveným filmem, protože fotografické materiály jsou na infračervené záření citlivé, $\lambda=0,78 \mu\text{m}$. Pokud film vyvoláme, získáme obraz teplotního pole. Pokud fotíme těleso, vyfotografuje se zároveň také teplotní měřidlo, které tvoří sada destiček. Každá z daných destiček je ohřátá na určitou teplotu. Tyto teploty jsou poté určeny dotykovým termočlánkem. Rozsah při měření se pohybuje v rozmezí od 250°C až do 1000°C . Přesnost při měření je závislá na vlastnostech termočládkových destiček, kvalita materiálu, který fotografujeme, rozdíl emisních koeficientů teplotního měřidla a měřeného objektu.

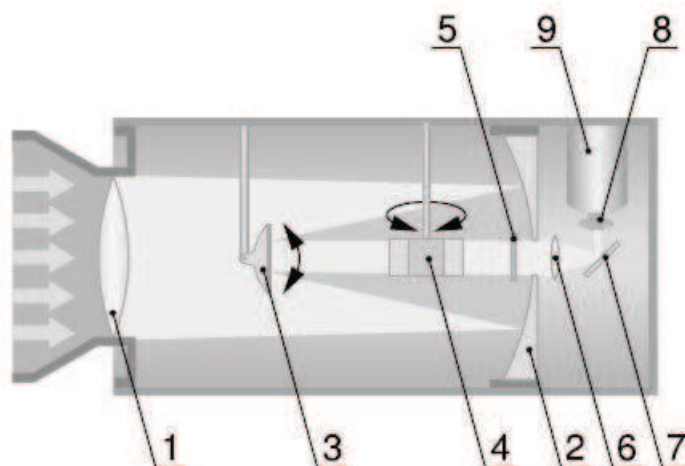
2.6.2 Termovize

Termovizní přístroje nám umožňují na povrchu měřeného tělesa zobrazit teplotní pole. V oblasti infračerveného spektra se využívá vyzařování těles. Dané teplotní pole je snímáno kamerou se snímačem a poté je zobrazováno na displeji. Teplotní pole se poté zobrazuje v různých barevných odstínech podle teploty.

Základní funkční člen systému je představován pomocí prvku, který je citlivý na dopad infračerveného záření. Zde používáme pyroelektrické nebo kvantové detektory. Pyroelektrický detektor se při dopadu infračerveného záření ohřeje a na tělese vznikne elektrický náboj. Zde není vyžadováno chlazení, takže jej můžeme použít v běžném prostředí. Kvantové detektory reagují při dopadu infračerveného záření zvýšením své elektrické vodivosti. Tyto detektory se však musí chladit na nízkou teplotu. Chlazení bývá realizováno například tekutým dusíkem. Přístroje určené k termovizi se z konstrukčního hlediska staví jako systémy s postupným opticko-mechanickým rozkladem.

Schématické zobrazení termovizního přístroje s opticko-mechanickým rozkladem obrazu je na (Obr. 2.16). Tepelné paprsky, které vyzařuje měřený objekt, prochází přes objektiv kamery 1 a dopadají na duté zrcadlo 2. Od něho se odrážejí na ploché zrcadlo 3, které kmitá okolo vodorovné osy s frekvencí 16 Hz . Tím se dosahuje vertikální rozklad obrazu. Dále se paprsky odrážejí a soustřeďují na osmiboký hranol 4. Ten rotuje okolo svislé osy s frekvencí otáčení 200 s^{-1} . Rozkmitaný paprsek prochází clonou 5, čočkou 6 a zrcadlo 7 ho odráží na fotogen 8. Fotočlen se nachází na dně Dewarové nádoby 9 naplněné tekutým dusíkem, čím se zabezpečuje chlazení

fotogenu. Jeho výstupní signál je úměrný intenzitě dopadajícího záření. V elektronických obvodech se zesiluje, zpracovává a přivádí na obrazovku monitoru. [2]



Obr. 2.16 – Termovize s opticko-mechanickým rozkladem obrazu [2]

Termogramy v různých odstínech šedé barvy však neumožňují tak lehké vyhodnocení obrazu. Proto se na termogramu zobrazuje často jen jedna hodnota teploty. Teplota, která je na objektu se zvýrazňuje jasně bílou barvou. Pokud chceme osmibarevný záznam, musíme vytvořit osm termogramů. Termogramy se fotografují na snímek přes barevné filtry a každý termogram má svou barvu.

Termovizní přístroje nám umožňují snadno zjistit pomocí programového cyklu lehkou a rychlou analýzu obrazů. Základní videovýstup umožňuje záznam obrazů a údajů na termokameře. Tento záznam může být užitečný, pokud potřebujeme provést kontrolu. Měřící rozsah bývá od -30°C až do 2000°C s rozlišením až $0,1^{\circ}\text{C}$.

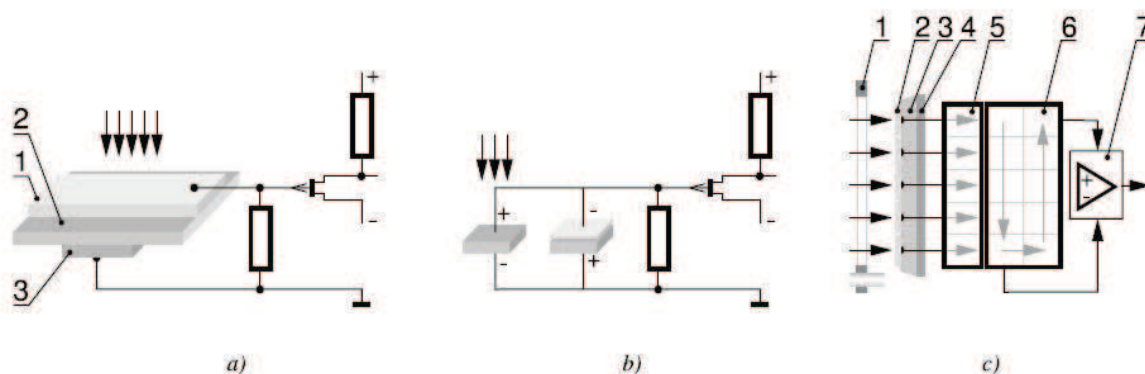
Přímozobrazující termovizní přístroje jako citlivý prvek využívají pyroelektrický detektor. Mají však malou přesnost měření, a proto se používají pouze na orientační měření teplot. Výhoda je absence chladicího zařízení, což má za následek nízké pořízení náklady přístroje.

Pyroelektrický detektor na základě pyroelektrického jevu snímá dopadající záření. Tento jev se vyskytuje v materiálech s trvalou polarizací nebo v některých feroelektrických materiálech, ve kterých se orientace domén vytvoří elektrický zlom. Nejčastěji se používá TGS (triglycin-sulfát), keramika PZT, LiTaO_3 (lítium tantalát) nebo PVDF (polyvinylfluorid). [2]

Základní schéma pyroelektrického citlivého prvku je na (Obr. 2.17a). Skládá se z přehledné elektrody 1, pyroelektrického material 2 a ze spodní elektrody 3. Citlivý prvek se tak může pokládat za kondenzátor, na který se v elektrodách indukuje elektrický náboj. Náboj se odvádí přes svodový odpor pyroelektrika a vstupní odpor předzesilovače. Před každým měřením náboje je potřeba zaclonit a opět odclonit dopadající záření. [2]

Parazitní pizelektrický jev se nejčastěji vyskytuje v pyroelektrických materiálech. Ten vnáší do měření systematickou chybu při deformaci. Díky tomu používáme kompenzační řešení uvedené na (Obr. 2.17b). Do obvodu je přiveden další pyroelektrický snímač s opačnou polarizací.

Příklad detekční části přímobrazujícího termovizního systému s řádkovým pyroelektrickým prvkem CCD uvádí (Obr. 2.17c). V případě řádkového nebo plošného snímání se náboje bodových pyroelektrických prvků zpracovávají pomocí posuvných registrů CCD. Diferenční zapojení se používá na vyhodnocení rozdílu dopadajícího záření při odkrytém a zacloněném pyroelektrickém prvku. Dopadající záření prochází přes clonící zařízení 1 a soustavu přehledných elektrod 2 a ze společné zadní elektrody 4 na vstupní obvody CCD 5 a přes posuvné registry 6 se dostává signál do diferenčního výstupního obvodu 7.[2]



Obr. 2.17 – Pyroelektrický detektor

a) Citlivý prvek b) Kompenzační zapojení c) Řádkový pyroelektrický snímač CCD [2]

Termovizní přístroje našly uplatnění při měření teploty například budov, potrubí, pecí a podobně.

3 Vliv správného nastavení emisivity na výsledek měření teploty

Emisivita je schopnost objektu absorbovat a emitovat infračervenou energii. Může mít hodnotu mezi 0 a 1,0. Například zrcadlo má emisivitu 0,1, zatímco takzvané „černé těleso“ dosahuje hodnot emisivity 1,0. Když je nastavená hodnota emisivity větší než je její skutečná velikost, bude na výstupu přístroje menší hodnota teploty, pokud je teplota cíle vyšší než teplota okolí přístroje. Když například nastavíme 0,95 a skutečná emisivita je 0,9, zobrazená hodnota teploty bude nižší než skutečná teplota.

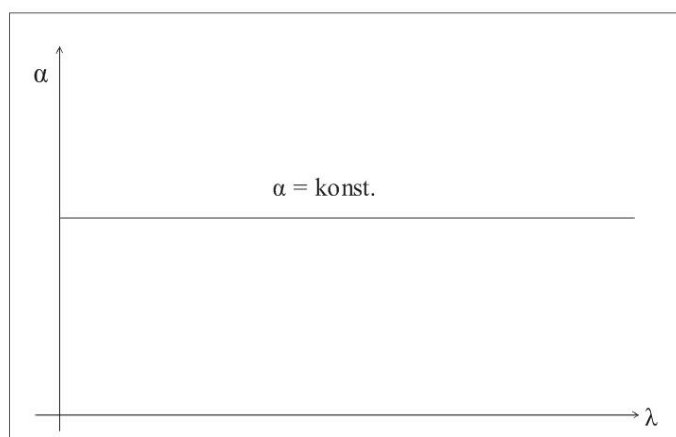
[7]

Emisivita může být určena jednou z následujících metod:

- Zjistěte skutečnou aktuální teplotu materiálu použitím termistoru (RTD, např. PT100), termočlánu nebo nějakou jinou vhodnou metodou. Pak měřte teplotu objektu a nastavujte emisivitu tak dlouho, dokud nedosáhnete stejné teploty. Takto nastavená emisivita je emisivita měřeného materiálu.
- Pro relativně nízké teploty (do 260 °C) nalepte na měřený povrch plastový štítek. Štítek musí být větší než stopa měření. Pak měřte teplotu štítku s emisivitou nastavenou na 0,95. Konečně měřte teplotu přiléhající oblasti a nastavujte emisivitu, dokud nedosáhnete stejné teploty. Takto nastavená emisivita je emisivita měřeného materiálu.
- Pokud je to možné, můžeme použít silnější vrstvu barvy na část objektu. Emisivita barvy musí být okolo 0,98. Pak měřte teplotu nabarvené plochy s emisivitou nastavenou na 0,98. Konečně měřte teplotu přiléhající oblasti a nastavujte emisivitu dokud nedosáhnete stejné teploty. Takto nastavená emisivita je emisivita měřeného materiálu.

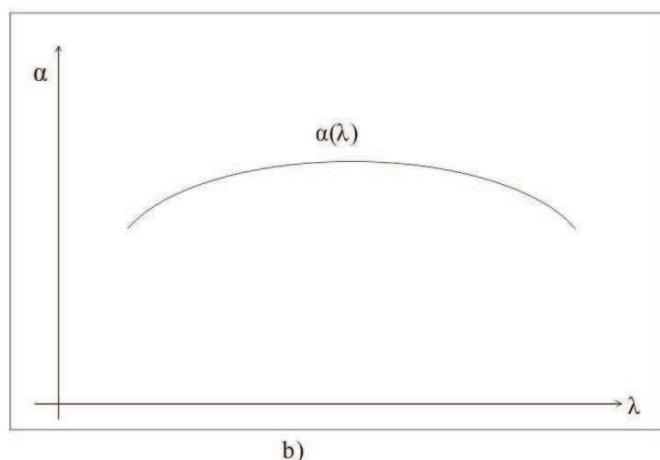
[7]

Reálné zdroje záření nesplňují podmínku maximální absorpce okolního záření, tj. $\alpha=1$, nýbrž u nich pohltivost bývá menší než jedna. Označují se jako nečerná tělesa. Podle závislosti pohltivosti α na vlnové délce se rozdělují na „šedá“ a „selektivní“ [15]



a)

Obr. 3.1 – Graf závislosti emisivity pro a) Šedé zářiče



Obr. 3.2 - Graf závislosti emisivity pro b) Selektivní zářiče

Selektivním spektrem se vyznačují plyny, kdežto nejméně selektivní charakter vykazují pevné látky s neleštěným povrchem. Intenzitu vyzařování reálných těles (nečerných) zářičů lze stanovit za použití Kirchhoffova vyzařovacího zákona: [15]

$$H_e(T, \lambda) / \lambda(T, \lambda) = H_o(T, \lambda) / \alpha_o(T, \lambda) = konst. \quad (3.1)$$

Poměr intenzity vyzařování libovolného tělesa k jeho absorpční schopnosti při dané teplotě a dané vlnové délce je konstantní a nezávisí na materiálu zářiče. Protože $\alpha_o(T, \lambda) = 1$, (ideální absorpce), plyne absorpční schopnost tělesa: [15]

$$\alpha(T, \lambda) = H_e(T, \lambda) / H_{e0}(T, \lambda) = \varepsilon(T, \lambda) \leq 1 \quad (3.2)$$

Koeficientu na pravé straně rovnice se říká koeficient černosti (emisivity) s označením epsilon. Je to veličina menší než jedna, závisí na teplotě, vlnové délce a opracování povrchu. Koeficientem ε je nutno pro reálné zářiče násobit hodnoty hustoty spektrálních intenzit vyzařování $H_o(T, \lambda)$ černého tělesa. Hodnoty emisivity jsou pro různé materiály i povrchy stanoveny v tabulkách. [15]

3.1 Hodnoty emisivity u materiálů

Následující tabulka je stručný referenční průvodce pro stanovení emisivity pro případy, že žádná z uvedených metod nemůže být provedena. Hodnoty emisivity v tabulce jsou přibližné, protože na její skutečnou velikost může mít vliv mnoho dalších materiálových parametrů jako:

- Teplota
- Úhel měření
- Geometrie povrchu (plochý, konkávní, konvexní)
- Tloušťka
- Kvalita povrchu (leštěný, hrubý, oxidovaný, pískovaný)
- Spektrální rozsah měření (spektrální citlivost)
- Transmisivity

Protože emisivita daného materiálu závisí na teplotě a povrchové úpravě, je třeba brát hodnoty v tabulce pouze jako orientační pro relativní nebo diferenční teplotní měření. Pokud je požadována vysoká přesnost měření, měla by se stanovit přesná hodnota emisivity kovu. [18]

Tab. 3.1 – Emisivita kovových materiálů

Kovové materiály	Teplota °C	Emisivita
Beton - hrubý	0-1093	0,94
Hliník - neoxidovaný	25	0,02
Hliník - slitina A3003	316	0,40
Chrom - leštěný	150	0,06
Měď - oxid mědi	38	0,87
Ocel - za studena válcovaná	93	0,75 - 0,85
Platina - černá	260	0,96
Stříbro - leštěné	38	0,01
Uhlík - lampová čern	25	0,95
Uhlík - neoxidovaný	25	0,81
Zlato - glazura	100	0,37
Železo - oxidované	100	0,74
Železo - oxidované	499	0,84
Železo - oxidované	1199	0,89
Železo - tepané, matné	349	0,94

Tab. 3.2 – Emisivita nekovových materiálů

Nekovové materiály	Teplota °C	Emisivita
Azbest - textilie	93	0,90
Azbest - papír	38-371	0,93
Barva - modrá	24	0,94
Barva - zelená	24	0,92
Barva - bílá ZnO	24	0,95
Barva - žlutá PbO	24	0,90
Barvy - olej, všechny barvy	93	0,92-0,96
Cihla červená drsná	21	0,93
Dřevo bukové, hoblované	70	0,94
Dřevo dubové, hoblované	38	0,91
Dřevo smrkové, obroušené	38	0,89
Lak - černý	93	0,96
Sklo - convex D	100	0,80
Sklo - hladké	0-93	0,92-0,94
Voda	38	0,67

4 NÁVRH A REALIZACE EXPERIMENTÁLNÍHO PRACOVÍŠTĚ PRO OVĚŘENÍ ZÁVISLOSTÍ

4.1 Použitý bezdotykový teploměr – Compact CM

Tento bezdotykový teploměr řadíme mezi systémové bezkontaktní teploměry. Měření teploty řadíme mezi nejsledovanější fyzikální veličiny. V průmyslu se téměř nedá najít odvětví, kde by nebylo potřeba měřit teplotu. Systémové bezkontaktní teploměry mají velmi rychlou časovou odezvu a umožňuje nám měřit v prostředí, které je nebezpečné pro měřicí přístroje nebo obsluhu teploměrů. Díky technologii měření i své bezpečnosti se stále na více místech užívá bezkontaktního měření teploty. Používá se také v případech, kde dříve měření kontaktním teploměrem bylo nemyslitelné. Stále nové technologie umožňují vyrábět malé, levné a výkonné teploměry.

Bezkontaktní teploměry pracují na principu vyhodnocení množství vyzářené energie v infračerveném spektru. Infračervené záření emitují všechna tělesa, jejichž teplota je vyšší než 0 K , vlivem tepelného pohybu elementárních částic hmoty. Pro bezkontaktní měření teploty se využívají vybrané vlnové délky z rozsahu přibližně 1 až $16\ \mu\text{m}$, na kterých nedochází k absorpci infračerveného záření atmosférou. Konstrukčně je bezkontaktní teploměr opticko-elektronický přístroj. Objektiv soustřeďuje infračervené záření na senzor, který je převede na elektrickou veličinu. Elektronická jednotka s procesorem signál senzoru zpracuje a zobrazí na displeji hodnotu teploty, případně převede na standardní elektrické veličiny. Pro kontinuální technologická měření s průběžným zobrazováním naměřených hodnot, s jejich archivací a pro účely řízení technologických procesů se používají systémové bezkontaktní teploměry. [6]

Nejširší ucelená řada přístrojů pro měření nízkých teplot *od -40°C do 600°C* . Zahrnuje celou škálu konstrukčních řešení od nejjednodušších a nejlevnějších systémových pyrometrů s pevným analogovým výstupem až po přístroje s možností digitální komunikace a s rozsáhlými možnostmi uživatelské volby parametrů a úpravy výstupního signálu. Unifikované rozhraní usnadňuje implementaci do stávajících systémů měření a regulace. K dispozici je rozsáhlé příslušenství pro montáž a ochranu hlavice před vlivy prostředí a programové vybavení DataTemp s komfortem vyšších modelů. [6]

Úsporný, jednoduchý a levný snímač v pouzdře z nerezové oceli s vysokým krytím a mechanickou odolností. Teploměry CM jsou vhodné jako přímá náhrada termočlánků typu J nebo K nebo čidel s napěťovým výstupem ve stávajících i nových konstrukcích a pro masové nasazení v OEM aplikacích v tvrdších podmínkách. Operativní možnost změny nastavení parametrů přes rozhraní RS232 včetně úprav výstupního signálu a jednoduchá LED autodiagnostika snižují čas při zjišťování funkčního režimu, nastavení konkrétních parametrů senzoru a jejich změny i při odstraňování případných závad. [6]

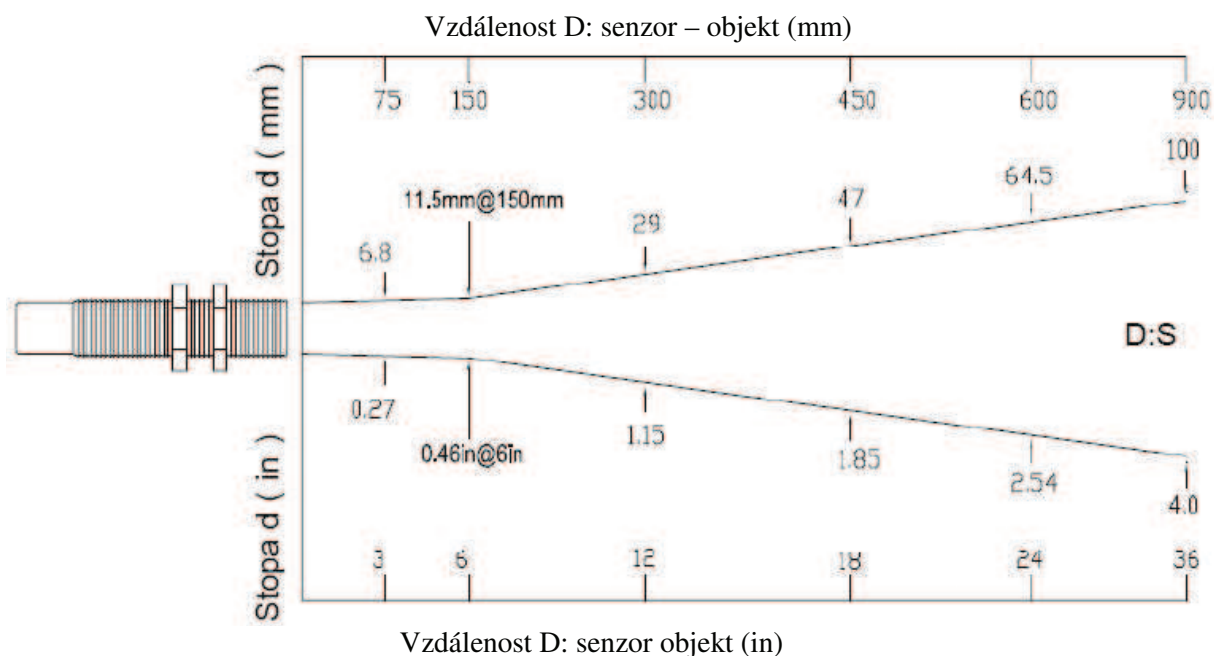


Obr. 4.1 – Bezdotykový teploměr Compact CM [6]

4.1.1 Základní charakteristiky a parametry teploměru – Compact CM

- Velký teplotní rozsah od -20 °C do 500 °C (-4 až 932 °F)
- Rozlišení optiky přístroje $13:1$ pro 90% energie
- Spektrální citlivost 8 až $14\text{ }\mu\text{m}$
- Přesnost (digitální a napěťový výstup) $\pm 1,5\%$ měřené hodnoty nebo $\pm 2\text{ °C}$
- Přesnost (termočlánek) $\pm 1,5\%$ měřené hodnoty $\pm 2\text{ °C}$ nebo $\pm 4\text{ °C}$
- Opakovatelnost (digitální a napěťový výstup) $\pm 0,5\%$ měřené hodnoty nebo $\pm 1\text{ °C}$
- Opakovatelnost (termočlánek) $\pm 0,5\%$ měřené hodnoty $\pm 1\text{ °C}$ nebo $\pm 2\text{ °C}$
- Časová odezva 150 ms (95% energie)
- Teplotní rozlišení $0,1\text{ °C}$
- Emisivita $0,100$ až $1,100$ (nastavitelná)
- Transmisivita $0,100$ až $1,000$ (nastavitelná)
- Analogový výstup lze nastavit v rozsahu 0 až 5 V , termočlánek typu J nebo K
- Komunikace přes digitální rozhraní RS232 pro monitorování a nastavení senzoru
- Výstupní signalizace tranzistor, $24\text{ VDC}/20\text{ mA}$
- Napájení $24\text{ VDC} \pm 20\%/20\text{ mA}$
- LED indikace stavu a diagnostika senzoru
- Nastavitelné zpracování výstupního signálu
- Robustní provedení v ochranném nerezovém plášti s krytím IP 65 (NEMA-4x)
- Provozní teplota okolí -10 °C až 70 °C
- Skladovací teplota -20 °C až 85 °C
- Rozměry/hmotnost – $L=94\text{ mm}$, průměr 19 mm /cca 200 g
- Kompatibilní s programem DataTemp Multidrop
- Doplnky pro čištění a ochranu objektivu

4.1.2 Optický diagram – Compact CM



Obr. 4.2 – Optický diagram teploměru Compact CM

D : S v ohnisku = 13:1 /11.5 mm ve vzdálenosti 150 mm

D = vzdálenost mezi objektivem senzoru a cílem

S = velikost stopy (pro 90% energie)

Pro výpočet velikosti ze dvou známých bodů uvnitř optického diagramu může být použit vzorec:

$$S_x = S_n + [(D_x - D_n) / (D_f - D_n) \cdot (S_f - S_n)] \quad (4.1)$$

kde

S_x – neznámý průměr cílové stopy

S_n – nejmenší známý průměr cílové stopy

S_f – největší známý průměr cílové stopy

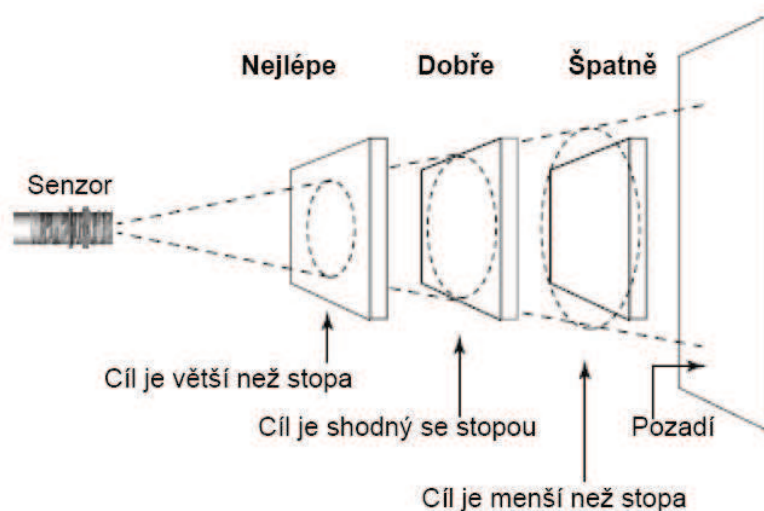
D_x – vzdálenost neznámé cílové stopy

D_n – vzdálenost nejmenší známé cílové stopy

D_f – vzdálenost větší známé cílové stopy

4.1.3 Zaměření

Je potřeba se ujistit, že cíl je větší než velikost stopy. Čím menší cíl měříme, tím musí být bezdotykový teploměr blíže.



Obr.4.3 – Umístění senzoru teploměru Compact CM

4.1.4 Elektrické rušení, kvalita atmosféry a emisivita

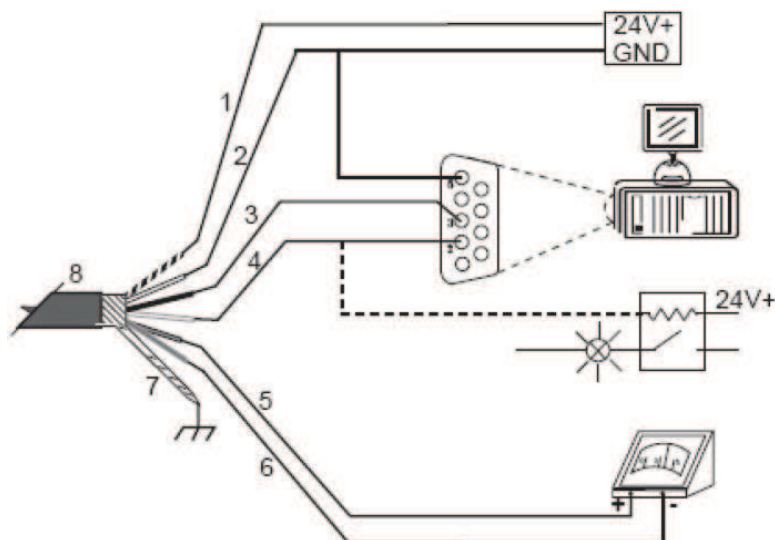
Pokud nechceme, aby se porušil objektiv a nedocházelo k chybnému naměření teploty, musíme objektiv chránit před prachem, výpary a dalším možným znečištěním. Na tuto ochranu můžeme použít například límec pro vzduchové čištění optiky.

Pokud chceme minimalizovat elektrické a elektromagnetické rušení musíme při měření teploty postupovat dle následujících instrukcí:

- Senzor by měl být instalován mimo dosah možných rušících zdrojů
- Musíme zajistit izolovanou instalaci senzoru
- Je třeba, aby bylo stínění kabelu uzemněno jen v jednom místě
- Vodič by neměl být připojen přímo do napájecí sítě 24 V

Emisivitu měřeného objektu určíme dle tabulek hodnot měřených materiálů. Pokud je emisivita velice malá, výsledky měření mohou být zkresleny interferencí infračerveného záření objektů v pozadí. Tyto nepřesnosti při měření mohou vzniknout například při měření různých reflexních povrchů a tenkých materiálů. Chyba měření teploty u takových objektů s malou emisivitou může být snížena důkladnou instalací a přípravou před měřením, zejména odstíněním záření.

4.1.5 Připojení a kabel



Obr.4.4 – Schéma zapojení bezdotykového teploměru Compact CM [6]

Analogový výstup

Minimální zatěžovací impedance pro výstup 0 až 5 V je větší než 50 k Ω .
Vnitřní impedance termočláňkového výstupu je 100 Ω .

Výstup signalizace

Vývod TxD rozhraní RS232 a výstup signalizace sdílí jeden vodič. Volba může být provedena z programu DataTemp nebo příkazem přes RS232. Když je aktivní režim signalizace, může teploměr Compact CM přijímat příkaz z počítače přes RS232, ale nemůže odpovédět do PC. Linka TxD rozhraní RS232 může normálně pracovat po vypnutí výstupu signalizace příkazem K=0. Když je přístroj nastaven z programu DataTemp, je signalizační výstup v požadovaném stavu až po restartu. [7]

4.2 3–bodový IR kalibrátor

Díky tomuto kalibrátoru je dnes velice snadné zkontrolovat správnost měření IR teploměru. Tento kalibrátor umožňuje rychlé, levné a snadné ověření měření. Obsahuje tři možné nastavení teploty – 50°C, 100°C a 150°C. Vybereme požadovanou teplotu, počkáme až se rozsvítí světlo, zaměříme na 1,5 palcový průměr černého bodu a můžeme měřit. Tento kalibrátor jsme použili pro ověření závislosti emisivity na měřené teplotě. Nastavení teploty může být za méně než pět minut, obvykle se stabilizuje teplota již během tří minut. Přesnost zařízení je $\pm 1^\circ\text{C}$ a stabilita je v rozmezí $\pm 0,1^\circ\text{C}$. Emisivita černého tělesa je $0,95 \pm 0,2$. Toto zařízení je zcela přenosné což zajišťuje měření a kalibrování snadno a rychle.

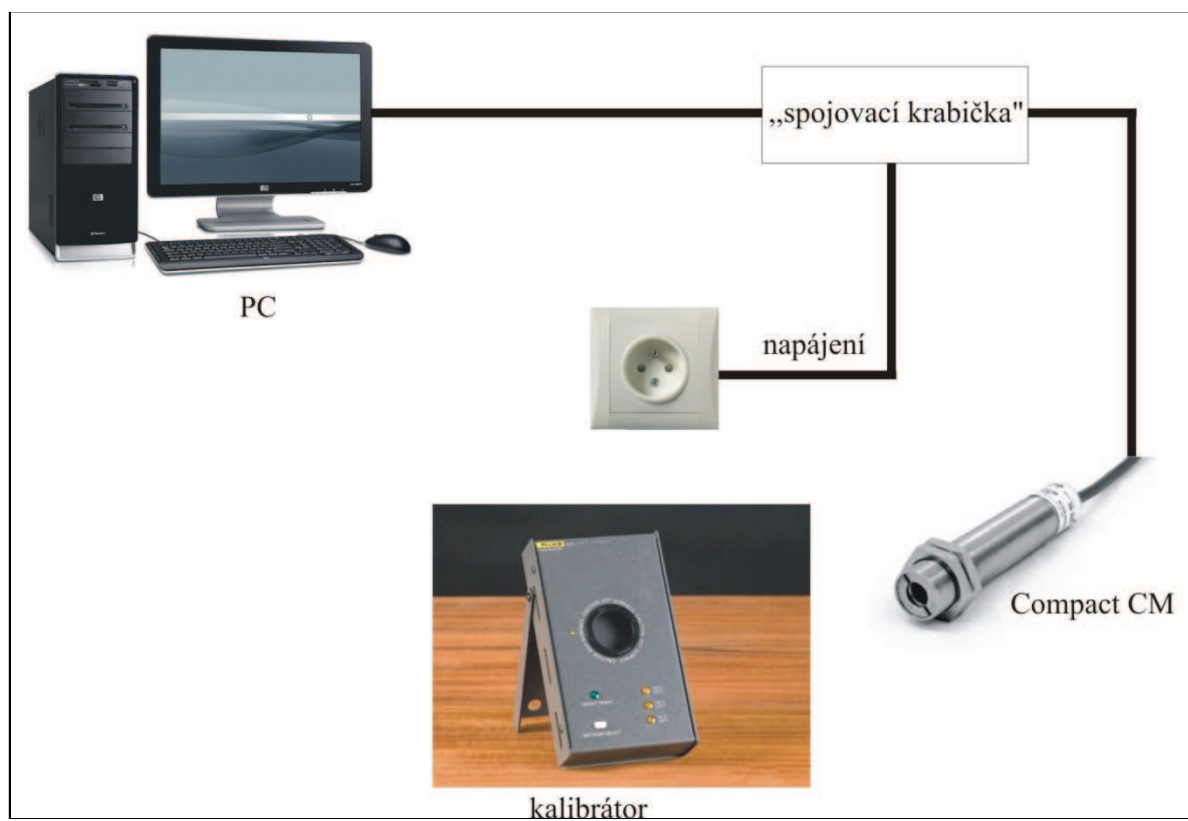
Tab. 4.1 – Specifikace 3-bodového IR kalibrátoru

Rozsah	50°C, 100°C, 150°C (122°F, 212°F, 302°F)
Přesnost	± 1°C
Stabilita	± 0,1°C
Doba ohřevu	25°C až 150°C : 3 min, typicky
Čas chlazení	150°C až 50°C : 25 min, typicky
Stabilizační čas	3 minuty, typicky
Průměr černého bodu	38 mm
Emisivita černého bodu	0.95
Rozměry	46 x 112 x 198 mm
Váha	700 g



Obr. 4.5 – 3-bodový IR kalibrátor

4.3 Schéma zapojení a pracoviště



Obr. 4.6 - Schéma zapojení bezdotykového teploměru Compact CM, připojení k PC, napájení, 3-bodový IR kalibrátor a krabička pro zapojení



Obr. 4.7 - Experimentální měřící pracoviště (Compact CM, 3-bodový IR kalibrátor, krabička pro zapojení) – pozn. výsledek měření uvádí další kapitola



Obr. 4.8 - Měřící pracoviště – Ověření závislosti nastavení emisivity pomocí Compact CM a dotykového teploměru – pozn. výsledek měření uvádí další kapitola

5 EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ VLIVU EMISIVITY, VYVOZENÍ ZÁVĚRŮ A DOPORUČENÍ

5.1 Nastavení a naměřené hodnoty

Naměřené hodnoty jsou uvedeny v následujících tabulkách :

- nastavení kalibrátoru na 50 °C
- nastavení kalibrátoru na 100 °C
- nastavení kalibrátoru na 150 °C

Při každém nastavení kalibrátoru byla na teploměru nastavována emisivita od 1,00 do 0,30. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulkách pro každé nastavení.

Jako první posouzení naměřených hodnot byly v softwaru Microsoft Excel zpracovány grafy závislosti údajů teploměru na nastavené emisivitě.

Z uvedených grafů je zřejmá nelineární závislost vztahů. Je také zřejmá vysoká podobnost průběhu pro všechna 3 měření.

Jako další fáze byla proto snaha provést zjištění stupně vzájemné podobnosti těchto vztahů.

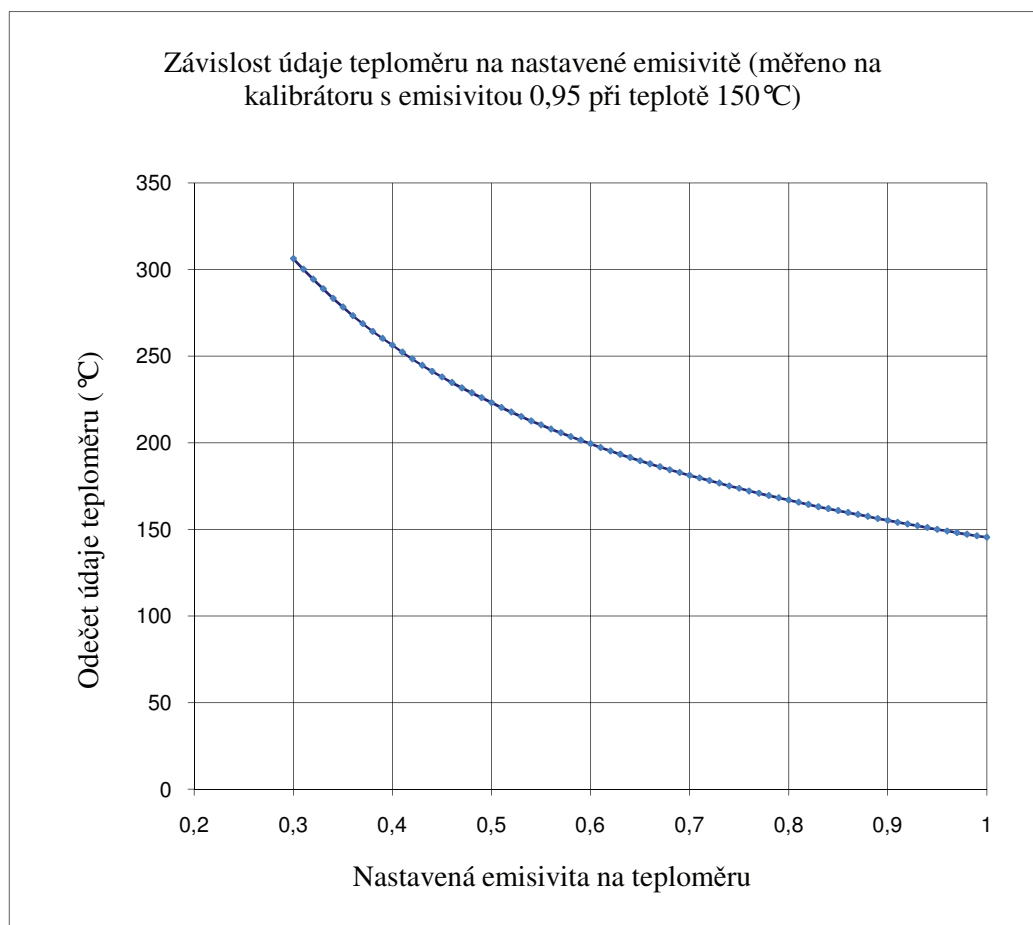
Naměřené hodnoty bezdotykovým teploměrem Compact CM na černém kalibrátoru:

Tab. 5.1 – Naměřené hodnoty při teplotě 150°C

Černé těleso Teplota °C	Kalibrátor Emisivita		Teploměr Teplota °C	Compact CM Emisivita
150,0	0,95		145,5	1,00
150,0	0,95		146,3	0,99
150,0	0,95		147,2	0,98
150,0	0,95		148,1	0,97
150,0	0,95		149,1	0,96
150,0	0,95		150,0	0,95
150,0	0,95		151,1	0,94
150,0	0,95		152,1	0,93
150,0	0,95		153,1	0,92
150,0	0,95		154,1	0,91
150,0	0,95		155,2	0,90
150,0	0,95		156,3	0,89
150,0	0,95		157,5	0,88
150,0	0,95		158,6	0,87
150,0	0,95		159,7	0,86
150,0	0,95		160,8	0,85
150,0	0,95		162,0	0,84
150,0	0,95		163,1	0,83

Černé těleso Teplota °C	Kalibrátor Emisivita		Teploměr Teplota °C	Compact CM Emisivita
150,0	0,95		164,4	0,82
150,0	0,95		165,6	0,81
150,0	0,95		166,9	0,80
150,0	0,95		168,2	0,79
150,0	0,95		169,5	0,78
150,0	0,95		170,9	0,77
150,0	0,95		172,2	0,76
150,0	0,95		173,7	0,75
150,0	0,95		175,1	0,74
150,0	0,95		176,7	0,73
150,0	0,95		178,2	0,72
150,0	0,95		179,7	0,71
150,0	0,95		181,2	0,70
150,0	0,95		182,8	0,69
150,0	0,95		184,4	0,68
150,0	0,95		186,1	0,67
150,0	0,95		187,9	0,66
150,0	0,95		189,6	0,65
150,0	0,95		191,5	0,64
150,0	0,95		193,4	0,63
150,0	0,95		195,3	0,62
150,0	0,95		197,3	0,61
150,0	0,95		199,5	0,60
150,0	0,95		201,5	0,59
150,0	0,95		203,5	0,58
150,0	0,95		205,8	0,57
150,0	0,95		207,9	0,56
150,0	0,95		210,3	0,55
150,0	0,95		212,6	0,54
150,0	0,95		215,1	0,53
150,0	0,95		217,7	0,52
150,0	0,95		220,3	0,51
150,0	0,95		223,2	0,50
150,0	0,95		226,0	0,49
150,0	0,95		228,9	0,48
150,0	0,95		231,7	0,47
150,0	0,95		234,8	0,46
150,0	0,95		238,0	0,45
150,0	0,95		241,3	0,44

Černé těleso Teplota °C	Kalibrátor Emisivita		Teploměr Teplota °C	Compact CM Emisivita
150,0	0,95		244,7	0,43
150,0	0,95		248,5	0,42
150,0	0,95		252,3	0,41
150,0	0,95		256,3	0,40
150,0	0,95		260,2	0,39
150,0	0,95		264,3	0,38
150,0	0,95		268,7	0,37
150,0	0,95		273,4	0,36
150,0	0,95		278,3	0,35
150,0	0,95		283,4	0,34
150,0	0,95		288,9	0,33
150,0	0,95		294,4	0,32
150,0	0,95		300,2	0,31
150,0	0,95		306,3	0,30



Obr 5.1 – Naměřené hodnoty při teplotě 150°C

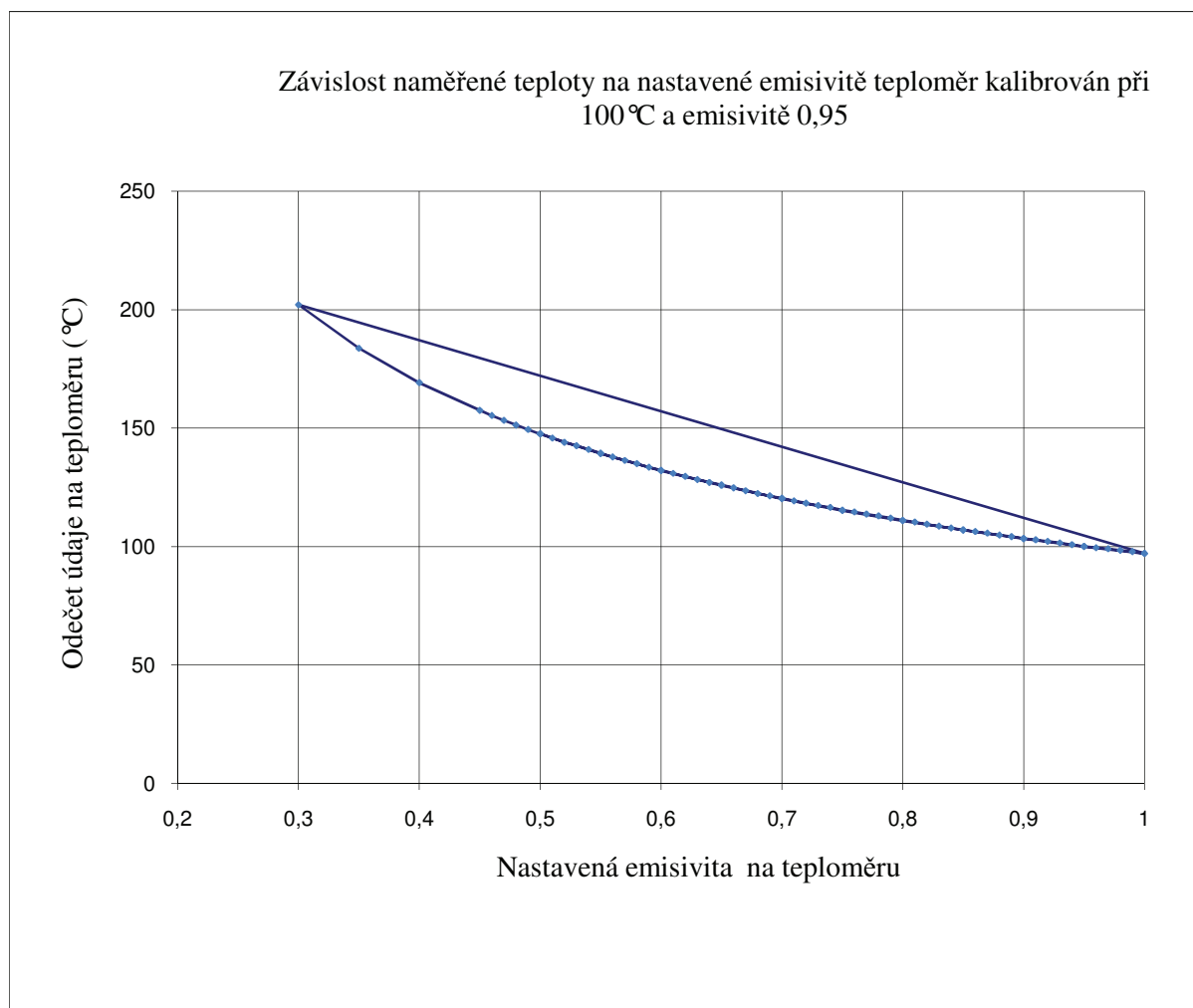
Tab. 5.2 - Naměřené hodnoty při teplotě 100°C

Černé těleso Teplota °C	Kalibrátor Emisivita		Teploměr Teplota	Compact CM Emisivita
100,0	0,95		97,0	1,00
100,0	0,95		100,0	0,95
100,0	0,95		103,3	0,90
100,0	0,95		106,9	0,85
100,0	0,95		110,9	0,80
100,0	0,95		115,2	0,75
100,0	0,95		120,2	0,70
100,0	0,95		125,8	0,65
100,0	0,95		132,0	0,60
100,0	0,95		139,2	0,55
100,0	0,95		147,5	0,50
100,0	0,95		149,4	0,49
100,0	0,95		151,3	0,48
100,0	0,95		153,3	0,47
100,0	0,95		155,3	0,46
100,0	0,95		157,5	0,45
100,0	0,95		169,2	0,40
100,0	0,95		183,7	0,35
100,0	0,95		202,1	0,30
100,0	0,95		226,3	0,25
100,0	0,95		259,7	0,20

Tab. 5.3 – Naměřené hodnoty při teplotě 100°C

Černé těleso Teplota °C	Kalibrátor Emisivita		Teploměr Teplota °C	Compact CM Emisivita
100,0	0,95		97,1	1,00
100,0	0,95		97,8	0,99
100,0	0,95		98,4	0,98
100,0	0,95		99,0	0,97
100,0	0,95		99,5	0,96
100,0	0,95		100,1	0,95
100,0	0,95		100,8	0,94
100,0	0,95		101,5	0,93
100,0	0,95		102,2	0,92
100,0	0,95		102,8	0,91
100,0	0,95		103,4	0,90
100,0	0,95		104,2	0,89
100,0	0,95		104,8	0,88

Černé těleso Teplota °C	Kalibrátor Emisivita		Teploměr Teplota °C	Compact CM Emisivita
100,0	0,95		105,6	0,87
100,0	0,95		106,3	0,86
100,0	0,95		107,1	0,85
100,0	0,95		107,8	0,84
100,0	0,95		108,6	0,83
100,0	0,95		109,4	0,82
100,0	0,95		110,3	0,81
100,0	0,95		111,1	0,80
100,0	0,95		112,0	0,79
100,0	0,95		112,9	0,78
100,0	0,95		113,7	0,77
100,0	0,95		114,6	0,76
100,0	0,95		115,4	0,75
100,0	0,95		116,5	0,74
100,0	0,95		117,3	0,73
100,0	0,95		118,3	0,72
100,0	0,95		119,3	0,71
100,0	0,95		120,4	0,70
100,0	0,95		121,4	0,69
100,0	0,95		122,4	0,68
100,0	0,95		123,6	0,67
100,0	0,95		124,8	0,66
100,0	0,95		126,0	0,65
100,0	0,95		127,1	0,64
100,0	0,95		128,3	0,63
100,0	0,95		129,6	0,62
100,0	0,95		130,9	0,61
100,0	0,95		132,2	0,60
100,0	0,95		133,5	0,59
100,0	0,95		135,0	0,58
100,0	0,95		136,4	0,57
100,0	0,95		137,8	0,56
100,0	0,95		139,4	0,55
100,0	0,95		141,0	0,54
100,0	0,95		142,6	0,53
100,0	0,95		144,0	0,52
100,0	0,95		145,8	0,51
100,0	0,95		147,7	0,50

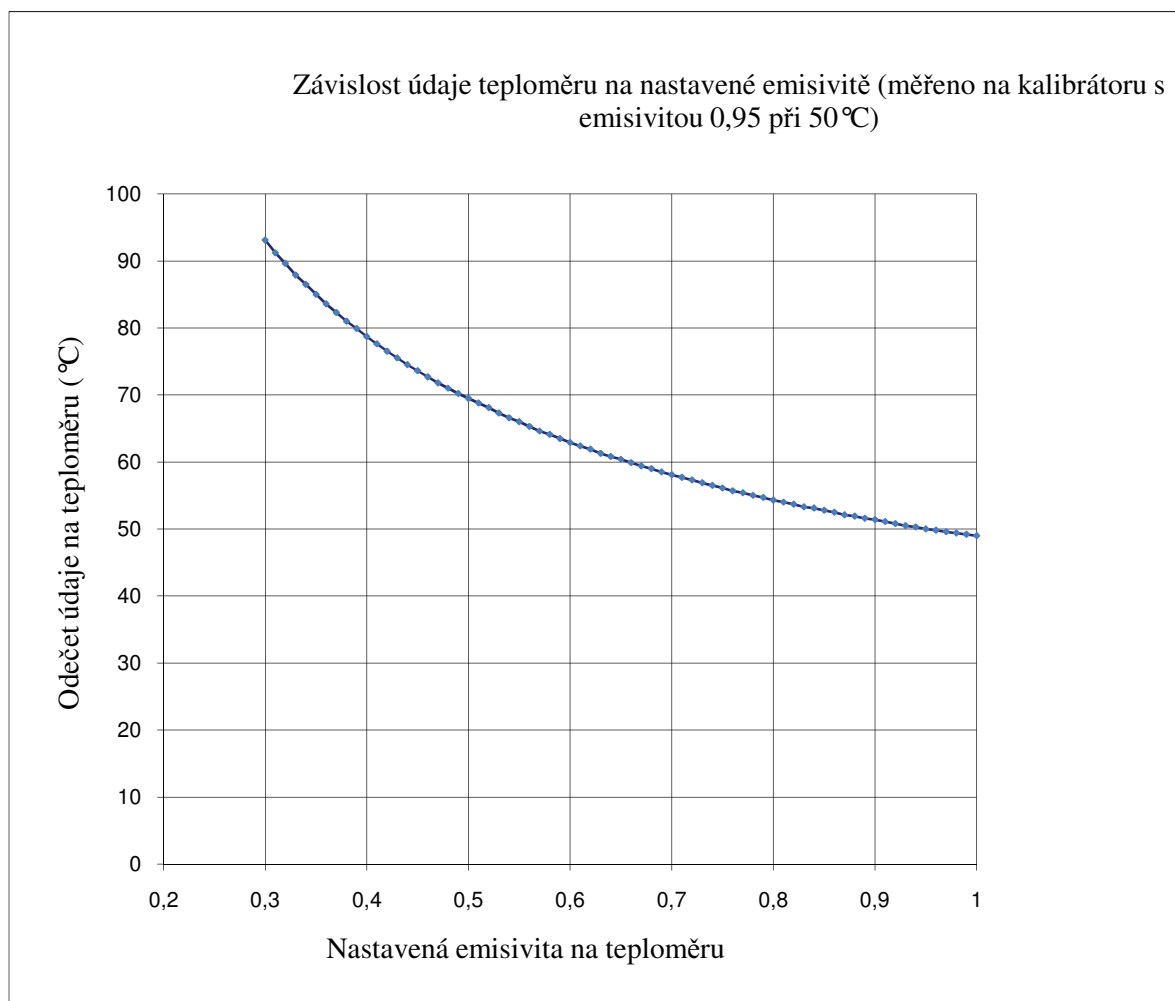


Obr 5.2 – Naměřené hodnoty při teplotě 100°C

Tab. 5.4 - Naměřené hodnoty při teplotě 50°C

Černé těleso Teplota °C	Kalibrátor Emisivita		Teploměr Teplota °C	Compact CM Emisivita
50,0	0,95		49,0	1,00
50,0	0,95		49,2	0,99
50,0	0,95		49,4	0,98
50,0	0,95		49,6	0,97
50,0	0,95		49,8	0,96
50,0	0,95		50,0	0,95
50,0	0,95		50,3	0,94
50,0	0,95		50,5	0,93
50,0	0,95		50,8	0,92
50,0	0,95		51,1	0,91
50,0	0,95		51,4	0,90
50,0	0,95		51,6	0,89
50,0	0,95		51,9	0,88
50,0	0,95		52,1	0,87
50,0	0,95		52,5	0,86
50,0	0,95		52,8	0,85
50,0	0,95		53,1	0,84
50,0	0,95		53,3	0,83
50,0	0,95		53,7	0,82
50,0	0,95		54,0	0,81
50,0	0,95		54,3	0,80
50,0	0,95		54,7	0,79
50,0	0,95		55,0	0,78
50,0	0,95		55,4	0,77
50,0	0,95		55,7	0,76
50,0	0,95		56,1	0,75
50,0	0,95		56,5	0,74
50,0	0,95		56,9	0,73
50,0	0,95		57,3	0,72
50,0	0,95		57,7	0,71
50,0	0,95		58,1	0,70
50,0	0,95		58,5	0,69
50,0	0,95		59,0	0,68
50,0	0,95		59,4	0,67
50,0	0,95		59,9	0,66
50,0	0,95		60,4	0,65
50,0	0,95		60,8	0,64
50,0	0,95		61,3	0,63

Černé těleso Teplota °C	Kalibrátor Emisivita		Teploměr Teplota °C	Compact CM Emisivita
50,0	0,95		61,9	0,62
50,0	0,95		62,4	0,61
50,0	0,95		62,9	0,60
50,0	0,95		63,5	0,59
50,0	0,95		64,1	0,58
50,0	0,95		64,6	0,57
50,0	0,95		65,3	0,56
50,0	0,95		66,0	0,55
50,0	0,95		66,6	0,54
50,0	0,95		67,3	0,53
50,0	0,95		68,1	0,52
50,0	0,95		68,8	0,51
50,0	0,95		69,5	0,50
50,0	0,95		70,2	0,49
50,0	0,95		71,0	0,48
50,0	0,95		71,8	0,47
50,0	0,95		72,7	0,46
50,0	0,95		73,6	0,45
50,0	0,95		74,5	0,44
50,0	0,95		75,5	0,43
50,0	0,95		76,5	0,42
50,0	0,95		77,6	0,41
50,0	0,95		78,7	0,40
50,0	0,95		79,9	0,39
50,0	0,95		81,0	0,38
50,0	0,95		82,3	0,37
50,0	0,95		83,6	0,36
50,0	0,95		85,0	0,35
50,0	0,95		86,5	0,34
50,0	0,95		87,9	0,33
50,0	0,95		89,6	0,32
50,0	0,95		91,2	0,31
50,0	0,95		93,1	0,30



Obr. 5.3 – Naměřené hodnoty při teplotě 50°C

5.2 Základní zpracování výsledků měření

Bylo zjištěno, že charakter závislosti nastavení emisivity na teploměru na naměřené hodnotě teploty jsou podobné. Bylo zjištěno, že procentuální změny naměřených hodnot teploty mezi body pro 95% emisivitu a 30% emisivitu jsou obdobné. To vedlo k úvaze použít to pro další fázi zpracování výsledků měření.

Opět použitím software Microsoft Excel byla z tabulky naměřených hodnot vypočtena odchylka naměřené teploty, byla provedena transformace výsledků měření na procentuální odchylku měření. Výpočty byly provedeny pro každé měření – pro 50°C, pro 100°C i pro 150°C. U měření při 100 °C byla v tabulce provedena korekce. Opět použitím software Microsoft Excel byly měření uspořádána sestupně podle nastavené emisivity. Duplicitní data byla vynechána a chybějící data byla doplněna pomocí interpolace mezi blízkými měřeními.

Výsledky transformace jsou uvedeny v příloženém tabulkovém přehledu. Je zpracována společná tabulka pro 50°C, 100°C i 150°C. Předpoklad podobnosti vztahů procentuální odchylky naměřené hodnoty je tímto výpočtem potvrzen.

Z tabulky byl zpracován společný graf závislosti odchylky naměřených hodnot v % na nastavení emisivity.

Ze společného grafu pro teplotu 50°C , 100°C i 150°C je možno konstatovat, že je zde vysoká shodnost grafů pro 100°C a 150°C . Graf pro 50°C se systematicky odlišuje ale základní charakter křivky je shodný.

Z naměřených hodnot ani z charakteristických vlastností teploměru není možno stanovit důvod této odchylky.

Při tomto měření je nutno pečlivě nastavit kalibrátor, kontrolovat okolní podmínky měření a sledovat možné příčiny odchylky.

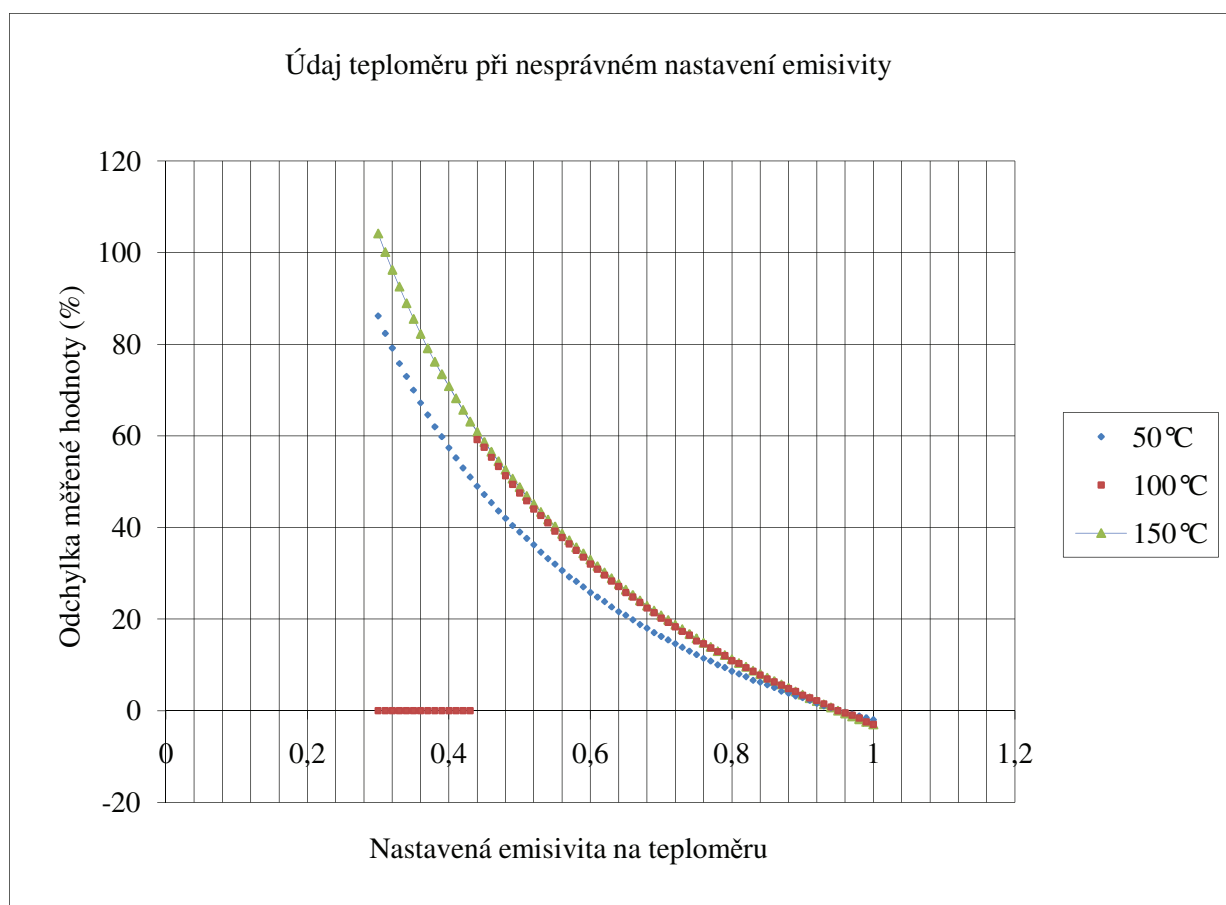
Pro další vyhodnocení měření byly proto použity závislosti údaje teploměru na změnách emisivity při nastavení kalibrátoru na 150°C , kde bylo provedeno měření téměř v celém rozsahu nastavené emisivity na teploměru v celém rozsahu od 0,3 do 1 ve stupních po 0,01.

Tab. 5.5 - Stanovení odchylky naměřené teploty v % měřicího rozsahu

Nastavená emisivita	Odchylka naměřené hodnoty na rozsahu		
	50°C	100°C	150°C
	%	%	%
1,00	-2,0	-3,0	-3,0
0,99	-1,6	-2,5	-2,5
0,98	-1,2	-1,6	-1,9
0,97	-0,8	-1,0	-1,3
0,96	-0,4	-0,5	-0,6
0,95	0,0	0,0	0,0
0,94	0,6	0,8	0,7
0,93	1,0	1,5	1,4
0,92	1,6	2,2	2,1
0,91	2,2	2,8	2,7
0,90	2,8	3,4	3,5
0,89	3,2	4,2	4,2
0,88	3,8	4,8	5,0
0,87	4,2	5,6	5,7
0,86	5,0	6,3	6,5
0,85	5,6	6,9	7,2
0,84	6,2	7,8	8,0
0,83	6,6	8,6	8,7
0,82	7,4	9,4	9,6
0,81	8,0	10,3	10,4
0,80	8,6	10,9	11,3
0,79	9,4	12,0	12,1

Nastavená emisivita	Odchylka naměřené hodnoty na rozsahu		
	50°C	100°C	150°C
	%	%	%
0,78	10,0	12,9	13,0
0,77	10,8	13,7	13,9
0,76	11,4	14,6	14,8
0,75	12,2	15,2	15,8
0,74	13,0	16,5	16,7
0,73	13,8	17,3	17,8
0,72	14,6	18,3	18,8
0,71	15,4	19,3	19,8
0,70	16,2	20,2	20,8
0,69	17,0	21,4	21,9
0,68	18,0	22,4	22,9
0,67	18,8	23,6	24,1
0,66	19,8	24,8	25,3
0,65	20,8	25,8	26,4
0,64	21,6	27,1	27,7
0,63	22,6	28,3	28,9
0,62	23,8	29,6	30,2
0,61	24,8	30,9	31,5
0,60	25,8	32,0	33,0
0,59	27,0	33,5	34,3
0,58	28,2	35,0	35,7
0,57	29,2	36,4	37,2
0,56	30,6	37,8	38,6
0,55	32	39,2	40,2
0,54	33,2	41,0	41,7
0,53	34,6	42,6	43,4
0,52	36,2	44,0	45,1
0,51	37,6	45,8	46,9
0,50	39,0	47,5	48,8
0,49	40,4	49,4	50,7
0,48	42,0	51,3	52,6
0,47	43,6	53,3	54,5
0,46	45,4	55,3	56,5
0,45	47,2	57,5	58,7
0,44	49,0	59,2	60,9
0,43	51,0	-	63,1
0,42	53,0	-	65,7
0,41	55,2	-	68,2

Nastavená emisivita	Odchylka naměřené hodnoty na rozsahu		
	50°C	100°C	150°C
	%	%	%
0,40	57,4	-	70,9
0,39	59,8	-	73,5
0,38	62,0	-	76,2
0,37	64,6	-	79,1
0,36	67,2	-	82,3
0,35	70,0	-	85,5
0,34	73,0	-	88,9
0,33	75,8	-	92,6
0,32	79,2	-	96,3
0,31	82,4	-	100,1
0,30	86,2	-	104,2



Obr. 5.4 – Graf stanovení odchylky naměřené teploty

5.3 Určení matematického vztahu měření na nastavení emisivity – výpočet koeficientu korekce

Pro další zpracování výsledků měření se ukázalo jako nutné vyjádřit závislost naměřených hodnot na nastavené emisivitě matematickou závislostí.

Výpočet koeficientu korekce z hodnot sousedních bodů.

V příložené tabulce ze softwaru Microsoft Excel je vyznačena metoda výpočtu koeficientu korekce. Pro jednotlivé hodnoty nastavené emisivity byl vypočítán koeficient korekce ze sousedního bodů podle rovnice:

$$K = \operatorname{tg} \alpha = (E_{n-1} - E_{n+1}) / (O_{n-1} - O_{n+1}) \quad (5.1)$$

Pro hodnotu K pro emisivitu $\varepsilon=0,99$ je vzorec výpočtu:

$$K = \operatorname{tg} \alpha = (D8-D10) / (C8-C10) \quad (5.2)$$

V tabulce je provedeno označení řádků a sloupců podle zásad Excelu.

Výpočty pro následující řádky tabulky jsou vypočteny aplikací uvedené rovnice. Z grafického zobrazení průběhu závislosti K na jednotlivých bodech emisivity je vidět nevyrovnaný průběh. To je způsobeno tím, že při výpočtu byl použit rozdíl číslic definovaných na 2 až 3 platná místa, která jsou zatížena chybami měření.

Praktické ověření:

výsledky měření : $t_m = 100^\circ\text{C}$, při $\varepsilon=0,8$

výpočet korigované teploty pro $\varepsilon = 0,7$

odečet K pro $\varepsilon = 0,8$

$$t_k = t_m + K * \varepsilon_m - \varepsilon_k$$

$$t_k = 100 - (-85) * (0,8-0,7) = 100 + 8,5 = 108,5^\circ\text{C}$$

Při větší odchylce emisivity je možno zvolit pro výpočet koeficient korekce ve středu intervalu – v našem případě K (pro $\varepsilon = 0,75$)=95.

$$t_k = 100 - (-95) * (0,8-0,7) = 100 + 9,5 = 109,5^\circ\text{C}$$

Výpočet koeficientu korekce stanovením směrnice tečny ke křivce.

Pro snížení chyb měření byla ověřena také metoda stanovení koeficientu korekce z rovnice závislosti odchylky měření na nastavené emisivitě.

Bylo ověřováno použití SW Excel pro vyhlazování křivek. Jako výchozí byla použita metoda analytického nástroje regrese. Byla ověřena polynomické regrese 2. a 3. stupně.

Poté byla ověřena také metoda vyhlazování křivek, která se ukázala jako nejvhodnější.

Bylo provedeno vyhlazování logaritmickou závislostí, i závislostí exponenciální i klouzavým průměrem.

Nejpřesněji však bylo možno danou závislost popsat polynomicickou funkcí 3. řádu. V příloze je uveden výsledek této závislosti i s udáním matematického vztahu. Výborný soulad matematické křivky s naměřenými hodnotami potvrzuje koeficient R^2 který je vypočten na 0,9997.

Po zobrazení křivky závislosti odchylky teploty na nastavené emisivitě byl spuštěn výpočet křivky. Pro polynom 3. řádu byl v Excelu dán výsledek :

$$Y = -281x^3 + 738,61x^2 - 720,83x + 259,76 \quad (5.3)$$

Byl také vypočten čtverec odchylek $R^2 = 0,9997$.

Tato hodnota potvrzuje dobrý soulad průběhu křivky s naměřenými hodnotami.

Koeficient korekce je vypočten jako první derivace křivky závislosti :

$$K = 7845,1 - 845,7x^2 + 1477x - 720,83 \quad (5.4)$$

Níže je uveden výstup z SW Excel včetně příslušného grafu a vypočtené matematické závislosti. V tabulce jsou doplněny i označení sloupců a řádků a uvedeny i výpočtové vzorce v metodice použité v Excelu.

Praktické ověření:

výsledky měření : $t_m = 100^\circ\text{C}$, při $\varepsilon = 0,8$

výpočet korigované teploty pro $\varepsilon = 0,7$

odečet K pro $\varepsilon = 0,8$

$$t_k = t_m + K * \varepsilon_m - \varepsilon_k$$

$$t_k = 100 - (-79,86) * (0,8 - 0,7) = 100 + 8,0 = 108,0^\circ\text{C}$$

Při větší odchylce emisivity je možno zvolit pro výpočet koeficient korekce ve středu intervalu – v našem případě K (pro $\varepsilon = 0,75$) = -88,23

$$t_k = 100 - (-88,23) * (0,8 - 0,7) = 100 + 8,8 = 108,8^\circ\text{C}$$

Srovnání výsledků

Vypočtené hodnoty koeficientu korekcí vypočtené metodou ze sousedních bodů a metodou z rovnice závislosti se ve střední části průběhu odchylují poměrně málo. V okrajových oblastech jsou vypočtené hodnoty koeficientů korekce podstatně vyšší. Tuto skutečnost je nutno brát v úvahu při používání této metody k provádění výpočtů korigované teploty.

Při uvedených výpočtech je použito označení :

t_k – korigovaná teplota

t_n – naměřená teplota při emisivitě ε_n

ε_n - emisivita při které bylo měřeno

ε_k – korigovaná emisivita

K - koeficient korekce odečtený z tabulky (grafu) pro ε_n

Výpočet koeficientu korekce ze sousedních bodů:

K – konstanta korekce; ε – emisivita, O – odchylka

$$K = tg\alpha = (D8 - D10) / (C8 - C10) \quad (5.5)$$

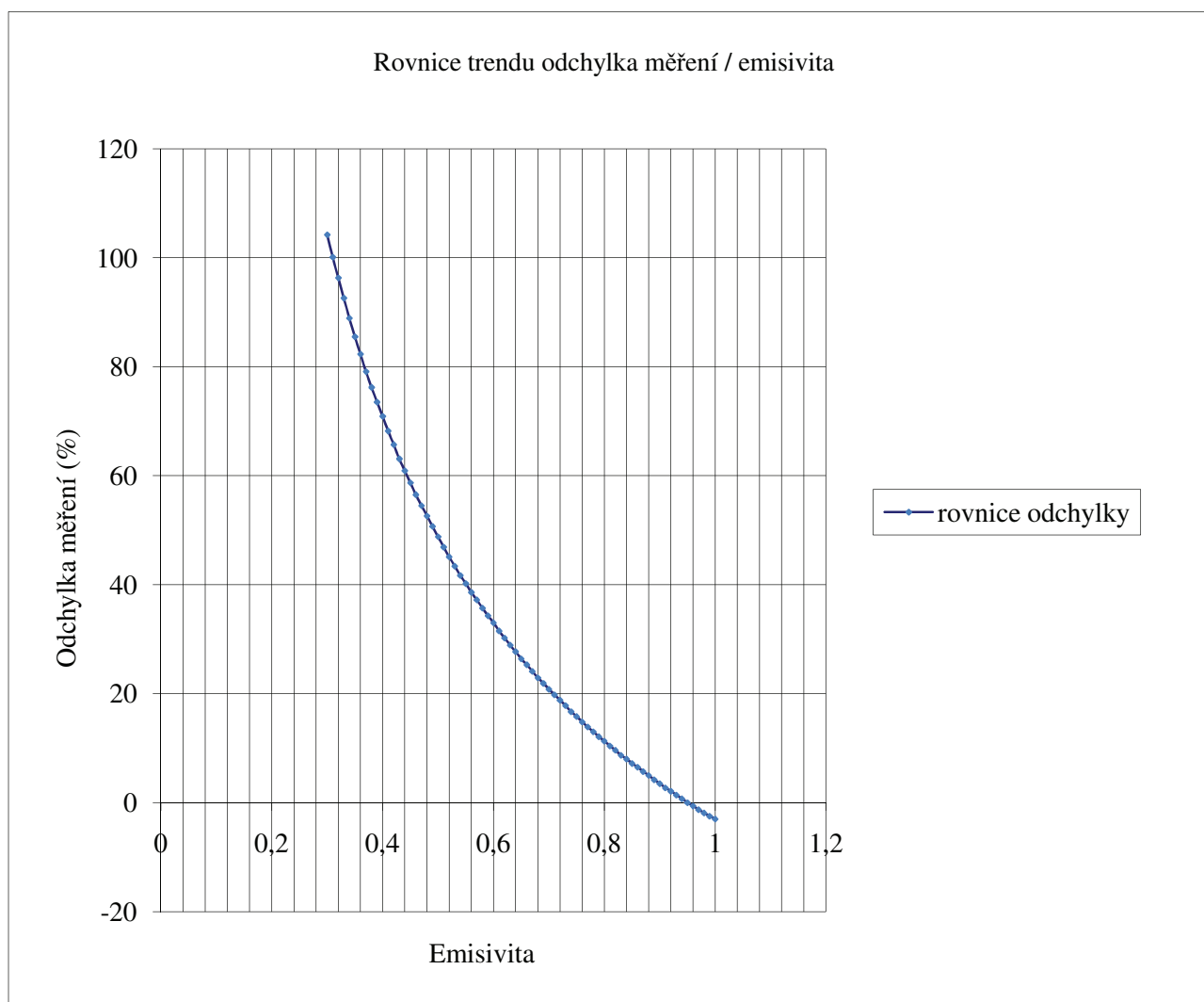
$$K = ((\varepsilon_{n-1}) - (\varepsilon_{n+1})) \cdot ((O_{n-1}) - (O_{n+1})) \quad (5.6)$$

Tab. 5.6 – Absolutní odchylka a směrnice

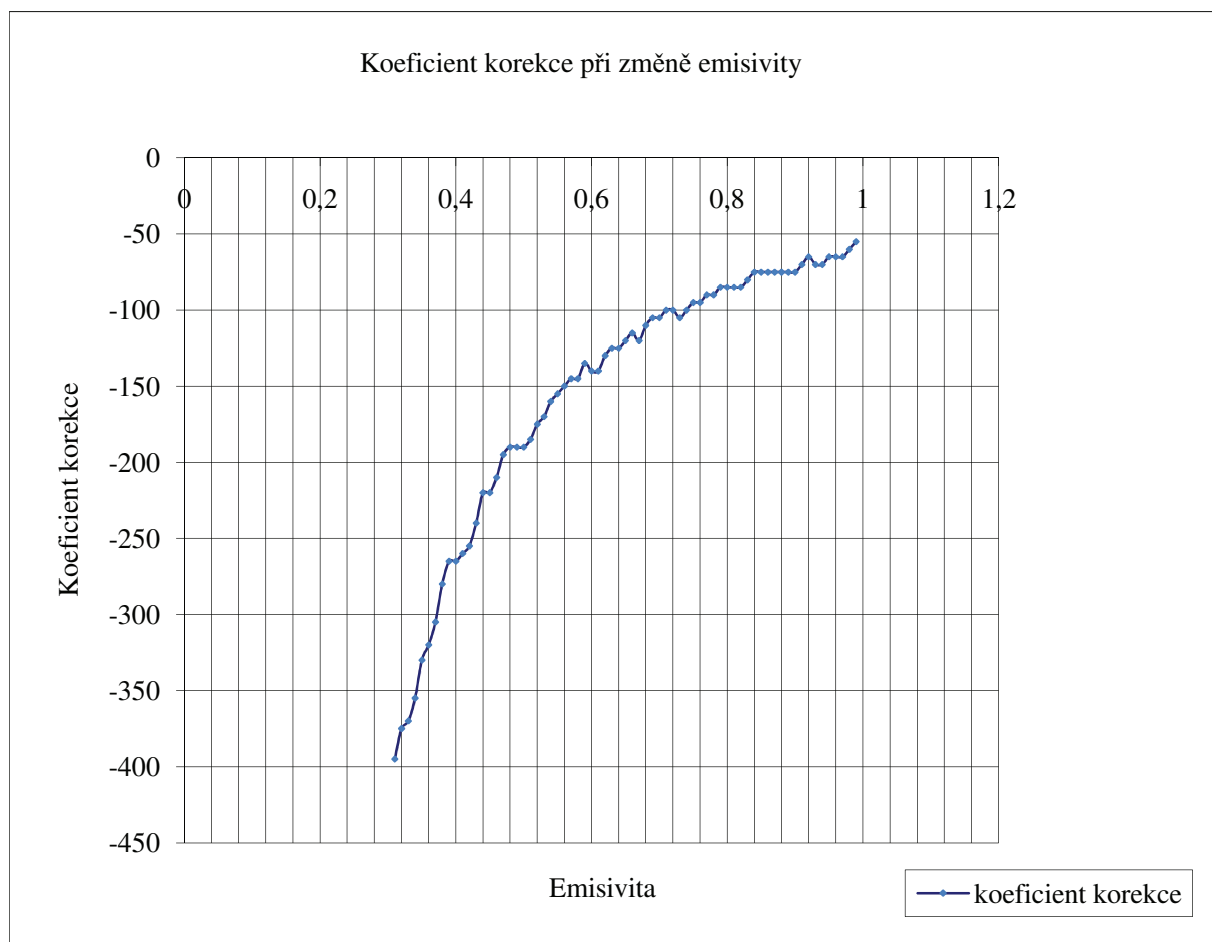
Emisivita	Absolutní odchylka proti hodnotě naměřené při emisivitě 0,95 odchylka	Směrnice křivky
ε	°C	K
100	-3,0	
0,99	-2,5	-55,00
0,98	-1,9	-60,00
0,97	-1,3	-65,00
0,96	-0,6	-65,00
0,95	0,0	-65,00
0,94	0,7	-70,00
0,93	1,4	-70,00
0,92	2,1	-65,00
0,91	2,7	-70,00
0,90	3,5	-75,00
0,89	4,2	-75,00
0,88	5,0	-75,00
0,87	5,7	-75,00
0,86	6,5	-75,00
0,85	7,2	-75,00
0,84	8,0	-75,00
0,83	8,7	-80,00
0,82	9,6	-85,00
0,81	10,4	-85,00
0,80	11,3	-85,00
0,79	12,1	-85,00
0,78	13,0	-90,00

Emisivita	Absolutní odchylka proti hodnotě naměřené při emisivitě 0,95 odchylka	Směrnice křivky
ε	$^{\circ}\text{C}$	K
0,77	13,9	-90,00
0,76	14,8	-95,00
0,75	15,8	-95,00
0,74	16,7	-100,00
0,73	17,8	-105,00
0,72	18,8	-100,00
0,71	19,8	-100,00
0,70	20,8	-105,00
0,69	21,9	-105,00
0,68	22,9	-110,00
0,67	24,1	-120,00
0,66	25,3	-115,00
0,65	26,4	-120,00
0,64	27,7	-125,00
0,63	28,9	-125,00
0,62	30,2	-130,00
0,61	31,5	-140,00
0,60	33,0	-140,00
0,59	34,3	-135,00
0,58	35,7	-145,00
0,57	37,2	-145,00
0,56	38,6	-150,00
0,55	40,2	-155,00
0,54	41,7	-160,00
0,53	43,4	-170,00
0,52	45,1	-175,00
0,51	46,9	-185,00
0,50	48,8	-190,00
0,49	50,7	-190,00
0,48	52,6	-190,00
0,47	54,5	-195,00
0,46	56,5	-210,00
0,45	58,7	-220,00
0,44	60,9	-220,00
0,43	63,1	-240,00
0,42	65,7	-255,00
0,41	68,2	-260,00
0,40	70,9	-265,00
0,39	73,5	-265,00
0,38	76,2	-280,00
0,37	79,1	-305,00
0,36	82,3	-320,00
0,35	85,5	-330,00
0,34	88,9	-355,00

Emisivita	Absolutní odchylka proti hodnotě naměřené při emisivitě 0,95 odchylka	Směrnice křivky
ε	$^{\circ}\text{C}$	K
0,33	92,6	-370,00
0,32	96,3	-375,00
0,31	100,1	-395,00
0,30	104,2	



Obr. 5.5 – Graf odchylky

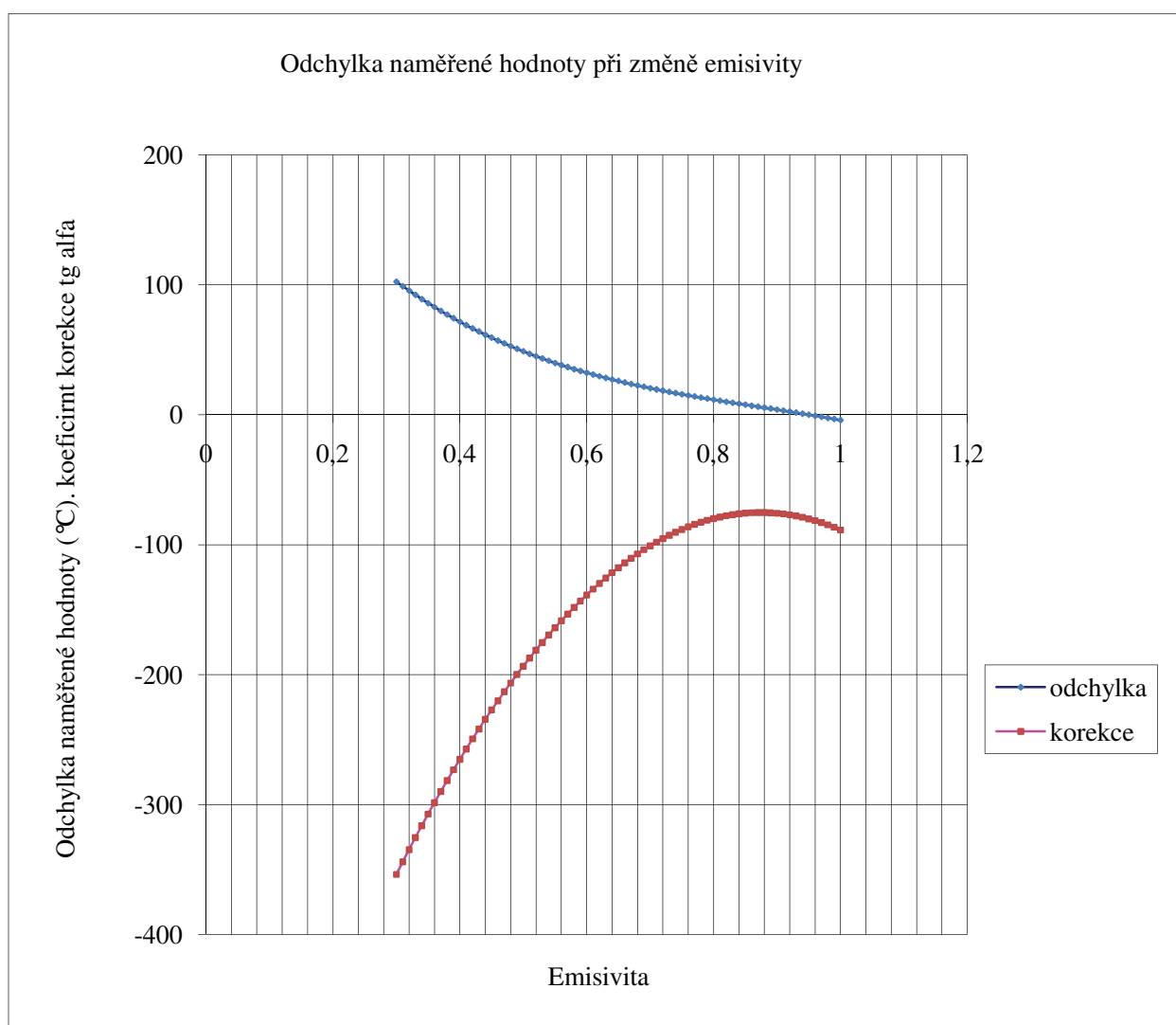


Obr. 5.6 – Koeficient korekce

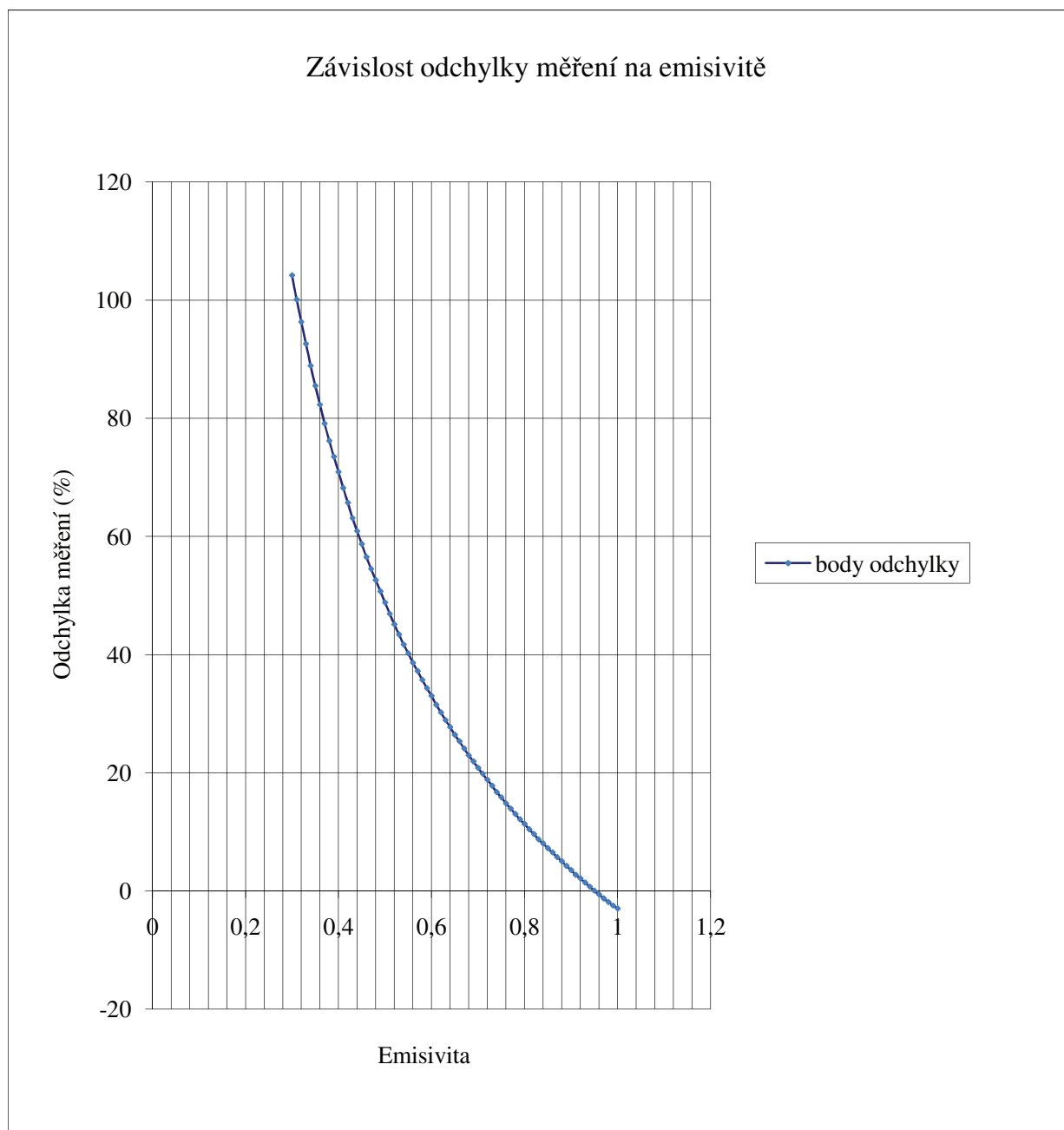
Tab. 5.7 - Výpočet koeficientu korekce z rovnice křivky

X^3	-281,67	-845,01			
X^2	738,61	1477,22			
X	-720,83	-720,83			
K	259,76				
Suma	-4,13	-88,62			
Emisivita	Y	Y' = K		Odchylka	
1,00	-4,13	-88,62		-3,0	
0,99	-3,25	-86,58		-2,5	
0,98	-2,40	-84,70		-1,9	
0,97	-1,56	-83,00		-1,3	
0,96	-0,74	-81,46		-0,6	
0,95	0,07	-80,09		0,0	
0,94	0,87	-78,89		0,7	
0,93	1,65	-77,86		1,4	
0,92	2,42	-77,00		2,1	
0,91	3,19	-76,31		2,7	
0,90	3,95	-75,79		3,5	
0,89	4,71	-75,44		4,2	
0,88	5,46	-75,25		5,0	
0,87	6,21	-75,24		5,7	
0,86	6,96	-75,39		6,5	
0,85	7,72	-75,71		7,2	
0,84	8,48	-76,20		8,0	
0,83	9,24	-76,86		8,7	
0,82	10,02	-77,69		9,6	
0,81	10,80	-78,69		10,4	
0,80	11,59	-79,86		11,3	
0,79	12,40	-81,20		12,1	
0,78	13,22	-82,70		13,0	
0,77	14,05	-84,38		13,9	
0,76	14,90	-86,22		14,8	
0,75	15,78	-88,23		15,8	
0,74	16,67	-90,41		16,7	
0,73	17,58	-92,77		17,8	
0,72	18,53	-95,28		18,8	
0,71	19,49	-97,97		19,8	
0,70	20,49	-100,83		20,8	
0,69	21,51	-103,86		21,9	
0,68	22,56	-107,05		22,9	
0,67	23,65	-110,42		24,1	

Emisivita	Y	Y' = K		Odchylka	
0,66	24,77	-113,95		25,3	
0,65	25,93	-117,65		26,4	
0,64	27,13	-121,53		27,7	
0,63	28,36	-125,57		28,9	
0,62	29,64	-129,78		30,2	
0,61	30,96	-134,15		31,5	
0,60	32,32	-138,70		33,0	
0,59	33,73	-143,42		34,3	
0,58	35,19	-148,30		35,7	
0,57	36,70	-153,36		37,2	
0,56	38,26	-158,58		38,6	
0,55	39,87	-163,97		40,2	
0,54	41,54	-169,54		41,7	
0,53	43,26	-175,27		43,4	
0,52	45,04	-181,17		45,1	
0,51	46,89	-187,23		46,9	
0,50	48,79	-193,47		48,8	
0,49	50,76	-199,88		50,7	
0,48	52,79	-206,45		52,6	
0,47	54,89	-213,20		54,5	
0,46	57,05	-220,11		56,5	
0,45	59,29	-227,20		58,7	
0,44	61,60	-234,45		60,9	
0,43	63,98	-241,87		63,1	
0,42	66,43	-249,46		65,7	
0,41	68,97	-257,22		68,2	
0,40	71,58	-265,14		70,9	
0,39	74,27	-273,24		73,5	
0,38	77,04	-281,51		76,2	
0,37	79,90	-289,94		79,1	
0,36	82,84	-298,54		82,3	
0,35	85,87	-307,32		85,5	
0,34	88,99	-316,26		88,9	
0,33	92,20	-325,37		92,6	
0,32	95,50	-334,65		96,3	
0,31	98,89	-344,10		100,1	
0,30	102,38	-353,71		104,2	



Obr. 5.7 - Odchylka a korekce



Obr. 5.8 - Body odchylyky a křivka odchylyky

5.4 Kontrolní měření

Na základě výše vypočtených hodnot jsme udělali kontrolní měření. Použili jsme bezdotykový teploměr Compact CM a dotykový měřič Metex M-3660D. Na elektrický vaříč jsme umístili rozehrát kovový materiál s neznámou emisivitou a stříbrným povrchem.

Měření 1

Použitý bezdotykový teploměr Compact CM

Použitý dotykový měřič Metex M-3660D

Na elektrický vaříč jsme umístili rozehrát stříbrné kovové těleso s neznámou emisivitou

Compact CM – nastavená emisivita 0,95 – naměřená teplota byla 121°C

Metex M-3660D – naměřená teplota byla 160°C

Výpočet odchylky měření:

$$t_s / t_n = 160/121 = 1,322 \quad (5.7)$$

odchylka je tedy 32,2%

kde

t_s – teplota skutečná

t_n – teplota naměřená

Z tabulky výpočtu koeficientu korekce z rovnice křivky (uvedená výše) určíme emisivitu daného tělesa, která je správná.

Tab. 5.8 – Odchylka při dané emisivitě a korekce

Emisivita	Y	Y' = K			Odchylka v %
0,61	30,96	-134,15			31,5
0,60	32,32	-138,70			33,0

Pro odchylku 31,5% je tedy emisivita 0,61

Pro odchylku 33,0% je tedy emisivita 0,60

Lineární interpolací jsme tedy vypočítali emisivitu neznámého tělesa – 0,60

Měření 2

Pro ověření námi vypočítané emisivity a potvrzení její správnosti jsme provedli další kontrolní měření.

Použitý bezdotykový teploměr Compact CM

Použitý dotykový měřič Metex M-3660D

Na elektrický vaříč jsme umístili rozehrát stříbrné kovové těleso s neznámou emisivitou

Compact CM – nastavená emisivita 0,60 – naměřená teplota byla 143°C

Metex M-3660D – naměřená teplota byla 143°C

V měření 1 byla na bezdotykovém teploměru nastavená emisivita na hodnotu $0,95$ a teplota byla 121°C . Díky výpočtu jsme zjistili emisivitu neznámého tělesa a to $0,60$. Po provedení kontrolního měření s touto nastavenou emisivitou se nám potvrdila správnost výpočtu. Naměřená teplota bezdotykovým teploměrem Compact CM je se správným nastavením hodnoty emisivity shodná s dotykovým měřičem Metex M-3660D a to 143°C .

Kontrolní měření potvrzují správnost vztahů mezi emisivitou a odchylkou, které jsme vypočítali v předchozí části.

6 ZÁVĚR

Hlavním záměrem diplomové práce bylo stanovit metodu pro výpočet korekce naměřené hodnoty (teploty) když se po provedení měření zjistí, že emisivita nebyla při měření nastavena správně. Když se zjistí odchylka mezi nastavenou emisivitou na teploměru a dodatečně zjištěnou správnou emisivitou měřeného tělesa (plochy) je možno stanovit koeficient korekce, kterým je možno vypočítat správnou hodnotu teploty bez opakování měření.

Protože křivka závislosti odchylky měření na nastavené emisivitě není lineární, je konstanta korekce proměnná s nastavenou emisivitou.

Byly ověřeny dvě metody stanovení koeficientu korekce:

- výpočtem ze dvou sousedních hodnot odchylek
- výpočtem z rovnice křivky průběhu odchylky s nastavenou emisivitou

Srovnáním konkrétních kontrolních výpočtů je možno konstatovat, že obě metody jsou použitelné. Dosažená přesnost se podstatně neodlišuje. Protože obě metody jsou stejně pracné, je pro praxi doporučováno použití metody, která vychází z rovnice průběhu závislosti odchylky na nastavené emisivitě.

Uvedený vztah výše je možno použít, když měření teploty bylo provedeno s chybně nastavenou emisivitou. Není nutno opakovat měření, ale možno provést korekci podle uvedeného vztahu.

Nesprávné nastavení emisivity má velký vliv na výsledky měření teploty. Určení emisivity je nutno věnovat velkou pozornost. Pokud není emisivita přesně známa je doporučováno použít některou z metod zjišťování emisivity předmětu měření.

Koeficient korekce není konstantní v rozsahu emisivity 0,3 až 1,0. Korekci je možno bez zhoršení přesnosti použít v rozsahu emisivity +/- 5 až +/-10% odchylky emisivity při měření a skutečné správné emisivitě.

Je možno konstatovat, že zde uvedená metodu korekce a stanovené koeficienty korekce platí v okolí teplot 100°C až 150°C.

Vliv na celkovou přesnost měření:

Chyba v nastavení emisivity je chyba instalace – nastavení měřicího přístroje – systémová chyba. Tato chyba nemůže být aplikována jako zhoršení přesnosti měřicího přístroje.

Na závěr jsme provedli poslední kontrolní měření, kde jsme si ověřili správnost výpočtu. Pomocí tabulky odchylky viz. výše jsme určili správné nastavení emisivity u tělesa a naměřili přesnou hodnotu teploty u tělesa.

Pyrometry obecně využívají IR 1 až 14 μm . Námi použitý bezdotykový teploměr Compact CM pracuje až v oblasti 8 až 14 μm a zpravidla platí, že čím více se posouváme od viditelného spektra (pod 1 μm), tak se problémy s „rozcházejícími se teplotami“ zvyšují. Dobře funguje, když si například přes kontaktní teploměr určíme emisivitu a poté ji dobře změříme, avšak většina dostupných tabulek emisivity nepostačuje a pouze s nimi

nevystačíme, abychom výrazně zpřesnili výsledky. Prakticky pro každý soubor měření by bylo zapotřebí rozsáhlých „doladění“ (kalibrace, kontaktní měření, aj.), emisivita se mění s materiálem, teplotou a dalšími vlivy okolí. Proto nelze široce zobecnit, musí se citlivě postupovat případ od případu zcela specificky. Poté máme měření velmi kvalitní (přesná) a podobně lze uvažovat nejen pro jednoduché pyrometry, ale i termokamery, kde se tato situace opakuje v tisících bodech.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] MIFR M.; Měření teploty [PDF Dokument]. [cit. 4.4. 2007] Dostupný z: www.kvetakov.net/down.php?file=./UEIKMT/2/ls/ISAME/MTVKap5.pdf
- [2] CHUDÝ V.; Palenčár R.; Kureková, E.; Halaj, M.; Meranie technických veličín : 1. Vydání Bratislava: Vydavateľstvo STU, 1999. 688s. ISBN 80-227-1275-2.
- [3] HUŠEK Miloš. Bezdotykové teploměry [online]. 2010, Dostupné z: <http://www.qtest.cz/bezdotykove-teplomery/bezdotykove-teplomery.htm>
- [4] Firemní literatura
Přehled výrobků MICRO-EPSILON Czech Republic, spol. s.r.o.(CZ), 2009
- [5] Firemní literatura
Infra-teploměr s označením snímané plochy TESTO, Lenzkirch (D), 2006
- [6] Firemní literatura
Prospekt Compact CM TSI System s.r.o. Brno (CZ), 2009
- [7] Firemní literatura
Raytek CM návod k použití TSI System s.r.o. Brno (CZ), 2009
- [8] Firemní literatura
3-bodový IR kalibrátor, Fluke Praha (CZ), 2005
- [9] Kalibrátory pro infrasnímače: [online] [cit. 14.2.2011] Dostupné na: <http://www.omegaeng.cz/shop/subsectionSC.asp?subsection=K02&book=Temperature>
- [10] Příručka pro výběr kalibrátoru: [online] [cit. 14.2.2011] Dostupné na: <http://www.omegaeng.cz/shop/subsectionSC.asp?subsection=K01&book=Temperature>
- [11] Firemní literatura
Infračervený teploměr IR 800-20D, FKtechnics, Praha (CZ), 2009
- [12] Měření termovizí [online] [cit. 20.3.2011] Dostupné na: <http://www.mereni-termokamerou.eu/princip-termografickeho-mereni>
- [13] Firemní literatura
Prospekt Compact MI3 TSI System s.r.o. Brno (CZ), 2009
- [14] Accurate Noncontact Infrared Temperature Measurement [online] [cit. 8.4.2011]
Dostupné na: <http://www.raytek.com/Raytek/en-r0/IREducation/AccurateMeasurement.htm>
- [15] LYSENKO V.; Detektory pro bezdotykové měření teplot : 1. vydání Praha: BEN – technická literatura, 2005. 160 s. ISBN 80-7300-180-2.
- [16] KREIDL M.; Měření teploty – Senzory a měřicí obvody : 1. vydání Praha : BEN – technická literatura, 2005. 240 s. ISBN 80-7300-145-4.

- [17] SLÁDEK, Z.; Vdoleček, F.; Technická měření : 1.vydání Brno : Nakladatelství VUT, 1992. 220s. ISBN 80-214-0414-0.
- [18] Firemní literatura
Soubor technických informací poskytovaných firmou Omega číslo 1- Zpravodaj pro měření a regulaci, číslo 1 – 2.vydání; Bezdotykové měření teploty 2005