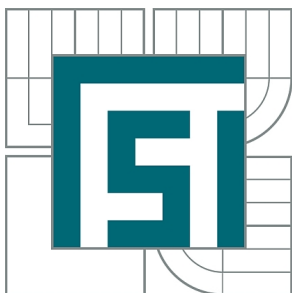


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AUTOMATION AND COMPUTER SCIENCE

PŘESNOST BEZDOTYKOVÉHO MĚŘENÍ TEPLoty

ACCURACY OF NON-CONTACTING TEMPERATURE MEASUREMENT

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. LADISLAV HORÁK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. FRANTIŠEK VDOLEČEK, CSc.

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automatizace a informatiky

Akademický rok: 2010/11

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Ladislav Horák

který/která studuje v **magisterském 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:

Přesnost bezdotykového měření teploty

v anglickém jazyce:

Accuracy 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, popř. také transmisivity, na výsledek měření teploty pomocí moderních bezdotykových teploměrů. Pro potvrzení těchto analýz navrhnete a realizujete jednoduché experimenty s využitím pyrometru Raytek MI3.

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 závislostí
4. Experimentální ověření vlivu emisivity
5. Závěry a doporučení pro měření v praxi

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 2010/11.

V Brně, dne 4.11.2010




Ing. Jan Roupec, Ph.D.
Ředitel ústavu


prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan

ABSTRAKT

Diplomová práce je zaměřena na vliv správného nastavení parametru emisivity, který je závislý na teplotě, vlnové délce a dalších vlivech okolního prostředí.

Pro zkoumání parametru byl pořízen infračervený (IR) bezdotykový teploměr MI3 od firmy Raytek. Ke zvýšení kvality měření byl navržen a naprogramován obslužný měřicí program. Program byl vyvinut v programovacím prostředí LabView 8.5.

Pro získání pravé hodnoty teploty měřeného objektu byl navržen a zkonstruován dotykový teploměr s odporově závislým senzorem. Teploměr je připojen ke komunikačnímu boxu bezdotykového IR teploměru a obsluhován stejným programem.

V dnešní době jsou nejvíce rozšířené IR teploměry s pevně nastaveným parametrem emisivity, které jsou použitelné pouze pro reálná tělesa v okolí hodnoty parametru emisivity 0,95. Pro tyto IR teploměry byla zkonstruována korekční funkce, která by měla hodnotu teploty naměřenou při pevně nastaveném parametru emisivity 0,95 přiblížit skutečné hodnotě měřeného objektu.

ABSTRACT

This master's thesis is specialized on the influence of correct parameters of emissivity, which depends on the temperature, wavelength and ambient environment.

The investigation the parameter was taken infrared non-contact thermometer MI3 from company Raytek. To improve the quality of measurement was designed and programmed measuring utility program. The program was developed in the LabView 8.5 programming environment. To obtain the true value of the measured temperature of the target was designed and constructed the touch thermometer with the resistance dependent sensor. The thermometer is connected to the communication box of infrared thermometer and contain the same program.

Nowadays are the most advanced IR thermometer with fixed parameters emissivity, which is applicable just to the real body in the vicinity of the parameter emissivity 0,95. For those IR thermometers were designed correction function, which would have temperature measured at a fixed emissivity parameter 0,95 set close to the actual value of the object.

KLÍČOVÁ SLOVA

MI3, Raytek, emisivita, elektromagnetické vlny, Planck, Stefan-Boltzman, teplota, IR, bezdotykové měření.

KEYWORDS

MI3, Raytek, emissivity, electromagnetic waves, Planck, Stefan-Boltzman, temperature, IR, noncontact measurement.

PODĚKOVÁNÍ

Za účinnou podporu a obětavou pomoc, cenné připomínky a rady při zpracování diplomové práce tímto děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Františku Vdolečkovi, CSc.

BIBLIOGRAFIE

HORÁK, L. *Přesnost bezdotykového měření teploty*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 60 s. Vedoucí diplomové práce Ing. František Vdoleček, CSc..

OBSAH

1	ÚVOD	13
2	ELEKTROMAGNETICKÉ VLNĚNÍ	15
3	BEZDOTYKOVÉ MĚŘENÍ TEPLoty	17
3.1	Infračervený měřicí systém	18
3.1.1	Měřený objekt	18
3.1.2	Atmosféra (prostředí).....	20
3.1.2	Senzor	21
4	ABSOLUTNĚ ČERNÉ TĚLESO A EMISIVITA	29
5	NÁVRH A REALIZACE EXPERIMENTÁLNÍHO PRACOVISTĚ	31
5.1	Moderní bezdotykový pyrometr MI3	31
5.2	Měřicí program MI3	33
5.3	Externí teploměr KTY 81-120.....	38
5.4	IR KALIBRÁTOR FLUKE 9135.....	40
6	EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ VLIVU EMISIVITY	43
6.1	Měření teploty kalibrátoru FLUKE 9135	43
6.2	Měření reálních objektů.....	47
6.2.1	Měření kovů.....	49
6.2.2	Měření plastů	50
6.2.3	Měření skla	52
7	MĚŘENÍ V PRAXI.....	53
8	ZÁVĚR	57
9	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	59

1 ÚVOD

Jednou z nejvýznamnějších fyzikálních vlastností hmoty je termodynamická teplota. V dnešní době je velmi málo látek, které jsou teplotně nezávislé, proto u teplotně závislých látek je zapotřebí, znát vlastní termodynamickou teplotu. V tuto chvíli přichází na řadu obecné měření teploty, které je rozděleno na dotykové a bezdotykové.

Dotykové měření teploty je zavedeno řadu let a ve své oblasti dosáhlo vrcholu. Z důvodu průmyslového zvyšování nároků na měření teploty, bylo zavedeno takzvané bezdotykové měření teploty, které je významným odvětvím v této oblasti. Bezdotykové měření teploty přináší množství výhod, ale také řadu nevýhod. Základní žádoucí vlastností je měření bez potřeby přímého (dotykového) kontaktu s měřeným objektem.

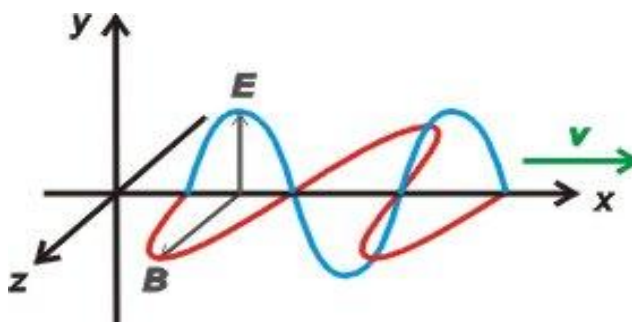
Pro získání přesných hodnot je důležitá znalost parametru emisivity měřeného objektu. Tento parametr se pro různé materiály mění v závislosti na vlnové délce a teplotě. Tato diplomová práce má za úkol zkoumat přesnost bezdotykového měření teploty v závislosti na změně parametru emisivity.

2 ELEKTROMAGNETICKÉ VLNĚNÍ

Roku 1865 skotský fyzik James Clerk Maxwell matematicky odvodil, že existují elektromagnetické vlny, které se šíří rychlostí světla. Objevil, že světlo je příčné elektromagnetické vlnění v určitém intervalu frekvencí. O rozšíření počtu elektromagnetických vln jiných frekvencí se postaral německý fyzik Heinrich Hertz.

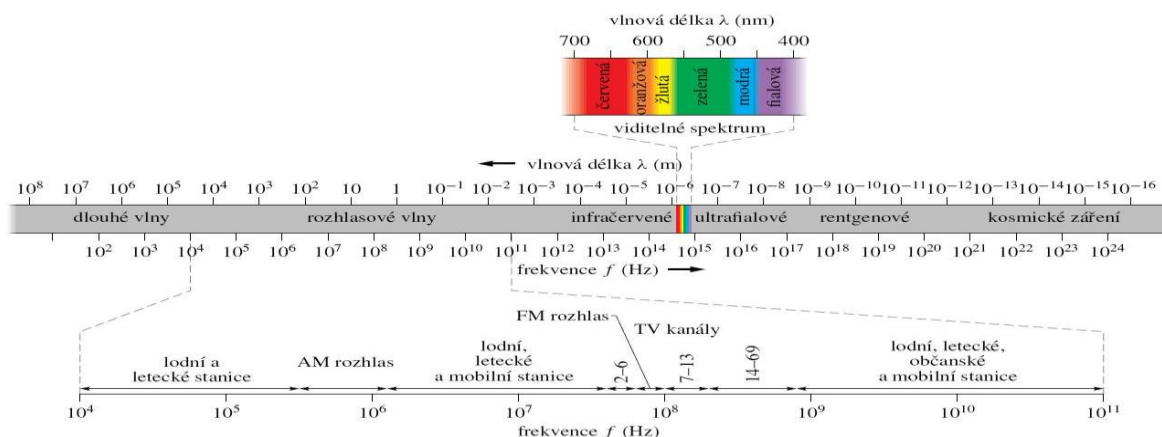
Elektromagnetické vlnění je složeno z vektoru intenzity elektrického pole E a vektoru magnetické indukce B , které nelze oddělit. Tyto složky jsou na sebe navzájem kolmé, stejně jako jsou kolmé na směr šíření. To znamená, že každé elektromagnetické vlnění je příčné vlnění, které se šíří rychlostí světla c (tj. $3 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$), což je společná vlastnost u všech elektromagnetických vlnění. Další společnou vlastností pro všechna elektromagnetická vlnění je podléhání ohybu, interferenci a v neposlední řadě také disperzi.

Vlnění má i rozdílené vlastnosti, které jednotlivé vlnění od sebe odlišuje. Jsou to např. vlnová délka, schopnost pronikat látkami a vlastním vznikem.



Obr.1 Elektromagnetická vlna

Jakýkoliv elektrický náboj, který se pohybuje s nenulovým zrychlením, vyzařuje elektromagnetické vlnění. Jak je ukázáno na Obr. 2, známe nyní široké spektrum elektromagnetických vln.



Obr.2 Spektrum elektromagnetických vln (Maxwellova duha)

Mezi jednotlivými druhy elektromagnetického vlnění neexistuje přesná (ostrá) hranice. Jednotlivé druhy vlnění se mohou částečně překrývat. Stručné rozdělení elektromagnetických vln:

- Technické vlny - mají největší vlnovou délku a někdy se též označují jako nízkofrekvenční vlny. Vznikají v různých technických zařízeních. Jejich vlnová délka dosahuje desítky až tisíce kilometrů.
- Rozhlasové a televizní vlny - vlny, které přenášejí televizní a rozhlasové vysílání. Jejich vlnová délka leží v intervalu 10^4 m až 10^{-2} m. Vznikají v oscilačních obvodech jako důsledek přeměny energie elektrického pole na energii magnetického pole.
- Mikrovlny - tyto vlny mají rozsáhlé využití v technické praxi. Používají se v radarové technice ke zjišťování polohy pohybujících se těles, v moderní komunikační technice se používají pro propojení např. počítačů. Jejich vlnová délka leží v intervalu 10^{-2} m až 10^{-4} m.
- Infračervené záření - objeveno německým astronomem Williamem Herschelem. Astronom při studiu teplotních účinků jednotlivých částí slunečního záření zjistil, že teplota oblasti kam dopadá světlo modré, je teplota nižší než teplota oblasti kam dopadá světlo červené. Infračervené záření má vlnovou délku větší nežli viditelné světlo, ale menší než mikrovlnné záření. Ve spektru elektromagnetického záření se nachází ve třetí dekádě s vlnovou délkou mezi 760 nm a 1 mm, resp. energií fotonů mezi 0,0012 a 1,63 eV.
- Světlo - druh elektromagnetického vlnění, které je možno zachytit pouhým okem. Vlnová délka leží v intervalu 390 nm až 790 nm.
- Ultrafialové záření - zdrojem UV záření jsou tělesa s vysokou teplotou (slunce, atd.) nebo speciální výbojky. Záření neprochází obyčejným sklem a proto je nutnost používat sklo křemenné. Vlnové délky ultrafialového záření leží v intervalu 400 nm – 10 nm.
- Rentgenové záření - záření s vlnovými délkami 10 nm až 1 pm které vzniká v rentgenkách při dopadu katodového záření (tvořeno svazkem urychlených elektronů) na kovovou anodovou elektrodu. Toto záření bylo německým fyzikem Röntgenem označeno jako "paprsky X". Proniká i neprůhlednými materiály.
- Gama záření - záření vzniká v atomovém jádře při dějích, které doprovází vznik záření alfa nebo beta. Vlnová délka je 10^{-2} nm a nižší. Pro pohlcení toho záření je zapotřebí velkého množství materiálu s vysokou hustotou a atomovým číslem.

3 BEZDOTYKOVÉ MĚŘENÍ TEPLOTY

Bezdotykové měření teploty (též známé jako infračervená pyrometrie) je měření elektromagnetického záření povrchu materiálu, které je přijímáno senzorem (detektorem) elektromagnetického záření vlnové délky v intervalu od 0,4 μm do 25 μm . Interval obsahuje oblast viditelného spektra 0,4 μm až 0,78 μm , oblast blízkého infračerveného spektra 0,78 μm až 1 μm , oblast krátkovlnného infračerveného spektra 2 μm až 3 μm , oblast středovlnného infračerveného spektra 3 μm až 5 μm a oblast dlouhovlnného infračerveného spektra 5 μm až 25 μm . Elektromagnetické záření v intervalu od 2 μm do 25 μm označujeme za tepelné záření a jsou mu přiřazeny teplotní hodnoty v intervalu od -40 °C do +10 000 °C.

Jakákoliv hmota – živá, neživá, tekutiny, plyny a v neposlední řadě pevné látky si se svým okolím vyměňují tepelnou energii formou elektromagnetického záření. Tato přeměna se uskutečňuje ve třech směrech.

1. Pokud má hmota nižší teplotu než je teplota okolního prostředí, bude se energie z okolního prostředí přesouvat do hmoty, což má za následek ohřívání hmoty a ochlazování okolního prostředí.
2. Jestli je teplota hmoty vyšší nežli teplota okolního prostředí, bude se energie hmoty přesouvat do okolního prostředí, což má za následek ochlazování hmoty a zvyšování teploty okolního prostředí.
3. Teplota hmoty se rovná teplotě okolního prostředí, což má za následek nulovou výměnu energií elektromagnetického záření. Můžeme říct, že hmota a okolí jsou energetické rovnováze.

Bezdotykovému měření teploty se v dnešní době dodává čím dál většího důrazu. Hlavním důvodem je zvyšování nároku na měření teploty v těžkém průmyslu, jak z důvodu přesnosti, tak především bezpečnosti. Hlavní výhody jsou:

- Zanedbatelný vliv měřicího přístroje na měřený objekt
- Měření teploty na rotujících nebo pohyblivých částech (teplota ložiska)
- Měření teploty z bezpečné vzdálenosti (v prostředí s nebezpečím výbuchu, hutním průmyslu)
- Měření s rychlou změnou teploty
- Měření teploty bodové i celého povrchu (termovce, termografie)

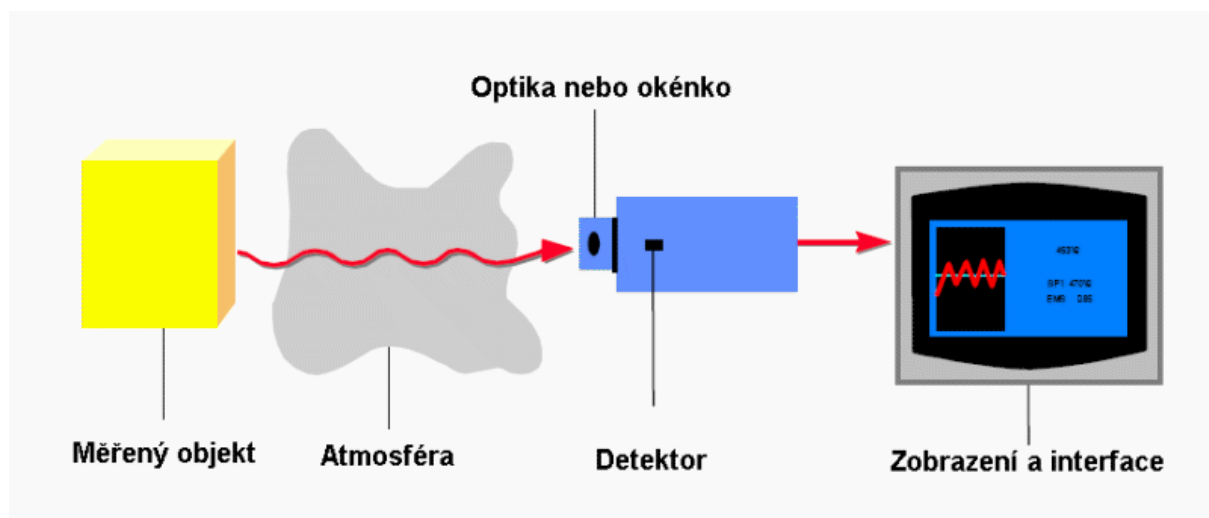
Je však nutnost poukázat i na nedostatky bezdotykového měření teploty, kterými jsou:

- Nejistoty měření, které jsou způsobeny neznalostí správného nastavení emisivity povrchu hmoty.
- Nejistoty měření, které způsobuje neznalost hodnoty prostupnosti prostředí mezi objektem a senzorem.
- Nejistoty měření, které jsou způsobeny špatnou korekcí parazitního odraženého záření z okolního prostředí na měřený objekt.

Těmito nedostatky se budeme dále zabývat v následujících kapitolách. Především je kladen důraz na vliv nastavení správné emisivity povrchu hmoty.

3.1 Infračervený měřicí systém

Systém je složen z měřeného objektu, senzoru (např. pyrometr, termokamera) a měřicí řetězec uzavírá vyhodnocovací modul (PC, zobrazovač integrovaný na senzoru). Senzor si zjednodušeně můžeme představit jako lidské oko. Oční čočka představuje optiku senzoru, skrz kterou elektromagnetické záření z povrchu měřeného objektu dopadá přes atmosféru na fotocitlivou vrstvu (oční sítnici), kde je signál vyhodnocen a předán ke konečnému zpracování (reprezentaci). Ilustrace měřicího systému je na Obr. 3.



Obr.3 Infračervený měřicí systém

3.1.1 Měřený objekt

Hmota (těleso), aby mohlo být měřeno infračerveným měřicím systémem, musí mít vlastní teplotu vyšší jak absolutní nula ($0\text{K} = -273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$). Za těchto podmínek je zajištěn termický pohyb částic hmoty a tím vytvořeno tepelné záření. Tuto teorii potvrzuje Stefanův-Boltzmannův zákon, který říká, že celková intenzita vyzařování je úměrná konstantě a čtvrté mocnině absolutní teploty. Výjádřeno:

$$M_e = \frac{\pi^4 K_1}{15 K_2^4} T^4 = \sigma T^4 \quad (1)$$

kde:

M_ecelková intenzita vyzařování [$W \cdot m^{-2}$]

σStefanova-Boltzmannova konstanta [$Watt \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$]

Ttermodynamická teplota [K]

Stefanův-Boltzmannův zákon lze odvodit integrací Planckova vyzařovacího zákona. Planckův vyzařovací zákon vyjadřuje spektrální intenzitu vyzařování dokonale černého tělesa jako funkci vlnové délky a absolutní teploty:

$$M_{e\lambda 0} = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{\pi}{e^{\frac{hc}{k\lambda T}} - 1} \quad (2)$$

kde:

$M_{e\lambda 0}$spektrální intenzita vyzařování [$W \cdot m^{-3}$]

λvlnová délka [m]

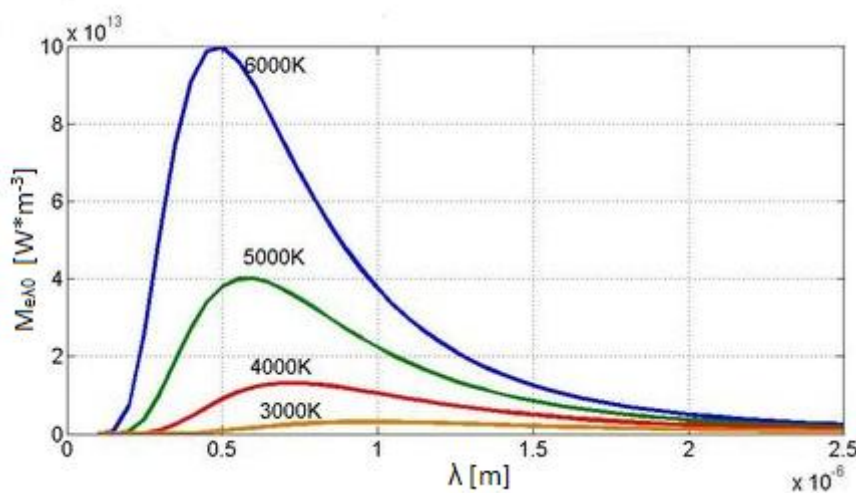
Ttermodynamická teplota absolutně černého tělesa [K]

hPlanckova konstanta [$J \cdot s$]

crychlost světla ve vakuu [$m \cdot s^{-1}$]

kBoltzmannova konstanta [$J \cdot K^{-1}$]

Na Obr. 4 je graficky vyjádřena intenzita zářivého toku dokonale černého tělesa na vlnové délce záření a to pro různé teploty.



Obr.4 Intenzita zářivého toku dokonale černého tělesa

Je patrné, že ideální nastavení infračerveného senzoru je na co nejširší vlnové pásmo, aby získal co největší energii, která odpovídá ploše pod křivkou. Ale toto nastavení není vždy výhodné.

Z obrázku je také patrné, že maxima při vyšších teplotách se posouvají ke kratším vlnovým délkám. Tento posuv matematicky reprezentuje Wienův zákon posunutí. Ten říká, že v záření absolutně černého tělesa je maximální energie vyzařována na vlnové délce, která

se s rostoucí termodynamickou teplotou snižuje. [4]

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T} \quad (3)$$

kde:

$\lambda_{\max}$vlnová délka, poloha maxima [m]

bkonstanta = $2,898 \cdot 10^{-3} [m \cdot K]$

Ttermodynamická teplota absolutně černého tělesa [K]

Závislost maximální intenzity vyzařování na teplotě:

$$M_{e\lambda 0 \max} = 1,286 \cdot 10^{-5} \cdot T^{-5} \quad (4)$$

2.1.2 Atmosféra (prostředí)

Prostředí můžeme klasifikovat podle vlivu na parametry tepelného záření:

- Průhledné – nedochází k rozptylu záření.
- Průsvitné – záření prostředím prochází, ale z části se rozptyluje.
- Neprůhledné – záření se silně pohlcuje (absorbuje) nebo se na povrchu odrazí.

- Homogenní – má v celé své oblasti stejné vlastnosti.
- Izotropní – má ve všech směrech stejné vlastnosti.
- Anizotropní – vlastnosti jsou závislé na směru.

- Opticky hustší – prostředí s větším indexem lomu, menší rychlosti záření.
- Opticky řidší – prostředí s menším indexem lomu, větší rychlost záření.

Tepelné záření, které prochází daným prostředím, může změnit své vlastnosti.

Prostředí může mít vliv na tepelné záření, může dojít ke změně jeho intenzity v důsledku interakce s jeho částicemi. Interakce se může projevit ve dvou jevech:

- Pohlcování (absorpce) – tepelné záření se mění na vnitřní energii prostředí.
- Rozptyl – mění se směr paprsku záření a ten dále může zesílit jiný paprsek jdoucí v jiném směru.

Velikost vlivu obou jevů je dána vlastnostmi daného prostředí a vlnovou délkou záření. Její možno je vyhodnotit pomocí konstant součinitele absorpce κ_s a součinitele rozptylu σ_s . Celkovou ztrátu intenzity vlivem absorpce a rozptylu může vyjádřit součinitelem útlumu:

$$\gamma_s = \kappa_s + \sigma_s \quad (5)$$

3.1.2 Senzor

V dnešní době všechny bezkontaktní přístroje, které zachycují a měří tepelné záření vyzařované daným povrchem můžeme nazývat „pyrometry“. V některých literaturách se můžeme setkat s názvem „radiační termometr“.

Základní parametry senzorů tepelného záření:

Integrální citlivost K je dána podílem elektrického napětí U na výstupu senzoru a zářivého toku Φ dopadajícího na citlivou plochu detektoru.

$$K = \frac{U}{\Phi} \quad (6)$$

kde:

Kintegrální citlivost [$V \cdot W^{-1}$]

Uelektrické napětí [V]

Φzářivý tok [W]

Spektrální citlivost K_λ udává závislost citlivosti na vlnové délce λ .

$$K_\lambda = \frac{U}{\Phi_\lambda} \quad (7)$$

kde:

K_λspektrální citlivost [$V \cdot W^{-1}$]

Uelektrické napětí [V]

Φ_λspektrální zářivý tok [W]

Relativní spektrální citlivost S_λ je dána vztahem:

$$S_\lambda = \frac{K_\lambda}{K_{\lambda_{\max}}} \quad (8)$$

V důsledku interakce fotonů můžeme provést základní rozdělení senzorů tepelného záření, na:

- tepelné

- kvantové

Tepelné senzory IR záření

U tepelných senzorů dochází při absorpci fotonů k oteplování citlivé části senzoru a pohlcená energie se nepřímo vyhodnocuje senzory teploty. Senzory jsou nezávislé na vlnové délce dopadajícího záření, tudíž jsou neselektivní. Jejich výhodou je široké pásmo vlnových délek, které senzor dokáže zachytit. Časová konstanta je řádově v milisekundách, což je nežádoucí. Senzory můžeme dále dělit, na:

- termoelektrické
- bolometrické
- pyrometrické

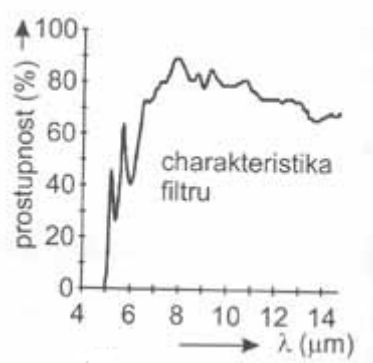
Termoelektrické senzory IR záření

Termoelektrické senzory (tzv. termočláňkové baterie) jsou sériově řazené termoelektrické články, které mohou být konstruovány ve dvou variantách. Buď jako tenké kovové pásky nebo jako pásky zhotovené technologií tenkých vrstev. Senzory pracují na stejném principu jako termočláňky. Tepelné záření emitované objektem dopadá přes filtrační okénko na absorpční plochu, které je natřené černým lakem. Záření dopadající na absorpční plochu se mění na teplo, které je vyhodnocováno termoelektrickými články.



Obr.5 Termoelektrický senzor včetně snímače srovnávací teploty [6]

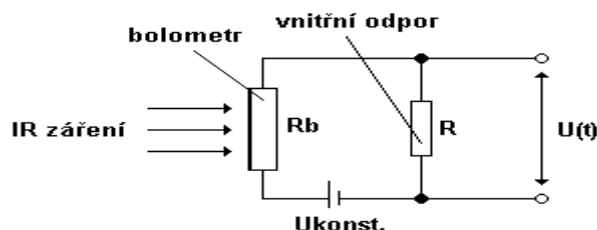
Na Obr. 6 je znázorněna charakteristika propustnosti vstupního okénka, které je vyrobeno z křemene. Z charakteristiky je patrné, že jsou senzory citlivé na vlnové délky okolo 5 μm .



Obr.6 Charakteristika okénka s filtrem

Bolometrické senzory IR záření

U bolometrických senzorů tepelné záření emitované objektem prochází přes filtrační okénko, které nepropustí záření neemitované objektem. Například u nízkých teplot filtr nepropustí viditelné záření. Záření, které filtr propustí dopadá na odporový senzor, jehož odpor je závislý na teplotě. Rezistor je pokryt černým lakem k zlepšení absorpce záření. Při absorpci záření se mění elektrický odpor rezistoru na teplotě. Aby změna odporu bolometru byla způsobena pouze absorbovaným zářením, musí být bolometr teplotně izolován od okolní teploty.



Obr.7 Bolometr jako prvek odporového děliče

Výstupní napětí bolometru $U(t)$ lze vypočítat podle Obr. 7, takto:

$$U(t) = R \frac{U_{konst.}}{R_B + R} \quad (9)$$

kde:

$U(t)$výstupní napětí bolometru [V]

Rodpor zatěžovacího rezistoru [Ω]

R_Bodpor bolometru [Ω]

$U_{konst.}$konstantní napětí zdroje [V]

Závislost odporu bolometru na teplotě je téměř lineární, kterou můžeme vyjádřit základním vztahem pro odporové snímače:

$$R_B = R_{B0} [1 + \alpha(t - t_0)] \quad (10)$$

Odporové čidlo bolometru může být buď:

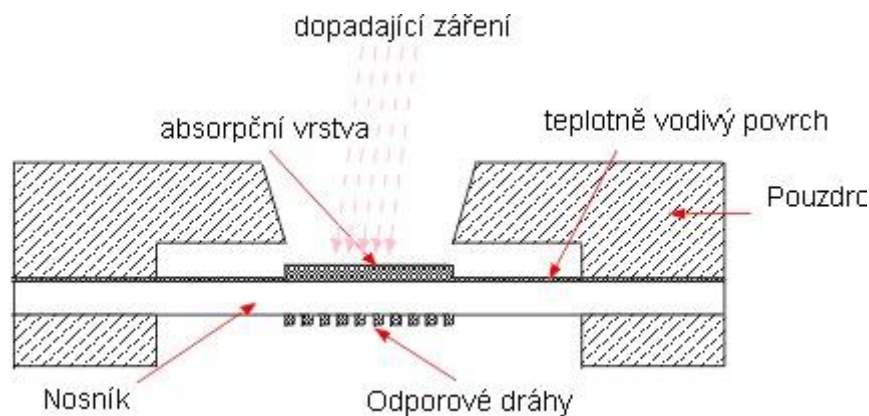
- kovové
- polovodičové (nejpoužívanější)

Samotné bolometry můžeme rozdělit podle provedení na:

- jednoduché bolometry
- mikrobolometry

Jednoduché bolometry

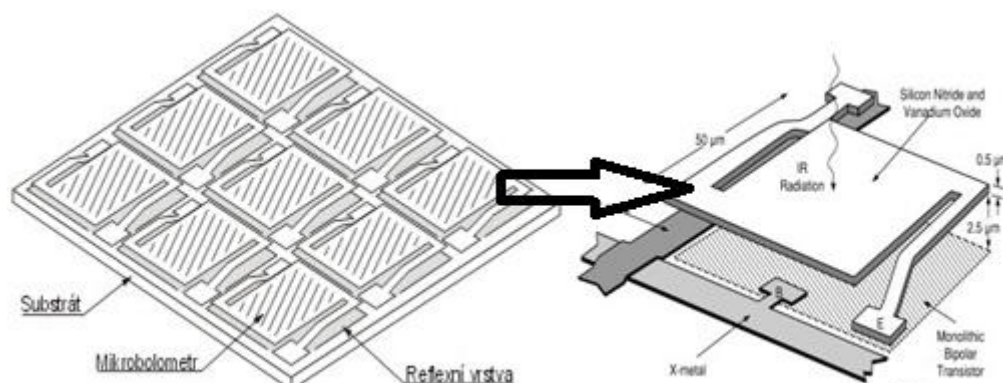
Tepelné záření dopadající na povrch absorpční vrstvy, která je tvořena zlatou fólií, ohřívá absorpční vrstvu i nosník. Na druhé straně nosníku je meandrovitě navinuta odporová dráha, která je lineárně závislá na teplotě.



Obr.8 Jednoduchý bolometr.[17]

Mikrobolometry

Mikrobolometry jsou maticově uspořádané jednoduché bolometry (mikrobolometrické pole). Toto pole může obsahovat až tisíce jednoduchých bolometrů. Mikrobolometr jako celek je vytvořen z monolitického křemíkového obvodu znázorněného na Obr. 9.

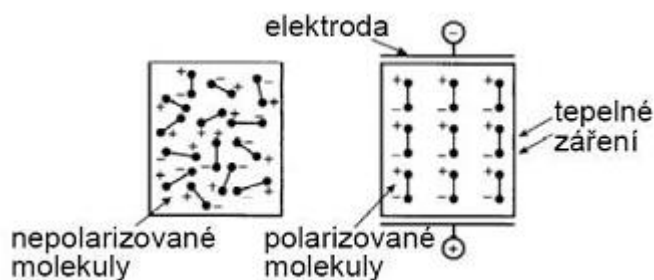


Obr.9 Struktura mikrobolometru.[17]

Pyroelektrické senzory IR záření

Senzor je tvořen krystalem, který je umístěn mezi dvěma elektrodami, přičemž jedna elektroda musí být schopna propouštět IR záření. Při detekci tepelného záření krystal generuje povrchový náboj. Tudiž při změně velikosti dopadajícího tepelného záření se mění velikost povrchového náboje, který indukuje na elektrodách napětí.

Princip pyroelektrických senzorů je založen na pyroelektrickém jevu. Podstatu jevu můžeme formulovat jako změnu spontánní polarizace P_s při změně teploty T , Obr. 10. Pyroelektrický jev se vyskytuje u pyroelektrik s trvalou polarizací nebo u některých ferroelektrik, u nichž se orientace domén vytvoří silným elektrickým polem. [6]



Obr.10 Polarizace pyroelektrického krystalu [5]

Změna teploty v důsledku velikosti absorbovaného zářivého toku $\Phi(t)$ se mění v časové oblasti.

$$\frac{d\Phi}{dt} = \frac{d\tau}{dt} \quad (11)$$

kde:

τ čas [s]

Φ zářivý tok [W]

Změna teploty změní velikost spontánní polarizace pyroelektrika P_s .

$$\frac{dP_s}{dt} = \frac{d\tau}{dt} p \quad (12)$$

kde:

P_sspontánní polarizace [-]

τčas[s]

ppyroelektrický koeficient [$C \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]

Změna spontánní polarizace vyvolá indukci náboje na pyroelektriku. Derivací náboje v čase bude získán elektrický proud, který generuje pyroelektrikum.

Časová změna teploty je lineárně závislá na absorbovaném záření a můžeme ji vyjádřit vztahem:

$$\frac{d\tau}{dt} = \frac{\alpha * \Phi(t)}{c * \rho * d * S} \quad (13)$$

kde:

$\alpha * \Phi$absorbované záření [-]

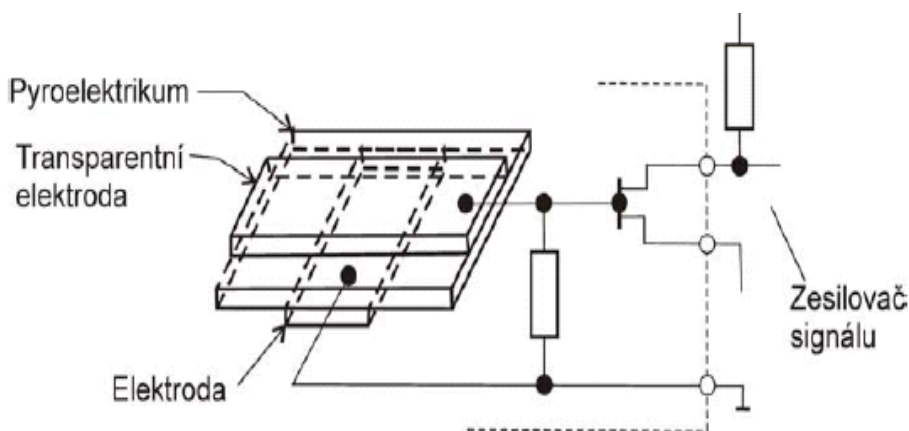
cměrná tepelná kapacita pyroelektrika [-]

ρhustota pyroelektrika [-]

dtloušťka pyroelektrika [-]

Splocha krystalu pyroelektrika [-]

U pyrometrických senzorů se vyhodnocuje časově proměnné elektrické napětí $U(t)$, které je měřitelné na elektrodách senzoru. Napětí je úměrné časové změně dopadajícího zářivého toku, který je úměrný teplotě. Aby docházelo k indukci náboje na elektrodách senzoru, je za potřeby senzor budit cyklickým zakrýváním a odryváním. Provedení pyroelektrického senzoru je na Obr. 11.



Obr.11 Pyroelektrický senzor

Kvantové senzory IR záření

V předchozí kapitole je popsán princip tepelných senzorů, který je založen na přeměně elektromagnetického záření na teplo. Kvantové senzory pracují na principu fotoelektrického jevu, při němž vzájemným působením elektromagnetického záření a hmoty dochází k pohlcování fotonů a uvolňování elektronů. Toto můžeme zjednodušené zapsat jako přeměnu elektromagnetického záření na elektrický signál. Fotoelektrický jev byl vysvětlen roku 1905 A. Einsteinem s využitím Planckovy kvantové teorie. K objasnění problematiky Einstein zavedl nový pojem “kvanta“ záření, což znamená, že elektromagnetické záření je pohlcováno i vyzařováno po shlucích o energii $h\nu$. Za tento přelomový objev získal Einstein roku 1921 Nobelovu cenu.

Kvanta elektromagnetického záření o dané energii $h\nu$, která dopadají na povrch detektoru jsou pohlcována (absorbována). Absorbovaná kvanta elektromagnetického záření předávají svou energii elektronům materiálu detektoru. Elektron využije získanou energii k vytržení z krystalické mřížky atomu a stane se volně pohyblivým nábojem. Minimální hodnota energie, které je potřebná k uvolnění elektronu z krystalické mřížky je vyjádřena výstupní prací A_v .

$$A_v = h \cdot \nu_0 \quad (14)$$

kde:

hPlanckova konstanta $6,626 \cdot 10^{-34} \text{ [J*s]}$

ν_0prahová frekvence dopadajícího elektromagnetického záření [-]

Pokud bude frekvence dopadajícího záření menší, než je hodnota prahové frekvence ν_0 , nedojde k uvolnění elektronu z krystalické mřížky. Pokud tomu tak není, elektron se uvolní z krystalické mřížky a má dvě možnosti:

- Elektron využil veškerou energii získanou od dopadajícího záření k uvolnění z krystalické mřížky a už nemá žádnou energii k opuštění materiálu detektoru – vnitřní fotoelektrický jev.

Energie pohlceného kvanta záření je menší než výstupní práce materiálu fotodetektoru.

$$h \cdot \nu < A_v \quad (15)$$

- Elektron nevyužil veškerou energii získanou od dopadajícího záření k uvolnění z krystalické mřížky a má dostatek energie k opuštění materiálu detektoru – vnější fotoelektrický jev. Aby elektron mohl opustit materiál detektoru, musí zbylou pohlcenou energii přeměnit na energii kinetickou.

Energie pohlceného kvanta záření je větší než výstupní práce materiálu fotodetektoru.

$$h \cdot \nu > A_v \quad (16)$$

$$E_K = h \cdot \nu - A_v \quad (17)$$

Výhodou kvantových detektorů je vysoká citlivost a malá časová konstanta. Nejběžnějším materiálem k výrobě kvantových detektorů jsou polovodiče (např. Si, Ge, PbS, GaAs, InGaAs a další). Podle typu použitého polovodiče se fotodetektory dělí na:

- intristické – vyrábí se z vlastního (čistého) polovodiče, řadíme k nim fotorezistor
- extristické – vyrábí se z nevlastních polovodičů (polovodičů typu N a P), patří k nim fotodiody, fototranzistory

Pro konkrétnější popis byl vybrán pouze jeden typ, a to intristický – fotorezistor.

Intristické - fotorezistor

Fotorezistor je elektrotechnická součást vytvořená z čistého křemíku. Ke své funkci využívá vnitřní fotoelektrický jev.

Jestliže na fototranzistor nedopadají žádné fotony, elektrony jsou vázány na valenční vrstvu a ve vodivém pásu nejsou žádné volné nosiče. Po připojení ke zdroji napětí fotorezistorem nepoteče žádný proud, má maximální elektrický odpor. Pokud na fotorezistor dopadají fotony, začne se uplatňovat vnitřní fotoelektrický jev, který byl popsán výše. Jestliže osvětlený fotorezistor připojíme ke zdroji napětí, pak elektrické pole tohoto zdroje způsobí pohyb elektronů a děr. Obvodem poteče fotoelektrický proud I_F , pro který platí vztah:

$$I_F = \Phi \cdot U \cdot K_f \quad (18)$$

kde:

Φabsorbovaný zářivý tok [-]

Unapětí zdroje [V]

K_fměrná citlivost fotorezistoru [-]

Ze vztahu je patrné, že fotoelektrický proud je přímo úměrný absorbovanému zářivému toku. Čím větší vlastní vodivost, tím menší odpor. Fotorezistory se vyrábí tak, že se na keramickou podložku napaří vrstvička fotocitlivého materiálu, kterým je např. PbS, CdS a jiné. Výhodou fotorezistoru je vysoká citlivost, snadné použití a nízká cena. Fotorezistory citlivé na infračervené záření jsou náročnější na výrobu, protože energie infračerveného záření je menší než energie viditelného světla. Nevýhodou je pomalá odezva na změnu osvětlení a teplotní závislost odporu.

4 ABSOLUTNĚ ČERNÉ TĚLESO A EMISIVITA

Při měření intenzity elektromagnetického záření emitovaného povrchem měřeného objektu je nejvíce ovlivňujícím parametrem součinitel emisivity, dále pak teplotní závislost a homogenita. Správné nastavení emisivity má pro získání přesného výsledku vysokou prioritu.

Parametr emisivity byl definován Kirchhoffem jako poměr intenzity elektromagnetického záření reálného (měřeného) tělesa k intenzitě elektromagnetického záření absolutně černého tělesa při stejné teplotě, směrových a spektrálních podmínkách. Matematicky vyjádřeno:

$$\varepsilon = \frac{H_R}{H_0} \quad (19)$$

kde:

εemisivita [-]

H_Rintenzita záření reálného tělesa [$W \cdot m^{-2}$]

H_0intenzita záření absolutně černého tělesa [$W \cdot m^{-2}$]

Emisivita je bezrozměrný parametr, který může nabývat hodnot v intervalu $<0;1>$. Tento interval je rozdělen na dva další intervaly hodnot. První interval hodnot přísluší reálným tělesům, která nabývají hodnot $0 < \varepsilon_r < 1$.

Elektromagnetické záření, které dopadá na reálný objekt, může být objektem absorbováno, odraženo nebo může objektem procházet (pokud není objekt neprůhledný). Pokud má měřený objekt konstantní teplotu, pak musí být absorbovaný výkon stejný jako výkon emitovaný. V tomto případě můžeme konstatovat, že absorpce, odraz a propuštění záření je v rovnováze. Tento jev by nastal pouze v ideálním tělese, které v reálném životě není zatím dostupné.

Ideální těleso bylo definováno v roce 1860 Kirchhoffem jako absolutně černé těleso, které má součinitel emisivity $\varepsilon_0 = 1$.

Ovlivňující vlastnosti parametru emisivity:

- materiál měřeného tělesa;
- povrch měřeného tělesa;
- vlnové délka vyzáření;
- směr vyzařování;
- termodynamická teplota měřeného tělesa.

Při neznalosti parametru emisivity dochází k nejčastějším chybám v bezdotykovém měření teploty, která může dosáhnout až desítky procent. Parametr můžeme praktickým řešením získat několika způsoby:

1. Vyhledání emisivity v tabulkách vlastností materiálů. [10]

V některých tabulkách můžeme dokonce nalézt i pro jaké pásmo vlnových délek je takto určená emisivita konstantní a to nám může pomoci při správném výběru pyrometru. Bohužel je nutné brát takto určenou emisivitu hodně s rezervou, protože skutečnou emisivitu může ovlivnit celá řada dalších faktorů (např. povrch materiálu). Hodnoty emisivit stanovené na základě tabulek by měli být brány jako orientační, zvlášť pak u kovů.

2. Ohřátí měřeného vzorku na známou teplotu. [10]

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

3. Použitím dodatečného materiálu nebo speciálního nátěru části měřeného objektu. [10]

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

4. Kombinací dalších metod měření povrchové teploty. [10]

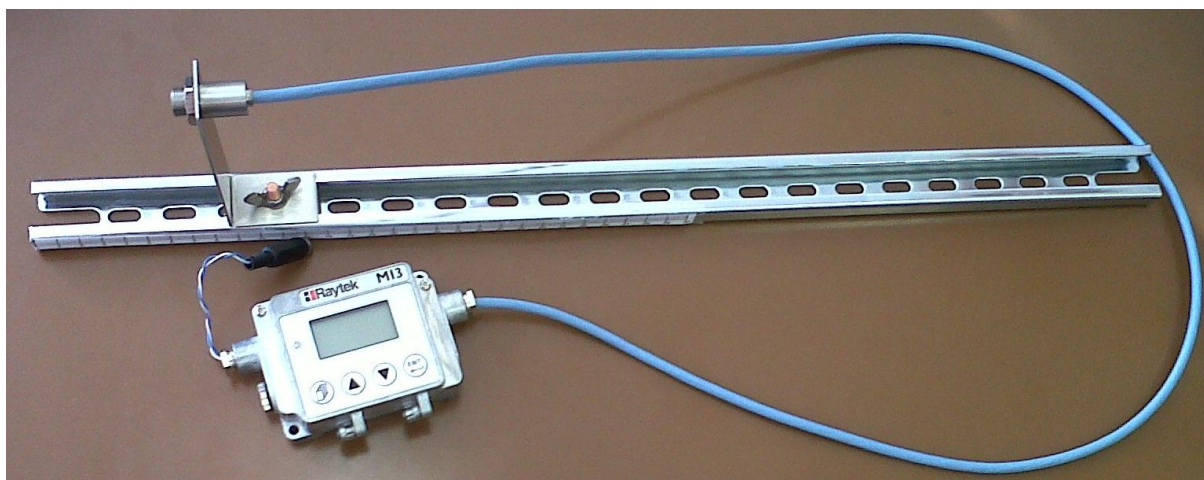
V současné době jsou na trh dodávány pyrometry, které jsou navíc vybaveny dotykovým senzorem. Takový pyrometr dokáže podle indikované povrchové teploty dotykového senzoru automaticky přednastavit hodnotu emisivity snímaného objektu.

5 NÁVRH A REALIZACE EXPERIMENTÁLNÍHO PRACOVISTĚ

Pro analýzu vlivu správného nastavení emisivity na výsledek měření teploty pomocí moderního bezdotykového pyrometru Raytek MI3 bylo navrženo experimentální pracoviště, které se skládá z:

- moderního bezdotykového pyrometru MI3 od fy. Raytek;
- měřicího programu, který byl naprogramován ve vývojovém prostředí LabView 8.5 od fy. National Instruments;
- malého kalibrátoru 9135 pro pyrometry od fy. Fluke;
- dotykového termistorového teploměru;
- přenosné kolejnice s držákem pro uchycení měřicí hlavy.

Experimentální pracoviště bylo navrženo a zkonstruováno za účelem zvýšení přesnosti měření a vyvarování se systematických chyb měření.



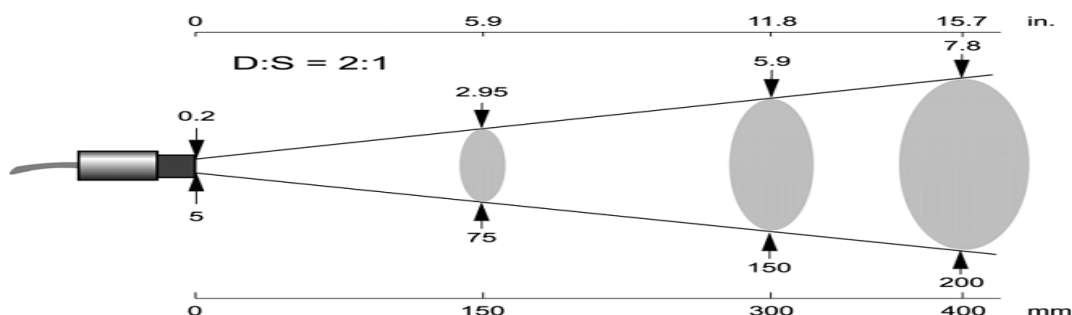
Obr.12 Měřicí systém (držák, senzor, komunikační box)

5.1 Moderní bezdotykový pyrometr MI3

MI3 je nová generace zavedených platforem MI. Tato generace je schopna pokrýt širokou škálu dnešních aplikací s výhodou zavedení sítě komunikací pro externí přístup k uživatelskému rozhraní a lepší specifikaci měření teploty.

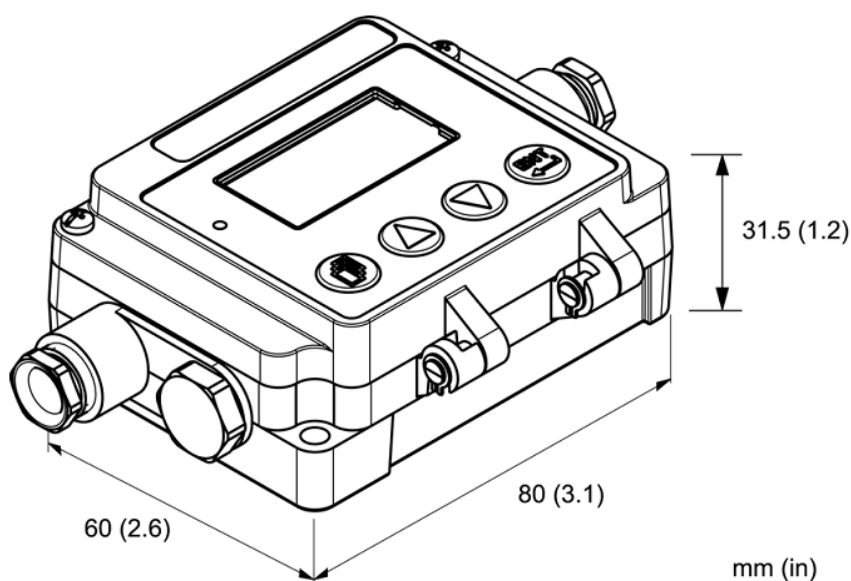
MI3 využívá robustních snímacích hlav, které odolávají vyšším teplotám okolního prostředí a to do 120 °C. Další výhodou je možnost vytvoření architektury z více snímacích hlav za použití jediného komunikačního boxu. Do tohoto pole je možno připojit hlavy s rozdílným optickým rozlišením, které mohou být v poměru D:S (2:1, 10:1, 22:1), kde D je vzdálenost měřeného cíle od hrany optiky snímací hlavy a S je průměr snímané plochy v této

vzdálenosti. Pro naši aplikaci byla použita jedna snímací hlava s optickým rozlišením 2:1, což znamená, že vzdálenost snímací hlavy je vždy 2x vyšší nežli průměr snímané plochy. Tato skutečnost je zachycena na Obr. 13.



Obr.13 Rozlišení snímací hlavy typu LTS s poměrem 2:1

Snímací hlavice je připojena pomocí cca 1 m dlouhého třížilového metalického kabelu ke komunikačnímu boxu. Komunikační box má k dispozici vlastní uživatelské rozhraní tvořené displejem a čtyřmi tlačítky pro manipulaci, viz Obr. 14. Uživatelské rozhraní umožňuje širokou škálu nastavení parametrů měření. Parametry, které byly použity pro naše experimentální pracoviště, jsou popsány v kapitole 5.2.



Obr.14 Komunikační box MI3

V dnešní době se už nevyužívá lokálního ovládání zařízení, ale preferuje se vzdálený přístup přes určité rozhraní. Na tomto experimentálním pracovišti bylo využito rozhraní miniUSB a jako řídicí člen stolní počítač.

Komunikace mezi stolním počítačem a zařízením je řešena sériovou linkou. Zařízení je sice připojeno přes USB, ale tento problém řeší driver od výrobce (Raytek). Driver virtuálně zpřístupní USB jako COM2.

Box dále poskytuje 3 analogové výstupy:

- 0-5 V - pro hlavici okolní teploty;
- TC - termočlánekový výstup typu J, K, R nebo S;
- 0 až 20 mA (aktivní), 4 až 20 mA (aktivní), 0 až 5 V, 0 až 10 V.

Výstupy nejsou elektricky izolované od napájecího napětí, které je v rozsahu od 8 až 32 VDC, max. 4 W. Při propojení zařízení přes USB není potřeba externí napájení, napájení poskytne USB rozhraní.

MI3 poskytuje jeden izolovaný výstup ALARM charakteru relé.

Externí vstupy jsou tři FTC1-3, které podléhají různým kombinacím:

- FTC1 - analogové nastavení emisivity (0 až 5 VDC);
- FTC2 - kompenzace okolní teploty prostředí (0 až 5 VDC);
- FTC3 - trigger/hold funkce, 0 až V_{SS}
- FTC1 - FTC3 - nastavení emisivity 3-bitovým kódem.

5.2 Měřicí program MI3

Měřicí program byl naprogramován za účelem snadného nastavování, sběru a následného vyhodnocování hodnot za pomoci stolního počítače. Na první pohled je program situován do tří základních částí.

- nastavení parametrů komunikace;
- vlastní měřicí program;
- program pro vyhodnocování hodnot externího teploměru.

Při spuštění měřicího programu se zobrazí dialogové okno s možnostmi parametrů pro nastavení komunikace mezi PC a měřicím zařízením. Jak už bylo zmíněno výše, zařízení je připojeno pomocí USB rozhraní, ale díky driveru od fy. Raytek je USB virtuálně přesměrován na rozhraní COM, takto:

1. Připojit zařízení k počítači pomocí USB rozhraní. Po detekci zařízení systémem (Windows) přiřadit driver od fy. Raytek. Po dokončení instalace zařízení je nutno změnit číslo portu COM.
2. Zapnout „správce zařízení“, rozbalit záložku „Porty(COM a LPT)“ a pravým

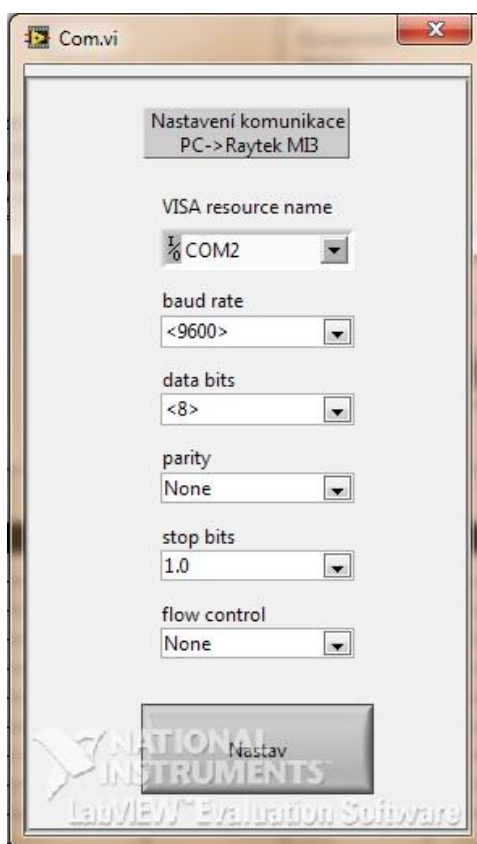
tlačítkem kliknout na nainstalované zařízení MI3 a z plovoucího menu vybrat položku „Vlastnosti“. Po zobrazení dialogového okna „Vlastnosti“ vybrat záložku „Nastavení portu“ a v této záložce vybrat „Upřesnit“.

3. V dialogovém oknu „Upřesnit“ je nutnost změnit číslo portu.

Nastavení parametrů komunikace je doporučeno výrobcem, takto:

- bity za sekundu: 9 600
- datové bity: 8
- stop bity: 1
- parita: žádná
- řízení toku: žádné

Po potvrzení nastavení komunikace tlačítkem „Nastavit“ se automaticky program přepne do měřicího prostředí pro vzdálenou komunikaci se zařízením MI3 Obr. 15. Měřicí prostředí umožňuje nastavit několik základních parametrů pro bezdotykové měření teploty a sběr dat zařízení.



Obr.15 Dialogové okno nastavení komunikace

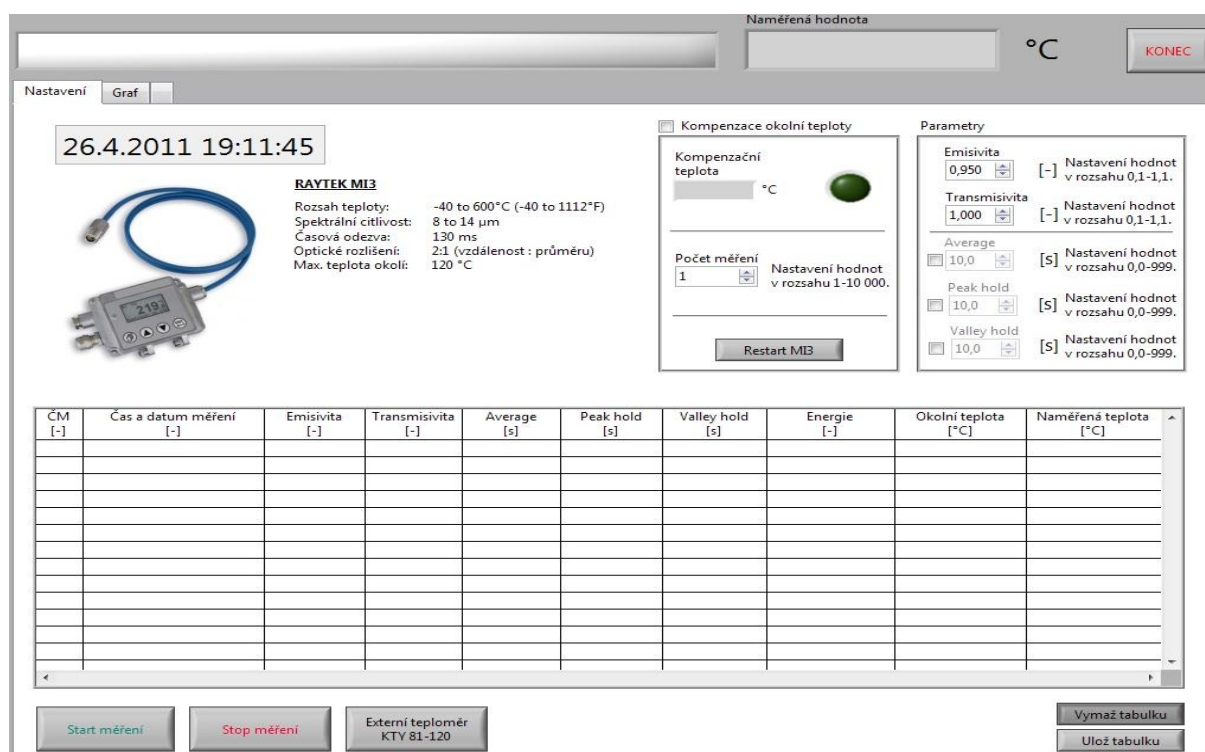
Komunikaci se zařízením je možno provádět prostřednictvím dvou variant přenosových módů. První přenosový mód je tzv. „Poll mode“, který umožňuje nastavit nebo získat hodnotu. Tato varianta přenosového módu je využita v tomto měřicím programu MI3. Nastavení tohoto módu je pomocí příkazu V=P\r. Pro potvrzení každého příkazu je nutno za příkaz vložit terminátor \r nebo <CR>. Druhou variantou přenosového módu je tzv. „Burst mode“. Mód využívá předdefinovaný řetězec, který je přenášén pouze v jednom směru, a to ze zařízení k uživatelskému rozhraní tak dlouho a rychle dokud je mód aktivní. Nastavení tohoto módu je pomocí příkazu V=B\r.

Parametry měření:

- emisivita
- transmisivita
- kompenzace teploty okolního prostředí

Parametry následného zpracování:

- averaging
- peak hold
- valley hold



Obr.16 Měřicí prostředí MI3 pro vzdálenou komunikaci.

Emisivita:

Emisivita je základní parametr bezdotykového měření teploty. Parametr byl detailně rozebrán v kapitole 3. Hodnota parametru se nastavuje příkazem $E=x.xx\backslash r$, kde je za x možno dosadit hodnoty v intervalu $<0,1 ; 1,1>$ s iterací 0,05. Jak je již známo, tak hodnota emisivity nabývá maximální hodnot 1 a to pro absolutně černé těleso. V našem případě zařízení MI3 poskytuje možné přetečení této hodnoty na 1,1.

Po inicializaci programu se hodnota parametru nastaví na defaultní hodnotu 0,95. Hodnotu je možno měnit před každým měřením. V probíhajícím měření je změna hodnoty blokována.

Transmisivita:

Další parametr, který se vykytuje u bezdotykového měření teploty. Parametr je přeložen jako propustnost. Propustnost je schopnost materiálu propouštět záření určitých vlnových délek. Tyto vlnové délky se u různých materiálů liší.

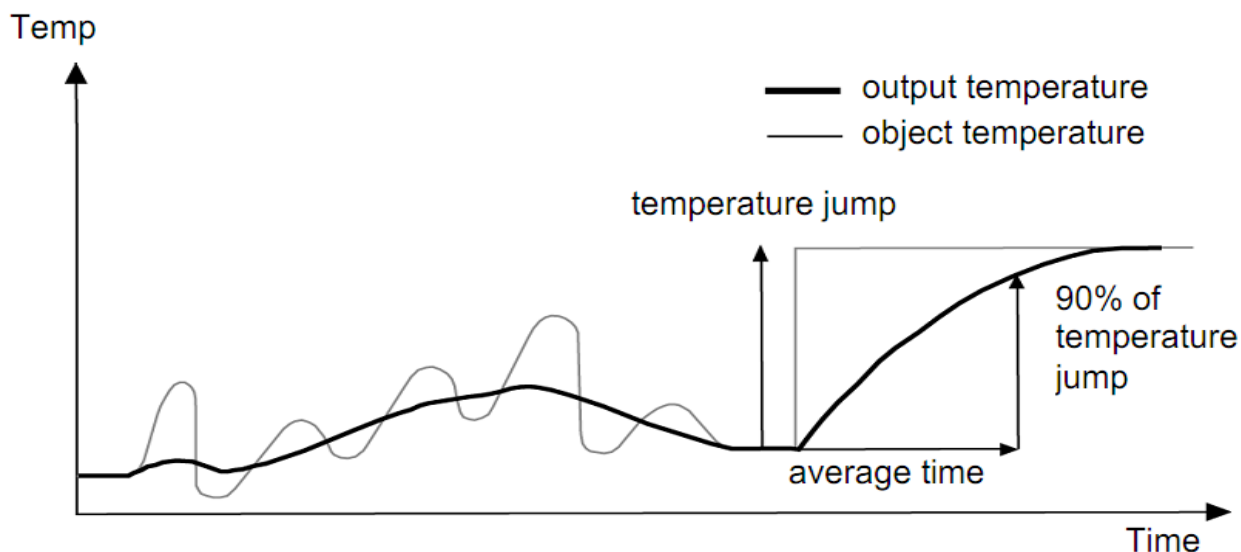
Kompenzace teploty okolního prostředí:

Tato vlastnost je užitečná, pokud emisivita měřeného objektu je menší než 1 a teplota okolního prostředí je vyšší nežli teplota měřeného objektu. Po aktivaci funkce je možno ručně nastavit hodnotu teploty okolního prostředí a to pomocí sekvence příkazů $A=xxx.x\backslash r$ a příkazu $AC=1\backslash r$. Hodnotu teploty okolního prostředí je možno získat pomocí externího termistorového teploměru. Tento způsob bude konkrétněji popsán níže.

Funkce následného vyhodnocení, které jsou popsány níže, jsou založeny na skutečnostech získaných z firemních podkladů (datasheet, user guide) od Raytek MI3. [7]

Averaging:

Parametr je možno přeložit do češtiny jako průměrování a slouží k vyhlazování výstupního signálu. Signál je vyhlazován v závislosti na nastavení časové základny. Výstupní signál je sledován detektorem signálu s významným časovým zpožděním, ale šum a krátké špičky jsou tlumeny. Nastavením vyšší hodnoty časové základny je získáno přesnějšího tlumení. Hodnota parametru časové základny je množství času potřebného pro dosažení 90% velikosti teplotního skoku. Tato situace je znázorněna na Obr. 17.

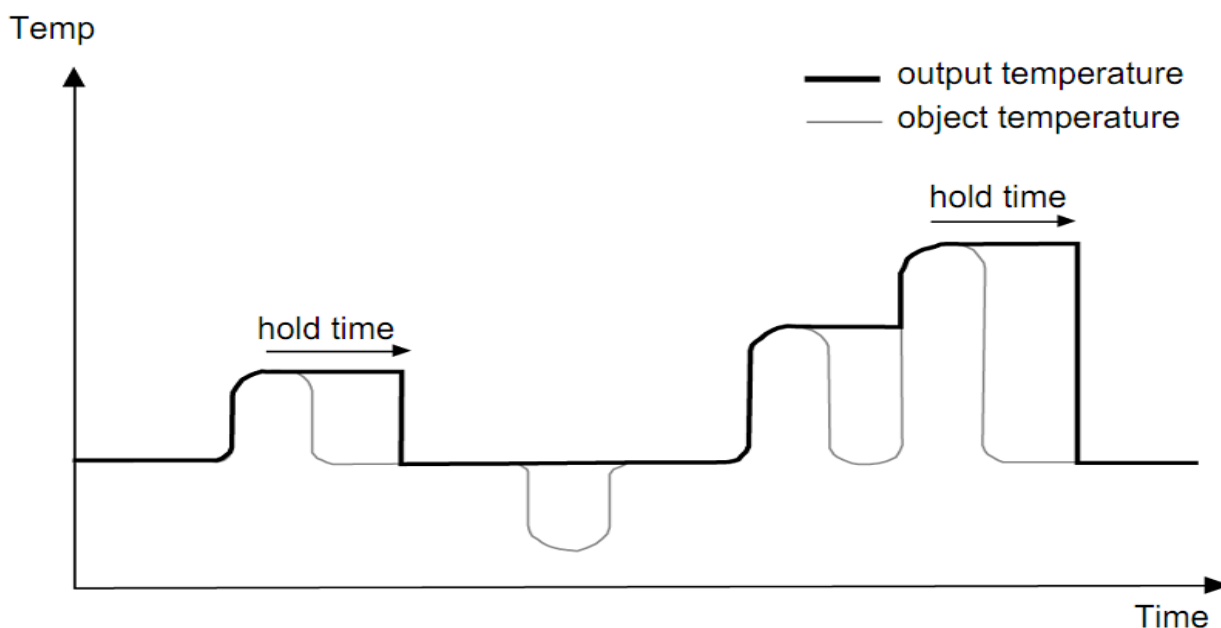


Obr.17 Averaging – průměrování.[7]

Průměrování s sebou nese i nežádoucí vlastnosti. Při průměrování dochází ke zpoždění výstupního signálu. Pokud se vstupní hodnota teploty mění skokově, tak výstupní signál dosáhne pouze 90% skutečné hodnoty v závislosti na nastavené hodnotě zpoždění.

Peak hold:

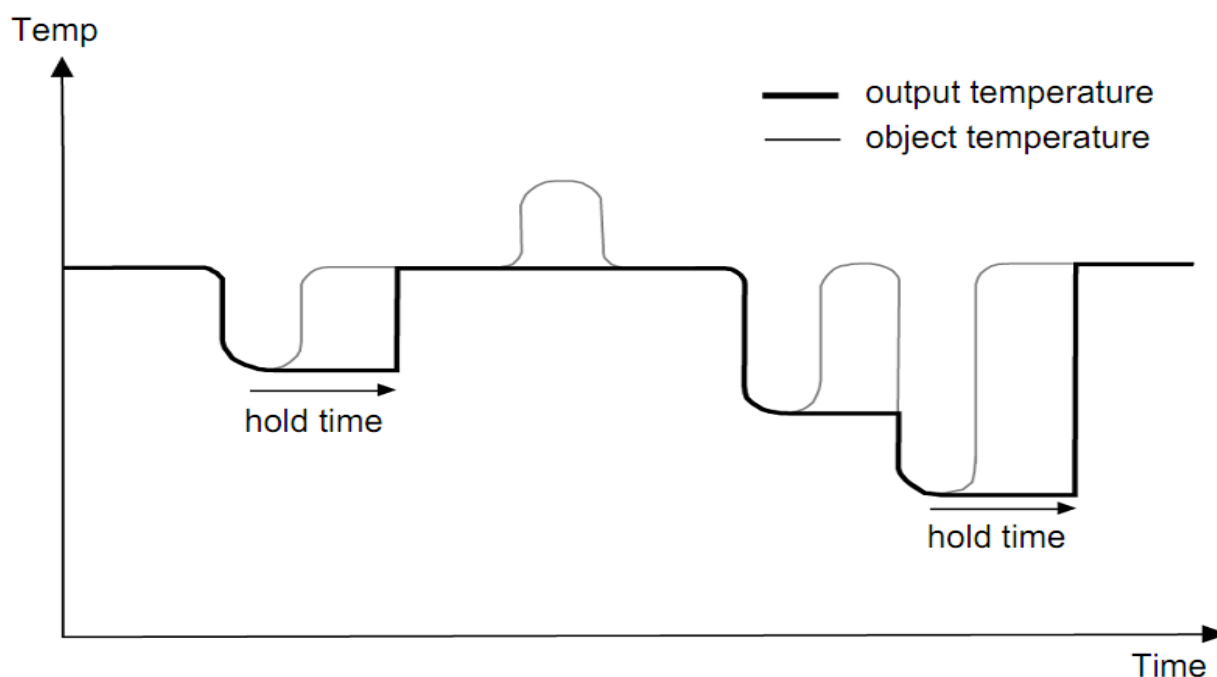
Výstupní signál sleduje teplotu objektu až do dosažení maxima. Po dosažení maximální hodnoty výstupního signálu bude tato hodnota zadržována po dobu, která je nastavená anebo do výskytu jiného maxima. Po uplynutí nastavené hodnoty přídržného času bude funkce restartována a začne prvotní proces sledování.



Obr.18 Peak hold – zádrž maximální hodnoty.[7]

Valley hold:

Inverzní funkce k funkci zadrž maximální hodnoty (peak hold). Výsledný signál sleduje minimální hodnotu teploty měřeného objektu. Po nalezení minimální hodnoty teploty objektu je hodnota zadržována po nastavenou dobu. Uplyne-li zadržný čas, funkce je restartována a proces se vrací na prvotní fázi sledování minimální hodnoty teploty měřeného objektu.



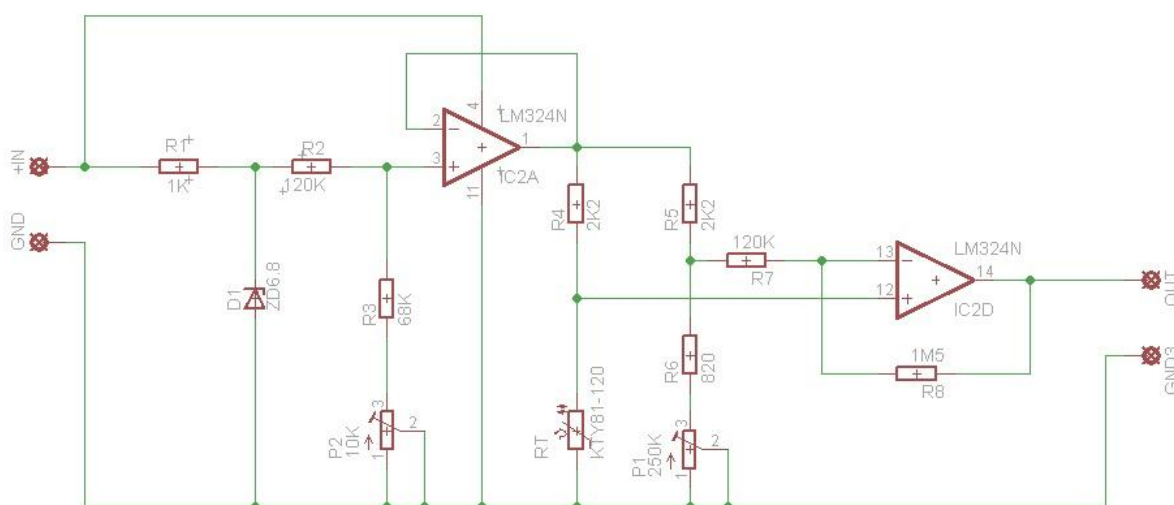
Obr.19 Valley hold – zadrž nominální hodnoty.[7]

Komunikační box MI3 poskytuje pokročilejší varianty předešlých funkcí (averagig, peak hol, valley hold) a jejich kombinaci. Tyto funkce jsou dostupné pouze z uživatelského rozhraní na boxu. Obslužný program tyto pokročilé varianty neřeší.

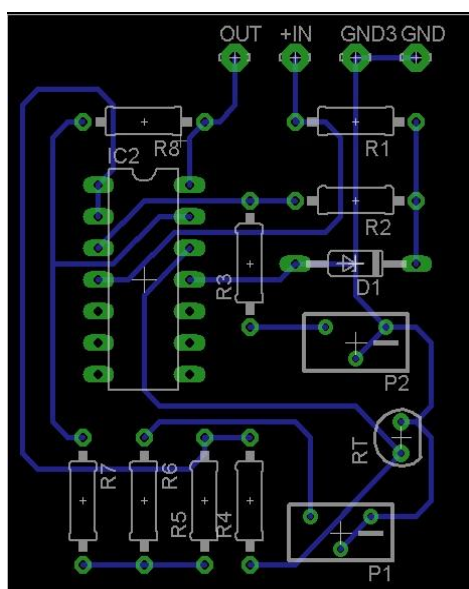
5.3 Externí teploměr KTY 81-120

Měřicí program obsahuje podprogram pro měření externí teploty nebo teplotu měřeného vzorku.

Obvodové schéma teploměru bylo navrženo v programu MultiSim a deska plošného spoje byla navržena v programu Eagle. Teploměr využívá odporový teplotní senzor KTY 8-120, který dovoluje měření v rozsahu od $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $150\text{ }^{\circ}\text{C}$. Převodník odporu na výstupní napětí 0 až 5V je na Obr. 20.



Obr.20 Schéma převodníku odpor-napětí.



Obr.21 Deska plošného spoje převodníku odpor-napětí.

Operační zesilovač OZ1 pracuje jako zdroj konstantního napětí 2,5 V, který napájí odporový můstek, v jehož jedné větvi je zařazen odporový senzor. Napětí, vzniklé rozvážením můstku vlivem teploty, je zesilováno operačním zesilovačem OZ2. Výstupní napětí se nastaví trimrem P1 a citlivost převodníku trimrem P2.

Výstupní napětí 0 až 5 V je připojeno na vstup FTC2 MI3, který byl navržen pro kompenzaci okolní teploty. Hodnoty z tohoto vstupu jsou získávány pomocí příkazu ?TV2I_r.

5.4 IR KALIBRÁTOR FLUKE 9135

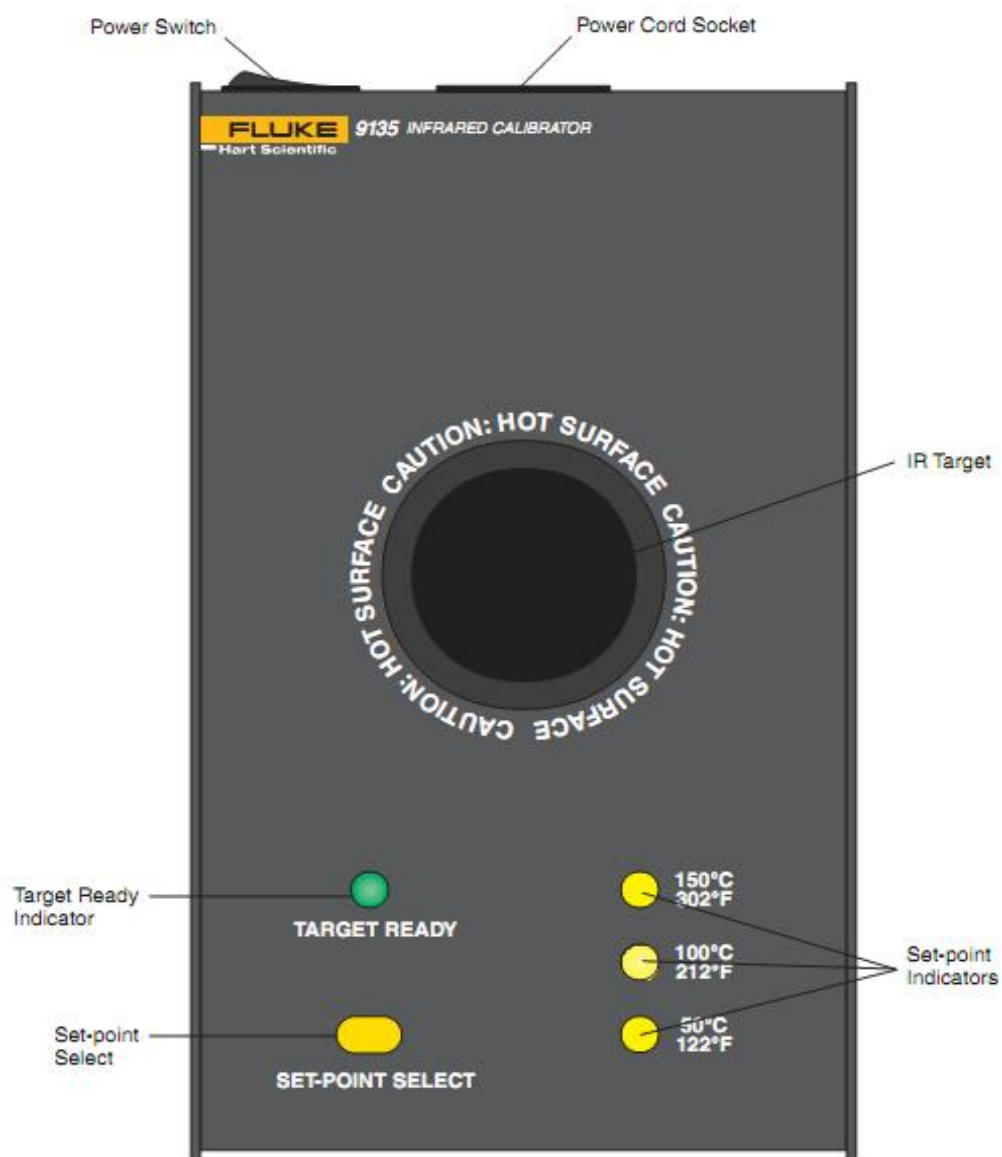
Data, která jsou obsažena v této kapitole, byla čerpána z firemních materiálů a manuálů FLUKE.[6]

FLUKE 9135 je malý přenosný vědecký IR kalibrátor navržený pro rychlou místní kontrolu a kalibraci IR teploměrů. Kalibrační terčik je vyroben z hliníkového materiálu, který je potažen speciální barvou o emisivitě 0,95. Pro nastavení konstantní teploty kalibrátoru je použit proporcionální regulátor. Hodnota teploty kalibračního terčíku může být pohodlně nastavena jedním tlačítkem (set-point select) na 50 °C, 100°C a 150 °C. Žlutá led dioda (set-point indicators) signalizuje vybranou hodnotu teploty. Po dosažení žádané hodnoty teploty kalibrátoru se rozsvítí zelená signalizační dioda (target ready). Kalibrátor FLUKE 9135 byl navržen pro jednoduchou manipulativnost a oproti jiným kalibračním přístrojům vyniká pořizovací cenou.

Tento nástroj by neměl být provozován v nadměrně prašném nebo špinavém prostředí.

Přístroj pracuje bezpečně za následujících podmínek:

- Okolní teplota: 5-40 °C.
- Okolní relativní vlhkost: max. 80% při teplotě < 30 °C, lineárně klesající na 50% při 40 °C.
- Tlak: 75 kPa-106 kPa.
- Síťové napětí v rozmezí $\pm 10\%$ od standardu (230 V).
- Vibrace při měření by měly být minimalizovány.
- Nadmořská výška < 2000 m.



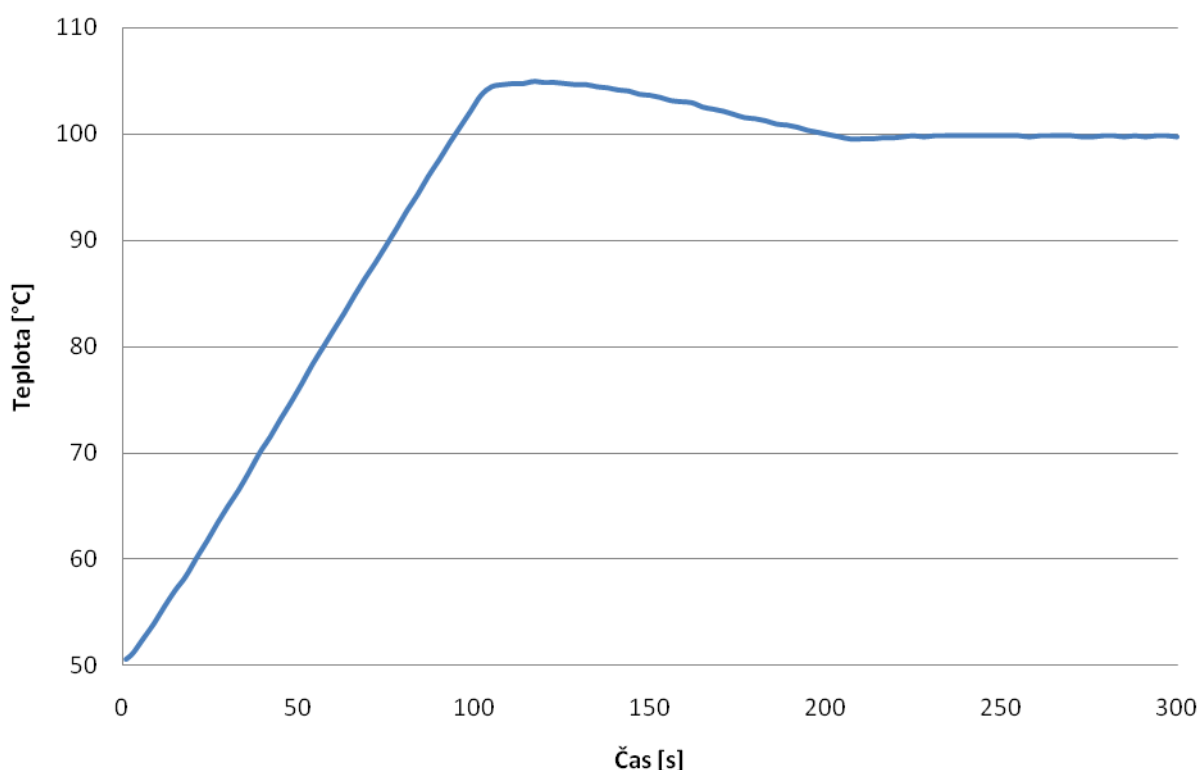
Obr.22 IR kalibrátor FLUKE 9135

6 EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ VLIVU EMISIVITY

Navržené experimentální pracoviště bylo využito k ověření vlivu emisivity na bezdotykové měření teploty. První měření bylo provedeno na laboratorním kalibrátoru FLUKE. Další soubor měření se zaměřila na měření reálných objektů kolem nás. Naměřená data jsou zpracována v tabulkách a výsledky vyneseny v grafech.

6.1 Měření teploty kalibrátoru FLUKE 9135

Na kalibrátoru byla proměřena závislost nárůstu teploty na čase a následná stálost na žádané hodnotě po přepnutí z 50 °C na 100 °C. Závislost je znázorněna na Obr. 23.



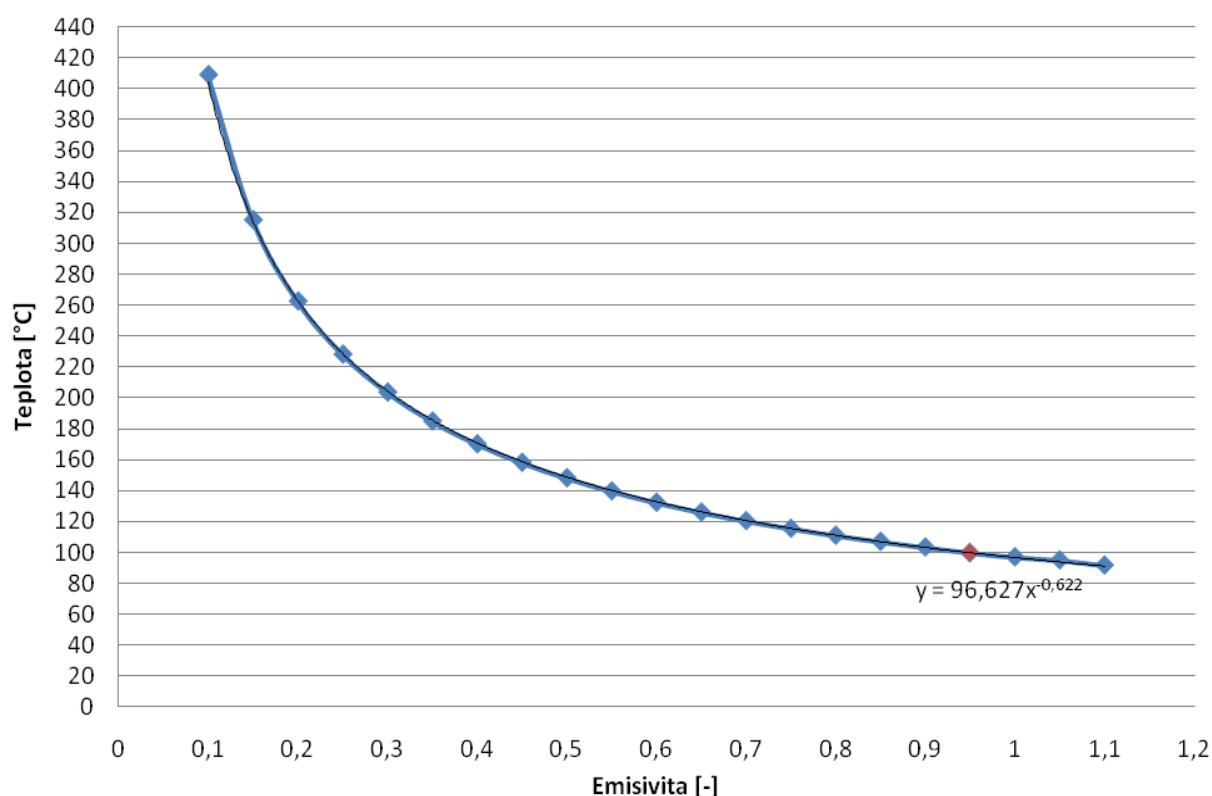
Obr.23 Časová závislost nárůstu a stálosti teploty na čase

Pokud graf pomyslně rozdělím na tři části, tak v první části získáme téměř lineární průběh, který má počátek v souřadnicích (0;50) a lineárně stoupá na souřadnice (102;103,6). Proložení lineární spojnicí trendu byla vypočítána rovnice regrese $y = 0,5364x + 49,167$. V druhé části grafu se projevila vlastní regulace kalibrátoru, která využívá proporcionální – integrační regulátor. Po dosažení žádané hodnoty se teplota ustálí s maximálním rozkmitem 0,1 °C. Můžeme konstatovat, že třetí část grafu je téměř lineární a po proložení lineární spojnicí trendu byla vypočítána rovnice regrese $y = -0,0009x + 100,01$.

Proměřením této závislosti byl získán reálný průběh teploty kalibrátoru po přepnutí žádané hodnoty na jinou žádanou hodnotu. Ustálení teploty se dosáhlo 231 s po přepnutí

žádané hodnot. Vzniklá odchylka od žádané hodnoty je zanedbána.

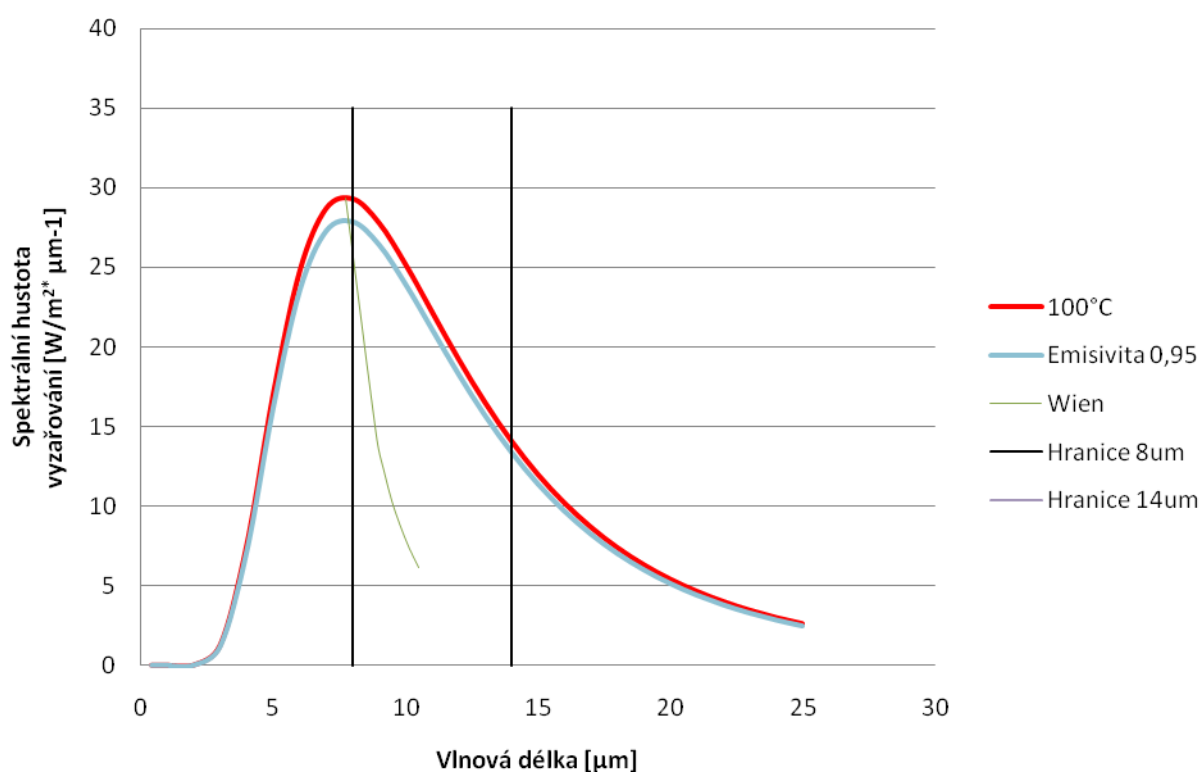
Pro tuto teplotu byl měřicí přístroj nastaven tak, aby při emisivitě 0,95 byla teplota 100 °C, jak udává emisivitu výrobce kalibrátoru. Měřicí senzor byl upevněn ve vzdálenosti 6 cm od hrany vyzařovací plochy. Tato vzdálenost byla vypočítána z rozlišení optika senzoru (2:1) a průměru vyzařovací plochy kalibrátoru (35 mm). Vzdálenost 70 mm nebyla zvolena, tak jak by přesně vycházelo z poměru, protože je počítáno se změnou teploty okraje vyzařovací plochy.



Obr.24 Závislost teploty 100 °C kalibrátoru na změně emisivity.

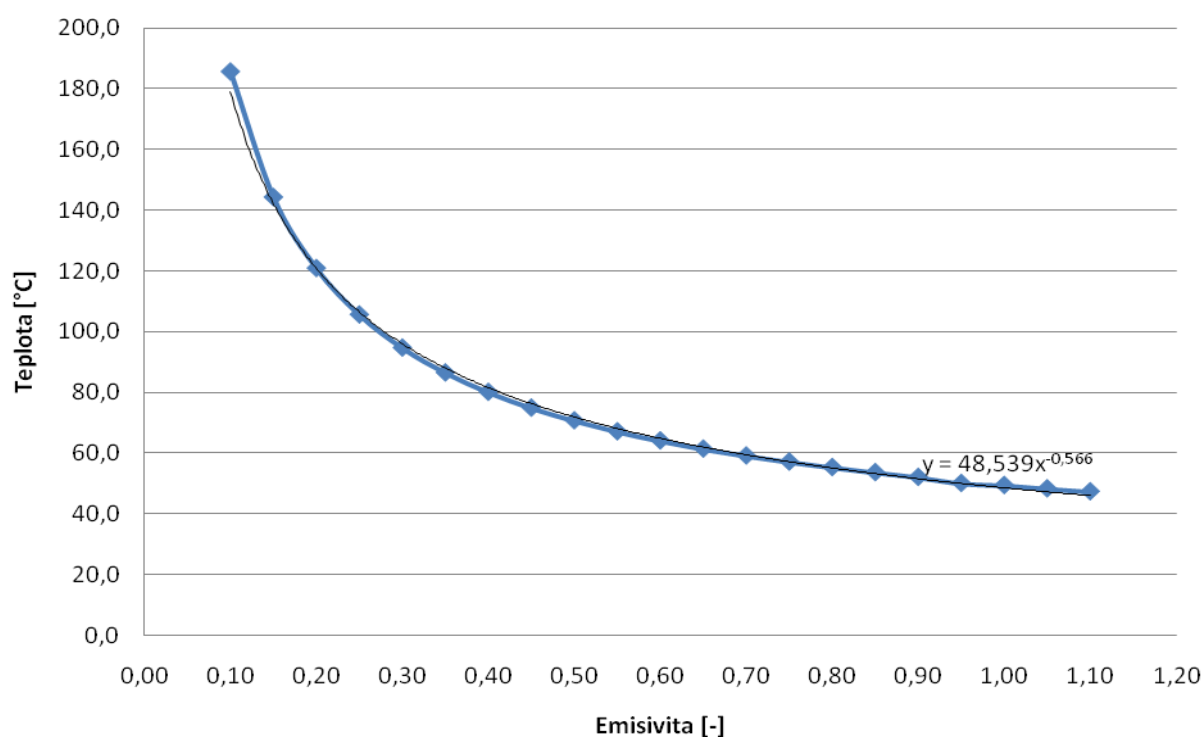
Z grafu je vidět, že v intervalu emisivit $<0,5; 0,95>$ teplota stoupá téměř lineárně, ale s chybou 48% při emisivitě 0,5. Chyba se snižující se emisivitou prudce stoupá.

Pro tuto tepotu byl vypočítán a sestrojen graf závislosti spektrální hustoty intenzity vyzařování na vlnové délce záření pro absolutně černé těleso. Výpočet je založen na Planckově vyzařovacím zákoně (1.2).



Obr.25 Závislost spektrální hustoty intenzity vyzařování na vlnové délce.

Stejné měření bylo provedeno na teplotě kalibrátoru 50 °C.



Obr.26 Závislost teploty 50 °C kalibrátoru na změně emisivity.

Tab. 1: Tabulka naměřených hodnot závislosti teploty na emisivitě.

ε [-]	t_{50} [°C]	t_{100} [°C]
0,10	185,60	409,04
0,15	144,20	315,10
0,20	120,90	262,51
0,25	105,50	228,12
0,30	94,60	203,59
0,35	86,40	184,84
0,40	80,00	170,07
0,45	74,90	158,10
0,50	70,70	148,13
0,55	67,00	139,60
0,60	64,00	132,26
0,65	61,30	125,92
0,70	59,10	120,36
0,75	57,10	115,41
0,80	55,30	110,97
0,85	53,60	106,94
0,90	52,00	103,28
0,95	50,00	99,87
1,00	49,40	96,92
1,05	48,30	94,91
1,10	47,30	91,58
δ [%]	271	309

Z tabulky naměřených hodnot je patrné, že s klesající emisivitou roste chyba měření. V tabulce je vypočítána relativní chyba pro nejnižší možnou hodnotu emisivity, co je možno na měřicím přístroji MI3 nastavit. Tato hodnota emisivity je 0,1. K ní pro teplotu 100 °C náleží

relativní chyba 309 %, pro 50 °C je relativní chyba 271 %. Pro vyšší teploty relativní chyba stoupá.

Grafy závislostí byly proloženy spojnici trendu, které mají mocninný charakter. K spojnici trendu byly vygenerovány rovnice regrese, podle kterých je možno závislosti zpětně zrekonstruovat.

Závislosti proměřené na kalibrátoru jsou brány za referenční a to z důvodu teplotní stálosti měřené plochy a přesné znalosti emisivity, což u reálních těles není možné.

Každá hodnota emisivity byla proměřena 20 cyklů. Tyto hodnoty jsou součástí přílohy na CD.

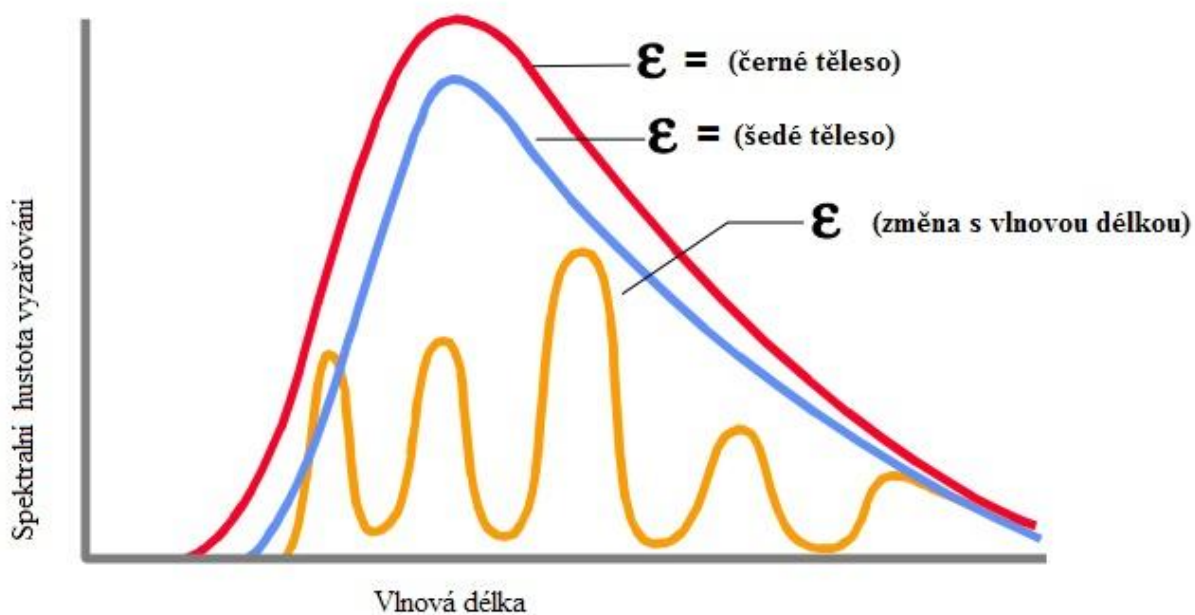
6.2 Měření reálních objektů

U měření reálních těles můžeme zapomenout na koncept absolutně černého tělesa. V reálném světě se nevyskytují objekty, které by splňovaly vlastnosti černého tělesa. Pouze v laboratorních podmínkách se jim můžeme přiblížit.

Reálné objekty může rozdělit do dvou skupin:

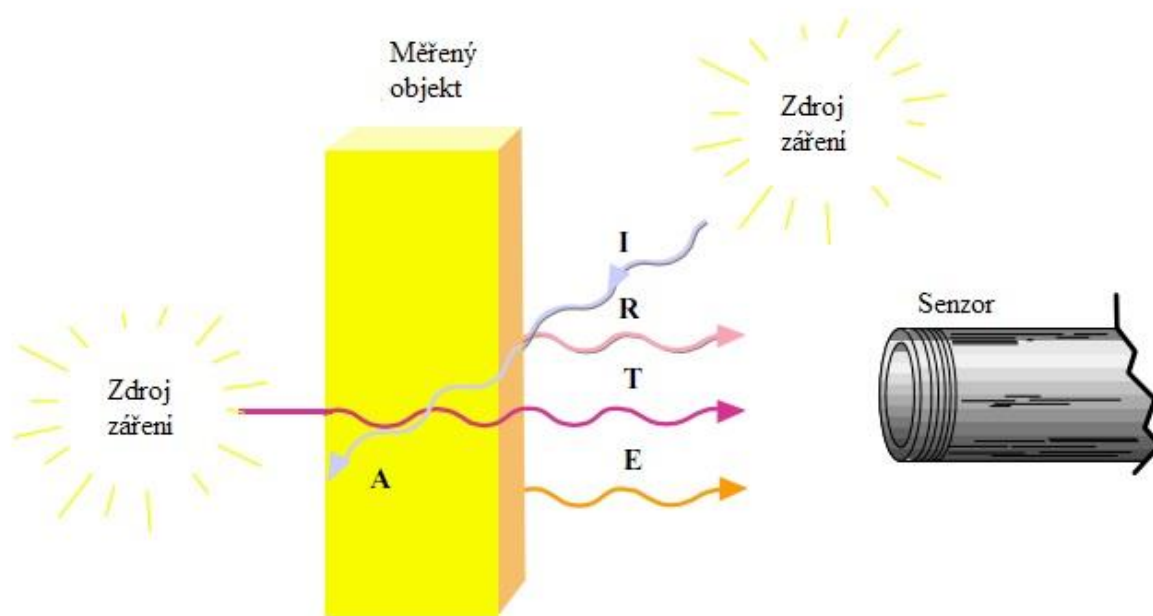
- šedé;
- barevné

U šedých objektů emisivita nezávisí na vlnové délce a barevné objekty mají emisivitu závislou na vlnové délce, jak znázorňuje Obr. 27.



Obr.27 Závislost emisivity na vlnové délce [16].

K správnému měření reálného objektu je nutno znát jeho vlastnosti vůči záření. Záření, které dopadá na povrch měřeného objektu, může objekt propustit, odrazit, pohltit a vyzařovat.



Obr.28 Vliv vlastnosti měřeného objektu na dopadající záření.[16]

- I = záření okolních zdrojů
- R = odrazivost povrchu objektu
- P = prostupnost objektu
- E = vyzařování objektu
- A = pohltivost objektu

Tuto situaci matematicky definoval Kirchhoff, takto:

$$E + R + P = 1 \quad (20)$$

U některých materiálů lze propustnost definovat jako nulovou. Tyto materiály jsou označeny jako neprůhledné. Nepropouštějí záření o určité vlnové délce. Materiály s opačnou vlastností se označují jako materiály průhledné. Tyto materiály propouštějí záření určité vlnové délky.

V následující části je přiblížena metodika měření objektů, které jsou závislé na vlnové délce a parametrech s ní související. Teoretický podklad je získaný z dimerních materiálů Raytek. [7].

6.2.1 Měření kovů

Kovy jsou řazeny do skupiny barevných objektů, a to z důvodu vlastností změny emisivity na vlnové délce. Další vlastnost, která nemůže být zanedbána, je odrazivost povrchů. Tato vlastnost souvisí s technologickou úpravou povrchu. Povrchy leštěné budou mít nižší emisivitu než povrchy oxidované nebo technologicky neupravené. Z rovnice 20 je vidět, že při rostoucí odrazivosti klesá emisivita při zanedbání prostupnosti ($P=0$) a naopak. U mnoha kovů roste chyba měření s vlnovou délkou, což vyvoluje doporučení vyhledat vlnovou délku, při které je emisivita v určitém teplotním rozsahu nejvyšší.

Optimální vlnová délka u kovů s vysokou teplotou je okolo $0,8\ \mu\text{m}$ až $1,0\ \mu\text{m}$, to je hranice viditelného spektra. Je možné použít alternativní rozsahy vlnových délek $1,6$; $2,2$ a $3,9\ \mu\text{m}$.

Pro diplomovou práci byl poskytnut pyrometr s měřícím oknem vlnových délek od $8\ \mu\text{m}$ do $14\ \mu\text{m}$, který není ideální pro tyto měření. Dobrých výsledků lze dosáhnout použitím poměrových pyrometrů v případě širokého rozmezí teplot a změně emisivit na teplotě.

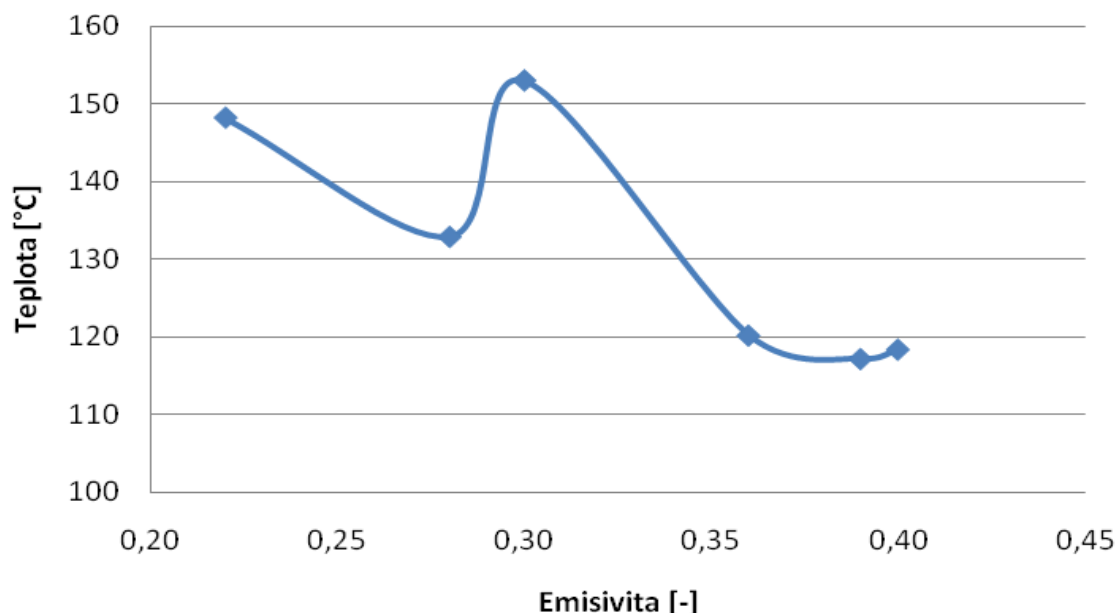
Pro experimentální měření byl využit vaříč, na který byl vložen kus měděné pásoviny o tloušťce $4\ \text{mm}$. Vlivem vaříče byla pásovina zahřátá na teplotu $135,2\ ^\circ\text{C}$. Teplota byla měřena termočlánkem a senzorem PT100.

Měřený vzorek byl proměřen v rozsahu emisivit v oblasti blízké teplotě naměřené kontaktními teploměry. Naměřené hodnoty jsou zapsány v Tab. 2.

Tab. 2: Měření měděné pásoviny.

ε [-]	t_m [$^\circ\text{C}$]
0,22	148,25
0,28	132,88
0,30	153,04
0,36	120,16
0,39	117,13
0,40	118,35

Hodnoty z tabulky byly vyjádřeny grafem Obr. 29, na kterém lze vidět prudká změna teploty v oblasti emisivity 0,30. V okolí této změny se pohybuje skutečná hodnota teploty měřeného objektu.

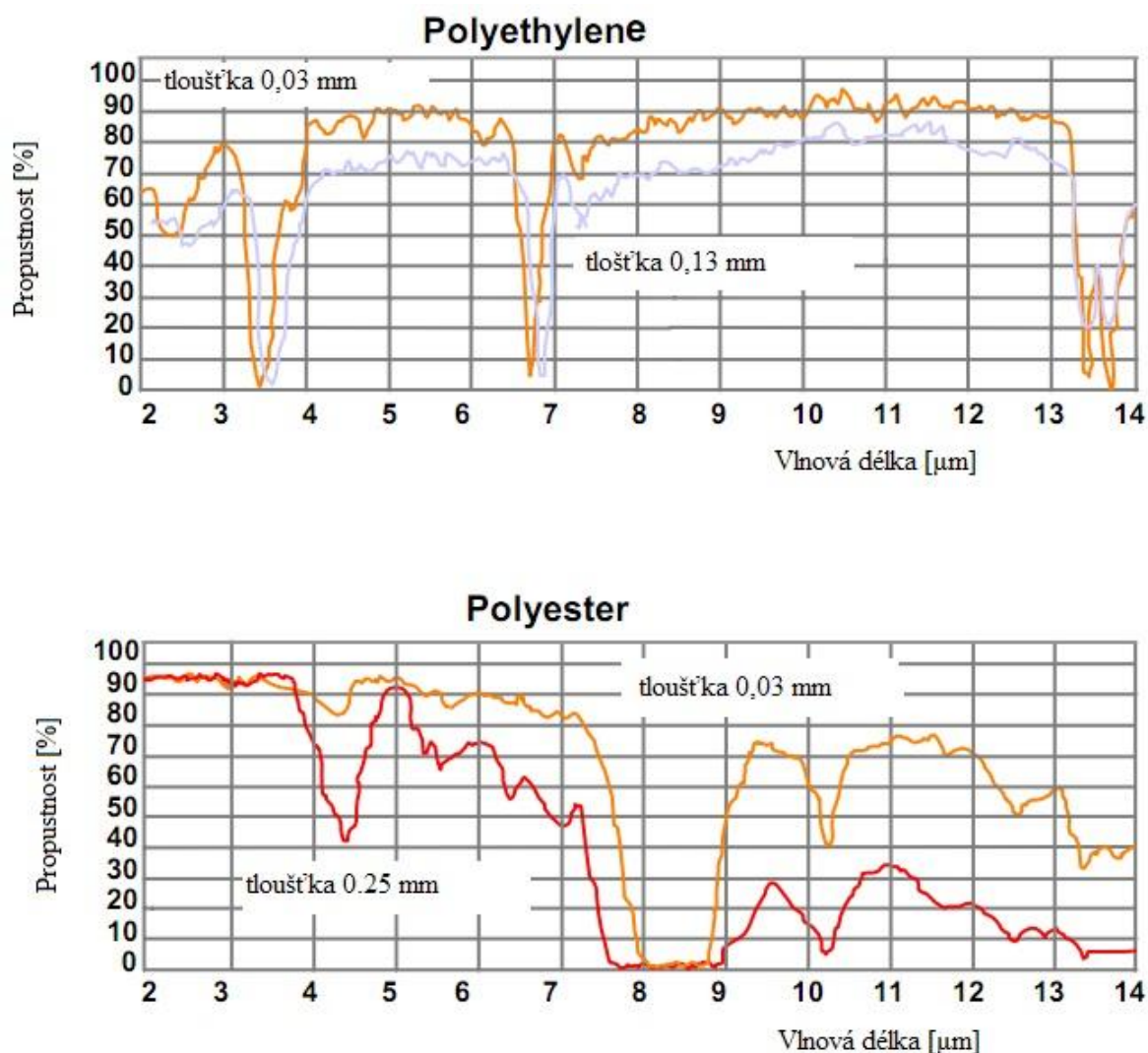


Obr.29 Závislost teploty mědi na emisivitě.

Funkce grafu už není mocninná, jak tomu bylo u jiných materiálů. Lze vidět, že emisivita nezávisí pouze na teplotě měřeného objektu, ale také na vlnové délce.

6.2.2 Měření plastů

U měření plastových objektů je důležité znát nejenom emisivitu, ale také propustnost materiálu (Transmission "P"). Propustnost materiálu je závislá na druhu plastu, vlnové délce a šířce měřeného objektu. Pro získání ideálních hodnoty teploty povrchu měřeného objektu je zapotřebí docílit co nejmenší propustnosti. V ideálním případě propustnost rovnou nule. Závislost propustnosti na vlnové délce a šířce měřeného objektu je znázorněna na Obr. 30.



Obr.30 Závislost propustnosti na vlnové délce a šířce materiálu [16].

Některé plasty (polyetylén, polypropylen, nylon) nejsou prostupné na vlnové délce 3,43 μm , jiné (polyester, polyuretan, teflon FEP, a polyamid) na úrovni vlnové délky 7,9 μm . S objekty širší > 0,4 mm a silně-barevnými filmy je vhodné zvolit měřicí okno s vlnovou délkou 8 až 14 μm .

K experimentálnímu ověření bylo využito varné konvice, kde byla měřena povrchová teplota plastového obalu. Jako varné médium byla použita pitná voda. Konvice byla naplněna ze 3/4.

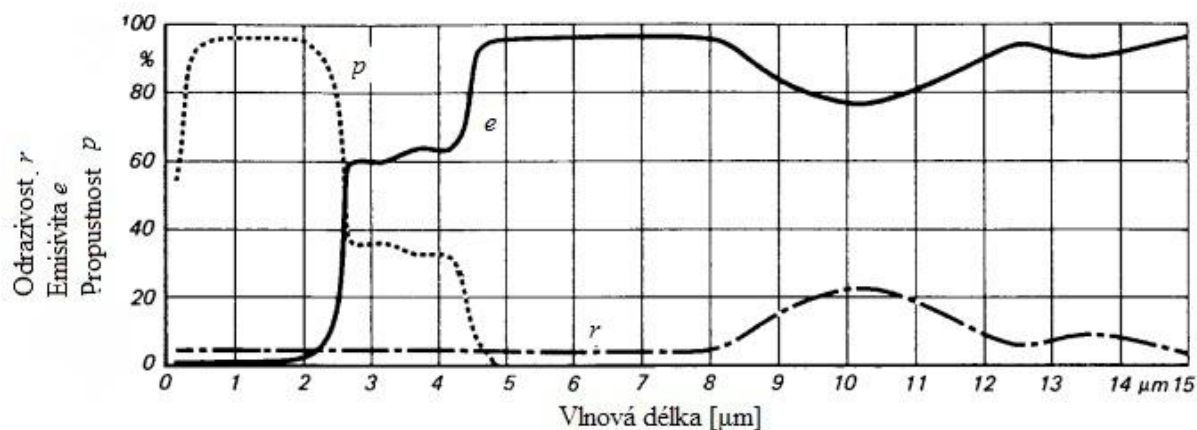
První měření povrchu konvice proběhlo po vypnutí z varu ve spodní 1/3 konvice, kde byla dotykovým teploměrem naměřena teplota 65 °C a bezdotykovým teploměrem průměrná teplota 85,4 °C, při emisivitě 0,95. Vnitřní hodnota varného média (vody) byla přes 100 °C. Rozdíl mezi teplotou získanou dotykovým a bezdotykovým teploměrem je 20,4 °C. Snižování parametru emisivity je získána teplota vyšší než 85,4. Je jasné, že měření povrchu je ovlivněno propustností materiálu.

Při měření v horní 1/3 varné konvice byla naměřena teplota bezdotykovým teploměrem 77,9 °C. Hodnota teploty se přibližuje k teplotě naměřené dotykovým teploměrem a to z důvodu menšího vlivu propuštěné teploty varného média.

6.2.3 Měření skla

Při měření skla musí být brána v úvahu emisivita, propustnost a odrazivost povrchu měřeného objektu. Výběr nesprávné vlnové délky má za následek, že se bude měřit teplota za sklem, ne teplota povrchu. Jestliže jsou pro měření vybrány vlnové délky 1,0; 2,2 nebo 3,9 μm , je měřena teplota za sklem. Pro měření povrchových teplot skla je volena hodnota vlnové délky okolo 5 μm .

Pyrometr MI3 je vhodný pro měření nízkých teplot skla. Měření probíhá na vlnových délkách 8 až 14 μm .



Obr.31 Závislost emisivity, propustnosti a odrazivosti skla [16].

Na Obr. 31 je znázorněna závislost emisivity, propustnosti a odrazivosti skla. Z grafu je patrné, že měření skla je ideální na vlnových délkách vyšších jak 5 μm , kde hodnota propustnosti je blízká nule.

7 MĚŘENÍ V PRAXI

Tato kapitola je věnována bezdotykovému měření teploty pomocí ručních pyrometrů.

Ruční pyrometry jsou v dnešní době hodně rozšířené. Na začátku rozmachu měli pyrometry parametr emisivity pevně stanovený na hodnotu 0,95 a postupně se tento parametr stal přestavitelným.

Pokud měříte teplotu objektu pyrometrem s pevně nastaveným parametrem emisivity a objekt nemá hodnotu emisivity 0,95, vzniká chyba měření, která může dosáhnout až desítky procent. Jestliže je hodnota emisivity měřeného objektu nižší nežli 0,95, měřicí přístroj zobrazí nižší hodnotu, než ve skutečnosti je. Z tohoto důvodu byla zkonstruována přepočtení rovnice, která má za úkol naměřenou hodnotu při emisivitě 0,95 přiblížit přesné hodnotě měřeného objektu za předpokladu znalosti emisivity materiálu. Existuje i možnost inverzního vyjádření rovnice, a to za předpokladu znalosti přesné hodnoty teploty měřeného objektu a následné zjištění emisivity měřeného materiálu.

Rovnice je založena na datech, které byly získány pomocí experimentálního měření kalibrátoru FLUKE 9135. Proměřením dvou teplot na celém rozsahu emisivity, byly vykresleny grafy, které jsou zobrazeny na Obr. 24 a Obr. 26.

Po proložení jednotlivých grafů spojnicí trendů byly získány dvě rovnice regrese. Na první pohled jde o funkce mocninného charakteru.

Rovnice regrese pro hodnotu teploty 50 °C:

$$y = 48,539 \cdot x^{-0,566} \quad (21)$$

a rovnice regrese pro hodnotu 100 °C:

$$y = 96,627x^{-0,622} \quad (22)$$

Z těchto rovnic regrese byla sestavena rovnice ve tvaru:

$$t = y - (0,033 \cdot y) \cdot x^{-0,0012y} \quad (23)$$

Kde y představuje hodnotu teploty naměřenou při pevně nastavené emisivitě 0,95. Dosazením hodnoty do rovnice byla získána mocninná rovnice regrese pro průběh měřené teploty. Proměnná x vyjadřuje emisivitu. Po úpravě proměnných a tvaru rovnice získáme:

$$t(t_{0,95}, \varepsilon) = \frac{t_{0,95} - (k_1 \cdot t_{0,95})}{\varepsilon^{k_2 + k_3 \cdot t_{0,95}}} \quad (24)$$

kde:

εemisivita [-]

tteplota při dané emisivitě [°C]

$t_{0,95}$teplota při emisivitě 0,95 [°C]

k_1koeficient 0,033 [-]

k_2koeficient 0,51 [-]

k_3koeficient 0,0012 [-]

Tab. 3: Tabulka naměřených hodnot

ε [-]	t [°C]	t_v [°C]
0,10	124,80	139,44
0,20	82,10	94,72
0,30	66,00	75,54
0,40	57,60	64,33
0,50	51,70	56,80
0,60	47,90	51,31
0,70	45,00	47,08
0,80	42,80	43,70
0,90	41,00	40,92
0,95	39,90	39,70

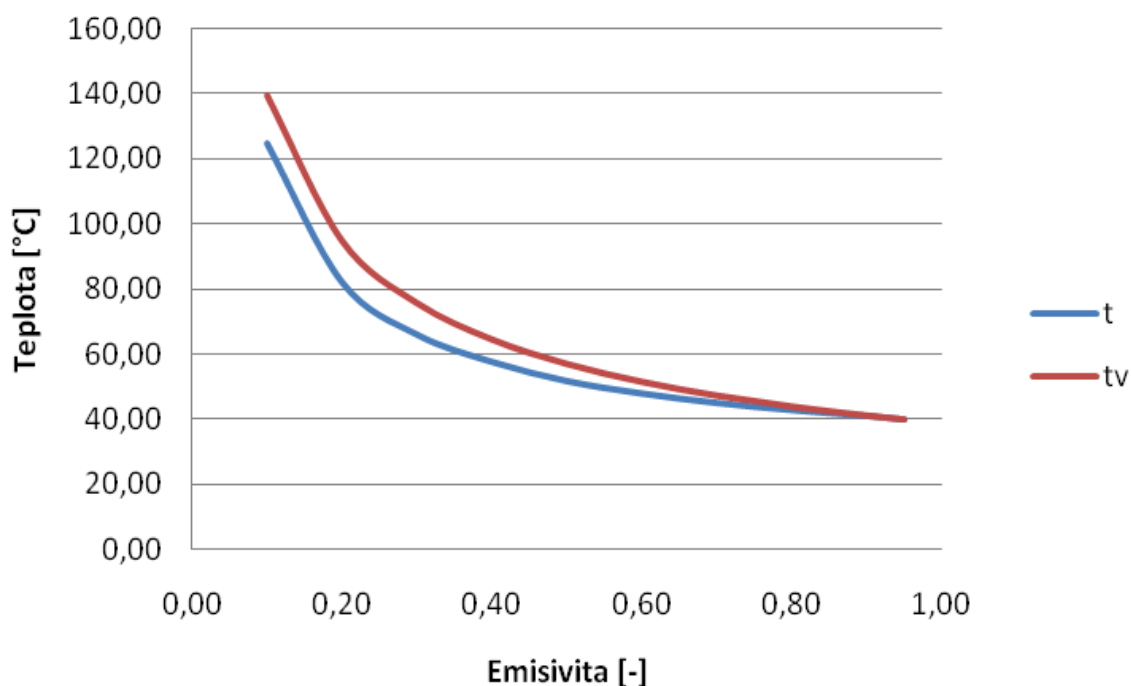
Funkce rovnice byla ověřena na experimentálním měření. Pro měření byl zvolen externí harddisk v kovovém pouzdru nastříkaný matnou černou barvou.

V první fázi byla změřena hodnota teploty při emisivitě 0,95, která je 39,90 °C. Tato hodnota byla dosazena do rovnice 24. Po získání tvaru mocninné funkce byla teplota vypočítána pro rozsah emisivit 0,10 až 0,90 s krokem 0,1. Vypočítané hodnoty teploty t_v jsou zachyceny v Tab. 2 a vykresleny v grafu na Obr. 32. Teploty naměřené pyrometrem MI3, jsou ve druhém sloupci Tab. 2.

Z grafu jde vidět, že hodnoty oblasti emisivit 0,50 až 0,95 jsou hodně podobné, ale hodnoty nižší jak 0,50 jsou už téměř nepoužitelné.

V druhé fázi měření byla zjištěna pravá hodnota měřeného objektu dotykovým teploměrem KTY, který je součástí měřicího systému. Dotyková teplota je $42,3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tato hodnota byla dosazena také do rovnice 24. Z ní byla vyjádřena emisivita, která má hodnotu 0,848. Hodnota emisivity získána výpočtem rovnice byla nastavena na pyrometru MI3 a následně změřena teplota. Teplota dosáhla hodnoty $41,7\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Když porovnáme hodnotu skutečné teploty (změřeno dotykovým teploměrem) a hodnotu získanou z MI3 (změřeno bezdotykovým teploměrem), vyjde nám relativní chyba 1,42 %.



Obr.32 Závislost teploty kovového obalu přenosného disku na emisivitě.

Křivka t zobrazuje hodnoty naměřené bezkontaktním teploměrem a křivka t_v zobrazuje hodnoty vypočítané přes rovnici.

8 ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo zkoumat vliv správného nastavení emisivity. První část práce je věnována teoretickému základu a fyzikální podstatě, o který se bezdotykové měření teploty opírá. Druhá část zachycuje měřicí systém, který se dá považovat za standardní. Následující části práce představují realizaci vlastního měřicího systému a jeho aplikaci pro zkoumání a vyhodnocení vlivu emisivity.

Měřicí systém je založen na bezdotykovém měřicím teploměru MI3 od firmy Raytek, který byl pro tuto diplomovou práci poskytnut katedrou UAI. K doplnění měřicího systému byl v programu MultiSim modifikován převodník - odpor na napětí, který využívá odporovou sondu KTY 81-120 jako kontaktní teploměr. Základ převodníku byl získán z praktické elektroniky-amatérské rádio. [14] Převodník poskytuje napěťový výstup 0-5 V, který je připojen do komunikačního boxu bezkontaktního teploměru MI3. Kontaktní teploměr slouží k získání pravé teploty měřeného objektu.

Komunikační box MI3 je obsluhován programem, který byl navrhnout a naprogramován ve vývojovém prostředí LabView 8.5. Program obsahuje základní funkci sběru naměřených dat a vzdálené nastavení parametrů jednotky MI3. Komunikace mezi programem a boxem MI3 je zprostředkována sériovou komunikací s využitím driveru (Raytek) pro virtualizaci USB na COM.

První měření bylo provedeno s pomocí kalibračního zařízení Fluke 9135. Kalibrátor byl proměřen na dvou hodnotách 50 °C a 100 °C. Z naměřených hodnoty byly zkonstruován graf závislost emisivity na teplotě. Ze závislosti je patrné, že teplota stoupá s klesající emisivitou. Hodnoty byly měřené v oknu vlnových délek 8 až 14 μm , které poskytuje měřicí hlavice. U těchto měření byla zanedbána propustnost a odrazivost objektu.

Zbývající měření byla zaměřena na reálná tělesa, která jsou dostupná v našem okolí. Reálná tělesa byla rozdělena tři skupiny. První skupina jsou tělesa kovová, u kterých je prioritní parametr emisivity, závislá na vlnové délce. Se stoupajícími (delšími) vlnovými délkami roste chyba měření. Z toho vyplývá, že měření kovů je ideální provádět v oknech kratších vlnových délek. Druhou skupinou reálných těles jsou plasty. U plastů není prioritní parametr pouze emisivity, ale i propustnost. Plast podle složení a tloušťky propouští záření na určitých vlnových délkách, což je důležité pro ideální zvolení okna vlnových délek. Zvolení špatného okna vlnových délek má za následek snímání záření jiného objektu. Tato skutečnost byla ověřena na měření obalu varné konvice. Teplota byla měřena v oknu 8 až 14 μm . V tomto vlnovém oknu plastový obal propouštěl záření varného média (vody), což mělo za následek chybu měření z důsledku snímání záření varného média a ne obalu konvice. Poslední skupinou reálných objektů jsou skla, která jsou chována pro bezdotykové měření teploty podobná plastům. Pro měření povrchových teplot skla je nutno využít vlnových délek 5 μm . Měření provedené na vlnových délkách 1,0; 2,2 nebo 3,9 μm má za následek měření objektu za sklem.

V závěrečné kapitole je popsána rovnice pro výpočet emisivity měřeného objektu za předpokladu známé teploty objektu. Je možno při známe emisivitě materiálu vypočítat pravou teplotu měřeného objektu. Tato rovnice vychází z rovnic regrese, které byly získány z grafů závislostí emisivity na teplotě kalibrátoru. Rovnice byla ověřena na experimentálním měření kovového obalu přenosného disku. Hodny získané měřením a vypočítané rovnicí jsou vyneseny v grafu Obr. 32. Z grafu je patrné, že s klesající hodnotu emisivity se zvyšuje chyba měření. V rozsahu emisivit 0,7 až 1,0 je chyba měření do 2 %, což je pro orientační hodnotu teploty dostačující. Rovnice je omezena maximální měřenou hodnotou, a to do 100 °C.

Diplomovou prací byl prokázán jednoznačný vliv správného nastavení parametru emisivity na přesnost bezdotykového měření teploty. Z experimentálních měření vzešel závěr, že hodnoty emisivit zahrnuté v jakýchkoliv obecných tabulkách jsou pouze orientační. Pro bezdotykové měření teploty v praxi je jednoznačné získávat emisivitu metodami, které jsou popsány v kapitole 3.

9 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] KREIDL, M. Měření teploty : Senzory a měřicí obvody. 1. vyd. Praha : BEN - technická literatura, 2005. 240 s. ISBN 80-7300-145-4.
- [2] KADLEC, . Měřicí technika : Měření teploty [online].2008 [cit. 2009-03-15]. Dostupný z WWW: <<http://web.vscht.cz/kadleck/aktual/mt.html>>.
- [3] CHUDÝ, V.; Palenčár, R.; Kureková, E.; Halaj, M. Meranie technických veličín : 1.vydání Bratislava : Vydavateľstvo STU, 1999. 688s. ISBN 80-227-1275-2.
- [4] LYSENKO,V. Detektory pro bezdotykové měření teplot : 1. vydání Praha: BEN – technická literatura, 2005. 160 s. ISBN 80-7300-180-2.
- [5] SLÁDEK, Z.; Vdoleček, F. Technická měření : 1.vydání Brno : Nakladatelství VUT, 1992. 220 s. ISBN 80-214-0414-0.
- [6] FLUKE. In *Infrared Thermometer Calibrator : User's Guide* [online]. Utah : Fluke Corporation, 2005 [cit. 2011-05-15]. Dostupné z WWW: <http://www.instrumart.com/assets/108/9135_manual.pdf>.
- [7] RAYTEK. In *Operating Instructions* [online]. Santa Cruz : RaytekGmbH, 2007 [cit. 2011-05-15]. Dostupné z WWW: <<http://www.raytek.com/>>.
- [8] FLIR. In *The Ultimate Infrared Handbook for R&D Professionals : A Resource Guide for Using Infrared in the Research and Development Industry* [online]. Boston : FLIR Systems, AB, 2010 [cit. 2011-05-15]. Dostupné z WWW: <<http://www.flir.com/thermography/eurasia/en/>>.
- [9] OMEGA. Bezdotykové měření teploty [online]. Dostupný z WWW: <http://www.omegaeng.cz/literature/PDF/techinfo_1.pdf>.
- [10] VAVŘIČKA, R.; Bezdotykové měření teploty: ČVUT Praha.
- [11] SZERUDA, R.; Základy bezdotykového měření teploty pásmovým radiačním pyrometrem [online]. Dostupný z WWW: <<http://www.pyrometrie.sweb.cz>>.
- [12] GEMINI; IR Transmission Spectra [online]. Dostupný z WWW : <<http://www.gemini.edu>>.
- [13] MICRO - EPSILON; Basic of non contact temperature measurement [online]. Dostupný z WWW: < <http://www.micro-epsilon.com>>.

- [14] PŘEVODNÍK : Teplota-napětí. In *A-Radio : Konstrukční elektronika*. číslo 3. Praha : Amaro spol. s r.o., 1996. s. 1.
- [15] AUTOMA. In *Automa : časopis pro automatizační techniku* [online]. Praha : FCC Public s. r. o., 2010 [cit. 2011-05-15]. Dostupné z WWW: <<http://www.odbornecasopisy.cz>>.
- [16] RAYTEK. In *Principles of Noncontact Temperature Measurement* [online]. Santa Cruz : RaytekGmbH, 2007 [cit. 2011-05-15]. Dostupné z WWW: <<http://www.raytek.com/>>.
- [17] *Termokamera* [online]. 2010 [cit. 2011-05-22]. Princip termografického měření. Dostupné z WWW: <http://www.termokamera.cz/index.php?option=com_content&task=view&id=4&Itemid=9>.