



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**
ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

**FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY**

METODIKA BEZKONTAKTNÍHO MĚŘENÍ TEPLoty

METHODOLOGY FOR CONTACTLESS MEASUREMENT OF TEMPERATURE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

David Skalický

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Martin Frk, Ph.D.

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektrotechnologie

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Mikroelektronika a technologie

Student: David Skalický

ID: 146952

Ročník: 3

Akademický rok: 2013/2014

NÁZEV TÉMATU:

Metodika bezkontaktního měření teploty

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Zpracujte teoretickou rešerši související s matematickým popisem a fyzikálními zákonitostmi elektromagnetického záření. Analyzujte současný stav v oblasti vývoje technologií a zejména použití bezkontaktního měření teploty v běžné praxi. Prostudujte principy metod bezkontaktního snímání teploty měřených objektů a aspekty, které ovlivňují jejich výslednou přesnost.

Sestavte laboratorní pracoviště umožňující objektivní srovnání jednotlivých druhů IR měřičů teploty pomocí přesného kalibrátoru. Proveďte posouzení vlivu vzdálenosti, prostředí a emisivity různých materiálových povrchů na výslednou hodnotu měřené teploty a zaměřte se na možné metodiky stanovení koeficientu emisivity pro jednotlivé materiály. Výsledky vyhodnoťte z pohledu dosažené přesnosti a posouzení vlivu nastavení jednotlivých přístrojových parametrů. Na základě použitých metodických postupů a dosažených výsledků měření vytvořte zadání laboratorní úlohy využitelné v předmětech orientovaných na diagnostické metody v elektrotechnice.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího bakalářské práce.

Termín zadání: 10.2.2014

Termín odevzdání: 5.6.2014

Vedoucí práce: Ing. Martin Frk, Ph.D.

Konzultanti bakalářské práce:

doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT:

Následující práce se zabývá problematikou bezkontaktního měření teplot a kalibrací vybraného měřiče teploty. Začátek práce pojednává o fyzikálních zákonech a základních pojmech, které je třeba znát pro bezkontaktní měření teploty. Dále následuje rozdělení detektorů a pyrometrů pro bezdotykové měření teploty. Závěr teoretické části tvoří výhody tohoto způsobu měření a využití v praxi. Praktická část pojednává o přístrojích dostupných na Fakultě elektrotechniky a komunikačních technologií, jejich porovnání a výběr nejvhodnějšího měřiče pro kalibraci. Následuje provedení experimentu týkajícího se bezkontaktního měření teploty. Závěr praktické části tvoří sestavení optimalizovaného pracoviště pro kalibraci bezkontaktních měřičů teploty a samotná kalibrace vybraných měřičů teploty.

KLÍČOVÁ SLOVA:

bezdotykové měření teploty, pyrometrie, kalibrace IR měřičů teploty

ABSTRACT:

This thesis deals with the issues of contactless measuring of temperatures and calibration of chosen temperature meter. The beginning of this thesis concerns physical laws and basic terms which are crucial for contactless measuring of temperatures. The following part gives the division of detectors and pyrometres for contactless measuring of temperatures. The conclusion of the theoretical part describes the advantages of these ways of measuring and practical use of them. The practical part deals with instruments that are accessible at Faculty of Electrical Engineering and Communication, their comparing and choice of the most advantageous meter for calibration. The following part is the implementation of the experiment related to contactless measuring of temperatures. The conclusion of the practical part contains composition of optimized workplace for calibration of contactless temperature meters and the calibration of chosen temperature meters itself.

KEYWORDS:

non-contact temperature measurement, pyrometry, calibration of IR thermometer

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE:

SKALICKÝ, D. *Metodika bezkontaktního měření teploty*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 45 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Martin Frk, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Metodika bezkontaktního měření teploty“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Martinu Frkovi, Ph. D. za odborné vedení, rady a konzultace při zpracování bakalářské práce.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

Obsah

Úvod.....	7
Teoretická část	8
1 Základní pojmy	8
1.1 Teplota x teplo.....	8
1.1.1 Teplota	8
1.1.2 Teplo	8
2 Bezdotykové měření teploty	8
2.1 Zákony záření	9
2.1.1 Stefan-Boltzmannův zákon.....	9
2.1.2 Wienův posunovací zákon	9
2.1.3 Planckův zákon	9
2.1.4 Lambertův zákon	10
2.2 Základní parametry pyrometrů.....	10
2.2.1 Emisivita	10
2.2.2 Optické rozlišení D:S.....	10
2.3 Absolutně černé těleso a šedé těleso	10
2.4 Rozdělení detektorů	11
2.4.1 Tepelné detektory infračerveného záření.....	11
2.4.2 Kvantové detektory infračerveného záření	12
2.5 Pyrometry	13
2.5.1 Úhrnné pyrometry	13
2.5.2 Monochromatické pyrometry	13
2.5.3 Vícepásmové pyrometry	14
2.5.4 Poměrové pyrometry.....	14
2.5.5 Jasové pyrometry	14
2.6 Termografie.....	15
2.6.1 Fotografické materiály pro snímání teplotních polí.....	15
2.6.2 Termovize	15
2.7 Nejistoty a chyby v pyrometrii.....	16
2.7.1 Nejistoty měření vlivem chybné emivity	16
2.7.2 Nejistota měření způsobená nerespektováním propustnosti prostředí.....	17
2.7.3 Nejistota způsobená nerespektováním odraženého záření.....	18
2.7.4 Nejistota měření nerespektováním optického rozlišení D:S.....	18
2.8 Výhody bezkontaktního měření teploty	19
2.9 Využití v praxi.....	19
Praktická část	21

3	Popis použitých přístrojů	21
3.1	Ruční bezdotykový teploměr Dostmann Proscan 530	21
3.2	Ruční bezdotykový teploměr Greisinger GIM530MS	22
3.3	Termokamera Flir i7	23
3.4	Přenosný kalibrátor BB500	24
3.5	Porovnání měřičů teploty	24
4	Provedení experimentu	25
5	Sestavení laboratorního pracoviště	26
5.1	Sestavení pracoviště v programu SolidWorks	26
5.2	Skutečná podoba laboratorního pracoviště	27
6	Kalibrace přístrojů pro bezkontaktní měření teploty	28
	Závěr	32
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	33
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ	35
	SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ	36
	SEZNAM POUŽITÝCH TABULEK	36
	PŘÍLOHY	37

Úvod

Termodynamická teplota je jednou ze základních jednotek SI soustavy. Teplota je vlastnost, která určuje stav hmoty, a proto je součástí mnoha fyzikálních zákonů a zasahuje prakticky do všech oblastí lidské činnosti. Teplota je mírou kinetické energie pohybujících se molekul a atomů, které na sebe navzájem narážejí. Rychlost pohybu těchto molekul není konstantní, ale mění se v čase. Za nejnižší teplotu považujeme teplotu 0 K (-273,15 °C), kdy ustává veškerý pohyb.

Při měření teploty se využívá fyzikální závislosti jiných fyzikálních veličin na teplotě. Z toho plyne, že se jedná o nepřímé měření. Mezi jedny z nejrozšířenějších snímačů teploty patří např. odporové, kdy se využívá závislosti elektrického odporu na teplotě.

Pro bezkontaktní měření teploty je důležité elektromagnetické záření, které vydává každé těleso, jehož teplota je vyšší než absolutní nula. Bezkontaktní měření využívá zejména infračerveného záření.

Bezkontaktní měření nachází v praxi široké možnosti využití, zejména při velmi vysokých teplotách nebo na místech, kde hrozí nebezpečí úrazu (např. elektrickým proudem). V takovýchto případech už většinou nelze použít kontaktní měření teploty. Bezkontaktní měření se vyznačuje další řadou výhod, jako např. že měření neovlivňuje měřený objekt, reaguje na velmi rychlé změny teploty, možnost měřit objekty v pohybu nebo rotující objekty atd. Ale pro přesné měření teploty je třeba znát pár důležitých věcí, se kterými je bezkontaktní měření neodmyslitelně spojeno.

Teoretická část

1 Základní pojmy

Následující kapitola definuje a vysvětluje základní pojmy vztahující se k řešené problematice.

1.1 Teplota x teplo

Pojem teplo a teplota bývají často zaměňovány. Teploměry měří teplotu nikoli teplo.

1.1.1 Teplota

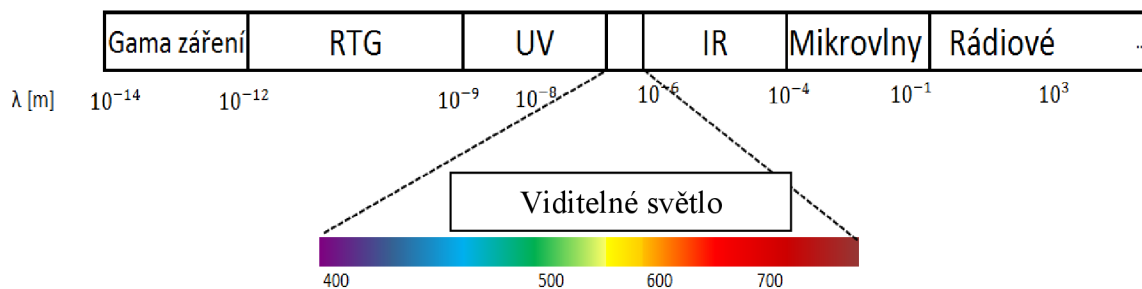
„Teplota je stavová veličina určující stav termodynamické rovnováhy tj. stav, kdy v izolované soustavě těles od okolního prostředí neprobíhají žádné makroskopické změny a všechny fyzikální veličiny, jimiž je stav soustavy popsán, nezávisí na čase. Stav termodynamické rovnováhy bývá charakterizován termodynamickou teplotou, která musí být stejná pro všechny části izolované soustavy.“ [1, s. 9]

1.1.2 Teplo

„Teplo je fyzikální veličinou popisující změnu termodynamického stavu systému, nikoli stav samotný. Teplo je míra změny vnitřní energie systému při styku s jiným systémem, aniž by přitom docházelo ke konání práce. Teplo je forma energie související s pohybem dané soustavy těles.“ [1, s. 9]

2 Bezdotykové měření teploty

Každé těleso, které má povrchovou teplotu vyšší než absolutní nula, je zdrojem elektromagnetického záření. Záření, které těleso emituje je závislé na teplotě a pro bezkontaktní metody je důležitá část o vlnových délkách v rozsahu 0,4-25 μ m. Dané vlnové délky pokrývají oblast viditelného světla (0,4-0,78 μ m). Vlnové délky 0,78-25 μ m zahrnují oblast infračerveného spektra, tuto oblast nazýváme též tepelným zářením. Uvedené vlnové délky umožňují měřit teplotu až do +10 000 °C. [2]



Obr. 1 Vlnové spektrum elektromagnetického záření

2.1 Zákony záření

2.1.1 Stefan-Boltzmannův zákon

Jedním z důležitých zákonů pro bezdotykové měření teploty je Stefan-Boltzmannův zákon. Ten říká, že intenzita záření absolutně černého tělesa je přímo úměrná čtvrté mocnině termodynamické teploty. Stefan-Boltzmannův zákon je podstatou úhrnných pyrometrů.

$$M_e = \sigma T^4 \quad (1)$$

kde M_e je intenzita záření, σ je Stefan-Boltzmannova konstanta a T je termodynamická teplota tělesa. [3]

2.1.2 Wienův posunovací zákon

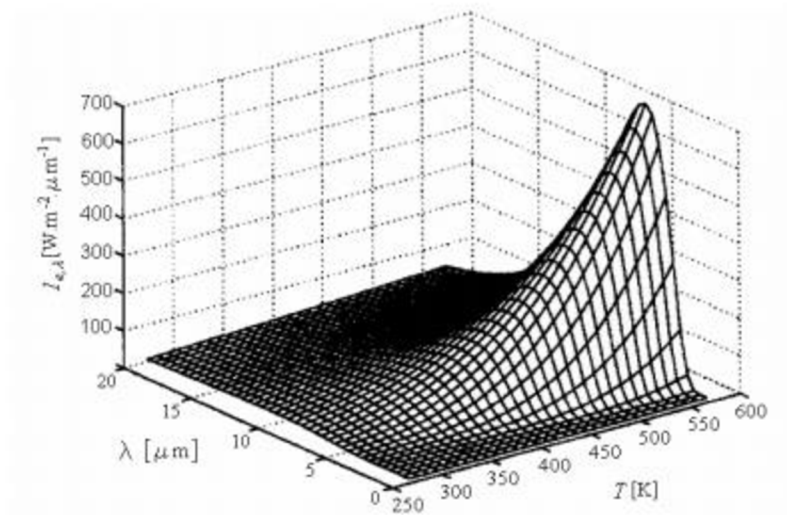
Wienův posunovací zákon říká, že s rostoucí termodynamickou teplotou se maximální intenzita vyzařování posouvá ke kratším vlnovým délkám. [4]

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T} \quad (2)$$

kde λ_{max} je maximální vlnová délka vyzařování a b je Wienova konstanta.

2.1.3 Planckův zákon

Planckův zákon vyjadřuje závislost intenzity záření na vlnové délce a teplotě. Každé těleso, které má povrchovou teplotu větší než absolutní nula, vyzařuje záření. Toto záření je vyzařováno a absorbováno po celistvých násobcích tzv. kvantech.



Obr. 2 Znárodnění Planckova vyzařovacího zákona [5]

2.1.4 Lambertův zákon

Důsledkem Lambertova zákona je, že zářivost I je závislá na úhlu φ , který svírá směr pozorování s kolmicí k rovině zdroje (směr normály n). [2]

$$I_{\varphi} = I_n \cos(\varphi) \quad (3)$$

kde I_n je maximální hodnota zářivosti ve směru kolmice.

2.2 Základní parametry pyrometrů

2.2.1 Emisivita

Bezdotykové měření teploty bývá často označováno jako pyrometrie nebo infračervená pyrometrie. Pro měření teploty bezkontaktní metodou je důležitá znalost emisivity měřeného objektu. Různé materiály mají různé hodnoty emisivity. Nejčastější hodnotou emisivity je 0,95, a proto některé pyrometry bývají nastaveny na tuto hodnotu, ale u většiny pyrometrů je možnost vlastního nastavení emisivity.

„Emisivita ϵ je poměr vyzařování tepelného zářiče k vyzařování černého tělesa při téže teplotě.“ [2, s. 161]

2.2.2 Optické rozlišení D:S

Optické rozlišení je jednou ze základních parametrů pyrometrů. Definuje poměr mezi vzdáleností od měřeného objektu a průměrem měřené plochy. Čím větší je hodnota optického rozlišení, tím je menší měřená plocha při stejné vzdálenosti anebo je možno měřit stejně velkou plochu, ale z větší vzdálenosti.

2.3 Absolutně černé těleso a šedé těleso

Absolutně černé těleso je takové těleso, které má hodnotu emisivity rovno 1. Jedná se o těleso, které pohlcuje veškeré dopadající záření nezávisle na vlnové délce a na úhlu dopadu. Zároveň vyzařuje maximální energii na všech vlnových délkách při dané teplotě. Jedná se pouze o ideální model. Neexistuje žádný materiál, který by splňoval tyto vlastnosti. [5]

Pouze černé těleso má hodnotu emisivity rovno 1. Protože se jedná pouze o ideální model, zavedl se v praxi pojem šedé těleso. Šedé těleso je takové těleso, které má hodnotu emisivity nezávislou na vlnové délce a hodnota jeho emisivity se blíží 1. Takový materiál, ze kterého by se dalo vyrobit šedé těleso, které by mělo hodnotu emisivity nezávislou na vlnové délce, také bohužel neexistuje. Avšak mnoho materiálů je v určitém rozsahu vlnových délek nezávislých na emisivitě, a proto je považujeme za šedé těleso. [5]

Pro kalibraci IR měřičů teploty se používá tzv. černý zářič, jehož emisivita se blíží 1. Černý zářič se obvykle realizuje jako tzv. dutinový zářič s reflexním, difúzním nebo difúzně reflexním povrchem. [2]

2.4 Rozdělení detektorů

Detektor je zařízení, které slouží pro převod dopadajícího elektromagnetického záření na elektrický signál, který můžeme dále zpracovávat. Detektory tepelného záření lze rozdělit do dvou skupin v závislosti na tom, jak reagují na dopadající záření.

2.4.1 Tepelné detektory infračerveného záření

Podstatou tepelných detektorů je dopad fotonů na citlivou část. Po absorpci fotonů se citlivá část otepluje a toto oteplení se vyhodnocuje nepřímo pomocí snímačů teplot. [2] Tepelné detektory dále dělíme na: termoelektrické, bolometrické a pyroelektrické detektory.

2.4.1.1 Termoelektrické detektory

Jejich podstatou je změna termoelektrického napětí dvou vodičů. Tyto vodiče jsou spojeny a místo spoje nazýváme měřicí (místo dopadu infračerveného záření) a volné konce nazýváme srovnávací spoje. [6]

Takovéto termoelektrické články se spojují do tzv. termoelektrických radiačních bloků. Čím více termoelektrických článků blok obsahuje, tím získáme vyšší citlivost, ale zvětší se časová odezva. [1]

Samotné termoelektrické články se zhotovují buď jako kovové 0,3 mm tlusté pásky, nebo pomocí tenkovrstvé technologie. [2]

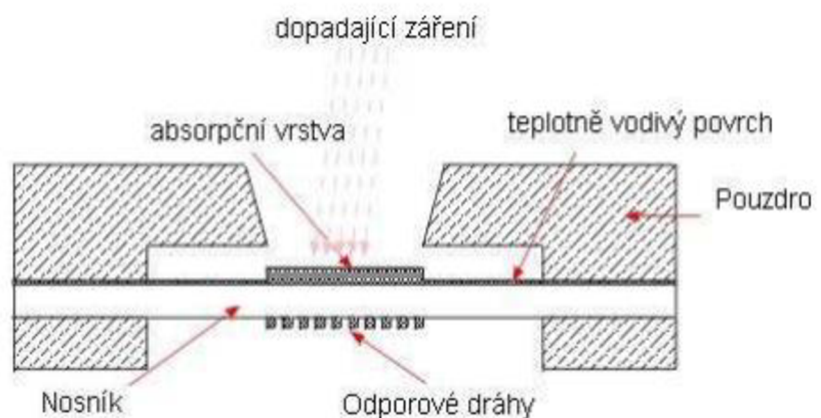


Obr. 3 Uspořádání termoelektrického detektoru [2]

2.4.1.2 Bolometrické detektory

Bolometrické detektory využívají teplotně závislé odpory. Při dopadu záření na čidlo dojde ke změně teploty čidla a tím i ke změně jeho elektrického odporu, proto musí být bolometry izolovány od svého okolí. Pro výrobu těchto detektorů se používají polovodičové

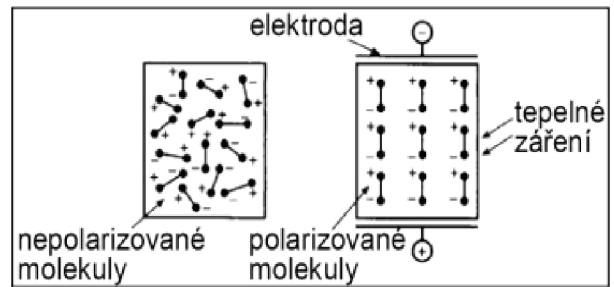
materiály. Nejčastěji se realizují jako integrované obvody, které obsahují několik stovek až tisíc bolometrů uspořádaných do matice. Nejčastěji se bolometry využívají v termovizních kamerách. [2]



Obr. 4 Provedení bolometru [4]

2.4.1.3 Pyroelektrické detektory

Jejich podstatu tvoří pyroelektrický jev. Při změně teploty dochází na povrchu materiálu ke generaci dočasného elektrického potenciálu – dochází ke spontánní polarizaci pyroelektrika. Tyto detektory jsou nejčastěji vytvořeny z krystalických materiálů. [2], [4]



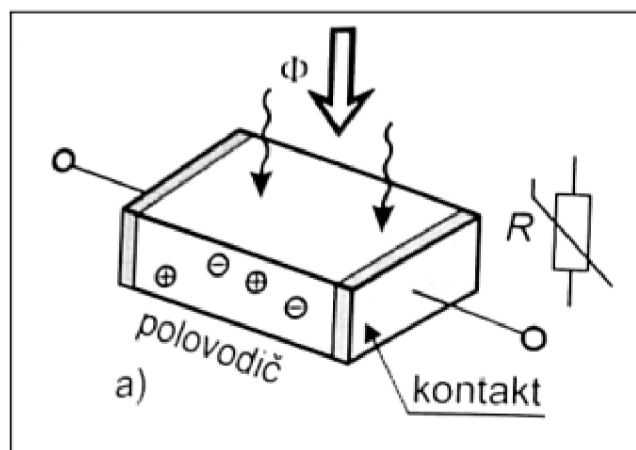
Obr. 5 Princip pyroelektrických detektorů [1]

2.4.2 Kvantové detektory infračerveného záření

Kvantové detektory pracují na odlišném principu než tepelné detektory. Při dopadu záření dochází ke generaci páru elektron – díra. Tento jev probíhá pouze za určitých podmínek - při teplotách vyšších než absolutní nula a pokud je energie dopadajících fotonů (W_f) větší nebo rovna energii šírce zakázaného pásu (W_g) ($W_f \geq W_g$). Kvantové detektory mohou být vyrobeny z vlastní polovodiče (tzv. intrinsický detektor) nebo z nevládního polovodiče (tzv. extrinsický detektor). Nejběžněji se využívají v termovizních kamerách, stejně jako bolometrické detektory. [2], [4]

2.4.2.1 Intrinsické detektory (fotorezistor)

Pracují na principu změny pohyblivosti nosičů nábojů při dopadu fotonů na polovodičovou vrstvu. Intrinsické detektory vyžadují elektrické pole, které je vytvořeno pomocí vnějšího napětí. [2]



Obr. 6 Kvantový detektor - fotorezistor [2]

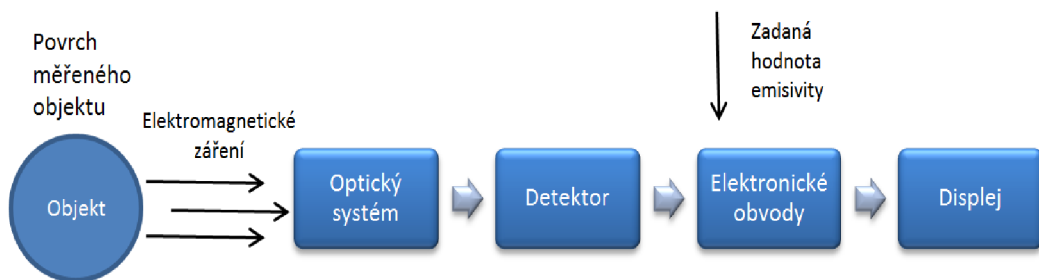
2.4.2.2 Extrinsický detektor (fotodioda)

Tyto detektory jsou vyrobeny z nevládních polovodičů. Jejich princip je založen na PN struktuře a hustota nosičů nábojů je dána koncentrací příměsí. Fotodiody mohou pracovat ve dvou různých módech. Buď ve fotovodivostním, kdy se dioda chová jako

rezistor, jehož odpor klesá s intenzitou ozáření nebo ve fotovoltaickém režimu, kdy se dioda chová jako zdroj elektrické energie. Výhodou fotovodivostních detektorů je větší citlivost oproti fotovoltaickým detektorům, ale mají pomalejší odezvu na rychlé změny toku záření. [1], [2]

2.5 Pyrometry

Pyrometry jsou bezdotykové teploměry, které měří teplotu na základě elektromagnetického záření, které vydává měřený objekt. Postupem času vzniklo mnoho druhů pyrometrů. Součástí pyrometrů jsou detektory, které jsou popsány výše a optický systém (soustava čoček či zrcadel).



Obr. 7 Uspořádání pyrometru

2.5.1 Úhrnné pyrometry

Jsou jedny z konstrukčně nejjednodušších a většinou nejlevnějších pyrometrů a někdy bývají také označovány jako radiální pyrometry. Pro měření teploty využívají Stefan-Boltzmannova zákona, tj. dokáží vyhodnocovat záření v celém spektru vlnových délek, proto se nejčastěji při jejich konstrukci používají tepelné detektory. Šířka vlnového pásma, kterou jsou schopny úhrnné pyrometry měřit, závisí na použitém optickém systému, který se skládá ze soustavy čoček nebo zrcadel. Úhrnné pyrometry umožňují měřit teplotu v rozsahu -40°C až $+2500^{\circ}\text{C}$. Často mívají menší citlivost a horší dynamické vlastnosti. [2], [7]

2.5.2 Monochromatické pyrometry

Monochromatické pyrometry teoreticky měří teplotu jen pro nekonečně úzkou šíři vlnového pásma, ale v praxi nelze vyrobit takový pyrometr, proto monochromatické pyrometry měří vždy ve velmi úzkých vlnových pásmech. Vlnové délky, které bude schopen monochromatický pyrometr měřit, jsou dány spektrální propustností použitého filtru, spektrální posloupností použité optiky a spektrální citlivostí detektoru. Pro vyšší teploty ($500-3500^{\circ}\text{C}$) se používají monochromatické pyrometry pro kratší vlnové délky. Pro nižší teploty (od -45°C) se používají pyrometry pro delší vlnové délky. Díky tomu, že monochromatické pyrometry měří pouze úzké pásmo vlnových délek, jsou dnes spíše na ústupu. [4]

Monochromatické pyrometry existují v provedení, kdy jsou schopny si samy zjistit hodnotu emisivity měřeného materiálu. Tento pyrometr je vybaven laserem a princip spočívá v tom, že se první změří zář měřeného materiálu a poté zář materiálu ozářeného laserem.

Pomocí mikroprocesoru je následně vypočítána hodnota emisivity vztahem:

$$\varepsilon = 1 - \frac{L_{\lambda 2} - L_{\lambda 1}}{2L_L} \quad (4)$$

kde $L_{\lambda 2}$ je zář materiálu neosvíceného laserem, $L_{\lambda 1}$ je zář materiálu osvíceného laserem a L_L je zář samotného laseru.

2.5.3 Vícepásmové pyrometry

Vícepásmové pyrometry pracují na podobném principu jako monochromatické pyrometry, ale jsou schopny měřit větší šíři pásma vlnových délek. Šířka pásma vlnových délek, které jsou schopny měřit, je dána použitým optickým systémem. Šířka pásma záleží také na použitém detektoru. Nejčastěji se používají kvantové detektory. [4]

Příklady používaných detektorů: germaniové fotodiody, které detekují vlnové délky 0,4-1,8 μm , křemíkový fotočlánek, který detekuje vlnové délky 0,6-1,8 μm a PbS fotoodpor, který detekuje vlnové délky 0,5-3,6 μm . [4]

2.5.4 Poměrové pyrometry

Poměrové pyrometry vyhodnocují teplotu na základě poměru dvou intenzit záření o dvou různých vlnových délkách. Jsou kalibrovány na teplotu absolutně černého tělesa, při níž je poměr intenzity pro dvě různé vlnové délky stejný, jako poměr intenzity u reálného měřeného tělesa. Z Planckova zákona lze odvodit, že poměr dvou intenzit vyzařování je zcela jednoznačný a pro každou teplotu jiný, díky tomu je tento způsob měření nezávislý na hodnotě emisivity. Nejčastěji se používají kvantové detektory. Tyto pyrometry jsou vhodné pro měření vyšších teplot a pro měření, kde se mění hodnota emisivity měřeného objektu. [2], [4], [5]

2.5.5 Jasové pyrometry

Jasové pyrometry využívají k měření teploty jen velmi úzké spektrální pásmo. Nejčastěji se využívá záření o vlnové délce 0,65 μm , což odpovídá červené barvě světla. Jasové pyrometry pracují na principu porovnávání září z měřeného objektu a ze srovnávacího zdroje.

Srovnávacím zdrojem bývá většinou pyrometrická wolframová žárovka. Na žárovku se přivede napětí a pomocí reostatu měníme hodnotu odporu do té doby, než záře z žárovky splyne se září měřeného objektu. Paralelně k žárovce je zapojen magneto-elektrický měřič, ze kterého odečteme hodnotu teploty. Srovnání září se většinou provádí pouhým okem, což hraje značnou roli v přesnosti měření. Jasové pyrometry se používají do teplot 1500 $^{\circ}\text{C}$, po přidání tzv. šedého filtru, až do hodnot 3500 $^{\circ}\text{C}$. Šedý filtr nám zaručuje stálost a přesnost údajů i při vyšších teplotách.

Další možností srovnávacího zdroje je optická clona. Ta absorbuje dopadající záření z měřeného objektu a hodnota absorpce je úměrná teplotě měřeného objektu. [4]

2.6 Termografie

V praxi je někdy nutné znát teplotní pole celého tělesa anebo zkoumat dynamický vývoj teplotního pole celého tělesa. V termografii se využívá stejných optických systémů a detektorů jako u pyrometrů. [4]

2.6.1 Fotografické materiály pro snímání teplotních polí

Jedním z nejstarších způsobů snímání teplotních polí je pomocí fotografických snímků, které jsou citlivé na infračervené záření. Využívá se zde černobilých snímků citlivých na infračervené světlo a propustnosti optických skel fotoaparátu. Před objektiv se umístí filtr, který odfiltruje záření viditelného světla. Tudiž k osvětlení filmu dojde pouze pomocí infračerveného záření. Na filmu se zobrazí požadované teplotní pole, kde teplá místa jsou vyobrazena černou barvou. Míra zčernání nám určuje teplotu tělesa. K určení hodnoty teploty je třeba ke snímanému objektu přidat referenční bod o známé teplotě. V praxi se většinou přidávají dva body blízké nejvyšší a nejnižší teplotě. [4]

2.6.2 Termovize

Slouží k zobrazování teplotních polí celého objektu pomocí termovizních kamer. Tyto kamery pomocí vestavěného detektoru infračerveného záření zobrazí na své obrazovce nebo na obrazovce počítače výsledný termovizní snímek – tzv. termogram. Termovizní snímek může být buď černobilý, nebo barevný, kdy jsou jednotlivým rozmezím teplot přiřazovány různé barvy nebo různé odstíny, v případě černobilých snímků. Protože termovizní kamery pracují v oblasti nebarevného světla (nelze vidět okem), je přiřazování barev pro různé teploty vytvořeno uměle a závisí na výrobci. Měřicí rozsah termovize je okolo $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $2000\text{ }^{\circ}\text{C}$ s rozlišitelností až $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$. [4], [8]

Termovizní kamery můžeme rozdělit do různých skupin podle různých kritérií. Nejčastější rozdělení bývá pomocí způsobu zobrazování, kde rozlišujeme kamery s opticko-mechanickým rozkladem obrazu (scannery) a kamery s maticovým detektorem. V dnešní době už se kamery s opticko-mechanickým rozkladem téměř nevyrábějí. Dále můžeme kamery rozdělit podle způsobu chlazení na kamery s nechlazeným detektorem a kamery s chlazeným detektorem, které jsou přesnější. Dále by se daly kamery dělit na krátkovlnné ($2\text{ }\mu\text{m}$ až $5\text{ }\mu\text{m}$) a dlouhovlnné ($7\text{ }\mu\text{m}$ až $13\text{ }\mu\text{m}$) atd. [2],[8]

Opticko-mechanické detektory provádí snímání jednotlivých bodů pomocí optické osy. Dráha rozkladu záření se provádí pomocí otočných hranolů nebo zrcadel. [2]

Pro systémy bez rozkladu se používají maticové detektory, které jsou tvořeny FPA (Focal Plane Array) maticí infračervených senzorů. Nejčastěji se používají mikrobolometrické detektory (nevyžadují chlazení) anebo kvantové FPA detektory. FPA detektory vyžadují ke své funkci chlazení. Chlazení se provádí Stirlingovým chladičem, což je hermeticky uzavřený systém s tekutým heliem a dvěma písty, který pracuje na principu kompresorové mikrochladičky. Nebo se chlazení provádí termoelektrickým chladičem, který pracuje na principu Peltierova jevu. Principem

Peltierova jevu je průchod proudu uzavřeným obvodem, který je zhotoven ze 2 vodičů z různého materiálu. Mezi stykovými plochami vzniká teplotní rozdíl. [2], [9]

2.6.2.1 Využití termovize

Termovizní kamery mají velkou škálu využití. V energetice se využívají k diagnostice stavu izolace vedení vysokého napětí, ve stavebnictví ke kontrole tepelné izolace budov, v hutnictví ke kontrole vyzdívky pece, v elektrotechnice například umožňují sledovat teplotu pláště elektromotoru atd.

Velkou roli hraje termovize v lékařství. Pomocí termovize je možné určit výskyt nádoru nebo zánětu. Nádorové nebo zánětlivé onemocnění má vyšší teplotu než je teplota zdravého lidského těla, a proto je možné odhalit toto onemocnění pomocí termovizní kamery. Avšak termovize má využití i v dalších oborech zdravotnictví, jako např. fyzioterapie, veterinářství, ortopedie a zubní lékařství. [10]

Termovize umožňuje detekovat defekty uvnitř materiálu. Pro tuto detekci se používají dvě metody:

Pulzní termografie

Principem pulzní termografie je ozáření diagnostikovaného objektu pomocí externího zářiče, který na objekt vysílá simulační pulzy, tím dojde ke zvýšení teploty uvnitř objektu. Doba trvání simulačních pulzů závisí na materiálu měřeného objektu – závisí na tepelné vodivosti materiálu. Po ukončení simulačních pulzů dochází k ochlazení objektu. Během celého procesu je povrch objektu snímán termovizní kamerou. Pokud se nalézá defekt s rozdílnou tepelnou kapacitou a tepelnou vodivostí uvnitř měřeného objektu, projeví se tento defekt v určitém časovém okamžiku na povrchové teplotě objektu. [2]

Lock-in termografie

Principem této termografie je modulace tepelného toku. Po celou dobu simulace je těleso vystaveno tepelnému vlnění (obvykle sinusovému). Tepelná vlna proniká dovnitř tělesa a v místě defektu dochází k jejímu odražení zpět k povrchu tělesa. Na povrchu tělesa dojde k interferenci s primárním vlněním. [2]

2.7 Nejistoty a chyby v pyrometrii

Pro správné bezkontaktní měření teploty je třeba znát určité údaje o měřeném objektu nebo je třeba nastavení vhodných podmínek pro měření. Nedodržením těchto podmínek nebo neznalostí některých údajů o měřeném objektu mohou vzniknout chyby v měření. Tyto nejistoty v měření lze považovat za nevýhody bezkontaktního měření teploty. Kromě těchto nejistot jsou nevýhodami bezkontaktního měření vyšší pořizovací cena a po určitém čase opakovaná kalibrace.

2.7.1 Nejistoty měření vlivem chybné emisivity

Nejistota vlivem chybné emisivity patří k nejčastějším nepřesnostem při bezkontaktním měření teploty. U monochromatických pyrometrů způsobuje chybné nastavení emisivity menší nejistotu než u pyrometrických nebo pásmových pyrometrů. Je to způsobeno tím,

že monochromatické pyrometry měří nejužší pásmo vlnových délek. To znamená, že nejistota vlivem chybné emisivity je závislá na šíři pásma vlnových délek, které daný pyrometr měří. Správnou hodnotu emisivity lze stanovit více způsoby. [2]

1. Vyhledání v tabulkách emisivit

V tabulkách můžeme nalézt hodnoty emisivit pro různé materiály. V některých tabulkách je uvedeno, pro které vlnové délky je tato emisivita konstantní. To nám může pomoci při výběru vhodného pyrometru. Jiné tabulky zase uvádí, pro které teploty platí uvedená emisivita. V tabulkách také může, pro daný materiál, být více hodnot emisivit, protože záleží na povrchové úpravě materiálu nebo na barvě materiálu. Tento způsob stanovení emisivity je třeba brát s rezervou, protože podle tabulek sice zjistíme hodnotu emisivity pro daný materiál, ale v praxi může mít materiál jinou povrchovou úpravu (než podle tabulek) a hodnota emisivity bude rázem jiná. [5]

2. Za pomoci dotykového teploměru

Pomocí dotykového teploměru změříme teplotu materiálu, u kterého hledáme hodnotu emisivity. Poté na bezdotykovém teploměru postupně nastavujeme hodnoty emisivity, dokud nebude teploměr ukazovat naměřenou teplotu. Existují pyrometry, které jsou vybaveny dotykovým teploměrem. Ten se přiloží na materiál, u kterého hledáme hodnotu emisivity, změří teplotu a automaticky vypočítá hodnotu emisivity. [2], [5]

3. Pomocí materiálu se známou hodnotou emisivity

Na část materiálu nalepíme speciální samolepku, u které známe hodnotu emisivity. Na pyrometru nastavíme hodnotu emisivity samolepky a změříme teplotu. Poté zaměříme pyrometr na část povrchu, u které hledáme hodnotu emisivity. Na pyrometru nastavujeme hodnoty emisivity do té doby, kdy se bude teplota shodovat s teplotou naměřenou na samolepce. Tento postup je vhodný zejména pro nižší teploty (do 250 °C). Místo samolepky je také možné část povrchu začernit pomocí laku nebo sazí, u kterých známe hodnoty emisivity. [2], [5]

4. Pomocí vyvrtaného otvoru

Do měřeného objektu vyvrtáme díru, jejíž hloubka bude alespoň 6x větší než průměr. Na pyrometru nastavíme hodnotu emisivity na $\varepsilon=1$ a změříme teplotu uvnitř díry. Poté opět zaměříme pyrometr na povrch tělesa a měníme hodnotu emisivity do té doby, dokud se nebude teplota shodovat s teplotou naměřenou uvnitř díry. Teplotu uvnitř díry měříme tak, aby plocha, kterou měří pyrometr, byla menší než průměr díry. Plochu, kterou pyrometr z dané vzdálenosti měří, nám udává optické rozlišení D:S. Podmínkou tohoto měření je také, aby teplota uvnitř objektu byla shodná s teplotou na povrchu objektu. [2]

2.7.2 Nejistota měření způsobená nerespektováním propustnosti prostředí

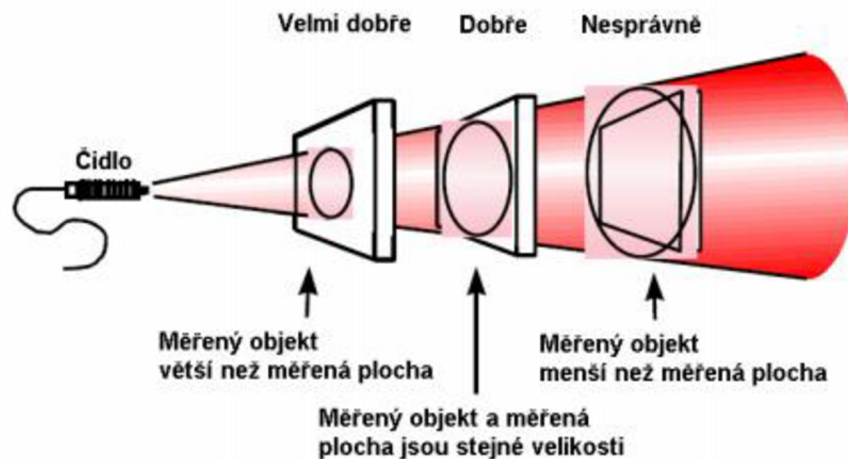
Tato nejistota se projevuje zejména při větších vzdálenostech mezi pyrometrem a měřeným objektem (např. ve stavebnictví při kontrole tepelné izolace). Zeslabení zářivého toku je jednak způsobeno přímou absorpcí okolní atmosféry a jednak se část infračerveného záření rozptýlí na aerosolech, molekulách plynu, částicích plynu atd. [5]

2.7.3 Nejistota způsobená nerespektováním odraženého záření

Při dopadu zářivého toku na detektor pyrometru dojde k jeho pohlcení, ale i částečnému odrazu. Tento odražený zářivý tok opět dopadá na měřený objekt, kde opět dochází k jeho částečnému odrazu. Detektor poté detekuje jednak zářivý tok z měřeného objektu, ale i svůj vlastní odražený zářivý tok. Podobně mohou měření ovlivnit i okolní objekty, jejichž emisivita není nulová. Významnou roli může hrát i proudění, které způsobuje ztrátu tepla na povrchu měřeného objektu. [2], [5]

2.7.4 Nejistota měření nerespektováním optického rozlišení D:S

Každý výrobce pyrometrů udává optické rozlišení D:S. Je nutné dodržet toto optické rozlišení, pokud by měřená plocha byla větší, než je měřený objekt, měřili bychom, kromě teploty objektu, i teplotu za objektem. Proto je nutné, aby měřený objekt vyplňoval celou měřenou plochu. [11]



Obr. 8 Jak správně měřit objekt [5]

Většina pyrometrů je vybavena zaměřovacím laserem (některé starší pyrometry měly zaměřovací dalekohled). Laser bývá buď zabudovaný v přístroji anebo je externí součástí přístroje. Laser pomáhá jednak, aby měřený objekt pokrýval celou měřenou plochu a jednak výrazně pomáhá pro zaměření pohybujících se objektů. Laserový paprsek může mít různé provedení. [11]

- Laserový paprsek s odsazením optické osy – používá se v přístrojích s menším optickým rozlišením. Není vhodný pro měření malých vzdáleností.
- Koaxiální laserový paprsek – ukazuje střed měřeného místa při každé vzdálenosti.
- Dvojitý laser – dvojice bodů udává průměr měřené plochy. Uživatel tedy nemusí počítat velikost měřené plochy.
- Kruhový laser s posunem optické osy – tento laser ukazuje větší plochu, než pyrometr skutečně měří a skutečná měřená plocha leží uvnitř kruhu vytvořeného laserem.
- 3-bodové koaxiální zaměrování – laser promítne 3 body v řadě. Prostřední určuje střed a krajní průměr měřené plochy.

2.8 Výhody bezkontaktního měření teploty

Bezdotykové měření má oproti kontaktnímu měření teploty řadu výhod. Jednou z hlavních výhod je rychlost měření. Měřená hodnota je oproti kontaktnímu měření teploty změřena velice rychle, řádově v ms. Díky tomu také dokáže měřit velmi rychlé změny teploty. Další výhodou je možnost měřit objekty v pohybu, rotující objekty nebo měřit objekty z bezpečné vzdálenosti (vysokonapět'ová elektrická zařízení, zařízení s vysokou teplotou atd.). Bezkontaktní měření má zanedbatelný vliv měřící techniky na měřený objekt, tzn. z měřeného objektu není odebírána žádná tepelná energie. Např. u materiálů, které špatně vedou teplo (např. dřevo nebo plasty) je bezdotykové měření velmi přesné a bez zkreslení v porovnání s dotykovým měřením. Další výhodou je, že nedochází k mechanickému působení na povrch měřeného objektu a nedochází k mechanickému opotřebení povrchu. Je možno měřit i velmi měkké povrchy. Je možné měřit a dále digitálně zpracovávat povrchové teploty celých objektů. [5], [11]

2.9 Využití v praxi

Bezkontaktní měření teploty se většinou využívá tam, kde není vhodné použití kontaktního měření nebo se využívá pro měření na místech, kde hrozí nebezpečí úrazu (např. elektrickým proudem, vysokými teplotami).

Teplota uvnitř pecí

Pyrometry se často používají pro měření teploty uvnitř pecí. Při měření teplot pomocí termočlánků dochází k ovlivnění měření vlivem chemické koroze uvnitř pece a navíc reagují pomalu na změnu teploty. Pyrometry tyto problémy nemají. Reagují velmi rychle na změnu teploty a při použití vhodných detektorů se vyznačují i vysokou citlivostí.

Kontrola částí za provozu

Menší přenosné pyrometry se používají pro kontrolu části za provozu. Mohou např. kontrolovat přehřívající se ložiska, kontakty a řemeny u kompresorů, čerpadel a motorů. Pravidelné kontroly mohou prodloužit životnost těchto přístrojů a zároveň zvýšit produktivitu celého systému.

Kontrola výměníků tepla

Pyrometry se také využívají pro velmi rychlou a také přesnou kontrolu tepelných výměníků. Umožňují měřit povrchovou teplotu a tím lze odhalit, zda nedochází např. k úniku tepla, korozi, erozi anebo zeslabení stěn. Výhodou je, že lze provést kontrolu velmi rychle a nemusí dojít k odstávce zařízení.

Kontrola elektrických zařízení

Postupem času dochází u elektrických součástek ke korozi nebo se mění jejich elektrické vlastnosti, tím dochází ke změně elektrického odporu a následně ke zvýšení teploty. Většinou dochází ke zvýšení povrchové teploty postupně, dříve než dojde

k poruše. Z toho vyplývá, že pravidelné kontroly umožní odhalení závady ještě před poruchou zařízení.

Kontrola stavu žáruvzdorných hmot a izolací

Kontrola žáruvzdorných hmot a izolací je založena na teorii, že objemová teplota uvnitř izolace je v celém objemu stejná a povrchová teplota je přímou funkcí vedení tepla přes izolační vrstvu a vnější stěnu. Objeví-li se v izolační vrstvě trhлина nebo jiná závada, dochází ke zvýšení povrchové teploty, která je úměrná dané závadě. Ke zvýšení povrchové teploty dochází v místě, kde se nachází závada.

Praktická část

3 Popis použitých přístrojů

V následující kapitole jsou srovnány, popsány a uvedeny parametry, které byly použity během experimentu nebo během kalibrace. K experimentu a kalibraci bylo použito přístrojů dostupných v laboratořích Fakulty elektrotechniky a komunikačních technologií v Brně.

3.1 Ruční bezdotykový teploměr Dostmann Proscan 530

Pro provedení experimentu a poté k následné kalibraci byl použit bezdotykový ruční teploměr Dostmann Proscan 530. Tento teploměr je vybaven digitálním LCD displejem, který ukazuje aktuální teplotu. Kromě aktuální teploty může dále zobrazovat minimální, maximální, průměrnou nebo diferenční hodnotu (rozdíl mezi maximální a minimální teplotou). Pyrometr umožňuje nastavit hodnoty emisivity od 0,1 až po 1,1. Umožňuje měřit teplotu v rozsahu $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ s přesností vstupu termočláunku $\pm 0,75\text{ }^{\circ}\text{C}$ nebo $\pm 1,0\text{ }\%$ podle toho, která z hodnot nepřesnosti je vyšší. Přístroj k měření využívá infračervené záření o vlnových délkách 8 až $14\text{ }\mu\text{m}$. Optické rozlišení je 75:1 (D:S). Přístroj má možnost přepínat optické systémy a to buď na standardní ohnisko, nebo blízké ohnisko. V režimu SF (Standard Focus neboli standardní ohnisko) je možné měřit objekty větší než 16mm. Po přepnutí do režimu CF (Close Focus neboli blízké ohnisko) je možné měřit objekty větší než 1mm. Tento mód je např. vhodný pro měření teploty SMD součástek. Podle zvoleného optického systému se také liší laser, který ukazuje měřenou plochu. Měřená plocha může být zobrazena pomocí laserového kříže nebo pomocí dvojice bodů.



Obr. 9 Ruční IR teploměr DostmannProscan 530 [12]

3.2 Ruční bezdotykový teploměr Greisinger GIM530MS

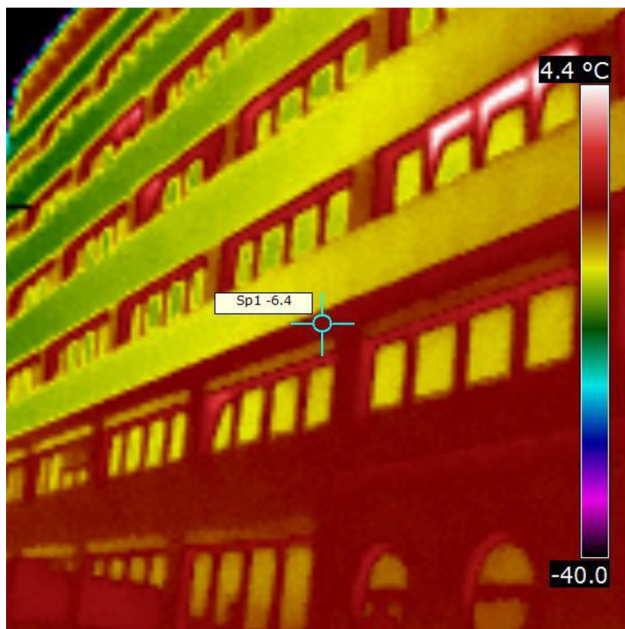
Pro kalibraci byl také použit bezdotykový ruční teploměr GIM530MS. Přístroj je rozměrově menší než výše uvedený pyrometr. Optické rozlišení přístroje je 20:1. Je schopný měřit teploty v rozsahu -32 °C až 530 °C s přesností $\pm 1\text{ °C}$ nebo $\pm 1\%$ podle toho, která z hodnot nepřesnosti je vyšší. Stejně jako výše uvedený pyrometr měří v rozsahu vlnových délek 8 až $14\text{ }\mu\text{m}$ a je schopný zobrazit maximální a minimální naměřenou hodnotu. Nastavení emisivity je možné v rozsahu 0,1 až 1. Přístroj obsahuje také jednobodový laser, který určuje střed měřené plochy.



Obr. 10 Bezdotykový ruční teploměr GIM530MS [13]

3.3 Termokamera Flir i7

Kromě infračervených měřičů teploty byla pro kalibraci použita také termokamera Flir i7. Tato termokamera také umožňuje nastavení emisivity a to v rozsahu 0,1 až 1. Na rozdíl od výše uvedených pyrometrů umožňuje vybrat materiál (z materiálů definovaných výrobcem) a tím dojde automaticky k nastavení emisivity materiálu. Flir i7 měří v rozsahu teplot -20 °C až 250 °C s přesností $\pm 2\text{ °C}$ nebo $\pm 2\%$ podle toho, která nepřesnost je vyšší. Kamera umožňuje snímat obraz ve třech různě barevných módech. Na výběr je z černobílého provedení, provedení v barvách duhy (tzv. rainbow mode) nebo v provedení železa (tzv. iron mode). Poslední zmiňovaný mód je v podstatě zobrazení pomocí odstínů modré a oranžové barvy. Pomocí programu od výrobce (FLIR Quick Report) je možné snímky dále upravovat. Program umožňuje výběr z více barevných provedení, ale také nám poskytne více informací o měřeném objektu (např. zobrazení teploty na různých bodech snímku). Umožňuje také dodatečně změnit emisivitu a přepočítat teplotu nebo exportovat naměřená data do Microsoft Excel.



Obr. 12 Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně zachycená termokamerou Flir i7



Obr. 11 Termokamera Flir i7 [14]

3.4 Přenosný kalibrátor BB500

Pro kalibraci infračervených měřičů teploty a termokamery byl použit přenosný kalibrátor BB500. Základem tohoto přístroje je kovový kužel, který je pokryt vrstvou oxidu s emisivitou 0,95. Přístroj je schopný měřit teploty v rozsahu 50 °C až 500 °C a přesnost závisí na nastavené teplotě. Pro teploty do 100 °C měří s přesností $\pm 0,8$ °C, pro teploty 100-200 °C s přesností $\pm 1,6$ °C a pro teploty 200-500 °C s přesností $\pm 2,8$ °C.



Obr. 13 Přenosný kalibrátor BB500 [15]

3.5 Porovnání měřičů teploty

V následující kapitole bylo provedeno srovnání technických parametrů použitých přístrojů dle technických listů jednotlivých výrobců. V tabulce 1 jsou uvedeny základní parametry, které jsou rozhodující pro výběr vhodného měřidla a zároveň udávají parametry umožňující srovnat jednotlivé přístroje. Jedná se o srovnání dvou IR měřičů teploty a jedné termokamery.

Tabulka 1 Srovnání základních parametrů použitých měřičů teploty

Název	rozsah emisivity	teplotní rozsah	rozsah IR spektra	přesnost	poměr D:S	rozlišení displeje
Dostmann Proscan 530	1,1 - 0,1	-35 °C – 900 °C	8 – 14 μm	$\pm 0,75$ °C nebo $\pm 1,00$ %	75:1	0,1°C
Greisinger GIM530MS	1 - 0,1	-32 °C – 530 °C	8 – 14 μm	$\pm 1,00$ °C nebo $\pm 1,00$ %	20:1	0,1°C
TermokameraF lir i7	1 - 0,1	-20 °C – 250 °C	7,5 – 13 μm	$\pm 2,00$ °C nebo $\pm 2,00$ %	-	0,1°C nad 100°C pouze 1°C

Z uvedeného srovnání vyplývá, že přístroj Dostmann Proscan 530 má dle udaných technických parametrů větší přesnost měření, rozsah měřených teplot a optické rozlišení, než přístroj Greisinger GIM530MS. Lze jej tedy použít pro širší spektrum aplikací a rozsahy měřených teplot.

4 Provedení experimentu

Účelem experimentu bylo sledování vlivu emisivity na měřenou teplotu. K experimentu byly vybrány tři druhy materiálu:

Zdivo – cihlová zeď s omítkou bílé barvy.

Měď – válcovaný plech, tabule o rozměrech přibližně 1 m x 0,7 m. Povrch plechu byl tmavohnědé barvy, což značí známku oxidace.

Nikl – válcovaný plech, tabule o rozměrech přibližně 1 m x 1 m. Povrch materiálu byl mírně matný, což vypovídalo o oxidaci materiálu.

Postup měření:

K měření byl vybrán pyrometr Dostmann Proscan 530 z důvodů lepších parametrů měření udávaných výrobcem. U každého materiálu bylo měření provedeno od hodnoty emisivity 0,95 až do hodnoty 0,1 s krokem měření 0,05.

Tabulka 2 Vliv emisivity na měřenou teplotu

	zdivo	měď	nikl
Emisivita	Teplota [°C]	Teplota [°C]	Teplota [°C]
0,95	22,9	20,4	23
0,9	22,8	19,5	22,7
0,85	22,7	19	22,6
0,8	22,5	18,7	22,5
0,75	22,4	18	22,1
0,7	22,1	17,7	22
0,65	22,1	17,4	22
0,6	21,7	16	21,7
0,55	21,4	14,8	21
0,5	20,6	13,7	20,6
0,45	19,6	10,8	19,5
0,4	18,6	9,3	18,3
0,35	16,5	7,4	16,7
0,3	13,8	5,2	12,7
0,25	10,3	1,3	9,6
0,2	6,7	-2,1	4,7
0,15	-2,5	-7,2	-4,7
0,1	-21	-15,5	-27,3

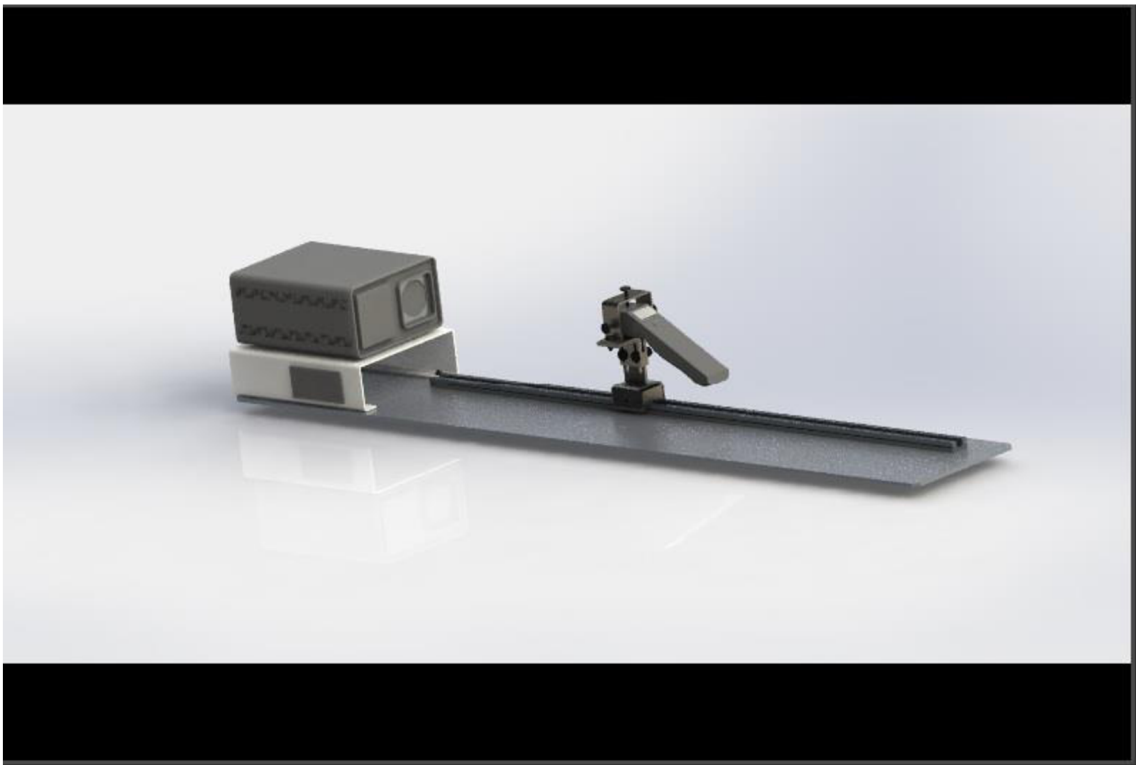
Z tabulky je patrné, že při bezkontaktním měření teploty je pro dosažení správných hodnot měřené teploty rozhodující určení hodnoty emisivity měřeného materiálu.

5 Sestavení laboratorního pracoviště

Z teoretické části a během semestrálního projektu vyplynulo zjištění, že během kalibrace má vzdálenost pyrometru od kalibračního přístroje zásadní vliv na výsledek kalibrace. Z tohoto důvodu bylo sestaveno laboratorní pracoviště, které umožňuje provést objektivní kalibraci vybraných IR měřičů teploty.

5.1 Sestavení pracoviště v programu SolidWorks

Před objednáním příslušných komponent byl sestaven model laboratorního pracoviště v programu SolidWorks. Model se skládá z přenosného kalibrátoru, který byl vymodelován podle kalibrátoru BB 500, který je dostupný na Fakultě elektrotechniky a komunikačních technologií, dále se model skládá z pyrometru GIM530MS, také dostupného na fakultě, podstavce pod kalibrátor, který zajišťuje, aby kalibrátor byl ve stejné výšce jako hlava pyrometru. Dále model obsahuje lineární vedení, které vodi magnetický snímač, který snímá vzdálenost pyrometru od kalibrátoru. V poslední řadě model obsahuje držák, ve kterém je uchycen pyrometr. Tento držák byl vymodelován částečně univerzální, aby se do něj mohlo uchytit více druhů pyrometrů.

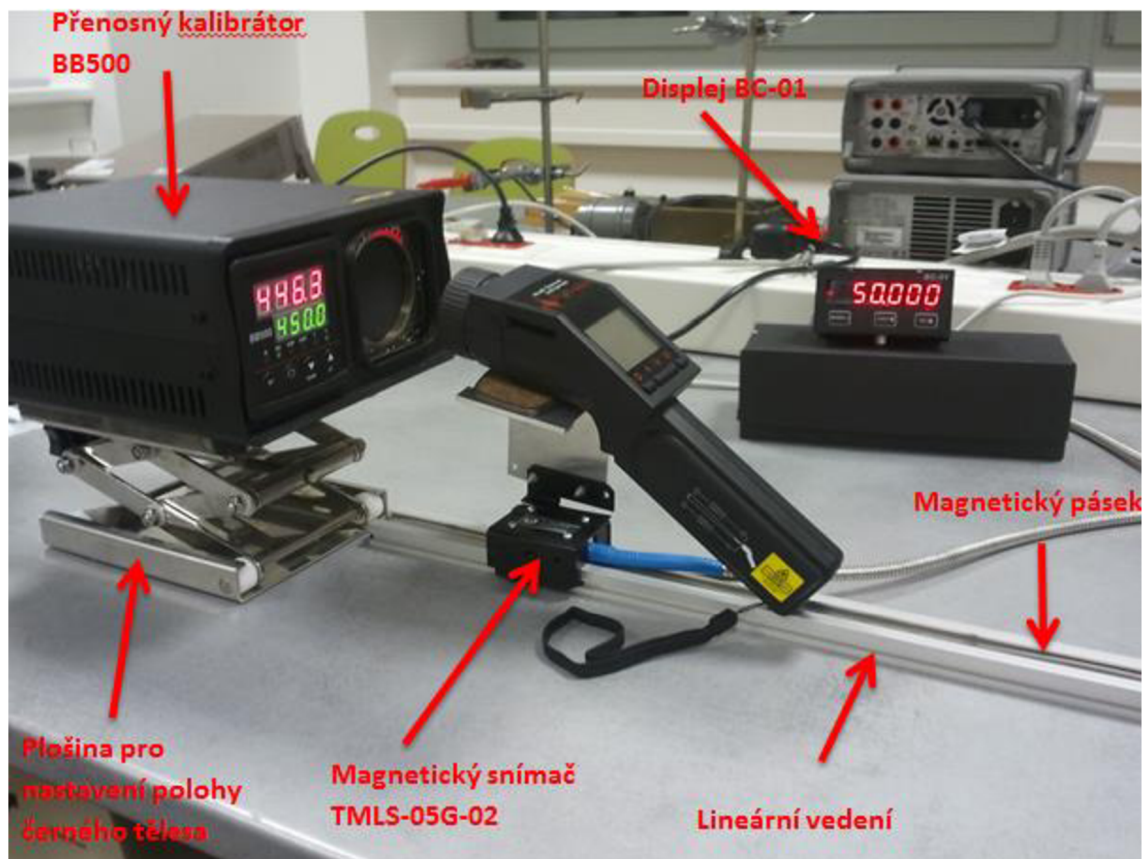


Obr. 14 Model laboratorního pracoviště pro kalibraci v programu SolidWorks

5.2 Skutečná podoba laboratorního pracoviště

Na základě modelu, který je uveden výše, bylo sestaveno skutečné laboratorní pracoviště, které by umožňovalo objektivní kalibraci IR měřičů teploty.

Jednou z hlavních částí pracoviště je přenosný kalibrátor BB500, který je umístěn na plošině, která má nastavitelnou výšku. Výšku je třeba nastavit tak, aby kalibrovaný IR měřič teploty mířil do středu absolutně černého tělesa a aby výsledek kalibrace nebyl ovlivněn prostředím kolem černého tělesa. Další částí pracoviště je vedený magnetický snímač s označením TMLS-05G-02. Tento snímač detekuje svoji polohu na základě magnetického pásu, který je umístěný uvnitř lineárního vedení. Toto lineární vedení slouží jako vodič magnetického snímače. Na magnetický snímač byl namontován držák, do kterého se uchytil kalibrovaný IR měřič teploty. Magnetický snímač je pomocí přívodního kabelu připojen k displeji. Jedná se o digitální displej s označením BC-01, který je schopen zobrazovat hodnotu s přesností na 3 desetinná místa. Digitální displej slouží také k určení referenčního bodu snímače, tedy bodu, od kterého bude snímač odměřovat vzdálenost. V případě tohoto laboratorního pracoviště byl tento referenční bod nastaven shodně s polohou absolutně černého tělesa.



Obr. 15 Ukázka laboratorního pracoviště

6 Kalibrace přístrojů pro bezkontaktní měření teploty

Další část měření byla zaměřena na kalibraci přístrojů pro bezkontaktní měření teploty. Kalibrovány byly dva bezkontaktní IR měřiče teploty typu Dostmann Proscan 530, Greisinger GIM530MS a termokamera Flir i7. Přístroje byly kalibrovány pomocí přenosného kalibrátoru BB500.

Protože vzdálenost pyrometru od kalibrátoru má značný vliv na hodnotu naměřené teploty, byla kalibrace provedena při třech různých vzdálenostech. Jednalo se o vzdálenosti 5, 10 a 15 cm. Termokamera Flir i7 neprojevovala závislost na vzdálenosti od kalibrátoru, jako zbývající dva pyrometry, proto byla kalibrována pouze při jedné vzdálenosti. Výrobce přenosného kalibrátoru BB500 udává nejnižší stabilní teplotu černého tělesa 50 °C a maximální teplotu černého tělesa 500 °C, proto byla kalibrace provedena od teploty 50 °C po teplotu 500 °C s krokem 50 °C. Výjimkou byla pouze termokamera Flir i7, jejíž maximální měřitelná teplota je 250 °C, tudíž byla kalibrace termokamery provedena pouze po teplotu 250 °C.

Výsledky kalibrace jsou uvedeny v příloze v tabulkách 3 a 4.

Kalibrace byla provedena při těchto atmosférických podmínkách:

Teplota okolí: 25,1 °C

Tlak: 976 hPa

Vlhkost: 42,5 %

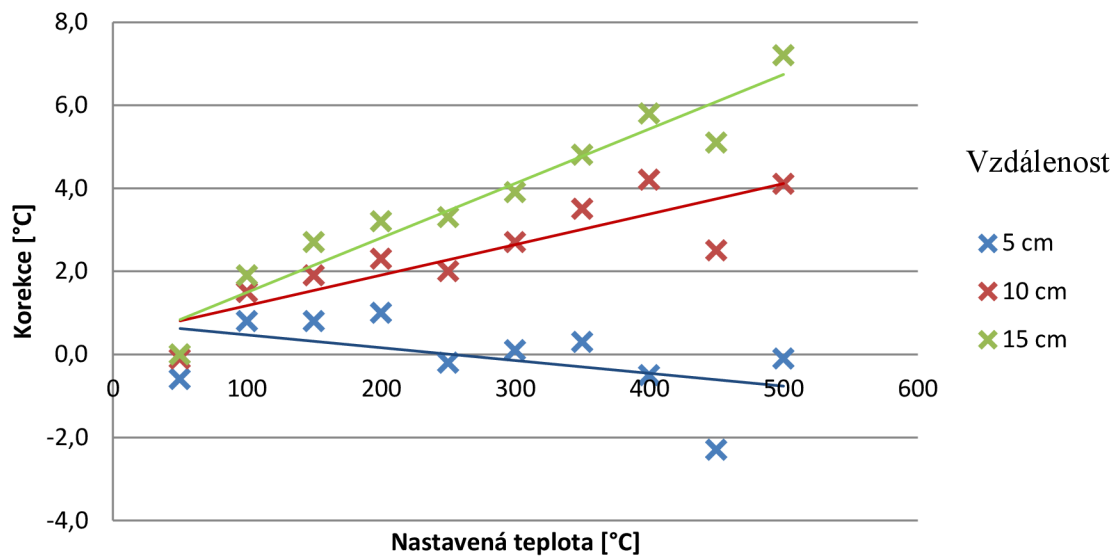
Teplota rosného bodu: 11,2 °C

Hodnoty korekce jsou uvedeny v příloze v tabulkách 5 a 6.

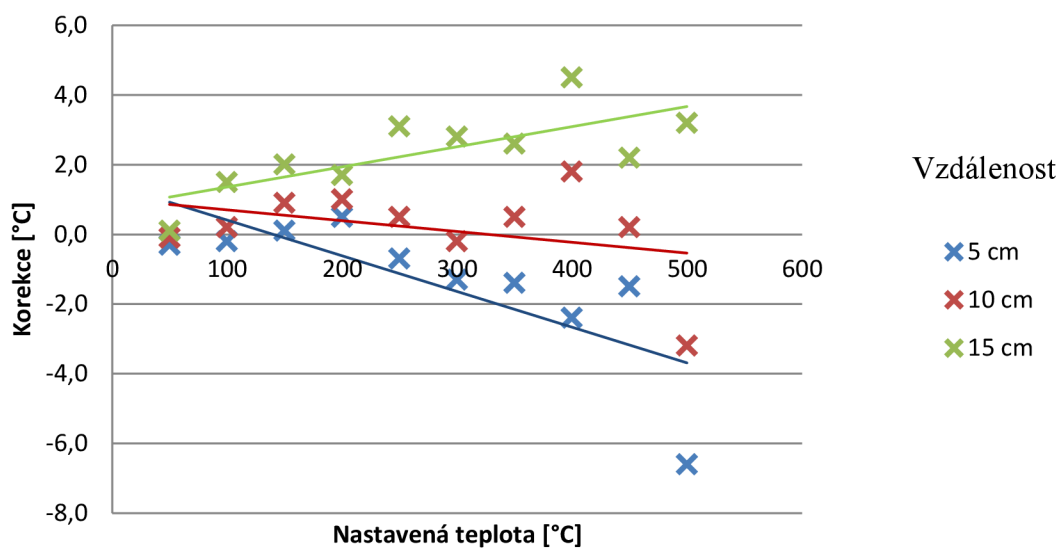
Výpočet korekce:

$$K = t_{ref} - t_{nam} \quad (5)$$

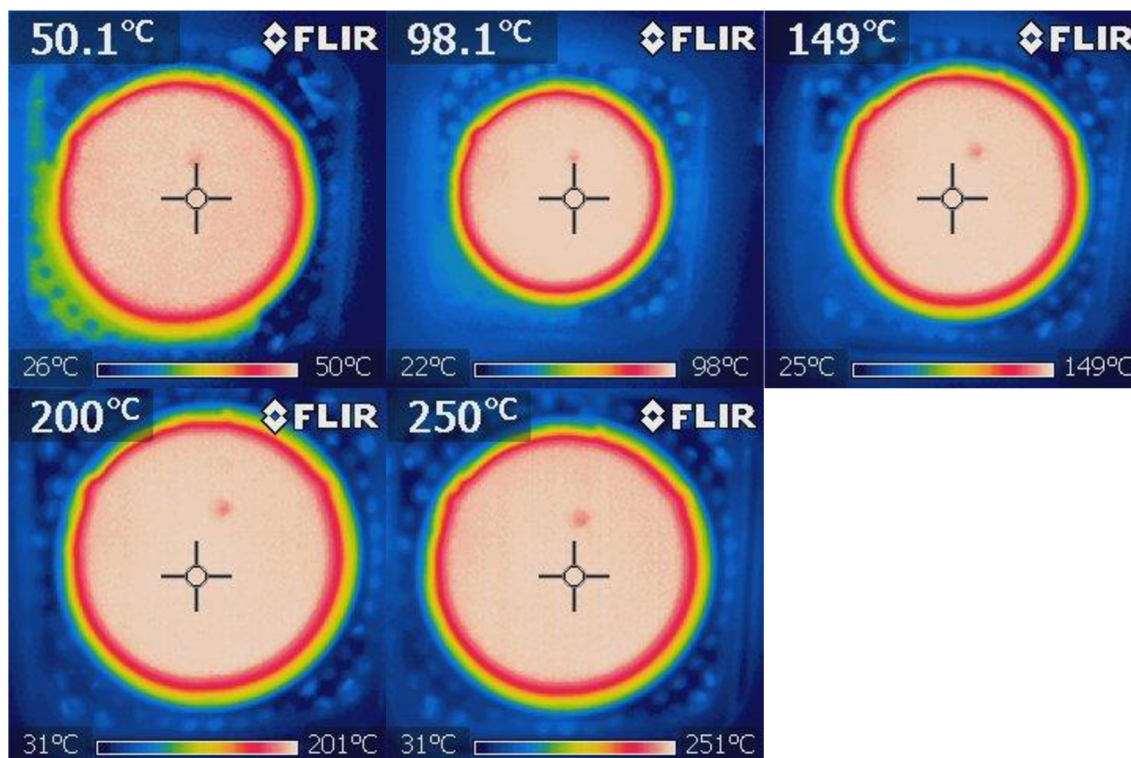
Kde t_{ref} je referenční teplota a t_{nam} je naměřená teplota.



Graf 1 Korekční graf pro přístroj Proscan 530



Graf 2 Korekční graf pro přístroj GIM530MS



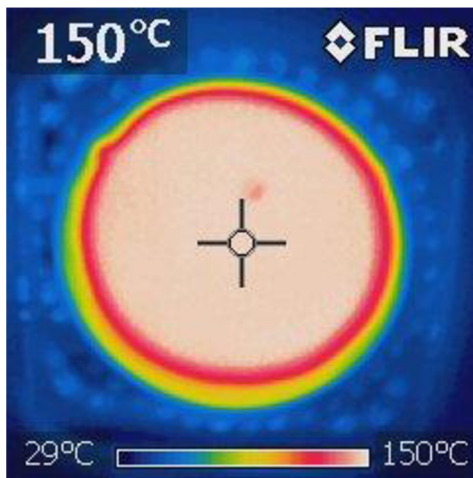
Obr. 16 Výsledky kalibrace termokamery při měření 50 - 250 °C

Graf 1 a graf 2 jsou korekční grafy IR měřičů teploty. Udávají závislost hodnoty korekce na teplotě pro tři různé vzdálenosti od černého tělesa. Z výsledků měření vyplývá, že vzdálenost od černého tělesa má znatelný vliv na hodnotu měřené teploty. Dalším zjištěním bylo, že přístroj Proscan 530 při menších vzdálenostech (5 cm) splňuje přesnost, kterou udává výrobce. S rostoucí vzdáleností od kalibrátoru a se zvyšující teplotou přesnost přístroje značně klesá. Přístroj GIM530MS měřil s nejvyšší přesností při vzdálenosti 10 cm od kalibrátoru, při této vzdálenosti pro většinu teplot splňoval přesnost, kterou udává výrobce.

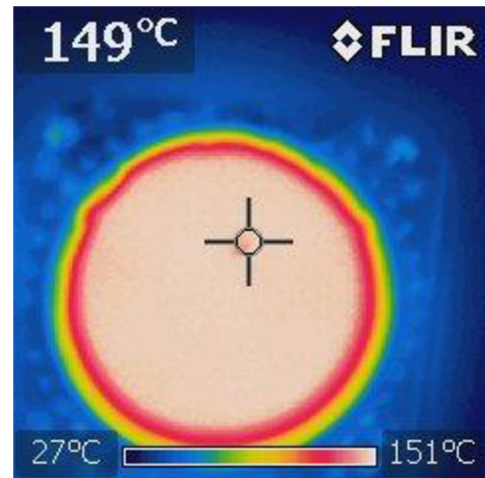
Přístroj Proscan 530 však není možné kalibrovat pomocí přenosného kalibrátoru BB500, protože kalibrátor nespĺňuje podmínku, že kalibrace je možná pouze etalonem vyšších řádů. Přesnost měření přístroje Proscan 530 je pro většinu teplot vyšší než u přenosného kalibrátoru BB500. Pro kalibraci Proscan 530 by bylo vhodnější použití jiného kalibrátoru, například Fluke 4181, který se vyznačuje vyšší přesností.

Termokamera Flir i7 nebyla ovlivňována vzdáleností od měřeného objektu, tudíž byla kalibrace provedena pouze na jedné vzdálenosti (15 cm od kalibrátoru). Kamera nad 100°C zobrazuje měřenou teplotu pouze na jednotky °C. Přesnost termokamery při měření byla do 2 %, což splňuje údaje, které udává výrobce.

Jistou roli při kalibraci mohl hrát i fakt, že povrch černého tělesa nebyl celý černý, ale na povrchu byla bílá tečka, která měla menší teplotu, než černá část tělesa. Tato vada je znázorněna na obrázcích níže.



Obr. 17 Teplota černé části tělesa



Obr. 18 Teplota bílé tečky

Závěr

V teoretické části této práce byly shrnuty poznatky o bezkontaktním měření teploty a vysvětlení základních pojmů a zákonitostí, kterými se řídí bezkontaktní měření teploty. Další část práce byla věnována popisu konstrukce detektorů pro snímání infračerveného záření a jednotlivých typů přístrojů pro bezdotykové měření teploty. Obsahem teoretické části byl také popis termografie a její využití v praxi. V další kapitole byly popsány nejistoty bezkontaktního měření. V závěru teoretické části byly popsány výhody bezkontaktního měření a použití pyrometrie v praxi.

V praktické části byly popsány přístroje dostupné na Fakultě elektrotechniky a komunikačních technologií v Brně, jednalo se o přístroje pro bezkontaktní měření teploty a kalibrační přístroj pro kalibraci bezdotykových měřičů teploty. Úvodní část byla také věnována srovnání parametrů jednotlivých přístrojů použitých při měření.

Dále bylo v praktické části sestaveno laboratorní pracoviště vhodné pro kalibraci IR měřičů teploty. Pracoviště bylo vymodelováno v programu SolidWorks a následně sestaveno skutečné laboratorní pracoviště pro objektivní kalibraci IR měřičů teploty.

Experimentální část práce byla rozdělena do dvou oblastí, a to zjišťování vlivu hodnoty emisivity na měřené teplotě a na provedení samotné kalibrace vybraných přístrojů. Experiment, kdy byl sledován vliv emisivity na měřenou teplotu, byl proveden na třech různých materiálech. Závěrem tohoto experimentu bylo zjištění, že určení správné hodnoty emisivity pro daný druh materiálu má rozhodující vliv na výsledky měření teploty u bezkontaktních měřidel teploty. Druhá část se týkala oblasti kalibrace přístrojů dvou vybraných bezkontaktních měřičů teploty a jedné termokamery. Měření bylo provedeno pro tři různé vzdálenosti a pro různé hodnoty teplot. Výsledkem měření bylo zjištění, že použité černé těleso jako kalibrační přístroj není vhodné pro kalibraci bezdotykového měřiče teploty Proscan 530. Důvodem je, že není dodržena zásada, kdy kalibrační přístroj musí být minimálně o řád přesnější, než je kalibrované měřidlo. Použitý kalibrační přístroj měl výrobcem definovanou menší přesnost než kalibrovaný IR teploměr Proscan 530. Z tohoto důvodu by pro kalibraci IR teploměru Proscan 530 bylo vhodnější použití jiného kalibračního přístroje, například Fluke 4181. Dalším zjištěním kalibrace bylo, že pro přístroj GIM530MS je optimální vzdálenost od kalibrátoru 10 cm, kdy splňoval přesnost, kterou udává výrobce.

Tato bakalářská práce by měla sloužit pro objasnění problematiky bezkontaktního měření, pro výběr vhodného pyrometru a jako objasnění problematiky týkající se kalibrace IR měřičů teploty.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] CHALOUPKA, R. *Srovnání senzorů pro měření teploty*. Brno, 2013. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. et Ing. Martin Bilík.
- [2] KREIDL, M. *Měření teploty: Měření teploty-senzory a měřicí obvody*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2005, 239 s. Senzory neelektrických veličin. ISBN 80-730-0145-4.
- [3] MIKULČÁK, J. *Matematické, fyzikální a chemické tabulky pro střední školy*. 4. vyd. Praha: Prometheus, 1988, 206 s. ISBN 80-85849-84-4.
- [4] SEGETA, P. *Bezdotykové měření teploty*. Brno, 2011. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Kamil Podaný, Ph.D.
- [5] Bezdotykové měření teploty. *Utp.fs.cvut.cz* [online]. 2007 [cit. 2013-11-07]. Dostupné z: <http://utp.fs.cvut.cz/vz/clanky/104.pdf>
- [6] LYSENKO, V. *Detektory pro bezdotykové měření teplot*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2005, 153 s. Senzory neelektrických veličin. ISBN 80-730-0180-2.
- [7] *Přístroje pro bezdotykové měření teploty* [online]. Praha, 2013 [cit. 2013-11-10]. Dostupné z: http://ufmt.vscht.cz/cs/component/joomdoc/doc_download/692-tg4h.html . Přednáška. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze.
- [8] PAVELEK, M. *Termovizní systémy* [online]. 2007 [cit. 2013-11-13]. Dostupné z: <http://ottp.fme.vutbr.cz/~pavelek/optika/0700.htm>
- [9] KOCHANÍČEK, L. *Využití Peltierova jevu* [online]. 2010 [cit. 2013-11-13]. Dostupné z: <http://coptel.coptkm.cz/?action=2&doc=7972&docGroup=177&cmd=0>
- [10] ELMAR, *2012 Proceedings*. Piscataway: IEEE, 2012, 355 - 357. ISBN 978-1-4673-1243-1. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6338543>
- [11] RAYTEK CORPORATION, *Principles of non-contact temperature measurement* [online]. 2003 [cit. 2013-11-15]. Dostupné z: http://support.fluke.com/raytek-sales/Download/Asset/IR_THEORY_55514_ENG_REVB_LR.PDF
- [12] DOSTMANN PROSCAN, *Návod k obsluze*. MEPDFI-MA-E2007-04-A. Wertheim-Reicholzheim, Dostmannelectronic, 2007 [cit. 2013-11-30].
- [13] *Infrared thermometer. GEN-MSP-MA-D-E2005-06-C*. Regenstauf, GREISINGER electronics GmbH. 2005 [cit. 2013-11-30].
- [14] *Flir i3 / i5 / i7* [online]. 2013 [cit. 2013-11-30]. Dostupné z: <http://www.flir.com/cs/emea/en/view/?id=41392>

- [15] *IR-500 Portable IR calibrator* [online]. 2013 [cit. 2013-12-01]. Dostupné z: <http://www.thermoworks.com/products/calibration/IR-500.html>
- [16] VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. *Virtuální laboratoř: Tabulky emisivit* [online]. Brno, 2003 [cit. 2014-04-29]. Dostupné z: <http://ottp.fme.vutbr.cz/skripta/vlab/tabulky/Ta04-00.htm>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

b	[m.K]	Wienova konstanta (2898 m.K)
I_φ	[W.sr ⁻¹]	Zářivost ve směru odchýleném od zdroje o úhel φ
I_n	[W.sr ⁻¹]	Zářivosti ve směru kolmice
K	[°C]	Korekce
L_L	[W.m ⁻² .sr ⁻¹]	Zář laseru
L_{λ_1}	[W.m ⁻² .sr ⁻¹]	Zář materiálu osvětleného laserem
L_{λ_2}	[W.m ⁻² .sr ⁻¹]	Zář materiálu neosvětleného laserem
M_e	[W.m ⁻²]	Intenzita záření
T	[K]	Termodynamická teplota
t_{ref}	[°C]	Referenční teplota
t_{nam}	[°C]	Naměřená teplota.
ε	[-]	Emisivita
λ_{max}	[m]	Maximální vlnová délka vyzařování
σ	[W.m ⁻² .K ⁻⁴]	Stefan-Boltzmannova konstanta (5,67.10 ⁻⁸ W.m ⁻² .K ⁻⁴)

SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ

Obr. 1 Vlnové spektrum elektromagnetického záření	8
Obr. 2 Znázornění Planckova vyzařovacího zákona	9
Obr. 3 Uspořádání termoelektrického detektoru	11
Obr. 4 Provedení bolometru.....	11
Obr. 5 Princip pyroelektrických detektorů	12
Obr. 6 Kvantový detektor - fotorezistor	12
Obr. 7 Uspořádání pyrometru	13
Obr. 8 Jak správně měřit objekt	18
Obr. 9 Ruční IR teploměr DostmannProscan 530	21
Obr. 10 Bezdotykový ruční teploměr GIM530MS	22
Obr. 11 Termokamera Flir i7	23
Obr. 12 Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně zachycená termokamerou Flir i7	23
Obr. 13 Přenosný kalibrátor BB500	24
Obr. 14 Model laboratorního pracoviště pro kalibraci v programu SolidWorks.....	26
Obr. 15 Ukázka laboratorního pracoviště	27
Obr. 16 Výsledky kalibrace termokamery při měření 50 - 250 °C.....	30
Obr. 18 Teplota černé části tělesa	31
Obr. 17 Teplota bílé tečky	31

SEZNAM POUŽITÝCH TABULEK

Tabulka 1 Srovnání základních parametrů použitých měřičů teploty	24
Tabulka 2 Vliv emisivity na měřenou teplotu	25

PŘÍLOHY

Příloha A Kalibrační tabulky bezdotykových měřičů teploty

Tabulka 3 Kalibrační tabulka tří vybraných bezkontaktních měřičů teploty do teploty 250 °C

Tabulka 4 Kalibrační tabulka dvou vybraných pyrometrů od teploty 300 °C do teploty 500 °C

Tabulka 5 Korekční tabulka tří vybraných měřičů teploty

Tabulka 6 Korekční tabulka dvou vybraných pyrometrů

Příloha B Tabulka 7 Tabulka emisivit kovových materiálů

Tabulka 8 Tabulka emisivit nekovových materiálů

Příloha C Laboratorní úloha s názvem: Bezkontaktní měření teploty - kalibrace a zjištění emisivity

Příloha A

Tabulka 3 Kalibrační tabulka tří vybraných bezkontaktních měřičů teploty do teploty 250 °C

Teplota černého tělesa [°C]	50			100			150			200			250		
Vzdálenost od kalibrátoru [cm]	5	10	15	5	10	15	5	10	15	5	10	15	5	10	15
Proscan 530 [°C]	50,6	50,1	50,0	99,2	98,5	98,1	149,2	148,1	147,3	199,0	197,7	196,8	250,2	248,0	246,7
GIM530MS [°C]	50,3	50,1	49,9	100,2	99,8	98,5	149,9	149,1	148,0	199,5	199,0	198,3	250,7	249,5	246,9
Termokamera Flir i7 [°C]	50,1			98,1			149			200			250		

Tabulka 4 Kalibrační tabulka dvou vybraných pyrometrů od teploty 300 °C do teploty 500 °C

Teplota černého tělesa [°C]	300			350			400			450			500		
Vzdálenost od kalibrátoru [cm]	5	10	15	5	10	15	5	10	15	5	10	15	5	10	15
Proscan 530 [°C]	299,9	297,3	296,1	349,7	346,5	345,2	400,5	395,8	394,2	452,3	447,5	444,9	500,1	495,9	492,8
GIM530MS [°C]	301,3	300,2	297,2	351,4	349,5	347,4	402,4	398,2	395,5	451,5	449,8	447,8	506,6	503,2	496,8

Tabulka 5 Korekční tabulka tří vybraných měřičů teploty

Teplota černého tělesa [°C]	50			100			150			200			250		
Korekce Proscan 530 [°C]	-0,6	-0,1	0,0	0,8	1,5	1,9	0,8	1,9	2,7	1,0	2,3	3,2	-0,2	2,0	3,3
Korekce GIM530MS [°C]	-0,3	-0,1	0,1	-0,2	0,2	1,5	0,1	0,9	2,0	0,5	1,0	1,7	-0,7	0,5	3,1
Korekce Flir i7 [°C]	-0,1			1,9			1			0			0		

Tabulka 6 Korekční tabulka dvou vybraných pyrometrů

Teplota černého tělesa [°C]	300			350			400			450			500		
Korekce Proscan 530 [°C]	0,1	2,7	3,9	0,3	3,5	4,8	-0,5	4,2	5,8	-2,3	2,5	5,1	-0,1	4,1	7,2
Korekce GIM530MS [°C]	-1,3	-0,2	2,8	-1,4	0,5	2,6	-2,4	1,8	4,5	-1,5	0,2	2,2	-6,6	-3,2	3,2

Příloha B

Tabulka 7 Tabulka emisivit kovových materiálů

Materiál	Teplota, při které byla emisivita zjištěna [°C]	Hodnota emisivity [-]
Cín		
Nezoxidovaný	25	0,04
Pocínované železo, lesklé	24	0,05
Hliník		
Nezoxidovaný	25	0,02
Zoxidovaný	199	0,11
Silně zoxidovaný	93	0,20
Silně zoxidovaný	504	0,31
Vysoký lesk	100	0,09
Fólie	100	0,09
Chrom		
Chrom	538	0,26
Chrom leštěný	150	0,06
Kobalt, nezoxidovaný		
Měď		
Oxid měďnatý	38	0,87
Černá zoxidovaná	38	0,78
Leštěná	38	0,03
Válcovaná	38	0,64
Mosaz		
Leštěná do hnědé barvy	20	0,40
Nezoxidovaná	25	0,04
Nikl		
Leštěný	38	0,05
Zoxidovaný	38	0,31
Nezoxidovaný	25	0,05
Ocel		
Válcovaná	93	0,75-0,85
Nezoxidovaná	100	0,08
Zoxidovaná	25	0,80
Platina		
Rtuť		
Stříbro, leštěné		
Uhlík		
Nezoxidovaný	25	0,81
Grafitovaný	100	0,76
Wolfram		
Nezoxidovaný	25	0,02
Vlákno	38	0,08
Zinek		
Leštěný	38	0,02
Zlato, leštěné		
Železo		
Zoxidované	100	0,74
Nezoxidované	100	0,05
Zrezivělé	25	0,65

Tabulka 8 Tabulka emisivit nekovových materiálů

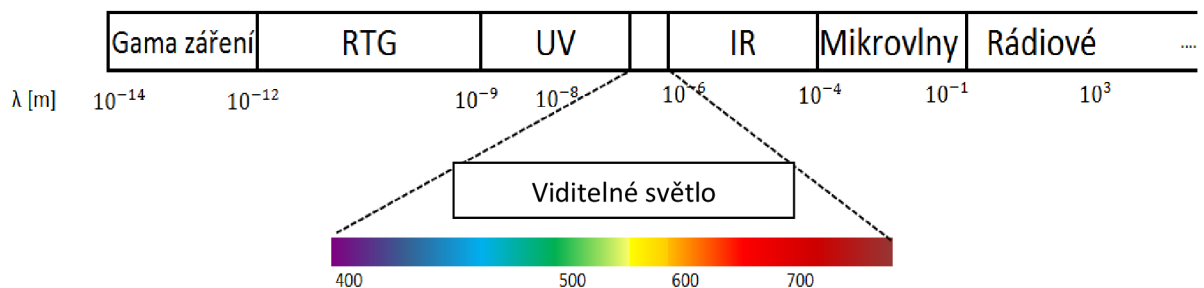
Materiál	Teplota, při které byla emisivita zjištěna [°C]	Hodnota emisivity [-]
Azbest		
Deska	38	0,96
Cement	0-200	0,96
Papír	38-371	0,93
Asfalt (vozovka)	38	0,93
Beton		
Hnědý	1371-2760	0,87-0,83
Černý	1371-2760	0,94-0,91
Cihla		
Červená, surová	21	0,93
Žáruvzdorná	1000	0,75-0,80
Dřevo		
Bukové, hoblované	70	0,94
Dubové, hoblované	38	0,91
Smrkové, hoblované	38	0,89
Kamenné zdivo	38	0,93
Keramika, neglazovaná	21	93
Křemen		
Sklo 1,98 mm	282	0,9
Neprůhledné sklo	299	0,92
Lak		
Černý	93	0,96
Bílý	93	0,95
Led		
Hladký	0	0,97
Mramor		
Bílý	38	0,95
Olejový nátěr		
Bílý	93	0,94
Nepálená cihla	20	0,9
Přůž (kaučuk), měkký	24	0,86
Saze		
Svíčkové	121	0,95
uhelné	20	0,95
Broušené sklo	0-93	0,92-0,94
Sníh, prachový	-7	0,82
Štěrka	38	0,28
Voda	38	0,67

Laboratorní úloha

Bezkontaktní měření teploty - kalibrace a zjištění emisivity

Teoretický úvod

Každé těleso, které má povrchovou teplotu vyšší než absolutní nula je zdrojem elektromagnetického záření. Záření, které těleso emituje je závislé na teplotě a pro bezkontaktní metody je důležitá část o vlnových délkách v rozsahu 0,4-25 μ m. Dané vlnové délky pokrývají oblast viditelného světla (0,4-0,78 μ m). Vlnové délky 0,78-25 μ m zahrnují oblast infračerveného spektra, tuto oblast nazýváme též tepelným zářením. Uvedené vlnové délky umožňují měřit teplotu v rozsahu -40 °C až +10 000 °C.



Obr. 1 Vlnové spektrum elektromagnetického záření

Bezkontaktní měření nachází v praxi široké možnosti využití, zejména při velmi vysokých teplotách nebo na místech, kde hrozí nebezpečí úrazu (např. elektrickým proudem). V takovýchto případech už většinou nelze použít kontaktní měření teploty. Bezkontaktní měření se vyznačuje další řadou výhod, jako např. že měření neovlivňuje měřený objekt, reaguje na velmi rychlé změny teploty, možnost měřit objekty v pohybu nebo rotující objekty atd. Ale pro přesné měření teploty je třeba znát pár důležitých věcí, se kterými je bezkontaktní měření neodmyslitelně spojeno.

Pro stanovení správné hodnoty teploty povrchu tělesa pomocí bezkontaktních teploměrů je třeba znát hodnotu emisivity měřeného materiálu. Emisivita je poměr vyzařování daného materiálu k vyzařování absolutně černého tělesa při téže teplotě. Absolutně černé těleso je takové těleso, jehož hodnota emisivity je rovna 1. To znamená, že je schopno dokonale pohlcovat veškeré dopadající záření nezávisle na vlnové délce nebo na úhlu dopadu.

Dále je třeba dbát na vzdálenost bezkontaktního měřiče teploty (pyrometru) od měřeného objektu. K danému účelu slouží parametr optické rozlišení D:S, který bývá uváděn u všech pyrometrů. Optické rozlišení D:S definuje poměr mezi vzdáleností od měřeného objektu a průměrem měřené plochy. Čím větší je hodnota optického rozlišení, tím jsme schopni měřit stejnou plochu z větší vzdálenosti.

Zákony bezkontaktního měření teploty

Pro pochopení principu pyrometrů je třeba znát některé důležité zákony záření, které tvoří podstatu většiny bezkontaktních měřičů teploty.

Stefan-Boltzmannův zákon

Jedním z nejdůležitějších zákonů pro bezkontaktní měření teploty je Stefan-Boltzmannův zákon. Ten říká, že intenzita záření absolutně černého tělesa je přímo úměrná čtvrté mocnině termodynamické teploty. Stefan-Boltzmannův zákon je podstatou úhrnných pyrometrů.

$$M_e = \sigma T^4 \quad (1)$$

kde M_e je intenzita záření, σ je Stefan-Boltzmannova konstanta ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$) a T je termodynamická teplota tělesa.

Wienův posunovací zákon

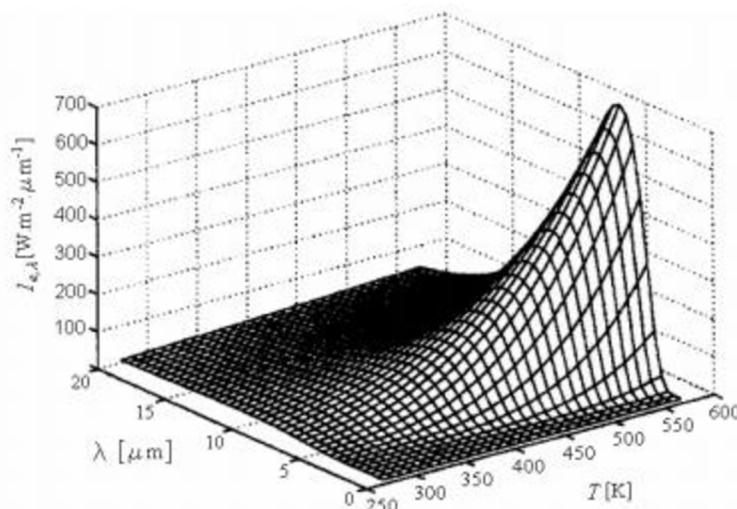
Wienův posunovací zákon říká, že s rostoucí termodynamickou teplotou se maximální intenzita vyzařování posouvá ke kratším vlnovým délkám.

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T} \quad (2)$$

kde λ_{max} je maximální vlnová délka vyzařování a b je Wienova konstanta (2898 m.K).

Planckův zákon

Planckův zákon vyjadřuje závislost intenzity záření na vlnové délce a teplotě. Každé těleso, které má povrchovou teplotu větší než absolutní nula, vyzařuje záření. Toto záření je vyzařováno a absorbováno po celistvých násobcích tzv. kvantech.



Obr. 2 Znárodnění Planckova vyzařovacího zákona

Chyby měření

Chyba měření udává odchylku hodnoty měřené veličiny X_M od správné (referenční) hodnoty měřené veličiny X_S . Chyba charakterizuje přesnost měření. Vyjadřuje se jako absolutní nebo relativní chyba.

Absolutní chyba měření se uvádí v jednotkách měřené veličiny.

$$\Delta_X = X_M - X_S \quad (3)$$

Kvalitu měření obvykle posuzujeme podle relativní chyby měření.

$$\delta_X = \frac{\Delta_x}{X_S} \quad (4)$$

Relativní chyba je bezrozměrná nebo se uvádí v procentech.

Pro kontrolu měřidla se často vynáší tzv. korekční křivka. Jedná se o závislost korekce na měřené veličině.

Korekce K je záporná hodnota absolutní chyby měřidla a vypočte se:

$$K = -\Delta = X_S - X_M \quad (5)$$

Vyjadřuje se v jednotkách měřené veličiny. Po přičtení korekce k naměřené hodnotě měřené veličiny dostaneme správnou (referenční) hodnotu měřené veličiny.

Výstupem kalibrace bezkontaktních měřičů teploty by měl být kalibrační list, případně i korekční a kalibrační grafy. Kromě kalibrační tabulky by měl kalibrační list také obsahovat podmínky, při kterých byla kalibrace provedena. Výsledkem kalibrace může být také zjištění, že přístroj měří s horší přesností, než kterou udává výrobce (v takovém případě je vhodné buď zvážit opravu tohoto přístroje anebo učinit opatření, které eliminují tuto nepřesnost).

Zadání

1. Provedte kalibraci bezkontaktního měřiče teploty GIM530MS pro teploty 50, 100 a 150 °C, vypočítejte absolutní a relativní chyby měření podle rovnic (3), (4) a vypracujte kalibrační list. Dopočtete korekci podle (5) a vynesete korekční graf pro kalibrovaný pyrometr. Při kalibraci zaměřte pozornost také na sledování vlivu vzdálenosti kalibrovaného měřiče od kalibrátoru.
2. Určete hodnoty emisivity pro vybrané materiály.
3. Zodpovězte kontrolní otázky.

Postup měření

Pomocí technické dokumentace přístrojů nastudujte ovládání pyrometru.

Kalibrace bezkontaktního teploměru

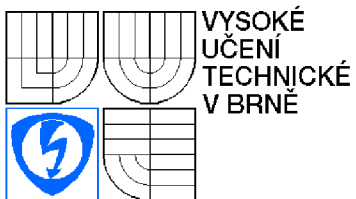
Ke kalibraci bezkontaktního teploměru použijte přenosný kalibrátor Dostmann BB500 s udávanou hodnotou emisivity 0,95. Pomocí příslušných ovládacích tlačítek nastavte na pyrometru stejnou hodnotu emisivity. Na kalibrátoru pomocí šipek nastavujte požadované teploty. Po dosažení požadované teploty vždy nechte kalibrátor teplotně stabilizovat po dobu 10 minut. Následně umístěte pyrometr do příslušné vzdálenosti od kalibrátoru, odečtěte naměřenou hodnotu teploty z displeje a zaznamenejte ji do kalibrační tabulky. Maximální povolenou vzdálenost zjistíte pomocí optického rozlišení D:S, kterou vyčtete z technické dokumentace nebo je uvedena přímo na přístroji.

Stanovení hodnoty emisivity

Pomocí kontaktního teploměru změřte teplotu připravených vzorků materiálů. Poté nasměrujte bezkontaktní teploměr na daný materiál. Pozor, při měření teploty bezkontaktní metodou respektujte maximální povolenou vzdálenost pyrometru danou optickým rozlišením D:S. V opačném případě je měřená teplota silně ovlivněna teplotou okolního prostředí. Postupně snižujte, resp. zvyšujte hodnotu emisivity, dokud se nebude hodnota teploty indikovaná pyrometrem shodovat s hodnotou zjištěnou pomocí kontaktního teploměru. Daným způsobem zjistěte hodnotu emisivity všech připravených materiálů. Dosažené výsledky srovnajte s tabulkovými hodnotami.

Kontrolní otázky

1. Popřemýšlejte o dalších možnostech určení emisivity materiálu.
2. Zamyslete se nad využitím bezkontaktního měření v běžné praxi. Kde se využívá v elektrotechnickém průmyslu?



VUT v Brně
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Kalibrační list

Podmínky měření

Teplota okolí:

Relativní vlhkost:

Atmosférický tlak:

Vzdálenost kalibrovaného pyrometru od kalibrátoru:

Tabulka 1 Kalibrační tabulka

Referenční hodnota teploty [°C]	Naměřená hodnota teploty [°C]	Absolutní chyba měřidla [°C]	Relativní chyba měřidla [%]	Korekce [°C]
50				
100				
150				

Tabulka 2 Použité přístroje

Výrobce	Typ	Datum poslední kalibrace	Teplotní rozsah [°C]	Přesnost přístroje [°C nebo %]

V Brně dne:

Podpis: