Přírodovědecká fakulta Jihočeské univerzity

Bakalářská práce:

Porovnání měření teploty dotykovou a bezdotykovou metodou

Vypracoval: Miloš Fuka

Školitel: Ing. Jiří Švec

Fakultní garant: prof. RNDr. Tomáš Polívka, Ph.D

České Budějovice 2011

Fuka, M., 2011: Porovnání měření teploty dotykovou a bezdotykovou metodou [Comparison measurement of the temperature with contact and no contact method. Bc. Thesis, in Czech.] – 47 p., Faculty of Science, The University of South Bohemia, České Budějovice, Czech Republic.

Anotace:
Cílem této bakalářské práce je popis metod měření teploty dotykovým a bezdotykovým způsobem. Teplota patří mezi nejdůležitější fyzikální veličiny. Při měření povrchové teploty je potřeba zvolit vhodný teploměr s ohledem na měřenou teplotu, daný materiál a okolní prostředí. Součástí práce je provedení měření povrchové teploty dotykovou a bezdotykovou metodou a obě metody porovnat. K měření jsem použil dotykovou termočlánkovou sondu K, infračervenou kameru TIM 160, ruční infračervený teploměr thermoMETER LS a stacionární infračervený teploměr thermoMETER CTlaser M3.

Annotation:
The goal of this work is description of measurement of temperature with contact and no contact methods. The temperature is covered in most important physical worthy. During measuring surface temperature is necessary to choose suitable thermometer regarding measurement of temperature, material and environment. The part of work is realization measurement of surface temperature with contact and no contact method. For the measurement I have used thermocouple K, infrared camera TIM 160, handy infrared thermometer LS and stationary infrared thermometer CTlaser M3.

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.
Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své bakalářské práce, a to v nezkrácené podobě elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejích internetových stránkách, a to se zachováním mého autorského práva k odevzdanému textu této kvalifikační práce. Souhlasím dále s tím, aby toutéž elektronickou cestou byly v souladu s uvedeným ustanovením zákona č. 111/1998 Sb. zveřejněny posudky školitele a oponentů práce i záznam o průběhu a výsledku obhajoby kvalifikační práce. Rovněž souhlasím s porovnáním textu mé kvalifikační práce s databází kvalifikačních prací Theses.cz provozovanou Národním registrem vysokoškolských kvalifikačních prací a systémem na odhalování plagiátů.

Datum

Podpis

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval Ing. Jiřímu Švecovi a prof. RNDr. Tomáši Polívkovi, Ph.D za jejich konzultace a odborné rady. Dále bych chtěl poděkovat firmě MICRO-EPSILON Czech Republic za umožnění realizace praktické části bakalářské práce.

OBSAH

1. Úvod 1

2. Představení bezdotykové metody měření teploty 2

2.1. Úvod 2

2.2. Historie 2

2.3. Popis absolutně černého tělesa 4

2.4. Emisivita 5

2.4.1. Stanovení neznámé emisivity v praxi 6

2.5. Infračervené záření 7

2.5.1. Popis infračerveného teploměru, pyrometru 7

2.5.2. Infračervené detektory 11

3. Historie a představení dotykové metody měření teploty 13

3.1. Rozdělení dotykových snímačů teploty 13

3.2. Odporové kovové teploměry 13

3.3. Odporové polovodičové teploměry 17

3.3.1. Termistory 18

3.3.2. Monokrystalické odporové snímače 20

3.4. Polovodičové snímače s PN přechod 21

3.4.1. Diodové snímače teploty s PN přechodem 21

3.4.2. Tranzistorové snímače teploty s PN přechodem 23

3.5. Termoelektrické snímače 24

4. Porovnání dotykové a bezdotykové metody měření 29

4.1. Cíl měření 29

4.2. Představení použitých měřících přístrojů a vypalovací pece 29

4.2.1. Termočlánková sonda K s měřícím multimetrem TD 2200 29

4.2.2. Průmyslová infračervená kamera TIM 160 30

4.2.3. Ruční infračervený teploměr thermoMETER LS 31

4.2.4. Stacionární infračervený teploměr thermoMETER CTlaser M3 32

4.2.5. Zkušební systém pro testování součástek VT 3050 33
4.3. Měření povrchové teploty řídící jednotky snímače DBS 5908 34
4.3.1. Zapojení 34
4.3.2. Postup měření 34
4.3.3. Tabulka naměřených hodnot 36
4.3.4. Fotografie pořízené infračervenou kamerou 37
4.3.5. Grafický průběh naměřených hodnot 38
4.3.6. Závěr měření 38
4.4. Měření povrchové teploty optického snímače optoNCDT 1402 SC 38
4.4.1. Zapojení 38
4.4.2. Postup měření 39
4.4.3. Tabulky naměřených hodnot 40
4.4.4. Fotografie pořízené infračervenou kamerou 41
4.4.5. Grafický průběh naměřených hodnot 42
4.4.6. Závěr měření 43
5. Výhody a nevýhody používání bezdotykových infračervených teploměrů 44
6. Závěr 45
Seznam použité literatury 46

1. ÚVOD

Teplota patří mezi nejdůležitější fyzikální veličiny. Musí se na ní brát ohled při návrzích, konstrukci a při samotné údržbě. Měřením teploty můžeme diagnostikovat, jestli zařízení pracuje správně, nedochází k přehřívání, či zjištění příčiny závady. Teplota je fyzikální veličina soustavy SI. Jednotkou je kelvin (K) a vedlejší jednotkou je stupeň Celsia (°C). Nejnižší možná teplota je teplota absolutní nuly (0 K, -273,15 °C), ke které se lze libovolně přiblížit, nelze ji dosáhnout.

K měření teploty lze použít bezdotykovou a dotykovou metodu.

Bezdotykové senzory na trhu zastupují ruční a stacionární infračervené teploměry, infračervené, neboli termovizní kamery. Jejich hlavní uplatnění je zejména na pohybujících se částech, kdy nedochází k přímému kontaktu mezi čidlem a měřeným objektem. Tyto teploměry mají také své nedostatky. Různé vlivy jako např. špatné zaměření, špatné nastavení emisivity, či nevhodně zvolený teploměr může ovlivnit samotné měření.

Existuje mnoho měřících přístrojů a metod, které se používají při měření dotykové metody. Nejčastěji se používají odporové teploměry a termočlánky. Uplatnění nachází zejména při měření nepohybujících, dobře přístupných částech. Nejsou vhodné pro měření velmi vysokých teplot, kdy dochází k omezené životnosti teploměru. Naopak mají rychlou odezvu a nižší cenu.

2. Představení bezdotykové metody měření teploty

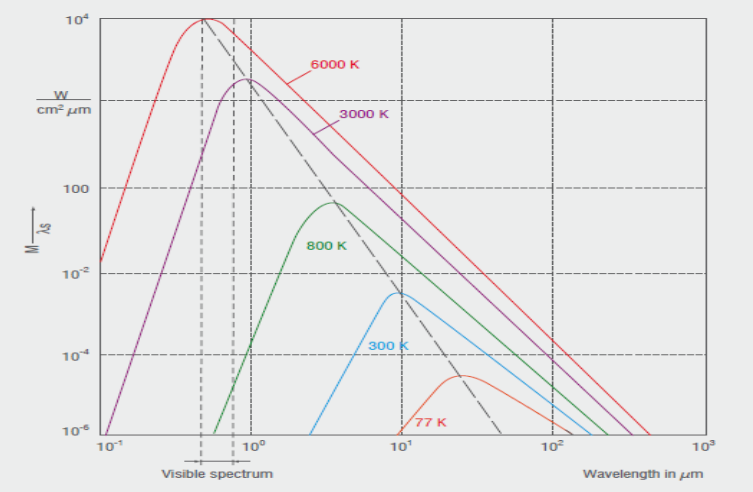
2.1. Úvod

Vlastníma očima člověk vidí svět ve viditelném světle, tzv. viditelném záření. Viditelné světlo je zahrnuto pouze v části spektra elektromagnetického záření. Neviditelné světlo je zahrnuto ve zbytku spektrálního rozsahu a mezi toto neviditelné záření patří i záření infračervené, které je generováno prostřednictvím tepelných vibrací elektronů a jádra. Intenzita vibrací závisí na teplotě objektu. Při bezdotykovém měření teploty se využívá elektromagnetické záření o vlnových délkách 0,4 μm až 25 μm.

2.2. Historie

Kolem 19. století Planck, Stefan, Wien a Kirchhoff přesně definovali elektromagnetické spektrum a popsali vztah mezi energií, vlnovou délkou záření a teplotou tělesa, které záření generuje.
Každé těleso o povrchové teplotě vyšší než je absolutní nula (-273.15 °C = 0 Kelvin) vysílá ze svého povrchu elektromagnetické záření odpovídající jeho teplotě (Planckův zákon). Pro bezdotykové měření teploty se využívá elektromagnetické záření o vlnových délkách 0,4 μm až 25 μm. Toto záření částečně spadá do viditelné oblasti, z větší části do infračervené oblasti spektra, které odpovídá vlnovým délkám v rozmezí od 0,78 μm do 1000 μm. Záření využívané pro bezdotykové měření teploty pokrývá tedy oblast viditelného spektra od 0,4 μm do 0,78 μm, dále pak oblast blízkého infračerveného spektra od 0,78 μm do 1 μm, oblast krátkovlnného infračerveného spektra od 1 μm do 3 μm, oblast středovlnného infračerveného spektra od 3 μm do 5 μm a oblast dlouhovlnného infračerveného spektra od 5 μm do 25 μm. Elektromagnetické záření s vlnovou délkou od 2 μm do 25 μm se někdy označuje jako tepelné záření. Uvedené rozsahy vlnových délek pokrývají měření teplot v rozmezí od -40 °C do +10000 °C. Pro detekci infračerveného záření o vlnových délkách nad 25 μm neexistují vhodné detektory.

Základním vztahem pro bezdotykové měření teploty je Stefan-Boltzmanův zákon. Říká, že hustota zářivého toku E [W.m^{-2}] generovaná z jednotky plochy zdroje je na všech vlnových délkách úměrná čtvrté mocnině absolutní teploty tělesa. Pro výpočet přenosu tepla je třeba znát, jak se tato energie rozdělí vzhledem k prostorovému úhlu ω. Proto se zavádí intenzita vyzařování. Ve skutečnosti intenzita vyzařování vyjadřuje část hustoty zářivého toku E [W.m^{-2}] vyzářenou jednotkovým prostorovým úhlem ve směru kolmém k povrchu zářiče. Můžeme říci, že maximum sálavého toku leží vždy ve směru normály k ploše zdroje (Lambertův směrový zákon). Wienův posouvací zákon nám vyjadřuje posun maxima hustoty zářivého toku s rostoucí teplotou tělesa do pásma kratších vlnových délek. To znamená, že například pro těleso o teplotě 600 K by měl bezdotykový teploměr pracovat v rozmezí vlnových délek od 2 μm do 10 μm. Pokud se výrazně zvýší nebo sníží teplota tělesa, nastavený teploměr teplotu nezaznamená. Spektrum vyzařování se posune směrem ke kratším, respektive delším vlnovým délkám.



(převzato z [5])

Všechny jmenované zákony byly odvozeny pro **absolutně černé těleso**. Toto těleso je ve skutečnosti definováno jako ideální těleso, které pohlcuje veškeré radiační záření bez ohledu na vlnovou délku a úhel, pod kterým je povrch tělesa ozářen. Zároveň absolutně černé těleso vyzařuje na všech vlnových délkách při dané teplotě maximální dosažitelnou energii zářivého toku (pokud je zdrojem radiace). Neexistuje žádný materiál, který by měl vlastnosti absolutně černého tělesa. Skutečné těleso vyzařuje méně než absolutně černé těleso.

2.3. Popis absolutně černého tělesa

Teplotní absolutně černé těleso má na jednom konci malý otvor. Jestliže se těleso zahřeje na běžnou teplotu, malý otvor vyzařuje ideální záření v závislosti na teplotě. Záření Slunce se poměrně dobře blíží záření absolutně černého tělesa s teplotou přibližně 5800 Kelvinů.

$$\alpha = \varepsilon = 1$$

α = absorpce

ε = emisivita

Jen málo těles má vlastnosti srovnatelné s absolutně černým tělesem. V praxi se zavedl pojem šedé těleso. Šedá tělesa jsou taková tělesa, u kterých nezávisí emisivita na vlnové délce vyzařování. V přírodě bychom opět tyto tělesa nenalezli. Avšak řada technicky významných materiálů se vyznačuje v určitém rozsahu vlnových délek nezávislostí emisivity na vlnové délce, a proto je za šedá tělesa můžeme považovat.

Infračervený teploměr přijímá nejen záření z měřeného objektu, ale také záření z okolí. Součet všech tří faktorů, tj. emisivity, odrazivosti a propustnosti, je roven jedné.

$$\varepsilon + \varphi + \tau = 1$$

ε – Emisivita

φ –Odrazivost

τ – Propustnost

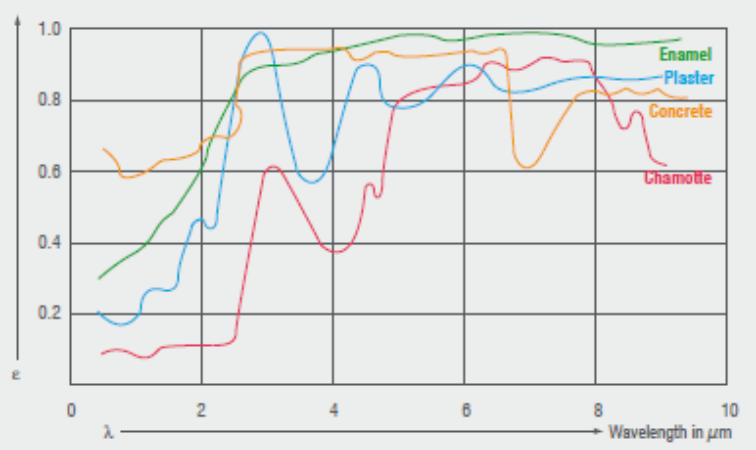
Pro nepropustné materiály je propustnost $\tau = 0$

$$\varepsilon + \varphi = 1$$

2.4. Emisivita

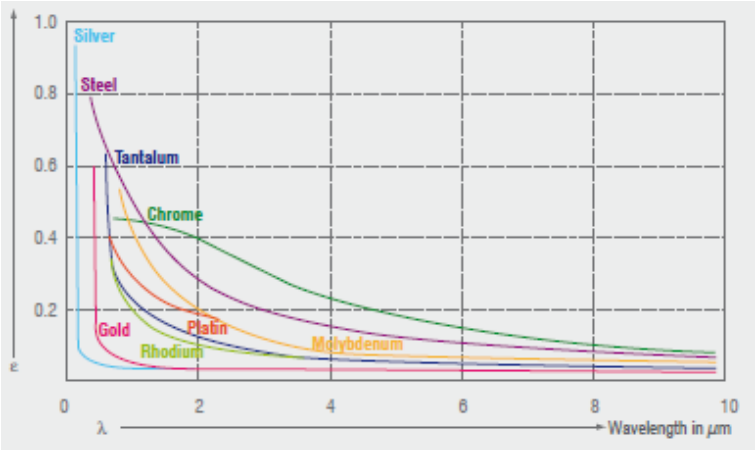
Poměr celkového zářivého toku q vyzářené daným tělesem k zářivému toku q_0, které by vyzářilo absolutní černé těleso se nazývá **emisivitou** ε.

Emisivita se používá jako konstantní faktor materiálu, který popisuje schopnost tělesa vydávat energii infračerveného záření. Může dosahovat hodnot v rozmezí od 0 do 100%. Ideálním zdrojem záření je černé těleso, které má emisivitu 1.0, zatímco na druhém konci této škály jsou např. zrcadla, jejichž emisivita je 0,1. Pokud je zvolená emisivita příliš vysoká, infračervený teploměr může zobrazit teplotní hodnotu, která je podstatně nižší než skutečná hodnota - za předpokladu, že měřený předmět je teplejší než okolí. Emisivita závisí na vlastním povrchu měřeného materiálu, teplotě a vlnové délce. U většiny nekovových materiálů je emisivita vysoká a poměrně stabilní.



Závislost emisivity na vlnové délce u některých nekovových materiálů
(převzato z [5])

V zásadě kovové materiály mají nízkou emisivitu, která je závislá na povrchovém složení měřeného objektu. Emisivita s rostoucí vlnovou délkou klesá.



Závislost emisivity na vlnové délce u některých kovových materiálů (převzato z [5])

2.4.1. Stanovení neznámé emisivity v praxi

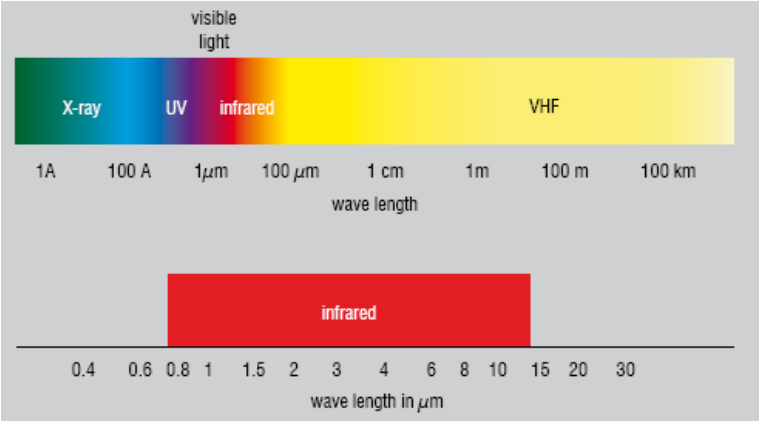
- Nejprve pomocí termočlánku nebo kontaktního senzoru určíme skutečnou teplotu měřeného předmětu. Poté tuto teplotu změříme infračerveným teploměrem a emisivitu upravíme tak, aby zobrazený výsledek odpovídal skutečné teplotě.

- Pokud měříme teplotu do hodnoty 380 °C včetně, můžeme měřený předmět kompletně zakrýt speciálním lepícím štítkem z plastu. Štítek má emisivitu 0,95 a je dodáván výrobci infračervených teploměrů. Např. firmou MICRO-EPSILON. Následně se emisivita teploměru nastaví na hodnotu 0,95 a změří se teplota tohoto štítku. Poté se změří teplota oblasti mimo štítek a emisivitu měníme do té doby, než se teplota shoduje s teplotou, která byla naměřená na štítku.

- Část povrchu měřeného předmětu se přetře černým rovným nátěrem s emisivitou 0,98. Následně na infračerveném teploměru se nastaví emisivita na hodnotu 0,98 a změří se teplota natřené plochy. Poté se určí teplota oblasti v bezprostředním okolí natřené plochy a emisivitu upravíme tak, aby naměřená hodnota odpovídala teplotě natřené plochy.

2.5. Infračervené záření

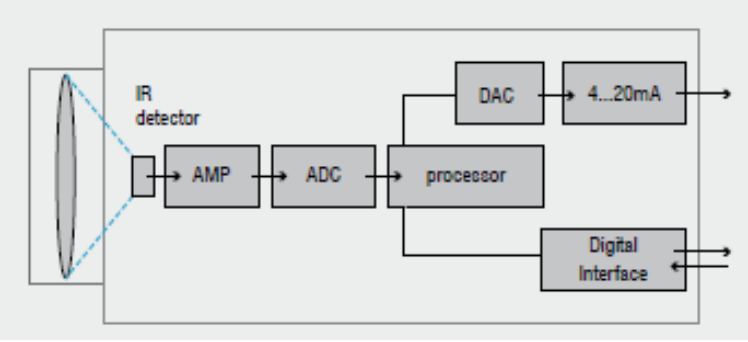
Spektrum infračerveného záření se pohybuje mezi 0,78 µm až 1000 µm vlnové délky. Pouze část spektra 0,8 µm až 14 µm je významná pro infračervené teplotní měření. Pokud je záření vyšší než 14 µm, detektory nejsou dostatečně citlivé, aby toto záření zaznamenaly.



(převzato z [5])

2.5.1. Popis infračerveného teploměru, pyrometru

Pomocí čoček jsou paprsky soustředěny na detektor, který generuje elektrický signál v závislosti na teplotě. V potaz musíme brát kalibraci snímače a nastavení emisivity. Signál je následně zesílen a transformován jako výstupní analogový signál 4 mA až 20 mA, případně 0 V až 10 V, nebo jako digitální signál. Hodnota může být zároveň zobrazena na displeji řídící jednotky.



(převzato z [5]

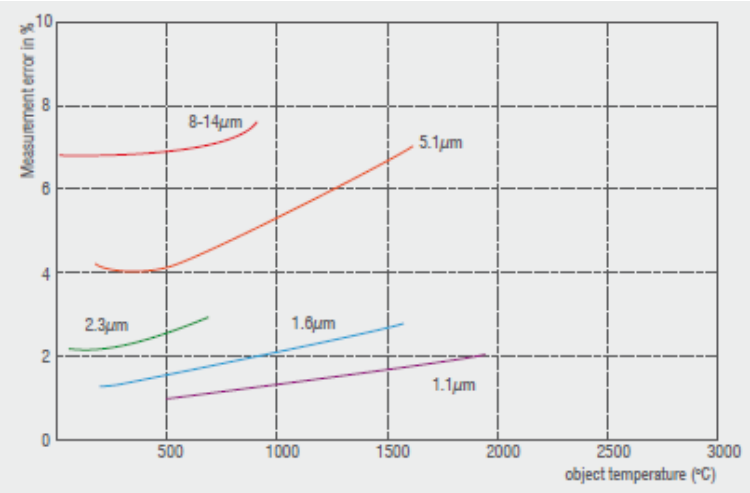
Podle oblasti spektrálního rozsahu můžeme pyrometry rozdělit na:

- úhrnné (širokopásmové),
- pásmové (úzkopásmové),
- poměrové

Úhrnné pyrometry (širokopásmové) pracují ve spektrálním rozsahu od 0,4 μm až do 20 μm. Horní a dolní mez širokopásmového přístroje závisí na použitém optickém systému. Konstrukčně jsou tyto přístroje nejjednodušší a nejlevnější. Tepelné záření, vysílané měřeným objektem, se soustřeďuje optickým systémem na detektor.
Optický systém bývá sestaven z čoček, nebo zrcadel.

Pásmové (úzkopásmové) pyrometry pracují v relativně úzkém rozmezí vlnových délek, přičemž volba tohoto rozmezí souvisí s požadovaným účelem měření. K detekci záření se využívají kvantové senzory záření. Mezi taková čidla patří fotonky, fotočlánky, fotodiody, fototranzistory a fotoodpory. Jejich výhodou je velmi rychlá reakce. Spektrální citlivost je závislá na typu čidla. V oblasti viditelného záření se využívají selenové fotočlánky. V rozsahu neviditelného záření (0,7 μm až 1,8 μm) jsou používány citlivé křemíkové fotočlánky. Požadované pásmo vlnových délek se vymezuje aplikací vhodné optiky, optického filtru a vhodnou spektrální citlivostí detektoru.

Úzkopásmové teploměry se používají např. při měření kovových materiálů. Výběr infračerveného teploměru závisí na vlnové délce a teplotním rozsahu. Jak je patrné z grafu, pro dosažení nejnižší chybovosti při měření vysokých teplot se doporučuje použít teploměr s vlnovou délkou 0,8 μm až 1,1 μm. Pro měření kovových materiálů při nižších teplotách je možné použít vlnové délky 1,6 μm, 2,2 μm a 3,9 μm.

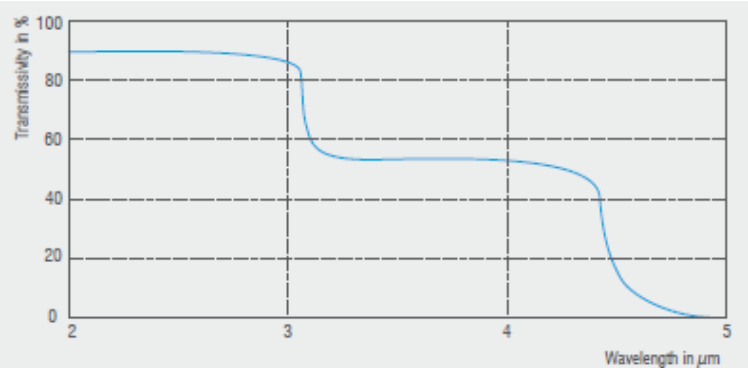


Tabulka ukazuje chybovost v % v závislosti na teplotě objektu pro různé spektrální rozsahy

(převzato z [5])

Při měření teploty plastů se s vlnovou délkou mění propustnost materiálu. Propustnost materiálu je závislá na její tloušťce. Tenký materiál má vyšší propustnost. Optimálním řešením je měřit ve vlnové délce, kde propustnost je téměř rovna nule. Polyethylen, polypropylen, nylon a polystyren mají nulovou propustnost při vlnové délce 3,43 µm. Polyester, polyuretan, teflon, FEP a polyamid mají nulovou propustnost při vlnové délce 7,9 µm. Při měření silnější vrstvy lze rovněž využít teploměr s vlnovou délkou 8 µm až 14 µm.

Při měření teploty skla si musíme dát pozor na propustnost a odrazivost. Vlnové délky 1,0 µm, 2,2 µm, nebo 3,9 µm jsou vhodné pro měření hlubší vrstvy skla, zatímco vlnová délka 5µm se doporučuje při měření povrchu skla.



Spektrální propustnost skla

(převzato z [5])

Poměrové pyrometry měří energii vyzařovanou objektem na dvou úzkých pásmech vlnových délek a vypočítávají poměr těchto energií. Původně se tyto teploměry označovaly jako „dvoubarevné pyrometry“, protože uvedené dvě vlnové délky odpovídaly dvěma různým barvám ve viditelném spektru. Vzhledem k tomu, že se vyhodnocuje poměr vyzařovaných energií, eliminuje se do značné míry vliv emisivity, eliminuje se rovněž vliv absorpce v atmosféře. Měřící terč nemusí vyplňovat celé zorné pole. Tyto pyrometry se využívají ve speciálních aplikacích, kde například prach nebo plamen může ovlivnit samotné měření.

Většina ručních infračervených teploměrů využívá k měření laserového zaměření buď jednoduchého laserového bodu, dvou laserových bodů, nebo laserového kříže. Na trhu se dále vyskytují ruční pyrometry, které využívají pro vlastní zaměření hledáček, podobně jako u fotoaparátů.

Ukázka ručních infračervených teploměrů

(převzato z [5])

2.5.2. Infračervené detektory

Jedna z nejdůležitějších částí infračerveného teploměru je infračervený detektor. Maticový detektor je základním prvkem termovizní, infračervené kamery. Je tvořen maticí infračervených senzorů. Na trhu se objevují dva druhy detektorů.

- **Tepelný detektor**
  - termočlánkový,
  - pyroelektrický,
  - bolometr FPA

- **Kvantový detektor**

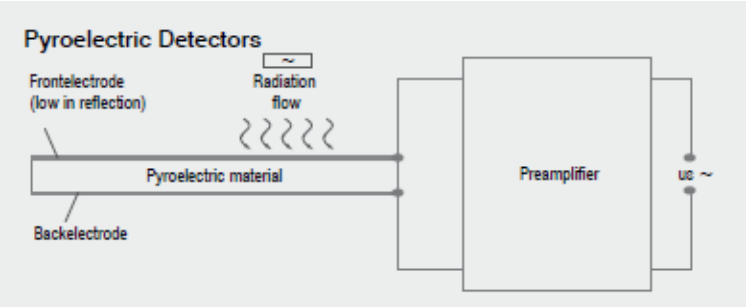
Tepelný detektor

Teplota tohoto citlivého detektoru se mění díky dopadu elektromagnetického záření.

Termočlánkový detektor

Tento detektor využívá principu klasického termočlánku. Pokud se spoj dvou drátů, které jsou z odlišného kovového materiálu zahřeje na určitou teplotu, vytvoří se elektrické napětí. Jestliže se takový spoj zahřeje díky vysílanému záření, nazývá se tento prvek radiačním termočlánkem.

Pyroelektrický detektor



(převzato z [5])

Pyroelektrický detektor se skládá z pyroelektrického materiálu se dvěma elektrodami. Absorbované infračervené záření změní teplotu citlivého prvku. To vede ke změně povrchu díky pyroelektrickému efektu. Vytvořený elektrický signál je přiveden do předzesilovače. Použitím selektivního předzesilovače dostaneme lepší signál s nižším šumem.

Bolometr FPA

Tyto detektory využívají teplotní závislosti elektrického odporu.
Se změnou dopadu infračerveného záření se změní velikost odporu, který je součástí tohoto detektoru. To vede ke změně napěťového signálu. Bolometry, které se používají v pokojovém prostředí, pracují s teplotním koeficientem kovového rezistoru (bolometr s černou nebo tenkou vrstvou), nebo s teplotním koeficientem polovodičového rezistoru (termistorový bolometr). V dnešní době polovodičová technologie nahradila mechanické skenery. FPA detektory jsou vyrobeny na principu tenkovrstvého bolometru. Díky této technologie se infračervené kamery zlevnily.

Kvantový detektor

Oproti teplotnímu detektoru je rychlejší. Tento detektor je založen na fotoefektu. Dopad fotonů infračerveného záření vede ke změně elektrické vodivosti. Takové detektory se většinou provozují chlazené a k tomu se využívá Peltierův, nebo Strilingův chladič (miniaturní heliový kompresorový agregát).

3. Historie a představení dotykové metody měření teploty

Při dotykovém měření se snímač musí dotýkat (je připevněn) k látce, či materiálu, jejíž teplotu má měřit. Využívá se zde přenosu tepla mezi dvěma objekty. Využití má hlavně tam, kde je snadný přístup, případně okolní prostředí, nebo samotný měřený objekt chemicky nereaguje.

3.1. Rozdělení dotykových snímačů teploty

Podle použitého principu měření teploty rozdělujeme dotykové snímače na:

- odporové kovové
- odporové polovodičové
- polovodičové s PN přechodem
- termoelektrické
- integrované inteligentní

3.2. Odporové kovové teploměry

Model kovu můžeme chápat jako soubor elektronového plynu tvořeného souborem chaoticky se pohybujících valenčních elektronů. Valenční elektrony jsou k jádru jen velice slabě vázány. S rostoucí teplotou se zvyšuje amplituda kmitů jednotlivých atomů, čímž je znesnadňován průchod elektronům a zvyšuje se elektrický odpor. Pro konduktivitu kovu platí

$$\sigma = n \cdot e^2 \cdot \tau / m$$

kde σ …konduktivita
n … počet elektronů v jednotce objemu
e … elementární náboj
τ … relaxační čas elektronů
m … hmotnost nosiče náboje

U odporových kovových teploměrů se využívá závislost změny elektrického odporu na změně teploty.

Teplotní součinitel odporu α lze získat ze vztahu

$$\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{100 \cdot R_0}$$

R_{100} … odpor čidla při teplotě 100 °C

R_0 .... odpor čidla při teplotě 0 °C

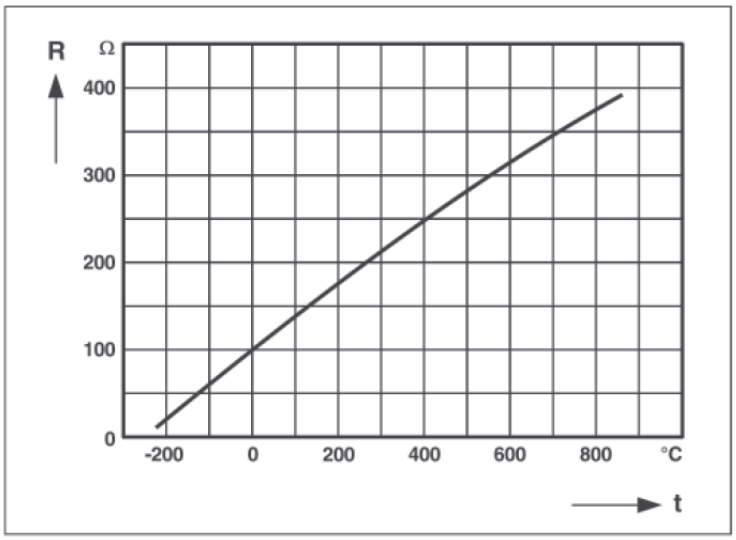
Při výrobě kovových odporových teploměrů se využívá těchto materiálů.

Nikl jako odporový teploměr je značně nelineární. Používá se jen pro malý rozsah teplot a to od -70 °C do 200 °C. Tento teploměr má horší dlouhodobou stabilitu a je špatně odolný proti působení vnějších vlivů prostředí. Za výhodu tohoto teploměru lze považovat velkou citlivost a větší teplotní součinitel odporu.

Měď má malou rezistivitu, snadno oxiduje, její použití je možné pouze v teplotním rozsahu -50 °C až 150 °C. Jako odporový snímač teploty se využívá výjimečně. Vykazuje menší teplotní stálost. Z hlediska výroby rozdělujeme čidla navinutá a vrstvová.

Platina je v průmyslu nejvíce využívaná. Má dobrou chemickou netečnost, časovou stálost a vysokou teplotu tání. Teplotní rozsah se pohybuje od -200 °C do 850 °C.

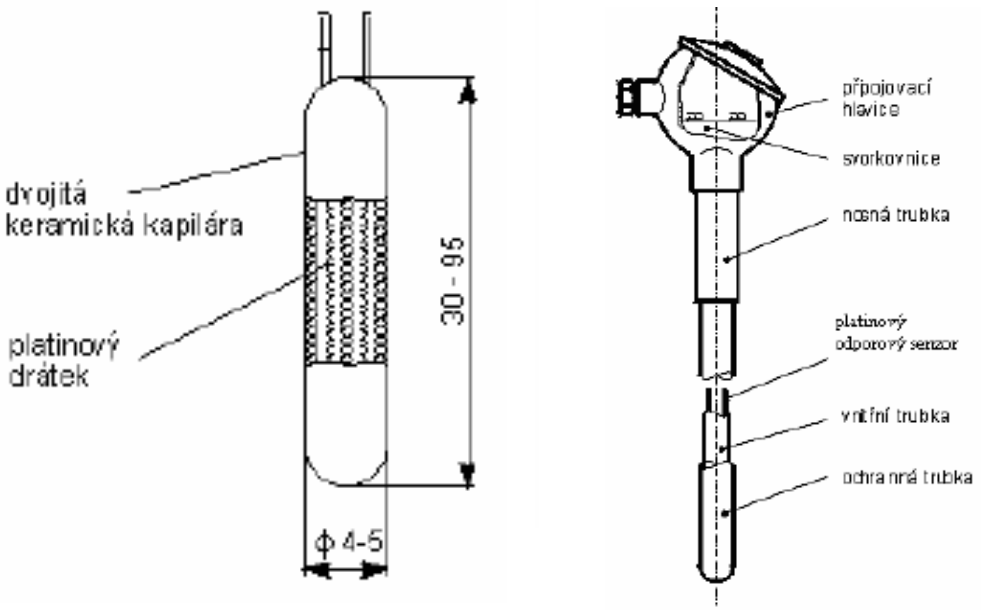
V praxi se často setkáváme s platinovými teplotními čidly PT 100, která mají základní odpor 100 Ω (číslo uváděné za označením PT nám udává velikost základního odporu). Princip odporového teploměru PT 100 spočívá ve změně elektrického odporu platinového drátku v závislosti na teplotě.



Obrázek zobrazuje závislost odporu na teplotě při použití odporového teploměru PT 100 (převzato z [15])

Platinové snímače teploty se vyrábí drátkovou, nebo plošnou metodou.

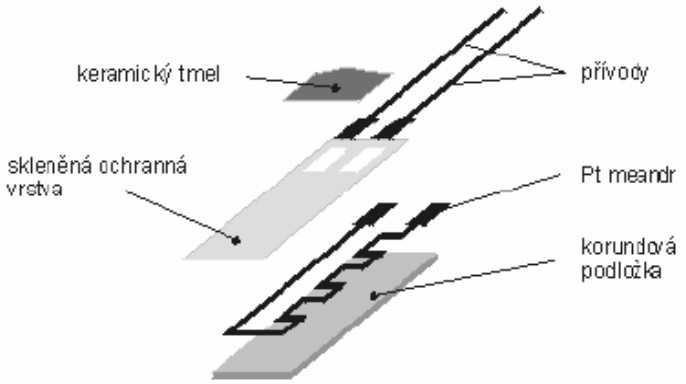
V prvním případě je drátkový měřící odpor tvořen spirálovitě stočeným tenkým drátkem o průměru 0,05 mm zataveným do keramiky nebo skla. Drátkové teploměry jsou časově stálejší. Odporové teploměry jsou umisťovány do ochranného pouzdra, jímky, či trubky. Chrání se tím před vnějšími vlivy.



a) Platinový odporový teploměr b) Ochranná trubice

(převzato z [10])

Snímače vyráběné plošnou metodou, při níž se platinový odpor vytvoří na ploché korundové destičce technikou napařování a iontového leptání, mají rychlejší odezvu než snímače drátkové. Obvykle mají vyšší odpor a jsou levnější. Díky menším rozměrům a vyšší odolnosti jsou v praxi více využívány.



Plošný platinový odporový senzor

(převzato z [11])

Platinové odporové teploměry patří mezi nejpřesnější teploměry, v praxi jsou používány jako etalony.

Odporový snímač teploty podle třídy přesnosti rozdělujeme do tří skupin.

Třída A umožňuje měřit s přesností 0,15 °C.
Třída B umožňuje měřit s přesností 0,30 °C.
Třída C umožňuje měřit s přesností 0,60 °C

Výhody odporových teploměrů:

- široký teplotní rozsah
- vysoká odolnost vůči elektrickému rušení
- vysoká přesnost
- dlouhá životnost
- vynikající dlouhodobá stálost odporu

Nevýhody odporových teploměrů:

- citlivost na magnetické pole (především při nižších teplotách)
- citlivost na vibrace

3.3. Odporové polovodičové teploměry

Rozdíl mezi polovodičovými a kovovými odporovými teploměry spočívá v tom, že u polovodičů jsou při teplotě absolutní nuly 0 K všechny elektrony pevně vázány ke svým jádrům. Materiál při této teplotě nemůže vést elektrický proud. Elektronům je třeba dodat určitou energii, aby překonaly „zakázaný pás“. Energii lze dodat různým způsobem. Například formou elektromagnetického pole, elektromagnetickým zářením, nebo formou tepla. Čím je vyšší teplota, tím se zvětšuje koncentrace volných elektronů a elektrický odpor se zmenšuje. Teplotní součinitel odporu může být pětkrát až padesátkrát větší než u kovových odporových snímačů teploty.

Polovodičové odporové snímače teploty dělíme na:

- Termistory - pozistory
  - negastory

- Monokrystalické odporové snímače

3.3.1. Termistory

Termistor je polovodičová součástka, teplotně závislá. Odpor se mění v závislosti na teplotě. Používá se především pro měření nízkých a středních teplot v rozmezí 4,2 K až 600 K (-268,95 °C až 326,85 °C). Závislost počtu volných nosičů na teplotě se řídí podle vztahu:

$$n \approx e^{\frac{\Delta E}{2kT}}$$

kde n je počet volných nosičů

ΔE je šířka mezery mezi energetickýni hladinami [W]

k je Boltzmanova konstanta [$J.K^{-1}$] k=1,38 $J.K^{-1}$

T je termodynamická teplota

Negastor, neboli NTC termistor má záporný teplotní součinitel odporu, což znamená, že jeho odpor při zahřátí nelineárně klesá. U polovodičů přibývá s teplotou volných nosičů. Používá se k měření teploty jako teplotní čidlo v rozsahu -50 °C až 150 °C a v extrémním rozsahu od 4,2 °C do 1000 °C. Měření se realizuje můstkovou výchylkovou metodou. Zapojením sériového, nebo paralelního odporu lze docílit vyšší přesnosti. Speciální NTC termistory byly součástí žhavících obvodů elektronkových zařízení. Sloužily jako ochrana proti přepálení vláken elektronek. Díky značné nelineární charakteristice je lze využít i pro generování definovaného časového zpoždění.

Příklady NTC termistorů (převzato z [11])

Pozistor, neboli PTC termistor má kladný teplotní součinitel odporu. Jeho odpor do 50°C mírně klesá a dále se zvyšující teplotou pozistoru rychle roste. K měření teploty se nepoužívá. V elektrických obvodech slouží jako tepelná ochrana. Dále ho lze využít v teplotní regulaci jako omezovač proudu. Průchodem většího množství proudu se součástka v obvodu zahřeje, zvýší se její odpor. Při výrobě pozistoru se používají polykrystalické feroelektrické keramiky.

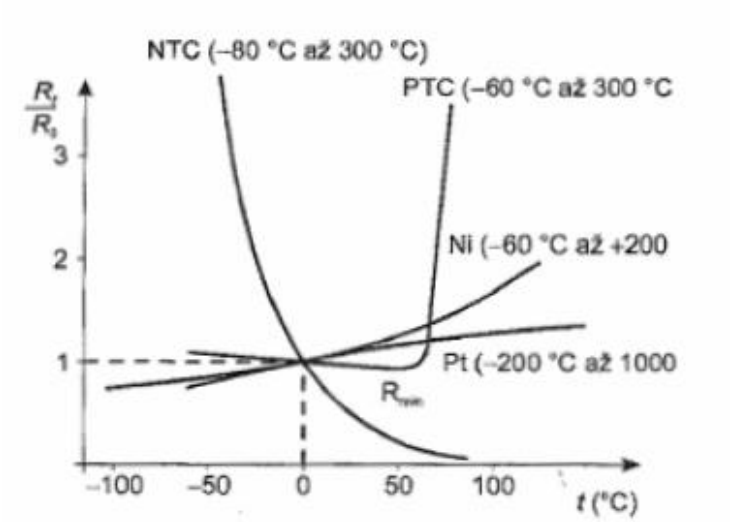
Termistory se vyrábějí práškovou technologií z oxidů různých kovů (např. Mn, Co, Ni, Cu, Ti, U). Oxid se rozemele a po přidání příměsi a pojidla se za vysoké teploty (více než 1000 °C) slisuje a nechá zestárnout. Termistory mají velký vnitřní odpor, proto je odpor jejich přívodních vodičů zanedbatelný. Časová stálost je u běžných typů horší než u čidel kovových. Výrazně lepších vlastností se dosahuje výběrem a umělým stárnutím.

Výhody:

- malé rozměry
- vysoká citlivost

Nevýhody:

- časová nestabilita
- nelineární závislost odporu na teplotě
- poškození při přehřátí



Teplotní závislost NTC a PTC termistorů a kovových odporových teploměrů PT, Ni (převzato z [15])

3.3.2. Monokrystalické odporové snímače

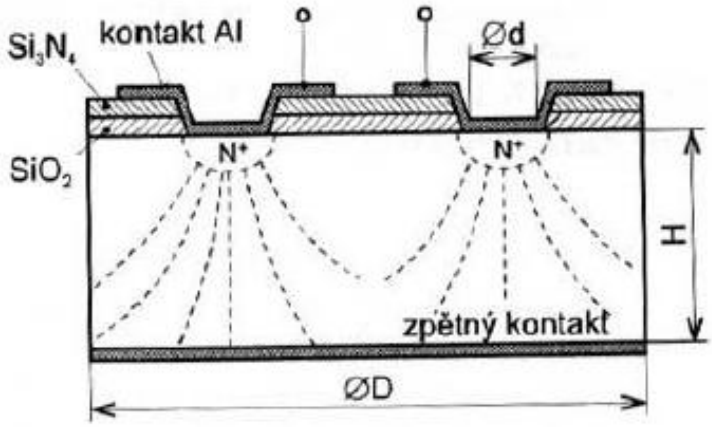
Tyto snímače jsou vyráběny ve třech provedeních:

- bez přechodu PN (používají se pro měření nízkých teplot)
- s jedním nebo několika přechody PN
- integrované (inteligentní, smart)

Výrobním materiálem je germanium, křemík a arzenid galia.
Germaniová čidla jsou vhodná pro měření nízkých teplot od 1,5 do 75 K. Jejich nevýhodou je citlivost na magnetické pole.

Křemíková čidla jsou vhodná pro měření teplot obvykle v rozsahu -160 až +150 °C. Při výrobě těchto čidel se využívá nevlastní polovodivosti typu N. Nejsou tak citlivá na magnetické pole jako čidla vyrobená z germania.

Díky relativně nízké nelinearitě a dlouhodobé stabilitě jsou monokrystalické křemíkové teploměry vhodné pro měření běžných teplot. Linearita je lepší než u NTC termistorů, ale horší než u platinových snímačů. Mají kladný teplotní součinitel odporu podobně jako PTC termistory.



Struktura Si snímače
(převzato z [15])

Materiálem je nevlastní polovodič N (Si). Dva kontakty, kov, polovodič jsou sériově řazeny za sebou.

3.4. Polovodičové snímače s PN přechodem

Mezi polovodičové snímače s přechodem PN můžeme zařadit diody a tranzistory. Používají se v rozsahu teplot 1 K až 400 K. Snímače jsou založeny na teplotní závislosti PN přechodu.

3.4.1. Diodové snímače teploty s PN přechodem

Patří mezi základní snímače s PN přechodem. Jako materiál se při výrobě používá křemík, germanium, arzenid galia. Tento snímač má lineární závislost výstupního napětí na teplotě.

Křemíková dioda se vyznačuje malým šumem. Je ale poměrně citlivá na vnější magnetické pole. Diody vyrobené z arzenidu galia mají téměř lineární charakteristiku. Vyrábějí se pro teplotní rozsah 1,5 K až 400 K. U křemíkové diody je potřeba pro otevření PN přechodu napětí 0,7 V. Tuto hodnotu lze však snížit dodáním tepelné energie.

Zde platí Shockleyho rovnice

$$I_D = I_S \cdot \left(e^{\frac{U_D}{m \cdot U_T}} - 1 \right)$$

Úpravou dostaneme

$$U_D = m \cdot U_T \cdot \ln\left(\frac{I_D}{I_S} + 1 \right)$$

U_D napětí na PN přechodu v propustném směru

m rekombinační koeficient polovodiče

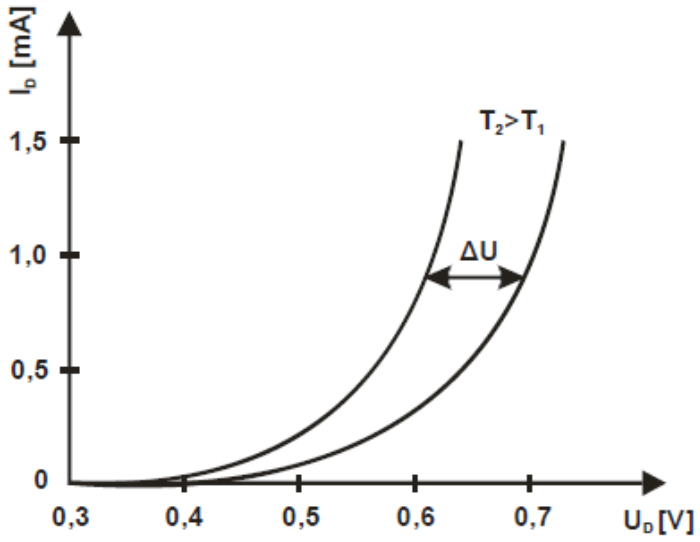
U_T teplotní napětí (J^*C^{-1})

I_D saturační proud diody v propustném směru

I_S saturační proud diody v závěrném směru

e elementární náboj

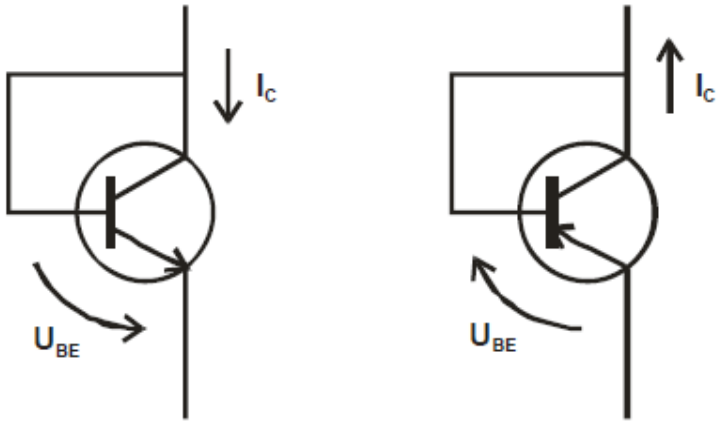
Veličiny m, U_T a I_S jsou teplotně závislé. Napětí U_D při zvyšující teplotě klesá.



(převzato z [15])

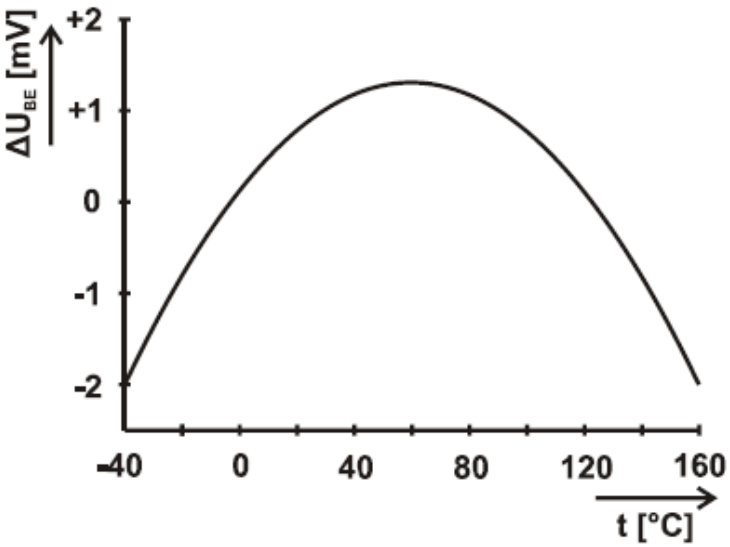
3.4.2. Tranzistorové snímače teploty s PN přechodem

Tyto snímače teploty pracují na podobném principu jako snímače diodové. Využívá se zde teplotní závislosti přechodu báze – emitor v propustném směru.



Tranzistorový snímač teploty s PN přechodem
(převzato z [10])

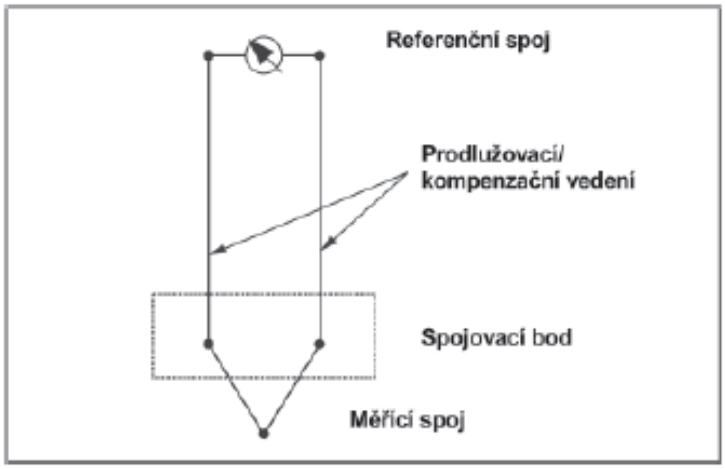
Kolektorovým proudem I_C lze ovlivnit citlivost senzoru. Nevýhodou u těchto snímačů je parazitní teplotní závislost proudu I_S.



Nelineární závislost U_{BE} na teplotě
(převzato z [10])

3.5. Termoelektrické snímače

Termoelektrický snímač, tzv. termočlánek, se skládá ze dvou vodičů. Tyto vodiče, vyrobené z vhodného materiálu jsou na jednom konci spojené k sobě (měrný spoj). Protější konce tvoří referenční spoj. Termočlánek může být prodloužen prodlužovacími, nebo kompenzačními kabely, které jsou připojeny k měřící jednotce, nebo galvanometru.



(převzato z [16])

Pokud je teplota na obou koncích drátu rozdílná, vznikne v obvodu napětí, které je dáno rozdílem termoelektrických napětí materiálů obou spojů. Termoelektrické napětí lze vyjádřit vztahem:

$$U = \alpha\,(T_1 - T_2) + \beta\,(T_1 - T_2)^2 \text{ (V)}$$

$\boldsymbol{\alpha, \beta}$ jsou součinitelé závislé na druhu materiálu použitého pro výrobu termočlánku

Tento jev nazýváme Seebeckův. Německý fyzik Thomas Johann Seebeck objevil v roce 1821 mezi dvěma konci kovové tyče elektrické napětí ΔE za předpokladu, že mezi těmito konci je teplotní rozdíl ΔT. Pro elektrické napětí na svorkách termočlánku platí Seebeckovy vztahy.

$$dE_{AB} = S_{AB}dT$$

a z toho dostaneme

$$E_{AB} = \int_{T_B}^{T_A} S_{AB} dT$$

$S_{AB} = S_A - S_B$

Seebeckovy koeficienty S_A a S_B vypočteme ze vzorce

$$S_A = \int_0^T \frac{\sigma_A}{T} \cdot dT\,, \qquad S_B = \int_0^T \frac{\sigma_B}{T} \cdot dT$$

$\boldsymbol{\sigma_A}$ a $\boldsymbol{\sigma_B}$ jsou Thomsonovy koeficienty.

Při průchodu elektrického proudu vodičem dochází ke vzrůstu, nebo poklesu tepla podél vodiče. Takovému termoelektrickému ději říkáme Thomsonův jev. Z tohoto jevu lze odvodit Thomsonovy koeficienty.

$$P = \sigma(T) \cdot I \cdot \frac{dT}{dx}$$

P ……..tepelný výkon

σ(T)…....Thomsonův koeficient

dT / dx…..gradient podél vodiče

Teplota rovnoměrně klesá od teplejšího konce k chladnějšímu. Napětí a polarita, které vzniknou na referenčním spoji termočlánku, závisí na konkrétním materiálu, ze kterého je vyroben a na rozdílu teplot mezi referenčním a měřícím spojem. Prodlužovací nebo kompenzační vedení je určeno pro spojení čidla s místem zpracování informace.

Prodlužovací vedení je ze stejného materiálu jako větve termočlánku. Kompenzační vedení se vyrábí z levnějšího materiálu. Musí odpovídat konkrétnímu typu termočlánku, a proto jsou barevně označena. Pro standartní kompenzační kabely platí pravidla obsažená v normě DIN EN 605 84. Termočlánková čidla jsou jediná čidla, která lze použít pro měření vysokých teplot dotykovou metodou.

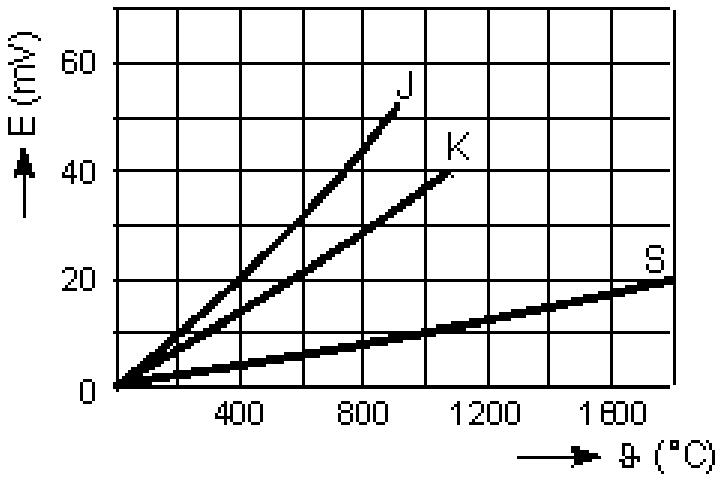
Závislost termoelektrického napětí na teplotě můžeme vyjádřit vztahem.

$$E = \alpha_{AB}\vartheta_m + \alpha_{BA}\vartheta_o = \alpha_{AB}(\vartheta_m - \vartheta_o)$$

kde α_{AB} je koeficient závislý na materiálech použitých kovů, přičemž platí, že

$$\alpha_{AB} = -\alpha_{BA}$$

K výrobě termočlánku by se měl použít materiál, který by měl mít velký lineární přírůstek termoelektrického napětí v závislosti na teplotě. Zároveň by měl být odolný v prostředí, které je náchylné na chemické a mechanické vlivy a dlouhodobě by měl být stabilní. Materiály, které se používají pro vytvoření termočlánků, jsou normalizovány. Označení jednotlivých termočlánků se provádí velkými písmeny. Pro zvýšení citlivosti je možné řadit termočlánky do série a vytvářet tak termoelektrické baterie.



(převzato z [17])

Pro průmyslové použití je nejrozšířenější termočlánek typu J (železo-měď/nikl) pro rozsah teplot od -200 °C do +600 °C. Pro vyšší teploty se používá termoelektrický

článek typu K (nikl/chrom-nikl/hliník) v rozsahu od -50 °C do 1 000 °C. Termoelektrický článek typu S (platina/rhodium-platina) se používá v rozsahu od 0 °C do +1 300 °C. Krátkodobě až do 1600 °C. Termoelektrický článek typu B (platina/rhodium-platina/rhodium) se používá v rozsahu od 300 °C do 1600°C. Krátkodobě až do teploty 1800°C.

V následující tabulce je uveden přehled vlastností termočlánků.

0značení termočlánku	***T***	***J***	***K***	***S***
název termočlánku	***měď-měď/nikl***	***železo-měď/nikl***	***nikl/chrom--nikl/hliník***	***Platina/rhodium--platina***
použitelnost: trvale krátkodobě	-200 °C až +400 °C +600 °C	-200 °C až +600 °C +900 °C	-50 °C až +1000 °C +1300 °C	0 °C až +1300 °C +1800 °C
Termoelektrické napětí (mV/100 °C)	4,25	5,37	4,8	0,64
odolnost v oxidačním prostředí	malá	malá	velká	velká
odolnost v redukčním prostředí		velká	malá	malá

(převzato z [17])

V praxi se volí termočlánkové čidlo tak, aby vyhovělo požadovaným parametrům. V automatizační technice se používají tyčové a plášťové termočlánky. Obzvlášť plášťové se vyznačují dlouhodobou stabilitou.

Složení materiálu, nehomogennost článku a kompenzačního vedení může způsobit chybu při měření termočlánkem. Samotné měření může ovlivnit i přesnost použitého voltmetru, nebo komparátoru. Při měření vysokých teplot je třeba počítat i s životností termočlánku. Termoelektrické napětí se časem mění.

Výhody použití termoelektrických článků:

- schopné měřit teplotu v širokém rozsahu
- velmi malé rozměry
- rychlá odezva
- malá hmotnost
- ohebnost (u plášťových termočlánků)
- mechanická odolnost (drsné pracovní podmínky, rázy, otřesy, vibrace)

Nevýhody použití termoelektrických článků:

- nelineární převodní charakteristika
- velké výrobní tolerance (odchylky, nejistoty)
- ovlivňování přesnosti změnami přechodových odporů
- potřeba kvalifikované obsluhy
- obtížné měřit na pohybujících se objektech

4. Porovnání dotykové a bezdotykové metody měření

4.1. Cíl měření

Cílem této části bakalářské práce bylo provést měření povrchové teploty dotykovou a bezdotykovou metodou a obě metody vzájemně porovnat. Měření jsem uskutečnil na řídící jednotce snímače DBS 5908 a optického snímače optoNCDT 1402 SC vyráběné firmou MICRO-EPSILON Czech Republic. Povrch řídící jednotky snímače DBS 5908 byl pokryt černým komaxitem. Jedná se o černou barvu v jemném prášku s emisivitou 0,95. Naopak optický snímač optoNCDT 1402 SC je vyroben z nerezové ušlechtilé oceli V4A. Systémy musí při výrobě projít procesem stárnutí. Pro tento účel se používá vypalovací pec VT 3050 od firmy Vötsch.

4.2. Představení použitých měřících přístrojů a vypalovací pece

4.2.1. Termočlánková sonda K od firmy Technology Korea Corporation s měřícím multimetrem TD 2200

Termočlánek typu K (NiCrNi) je součástí měřícího zařízení TD 2200 Counts Dual Display Digital Multimeter.

Měřící rozsah: -40 až 200°C Přesnost: ± 3 % z měřené hodnoty + 5°C

Rozlišení: 0,1°C

4.2.2. Průmyslová infračervená kamera TIM 160 od firmy MICRO-EPSILON

Měřící rozsah: -20 až 900 °C
Přesnost: ± 2 °C nebo ± 2 % z měřené hodnoty (platí vyšší hodnota)
Rozlišení: 0,1 °C
Frekvence obrazu: 100 Hz
Optické rozlišení: 160 x 120 pixelů
Použitý objektiv: 31°
Spektrální rozsah: 7,5 až 13 µm
Detektor: FPA
Teplotní citlivost: 0,1 K

Infračervená průmyslová kamera thermoIMAGER TIM 160
(převzato z [1])

Infračervená kamera TIM je napájena přes USB kabel z počítače. Data jsou ukládána online rovněž přes USB kabel. Software, který je součástí infračervené kamery umožňuje nahrávat video a vytvářet snímky. V software lze vytvářet oblasti a z nich vyhodnocovat minimální, průměrnou, případně maximální teplotu. Data z vybraných oblastí lze ukládat do CSV souboru. K dispozici je DLL knihovna dat pro vytvoření vlastní aplikace. Např. v programu C++. Kamera disponuje ještě jedním konektorem. Tento konektor lze využít jako analogový výstup 0 V až 10V, případně jako analogový vstup pro ovládání kamery.

4.2.3. Ruční infračervený teploměr thermoMETER LS od firmy MICRO-EPSILON

Měřící rozsah:	-35 až 900°C
Přesnost:	± 0,75 °C nebo ± 0,75 % z měřené hodnoty (platí vyšší hodnota)
Optika:	75:1
Doba odezvy:	150ms
Spektrální rozsah:	8 až 14µm
Detektor:	FPA
Opakovatelnost:	± 0,5 °C nebo ± 0,5 % z měřené hodnoty (platí vyšší hodnota)

Ruční infračervený teploměr thermoMETER LS
(převzato z [1])

Infračervený ruční teploměr LS umožňuje přesné bezdotykové měření teploty již na objektech o průměru 1mm. S pomocí laserového kříže se v jakékoliv měřené vzdálenosti označí velikost měřeného bodu. Součástí teploměru je termočlánková sonda typu K, USB kabel a software. SW umožňuje pomocí grafu online nahrávat průběh zaznamenané teploty a následně ukládat do csv souboru.

4.2.4. Stacionární infračervený teploměr thermoMETER CTlaser M3 od firmy MICRO-EPSILON

Měřící rozsah: 100 až 600°C
Přesnost: ± 0,3 % z měřené hodnoty + 2°C
Optika: 100:1
Doba odezvy: 1ms
Spektrální rozsah: 2,3µm
Rozlišení: 0,1°C
Opakovatelnost: ± 0,1 % z měřené hodnoty + 1°C
Nejmenší měřený bod 0,7 mm.

Stacionární infračervený teploměr thermoMETER CTlaser M3
(převzato z [1])

Tento teploměr je vhodný zejména pro měření lesklých, kovových a keramických materiálů. Krátká vlnová délka od 2,3 µm redukuje riziko chybného měření teploty při změnách emisivity či špatném nastavení. Senzor lze bez chlazení používat při okolní teplotě až 85 °C. V hlavici teploměru je zabudovaný dvojitý zaměřovací laser se dvěma paprsky pro přesné označení měřícího pole a přesné nastavení. Teploměr se skládá z hlavice kabelu a samotné řídící jednotky s displejem. Běžně lze využívat analogové výstupy 0 V až 10V, 4 mA až 20mA, případně digitální výstupy přes rozhraní USB, RS232, RS485, Profibus, Ethernet.

4.2.5 Zkušební systém pro testování součástek VT 3050 od firmy Vötsch Industrietechnik

Objemová plocha:	500 litrů	Teplotní rozsah:	-30 až 100°C
Teplotní kolísání:	± 0,5K	Oteplení:	2K/min
Ochlazení:	1,4K/min	Šířka:	710mm
Hloubka:	590mm	Výška:	1250mm
Úroveň hluku:	< 60dB		

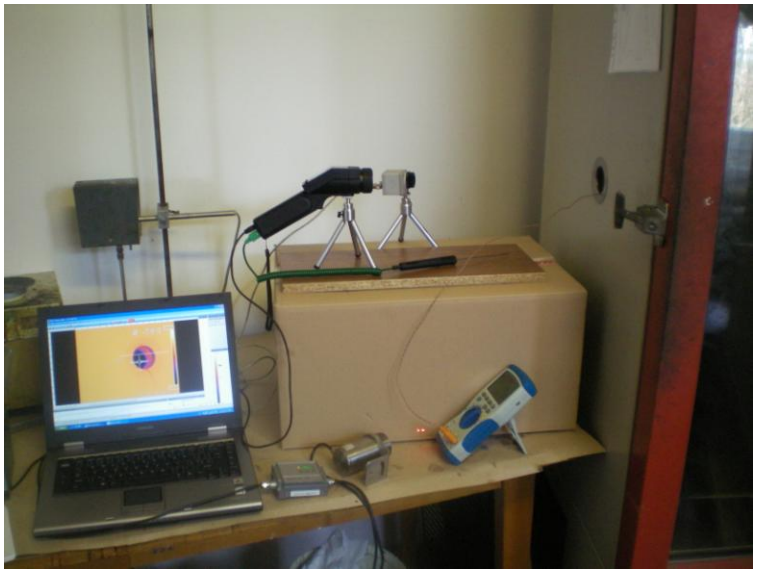
Zkušební systém pro testování součástek VT 3050
(převzato z [14])

Tento zkušební systém se používá při procesech stárnutí elektronických součástek. Umožňuje lineárně měnit teplotu uvnitř komory. Konkrétní nastavení průběhu teploty je dáno pracovním postupem daného procesu. Systém je vybaven odporovým teploměrem Pt 100. Přesnost teploměru je ± 1 K.

4.3. Měření povrchové teploty řídící jednotky snímače DBS 5908

4.3.1. Zapojení

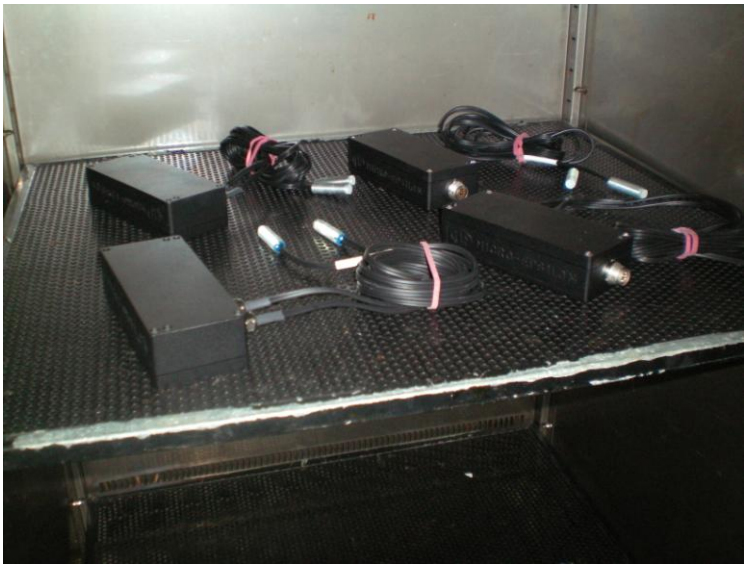
Před vypalovací pec jsem připravil měřící pracoviště. K měření jsem použil infračervenou kameru TIM 160, ruční infračervený teploměrem thermoMETER LS, stacionární infračervený teploměr thermoMETER CT laser M3 a termočlánkovou sondu K. Signál z infračervené kamery TIM 160 jsem přenášel pomocí USB kabelu do počítače. Ostatní měřící zařízení měla svůj displej, na kterém se zobrazovala naměřená hodnota.



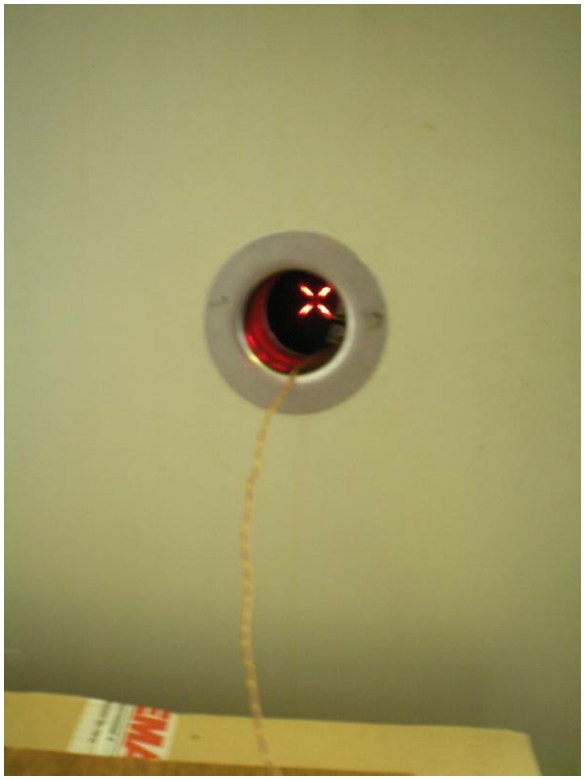
4.3.2. Postup měření

Do pece VT 3050 jsem umístil senzory DBS 5908, které musí projít procesem stárnutí. Procesem stárnutí se rozumí měnit teplotu pece v rozmezí od -20 °C do +70 °C po dobu 4h. V našem případě jsem simuloval proces stárnutí tak, že pomocí výše uvedených měřících přístrojů jsem měřil povrchovou teplotu řídící jednotky při různých teplotách. Boční otvor pece jsem využil pro zaměření a následné změření povrchové teploty. Zároveň jsem jím vedl kabel od termočlánkové sondy K. K připevnění termočlánku k řídící jednotce jsem použil lepící pásku. Při vypnutém stavu ukazovala zkušební pec teplotu 22°C. Pec jsem zapnul a nastavil požadovanou teplotu na 10°C. Po dosažení této teploty jsem zapsal naměřené údaje z jednotlivých teploměrů do tabulky. Teplotu zkušební pece jsem postupně snižoval o 10°C až do hodnoty -10°C. Při každém

dosažení požadované teploty jsem zapsal naměřené hodnoty do tabulky. Později jsem teplotu pece zvyšoval o 10°C až do hodnoty 75°C.



Systémy DBS 5908 umístěné ve vypalovací peci



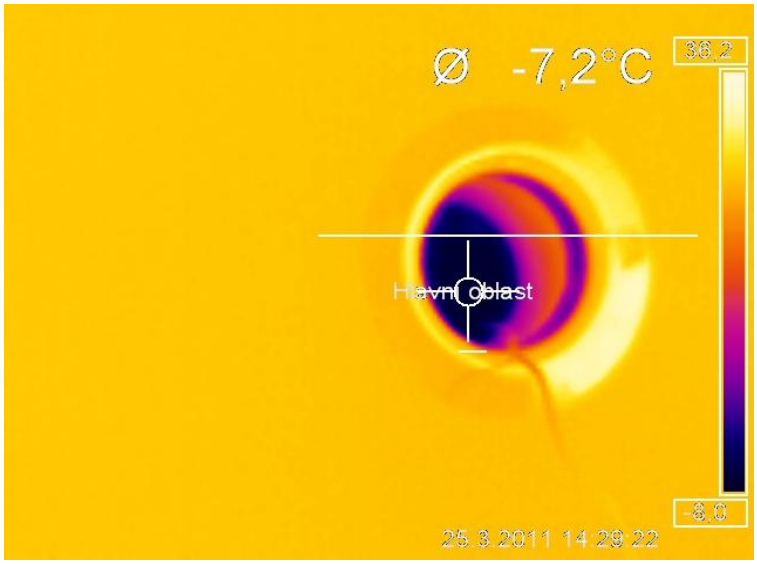
Na obrázku je vidět kabel z termočlánkové sondy K a zaměřovací laserový kříž infračerveného teploměru thermoMETER LS.

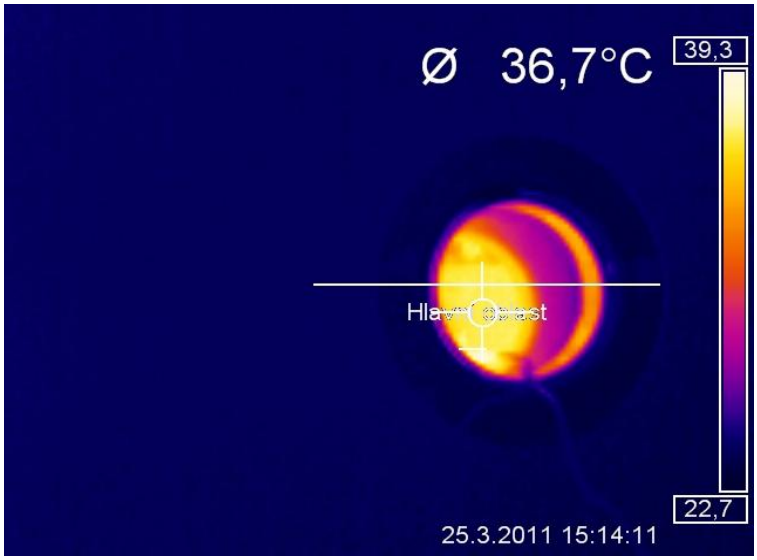
4.3.3. Tabulka naměřených hodnot

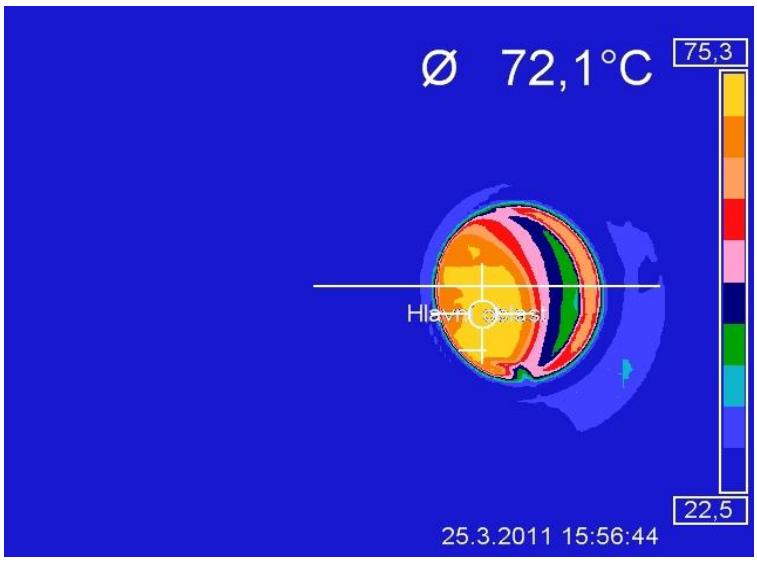
			NAMĚŘENÉ HODNOTY			
Číslo měření	Teplota pece, původní hodnota [°C]	Teplota pece, následující hodnota po ohřátí, či ochlazení [°C]	Termočlánek NiCr Ni [°C]	Ruční infračervený teploměr LS [°C]	Infračervená kamera TIM 160 [°C]	infračervený stacionární teploměr CT laser 3M [°C]
1.	22,0	10,0	13,5	13,9	13,8	-----
2.	10,0	0,0	5,0	5,6	4,8	-----
3.	0,0	-10,0	-5,9	-5,9	-7,6	-----
4.	-10,0	0,0	-2,1	-2,2	-3,4	-----
5.	0,0	10,0	4,9	4,8	4,6	-----
6.	10,0	20,0	13,6	13,7	13,4	-----
7.	20,0	30,0	22,7	22,8	23,3	-----
8.	30,0	40,0	34,5	34,9	35,8	-----
9.	40,0	50,0	45,0	45,2	46,3	-----
10.	50,0	60,0	57,0	57,5	58,2	59,1
11.	60,0	70,0	66,9	67,5	68,0	68,2
12.	70,0	75,0	73,0	73,8	74,2	73,3

Zápis naměřených hodnot jsem prováděl za neustáleného stavu. Teplota měřené řídící jednotky se v čase měnila. Cílem měření bylo porovnání teploty snímačů na stejném materiálu v jeden okamžik. Podle katalogových údajů, by měl nejpřesněji měřit ruční infračervený teploměr thermoMETER LS. Přesnost tohoto teploměru může být ale zavádějící v případě, že špatně nastavíme emisivitu, budeme měřit na kovovém materiálu bez použití samolepky s emisivitou 0,95, nebo při měření bude oblast měření teploměru zasahovat do nepožadovaného místa.

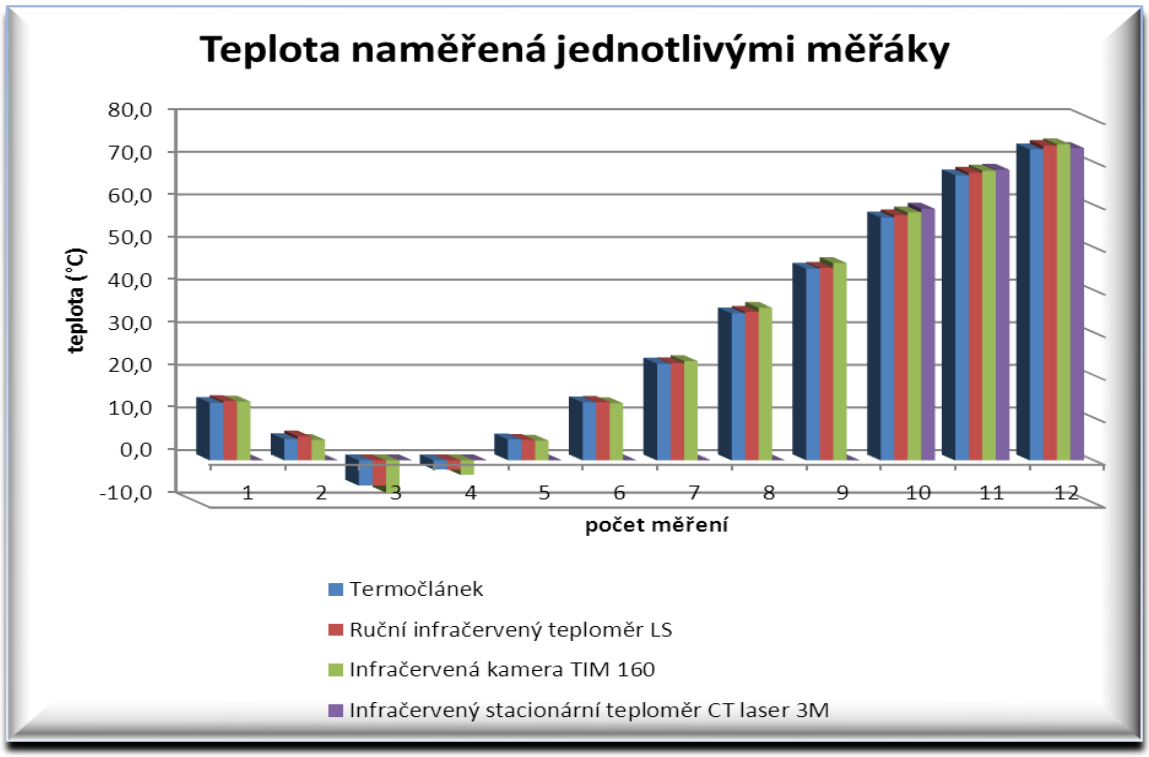
4.3.4. Fotografie pořízené infračervenou kamerou







4.3.5. Grafický průběh naměřených hodnot



4.3.6. Závěr měření

Měření všemi měřícími přístroji bylo srovnatelné a uspokojivé. Odchylka jednotlivých měřících systémů nebyla vyšší než 2,6°C.

4.4. Měření povrchové teploty optického snímače optoNCDT 1402 SC

4.4.1. Zapojení

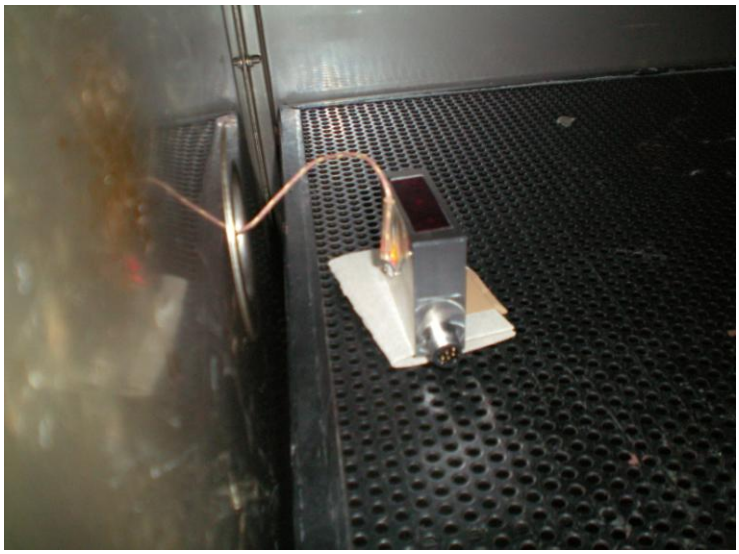
Před vypalovací pec jsem připravil měřící pracoviště. K měření jsem použil infračervenou kameru TIM 160, ruční infračervený teploměrem thermoMETER LS, stacionární infračervený teploměr thermoMETER CT laser M3 a termočlánkovou sondu K. Signál z infračervené kamery TIM 160 jsem přenášel pomocí USB kabelu do počítače. Ostatní měřící zařízení měla svůj displej, na kterém se zobrazovala naměřená hodnota.

4.4.2. Postup měření

Do pece jsem vložil optický snímač optoNCDT 1402 SC. Pouzdro snímače je vyrobeno z nerezové ušlechtilé oceli V4A. Senzory musí během výroby projít procesem stárnutí. Procesem stárnutí se rozumí měnit teplotu pece v rozmezí od -20 °C do +70 °C po dobu 1h.

Při prvním měření jsem na snímač nalepil štítek s emisivitou 0,95 o průměru 25mm. Infračervenou kameru TIM 160 nastavil tak, abych snímal teplotu na štítku (emisivita nastavená na 0,95) a zároveň mimo štítek (emisivita nastavená na 0,45). Ručním infračerveným teploměrem thermoMETER LS jsem snímal teplotu na štítku (emisivita nastavená na 0,45). Termočlánkovou sondu jsem připevnil na pouzdro optického snímače. Při vypnutém stavu ukazovala zkušební pec teplotu 22 °C. Pec jsem zapnul a nastavil požadovanou teplotu na 30 °C. Po dosažení této teploty jsem zapsal naměřené údaje z jednotlivých teploměrů do tabulky. Teplotu zkušební pece jsem postupně navyšoval o 10 °C až do hodnoty 70 °C. Při každém dosažení požadované teploty jsem opět zapsal naměřené hodnoty do tabulky.

Při druhém měření jsem použil termočlánkovou sondu K a stacionární infračervený teploměr thermoMETER CT laser M3. Tento teploměr, díky nižšímu spektrálnímu rozsahu, umožňuje měřit povrchovou teplotu kovu bez použití lepícího štítku. Nevýhodou je, že měří od teploty 50 °C. Teplotu pece jsem proto nastavil na 55°C. Po dosažení této teploty jsem zapsal naměřené údaje z obou teploměrů do tabulky. Teplotu zkušební pece jsem postupně navyšoval o 5 °C až do hodnoty 75 °C. Při každém dosažení požadované teploty jsem zapsal naměřené hodnoty do tabulky.



Optický snímač optoNCDT 1402 SC umístěný ve vypalovací peci

4.4.3. Tabulky naměřených hodnot

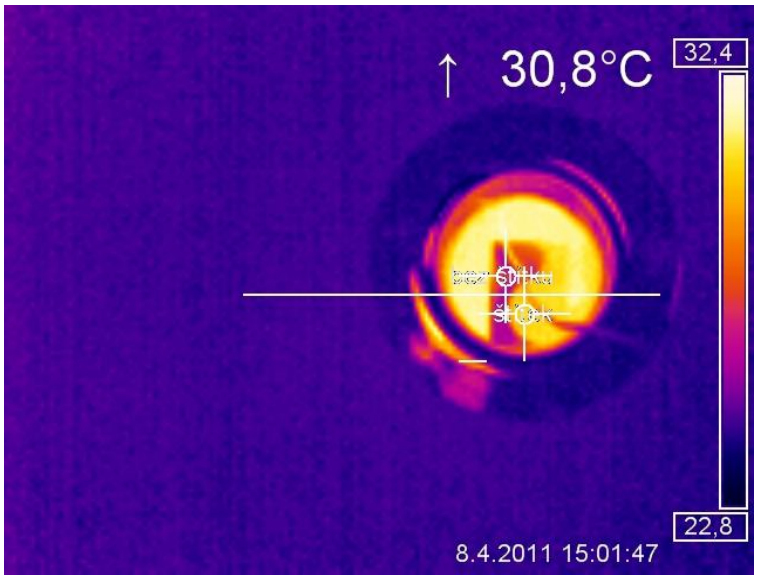
1. měření

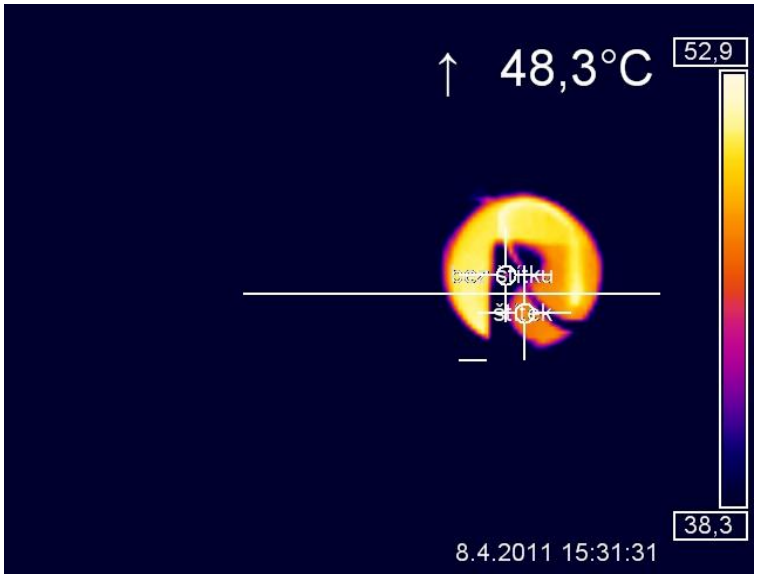
			NAMĚŘENÉ HODNOTY			
Číslo měření	Teplota pece, původní hodnota [°C]	Teplota pece, následující hodnota po ohřátí, či ochlazení [°C]	Termočlánek NiCr Ni [°C]	Ruční infračervený teploměr LS [°C], použit štítek s emisivitou O,95	Infračervená kamera TIM 160 [°C], použit štítek s emisivitou 0,95	Infračervená kamera TIM 160 [°C], bez použití štítku, emisivita nastavena na 0,45
1.	22,0	30,0	30,6	30,8	31,8	30,4
2.	30,0	40,0	39,3	38,0	40,0	38,9
3.	40,0	50,0	49,1	46,1	49,2	46,6
4.	50,0	60,0	60,4	55,1	59,6	54,5
5.	60,0	70,0	72,5	64,7	69,6	66,1

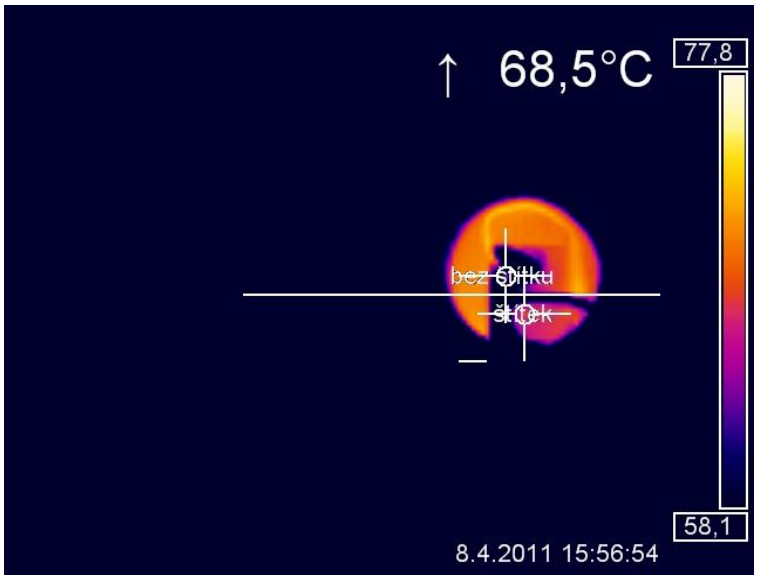
2. měření

			NAMĚŘENÉ HODNOTY	
Číslo měření	Teplota pece, původní hodnota [°C]	Teplota pece, následující hodnota po ohřátí, či ochlazení [°C]	Termočlánek NiCr Ni [°C]	Infračervený stacionární teploměr CT laser M3 [°C], Emisivita nastavena na 0,9
1.	50,0	55,0	53,3	54,1
2.	55,0	60,0	58,8	60,2
3.	60,0	65,0	64,7	64,8
4.	65,0	70,0	72,0	68,3
5.	70,0	75,0	78,3	72,5

4.4.4. Fotografie pořízené infračervenou kamerou

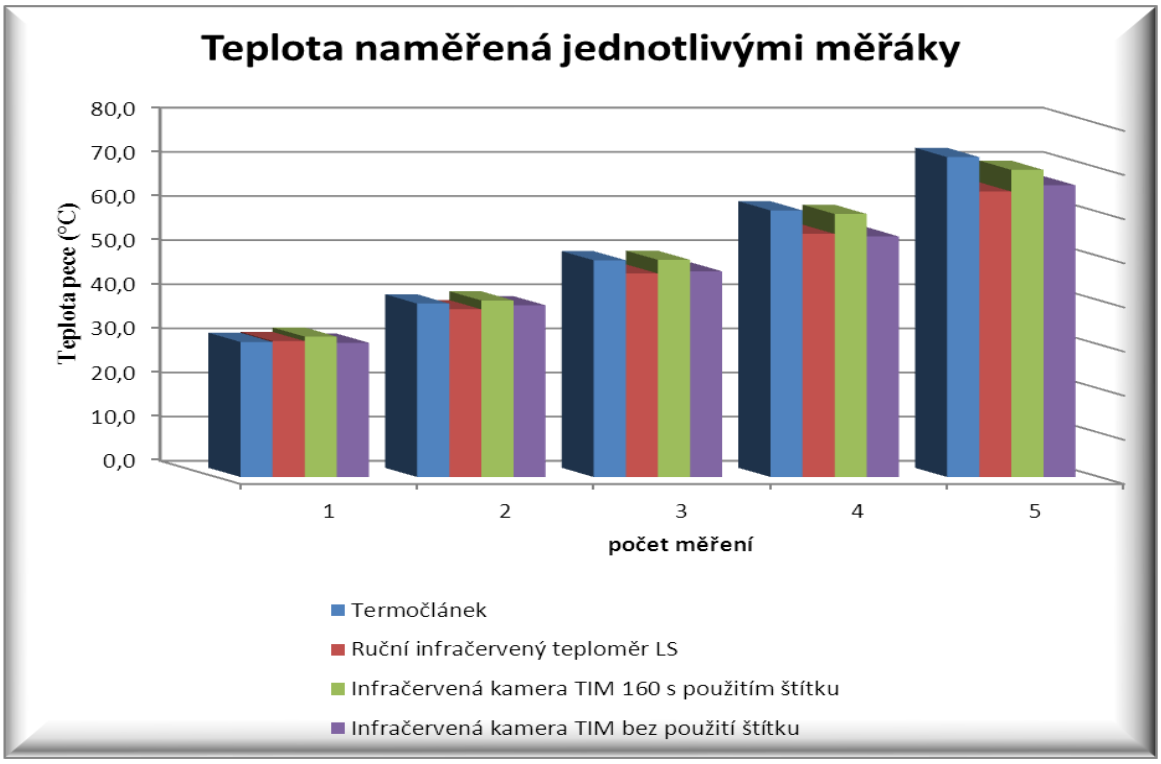




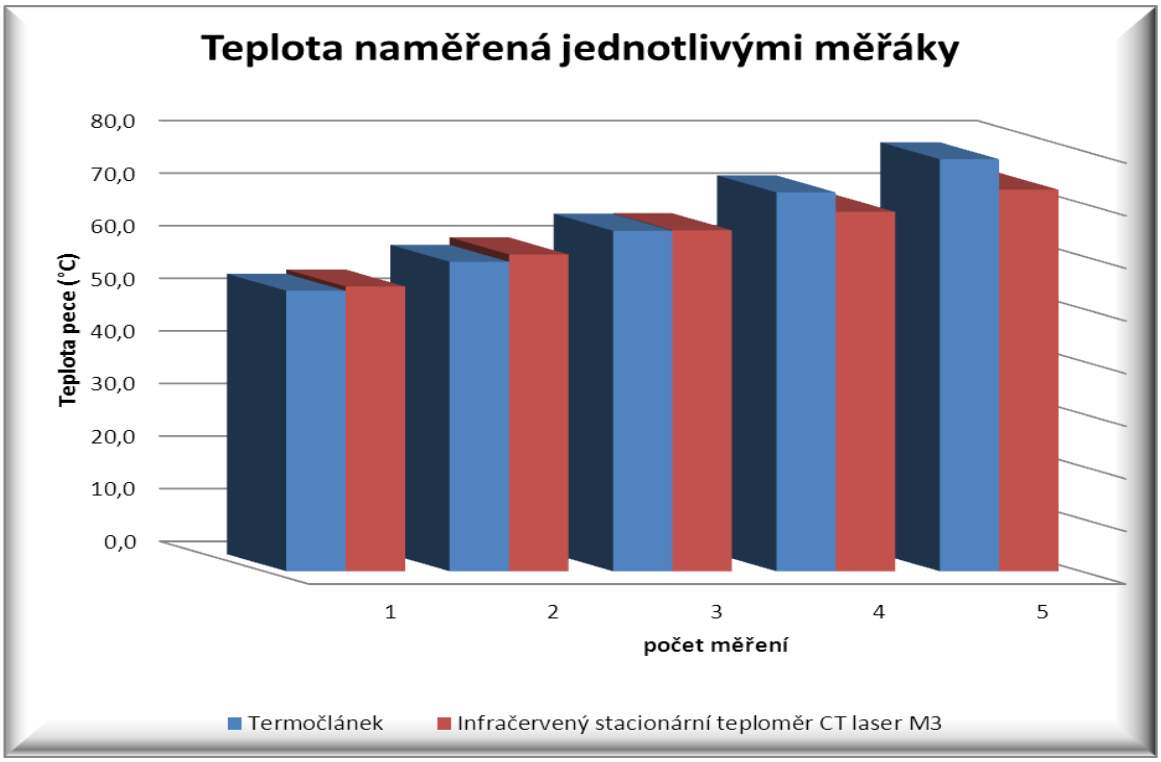


4.4.5. Grafický průběh naměřených hodnot

1. měření



2. měření



4.4.6. Závěr měření

1. měření

Účelem prvního měření bylo porovnat hodnoty ručního infračerveného teploměru thermoMETER LS, infračervené kamery TIM 160 a termočlánkové sondy K. Teploměre Pt 100, který byl součástí vypalovací pece, jsem využil k naměření referenční hodnoty teploty. Nejlepších výsledků jsem docílil použitím infračervené kamery TIM 160 za použití štítku s emisivitou 0,95. Pomocí software jsem nastavil dvě oblasti s velikostí 1x1 pixel. V prvním případě jsem měřil teplotu štítku (emisivita oblati nastavená na 0,95), ve druhém případě jsem měřil teplotu ocelového pouzdra (emisivita nastavená na 0,45). Infračerveným teploměrem thermoMETER LS jsem měřil teplotu štítku s emisivitou 0,95. Nepřesnost tohoto teploměru se s vyšší hodnotou zvyšovala. Pravděpodobně jsem při měření zabíral i oblast mimo štítek. Tím se hodnota průměrovala a došlo k vyšší odchylce měření. Termočlánková sonda K se do teploty 70°C chovala velmi stabilně. Při vyšší teplotě se přesnost sondy zhoršila.

2. měření

Učelem druhého měření bylo porovnat hodnoty teploty z termočlánkové sondy K a stacionárního teploměru thermoMETER CT laser M3 (emisivita nastavená na 0,9). Teplotu jsem měřil přímo na ocelovém pouzdru bez použití štítku. Stacionární infračervený teploměr se díky nižšímu spektrálnímu rozsahu choval velmi stabilně a přesnost měření byla v toleranci s parametrem uváděným výrobcem. Termočlánková sonda K se do teploty 70°C chovala stabilně. Při vyšší teplotě se přesnost sondy zhoršila.

5. Výhody a nevýhody používání bezdotykových infračervených teploměrů

Výhody

- Lze měřit pohybující a horké objekty a objekty ve výbušném prostředí.
  Nedochází k přímému kontaktu mezi čidlem a povrchem tělesa.

- Velmi rychlá odezva
  Infračervené teploměry reagují na změnu teploty řádově v milisekundách, což umožňuje uskutečňovat více měření v relativně krátké době.

- Dlouhotrvající a nedestruktivní měření
  Není potřeba na měřený povrch umisťovat různá čidla mechanicky, chemicky, apod.

- Zanedbatelný vliv měřící techniky na měřený objekt
  Z měřeného objektu není odebírána žádná tepelná energie, což je výhodné zejména u materiálů, které špatně vedou teplo, jako např. dřevo, nebo plasty.

- Možnost měřit a dále zpracovávat teplotu v celém obrazu, za použití infračervené kamery.

- Lze měřit povrchovou teplotu kovů, skla, plamene atd.

Nevýhody

- Vyšší cena

- Mezi nevýhodu můžeme zařadit nejistotu měření způsobenou nastavením nesprávné emisivity

6. Závěr

Bakalářskou prací Porovnání měření teploty dotykovou a bezdotykovou metodou jsem se snažil objasnit výhody a nevýhody dotykové a bezdotykové metody měření teploty. V teoretické části popisuji jednotlivé metody. V praktické části jsem se zaměřil na porovnání měření teploty ručním bezdotykovým infračerveným teploměrem thermoMETER LS, infračervenou kamerou TIM 160, stacionárním infračerveným teploměrem thermoMETER CT laser M3 od firmy MICRO-EPSILON a termočlánkové sondy K s multimetrem TD 2200 od firmy Technology Korea Corporation. Měření jsem provedl na řídící jednotce, která byla pokryta černou vrstvou a na optickém snímači, jehož pouzdro bylo vyrobeno z ušlechtilé oceli. Oba systémy jsem vložil do vypalovací pece a skrz otvor měřil povrchovou teplotu. Součástí vypalovací pece byl odporový teploměr Pt 100, který jsem použil k naměření referenční hodnoty vnitřní teploty pece. Při měření bezdotykovou metodou může samotné měření ovlivnit více faktorů. Při použití infračervených teploměrů se spektrálním rozsahem 8μm – 14μm dochází při měření vůči lesklému kovovému objektu k odchylce měření. Pro měření na kovových materiálech se využívají úzkopásmové infračervené teploměry s nižším spektrálním rozsahem 1μm, 1,6μm, případně 2,3μm. Jako alternativu lze použít speciální samolepku s emisivitou 0,95, nebo speciální sprej pro vypalování pecí. Samolepku lze použít do teploty 380°C. Sprej lze použít až do teplot 800°C.

Doufám, že tato práce bude svým čtenářům užitečnou pomůckou při zvolení optimální bezdotykové a dotykové metody měření povrchové teploty.

Seznam použité literatury:

1. Vlastimil Beran, Technická měření – Učební text, Fakulta elektrotechnická, Západočeská univerzita v Plzni 2004
2. Milan Hutyra, Miroslav Dubec, Bohumil Horák, Měření neelektrických veličin1, - Návody k laboratorním cvičením, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Vysoká škola Báňská – Technická univerzita Ostrava
3. Marcel Kreidl, Senzory a měřící obvody. BEN – technická literatura, Nakladatelství BEN, 2005
4. Martínek, Senzory v průmyslové praxi. BEN – technická literatura Praha, 2004
5. Infračervené teploměry http://www.micro-epsilon.cz/products/temperature-sensors/index.html
6. Ing. Roman Vavřička, Bezdotykové měření teploty, Fakulta strojní, ČVUT v Praze http://utp.fs.cvut.cz/vz/clanky/104.pdf
7. Kadlec, Bezdotykové měření teploty, VŠCHT Praha http://web.vscht.cz/kadleck/aktual/LBMT/BMT-priprava_lab_v4.pdf
8. http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=33504
9. Termistor http://cs.wikipedia.org/wiki/Termistor
10. http://stag.zcu.cz/fel/kae/+sac/final.pdf
11. http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=28448
12. Měření a regulace teploty http://www.aterm.cz/Teperm.htm
13. Ludvík Bejček, Snímače teploty – článek http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/39160.pdf
14. Odporové senzory teploty http://147.229.68.118/~adamek/uceb/DATA/s_3_2_4.htm
15. Snímače teploty, SPŠ Kutná hora http://www.edumat.cz/texty/teplota.pdf

16. Odporové teploměry a termočlánky Rosemount http://www.emersonprocess.com/Rosemount/document/man/00809-0301-2654.pdf

17. Měření teploty http://uprt.vscht.cz/ucebnice/mrt/F4/F4k43-tepl.htm#k432