

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

BEZDOTYKOVÉ MĚRENÍ TEPLoty

NON-CONTACT TEMPERATURE MEASUREMENT METHODS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

PETR SEGEŤA

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. KAMIL PODANÝ, Ph.D.

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie
Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Petr Segeřa

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

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

Bezdotykové měření teploty

v anglickém jazyce:

Non-contact temperature measurement methods

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jedná se o zpracování aktuální literární studie možných metod bezkontaktního měření teploty. Součástí práce bude rozbor jejich významu a příklady použití ve strojírenské praxi.

Cíle bakalářské práce:

Aktuální literární studie se zaměřením na bezdotykové způsoby zjišťování teplot se zhodnocením jejich výhod a nevýhod.

Seznam odborné literatury:

1. ČECH, Jaroslav, Jiří PERNIKÁŘ a Kamil PODANÝ. Strojírenská metrologie. Skriptum FSI VUT v Brně, 4. přeprac. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 2005. 176 s. ISBN 80-214-3070-2.
2. KŘÍŽ, Rudolf a Pavel VÁVRA. Strojírenská příručka - 2. Sv. D: Měřicí technika a bezdemontážní diagnostika. 1. vyd. Praha: SCIENTIA, spol. s.r.o., 1993. 224 s. ISBN 80-85827-00-X.
3. ZEHNULA, Karel. Snímače neelektrických veličin. 2. vyd. Praha: SNTL, 1983. 371 s.
4. JENČÍK, Josef a Jaromír VOLF. Technická měření. 1. vyd. Praha: ČVUT, 2000. 212 s. ISBN 80-01-02138-6.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Kamil Podaný, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/2012. V Brně, dne 15.11.2011

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

SEGEŘA Petr: Bezdotykové měření teploty.

Práce obsahuje přehled metod bezdotykového měření teplot. V práci je rozebrána teorie, a dvě hlavní metody - termovizní a měření pomocí pyrometrů. Je popsán princip, kalibrace, jejich výhody a nevýhody.

Klíčová slova: bezdotykové měření, teplota, pyrometr, termovize, fotometrie

ABSTRACT

SEGEŘA Petr: Non-contact temperature measurement methods.

The thesis provides an overview of methods for non-contact temperature measurement. The thesis analyzes the theory and the two main methods - measurement using pyrometers and thermovision. Are described the principle, calibration, their advantages and disadvantages.

Keywords: Non-contact measurement, temperature, pyrometer, thermovision, photometry

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SEGEŘA, Petr. Bezdotykové měření teploty. Brno, 2012. 27 s. CD. Bakalářská práce.
Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Kamil
Podaný, Ph.D.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího bakalářské práce.

V Brně dne:

podpis:.....



PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu Ing. Kamilu Podanému, Ph.D. za cenné připomínky a rady týkající se zpracování bakalářské práce.

OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

ÚVOD	10
2 PRINCIP	11
2.1 Detektory.....	13
3 PYROMETRY	16
3.1 Subjektivní pyrometry	17
3.1.1 <i>Jasové pyrometry</i>	17
3.1.2 <i>Barvové pyrometry</i>	19
3.2 Objektivní pyrometry.....	20
3.2.1 <i>Monochromatické pyrometry</i>	20
3.2.2 <i>Pásmové pyrometry</i>	20
3.2.3 <i>Pyrometry celkového záření</i>	21
3.2.5 <i>Poměrové pyrometry</i>	22
4 ZOBRAZOVACÍ METODY	23
4.1 Fotometrie	23
4.2 Termovizní metody	24
4.2.1 <i>Rozklad obrazu</i>	25
4.2.2 <i>Zásady práce s termovizní kamerou</i>	25
5 ZÁVĚR	27

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých symbolů

ÚVOD [1] [2] [6] [18] [19]

Při výrobě součástí je klíčovou veličinou teplota. Teplota hraje velkou roli pro správné nastavení podmínek výrobního a technologického procesu. Teplotu je možné měřit dotykově nebo bezdotykově. Dotykové měření je používáno při méně náročných operacích, kdy není problém na měřenou součást přidat senzor teploty. Používají se termočlánky. Pokud není možné umístit senzor na součást (příliš vysoké teploty, pohybující se součásti), tak je používáno bezdotykové měření.

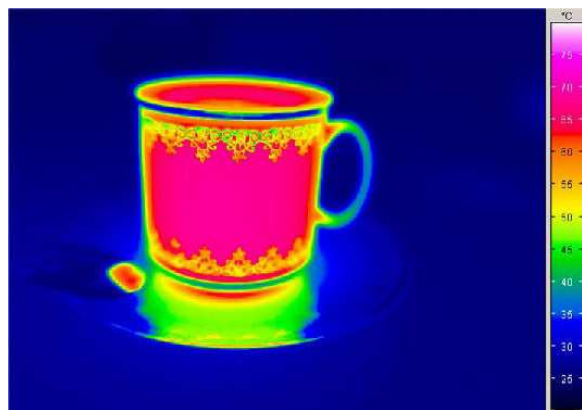
Bezdotykové měření teploty je velmi efektivní, nedestruktivní, ekonomicky dobře využitelný způsob měření teploty, u kterého nehrozí chyba dotykem, otěrem nebo dokonce destrukce čidla. Je využíváno v technologických procesech pro okamžité určení teploty dané součásti. Díky své efektivnosti se používá v kusových úkonech, ale taky v sériových procesech. Používá se pro měření teplot od -50°C do 4000°C .



Obr. 1 Rozdělení bezdotykového měření teploty

Bezdotykové měření pracuje na principu porovnání energií. Každé těleso vyzařuje určitou energii. Tuto energii je potřeba zachytit, změřit a porovnat.

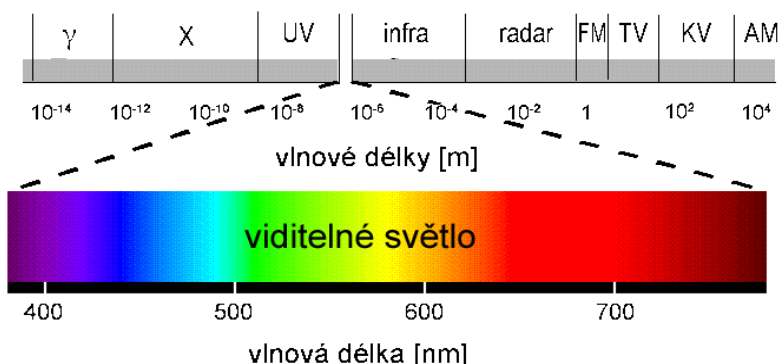
Přístroje používané pro bezdotykové měření teploty jsou pyrometry nebo termovize. Přístroje využívají infračerveného spektra pro snímání teploty. Existují mnohá úskalí, která zneprůjemňují jejich použití, ale lze se s nimi vyrovnat. Určování teploty závisí na mnoha faktorech - emisivitě tělesa, povrchu tělesa, kalibraci přístroje a jiné. V práci budou nastíněny metody bezkontaktního měření teploty, jejich výhody a nevýhody a jejich použití v praxi.



Obr. 2 Ukázky bezdotykového měření teplot pomocí termovize a pyrometru [19,18]

2 PRINCIP [2] [6] [8] [10] [16]

Všechny objekty, o vyšší teplotě než 0K, vyzařují elektromagnetické záření o různé hodnotě vlnové délky. Je způsobeno vnitřním pohybem molekul. S rostoucí teplotou roste intenzita záření. Tento princip platí přibližně do teplot 4000°C. Pro bezdotykové měření jsou využívány vlnové délky v rozsahu 0,4 - 20 μm. Tento rozsah leží pod infračerveným světlem a je pro lidské oko neviditelný. Na obrázku 3 je zobrazeno rozložení elektromagnetického záření.



Mezi výhody bezdotykového měření teplot patří

- + zanedbatelný vliv měřicí techniky na měřený objekt
- + měření teploty rotujících a pohybujících se objektů
- + měření teplot z bezpečné vzdálenosti - hutní objekty, elektrická zařízení.
- + možnost měření velmi rychlých změn teploty
- + možnost měření teploty celého povrchu měřeného tělesa - termovize, termografie
- + nehrozí chyba dotykem nebo otěrem
- + nedestruktivní metoda

Bezdotykové měření teplot má i své nevýhody

- neznalost přesné emisivity měřeného tělesa
- neznalost přesné hodnoty propustnosti prostředí mezi měřeným tělesem a čidlem - prach, drobné kapičky vody
- nutná korekce parazitního záření z okolí měřeného tělesa.
- vyšší pořizovací náklady
- nutná opakovaná kalibrace

Závislosti mezi tepelným zářením a teplotou povrchu sledovali pánové Stefan s Boltzmannem. Odvodili vztah pro celkovou intenzitu záření. Stefan-Boltzmannův zákon (2.1) popisuje závislost mezi celkovou intenzitou elektromagnetického záření absolutně černého tělesa a jeho teplotou a říká, že celková intenzita tepelného záření roste se čtvrtou mocninou teploty zářícího tělesa.

$$M_0 = \int_0^{\infty} M_{0\lambda} \cdot d\lambda = \sigma \cdot T^4 \quad (2.1)$$

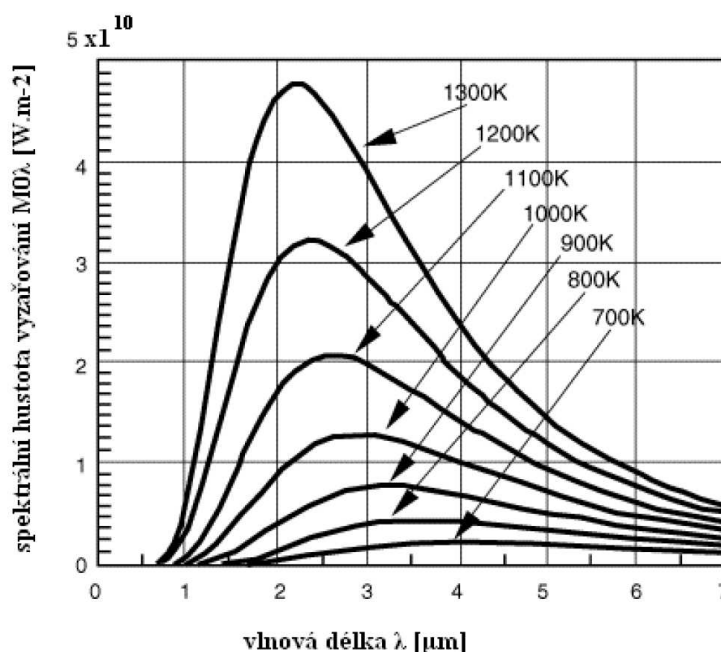
kde: M_0 hustota intenzity záření [$W \cdot m^{-2}$]

$M_{0\lambda}$ spektrální hustota intenzity záření absolutně černého tělesa [$W \cdot m^{-2}$]

σ Stefanova-Boltzmannova konstanta ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$)

T teplota tělesa [K]

Stefan-Boltzmannův zákon není vhodný pro praktické použití. Místo něj je používán Planckův zákon (2.2), ten vyjadřuje závislost intenzity záření na vlnové délce a teplotě, viz obrázek 4. Max Planck jej odvodil za předpokladu, že černé těleso nemůže pohlcovat nebo vyzařovat energii v libovolně velkém množství, ale pouze po určitých částech tzv. kvantech. Planckův zákon lze upravit a to tak, že je derivována spektrální hustota podle vlnové délky. Derivace je položena rovno nule.



Obr. 4 Závislost intenzity elektromagnetického záření na vlnové délce a teplotě [10]

$$M_{o\lambda} = \frac{2 \cdot \pi \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5 \cdot e^{\frac{h \cdot c}{\lambda \cdot T}}} = \frac{c_1}{\lambda^5 \cdot \left(e^{\frac{c_2}{\lambda \cdot T}} - 1 \right)} \quad (2.2)$$

- kde: c rychlost světla [$c = 299\,792\,485 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$]
 c_1 první vyzařovací konstanta ($c_1 = 3,7413 \cdot 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$)
 c_2 druhá vyzařovací konstanta ($c_2 = 1,4388 \cdot 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$)
 h Planckova konstanta ($h = 6,6260755 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$)
 λ vlnová délka záření [m]
 k Boltzmannova konstanta ($k = 1,380648 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Derivací je získán tzv. Wienův zákon posunu (2.3). Vyjadřuje, že intenzita záření černého tělesa je maximální tehdy, jestliže se vlnová délka zkracuje s rostoucí termodynamickou teplotou. Tedy čím má těleso vyšší teplotu, tím září na kratších vlnových délkách.

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T} \quad (2.3)$$

- kde: λ_{\max} = maximální vlnová délka pro vyzařování [m]
 b = Wienova konstanta [$b = 2898 \text{ m} \cdot \text{K}$]

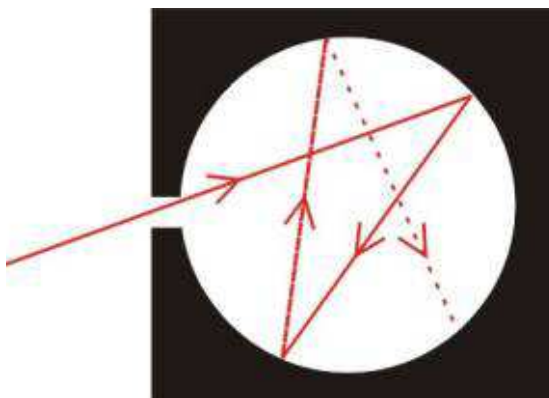
Při porovnávání a zkoumání vyzařování daného tělesa je nutné uvažovat zákon zachování energie (2.4). Na povrch měřeného tělesa dopadá záření o intenzitě E , část tohoto záření se od povrchu odrazí - E_r , část záření je pohlceno - E_a a část záření je propuštěno - E_p .

$$E = E_r + E_a + E_p \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (2.4)$$

Všechny tyto zákony platí pro absolutně černé těleso. Toto těleso je fyzikální představou, které pohlcuje všechno záření ve všech vlnových délkách dopadající na jeho povrch. Zároveň platí, že je také ideálním zářičem. Ze všech těles o stejné absolutní teplotě vyzařuje největší

dosažitelné množství záření - energie. Absolutně černé těleso si lze přestavit jako duté těleso s velmi malým otvorem, viz obr. 5. Veškeré záření, které vniká do dutiny je postupně pohlcováno stěnami tělesa. Tyto stěny neustále vyzařují a pohlcují záření.

Jelikož toto těleso neexistuje byl zaveden pojem emisivita ε . Nabývá hodnot 0 až 1 a je definovaná jako poměr vyzařované energie měřeného tělesa děleno vyzařovanou energií absolutně černého tělesa za stejné teploty a vlnové délky (2.5). Maximální hodnota emisivity $\varepsilon = 1$ je pro absolutně černé těleso. Pro všechny ostatní tělesa je ε menší než jedna.



Obr.5 Model absolutně černého tělesa [16]

$$\varepsilon(\lambda, T) = \frac{M(\lambda, T)}{M_0(\lambda, T)} = [-] \quad (2.5)$$

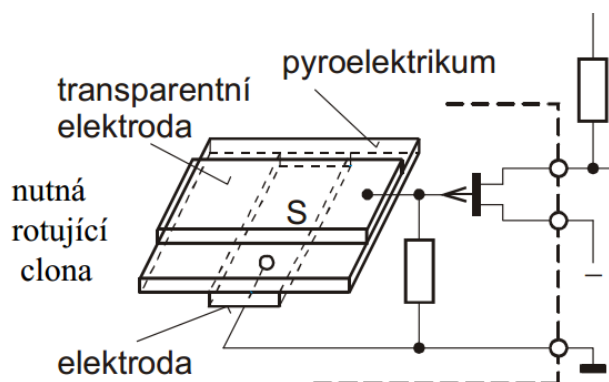
Absolutně černé těleso neexistuje, proto byl zaveden pojem šedé těleso. Šedé těleso je takové těleso, jehož emisivita nezávisí na vlnové délce. Sice šedé těleso také neexistuje, nicméně mnoho technicky významných materiálů je v určitém rozsahu vlnových délek nezávislých na emisivitě. Emisivita také záleží na drsnosti povrchu. Zoxidované, natřené, zdrsňené povrchy mají emisivitu blízkou číslu 1. Například zrcadlo nebo leštěný hliník mají emisivitu okolo 0,1. Dále závisí na mnoha dalších faktorech jako je například úhel měření, propustnost, spektrální rozsah, geometrie povrchu apod.

2.1 Detektory [6] [10] [11] [13]

Detektor je zařízení v pyrometru, pro převod dopadající elektromagnetického záření na elektrický signál, který je dále zpracováván. Tyto detektory jsou používány také u zobrazovacích metod. Rozlišujeme dva druhy detektorů - tepelné a kvantové.

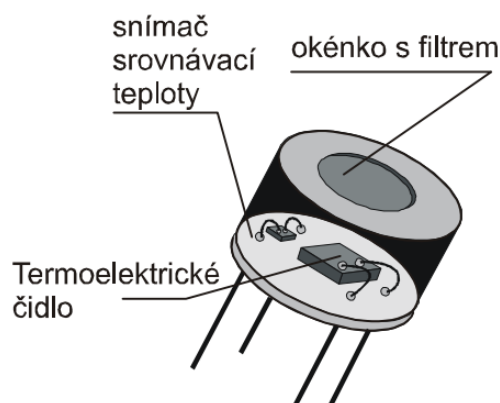
Tepelné detektory přeměňují dopadající záření na teplo, to je poté převedeno na elektrický signál. Tyto detektory se nejčastěji používají u pyrometrů celkového záření. Jsou cenově dostupné. Patří zde pyroelektrické detektory, termočlánky a bolometry.

Pyroelektrické detektory fungují na principu pyroelektrického jevu tj. při změně teploty se na povrchu krystalu objeví krátkodobé napětí. Proto jsou tyto detektory vyrobeny z krystalických materiálů. Na obrázku 7 je schématicky zobrazen pyroelektrický detektor se zesilovačem. Změna napětí je zpracovávána v tranzistoru, který je součástí snímače. Tyto detektory jsou citlivé v širokém pásmu infračerveného záření, proto jsou před detektory instalovány filtry.



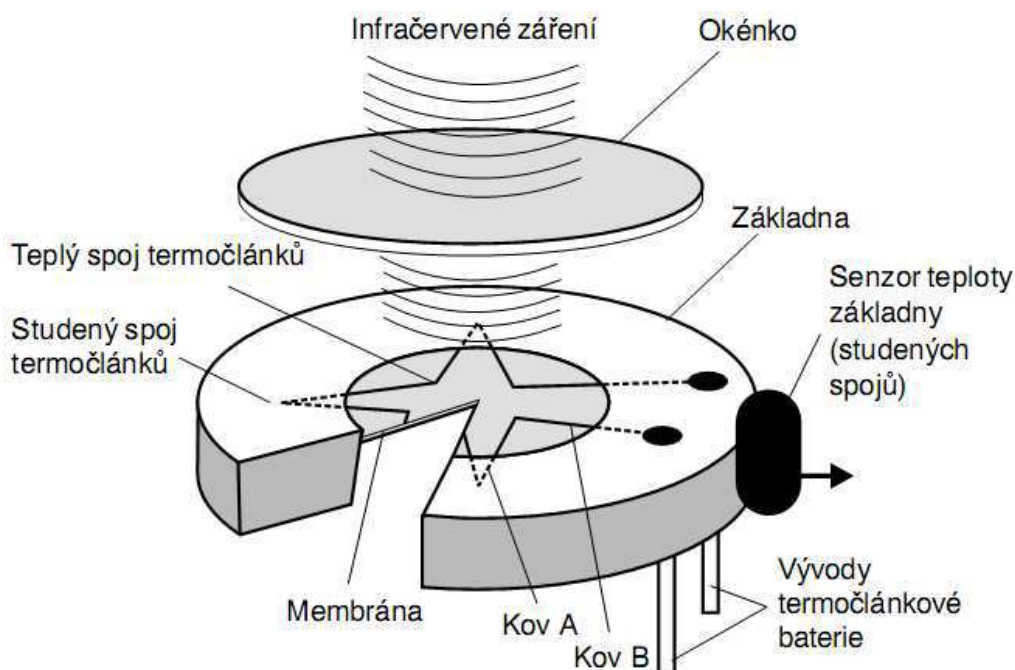
Obr. 7 Pyroelektrický detektor se zesilovačem [10]

Dalším druhem tepelného detektoru je termočlánekový detektor, viz obrázek 8. Na černý materiál (dobře absorbuje infračervené záření) je připojen termočlánek. Na tento termočlánek je zaměřeno záření od měřeného objektu. Teplota termočláneku se mění s intenzitou tohoto záření. Teplota teplého konce termočláneku je vyšší, než studeného konce. Tímto jevem je vyvoláno napětí v termočláneku, které je dále vyhodnoceno. Termočlánekové detektory reagují na záření ve směru, kterým jsou natočeny. Součástí termočlánekového detektoru je i klasický referenční termistor pro měření teploty pouzdra senzoru. Je totiž nutné provádět kompenzaci vlivu okolní teploty.



Obr. 8. Termočlánekový detektor [6]

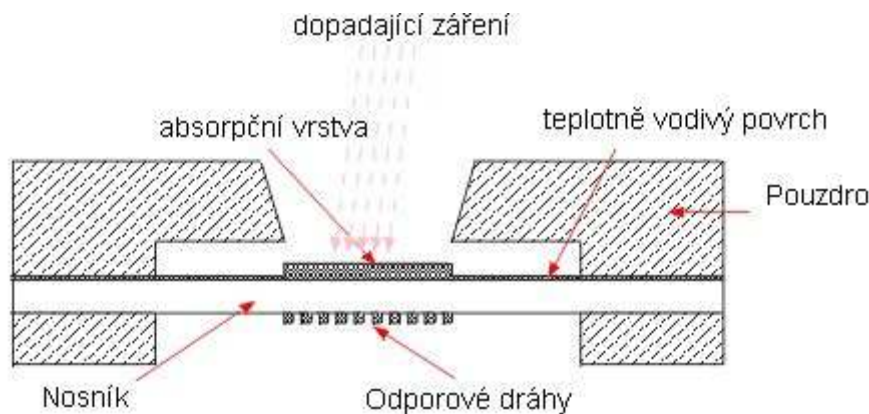
Na obrázku 9 je konstrukce detektoru infračerveného záření s baterií termočláneku. Infračervené záření prochází okénkem, které propustí pouze určité vlnové délky. Tepelné záření je přeměněno na teplo a poté na elektrický signál. Výstupní napětí termočláneku je úměrné rozdílu teplot mezi teplými a studenými spoji. Teplé spoje jsou zbarveny černou barvou kvůli lepší absorpci tepelného záření. Studené spoje jsou umístěny na základně. Teplotu studených spojů měří termistory. Termistor je elektrotechnická součástka, jejíž elektrický odpor je závislý na teplotě.



Obr. 9 Konstrukce tepelného detektoru s termočláneku [10]

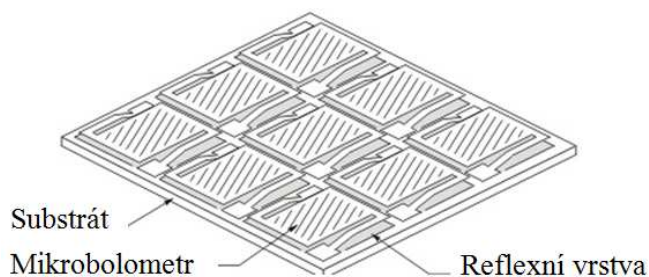
Bolometr je dalším tepelným detektorem, který je možno použít. Odpor bolometru se mění v závislosti na teplotě. Změna odporů je rovna dopadajícímu infračervenému záření od měřeného tělesa. To platí pouze tehdy, jsou-li bolometry izolovány od svého okolí.

Na obrázku 10 je provedení jednoduchého bolometru. Záření dopadá na absorpční vrstvu tvořenou zlatou folií. Ta pohlcuje 95% záření, které ohřívá teplotně vodivý povrch i nosník. Na spodní straně nosníku jsou stočené odporové dráhy. Odpor těchto drah roste lineárně s teplotou.



Obr. 10 Provedení jednoduchého bolometru [13]

Mikrobolometrické detektory pracují na totožném principu jako bolometrické detektory. Jeden senzor obsahuje více plošek, které absorbují záření, viz obrázek 11. Celý senzor je vyroben jako celistvý křemíkový obvod. Tyto senzory jsou nejčastěji používány v termovizních kamerách.



Obr. 11 Provedení mikrobolometru [13]

Kvantové detektory pracují na odlišném principu než tepelné detektory. Nepřevádějí dopadající záření na teplo, ale přímo na elektrický signál. Mezi kvantové detektory patří fotodioda, fototranzistor a fotoodpor. Při běžné pokojové teplotě je výsledný elektrický signál ovlivněn generátorovým šumem, proto je třeba tyto detektory chladit, což je jejich nevýhoda. Nejčastěji používaný materiál pro kvantové detektory je CMT (Cadmium Mercury Telluride). Spektrální citlivost detektoru je ovlivněna složením této sloučeniny a pohybuje se okolo 3-5 μm nebo 8-14 μm . Kvantové detektory se používají nejčastěji pro termovizní systémy, stejně jako mikrobolometry.



Obr. 12 Fotoodpor FW200 [11]

3 PYROMETRY [1] [6] [7] [12]

Pyrometry jsou bezdotykové teploměry, pracující na principu zpracování signálu elektromagnetického záření od měřeného tělesa. Slovo pyrometr pochází z řečtiny - pyr (oheň) a metrein (měřit). Pyrometry mohou měřit teploty od -50 do 3500 °C. Postupem doby bylo vyvinuto mnoho druhů pyrometrů. Aby pyrometry měřili s velkou přesností, je nutné je kalibrovat. Součástí pyrometru jsou detektory infračerveného záření a optický systém.

Pro správné seřízení přístroje se používá zařízení na kalibraci. Zařízení má přesně



definovanou emisivitou, viz obrázek 6. Je to model absolutně černého tělesa. Obvykle se jedná o kovovou dutinu, která má povrch upraven nátěrem a jehož emisivita je v rozmezí 0,98 až 0,995. Dutina je udržována na žádanou teplotu a to většinou pomocí elektrického regulátoru. Poté je pyrometr zaměřen na dutinu a kalibruje se hodnota buď emisivity nebo výsledné teploty.

Obr. 6 Teplotní kalibrátor BB-4A (černé těleso) [7]

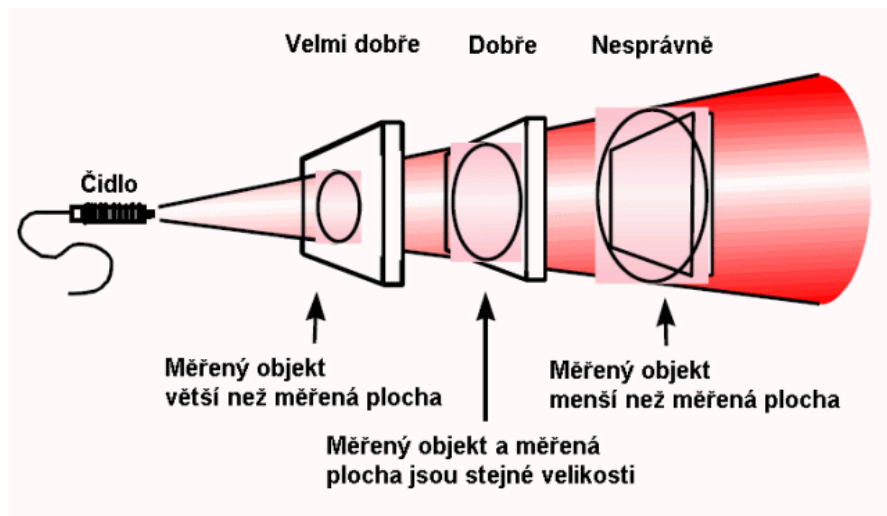
Výrobci pyrometry kalibrují tak, jako by byla měřena teplota absolutně černého tělesa ($\varepsilon = 1$). V důsledku toho je při měření reálných těles ($\varepsilon < 1$) naměřena menší teplota než je teplota skutečná. Moderní přístroje mají nastavitelnou emisivitu, která se dá měnit podle fyzikálních charakteristik měřeného objektu. Díky tomu se chyba měření redukuje.

Neznalost emisivity je velkým problémem pro určení teploty povrchu. Užití špatné emisivity má za následek velkou chybu měření. Emisivita je nejčastěji určována těmito způsoby.

- Emisivitu lze určit z různých tabulek a monogramů, které jsou obvykle přiloženy k danému přístroji. Toto určení není přesné, protože emisivitu ovlivňuje mnoho faktorů - např. stopy po obrábění, lakování, oxidace materiálu a jiné.
- Zahřáním měřeného tělesa na známou teplotu - na měřícím přístroji je nastavována emisivita tak dlouho, dokud přístroj neukazuje stejnou teplotu jako je teplota na tělese.
- Na měřený objekt je dodatečně nanesen speciální nátěr nebo nalepena černá páska. Oba tyto materiály mají emisivitu blízko k jedné, ideálně jako absolutně černé těleso. Tento nanesený povrch je poté měřen a jeho teplota je stejná jako teplota povrchu měřeného tělesa. Poté je na měřícím přístroji nastavena emisivita tak, aby si odpovídaly teploty na naneseném povrchu a měřeném objektu. Tento způsob je vhodný přibližně do 250 °C. Používá se především u velmi odrazivých materiálů jako je hliník a měď.
- Kombinací více metod - teplota je změřena jinou metodou, například termočlánkem a hodnota emisivity je nastavena na měřícím přístroji tak, aby teplota byla stejná, jako na termočlánku.

Optickým systémem je nazýváno zařízení pyrometru, které snímá infračervené záření od měřeného tělesa. Záření je zaostřováno do detektoru. Optický systém je složen z čoček a zrcadel. Materiály pro zrcadla jsou měď, stříbro a zlato. Okénko zaručuje, aby byl optický systém chráněn proti nečistotám a byl nepoškozený, což je nezbytné pro správnou funkci. Okénko ovlivňuje vlnové délky, na které pyrometr reaguje.

Na obrázku 13 je vidět optimální zaměření objektu při měření. Není vhodné, aby byl měřený předmět menší, než měřená plocha.



Charakteristickým parametrem je zorný úhel, tj. index zaostření, a je roven poměru snímané plochy na měřeném objektu ku vzdálenosti měřeného předmětu od objektivu. Čím je index zaostření menší, tím je optické rozlišení přístroje větší.

Obr. 13 Zaměření objektu [12]

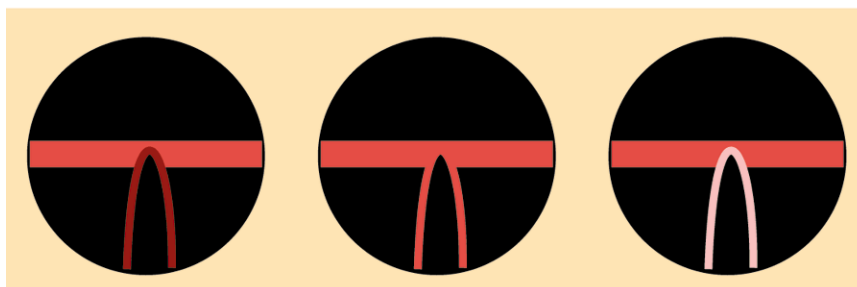
3.1 Subjektivní pyrometry

Subjektivní pyrometry potřebují k určení teploty subjekt - člověka. Detektorem záření je lidské oko. Porovnáním záření se srovnávacím zářičem určíme teplotu. Existují dva základní subjektivní pyrometry - jasové a barvové. Někdy se subjektivním pyrometrům také říká optické pyrometry.

Jsou poměrně jednoduché, v minulosti byly využívány častěji než dnes, kdy je předčily objektivní pyrometry. Jejich nevýhoda je nemožnost automatizace měření a taky rozdílné výsledky měření - každý člověk určí výsledný optický vjem subjektivně.

3.1.1 Jasové pyrometry [1] [2] [3] [20]

Snímají tepelné záření tělesa pouze na jedné vlnové délce - $0,65 \mu\text{m}$ - červená barva světla. Jasové pyrometry porovnávají záření se srovnávacím zdrojem záření. Tímto zdrojem může být pyrometrická wolframová žárovka. Na tuto žárovku je přiváděno napětí 3V. Pomocí reostatu nastavujeme odpor tak, aby nám konec žhaveného drátu splýnul v záři měřeného tělesa (aby měl stejnou barvu). Na obrázku 14 je uvedeno seřízení jasového pyrometru. Vláknem vlevo má nižší teplotu než měřená součást. Vláknem uprostřed má stejnou teplotu jako měřená součást. Vláknem vpravo má vyšší teplotu než měřená součást. Paralelně k žárovce je zapojen magneto-elektrický měřič se stupnicí teploty. Odtud po kalibraci odporu odečteme hodnotu teploty. Srovnání se většinou provádí lidským okem.



Obr. 14 Seřízení jasového pyrometru [3]

Jsou používány do teplot 1500°C. Přesnost je závislá na rozsahu teplot. Při měření do 1 500 °C je přesnost ± 25 °C. Při vyšších teplotách je nutné přidat za objektiv tzv. šedý filtr. Tím zvýšíme rozsah od 1300°C do 3500°C. Šedý filtr nám zaručuje stálost a přesnost údajů. Nejčastěji jsou používány v menších slévárnách pro měření taveniny v peci. Nevýhodou je nutnost ruční manipulace s přístrojem. Na obrázku 15 je dříve hojně využívaný jasový pyrometr značky Pyromet. Tento přístroj je bateriový s ručním nastavením jasu žárovky.

Skutečnou teplotu je nutno korigovat, protože jasové pyrometry jsou nastaveny na záření černého tělesa. Dým, kouř a také CO₂ a páry H₂O absorbují tepelné záření, čímž způsobují chybu měření. Údaj jasového pyrometru je tedy vždy nižší, než je skutečná teplota T_s. Pro určení skutečné teploty T_s je používán přepočtový vztah (3.1).



Obr. 15 Jasový pyrometr [20]

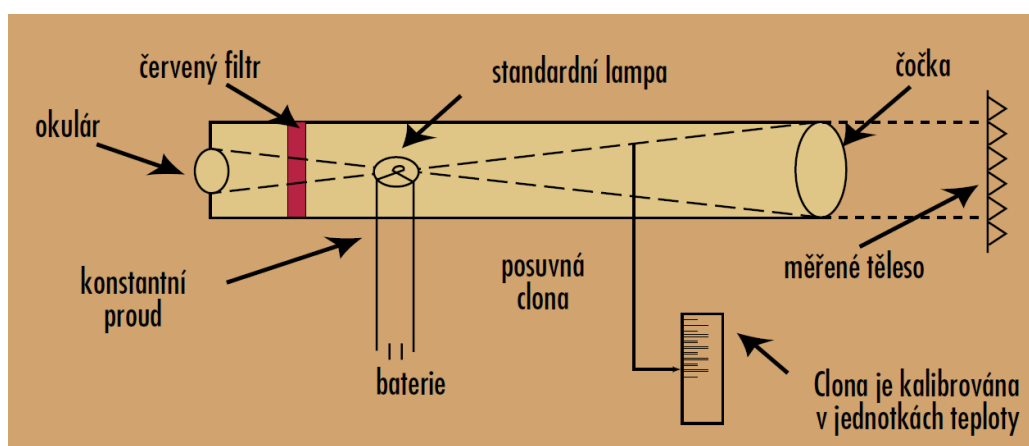
$$\frac{1}{T_s} = \frac{1}{T_p} + \frac{\lambda}{c_2} \cdot \ln \varepsilon \quad (3.1)$$

kde: T_s = skutečná teplota [K]

T_p = teplota naměřená pyrometrem [K]

ε = emisivita [-]

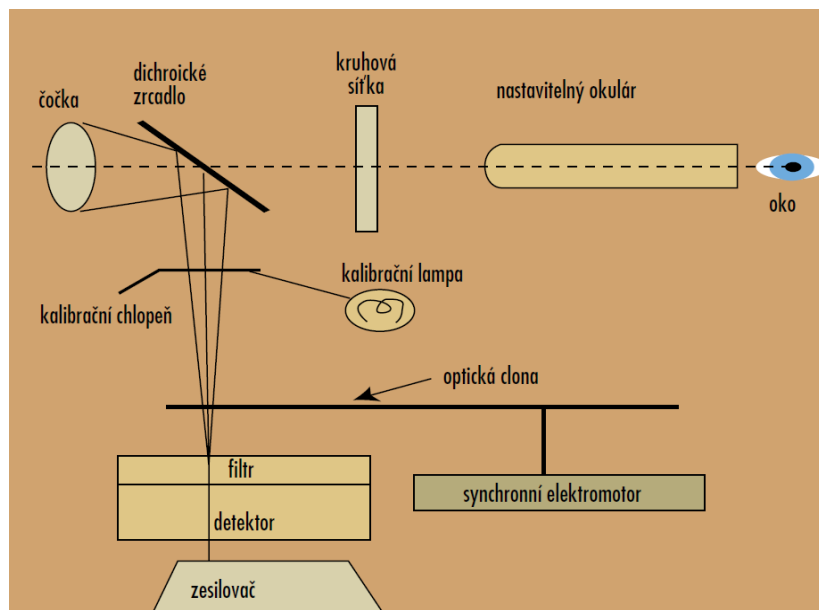
V jiném případě je u vlákna konstantní žhavicí proud a měří se jas tělesa pomocí optické clony. Na obrázku 16 je uspořádání jasového pyrometru s optickou clonou. Hodnota absorpce záření u clony je úměrná teplotě tělesa. Daná clona je přímo pro toto vytvořena.



Obr. 16 Jasový pyrometr s optickou clonou [1]

Existují také automatické jasové pyrometry. Tyto pyrometry jsou citlivé v infračerveném pásmu. Místo lidského oka je ke srovnání používáno elektrického radiačního detektoru. Tento přístroj opět pracuje na principu srovnání energie záření tělesa a vnitřního zdroje. Výstupní hodnota je rovna rozdílu vyzařování mezi měřeným tělesem a vnitřním zdrojem.

Obrázek 17 ukazuje pyrometr s dichroickým zrcadlem. Pomocí vrtulky je splněn požadavek na střídavé záření. Záření prochází čočkou na zrcadlo. Ze zrcadla se odráží infračervené záření do detektoru. Viditelné světlo projde do okuláru. Cívkou ze zesilovače je ovládána kalibrační chlopeň. Ta po spuštění přeruší záření přicházející skrze čočku a zaostří kalibrační lampu do detektoru. Všechny tyto komponenty bývají umístěny v jednom přístroji puškového typu.



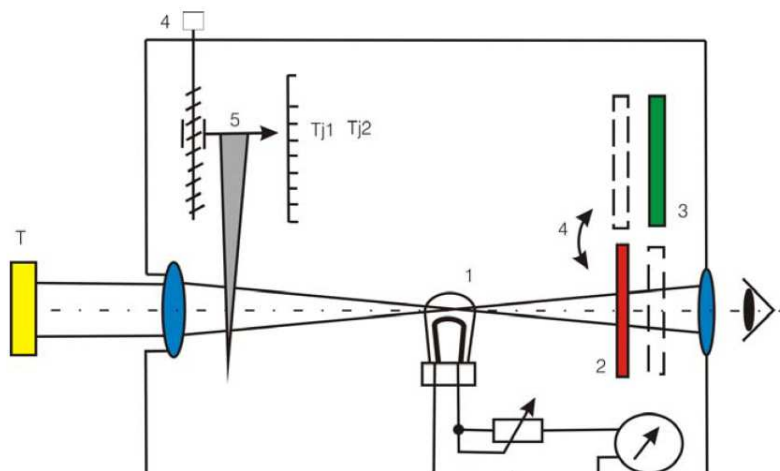
Obr. 17 Automatický optický pyrometr [1]

3.1.2 Barvé pyrometry [1] [2] [6] [19]

Pro měření jsou zde využívány dvě vlnové délky. Nejčastěji $0,55 \mu\text{m}$ a $0,65 \mu\text{m}$ tedy zelená a červená barva světla. Teplota je vyhodnocena podle barevného vjemu vyvolaného těmito spektry. Teplota je určena z poměrů jasů nebo srovnáním záření. Někdy jsou barvé pyrometry označovány jako pyrometry na speciální rozložení.

Poměrový pyrometr na obrázku 18 pracuje jako dva samostatné jasové pyrometry, každý s jinou vlnovou délkou. Součástí jsou dva výměnné filtry, červený a zelený. Poměr naměřených intenzit odpovídá barvé teplotě.

Srovnávací barvé pyrometry obsahují různé filtry. Šedý, červený klínový filtr a červenozelený. Dále obsahují pyrometrickou žárovku a reostat pro žhavení žárovky na danou teplotu. Okulárem je nutné se dívat přes červenozelený filtr do přístroje. Šedým klínovým filtrem je porovnáván jas žárovky s jasem měřeného objektu- na stupnici je indikována jasová teplota. Poté pomocí červeného klínového filtru je dosaženo shodné barvy měřeného objektu s barvou pyrometrické žárovky. Podle polohy červeného klínového filtru je na stupnici odečtena tzv. barvá teplota.



Obr. 18 Schéma poměrového barvého pyrometru [9]

Práce s barvovými pyrometry je daleko náročnější než s jasovými. Velmi náročné je jejich seřízení, proto jsou v praxi méně rozšířeny. Jsou vhodné pro měření teplot u těles, u nichž není přesně známa emisivita nebo tam kde emisivita kolísá. A také tam, kde se teplota nemění příliš rychle. Rozsah měření se pohybuje od 700°C do 2000°C. Chyba bývá 1,5% až 2% z měřicího rozsahu.

3.2 Objektivní pyrometry

Jsou to přístroje u nichž je záření určováno pomocí detektorů. Nejvíce se využívá termočlánků, fotodiody a fotoodporu. Výsledná teplota není ovlivněna lidskou chybou při srovnávání záření. Mezi objektivní pyrometry patří: monochromatické, pásmové, celkového záření (radiační) a poměrové.

3.2.1 Monochromatické pyrometry [1] [2] [6]

Monochromatické pyrometry se někdy označují jako úzkopásmové teploměry. Jsou velmi podobné jasovým pyrometrům s rozdílem, že záření je vyhodnoceno elektronickým detektorem. Tyto pyrometry měří ve velmi úzké oblasti vlnových délek. Oblast vlnových délek, ve kterých monochromatický teploměr pracuje, je závislá na spektrální propustnosti použitého filtru, dále na spektrální propustnosti dané optiky. A na spektrální citlivosti čidla - detektoru. Monochromatické pyrometry pro kratší vlnové délky se používají pro měření vyšších teplot - nad 500°C (maximum je 3500°C). Delší vlnové délky se používají pro nižší teploty - od -45°C. Dnes jsou monochromatické pyrometry využívány méně, právě protože měří pouze v úzkém rozsahu vlnových délek.

Existuje modifikace monochromatického pyrometru - pyrometr s automatickou korekcí emisivity. Tyto pyrometry umožňují měřit teplotu povrchu tělesa bez znalosti jeho emisivity. Princip spočívá v automatickém zpracování poměru emisivit. K zaměření měřeného místa je v pyrometru zabudován laser.

3.2.2 Pásmové pyrometry [1] [5] [6] [10] [23]

Na rozdíl od monochromatických pyrometrů mají větší použitelnou šířku vlnových délek. Tento rozsah délek je určen podle toho, jaký je použit optický systém a detektor. Energie záření od měřeného tělesa prochází skrz optický systém, dále na detektor. Detektor převede tepelné záření na elektrickou veličinu - proud, odpor, napětí. Tyto veličiny se dále zpracovávají v elektronickém přístroji a jsou zobrazeny na displeji (popř. mají jiný výstup) viz obrázek 19.

Spektrální oblast je většinou omezena materiálem čoček - jejich spektrální propustností. A taky spektrální citlivostí detektorů. Nejčastěji používaným detektorem je fotodioda, fotovoltaiický článek nebo fotoodpor..



Obr. 19 Pásmový pyrometr Marathon [5]

Příklady spektrálních citlivostí detektorů: 0,4 – 1,8 μm germaniové fotodiody
0,6 – 1,8 μm křemíkový fotočlánek
0,5 – 3,6 μm PbS fotoodpor

Pásmové pyrometry jsou kalibrovány na záření černého tělesa. Poté se tedy výsledná teplota určí ze vztahu. (3.2).

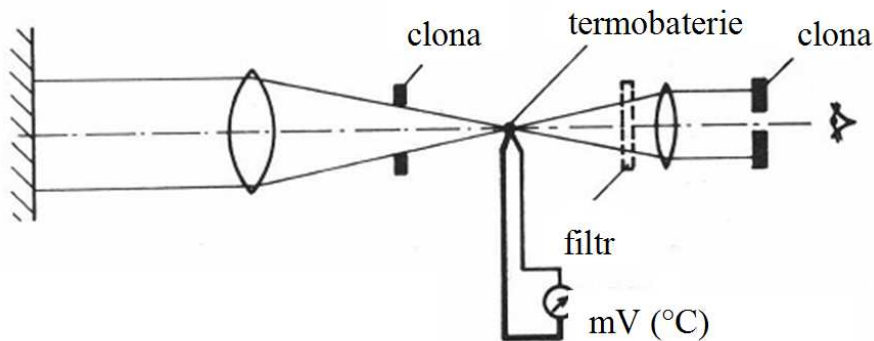
$$T_s = \frac{T_p \cdot c_2}{c_2 + \lambda \cdot T_p \cdot \ln \varepsilon} \quad (3.2)$$

Jsou používány pro teploty od 300°C do 2000°C. Výhodou pásmových pyrometrů je téměř okamžité zjištění teploty. Tyto pyrometry lze používat v prostředí, které absorbuje určité vlnové délky záření. Je ale nutné zvolit detektor a optický systém pyrometru, který pracuje mimo rozsah potlačovaných frekvencí. Proto jsou tyto pyrometry vhodné pro práci např. ve slévárnách kde je atmosféra znečištěna CO₂, vodní párou a dalšími zplodinami.

3.2.3 Pyrometry celkového záření [1] [2] 4] [6] [21] [22]

Tyto pyrometry jsou také někdy nazývány radiační nebo úhrnné pyrometry. Měří ve velké šíři frekvenčního záření. Tyto pyrometry jsou jednoduché, ale je složitá korekce údajů pyrometru. Vlastnosti pyrometru jsou určeny použitým detektorem záření a použitým optickým systémem. Často se používá sériově zapojených detektorů (termočlánků) tvořících tzv. termobaterii nebo např. bimetalickou spirálu, která dodává vyšší napětí než samostatný termočlánek.

Princip měření (na obrázku 20) je takový, že tepelné záření projde přes optiku a ta jej nasměruje na detektor. Což bývá zpravidla termočlánek nebo bolometr. Zpracování signálu prování elektronické obvody řízené mikroprocesorem. Výsledná teplota (3.3) je odvozena pomocí Stefan-Boltzmannova zákona.



Obr. 20 Schéma pyrometru celkového záření [21]

$$T_s = T_p \cdot \frac{1}{\sqrt[4]{\varepsilon}} \quad (3.3)$$

Používají se pro měření teploty součástí, jejichž vlastnosti se blíží vlastnostem černého tělesa ($\varepsilon = 1$). Rozsah použití je od - 40 do + 2500°C. Používají se pro měření teploty v pecích, viz obrázek 21. Vhodným použitím polovodičových detektorů lze dosáhnout vysoké citlivosti, ovšem pouze v určitém pásmu vlnových délek. Měření probíhá velmi rychle a efektivně. Díky vysoké citlivosti jsou používány pro měření teploty těles o malých rozměrech (\varnothing tělesa 1,5 mm ze vzdálenosti $L=150$ mm).

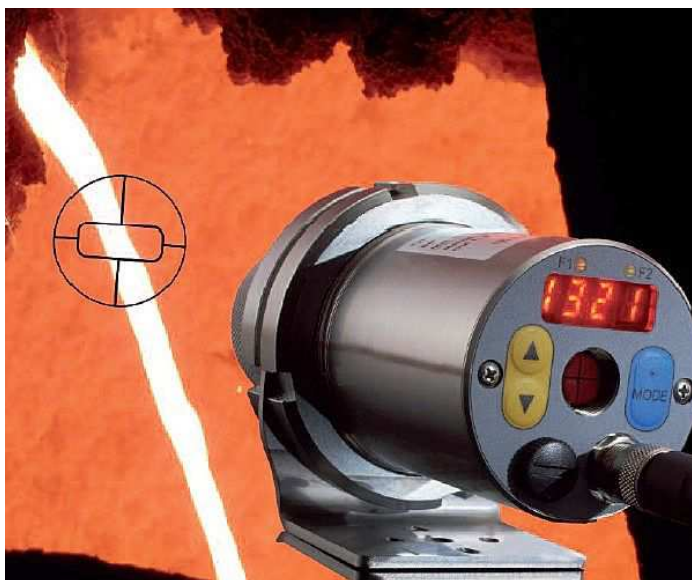


Obr. 21 Ruční radiační pyrometr [4]

3.2.5 Poměrové pyrometry [1] [2] [4] [6] [22]

Poměrové pyrometry vyhodnocují teplotu na základě intenzity vyzařování ve dvou odlišných vlnových délkách. Nejčastěji používanými detektory jsou fotodiody, fotovoltaické články či fotoodpory. Energie záření od měřeného tělesa prochází skrz optický systém. Ten jej nasměruje na polopropustný filtr. Tento filtr propustí jen dvě záření o dvou vlnových délkách. Zpravidla 0,55 a 0,65 μm - zelená a červená barva. Filtr tyto záření rozdělí, ty potom dopadnou na detektory záření. Tímto vzniknou dvě hodnoty výstupního elektrického signálu. Výsledná hodnota je poměrem těchto elektrických signálů.

Poměrové pyrometry jsou používány například u ohřevu dílců, neboť tehdy se mění spektrum vyzařování ve velkém rozsahu. Nebo k měření teploty proudu roztaveného železa během odpichu, viz obrázek 21, měření teploty rychle se pohybujícího drátu (tyčoviny), měření teploty sváru při indukčním svařování. Výhodou poměrového pyrometru je, že eliminuje chyby měření v důsledku změny emisivity a absorpce záření. Tyto pyrometry jsou vhodné pro měření teplot nad 200°C



Obr. 21 Poměrový pyrometr při měření teploty proudu roztaveného železa [4]

4 ZOBRAZOVACÍ METODY [15] [23]

V praxi je někdy potřeba znát teplotu povrchu objektu ne v jednom místě, ale její celkové rozložení. Zobrazovací metody jsou vhodné pro určování teplotních polí těžko přístupných předmětů. Jsou používány tam, kde je třeba znát rozložení teplot nebo kde by bylo finančně velmi náročné aplikovat jiné metody. Například jsou používány pro kontrolu vnějšího pláště pece, pro kontrolu vyzdívky pece nebo také pro kontrolu tepelné izolace stěn budov. Umožňují nám také sledovat dynamický vývoj daného teplotního pole. U zobrazovacích metod se používají stejné detektory a optické systémy jako u pyrometrů.

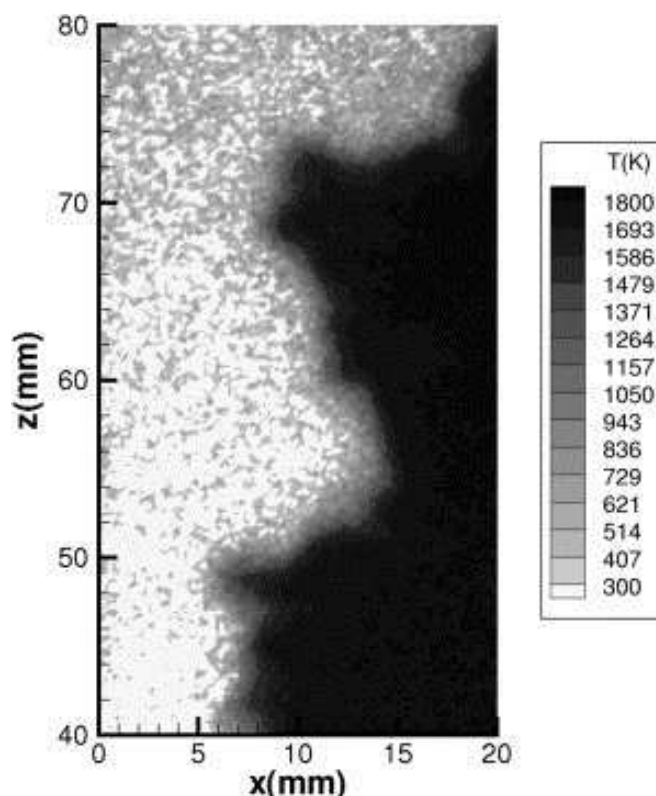


Obr. 22 Úniky tepla v podkrovním bytu [23]

4.1 Fotometrie [2] [14]

Fotografické materiály jsou citlivé na infračervené záření. Nejstarším způsobem zobrazování teplotních polí je fotografické snímání infračerveného záření. Je k tomu používáno spektrální citlivosti černobílých fotografických materiálů v infračervené oblasti - do 1,3 μm a propustnosti optických skel fotoaparátů - do 2 μm .

Fotoaparát má před objektivem zabudovaný infračervený filtr. Ten slouží k odfiltrování viditelného záření. Fotoaparát je zaměřen na část tělesa, kterou chceme teplotně zobrazit. Teplotu nám určuje míra zčernání fotografického materiálu, viz obrázek 23. Čím větší je hustota tohoto zčernání, tím je teplota vyšší. K určení teploty je potřeba přidat ke snímanému tělesu referenční místo o známé teplotě. Používají se nejméně dva teplotní zářiče, u kterých je nutné znát teploty. Je potřeba zajistit, aby tyto teploty byly blízké nejvyšší a nejnižší teplotě měřeného tělesa. Nakonec je možné pomocí fotometru určovat povrchové teploty na měřeném předmětu.



Obr. 23 Ukázka prvních měření na fotografickém materiálu [14]

4.2 Termovizní metody [2] [6] [15] [19] [24]

Termovize je metoda zobrazení teplotních polí. U této metody jsou používány kamery, které pomocí vestavěného detektoru infračerveného záření zobrazí na obrazovce výsledný snímek - termogram. Teplotu v jednotlivých místech je určena podle různých barevných odstínů nebo podle odstínů šedé barvy. Rozlišitelnost je až 0,2 °C. Měřicí rozsah se pohybuje od -30 °C až do +1 200 °C. Využití termovize je velice rozmanité.

Používá se pro:

- měření dynamických teplotních polí při mechanickém zatěžování
- kontrola tepelné izolace budov
- sledování poškození elektrických vedení - nedokonalé spoje
- určování poruch z nehomogenit teplotních polí
- automatizaci procesů
- noční vidění
- lokalizace potrubí v zemi
- kontrolu vyzdívky pece
- v kriminalistice

Termovizní kamery je možné dělit na kamery s mechanickým rozkladem nebo elektronickým rozkladem obrazu.

Na obrázku 24 je vidět rozdíl mezi zatepleným a nezatepleným obytným domem. Díky termovizi lze určit teplotní ztráty domu.

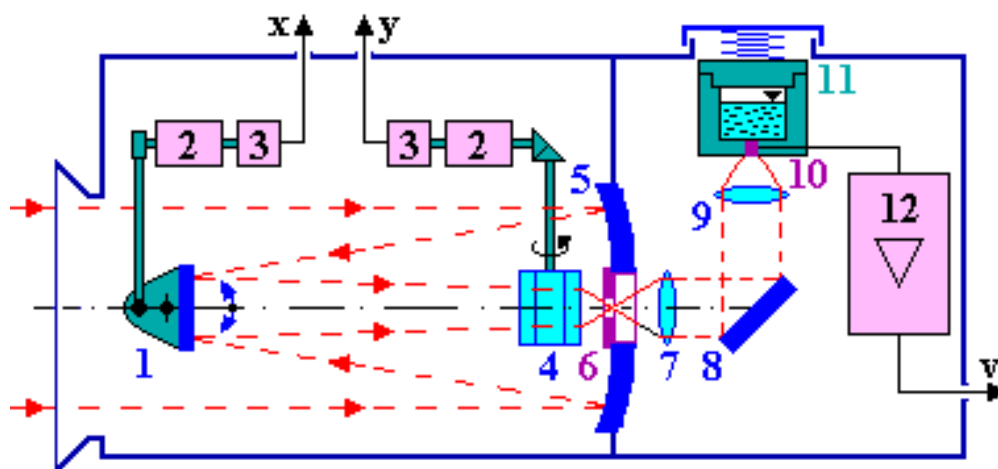


Obr. 24 Termogram zdiva rodinného domu [24]

4.2.1 Rozklad obrazu [6] [10] [15] [19]

Termovizní kamery jsou rozděleny podle způsobu rozkladu obrazu na kamery s opticko-mechanickým rozkladem obrazu a s elektronickým rozkladem obrazu.

Opticko-mechanický rozklad je prováděn snímáním jednotlivých bodů řízenou optickou osou. Na zorné pole termovize jsou zaměřovány všechny body měřeného objektu. Dráhy rozkladu infračerveného záření jsou určeny pohybem optického systému (otočné hranoly či zrcadla). Obraz lze rozložit na řádky pomocí kývajících se zrcadel nebo pomocí rotačních reflexních krystalů na body. Rozhodující je způsob použití detektoru. Je možné použít jeden samostatný detektor, více detektorů vedle sebe nebo detektory uspořádané do určitých obrazců. Na obrázku 25 je zobrazeno schéma opticko-mechanického rozkladu obrazu. 1 rozmitací zrcadlo, 2 motorky, 3 fotoelektrické vysílače, 4 křemenný osmiboký hranol, 5 duté zrcadlo, 6 clona, 7, 8, 9 optická soustava, 10 kvantový detektor, 11 termoska na kapalný dusík, 12 předzesilovač



Obr. 25 Schéma termovize s mechanickým rozkladem obrazu [15]

Termovizní kamery s elektronickým rozkladem obrazu využívají k zobrazení teplotního pole buď pyroelektrické detektory nebo kvantové infračervené detektory. Jsou podobné CCD čipům používaných v klasických kamerách. Každý pixel tvořící infračervený obraz odpovídá jednomu detektoru.

4.2.2 Zásady práce s termovizní kamerou [15] [17] [19]

Kameru a objektivy je vždy potřeba chránit před agresivním prostředím např. dotyky prstů na objektivu, extrémní teploty, znečištění, prach, nárazy. Při měření termokamerou je potřeba dodržovat jisté zásady k minimalizaci chyb měření. Rozlišujeme čtyři základní druhy měření. Tehdy když je neprůteplivý objekt - transmitance $t = 0$ nebo je částečně průteplivý objekt ($t > 0$) anebo když měříme v průteplivém prostředí (transmitance $t_L = 1$) či v částečně neprůteplivém prostředí ($t_L < 1, \epsilon_L \neq 0$).

Měření neprůteplivých objektů v průteplivém prostředí. Ještě před měřením je často potřeba na kameře nastavit vhodný rozsah teplot. Je nutné měřit dostatečně velké změny teplot. Např. při měření tepelné izolace budov je doporučeno provádět měření, tehdy když je rozdíl mezi vnitřní a vnější teplotou minimálně 20 °C. Je dobré, aby byl měřený objekt v zorném poli termokamery co největší, to je možno zajistit vhodným umístěním termokamery nebo použitím vhodného objektivu nebo některé termokamery jsou vybaveny transfokátorem - zoomem. Dále je třeba znát emisivitu ϵ měřeného objektu. Pokud se

v okolí měřeného tělesa vyskytují povrchy s vysokou či nízkou teplotou (plamen, žárovka, Slunce, lidé apod.), je nutné odclonit záření od těchto těles pomocí přepážek nebo objekt umístít do speciální komory. Měření se může provádět z několika různých směrů. U venkovních experimentů je vhodné provádět měření bez slunečního záření, nejlépe ráno nebo večer.

Další možností je měření neprůteplivých objektů v částečně neprůteplivém prostředí. Při měření v částečně neprůteplivém prostředí mezi měřeným objektem a kamerou (větší množství vodních par, plynů, CO, CO₂ aerosolů apod.) dochází k pohlcování záření. Je nutné znát parametry prostředí - vzdálenost L objektu od kamery, transmitaci prostředí t_L a teplotu prostředí T_L , tuto teplotu měříme teploměrem, který je stíněn vůči záření. Měření v částečně neprůteplivém prostředí zmenšuje přesnost měření, a proto není vhodné, měřit např. dešti nebo mlze.

Jiným případem je měření částečně průteplivých objektů. Pokud je měřený objekt částečně průteplivý, projevuje se při vyhodnocování termogramu zářením pozadí. Je třeba znát exaktně transmitanci

objektu t (v rozsahu spektrální citlivosti kamery) a teplotu pozadí objektu T_c . Záření pozadí se však může projevovat při měření příliš malých objektů, srovnatelných s velikostí obrazových bodů kamery. Poté je třeba objekt zvětšit - přiblížením kamery, jiným objektivem, předsádkou objektivu nebo zoomem.

Velkou nepřesnost při kontrole tepelné izolace budov způsobuje vítr. Díky větru jsou termogramy těžko vyhodnotitelné a obsahují velkou chybu.



Obr. 26 Termogram potrubí [17]

5 ZÁVĚR

Bezdotykové měření teplot se provádí pomocí dvou základních principů - měření pomocí pyrometrů a zobrazovacích metod. Pyrometry jsou rozděleny na subjektivní a objektivní. První z nich - jasové a barvové se hodí spíše pro ruční, nesériové určování teplot. Je zde požadována odborná znalost a zručnost pracovníků. V dnešní době jsou již méně rozšířeny a jsou postupně nahrazovány pyrometry objektivními. Zde hrozí menší chyba měření způsobena subjektivním odečtem. Jsou vhodné do automatických provozů. Mezi objektivní pyrometry patří radiační, pásmové a poměrové. Nejrozšířenější jsou pyrometry radiační, používají se pro měření těles s emisivitou blízkou jedné - tedy například měření teplot litin, zoxidovaných plechů apod. Pásmové pyrometry jsou vhodné k téměř okamžitému zjištění teploty, používají se v prostředích, které jsou znečištěny prachem, kouřem, CO₂ apod. Jsou vhodné pro měření teplot od 300 do 2000°C. Poměrové pyrometry jsou používány tam, kde hodnota emisivity silně kolísá - například u ohřevu dílců, nebo pro pohybující se předměty.

Pomocí zobrazovacích metod je určováno rozložení teplot na tělese. Výsledek měření je snímek zvaný termogram. Výhodou termovize je možnost zobrazení velkých rozdílů teplot. V dnešní době je termovize využívána v kriminalistice. Je pomocníkem při určování různých defektů u potrubí, licích pecí apod. Pomocí termovize je možné také určit, jak se teplota daného povrchu mění v čase. Mezi nevýhody patří zajištění optimálních podmínek pro měření, odklon jiných záření, dobré klimatické podmínky - nepřesné výsledky za větru a deště. U termovize je nutné provádět kalibraci pomocí softwaru, který je přiložen ke kameře.

Při pořizování přístroje pro bezdotykové měření teplot je nutné dbát určitých zásad. Neexistuje univerzální přístroj, který by měřil přes celý rozsah teplot a byl zároveň dostatečně přesný. Je nutné zvážit, jak přesně je potřeba teplotu měřit, jaké materiály se budou měřit a v jakém prostředí se bude teplota měřit. Podle těchto kritérií a samozřejmě také podle ceny volíme přístroj. Rozhodně neplatí, že nejdražší je nejlepší.

K hlavními výhodám bezdotykového měření patří rychlost a snadnost měření, možnost měření pohybujících se předmětů. Umožňuje měřit teplotu na větší vzdálenosti. Další velkou výhodou je nepoškození tělesa a schopnost měřit i velmi vysoké teploty okolo 4000°C. Nevýhodou může být to, že tímto způsobem je měřena pouze povrchová teplota.

Díky rozvoji elektroniky, je bezdotykové měření teploty velmi progresivní metodou.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. Bezdotykové měření teploty. *Zpravodaj pro měření a regulaci*. 2005, č. 1, s. 83. Dostupné z: http://www.omegaeng.cz/literature/PDF/techinfo_1.pdf
 2. ČECH, Jaroslav, Jiří PERNIKÁŘ a Kamil PODANÝ. *Strojírenská metrologie I*. Vyd. 5., V Akademickém nakl. CERM vyd. 3. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009, 183 s. ISBN 978-80-214-4010-4.
 3. Seřízení jasového pyrometru. *The Pyrometer Instrument Company* [online]. 2012 [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: <http://www.pyrometer.com/processheating.html>
 4. Infrared pyrometer for molten metals: CellaTemp PA PA43. *Direct industry* [online]. 2012 [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: <http://www.directindustry.com/prod/keller-msr-infrared-temperature-solutions/infrared-pyrometers-for-molten-metals-14914-581488.html>
 5. Marathon MM G5. *TSI system* [online]. 2012 [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: <http://www.tsisystem.cz/produkty/marathon-mm-g5--251>
 6. KREIDL, Marcel. Měření teploty: senzory a měřicí obvody. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2005, 239 s. Senzory neelektrických veličin. ISBN 80-730-0145-4.
 7. BB-4A Černé těleso pro vysoké teploty. *Omegaeng* [online]. 2011 [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: <http://www.omegaeng.cz/ppt/pptsc.asp?ref=BB-4A>
 8. Princip fungování fotovoltaiky. *CZECHSOLAR* [online]. 2009 [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: <http://www.czechsolar.cz/fotovoltaika/princip-fungovani/>
 9. VARGOVÁ, Helena. Principy snímačů teploty a možnosti jejich aplikace v textilu. In: *Měření teploty, principy, aplikace v textilu* [online]. 2000 [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: <http://www.kod.tul.cz/predmety/STE/ste.html>
 10. VRÁNA, Tomáš. Bezkontaktní metody měření teploty v ekologickém inženýrství. Brno, 2010. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Zdeněk Němec, CSc..
 11. Fotoodpor. *Profi elektronika* [online]. 2011 [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: <http://www.profi-elektronika.cz/fotoodpor-fw200/id/50-45535/>
 12. Zaměření objektu. *QTEST* [online]. 2009 [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: <http://www.qtest.cz/bezdotykove-teplomery/bezdotykove-mereni-teploty.htm>
 13. Co jsou BOLOMETRY a MIKROBOLOMETRY. VOJÁČEK, Antonín. *AUTOMATIZACE HW* [online]. 2005 [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: <http://automatizace.hw.cz/mereni-a-regulace/ART196-co-jsou-bolometry-a-mikrobolometry-.html>
-

14. Selected temperature field. *Science direct* [online]. 2007 [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010218007002970>
 15. TERMOVIZNÍ SYSTÉMY. *Milan PAVELEK* [online]. 2007 [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: <http://ottp.fme.vutbr.cz/~pavelek/optika/0700.htm>
 16. ZÁŘENÍ ABSOLUTNĚ ČERNÉHO TĚLESA. *Gymnázium Ladislava Jaroše Holešov* [online]. 2005 [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: http://www.gymhol.cz/projekt/fyzika/13_act/13_act.htm
 17. Termovize a možnosti jejího využití. *Asb portal* [online]. 2009 [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: <http://www.asb-portal.cz/termovize-a-moznosti-jejeho-vyuziti/galeria/1208/7483>
 18. Bezdotykové měření teploty. *E-THERM* [online]. 2011 [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: <http://www.etherm.cz/produkty/bezdotykovye-mereni-teploty/>
 19. TEORIE TERMOVIZNÍCH MĚŘENÍ. *Milan PAVELEK* [online]. 2007 [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: <http://ottp.fme.vutbr.cz/~pavelek/optika/0700-z01.pdf>
 20. Měření teploty pyrometrem. *Fakulta strojní ČVUT v Praze* [online]. 2006 [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: <http://www.fsid.cvut.cz/tem/teplo/pyrometr.htm>
 21. PYROMETRY RADIAČNÍ. *Maryshfmmi* [online]. 2012 [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: <http://www.maryshfmmi.webzdarma.cz/pmt.htm>
 22. Základy bezdotykového měření teploty pásmovým radiálním pyrometrem. SZERUDA, Rostislav. *Základy pyrometrie* [online]. 2006 [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: <http://pyrometrie.sweb.cz/Zaklady.htm>
 23. Termovize - Stavebnictví. *TMV SS* [online]. 2011 [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: <http://www.tmvss.cz/Aplikace/termovize/stavebnictvi.html>
 24. TERMOVÍZIA A DIAGNOSTIKA STAVIEB. *PRIVILEG* [online]. 2011 [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: <http://www.privileg.sk/termovizia.html>
 25. Generátor citací. KRČÁL, Martin. *Citace* [online]. 2012 [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: <http://generator.citace.com>
-

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

symbol	význam	jednotka
b	Wienova konstanta ($b = 2898 \text{ m}\cdot\text{K}$)	$[\text{m}\cdot\text{K}]$
c	rychlost světla ($c = 299792485 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$
c_1	první vyzařovací konstanta ($c_1 = 3,7413\cdot 10^{-16} \text{ W}\cdot\text{m}^2$)	$[\text{W}\cdot\text{m}^2]$
c_2	druhá vyzařovací konstanta ($c_2 = 1,4388\cdot 10^{-2} \text{ m}\cdot\text{K}$)	$[\text{m}\cdot\text{K}]$
E	intenzita celkového záření	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-2}]$
E_r	intenzita odraženého záření	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-2}]$
E_a	intenzita pohlceného záření	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-2}]$
E_p	intenzita propuštěného záření	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-2}]$
h	Planckova konstanta ($h = 6,6260755\cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$)	$[\text{J}\cdot\text{s}]$
k	Boltzmannova konstanta ($k = 1,380648\cdot 10^{-23} \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$)	$[\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}]$
L	vzdálenost měřeného objektu od objektivu	$[\text{m}]$
M_o	hustota intenzity záření	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-2}]$
$M_{o\lambda}$	spektrální hustota intenzity vyzařování	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-2}]$
t_L	transmitace prostředí	$[-]$
T	termodynamická teplota tělesa	$[\text{K}]$
T_L	teplota prostředí	$[\text{K}]$
T_p	teplota udaná pyrometrem	$[\text{K}]$
T_s	skutečná teplota	$[\text{K}]$
<hr/>		
λ	vlnová délka záření	$[\text{m}]$
λ_{max}	maximální vlnová délka pro vyzařování	$[\text{m}]$
ε	emisivita	$[-]$
ε_L	emisivita prostředí	$[-]$
π	Ludolfovo číslo ($\pi = 3,14159$)	$[-]$
σ	Stefanova-Boltzmannova konstanta [$\sigma = 5,67\cdot 10^{-8} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$] $[\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}]$	