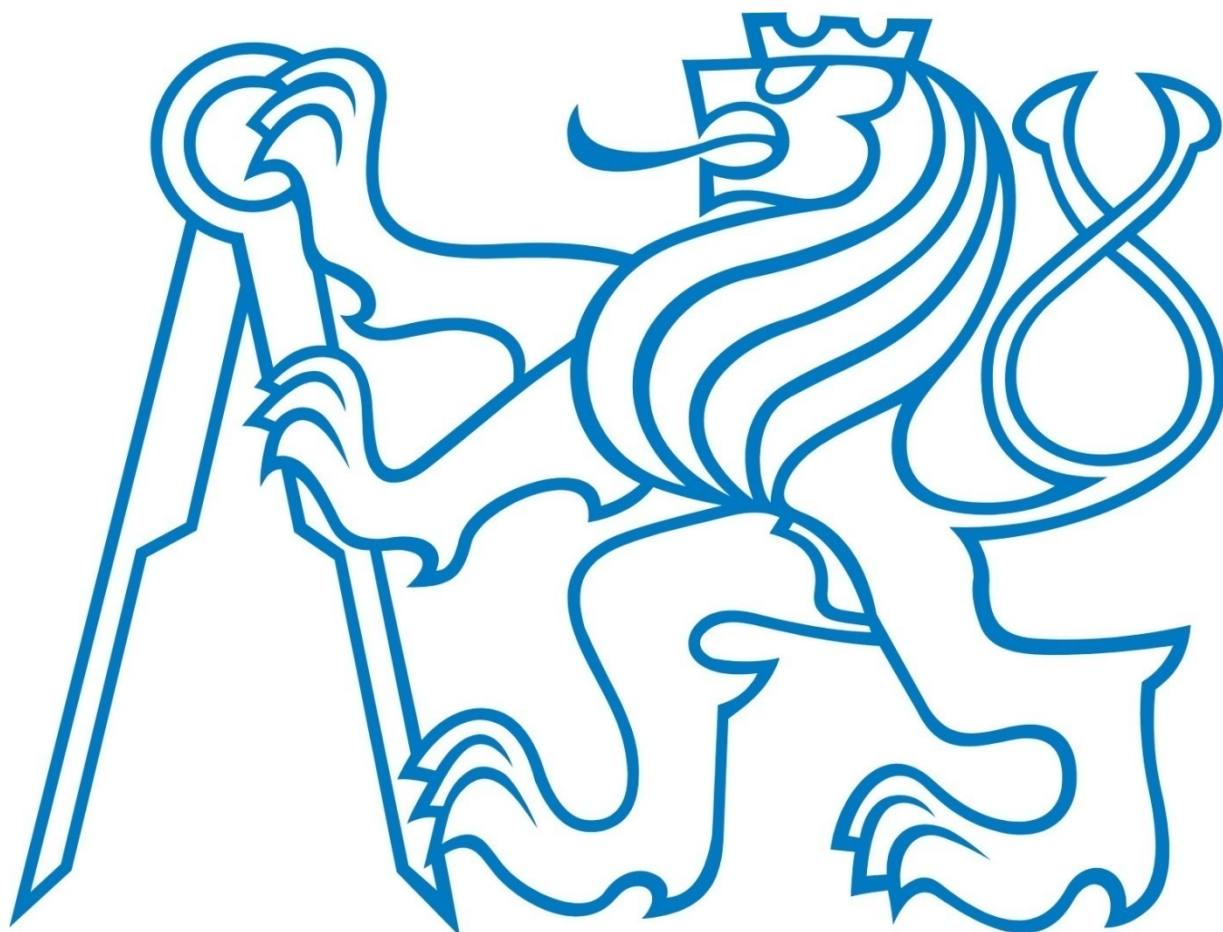


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ

Fakulta dopravní



Úvod do teorie termovizního měření

Petr Brynda
sk. 370

Anotace

Práce se zabývá zprvu historickým vývojem oblasti optiky a elektromagnetického záření předcházející oboru bezdotykového měření teplotních polí. Následuje stručný výklad teorie z oblasti fyziky nutný k pochopení způsobu termovizního měření. Závěrečná část práce se věnuje popisu měřících rovnic a ukázkou praktických měření včetně upozornění na časté problémy. Příloha čtenáře seznamuje s praktickými ukázkami termogramů.

Klíčová slova

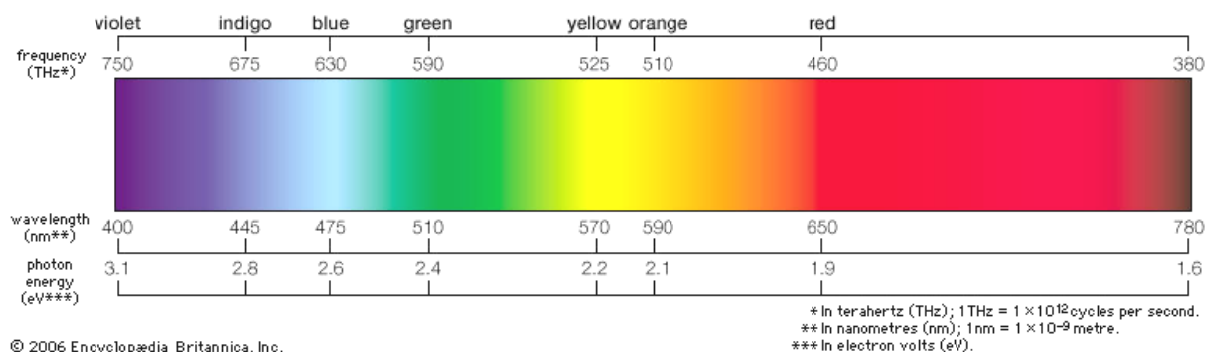
termovizní měření, bezdotykové měření teploty, infra, termografie, emisivita, vyzařovaná energie, termogram

Úvod

Lidské oko je schopné zachytit pouze velmi úzkou oblast energie vyzážené (emitované) sluncem. Tuto oblast nazýváme světlo a nachází se v rozsahu přibližně 400nm až 800nm [1]. Kdybychom mohli vnímat i světlo delších vlnových délek tzv. infračervené záření IR významně by se zlepšila schopnost našeho vidění ve tmě. IR záření jsme schopni vnímat pouze změnou teploty pokožky. Energii prostřednictvím infračerveného záření přitom vyzařují i objekty jejichž teplota je oproti okolí nižší. Jistou formu IR záření tedy můžeme za jistých okolností detekovat prakticky u všech objektů. Této skutečnosti velmi dobře využívají například chřestýši. Mají pod každým okem umístěný zvláštní detektor teploty a díky tomu jsou schopni snáze rozpoznat svou oběť a lépe se chránit před predátory.

Neinvasivní bezdotykové senzory teploty pracují na principu snímání energie IR záření pro zjištění teploty bez potřeby přímého kontaktu s měřeným objektem. Po analýze vlnové délky vyzařované objektem se rovnicemi popisujícími vliv materiálu a kvality jeho povrchu na měření vyhodnotí jeho teplota.

Light, the visible spectrum



Obr. 1. Viditelné spektrum vlnových délek

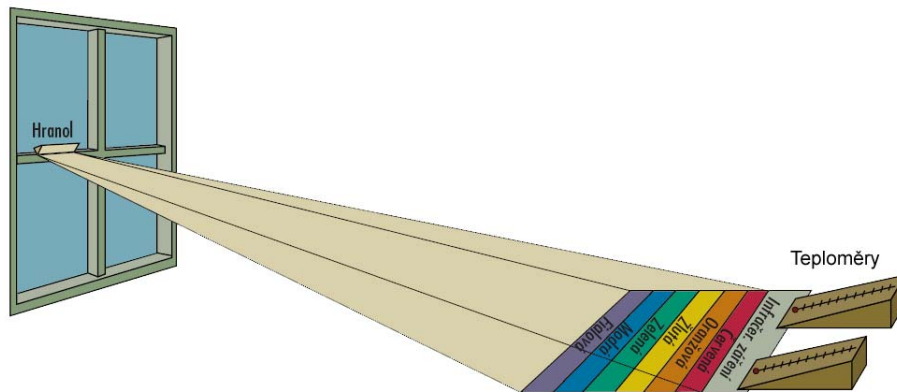
Historický přehled

Již starověcí řemeslníci určovali teplotu zpracovávaných kovů díky zkušenosti, v závislosti na jejich barvě. To jim dovolovalo vytvářet na tehdejší dobu obdivuhodné předměty a nástroje. Především pak zbraně. Bez nadsázky lze říci, že znalost zpracování kovů a tedy i určování teploty v jednotlivých technologických postupech měla určující vliv na zánik nebo přežití jejich národa.

Vynálezce prvního teploměru byl Galileo Galilei (1564 – 1642) a podařilo se mu ho vynalézt 200 let před objevením infračerveného záření v roce 1800 a sto let před tím než Sir Isaac Newton experimentoval s rozklady světla skleněnými hranoly. A dokázal tak, že bílé světlo je složené z barevného spektra. A lze ho rozložit i opětovně složit skleněným hranolem. Newton se však domníval, že světlo se skládá z částíček tzv. korpuskulí. Christian Huygens (1629-1695) napadl Newtonovu teorii ideou, že světlo může být pochopeno lépe, pakliže budeme uvažovat jeho složení z vln. Teorie byla nakonec v průběhu 19. století přijata a sehrála svou roli v teorii elektromagnetické radiace Jamese Clerka Maxwella.

Zajímavé je, že infračervené záření bylo objeveno pomocí klasického konvenčního teploměru. Když v roce 1800 astronom Frederick William Herschel (1738 – 1822) používal pro své pozorování slunce barevná skla, zjistil že tepelný efekt je různý v závislosti na barvě daného skla. Rozhodl se uskutečnit jednoduchý pokus, při kterém rozložil bílé sluneční světlo pomocí hranolu a ve spektru pohyboval rtuťovým teploměrem. Naměřená teplota se přitom lišila a směrem k červené části spektra rostla. Navzdory předpokladům při přesunu teploměru mimo červené (viditelné) spektrum teplota neklesla, ale ještě více vzrostla. Objevil, tak neviditelné spektrum, kterému dal název infračervené tj. „pod červenou“.

Názory na původ nově objeveného spektra se zprvu lišili. Trvalo celé půl století, než se na infračervené paprsky sjednotil názor, že mají stejné vlastnosti jako světelné s rozdílem, že nepůsobí na sítnici oka.



Obr. 2. Znárodnění Herschelova pokusu [2]

Významný milník byl v roce 1864, kdy James Clarck Maxwell (1831 – 1879) odvodil rovnice popisující základní zákony elektromagnetismu. Z nich vyplývá, že elektrický náboj vyzařuje vlny prostorem. Vlny mají dané definované frekvence určující polohu v Imag. spektru. Je to i teoretické odvození rychlosti elektromagnetického vlnění. Ze spolupráce dvou fyziků Bunsena a Kirchhoffa vzešel poznatek dnes známý jako Kirchhoff-Bunsenův zákon. Totiž schopnost látky emitovat záření je shodná se schopností jej přijímat při stejné teplotě. Následoval už jen malý krůček k definici absolutně černého tělesa, jako tělesa schopného při zahřívání absorbovat všechny frekvence záření a při ochlazování je vyzařovat. Teď již zůstával pouze problém klasické fyziky ve schopnosti vysvětlit spektrální radiaci závisující pouze na teplotě a materiálu tělesa.

Tohoto problému se nakonec zhostil fyzik Josef Stefan (1835 – 1893), který experimentálně zjistil že celková radiace emitovaná absolutně černým tělesem se mění jako čtvrtá mocnina jeho absolutní teploty. Jeho jeden bývalý žák Ludwig Boltzmann (1844 – 1906) v roce 1844 teoreticky popsal na základě termodynamických principů a Maxwellovy rovnice elektromagnetické teorie Boltzmannův experimentální vztah. Díky němu byl Stefan schopen provést měření povrchové teploty Slunce (přibližně 6000°C).

Absolutně černé těleso a povaha jeho záření u vědců vyvolávala další otázky. Stále nebyl stanoven teoretický vztah mezi spektrální radiací a jeho termodynamickou teplotou. Této práci se ujali Wilhelm Wien a John Rayleigh. Výsledkem práce Viena byly grafy intenzit záření v závislosti na vlnové délce a empirický vztah, který dával dobré výsledky pro vysoké frekvence záření černého tělesa (krátké vlnové délky). Rayleighovy poznatky naopak vyhovovaly pro nízké frekvence.

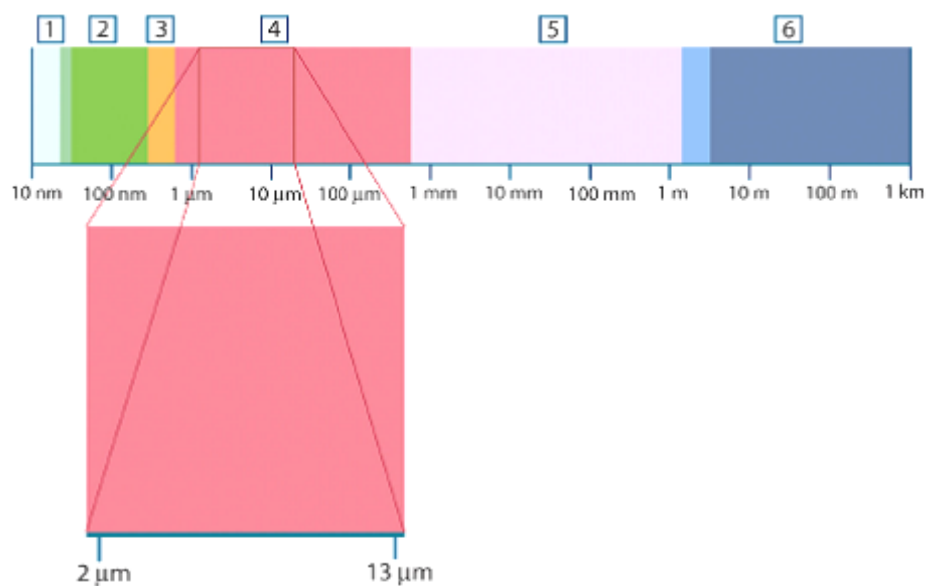
Na sklonku 19. století se spektrem záření zabýval Max Karl Ernst Ludwig Planck (1859 – 1947) a vyslovil hypotézu, že světlo je emitováno miniaturními částicemi a

skládá se rovněž z malých nedělitelných částic. Planckovi se nakonec v roce 1897 podařilo nalézt vztah, který odpovídal energii radiace na jakékoliv vlnové délce a teplotě. Vzněl myšlenku, že světlo a teplo není vyzařováno ve spojitém proudu. Objevil univerzální Planckovu konstantu k výpočtu spektra. Nová éra fyziky mohla začít.

Albert Einstein (1879 – 1995) studoval práci Maxwella a Helmholtze a v roce 1905 vysvětlil kvantem fotoelektrický jev (světlo se může chovat jako proud částic). Dokázal, že světlo je proudem částic s daným množstvím energie, které lze určit s pomocí Planckovy konstanty.

Teorie termografie

Elektromagnetické spektrum je rozděleno podle do několika skupin (vlnová pásma) na základě vlnových délek. Dále existuje další rozdělení podle metod na zjišťování a vytváření imag. spektrem. Neexistuje však žádný rozdíl mezi jednotlivými pásmy elektromagnetického spektra protože všechny podléhají stejným zákonům a liší se pouze vlnovými délkami. [3]



Obr. 3. Elektromagnetické spektrum. 1: rentgenové záření; 2: ultrafialové záření; 3: viditelné záření; 4: infračervené záření; 5: mikrovlnné záření; 6: radiové záření.

Termografie začíná pracovat s vlnovým pásmem infračerveného záření. Jeho hranice začíná tam, kde končí viditelné pásmo a končí, kde začínají mikrovlnné vlnové délky (v pásmu několika milimetrů vlnové délky).

Toto pásmo má podrobnější [3] dělení na další čtyři:

near infrared –blízké IČ (0,75–3 μm)

middle infrared-střední IČ (3–6 μm)

far infrared-vzdálené IČ (6–15 μm)

extreme infrared-velmi vzdálené (15–100 μm)

Abychom si mohli přiblížit pojem záření musíme si znovu vrátit k černému tělesu. Je zavedeno jako objekt pohlcující veškeré záření na něj dopadající bez ohledu na vlnovou délku záření. Jeho konstrukce je docela jednoduchá. Lze ho modelovat pomocí vyzařovacích charakteristik otvoru vytvořeného v izotermní dutině neprůhledného absorbujícího materiálu. Veškeré záření vstupující otvorem se opakovaně odráží od vnitřních stěn tělesa, takže ven se může dostat pouze minimální díl záření.

V případě, že opatříme takovýto objekt zdrojem tepla stane se z něj tzv. dutinový zářič. Izotermní dutina zahřátá na konstantní teplotu vytváří záření černého tělesa, přičemž charakteristika takového záření je určována pouze teplotou dutiny. [3] Při překročení teploty 525°C se zdroj záření jeví jako viditelný.

Planckův zákon

Max Planck vyjádřil intenzitu spektrálního vyzařování pomocí vzorce:

$$W_{\lambda b} = \frac{2\pi hc^3}{\lambda^5 (e^{hc/\lambda kT} - 1)} \times 10^{-6} \left[\text{Watt}/\text{m}^2 \mu\text{m} \right]$$

kde:

$W_{\lambda b}$ spektrální hustota intenzity vyzařování černého tělesa při vlnové délce λ .

c rychlost světla = 3×10^8 m/sek.

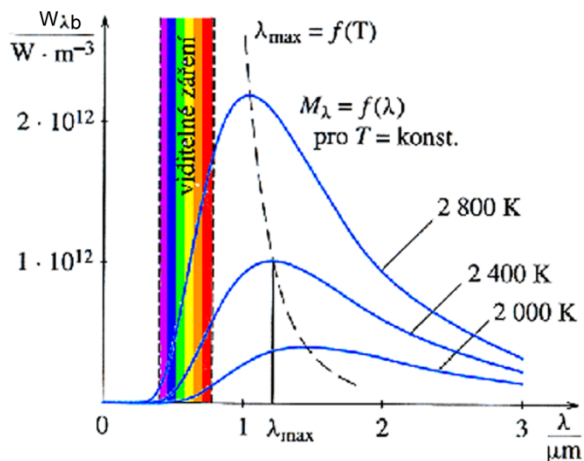
h Planckova konstanta = $6,6 \times 10^{-34}$ Joule sek.

k Boltzmannova konstanta = $1,4 \times 10^{-23}$ Joule/K.

T absolutní teplota (K) černého tělesa.

λ vlnová délka (μm).

Grafické znázornění Planckova zákona dává soustavu křivek pobíhajících od nuly při vlnové délce rovné nule a zvyšující se s rostoucí vlnovou délkou až k dosažení maxima λ_{max} , aby se opět pozvolna přiblížily k nule při velkých hodnotách vlnových délek. S vyšší teplotou tělesa dojde k dosažení maxima na kratší vlnové délce.



Obr.4. Spektrální hustota vyzařování [4]

Wienův zákon posuvu

Diferenciací Planckova zákona se zřetelem na λ a nalezení maxima získáme:

$$\lambda_{\max} = \frac{2898}{T} [\mu\text{m}]$$

Z toho vyplývá, že při zvýšení teploty zářiče se barvy mění od červené k oranžové či žluté. Vlnová délka barvy vždy odpovídá λ_{\max} . S tímto vzorcem lze například jednoduše spočítat vlnovou délku λ_{\max} Slunce (jeho teplota je přibližně 6000K) odpovídající žlutému světlu přibližně ve středu viditelného světla.

Stefan Boltzmanův zákon

Integrací Planckova zákona přes λ v rozmezí 0 až ∞ vypočteme celkové vyzařování (W_b) černého tělesa:

$$W_b = \sigma T^4 [\text{Watt}/\text{m}^2]$$

Aplikací tohoto vztahu na lidské tělo s plochou povrchu asi 2m^2 a teplotou 300K dostaneme teplotní ztrátu 1 kW. To je samozřejmě nepřípustná ztráta a je z velké části kompenzována absorpcí záření okolního prostředí při pokojových teplotách, které se příliš neodlišují od teploty lidského těla a samozřejmě také absorbováním energie odražené a vyzařené oblečením.

Ostatní zářiče

Zatím jsme se zmiňovali pouze o zářičích ve formě absolutně černého tělesa. Reálné objekty se však od něj odlišují a neřídí se v delších intervalech vlnových délek stejnými zákony, platících pro černé těleso, ačkoliv v určitých rozmezích to tak může být.

Existují tři vlastnosti jimiž se mohou skutečné objekty odlišovat od absolutně černého tělesa. A to část dopadajícího záření α může být absorbována, část záření ρ se může odrazit a část T může objektem prostupovat. Všechny složky jsou závislé na vlnové délce, k jejich vyjádření využíváme spektrální zářivost λ . Potom [3]:

- Spektrální pohltivost $\alpha_\lambda =$ poměr energie pohlcené spektrálním zářičem a celkovým tokem.
- Spektrální odrazivost $\rho_\lambda =$ poměr energie odražené spektrálním zářičem a celkovým tokem.
- Spektrální propustnost $\tau_\lambda =$ poměr energie propuštěné spektrálním zářičem a celkovým tokem.

Suma všech faktorů je vždy rovna jedné a to bez ohledu na vlnovou délku, výsledný vztah je:

$$\alpha_\lambda + \rho_\lambda + \tau_\lambda = 1$$

U nepropustných materiálů je T_λ rovno nule vztah se potom zredukuje na

$$\alpha_\lambda + \rho_\lambda = 1$$

Nyní si zavedeme pojem emisivita ε jako poměr mezi energií spektrálního zářiče objektu a energií absolutně černého tělesa při stejné vlnové délce a teplotě.

Poměr mezi spektrálním vyzařováním obecného objektu a černého tělesa lze vyjádřit

$$\varepsilon_\lambda = \frac{W_{\lambda a}}{W_{\lambda b}}$$

V závislosti vyzařování na vlnové délce existují tři druhy zdrojů záření

- Absolutně černé těleso, pro které platí $\varepsilon_\lambda = \varepsilon = 1$.
- Šedé těleso, pro které platí $\varepsilon_\lambda = \varepsilon =$ konstanta, která je menší než 1.
- Selektivní zářič, jehož ε závisí na vlnové délce.

Z Kirchhoffova zákony vyplývá, že pro všechny materiály se spektrální vyzařování a pohltivost sobě rovnají a to při jakékoliv vlnové délce a teplotě

$$\varepsilon_\lambda = \alpha_\lambda$$

Pro nepropustné materiály potom platí $\varepsilon_\lambda + \rho_\lambda = 1$

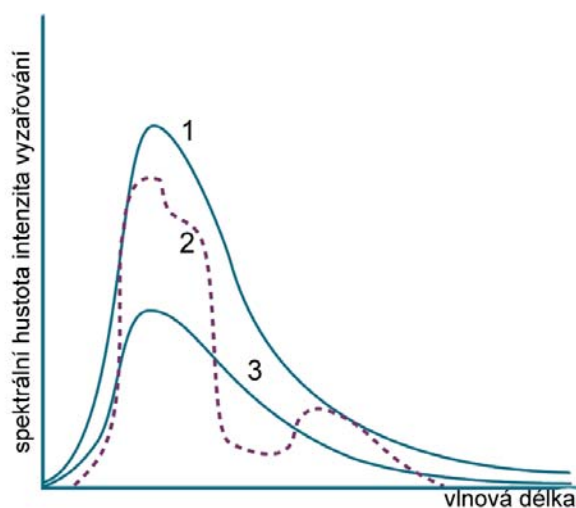
U vysoce lesklých materiálů se ε_λ přibližuje k nule. Pro dokonale vyleštěné zrcadlo s vysokou odrazivostí by tedy teoreticky platilo

$$\rho_\lambda = 1$$

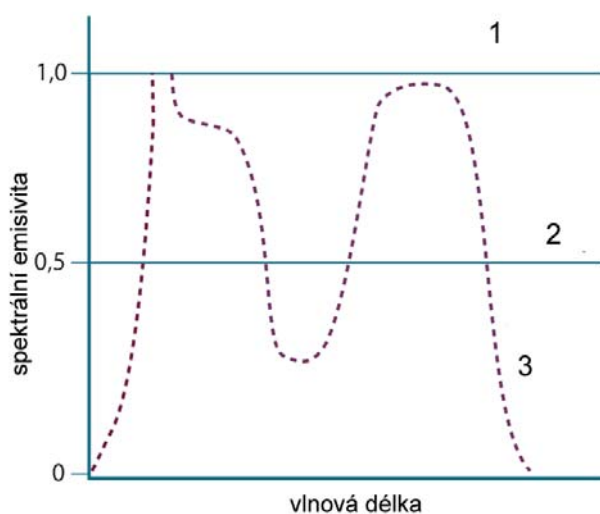
Pro šedý zářič je pak Stefan-Boltzmannův vztah

$$W = \varepsilon\sigma T^4 \text{ [Watt/m}^2\text{]}$$

To znamená, že při rovných teplotách šedého zářiče a absolutně černého tělesa je konečná energie vyzařovaná šedým zářičem v porovnání s vyzařovanou energií černého tělesa menší přímo úměrně k hodnotě ε z šedého tělesa.



Obr.5. Spektrální hustota intenzity vyzařování tří druhů zářičů. 1. černé těleso; 2. selektivní zářič; 3. šedé těleso



Obr.6. Spektrální emisivita tří druhů zářičů. 1. černé těleso; 2. šedé těleso; 3. selektivní zářič.

Polopropustné materiály

Řešení vyzařování i polopropustných materiálů je složitější, musím totiž uvažovat, že radiace prostupující tělesem je částečně pohlcována jím samým. Navíc zlomek z záření, které dorazí až na povrch je odraženo zpět do tělesa, kde opět dochází k absorpci při průchodu materiálem a k odrazu na druhé stěně tělesa. Tímto způsobem probíhají postupné konvergující odrazy. Po sečtení geometrické řady dostaneme vztah:

$$\varepsilon_\lambda = \frac{(1 - \rho_\lambda)(1 - \tau_\lambda)}{1 - \rho_\lambda \tau_\lambda}$$

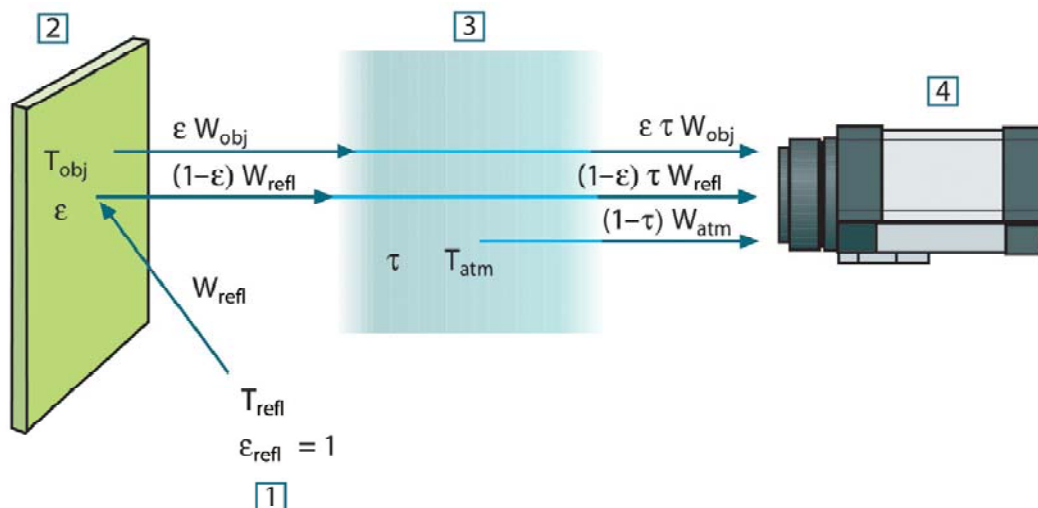
U nepropustného tělesa se rovnice zjednoduší

$$\varepsilon_\lambda = 1 - \rho_\lambda$$

Ta je výhodná, je totiž mnohem jednodušší změřit odrazivost než emisivitu.

Teorie praktického měření

Při měření termovizní kamerou nejsme schopni vyloučit vliv záření okolních objektů mimo náš zájem, ani záření odražené z povrchu tělesa. Při měření je nutné vzít také v úvahu vliv atmosféry. Ta nejenom záření po cestě mezi objektem a senzorem zeslabuje, navíc produkuje ještě záření vlastní.



Obr.7. Schematický náčrt obecné termografické měřicí situace. 1 okolí; 2. objekt; 3. atmosféra; 4. kamera [3]

Předchozí obrázek nastiňuje schéma praktického měření. Byly však zanedbány některé další vlivy pro výsledky měření většinou zanedbatelné. Mezi tyto vlivy patří světlo rozptýlené v atmosféře či záření ze zdrojů nacházejících se mimo zorné pole

senzoru termokamery. V ojedinělých případech je však nutné brát tyto parametry úvahu. Takové posouzení je vždy v kompetenci operátora a má na něj do značné míry vliv jeho zkušenost.

Za předpokladu, že přijatý výkon záření W z černého zdroje s určitou teplotou na krátkou vzdálenost vygeneruje na senzoru kamery výstupní signál U_{zdroj} , který je vůči vstupní energii lineární můžeme psát

$$U_{\text{zdroj}} = CW(T_{\text{zdroj}}), \text{ kde } C \text{ je konstanta.}$$

U šedého tělesa s emisivitou ε bude přijaté záření $\varepsilon W_{\text{zdroj}}$

Složky přijatého záření potom jsou:

1. *Emise z objektu* = $\varepsilon \tau W_{\text{obj}}$, ε je emitance z objektu a τ je propustnost

atmosféry. U objektu uvažujeme teplotu T_{obj} .

2. *Odražené záření z okolních zdrojů* = $(1 - \varepsilon) \tau W_{\text{refl}}$, kde $(1 - \varepsilon)$ je odrazivost objektu. Okolní zdroje mají teplotu T_{refl} .

V tomto bodě se vědomě dopouštíme zjednodušení, kdy předpokládáme, že všechny emitující objekty a jejich povrchy v prostoru zasahujícím do měření mají stejnou teplotu. Toto zjednodušení je však nutné k sestavení funkční rovnice, abychom mohli přiřadit T_{refl} určitou efektivní teplotu uvažovaného okolí.

V souladu s Kirchhoffovým zákonem (Veškerá záření dopadající na okolní povrchy je nakonec týmiž povrchy pohlceno) pokládáme emitenci okolí rovnou jedné.

3. *Emise z atmosféry* = $(1 - \tau) \tau W_{\text{atm}}$, kde $(1 - \tau)$ je emitance z atmosféry. Teplota atmosféry je T_{atm} .

Teď můžeme vyjádřit souhrnnou energii přijatého záření:

$$W_{\text{tot}} = \varepsilon \tau W_{\text{obj}} + (1 - \varepsilon) \tau W_{\text{refl}} + (1 - \tau) W_{\text{atm}}$$

Všechny složky vynásobíme konstantou C a zaměníme produkty CW odpovídajícími U

$$U_{\text{tot}} = \varepsilon \tau U_{\text{obj}} + (1 - \varepsilon) \tau U_{\text{refl}} + (1 - \tau) U_{\text{atm}}$$

Po úpravě předchozí rovnice a osamostatněním U_{obj} dostaneme:

$$U_{\text{obj}} = \frac{1}{\varepsilon \tau} U_{\text{tot}} - \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} U_{\text{refl}} - \frac{1 - \tau}{\varepsilon \tau} U_{\text{atm}}$$

Tuto rovnici můžeme považovat za obecnou pro většinu měřících termografických systémů.

Kde jednotlivé členy U mají následující význam:

U_{obj} – výsledné napětí na výstupu kamery pro teplotu T_{obj} absolutně černého tělesa. Toto napětí lze přímo převádět na reálnou teplotu měřeného objektu.

U_{tot} – naměřené napětí na výstupu pro skutečný případ.

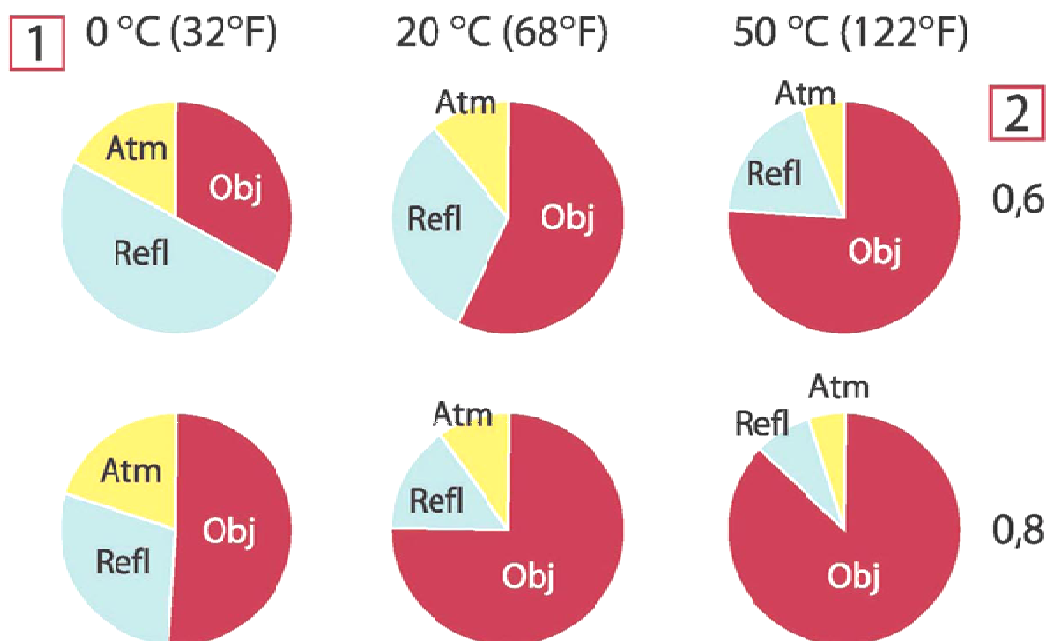
U_{refl} – Teoretické výstupní napětí odpovídající teplotě T_{refl} černého tělesa dle kalibrace.

U_{atm} - Teoretické výstupní napětí odpovídající teplotě T_{atm} černého tělesa dle kalibrace.

Pro výpočet je nutné zadat některé parametry, patří mezi ně:

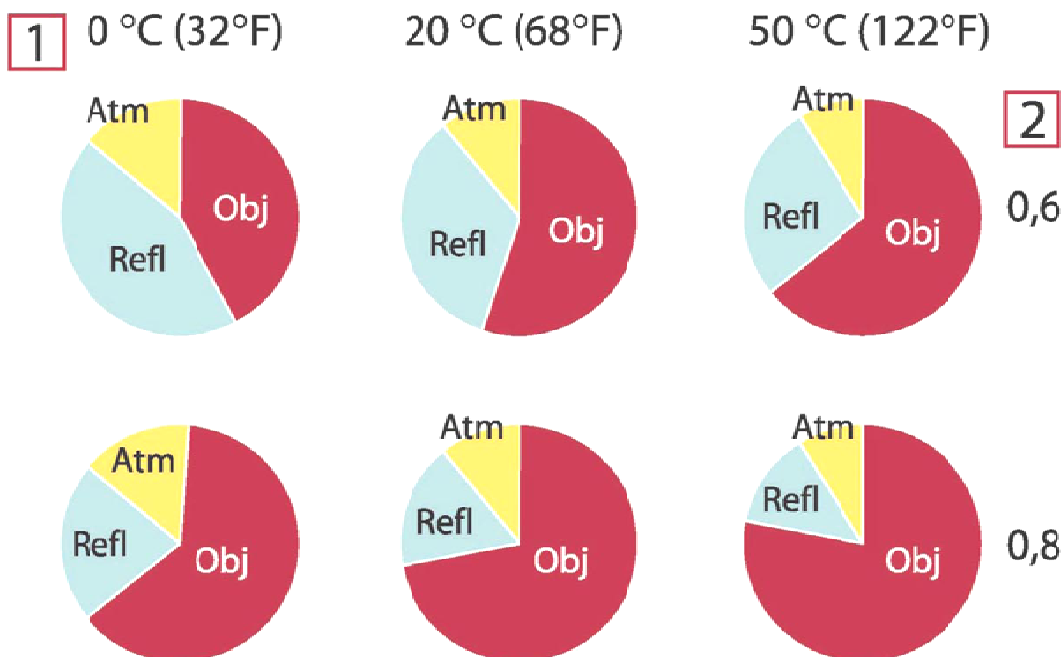
- Emisivita (emitence) objektu ε
- Relativní vlhkost prostředí
- Teplota atmosféry T_{atm}
- Vzdálenost kamery od měřeného objektu (D_{obj})
- Efektivní teplota okolí či odražená okolní teplota T_{refl}

Správný výběr odpovídajících hodnot do jisté míry závisí na zkušenostech zodpovědné osoby. Otázkou ovšem je jak velký podíl mají jednotlivé parametry na výsledky měření. Pro bližší představu můžeme vycházet z [3] a využít zjištěných rozdílů v grafickém znázornění.



Obr. 8. Relativní velikosti zdrojů záření za různých podmínek měření (SW kamera).
1: teplota objektu; 2: Vyzařování; Obj: Záření objektu; Refl: Odražené záření; Atm:

atmosférické záření. Fixní parametry: $\tau = 0,88$; $T_{refl} = 20\text{ °C}$ (+68 °F); $T_{atm} = 20\text{ °C}$ (+68 °F).

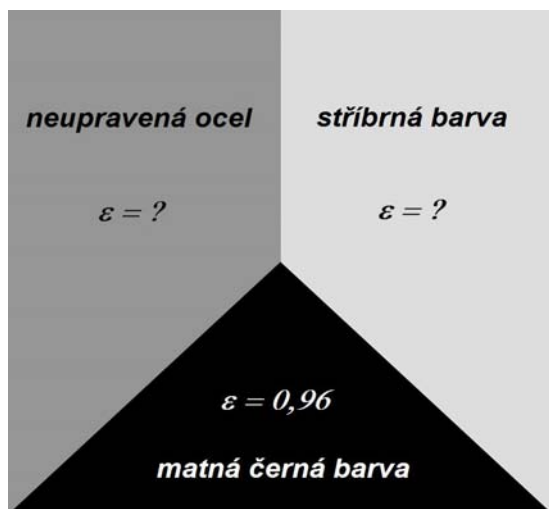


Obr. 9. Relativní velikosti zdrojů záření za různých podmínek měření (LW kamera). 1: teplota objektu; 2: Vyzařování; Obj: Záření objektu; Refl: Odražené záření; Atm: atmosférické záření. Fixní parametry: $\tau = 0,88$; $T_{refl} = 20\text{ °C}$ (+68 °F); $T_{atm} = 20\text{ °C}$ (+68 °F).

Praktické ukázky termogramů

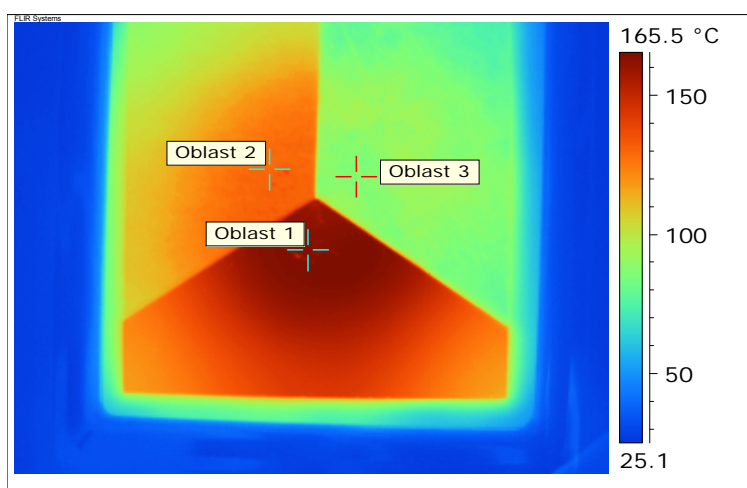
Na následujících dvou termogramech chci demonstrovat nutnost správného nastavení parametrů objektu. V prvním případě je nutné si uvědomit, který z těchto parametrů má na výsledky měření největší vliv. Naštěstí lze dodatečně upravit nastavení parametrů s využitím analytického softwaru. Obsluha termokamery se tedy může omezit na nastavení správného teplotního rozsahu a ideální záznam objektu. Ten by měl, pokud je to možné, přesahovat obrazové pole senzoru kamery pro omezení vlivu okolních objektů.

V prvním případě byla jako měřený objekt použita ocelová deska umístěna na topné těleso. Její povrch byl opatřen 3 různými druhy žáruvzdorného nátěru nátěrů dle následujícího schématu.



Obr.10. Schéma nátěrů ocelové desky.

Pro správné určení teploty v jednotlivých segmentech desky je nutné znát alespoň jednu emisivitu jejího povrchu nebo teplotu desky zjištěnou dotykovým teploměrem pro stanovení ostatních emisivit. Díky rovnoměrnému zahřívání je teplota desky ve všech segmentech stejná, ale vzhledem k rozdílným emisivitám povrchu se jeví na termogramu dosti rozdílně.

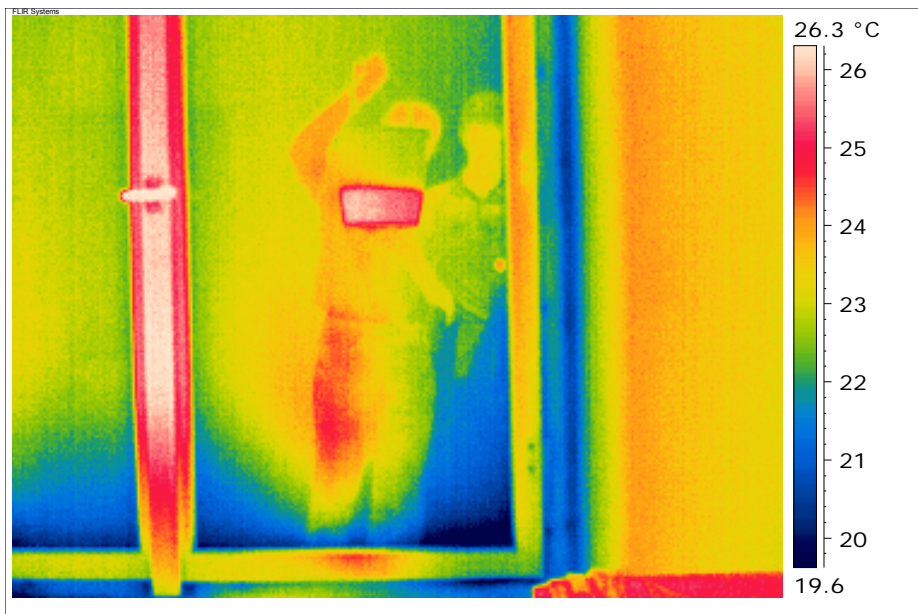


Parametry objektu	Hodnota
Emisivita	0.96
Vzdálenost objektu	1.0 m
Odražená teplota	25.0 °C
Teplota atmosféry	22.0 °C
Propustnost atmosféry	0.99
Podrobnosti	Hodnota
Oblast 1	164.5 °C
Oblast 2	129.1 °C
Oblast 3	87.3 °C

Obr. 11. Termogram ocelové desky s různými nátěry

V praxi se pro eliminaci problému různých emisivit měřeného objektu využívá tzv. termospotů. Značkovacích samolepek s definovanými parametry a samozřejmě emisivitou nebo speciálních sprejů pro ošetření povrchu větších ploch před samotným měřením.

Následující termogram demonstruje problém s odraženou teplotou. V tomto případě se jedná o obraz odraženého záření dvou postav ve skle. Tento problém lze částečně odstranit nastavením odražené teploty, ale vzhledem k nerovnoměrnému rozložení teplot obrazů je nelze odstranit zcela.



Obr. 12. Odražená energie vytvoří na skle obraz



Obr. 13. Vizuální zobrazení předešlé situace

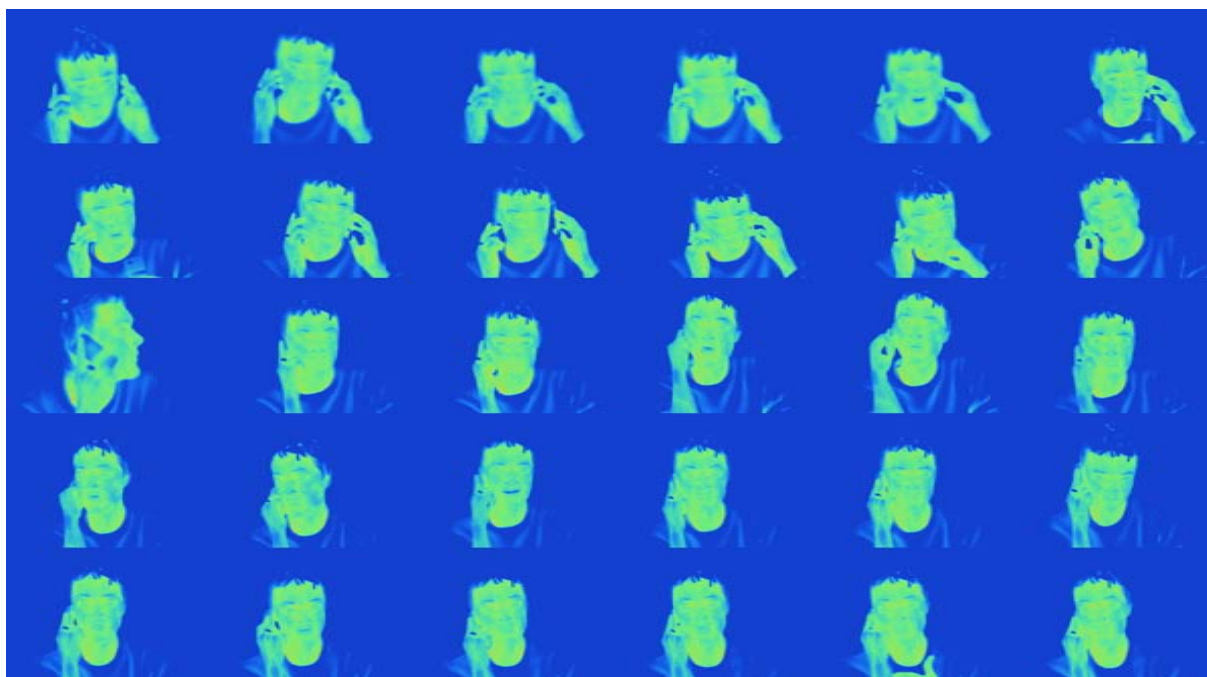
Příloha – příklady využití termogramů

Další obrazová příloha slouží k velmi stručnému nastínění představy využití termovize v praxi. Uplatnění je však daleko větší než poskytuje prostor této práce. Termovize se využívá k hlídání průmyslových procesů například v chemickém, ale i hutním průmyslu, ve zdravotnictví a k vyhledávání osob či cílů armádních jednotek.

Toto improvizované měření mělo za cíl zjistit vliv elektromagnetického záření na změnu teploty figuranta. Během testovací doby 30 minut byl uskutečněn hovor prostřednictvím GSM mobilního telefonu s hodnotou SAR:

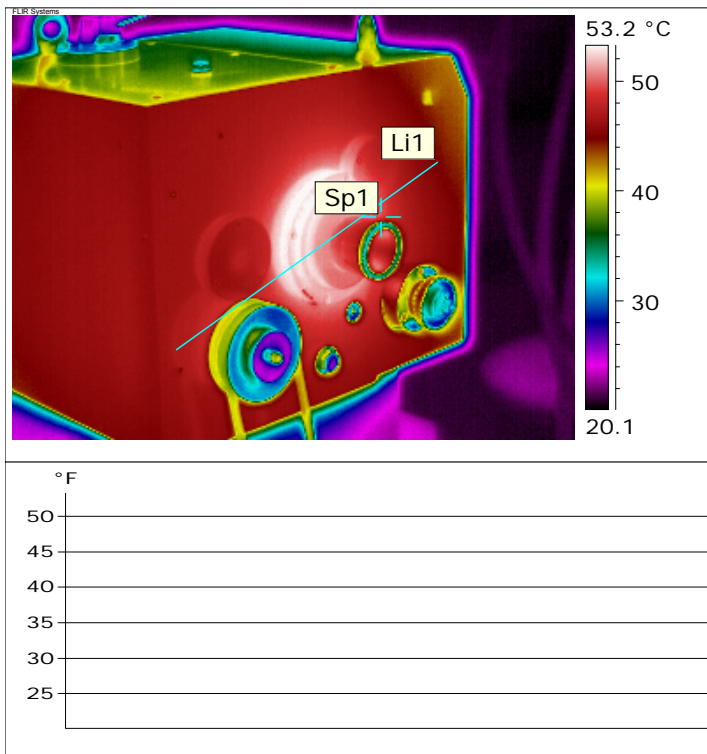
GSM Head: 0,743 mW/g (10g)

V jeho průběhu byl figurant intervalově snímán termokamerou. Větší nárůst teploty subjektu nebyl zaznamenán.



Obr. 14. Měření vlivu elektromagnetického záření na změnu teploty tkáně

Termogram hodnotí převodovou skříň pro obráběcí stroj v testovacím provozu



Obr. 15. Převodová skříň obráběcího stroje s vyznačeným teplotním profilem

Použitá literatura:

- [1] <http://cs.wikipedia.org/wiki/Sv%C4%9Btlo> –Wikipedia otevřená encyklopedie, téma světlo
- [2] Zpravodaj pro měření a regulaci číslo 1 (Bezdotykové měření teploty)
- [3] ThermaCAM P65 – Příručka uživatele, Flir, 2004
- [4] mfweb.wz.cz/fyzika/206.htm - Záření černého tělesa
- [5] Přednášky z předmětu Optoelektronické systémy na FS ČVUT, Ing. Čáp, LS 2008

Další doporučená literatura:

- Album of Science, The 19th Century, Pearce L. Williams, Charles Scribner's Sons, 1978
- Asimov's Chronology of Science and Discovery, Isaac Asimov, HarperCollins Publishers, 1994
- Theory and Practice of Radiation Thermometry, David P. DeWitt a Gene D. Nutter, John Wiley and Sons, 1988