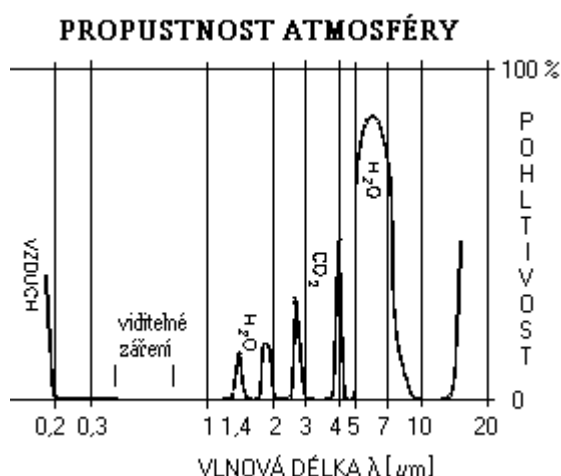


Infračervené záření a historie

Historie

Objevitelem infračerveného záření v roce 1800 je britský astronom William Frederic Herschel. K objevu infračervených paprsků mu pomohlo zjištění enormního nárůstu teploty v červeném pásmu viditelného světla při rozložení slunečního světla skleněným hranolem, které signalizovalo přítomnost pro lidské oko ještě dalšího, ale už neviditelného záření. Infračervené záření IR (tak bylo nazváno po původním označení jako ultračervené) dělí z technologického hlediska podle vlnového rozsahu na pásma A, B, C. Pásmo A zahrnuje rozpětí vlnových délek 0,76 - 1,4 μm , střední pásmo B 1,4 - 3 μm a dlouhovlnné pásmo C úsek nad 3 μm (to pak přechází bez ostré hranice, přibližně v pásmu kolem 100 μm , do oblasti radiových vln). V pásmu IR-A jen málo paprsků slunečního



spektra projde parami v zemském ovzduší a jen málo jsou absorbovány vodou. Pásmo IR-B se téměř úplně pohltí vodou, prochází sklem i zemskou atmosférou a u pásma IR-C, kde zdrojem mohou být i žhavené spirály nebo třeba elektricky vyhřívaná tělesa, tento jev ještě zesílen.

Rok 1900 Planckův zákon

$$dI = \frac{\hbar}{\pi^2 c^2} \frac{\omega^3}{e^{\frac{\hbar\omega}{kT}} - 1} d\omega,$$

ω je úhlová frekvence záření,

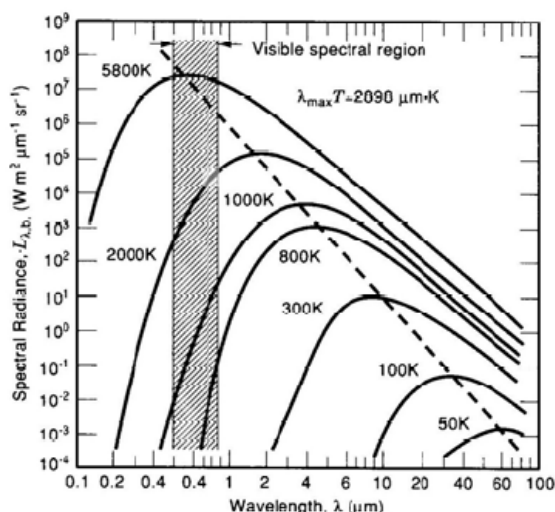
I je intenzita záření,

T je teplota absolutně černého tělesa,

\hbar je redukovaná Planckova konstanta,

c je rychlost světla ve vakuu a

k Boltzmannova konstanta.



Průběh Planckových křivek ukazuje, že množství vysílaného záření závisí dokonce na

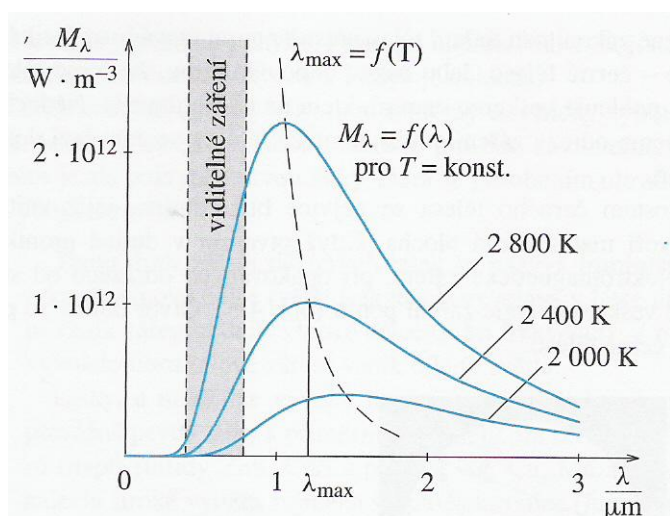
- intenzita vyzařování klesá výrazně s klesající teplotou

4. mocnině absolutní teploty, a že spektrální rozložení záření se přesouvá k delším vlnovým délkám pro chladnější objekty. Jestliže povrch Slunce vyzařuje při teplotě 5700 K maximum energie ve žlutozelené optické části spektra pro vlnové délky slabě nad 500 nm, tak člověk o teplotě 310 K září nejvíce v pásmu slabě nad 9 mikrometrů - tedy právě v infračerveném spektrálním oboru.

Wienův zákon

$$I_{\max} = \frac{b}{T}, \quad b = 2,897\,768\,5(51) \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$$

Wienův zákon nám ukazuje, jak se posunuje vyzařovací maximum s teplotou. Udává hodnotu vlnové délky, na které dochází k maximálnímu vyzařování při dané teplotě.

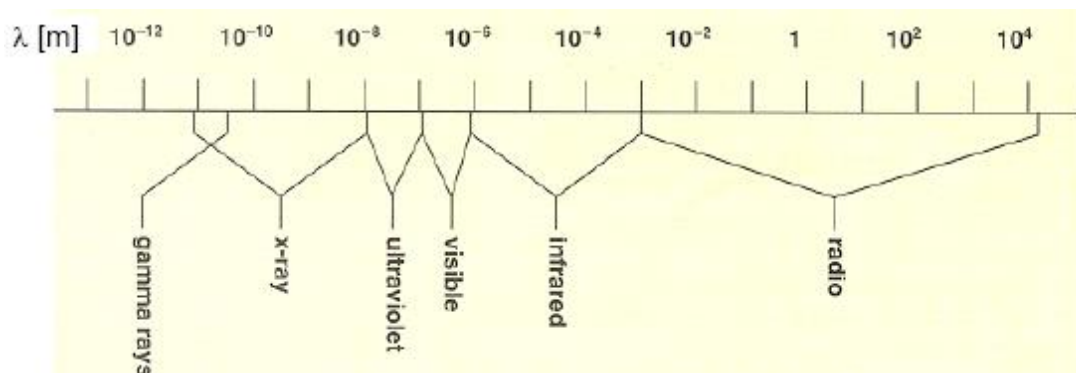


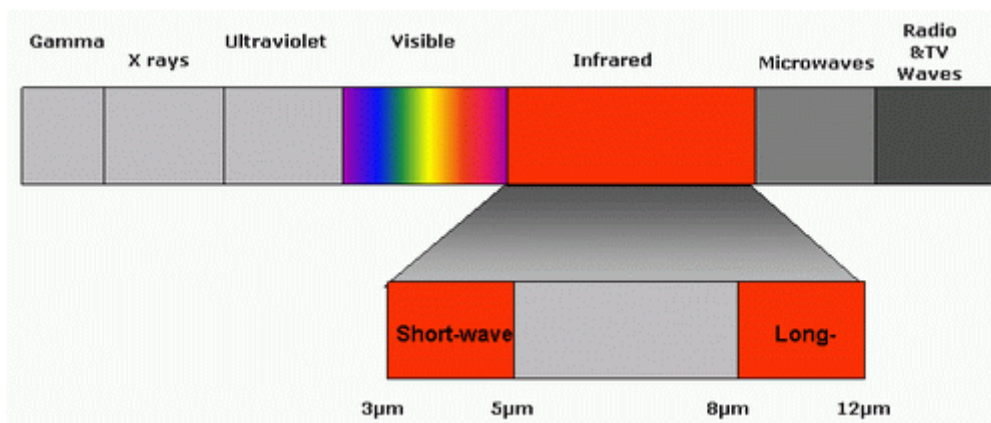
Stefanův-Boltzmannův zákon

Každé těleso o teplotě vyšší než 0 K (-273,15 °C = absolutní nula) vyzařuje energii ve formě elektromagnetického záření na různých vlnových délkách. Část záření, která vzniká tepelným pohybem částic pevných těles, kapalin nebo i plynů a plazmatu se nazývá tepelné záření, přičemž vyzářená energie je úměrná čtvrté mocnině teploty tělesa, což vyjadřuje Stefan-Boltzmannův zákon pro celkovou intenzitu záření vyzařovanou jednotkou plochy do poloprostoru.

$$I = \sigma \cdot T^4 \quad \text{kde } \sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}.$$

Spektrum





Další veličiny

- Zářivý tok (zářivý výkon) Φ (W)
Intenzita vyzařování M ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) - někdy označujeme I a H
- Poměry zářivých toků
 - pohltivost α (pohlčený/dopadající)
 - prostupnost τ (prostupující/dopadající) $\alpha + \tau + \rho = 1$ resp. $\varepsilon + \tau + \rho = 1$
 - odraznost ρ (odražený/dopadající) $\alpha_\lambda + \tau_\lambda + \rho_\lambda = 1$ resp. $\varepsilon_\lambda + \tau_\lambda + \rho_\lambda = 1$

Emisivita a černé těleso

Černé těleso

Černé těleso je takové těleso, které veškerou dopadající zářivou energii pohlcuje (bez ohledu na vlnovou délku) a potom ji vysílá pouze ve formě tepelného záření.

- v přírodě takové těleso neexistuje
- v praxi ho můžeme realizovat dutinou se začerněnými vnitřními stěnami a s malým otvorem
- dopadající záření při mnohonásobných odrazech předá svou energii stěnám černého tělesa, které ji vyzáří ve formě tepelného záření

Selektivní zářiče

Jsou to tělesa, která mají pro různou vlnovou délku různou emisivitu ε_λ .

Šedé těleso

Emisivitu ε šedého tělesa můžeme považovat za konstantní v dosti širokém rozsahu vlnových délek.

Barva tělesa se mění s teplotou

- $t < 525$ °C - infračervené záření (nevidíme)
- $t = 700$ °C - tmavočervená barva
- $t = 900$ °C - červená barva
- $t = 1100$ °C - oranžově červená barva
- $t = 1300$ °C - bílá barva
- $t = 3000$ °C - modrobílá barva

Emisivita

Vyzařovací schopnost každého tělesa se nazývá emisivitou povrchu daného tělesa a označuje se e . Emisivita je číselně rovna poměru energií vyzařených reálným povrchem a absolutně černým tělesem:

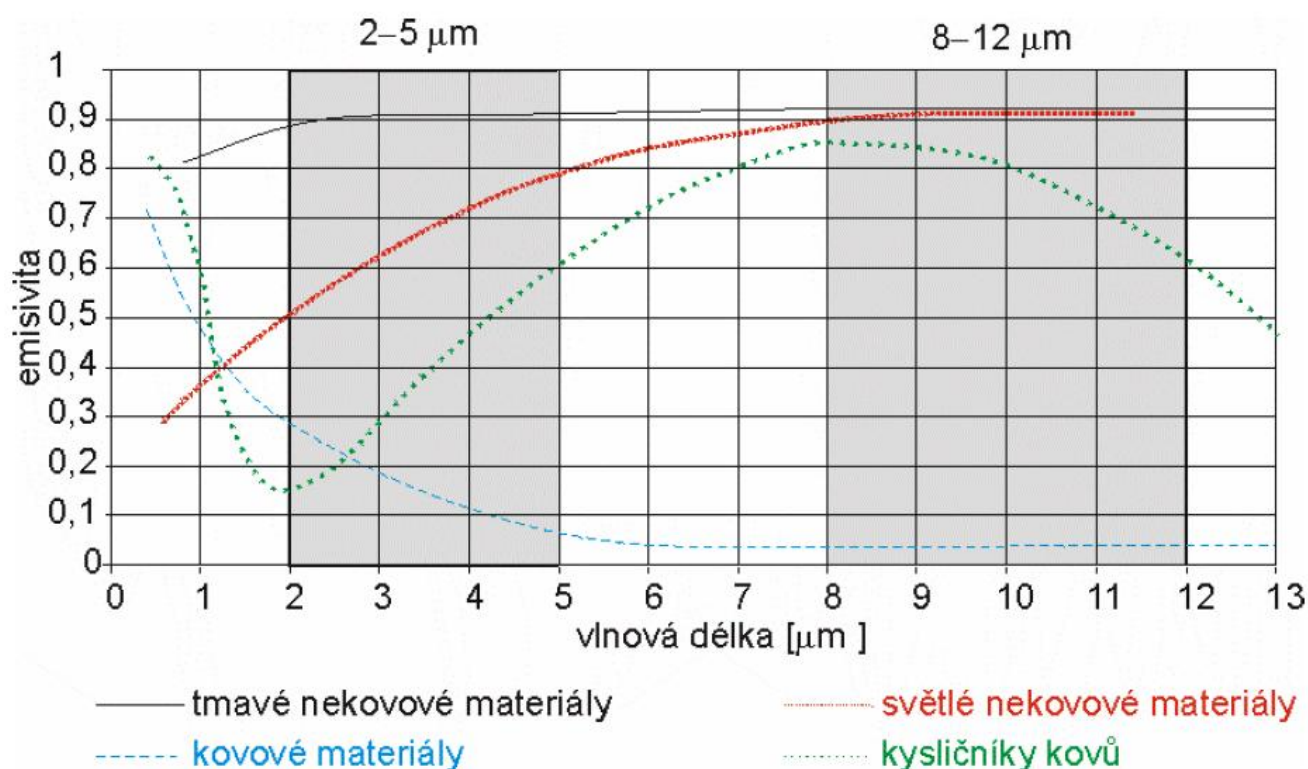
$$e = \frac{H_m(T)}{H_c(T)} \quad e = \frac{M}{M_0} = \frac{\int_0^\infty e(\lambda, T) \cdot M_{0\lambda} d\lambda}{\int_0^\infty M_{0\lambda} d\lambda}$$

kde $H_m(T)$ je energie vyzařovaná měřeným objektem o teplotě T

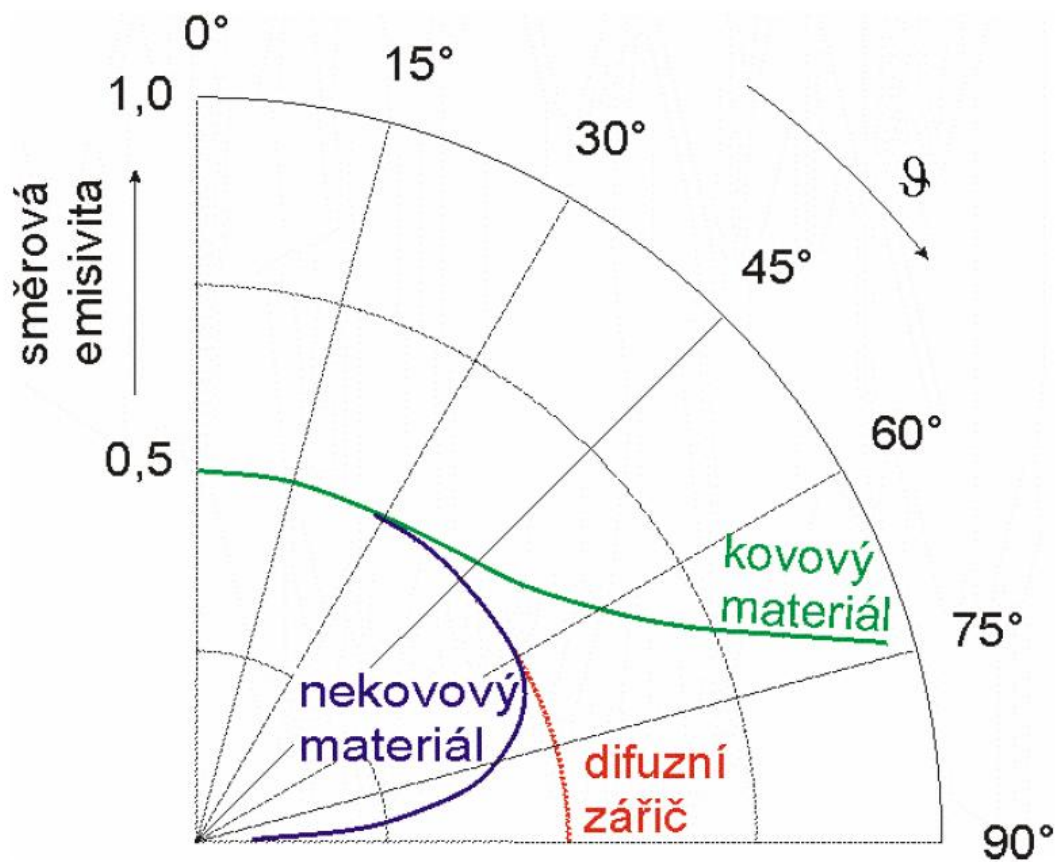
$H_c(T)$ je energie vyzařovaná černým tělesem o teplotě T

Definice emisivity vyjadřuje celkovou emisivitu. V praxi pracujeme s přístroji, které měří energii záření jen v určitém omezeném spektrálním rozsahu. Proto je vhodné uvažovat spektrální emisivitu, kde emisivita je funkcí vlnové délky $e = e(\lambda)$. Protože se pyrometry celkového záření v praxi příliš nevyskytují, budeme dále chápat pojem emisivity ve smyslu spektrální emisivity. Stanovení emisivity výpočtem je složité, proto se emisivita určuje spíše měřením. Dále musíme uvažovat, že emisivita závisí i na směru zářiče od pyrometru a mění se nám s teplotou. Pro některé materiály je tato závislost silnější, pro jiné slabší. Největším změny pozoruje, když materiál mění strukturu své krystalické mřížky. Velký vliv na povrchové vlastnosti materiálu má i povrchová oxidace.

Emisivita v závislosti na vlnové délce...vybrané druhy materiálů



Emisivita v závislosti na směru



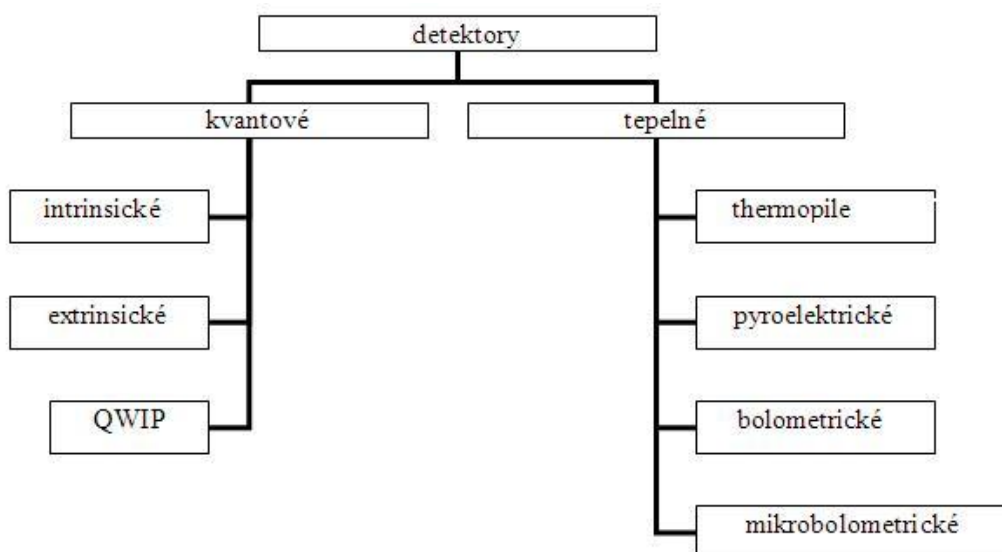
Hodnoty emisivity pro vybrané povrchy:

Těleso	emisivita
černé těleso	1
černý matový lak	0,99
voda	0,95
cihly	0,85
zoxidovaný ocelový plech	0,75
zoxidovaný hliník	0,55
lesklý ocelový plech	0,25

Detektory

Nadále se budeme věnovat detektorům, které se používají pro bezkontaktní měření teploty. Pro potřeby snímání infračerveného záření se využívá dvou typů detektorů, které pro jeho konverzi na elektrický signál vhodný pro elektronické zpracování využívají dva rozdílné přístupy:

- Tepelné detektory (Thermal Detectors) - využívají změny některé vlastnosti materiálu na základě absorpce energie infračerveného záření.
- Kvantové detektory (Quantum Detectors) - využívají přímé přeměny dopadajícího záření na náboj, resp. elektrický proud.



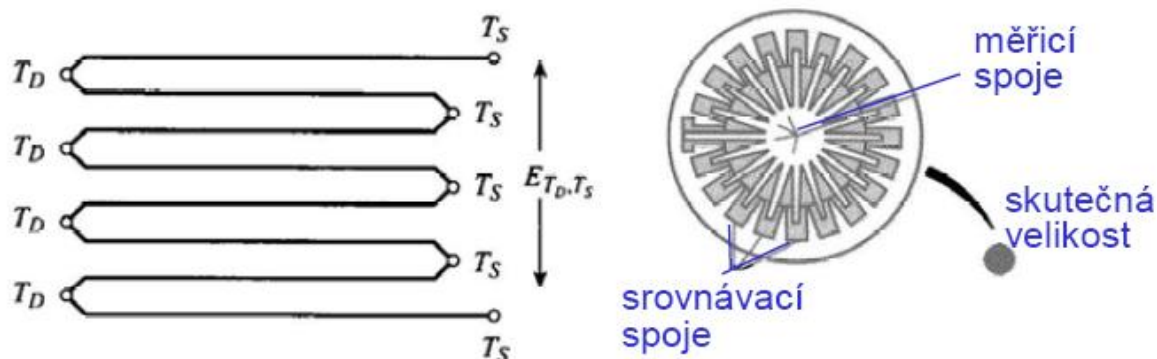
Tepelné detektory

Porovnání tepelných detektorů radiační pyrometrie

Typ teplotního detektoru	Spektrální citlivost	Převodní konstanta (dle zprac. výstupu)	NEP - Noise Equivalent Power	Frekvenční odezva
Thermopile	0.2 až 35 μm	cca až 100 V/W	0.1 až 10 nW/ $\sqrt{\text{Hz}}$	až 100 Hz
Bolometr Si	1.6 až 5000 μm	až 100 kV/W	1 pW/ $\sqrt{\text{Hz}}$ až 1 fW/ $\sqrt{\text{Hz}}$	až 1 kHz
Pyroelektrický (LiTaO ₃)	0.01 až 1000 μm	až 3.0 $\mu\text{A/W}$	10 nW/ $\sqrt{\text{Hz}}$ až 10 $\mu\text{W}/\sqrt{\text{Hz}}$	až 100 kHz (1MHz)
Kalorimetr	0.25 až 35 μm	0.1 V/W	10 $\mu\text{W}/\sqrt{\text{Hz}}$ až 10 mW/ $\sqrt{\text{Hz}}$	0.001 až 0.2 Hz

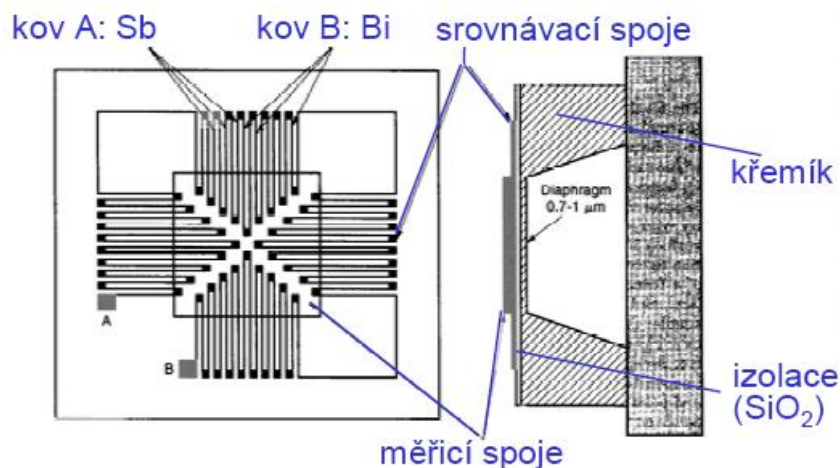
Thermopile

Thermopile sensors, v češtině obecně označované jako radiační pyrometry nebo též infratermočlánky, jsou senzory pro bezdotykové měření povrchové teploty předmětů a objektů. Jak napovídá vcelku výstižný název infratermočlánky, jde o zahřívání termočlánků infračerveným zářením, které vysílá každý objekt o určité teplotě. Nezaměňovat však s pyroelektrickými senzory, které pracují na podobné principu, ale využívají pyroelektrického efektu.





Vlevo vidíme skutečné provedení infratermočlánků. Dolní část nám ukazuje možné provedení a zapouzdření snímače.



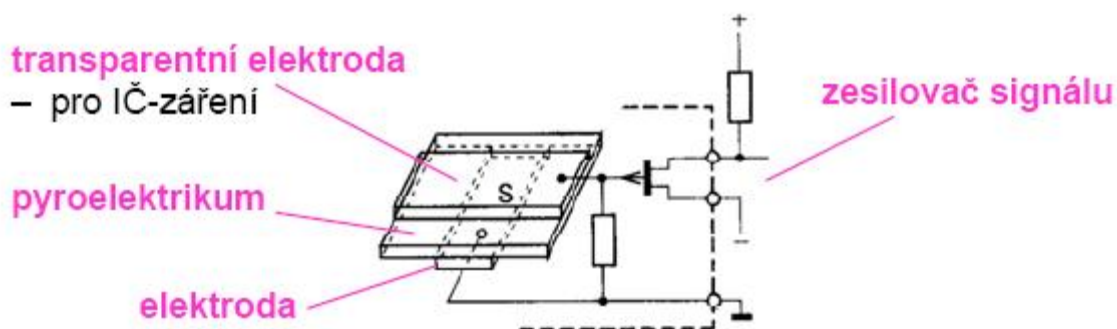
35

Pyroelektrické senzory

- založeny na pyroelektrickém jevu, změna spontánní polarizace pyroelektrika při změně teploty
- pyroelektrika: např. keramické látky na bázi titaničitanu a zirkoničitanu olovnatého

Princip pyroelektrického senzoru :

- senzor představuje kondenzátor, na jehož elektrodách se při změně polarizace v pyroelektriku naindukuje náboj
- při aplikaci pyroelektrického senzoru musí být tepelné záření cyklicky přerušováno

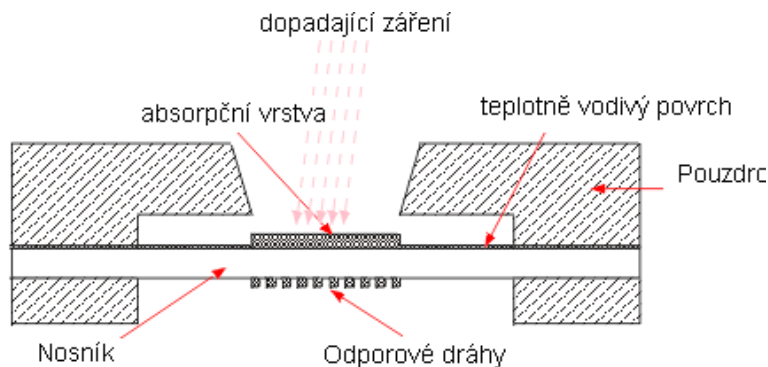


Uspořádání pyroelektrického senzoru

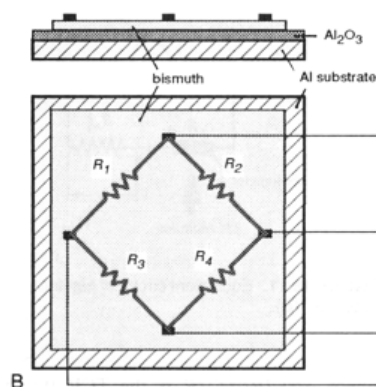
- před každým odměrem je nutné záření dopadající na detektor začlonit a opět odclonit
- u pyroelektrických materiálů se kromě pyroelektrického jevu projevuje parazitní piezoelektrický jev (např. při otřesu a deformaci pyroelektrika), který je u některých přístrojů kompenzován druhým opačně pólovaným detektorem, který je odstíněn před tepelným zářením

Bolometry a mikrobolometry jako nejpoužívanější

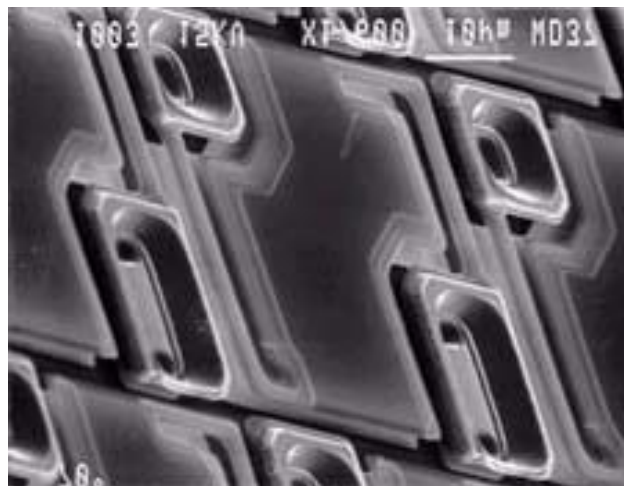
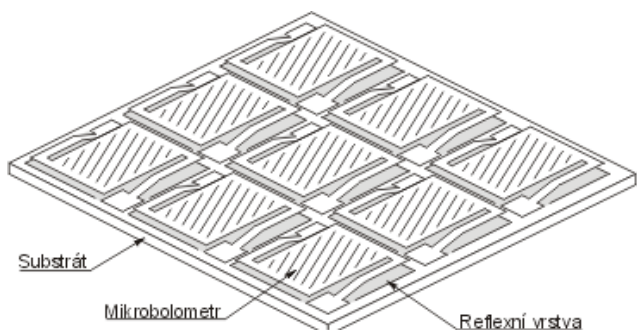
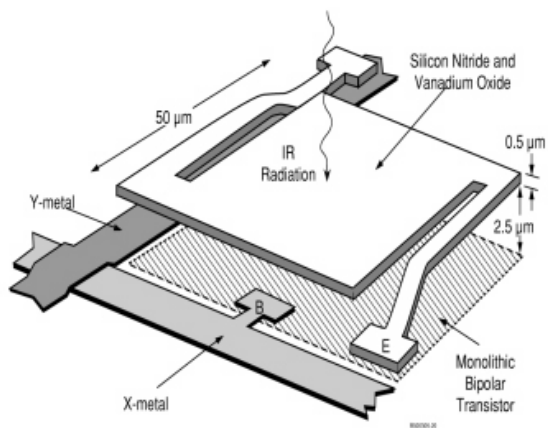
Současným nejpoužívanějším snímačem je bolometr a jeho mikrostruktura, mikrobolometr. Jde o tepelný snímač, kdy se s absorpcí IR záření mění jeho teplota a tím jeho odpor. Princip podobný kovovým snímačům teploty.



Klasický bolometry, jednoduché uspořádání a můstkové zapojení pro kompenzaci okolních vlivů



Mikrobolometry se vyrábí s využitím nanotechnologií, zde je vidět FPA detektor. Na horní fotografii je model jednoho elementu, kde je vidět implementace senzoru a zapojení na tranzistor, který zabezpečuje přenos informace o dopadajícím záření. Fotografie ukazují skutečný snímač a pohled na strukturu při zvětšení. Dolní obrázek ukazuje model uspořádání elementů. K teplotní stabilizace se někdy využívá Peltierova článku, který teplotně stabilizuje prostředí detektoru.



Vývoj

1. Generace - zahrnuje první termokamery vznikající v 70. a 80. letech, které byly převážně vyvíjeny a určeny pro vojenské účely. Tyto kamery využívaly jednoduché diskretní detektory které tvořily nemultiplexované fotovodivé lineární matice s maximálně 100 elementy (poslední špičkové kamery 1. generace měly až 180), typicky vyráběné z materiálu InSb, PbSe a později i HgCdTe. Výrazný posun v kvalitě v 80. letech pak přineslo vynalezení SPRITE detektorů a nasazení skenovací technologie. Typicky tyto kamery pracovaly v pásmu 8 - 12 mikrometrů s optikou F/2 - F/4 a typickým teplotním rozlišením NETD 0,2 Kelvinů. Některé termokamery 1. generace v armádách stále ještě slouží.

2. Generace - vyznačují se použitím skenovacího systému ve spojení s lineárními nebo 2D FPA (Focal Plane Arrays) detektory s počtem 100 až 1000 elementů nebo případně ještě multiprvkovými SPRITE detektory. Teplotní rozlišení NETD tím kleslo typicky na cca 0,1 K. Tyto kamery se již vyznačovaly přijatelně malými rozměry a hmotností a začaly být prodávány i v komerční provedení. To bylo docíleno uměním plné integrace snímacích elementů a základní čtecí logiky na jeden společný čip. Nasazení těchto termokamer ve vojenství začalo již v 2. polovině 80. let a trvalo až do cca poloviny 90. let a i v současnosti stále představují hlavní podíl těchto zařízení ve výzbroji armád. Termokamery využívající vylepšené multilineární FPA detektory jsou někdy označovány jako generace 2+ s vylepšeným teplotním rozlišením až 0,05 K. Jádrem jsou HgCdTe detektory s 288x4 elementy pro pásma 3-5 mikrometrů a 8-10,5 mikrometrů s integrovaným plným signálovým zpracováním (integrace fotoproudu, rychlé čtení, dělení, TDI, výstupní předzesílení apod.).

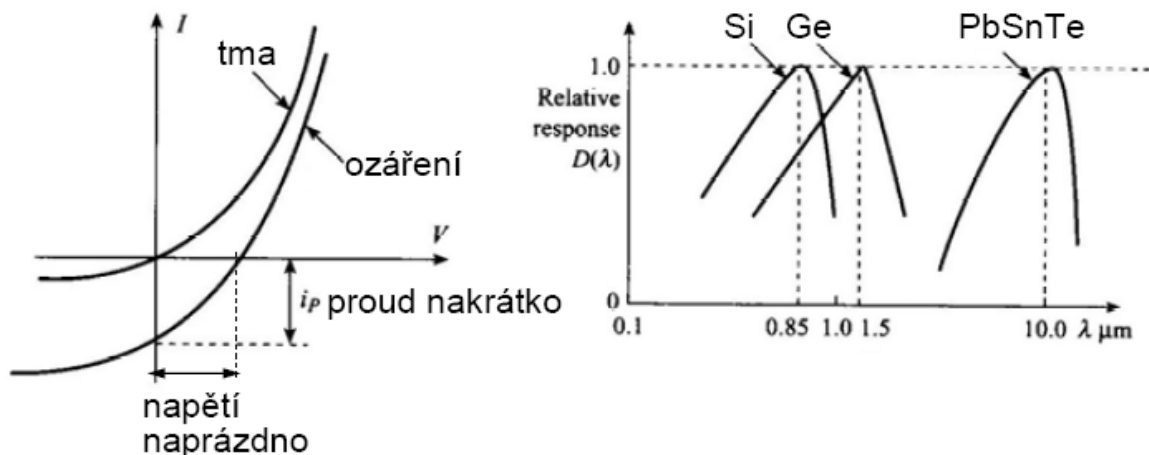
3. Generace - obsahuje neskenovací termokamery využívající buď 2D chlazené FPA detektory z materiálu HgCdTe, InSb nebo nejnověji technologii QWIP, nebo nechlazené FPA založené na mikrobolometrech nebo feroelektrické technologii. Počet elementů dosahuje 1 a více miliónů. Tyto staring arrays, jak se také označují, již obsahují plné digitální zpracování signálu na společném čipu, rychlé integrované vyčítací obvody ROIC, volbu pixelů, antiblooming každého pixelu, předzesílení, úpravu a filtraci v blocích apod. "Zrušení" skenovací mechaniky velmi zjednodušilo optiku, která teď má za úkol jen zaostřit infračervený obraz na FPA. První kamery 3. generace byly k dispozici již v 90. letech a od počátku 21. století jsou volně na trhu i chlazené kamery s QWIP technologií nebo nechlazené kamery s detektorem s mikrobolometry. Ty sice se vyznačují výrazně horší kvalitou obrazu než chlazené typy, ale zase jsou 2x až 4x levnější.

Kvantové senzory

Při interakci fotonů dopadajících na strukturu senzoru dochází ke generaci párů elektron-díra. Intrinsické jsou detektory, které využívají jen vlastní polovodič, extrinsické jsou ty, které používají dotovaných struktur,

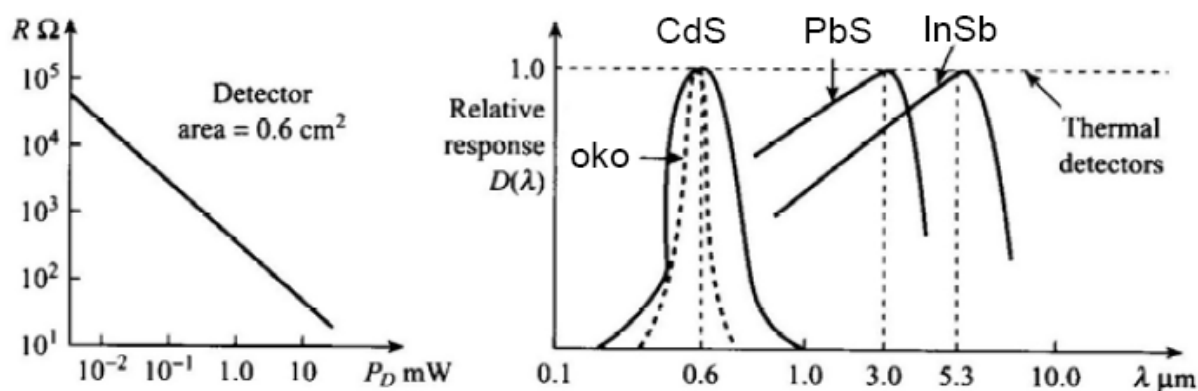
Fotodioda

Fotodioda využívá se jevů, ke kterým dochází na PN přechodu Si diody.



Fotoodpor

- změna pohyblivosti nosičů náboje při dopadu fotonů na polovodičovou vrstvu
- vodivost je funkcí fotonového toku
- detektor vyžaduje elektrické pole vytvořené připojením vnějšího napětí
- fotoodpory na bázi CdS, PbS, InSb, PbSe



QWIP detektory

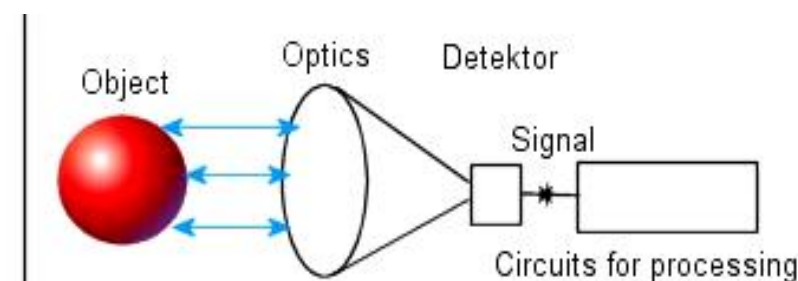
Jde o moderní detektory, které pracují na kvantovém principu. Klasické infračervené detektory pracují na stejném principu jako běžné digitální videokamery, jen pixely jejich snímacího čipu nepřeměňují v elektrický proud fotony viditelného světla, ale infračerveného záření. Čím více pixelů, tím větší rozlišovací schopnost. Naproti tomu detektor QWIP je sestaven z více než 100 vrstev polovodiče GaAs (arzenid galia), z nichž každá je extrémně

tenká - má sílu od 10 do 700 atomů. Jednotlivá vrstva pracuje jako kvantová jáma, což znamená, že uvolní elektron pouze když na ni dopadne světelné záření o přesně definované energii, přičemž každá z nich je "vyladěná" na dopadající fotony s jinou energií. Díky tomu poslední verze detektoru QWIP dokáže zpracovávat IR záření v rozsahu vlnových délek od 8 do 12 mikrometrů. Uvolněné elektrony pak detekuje speciální čip, který informaci předává počítači. Ten pak na základě získaných údajů vytvoří výsledný obraz. Rozlišení infračerveného zařízení s QWIP detektorem odpovídá klasickému detektoru s milionem pixelů. Přitom nová technologie je poměrně levná, protože lze využít postupy běžné při výrobě polovodičových čipů. Bloky galiumarzenidu tak lze "pěstovat" stejně levně a ve stejných velikostech jako monokrystaly křemíku pro počítačový průmysl.

Kamery pro termodiagnostiku

Jsou to zařízení, která implementují detektor a obvody pro zpracování signálu. Celý systém samozřejmě potřebuje zdroj energie a prostředky pro izolaci od okolního prostředí, aby došlo k co nejmenšímu ovlivnění snímače.

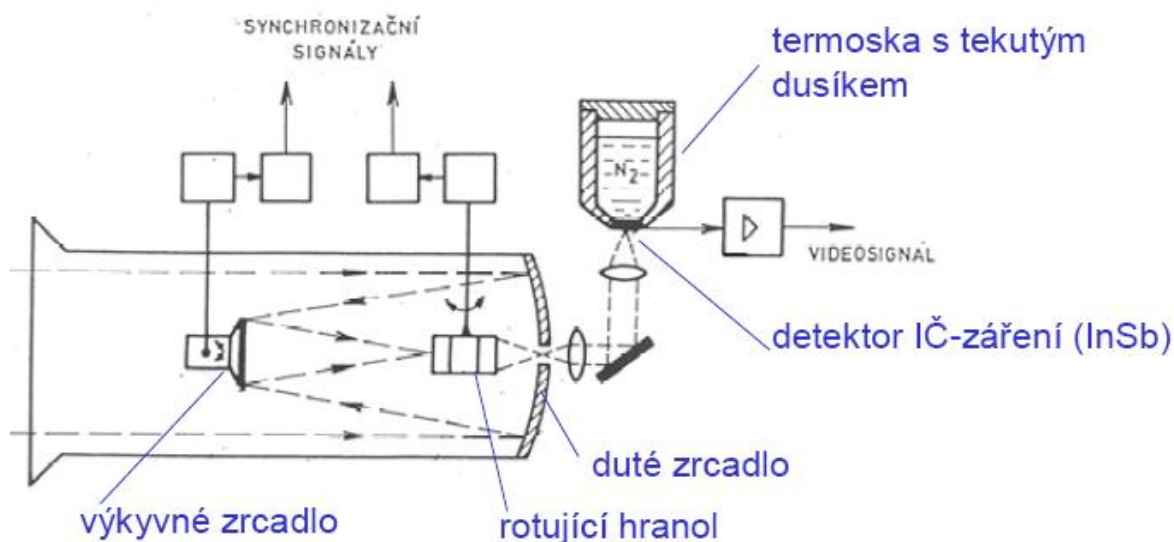
Jednoduché schéma zapojení kamery.

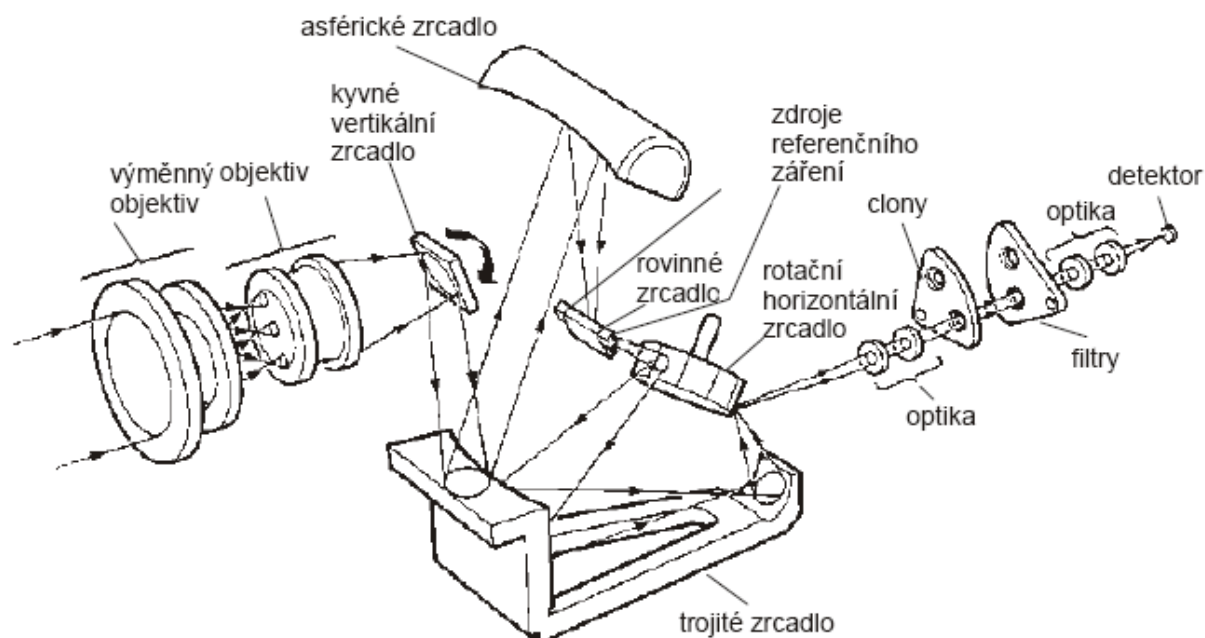


Background

Princip termovizní kamery s elektromechanickým

rozkladem obrazu. Jde o starší typ kamer, které vyžadovaly chlazení. Využíval se mechanický rozklad obrazu pomocí rotujících prvků. Obraz se rozloží do řádek a bodů pomocí vertikálně kmitajícího zrcadla a horizontálně rotujícího hranolu či zrcadla. Detektory se chladily na teplotu menší než 80 K.

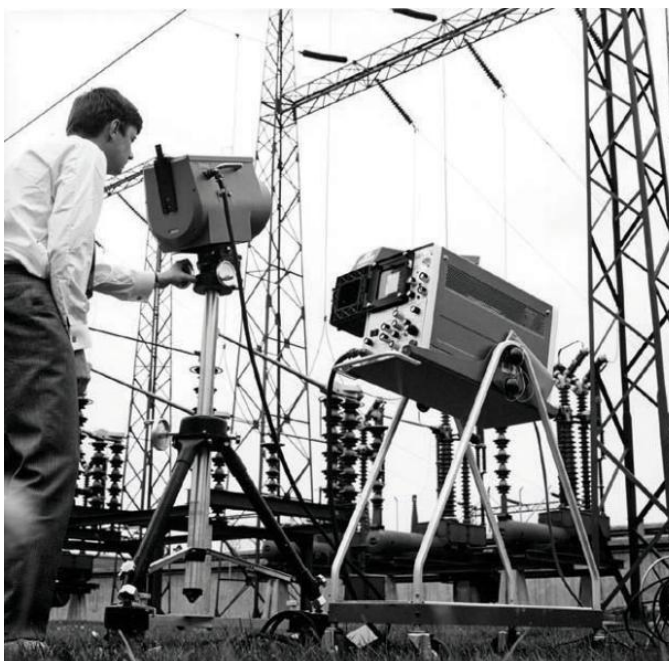




Skutečné uspořádání prvku v systému s mechanickým rozkladem obrazu.

Termovizní kamery z maticovými detektory. Jde o jednodušší způsob, který však vyžaduje detektory s vyšším rozlišením. Uspořádání kamery je dle obrázku na začátku kapitoly. Systém se skládá z optiky, snímače a obvodů. Využívají se detektory chlazené i nechlazené, většinou mikrobolometry. Novým krokem jsou QWIP detektory, které mají mnohem větší rozlišení a tím i poskytují přesnější snímky.

Kamery historie a současnost



Kamera 0,55 kg

Kamera 25 kg

Osciloskop 20 kg

Stativ 15 kg

Polaroid 6 kg

Dusík 10 l

CELKEM cca 70 kg

Fotografie zobrazují, jak se změnila podoba kamer během asi 40 let.

Příklady kamer



Jejich parametry se liší dle použití. Menší jsou pro rychlou diagnostiku v provozu, větší pro detailní rozbor a aplikace v technologii. Mají rozdílné citlivosti, velikosti snímačů, provedení těla, rozsahy měřených teplot...



Kamera FLIR E45

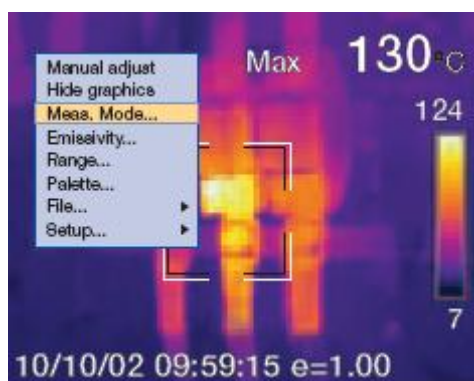
Je kamera používaná pro měření na naší katedře. Jde o malou kompaktní kameru se zdrsňeným držadlem pro pevný úchop určenou pro měření v průmyslu s krytím IP 54. Fotka přístroje.



Tento přístroj výrobce označuje jako typ pro rychle měření při diagnostice poruch. Spektrální rozsah je $7,5 - 13 \mu\text{m}$. Rozsah měřených teplot $-20 \div 100 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $0 \div 250 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $120 \div 900 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Dokáže snímkovat předměty o frekvenci 50 Hz a v době nákupu šlo o nejlehčí kameru na trhu (0,7 kg). Snímky se zobrazují na dvou a půlpalcovém barevném displeji v horní části těla. Ovládání je realizováno pomocí sady tlačítek umístěných pod displejem. Rozlišení snímače je 160×120 bodů. Vnitřní paměť dovoluje uložení až 200 obrazů. Doba náběhu přístroje je asi 15 sekund, pro měření výrobce doporučuje nechat přístroj teplotně ustálit 5 minut, pak zaručuje danou přesnost měření. Možnost použití je v prostředí o teplotách -15 až $50 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Přesnost $\pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ze snímané teploty a citlivost $0,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Pro přenos dat můžeme použít rozhraní RS - 232 / USB nebo CVBS (S-Video out).

Obrazovka a nastavení

Nastavení parametrů se provádí přes grafický displej. Menu je ve více jazycích, podporuje češtinu. Základní nabídka obsahuje nastavení - režimu měření (bod, plocha – max, min,



průměr), volby rozsahu (automaticky, manuálně), emisivity (0,1 – 1,0), palety barev (duha, šedá, železo), rozsahy teplot, skryt menu, soubor (správa obrazů), nastavení (datum, čas, lokalizace...).

Na předchozím obrázku je příklad obrazovky kamery obsahující menu v anglickém jazyce, dále datum, čas a emisivitu v dolní části, teplotní barevnou paletu v pravé části,

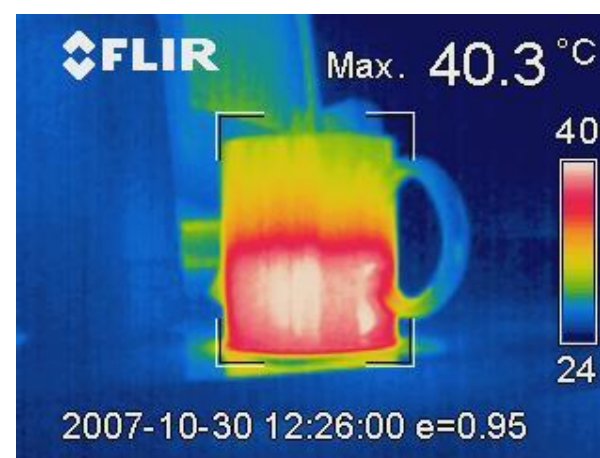
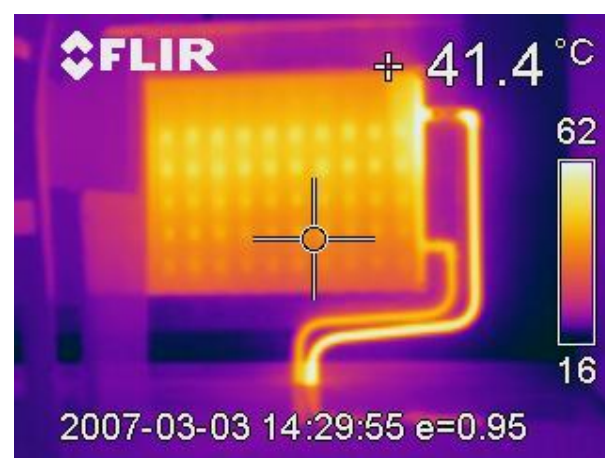
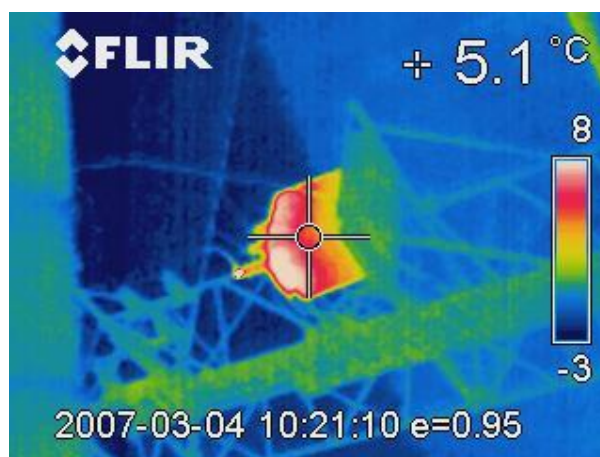
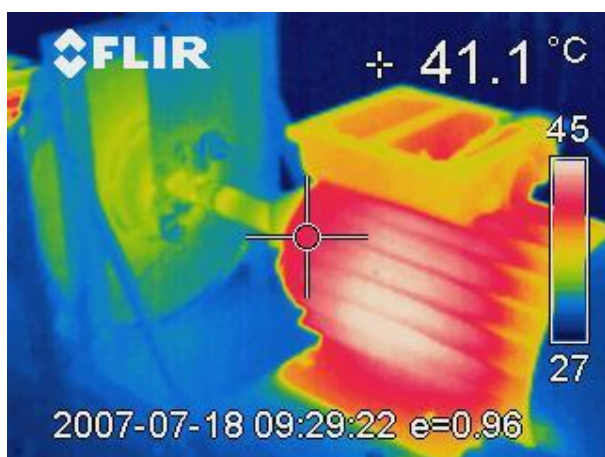
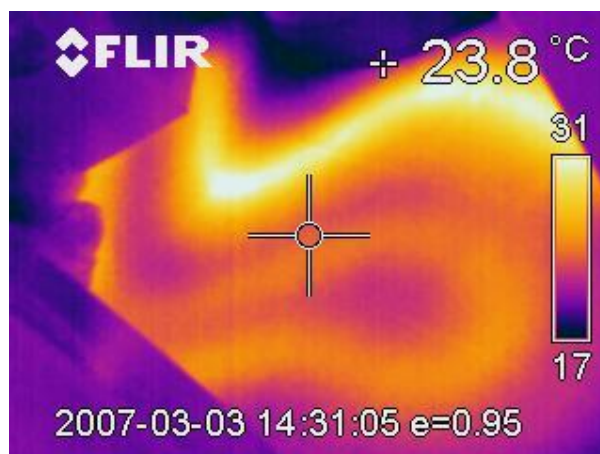
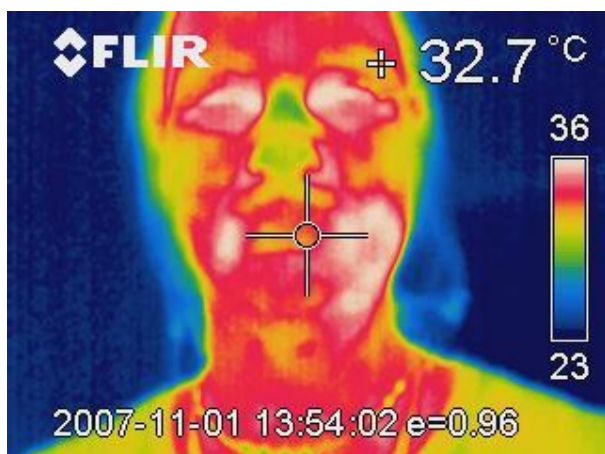
maximální naměřenou teplotu v horní části a střed naznačuje plošné měření, s určením maxima ve vyznačené oblasti.

Export dat a využití software

Kamera kontinuálně snímá měřený objekt, při vhodné kompozici je možné snímek uložit do vnitřní paměti. Snímač má rozlišení 160x120 bodů, obrazy se ukládají v interpolovaném rozlišení 320x240 ve formátu JPG.

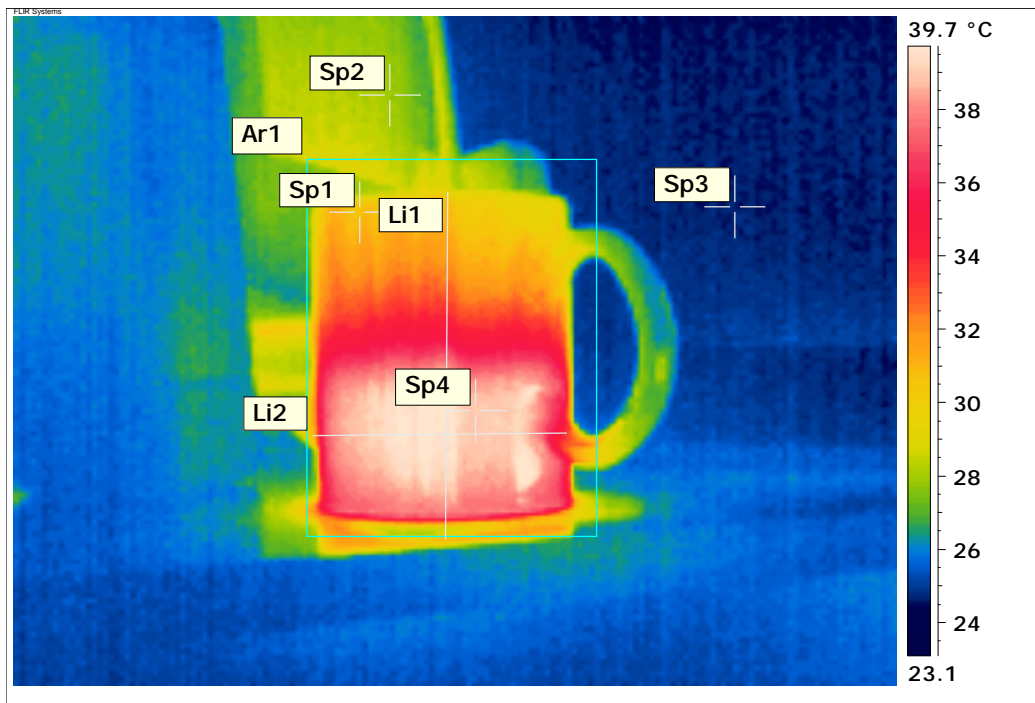
Příklady snímků

Možnost použití termodiagnostiky v praxi, následuje několik snímků z různých odvětví.

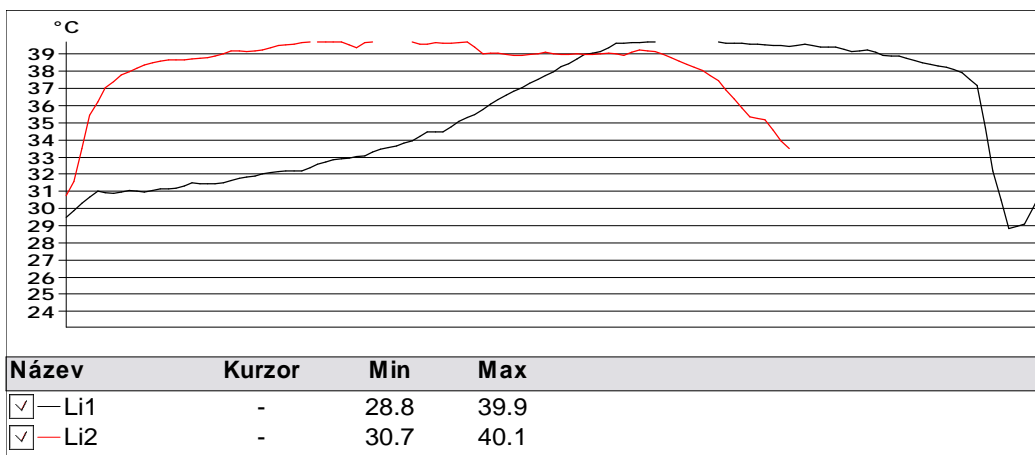


Všechny předchozí snímky byly pořízeny kamerou Flir E45 za různých podmínek, u většiny je měření teploty nastaveno bodově, jen poslední obrázek ukazuje plošné měření s určením maxima.

Rozložení teploty na keramickém hrnku naplněném tekutinou

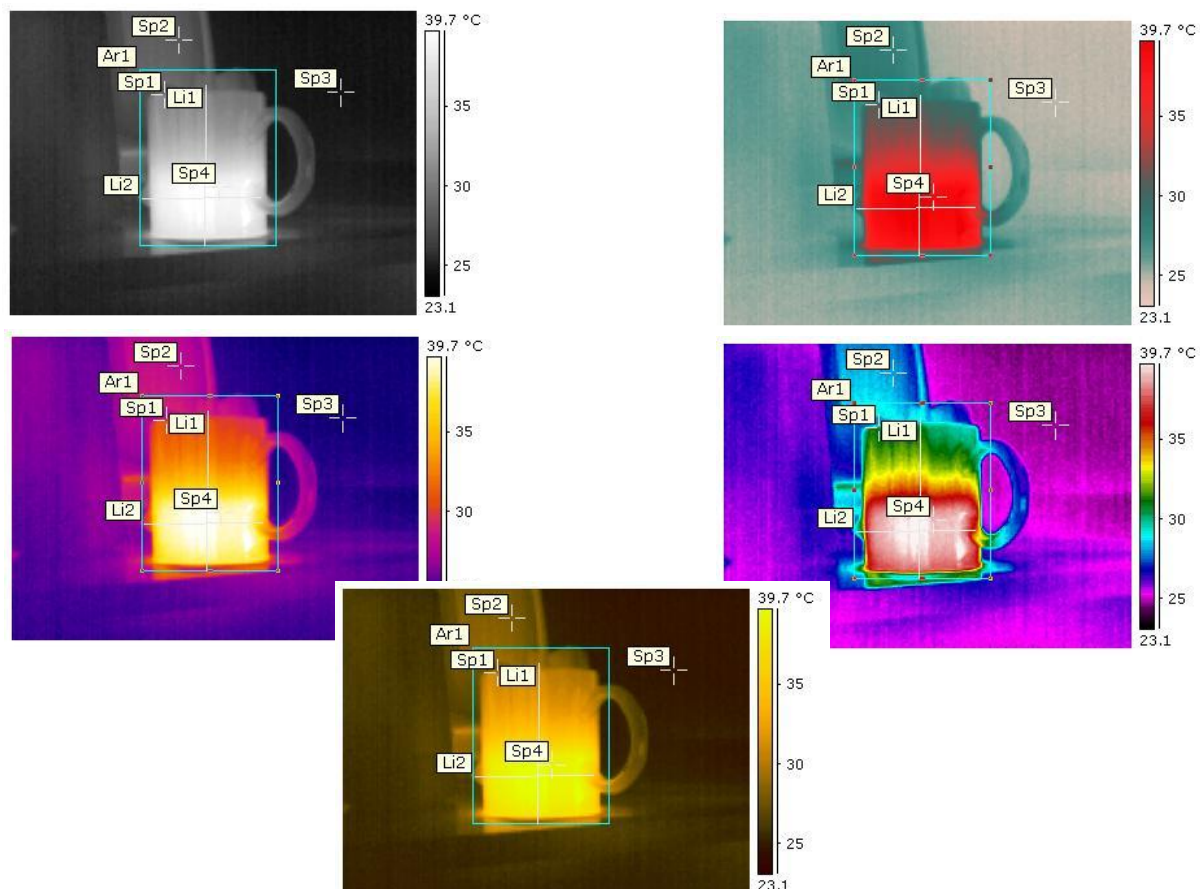


Průběh teploty na liniích Li1 a Li2



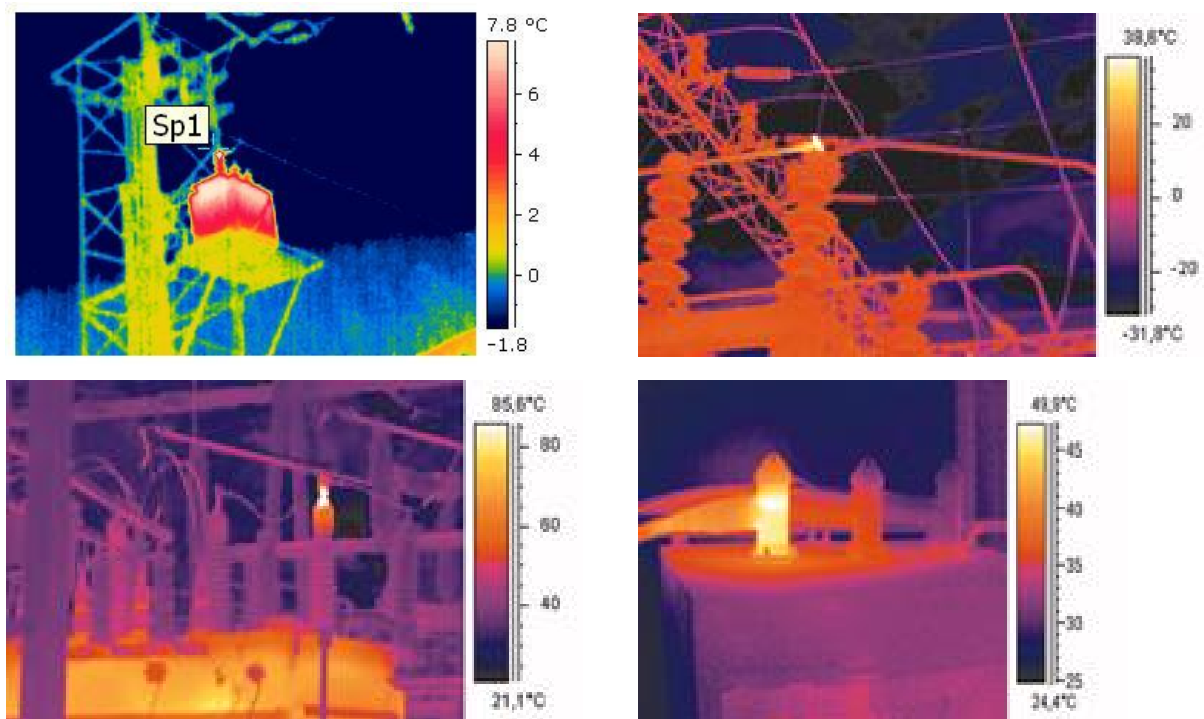
Parametry objektu		Hodnota		
Emisivita		0.95	Sp1	30.5 °C
Vzdálenost objektu		2.0 m	Sp2	27.8 °C
Odražená teplota		20.0 °C	Sp3	24.6 °C
Teplota atmosféry		20.0 °C	Sp4	39.0 °C
Propustnost atmosféry		0.99	Li1: Max	39.9 °C
Podrobnosti	Hodnota		Li2: Max	40.1 °C
			Ar1: Max	40.3 °C

Ukázka protokolů, který je vytvořen pomocí programu Thermal Reporter. Jsou vidět tepelné průběhy podél linií Li1 a Li2, které ukazují změnu teploty se změnou prostorové souřadnice.

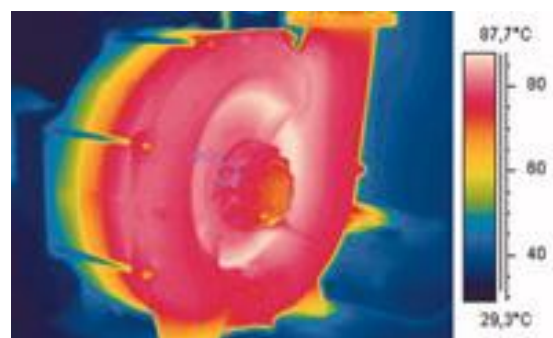
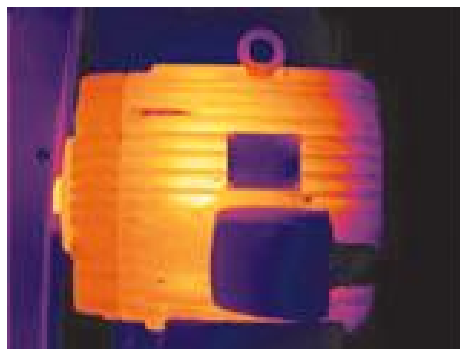
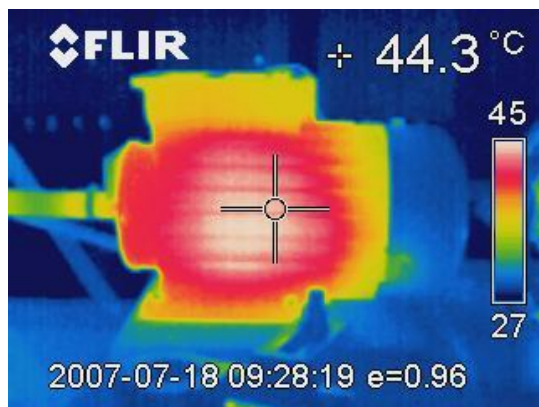


Možnosti barevného podání, které je přepínatelné. Je zde vidět přechody mezi dvěmi, třemi, pěti a osmi barvami.

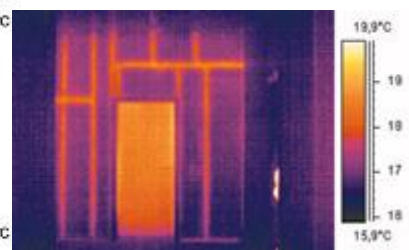
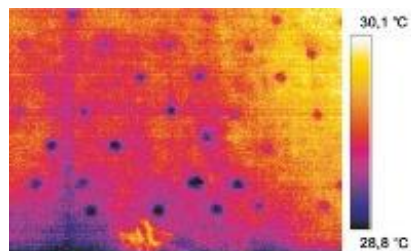
Energetika – poruchy na propojeních



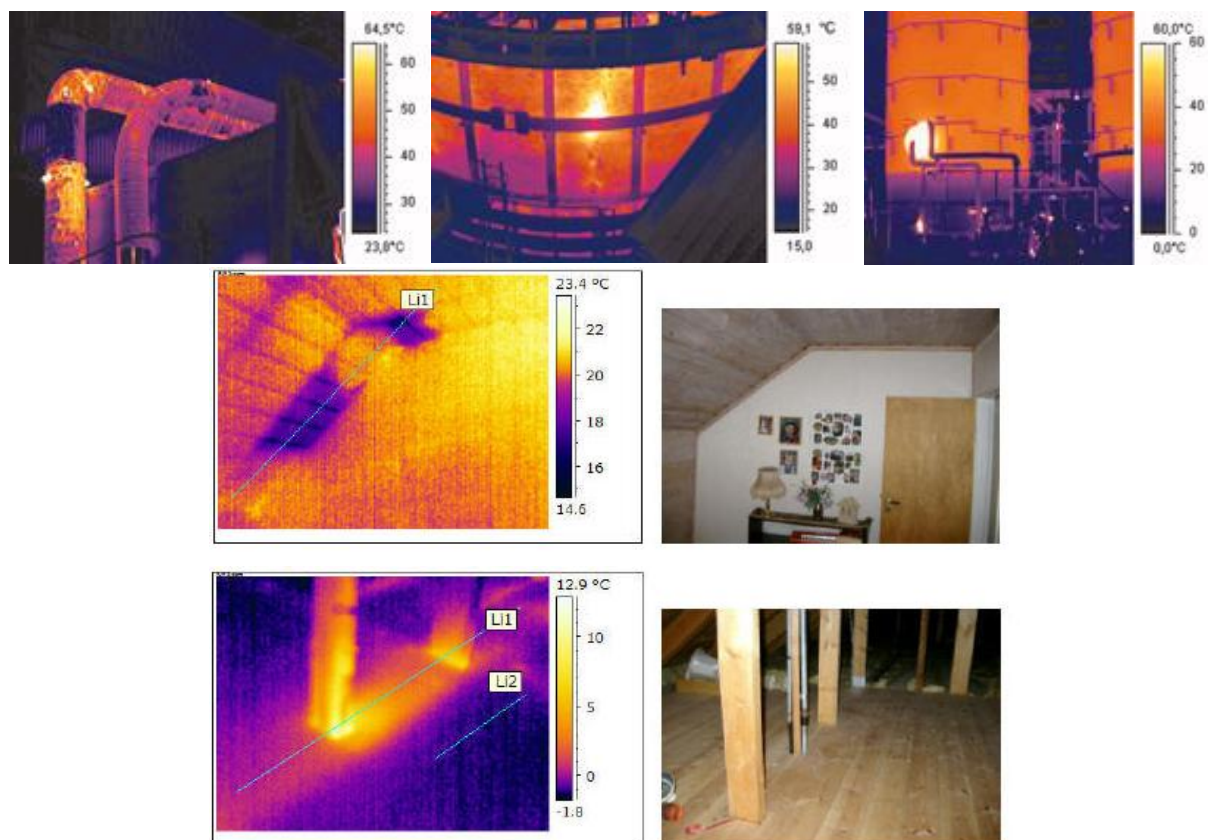
Točivé stroje – přehřátí



Stavebnictví



Technologie



Lékařství

