



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
ENERGY INSTITUTE

## TERMOVIZNÍ MĚŘENÍ

THERMAL MEASUREMENT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

MARTIN ZACHAR

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. PETR KRACÍK

BRNO 2014



Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2013/14

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Martin Zachar

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:

### **Termovizní měření**

v anglickém jazyce:

### **Thermal measurement**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Náplní práce je problematika měření termovizní kamerou.

Cíle bakalářské práce:

- popište po fyzikální a technické stránce měření termovizní kamerou
- porovnejte termovizní kamery, které jsou dnes nabízené na trhu
- popište základní metodiku zpracování termovizního měření



Seznam odborné literatury:

Mikaél Abramovich Bramson. Infrared radiation: a handbook for applications, with a collection of reference tables. Plenum Press, 1968. s. 623.

Absorption and Reflection of Infrared Radiation by Ultrathin Films. Handbook of Infrared Spectroscopy of Ultrathin Films [online]. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc, 2003-05-23, s. 1. ISBN 9780471234326.

firemní literatura

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Petr Kracík

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/14.

V Brně, dne 9.10.2013



doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.  
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.  
Děkan

## **Abstrakt**

Táto práca sa zaoberá teóriou termovízneho merania a to ako po stránke fyzikálnej tak aj technickej. Práca popisuje základnú metodiku termovízneho merania a ďalej porovnáva niekoľko rôznych termovíznych kamier na súčasnom trhu.

Hlavná časť práce je venovaná skriptu, vytvorenému v programe Matlab, slúžiacemu k rozboru série termovíznych snímok zachytávajúcich vertikálne uložené potrubia, následnému zápisu zistených teplôt do Excelu a vykresleniu grafov zmeny priemernej teploty pozdĺž potrubia a histogramov teplôt daných snímok.

## **Abstract**

This thesis deals with theory of thermal measurement with both physical as well as technical side. Thesis describes basic methodics of thermal measurement and further compares few different thermographic cameras at the current market.

Main part of the thesis is focusing on a script, that has been created in program Matlab, serving for analysis of a series of thermographic pictures capturing vertically placed pipes, following by registration of founded temperatures to Excel and drawing of diagrams of the change of average temperature along pipe and histograms of temperatures of given pictures.

## **Kľúčové slová**

termovízna kamera, termovízne meranie, infračervené žiarenie, termografia, emisivita, termogram

## **Keywords**

thermographic camera, thermal measurement, infrared radiation, thermography, emissivity, thermogram



### **Bibliografická citácia**

ZACHAR, M. Termovizní měření. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 42 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Petr Kracík.





### **Čestné prehlásenie**

Prehlasujem, že som bakalársku prácu na tému „Termovizní měření“ vypracoval samostatne pod vedením vedúceho práce a s použitím poznatkov získaných zo zdrojov uvedených na konci tejto práce.

V Brne dňa 24. 05. 2014

.....  
Podpis



## **Pod'akovanie**

Rád by som poďakoval vedúcemu mojej bakalárskej práce Ing. Petrovi Kracíkovi za cenné rady a pripomienky, ako aj za jeho ochotu. Ďalej by som sa chcel poďakovať svojim rodičom a svojej priateľke za podporu počas celého môjho štúdia.



## Obsah

<b>1 Úvod</b> .....	<b>14</b>
<b>2 História infračervenej techniky</b> .....	<b>15</b>
2.1 Objavenie infračerveného žiarenia .....	15
2.2 Vynájdenie termoelektrickej batérie a prvý termograf .....	16
2.3 Ďalší vývoj.....	17
<b>3 Teória termografie</b> .....	<b>18</b>
3.1 Elektromagnetické spektrum .....	18
3.2 Prenos tepla žiarením (radiáciou) .....	18
3.3 Žiarenie dokonale čierneho telesa .....	19
<b>4 Techniky merania teplôt</b> .....	<b>21</b>
4.1 Teoretické základy termovízneho merania .....	21
4.1.1 Planckov vyžarovací zákon .....	21
4.1.2 Wienov zákon.....	21
4.1.3 Kirchhoffové zákony.....	22
4.1.4 Stefanov - Boltzmannov zákon.....	22
4.2 Rozbor žiarenia pri meraní termovíznou kamerou.....	23
4.3 Rozdelenie termovíznych kamier .....	24
<b>5 Úvod do techniky merania teplôt</b> .....	<b>25</b>
5.1 Emisivita objektu .....	25
5.2 Teplota odrážaného žiarenia.....	25
5.3 Vzdialenosť.....	26
5.4 Relatívna vlhkosť .....	26
5.5 Ďalšie parametre.....	26
<b>6 Porovnanie termovíznych kamier na súčasnom trhu</b> .....	<b>27</b>
<b>7 Program určený na rozbor série termovíznych snímok, zachytávajúcí vodorovné potrubia</b> .....	<b>28</b>
7.1 Kód programu pre rozbor série termovíznych snímok .....	28
<b>8 Záver</b> .....	<b>36</b>
<b>9 Zoznam použitých zdrojov</b> .....	<b>37</b>
<b>10 Zoznam použitých obrázkov</b> .....	<b>39</b>
<b>11 Zoznam tabuliek</b> .....	<b>40</b>
<b>12 Zoznam použitých symbolov</b> .....	<b>41</b>
<b>13 Zoznam príloh</b> .....	<b>42</b>

# 1 ÚVOD

Termovízne meranie je moderná technológia, ktorá nám umožňuje pomocou infračerveného polovodičového detektora zabudovaného v termovíznej kamere bezdotykovo a nedeštruktívne merať povrchovú teplotu rôznych predmetov, elektroniky či úniky tepla zo stavieb a teda vyhľadávať potencionálne mechanické, elektrické či procesné problémy. Výsledkom termovízneho merania je grafický záznam, takzvaný termogram.

Jednou z veľkých výhod termovízneho merania je, že sa môže vykonávať na danom objekte počas jeho bežnej prevádzky, bez akéhokoľvek zásahu do jej behu.

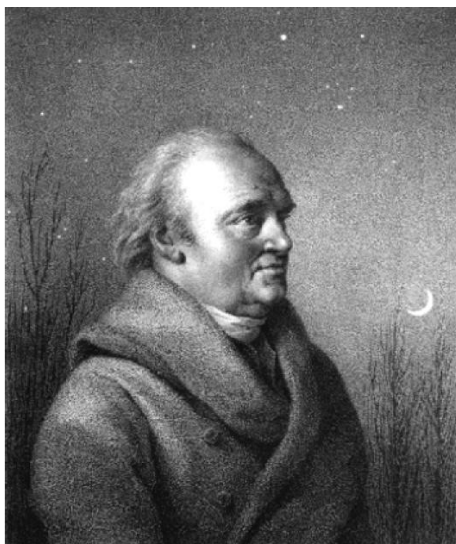
Termovízne meranie má veľmi široké použitie a to napríklad v elektroenergetike, stavebníctve, priemysle a teplárenstve.

Historické korene termovízneho merania siahajú až do obdobia po priemyselnej revolúcii, konkrétne do roku 1800, kedy anglický dvorný astronóm sir William Herschel objavil infračervené žiarenie.

## 2 História infračervenej techniky

### 2.1 Objavenie infračerveného žiarenia

Objavenie infračerveného svetla sa odohralo v roku 1800, kedy sa dvorný astronóm anglického kráľa Juraja III. sir Frederick William Herschel, známy napríklad objavením planéty Urán, pokúšal nájsť materiál pre optický filter, ktorým by pri pozorovaní slnka znížil jas obrazu v ďalekohľade. [1]



Obr. 1 Sir Frederick William Herschel (1738-1822) [1]

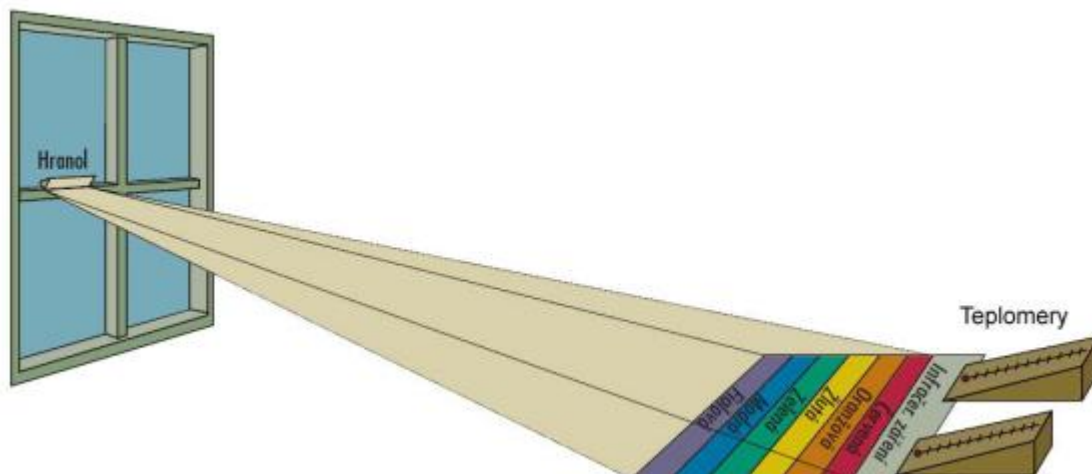
Pri testovaní rôznych vzoriek farebných skiel si všimol skutočnosti, že niektorými sklami prechádzalo iba málo slnečného tepla, no inými sklami ho prechádzalo také množstvo, že riskoval poškodenie svojich očí iba po chvíli pozorovania. To ho viedlo k tomu, aby začal experiment s cieľom nájsť taký materiál, ktorý by znižoval jas ako aj bol schopný, čo najviac obmedzovať prechádzajúce teplo. [1]

Jeho experiment bol v podstate rovnaký ako Newtonov experiment s hranolom s tým rozdielom, že sledoval tepelný efekt a nie rozloženie svetelnej intenzity v spektre. Najskôr atramentom začiernil banku s ortuťovým teplomerom. Týmto detektorom žiarenia testoval tepelné účinky rôznych farieb spektra vytvoreného pomocou skleneného hranolu, ktorým prechádzalo slnečné svetlo. Pre porovnanie používal iný teplomer umiestnený mimo priame slnečné žiarenie. [1]

Pri posúvaní začierneného teplomeru po jednotlivých farbách spektra ukazovali namerané teploty neustály rast, od fialového konca po koniec červený. Pri tomto pozorovaní Herschel rozpoznal, že musí existovať bod, v ktorom tepelný efekt dosiahne maximum, ale narazil na nečakaný jav, po opustení oblasti farebného spektra teplota stále rástla až do bodu, ktorý bol relatívne ďaleko od viditeľnej červenej časti. Dnes sa tejto oblasti hovorí "infračervené vlnové pásmo". [1]

Názory na pôvod novo objaveného spektra sa zo začiatku líšili. Trvalo to až pol storočia kým sa konečne názor na infračervené paprsky zjednotil v tom, že majú vlastne rovnaké vlastnosti ako svetelné, s tým rozdielom, že na ne nereaguje sieťnica oka. [1]

Herschel nazval túto časť pôvodne "termické spektrum". Termín "infračervený" sa začal vyskytovať v tlači až o zhruba 75 rokov neskôr a pôvodca je stále neznámy. [1]



Obr. 2 Znárodnenie Herschelovho pokusu [2]

Herschelovo pôvodné použitie skleneného hranolu viedlo k určitým pochybnostiam medzi jeho súčasníkmi o skutočnej existencii infračerveného svetla. Iní v snahe potvrdiť jeho pokus používali rôzne druhy skla bez rozlíšenia, vďaka čomu ale dosahovali rôzne priehľadnosti v infračervenom pásme. Vo svojich neskorších experimentoch si Herschel bol vedomý obmedzenej priepustnosti skla voči novo objavenému tepelnému žiareniu a bol nútený dôjsť k záveru, že iba výhradne odrážajúce prvky (rovné alebo zakrivené zrkadlá) budú môcť byť používané. [1]

Táto myšlienka bola vyvrátená už v roku 1830, talianskym badateľom Macedoniom Melloni, ktorý učinil prevratný objav, že v prírode sa hojne vyskytujúca kamenná soľ (NaCl) pozoruhodne prepúšťa infračervené žiarenie. Výsledkom teda bolo, že kamenná soľ sa stala hlavným optickým materiálom pre infračervené spektrum až do roku 1930, kedy bola zvládnutá metóda výroby syntetických kryštálov. [1]

## 2.2 Vynájdenie termoelektrickej batérie a prvý termograf

Teplomery sa ako detektory žiarenia používali až do roku 1829, kedy Leopoldo Nobili vynášiel prvý termočlánok. Neskôr Macedonio Melloni pripojil určitý počet termočlánkov a vytvoril tak prvú termoelektrickú batériu. Toto nové zariadenie bolo pre detekciu tepelného žiarenia približne 40x citlivejšie ako najlepší teplomer tej doby (bolo schopné detekovať teplo osoby vzdalenej až 3 metre). [1]

V roku 1840 bol vytvorený prvý tzv. "tepelný obraz", čo bol výsledok práce sira Johna Herschela, syna Williama Herschela, objaviteľa infračerveného žiarenia. Na základe diferenciálneho odparovania tenkej vrstvy oleja vystavenej tepelnému žiareniu, bolo možné uzrieť tepelný obraz vďaka odrazenému svetlu, pretože interferenčné účinky olejovej vrstvy zaistili, že obraz bol pre ľudské oko viditeľný. Sir John Herschel taktiež vytvoril jednoduchý záznam teplotného obrazu na papier, ktorý neskôr nazval "termograf". [1]



## 2.3 Další vývoj

Zlepšovanie detektoru infračerveného žiarenia pokračovalo pomaly. Prvý významný pokrok učinil Samuel Pierpont Langley v roku 1880, vynájdením bolometru (zariadenie na meranie toku žiarenia). Prvý bolometer bol dokonca schopný detekovať teplo kravy na 400 metrov. [1]

Prvé funkčné systémy v oblasti infračerveného žiarenia začali byť vyvíjané behom prvej svetovej vojny, kedy obe strany vykonávali výskumné programy zamerané na vojenské využitie tohto žiarenia. Tieto programy zahrňovali experimentálne systémy k detekcii prenikania nepriateľa, meranie tepla na diaľku, zabezpečenú komunikáciu a navádzanie torpéd. Jeden infračervený vyhľadávací systém bol schopný detekovať blížiac sa lietadlo na vzdialenosť 1,5 kilometra alebo osobu na vzdialenosť väčšiu než 300 metrov. [1]

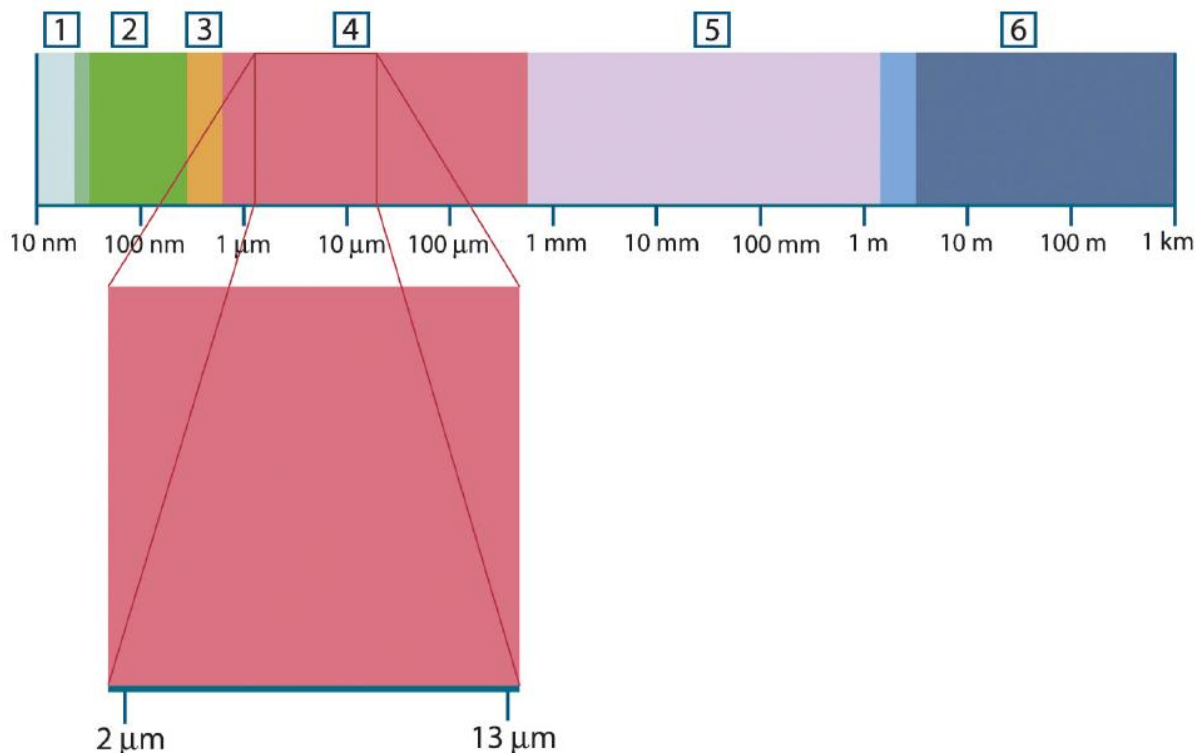
Až do tejto doby boli všetky systémy založené na obmenách bolometru, ale v medzivojnovom období boli vyvinuté dva nové a revolučné infračervené detektory: konvertor obrazu a fotónový detektor. O konvertor obrazu sa spočiatku najviac zaujímala armáda, pretože pozorovateľovi doslova dovoľoval "vidieť v tme". Avšak citlivosť konvertoru obrazu bola obmedzená na blízke infračervené vlnové dĺžky, a preto väčšina zaujímavých vojenských cieľov musela byť osvetľovaná infračervenými vyhľadávacími paprskami. Keďže tak vznikalo riziko, že poloha pozorovateľa bude prezradená podobne vybavenému pozorovateľovi nepriateľa, tak vojenský záujem o konvertor obrazu čoskoro zanikol.

Vojensko-taktické nevýhody takzvaných "aktívnych" (tj. vybavených vyhľadávajúcim paprskom) systémov teplotného obrazu boli po 2. svetovej vojne hybnou silou pre rozsiahle tajné vojenské programy k výskumu infračerveného spektra zamerané na vývoj "pasívnych" (bez vyhľadávacieho paprsku) s využitím extrémne citlivého fotónového detektoru. V tej dobe zakazovali vojenské bezpečnostné predpisy zverejňovanie informácií o infračervenej zobrazovacej technike. Odtajnenie bolo zrušené v polovici päťdesiatych rokov. Od tej doby sú postačujúce teplotné zobrazovacie zariadenia k dispozícii civilnému sektoru, vede a priemyslu. [1]

### 3 Teória termografie

#### 3.1 Elektromagnetické spektrum

Elektromagnetické spektrum je rozdelené na základe vlnových dĺžok do niekoľkých skupín (vlnových pásiem). Neexistuje však žiadny rozdiel medzi jednotlivými pásmami elektromagnetického spektra, pretože všetky podliehajú rovnakým fyzikálnym zákonom a líšia sa iba vlnovými dĺžkami. [2]



Obr. 3 Elektromagnetické spektrum. 1. röntgenové žiarenie, 2. ultrafialové žiarenie, 3. viditeľné žiarenie, 4. infračervené žiarenie, 5. mikrovlnné žiarenie, 6. rádiové žiarenie [2]

Termografia využíva pásmo infračerveného žiarenia o vlnočte ( $200-4000 \text{ cm}^{-1}$ ). [10] Jeho hranica začína tam, kde sa končí viditeľné pásmo (tmavá červená) a končí na mieste začiatku mikrovlnného pásma. Toto pásmo má podrobnejšie delenie na ďalšie štyri podpásma, ktoré majú umelo vytvorené hranice, sú to: [2]

- near infrared - blízke infračervené ( $0,75-3 \mu\text{m}$ )
- middle infrared - stredné infračervené ( $3-6 \mu\text{m}$ )
- far infrared - ďaleké infračervené ( $6-15 \mu\text{m}$ )
- extreme infrared - veľmi vzdialené infračervené ( $15-100 \mu\text{m}$ )

#### 3.2 Prenos tepla žiarením (radiáciou)

Žiarenie sa šíri v prostredí rýchlosťou svetla  $c$ , ktorá je závislá na prostredí. Rýchlosť šírenia svetla vo vákuu je:

$$c_0 = (2,997\,924\,58 \pm 0,000\,000\,012) \cdot 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1} \quad (4)$$

Tepelné žiarenie je energia emitovaná hmotou, ktorá má nenulovú teplotu. Energia radiačného poľa je prenášaná elektromagnetickými vlnami (poprípade fotónmi). Zatiaľ čo prenos tepla vedením (kondukciou) alebo konvekciou vyžaduje materiálnu prítomnosť média, pri žiarení je nepotrebná. [11]

Dokonca je prenos žiarením najúčinnjší vo vákuu a to z dôvodu neprítomnosti častíc, ktoré by mohli žiarenie zachytávať, a teda sa od pozorovaného objektu dostane do objektívu termovíznej kamery 100% vyžarovaného tepelného žiarenia z objektu daným smerom .

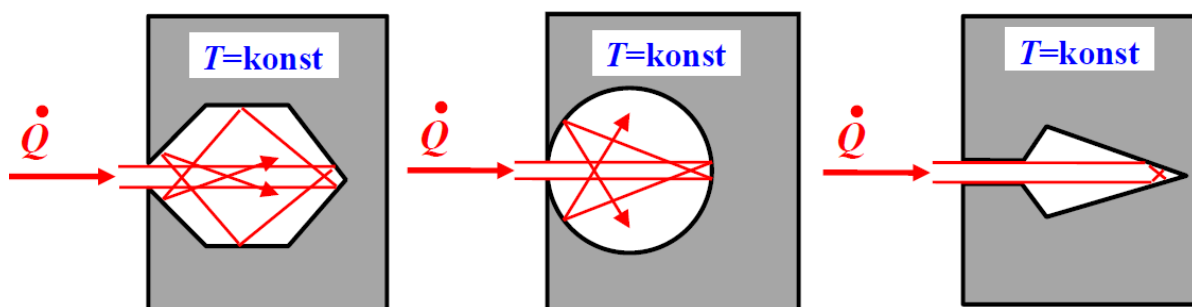
### 3.3 Žiarenie dokonale čierneho telesa

Dokonale čierne teleso je hypotetické teleso, definované ako objekt, ktorý pohlcuje všetko elektromagnetické žiarenie, ktoré naň dopadá a to bez ohľadu na vlnovú dĺžku žiarenia. [1]



Obr. 4 Gustav Robert Kirchhoff (1824 - 1887) [1]

Dokonale čierne teleso môžeme charakterizovať pomocou vyžarovacích charakteristík otvoru vytvoreného v izotermnej dutine nepriehľadného absorbujúceho materiálu. V praxi je možné tento princíp uplatniť pri konštrukcii dokonalého pohlcovača žiarenia, čo môže byť svetlotesná bedňa, ktorá má na jednej strane malú štrbinu. Všetko žiarenie, ktoré vstúpi týmto otvorom, sa rozptýli a opakovanými odrazmi pohltí, takže môže uniknúť iba veľmi povedzme, že nekonečne malá časť žiarenia. Čiernosť dosiahnutá takýmto otvorom je takmer zhodná s vlastnosťami čierneho telesa a vyhovuje pre všetky vlnové dĺžky. [1]



Obr. 5 Možnosti realizácie dokonale čierneho telesa [4]  
pozn.pri privádzaní tepla do telesa a udržiavaní konštantnej teploty, musí stúpať tlak

Keď túto izotermickú dutinu vybavíme vhodným zdrojom tepla, tak sa z nej stane takzvaný dutinový žiarič. Izotermná dutina zahriata na konštantnú teplotu vytvára žiarenie čierneho telesa, pričom charakteristika takéhoto žiarenia je určená iba teplotou dutiny.

Takéto dutinové žiariče sa veľmi často využívajú ako zdroje žiarenia pre krabice prístrojov vyhodnocujúcich infračervené žiarenie.[1]

Ak prekročí teplota v telese  $525\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $798,15\text{ K}$ ), zdroj začína byť viditeľný, pretože pre ľudské oko sa už nejaví ako čierny. Je to počiatočný stav takzvanej červenej sálavej teploty žiariča, ktorá potom pri zvyšovaní teploty prechádza do farby oranžovej až žltej. Definícia takzvanej teploty farby vyjadruje, že je to taká teplota, na ktorú by muselo byť zahriaté čierne teleso, aby malo rovnakú farbu ako objekt. [1]

## 4 Techniky merania teplôt

### 4.1 Teoretické základy termovízneho merania

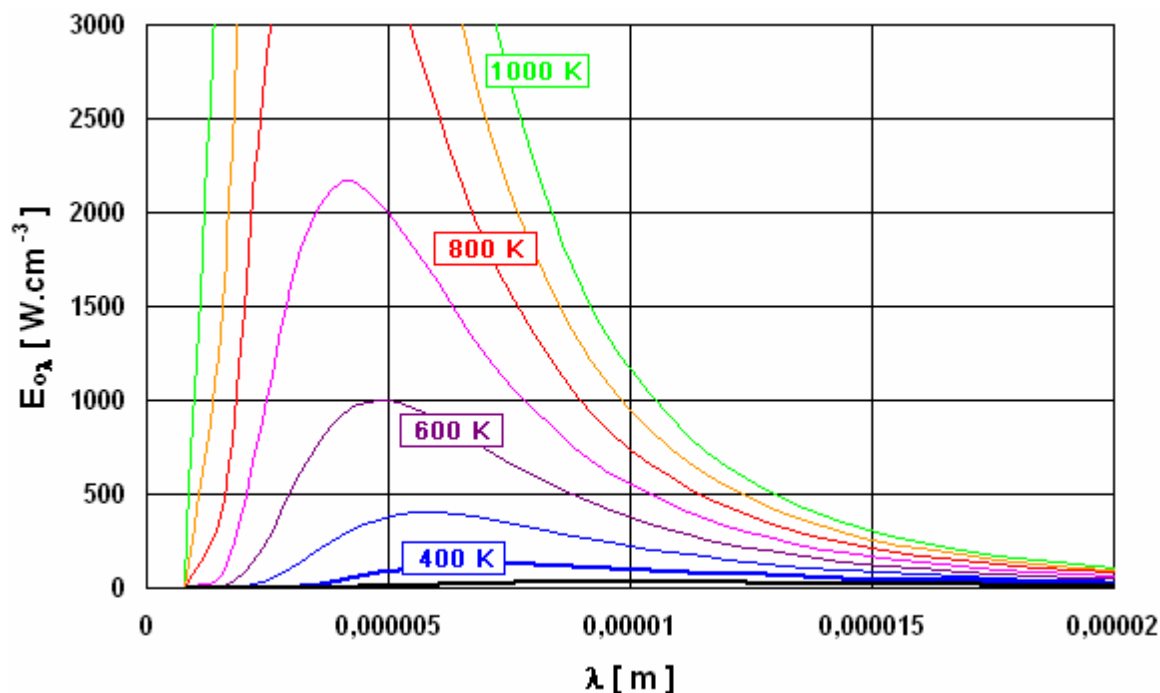
Termovízne merania vyžadujú znalosť fyzikálnych základov tejto meracej metódy, aby sme si mohli vhodne usporiadať merania a získali tak kvalitné záznamy pre kvantitatívne vyhodnotenia. [6]

#### 4.1.1 Planckov vyžarovací zákon

Planckov vyžarovací zákon sa dá vyjadriť buďto graficky (Obr.11) alebo aj matematicky vzťahom:

$$E_{0\lambda} = \frac{c_1 \cdot \lambda^{-5}}{e^{\left(\frac{c_2}{\lambda \cdot T}\right) - 1}} \quad (2)$$

kde  $E_{0\lambda}$  [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$ ] je spektrálna hustota žiarivého toku čiernych objektov do polopriestoru,  $T$  [K] je teplota objektu,  $\lambda$  [m] je vlnová dĺžka žiarenia a konštanty  $c_1$  a  $c_2$  majú hodnoty  $c_1=3,74 \cdot 10^{-16} \text{ W}\cdot\text{m}^2$  a  $c_2=1,44 \cdot 10^{-2} \text{ K}\cdot\text{m}$ . [6]



Obr.6 Planckov vyžarovací zákon [6]

#### 4.1.2 Wienov zákon

Wienov posunovací zákon hovorí, že s rastúcou teplotou žiaríča sa posúva maximálna hodnota spektrálnej hustoty žiarivého toku  $E_{0\lambda}$  ku kratším vlnovým dĺžkam. Matematicky popis je rovnicou: [6]

$$\lambda_{max} \cdot T = 2.8978 \cdot 10^{-3} \text{ m}\cdot\text{K} \quad (3)$$

### 4.1.3 Kirchhoffové zákony

Prvý Kirchhoffov zákon sa zaoberá interakciou žiarenia s objektom a hovorí, že súčet reflektancie  $r$ , absorptancie  $a$  a transmitancie  $t$  je vždy rovný jednej. [6]

$$r + a + t = 1 \quad (4)$$

Druhý Kirchhoffov zákon konštatuje, že objekt je tak dokonalým žiaričom, ako dokáže žiarenie pohlcovať ( $\varepsilon$  - žiarivosť) [6]

$$\varepsilon = a \quad (5)$$

Pri interakcii žiarenia s povrchom je potrebné taktiež uvážiť kvalitu povrchu, ktorá má vplyv na šírenie žiarenia po odraze. Z tohto pohľadu rozlišujeme dva typy povrchov, zrkadlový povrch, kedy uhol dopadu sa rovná uhlu odrazu a difúzny povrch, ktorý dopadajúce žiarenie odráža rovnomerne do všetkých smerov. [6]

### 4.1.4 Stefanov - Boltzmannov zákon

Tento zákon môžeme získať integráciou spektrálnej hustoty žiarivého toku čierneho objektu  $E_{0\lambda}$ , a to cez celý rozsah vlnových dĺžok  $\lambda$  (od 0 do  $\infty$ ) a za konštantnej teploty. Výsledkom je hustota žiarivého toku  $E_0$  [ $W \cdot m^{-2}$ ], pre ktorú platí: [6]

$$E_0 = \sigma_0 \cdot T^4 \quad (6)$$

kde je  $\sigma_0$  Stefan - Boltzmannova konštanta, ktorá nesie hodnotu  $5,6697 \cdot 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$

Pokiaľ sa premení žiarivý tok pri dopade na objekt na tepelný tok, môžeme Stefanov - Boltzmannov zákon pre dokonalý žiarič písať vo tvare: [4]

$$\dot{q}_0 = \sigma_0 \cdot T^4 \quad (7)$$

kde  $\dot{q}_0$  je hustota žiarivého toku.

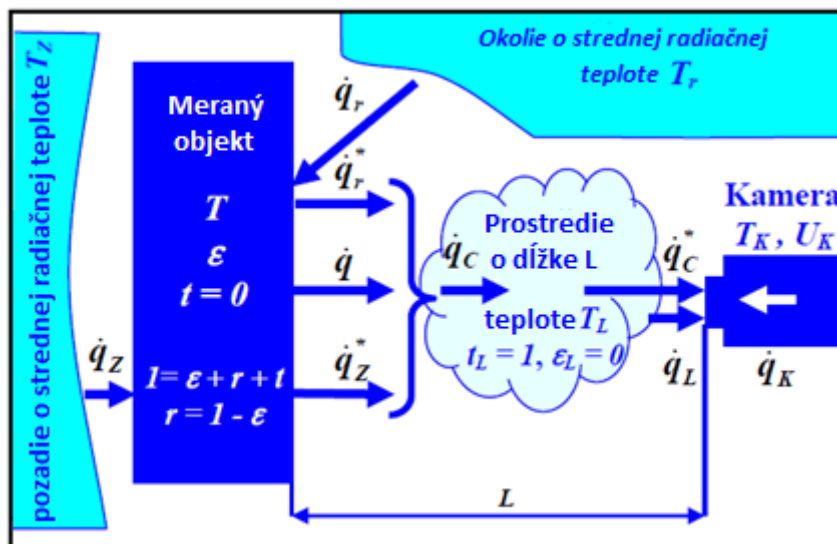
Pre nedokonalé (reálne) teleso musíme danú rovnicu rozšíriť o emisivitu, z čoho vyplýva, že ich tepelný tok žiarením bude menší než u dokonalého žiariča. [4]

$$\dot{q}_0 = \varepsilon \cdot \sigma_0 \cdot T^4 \quad (8)$$

Na základe tohto vzorca termovízne kamery prepočítavajú zachytenú radiáciu tepla na teplotu objektu. Je možné ho tiež využiť na spätný prepočet a z teploty vypočítať tepelný tok.

## 4.2 Rozbor žiarenia pri meraní termovíznou kamerou

Pri termovíznom meraní dochádza k vzájomnému prenosu a ovplyvňovaniu žiarivých tokov nielen medzi kamerou a meraným objektom, ale vždy je treba brať do úvahy aj vplyv žiarenia okolitého prostredia. Ak je transmitancia meraného objektu nenulová, musíme navyiac uvažovať aj vplyv žiarenia v pozadí a ak je emisivita medzi kamerou a objektom nenulová je potrebné uvažovať vplyv žiarenia o dĺžke  $L$  [m]. [6]



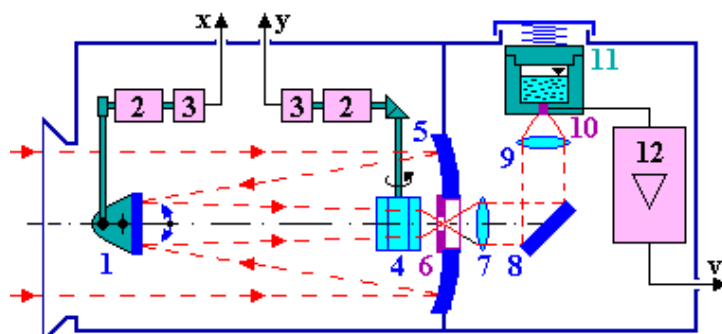
Obr.7 Usporiadanie objektov pri termovíznom meraní [6]

- $\dot{q}$  – vlastná hustota tepelného toku
- $\dot{q}_r$  – vlastná hustota tepelného toku žiarenia okolia
- $\dot{q}_r^*$  – hustota tepelného toku žiarenia z okolia odrážaná od meraného objektu
- $\dot{q}_z$  – vlastná hustota tepelného toku žiarenia z pozadia
- $\dot{q}_z^*$  – hustota tepelného toku žiarením prešlá meraným objektom
- $\dot{q}_L$  – vlastná hustota tepelného toku žiarením prostredia
- $\dot{q}_K$  – vlastná hustota tepelného toku detektoru kamery
- $\dot{q}_C$  – hustota tepelných tokov všetkých objektov pred kamerou

### 4.3 Rozdelenie termovíznych kamier

Termovízne kamery sa dajú deliť podľa rôznych kritérií. Podľa spôsobu zobrazovania ich delíme na: skenery (kamery s rozkladom obrazu), kamery s maticovými detektormi (bez rozkladu obrazu). Podľa spôsobu chladenia: kamery s chladeným detektorom a kamery bez chladeného detektoru. Podľa iných kritérií ich môžeme rozdeliť na krátko vlnové a dlho vlnové, rýchle (záznam videosekvencií) a pomalé, kompaktné a viac komponentové atď. [6]

- 1 rozmietaacie zrkadlo,
- 2 motorky,
- 3 fotoelektrické vysielače polohy  $x$ - $y$
- 4 kremenný osemboký hranol,
- 5 duté zrkadlo,
- 6 clona,
- 7, 8, 9 optická sústava,
- 10 kvantový detektor,
- 11 kvapalný dusík,
- 12 predzosilovač s videovýstupom  $v$



Obr. 8 Schéma termovíznej kamery s rozkladom obrazu a chladeným detektorom [6]

Pri výbere termovíznej kamery je potrebné brať do úvahy podľa oblasti použitia rôzne parametre: spektrálnu citlivosť, rozsah teplôt rozlíšenie a iné. Je potrebné uvážiť či bude kamera pri používaní na jednom stálom mieste alebo bude mobilná, či bude ovládaná na diaľku pomocou počítača alebo priamo pomocou ovládacích prvkov kamery. [6]



## 5 Úvod do techniky merania teplôt

Radiácia meraná kamerou nezávisí len na teplote objektu, ale tiež aj na emisivite. Žiarenie taktiež vzniká aj v okolitom prostredí a odráža sa od objektu. Žiarenie objektu a odrážané žiarenie sú taktiež pohlcované pri prechode atmosférou. K presnému meraniu teplôt je preto nutné kompenzovať účinky rôznych zdrojov radiácie. Práve termovízna kamera to dokáže urobiť automaticky za chodu. Do kamery je ale však nutné zadať nasledujúce parametre objektu: 1. emisivita objektu, 2. teplota odrážaného žiarenia, 3. vzdialenosť medzi objektom a kamerou, 4. relatívna vlhkosť, 5. teplota atmosféry. [1]

### 5.1 Emisivita objektu

Najdôležitejší parameter objektu, ktorý musí byť správne určený je emisivita. Emisivita objektu je pomer množstva žiarenia emitovaného objektom a žiarenie dokonale čierneho telesa rovnakej teploty. [1]

Emisivita resp. koeficient bežných materiálov a ich upravených povrchov je zhruba v rozsahu od 0,1 do 1 (dokonale matný materiál).

Emisivita závisí od nasledujúcich parametrov:

#### a) Materiál

Hlavným parametrom materiálu je jeho samotný druh. Najjednoduchšie rozdelenie materiálov je na kovy a nekovy. Väčšina nekovových materiálov meraných pomocou termografie v praktických aplikáciách ako pokožka, papier, nátery, sklo atď. sú takzvané šedé telesá s vysokou hodnotou emisivity nad 0,8 (pokožka od 0,97 do 0,98). Na rozdiel od toho kovy a obzvlášť leštené povrchy spôsobujú problémy pri meraní, pretože majú nízku hodnotu emisivity, ktorá sa zvyšuje iba s teplotou. [5] Jednoducho povedané čím je materiál „zrkadlovejší“ tým je jeho emisivita nižšia.

#### b) Kvalita povrchu

Pre ktorýkoľvek materiál sa môže emisivita meniť podľa štruktúry jeho povrchu. To vedie ku skutočnosti, že rovnaký materiál môže mať rôzne hodnoty emisivity. Tento efekt je najvýraznejší práve u kovových materiálov, pretože u leštených kovových materiálov môže byť hodnota emisivity nižšia ako 0,02 a naopak u drsných povrchov môže byť až nad 0,8. Najvyššie hodnoty emisivity kovové prvky získavajú napríklad vďaka dlhodobej oxidácii. Silne oxidovaná meď môže dosahovať hodnoty emisivity až 0,78. [5]

#### c) Pozorovací uhol

Spektrálna emisivita závisí od vlnovej dĺžky a od uhla vyžarovania. Vyžarovanie povrchu pri infračervenom meraní v kolmom smere k povrchu ( $0^\circ$ ) emituje viac žiarenia ako pod akýmkoľvek iným uhlom. Pri pozorovacom uhle do  $45^\circ$  až  $60^\circ$  je zmena emisivity u nekovov zanedbateľná, ale nad  $60^\circ$  už veľmi rýchlo klesá k veľmi nízkym hodnotám. Opačne je to u kovových materiálov, hodnota emisivity pri pozorovacom uhle nad  $60^\circ$  mierne stúpa, ale pri uhle nad  $80^\circ$  tiež klesá k nízkym hodnotám. [5]

### 5.2 Teplota odrážaného žiarenia

Tento parameter sa používa ku kompenzácii žiarenia odrážaného objektom. Ak je emisivita nízka a teplota objektu relatívne dosť iná než teplota odrážaná, bude dôležité správne nastaviť a kompenzovať teplotu odrážaného žiarenia. [1]

### 5.3 Vzdialenosť

Vzdialenosťou sa rozumie, vzdialenosť medzi objektom a objektívom kamery. Tento parameter sa používa ku kompenzácii žiarenia cieľového objektu, ktoré je absorbované atmosférou medzi objektom a kamerou a žiarenia atmosféry detekované kamerou. [1]

### 5.4 Relatívna vlhkosť

Kamera môže taktiež kompenzovať skutočnosť, že priepustnosť atmosféry závisí na jej relatívnej vlhkosti. Preto je nutné zadať hodnotu parametru relatívnej vlhkosti. Pre malé vzdialenosti môže byť jej hodnota ponechaná na obvykle predvolených 50%. [1]

### 5.5 Ďalšie parametre

Ďalšie parametre, ktoré sa dajú na niektorých kamerách kompenzovať sú atmosférická teplota (teplota atmosféry medzi kamerou a objektom), teplota externej optiky (teplota externých šošoviek použitých pred kamerou), transmitancia externej optiky (priepustnosť externých šošoviek použitých pred kamerou). [1]

## 6 Porovnanie termovíznych kamier na súčasnom trhu

Nasledujúca tabuľka nám ukazuje porovnanie niektorých termovíznych kamier značiek Flir, Testo a Infrared Cameras Inc. na súčasnom trhu:

Tab 1. Porovnanie termovíznych kamier FLIR, Testo a ICI (ceny sú k 26.2.2014)

Kamera	Cena	Rozlíšenie detektoru	Teplotný rozsah	Citlivosť	Priblíženie
FLIR E40 [8]	4 017 € [9]	160x120	-20 až +120 °C / 0 až +650 °C	< 0,07 °C	1-2x
FLIR E8 [7]	5 703 € [9]	320x240	-20 až +250 °C	< 0,06 °C	nie
Testo 870-2 [16]	3034,70 €	160x120	-20 až +280 °C	< 0,1 °C	-
Testo 875-2i [17]	4617,40 €	160x120	-20 až +100 °C / 0 až +350 °C	< 0,05 °C	-
ICI 320X Core [22]	2 700 € [21]	320x240	do +500 °C	< 0,065 °C	2x, 4x
ICI Centurion [23]	4 242 € [21]	320x240	do +500 °C	< 0,065 °C	2x, 4x
FLIR E50 [8]	6 594,00 € [15]	240x180	-20 až +120 °C / 0 až +650 °C	< 0,05 °C	1-4x
FLIR E60 [8]	8 994,00 € [9]	320x240	-20 až +120 °C / 0 až +650 °C	< 0,05 °C	1-4x
FLIR T420 [12]	\$8,495.00 [9]	320x240	-20 až +650 °C	< 0,045 °C	1-4x
Testo 882 [18]	6597,40 €	320x240	-20 až +100 °C / 0 až +350 °C	< 0,06 °C	-
Testo 885-2 [19]	9897,40 €	320x240	-20 až +100 °C / 0 až +350 °C	< 0,06 °C	-
ICI FX 160 [24]	5 395 € [21]	160x120	do +500 °C	< 0,1 °C	-
FLIR T600 [13]	\$15,950.00 [9]	480x360	-40 až +650 °C	< 0,04 °C	1-4x
FLIR T620 [14]	\$20,450.00 [9]	640x480	-40 až +650 °C	< 0,04 °C	1-4x
FLIR T640 [14]	\$25,950.00 [9]	640x480	-40 až +2000 °C	< 0,035 °C	1-8x
Testo 890-2 [20]	17157.40 €	640x480	-20 až +100 °C / 0 až +350 °C	< 0,04 °C	-
ICI IR Monitor [25]	11 566 € [21]	320x240	-40 až +120 °C / 0 až +500 °C	< 0,08 °C	-

Na základe Tab.1 je možné posúdiť niekoľko typov termovíznych kamier a môžeme ich medzi sebou porovnať vzhľadom na základné vlastnosti. Rozdiely medzi jednotlivými typmi kamier sú najmä v rozlíšení kamier a ich tepelnej citlivosti. Je možné si všimnúť, že zlepšovaním najmä týchto vlastností cena stúpa, ale aj možnosťou priblíženia a teplotným rozsahom. Je možné si tiež všimnúť, že citlivosť kamery má na jej cenu iba minimálny dopad.

## 7 Program určený na rozbor série termovízných snímků, zachytávající vodorovné potrubia

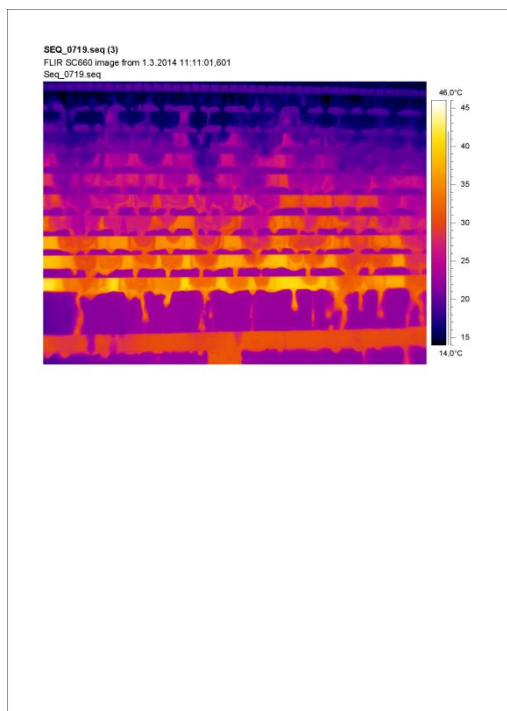
Následující kód programu, napsaného v softvéru Matlab slouží na rozbor série niekoľkých termovízných snímků. Program funguje nasledujúcim spôsobom:

1. program načítá obrázok, ktorý je uložený vo formáte stránky A4 a teda pripravený pre prípadnú tlač, ktorý následne oreže tak aby na ňom zostala iba snímka
2. program prevedie snímku do odtieňov šedej pre ďalšiu prácu
3. program na základe zadanej maximálnej a minimálnej teploty prepočíta každý pixel na danú teplotu
4. program zapíše teploty každého pixelu do Excelovského súboru, pre prípadnú ďalšiu prácu
5. program si vytvorí pozdĺžny výsek zo snímky na základe zadaných údajov
6. program vypočíta graf zmeny priemernej pozdĺžnej teploty a histogram teplôt z daného výseku
7. program zopakuje posledné dva body pre ďalšie výseky
8. program zopakuje všetky predchádzajúce body pre všetky ďalšie snímky určené na rozbor
9. program vykreslí dané výseky aj s grafmi a histogrammi pre každú snímku a v novom okne vykreslí poslednú snímku aj s výraznenými výsekmi

V nasledujúcej podkapitole je vysvetlené fungovanie každého príkazu jednotlivo.

### 7.1 Kód programu pre rozbor série termovízných snímků

V nasledujúcej časti bude ukázaný konkrétny kód programu (písaný tučne) aj s jednotlivými vysvetleniami príkazov (písané kurzívou), ukážeme si vstupy a následne výstupy programu.



Obr. 9 Počiatočná snímka ešte pred orezaním

**pocet\_snimok=3;**

*Uživatel si zadá počet snímků, na kterých chce vykonat rozbor*

**mint=14;**

*Uživatel zadá minimální teplotu na snímkoch*

**maxt=46;**

*Uživatel zadá maximální teplotu na snímkoch*

**m=0;**

*Premenná důležitá pro stanovení jednotlivých subplotů*

**n=1;**

*Premenná, která nám posílá Listy v Excelových souborech*

**o=1;**

*Premenná, která slouží na změnu názvu jednotlivých výseků*

**filename = 'teploty\_zo\_serie\_snimok\_cele\_snimky.xlsx';**

*Vytvoření souboru pro zápis teplot nacházejících se na snímkoch do Excelu*

**filename = 'teploty\_zo\_serie\_snimok\_1.xlsx';**

*Vytvoření souboru pro zápis pozdĺžnej zmeny priemerných teplot nachádzajúcich sa v prvom výseku do Excelu*

**filename = 'teploty\_zo\_serie\_snimok\_2.xlsx';**

*Vytvoření souboru pro zápis pozdĺžnej zmeny priemerných teplot nachádzajúcich sa v druhom výseku do Excelu*

Pokiaľ bude užívateľ pridávať ďalší výsek treba pridať rovnakým spôsobom vytvorenie ďalšieho Excelu

**for ii = 1:pocet\_snimok**

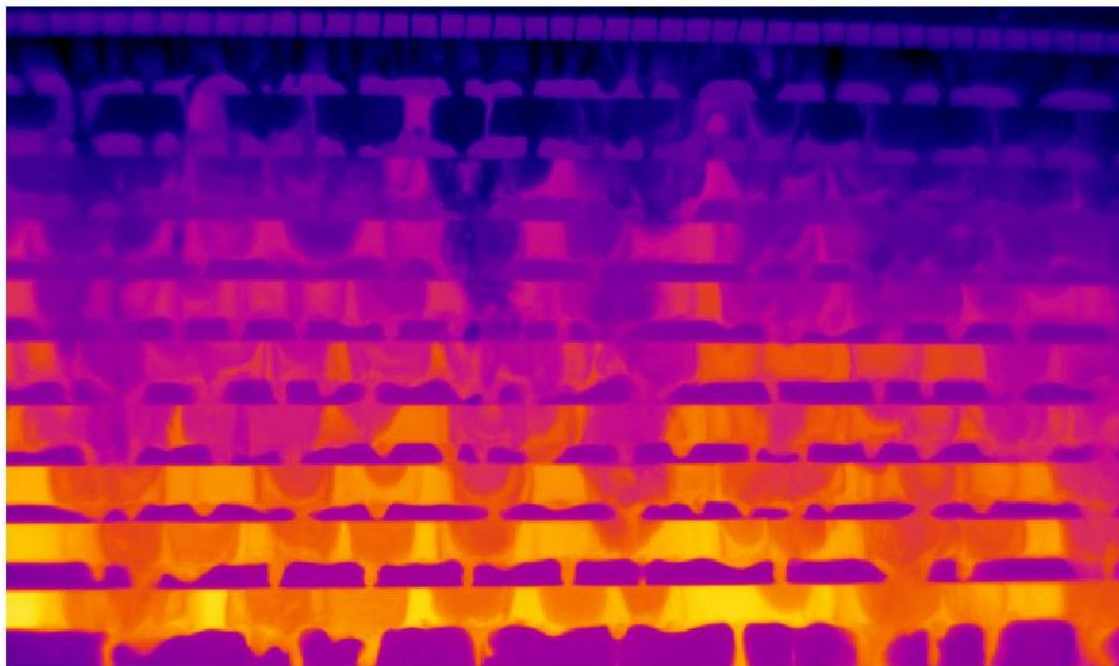
*Začiatok cyklu spracovávania snímků*

**img = imread(sprintf('názov\_snímky%03.0f.bmp',ii));**

*Načítá obrázok, kde za "názov\_snímky" si užívateľ dosadí názov daných snímků a časť %03.0f slúži na určenie poradia snímků*

**img=img([180:730],[89:1020],:);**

*Orezanie obrázku tak aby tam ostala iba termovízna snímka*



Obr. 10 Snímka po orezaní pripravená na rozbor

**J = rgb2gray(img);**

*Farebná snímka sa prekonvertuje na snímku v odtieňoch šedej*

**J=double(J);**

*Prevedie maticu z formátu uint8 na formát double, čím dosiahneme nezaokrúhlenie hodnôt pri prepočte na teploty*

**J=J(:,:,1);**

*Prevedie maticu J na 2-rozmernú*

**q=255/(maxt-mint);**

*Vytvorí súčiniteľ potrebný na výpočet teplôt*

**A=(J./q)+mint;**

*Vytvorí sa matica s teplotami na snímke*

**xlswrite('teploty\_zo\_serie\_snimok\_celej\_snimky.xlsx',A,n);**

*Uloží teploty z matice A do Excelovského súboru*

**B=img;**

*Vytvorí identickú maticu k matici img pre neskoršie vykresľovanie snímok a ich častí*

**A=round(A);**

*Zaokrúhľia sa hodnoty v matici A pre výber četností*

**vyska=size(A,1);**

*Vypočíta počet riadkov matice A*

**prva\_suradnica\_v\_precentach=10;**

*Užívateľ si zadá percentuálny začiatok výseku*

**druha\_suradnica\_v\_precentach=20;**

*Uživatel si zadá percentuální koniec výseku*

**prvsur=vyska\*(prva\_suradnica\_v\_precentach/100);**

**drusur=vyska\*(druha\_suradnica\_v\_precentach/100);**

*Prepočítajú sa percentuálne súradnice na súradnice na snímke*

**prvsur=round(prvsur);**

**drusur=round(drusur);**

*Zaokrúhľia sa hodnoty pre vyťahnutie konkrétnych riadkov z matice A*

**C=A([prvsur:drusur],:);**

*Vytvorí sa nová matica, ktorá bude obsahovať už len daný výsek*

**D=B([prvsur:drusur],:,:);**

*Vytvorí sa nová matica, ktorá bude obsahovať už len daný výsek, matica bude stále trojrozmerná, pretože bude slúžiť na vykreslenie výseku*

**E=unique(C);**

*Vytvorí sa nová matica, ktorá bude obsahovať jednotlivé hodnoty nachádzajúce sa v matici C*

**F=histc(C(:),E);**

*Vytvorí sa nová matica, ktorá bude obsahovať jednotlivé četnosti hodnôt nachádzajúcich sa v matici C*

**S=sum(F);**

*Vytvorí celkový počet četností z matice F pre prevod na percentá*

**F=(F./S)\*100;**

*Zmení četnosti tak aby súčet dával 100, môžeme teda zapísať y-ovú os histogramu v percentách*

**if n==pocet\_snimok**

*Začiatok cyklu pre vykreslenie výseku*

**K = mat2gray(D);**

*Vytvorí obrázok z matice D*

**subplot(7,2,1)**

*Zadanie súradníc prvého subplotu*

**imshow(K)**

*Vykreslí obrázok*

**title(sprintf('%1.0f. výrez',o))**

*Napíše poradie výseku*

**o=o+1;**

*Navýši sa premenná o pre neskoršie zdvihnutie poradia výseku*

**end**

*Koniec cyklu pre vykreslenie obrázku*

**M = mean(C);**

*Vytvorí sa matica priemerných hodnôt zo stĺpcov z matice C, slúžiacich pre vykreslenie grafu zmeny teplôt*

**xlswrite('teploty\_zo\_serie\_snimok\_1.xlsx',M,n);**

*Uloží teploty z matice M do Excelovského súboru*

**l=length(M);**

*Vypočíta dĺžku matice M pre pre definovanie vektoru x*

**x=linspace(1,100,l);**

*Definujeme si vektor dĺžky ako je vektor M pre vykreslenie grafu teplôt*

**subplot(7,2,3+m)**

*Zadanie súradníc subplotu*

**plot(x,M)**

*Vykreslí graf pozdĺžnej zmeny teplôt*

**title(sprintf('Zmena priemernej teploty v závislosti na dĺžke v prvom výreze na snímke %1.0f',n))**

*Napíše názov grafu v závislosti na poradí snímky*

**xlabel('Délka(%)')**

*Napíše názov x-ovej osi*

**ylabel('Teploty(°C)')**

*Napíše názov y-ovej osi*

**grid**

*Vytvorí mriežku v grafe*

**subplot(7,2,5+m)**

*Zadanie súradníc subplotu*

**bar(E,F,1,'b')**

*Vykreslí histogram teplôt daného výseku*

**title(sprintf('Histogram teplôt v druhom výreze na snímke %1.0f',n))**

*Napíše názov grafu v závislosti na poradí snímky*

**xlabel('Teploty(°C)')**

*Napíše názov x-ovej osi*

**ylabel('%')**

*Napíše názov y-ovej osi*



**grid**

*Vytvorí mriežku v grafe*

```

prva_suradnica_v_precentach=30;
druha_suradnica_v_precentach=40;
prvsur2=vyska*(prva_suradnica_v_precentach/100);
drusur2=vyska*(druha_suradnica_v_precentach/100);
prvsur2=round(prvsur2);
drusur2=round(drusur2);
C=A([prvsur2:drusur2],:);
D=B([prvsur2:drusur2],:,:);
E=unique(C);
F=histc(C(:),E);
S=sum(F);
F=(F./S)*100;
if n==pocet_snimok
K = mat2gray(D);
subplot(7,2,2)
imshow(K)
title(sprintf('%1.0f. výrez',o))
o=o+1;
end
M = mean(C);
xlswrite('teploty_zo_serie_snimok_2.xlsx',M,n);
subplot(7,2,4+m)
plot(x,M)
title(sprintf('Zmena priemernej teploty v závislosti na dĺžke v druhom výreze na snímke
%1.0f',n))
xlabel('Délka(%)')
ylabel('Teploty(°C)')
grid
subplot(7,2,6+m)
bar(E,F,1,'b')
title(sprintf('Histogram teplôt v druhom výreze na snímke %1.0f',n))
xlabel('Teploty(°C)')
ylabel('%')
grid

```

*V tejto časti si užívateľ nastaví nové percentuálne súradnice pre ďalší výrez, program ďalej všetko vykoná. V prípade pridania ďalšieho výrezu, užívateľ celý úsek zkopíruje a vloží hneď za tento. Následne zadá nové súradnice výrezu, premenné prvsur2 a drusur2 premenuje o číslo vyššie, to isté aj pre zápis do Excelu, následne upraví súradnice všetkých subplotov aby to sedelo a zmení o dva kroky ďalej rast premennej m o 2 s každým novým výrezom*

**n=n+1;**

*Prepne zápis na nový list Excelových súborov*

**m=m+4;**

*Premenná m sa navýši pre posunutie subplotov, treba zmeniť vždy o +2 s každým pridaným výrezom*

**end**

*Koniec cyklu spracovávanía snímok*

**figure**

*Vytvorí nové okno*

**K = mat2gray(B);**

*Vytvorí sa snímka z matice B*

**imshow(K)**

*Vykreslí sa celá spracovávaná snímka (jedná sa o poslednú snímku v poradí)*

**line([0,l],[prvsur,prvsur],'color',[1 0 0])**

*Vykreslí hornú hranicu prvého výrezu červenou farbou*

**line([0,l],[drusur,drusur],'color',[1 0 0])**

*Vykreslí dolnú hranicu prvého výrezu červenou farbou*

**line([0,l],[prvsur2,prvsur2],'color',[0 1 0])**

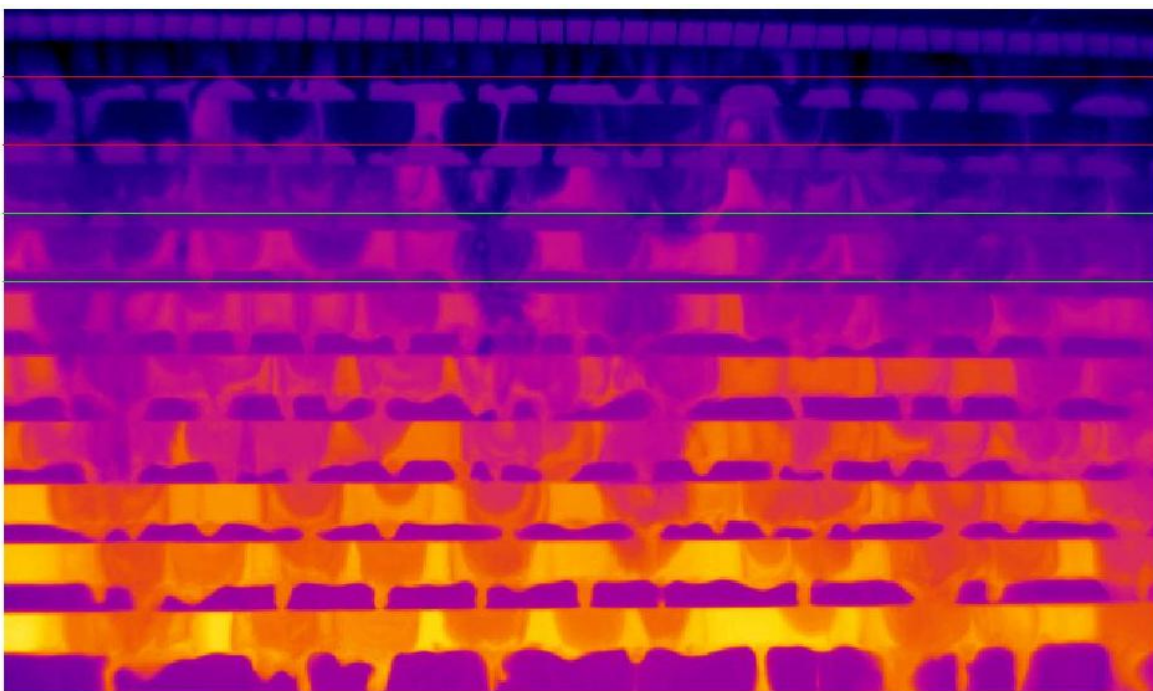
*Vykreslí hornú hranicu druhého výrezu zelenou farbou*

**line([0,l],[drusur2,drusur2],'color',[0 1 0])**

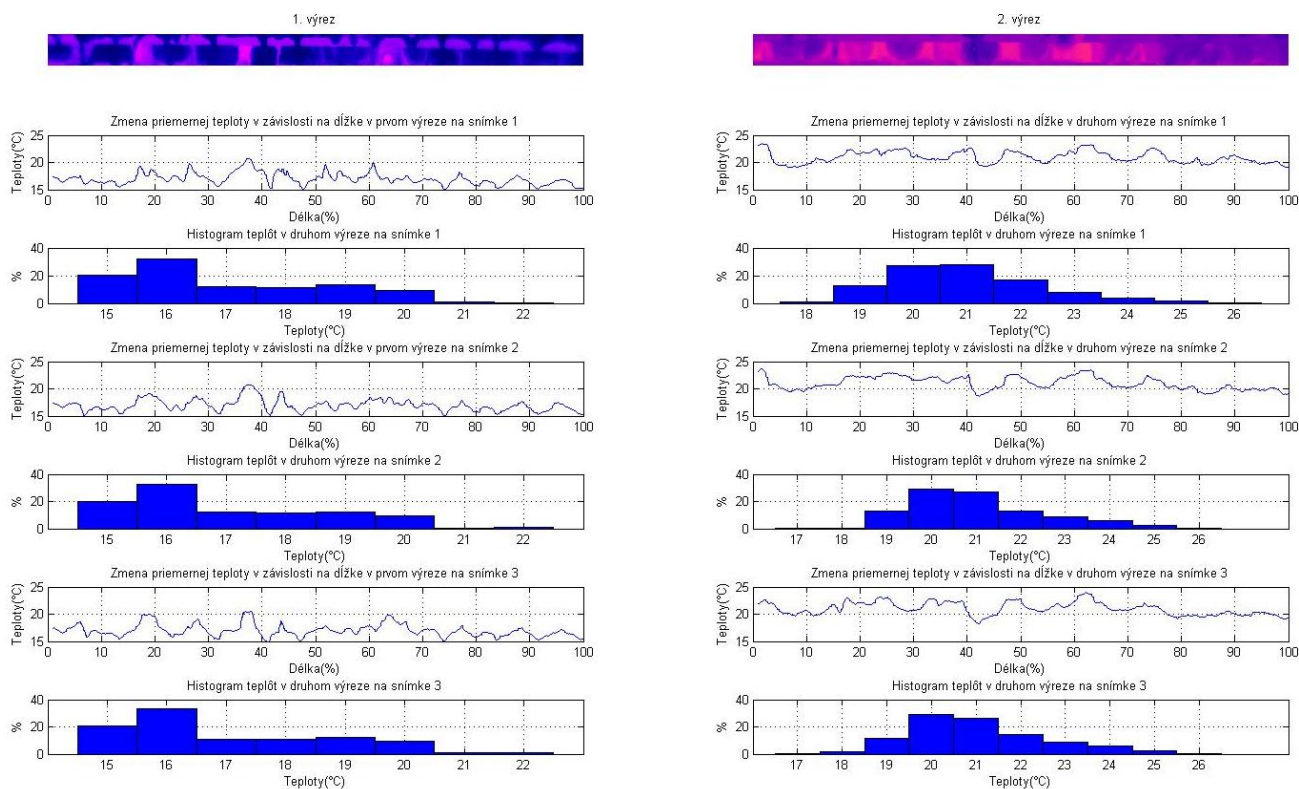
*Vykreslí dolnú hranicu druhého výrezu zelenou farbou (pre vykreslenie hraníc ďalšieho výrezu je potrebné zopakovať posledné dva príkazy so zmenou názvu premenných)*

**title('Celá snímka s výraznenými výsekmí')**

*Napíše názov snímky*



Obr. 11 Výstup programu - Snímka s výraznenými jednotlivými výsekmí



**Obr. 12 Výstup programu - Výřezy s jednotlivými pozdĺžnymi zmenami teplôt a histogrammi na snímkach**

Na výstupoch skriptu je vidieť orezaná snímka s výraznenými výsekmí, ktoré boli určené na rozbor a následne dané výřezy, pod ktorými sú grafy pozdĺnej zmeny teplôt a histogramy od prvej snímky až po poslednú.

## 8 Závěr

Cieľom tejto bakalárskej práce bol fyzikálny a technický popis termovízneho merania, jeho história a vývoj. Bakalárska práca ďalej porovnávala niekoľko termovíznych kamier značiek Flir, ICI a Testo na súčasnom trhu. Rozdiely medzi jednotlivými typmi kamier sú najmä v rozlíšení kamier a ich tepelnej citlivosti. Môžeme si všimnúť, že zlepšovaním najmä týchto vlastností cena stúpa, ale aj možnosťou priblíženia a teplotným rozsahom. Môžeme si tiež všimnúť, že citlivosť kamery má na jej cenu iba minimálny dopad.

Hlavná časť práce je venovaná skriptu na spracovanie série termovíznych snímok, získaných termovíznou kamerou, v prostredí Matlab, určeného na rozbor týchto snímok vodorovne uložených potrubí s výstupmi vo forme grafu priemernej pozdĺžnej zmeny teploty v potrubí a histogramu teplôt v potrubí.

Program naskôr načíta obrázok zo sekvencie obrázkov obsahujúci termovíznou snímku, ktorý následne oreže a ďalej prevedie do odtieňov šedej, následne program podľa zadaného rozmedzia teplôt prepočíta každý pixel na danú teplotu, ktorá sa na ňom nachádza, program zapíše teploty do Excelu, pre prípad ďalšieho použitia. Program následne vytvorí výseky podľa súradníc zadaných užívateľom, z nich vypočíta dané grafy pozdĺžnej zmeny teplôt a vykreslí histogram. Následne sa všetko zopakuje pre ďalšie snímky, ktoré sú určené na rozbor. Program už len vykreslí všetky grafy a histogramy aj s danými výrezmi a v ďalšom okne vykreslí celú snímku aj s výraznenými výsekami.

## 9 Zoznam použitých zdrojov

- [1] FLIR Systems, Inc. *FLIR - Uživatelská příručka*. 2010.
- [2] Brynda, P. *Úvod do teorie termovizního měření*. [on-line]. [citované 10.10.2013] <[http://www.fd.cvut.cz/projects/k611x1s/doc/works/teorie\\_brynda.pdf](http://www.fd.cvut.cz/projects/k611x1s/doc/works/teorie_brynda.pdf)>
- [3] e-Fyzika II *Zákon vyžarovania pre absolútne čierne teleso*. [on-line]. [citované 18.2.2014] <[http://kf-lin.elf.stuba.sk/~ballo/STU\\_online/Fyzika%20II/13%20kapitola/13.1/kvantF1-2-2.htm](http://kf-lin.elf.stuba.sk/~ballo/STU_online/Fyzika%20II/13%20kapitola/13.1/kvantF1-2-2.htm)>
- [4] Doc. Ing. Milan Pavelek, CSc. *Teorie Přenos tepla zářením (radiací)*. [on-line]. [citované 19.2.2014] <[http://studyenergyweb.fme.vutbr.cz/elearning/file.php/98/19\\_Zareni.pdf](http://studyenergyweb.fme.vutbr.cz/elearning/file.php/98/19_Zareni.pdf)>
- [5] Ing. Dušan Kisel', CSc. *Termografia chladiacich zariadení a tepelných čerpadiel*. [on-line]. [citované 20.10.2013] <[http://www.ktest.sk/images/testo/termografia\\_chlad\\_okruhov.pdf](http://www.ktest.sk/images/testo/termografia_chlad_okruhov.pdf)>
- [6] Doc. Ing. Milan Pavelek, CSc. *Teorie termovizních měření*. [on-line]. [citované 10.10.2013] <<http://otp.fme.vutbr.cz/~pavelek/optika/0700-z01.pdf>>
- [7] *TERMOKAMERY FLIR řady Ex*. [on-line]. [citované 19.2.2014] <<http://storage.merici-opticke-pristroje.cz/contentresources/Termokamery-Flir-Ex-2182-306.pdf>>
- [8] *FLIR E-Series Technical specifications*. [on-line]. [citované 19.2.2014] <<http://storage.merici-opticke-pristroje.cz/contentresources/Technicke-parametry-termokamer-Flir-rady-E-1658-35.pdf>>
- [9] *Meraciapristroje.sk* [on-line]. [citované 19.2.2014] <<http://www.meraciepristroje.sk/vyhľadavanie?q=flir>>
- [10] Absorption and Reflection of Infrared Radiation by Ultrathin Films. Handbook of Infrared Spectroscopy of Ultrathin Films [online]. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc, 2003-05-23, s. 1. ISBN 9780471234326.  
firemná literatúra
- [11] INCROPERA, Frank P et al. Principles of heat and mass transfer. 7th ed., international student version. Singapore: John Wiley & Sons, c2013, xxiii, 1048 s. ISBN 978-0-470-64615-1.
- [12] *FLIR T420 & T440*. [on-line]. [citované 26.2.2014] <[http://www.shopflir.com/crm\\_uploads/flir-t420-t440-datasheet.pdf](http://www.shopflir.com/crm_uploads/flir-t420-t440-datasheet.pdf)>
- [13] *FLIR T600*. [on-line]. [citované 26.2.2014] <[http://www.shopflir.com/crm\\_uploads/flirt600\\_datasheet\\_2013.pdf](http://www.shopflir.com/crm_uploads/flirt600_datasheet_2013.pdf)>

- [14] *FLIR T620 Infrared Camera*. [on-line]. [citované 26.2.2014]  
<[http://www.shopflir.com/p8398/flir\\_t620.php?tab=documents#tab\\_header](http://www.shopflir.com/p8398/flir_t620.php?tab=documents#tab_header)>
- [15] *Micronix*. [on-line]. [citované 26.2.2014]  
<<http://eshop.micronix.sk/meracia-technika/termokamery/flir>>
- [16] *K test*. [on-line]. [citované 26.2.2014]  
<<http://www.termokamery.net/e-1595-testo-870-2?ref=153>>
- [17] *K test*. [on-line]. [citované 26.2.2014]  
<<http://www.termokamery.net/e-1589-testo-875-2i?ref=153>>
- [18] *K test*. [on-line]. [citované 26.2.2014]  
<<http://www.termokamery.net/e-1541-testo-882?ref=153>>
- [19] *K test*. [on-line]. [citované 26.2.2014]  
<<http://www.termokamery.net/e-1554-testo-885---2?ref=153>>
- [20] *K test*. [on-line]. [citované 26.2.2014]  
<<http://www.termokamery.net/e-1556-testo-890---2?ref=153>>
- [21] *Trifid automation*. [on-line]. [citované 26.2.2014]  
<<http://www.trifidautomation.sk/sk/produkty/e-shop/infracervene-kamery-termokamery/>>
- [22] *ICI 320X IR Core*. [on-line]. [citované 26.2.2014]  
<[http://www.trifidautomation.sk/domain/trifidautomation/files/pdf-subory/320x\\_cmyk.pdf/](http://www.trifidautomation.sk/domain/trifidautomation/files/pdf-subory/320x_cmyk.pdf/)>
- [23] *ICI Centurion*. [on-line]. [citované 26.2.2014]  
<<http://www.trifidautomation.sk/domain/trifidautomation/files/pdf-subory/centurionp.pdf>>
- [24] *FX 160 FireFighter*. [on-line]. [citované 26.2.2014]  
<<http://www.trifidautomation.sk/domain/trifidautomation/files/pdf-subory/fx160.pdf>>
- [25] *ICI IR Monitor Scientific*. [on-line]. [citované 26.2.2014]  
<[http://www.trifidautomation.sk/domain/trifidautomation/files/pdf-subory/ir\\_monitors\\_2009.pdf](http://www.trifidautomation.sk/domain/trifidautomation/files/pdf-subory/ir_monitors_2009.pdf)>

## 10 Zoznam použitých obrázkov

*Obr. 1 Sir Frederick William Herschel (1738-1822) [1]*

*Obr. 2 Znážornenie Herschelovho pokusu [3]*

*Obr. 3 Elektromagnetické spektrum [1]*

*Obr. 4 Gustav Robert Kirchhoff (1824 - 1887) [1]*

*Obr. 5 Možnosti realizácie dokonale čierneho telesa [4]*

*Ob . 6 Planckov vyžarovací zákon [6]*

*Obr. 7 Usporiadanie objektov pri termovíznom meraní [6]*

*Obr. 8 Schéma termovíznej kamery s rozkladom obrazu a chladeným detektorom [6]*

*Obr. 9 Počiatočná snímka ešte pred orezaním*

*Obr. 10 Snímka po orezaní pripravená na rozbor*

*Obr. 11 Výstup programu - Snímka s výraznenými jednotlivými výsekmi*

*Obr. 12 Výstup programu - Výrezy s jednotlivými pozdĺžnymi zmenami teplôt a histogramami na snímkach*

## 11 Zoznam tabuliek

*Tab. 1 Porovnanie termovíznych kamier*

*str.22*



## 12 Zoznam použitých symbolov

$c_0$	rýchlosť svetla vo vákuu	$[m \cdot s^{-1}]$
$\dot{Q}$	tepelný tok	$[W]$
$E_{0\lambda}$	Spektrálna hustota žiarivého toku čiernych objektov do polopriestoru	$[W \cdot m^{-3}]$
$T$	Teplota	$[K]$
$\lambda$	Vlnová dĺžka	$[m]$
$c_1$	Planckova konštanta 1	$[W \cdot m^2]$
$c_2$	Planckova konštanta 2	$[K \cdot m]$
$r$	reflektancia	$[1]$
$a$	absorptancia	$[1]$
$t$	transmitancia	$[1]$
$\varepsilon$	žiarivosť	$[1]$
$E_0$	hustota žiarivého toku	$[W \cdot m^{-2}]$
$\sigma_0$	Stefan - Boltzmannova konštanta	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}]$
$\dot{q}_0$	hustota žiarivého toku	$[W \cdot m^{-2}]$
$\dot{q}$	vlastná hustota tepelného toku	$[W \cdot m^{-2}]$
$\dot{q}_r$	vlastná hustota tepelného toku žiarenia okolia	$[W \cdot m^{-2}]$
$\dot{q}_r^*$	hustota tep. toku žiarenia z okolia odrážaná od meraného objektu	$[W \cdot m^{-2}]$
$\dot{q}_z$	vlastná hustota tepelného toku žiarenia z pozadia	$[W \cdot m^{-2}]$
$\dot{q}_z^*$	hustota tepelného toku žiarením prejdená meraným objektom	$[W \cdot m^{-2}]$
$\dot{q}_L$	vlastná hustota tepelného toku žiarením prostredia	$[W \cdot m^{-2}]$
$\dot{q}_K$	vlastná hustota tepelného toku detektoru kamery	$[W \cdot m^{-2}]$
$\dot{q}_C$	hustota tepelných tokov všetkých objektov pred kamerou	$[W \cdot m^{-2}]$
$\varepsilon$	emisivita	$[1]$

## 13 Zoznam príloh

- P1 elektronická verzia bakalárskej práce
- P2 m-file so skriptom na rozbor série termovíznych snímok