

Využití termovizních systémů v bezpečnostních aplikacích

Jiří Horáček

Bakalářská práce
2016



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky
akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Jiří Horáček
Osobní číslo: A12091
Studijní program: B3902 Inženýrská informatika
Studijní obor: Bezpečnostní technologie, systémy a management
Forma studia: prezenční

Téma práce: Využití termovizních systémů v bezpečnostních aplikacích
Téma anglicky: Using Thermo-vision Systems in Security Applications

Zásady pro vypracování:

1. Nastudujte současný stav a technické možnosti využití termovizních systémů v oblasti bezpečnostních technologií.
2. Vypracujte literární rešerši na dané téma.
3. Seznamte se s principy detekce a zobrazovacích technik v oblasti infračerveného záření.
4. Navrhněte testovací zařízení pro měření prostorového rozlišení termokamer.
5. Vytvořte zadání laboratorní úlohy do předmětu "Instrumentace a měření", proveďte reálná měření a vypracujte vzorový protokol.

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. FRADEN, Jacob. Handbook of modern sensors: physics, designs, and applications. 4th ed. New York: Springer, 2010, xv, 663 s. ISBN 9781441964656.
2. BROŽ, Jaromír. Základy fyzikálních měření (I). 1. vyd. Praha: SPN, 1967, 523 s.
3. ENGLICH, Jiří. Úvod do praktické fyziky I: Zpracování výsledků měření. 1. vyd. Praha: Matfyzpress, 2006, 145 s. ISBN 80-86732-93-2.
4. PELANT, Ivan. Fyzikální praktikum III – Optika. 2 vyd. přepr. a dopl. Praha: Matfyzpress, 2001, 227 s. ISBN 80-85863-72-3.
5. HÁBOVČÍK, P. Lasery a fotodetektory. 1. vyd. Bratislava: Alfa, 1989, 318 s. ISBN 80-05-00526-1.

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Milan Navrátil, Ph.D.
Ústav elektroniky a měření

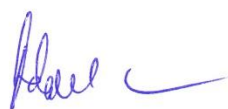
Datum zadání bakalářské práce:

23. února 2016

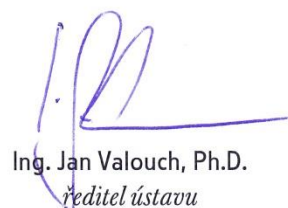
Termín odevzdání bakalářské práce:

30. května 2016

Ve Zlíně dne 16. února 2016



doc. Mgr. Milan Adámek, Ph.D.
děkan



Ing. Jan Valouch, Ph.D.
ředitel ústavu


Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen připouští-li tak licenční smlouva uzavřená mezi mnou a Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně s tím, že vyrovnání případného přiměřeného příspěvku na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše) bude rovněž předmětem této licenční smlouvy;
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na diplomové/bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně, dne


.....
podpis diplomanta

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce řeší problematiku termovizních systémů, zejména termokamer, které jsou využívány pro bezkontaktní měření teplot objektů. V teoretické části je rozebrán fyzikální princip činnosti termovizních kamer a jejich využití v mnoha oborech lidské činnosti.

Praktická část bakalářské práce se věnuje zejména měření s termokamerou. Výsledky měření z praktické části bakalářské práce z části poslouží jako studijní materiál a podklad laboratorní úlohy pro studenty.

Klíčová slova: infrakamera, termokamera, termovize, teplota, měření, snímání, infračervené záření, emisivita, úhlové rozlišení, kontrast.

ABSTRACT

This thesis addresses the issue of thermovision systems, especially thermal cameras, which are used for contactless temperature measurement of objects. The theoretical part analyzes the physical principles of thermal imaging cameras and their use in many fields of human activity.

The practical part of the thesis deals mainly with measuring with thermal camera. Measurement results from the practical part of the study will serve as the fundamental and study material for laboratory exercises for students.

Keywords: infrared camera, thermal camera, thermovision, temperature, measurement, capturing, infrared radiation, emissivity, angular resolution, contrast.

Děkuji panu Ing. Milanu Navrátilovi, Ph.D. za poskytnuté rady při vedení bakalářské práce. Děkuji také svým rodičům a přátelům za podporu při studiu.

OBSAH

ÚVOD.....	9
I TEORETICKÁ ČÁST.....	10
1 INFRAČERVENÉ ZÁŘENÍ	11
1.1 INFRAKAMERY	11
2 FYZIKÁLNÍ PRINCIP.....	12
2.1 SÁLÁNÍ.....	12
2.2 TEPLO.....	13
2.3 TEPLOTA	13
2.4 TEPELNÉ ZÁŘENÍ	14
2.5 STEFANŮV-BOLTZMANNŮV ZÁKON.....	15
2.6 WIENŮV POSUNOVACÍ ZÁKON	15
2.7 PLANCKŮV VYZAŘOVACÍ ZÁKON.....	16
2.8 EMISIVITA	17
2.9 ČERNÉ TĚLESO	18
2.10 ŠEDÉ TĚLESO	18
2.11 SELEKTIVNÍ ZÁŘIČ.....	18
3 TERMOKAMERY	20
3.1 KONSTRUKCE TERMOKAMERY	20
3.1.1 Optika.....	21
3.1.2 Detektor.....	21
3.1.2.1 Tepelné detektory	21
3.1.2.2 Fotonové detektory	22
3.2 TERMOGRAFIE	22
3.2.1 Termogram.....	23
3.3 VYUŽITÍ TERMOKAMER	24
3.3.1 Měření úniku tepla	25
3.3.2 Bezpečnostní aplikace	25
3.3.2.1 Výbušné prostředí	25
3.3.2.2 Výrobní linky	26
3.3.2.3 Jiskření	26
3.3.3 Termokamery a sport	27
4 NOKTOVIZORY	28
4.1 VÝHODY NOKTOVIZORU	28
4.2 NEVÝHODY NOKTOVIZORU.....	29
4.3 VYUŽITÍ NOKTOVIZE	29
II PRAKTICKÁ ČÁST	30
5 TESTOVACÍ ZAŘÍZENÍ.....	31

5.1	POPIS MĚŘENÍ	32
5.2	PRVNÍ NÁVRH TESTOVACÍHO ZAŘÍZENÍ.....	33
5.3	TESTOVACÍ ZAŘÍZENÍ Č. 1	33
5.4	TESTOVACÍ ZAŘÍZENÍ Č. 2.....	35
5.5	ZÁVISLOST KONTRASTU VYBRANÉHO OBRAZU NA VZDÁLENOSTI SNÍMÁNÍ	39
5.6	ZÁVISLOST TEPLoty ODPOROVÉHO DRÁTU NA PROCHÁZEJÍCÍM ELEKTRICKÉM PROUDU	43
5.6.1	Emisivita	45
5.7	JOULEOVO TEPLO	46
5.8	TERMOKAMERA FLIR E6 3900	46
5.9	ZDROJ ELEKTRICKÉHO PROUDU	48
5.10	DISKUZE O MĚŘENÍ.....	49
ZÁVĚR		51
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY		52
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....		54
SEZNAM OBRÁZKŮ		55
SEZNAM TABULEK.....		56
SEZNAM GRAFŮ		57

ÚVOD

Cílem této bakalářské práce je poskytnout ucelený pohled na problematiku termovizních systémů a jejich využití. Práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část. Téma této bakalářské práce pro mě bylo vhodnou volbou, jelikož se o podobné zobrazovací metody zajímám a termovizní systémy jsou nedílnou součástí právě takových zobrazovacích metod. V teoretické části v první kapitole je věnována pozornost infračervenému záření, ve kterém termovizní systémy pracují. Ve druhé kapitole je rozebrán fyzikální princip funkce termokamer. Ve třetí kapitole je popsána termokamera z hlediska její konstrukce, je popsán současný stav a technické možnosti a využití termovizních systémů. Termovizní systémy umožňují bezkontaktní měření teplot objektů. Toto měření patří mezi základní diagnostické veličiny. Technická diagnostika je základem bezpečnosti, spolehlivosti v letecké, železniční a automobilové dopravě a v energetice a ve veškeré průmyslové produkci. Využití termokamer najde své uplatnění také v bezpečnostních aplikacích při zabezpečení osob a majetku. Ve čtvrté kapitole jsou popsány zařízení s režimem „nočního vidění“, tedy noktovizory. V teoretické části této práce jsou také popsány principy detekce a principy zobrazovacích technik v oblasti infračerveného záření.

V praktické části bakalářské práce je využita termokamera FLIR E6 3900 pro měření prostorového rozlišení této termokamery. V několika kapitolách jsou zde popsány veškeré návrhy testovacího zařízení, způsob měření a výsledky měření jsou vyhodnoceny a zpracovány. V praktické části jsou popsány i použité přístroje, tedy termokamera a její specifikace a zdroj elektrického proudu. Součástí bakalářské práce je i návrh a sestavení vhodné laboratorní úlohy pro studenty bakalářského stupně studia do předmětu "Instrumentace a měření". Závěr praktické části je věnován diskuzi o měření. Vzorový protokol pro studenty je pak v příloze.

.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 INFRAČERVENÉ ZÁŘENÍ

Infračervené záření nebo také IR záření, z anglických slov infra-red, je elektromagnetické záření, které má vlnovou délkou větší než viditelné světlo, ale menší než mikrovlnné záření. Název infra red je odvozen z latiny, kde infra = „pod“. Infračervené záření zabírá ve spektru elektromagnetického záření 3 dekády a jeho vlnová délka se pohybuje mezi 760 nm a 1 mm. Dá se říct, že každé těleso, které má větší teplotu než je teplota absolutní nuly (0 K) je zdrojem infračerveného záření. Tělesa podle své teploty vyzařují rozdílné množství infračerveného záření různých vlnových délek. Při nízké teplotě tedy vyzařují neviditelné dlouhovlnné infračervené záření, ale při rostoucí teplotě již vyzařují infračervené záření se stále kratší vlnovou délkou. Infračervené záření je v podstatě totožné se světlem, skládá se z různých paprsků různých barev a taktéž jeví vlastnosti světla jako přímočaré šíření, odrazivost, polarizaci, lámavost a také jeví interferenci. [1]

Rozdělení infračerveného záření existuje několik, zde je jedno z nich:

- Oblast blízkého infračerveného spektra od 0,78 μm do 1 μm ,
- oblast krátkovlnného infračerveného spektra od 2 μm do 3 μm ,
- oblast středovlnného infračerveného spektra od 3 μm do 5 μm ,
- oblast dlouhovlnného infračerveného spektra od 5 μm do 25 μm .

Elektromagnetické záření s vlnovou délkou v rozsahu od 2 μm do 25 μm se také označuje jako tepelné záření. [2, 3]

1.1 Infrakamery

Infrakamery nebo také termokamery pracují a snímají obraz v infračerveném spektru, které je pro lidské oko neviditelné. Obecně lze říci, že infrakamery je jen jiný název pro termokamery, existuje však několik drobných rozdílů. Rozdíl je zejména ve snímání a v následném výstupním snímku. Výstupní snímek z termokamer se nazývá termogram. Termogram je uměle zabarvený snímek pomocí barevných palet, aby bylo pro pozorovatele snazší určit rozdíly v teplotách a teplotních polích, většinou obsahuje i teplotní stupnici s rozsahem maximální a minimální teploty na snímku. Naproti tomu obyčejné infrakamery snímají obraz v IR pásmu a jen ho digitálně převádí na snímek snáze viditelný pro lidské oko.

Například bezpečnostní infrakamery tedy snímají daný obraz v IR spektru a pokud se na takovém obraze objeví objekt, který má větší teplotu než teplotu okolí, vyhlásí poplach.

2 FYZIKÁLNÍ PRINCIP

Pro základní popis principu funkce termokamer je třeba začít s popisem fyzikálního principu a tedy i jednotlivých fyzikálních procesů a pojmů jako např. sálání, tepelné záření, emisivita, teplo, teplota. Bude zde popsáno také několik fyzikálních zákonů, které se touto problematikou zabývají a které částečně popisují toto téma z fyzikálního hlediska.

2.1 Sálání

„Sálání (také vyzařování, záření a radiace) je fyzikální proces, při kterém látka emituje do prostoru energii ve formě elektromagnetického záření.“[4]

Sálání nebo záření je záření elektromagnetické, které má vlnové vlastnosti a je pro něj typická nulová klidová hmotnost. Nejmenším množstvím záření je energie jednoho fotonu $\varepsilon = h \cdot \nu$ (součin Planckovy konstanty h a kmitočtu záření ν). [5]

Prostřednictvím sálání lze teplo přenášet i ve vakuu, na rozdíl od přenosu tepla vedením nebo prouděním. Tzn. bez zprostředkování přenosu látkovým prostředím.[4]

Vyzařovaná energie prostřednictvím sálání závisí na několika faktorech:

- teplota tělesa – množství vyzařené energie popisuje Planckův vyzařovací zákon.
- barva povrchu – největší množství tepla vyzařují černé povrchy, naopak nejmenší množství tepla vyzařují stříbřitě lesklé povrchy. Této zákonitosti se využívá například při konstrukci termosek, kde jsou povrchy stříbřitě lesklé pro minimalizaci předávání tepla sáláním.[2]
- „obsah plochy – energie vyzařovaná sáláním je přímo úměrná obsahu povrchu vyzařujícího tělesa.“[2]

Obory, které se sáláním zabývají, jsou termodynamika záření a statistická fyzika fotonového plynu, pro něž jsou důležitými zákony zejména:

- 1) Stefanův-Boltzmannův zákon.
- 2) Wienův posunovací zákon,
- 3) Planckův vyzařovací zákon,

- 4) Kirchhoffův zákon tepelného vyzařování.

2.2 Teplo

Teplo označujeme jako jednu z forem energie, zpravidla jde o kinetickou energii všech molekul tělesa. Jelikož se jedná o energii, její jednotky jsou jednotky práce, tedy *joule* (J). Pro měření tepla se dále užívají jednotky kalorie (cal) a kilokalorie (kcal). Vztah mezi těmito jednotkami je dán převodem:

$$4186,8 \text{ J} = 1000 \text{ cal} = 1 \text{ kcal}$$

Další důležitou veličinou týkající se tepla, je množství tepla Q . Tato veličina je definována jako množství tepla, které je třeba dodat termodynamické soustavě, aby se zvýšila její teplota o jeden stupeň. [6]

Teplo je aditivní funkcí stavu těles (termodynamického systému). Je konstantní pro izolované systémy, pro otevřené systémy je mírou interakce s okolím. Rozlišují se tři formy výměny tepla – vedením, prouděním a sáláním (zářením). [5, 6, 7]

2.3 Teplota

Teplota je vlastnost těles a jedna z nejdůležitějších termodynamických vlastností vůbec. Určuje stav hmoty a mnoho fyzikálních zákonů teplotu využívá. Teplota se dá také popsat jako míra kinetické energie pohybu molekul a atomů, kde do sebe molekuly narážejí - v pevném skupenství molekuly neuspořádaně kmitají kolem rovnovážné polohy. V tekutém skupenství je pohyb molekul neuspořádaný v celém objemu. Průměrná rychlost pohybu molekul je konstantní, pokud je hmota izolována od okolního prostředí. [2, 6]

Stavová veličina teplota určuje stav termodynamické rovnováhy. V soustavě těles, která je izolovaná od okolního prostředí, tedy neprobíhají žádné makroskopické změny. Pojem termodynamická rovnováha také sděluje, že veškeré fyzikální veličiny, jimiž je stav soustavy popsán, nezávisí na čase. Termodynamická rovnováha je tedy stav, který je charakterizován termodynamickou teplotou a pro tu platí, že musí být stejná pro všechny části izolované soustavy. Měření teploty je měření nepřímé, jelikož se při měření využívá dalších fyzikálních veličin a nelze změřit přímo. [3, 5, 7]

Teplotu můžeme také po technické stránce považovat za jeden ze zdrojů nejistoty ovlivňující například nejistotu měření jiných veličin. [2]

Jako nejnižší teplotu předpokládáme absolutní teplotní nulu neboli nulu termodynamické stupnice 0 K, během níž veškerý pohyb ustává. [2]

Potřebná znalost teploty se nachází ve všech okruzích lidské činnosti. Z této potřeby vznikla tzv. diagnostika, která se dá považovat za základní prostředek ke zjišťování technického stavu neživých objektů.

„Fyzikální veličina teplota se nesmí zaměňovat za fyzikální veličinu teplo, neboť teplo je forma energie související s pohybem částic dané soustavy těles, ale není stavovou veličinou, neboť nezávisí na přítomném stavu soustavy, ale na celé minulosti vývoje této soustavy.“ [2]

2.4 Tepelné záření

Princip snímání termokamer je založen také na pojmu tepelné záření.

V obecném smyslu jsou pojmy sálání a tepelné záření totožné. Popisují vyzařování tělesa v celém elektromagnetickém spektru, tedy záření, které pokrývá veškeré vlnové délky. Je určeno tepelným kmitáním všech částic látky (spojité spektrum), ale i ději v atomech a molekulách (čárové spektrum). [5, 8]

„Z termodynamického hlediska jde o tepelný přenos při jakékoli vlnové délce.“ [8]

Přesněji je myšleno záření infračerveného spektra, nebo záření trochu užšího intervalu vlnových délek 0,7–10 μm .

Tepelné záření těles popisuje tzv. Planckův vyzařovací zákon formulovaný v roce 1900 Maxem Planckem. Intenzita vyzařování roste se čtvrtou mocninou povrchové teploty tělesa. [8]

Zdrojem tepelného záření je termický pohyb částic, z nichž je objekt složen, a proto nazýváme toto záření „tepelným zářením“, abychom jej odlišili od ostatního elektromagnetického záření, které vzniká z jiných příčin. Intenzita tohoto elektromagnetického - tepelného záření je závislá na povrchové teplotě objektu, který toto záření vydává. Změřením této intenzity záření je možno stanovit povrchovou teplotu objektu. To je princip bezdotykového měření teploty, na kterém funguje i měření pomocí termovizní kamery. [8]

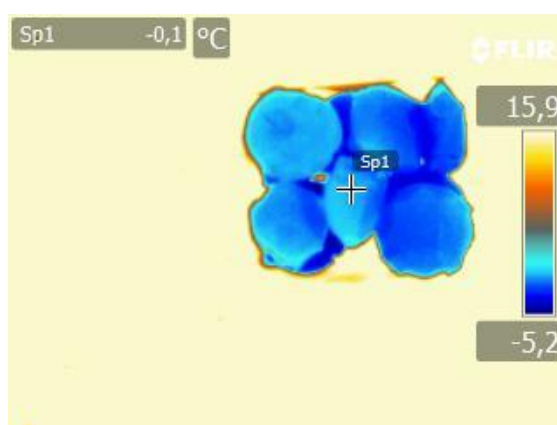
2.5 Stefanův-Boltzmannův zákon

Stefanův-Boltzmannův zákon udává intenzitu vyzařování černého tělesa při termodynamické teplotě T ($H_0(T)$). Intenzita vyzařování absolutně černého tělesa je tedy úměrná čtvrté mocnině jeho absolutní teploty (T).

$$H_0(T) = \sigma \cdot T^4 \text{ [W]} \quad (1)$$

kde σ je Stefanova-Boltzmannova konstanta ($\sigma = 5,670 \cdot 10^{-8} \text{ [W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}]$). [1, 5]

S pomocí Stefanova-Boltzmannova zákona můžeme vypočítat vyzářený výkon tělesa ve Watech, jestliže známe teplotu tělesa v Kelvinech a známe-li také emisivitu tělesa, které je zdrojem záření. Každé těleso nebo předmět kolem nás vyzařuje tepelné záření. Dokonce i předměty, které považujeme za velmi studené (např. kostka ledu) vyzařují spoustu energie ve formě tepelného záření. [8]



Obrázek 1 Tepelné záření kostky ledu [8]

2.6 Wienův posunovací zákon

Wienův posunovací zákon říká, že se změnou povrchové teploty objektu se mění spektrální rozložení vyzařovaného výkonu a ne jen intenzita vyzařování, jak říká výše zmíněný Stefanův-Boltzmannův zákon. [8]

„Udává závislost vlnové délky maxima vyzařování (λ_{\max}) na termodynamické teplotě T .“ [5]

$$T \cdot \lambda_{\max} = b [-] [\text{m} \cdot \text{K}] \quad (2)$$

Kde b je hodnota konstanty Wienova zákona $b = 2,897 \cdot 10^{-3} [\text{m} \cdot \text{K}]$. [1, 5]

2.7 Planckův vyzařovací zákon

Stefanův-Boltzmannův zákon ani Wienův posunovací zákon nám neposkytují úplnou informaci o tepelném záření těles. Stefanův-Boltzmannův zákon udává pouze celkovou vyzařovanou energii. Wienův posunovací zákon naproti tomu říká pouze vlnovou délku, kde těleso vyzařuje maximum záření. [8]

Planckův vyzařovací zákon, který formuloval Max Planck v roce 1900, nám popisuje tepelné záření těles srozumitelněji. Planckův vyzařovací zákon stanovuje, kolik energie těleso vyzaří na jednotlivých vlnových délkách.

Pro černé těleso má tvar:

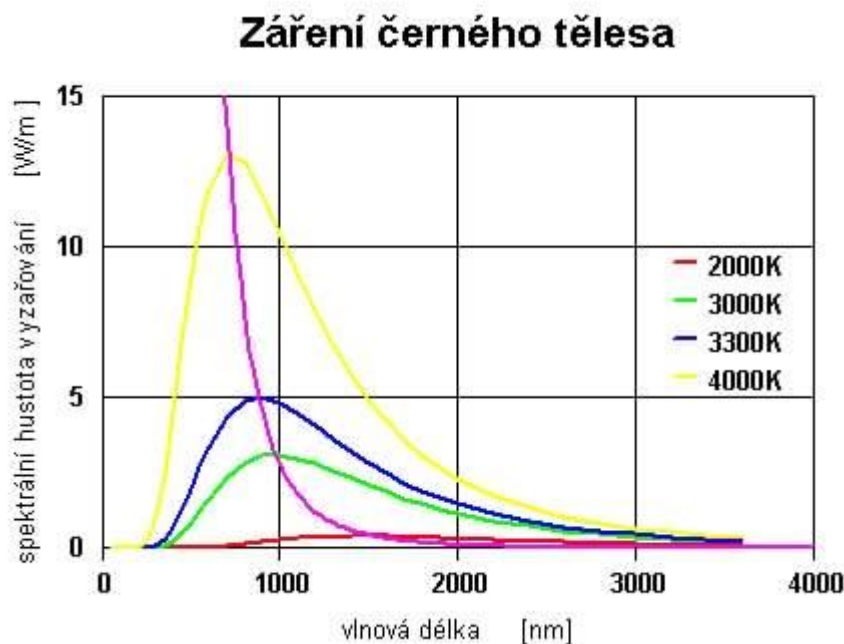
$$H_{e\lambda 0} = H_0(T, \lambda) = \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\left(\frac{c_2}{e^{T \cdot \lambda}} - 1\right)} [\text{W} \cdot \text{m}^{-3}] \quad (3)$$

kde $H_0(T, \lambda)$ je spektrální hustota intenzity vyzařování, c_1, c_2 jsou první a druhá vyzařovací konstanta. [1, 5]

$$(c_1 = 3741 \cdot 10^{-16} [\text{W} \cdot \text{m}^2])$$

$$(c_2 = 1,438 \cdot 10^{-2} [\text{m} \cdot \text{K}])$$

„Pro černé těleso (tj. těleso s emisivitou rovnou jedné) je tato spektrální závislost funkcí pouze povrchové teploty, jak ukazuje následující graf záření pro černé těleso s různou povrchovou teplotou.“ [8]



Obrázek 2 Záření černého tělesa [9]

2.8 Emisivita

S tepelným zářením také značně souvisí pojem emisivita. Emisivitu lze popsat jako optickou vlastnost materiálu, která popisuje množství světla, jež se vyzařilo z materiálu (zářiče) v poměru k množství, které vyzařuje i černé těleso při stejné teplotě. [10]

$$\varepsilon = \frac{H_e}{H_0} [-] \quad (4)$$

Kde H_e je intenzita vyzařování reálného tělesa, H_0 je intenzita vyzařování černého tělesa se stejnou teplotou. Jednotka těchto intenzit vyzařování je W/m^2 , samotná emisivita je bezrozměrná veličina.

Emisivita materiálu souvisí s vyzařováním, a protože se jedná o vlastnost materiálu, emisivita závisí také na typu měřeného materiálu (kov, dielektrikum, polovodič, plast apod.), dále pak závisí i na chemickém složení, stavu a struktuře materiálu a jeho povrchu (teplotě, drsnosti, stupni oxidace, stupni zašpinění). [10]

Velikost emisivity měřeného povrchu a tím pádem i vyhodnocení emisivity diagnostikem (měřitelem), podstatným způsobem ovlivňuje výsledek měření termokamerou. Je-li emisivita vyhodnocena a nastavena nesprávně, výsledky měření mohou být zavádějící. Na obr. č. 6 je ukázka povrchu, jehož povrchová teplota je konstantní, ale vlivem odlišné emisivity „nasprejovaného“ nápisu je jeho povrch zdánlivě chladnější. [8]



Obrázek 3 Ukázka odlišné emisivity měřeného objektu [8]

2.9 Černé těleso

Pokud tělesa odráží jen několik procent dopadajícího záření, pak se nám tato tělesa zdají jako tělesa černá. Nejvíce černá tělesa odrážejí pouze 1% dopadajícího světla. Černé těleso je tedy takové těleso, které při každé vlnové délce vyzařuje maximální energii nezávisle na použitém materiálu. Černé těleso také dokonale pohlcuje dopadající záření a to při každém úhlu dopadu při libovolné spektrální záři. Zář černého tělesa je vždy konstantní. Emisivita černého tělesa $\varepsilon=1$. [1, 7]

Černá tělesa se využívají například pro kalibraci bezkontaktních čidel měření teploty (infradetektorů, pyrometrů, termovizních kamer).

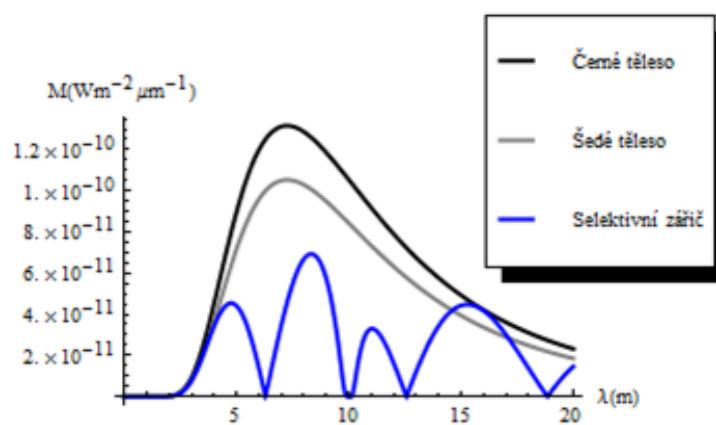
2.10 Šedé těleso

Šedé těleso je takové těleso, u kterého uvažujeme, že jeho emisivita nezávisí na frekvenci, resp. vlnové délce. Emisivita je ale na vlnové délce závislá vždy a proto všechny reálné předměty jsou tzv. selektivní zářiče.

2.11 Selektivní zářič

Selektivní zářič je těleso, jehož emisivita je funkcí frekvence, resp. vlnové délky.

Následující graf ilustruje rozdíly mezi vyzařováním černého tělesa, šedého tělesa a selektivního zářiče. Veličina M je intenzita vyzařování a λ je vlnová délka. [8]



Obrázek 4 Vyzařování odlišných těles [8]

3 TERMOKAMERY

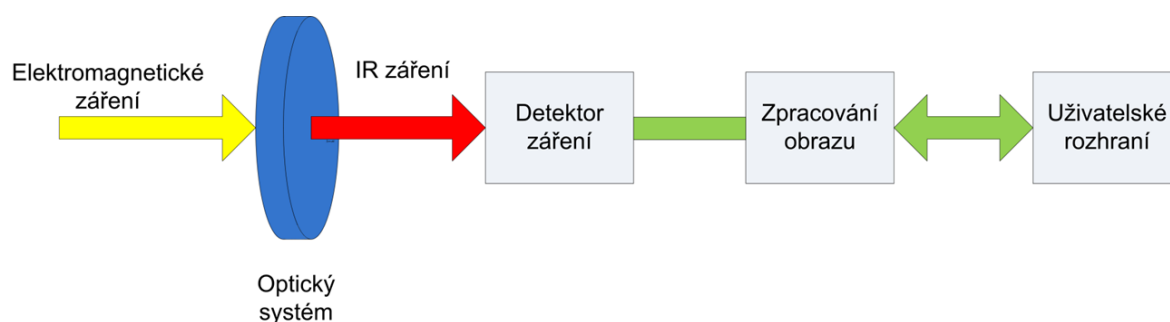
Termokamery nekontaktním způsobem snímají vyzařované infračervené záření, které vyzařují všechna tělesa. Toto záření je pro lidské oko neviditelné a termokamery jej reprodukují do viditelného obrazu. Termokamery tedy měří teplotu snímaného tělesa plošně. Požadavek plošného měření teploty původně zavedla armáda.

3.1 Konstrukce termokamery

Termokamera pracuje na stejném principu jako radiotermometr nebo pyrometr a skládá se z optického systému, který soustřeďuje infračervené záření snímaného objektu na snímací prvek (detektor). Tento prvek mění dopadající záření ve zvoleném frekvenčním spektru na elektrický signál pomocí fotoemise. Výstupem radiotermometru může být jen údaj o teplotě, nebo rovnou snímek na termokameře, kde zobrazované barvy odpovídají určitým teplotám. Výsledkem měření pozorování termovizní kamerou je pak termogram, na kterém se vždy nachází teplotní škála přiřazující barvy jednotlivým číselným hodnotám teploty. [11]

Schéma konstrukce termokamery lze rozdělit na tři nejdůležitější části:

- Optika,
- detektor,
- elektronika pro zpracování a prezentaci obrazu.



Obrázek 5 Schéma konstrukce termokamery [12]

3.1.1 Optika

V současné době se pro optiku termokamer využívá zejména spojka z germánia, která nemá možnosti optického zoomu. Jelikož se jedná o čočku, která je v podstatě totožná s obyčejnou skleněnou čočkou, platí pro ni stejné zákony optiky. Germániová spojka se od skleněné čočky liší pouze použitým materiálem. Na povrch použité čočky se nanáší navíc antireflexní vrstva, která eliminuje nežádoucí odraz infračerveného záření na povrchu čočky a tím dochází ke zvýšení propustnosti čočky až na 90%. Na germániovou spojku dopadá elektromagnetické záření všech vlnových délek, ale jelikož tato spojka zastává i funkci filtru, propustí na detektor jen záření požadovaných vlnových délek, tedy infračerveného spektra. [12]

3.1.2 Detektor

Další důležitou součástí konstrukce termovizních systémů je detektor infračerveného záření, který převádí toto dopadající vyselektované infračervené záření na elektrický signál. Tento signál je následnou elektronikou upraven na výsledný termogram, který je uživateli termokamery demonstrován jako výsledek měření. [12]

Podle principu funkce detektorů rozlišujeme dva základní typy: tepelné a fotonové.

3.1.2.1 Tepelné detektory

Tepelné detektory v zásadě pracují na principu změny elektrických vlastností v závislosti na množství dopadajícího IR záření. Jako příklad lze uvést tzv. mikrobolometr, který mění hodnotu svého elektrického odporu v závislosti na intenzitě dopadajícího záření. Mikrobolometrické pole je velké množství mikrobolometrů rozmístěných do 2D pole (o délce hrany nejobvykleji 1 až 2 cm). Toto „pole“ je dnes jedním z nejčastěji využívaných typů detektoru u termovizních kamer a setkáváme se s ním minimálně v 95 % případů, kdy se jedná o běžné termokamery. Detekční systémy s tepelnými senzory není třeba chladit. Nejdražší termokamery, používané zejména pro výzkumné účely, bývají osazeny druhým typem detektoru, tedy fotonovým detektorem a to za účelem zvýšení citlivosti těchto snímacích zařízení. [12]

3.1.2.2 Fotonové detektory

Pracují na principu počítání kvant elektronového záření, využívají přeměny dopadajícího záření na elektrický proud tedy fotoelektrického jevu. Intenzita dopadajícího záření má vliv na velikost výstupního elektrického signálu. Tyto detektory bývají zpravidla výrazně citlivější, než první typ detektorů - tepelné detektory. Naopak fotonové detektory vyžadují chlazení, což z nich dělá zařízení, která jsou náročnější na manipulaci. Termovizní kamera, která využívá fotonový detektor je mnohem těžší právě z důvodu nutnosti chlazení detektoru. K chlazení se využívá Peltierův nebo Stirlingův chladič, což jsou miniaturní heliové kompresorové agregáty, a z tohoto důvodu jsou systémy s fotonovým detektorem i podstatně dražší. [12]

3.2 Termografie

Infračervená termografie je bezkontaktní zobrazování teplot a teplotních polí. Spolu s moderní infračervenou termografickou technikou se využívá v nespočtu oborů lidské činnosti už od roku 1965. [3]

Termografie má za úkol analyzovat infračervené záření, které vyzařuje snímané těleso. Termografickým měřicím systémem lze zobrazit jeho povrchová teplota a teplotní pole měřeného objektu. Termografie se rozvinula společně s rozšířením infračervených kamer, pro které se obecně vžil označení termovizní kamera, resp. termovize.

Na původní princip měření přišel fyzik Max Planck.

Termovizní kamery umožňují zobrazit infračervené záření tělesa do takového obrazu, aby bylo pro lidské oko viditelné. Výstupním snímkem z termovizní kamery je infračervený snímek, odborně termogram, resp. termovizní snímek. Radiometrické termovizní kamery umožňují určit teplotu v jednotlivých bodech snímku, maximální a minimální teplotu atp. Určení teploty však není vždy úplně přesné, je ovlivňováno dalšími okolnostmi a závisí na několika parametrech. Jeden z hlavních parametrů je emisivita tělesa, která byla popsána výše. Ideálně černé těleso má emisivitu 1, naopak lesklá tělesa mají emisivitu velmi malou. Malá emisivita tělesa většinou zmenšuje přesnost měření. [3, 13]

3.2.1 Termogram

Termogram nebo termovizní snímek je obraz pořízený termokamerou. Jak již bylo popsáno výše, infračervené záření je pro lidské oko neviditelné a proto se termovizní snímky převádějí a uměle barví za použití okem viditelných palet, které přiřazují barvu různým teplotám (různé množství tepelného toku -> různá přiřazená barva). Termogram je složený z jednotlivých pixelů, které odpovídají povrchové teplotě snímaného objektu v daném bodě. Tyto pixely určují rozlišení detektoru termokamery.

Termovizní systémy se dále dělí na radiometrické a neradiometrické, při čemž neradiometrické snímky jsou pouze zobrazující. Radiometrické termovizní systémy poskytují vypočítat povrchovou teplotu tělesa. Pro výpočet je důležité množství snímaného infračerveného zářivého toku. V radiometrickém termogramu je možné provádět měření jednotlivých teplot a upravit různé parametry snímku. Tyto parametry bývají zpravidla emisivita, vzdálenost od měřeného objektu a zdánlivá odražená teplota a údaje o okolní atmosféře. Všechny tyto parametry mají vliv na výslednou naměřenou teplotu a zobrazení.

Pokud měříme teplotu v bodě, má na naměřenou hodnotu vliv i velikost obrazového bodu. Při snímání malého objektu z větší vzdálenosti nebo bude-li velikost snímaného obrazového bodu větší než měřený objekt, pak bude výsledek měření zkreslen okolím měřeného objektu a měření bude nepřesné.

Důležitým parametrem termovizních kamer je jejich teplotní citlivost, která u kvalitních kamer může dosahovat až 50 mK (rozliší rozdíl teplot od 0,05°C). [13]

Moderní termokamery již nabízejí prolínání termogramu a běžné fotografie, tento snímek se také nazývá „obraz v obraze“. Lze nastavit různé režimy snímání infračerveného spektra. Termokamera pak sama může na snímku vyhledat a zaměřit nejteplejší bod tzv. hot spot a naopak i nejchladnější bod cold spot.



Obrázek 6 Termogram notebooku

3.3 Využití termokamer

Termokamery najdou uplatnění ve stavebnictví a strojírenství, zejména při problematice měření a diagnostice úniku tepla (termografická diagnostika budov), dále pak v nejrůznějších měřicích laboratořích, kde se zjišťují teplotní změny, růst teploty při tření materiálů apod. Využívají se také k údržbě elektrických strojů a zařízení (kontrola elektroinstalace a rozvodných skříní), vyhledávání poškozených fotovoltaických panelů (diagnostika fotovoltaických elektráren), vadných ložisek, zánětů pod kůží apod.

Aktivní termografie je podobor infračervené termografie, který nachází uplatnění při defektoskopii a diagnostice materiálů v letectví, metalurgii, výrobě kompozitních materiálů apod.

Hojně se využívají i v bezpečnostních aplikacích. Ať už při monitorování objektu za účelem odhalení vniknutí narušitele, nebo při monitorování areálů, kde je vyšší riziko vzniku požárů, ve výbušných prostředích, v nejrůznějších průmyslových a výrobních prostorech atd.

Další využití termokamer:

- Zjišťování vlivu elektrického nevyvážení sítě a přetížení motorů,
- zdokonalení kontrol a programů preventivní údržby,
- kontroly elektrických a mechanických systémů,
- detekce problémů topných, ventilačních a klimatizačních systémů,
- ve vojenské technice a kriminalistice,
- lokalizace potrubí v zemi,

- rozložení teploty na „živých“ objektech.

3.3.1 Měření úniku tepla

Ve stavebnictví a v komerční sféře se využívají termokamery k tomu, aby se zajistilo hospodárné vytápění objektů, předcházelo nebo omezilo značným únikům a prostupům tepla a aby se vyhodnotila kvalita stavby. Měření úniku tepla za pomoci termokamery je již celkem běžnou záležitostí, postup měření má však svá specifika. Měření by mělo probíhat za bezvětrí a ideálně před svítáním nebo během něj, aby nebylo příliš ovlivněno slunečním zářením. Aby se zredukovaly náhodné jevy a stavy, mělo by se měření několikrát opakovat.

3.3.2 Bezpečnostní aplikace

Využití termovizních kamer v bezpečnostních aplikacích je velmi široké. Infrakamery najdou využití při zabezpečení nejrůznějších objektů. Vzhledem ke své poměrně nízké ceně jsou vhodné na zabezpečení vnějších perimetrů objektů velkých rozměrů, jako jsou např. elektrárny, velké výrobní haly a logistické sklady. Infrakamery a termovizní kamery jsou jedny z nejpoužívanějších systémů perimetrické ochrany velkých objektů, pokud jsou doplněny o další zabezpečovací systémy.

Termokamery se dále hojně využívají v místech, kde hrozí prudké zvýšení teplot a větší riziko požárů (zahoření). Napomáhají tak k bezpečnosti práce.

3.3.2.1 Výbušné prostředí

Zabezpečení výbušných prostředí a prostor je velmi podstatné téma a je nutné tomu přikládat velkou vážnost. Výbušné prostředí jsou specifická ve všech směrech. Všechna elektrická zařízení musí být konstruována tak, aby jejich funkce nenapomáhala k výbušné atmosféře. V takových prostorech se vyskytuje větší množství výbušných plynů, prachů a par a musí být zajištěno větší odvětrávání. I proto musí být všechna zařízení konstruována podle přísnějších norem. V Evropské unii platí předpisy, které udávají, že veškerá elektrická zařízení v prostředí s nebezpečím výbuchu musí být označena nejen značkou CE, tedy prohlášením o shodě výrobku, ale musí být označena i značkou Ex jako zařízení pro prostředí

s nebezpečím výbuchu. Dále může být označeno písmeny EEx, pokud zařízení odpovídá i evropským normám. Veškeré elektrické spoje musí být řádně izolovány od vnějšího okolí, aby nedošlo k žádnému jiskření, tomuto bezpečnostnímu opatření se říká jiskrově bezpečné obvody. Termokamery speciálně určené k instalaci do výbušných prostředí musí být navrženy tak, aby rozpoznaly i sebemenší nárůst teploty a předcházely tak závažným nehodám. [14]

3.3.2.2 Výrobní linky

Bezpečnost práce vyžaduje, aby veškeré výrobní linky, stroje a průmyslové a montážní místnosti byly co nejbezpečnější jak pro pracovníky, tak i pro celé okolí. Z tohoto důvodu se do průmyslových oblastí zavedl monitoring termovizními systémy, aby bylo co možná nejspíše určit unik tepla nebo zvýšený nárůst teploty a zdokonalila se tak kontrola a preventivní údržba. Toto platí zejména v prostředích, ve kterých jsou využívány stroje a mechanické a elektrické systémy, které se mohou často přehřívat nebo může docházet k elektrickému nevyvážení sítě a přetížení motorů.

3.3.2.3 Jiskření

Když opomeneme jiskření, ke kterému může docházet v každé elektroinstalaci, je jiskření nejčastěji průvodním jevem v montážních a průmyslových objektech, kde k jiskření dochází při provozu nejrůznějších montážních přístrojů. Při používání svářecích, obráběcích a podobných nástrojů je vznik jisker samozřejmostí. Právě tyto jiskry, které mohou dosahovat teplot až několik tisíc °C, představují riziko pro okolní prostředí a termokamery tedy mohou monitorovat právě toto okolní prostředí, aby se zamezilo vzniku požárů.

3.3.3 Termokamery a sport

V poslední době se na světlo dostávají i případy podvodů ve sportovním odvětví, zejména v profesionální cyklistice. Tyto podvody spočívají v tom, že se do zadní části rámu kola vloží malá verze motoru. Motorek pak pomáhá cyklistovi v náročném stoupání, při jízdě do kopců, popř. i při běžné jízdě. Při správném využití termokamery lze takový motor odhalit. Motor musí být v danou chvíli v chodu, tím se zahřívá část rámu kola a na termokamere je toto rozložení teploty jasně patrné a měřitelné. Tyto motory však nejsou v chodu neustále a tím jsou hůře identifikovatelné při běžném závodu. Například po vypnutí motoru dochází rychlou jízdou ke chlazení rámu kola a tím i ke chlazení motoru.



Obrázek 7 Motorek v rámu kola

4 NOKTOVIZORY

Noktovizory jsou přístroje pro noční vidění a spadají do kategorie infračervených snímacích zařízení, které umožňují pozorovateli snímat obraz, který je ozářen infračerveným zářením, tedy i při minimálním osvětlení. Najdou uplatnění zejména pro vojenské účely a pro účely dalších bezpečnostních složek.

Přímé vidění v noci umožnil teprve obrazový měnič, který je schopen zviditelnit pohyblivý infračervený obraz, vytvořený právě infračerveným zářením vlnového oboru od 0,70 μm přibližně do 1,2 μm až 1,3 μm . Právě vojenské účely během 2. světové války odstartovaly rozvoj nočního vidění na tomto principu. [1]

Noktovizory používají jako detektory fotonásobiče. Tyto fotonásobiče zesilují velmi malé zbytkové odrážené infračervené záření na měřitelnou úroveň. Zachycují proto i bohužel obvykle bezvýznamné množství tepelného záření u „teplých těles“. Větší množství tepelného záření, o vlnových délkách okolo 10000 nm, které vyzařuje běžně teplé těleso, zachycují a využívají termovizní kamery. Noktovizor zesiluje záření o vlnových délkách 700 až 1000 nm a převádí ho do viditelné oblasti spektra. Obraz se pravidelně zobrazuje na zeleném stínítku. Uživatel tak vidí monochromatický, zelený obraz. Noktovizor může být součástí pozorovací elektroniky celého vozidla, ale existuje také jako osobní noktovizor pro jednotlivce, zvláště pro vojenské účely. [15]

4.1 Výhody noktovizoru

- Noktovizor jako samostatné zařízení má oproti infračervenému pozorovacímu přístroji menší rozměry a znatelně menší energetickou náročnost,
- infračervené snímáče mohou být oklamány tepelnou izolací, což pro noktovizor nepředstavuje velký problém. Naproti tomu funkce noktovize se dá potlačit například tím, že se různým způsobem sníží odrazivost materiálů v infrapásmu, jelikož noktovize pouze zesiluje odrážené záření. Snížit odrazivost se dá například vhodnou impregnací, nebo použitím speciálních tkanin vyvinutých pro tyto účely (moderní uniformy vojáků). [15]

4.2 Nevýhody noktovizoru

- Noktovizory není možné používat ve sklepeních a v jeskyních, pokud nemá přídavný zdroj infračerveného záření, jelikož tam, kde je „úplná tma“ nepomůže ani noktovize,
- poněkud starší verze přístrojů pro noční vidění se dají vyřadit nebo oslepit velmi silným zdrojem světla.

4.3 Využití noktovize

Jak již bylo zmíněno, první požadavky na rozvoj noktovize zavedla armáda a tak je i armáda největším uživatelem noktovizorů a přidružených zařízení pro noční vidění. Použití takových přístrojů je vcelku jasné, např. na různých misích, kde je špatná viditelnost, noční mise atd. Mimo armádu využívají noktovizory i další bezpečnostní složky. Noční vidění se již vcelku běžně implementuje do různých monitorovacích systémů, takže najde své uplatnění i v komerční sféře při zabezpečení objektů.



Obrázek 8 Ukázka noktovize [16]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 TESTOVACÍ ZAŘÍZENÍ

V praktické části bakalářské práce bude nejprve popsán způsob návrhu zařízení pro měření prostorového rozlišení termokamery. Dále je popsán způsob a postup měření, který je pak rozepsán při každém měření jednotlivého testovacího zařízení zvlášť. Budou zde také doplněny grafy závislosti kontrastu obrazu na snímané vzdálenosti a grafy závislosti teploty odporového drátu na protékajícím elektrickém proudu. Popsán bude i typ využití termokamery, využitý zdroj elektrického proudu a na závěr této praktické části bakalářské práce bude diskuze o měření.

Testovací zařízení pro měření prostorového rozlišení termokamer bylo navrženo tak, aby splňovalo obecné požadavky k snadnému pochopení principu měření a jednoduchému manipulování. Sestava se skládá ze dvou dřevěných destiček o rozměrech zhruba 100x100x20 mm, které jsou připevněny kolmo na sebe, aby se zařízení mohlo snadno položit na jakoukoliv hranu ať už v laboratořích, nebo na obyčejný stůl. K přednímu kusu dřevěné destičky je připevněn kus polystyrenu, který slouží jako vhodné pozadí při sledování teplotního pole. Polystyren byl určen proto, jelikož byla potřeba takového materiálu, který je světlý a v podstatě měkký. Měkký proto, aby bylo snadné k němu přichytit dva odporové dráty. Další vlastnost polystyrenu je ta, že se nezahřívá tak rychle jako ostatní materiály a to je při měření s termokamerou zásadní. Kus polystyrenu se navíc dá kdykoliv snadno vyměnit nebo upravit.

K tomuto polystyrenu jsou přilepeny dva odporové dráty. Přilepeny jsou dvousložkovým epoxidovým lepidlem, aby bylo zajištěno trvalé přichycení. Tyto odporové dráty jsou umístěny rovnoběžně vedle sebe v určité vzdálenosti. Dráty by měly být v rámci možností co nejrovnější. Samotné měření bude přiblíženo v nadcházející kapitole.



Obrázek 9 Testovací zařízení

5.1 Popis měření

Měření probíhalo následujícím způsobem. Ke drátům testovacího zařízení byl připojen zdroj elektrického proudu. Zdroj proudu bude popsán v samostatné kapitole. Zdroj byl připojen pomocí dvou malých kovových čelistí, které zajišťovaly kontakt s odporovými dráty.

Při protékání elektrického proudu se dráty zahřívají. Díky protékajícímu proudu docházelo k zahřívání odporových drátů a jejich teplota závisela právě na hodnotě nastaveného proudu. Pro dosažení dostatečného kontrastu byly odporové dráty položeny na tepelně izolační materiál, v našem případě pěnový polystyren, což bylo pro cíl tohoto měření nezbytné. Teplota byla měřena pomocí termokamery FLIR E6 3900. Cílem měření bylo určit úhlové teplotní rozlišení termokamery. Proudem zahřáté odporové dráty byly termokamerou snímány z různé vzdálenosti a pozorovalo se, kdy jednotlivá teplotní pole z každého drátu začnou „splývat“ dohromady. Dále se vyhodnotil pokles kontrastu ve vybrané části obrazu v závislosti na vzdálenosti snímání termokamerou.



Obrázek 10 Způsob měření

5.2 První návrh testovacího zařízení

První představa tohoto zařízení byla taková, že se do polystyrenu přitluče středový hřebík, kolem kterého se obtáhne izolovaný drát. Po konzultaci s vedoucím byl drát vyměněn právě za kvalitnější odporový drát, který měl menší průměr a tím byl vhodnější pro měření. Tento drát je také lépe natahovací a rovnější. Odporový drát tedy byl obtočen kolem středového hřebíku a dále byl obtočen kolem dvou hřebíků na stranách, na které byl napojen zdroj proudu přímo. Drát tedy měl tvar obráceného V.

Po připojení ke zdroji proudu se drát začal zahřívat pouze na jedné straně, což bylo pro účel měření špatně a nebylo tak možné sledovat splývání teplotních polí na každém drátu zvlášť. Zahřívání drátu pouze na jedné straně mohlo být způsobeno např. špatným kontaktem. Testovací zařízení tedy bylo nutno navrhnout jinak.

5.3 Testovací zařízení č. 1

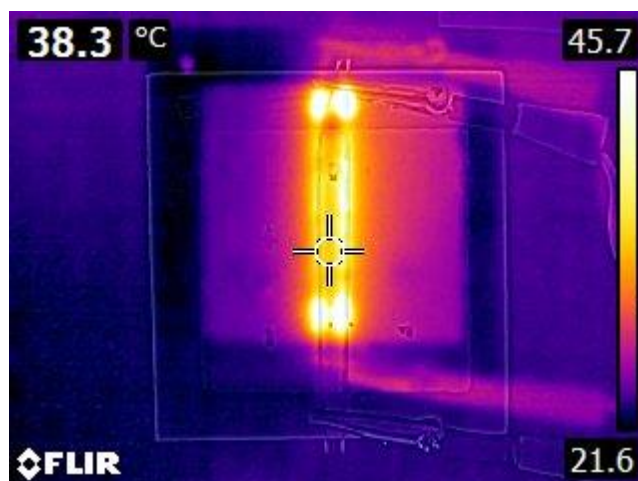
První vhodné testovací zařízení bylo navrženo v podobném stylu, jako úplně počáteční návrh, jen s několika rozdíly. Odporový drát byl doplněn o další odporový drát. Tyto dráty

byly přilepeny ke kusu polystyrenu lepidlem. Dráty měly průměr zhruba 1 mm a byly od sebe vzdáleny 7 mm. U tohoto zařízení byly využity dráty s jemným kovovým opletem, který ale měření nejspíše nijak neovlivnil. Polystyren s odporovým drátem se dá lehce sejmut a vyměnit za jiný kus, respektive typ testovacího zařízení. Po připojení ke zdroji proudu byly dráty zahřáty zhruba na 45°C. Vyžadovaná teplota byla taková, aby se lišila od teploty okolí a aby byly dráty na termokameře „jasně“ vidět.

Už i z malé vzdálenosti však nastal při snímání tohoto typu zařízení problém. Teplotní pole z jednotlivých drátů začala splývat už ze vzdálenosti přibližně 30 cm. Bylo rozhodnuto, že tento typ testovacího zařízení je pro měření nevhodný kvůli malé vzdálenosti odporových drátů od sebe (7 mm).



Obrázek 11 Testovací zařízení č. 1



Obrázek 12 Termogram testovacího zařízení č. 1
(bezprostřední snímaná vzdálenost)



Obrázek 13 Termogram testovacího zařízení č. 1
(snímaná vzdálenost 30 cm)

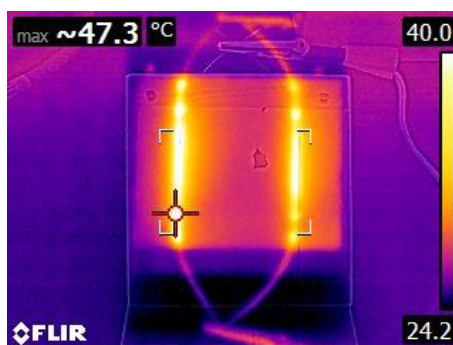
5.4 Testovací zařízení č. 2

Vzhledem k potížím při snímání prvního testovacího zařízení bylo rozhodnuto, že vzdálenost jednotlivých drátů by měla být minimálně 40 mm. Druhé testovací zařízení bylo tedy navrženo tak, že vzdálenost odporových drátů byla 47 mm. Dráty byly tentokrát bez kovového opletu a s průměrem zhruba 0,5 mm kvůli tomu, aby byla usnadněna manipulace při připojování ke zdroji elektrického proudu. Opět bylo využito lepidlo na přichycení strun ke kusu polystyrenu a ten se jednoduše nasadil na předem připravenou plochu.



Obrázek 14 Testovací zařízení č. 2

Po připojení ke zdroji elektrického proudu se dráty zahřály přibližně na 47°C , jak je vidět na obrázku č. 14. Snímání termokamerou proběhlo z velmi blízké vzdálenosti, přibližně 10 cm.



Obrázek 15 Termogram testovacího zařízení č. 2 (snímaná vzdálenost 10 cm)

Proběhlo několik dalších snímání, pro příklad bylo vybráno měření ze vzdálenosti 1 m. Měření ukázalo, že teplotní pole jednotlivých drátů jsou stále dobře rozeznatelná a nesplý-

vají. Jak je vidět na obrázku č. 15, maximální teplota dosáhla 57,6 °C z toho důvodu, že termokamera byla nastavena na režim snímání a centrování na tzv. Hot spot, tzn., že se termokamera sama zaměřila na nejteplejší místo na snímku. Nejteplejší místo při takovém měření byla část zařízení, kde byla nanесena vrstva lepidla. Lepidlo se ohřívalo přes drát a docházelo k hromadění tepla a nárůstu teploty, ale teplotní pole samotných drátů se nijak nezměnilo, což bylo pro cíl měření v pořádku.



Obrázek 16 Termogram testovacího zařízení č. 2
(snímaná vzdálenost 1m)

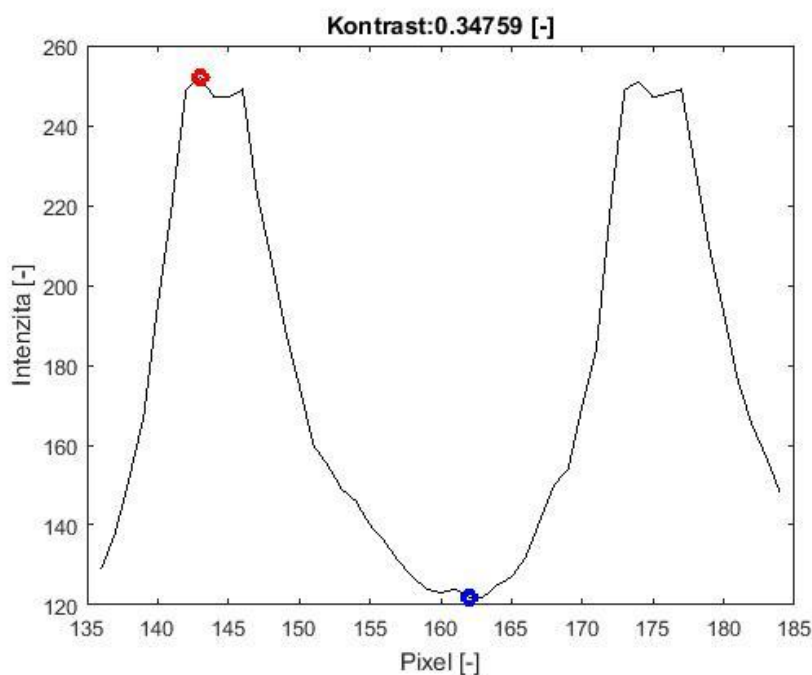


Obrázek 17 Termogram testovacího zařízení č. 2
(snímaná vzdálenost 4m)

U tohoto typu testovacího zařízení proběhlo ještě další měření, kdy se snímaly snímky ze vzdálenosti 5 cm, dále 20 cm, 40 cm, 60 cm až do vzdálenosti 280 cm. Těchto 14 snímků se vyhodnocovalo pomocí skriptu v MATLABU. Tento skript byl napsán a poskytnut vedoucím bakalářské práce. Skript vyhodnocoval pokles kontrastu na jednotlivých snímcích na vybrané části obrazu. Kontrast klesal v závislosti na rostoucí vzdálenosti snímání termokamerou.



Obrázek 18 Vybraná část obrazu pro vyhodnocení kontrastu (snímaná vzdálenost 60 cm)



Obrázek 19 Výsledná hodnota kontrastu pro vybranou část obrazu

5.5 Závislost kontrastu vybraného obrazu na vzdálenosti snímání

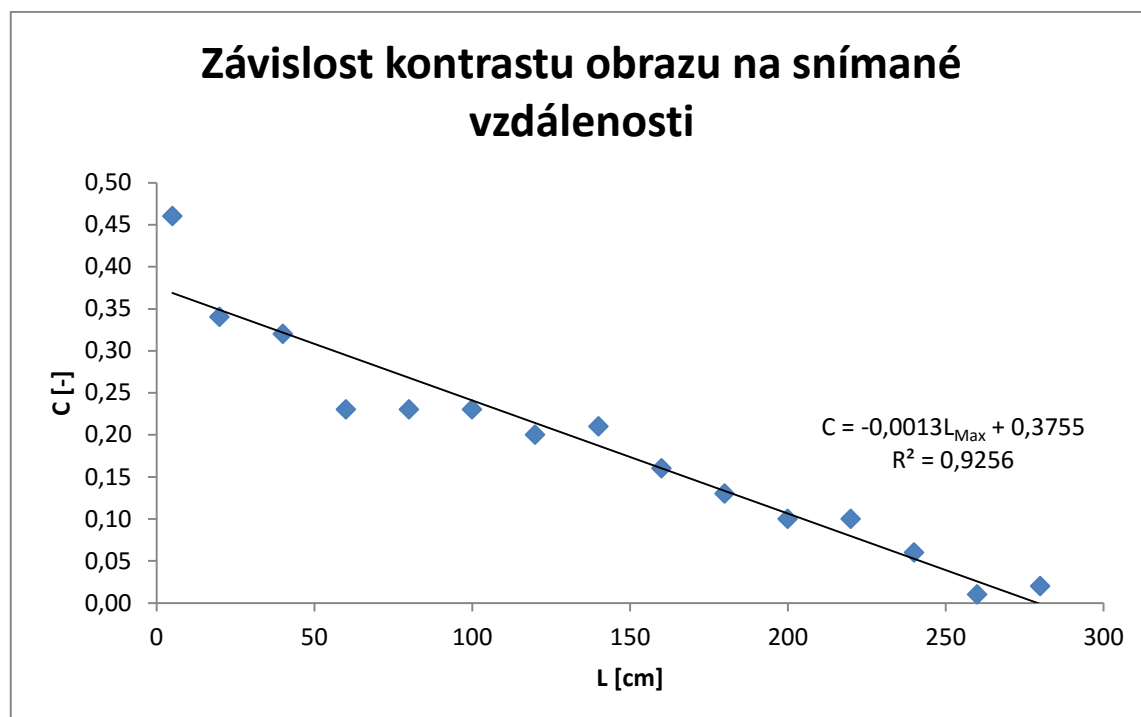
Tato část praktické části je stěžejní pro určení výsledného úhlového rozlišení termokamery FLIR E6 3900, což je jeden úkol v zadání bakalářské práce.

Na základě měření poklesu kontrastu byly vytvořeny tabulky a grafy, které zobrazují závislost kontrastu vybraného obrazu na vzdálenosti snímání termokamerou.

Sloupec L [cm] udává vzdálenost jednotlivých snímání, sloupec C [-] udává kontrast vybrané části obrazu, který byl vyhodnocen pomocí skriptu programu MATLAB. Měření probíhalo při protékajícím elektrickém proudu $I = 0,85$ A. Hodnota proudu I byla zvolena tak, aby se odporový drát zahřál a jeho teplota vzrostla vzhledem k okolí.

I = 0,85 [A]		
Č. měření	L [cm]	C [-]
1	5	0,46
2	20	0,34
3	40	0,32
4	60	0,23
5	80	0,23
6	100	0,23
7	120	0,20
8	140	0,21
9	160	0,16
10	180	0,13
11	200	0,10
12	220	0,10
13	240	0,06
14	260	0,01
15	280	0,02

Tabulka 1 Hodnoty kontrastů a vzdáleností snímání ($I=0,85$ A)



Graf 1 Závislost kontrastu vybraných částí obrazu na vzdálenosti ($I = 0,85 \text{ A}$)

Výpočet teplotního kontrastu (pro $I=0,85 \text{ A}$ byly naměřeny teploty $T_{\text{Max}}=34^\circ\text{C}$ a $T_{\text{Min}}=30^\circ\text{C}$):

$$T_{C1}[-] = \frac{T_{\text{Max}} - T_{\text{Min}}}{T_{\text{Max}} + T_{\text{Min}}} = \frac{34 - 30}{34 + 30} = 0,0625 \quad (5)$$

Pokles počátečního kontrastu (C_1) e-krát:

$$C_e = C_1 * \left(\frac{1}{e}\right) = 0,46 * \left(\frac{1}{2,7186}\right) = 0,1692 \quad (6)$$

Pokles počátečního kontrastu (C_1) na 15%:

$$C_{(15)} = C_1 * 0,15 = 0,46 * 0,15 = 0,069 \quad (7)$$

Matematický výpočet L_{Max} : rovnice regrese $C = -0,0013L_{\text{Max}} + 0,3755$ se upraví na požadovaný tvar. Vyjádřením L_{Max} a dosazením „hodnoty poklesu kontrastu e-krát“ za proměnnou C , získáme výpočet L_{Max} .

$$C = -0,0013 \cdot L_{Max} + 0,3755$$

$$L_{Max} = \frac{0,3755 - C}{0,0013} = \frac{0,3755 - 0,1692}{0,0013} = 158,7 \text{ cm} \quad (8)$$

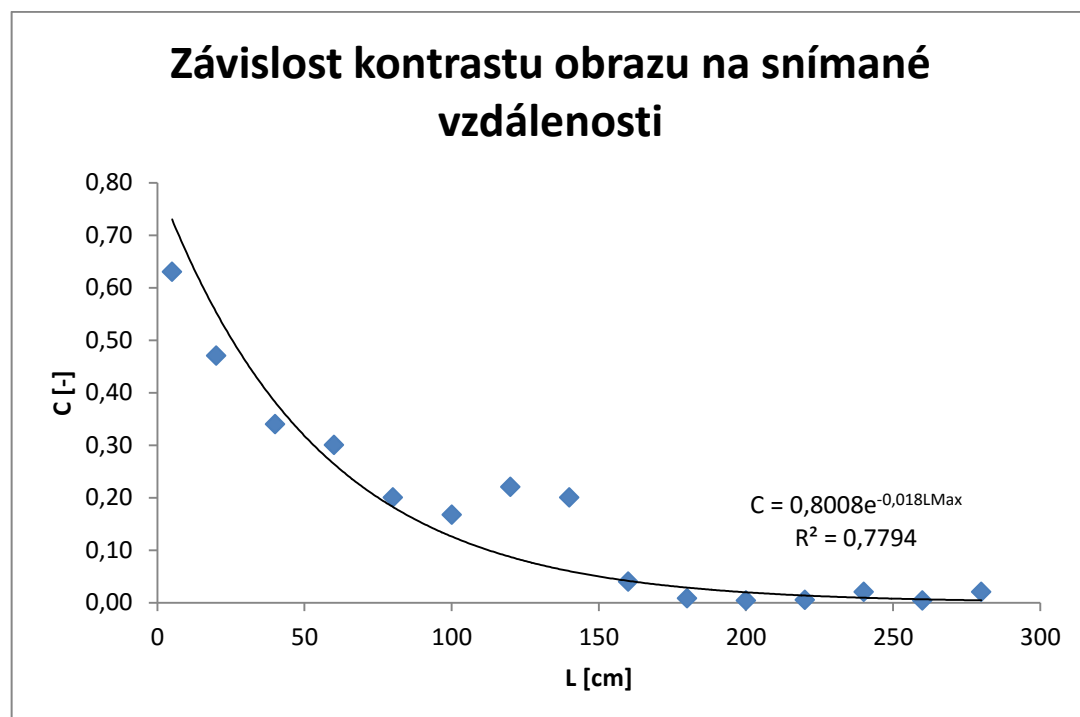
Úhlové teplotní rozlišení termokamery ($x=0,047$ m, vzdálenost odporových drátů):

$$\alpha = \frac{x}{L_{Max}} = \frac{0,047}{1,587} = 0,0296 \text{ rad} \quad (9)$$

I = 2 [A]		
Č. měření	L [cm]	C [-]
1	5	0,63
2	20	0,47
3	40	0,34
4	60	0,30
5	80	0,20
6	100	0,17
7	120	0,22
8	140	0,20
9	160	0,04
10	180	0,01
11	200	0,00
12	220	0,01
13	240	0,02
14	260	0,00
15	280	0,02

*Tabulka 2 Hodnoty kontrastů
a vzdáleností snímání (I=2A)*

Sloupec L [cm] udává vzdálenost jednotlivých snímání, sloupec C [-] udává kontrast vybrané části obrazu, který byl vyhodnocen pomocí skriptu programu MATLAB. Měření probíhalo při protékajícím elektrickém proudu $I = 2$ A. Hodnota proudu I byla zvolena tak, aby se odporový drát maximálně zahřál vzhledem k okolí, ale aby zároveň neporušoval a nezahříval polystyren, na kterém byl odporový drát uchycen.



Graf 2 Závislost kontrastu vybraných částí obrazu na vzdálenosti ($I = 2 \text{ A}$)

Výpočet teplotního kontrastu (pro $I=2 \text{ A}$ byly naměřeny teploty $T_{Max}=48^\circ\text{C}$ a $T_{Min}= 30^\circ\text{C}$):

$$T_{C2}[-] = \frac{T_{Max} - T_{Min}}{T_{Max} + T_{Min}} = \frac{48 - 30}{48 + 30} = 0,2307 \quad (10)$$

Pokles počátečního kontrastu (C_1) e-krát:

$$C_e = C_1 * \left(\frac{1}{e}\right) = 0,63 * \left(\frac{1}{2,7186}\right) = 0,2317 \quad (11)$$

Pokles počátečního kontrastu (C_1) na 15%:

$$C_{(15)} = C_1 * 0,15 = 0,63 * 0,15 = 0,0945 \quad (12)$$

Matematický výpočet L_{Max} : rovnice regrese $C = 0,8008e^{-0,018L_{Max}}$ se upraví na požadovaný tvar. Vyjádřením L_{Max} a dosazením „hodnoty poklesu kontrastu e-krát“ za proměnnou C , získáme výpočet L_{Max} .

$$\begin{aligned}
 C &= 0,8008 e^{-0,018 * L_{Max}} \\
 \log C &= \log 0,8008 * e^{-0,018 * L_{Max}} \\
 \log C &= (-0,018 * L_{Max}) * (\log 0,8008 * e) \\
 \frac{\log C}{(\log 0,8008 * e)} * \left(\frac{1}{-0,018} \right) &= L_{Max} = 134,53 \text{ cm}
 \end{aligned} \tag{13}$$

Úhlové teplotní rozlišení termokamery ($x=0,047$ m, vzdálenost odporových drátů):

$$\alpha = \frac{x}{L_{Max}} = \frac{0,047}{1,3453} = 0,0349 \text{ rad} \tag{14}$$

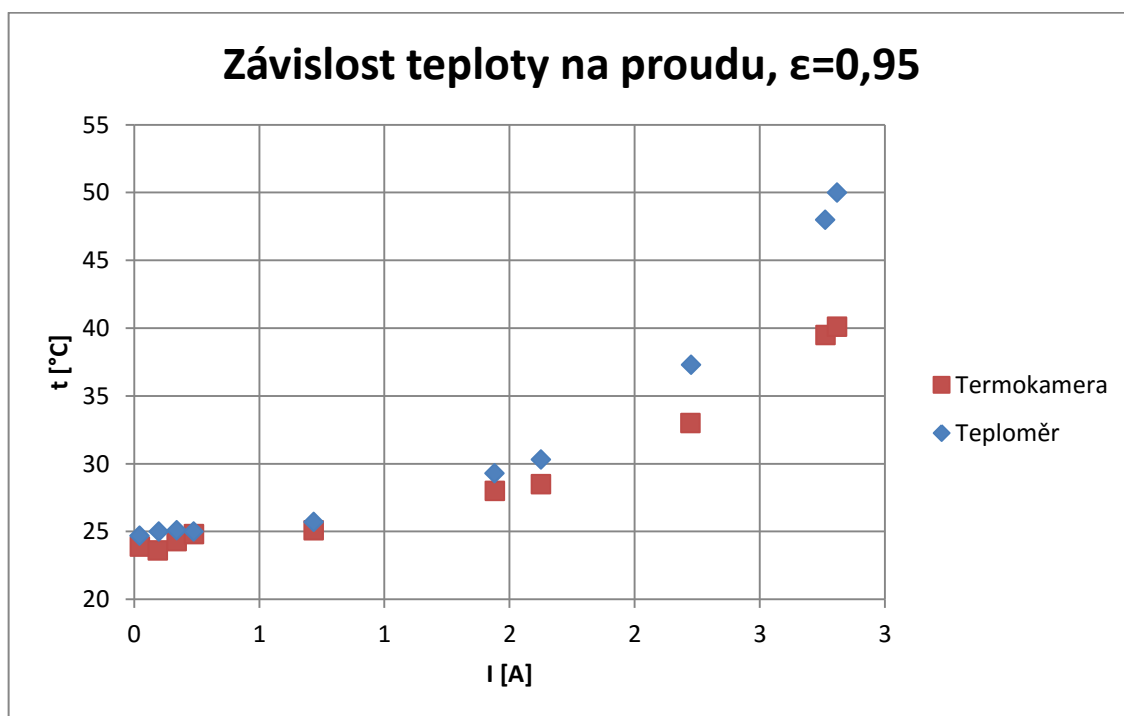
Pokles kontrastu e-krát byl zvolen vzhledem k tomu, že se takový pokles rozlišení v technické praxi běžně používá.

5.6 Závislost teploty odporového drátu na procházejícím elektrickém proudu

Teplota odporového drátu při procházejícím proudu byla změřena bezkontaktně termokamerou a dále pak kontaktně dotykovým teploměrem. Dotykový teploměr Testo využíval termočláňkovou sondu typu K s rozsahem -50 až $+250$ °C. Hodnoty naměřené kontaktním teploměrem jsou samozřejmě spolehlivější a přesnější, jelikož toto měření probíhá dotykově a na základě přesně daných výpočetních metod. Naopak, při měření termokamerou je nutno správně nastavit několik rozhodujících faktorů, zejména emisivitu.

teploměr			termokamera		
Č. měření	I [A]	t [°C]	Č. měření	I [A]	t [°C]
1	0,022	24,7	1	0,023	23,9
2	0,098	25,0	2	0,095	23,6
3	0,170	25,1	3	0,170	24,3
4	0,238	25,0	4	0,239	24,8
5	0,717	25,7	5	0,717	25,1
6	1,440	29,3	6	1,441	28,0
7	1,625	30,3	7	1,626	28,5
8	2,226	37,3	8	2,223	33,0
9	2,762	48,0	9	2,763	39,5
10	2,809	50,0	10	2,809	40,1

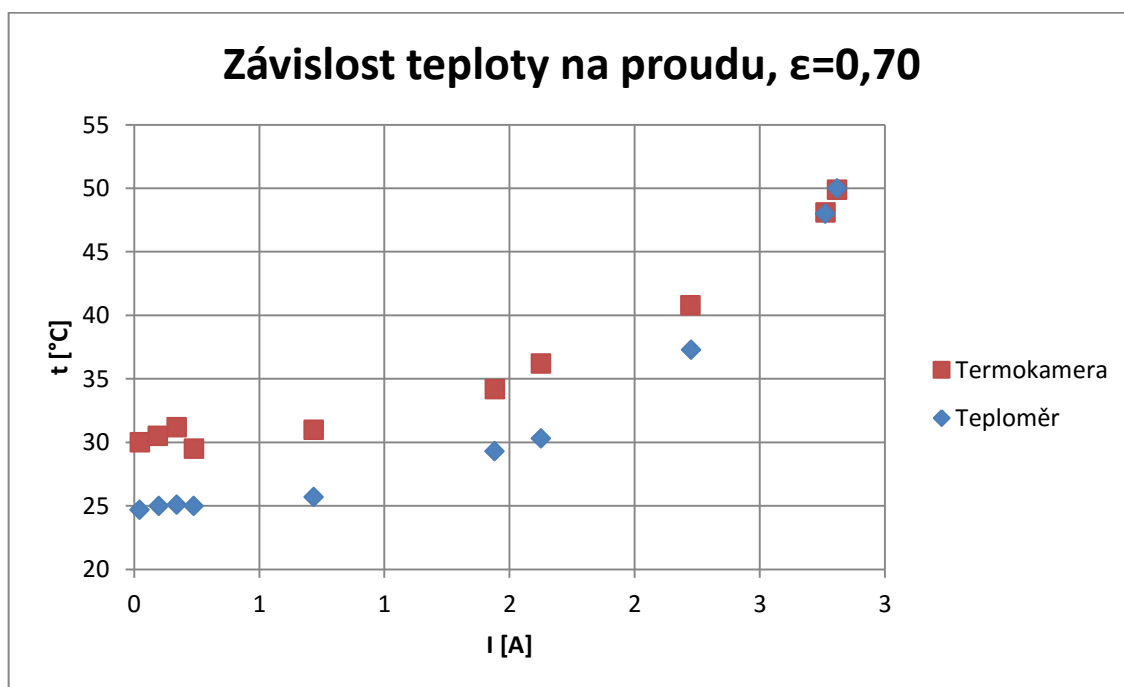
Tabulka 3 Hodnoty měřených teplot teploměrem a termokamerou při nastavené emisivitě $\varepsilon=0,95$.



Graf 3 Závislost teploty odporového drátu na protékajícím proudu při $\varepsilon=0,95$.

Teploměr			Termokamera		
Č. měření	I [A]	t [°C]	Č. měření	I [A]	t [°C]
1	0,022	24,7	1	0,023	30,0
2	0,098	25,0	2	0,095	30,5
3	0,170	25,1	3	0,170	31,2
4	0,238	25,0	4	0,239	29,5
5	0,717	25,7	5	0,717	31,0
6	1,440	29,3	6	1,441	34,2
7	1,625	30,3	7	1,626	36,2
8	2,226	37,3	8	2,223	40,8
9	2,762	48,0	9	2,763	48,1
10	2,809	50,0	10	2,809	49,9

Tabulka 4 Hodnoty měřených teplot teploměrem a termokamerou při nastavené emisivitě $\varepsilon=0,70$.



Graf 4 Závislost teploty odporového drátu na protékajícím proudu při $\varepsilon=0,70$.

5.6.1 Emisivita

Podle naměřených hodnot v tabulce a podle výsledných grafů je vidět, že nastavení emisivity na termokameře má zásadní vliv na výsledky měření. Zvolená emisivita $\varepsilon=0,70$ přibližně odpovídá lesklým kovovým materiálům, tedy zvolenému odporovému drátu. Emisi-

vitou těles se zabývá i několik bakalářských a diplomových prací pocházejících z Fakulty aplikované informatiky, avšak měření emisivity jako takové, není tématem této bakalářské práce. Emisivita je rozhodujícím faktorem pro měření teploty pomocí termokamery, ale tato práce se zabývá zejména samotným rozlišením využití termokamery FLIR E6 3900, a proto na nastavení správné emisivity není kladen důraz.

5.7 Jouleovo teplo

Vodič, kterým protéká proud, se zahřívá. Teplo, které vodič vyzařuje, se nazývá Jouleovo teplo. Nositelé proudu ve vodiči jsou v neustálé interakci s látkou vodiče, které neustále předávají energii elektrického pole. Jouleovo teplo tedy vzniká v celém objemu vodiče. [17]

5.8 Termokamera FLIR E6 3900

Specifikace termokamer FLIR řady E6:

- Infračervené rozlišení: 160×120 ,
- Rozlišení u MSX obrazu: 320×240 ,
- Teplotní citlivost: $<0.06^{\circ}\text{C}$,
- Úhel pohledu/rozhledu: $45^{\circ} \times 34^{\circ}$,
- Detektor: nechlazený mikrobolometr,
- Snímková frekvence obrazu: 9 Hz.

Popis jednotlivých funkcí a režimů snímání využití termokamery:

U termokamery je možno nastavit různé přístrojové nastavení (Device settings), dále má kromě nastavitelné vzdálenosti snímání a emisivity také několik dalších funkcí, zejména různé režimy snímání obrazu, režimy měření a režimy nastavení barevných palet.

1. Mód zobrazení (Image mode):

- **Thermal MSX** - Multi Spectral Dynamic Imaging – jedná se o snímek, který je proložený obyčejným reálným snímkem a termovizním snímkem (zjednodušeně 2v1). Tento režim zobrazení dovoluje zobrazit snímáný objekt v detailnějším provedení než u běžného termovizního snímku. Jdou na-

příklad vidět hrany objektů a jednotlivé části, jako například nápisy, otvory. Tento režim zobrazení však vyžaduje větší osvětlení snímaného objektu právě proto, že termovizní snímek je proložen reálným snímkem, který by se ve špatně osvětleném prostoru nedal pořídit.

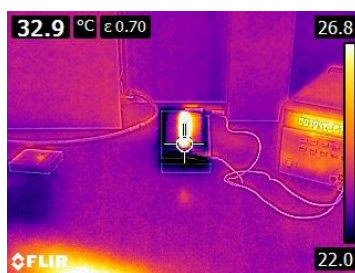
- **Thermal** – termovizní snímek, který je možno pořídit i za tmy.
- **Picture in picture** – je režim snímání, kdy je možno vidět reálný snímek pořízený integrovanou digitální kamerou, avšak uprostřed obrazu je vložen termovizní snímek. Tento režim snímání slouží zejména pro snadnější orientaci.
- **Thermal blending** – podobný režim snímání jako MSX. Zde je možné nastavit, zda bude na obrazu převládat spíše termovizní snímek nebo reálný snímek.

2. Mód měření (Measurment): jedná se o režim dodatečného měření teploty na snímku.

- **Central** – zaměřovací kříž se nachází uprostřed obrazu a termokamera bezdotykově měří teplotu objektu nebo části objektu, na kterou je tento zaměřovací kříž nasměrován/namířen.
- **Hot Spot** – termokamera automaticky vyhledá, zaměří a vyhodnotí nejteplejší místo na snímku. Zaměřovací kříž má červenou barvu.
- **Cold Spot** - termokamera automaticky vyhledá, zaměří a vyhodnotí nejchladnější místo na snímku. Zaměřovací kříž má modrou barvu.
- **No measurment** – snímání obrazu bez zaměřovacího kříže, tedy bez dodatečného měření teploty.

3. Mód barevných palet (Color): nastavení odlišných barevných palet.

- **Iron** – barevná paleta „železných“ odstínů.



Obrázek 20 Color - iron

- **Rainbow** – barevná paleta „duhových“ odstínů.



Obrázek 21 Color - rainbow

- **Gray** – odstíny šedi.
- **Bellow alarm** – lze nastavit hranici teploty, kdy budou snímané objekty zobrazovány modře. Např. nastavená hranice by byla 20°C, všechny objekty na obraze, které by byly chladnější než 20°C by byly vybarveny jako modré. Všechny objekty na obraze, které by byly teplejší než 20°C budou zobrazovány v odstínech šedi.
- **Above alarm** - lze nastavit hranici teploty, kdy budou snímané objekty zobrazovány červeně. Např. nastavená hranice by byla 20°C, všechny objekty na obraze, které by byly teplejší než 20°C by byly vybarveny jako červené. Všechny objekty na obraze, které by byly chladnější než 20°C budou zobrazovány v odstínech šedi.

4. Teplotní škála (Scale):

- **Automatic** – teplotní škála, která se automaticky mění v závislosti na snímaném obraze.
- **Lock** – teplotní škálu lze manuálně zamknout na minimálních a maximálních hodnotách této stupnice.

5.9 Zdroj elektrického proudu

Využitý zdroj elektrického proudu byl typ Agilent E3632A DC Power Supply. Digitální a počítačem řízený zdroj, u kterého lze hodnoty proudu nastavovat v závislosti na zvoleném napětí.

Důležité parametry:

- Výstup napětí (nízký rozsah 0 V až +15 V, vysoký rozsah 0 V až +30 V),
- Výstup proudu (nízký rozsah 0 A až 7 A, vysoký rozsah 0 A až 4 A),
- Přepětíová ochrana (1 V až 32 V),
- Nadproudová ochrana (0 A až 7,5 A),
- Tlačítko Output On/Off (zastaví výstup hodnot napětí/proudu, aniž by musel být vypnut celý zdroj),



Obrázek 22 Agilent E3632A DC Power Supply

5.10 Diskuze o měření

Měření s termokamerou FLIR E6 3900 probíhalo v laboratoři D204 v budově Fakulty aplikované informatiky. Laboratoř je využívána výhradně k vědecko-výzkumným aktivitám a studenti do ní zpravidla nemají přístup, což velice ulehčilo celé měření. Samotné měření bylo rozděleno do několika fází. V prvních fázích bylo nejprve nutno navrhnout vhodné testovací zařízení pro měření prostorového rozlišení termokamer. Ke vhodnému testovacímu zařízení jsme dospěli až po několika prvních neúspěšných pokusech. Konečný návrh testovacího zařízení je popsán v předchozích kapitolách. Měření dále vyžadovalo využití zdroje elektrického proudu a samotné termokamery. Obě tyto zařízení mohou být také zdrojem různých nepřesností v měření. Výsledný obraz snímáný termokamerou závisí na teplotě objektu, který je měřen. Teplota objektu v našem případě závisí právě na protékajícím elektrickém proudu. U termokamery se mohou vyskytovat nepřesnosti v měření ve vhodném nebo nevhodném nastavení nejrůznějších parametrů, jako je emisivita, vzdále-

nost snímaného objektu atd. Emisivita těles je rozhodující faktor při bezdotykovém měření teploty objektů a je zdrojem velkých chyb a nejistot při měření, ale toto není cílem bakalářské práce, i když je tomu věnována jedna z částí. Emisivitou se zabývají jiné akademické práce i z Fakulty aplikované informatiky. Při měření termokamerou se snímal obraz z různých vzdáleností, které byly měřeny pomocí svinovacího metru, což mohl být také zdroj nepřesností. Hodnoty elektrického proudu, snímané teploty, poklesu kontrastu, vzdálenosti snímání a další hodnoty byly zaokrouhlovány, což se také promítlo do přesnosti výsledků.

ZÁVĚR

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou termovizních systémů, které se využívají pro bezkontaktní měření teplot objektů, ale i pro zabezpečení prostor a pro průmyslové aplikace. V teoretické části této práce je rozebrán princip funkce termovizních systému z fyzikálního hlediska, princip detekce a princip zobrazování snímané scény. Popsána je obecná konstrukce termokamer, využívané detektory a praktické využití termokamer. Poslední kapitola teoretické části bakalářské práce je věnována noktovizorům, tedy zařízením pro „noční vidění“.

Praktická část této práce popisuje snahu vypočítat a určit úhlové teplotní rozlišení termokamery a vyobrazuje data získaná v průběhu celého měření, jako jsou jednotlivé teploty odporového drátu; protékající elektrický proud; vzdálenosti, ze kterých bylo snímáno testovací zařízení; hodnoty kontrastu vybraných částí obrazu atd. Bylo navrženo testovací zařízení pro měření prostorového rozlišení využití termokamery typu FLIR E6 3900. Postup při měření je také popsán v praktické části. Měření spočívalo v pořizování snímků testovacího zařízení termokamerou. Tyto snímky se následně vyhodnotily na pokles kontrastu v závislosti na snímané vzdálenosti a z této závislosti se vypočítalo prostorové – úhlové rozlišení termokamery. Pokles kontrastu byl vyhodnocen pomocí skriptu z programu MATLAB, který byl poskytnut vedoucím práce. Veškeré naměřené hodnoty byly zapsány do tabulek a byly vytvořeny grafy závislosti poklesu kontrastu vybrané části obrazu na snímané vzdálenosti. Další grafy popisují závislost teploty odporových drátů na protékajícím elektrickém proudu. V praktické části se také nachází popis jednotlivých využitých pomůcek, jako je testovací zařízení, zdroj elektrického proudu a popis využití termokamery FLIR E6 3900. V závěru praktické části je rozepsána diskuze o měření, kde jsou jednotlivě popsány eventuální chyby a zdroje nejistot při prováděném měření.

Tato práce je určena pro kohokoliv, kdo se o danou problematiku zajímá. Jak již bylo zmíněno, termokamery zaujímají výrazné místo v bezdotykové diagnostice teplot nejrůznějších objektů, ale najdou své uplatnění i v bezpečnostních aplikacích při monitorování prostor s rizikem zahoření atp. Práce je ale zejména určena pro studenty bakalářského stupně studia, kteří mohou výsledky využít jako podklad pro měření, jelikož součástí práce je i návrh a sestavení vhodné laboratorní úlohy pro studenty do předmětu „Instrumentace a měření“.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] VAŠKO, Antonín. Infračervené záření a jeho užití. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1963. Řada elektrotechnické literatury.
- [2] KREIDL, Marcel. Měření teploty: senzory a měřicí obvody. Praha: BEN - technická literatura, 2005. Senzory neelektrických veličin. ISBN 80-7300-145-4.
- [3] Infračervené záření. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2016-05-11]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Infra%C4%8Derven%C3%A9_z%C3%A1%C5%99en%C3%AD
- [4] Sálání. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2016-05-10]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/S%C3%A1l%C3%A1n%C3%AD>
- [5] LYSENKO, Vladimír. Detektory pro bezdotykové měření teplot. Praha: BEN - technická literatura, 2005. Senzory neelektrických veličin. ISBN 80-7300-180-2.
- [6] BROŽ, Jaromír. Základy fyzikálních měření (I). 1. vyd. Praha: SPN, 1967, 523 s.
- [7] ENGLICH, Jiří. Úvod do praktické fyziky. Praha: Matfyzpress, 2006. ISBN 80-86732-93-2.
- [8] Tepelné záření. In: Termokamera.cz [online]. [cit. 2016-05-11]. Dostupné z: <http://www.termokamera.cz/princip-a-funkce/tepelne-zareni/>
- [9] Záření černého tělesa. In: FyzWeb.cz [online]. 2008 [cit. 2016-05-11]. Dostupné z: <http://fyzweb.cz/clanky/index.php?id=109>
- [10] Emisivita. In: Představení a nabídka odboru TTP: Termomechanika technologických procesů [online]. 2015 [cit. 2016-05-11]. Dostupné z: <http://tp.zcu.cz/cz/laboratore/opticke-vlastnosti/opticke-vlastnosti/emisivita>
- [11] Termokamera. In: Věda a technika v pozadí Termokamera | Eduportál Techmania [online]. [cit. 2016-05-11]. Dostupné z: <http://edu.techmania.cz/cs/veda-v-pozadi/807>
- [12] Konstrukce. In: Termokamera.cz [online]. [cit. 2016-05-11]. Dostupné z: <http://www.termokamera.cz/princip-a-funkce/konstrukce-termokamery/>

- [13] Termografie. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2016-05-10]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Termografie>
- [14] Elektrická zařízení v prostředí s nebezpečím výbuchu. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2016-05-11]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Elektrick%C3%A1_z%C5%99%C3%ADzen%C3%AD_v_prost%C5%99ed%C3%AD_s_nebezpe%C4%8D%C3%ADm_v%C3%BDbuchu
- [15] Brýle pro noční vidění pro bojové vrtulníky. Vrtulníky v Česku [online]. 2011 [cit. 2016-05-11]. Dostupné z: <http://www.vrtulnik.cz/avionic/nvg.htm>
- [16] NVB5X. NOČNÍ VIDĚNÍ, TERMOVIZE | Noční vidění ATN [online]. 2011 [cit. 2016-05-11]. Dostupné z: <http://www.nocni-videni-atn.cz/nocni-videni/binokulary/nvb5x/>
- [17] SEDLÁK, Bedřich a Ivan ŠTOLL. Elektřina a magnetismus. Vyd. 2., opr. a rozš. Praha: Academia, 2002. ISBN 80-200-1004-1.
- [18] FRADEN, Jacob. Handbook of modern sensors: physics, designs, and applications. 4th ed. New York: Springer, c2010. ISBN 9781441964663.
- [19] PELANT, Ivan. Fyzikální praktikum III - Optika. 2 vyd. přepr. a dopl. Praha: Matfyzpress, 2001, 227 s. ISBN 80-85863-72-3.
- [20] HÁBOVČÍK, P. Lasery a fotodetektory. 1. vyd. Bratislava: Alfa, 1989, 318 s. ISBN 80-05-00526-1.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

b	hodnota konstanty Wienova zákona
C	kontrast
c_1	první vyzařovací konstanta
c_2	druhá vyzařovací konstanta
e	Eulerovo číslo
$H_0(T, \lambda)$	spektrální hustota intenzity vyzařování
H_0	intenzita vyzařování černého tělesa
H_e	intenzita vyzařování reálného tělesa
T	termodynamická teplota
T_c	teplotní kontrast
α	Úhlové teplotní rozlišení
ε	emisivita
λ	Vlnová délka
σ	Stefanova-Boltzmannova konstanta
CE	Conformite Européene
Ex	Explosion Protected
EEx	Explosion Protected splňující i evropské normy

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1 Tepelné záření kostky ledu [8]</i>	<i>15</i>
<i>Obrázek 2 Záření černého tělesa [9]</i>	<i>17</i>
<i>Obrázek 3 Ukázka odlišné emisivity měřeného objektu [8]</i>	<i>18</i>
<i>Obrázek 4 Vyzařování odlišných těles [8]</i>	<i>19</i>
<i>Obrázek 5 Schéma konstrukce termokamery [12]</i>	<i>20</i>
<i>Obrázek 6 Termogram notebooku</i>	<i>24</i>
<i>Obrázek 7 Motorek v rámu kola</i>	<i>27</i>
<i>Obrázek 8 Ukázka noktovize [16]</i>	<i>29</i>
<i>Obrázek 9 Testovací zařízení</i>	<i>32</i>
<i>Obrázek 10 Způsob měření</i>	<i>33</i>
<i>Obrázek 11 Testovací zařízení č. 1</i>	<i>34</i>
<i>Obrázek 12 Termogram testovacího zařízení č. 1 (bezprostřední snímaná vzdálenost)</i>	<i>35</i>
<i>Obrázek 13 Termogram testovacího zařízení č. 1 (snímaná vzdálenost 30 cm)</i>	<i>35</i>
<i>Obrázek 14 Testovací zařízení č. 2</i>	<i>36</i>
<i>Obrázek 15 Termogram testovacího zařízení č. 2 (snímaná vzdálenost 10 cm)</i>	<i>36</i>
<i>Obrázek 16 Termogram testovacího zařízení č. 2 (snímaná vzdálenost 1m)</i>	<i>37</i>
<i>Obrázek 17 Termogram testovacího zařízení č. 2 (snímaná vzdálenost 4m)</i>	<i>37</i>
<i>Obrázek 18 Vybraná část obrazu pro vyhodnocení kontrastu (snímaná vzdálenost 60 cm)</i>	<i>38</i>
<i>Obrázek 19 Výsledná hodnota kontrastu pro vybranou část obrazu</i>	<i>38</i>
<i>Obrázek 20 Color - iron</i>	<i>47</i>
<i>Obrázek 21 Color - rainbow</i>	<i>48</i>
<i>Obrázek 22 Agilent E3632A DC Power Supply</i>	<i>49</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1 Hodnoty kontrastů a vzdáleností snímání ($I=0,85 A$).....</i>	<i>39</i>
<i>Tabulka 2 Hodnoty kontrastů a vzdáleností snímání ($I=2A$).....</i>	<i>41</i>
<i>Tabulka 3 Hodnoty měřených teplot teploměrem a termokamerou při nastavené emisivitě $\varepsilon=0,95$.</i>	<i>44</i>
<i>Tabulka 4 Hodnoty měřených teplot teploměrem a termokamerou při nastavené emisivitě $\varepsilon=0,70$.</i>	<i>45</i>

SEZNAM GRAFŮ

<i>Graf 1 Závislost kontrastu vybraných částí obrazu na vzdálenosti ($I = 0,85 A$)</i>	<i>40</i>
<i>Graf 2 Závislost kontrastu vybraných částí obrazu na vzdálenosti ($I = 2 A$)</i>	<i>42</i>
<i>Graf 3 Závislost teploty odporového drátu na protékajícím proudu při $\varepsilon=0,95$.</i>	<i>44</i>
<i>Graf 4 Závislost teploty odporového drátu na protékajícím proudu při $\varepsilon=0,70$.</i>	<i>45</i>

PŘÍLOHA P I: VZOROVÝ PROTOKOL