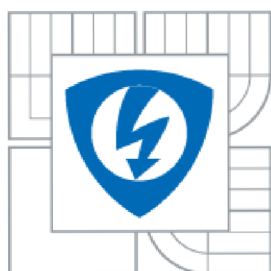




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY**

**FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION**

POUŽITÍ TERMORIZNÍ KAMERY V MĚŘICÍ TECHNICI
THE USE OF THERMAL IMAGING CAMERA IN AN INSTRUMENTATION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Robert Bayer

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

DOC. ING. LUDVÍK BEJČEK, CSC.

BRNO 2013

Originální zadání SEMESTRÁLNÍ práce

1. Seznamte se s bezdotykovými metodami měření teploty (zaměřte se zejména na termodiagnostiku) a nabízeným sortimentem IR zobrazovačů na trhu.
2. Seznamte se podrobně s IR zobrazovačem FLUKE Ti55FT a programovým vybavením SmartView.
3. Přeložte brožuru "Introduction to Thermography Principles" fy FLUKE.

ABSTRAKT

Cílem této práce je seznámit se s bezdotykovými metodami měření teploty a přiblížit je čtenáři. Dále si osvojit práci s IR zobrazovačem FLUKE Ti55FT (a programovým vybavením SmartView) a tento pak také přiblížit čtenáři. Nakonec přeložit brožuru "Introduction to Thermography Principles" od firmy FLUKE, která bude v elektronické formě přiložena k práci v příloze.

KLÍČOVÁ SLOVA

Termální zobrazovač, pyrometr, termočlánek, termografie, termogram, měření teploty, snímač.

ABSTRACT

The goal of this thesis is to get acquainted with contactless methods of measuring a temperature and give the reader an idea of it. Next goal is to master the working with IR visual display terminal FLUKE Ti55FT (and program equipment SmartView) and describe it to the reader too. Last goal is to translate the booklet "Introduction to Thermography Principles", published by FLUKE company, which will be enclosed in electronic form to the thesis in the appendix.

KEYWORDS

Thermal imager, pyrometer, thermocouple, thermography, termogram, temperature measurement, sensor.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Použití termovizní kamery v měřicí technice jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne:

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Ludvíku Bejčkovi, CSc. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé práce.

V Brně dne:

.....
podpis autora

Obsah

1. TROCHA Z HISTORIE ^[1]	- 7 -
Využití infračerveného záření v minulých staletích	- 7 -
Objev infračerveného záření.....	- 8 -
Současnost	- 10 -
Některé dnes používané termografické metody ^[12]	- 10 -
Projekty poslední doby využívající termografii	- 13 -
2. TEORIE BEZDOTYKOVÉHO MĚŘENÍ TEPLoty ^[1]	- 14 -
Základní informace o radiaci	- 14 -
Absolutně černé těleso	- 15 -
3. BEZKONTAKTNÍ TEPLOTNÍ ČIDLA	- 16 -
Bezkontaktní infračervený termočlánek.....	- 16 -
Optická čidla.....	- 17 -
Pyrometr	- 17 -
Termokamera.....	- 20 -
Linescanner	- 21 -
4. IR ZOBRAZOVAČ FLUKE Ti55FT ^[10]	- 23 -
Fluke IR-Fusion®	- 23 -
Velký, ostrý termoobraz.....	- 24 -
Ostrý obraz za každé situace	- 24 -
Zviditelnění anomálie.....	- 24 -
Radiometrická měření – „údaje za obrázkem“	- 24 -
Specifikace.....	- 24 -
Stručný návod k použití ^[11]	- 26 -
Skenování obrazu.....	- 30 -
Pozastavení/Uložení obrazu.....	- 30 -
Procházení uložených snímků	- 31 -
Smazání uloženého snímku.....	- 31 -
5. ZÁVĚR	- 32 -
Seznam obrázků	- 34 -
Použitá literatura.....	- 35 -

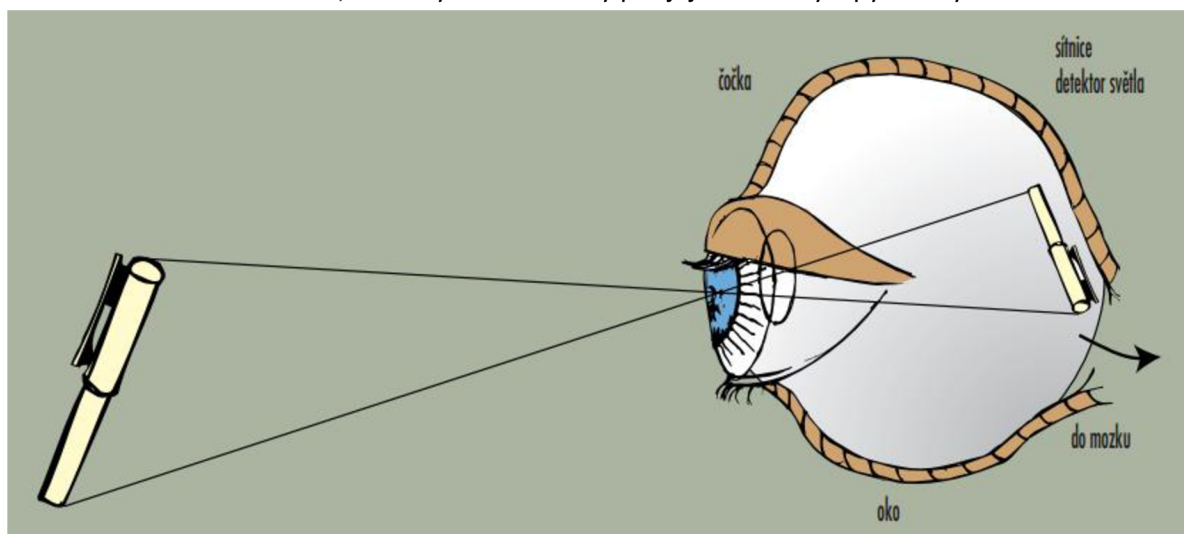
1. TROCHA Z HISTORIE^[1]

Naše oči vidí a vnímají pouze zlomek energie vyzářené (emitované) sluncem, které vnímáme jako světelné záření. Kdybychom ale mohli vnímat infračervené záření emitované všemi objekty, viděli bychom velmi dobře ve tmě. Infračervené záření je lidským okem neviditelné, ale můžeme ho detekovat tak, že cítíme ohřátí kůže.

Bezdotykové snímače teploty využívají snímání energie infračerveného záření pro měření teploty na dálku. Po určení vlnové délky záření emitovaného objektem určí snímač, pomocí rovnic popisujících vliv materiálu tělesa a vliv kvality jeho povrchu na infračervené měření, jeho teplotu.

Využití infračerveného záření v minulých staletích

Radiační termometrie se používá již po tisíce let. Prvním prakticky používaným infračerveným teploměrem bylo lidské oko. Lidské oko obsahuje čočku, která soustřeďuje emitované záření na sítnici. Ta je zářením podrážděna a vysílá signál k mozku, který slouží jako indikátor záření. Pokud je mozek zkušeností správně kalibrován, převádí tento signál na hodnotu teploty. Lidé využívali teplo infračerveného záření pro svůj prospěch po tisíce let. Zhruba od r. 2700 až 2200 před Kristem se z cihel vysušených na slunci stavěly pyramidy. Egypťané vyráběli rovněž kovové předměty, jako pilky, sečné nástroje a klíny, které zhotovovali zkušení řemeslníci své doby. Ti museli vědět, na jakou teplotu mají kov před jeho tvářením ohřát. Nejpravděpodobněji to dokázali na základě zkušenosti s barvou ohřátého železa. Kvůli nedostatku paliva byli stavitelé biblických časů závislí na infračerveném záření slunce, které vysušovalo cihly pro jejich chrámy a pyramidy.



Obr. 1: První infračervený teploměr^[1]

Zbytky Babylonské věže v Mezopotámii ukazují, že byla vystavěna z cihel vysušených na slunci a které jsou srovnatelné s pálenými cihlami a s kamenem. V Indii byla v období 2500 r. před Kristem postavena kanalizace, která vedla odpadní vody keramickými trubkami do kanálů podél cest. Tyto kanály byly přikryté cihlami a vyústovaly cihlových propustí, které vedly do řeky. Terakotové, cihlově červené, trubky byly vyráběny ohřevem materiálu na jistou danou teplotu a jejich odléváním do formy.

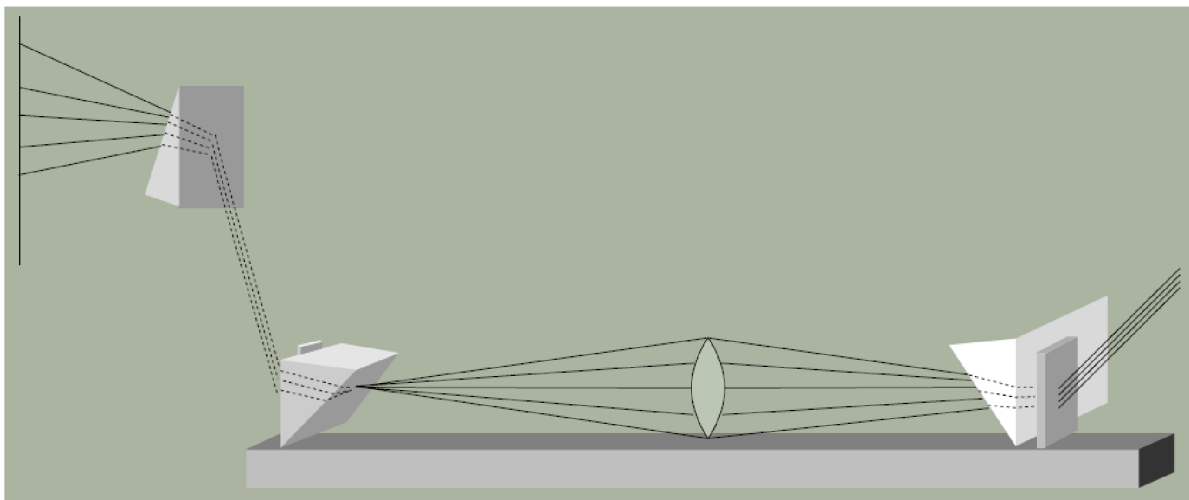
I v novějších dobách, byli odborní řemeslníci při pozorování, zda má materiál správnou teplotu pro odlévání nebo dělení, závislí na svých vlastních smyslech. Zrak se používal při výrobě a zpracování oceli, při výrobě a zpracování skla, při formování vosku, při výrobě keramiky. Zkušení řemeslníci se učili na základě své zkušenosti určit teplotu a množství tepla ve vypalovacích a sušících pecích, v tavících pecích, nebo ve sklářských pecích podle barvy vnitřku pecní komory. Stejně tak může například kovář odhadnout teplotu kovatelnosti podkovy podle její barvy, nebo sklář tvarovatelnost kusu skla podle jeho barvy nebo jasů.

Objev infračerveného záření

Teploměr vynalezl v Itálii Galileo Galilei (1564-1642) asi 200 let před tím, než bylo v roce 1800 objeveno infračervené záření, a asi 100 let předtím, než velký anglický vědec Sir Isaac Newton (1642-1727) zkoumal povahu světla v experimentech s hranolů.

Jak je publikováno v knize Optika, vydané roku 1704, použil Newton skleněných hranolů k tomu, aby ukázal, že bílé světlo může být rozloženo do barevného spektra. Nejméně zalomenou částí světla byla červená složka, následně pak v pořadí oranžová, žlutá, zelená, modrá, indigová a fialová, každá postupně přecházející v další. Newton také ukázal, že tyto barvy mohou být zpětně složeny dalším hranolem, čímž vznikne opět bílé světlo (Obr.2). Ve své práci Newton objasnil, že barva je základní vlastností světla a že bílé světlo je směsí různých barev. Hmota ovlivňuje barvu jen absorpcí některých druhů světla a propouštěním nebo odražením jiných.

Byl to také Newton, kdo roku 1675 vyslovil názor, že světlo je tvořeno malými částicemi, neboli „korpuskulemi“. V rámci této teorie měl Newton v úmyslu měřit relativní velikost těchto korpuskule. Z pozorování zatmění Měsíce a Jupitera odvodil, že všechny druhy světla se pohybují stejnou rychlostí. Na základě toho stanovil relativní velikost barevného světla pomocí měření úhlů lomu.



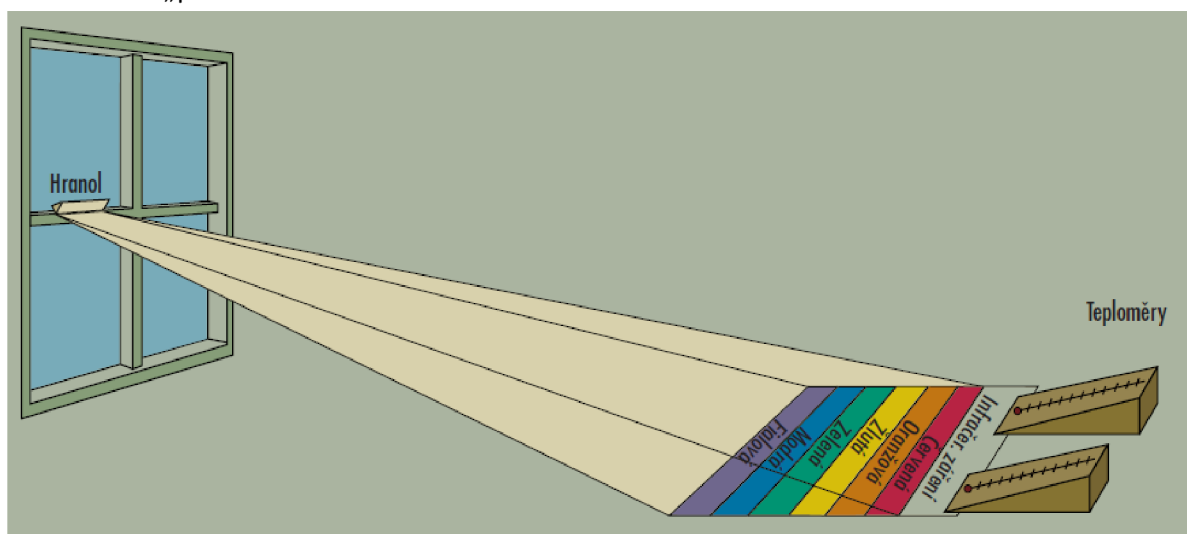
Obr.2: Newtonův rozklad a zpětná rekombinace bílého světla^[1]

V roce 1678 Christiaan Huygens (1629-1695), matematik, astronom a přírodovědec, zpochybnil Newtonovu korpuskulární teorii myšlenkou, že světlo může být lépe pochopeno za předpokladu, že je složeno z vln. V průběhu 19. Století byla tato teorie přijata a nakonec byla významná pro teorii elektromagnetické radiace Jamese Clerka Maxwella.

Ironií osudu pro infračervenou termografii je fakt, že infračervené záření bylo objeveno za použití konvenčního teploměru. Frederick William Herschel (1738-1822), vědec a astronom, je znám

jako otec hvězdné astronomie. Zkoumal planety a byl prvním vědcem, který plně popsal mléčnou dráhu. Také přispěl ke studiu slunečního záření. V roce 1800 v Anglii experimentoval se slunečním světlem. Při pozorování slunce přes barevná skla si Herschel všiml, že tepelný vjem nebyl v souladu s viditelným světlem (Obr.3). To jej vedlo k provedení experimentů se rtuťovými teploměry a skleněnými hranoly a ke správné hypotéze o existenci neviditelných infračervených vln. Před Herschelem nikoho nenapadlo použít zároveň teploměr a hranol a měřit, jaké množství tepla náleží určité barvě spektra.

Herschel rozložil sluneční záření na spektrum a testoval jeho různé části teploměrem, aby zjistil, jestli některé barvy nesou větší množství tepla než jiné. Zjistil, že když teploměr posouvá směrem k červené části spektra, teplota roste. Přitom zkusil posunout teploměr až za konec červené složky spektra a zjistit, zdali zde vymizí tepelný efekt. To se nestalo. Místo toho teplota vzrostla výše než v kterémkoliv místě před koncem červené složky spektra. Tato oblast byla nazvána infračervená, což znamená „pod červenou“.



Obr.3: Herschelův objev infračerveného záření^[1]

Jak interpretovat tuto oblast nebylo hned jasné. Zprvu se zdálo, že slunce vyzařuje tepelné paprsky stejně jako světelné, a že tepelné paprsky se lámou méně než světelné. Uplynulo půl století, než se zjistilo, že infračervené záření má stejné vlastnosti jako světelné vlny s jedinou výjimkou, a to, že nepůsobí na sítnici oka tak, aby vyvolalo světelný vjem.

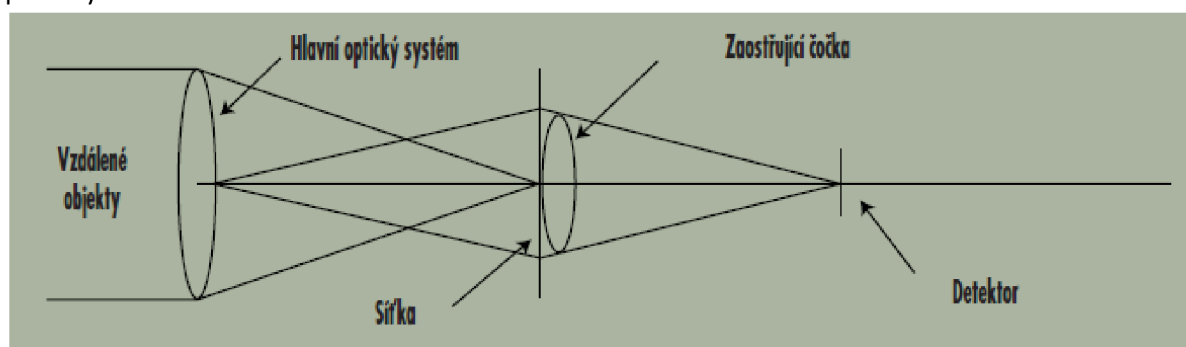
Na počátku 19. Století zkoumal sluneční spektrum německý fyzik Joseph von Fraunhofer (1787-1826). Do jeho spektroskopu vstupovaly paralelní paprsky bílého slunečního světla, které propouštěl skrze úzkou štěrbinu. Světlo dále rozkládal pomocí hranolu. Tím vytvořil nespočetné množství světelných čar, z nichž každá byla obrazem štěrbinu a každá obsahovala velmi úzké pásmo vlnových délek. Některé vlnové délky nicméně chyběly a proto obrazy štěrbinu na těchto vlnových délkách byly tmavé. Výsledkem bylo zjištění, že sluneční spektrum je přerušeno tmavými čarami. Tyto linie byly později důležité pro studium emise a radiace.

V roce 1864 odvodil James Clarck Maxwell (1831-1879) rovnice popisující základní zákony elektromagnetismu. Rovnice popisují že elektrický náboj, (zdroj), vyzařuje vlny prostorem. Vlny mají definované frekvence, které určují polohu zdroje v elektromagnetickém spektru. Toto, jak nyní víme, zahrnuje rádiové vlny, mikrovlny, infračervené záření, ultrafialové záření, záření x a gama záření.

Současnost

V roce 1901 byl podán první patent týkající se radiační termometrie. Přístroj používal termoelektrické čidlo, dával elektrický signál a byl schopen pracovat bez obsluhy. V roce 1931 byly na trh uvedeny první komerčně dostupné radiační termometry. Tyto přístroje byly široce používány k zaznamenávání a řízení průmyslových procesů. Používají se dodnes, zejména pro nízkoteplotní aplikace.

První radiační teploměry byly dostupné až po druhé světové válce. Prvními infračervenými kvantovými detektory, široce používanými v průmyslové radiační termometrii, byly fotodetektory se siričkem olovnatým, a byly původně vyvinuty pro vojenské účely. Také jiné typy kvantových detektorů byly původně vytvořeny pro vojenské aplikace a nyní jsou široce užívané v radiační termometrii. Mnohé infračervené radiační teploměry používají termoelektrické články jako detektory, které jsou citlivé na široké spektrum záření. Mají rozsáhlé použití u přístrojů řídicích procesy.



Obr.4: Infračervená optika naváděcího systému střely^[1]

Některé dnes používané termografické metody^[12]

Pasivní termografie

Pasivní termografie je zobrazování teplotních polí povrchů elektrických nebo mechanických objektů, které za provozu vyvíjejí teplo. Lze tak zjistit opotřebení mechanických prvků jako je např. převodovka, nebo ohřev elektrických obvodů ztrátovým výkonem např. na kontaktech silových spínačů.

Při pasivní termografii se jedná o monitorování objektů v rámci preventivní údržby. Hodnotící veličinou jsou teplotní rozdíly na povrchu objektu mezi teplotami změřenými a teplotami přípustnými.

Aktivní termografie

Aktivní termografie je založena na řízené stimulaci tepelné vlny v tělese a následným snímáním rozložení teploty IR zobrazovačem a analýzou signálu. Zdrojem tepla, který je nejčastěji vně tělesa je halogenová lampa, pulzní laser, výkonový blesk, xenonová výbojka nebo teplý proudící vzduch. Při známých vlastnostech materiálu lze pak z tepelného obrazu vyhodnotit rozsah a hloubku podpovrchové vady teoreticky nebo srovnáním s etalonem.

Pulzní termografie

Spočívá v rychlém (pulzním) externím nebo interním ohřevu tělesa a následném vyhodnocení ohřátí povrchu tělesa termokamerou. Podle uspořádání zdroje ohřevu se pulzní metoda dělí na

reflexní a průchodovou. Teplota povrchu se po řízené pulzní stimulaci vlivem rozptylu tepelné vlny rychle mění. Defekt v tělese způsobí snížení rychlosti šíření tepelné vlny. V důsledku tohoto jevu defekty ve větší povrchové hloubce jsou pozorovány později a se sníženým kontrastem v obraze. Pro materiály s vysokou tepelnou vodivostí, jako jsou kovy, je potřebná doba trvání pulzu v řádech milisekund, naproti tomu u materiálů s nízkou tepelnou vodivostí, jako jsou např. plasty, je doba trvání v řádech sekund. Oteplení obvykle činí několik stupňů Celsia, neboť řízený ohřev nikdy nesmí poškodit objekt.

Pulzy mají nejčastěji obdélníkový průběh a jejich frekvenční spektrum je složeno z řady spektrálních složek s různou amplitudou. Z hlediska prostupující tepelné vlny se dá tedy uvažovat o šíření vln s různou amplitudou s následným vyhodnocením fáze pomocí FFT analýzy. Nevýhodou pulzní termografie je stejně jako u pasivní termografie vliv prostředí, kmitání objektu a vliv emisivity povrchu tělesa.

Tato technologie se dá uplatnit v celé řadě aplikací od automatizované průmyslové kontroly kvality výrobků přes automobilový a energetický průmysl až po vojenské a vědecké účely. S výhodou lze použít pro detekci dutin a koroze materiálu, kontrolu sváru nebo tloušťky nátěru, či mapování tepelné vodivosti.

Mezi pulzní aktivní termografické principy patří také metoda SH (*Step Heating*) neboli metoda dlouhého pulzu. Od výše uvedené metody se liší tím, že je vyhodnocován tepelný obraz povrchu jak během stimulačního pulzu, tak po jeho ukončení. Metoda je někdy označována jako TRIR (*Time-Resolved Infrared Radiometry*).

Lock-in termografie

Z teorie signálu je známo, že modulaci signálu lze oddělit užitečnou složku signálu od složek rušivých. Namodulaci řízeného tepelného toku dopadajícího na diagnostikované těleso je založena lock-in termografie. Tepelná (obvykle sinusová) vlna proniká dovnitř tělesa a v místě změny prostředí, tj. anomálie struktury materiálu, se odráží zpět k povrchu. Na povrchu objektu dochází k interferencím vyzařovaného a primárního (dopadajícího) infračerveného záření. Termografickou kamerou snímané obrazce jsou tedy modifikovány vracející se tepelnou vlnou z vnitřku tělesa. Analýzou signálu z každého pixelu senzoru kamery lze stanovit odděleně amplitudu a fázový posun odezvy. Amplituda signálu z jednotlivých pixelů je ovlivněna nehomogenitou parametrů (pohltivostí, emisivitou) a nehomogenním rozložením ozáření povrchu tělesa. Avšak ve fázové informaci jsou uvedené efekty vyloučeny a metoda lock-in poskytuje nezkreslené informace o podpovrchové teplotě v tělese. Vyhodnocení amplitudy a fáze obrazového signálu lze provést různými způsoby jako jsou duální synchronní detekce, FFT analýza a nebo nejčastěji zpracování čtyř o 90° fázově posunutých obrazů.

Tato metoda se používá například při kontrole kvality žárových nástřiků.

Aktivní pulzní a lock-in ultrazvuková termografie

Výkonová ultrazvuková vlna prostupující materiálem rozkmitává částice hmoty a jejich vzájemným třením vzniká teplo. Tepelná odezva na anomálii ve struktuře se šíří k povrchu tělesa a tepelný obraz je vyhodnocen termografickou kamerou. Výkonový ultrazvukový měnič (100-1000 W, ultrazvuková frekvence 15-30 kHz) neumístěn přes laděný akustický nástavec. V literatuře se tato kombinace často označuje jako sonotrode. Při lock-in metodě je generován modulovaný ultrazvukový

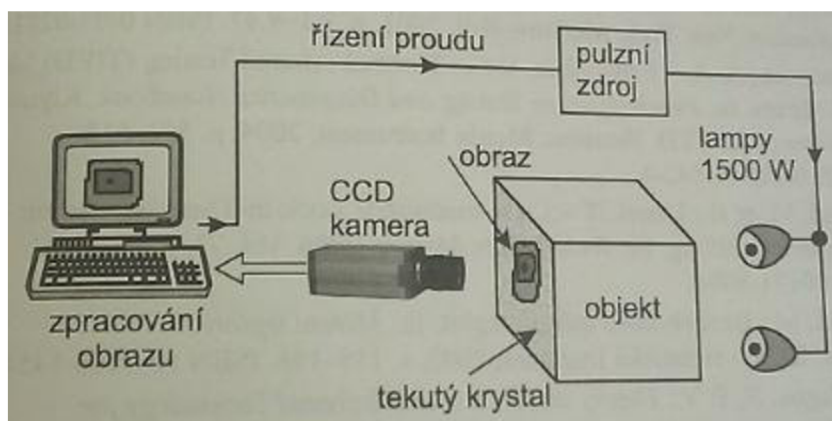
signál (modulační frekvence 0,03-0,25 Hz). Při pulzní metodě je generována skupina pulzů, tj. jeden tzv. burst impulz o délce 10 ms až 10 s. Oproti klasické lock-in termografii nedochází k interferenci vln na povrchu tělesa a defekt nelze vyhodnotit z fáze vlny.

Tato metoda je jedna z nejnovějších a nejefektivnějších, a díky schopnosti odhalit v kovu podpovrchový defekt o velikosti už od 20 μm , se využívá při výrobě součástek u kterých jsou kladeny maximální nároky na kvalitu materiálu.

Aktivní termografie s využitím kapalných krystalů

Kapalné krystaly jsou kapaliny, které se při zvyšování teploty udržují do určité teploty molekulární orientaci při skupenské přeměně z pevné do kapalné fáze, tj. molekuly ve tvaru tyčinek se volně pohybují, ale udržují si směrovost.

Bude-li dopadat na objekt s nanesenou vrstvou kapalného krystalu bílé světlo obsahující všechny barevné složky a odrazí se např. pouze spektrum modré barvy, znamená to, že ostatní spektrální složky byly krystalem absorbovány a oko nebo CCD kamera registruje modré zbarvení objektu. Pro defektoskopii se používají krystaly tzv. cholesterického typu. Aplikace kapalného krystalu pro aktivní termografii je patrná z obr.5.



Obr.5: Uspořádání aktivní termografie s CCD kamerou [\[12\]](#)

Tato metoda se používá například v medicíně při kontrole postupu nádorů, protože nijak nezatěžuje lidský organismus.

Vibrotermografie

Princip vibrotermografie je založen na periodickém silovém namáhání tělesa prostřednictvím řízeného budiče kmitů (20-50 Hz). Při průchodu mechanické napěťové vlny objektem dochází vlivem vzájemného tření částic hmoty a pohlcování energie k transformaci mechanických vln na vlny tepelné, které se šíří objektem k jeho povrchu. V místě defektu v materiálu je větší hodnota mechanického napětí, což má za následek také změnu tepelné vodivosti materiálu. Vysokofrekvenční signál budiče kmitů je nízkofrekvenčně modulován. Teplota na povrchu objektu je snímána termografickou kamerou a vyhodnocena lock-in měřícím systémem. Fázová informace z videosignálu zajišťuje optimální věrohodnost a reprodukovatelnost měření.

Mezi vibrotermografické defektoskopické metody je zařazována také metoda SPATE (*Stress Pattern Analysis by Thermal Emission*) firmy Ometron Ltd., UK. Objekt je u této metody zatěžován nízkofrekvenčně (řádově hertzy) elektrohydraulickým budičem.

Projekty poslední doby využívající termografii

Průzkumník slunce

18. 5. 2012 získala Evropská Vesmírná Agentura (ESA) zakázku od Velké Británie k postavení sondy další generace určené k průzkumu slunce. Sonda bude mít za úkol zjistit a monitorovat jak přesně slunce vytváří a „ovládá“ heliosféru (atmosféru, nebo spíše obal částic). Zakázka v hodnotě kolem 300 milionů eur je v plném proudu a start je naplánován na rok 2017.

Meteosat třetí generace (MTG)

MTG bude sestávat ze čtyř zobrazovacích a dvou zvukových satelitů. MTG-I zobrazovací satelity ponosou Přizpůsobivý kombinovaný zobrazovač (FCI) a Zobrazovač bouří. MTG-S zvukové satelity (vůbec prvně použité pro Meteosat) ponosou Infračervený zobrazovač (IRS) a Ultrafialový téměř infračervený spektrometr, které poskytne ESA.

Na MTG-I satelitu bude FCI kompletně skenovat povrch Země každých 10 minut za použití 16 spektrálních analyzátorů s velmi vysokým prostorovým rozlišením od 2 do 0,5 km. V módu rychlého skenování bude schopen opakovat 2,5 minutový proces každou čtvrtinu obletu kolem Země.

Na MTG-S satelitu bude IRS pořizovat detailní vertikální profil atmosférických teplot a vlhkosti s vysokým prostorovým rozlišením až 4 km. Tato data se pak budou zpracovávat pro velmi přesnou krátkodobou předpověď počasí.

Monitorování nestabilit v atmosféře přinese například včasné varování před extrémními bouřemi a údaje o stavu ozonu, oxidu uhličitého a sopečného popela v atmosféře.

QUADRO – noční vidění s fúzí obrazu

Po letech výzkumu a vývoje kanadský tým vědců a techniků vyvinul unikátní hybridní systém, zabudovaný do nočního vidění o hmotnosti pouhých 900 gramů, který je schopen jak funkce nočního vidění a termovize, tak i fúze těchto dvou funkcí. Spojením těchto funkcí vznikne dokonalý obraz i při velmi špatném osvětlení s možností velmi dobře vidět tepelnou stopu ukrytých nepřátel na bojišti. Díky prodloužené výdrži na baterii (až 7 hodin nepřetržitého provozu) tak poskytne vojenským jednotkám neocenitelnou výhodu v boji.

2. TEORIE BEZDOTYKOVÉHO MĚŘENÍ TEPLoty^[1]

Veškerá hmota – živá nebo neživá, tekutiny, pevné látky, plyny, si trvale vyměňují se svým okolím tepelnou energii ve formě elektromagnetické radiace. Pokud je mezi daným objektem a jeho okolím teplotní rozdíl, bude se energie přenášet ve formě tepla, chladnější objekt se bude ohřívat na úkor svého okolí, teplejší objekt se bude ochlazovat. Pokud má daný objekt stejnou teplotu jako jeho okolí, celková výměna energie radiací bude nulová.

V každém případě charakteristické spektrum radiace závisí na absolutních teplotách objektu a jeho okolí.

Základní informace o radiaci

Vývoj matematických vztahů popisujících radiaci byl velkým pokrokem při vývoji moderní teorie radiační termometrie. Schopnost kvantifikovat radiační energii vychází do značné míry z Planckovy kvantové teorie. Planck předpokládal, že záření je tvořeno diskretními množstvími energie, zvanými fotony nebo kvanta, jejichž velikost závisí na vlnové délce záření. Celková energie kvanta označovaná jako E se vypočte vynásobením Planckovy konstanty, $h=6,6256 \times 10^{-34}$, a frekvence záření v udávané v Hz.

V roce 1905 přišel Albert Einstein na to, že tato kvanta odpovídají částicím pohybujícím se rychlostí $2,9989 \times 10^8$ m/s. Pokud se tyto fotony pohybují rychlostí světla, řídí se teorií relativity, vyjádřené rovnicí $E^2=c^2p^2$ a fotony mají hybnost $p = E/c = h/\lambda$. Substitucí dostaneme: $E = hv = hc/\lambda$.

Z této rovnice je zřejmé, že množství vyzařované energie závisí na vlnové délce (nebo frekvenci). Čím kratší je vlnová délka, tím vyšší je energie.

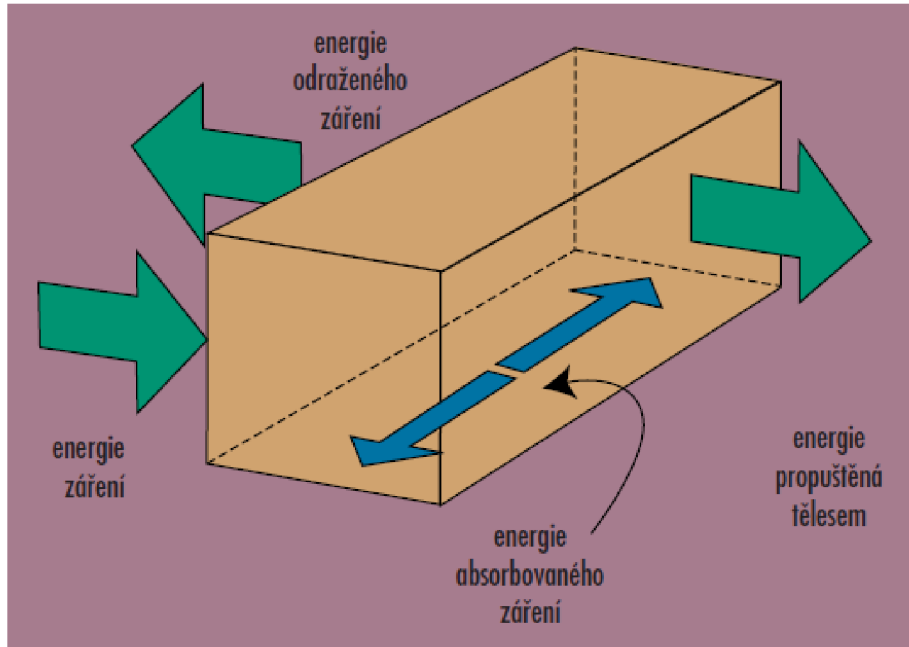
Množství radiace na jednotkovou vlnovou délku, nazývané spektrální koncentrace, taktéž závisí na vlnové délce. Množství radiace na jakékoliv vlnové délce, stejně jako spektrální distribuce, závisí na vlastnostech a teplotě emitujícího povrchu. Záření má také směr. Povrch může preferovat určitý směr, v němž energii vyzařuje. Při zkoumání záření se musí vzít v úvahu jak spektrální, tak i směrová distribuce.

Mezi krátké vlnové délky, které nesou nejvyšší množství energie, patří paprsky gama, paprsky X a pásmo ultrafialové radiace. Střední část spektra je oblast tepelných paprsků sahající přibližně od 0,1 do 1000 μ m, a spadá do něj část ultrafialových a všechny viditelné vlnové délky a infračervené vlnové délky.

Bezdotyková teplotní čidla pracují s infračervenou částí spektra. Infračervené pásmo leží mezi 0,78 μ m a 1000 μ m a je pouhým okem neviditelné. Infračervené pásmo se dělí na tři oblasti: blízké infračervené pásmo (0,78-3,0 μ m), střední (3,0-30 μ m) a vzdálené infračervené pásmo (30-300 μ m). V infračervené termometrii se běžně používá záření o vlnové délce 0,7-14 μ m. Výběr vlnové délky u různých aplikací se řídí atmosférickým přenosem záření.

Absolutně černé těleso

Jak ukazuje Obr.5, může být záření dopadající na objekt absorbováno, odraženo zpět, nebo může objektem procházet (pokud není neprůhledný). Pokud má objekt konstantní teplotu, potom musí být výkon emitovaného záření stejný jako výkon záření absorbovaného. V opačném případě se objekt ochlazuje (vyzařování je větší než absorpce) nebo zahřívá (absorpce je větší než vyzařování). Proto pro tělesa s konstantní teplotou platí, že absorpce, odraz a propuštění záření jsou v rovnováze.



Obr.6: Energetická rovnováha objektu^[1]

Základem radiační termometrie je koncepce absolutně černého tělesa. V roce 1860 definoval Kirchhoff absolutně černé těleso jako povrch, který záření neodráží ani nepropouští, ale pouze veškeré dopadající záření absorbuje, nezávisle na jeho směru a vlnové délce. U reálného tělesa se podíl pohlceného záření nazývá absorptivita α . Pro absolutně černé těleso je absorptivita rovna 1,0. Pro reálná tělesa je absorpce v rozmezí $0 \leq \alpha \leq 1$.

Absolutně černé těleso nejen pohlcuje veškeré dopadající záření, ale je také dokonale vyzařujícím tělesem. Aby popsal vyzařovací schopnosti povrchu ve srovnání s vyzařováním absolutně černého tělesa, definoval Kirchhoff emisivitu (ϵ) reálného povrchu jako poměr tepelné radiace při dané teplotě a radiace absolutně černého tělesa při stejné teplotě a za stejných spektrálních a směrových podmínek.

Nejpřesnější aproximací absolutně černého tělesa je dutina s vnitřním povrchem o konstantní teplotě, která komunikuje s okolím skrze malou díрку, jejíž průměr je velmi malý ve srovnání s rozměry dutiny. Většina záření vstupující dírkou je buď okamžitě absorbována, nebo je povrchem dutiny odražena zpět do dutiny (a nakonec také absorbována), zatímco z otvoru vychází zanedbatelné množství záření.

3. BEZKONTAKTNÍ TEPLOTNÍ ČIDLA

„Bezkontaktní teplotní snímače umožnily technikům přesné měření teploty tam, kde je velmi těžké nebo nemožné použít jiné teplotní snímače. V některých případech je to proto, že již při samotném použití je kontaktní čidlo zničeno, jako například kontaktní termočlánky nebo odporový teplotní detektor při měření teploty rozžhaveného kovu.

Žádný jiný snímač, než bezdotykový teploměr, není schopen provádět měření na velké vzdálenosti. To je nutné například při hledání horkých míst nebo problematických oblastí u destilačních přístrojů, nádob, izolací, trubek, motorů, nebo transformátorů. V oblasti vyhledávání a zjišťování vad přístrojů jsou ruční radiační termometry těžko překonatelné.“ ^[1]

Bezkontaktní infračervený termočlánek

„Využívá principu termoelektrického jevu. Může být případně používán také jako spolehlivý zdroj elektrického proudu, ale jeho energetická účinnost a výkon jsou malé.

Skládá se ze dvou kovů zapojených do série se dvěma spoji (kov A - spoj AB - kov B - spoj BA - kov A). Mají-li spoje navzájem různou teplotu, vzniká na každém ze spojů odlišný elektrický potenciál, který je zdrojem proudu.“ ^[2]

Výhody:

- Nízká cena (v řádech tisíců korun)
- Samonapájecí
- Bez posunu (driftu) měření
- Připojení na regulační zařízení a na displej standardního termočlánku
- Dosažení obtížně dostupných oblastí
- Vnitřní (jiskrová) bezpečnost

Nevýhody:

- Nelineární výstup
- Ovlivnění elektromagnetickou interferencí

Termočlánky dělíme dle použitých kovů a maximální teploty:

- Typ B 0 - 1700 °C
- Typ C 0 - 2300 °C
- Typ D 0 - 2300 °C
- Typ E -200 - 950 °C, chromel-konstantan
- Typ G 0 - 2300 °C
- Typ J 0 - 750 °C, 52,3 μV/°C, železo-konstantan
- Typ K -200 - 1250 °C, 40,8 μV/°C, chromel-alumel (Cr-Al)
- Typ N -270 - 1300 °C
- Typ R 0 - 1450 °C, platinarhodium-platina
- Typ S 0 - 1400 °C, 6,3 μV/°C
- Typ E -250 - 350 °C
- Typ T měď-konstantan



Obr.7: Termočlánkový teplotní senzor uzpůsobený pro měření teploty vzduchu^[6]

Optická čidla

Pyrometr

Jsou to bezdotykové teploměry, které určují teplotu měřeného tělesa z teplotního záření. Měří se jimi převážně teploty v rozsahu $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+3500\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pyrometr byl vynalezen Pietrem van Muschenbroeckem (1692-1761).

Pyrometry patří mezi bezdotykové teploměry. Ty se dělí na:

- přímo měřící bezdotykové teploměry - např. pyrometry
- zobrazovací bezdotykové teploměry - např. termovize

Podle způsobu detekce záření se pyrometry dělí na:

- Subjektivní - detektorem záření je lidské oko (jasové a barvové pyrometry)
- Objektivní - záření je detekováno selektivními (Si, Ge) nebo neselektivními (bolometrické, termoelektrické, pyroelektrické) detektory záření

Další dělení je podle využití spektrální oblasti záření:

- Monochromatické - pracují se zářením jedné nebo dvou vlnových délek
- Svazkové - pracují se zářením v širším (nebo celém) pásmu vlnových délek

Podle konstrukce jednotlivých částí pyrometrů může být provedeno dělení následujícím způsobem:

- Optický systém
 - o Clonkový
 - o Čočkový
 - o Zrcadlový
 - o Světlovaný
- Zaměřovací systém
 - o optický přes objektiv
 - o světelný (např. laserový paprsek)
 - o mířidlový (puškový)

Výhody:

- rychlost měření
- možnost měření i objektů, které se pohybují
- snadné měření teploty na obtížně dostupných místech
- bezproblémové měření velmi vysokých teplot
- nedochází k ovlivnění měřeného objektu
- měření probíhá bez rizika kontaminace a mechanických účinků na povrch měřeného objektu
- nízká až středně vysoká cena (v řádech tisíců až desetitisíců korun)

Nevýhody:

- měřený objekt musí být pro teploměr opticky viditelný
- pevné překážky dovolují pouze povrchové měření (ne vnitřní teplotu)
- nutnost ochrany čidla před prachem a kondenzujícími kapalinami
- měří se pouze povrchová teplota materiálů a je nutné brát v úvahu jejich emisivitu

„V **poměrovém pyrometru** (také podílový nebo dvoubarevný pyrometr) není měřena jenom intenzita v jednom vlnovém rozsahu, ale zobrazuje se poměr intenzit dvou „barev“. To znamená, že se teplota neurčuje na základě jasnosti, ale na základě barvy záření. Při tomto postupu nehraje emisivita žádnou roli, pokud se teplota nemění příliš rychle. Poměrové zpracování signálu je výhodné z hlediska malé citlivosti poměrového pyrometru na změnu velikosti žhavého objektu v jeho zorném poli. Pokud se třeba velikost žhavého objektu v zorném poli zmenší na polovinu, poměr obou signálů a tedy i údaj teploty pyrometru zůstane nezměněn. V případě běžného pyrometru by stejná změna velikosti měřeného signálu znamenala chybu, která by zcela zkreslila celé měření.

Pyrometr někdy teplotu vyhodnocuje, díky filtru úzkého vlnového rozsahu, pouze z malé části spektra záření. Takový pyrometr se nazývá **monochromatický** (úzkopásmový) – vyhodnocování signálu se děje jednoduchým způsobem a spektrální citlivost čidla zde nehraje žádnou roli.

Pokud je vlnový rozsah pyrometru širší, mluvíme o **svazkovém radiačním pyrometru** nebo totálním radiačním pyrometru. Tyto pyrometry tedy využívají tepelného záření ve velké oblasti vlnových délek (teoreticky v celém rozsahu), který je omezen pouze absorpční schopností detektoru a propustností optiky pyrometru. Emisivita nečerných zářičů je silně závislá na jakosti povrchu tělesa,

materiálu a teplotě. Protože korekce údaje pyrometru je velmi obtížná, používají radiační pyrometry k měření teploty pouze černé zářiče, popř. zářiče jim blízké.

Pro žhavé objekty se používají vizuální postupy, kdy obraz měřeného objektu je vytvářen objektivem v rovině vlákna pyrometrické žárovky. Toto vlákno, které je žhaveno proudem z baterie, je z wolframu. Pozorovatel sleduje jak měřený objekt, tak vlákno žárovky okulárem přes červený filtr. Tento filtr vymezuje danou vlnovou délku. Velikost proudu z baterie se dá regulovat pomocí reostatu a to se provádí až do okamžiku, kdy vlákno svou září splyne se září pozorovaného objektu. V obvodu žhavicí žárovky je pak obvykle zařazen měřicí přístroj, který udává teplotu vlákna a tím i měřeného objektu.“ [\[3\]](#)



Obr.8: Ukázka termometrů firmy FLUKE [\[7\]](#)

Termokamera

„IR zobrazovač, neboli „termokamera“, je blízký příbuzný pyrometru jen s tím rozdílem, že na rozdíl od pyrometru neměří teplotu pouze jednoho bodu (nebo průměrnou teplotu velmi malé oblasti) ale snímá znatelně větší plochu. Naměřené informace pak převádí na vizuální obraz zbarvený dle použité barevné škály.

Díky termovizním systémům dokážeme rychle, cíleně a přesně zaznamenat dynamiku ohřevu, chladnutí i detailní rozložení teploty na povrchu materiálu.

Pomocí infračervených kamerových systémů je možno detekovat kvalitu vstupních polotovarů, jako je maximální teplota, tvar předmětu a to včetně průhledných materiálů či celkový počet.

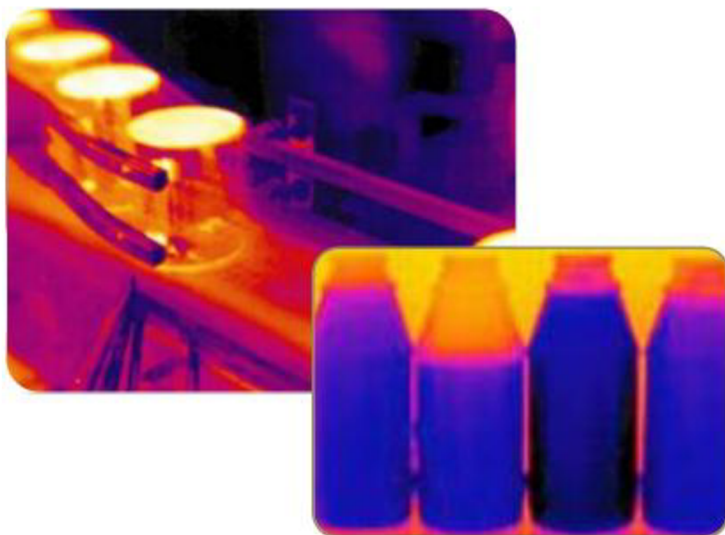
Infrasystémy dovolují měřit procesy s frekvencí až 1 kHz. U produktů z infrapropustných materiálů lze detekovat hladinu náplně či kvalitu sváru při svařování plastů.

Díky vysoce citlivým detektorům s citlivostí až 0,03 °C lze odhalit dutiny v kompozitních materiálech a pěnových výrobcích. Pomocí speciálního softwaru lze měřit dynamiku chladnutí sváru kovových i nekovových objektů.

Ve spojení s aktivními zdroji infrazářením lze nedestruktivně testovat strukturální vady, mikrotrhliny a podpovrchové anomálie. ^[4]

„Dále se dají použít například k hledání úniků tepla z budov, sledování elektrických vedení a jejich poškození, neinvazivní detekci zánětů pod kůží, detekci osob v zabezpečených objektech a nočním vidění.

Výstupem z termovizní kamery je infračervený snímek, odborně termogram, resp. Termovizní snímek. Radiometrické termokamery pak uživateli umožní určit teplotu v jednotlivých bodech termogramu. Určení teploty však není snadné, protože závisí na několika parametrech. Jeden z hlavních parametrů je emisivita tělesa. Absolutně černé těleso má emisivitu 1, leklá tělesa mají emisivitu velmi malou (až 0,1). Malá emisivita většinou znamená menší přesnost měření. Do měřeného zářivého toku tělesa totiž může značným způsobem vstoupit zdánlivá odražená teplota, která ovlivňuje naměřený výsledek. ^[5]



Obr.9: Termogram z kontroly výrobního procesu^[4]



Obr.10: Ukázka termokamer firmy FLUKE^[8]

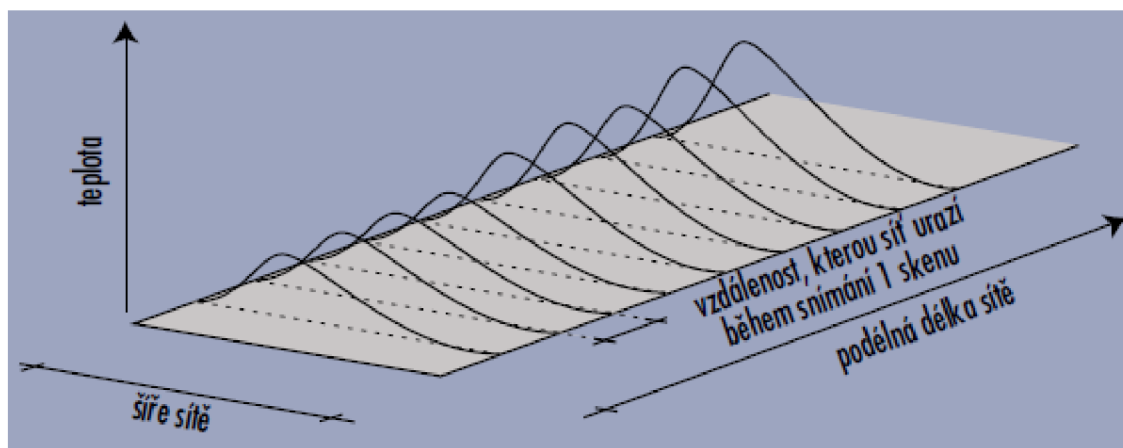
Linescanner

„Linescannery poskytují obraz povrchových teplot pohybujícího se výrobku – jako například kovových plátů, skla, textilu, stočeného plechu nebo plastů. Obsahují čočku, otočné zrcadlo, které skenuje zorné pole přístroje, detektor, který načítá hodnoty tak, jak se zrcadlo pohybuje, a počítačový systém ke zpracování dat.

Jak zrcadlo rotuje, linescanner provádí mnohonásobná měření celého povrchu, a tím získává celkový teplotní profil produktu. Jak se produkt pohybuje pod senzorem, postupné snímání poskytne profil celého produktu, od kraje ke kraji a od začátku do konce.

Počítač promění tento profil v termografické zobrazení produktu, za použití rozličných barev, které reprezentují jednotlivé teploty, nebo může vytvořit „mapu“ výrobku.

Linescannery mohou být extrémně drahé. Představují ale jedinou možnost k získání úplného teplotního profilu nebo obrazu pohybujícího se produktu.“^[1]



Obr.11: 1-D skeny složené do 2-D obrazu ^[1]



Obr.12: Linescanner MP150 firmy Raytek ^[9]

4. IR ZOBRAZOVAČ FLUKE Ti55FT^[10]

Nejlepší snímky ze všech termokamer firmy FLUKE bezpochyby zvládne řada modelů Ti5x. Nabízejí detektory 320 × 240 s nejlepší teplotní citlivostí v oboru pro vysoce kvalitní snímky s vysokým rozlišením. Díky obnovovací frekvenci detektoru 60 Hz jsou teploty zobrazovány živě na 125mm velkém barevném displeji.

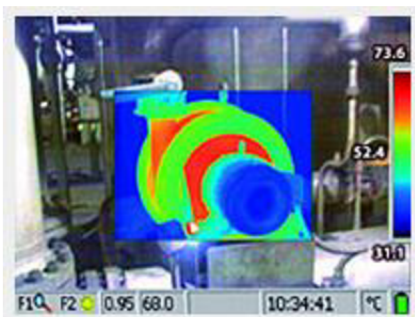
Všechny modely FT nabízejí inovativní technologii obrazové analýzy IR-Fusion™. Technologie IR-Fusion zachycuje kromě infračerveného snímku i obrázek při viditelném světle a tím snímá tajemství z analýzy infračerveného obrazu. Pomáhá lépe identifikovat a zaznamenat podezřelé součásti a umožňuje provést správnou opravu hned napoprvé.



Obr.13: IR zobrazovač FLUKE Ti55 FT^[10]

Fluke IR-Fusion®

Technologie Fluke IR-Fusion® spojuje reálný vizuální snímek s termosnímek. Spojuje dva obrazy do jednoho s možností prolínání mezi dvěma obrazy nebo vytvoření kombinací obrazu v obraze. Limity signalizace lze navrstvit přes obraz ve viditelném světle, aby bylo možno přesně určit části, které přesahují stanovený teplotní limit. Vizuální obrazy i termoobrazy je možné využít v protokolech. Toto urychluje dokumentaci tak, že omezí nutnost vyhledávání jednotlivých snímků pořízených samostatným digitálním fotoaparátem. Technologie IR Fusion pomáhá lépe identifikovat a zaznamenat podezřelé části a umožňuje provést opravu správně hned napoprvé.



Obr.14: Technologie Fluke IR-Fusion^[10]

Velký, ostrý termoobraz

Díky největšímu displeji (125 mm) dostupnému u tohoto typu termokamery v kombinaci s nízkošumovými čidly VOx vytvářejí přístroje Fluke IR FlexCam obrazy výjimečně vysoké kvality, na kterých jsou vidět i nejmenší teplotní rozdíly. Jsou srovnatelné s obrazy, které lze běžně pořídit pouze mnohem dražšími přístroji.

Ostrý obraz za každé situace

Inovovaný objektiv otočný v rozsahu 180° umožňuje zobrazit a zachytit obrazy v těžko dostupných místech. Při prohlížení vysokých objektů, pohledech pod stroj nebo kolem nepohyblivých překážek zůstává displej jasně viditelný. Otočný ovladač SmartFocus usnadňuje získání stabilního a ostrého obrazu. Pro otáčení kroužkem ostření, nemusíte sundávat ruku z přístroje.

Zviditelnění anomálie

Díky integrovaným funkcím, jakou je AutoCapture (automatické zaznamenání), pomáhají termokamery IR FlexCam řešit komplikované problémy. Přístroj lze snadno nastavit na automatické zaznamenání pouze těch obrazů, u kterých je překročen teplotní limit. Tímto způsobem lze zaznamenat obtížně zjistitelné občasné problémy a rychleji je analyzovat tím, že se soustředíte pouze na obrazy obsahující anomálie.

Radiometrická měření – „údaje za obrázkem“

Plně radiometrické termokamery zaznamenávají a ukládají kalibrované teplotní údaje pro matici obsahující tisíce bodů, ze kterých se sestavuje termosnímek. To umožňuje provádět detailní analýzu a měnit klíčové parametry, jako jsou emisivita nebo teplotní rozsah, buď v provozu přímo na kameře, nebo v kanceláři pomocí počítačového softwaru.

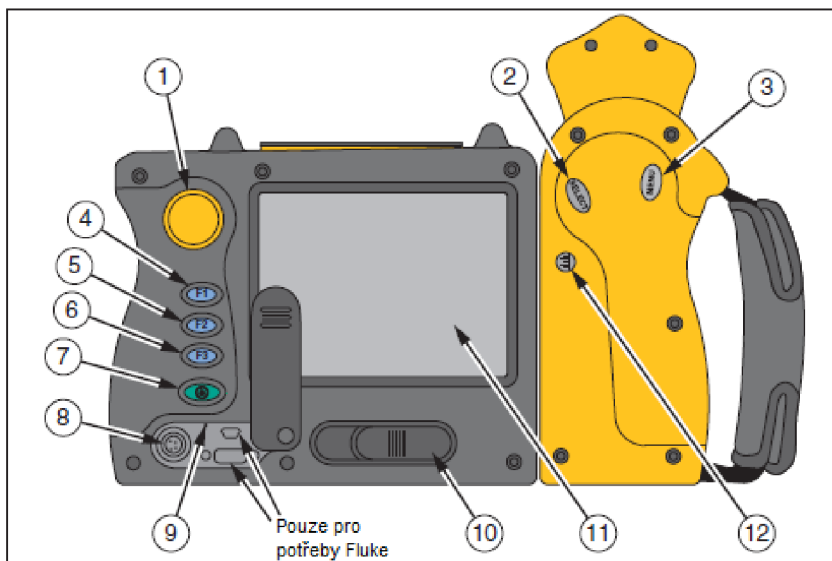
Specifikace

Termální zorné pole	20 mm objektiv 23° × 17° 10,5 mm objektiv 42° × 32° 54 mm objektiv 9° × 6°
Prostorové rozlišení	1,30 mrad
Minimální vzdálenost ostření	0,15 m
Teplotní citlivost	≤0,05 °C (50 mK) při 30 °C
Získávání dat z detektoru	60 Hz
Zaostření	SmartFocus, nepřetržité ostření jedním prstem
Infračervený digitální zoom	2x, 4x, 8x
Typ detektoru	320 × 240 ohniskový rovinný svazek, nechlazený mikrobolometr s oxidem vanadu (VOx) s mezerou 25 mikronů
Spektrální pásmo	8 μm až 14 μm

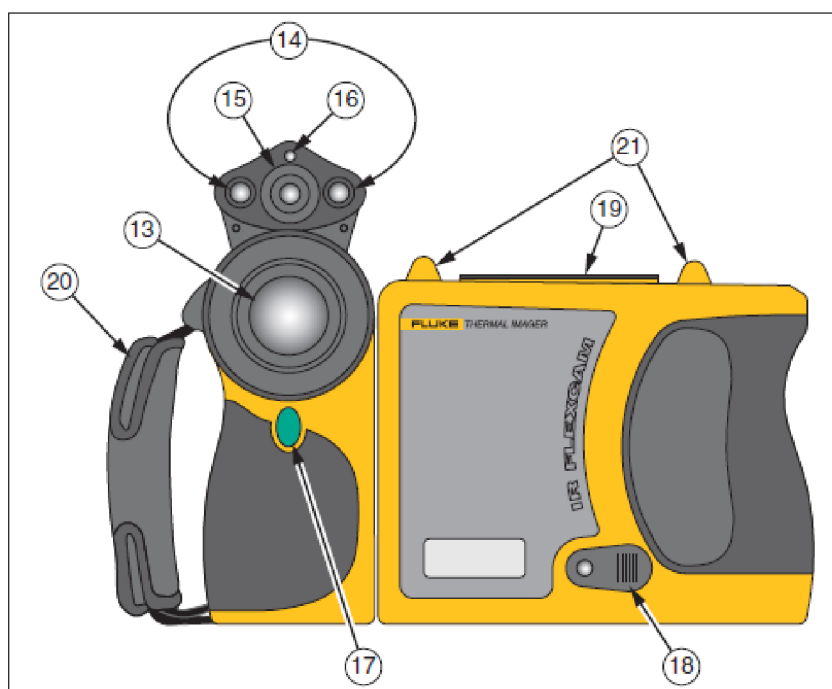
Optické provozní režimy v termokameře	Pouze termální, pouze viditelné světlo nebo spojení termálního obrazu a obrazu viditelného světla. Obraz v obraze
Fotoaparát pro viditelné světlo	1280 × 1024 pixelů, barevný
Digitální zoom pro viditelné světlo	2×, 4×
Kalibrovaný teplotní rozsah	-20 °C až 600 °C ve 3 rozsazích
Rozsah 1	-20 °C až 100 °C
Rozsah 2	-20 °C až 350 °C
Rozsah 3	250 °C až 600 °C
Přesnost	±2 °C nebo 2 % (platí vyšší hodnota)
Režimy měření	Střední bod, střední okénko (oblast min./max., průměr), pohyblivá místa/okénka, textové vysvětlivky / pole stanovené uživatelem, izotermy, automatická detekce studeného a horkého bodu, barevná optická signalizace nad a pod
Korekce emisivity	0,1 až 1,0 (přírůstky po 0,01)
Digitální displej	125 mm velký digitální displej s vysokým rozlišením
Volitelné objektivy	
54 mm teleobjektiv	Vysoce přesný germaniový objektiv
Zorné pole	9° horizontálně × 6° vertikálně
Prostorové rozlišení	0,47 mrad
Minimální vzdálenost ostření	0,6 m
0,5 mm širokoúhlý objektiv	Vysoce přesný germaniový objektiv
Zorné pole	42° horizontálně × 32° vertikálně
Prostorové rozlišení	2,45 mrad
Minimální vzdálenost ostření	0,3m
Provozní teplota	-10 °C až +50 °C
Teplota skladování	-40 °C až +70 °C

Relativní vlhkost	Provoz a skladování 10% až 95%, nekondenzující
Odolnost krytí vůči vodě a prachu	IP54
Hmotnost (včetně baterií)	1,95 kg
Rozměry termokamery (V × Š × H)	162 × 262 × 101 mm

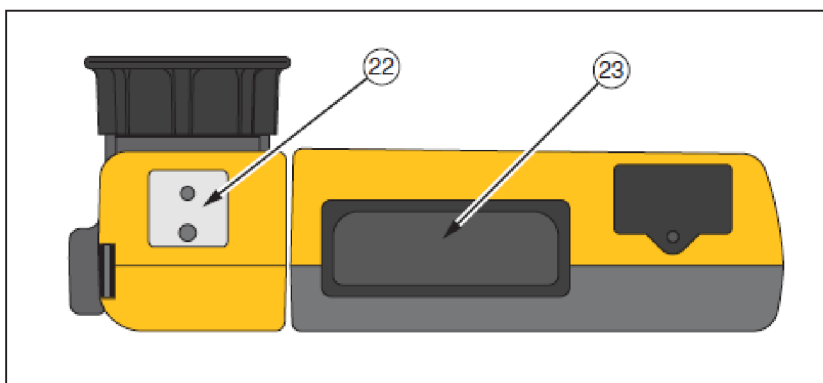
Stručný návod k použití^[11]



Obr.15: Pohled na kameru Fluke Ti55FT zezadu^[11]

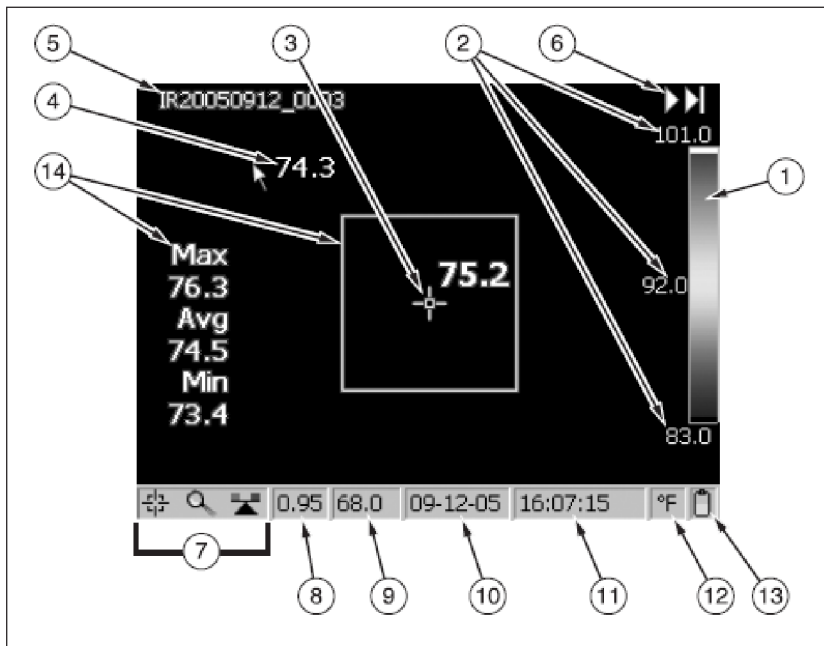


Obr.16: Pohled na kameru Fluke Ti55FT zepředu^[11]

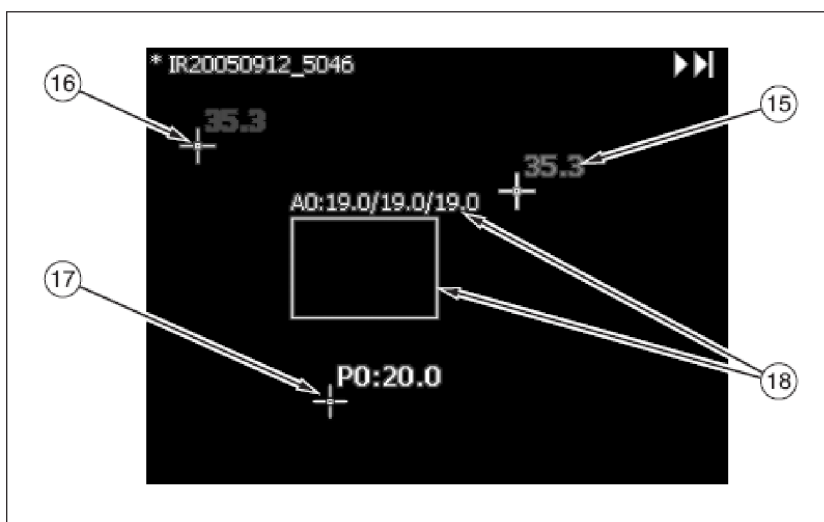


Obr.17: Pohled na kameru Fluke Ti55FT zespodu ^[11]

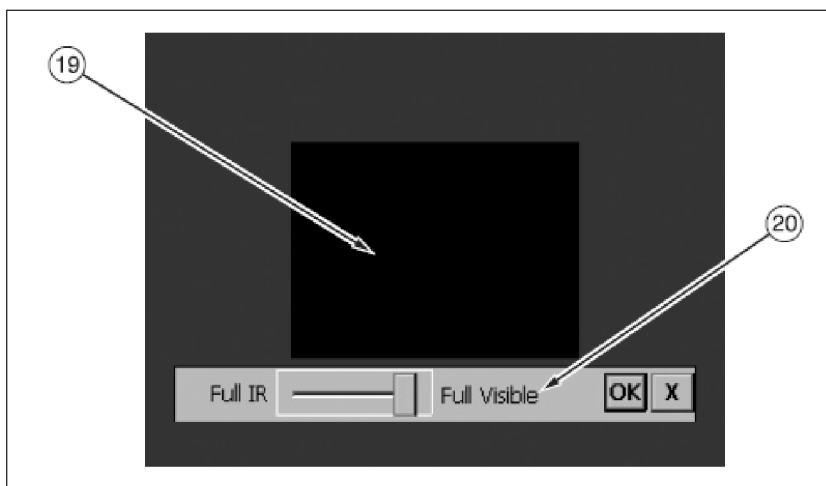
Položka	Popis
1	Ovladač myši – Slouží k pohybu ukazatele po snímcích a menu.
2	Tlačítko „select“ – Slouží ke kliknutí myší nebo jako funkce „enter“.
3	Tlačítko „menu“ – Slouží k zobrazení menu.
4	Programovatelné tlačítko „F1“ – Může být naprogramováno k různým funkcím v menu.
5	Programovatelné tlačítko „F2“ – Může být naprogramováno k různým funkcím v menu.
6	Programovatelné tlačítko „F3“ – Může být naprogramováno k různým funkcím v menu.
7	Vypínací tlačítko – Slouží k zapnutí a vypnutí kamery a režimu spánku.
8	Pomocný napájecí port – Připojení AC/DC adaptéru.
9	Reset – Skryté tlačítko k restartu kamery přístupné například kancelářskou sponkou.
10	Západka baterie – Slouží k vyjmutí baterie.
11	LCD displej – Na slunci čitelný barevný displej k prohlížení snímků a přístupu do menu kamery.
12	„LEVEL & SPAN“ tlačítko – Slouží k přeškolení barevné palety podle maximální a minimální teploty v daném snímku a k nastavení úrovně funkce IR-Fusion.
13	Infračervené čočky – Germaniové čočky s manuálním ostřením.
14	Svítilna/Blesk – Když je povolena svítilna, osvětlí temnější pracovní oblasti. Když je povolen blesk, osvětlí daný objekt během zachycování snímku pro lepší kvalitu snímku viditelného světla. Svítilna a blesk mohou být zapnuté ve stejnou dobu.
15	Čočky viditelného světla – Zachycují snímky ve viditelném spektru.
16	Laser – Slouží k označení objektu, na který je kamera namířena.
17	Spoušť – Slouží k pozastavení a/nebo uložení snímku. Také slouží k potvrzení změn nastavení, zavření menu a návrat do snímacího režimu.
18	Video konektor – RCA video konektor k připojení kamery k TV.
19	Slot paměťové karty CompactFlash – Vysouvací tlačítko a slot pro paměťovou kartu CompactFlash
20	Poutko na ruku – Nastavitelné poutko pro lepší stabilitu při zachycování snímků.
21	Úchytky pro popruh přes krk
22	Úchytko pro stativ – Standardní 1/4-20 díra se závitem k připevnění stativu.
23	Baterie – Fluke 7 voltová Li-Ion baterie k hlavnímu napájení.



Obr.18: Pohled na displej kamery – Příklad 1 [\[11\]](#)



Obr.19: Pohled na displej kamery – Příklad 2 [\[11\]](#)














Obr.20: Pohled na displej kamery – Příklad 3 [\[11\]](#)

Položka	Popis
1	Barevná paleta – Paleta použitá v zobrazeném snímku; klikněte pro změnu barevné palety
2	Úroveň a rozpětí – Maximální, středová a minimální teplota na paletě. Klikněte na teploty ke změně limitních hodnot rozsahu.
3	Teplota středového bodu – Průměrná teplota 4 středových pixelů.
4	Ukazatel myši a teploty – Teplota v oblasti ukazatele myši.
5	Název snímku – Název snímku vytvořený podle šablony (datum a pořadové číslo snímku). Zobrazuje se pouze při prohlížení uložených snímků.
6	Šipky k prohlížení snímků – Zobrazí se při prohlížení uložených snímků. Klikněte pro přejítí na další/předchozí snímek.
7	Ikony programovatelných tlačítek – Ikony funkcí programovatelných tlačítek F1, F2 a F3. Klikněte pro změnu funkce tlačítka.
8	Emisivita – Používaná kamerou k výpočtu teplot. Klikněte na číslo pro změnu emisivity.
9	Teplota pozadí - Používaná kamerou k výpočtu teplot. Klikněte na číslo pro změnu teploty pozadí.
10	Datum – Aktuální datum; klikněte pro změnu.
11	Čas – Aktuální čas v 24-hodinovém režimu; klikněte pro změnu.
12	Teplotní stupnice – Používána k zobrazení teploty v dané stupnici; klikněte pro změnu stupnice.
13	Napájení – Indikátor AC zdroje nebo stavu baterie; klikněte pro zjištění zbývajcího času při používání na baterii před jejím vybitím.
14	Středový rámeček s teplotami – Středová oblast 50 × 50 pixelů s maximální, průměrnou a minimální teplotou v rámečku (pokud zapnuto).
15	Ukazatel nejvyšší teploty – Nejvyšší teplota na snímku; vždy červenou barvou (pokud zapnuto).
16	Ukazatel nejnižší teploty – Nejnižší teplota na snímku; vždy modrou barvou (pokud zapnuto).
17	Měřený bod – Teplota označeného bodu na snímku. Možno přidat až tři značky (pokud zapnuto).
18	Měřená oblast – Minimální, průměrná a maximální teplota v označené oblasti na snímku. Možno přidat až tři oblasti (pokud povoleno).

19	Obraz v obraze (PIP) – Obvyčejný nebo promíchaný infračervený/viditelný snímek se zobrazí v prostřední čtvrtině obrazovky a viditelný snímek ve zbytku (pokud povoleno).
20	Ovládání funkce IR-Fusion – Používáno k nastavení úrovně promíchání od plně infračerveného snímku po viditelné světlo nebo něco mezi tím. Vypnuto při použití 10 mm a 54 mm čočky.

Tabulka funkcí programovatelných tlačítek:

Položka	Popis
	Středový bod/Středová oblast – Slouží k přepínání středový bod / středový bod + středová oblast / vypnuto.
	Zoom – Rychlé přepínání mezi 1x, 2x, 4x a 8x zoomem.
	Světlost – Rychlé přepínání mezi tmavším, normálním a světlejším zobrazením displeje.
	Poznámka – Rychlý přístup k editoru poznámek snímku.
	Procházet snímky – Rychlé zobrazení posledního uloženého nebo prohlíženého snímku.
	Procházet náhledy – Rychlé přepnutí do režimu prohlížení miniatur snímků na paměťové kartě.
	Viditelnost palety – Rychlé zapnutí/vypnutí barevné palety.
	Viditelnost lišty značkovače – Rychlé zobrazení/skrytí lišty značkovače pro rychlé přidání dalších bodů nebo oblastí pro měření teploty na snímku.
	Svítilna – Rychlé zapnutí/vypnutí LED svítilny. Po 60 vteřinách se automaticky svítilna vypne.
	Laser – Pomáhá rychle určit na co je kamera zaměřena. Bod z laseru je viditelný na snímku.
	Zapnout sekvenční snímání – Rychlé zapnutí automatického snímání.
	Vypnout sekvenční snímání – Rychlé vypnutí automatického snímání.
	Vylepšení obrazu – Rychlé přepínání mezi stupni vylepšení obrazu: vypnuto, normální, střední, vysoké.
	Obraz v obraze – Rychlé přepnutí mezi celoobrazovkovým režimem a režimem obraz v obraze.
	Kalibrovat – manuální zapnutí kalibrace.

Skenování obrazu

1. Zapněte kameru
2. Sundejte krytku čočky a namiřte kameru na požadovanou oblast
3. Manuálně zaostřete obraz
4. Tlačítkem „Level&Span“ automaticky nastavte teplotní rozsah

Pozastavení/Uložení obrazu

Po naskenování obrazu zmáčkněte krátce spoušť pro pozastavení obrazu. V levém horním rohu se objeví nápis „Paused“ a nyní máte možnost pozastavený obraz v kameře dále analyzovat. Pokud nejste s obrazem spokojeni, zmáčkněte rychle spoušť a kamera se vrátí do skenovacího režimu. Pokud jste s obrazem spokojeni, podržte spoušť na 2-3 vteřiny a pozastavený obraz se uloží na

paměťovou kartu pod jménem podle šablony. Poté krátce zmáčkněte spoušť pro návrat do skenovacího režimu.

Procházení uložených snímků

1. Ujistěte se, že je vložena paměťová karta a zmáčkněte „Menu“.
2. Myší najedte na položku „Browse Images“ ve vyskakovacím menu a zmáčkněte „Select“.
3. Myší najedte na požadovaný snímek a zmáčkněte dvakrát „Select“.
Pokud nevidíte požadovaný snímek na první stránce, myší nalistujte pomocí šipek vlevo/vpravo na spodní straně obrazovky příslušnou stránku.
4. Zmáčkněte spoušť pro zavření otevřeného snímku a návrat do skenovacího režimu.

Smazání uloženého snímku

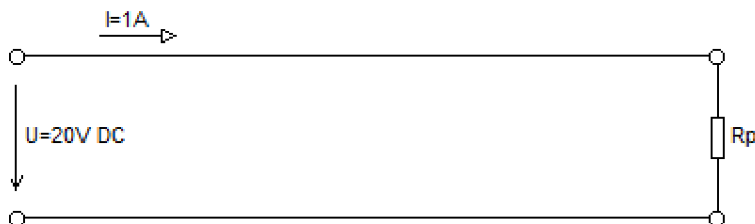
1. Ujistěte se že je vložena paměťová karta a zmáčkněte „Menu“.
2. Myší najedte na položku „Browse Images“ ve vyskakovacím menu a zmáčkněte „Select“.
3. Myší najedte na snímek který chcete smazat, ten se zvýrazní a zmáčkněte „Select“.
4. Najedte myší na tlačítko „Delete“ a zmáčkněte „Select“. Objeví se dialogové okno: vyberte „Yes“ pro smazání snímku, „No“ pro jeho zachování nebo „Cancel“ pro zrušení operace a návrat na prohlížení snímků.
Pokud nevidíte požadovaný snímek na první stránce, myší nalistujte pomocí šipek vlevo/vpravo na spodní straně obrazovky příslušnou stránku.
5. Zmáčkněte spoušť pro zavření náhledů a návrat do skenovacího režimu.

5. ZÁVĚR

Cílem práce je seznámit sebe a další čtenáře s principy termografie, využitelností termokamery a dalších bezdotykových teplotních snímačů v měřící technice a základními prvky ovládání termokamery Fluke Ti55FT.

Jako demonstrační projekt jsem si připravil proměření teploty svorkovnice vlivem přechodového odporu při stejném napětí a proudu a rozdílném momentu dotažení šroubu.

Schéma zapojení:



kde R_p reprezentuje přechodový odpor ve svorkovnici.

Na laboratorním zdroji TESLA BK127 sem nastavil proud 1 A a napětí 20 V. Svorkovnici jsem použil klasickou „čokoládku“ na 250 V, kterou jsem předem zbavil veškeré izolace pro lepší měření teploty. Drát je klasický měděný vodič o průřezu $1,5 \text{ mm}^2$. Pomocí digitálního momentového klíče firmy Natis s rozlišením 0,01 Nm jsem poté postupně dotahoval uchycovací šroubek ve svorkovnici na moment 0,1 Nm, 0,4 Nm a 0,7 Nm. Ke snímání jsem použil termální zobrazovač Fluke Ti55FT s 20 mm objektivem. Mezi jednotlivými měřeními jsem počkal dostatečně dlouho (nejméně však 5 minut), než se ustálí teplota svorkovnice, kvůli zbytkovému teplu z ohřátí rukou při dotahování. Pro co nejlepší přehlednost jsem zvolil teplotní paletu v odstínech šedi.

Při dotažení šroubku na moment 0,1 Nm se drát v místě styku se svorkovnicí zahřál na $23,63 \text{ }^\circ\text{C}$, jak je vidět na následujícím obrázku.



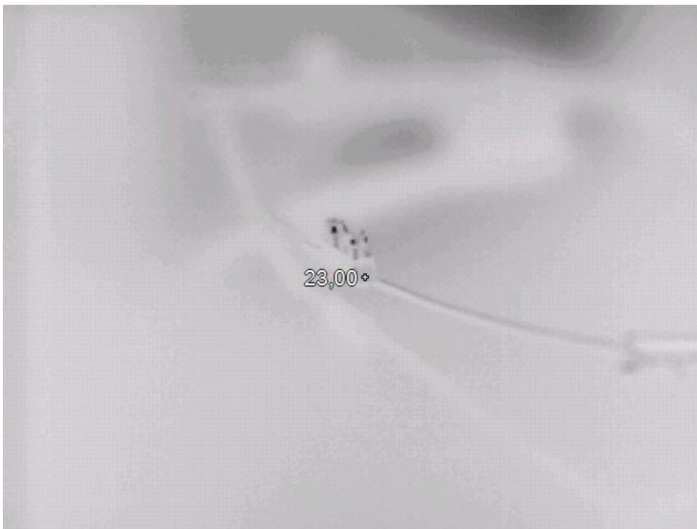
Obr.21: Zahřátí spoje v místě přechodového odporu při utažení svorky na 0,1 Nm

Při dotažení šroubku na 0,4 Nm se drát v místě dotyku zahřál na 23,06 °C.



Obr.22: Zahřátí spoje v místě přechodového odporu při utažení svorky na 0,4 Nm

A nakonec při dotažení šroubku na 0,7 Nm se drát ohřál na 23,00 °C.



Obr.23: Zahřátí spoje v místě přechodového odporu při utažení svorky na 0,7 Nm

Je zde tedy vidět, že i při tak slabém proudu jako je 1 A dělá rozdíl teplot při různých stupních utažení svorkovnice více než 0,6 °C. Při dotažení silnějším jak 0,4 Nm už není teplotní rozdíl přechodového odporu tak markantní, což znamená, že při „silném“ utažení se například při výrobě musí počítat s ekonomicky výhodnou hranicí, kdy se ještě vyplatí investovat do energie potřebné pro dokonalejší spoj a kdy je spoj dostatečně kvalitní pro potřeby použití. Proto je dobré hlavně v energetických aplikacích omezit přechodový odpor důkladným očištěním kontaktů a jejich dostatečně silným dotažením s ohledem na ekonomické hledisko při hromadné výrobě.

Seznam obrázků

<i>Obr.1: První infračervený teploměr</i>	- 7 -
<i>Obr.2: Newtonův rozklad a zpětná rekombinace bílého světla</i>	- 8 -
<i>Obr.3: Herschelův objev infračerveného záření</i>	- 9 -
<i>Obr.4: Infračervená optika naváděcího systému střely</i>	- 10 -
<i>Obr.5: Uspořádání aktivní termografie s CCD kamerou</i>	- 12 -
<i>Obr.6: Energetická rovnováha objektu</i>	- 15 -
<i>Obr.7: Termočlánekový teplotní senzor uzpůsobený pro měření teploty vzduchu</i>	- 17 -
<i>Obr.8: Ukázka termometrů firmy FLUKE</i>	- 19 -
<i>Obr.9: Termogram z kontroly výrobního procesu</i>	- 21 -
<i>Obr.10: Ukázka termokamer firmy FLUKE</i>	- 21 -
<i>Obr.11: 1-D skeny složené do 2-D obrazu</i>	- 22 -
<i>Obr.12: Linescanner MP150 firmy Raytek</i>	- 22 -
<i>Obr.13: IR zobrazovač FLUKE Ti55 FT</i>	- 23 -
<i>Obr.14: Technologie Fluke IR-Fusion</i>	- 23 -
<i>Obr.15: Pohled na kameru Fluke Ti55FT zezadu</i>	- 26 -
<i>Obr.16: Pohled na kameru Fluke Ti55FT zepředu</i>	- 26 -
<i>Obr.17: Pohled na kameru Fluke Ti55FT zespodu</i>	- 27 -
<i>Obr.18: Pohled na displej kamery – Příklad 1</i>	- 28 -
<i>Obr.19: Pohled na displej kamery – Příklad 2</i>	- 28 -
<i>Obr.20: Pohled na displej kamery – Příklad 3</i>	- 29 -
<i>Obr.21: Zahřátí spoje v místě přechodového odporu při utažení svorky na 0,1 Nm</i>	- 32 -
<i>Obr.22: Zahřátí spoje v místě přechodového odporu při utažení svorky na 0,4 Nm</i>	- 33 -
<i>Obr.23: Zahřátí spoje v místě přechodového odporu při utažení svorky na 0,7 Nm</i>	- 33 -

Použitá literatura

- [1] Zpravodaj pro měření a regulaci: *Bezkontaktní měření teploty*. Newport electronics, 2001–. Dostupné z URL <http://www.omegaeng.cz/literature/PDF/techinfo_1.pdf>
- [2] *Termočlánek* [online]. c2013, poslední revize 9.3.2013 [cit. 2013-04-30]. Dostupné z: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Termo%C4%8DI%C3%A1nek>>
- [3] *Pyrometr* [online]. c2013, poslední revize 10.3.2013 [cit. 2013-04-30]. Dostupné z: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Pyrometr>>
- [4] Workswell. *Průmyslové infračervené kamery a integrace* [online]. [cit. 2013-04-30]. Dostupné z: <http://www.workswell.cz/wp-content/uploads/2013/01/brozura_integratori.pdf>
- [5] *Termografie* [online]. c2013, poslední revize 22.3.2013 [cit. 2013-04-30]. Dostupné z: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Termografie>>
- [6] *Teplotní čidla* [online]. Dostupné z: <<http://www.e-pristroje.cz/teplotni-cidla.html>>
- [7] Fluke. *Infračervené teploměry* [online]. Dostupné z: <<http://www.fluke.com/fluke/czcs/products/Teplomery.htm>>
- [8] Fluke. *Termokamery FLUKE* [online]. Dostupné z: <<http://www.fluke.com/fluke/czcs/products/Termokamery.htm>>
- [9] Raytek. *MP150 Infrared Line Scanner* [online]. Dostupné z: <<http://www.raytek.com/Raytek/en-r0/ProductsAndAccessories/InfraredLineScanners/InfraredLineScannersSeries/MP150Linescanner/Default.htm>>
- [10] Fluke. *Termokamery Fluke Ti50 a Ti55* [online]. Dostupné z: <<http://www.fluke.com/fluke/czcs/termokamery/fluke-ti50-series.htm?PID=56188>>
- [11] Fluke. *TiR2, TiR3, TiR4, Ti40, Ti45, Ti50, Ti55 IR FlexCam Thermal Imagers User Manual* [online]. c2009 [cit. 2013-04-30]. Dostupné z: <<http://www.fluke.com/fluke/czcs/support/manuals/default.htm>>
- [12] KREIDL, Marcel. *Technická diagnostika: senzory, metody, analýza signálu*. Šmíd Radislav. 1. Vyd. Praha: BEN, 2006. 408 s. ISBN 80-7300-158-6.