



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AUTOMATION AND COMPUTER SCIENCE

MĚŘENÍ TEPLoty V TECHNICKÉ DIAGNOSTICE

TEMPERATURE MEASUREMENT IN TECHNICAL DIAGNOSTICS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

TOMÁŠ SZMEK

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. FRANTIŠEK VDOLEČEK, CSc.

BRNO 2008

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automatizace a informatiky

Akademický rok: 2007/08

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Szmek Tomáš

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Měření teploty v technické diagnostice

v anglickém jazyce:

Temperature Measurement in Technical Diagnostics

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Měření teploty, zejména pak měření bezdotyková, pracující v oblasti IR záření, se dnes stále více prosazují v oboru termodiagnostiky.

Cíle bakalářské práce:

Cílem práce je vypracování studie, která přiblíží aplikace metod a prostředků měření teploty, zejména pak IR bezdotykových teploměrů, v oboru termodiagnostiky.

Doporučená osnova práce:

1. Technická diagnostika a termodiagnostika
2. Měření teploty a bezdotykové teploměry
3. Příklady aplikací termodiagnostiky

Seznam odborné literatury:

CHUDÝ, V.; Palenčár, R.; Kureková, E.; Halaj, M.; Meranie technických veličín : 1.vydání Bratislava : Vydavateľstvo STU, 1999. 688s. ISBN 80-227-1275-2.

KREIDL, M. a kol.; Diagnostické systémy. : 1. vydání Praha :Vydavatelství ČVUT, 2001. 352 s. ISBN 80-01-02349-4.

KREIDL, M.; Měření teploty – Senzory a měřicí obvody : 1. vydání Praha : BEN – technická literatura, 2005. 240 s. ISBN 80-7300-145-4.

Časopisy AUTOMA a AUTOMATIZACE
Firemní literatura

Vedoucí bakalářské práce:Ing. František Vdoleček, CSc.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2007/08.

V Brně, dne 14.11.2007

L.S.



doc. RNDr. Ing. Miloš Šeda, Ph.D.
Ředitel ústavu



doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

LICENČNÍ SMLOUVA

(na místo tohoto listu vložte vyplněný a podepsaný list formuláře licenčního ujednání)

ABSTRAKT

Bakalářská práce má seznámit čtenáře s možnostmi měření teploty, s konstrukcí a funkcí jednotlivých měřidel a ukázat jejich přednosti a nedostatky. Jsou zde popsány jak jednoduché dotykové přístroje používané v běžném životě, tak složité systémy (termovize) využívané v nejnáročnějších průmyslových aplikacích. Práce zobrazuje teplotu především jako diagnostickou veličinu, díky níž lze snadno a rychle odhalit příčiny poruch různých zařízení a zabránit tak následným haváriím.

ABSTRACT

The purpose of this bachelor's thesis is to familiarize a reader with possibilities of temperature measurement along with constructions and functions of particular measuring instruments and to present their positive and negative aspects. Both basic contact thermometers used in common life and complex systems (thermovision) employed in the most demanding industrial application are described here. The thesis depicts temperature as a diagnostic value according to which the causes of machinery failures are easily detected and subsequent accidents prevented.

KLÍČOVÁ SLOVA

diagnostika, termodiagnostika, teplota, teploměr, snímač, pyrometr, emisivita, termogram, měření, záření

KEYWORDS

diagnostics, thermodiagnosics, temperature, thermometer, sensor, pyrometer, emissivity, termogram, measuring, radiation

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Františku Vdolečkovi za spolupráci, ochotu a odbornou pomoc, která mi pomohla při její tvorbě.

OBSAH

Zadání bakalářské práce.....	3
Licenční ujednání.....	5
Abstrakt.....	7
1 Úvod.....	13
2 Technická diagnostika.....	15
2.1 Diagnostické systémy.....	15
2.2 Rozdělení technické diagnostiky.....	15
2.3 Termodiagnostika.....	16
3 Teplota a její měření.....	17
3.1 Principy měření teploty.....	17
3.2 Teploměry.....	17
3.2.1 Kontaktní teploměry dilatační.....	18
3.2.2 Kontaktní elektrické teploměry.....	18
3.2.3 Termoelektrické snímače teploty (termočlánky).....	19
4 Bezkontaktní měření teploty.....	21
4.1 Zákony bezkontaktního měření teploty.....	21
4.2 Měřicí přístroje (pyrometry).....	23
4.2.1 Radiační (úhonné) pyrometry.....	23
4.2.2 Pásmové (fotoelektrické) pyrometry.....	24
4.2.3 Spektrální (jasové) pyrometry.....	24
4.2.4 Barvové (poměrové) pyrometry.....	24
4.3 Infračervené přístroje.....	26
4.3.1 Infračervené pyrometry.....	26
4.3.2 Infračervené termočlánky.....	27
4.3.3 Termovize.....	28
4.4 Klady a zápory bezdotykového měření teploty.....	29
5 Příklady aplikací termodiagnostiky.....	31
5.1 Průmysl.....	31
5.2 Energetika.....	32
5.3 Teplovodní a parovodní systémy.....	33
5.4 Stavebnictví.....	33
5.5 Výzkum a vývoj.....	34
5.6 Další využití.....	34
6 Závěr.....	35
7 Seznam použité literatury.....	37

1 ÚVOD

Soudobá lidská činnost se jen stěží obejde bez široké technické podpory různých systémů a zařízení. Přes veškeré trendy ve vývoji, jsou mnohé z nich určeny k dlouhodobému používání a mají větší či menší nároky na údržbu, za účelem zachování funkčnosti. Náklady na údržbu a opravy mají ve většině případů rostoucí charakter. Je zřejmé, že poruchovost, výška nákladů na údržbu a opravy mohou být v mnoha případech podmíněné neznalostí technického stavu strojů a zařízení. Tuto skutečnost dokazují výsledky z praxe, kde hledání příčiny poruchy a samotných poruch, zabere v mnohých případech více času, než následná oprava.

Informace o stavu jednotlivých zařízení získáváme měřením. Pro různá zařízení používáme různé metody měření, které společně nazýváme technickou diagnostikou. Využitím metod a prostředků technické diagnostiky, lze docílit zvýšení produktivity práce v procesu údržby a oprav, snížení nákladů na náhradní díly, snížení doby odstávky zařízení z výrobního procesu, a tím i snížení ekonomických ztrát. Zdokonalením systému údržby díky diagnostikování změn technického stavu stroje, se podstatně zvýší efektivnost a především spolehlivost stroje a celého zařízení. V tomto směru má technická diagnostika své pevné a nezastupitelné místo.

V současné době, kdy se technická diagnostika stává samostatným vědním oborem, zdaleka nestačí zvolit vhodnou diagnostickou metodu a vybrat optimální typy senzorů a měřících přístrojů. Diagnostika se již nespokojí s pouhým určením existující závady, ale vyžaduje přesnou specifikaci závady. Z tohoto důvodu je nutné naměřené údaje digitalizovat a dále zpracovávat prostřednictvím pokročilých metod analýzy naměřených veličin a matematických metod.

Správná diagnostika a z ní vycházející vhodné plánování oprav, je jedním z prostředků zajišťujících bezpečný a spolehlivý provoz zařízení, vedoucí k maximální ekonomické efektivitě provozu všech průmyslových zařízení.

2 TECHNICKÁ DIAGNOSTIKA

Technická diagnostika je vědní obor, který se zabývá moderními metodami zjišťování technického stavu, vlastností a parametrů sledovaného objektu. Diagnostika poskytuje objektivní informace o provozním stavu strojů, zařízení, přístrojů a jiných systémů, případně o potřebách jejich údržby a průběhu doby života. O zařazení diagnostiky do běžného provozu, rozhodují výsledky úvah, které mají za úkol porovnat předpokládané náklady na diagnostický systém a jeho provoz a výši úspor vzniklých snížením pravděpodobnosti havárie, prodloužením doby života objektu a snížením nákladů na náhradní díly.

Kontrola stroje v provozu běžnými montážními způsoby bez jeho odstavení je prakticky nemožná, proto se technický stav zařízení stále častěji zjišťuje nedestruktivními a bezdemontážními metodami. Hlavním cílem diagnostiky je využít všechny užitečné informace o stavu daného objektu, pracujícího v běžných, ale i extrémních podmínkách provozu a zabránit tak možným haváriím. [2]

2.1 Diagnostické systémy

Diagnostické systémy nejsou určeny jen pro samotnou diagnostiku a neskládají se z pouhých čidel, měřené fyzikální veličiny, měřicího řetězce a zobrazovače naměřené hodnoty. Většinou fungují jako prostředek, využívaný dalšími systémy nebo procesy při provozu a správě technických zařízení. Jednoduchý diagnostický systém zpravidla signalizuje poruchu objektu ohrožující jeho provoz. Složitější systémy vyhodnocují stupeň nebezpečnosti poruchy, její příčinu a v případě hrozící havárie mohou zastavit provoz objektu. Tyto systémy se volí podle druhu sledovaného objektu a podle jeho funkce sledované ve vybraných místech, kde se porucha projeví změnou některé z fyzikálních veličin.

Při přesnější diagnostice může být současně měřeno několik různých veličin. Naměřené údaje obvykle projdou mnoha diagnostickými testy, které jsou na základě stanovených modelů číselně zpracovány a graficky zobrazovány. Z těchto informací lze stanovit spolehlivé kritérium charakterizující vznik a vývoj poruchy až do mezního stavu hrozícího havárií, a tedy i dobu, po kterou bude možno objekt ještě používat, a termín, kdy bude třeba provést jeho demontáž a opravu.

S prudkým rozvojem elektroniky a informační techniky stoupá i účinnost technické diagnostiky, běžně vybavené výpočetní technikou a příslušným softwarem. Důležitými prvky diagnostických systémů jsou čidla a senzory, sledující velikost a průběh fyzikálních veličin. Ty je nutné ve vhodných časových intervalech kalibrovat, z hlediska jejich dlouhodobé přesnosti a spolehlivosti. [3]

2.2 Rozdělení technické diagnostiky

Výpočetní technika dokáže provádět řadu diagnostických testů a výpočtů stupně nebezpečnosti poruchy. K testování diagnostických funkcí jsou na vstup sledovaného objektu přiváděny tzv. simulační signály, které nenaruší jeho běžný provoz. To umožňuje realizovat postupy pro detekci a lokalizaci poruch. Při funkčním diagnostikování jsou vyšetřovány signály senzorů při běžném či zvlášť nastaveném, mezním provozním režimu. Funkční diagnostická technika je zpravidla vestavěna do sledovaného objektu např. u automobilů.

Technickou diagnostiku rozlišujeme podle sledovaných fyzikálních veličin, které umožňují určit provozní stav daného objektu:

- *vibrodiagnostika*: v kritických bodech se měří a vyhodnocuje mechanické kmitání,
- *diagnostika modální analýzou*: měří se a vyhodnocují vlastní frekvence mechanické konstrukce a jejich tlumení,
- *hluková diagnostika*: v kritických místech se měří hluk s aktuálním frekvenčním spektrem,
- *elektrodiagnostika*: měří se velikosti a změny elektrických veličin, funkce elektrických přístrojů a dalších elektrických zařízení,
- *teplotní diagnostika*: v kritických místech se měří teplota a její změny,
- *termografická diagnostika*: ve vybraných částech se měří a analyzují teplotní pole,
- *tribodiagnostika*: v kritických místech se provádí analýza aplikovaných maziv,
- *diagnostika statickým zatížením*: v kritických místech se měří a analyzují statické síly, mechanické napjatosti a tlaky. [2]

2.3 Termodiagnostika

Termodiagnostická metoda je založena na měření teploty povrchu těles a spočívá ve využití teploty jako diagnostického parametru charakterizující určitý stav objektu. V praxi se k tomu využívají, jak hodnoty ustálených teplot (střední hodnota, efektivní hodnota), tak hodnoty časově proměnných teplot (okamžitá hodnota, frekvenční spektrum).

Termodiagnostika se využívá tam, kde vznikající poruchy stroje nebo zařízení způsobují zvýšení pasivních ztrát, snížení účinnosti nebo vytvoření nového tepelného zdroje. Teplotu je možné měřit přímo v jednotlivých místech, tj. bodově, pomocí dotykových teploměrů, pomocí bezdotykových teploměrů v případech, kdy nelze použít dotykové přístroje nebo pomocí termografie pro rozměrnější stroje.

Diagnóza je stanovena na základě srovnání naměřených teplot s běžnými provozními hodnotami. Touto metodou lze přesněji lokalizovat místo, kde je zvýšená teplota vlivem tření nebo nadměrného opotřebení stroje. Typickým příkladem je zvýšení teploty ložisek vlivem degračních procesů. [2], [3]



Obr. 2.1 Termogram přehřívajících se ložisek. [13]

3 TEPLOTA A JEJÍ MĚŘENÍ

Jedním ze sledovaných parametrů ve výrobě, v diagnostice a údržbě je teplota, která charakterizuje určitý fyzikální stav měřeného objektu. Všichni máme představu o tom, co teplota je a co znamená, ale její fyzikální definice je poněkud složitější.

Teplota je základní stavová veličina definovaná na základě účinnosti vratného Carnotova cyklu. Účinnost vratného Carnotova cyklu, pracujícího mezi dvěma stejnými zásobníky tepla s určitými teplotami, závisí pouze na těchto teplotách a nezávisí na použitých látkách. Teplota nám ve své podstatě ukazuje, jaký směr bude mít tepelný tok mezi dvěma objekty. Pro účinnost Carnotova cyklu platí vztah:

$$\eta = \frac{Q_2 - Q_1}{Q_2} = \frac{T_2 - T_1}{T_2} \quad (3.1)$$

kde η je účinnost Carnotova cyklu,

Q_2 je teplo odebrané látkou ze zásobníku s teplotou T_2 ,

Q_1 je teplo odevzdané látkou zásobníku s teplotou T_1 ,

a platí, že $T_2 > T_1$.

Termodynamickou rovnováhu tělesa vyjadřuje termodynamická teplota (jednotkou je kelvin), definovaná na základě trojného bodu vody. Ta má hodnotu $T = 273,16\text{K}$. Za 0 K se považuje absolutní nula, což je teplota, při které ustává veškerý pohyb částic (atomů) v látkách.

V běžné praxi je používanou jednotkou teploty stupeň Celsia. Ten je definován jako rozdíl termodynamické teploty T a teploty $T_0 = 273,15\text{K}$. Podle této definice má stupeň Celsia stejnou hodnotu jako kelvin ($1\text{K} = 1^\circ\text{C}$).

Teplota patří v diagnostice k důležitým fyzikálním veličinám, jejíž sledováním lze regulovat výrobní procesy, kontrolovat provozní stavy strojů a zařízení, diagnostikovat přehřívání spojů, kabelů nebo mechanických součástí, či vyhodnocovat tepelné vlastnosti budov. [1]

3.1 Principy měření teploty

Teplota kteréhokoliv objektu se dá změřit množstvím metod a prostředků. Při měření teploty daného objektu měříme obecně jinou veličinu (změnu objemu nebo tlaku měřené látky, změnu elektrických vlastností snímače teploty, vyzařování měřeného objektu), která je na teplotě závislá. K měření teploty se využívá řada funkčních principů:

1. teplotní roztažnost pevných, kapalných nebo plyných látek
2. změna elektrických vlastností snímače teploty
3. změna celkové energie záření
4. využití spektrálního vyzařování měřeného objektu [1]

3.2 Teploměry

Zařízení sloužící k měření teploty se nazývá teploměr. Teploměry využívají různé měřicí principy a zpravidla se rozdělují podle umístění snímací části na:

- kontaktní (mají snímací část umístěnou přímo v měřeném prostředí, dotýkají se měřeného povrchu),
- bezkontaktní (snímací část není umístěná v měřeném prostředí, měření na dálku). [1]

3.2.1 Kontaktní teploměry dilatační

Dilatační teploměry využívají principu objemové nebo délkové roztažnosti látek při konstantním tlaku. Změnou teploty se změní objem či délka látky. Tato změny jsou popsána fyzikálními vztahy a koeficienty. Podle druhu použité látky se dělí dilatační teploměry na plynové, kapalinové a teploměry založené na roztažnosti pevných látek.

Plynové teploměry využívají k měření teploty změnu objemu plynné látky při konstantním tlaku. Nejčastěji se používají k měření teplot blízkých absolutní nule a v agresivních prostředích.

Kapalinové teploměry jsou založeny na závislosti změny objemů kapalin na teplotě. Jejich rozsah je podmíněn teplotou tání a varu použité kapaliny. S těmito teploměry se nejčastěji setkáme v domácnostech, v medicíně, v laboratořích atd. Pro průmyslovou praxi a zvláště diagnostiku nejsou příliš vhodné kvůli jejich křehkosti, obtížnosti dálkového přenosu údaje a s tím související zpracování dat.

Teploměry založené na roztažnosti pevných látek fungují na principu rozdílné délkové roztažnosti dvou kovů. Teploměry bývají vyhotoveny ve dvou základních provedeních, jako tyčové, kde v obalu z materiálu o malé délkové roztažnosti je vložena tyč z materiálu o velké roztažnosti. Prodloužení tyče je úměrné měřené teplotě. Teploměry mají delší časovou konstantu a nedá se jimi s danou přesností měřit bodová teplota.

Druhé provedení je tzv. bimetalické, teploměr je tvořen dvěma pevně spojenými kovovými pásky o různé tepelné roztažnosti. Změnou teploty se pásek deformuje a hodnota deformace je přenášena na ukazatel teploty. Tyto teploměry nacházejí uplatnění v širokém rozsahu aplikací, často jsou použity jako teplotní spínač regulace teploty. [1]

3.2.2 Kontaktní elektrické teploměry

Elektrické teploměry jsou díky svému elektrickému výstupu nejrozšířenější v automatizaci technologických procesů. Ve snímači je teplota převáděna na elektrickou veličinu, která je zpracována a převedena na teplotní údaj. Výhodou jsou malé rozměry, přesnost a možnost připojení k různým vyhodnocovacím přístrojům. Mezi elektrické teploměry patří odporové teploměry a termočlánky.

Odporové snímače teploty jsou založeny na teplotní závislosti elektrického odporu kovů nebo polovodičů. Snímače musí splňovat určité požadavky, aby jimi procházející proud způsoboval co nejmenší ohřev.

Odporové snímače dělíme na kovové a polovodičové. S rostoucí teplotou se elektrický odpor kovů zvyšuje. Čidla jsou často vyráběny jako kompletní měřící sondy. Nejčastějším materiálem používaným k výrobě je platina, nikl, germanium a slitina rhodium - železo. Ideální jsou k měření povrchových teplot těles, v klimatizaci, k měření teploty různých plynů např. v aerodynamických tunelech.

Polovodičové odporové teploměry jsou označovány jako termistory. S rostoucí teplotou se u polovodičů zvyšuje koncentrace nosičů náboje a elektrický odpor materiálu se snižuje. Pro své malé rozměry jsou využívány v těžko dostupných místech. Jsou mnohem citlivější na změnu teploty než kovové odporové snímače, ale jejich nevýhodou je silná nelinearita a horší časová stálost. [1]

3.2.3 Termoelektrické snímače teploty (termočlánky)

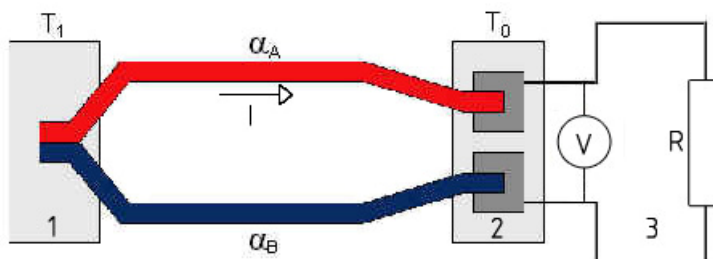
Termoelektrické snímače teploty využívají k měření teploty články, se dvěma vodiči z různých kovových materiálů, které jsou na koncích vodivě spojeny (obr. 3.1). Oba vodiče mají rozdílný termoelektrický součinitel a k určení teploty objektu využívají termoelektrický jev (Seebeckův jev). Jestliže se liší teplota jednoho spoje od teploty druhého spoje, vzniká termoelektrické napětí a obvodem prochází termoelektrický proud. Jeden z uzlů je přitom měřicí a druhý srovnávací.

Pro správnou funkci snímače je nutné, aby teplota srovnávacího spoje byla konstantní, nebo aby vliv termoelektrického napětí tohoto spoje byl kompenzován. Vliv kolísání teploty srovnávacího spoje lze vyloučit umístěním spoje do termostatu (v laboratoři při 0 °C, u průmyslových aplikací při 50 °C) nebo kompenzačním obvodem, který koriguje odchylku napětí způsobenou změnou teploty srovnávacího spoje.

Termočlánky jsou umístěny v ochranném obalu, který zabraňuje mechanickému poškození a chrání je před nepříznivými fyzikálními a chemickými vlivy okolí. Celý bývá zakončen přírubou, na které je svorkovnice s vývody.

Materiál termočlánků má mít co největší lineární přírůstek termoelektrického napětí v závislosti na teplotě a stabilitu při dlouhodobém provozu. Označení termočlánků je normalizováno dle ČSN IEC 584-1, např. termočlánek typu J (železo-konstantan) pro rozsah od 0 do 750 °C. Pro vyšší teploty se používá termočlánek typu K (chromel-alumel) v rozsahu od -200 do 1250 °C nebo článek typu R (platinarhodium-platina) v rozsahu od 0 do 1450 °C.

Termočlánky lze s výhodou použít při měření teplotních rozdílů, protože jsou ve své podstatě diferenčním měřidlem. V takovém případě bereme oba spoje jako měřicí a výsledné napětí závisí na rozdílu teplot těchto spojů. [1]



Obr. 3.1 Princip termočlánku: 1 – měřicí spoj, 2 – srovnávací spoj, 3 – kompenzační obvod, α_A , α_B – dva vodiče z různým termoelektrickým součinitelem.

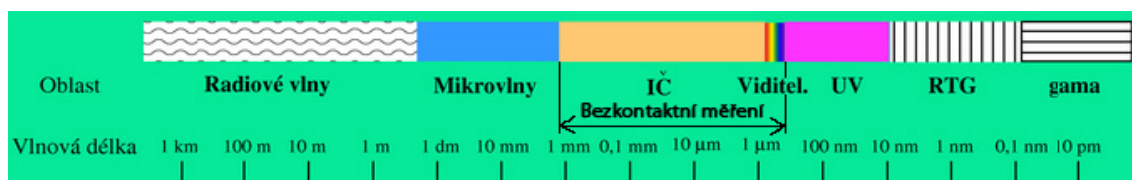
V této kapitole byly popsány jak prosté kontaktní teploměry, které jsou součástí téměř každé domácnosti, tak složitější přístroje používané především v průmyslových aplikacích, v laboratořích, atd. V diagnostice se k vyhodnocování stavu měřeného objektu využívají především modernější metody měření teploty, díky kterým se stává diagnostikování rychlejší a přesnější. Následující kapitola se zabývá bezkontaktními přístroji, základními fyzikálními principy jejich funkce a jejich přínosem v oblasti termodiagnostiky.

4 BEZKONTAKTNÍ MĚŘENÍ TEPLOTY

Bezdotykové měření teploty si v praxi našlo nezastupitelné místo a oblast jeho aplikací neustále roste. Vyplývá to jednak z jeho charakteristických vlastností, především z možnosti měření teploty na dálku, které nemá vliv na měřený předmět, a jednak z možnosti měření v podmínkách, kde je použití ostatních snímačů teploty problematické nebo zcela nemožné. Další skutečností hovořící ve prospěch bezkontaktních metod je měření teploty pohybujících se objektů, měření náhlých teplotních změn a plošné monitorování teploty. K rozšíření přispívá i to, že se tyto přístroje stávají stále cenově dostupnější. [4]

4.1 Zákony bezkontaktního měření teploty

Dříve než si pořídíme přístroj pro bezkontaktní měření teploty je třeba znát alespoň základní teoretické poznatky z této oblasti. Měření je založeno na vyhodnocování elektromagnetického záření těles. Každé těleso o vyšší teplotě než je absolutní nula vysílá elektromagnetické záření. K bezkontaktnímu měření se využívá část elektromagnetického spektra v rozmezí vlnových délek 0,4 μm až 1000 μm . Tuto oblast dělíme na oblast viditelného spektra a oblast infračerveného spektra, nazývanou tepelným zářením.



Obr. 4.1 Elektromagnetické spektrum záření.

Objekt, který maximálně pohlcuje a maximálně vyzařuje elektromagnetické záření je absolutně černé těleso. Vyzařování známých materiálů se mění v určitém rozsahu vlnových délek. Základním zákonem, kterým se bezdotykové měření řídí, je Stefan-Boltzmannův zákon. Ten říká, že intenzita vyzařování absolutně černého tělesa H_0 [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$] je na všech vlnových délkách úměrná čtvrté mocnině absolutní teploty tělesa.

$$H_0 = \sigma * T^4 \quad (4.1)$$

kde T je absolutní teplota tělesa,
 σ je Stefan-Boltzmannova konstanta ($\sigma = 5,6697 * 10^{-8} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$).

Experimentální výsledky však ukázaly rozdíly vůči zákonům popisujícím vyzařování absolutně černého tělesa, proto byly zákony upraveny tak, aby lépe odpovídaly realitě. Závislost spektrální hustoty intenzity vyzařování na vlnové délce a teplotě popisuje Planckův vyzařovací zákon:

$$H_{0,\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left(e^{\frac{hc}{k\lambda T}} - 1 \right)} = \frac{c_1}{\lambda^5 \left(e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1 \right)} \quad (4.2)$$

kde h je Planckova konstanta ($h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$),
 c je rychlost světla ve vakuu ($c = 2,9979 \cdot 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$),
 λ je vlnová délka záření,

k je Boltzmannova konstanta ($k = 1,3807 \cdot 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$),
 T je absolutní teplota,
 c_1 je první vyzařovací konstanta ($c_1 = 3,742 \cdot 10^{-16} \text{ W.m}^{-2}$),
 c_2 je druhá vyzařovací konstanta ($c_2 = 1,439 \cdot 10^{-2} \text{ K.m}$).

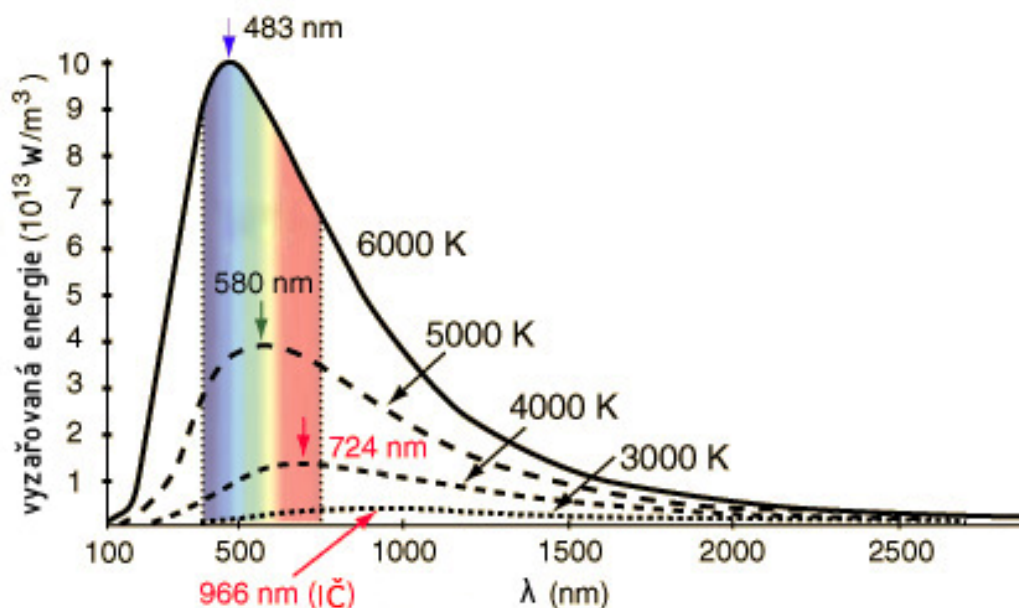
Z Planckova zákona lze odvodit tyto poznatky:

- emitované záření se spojitě mění s vlnovou délkou,
- při každé vlnové délce se emitované záření zvětšuje s rostoucí teplotou,
- spektrální rozložení emitovaného záření se mění s teplotou.

Zjednodušeně řečeno, čím více záření absolutně černé těleso pohltí, tím vyšší bude jeho teplota a tím kratší budou vlnové délky vyzařovaného záření. Maximální hodnota se posouvá se vzrůstající teplotou ke kratším vlnovým délkám podle Wienova posunovacího zákona:

$$\lambda_{\max} \cdot T = \text{konst.} = 2898 \mu\text{m} \cdot \text{K} \quad (4.3)$$

kde λ_{\max} je vlnová délka, na kterou připadá maximální intenzita vyzařování při dané teplotě.



Obr. 4.2 Wienův posunovací zákon.

[upraveno dle <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/quantum/radfrac.html>]

Reálná tělesa však vyzařují i pohlcují méně než absolutně černé těleso a proto platí:

$$H = H_0 \cdot \varepsilon \quad (4.4)$$

kde ε je emisivita.

Emisivita je definována jako poměr intenzity energie vyzařované reálným tělesem určité teploty a energie vyzářené absolutně černým tělesem téže teploty. Část energie dopadající na těleso se může odrazit, pohltit nebo propustit. Celkovou energii pak tvoří jejich součet. Jeli objekt v tepelné rovnováze, nedochází k ohřívání ani ochlazování, pak vyzařovaná energie je rovna energii pohlcované.

Emisivita je závislá na druhu materiálu, na jeho povrchu (oxidaci povrchu) a na teplotě. Absolutně černé těleso má emisivitu 1,0. Příklady některých emisivit vybraných povrchů uvádí tabulka.

Tab. 4.1 Emisivita ϵ pro vybrané povrchy.

černé těleso	1,00
černý matný lak	0,99
voda	0,95
cihly	0,85
zoxidovaný ocelový plech	0,75
zoxidovaný hliník	0,55
lesklý ocelový plech	0,25

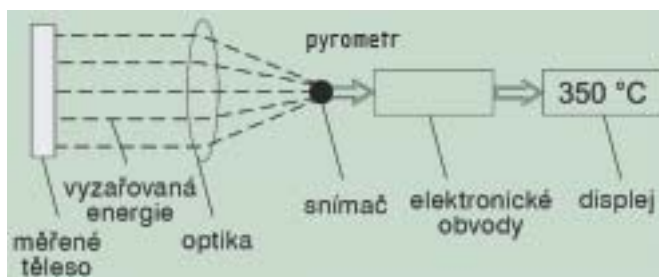
V technické praxi se pro zjednodušení zavedl pojem šedé těleso, jehož emisivita není závislá na vlnové délce vyzařování. Řada materiálů se v určitém rozsahu vlnových délek chová stejně. [1], [5]

4.2 Měřicí přístroje (pyrometry)

K měření teploty bezkontaktní metodou se využívají přístroje zvané pyrometry. Ty vyhodnocují na základě tepelného nebo světelného záření teplotu měřeného objektu. Pyrometry jsou k dostání v mnoha vyhotoveních. Pro praxi je nejvhodnější rozdělení podle oblasti spektra využitého záření na:

- radiační (úhrnné neboli celkové),
- pásmové (fotoelektrické),
- spektrální (jasové, monochromatické),
- barvové (poměrové).

V technických parametrech přístroje je uvedeno buď spektrální pásmo, pro které pyrometr měří, nebo střední vlnová délka, pokud není pásmo příliš široké. [1]



Obr. 4.3 Blokové schéma bezkontaktního teploměru. [upraveno dle 7]

4.2.1 Radiační (úhrnné) pyrometry

Radiační pyrometr využívá široké oblasti vlnových délek a používá se k měření objektů s vysokou hodnotou emisivity, blížíci se hodnotě absolutně černého tělesa. Tepelné záření objektu prochází optickou soustavou sestavenou ze zrcadel nebo z čoček, která ho soustřeďuje na čidlo umístěné v jejím ohnisku. Jako čidlo se používá miniaturní termočlánek, baterie termočláneků (až 30 spojů zapojených do série), fóliový odporový teploměr (bolometr) nebo termistor. Čidlo bývá začerněno, aby pohltilo co nejvíc dopadajícího záření.

Rozsah použití je od $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$, ve speciálních případech do $5000\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dovolená chyba se pohybuje do 2 % rozsahu a časová konstanta v řádech 10^{-2} s . V případě, že se emisivita měřeného objektu blíží 1, vykazují radiační pyrometry malou chybu. Pokud je emisivita výrazně nižší, musí se údaj korigovat. [1]

4.2.2 Pásmové (fotoelektrické) pyrometry

Pásmový pyrometr pracuje na podobném principu jako radiační pyrometr, ale v užším pásmu vlnových délek. Optická soustava, filtry a citlivost snímacího čidla určují spektrální charakteristiku pyrometru. Jako fotoelektrického čidla, které převádí tepelné záření na elektrické napětí, proud nebo odpor, se používá fotonek, selenových nebo křemíkových fotočlánků, fotodiod, fototranzistorů a fotoodporů. Výstupní signál je zpracováván v elektronických obvodech, digitalizován v převodníku a zpracováván mikroprocesorem.

Hlavní výhodou pásmových pyrometrů je rychlá reakce na teplotní změny a měření teploty malých objektů. Lze je použít v prostředí, kde se mezi objektem a pyrometrem nachází atmosféra, schopná absorbovat infračervené záření, jako CO_2 , vodní pára apod. [1]

4.2.3 Spektrální (jasové) pyrometry

K měření využívají spektrální pyrometry úzké pásmo vlnových délek viditelného záření. Snímacím čidlem je lidské oko, které porovnává záři měřícího objektu se září srovnávacího zdroje. Spektrální pyrometry dělíme na přístroje s proměnlivým jasem a přístroje se stálým jasem porovnávajícího zdroje.

Pyrometry s proměnlivým jasem snímají záření měřeného objektu objektivem, který vytváří obraz v rovině rozžhaveného vlákna pyrometrické žárovky. Současně se sleduje obraz objektu a vlákno žárovky, jehož záření se reguluje velikostí elektrického proudu až obě záře splynou. Teplota měřeného objektu je úměrná proudu, protékajícím vláknem žárovky. Měřící rozsah bývá omezen materiálem vlákna žárovky.

U spektrálních pyrometrů se stálým jasem je elektrický proud konstantní a porovnávání září se provádí zasouváním šedého klínu. Pozorovatel pootáčí klínem do okamžiku, kdy záře vlákna žárovky splyne se září objektu. Zasunutí klínu je funkcí teploty, která se zobrazí na stupnici.

Přesnost měření závisí výhradně na obsluze. Modernějším přístrojem, který vylučuje možnost chyby, způsobené nepřesným porovnáním obrazů pozorovatelem, je spektrální pyrometr s automatickým porovnáváním intenzity záření. Fotodioda umístěná v ohnisku optické soustavy porovnává záření, která jsou rušena rotující clonou. Tento efekt vyvolá v obvodu s fotodiodou elektrické impulsy, na jejichž základě je clona přestavována do doby, kdy je intenzita záření stejná.

Spektrální pyrometry jsou kalibrovány na emisivitu absolutně černého tělesa, proto je nutné naměřené hodnoty korigovat. V praxi existují tabulky, které přiřazují jednotlivým hodnotám emisivity korekční teplotu.

Spektrální pyrometry jsou robustní kompaktní přístroje pracující v rozsahu teplot od $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $3000\text{ }^{\circ}\text{C}$. V tomto rozsahu mají chybu měření okolo 7%. [1]

4.2.4 Barvové (poměrové) pyrometry

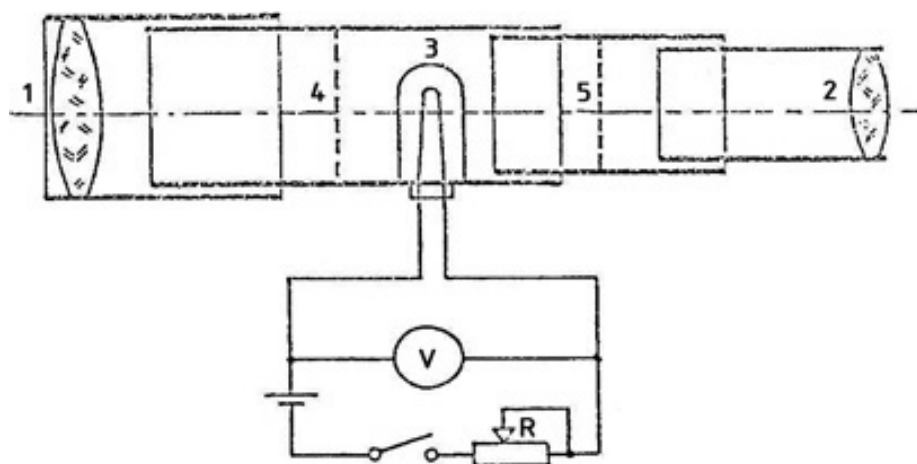
Barvové pyrometry pracují na podobném principu jako pyrometry spektrální. Jsou objektivnější a k měření stačí vědět přibližnou hodnotu emisivity. Jsou vhodné pro

měření teploty objektů, u kterých se mění emisivita. Barvové pyrometry dělíme na srovnávací a poměrové.

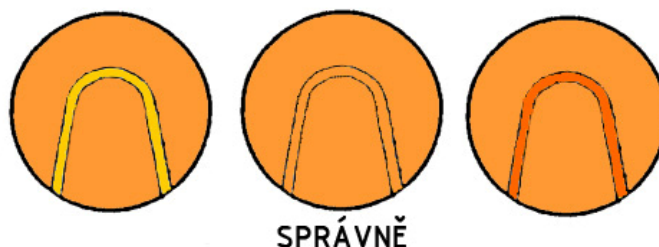
Srovnávací barvové pyrometry porovnávají intenzity záření měřeného objektu a pyrometrické žárovky. Pracují při vlnových délkách viditelného světla $\lambda_1 = 0,65 \mu\text{m}$ (červené světlo) a $\lambda_2 = 0,55 \mu\text{m}$ (zelené světlo). Tyto vlnové délky spolu tvoří vlnovou délku bílého světla. Záření prochází objektivem přes dvojbarevný otočný klínový filtr. Pozorovatel otáčí klínovým filtrem, aby změnil poměr červeného a zeleného světla a docílil tak světla bílého. Záření žárovky rovněž prochází filtrem, který mění vlnovou délku tak, aby oko pozorovatele vnímalo bílé světlo. Na základě porovnání obou bílých záření se určí výsledná teplota objektu. Pokud má měřený objekt charakter šedého tělesa, není třeba hodnotu korigovat. Pokud se emisivita v průběhu měření změní, je třeba výsledek korigovat. Pyrometr je vhodný k měření teplot, které se nemění příliš rychle.

Barvový poměrový pyrometr využívá k měření poměru dvou intenzit záření různých vlnových délek. Záření se rozdělí přes polopropustný hranol na samostatné svazky, procházející rotující clonou a filtry, které propustí záření zelené barvy a záření červené barvy. Oba svazky se přivedou k snímacímu prvku (fotodioda), ve kterém vzniká střídavý signál. Ten je vyhodnocován a mechanickou jednotkou je měněn poměr tak, aby intenzita obou svazků byla stejná.

Rozsah barvových pyrometrů je od $700 \text{ }^\circ\text{C}$ do $2000 \text{ }^\circ\text{C}$. Chyba měření je okolo 1,5 % až 2 % z naměřené hodnoty. [1]



Obr. 4.4 Schéma pyrometru s pyrometrickou žárovkou: 1 – objektiv, 2 – okulár, 3 – pyrometrická žárovka, 4, 5 – filtry.



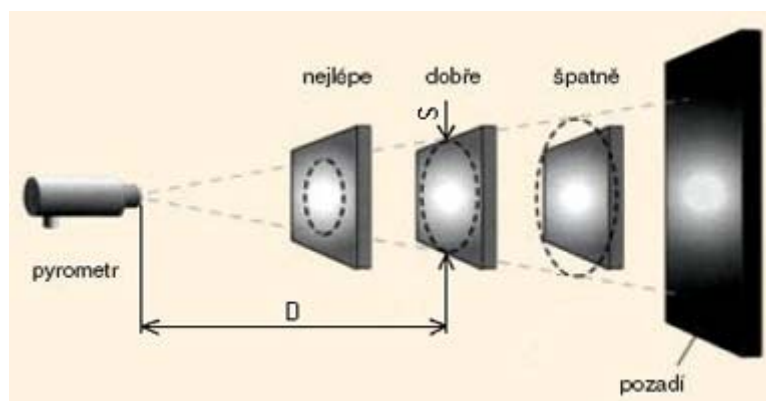
Obr. 4.5 Princip porovnávání intenzity záření tělesa s vláknem pyrometrické žárovky.

4.3 Infračervené přístroje

Infračervené přístroje se řídí stejnými zákony jako ostatní bezdotykové přístroje k měření teploty (pyrometry). K měření teploty využívají infračervené záření s vlnovou délkou mezi $0,78 \mu\text{m}$ a 1mm . Přístroje měřící teplotu na základě infračerveného záření dělíme na infračervené pyrometry a infračervené termočlánky. Zvláštní skupinu tvoří termovize nebo též termokamery. [1]

4.3.1 Infračervené pyrometry

Vyrábějí se ve dvou provedeních, jako spektrální (jasové) a barvové porovnávací pyrometry. Skládají se ze 3 částí, optické, snímací a elektronické. Optika zachytává a soustřeďuje vyzařovanou energii tak, aby dopadala na snímač. Důležitým údajem každého pyrometru je optické rozlišení, které je definováno poměrem $D : S$. Tento poměr udává, že teplotu plochy o průměru S je možné měřit ze vzdálenosti D od měřeného objektu. To znamená, že jeli použit pyrometr s rozlišením $D : S = 3 : 1$, teplota tělesa o průměru např. 10 cm se může měřit ze vzdálenosti nejvýše 30 cm . Při překročení maximální vzdálenosti měří pyrometr i teplotu okolí za objektem a to vede k chybným výsledkům. Optické rozlišení běžných teploměrů se pohybuje v rozmezí od $3 : 1$ do $80 : 1$.



Obr. 4.6 Princip optické charakteristiky: D – vzdálenost pyrometru od měřené plochy, S – průměr měřené plochy. [upraveno dle 9]

Infračervený snímač (detektor) zachycuje energii vyzařovanou měřeným objektem a převádí ji na měřitelné napětí úměrné dopadajícímu záření. Signál ze snímače má velmi malou hodnotu, proto je zesilován a upraven tak, aby údaj, který je zobrazen na displeji byl použitelný. Složitější přístroje jsou vybaveny digitálním převodníkem a připojeny k nadřazenému systému, jako je PC.

Infračervené pyrometry jsou vyráběny jako stacionární (pevné) nebo přenosné. Pevné jsou určeny pro specifické aplikace, kde trvale monitorují daný proces. Kompaktní ruční přístroje ve tvaru pistole mají všestranné použití. Rozsahy jsou různé, dovolená chyba je okolo 1% měřícího rozsahu, čas odezvy je mezi $0,3$ a 1 s . Emisivita bývá nastavitelná. [1], [7]



Obr. 4.7 Průmyslové stacionární infračervené pyrometry. [12]



Obr. 4.8 Přenosné (ruční) infračervené pyrometry. [12]

4.3.2 Infračervené termočlánky

Infračervené termočlánky pracují na stejném principu jako články konvenční. Výstupní signál je získáván přímo z dopadajícího infračerveného záření tzv. termoelektrickým efektem. Elektrický signál je lineárně závislý na teplotě jen do určité míry, proto infračervených termočlánků nelze využít pro velké teplotní rozsahy. Tato skutečnost je příčinou vyšší přesnosti termočlánků, která se pohybuje okolo 1 %. Přesnost je ovlivněna také konstrukcí, jejíž stavba brání změně mechanických a chemických vlastností daného termočlánku.

Infračervené termočlánky využívají spojení infračerveného snímače s konvenčními termočlánky různých typů a nabízejí mnoho různých vyhotovení. Na rozdíl od konvenčních termočlánků jsou v ochranných pouzdrech, které rozšiřují oblast jejich aplikace. Můžou být použity v agresivním prostředí, znečištěném prostředí, na měření vysokých teplot atd. Měřicí rozsah komerčně dostupných infračervených termočlánků je od -45 až do 2800 °C. Časová konstanta se pohybuje v rozmezí 0,01 až 0,3 sekund.

Oblast použití je velmi široká. Používají se na měření teploty pohybujících se nebo rotujících objektů. Slouží k měření teploty integrovaných obvodů, ale i k měření teploty na velkou vzdálenost, např. odlévání pod tlakem, řezání plamenem, kalení a podobně. [1]



Obr. 4.9 Infračervené termočlánky. [12]

Všechny typy teploměrů, které byly doposud popsány měří teplotu buď v konkrétním bodě (dotykové přístroje), anebo na malé ploše měřeného objektu (bezkontaktní přístroje). Pokud chceme znát rozložení teplot na celém povrchu měřeného objektu, musíme k tomu použít velké množství snímačů a následně vyhodnotit průběh teplotních polí. Tento způsob měření je finančně i časově náročný,

proto se v praxi stále více uplatňují přístroje, které dokážou zobrazit teplotní pole snímaného objektu okamžitě. K tomuto účelu se používají termovizní kamery.

4.3.3 Termovize

Termovizní kamery pracují jako bezdotykové snímače teploty v infračervené oblasti elektromagnetického spektra. Tepelné pole je snímáno optickým systémem kamery s teplotním čidlem a zobrazeno jako termogram na vlastní obrazovce. Jako snímače, citlivé na infračervené záření, se využívají kvantové nebo pyroelektrické detektory.

Kvantový detektor po dopadu infračerveného záření zvyšuje elektrickou vodivost a vysílá signál úměrný tomuto záření. Signál na výstupu je zesilován a zpracováván v elektrických obvodech a promítnut na obrazovku monitoru. Tyto detektory se velmi rychle přehřívají, a proto musí být chlazeny, nejčastěji tekutým dusíkem.

Pyroelektrický detektor funguje na základě pyroelektrického jevu. Při dopadu infračerveného záření se detektor zahřeje a tím v něm vzniká elektrický náboj. Nežádoucí účinek má parazitní pyroelektrický jev, který způsobuje chyby měření. Chyby jsou korigovány zařazením druhého pyroelektrického snímače s opačnou polaritou do obvodu. Kvůli menší přesnosti se tyto termovize používají hlavně k měření, kdy není prioritou vysoká přesnost naměřených údajů a také k měření teplotních extrémů, protože nevyžadují chlazení.

Díky své konstrukci umožňují termovize rychlou a snadnou analýzu daného objektu. Obvykle mají výstup pro záznam termogramů a měřených údajů. Tyto záznamy jsou užitečné pro podrobnou analýzu či dodatečnou kontrolu údajů. Přesnost měření zabezpečují dva referenční černé tělesa a zabudované snímače teploty. Rozsah měření se obvykle udává od -30 °C až po 2000 °C s rozlišením až $0,1\text{ °C}$.

Termovizní systémy se uplatňují hlavně v průmyslu k měření rozměrnějších objektů (venkovních plášťů pecí, potrubí), ale také k měření teploty různých přístrojů a zařízení uvnitř objektů. [1]



Obr. 4.10 Příklady termovizních kamer značky FLIR. [10]

4.4 Klady a zápory bezdotykového měření teploty

Jako každá metoda má i bezdotykové měření teploty celou řadu výhod, ale také nevýhod. K hlavním výhodám bezdotykového měření přispívají tyto skutečnosti:

- Vliv měřících přístrojů na měřený objekt je zcela zanedbatelný, tzn. z měřeného objektu není odebírána tepelná energie, to je výhodné především u materiálů špatně vedoucích teplo (dřevo, plasty).
- Při měření nedochází k mechanickému opotřebením snímače ani snímaného objektu.
- Díky nepřímému kontaktu čidla přístroje a povrchu měřeného tělesa lze měřit teploty pohybujících se objektů.
- Bezkontaktními přístroji lze měřit velmi vysoké teploty (3000 °C), ale také zachytit velmi rychle probíhající teplotní změny (reakce na změny teploty řádově v milisekundách).
- V neposlední řadě jimi lze měřit a zpracovávat teploty povrchu objektů větších rozměrů (termovizní kamery).

Nevýhody těchto měřidel jsou většinou spojené s neznalostí teorie bezdotykového měření a s chybným nastavením podmínek měření.

- K nejčastějším chybám při měření bezdotykovými přístroji dochází na základě neznalosti správné hodnoty emisivity povrchu tělesa a následného chybného nastavení přístroje. Měřený objekt může být lesklý, drsný, barevný, černý nebo také průhledný, přičemž každá z těchto vlastností se při měření uplatňuje rozdílně.
- Podstatnou roli hraje propustnost prostředí mezi čidlem a měřeným objektem. Transformace záření může být způsobena absorpcí i rozptylem infračerveného záření na molekulách plynu, kapkách vody, částicích kouře atd.
- Na měření má vliv také rušivé záření z okolí. Teplota vnějšího prostředí ovlivňuje velikost detekovaného infračerveného záření a rovněž jeho kolísání.
- Další chyby jsou způsobeny nedodržením optického rozlišení určeného výrobcem nebo špatným zaměřením objektu. Měřený objekt musí zcela vyplňovat zorné pole, jinak je měřená hodnota ovlivněna i zářením okolních ploch (pozadí).

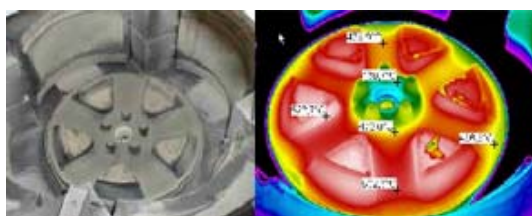
Všechny tyto nedostatky způsobují menší či větší chyby v měření, kterých je třeba se vyvarovat. Důležité je brát ohled na fakt, že infračervené měření teploty je založeno na optickém měření, a proto mají optické vlastnosti pyrometru velký, ale často podceňovaný vliv na výsledky měření. Použitá optika musí být kvalitní, antireflexní a měla by být správně korigována pro celý spektrální rozsah pyrometru. Chyba předepsaná výrobcem pyrometru se může díky znečištěné optice, stárnutí detektoru nebo odchylce teploty přístroje od jmenovité hodnoty mnohonásobně zvýšit. Proto je nutné přístroje kontrolovat a pravidelně kalibrovat. [5], [6]

5 PŘÍKLADY APLIKACÍ TERMODIAGNOSTIKY

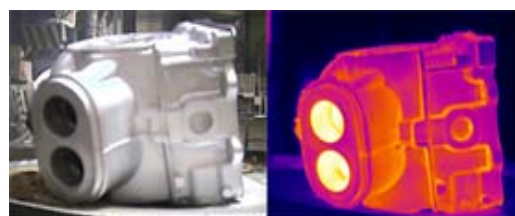
Od doby, kdy byl na trh uveden první přístroj pro bezdotykové měření teploty, značně pokročila kvalita optických částí, elektrických obvodů, způsobu zpracování a vyhodnocování signálu. V současnosti se tato technika uplatňuje v řadě průmyslových odvětvích a aplikacích, jako jsou prediktivní údržba a diagnostika, řízení různých technologických procesů, výzkum, vývoj, apod.

5.1 Průmysl

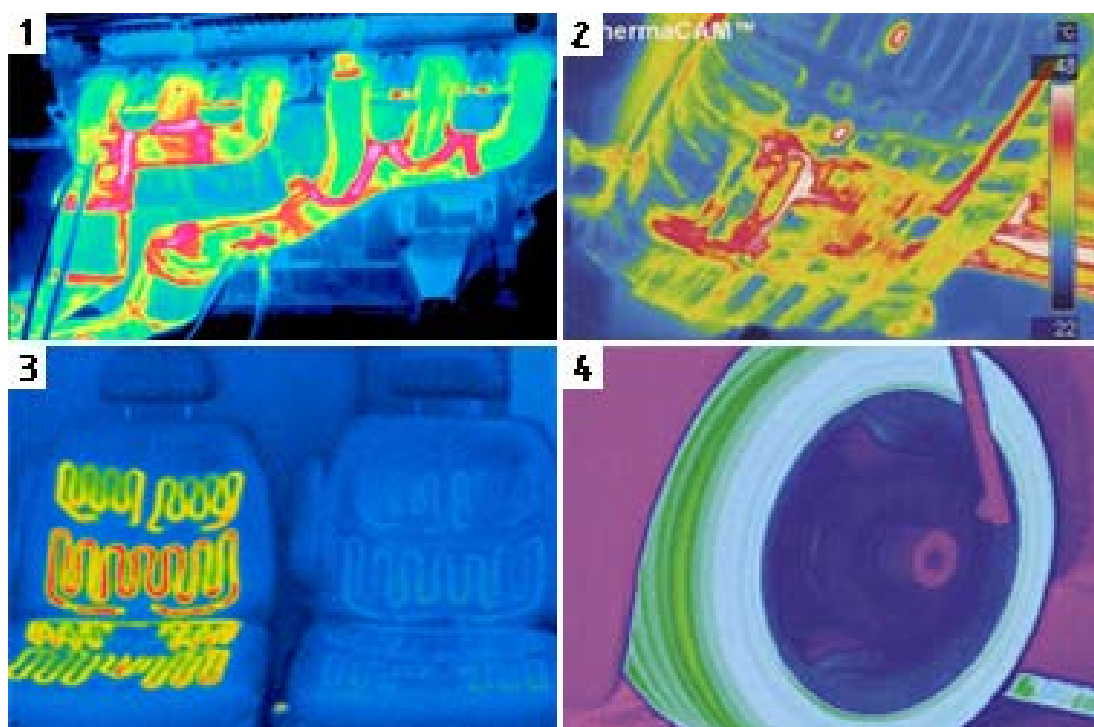
Měření povrchové teploty tělesa a zobrazení jeho teplotního pole nachází v průmyslu široké uplatnění. Bezkontaktní metoda měření teploty je využívána v mnoha odvětvích, např. ve slévárnictví při zkoumání teplotních polí forem (obr. 5.1), v metalurgii při tepelné úpravě kovů, ve sklářském průmyslu při výrobě a zpracování skla, v automobilovém průmyslu (obr. 5.3), v potravinářském průmyslu, v chemickém průmyslu, dále např. při kontrole izolace chladírenských zařízení a mrazících boxů, ke sledování technologie výroby a dodržování výrobního postupu (obr. 5.2) a v neposlední řadě v protipožární prevenci. Termovizní systémy se často využívají ke sledování skladů materiálu s vysokým rizikem vzniku požáru např. skládka uhlí, pneumatik. [8]



Obr. 5.1 Slévárnská forma. [10]



Obr. 5.2 Chladnutí bloku motoru. [10]



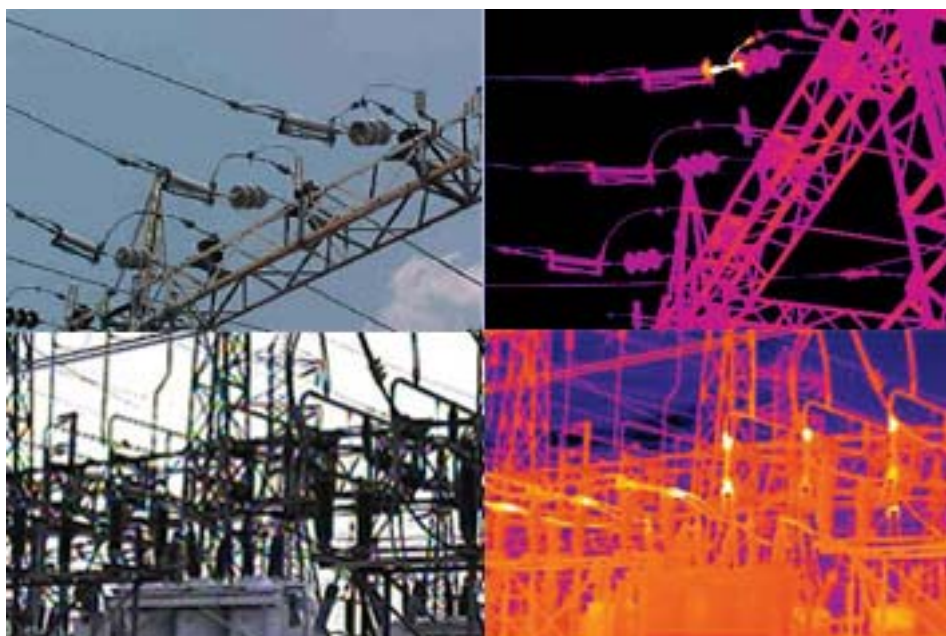
Obr. 5.3 Termogramy z automobilového průmyslu: 1 – spalovací motor, 2 – podvozek automobilu, 3 – vyhřívání sedadel, 4 – zkouška vlastností pneumatik. [upraveno dle 10]

5.2 Energetika

Pravidelné kontroly, diagnostika a monitorování energetických zařízení má nejen bezpečnostní význam, ale i významný ekonomický efekt. Poruchový stav (výpadek zařízení vvn nebo vn) má dopad na řadu odběratelů, na jejich výrobní proces a ekonomiku podniku. Pravidelným měřením a kontrolami je možné odhalit závady již v počátečním stádiu, rozhodnout o jejich závažnosti a vlivu na chod daného objektu. Výhodou tohoto měření je použití v době plného provozu zařízení (není třeba toto zařízení z provozu odstavit). V energetice se termodiagnostika využívá v těchto oblastech výroby a distribuce elektrické energie:

- kontrola rozvodné sítě elektrické energie,
- kontrola elektrických strojů, přístrojů a zařízení zajišťujících napájení,
- kontrola rozvaděčů.

Kontrola venkovních rozvodů se nejčastěji provádí termovizní technikou zabudovanou ve vrtulníku. U rozvodné sítě se kontroluje především tepelný stav spojů a svorek, zdali nevykazují vyšší teplotu než samotné vedení (obr. 5.4).

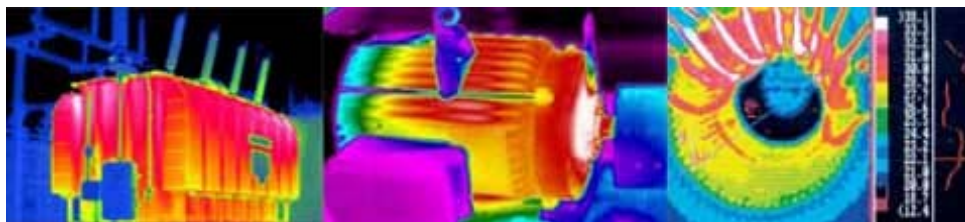


Obr. 5.4 Přehřívající se svorky elektrické rozvodné sítě. [10]

Při kontrole transformátorů jsou mimo svorek kontrolovány také průchodky, rozložení teplotního pole na nádobách olejových transformátorů apod. (obr. 5.5).

Termovizní technika se také uplatňuje při kontrole elektrických strojů a přístrojů, např. ke zjišťování teploty sběrných kartáčů a budících soustav motorů a generátorů, mechanických částí elektrických strojů např. zvýšení teploty zadírajícího se ložiska (obr. 5.5), silových částí elektrických obvodů.

Použitím termovize u velkých elektrických strojů se často kontroluje magnetický obvod. Kolem statoru odstaveného stroje (bez rotoru) je navinuto magnetizační vinutí, jehož zatížením je aktivován magnetický obvod stroje. V případě poškozeného statorového vinutí dochází ke zkratům mezi jednotlivými plechy magnetického obvodu a ke zvýšení teploty, které je termovizní technikou lehce identifikovatelné (obr. 5.5). Zkratky jsou zvláště nebezpečné pro izolaci vinutí, která může být nepřiměřeně namáhána. Důsledkem bývá její poškození a následná havárie stroje.



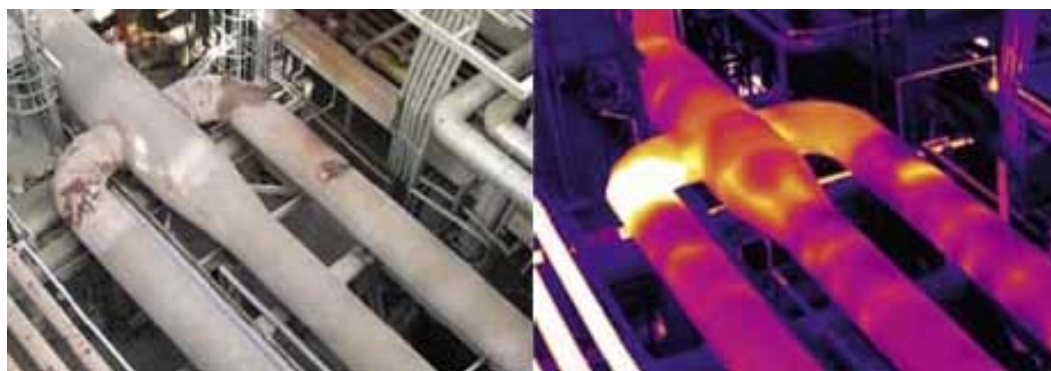
Obr. 5.5 Termogram transformátoru, motoru s přehřívajícím se ložiskem, satorového vinutí motoru. [upraveno dle 8, 10, 13]

S rozvojem telekomunikačních sítí se začala termodiagnostika stále více uplatňovat při pravidelných revizích, které se díky tomu značně zjednodušily a zkrátily. Složité anténové systémy jsou velmi citlivé na zhoršení přechodových odporů, díky nimž vznikají tepelné ztráty a klesá emitovaný výkon vysílače.

Termovizní techniku je rovněž vhodné použít v mnoha oblastech slaboproudé elektrotechniky např. při měření teplot na deskách plošných spojů, k optimalizaci návrhu rozložení součástek a detekci chybných komponentů. [8]

5.3 Teplovodní a parovodní systémy

U tepelných rozvodů dochází při přenosu k poměrně vysokým ztrátám, způsobeným nedostatečnou izolací, poškozeným popř. přímo děravým potrubím s ne příliš dlouhou životností. Pomocí termovizní techniky je možné vyhledat poruchy podzemního vedení, zjišťovat stav izolace (obr. 5.6), kontrolovat nadzemní sítě, u kterých hraje významnou roli bezpečnost. Diagnostika těchto systémů přináší výsledky v podobě ušetřené energie, vody, práce a napomáhá předejít vážným poruchám a k lepšímu plánování oprav. [8]



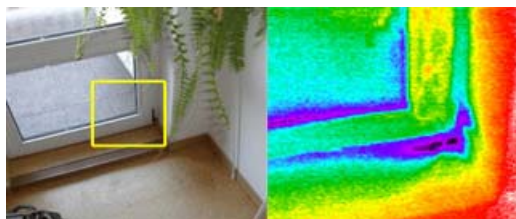
Obr. 5.6 Termogram poškozené izolace potrubí. [10]

5.4 Stavebnictví

Účelem termodiagnostiky ve stavebnictví je stanovení povrchových teplot pláště budovy (obr. 5.7). Tímto způsobem lze snadno lokalizovat místo a příčinu vzniku ztrát např. špatná izolace, netěsnost oken a dveří (obr. 5.8), kondenzace vlhkosti způsobená chybně provedenými stavebními pracemi atd. a tím předejít nežádoucímu úniku energie. [8]



Obr. 5.7 Exteriér horské chaty (tepelné ztráty v podkroví budovy). [14]



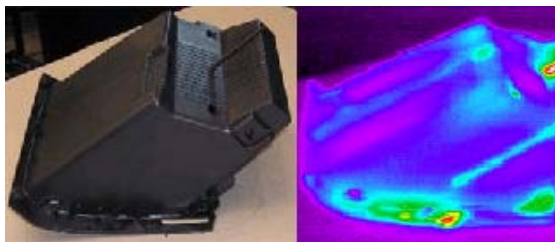
Obr. 5.8 Interiér rodinného domu (tepelné ztráty okolo dveří). [14]

5.5 Výzkum a vývoj

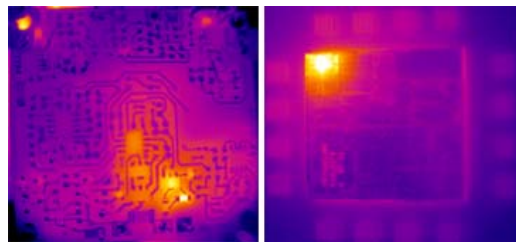
Výzkum a vývoj je další významnou oblastí, kde se velmi intenzivně využívá především termovizní technika. Okruh použití:

- vývoj materiálů,
- kontrola kvality (obr. 5.10),
- kontrola výrobních procesů,
- nedestruktivní defektoskopie.

Hlavní využití nachází termodiagnostika právě při nedestruktivním zkoušení materiálů a komponentů s možností analýzy tepelných obrazů v reálném čase (obr. 5.9) a se záznamem statických a dynamických dějů. [8]



Obr. 5.9 Teplotní analýza příčiny závady výrobku. [14]



Obr. 5.10 Kontrola základní desky a procesoru počítače. [10]

5.6 Další využití

- Medicína – využití termovize je založené na předpokladu, že místo postihnuté nemocí vyzařuje rozdílné množství tepla než zdravá tkáň (diagnostika cévních onemocnění, onemocnění kůže, očí, revmatická onemocnění kloubů, screening).
- Ekologie – vyhodnocování tepelných obrazů vybraných lokalit (hromadné zástavby, vodní nádrže), zkoumání příčin akumulace tepelné energie a regulace tepelné zátěže (výsadba porostu) k dosažení vhodného mikroklimatu.
- Speciální aplikace – bezpečnostní aplikace, průzkum, vyhledávání osob, zabezpečení ochrany objektu a majetku firem, noční vidění. [8]

6 ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo stručně popsat základní principy měření, hlavní rozdíly v konstrukci a funkci jednotlivých měřidel a jejich aplikační možnosti. Téma měření teploty a diagnostika je natolik obsáhlé, že tato práce není schopna svým rozsahem uspokojit zkušeného uživatele zmíněné měřicí techniky. Bakalářská práce však může posloužit jako zdroj informací pro zájemce o obor termodiagnostiky a s ním související měřicí technikou.

Přesné sledování teploty, jako jedné z významných stavových veličin pro řízení většiny technologických procesů, je zárukou stále jakosti mnoha produktů, dosažené bezpečnosti, hospodárnosti a vysoké produktivity výrobních procesů. Vyšší náklady na údržbu způsobené neefektivními metodami řízení a nedostatkem včasných a konkrétních informací o technickém stavu zařízení, dávají příležitost pro využití prediktivních technologií, jakým je termodiagnostika.

Konkurence na trhu nutí podniky respektovat novodobé trendy, mezi které patří zvyšování spolehlivosti a bezpečnosti provozu strojů a strojních zařízení, tedy i jejich vybavování účinným diagnostickým systémem.

Důležitým předpokladem správného výsledku měření je nejen dokonalá technika, ale i nezbytná znalost fyzikálních principů bezkontaktního měření teploty. Kvalitní měřicí systémy samy o sobě ještě nejsou zárukou přesných výsledků měření. Proto řada výrobců poskytuje ke svému sortimentu i odborné školení a zajišťuje veškerý záruční i pozáruční servis. Např. společnost TMV SS je výhradním dodavatelem termovizních kamer FLIR v České republice a na Slovensku a jako součást dodávky poskytuje zdarma ke každé zakoupené termovizní kameře odpovídající školení a instruktáž pracovníků.

Termodiagnostika je sice poměrně mladá disciplína, ale její přínos byl mnohokrát ověřen praxí. Bezdotykové měřicí přístroje doznaly v poslední době značného pokroku díky trvalému rozvoji v elektronice a optice. I proto, ale také díky příznivým cenám a dostupnosti, dnes nachází tato technika široké uplatnění a záleží pouze na uživateli, jak s nabízenými možnostmi naloží.

7 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] CHUDÝ, V.; PALENČÁR, R.; KUREKOVÁ, E.; HALAJ, M. Meranie technických veličín, 1. vydanie Bratislava: Vydavateľstvo STU, 1999. 688s. ISBN 80-227-1275-2;
- [2] ČERNOHORSKÝ, Jiří. Technická diagnostika. *Automa* [online]. 2003, č. 05 [cit. září 2008]. Dostupné na WWW: <http://www.odbornecasopisy.cz/>
- [3] JANČÍK, Jaroslav.; VACÁTKO, Jiří. Diagnostika v řídicích systémech. *Automa* [online]. 2008, č. 02 [cit. září 2008]. Dostupné na WWW: <http://www.odbornecasopisy.cz/>
- [4] BEJČEK, Ludvík. Bezdotykové měření teploty – novinka na trhu. *Automa* [online]. 2003, č. 01 [cit. září 2008]. Dostupné na WWW: <http://www.odbornecasopisy.cz/>
- [5] KADLEC, Karel. Bezdotykové měření teploty: [PDF dokument]. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze. [cit. září 2008]. Dostupný z: <http://www.vscht.cz/ufmt/kadleck.html>
- [6] VAVŘIČKA, Roman. Bezdotykové měření teploty: Praha 2006. [PDF dokument]. České vysoké učení technické, Fakulta strojní. [cit. září 2008]. Dostupný z: <http://utp.fs.cvut.cz/vz/clanky/>
- [7] DÍTĚ, Ivan. Bezkontaktní infračervené teploměry. *Elektro* [online]. 2004, č. 07 [cit. září 2008]. Dostupné na WWW: <http://www.odbornecasopisy.cz/>
- [8] ŠIMKO, Milan.; CHUPÁČ, Milan. Aplikačné možnosti termovízie v praxi. *Elektro* [online]. 2006, č. 01 [cit. září 2008]. Dostupné na WWW: <http://www.odbornecasopisy.cz/>
- [9] KABEŠ, Karel. Infračervené pyrometry – přehled trhu. *Automatizace* [online]. 2005, č. 9 [cit. září 2008]. Dostupné na WWW: <http://www.automatizace.cz/>
- [10] Webové stránky společnosti FLIR systems [online]. [cit. září 2008]. Dostupné na WWW: <http://www.flirthermography.com/czech/>
- [11] Webové stránky společnosti TMV SS [online]. [cit. září 2008]. Dostupné na WWW: <http://www.tmvss.cz/index.html>
- [12] Webové stránky společnosti OMEGA [online]. [cit. září 2008]. Dostupné na WWW: <http://www.omegaeng.cz/>
- [13] Meverick Inspection Ltd., Canada <http://www.maverickinspection.com/>
- [14] Termovize s.r.o. <http://www.termovize.com>