



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A
ROBOTIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND
ROBOTICS

TERMODIAGNOSTIKA - DOTYKOVÉ A BEZDOTYKOVÉ MĚŘENÍ TEPLoty

THERMODIAGNOSTICS – CONTACT AND CONTACT-FREE TEMPERATURE
MEASUREMENTS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. Martin MIKULA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. Miloš HAMMER, CSc.

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky

Akademický rok: 2013/14

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Martin Mikula

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

obor: **Kvalita, spolehlivost a bezpečnost (2341T005)**

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 diplomové práce:

Termodiagnostika - dotykové a bezdotykové měření teploty

v anglickém jazyce:

Thermodiagnosics – contact and contact-free temperature measurements

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V průmyslové praxi je značně důležitá termodiagnostika, tedy posuzování stavu technického objektu na základě teploty. Jsou rozšířeny různé způsoby měření teploty, můžeme je rozdělit na dotykové a bezdotykové. V obou uvedených případech je možné získané výsledky použít k termodiagnostice konkrétních technických objektů.

Cíle diplomové práce:

V diplomové práci se především soustředíte na tyto úkoly:

1. Popište způsoby dotykového a bezdotykového měření teploty a vysvětlíte možnost použití získaných výsledků k posouzení teplotního stavu obecného diagnostikovaného objektu.
2. Ve spolupráci s konkrétní firmou vyberte vhodný technický objekt a u něho proveďte měření teploty všemi ve firmě dostupnými měřicími přístroji.
3. Výsledky důkladně vyhodnoťte, porovnejte, a to především z hlediska přesnosti a využití konkrétního způsobu měření.
4. Rozeberte možnost využití získaných výsledků k diagnostice konkrétního vybraného technického objektu.

Seznam odborné literatury:

- 1.KREIDL,M; ŠMÍD,R. Technická diagnostika. Senzory-metody-analýza signálu. 1. vydání. Praha: BEN-technická literatura, 2006,408 s. ISBN 80-7300-158-6.
- 2.KREIDL,Marcel. Měření teploty (senzory a měřicí obvody). 1. Vydání. Praha: BEN – technická literatura, 2005. 240 s. ISBN 80-7300-145-4.

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Miloš Hammer, CSc.

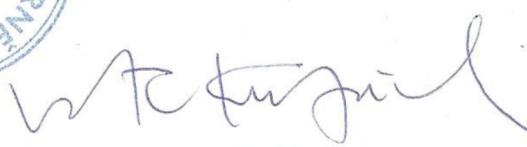
Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/14.

V Brně, dne 20.11.2013 6:50:

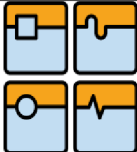




doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
Ředitel ústavu



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

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 5
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá termodiagnostikou v průmyslové praxi, která je v dnešní době značně důležitá pro posuzování technického stavu objektu na základě teploty. Obsahuje přehled metod dotykového, bezdotykového měření teploty a jejich princip, výhody a nevýhody pro aplikaci v průmyslové praxi. Dále bylo v rámci této diplomové práce provedeno měření ve firmě Daikin Device Czech Republic s použitím kontaktního teploměru a dvou dostupných termokamer pro řešení aktuálních úkolů souvisejících s výrobou.

Klíčová slova

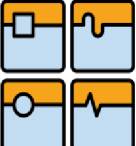
Termodiagnostika, teplota, teploměr, senzor, měřený objekt, měřící zařízení, bezdotykové měření teploty, dotykové měření teploty, emisivita, termokamera, termogram

ABSTRACT

This thesis is concerned with thermodiagnosics in industrial practise, which is very important for the assessment of technical condition of object on the basis of temperature, in today's time. It includes summary of contact and contact-free methods and their principle, advantages and disadvantages for application in industrial practise. Because of thesis it was carried out measurement in company Daikin Device Czech republic with the use of contact thermometer and two available thermocameras for solving of topical tasks relating to production.

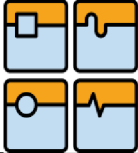
Key words

Thermodiagnosics, temperature, thermometer, sensor, the measured object, measuring equipment, contact-free temperature measurements, contact temperature measurements, emissivity, thermal imager, thermo gram

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 6
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MIKULA, Martin. *Termodiagnostika - dotykové a bezdotykové měření teploty*. Brno 2014. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. 74 s. Vedoucí práce doc. Ing. Miloš Hammer, CSc.

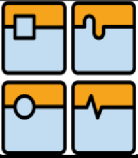
	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 7
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

PROHLÁŠENÍ

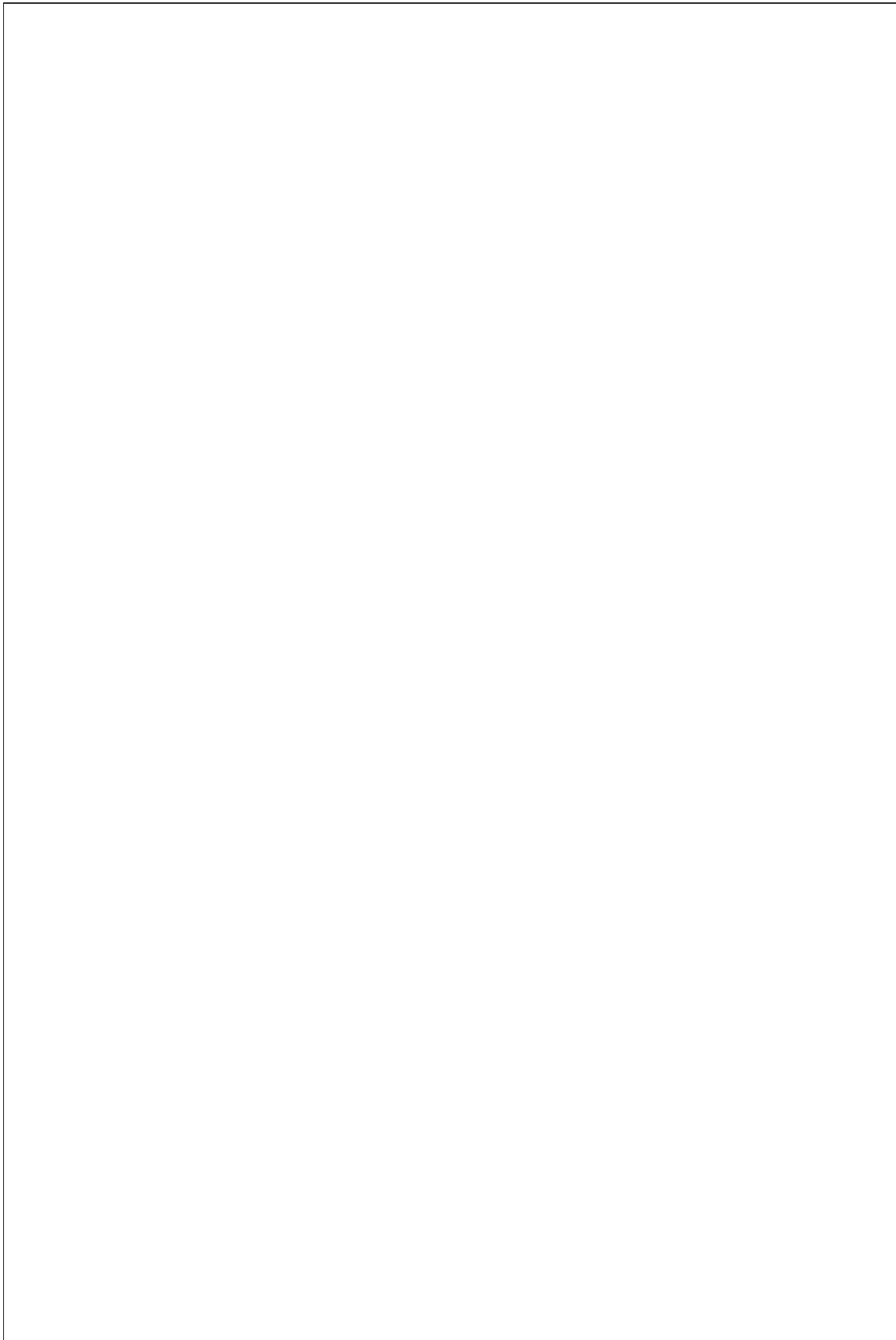
Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Termodiagnostika - dotykové a bezdotykové měření teploty** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

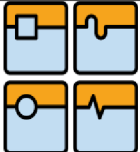
Datum

Bc. Martin Mikula



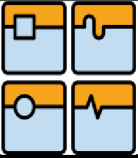
DIPLOMOVÁ PRÁCE



	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 9
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval panu doc. Ing. Miloši Hammerovi, CSc. za vstřícný přístup, odbornou pomoc a věcné připomínky, které mi pomohli vypracovat tuto diplomovou práci. Dále bych chtěl poděkovat firmě Daikin Device Czech s.r.o. za poskytnutí tématu a podporu při jeho zpracování, své rodině, přítelkyni a přátelům za velkou podporu během studia na vysoké škole.

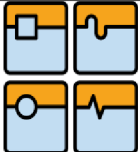


DIPLOMOVÁ PRÁCE

OBSAH

ABSTRAKT	5
PROHLÁŠENÍ.....	7
PODĚKOVÁNÍ	9
OBSAH.....	11
ÚVOD.....	13
1 Technická diagnostika	15
1.1 Úvod do technické diagnostiky.....	15
1.2 Rozdělení technické diagnostiky	15
1.3 Termodiagnostika	16
1.3.1 Teplota	16
1.3.2 Snímač teploty	17
2 Dotykové měření teploty	18
2.1 Rozdělení teploměřů	18
2.1.1 Dilatační teploměry.....	18
2.1.2 Elektrické teploměry	22
2.1.3 Speciální teploměry	28
2.2 Zabudování dotykových čidel teploty.....	30
2.3 Výhody a nevýhody dotykového měření teploty	32
3 Bezdotykové měření teploty	35
3.1 Základní veličiny a pojmy bezdotykového měření teploty.....	35
3.2 Zákony záření pro černé těleso	38
3.3 Rozdělení bezdotykových snímačů teploty	39
3.3.1 Širokopásmové pyrometry	40
3.3.2 Úzkopásmové pyrometry	40
3.3.3 Poměrové pyrometry.....	41
3.3.4 Termovize	42
3.4 Výhody a nevýhody bezdotykového měření teploty	44
4 Využití termografie v praxi.....	46
4.1 Využití termografie v energetice	46
4.2 Využití termografie v teplovodních a parovodních systémech	47
4.3 Využití termografie ve stavebnictví.....	47
4.4 Využití termografie v medicíně	48
4.5 Využití termografie v dalších odvětvích.....	48
4.6 Ukázky využití termografie v Daikin Device Czech	48
5 Praktická měření ve firmě Daikin Device Czech.....	51

5.1 O společnost Daikin Device Czech	51
5.2 Použitá měřicí zařízení	51
5.2.1 MOBIR M8.....	51
5.2.2 Fluke Ti27.....	52
5.2.3 Anritsu HA-200K, teplotní sonda N-231K-00-1-TC1-ASP	53
5.3 Měření provedená ve firmě Daikin Device Czech	54
5.3.1 Hodnocení způsobilosti měřidla	54
5.3.2 Stanovení emisivit povrchu komponent kompresoru nahříváných v peci.....	59
5.3.3 Stanovení emisivit povrchu komponent kompresoru upravených lihovým fixem nahříváných v peci.....	61
5.3.4 Stanovení emisivit povrchu komponent kompresoru upravených pájecí pastou (D60) nahříváných v peci	63
ZÁVĚR.....	65
Přílohy.....	67
Tabulka emisivit	67
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	68
Seznam použitých symbolů a zkratek.....	73

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 13
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

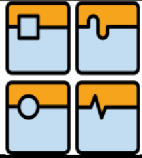
ÚVOD

Jedním z nejvíce sledovaných parametrů ve výrobě, v diagnostice a údržbě je dnes teplota, která charakterizuje určitý fyzikální stav zkoumaného objektu. Díky sledování teploty můžeme regulovat výrobní procesy, diagnostikovat elektrické nebo mechanické součásti, stavebně tepelné vlastnosti budov a kontrolovat provozní stavy strojů a zařízení, díky čemuž můžeme správně nastavit podmínky výrobního a technologického procesu, dodržet požadovanou jakost a minimalizovat neplánované odstávky. [1], [2]

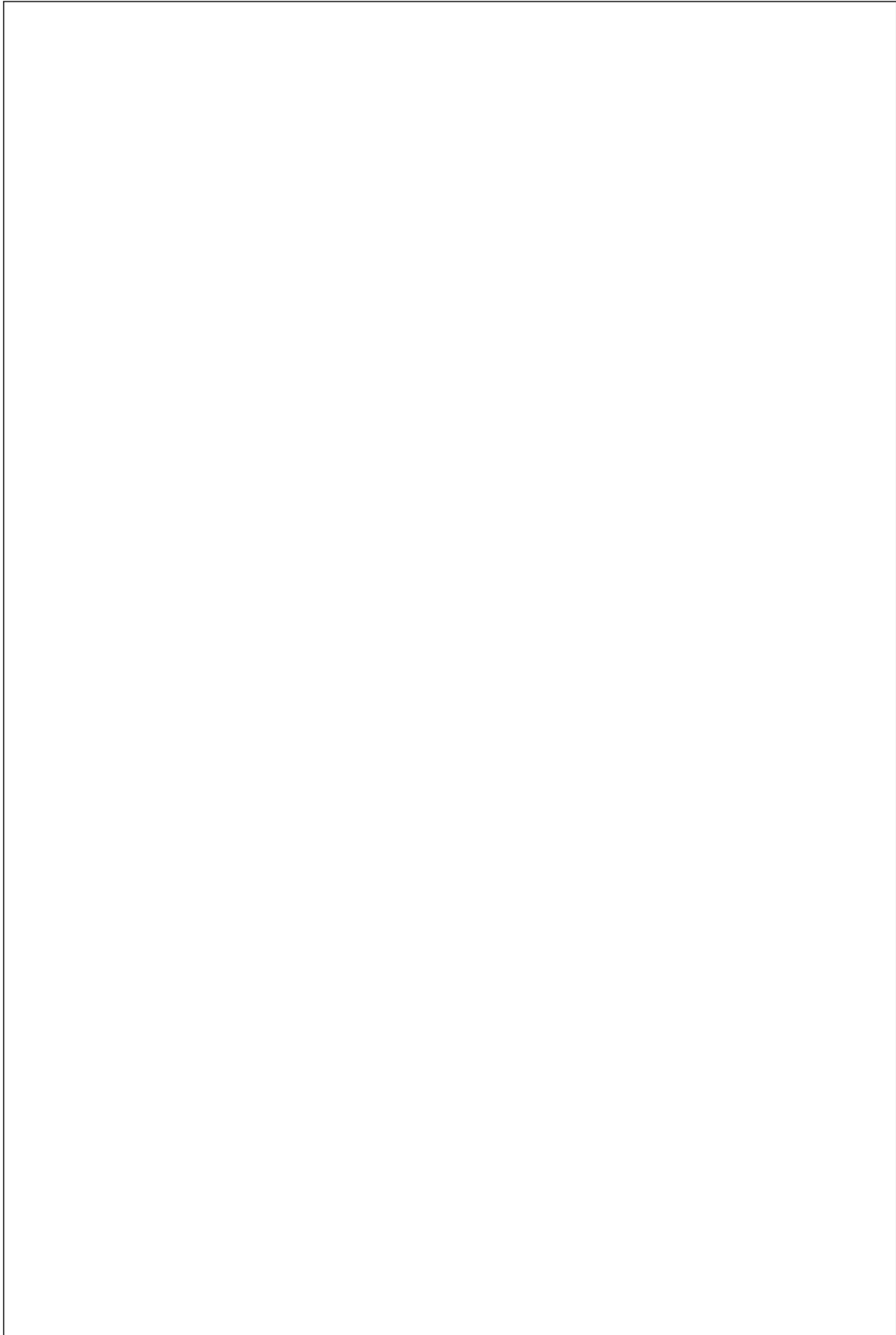
Měření teploty se podle použité metody rozděluje na kontaktní, využívající různé druhy kontaktních teploměrů a bezkontaktní, které pro měření povrchu využívají pyrometry nebo termovizní kamery.

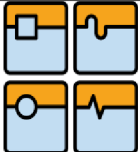
Záměrem této diplomové práce je popsat a objasnit metody kontaktního a bezkontaktního měření teploty, jejich výhody a nevýhody, jejich použití v průmyslové praxi a následně ověřit tyto poznatky na konkrétních aplikacích v provozu firmy Daikin Device Czech Republic.

Ve firmě Daikin Device Czech jsou termokamery MobIR M8 a Fluke Ti27 využívány především pro zjišťování teplotního gradientu a odhalování poruch u zařízení a elektroinstalace. Pro přesné měření teplot byly kamery využívány pouze okrajově. Cílem diplomové práce tedy je uvedené termokamery využít při procesu pájení, a to včetně určení některých technických parametrů při uvedených procesech a v rámci možností i zaškolit zaměstnance z oddělení údržby a engineeringu v oblasti měření, údržby a odhalování poruch zařízení.



DIPLOMOVÁ PRÁCE



	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 15
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

1 TECHNICKÁ DIAGNOSTIKA

1.1 Úvod do technické diagnostiky

Technická diagnostika je samostatný vědní obor, který se zabývá stanovováním technického stavu objektu pomocí bezdemontážních a nedestruktivních metod a prostředků. Využívá znalostí, které mají jak heuristický, tak i kauzální charakter a matematických modelů diagnostikovaných objektů. Díky sledování technického stavu zařízení můžeme včasně detekovat fyzikální změny a procesy. [3]

Důležitými úkoly technické diagnostiky také jsou:

- Detekce vady nebo poruchy (identifikace vady nebo poruchy)
- Lokalizace vady nebo poruchy (určení místa vady nebo poruchy objektu)

Diagnostické systémy představují prostředek, který využívají další systémy a procesy uplatňované při provozu a správě technických zařízení a volí se podle druhu diagnostikovaného objektu. Jednoduchý diagnostický systém dokáže pouze detekovat poruchu ohrožující provozuschopnost objektu, zatímco složitější systémy dokáží vyhodnotit stupeň nebezpečnosti vzniklé poruchy, její příčinu a případně mohou zastavit provoz objektu.

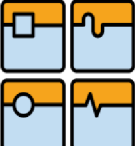
Při diagnostice sledovaného objektu se zpravidla měří několik různých veličin, na základě kterých je více či méně možné stanovit vznik a vývoj poruchy včetně doby, kdy lze objekt ještě bezpečně používat. V tom případě hovoříme o multiparametrické diagnostice, která však není předmětem této diplomové práce. [3]

1.2 Rozdělení technické diagnostiky

Technická diagnostika je v dnešní době neodmyslitelnou součástí systému údržby. Díky technické diagnostice můžeme rozpoznat okamžik k provedení příslušného zásahu. Každý obor technické diagnostiky je schopen postihnout jiné podstatné skutečnosti důležité pro provoz a údržbu daného objektu a poskytují informace o okamžitém stavu tohoto objektu.

Technickou diagnostiku můžeme rozdělit podle sledovaných fyzikálních veličin určujících provozní stav objektu na tyto nejdůležitější:

- Diagnostika teploty (častěji termodiagnostika)
- Diagnostika tlaku
- Diagnostika množství tepla
- Diagnostika průtoku
- Diagnostika koncentrace
- Diagnostika výšky hladiny
- Vibrodiagnostika
- Zvuková (hluková) diagnostika
- Defektoskopie
- Tribodiagnostika
- Elektrodiagnostika
- Diagnostika multiparametrická

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 16
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

Podrobnosti o jednotlivých diagnostikách jsou uvedeny v příslušné literatuře. Dále je pozornost soustředěna na termodiagnostiku. [4], [5], [6]

1.3 Termodiagnostika

Termodiagnostika patří mezi nedestruktivní metody sloužící pro monitorování technického stavu objektu během provozu, případně pro nedestruktivní testování materiálu objektu. Je založená na zobrazení a vyhodnocení teplotního pole povrchu zkoumaného objektu.

Pro snímání teploty může být použito dotykových nebo bezdotykových metod. U dotykových metod lze pro získání teplotního pole použít jako indikátor tekuté krystaly spolu se záznamem CCD kamerou. U bezdotykových metod se měření povrchu provádí za pomoci termografických kamer využívajících infračerveného spektra elektromagnetického záření v oblasti vlnových délek od 0,4 μm do 25 μm vyzařované povrchem tělesa. [3]

1.3.1 Teplota

Teplota je stavová veličina, která patří mezi nejdůležitější termodynamické vlastnosti určující stav hmoty. Patří mezi základní fyzikální veličiny mezinárodní soustavy SI s jednotkou kelvin.

Teplota představuje míru kinetické energie, s kterou se atomy a molekuly pohybují. Tento pohyb ustává při dosažení absolutní teplotní nuly.

Teplotní stupnice byla odvozena pomocí termodynamických zákonů. Základní jednotkou termodynamické stupnice je kelvin a definuje se jako 273,15-tý díl termodynamické teploty trojného bodu vody, který představuje rovnovážný stav všech třech skupenství vody. V termodynamické stupnici má teplota trojného bodu hodnotu $T = 273,15\text{K}$. Dále nejčastěji rozlišujeme Celsiovu teplotu, která má jednotku stupeň celsia a přepočet na termodynamickou teplotu je dán vztahem:

$$t (^{\circ}\text{C}) = T(\text{K}) - 273,15 \quad (1)$$

Dále se můžeme v některých anglosaských zemích setkat s Fahrenheitovou stupnicí, u které je přepočet na stupnici Celsia dán vztahem:

$$\vartheta = \left(\frac{9}{5}\right) t + 32 \quad (2)$$

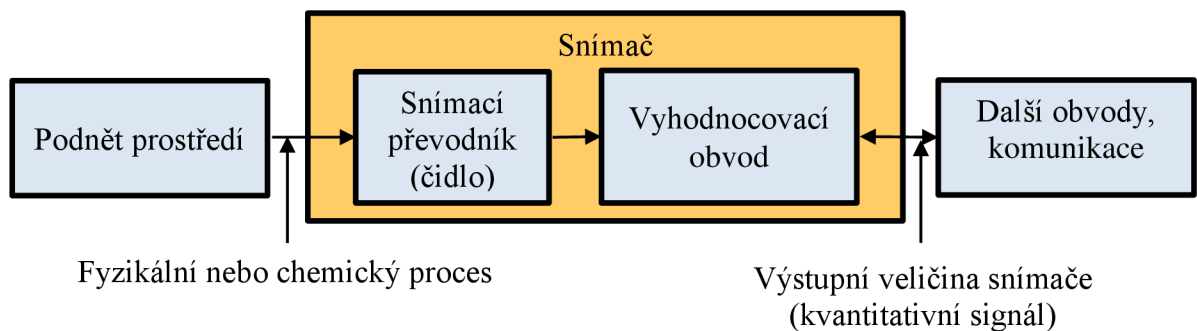
ϑ ... Fahrenheitova teplota,

t ... Celsiova teplota

Teplota je nepřímo měřenou veličinou. Pro určení teploty se využívá závislosti vhodné zvolených fyzikálních veličin na teplotě. Mezi tyto teplotně závislé veličiny patří nejčastěji délkové rozměry a objem pevných a kapalných těles, tlak plynů, elektrický odpor vodičů nebo polovodičů a elektromotorické napětí termoelektrických článků. Lze též využít vlastností elektromagnetických vln vyzařovaných tělesem. [7]

1.3.2 Snímač teploty

Snímač teploty, někdy také označován ekvivalentními pojmy senzor nebo čidlo teploty, tvoří nejdůležitější část měřicího zařízení. Rozhoduje o přesnosti, měřicím rozsahu, rychlosti měření a dalších vlastnostech. Snímač je první funkční prvek měřicího řetězce, který snímá sledovanou fyzikální nebo chemickou veličinu. Tuto snímanou veličinu transformuje dle definovaného principu na výstupní veličinu. Výstupní veličinou bývá obvykle elektrický signál, který je dále vyhodnocován a zpracováván elektronickým detektorem a dalšími obvody. Schéma snímače můžeme vidět na následujícím obrázku (Obr. 1).



Obr. 1 Schéma snímače teploty

Snímače teploty můžeme rozdělit podle měřené teploty, styku s měřenou soustavou, fyzikálního principu a transformace signálu.

Podle měřené teploty se snímače dělí na:

- Nízkoteplotní (pouzdro snímače obvykle obsahuje elektroniku, cca do 125 °C)
- Vysokoteplotní (pouzdro snímače je bez elektroniky)

Podle styku s měřenou součástí se snímače dělí na:

- **Bezkontaktní**
- **Kontaktní**

Podle fyzikálního principu se snímače dělí na:

- Dilatační
- Termoelektrické
- Odporové
- Polovodičové
- Chemické
- Radiační

Podle transformace se snímače dělí na:

- Aktivní (snímač se díky působení teploty chová jako zdroj elektrické energie a nepotřebuje další napájení)
- Pasivní (pro převod teploty na jinou fyzikální veličinu je nutné snímač připojit ke zdroji elektrické energie)

2 DOTYKOVÉ MĚŘENÍ TEPLoty

2.1 Rozdělení teploměrů

Dotykové měření teploty spočívá v přímém kontaktu snímače (čidla nebo senzoru) s měřeným objektem, přičemž se využívá přenosu tepla. Dotykové měření teploty se využívá zejména u stacionárních, dobře přístupných objektů. Přehled technických dotykových teploměrů nalezneme v následující tabulce:

Tab. 1 Přehled technických dotykových teploměrů [10], [11]

Skupina teploměrů	Typ teploměru	Fyzikální princip	Obvyklý teplotní rozsah [°C]	
Dilatační teploměry	Plynový	Změna tlaku	- 270	700
	Tenzní	Změna tenze par	- 40	400
	Kapalinový	Změna objemu	- 20	750
	Kovový	Délková roztažnost	0	900
Elektrické teploměry	Termoelektrické	Termoelektrický jev	- 200	2000
	Odporové kovové	Změna elektrického odporu	- 250	1000
	Odporové polovodičové	Změna elektrického odporu	- 250	1000
	Monolitické (integrované)	Změna prahového napětí	- 200	400
Speciální teploměry	Žároměrky	Bod tání materiálu	600	2000
	Tavné indikátory	Bod tání materiálu	40	1650
	Barevné indikátory	Změna barvy	40	1300

2.1.1 Dilatační teploměry

Princip dilatačních teploměrů je založen na roztažnosti použitých kapalin, plynů a pevných látek při změně teploty, která způsobí změnu jejich objemu, přičemž jejich objem se s rostoucí teplotou zvětšuje. U kapalin, plynů a pevných látek je teplotní objemová roztažnost dána vztahem:

$$V = V_0(1 + \beta \Delta t) \quad (3)$$

V_0 ... počáteční objem kapaliny nebo plynu

V ... konečný objem kapaliny nebo plynu

Δt ... rozdíl mezi počáteční a konečnou teplotou

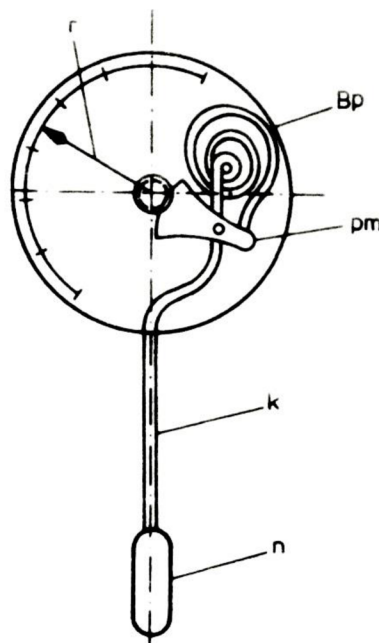
β ... součinitel teplotní objemové roztažnosti

Mezi teploměry využívající teplotní objemovou roztažnost patří plynové, tenzní a kapalinové. [12]

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 19
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

Plynové teploměry

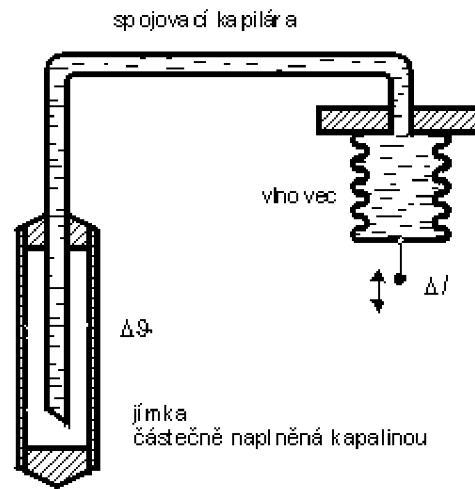
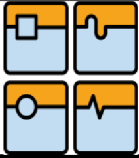
U plynových teploměrů se využívá přímé úměrnosti tlaku plynu za stálého objemu na teplotě. Teploměr se skládá z jímky (n), která představuje vlastní čidlo válcového tvaru o objemu 100 – 500 cm³, spojovací kapiláry (k) a deformačního tlakoměru, kterým může být například Bourdonova trubice (Bp) a převodového ústrojí (pm). Jako náplň těchto teploměrů slouží nejčastěji dusík, hélium nebo suchý vzduch pod tlakem. [7], [11], [12]



Obr. 2 Plynový tlakový teploměr [13]

Tenzní teploměry

Teploměry tenzní využívají závislosti mezi teplotou a rovnovážným tlakem v soustavě o jedné složce a dvou fázích: kapalina-pára. Konstrukce tenzních teploměrů je obdobná konstrukci plynových teploměrů. Skládá se z jímky (vlastní čidlo o malém objemu), do které je zavedena až ke dnu kapilára spojující jímku s deformačním tlakoměrem. Spojovací kapilára a deformační člen je zcela zaplněn kapalinou, zatímco jímka je zaplněná kapalinou jen částečně. Při maximální hodnotě teploty dojde k odpaření veškeré kapaliny. [7], [11], [12]

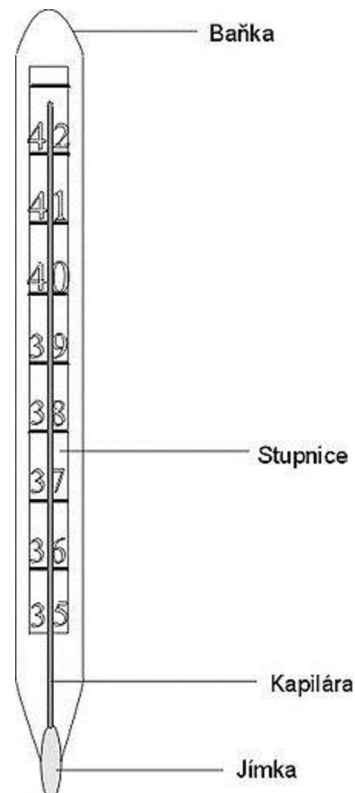


Obr. 3 Tenzní teploměr [11]

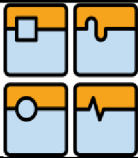
Kapalinové teploměry

Kapalinové teploměry využívají závislosti změny objemu kapaliny se změnou teploty. Mohou být buď ve formě skleněných teploměrů, nebo tlakových kapalinových teploměrů.

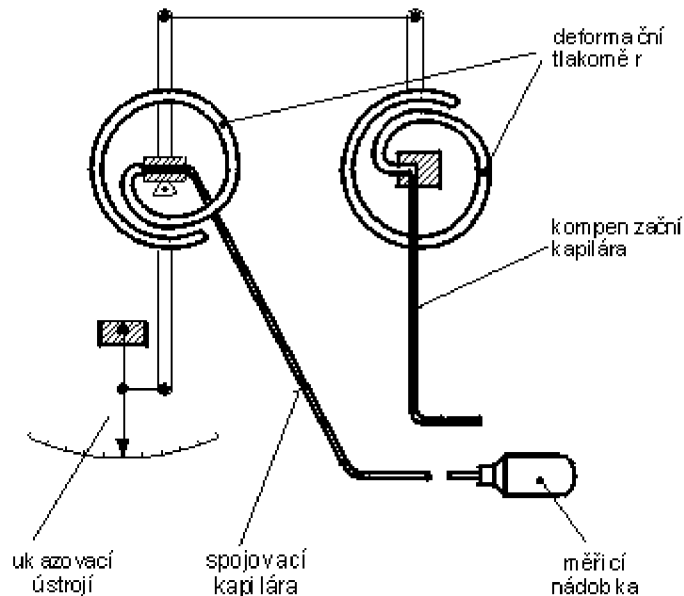
Skleněné teploměry bývají nejčastěji plněny rtutí nebo etanolem. Skládají se z jíмки naplněné teploměrnou kapalinou, měřící kapilárou, stupnice a skleněného obalu. S rostoucí teplotou se zvětšuje objem teploměrné kapaliny v jímkce a dojde k expanzi do kapiláry. Výška hladiny v kapiláře spolu se stupnicí určují teplotu měřeného objektu. [7], [11], [12]



Obr. 4 Části kapalinového teploměru [14]



U kapalinových tlakových teploměrů je náplň tvořena nejčastěji rtutí, metanolem nebo xylenem. Konstrukce je tvořena kovovou nádobkou, spojovací kapilárou a deformačním členem, které jsou zcela naplněny teploměrnou kapalinou. S rostoucí teplotou dochází k nárůstu tlaku, který je detekován deformačním členem a převáděn na hodnotu teploty. [11]



Obr. 5 Kapalinový tlakový teploměr s kompenzačním členem [15]

Dále se využívá teplotní délková roztažnost, při které se se změnou teploty těleso roztáhne v daném směru o určitou délku. Obvykle se o délkové roztažnosti hovoří u těles, které mají protáhlý tvar s jedním délkovým rozměrem, který výrazně převyšuje zbylé dva rozměry. Teplotní délková roztažnost má zpravidla smysl pouze u pevných látek. Teplotní délková roztažnost je dána vztahem:

$$l = l_0(1 + \alpha \Delta t) \quad (4)$$

l_0 ... počáteční délka tělesa

l ... konečný délka tělesa

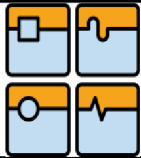
Δt ... rozdíl mezi počáteční a konečnou teplotou

α ... teplotní součinitel délkové roztažnosti

Teplotní délkové roztažnosti kovů využívají v praxi bimetalické a tyčové dilatační teploměry. [7], [11], [12]

Bimetalický teploměr

Bimetalický teploměr je tvořen dvěma kovy s různou teplotní délkovou roztažností, které jsou navzájem pevně spojeny například svařením. Tento bimetalový proužek je jedním koncem pevně upevněn a vlivem rostoucí teploty se začne deformovat (prohýbat) směrem ke kovu s menším teplotním součinitelem. Tento ohyb volného konce proužku je přenášen ukazatelem přístroje. Kovy používané pro výrobu bimetalových proužků by měly mít co největší rozdíl teplotních součinitelů. Kovy používané pro výrobu bimetalu jsou uvedeny v následující tabulce.



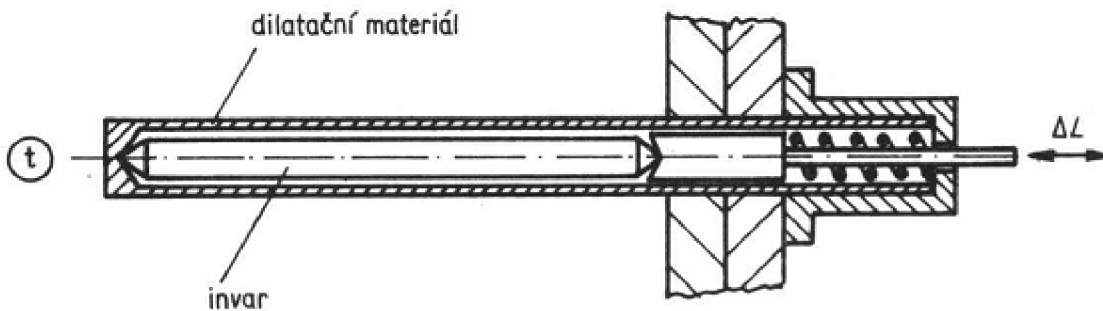
Tab. 2 Materiály používané pro výrobu bimetalu [16]

Materiál	Teplotní součinitel [10^{-5} K^{-1}]
Hliník	2,4
Měď	1,7
Mosaz	1,9
Nikl	1,3
Železo	1,2
Invar (64% Fe, 36% Ni)	< 0,13

Bimetalové teploměry se nejčastěji využívají jako tepelná ochrana silnoproudých zařízení a pro signalizaci mezním stavů. [7], [11], [12]

Tyčový dilatační teploměr

Tyčové dilatační teploměry jsou tvořeny kovovou trubicí a v ní umístěnou kovovou tyčí. Materiály používané pro výrobu jsou obdobné jako u bimetalických teploměrů. Trubice je zpravidla tvořena materiálem s velkým teplotním součinitelem délkové roztažnosti, zatímco pro tyč se využívají materiály s malým teplotním součinitelem. Kovová tyč je na jednom konci pevně spojena s trubicí, ve které je uložena. S rostoucí teplotou dojde ke změně délky trubice i v ní vložené tyče, přičemž délka trubice oproti tyči vzroste několikanásobně. Tento rozdíl lze snímat indukčním převodníkem nebo jiným snímačem posuvu. [7], [11], [12]

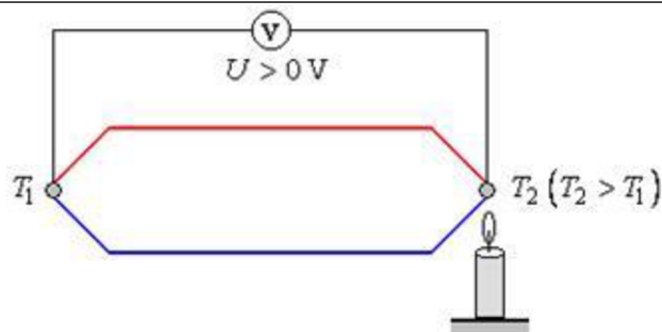


Obr. 6 Dilatační tyčový teploměr [15]

2.1.2 Elektrické teploměry

Termoelektrické senzory (termočlánky)

Princip termočlánků je založen na Seebeckově jevu, kdy je tepelná energie převáděna na energii elektrickou. Termočlánek je tvořen dvěma vodiči, navzájem vodivě spojených na obou koncích, přičemž každý z nich je vyroben z odlišného kovového (polovodičového) materiálu. Pokud mají oba spoje rozdílnou teplotu, vznikne termoelektrické napětí a obvodem začne protékat termoelektrický proud.



Obr. 7 Seebeckův jev [17]

Při malém teplotním rozdílu obou konců vodičů platí téměř lineární závislost termoelektrického napětí na teplotě a tuto závislost lze vyjádřit jako:

$$\Delta U = \alpha_{12} (T_2 - T_1) = \alpha_{12} \Delta T \quad (5)$$

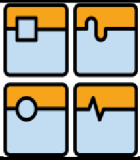
α_{12} ... Seebeckův (termoelektrický) koeficient závisléjící na dvojici použitých kovů

Při větším rozdílu teplot obou konců vodičů by napětí již nebylo přímo úměrné rozdílu teplot a tento lineární vztah by bylo nutné nahradit složitějším vztahem. [29]

Materiály používané pro výrobu termočlánků jsou normalizovány a označovány jednotlivými typy. Dané materiály by měli vykazovat co největší linearitu závislosti termoelektrického napětí na teplotě, stabilitu při dlouhodobém provozu, dobrou chemickou a mechanickou odolnost. V následující tabulce (Tab. 3) je uvedeno složení a použitelnost jednotlivých typů termočlánků. [7]

Tab. 3 Typy a použitelnost termočlánků [7], [18]

Typ	Složení	Použitelnost
TYP K	NiCr-NiAl (chromel-alumen)	Využívá se především pro měření v oxidační a inertní atmosféře a v jaderné energetice. Není vhodný pro měření ve vakuu.
TYP T	Cu-CuNi (měď-konstantan)	Nejvhodnější článek pro měření nízkých až kryogenních teplot. Je vhodný i pro měření v redukční a oxidační atmosféře a ve vakuu.
TYP J	Fe-CuNi (železo-konstantan)	Vhodný článek pro měření v redukční, oxidační a inertní atmosféře a ve vakuu.
TYP N	NiCrSi-NiSiMg (nicrosil-nisil)	Využívá se v aplikacích, kde dochází k cyklickým změnám teploty a v jaderné energetice.
TYP E	NiCr-CuNi	Vhodný pro vakuum a mírně oxidační atmosféru.
TYP R	PtRh13-Pt	Vhodný pro oxidační atmosféru a korozivní prostředí.
TYP S	PtRh10-Pt	Má obdobné využití jako TYP R.
TYP B	PtRh30-PtRh6	Má obdobné využití jako TYP S a TYP R.
TYP G	W-WRh	Nejvhodnější článek pro měření extrémně vysokých teplot v oxidační a inertní atmosféře, vakuu a vodíku.
TYP C	WRh5-WRh26	Má obdobné využití jako TYP G.
TYP D	WRh3-WRh25	Má obdobné využití jako TYP G a TYP C.



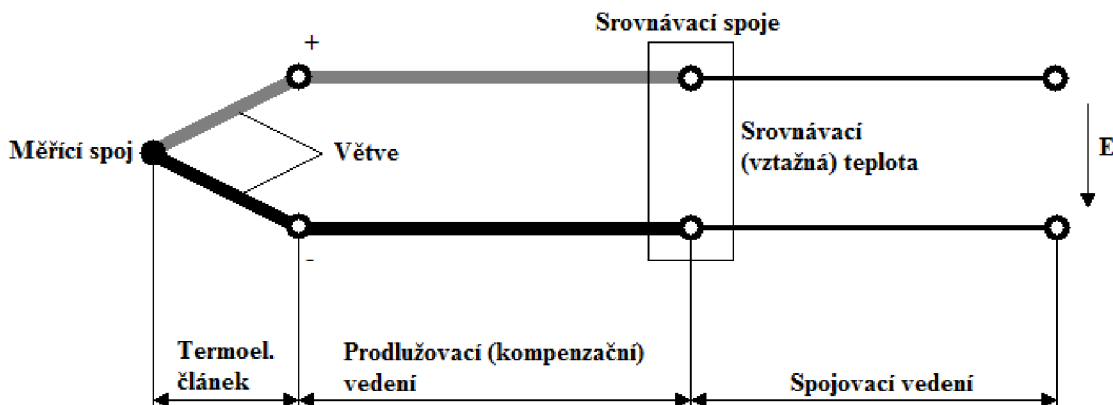
V následující tabulce jsou uvedeny teplotní rozsahy jednotlivých typů termočlánků. Dlouhodobé a krátkodobé využití je závislé na konstrukci snímače.

Tab. 4 Teplotní rozsahy termočlánků [7], [11], [18], [19]

Typ	Dlouhodobě [°C]		Krátkodobě [°C]	
TYP K	-200	1250	-270	1370
TYP T	-250	350	-270	400
TYP J	0	750	-210	1200
TYP N	0	1100	-270	1300
TYP E	-200	900	-270	100
TYP R	0	1600	-50	1770
TYP S	0	1550	-50	1770
TYP B	0	1700	0	1820
TYP G	0	2320	0	2600
TYP C	30	1820	0	2320
TYP D	0	1820	0	2320

Při měření termoelektrického napětí se měřicí přístroj zapojí tak, že se rozpojí srovnávací spoj nebo se zapojí do jedné větve termočlánku. Správná funkce snímače je zajištěna, pokud je teplota srovnávacího spoje konstantní nebo musí být vliv termoelektrického napětí tohoto spoje kompenzován. [11]

Schéma termočlánku můžeme vidět na následujícím obrázku (Obr. 8):



Obr.8 Schéma termoelektrického článku

Podle konstrukce se termočlánky dělí na:

- Drátové termoelektrické články, které tvoří dvě kovové větve svařené do kuličky, obvykle uložené keramických trubičkách o průměru 0,5 až 3,5 mm.
- Plášťové termoelektrické články jsou chráněny kovovým pláštěm o průměru 0,1 až 8 mm a izolovány minerálním práškem z MgO nebo Al₂O₃.
- Speciální termoelektrické články využívané v prostředí s nebezpečím výbuchu, jednorázová měření, pro měření vysokých teplot a teplot taveniny. [12]

Odporové kovové senzory

Elektrický odpor kovů je závislý na teplotě. Kov je tvořen krystalovou mřížkou, kde se mezi atomy kovu v uzlových bodech volně (chaoticky) pohybují elektrony (elektronový plyn), které umožňují vedení elektrického proudu. Se zvyšující se teplotou roste amplituda kmitů atomů kovu kolem uzlových bodů mřížky a dochází k rozptylu elektronů, což má za následek rostoucí odpor kovu. Konduktivitu (měrnou elektrickou vodivost) můžeme vyjádřit vztahem:

$$\sigma = n \cdot e^2 \frac{\tau}{m} \quad (6)$$

n ... počet elektronů v jednotce objemu

e ... elementární náboj

τ ... relaxační čas elektronů

m ... hmotnost nosiče náboje

Elektrický odpor kovů roste s teplotou a tuto závislost pro malý teplotní rozsah od 0 °C do 100 °C lze vyjádřit lineárním vztahem:

$$R_t = R_0(1 + \alpha t) \quad (7)$$

R_t ... odpor při teplotě t

R_0 ... odpor při teplotě 0 °C

α ... teplotní součinitel odporu

Střední hodnota teplotního součinitele odporu α lze poté vyjádřit vztahem:

$$\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{100R_0} \quad (8)$$

R_{100} ... odpor při teplotě 100 °C

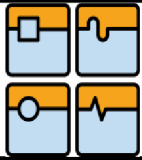
R_0 ... odpor při teplotě 0 °C

Pro výrobu kovových odporových senzorů se používají čisté kovy se stálým a co možná největším teplotním součinitelem odporu a malou hysterezí. Mezi tyto materiály patří nejčastěji platina, nikl, měď a případně další vzácné kovy. Vlastnosti nejčastěji používaných materiálů jsou uvedeny v následující tabulce. [7]

Tab. 5 Materiály pro kovové odporové senzory [7], [11]

Materiál	$\alpha \cdot 10^{-3} [\text{K}^{-1}]$	Meze použití [°C]
Platina	3,85 až 3,93	-260 až 850
Nikl	6,17 až 6,75	-70 až 200
Ni-Fe	5,18 až 5,27	-100 až 200
Měď	4,26 až 4,33	-50 až 150

Mezi nepoužívanější kov pro výrobu kovových odporových senzorů patří platina díky vysoké teplotě tání, časové stálosti a chemické odolnosti. Použitá platina musí mít mimořádnou čistotu (99,999%). Senzory vyrobené z platiny jsou velmi spolehlivé a mají dlouhodobou teplotní stabilitu a malé rozměry. Standartním senzorem vyrobeným z platiny je senzor Pt100 (odpor 100 Ω). Dále se vyrábí i s hodnotami základního odporu 50 Ω , 200 Ω , 500 Ω , 1000 Ω a 2000 Ω . [11]



Senzory vyrobené z niklu mají také malé rozměry, větší teplotní součinitel odporu, dobrou citlivost a rychlou odezvu, ale oproti platině mají omezený teplotní rozsah, nelinearitu, horší dlouhodobou teplotní stabilitu a horší chemickou odolnost. Jako platinové senzory se vyrábí s hodnotami základního odporu 50 Ω , 100 Ω , 200 Ω , 500 Ω , 1000 Ω a 2000 Ω . [11]

Měď se z důvodu malé rezistivity a velké oxidace běžně pro výrobu senzorů nepoužívá. Využití se nabízí spíše u přímého měření teploty měděného vinutí elektromotoru.

Pro výrobu odporového kovového senzoru teploty se využívají následující technologie:

- Drátková

Drátkový měřicí rezistor, nejčastěji vyrobený z platiny, o průměru od 0,007 do 0,05 mm bývá obvykle uložen v ochranných keramických kapilárách nebo je navinut na keramická či skleněná tělíska a zafixován skleněným povlakem. Obvykle se drátková čidla vyrábí s hodnotou odporu 100 Ω , 500 Ω nebo 1000 Ω .

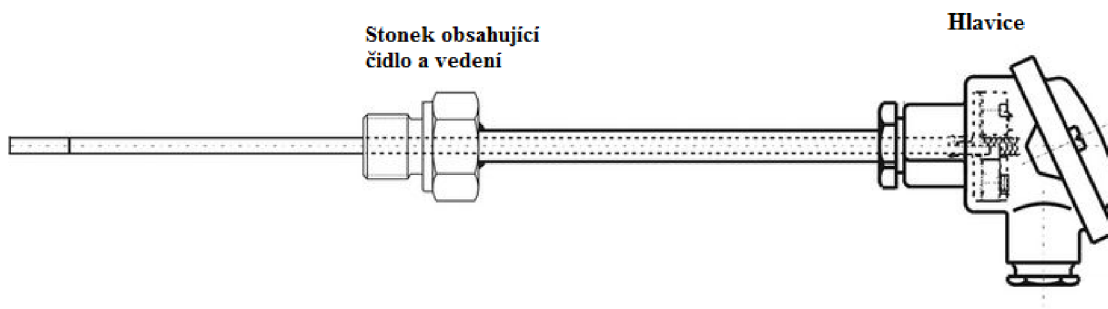
- Tenkovrstvá

Kovová vrstva o tloušťce 1 nm až 1 μm , obvykle tvořena platinou, je napařováním nebo iontovým leptáním nanášena na korundovou destičku. Požadovaná hodnota odporu se nastavuje pomocí laseru (laserové trimování).

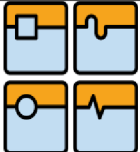
- Tlustovrstvá

Kovová vrstva, opět nejčastěji tvořena platinou, je nanášena na korundovou destičku pomocí sítotisku a následně vypalována pro zajištění stability. Požadovaná hodnota odporu se opět nastavuje pomocí laseru (laserové trimování).

Čidlo spolu s vývody a vedením jsou uloženy v ochranném stonku s hlavicí snímače, jak můžeme vidět na následujícím obrázku (Obr. 9). [7], [11], [12], [20], [21]



Obr. 9 Odporový snímač teploty [22]

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 27
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

Odporové polovodičové senzory

Odporové polovodičové senzory využívají stejně jako odporové kovové senzory závislosti změny odporu na teplotě. Polovodičové odporové senzory můžeme rozdělit na:

- Termistory
 - NTC (negastory)
 - PTC (pozistory)
- Monokrystalické odporové senzory

Termistory vyráběné z polovodičových feroelektrických keramických materiálů mohou mít různé tvary, např. destička, kapka, váleček. Vyrábí se v širokém rozmezí hodnot odporu od 0,1 Ω až do několika M Ω . Termistory vynikají malými rozměry a velmi dobrou citlivostí, díky čemuž jsou velmi rychlé a umožňují monitorovat i teplotní šoky. Mezi nevýhody patří nelineární charakteristika.

Termistory mohou mít podle použitého materiálu záporný teplotní součinitel (negastor) nebo kladný teplotní součinitel (pozistor).

V praxi se pro měření teplot používají převážně NTC-termistory (negastory). Ty se vyrábí spékáním oxidů jako $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$, $\text{MnO} + \text{CoO}$ a dalších. Teplotní rozsah pro negastory se obvykle pohybuje od $-60\text{ }^\circ\text{C}$ do $200\text{ }^\circ\text{C}$.

PTC-termistory (pozistory) se nejčastěji vyrábí z titaničitanu barnatého (BaTiO_3). Při rostoucí teplotě dochází ke strmému nárůstu teploty, což umožňuje použití jako samoregulační součásti topení, teplotní spínače nebo proudové omezovače. Pozistory se obvykle využívají v teplotním rozsahu od $60\text{ }^\circ\text{C}$ do $180\text{ }^\circ\text{C}$.

K výrobě monokrystalických senzorů se využívá křemík, germanium, indium a jejich slitiny. Nejčastější křemíkové senzory, které vynikají svou dlouhodobou teplotní stabilitou a nízkou cenou, se využívají pro teplotní rozsah $-50\text{ }^\circ\text{C}$ až $150\text{ }^\circ\text{C}$. Germaniové senzory lze využít již od nízkých teplot $-190\text{ }^\circ\text{C}$. [7], [11], [12]

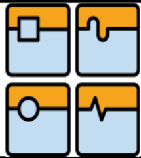
Monolitické (integrované) senzory

Monolitické PN senzory teploty využívají závislosti napětí PN přechodu (propustný směr) na teplotě a dělí se na:

- Diodové PN senzory
- Tranzistorové PN senzory

Diodové PN senzory jsou polovodičové součástky s jedním PN přechodem a patří mezi základní monolitické senzory. Pro jejich výrobu se využívá křemík, germanium (měření nízkých teplot) a arzenid galia. Senzory mají dobré dynamické vlastnosti a výbornou časovou stálost.

Pokud diodový PN senzor připojíme ke zdroji konstantního proudu v propustném směru, pak bude napětí na přechodu s rostoucí teplotou klesat. Z tohoto napětí lze poté určit příslušnou teplotu.



Tranzistorové senzory obsahují dva PN přechody a pracují na obdobném principu jako senzory diodové (jeden PN přechod). Využívá se závislosti napětí na přechodu báze-emitor na teplotě. [7], [11], [12]

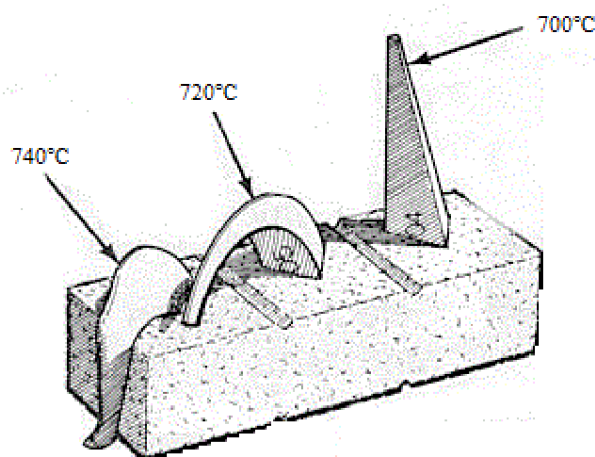
2.1.3 Speciální teploměry

Mezi speciální teploměry patří keramické žároměrky, teploměrná tělíska a teploměrné barvy. Tyto teploměry slouží pouze k přibližnému stanovení teploty na základě znalosti teploty, při níž dojde k předem definované změně. Tato změna může představovat změnu tvaru nebo barvy indikátoru. Dále se tyto teploměry člení na:

- Vratné indikátory
- Nevratné indikátory

Žároměrky

Mezi nevratné indikátory teploty patří keramické žároměrky. Žároměrky mohou mít tvar trojbokého jehlanu, kroužků nebo tyčinek se čtvercovým profilem a vyrábějí se z kysličníků SiO_2 a Al_2O_3 . Žároměrky bývají odstupňovány po 10°C až 50°C . Pro konkrétní teplotu se nejčastěji využívají tři žároměrky najednou zapíchnuté do kousku hlíny pod úhlem přibližně 8° . První je určena pro nižší teplotu než je žádaná a signalizuje blížící se žádanou teplotu. Druhá signalizuje dosažení přesně žádané teploty a třetí žároměrka slouží pro hlídání vyšší dosažené teploty (překročení teploty). Pokud se žároměrka ohne do úhlu 90° , značí to dosažení teploty příslušné pro daný typ žároměrky. Žároměrky se nejčastěji používají v pecích při výrobě keramiky. [7], [23]



Obr. 10 Keramické žároměrky [23]

Tavné indikátory

Tavné indikátory patří mezi další nevratné indikátory. Tavné indikátory existují ve formě teploměrových tablet, kapalin, tužek a nálepek.

Teploměrové tablety se vyrábějí lisováním z keramických prášků a po dosažení kritické teploty dojde k nevratnému roztavení tablety.

Teploměřové kapaliny jsou vyrobeny z keramického prášku rozpuštěného v těkavé kapalině a nanáší se pomocí štětce nebo spreje. Po dosažení kritické teploty dojde ke zředění a roztečení.

Teploměrné tužky obsahují keramický prášek spolu s pojidlem. Po dosažení kritické teploty se nanosená stopa tužky roztaví ve skvrnu a ztmavne.

Teploměrné nálepky obsahují až 8 polí obdélníkového nebo kruhového tvaru bílé (oranžové) barvy, které po dosažení kritické tavné teploty změni barvu na černou. [7]



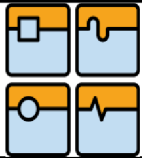
Obr. 11 Teploměřové nálepky [24]

Barevné indikátory

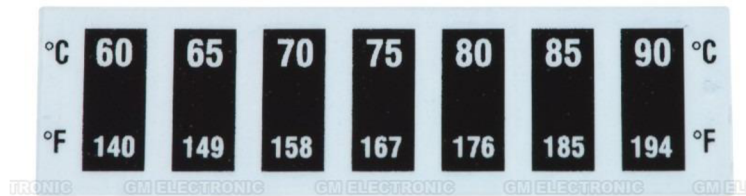
Barevné indikátory teploty existují ve formě teploměrových barev a tužek, nálepek, kapalných krystalů a luminiscenčních indikátorů.

Teploměřové barvy a tužky patří mezi nevratné indikátory a jsou složeny z akrylátových laků nebo prášků stmelěných pojidlem. Po dosažení kritické teploty dojde k nevratné změně barvy indikátoru. Pro výrobu se používají různé druhy kovů (Co, U, Cu, Mo, Cr).

Indikátory teploty s kapalnými krystaly patří mezi vratné indikátory. „Kapalné krystaly jsou organické látky s teplotní závislostí molekulární struktury ve stavu mezi pevnou a kapalnou fází. Ve skutečnosti jsou to kapaliny, které si při zvyšování teploty udržují do určité teploty molekulární orientaci při skupenské přeměně z pevné do kapalné fáze.“ [7] V závislosti na hodnotě měřené teploty tedy dochází při dopadu bílého světla k odrazu pouze určitého spektra. Ostatní složky spektra dopadajícího bílého světla jsou krystalem pohlceny. Existuje řada teploměrných kapalných krystalů, které se navzájem liší svojí molekulární strukturou. Můžeme se setkat s kapalnými krystaly nematického a smectického typu, avšak v technické praxi se nejčastěji využívají indikátory na bázi kapalných krystalů cholesterického typu. Tyto kapalné krystaly se nanášejí ve formě tenké vrstvy o tloušťce několika setin milimetru na černý matný povrch měřeného tělesa nebo ve formě fólií (teploměřové nálepky), v kterých jsou tekuté krystaly rozptýleny a chráněny vůči okolnímu prostředí. Nejčastější využití nacházejí v nedestruktivní defektoskopii a při zkoumání rozložení teplotních polí. [7], [25], [26]



Luminiscenční indikátory teploty mění luminiscenci (jas nebo barvu) při dosažení kritické teploty. U některých typů se projeví změna luminiscence až po ozáření ultrafialovým zářením. [7]



Obr. 12 Teploměřová nálepka na bázi kapalných krystalů [27]

2.2 Zabudování dotykových čidel teploty

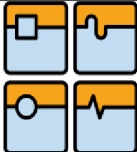
Je velice důležité, aby čidla používaná v technické diagnostice pro regulaci měřila přesně a byla umístěna na správném místě. Při špatném umístění nebo montáži čidla může dojít ke špatné funkci a nepřesně naměřeným hodnotám.

Mezi všeobecné zásady zabudování dotykových teploměru patří:

- „zajistit minimální odpor mezi snímačem a povrchem měřeného tělesa při měření teploty tuhých těles“ [7]
- „zajistit maximální součinitel prostupu tepla z měřeného prostředí do čidla teploměru při měření teploty v tekutinách“ [7]
- „zajistit minimální tepelný tok ze snímače do okolního prostředí“ [7]
- „nenarušit tepelné pole v místě měření“ [7]

U snímačů teploty tekutin musíme zajistit:

- ponoření celé aktivní délky čidla do měřeného média a jímku čidla montovat vždy proti směru proudění média
- pokud je potrubí s chladným (ledovým) médiem opatřeno izolací, musí být jímka prodloužena z důvodu srážení kondenzátu skrz tuto izolaci a otvor náležitě utěsněn
- volit co nejmenší rozměry jímky a snímače a v případě nevyhovující délky aktivní délky čidla vůči průměru potrubí montovat jímku šikmo nebo do obtoku, který musí zasahovat do hlavní trubky
- v případě směšování dvou a více proudů musíme zajistit dodržení dostatečné vzdálenosti čidla od směšovacího členu
- dosáhnout co největšího součinitele přestupu tepla z měřeného média do jímky a z jímky do snímače [28]

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 31
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

U snímačů teploty tuhých látek musíme zajistit:

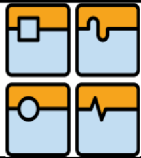
- co největší součinitel přestupu tepla z měřeného média do jímky a z jímky do snímače
- v případě nutnosti vrtání otvoru do měřeného tělesa dodržet poměr mezi hloubkou a průměrem otvoru $D/h = 0,1$ až $0,2$ (pro tepelnou vodivost tělesa $\lambda > 30 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
- pokud to umožňuje konstrukční návrh, zajistit zabudování snímače do objektu během montáže před dodatečným umístěním snímače [28]

Při měření teploty v místnosti musíme zajistit:

- umístění snímače ideálně do výšky $1,5 \text{ m}$ a $0,5 \text{ m}$ od nejbližší zdi mimo slunečné místo
- snímač neumístujeme na venkovní stěnu ani do míst se sníženou cirkulací vzduchu
- čidlo neumístujeme poblíž zdrojů tepla

U snímačů venkovní teploty musíme zajistit:

- umístění čidla mimo přímé oslunění
- vyvarovat se umístění čidla pod převisy střech, nad okna a na fasády s velkou tepelnou kapacitou
- čidlo neumístujeme poblíž zdrojů tepla [28]



2.3 Výhody a nevýhody dotykového měření teploty

V následujících tabulkách (Tab. 6, Tab. 7, Tab. 8) budou shrnuty rozsahy použití, nejistoty při měření, výhody a nevýhody jednotlivých typů kontaktních teploměrů.

Tab. 6 Srovnání výhod a nevýhod dilatačních teploměrů [7], [29], [30]

Dilatační teploměry			
Plynový teploměr			
Rozsah použití:	-270 °C až 700 °C	Nejistoty měření:	do ± 1 % z rozsahu
Výhody:	Netoxická teploměrná látka (vodík, dusík, hélium, suchý vzduch), přesnost, stálost parametrů ($\pm 0,2$ % za rok), odolnost proti mechanickým rázům (otřesům)		
Nevýhody:	Poměrně malý přírůstek tlaku s teplotou		
Vhodná aplikace:	Potravinářství (sanitovatelné provedení), chemický průmysl, výroba léčiv		
Tenzní teploměr			
Rozsah použití:	-40 °C až 400 °C	Nejistoty měření:	± 1 % z rozsahu
Výhody:	Dobrá citlivost a reakce na změnu teploty		
Nevýhody:	Nelineární závislost, malý rozsah použití		
Vhodná aplikace:	Průmyslová měření teploty		
Kapalinový teploměr			
Rozsah použití:	-20 °C až 750 °C	Nejistoty měření:	do ± 1 % z rozsahu
Výhody:	Poměrně velký rozsah použití, lineární závislost, jednoduchá konstrukce a nízká pořizovací cena u skleněných kapalinových teploměrů, poměrně velký přírůstek tlaku s teplotou u kapalinových tlakových teploměrů		
Nevýhody:	U skleněných teploměrů křehkost, omezenost dálkového přenosu a někdy špatná čitelnost (chyba paralaxe při čtení na stupnici), u kapalinových tlakových teploměrů nutnost použití kompenzačního členu		
Vhodná aplikace:	Kapalinové tlakové teploměry se uplatňují v těžkých provozních podmínkách, signalizaci a dvoupolohové regulaci.		
Kovový teploměr			
Rozsah použití:	0 °C až 900 °C	Nejistoty měření:	± 3 % z rozsahu
Výhody:	Poměrně krátká časová odezva na změnu teploty u tyčových teploměrů, značná přestavující síla, jednoduchá údržba, robustní konstrukce		
Nevýhody:	Poměrně velká nejistota měření, pomalá odezva na změnu teploty u bimetalických teploměrů		
Vhodná aplikace:	Využívají se převážně v termostatech jako dvoupolohové regulátory teploty, bimetalické pojistky		

Tab. 7 Srovnání výhod a nevýhod elektrických teploměrů [7], [11], [29], [30]

Elektrické teploměry			
Termoelektrický článek			
Rozsah použití:	-200 °C až 2000 °C	Nejistoty měření:	od ± 1 °C do ± 4 °C podle typu a třídy článku
Výhody:	Aktivní snímač se širokým teplotním rozsahem, jednoduchý, nízká pořizovací cena, odolný		
Nevýhody:	Nelineární závislost, nízká úroveň signálu, nízká citlivost a stabilita, nutnost využití referenčního signálu		
Vhodná aplikace:	Termočlánky jsou vhodné pro monitorování velkého množství měřících míst, detailní využití podle typu termoelektrického článku udává Tab. 3		
Odporový kovový senzor			
Rozsah použití:	-250 °C až 1000 °C	Nejistoty měření:	od ± 0,2 °C do ± 1,5 °C podle typu a třídy přesnosti
Výhody:	Vysoká stabilita a přesnost, lepší linearita než u termočlánku		
Nevýhody:	Vysoká pořizovací cena, nutnost použití stabilizovaného napájecího zdroje, malá změna odporu		
Vhodná aplikace:	Odporové kovové senzory jsou vhodné pro aplikace, kde je vyžadována větší přesnost měření (platinové odporové senzory)		
Odporový polovodičový senzor			
Rozsah použití:	-250 °C až 1000 °C	Nejistoty měření:	od ± 0,5 °C do ± 2 °C podle typu
Výhody:	Rychlá odezva a vysoká citlivost		
Nevýhody:	Nelineární, křehký, nutnost použití stabilizovaného napájecího zdroje		
Vhodná aplikace:	Odporové polovodičové senzory nacházejí uplatnění v aplikacích, kde je preferováno jednoduché připojení k řídicímu systému		
Monolitický (integrováný) senzor			
Rozsah použití:	-200 °C až 400 °C	Nejistoty měření:	do ± 2 % z rozsahu
Výhody:	Vysoká citlivost, lineární		
Nevýhody:	Omezený rozsah použití, pomalá odezva, nutnost napájení		
Vhodná aplikace:	Monolitické (integrované) senzory se obvykle používají pro měření a následnému kompenzování vlivu teploty na výstupní signál u inteligentních převodníků		

Tab. 8 Srovnání výhod a nevýhod speciálních teploměřů [7], [29], [30]

Speciální teploměry			
Keramické žároměrky			
Rozsah použití:	600 °C až 2000 °C	Nejistoty měření:	do ± 15 °C
Výhody:	Nízká pořizovací cena, jednoduché použití, není potřeba nákladná měřicí aparatura		
Nevýhody:	Nevratný indikátor, malá přesnost měření		
Vhodná aplikace:	V keramickém průmyslu pro měření teplot v pecích		
Tavné indikátory			
Rozsah použití:	40 °C až 1650 °C	Nejistoty měření:	do ± 1 % z rozsahu
Výhody:	Nízká pořizovací cena, široký rozsah teplot, použitelnost i na méně přístupných místech, nízká hmotnost, není potřeba nákladná měřicí aparatura		
Nevýhody:	Nevratný indikátor, u pohybujících se objektů je možnost prohlídky až po skončení měření, obtížnější použití u šikmých a svislých ploch (kvůli stékání)		
Vhodná aplikace:	Průmyslová měření teploty		
Barevné indikátory			
Rozsah použití:	40 °C až 1300 °C	Nejistoty měření:	od ± 0,1 °C do ± 3 °C podle typu
Výhody:	Vratné indikátory (kromě několika typů teploměrných barev), nízká pořizovací cena, není potřeba nákladná měřicí aparatura, rychlá odezva, vysoká citlivost		
Nevýhody:	Nižší životnost, poměrně velká nejistota měření (některé typy teploměrných barev a nálepek), nemožnost měřit hodně tvarově složité povrchy		
Vhodná aplikace:	Pro použití při nedestruktivní kontrole správné funkce měřeného objektu (odhalování skrytých vad)		

3 BEZDOTYKOVÉ MĚŘENÍ TEPLoty

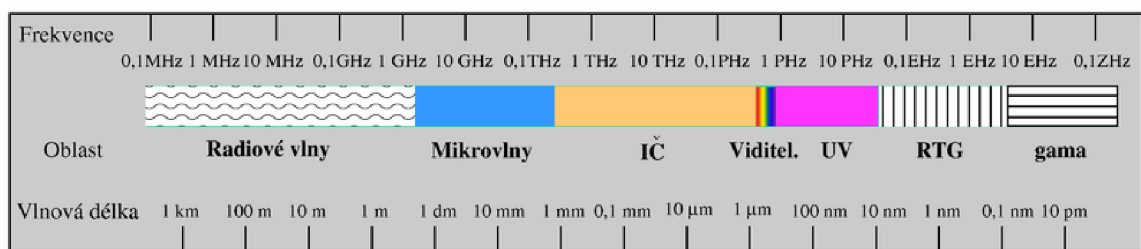
Původní uplatnění bezdotykového měření teplot spočívalo v měření vysokých teplot (nad 500 °C), kde nebylo možné použít dotykového měření teplot. Jednalo se zejména o aplikace v chemickém, metalurgickém a silikátovém průmyslu. V dnešní době se ovšem bezdotykové měření teplot přesouvá i k nižším teplotám v dalších průmyslových odvětvích.

Bezdotykové měření teploty spočívá v měření povrchové teploty objektu na základě elektromagnetického záření vysílaného objektem a přijímaného detektorem. Pro bezdotykové měření jsou využívány vlnové délky od 0,4 μm do 25 μm. Tento rozsah pokrývá oblast viditelného spektra (0,4 μm až 0,78 μm), oblast infračerveného spektra (0,78 μm až 25 μm). Teplotně tento rozsah pokrývá měření teplot od -40 °C do 10000 °C. [7]

3.1 Základní veličiny a pojmy bezdotykového měření teploty

Infračervené záření

Vlnová délka infračerveného (tepelného) záření se nachází mezi vlnovými délkami mikrovlnného a viditelného záření (Obr. 13). Ve spektru elektromagnetického záření se jedná konkrétně o oblast vlnových délek 760 nm až 1 mm. [31]



Obr. 13 Elektromagnetické spektrum [31]

Černé těleso

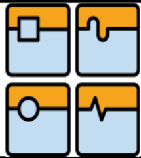
Těleso, které dokonale pohlcuje i vyzařuje záření (energii) bez ohledu na úhel, vlnovou délku a použitý materiál, se nazývá černé těleso (černý zářič). Záření černého tělesa se poměrně dobře blíží záření Slunce.

Pro kalibraci pyrometrů a termovizních kamer slouží černý zářič, jenž má rozsah emisivity $1 > \varepsilon > 0,99$. „Obvykle je realizován dutinovým zářičem s reflexním, difúzním nebo difúzně reflexním povrchem.“ [7]

Emisivita

Skutečné těleso pohlcuje i vyzařuje méně, než dokonale černé těleso, přičemž poměr energie vyzařené objektem při dané teplotě k energii vyzařované dokonale černým tělesem při téže teplotě udává emisivita.

Emisivita je bezrozměrná veličina a pro černé těleso je rovna $\varepsilon = 1$. Pro reálná tělesa (šedá tělesa) platí, že $0 < \varepsilon \leq 1$. Pro emisivitu platí následující vztah:



$$\varepsilon = \frac{M}{M_0} = \frac{\int_0^{\infty} \varepsilon(\lambda, T) M_{0\lambda} d\lambda}{\int_0^{\infty} M_{0\lambda} d\lambda} \quad (9)$$

M_0 ... intenzita vyzařování černého tělesa,

$M_{0\lambda}$... spektrální hustota intenzity vyzařování černého tělesa,

$\varepsilon(\lambda, T)$... emisivita

[7]

Způsob určování emisivity

Pro přesné měření teploty pomocí infračervených teploměrů je velice důležité správné nastavení hodnoty emisivity. Většina obvyklých materiálů jako je dřevo, keramika, textil, kůže, sklo, apod. má emisivitu přibližně 0,95. U obtížně měřitelných povrchů, jako jsou například lesklé povrchy kovů, můžeme správným nastavením emisivity dosáhnout přesnějších hodnot teploty. Hodnotu emisivity u často používaných materiálů můžeme jednoduše vyhledat v tabulkách nebo můžeme emisivitu určit také experimentálně.

Základní způsoby získání hodnoty emisivity:

- Vyhledáním hodnoty emisivity v tabulkách

Vyhledáním hodnoty emisivity v tabulkách u často používaných materiálů patří mezi nejjednodušší a nejrychlejší metodu. Tyto tabulky můžeme nalézt v různých publikacích, na internetu a obvykle bývají dodávány výrobcem přímo k měřicímu zařízení. Takto zjištěná emisivita je však spíše orientační, protože skutečnou hodnotu emisivity může ovlivnit mnoho faktorů (např. úprava povrchu).

- Použitím referenčního teploměru

Pomocí přesného referenčního teploměru změříme teplotu vzorku a změnou nastavení hodnoty emisivity u termokamery se snažíme docílit stejné teploty jako u referenčního teploměru. Jakmile se teploty shodují, nastavenou emisivitu můžeme považovat za správnou. Výhodou této metody je, že se měřený vzorek nemusí nijak upravovat. Je však náročnější na přístrojové vybavení.

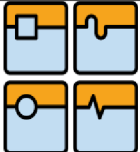
Tato metoda byla použita u experimentálního zjišťování emisivity neznámých povrchů při měření ve firmě Daikin Device Czech Republic.

- Použití nálepek nebo speciálního nátěru na část měřeného vzorku

U nižších teplot můžeme použít speciální nálepkou nebo nátěr se známou hodnotou emisivity (obvykle $\varepsilon = 0,95$) jako zaměřovací plochu. Emisivitu této nálepky nastavíme do měřicího zařízení a poté můžeme změřit teplotu vzorku. Následně měřící bod zaměříme mimo tuto nálepkou nebo nátěr a nastavením emisivity se snažíme docílit stejné teploty. Po dosažení shodné teploty, můžeme považovat nastavenou emisivitu za správnou.

- Vytvořením otvoru ve vzorku

U vyšších teplot můžeme do měřeného vzorku vyvrtat otvor s hloubkou $h = 6D$. Emisivita takto vytvořeného otvoru je rovna přibližně $\varepsilon = 1,0$. Poté může změřit teplotu

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 37
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

vzorku v otvoru a po zaměření měřicího bodu na povrch vzorku se snažíme nastavením emisivity opět dosáhnout shodné teploty. Tato metoda je vhodná pro vzorky, u kterých můžeme předpokládat stejnou teplotu na dně otvoru a na povrchu. Nevýhodou metody je nutnost vytvoření otvoru a tím poškození vzorku. [32], [33], [34], [35]

Propustnost

Propustnost záření má význam především u snímání objektů z větších vzdáleností, jako například měření povrchové teploty budov, apod. Záření je zeslabováno při průchodu atmosférou přímou absorpcí a rozptylem, což způsobují molekuly plynu, kapky vody a různé další částice obsažené v atmosféře. [34]

Propustnost záření lze vyjádřit následujícím vztahem:

$$\tau = \frac{\Phi_t}{\Phi_d} = \frac{\int_0^\infty \Phi_{\lambda t} \tau_\lambda d\lambda}{\int_0^\infty \Phi_{\lambda d} d\lambda} \quad (10)$$

τ_λ ... spektrální propustnost dané vlnové délky

τ ... propustnost v úhrnném spektru

Φ_t ... prostupující zářivý tok (výkon přenášený zářením)

Φ_d ... dopadající zářivý tok (výkon přenášený zářením) [7]

Pohltivost

Vnější zdroje záření ovlivňují skutečnou povrchovou teplotu měřeného objektu (absorpce).

Pohltivost (absorpce) záření lze vyjádřit vztahem:

$$\alpha = \frac{\Phi_a}{\Phi_d} = \frac{\int_0^\infty \Phi_{\lambda a} \alpha_\lambda d\lambda}{\int_0^\infty \Phi_{\lambda d} d\lambda} \quad (11)$$

α_λ ... spektrální pohltivost dané vlnové délky

α ... pohltivost v úhrnném spektru

Φ_a ... pohlcený zářivý tok (výkon přenášený zářením)

Φ_d ... dopadající zářivý tok (výkon přenášený zářením) [7]

Odrazivost

Vnější zdroje záření ovlivňují zdánlivou povrchovou teplotu měřeného objektu (reflexe).

Odrazivost (reflexe) záření můžeme vyjádřit následujícím vztahem:

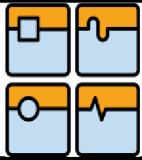
$$\rho = \frac{\Phi_r}{\Phi_d} = \frac{\int_0^\infty \Phi_{\lambda r} \rho_\lambda d\lambda}{\int_0^\infty \Phi_{\lambda d} d\lambda} \quad (12)$$

ρ_λ ... spektrální odraznost dané vlnové délky

ρ ... odraznost v úhrnném spektru

Φ_r ... odražený zářivý tok (výkon přenášený zářením)

Φ_d ... dopadající zářivý tok (výkon přenášený zářením) [7]



3.2 Zákony záření pro černé těleso

Planckův zákon

$$M_{0\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \left(\frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \right) \quad (13)$$

$M_{0\lambda}$... spektrální hustota vyzařování

c ... rychlost světla

k ... Boltzmannova konstanta ($1,380658 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$)

h ... Plancova konstanta ($6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$)

c_1 ... první vyzařovací konstanta ($3,7417749 \cdot 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$)

c_2 ... druhá vyzařovací konstanta ($1,438769 \cdot 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$)

λ ... vlnová délka záření

T ... termodynamická teplota [7]

Wienův zákon

Wienův zákon pro aplikaci pyrometrie můžeme vyjádřit zjednodušeným vztahem:

$$M_{0\lambda} = c_1 \lambda^{-5} e^{\frac{c_2}{\lambda T}} \quad (14)$$

$M_{0\lambda}$... spektrální hustota vyzařování

c_1 ... první vyzařovací konstanta ($3,7417749 \cdot 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$)

c_2 ... druhá vyzařovací konstanta ($1,438769 \cdot 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$)

λ ... vlnová délka záření

T ... termodynamická teplota [7]

Wienův zákon posuvu

Z Wienova zákona posuvu vyplývá, že maximum spektrální emisivity se s rostoucí absolutní teplotou posouvá ke kratším vlnovým délkám. Při rostoucí teplotě tělesa nejprve vyzařují jen dlouhovlnné tepelné záření, které postupně přechází přes červenou a žlutou až po bílou barvu při teplotě několika tisíc stupňů.

$$\lambda_{max} T = 2898 \mu m K \quad (15)$$

Wienův zákon nachází uplatnění při výběru čidla podle rozsahu měření. [7]

Stefan-Boltzmannův zákon

Stefan-Boltzmannův zákon je důležitý pro širokospektrální pyrometry, protože vyjadřuje pro danou teplotu intenzitu vyzařování v celém spektru vlnových délek. Můžeme ho vyjádřit vztahem:

$$M_0 = \sigma T^4 \quad (16)$$

σ ... Stefan-Boltzmannova konstanta ($\sigma = 5,669 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$) [7]

Kirchhoffův zákon

Kirchhoffův zákon vyjadřuje, že poměr intenzity vyzařování M zdroje k absorpci (pohltivosti) α závisí pouze na termodynamické teplotě tělesa. Pro záření lze Kirchhoffův zákon vyjádřit vztahem:

$$\frac{M}{\alpha} = f(T) \quad (17)$$

M ... intenzita vyzařování zdroje

α ... pohltivost

T ... termodynamická teplota

Zář černého tělesa závisí podle tohoto vztahu pouze na termodynamické teplotě a nikoli na vlastnostech tělesa, jako je povrchová úprava, chemické složení, apod.

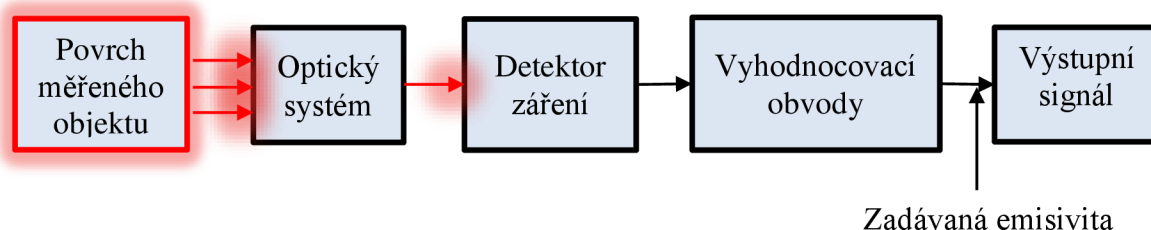
Zákon platí i pro monochromatické vyzařování M_λ a monochromatickou absorpci α_λ a vztah pro monochromatické záření má tvar:

$$\frac{M_\lambda}{\alpha_\lambda} = f(T, \lambda) \quad (18)$$

Kirchhoffův zákon vyjadřuje velmi důležitou skutečnost, že každá látka pohlcuje nejsilněji záření těch vlnových délek, které nejsilněji vyzařuje. [7]

3.3 Rozdělení bezdotykových snímačů teploty

Při bezdotykovém měření teploty se vyzařované záření o rozsahu 0,4 až 25 μm soustřeďuje pomocí optického systému na vhodný detektor, jehož elektrický signál je zpracován na vhodný výstup měřicího zařízení, jak můžeme vidět na následujícím schématu (Obr. 14).



Obr. 14 Schéma bezdotykového teploměru

Detektory tepelného záření můžeme rozdělit podle vzájemného působení dopadajících fotonů s materiálem na:

- Tepelné
 - Termoelektrické (změna termoelektrického napětí dvojice vodičů vlivem rozdílu teplot mezi měřícím spojem a srovnávacím spojem)
 - Bolometrické (změna elektrického odporu elementu detektoru na základě změny jeho teploty)
 - Pyroelektrické (teplotní změna elektrostatické polarizace)

- Kvantové (působením dopadajících fotonů dojde ke generaci párů elektron – díra)
 - Fotorezistor
 - Fotodioda
 - Fototranzistor
- [11]

Přehled technických bezdotykových teploměrů nalezneme v následující tabulce.

Tab. 9 Přehled technických bezdotykových teploměrů [10], [11]

Skupina teploměrů	Typ teploměru	Fyzikální princip	Obvyklý teplotní rozsah [°C]
Bezdotykové teploměry	Širokopásmové pyrometry	Zachycení celého spektra tepelného záření	- 40 5000
	Úzkopásmové pyrometry	Zachycení úzkého svazku záření	-40 3000
	Poměrové pyrometry	Srovnání dvou svazků tepelného záření o různých vlnových délkách	700 3000
	Termovize	Snímání teplotního pole tělesa	- 30 2000

3.3.1 Širokopásmové pyrometry

Širokopásmové pyrometry patří mezi nejjednodušší, nejlevnější a teoreticky vyhodnocují tepelné záření emitované měřeným objektem v celém rozsahu spektra vlnových délek. Jisté omezení zde představuje absorpční schopnost použitého tepelného detektoru a propustností/odrazivostí optiky/zrcadel. K vyhodnocení teploty se využívá Stefan Boltzmannova zákona.

Záření emitované měřeným objektem je pomocí optiky s širokým spektrem prostupnosti pro teploty 600 °C až 2000 °C nebo zrcadel s širokým spektrem odrazivosti pro teploty 0 °C až 1000 °C soustředěna na tepelný detektor pyrometru.

Širokopásmové pyrometry se používají pro měření objektů, jejichž vlastnosti se blíží vlastnostem černého tělesa. Jedná se například o měření teploty v pecích s využitím polo uzavřené keramické trubice. Ta je do pece vložena uzavřeným koncem do pece a na dno trubice se poté zaměří pyrometr. [7], [36], [41]

3.3.2 Úzkopásmové pyrometry

Úzkopásmové pyrometry, které dnes patří k nejrozšířenějším pyrometrům s fotoelektrickým detektorem používaných v technické praxi, pracují pouze s úzkým pásmem vlnových délek. Obvykle používají pásmo menší než 1 μm. Oblast vlnových délek, v kterých úzkopásmový

pyrometr pracuje, je dána spektrální citlivostí kvantového detektoru, spektrální prostupností optiky a interferenčních filtrů pro omezení odezvy jen na určitou vlnovou délku.

Jako detektory se používají kvantové detektory (fotorezistor, fotodioda, fototranzistor), které velmi rychle reagují na změnu teploty. Spektrální citlivost určuje typ čidla jako například:

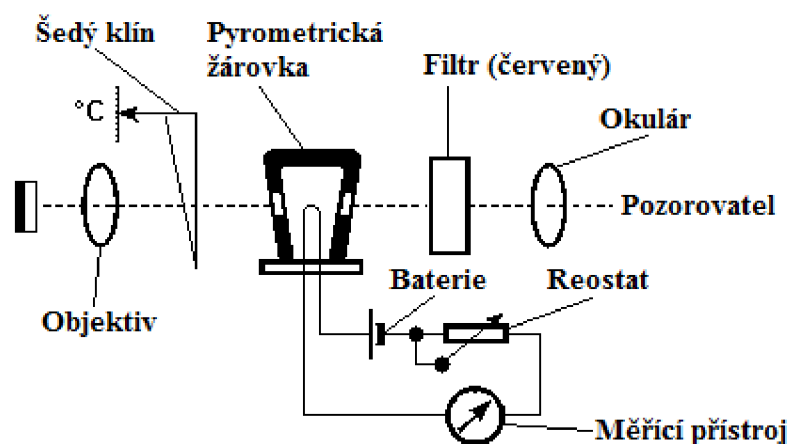
- selenový fotočlánek (oblasti viditelného záření)
- křemíkový fotočlánek (rozsah 0,6 μm až 1,8 μm)
- fotoodpor PbS (rozsah 0,5 μm až 3,6 μm)

Obvykle se využívá selektivních filtrů pro omezení následujících vlnových délek:

- 8 μm až 14 μm pro potlačení vlivu atmosférické vlhkosti na šíření záření
- 7,9 μm pro měření teplot u tenkých plastových folií
- 5 μm pro měření teplot skleněných povrchů
- 3,86 μm pro potlačení vlivu oxidu uhličitého a vodní páry v plameni

Rozmezí měřicích rozsahů může být například 100 °C až 1000 °C, 500 °C až 2000 °C, 600 °C až 3000 °C aj. Úzkopásmové pyrometry se používají s výhodou tam, kde se vyskytují mezi měřeným objektem a pyrometrem plyny s absorpčními pásmy (oxid uhličitý, vodní pára).

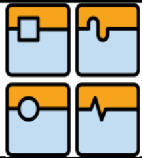
Mezi úzkopásmové pyrometry můžeme zařadit i jasový pyrometr. Při měření tímto pyrometrem se využívá porovnávání záře měřeného objektu se září o určité vlnové délce srovnávacího zdroje. Obvykle se jedná o vlnovou délku 0,65 μm . Srovnání probíhá buď za pomoci lidského oka, nebo různými elektrooptickými kompenzačními metodami. Schéma jasového pyrometru můžeme vidět na Obr. 15. Jasové pyrometry umožňují měřit v rozsahu 400 °C až 2300 °C. [7], [11], [36], [37], [41]



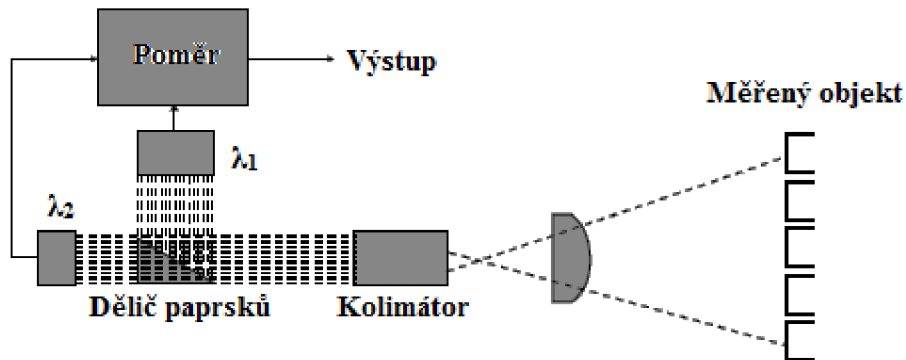
Obr. 15 Schéma jasového pyrometru [11]

3.3.3 Poměrové pyrometry

Poměrové pyrometry pracují na principu poměru dvou paprsků (vlnových délek) záření z měřeného objektu o různých vlnových délkách. Tento princip můžeme vidět



na následujícím obrázku (Obr. 16). Záření z měřeného objektu je nasměřováno pomocí optického systému přes polopropustný filtr na kvantový detektor. Polopropustný filtr obvykle propustí záření o dvou vlnových délkách, obvykle $0,55 \mu\text{m}$ a $0,65 \mu\text{m}$ (zelená a červená barva).



Obr. 16 Schéma poměrového pyrometru [51]

Dříve se poměrové pyrometry nazývaly pyrometry dvoubarevné, protože používané dva paprsky záření odpovídaly dvěma různým barvám ve viditelném spektru. Moderní poměrové pyrometry dnes využívají i více než dva paprsky (např. 4 paprsky, 7 paprsků).

Poměrové pyrometry umožňují běžně měřit v rozmezí $900 \text{ }^\circ\text{C}$ až $3000 \text{ }^\circ\text{C}$. Umožňují velmi přesné měření i v podmínkách, kde měřený objekt podstupuje fyzikální nebo chemické změny. Využívají se v aplikacích jako je například měření teploty svařování a odpichu železa. [7], [36], [37], [41]

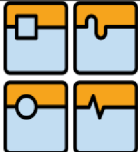
3.3.4 Termovize

Termovize představuje základní měřicí zařízení infračervené diagnostiky, kdy se pro diagnostiku zařízení a kontrolu jeho funkcí zjišťuje rozložení teplotního pole měřeného objektu. Na základě toho lze lokalizovat materiálové vady, opotřebení součástek, stav izolátorů za provozu, stavy vypínačů, stav vyzdívky hutních pecí, teploty různých elektrotechnických zařízení apod. [41]

Termovizní systémy můžeme rozdělit podle způsobu rozkladu obrazu na:

- Termovize s opticko-mechanickým rozkladem obrazu
- Termovize s maticovým detektorem

U termovize s opticko-mechanickým rozkladem obrazu je snímání jednotlivých bodů měřeného objektu realizováno pomocí řízené optické osy, kdy se okamžité zorné pole termovize zaměřuje postupně na všechny body měřeného objektu pomocí pohyblivých hranolů nebo zrcadel. Termovize s opticko-mechanickým rozkladem obrazu se již v dnešní praxi nevyužívá. [41]

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 43
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

K zobrazení teplotního pole u termovize s maticovým detektorem se využívají mikrobolometrické (chlazené, nechlazené) detektory nebo kvantové FPA detektory, které se podobají CCD čipům používaným v klasických kamerových systémech. Každý jednotlivý pixel termogramu odpovídá jednomu detektoru. Termovizní zařízení využívají pro měření krátkovlnné (2 μm až 5 μm) a dlouhovlnné (8 μm až 14 μm) pásmo vlnových délek. [41]

Termovizní systémy zobrazují rozložení teplotního pole pomocí termogramu. Na termogramu jsou zobrazeny zdroje záření formou barevného spektra případně ve stupních šedi, kde každý barevný tón odpovídá zaznamenané teplotě. Termogramy mohou být:

- Radiometrické, které umožňují vypočítat teplotu na povrchu měřeného objektu na základě zadaných podmínek a změřeného infračerveného záření, případně lze provádět úpravu zadaných parametrů snímku (emisivita, vzdálenost objektu).
- Neradiometrické, které umožňují pouze zobrazení rozložení teplotního pole na měřeném objektu (kvalitativní srovnávání). [38]

Termografii můžeme rozdělit na:

- Pasivní

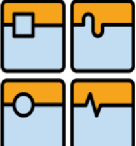
Pomocí pasivní termografie zobrazujeme rozložení teplotního pole na měřeném objektu, který během svého provozu vyvíjí nebo absorbuje teplo. Hlavní hodnotící veličinou jsou rozdíly teplot na vybraných místech na povrchu měřeného objektu mezi změřenou a referenční teplotou.

- Aktivní

Aktivní termografie využívá řízenou tepelnou vlnu vyvolanou v tělese s následným snímáním rozložení teploty termokamerou na povrchu měřeného objektu. Defekty uvnitř materiálu se projeví rozdílným rozložením povrchové teploty. Jako zdroj tepla lze použít halogenovou lampu, pulzní laser, výbojky, ultrazvukovou vlnu apod. Pro diagnostikování podpovrchových vad existují dvě metody:

- Pulzní termografie, u které princip spočívá v ozařování měřeného objektu stimulačními pulzy trvajících v řádu milisekund u materiálů s velkou tepelnou vodivostí až sekund u materiálů s malou tepelnou vodivostí a následném měření teploty povrchu. Díky těmto pulzům dojde ke zvýšení teploty uvnitř materiálů a následnému ochlazení. Podpovrchové vady uvnitř materiálu se promítnou do tepelného obrazu povrchu měřeného objektu.
- Lock-in termografie, která je založena na modulaci řízeného tepelného toku, který dopadá na měřený objekt. Sinusová tepelná vlna pronikne pod povrch materiálu a v místě anomálie ve struktuře materiálu se odrazí zpět k povrchu měřeného objektu. Na povrchu poté dochází k interferencím dopadajícího a vyzařovaného tepelného toku. Rozborem zachyceného termogramu lze získat informace o podpovrchové teplotě měřeného objektu. [7], [39]

Rozlišení termovizních systému je obvykle od -30 °C do 2000 °C s rozlišením až 0,1 °C.

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 44
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

3.4 Výhody a nevýhody bezdotykového měření teploty

Obecně lze při použití bezkontaktních měřidel pro měření teplot předpokládat tyto výhody a nevýhody:

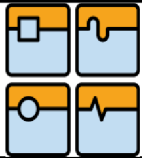
- Výhody bezdotykového měření teploty
 - Měřicí technika neovlivňuje měřený objekt
 - Možnost měřit a zpracovat celé povrchy těles
 - Lze měřit i velmi rychlé změny teploty měřeného objektu
 - Lze měřit i pohybující se objekty
 - Měření lze provádět z bezpečné vzdálenosti (části pod elektrickým napětím)
 - Lze měřit i velmi vysoké teploty
- Nevýhody bezdotykového měření teploty
 - Nejistoty měření způsobené neznalostí emisivity měřeného povrchu, prostupností prostředí mezi měřicím zařízením a měřeným objektem a nesprávnou korekcí okolního (parazitního) záření
 - Měřený objekt musí být opticky viditelný
 - Měří se pouze povrchová teplota

[7], [41]

V následující tabulce (Tab. 10) budou shrnuty rozsahy použití, nejistoty při měření, výhody a nevýhody jednotlivých typů bezkontaktních teploměřů.

Tab. 10 Srovnání výhod a nevýhod bezkontaktních teploměrů [7], [30]

Bezkontaktní teploměry			
Širokopásmové pyrometry			
Rozsah použití:	-40 °C až 5000 °C	Nejistoty měření:	do ± 1 % z rozsahu
Výhody:	Nízké pořizovací náklady, jednoduchá konstrukce		
Nevýhody:	Měřena pouze určitá malá oblast, ovlivnění měření přítomností kouře, prachu, apod.		
Vhodná aplikace:	Diagnostická a inspekční měření, použití u objektů s vlastnostmi blízcím se vlastnostem černého tělesa		
Úzkopásmové pyrometry			
Rozsah použití:	-40 °C až 3000 °C	Nejistoty měření:	do ± 1 % z rozsahu
Výhody:	Možnost použití selektivních filtrů pro omezení určitých vlnových délek		
Nevýhody:	Pracují pouze s úzkým pásmem vlnových délek		
Vhodná aplikace:	Diagnostická a inspekční měření, aplikace kde se vyskytují mezi měřeným objektem a pyrometrem plyny s absorpčními pásmy		
Poměrové pyrometry			
Rozsah použití:	700 °C až 3000 °C	Nejistoty měření:	do ± 1 % z rozsahu
Výhody:	Lze měřit i skrz prostředí obsahující prach, kouř, apod., nezávislost na emisivitě měřeného objektu		
Nevýhody:	Vyšší pořizovací cena		
Vhodná aplikace:	Diagnostická a inspekční měření, měření teploty svařování a odpichu železa		
Termovize			
Rozsah použití:	-30 °C až 2000 °C	Nejistoty měření:	± 2 % z rozsahu
Výhody:	Možnost měřit rozložení teplotního pole na povrchu měřeného objektu		
Nevýhody:	Vysoká pořizovací cena		
Vhodná aplikace:	Diagnostická a inspekční měření		



4 VYUŽITÍ TERMOGRAFIE V PRAXI

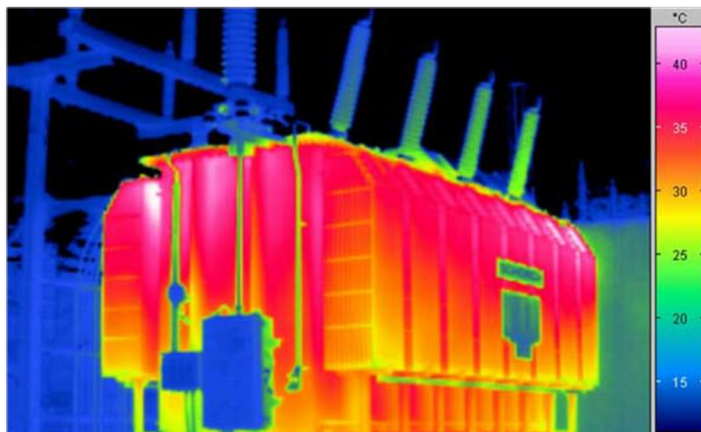
Přenosné bezdotykové měřicí zařízení nacházejí v dnešní době široké uplatnění při detekci tepelných ztrát, odhalování poruch a revizi zařízení. K nejmodernější termodiagnostické technice patří termokamery, které se ve velké míře uplatňují pro měření teplotních polí na povrchu tělesa, prediktivní údržbě a k diagnostickým účelům v řadě odvětví. [3], [40], [41]

4.1 Využití termografie v energetice

Pravidelnými kontrolami lze včas odhalit závady, vyhodnotit stupeň nebezpečnosti těchto závad a stanovit dobu, kdy lze objekt ještě bezpečně používat. Díky pravidelným kontrolám energetických zařízení lze předejít poruchovému stavu (výpadku) na VVN nebo VN zařízení, což by mělo významný ekonomický dopad na řadu odběratelů. Termodiagnostika se v energetice obvykle využívá při kontrole rozvodné sítě elektrické energie, elektrických strojů (zařízení) a rozvaděčů.

Pravidelné kontroly se mohou vykonávat za provozu (pod napětím) nebo na odstavených (bez napětí) elektrických zařízeních. Kontroly vykonávané za provozu mají oproti kontrolám vykonávaných na odstavených zařízeních výhodu, že nedojde k omezení dodávek elektrické energie odběratelům. Proto se v současnosti využívá především bezkontaktních metod využívajících infračervené záření.

Při kontrole rozvodů elektrické energie se pomocí termovizní techniky zjišťuje tepelný stav spojů (svorek), zdali nevykazují zvýšenou teplotu oproti samotnému vedení. U transformátorů se kontroluje teplotní pole olejových nádob transformátorů (Obr. 17). [40], [44]



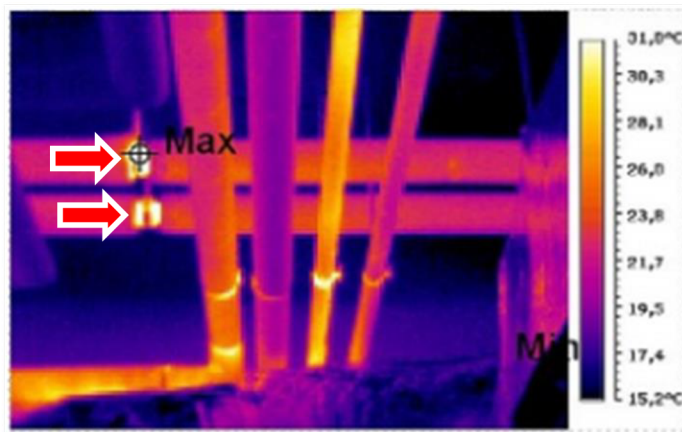
Obr. 17 Termogram elektrického transformátoru [45]

Termovize má své široké uplatnění také při kontrole elektrických strojů a zařízení, jako jsou sběrná ústrojí, budících soustav generátorů a motorů, mechanických částí strojů, silových částí elektrických strojů, slaboproudé elektrotechniky apod. [43], [44]

4.2 Využití termografie v teplovodních a parovodních systémech

U teplovodních a parovodních systémů je snaha zajišťovat přenos tepelné energie s minimálními ztrátami pro zajištění minimálních nákladů na přenos energie. Mezi vhodné a dostupné metody revize u teplovodních a parovodních systémů patří termovize.

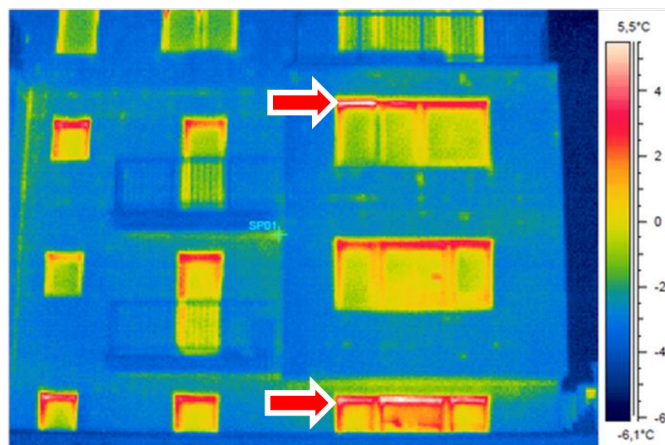
Termovize umožňuje lokalizovat poruchy a kontrolovat stav izolace u rozvodů tepla. Tyto tepelné ztráty se na pořízených termogramech projeví vlivem úniku tepla lokálním zvýšením teploty na povrchu v místě poškozeného místa. Podle velikosti rozdílu teplot mezi poškozenou a nepoškozenou částí lze i přibližně stanovit rozsah poškození. [43], [44]



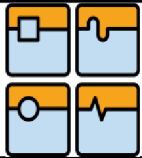
Obr. 18 Termogram rozvodů tepla [46]

4.3 Využití termografie ve stavebnictví

Ve stavebnictví se využívá termovizních systémů pro zjištění rozložení teplotního pole pláště budov a zjištění, zda nedochází k nežádoucím únikům tepelné energie vlivem chybného provedení stavebních prací, poruchami izolaci, netěsnostmi apod. Dále se termovize využívá jako podklad pro projektování dodatečného zateplení, vyhledávání poruch vytápění a technologického vybavení budov. [43], [44]



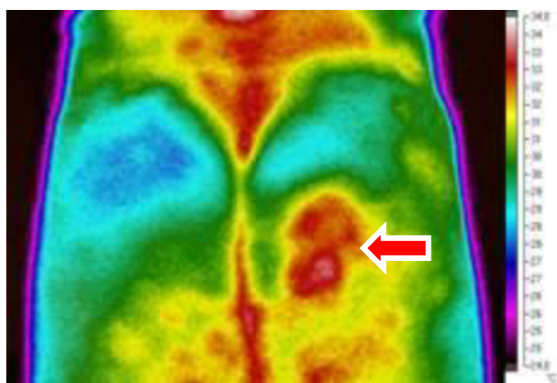
Obr. 19 Termogram fasády s větším množstvím tepelných mostů [47]



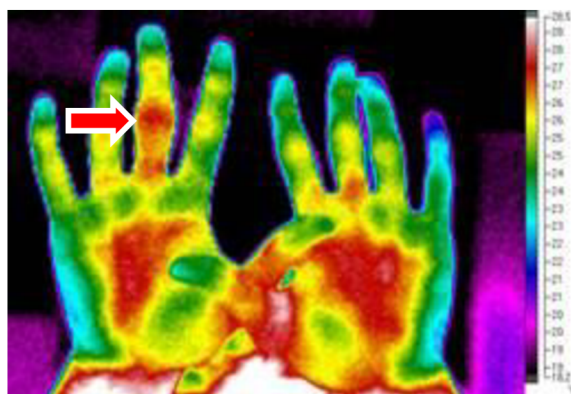
4.4 Využití termografie v medicíně

Díky své jednoduchosti, neinvazivnosti, bezpečnosti pro pacienta i obsluhu a nízké ceně vyšetření má termografie široké uplatnění i jako vyšetřovací metoda v medicíně v mnoha zemích. Využívá se předpokladu, že postižená část má vyšší teplotu než okolní tkáň. Proto je využívána pro diagnostikování cévních onemocnění, fáze zánětu, při vyhledávání metastáz, sledování úspěšnosti léčebného postupu, šíření epidemie, apod.

Stejně jako má termovize možnosti uplatnění v medicíně, lze ji stejně dobře využít i pro veterinární vyšetření. [42]



Obr. 20 Krevní výron při natržení hýžd'ového svalu [48]



Obr. 21 Zánět zlomeného prostředníku pravé ruky [48]

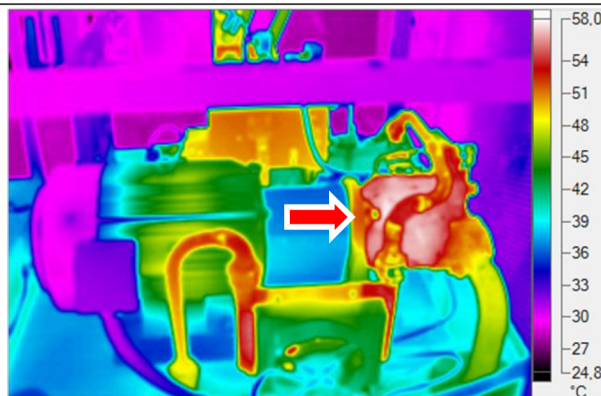
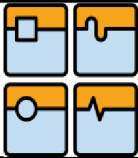
4.5 Využití termografie v dalších odvětvích

Díky možnosti zobrazení rozložení teplotního pole a měření teploty na povrchu lze termografii aplikovat všude tam, kde na základě teploty můžeme diagnostikovat stav měřeného objektu. Proto se termografie využívá i mnoha dalších aplikacích jako jsou žáruvzdorná a petrochemická zařízení, při diagnostice mechanických zařízení, detekce vzplanutí, detekce úrovně v nádržích apod.

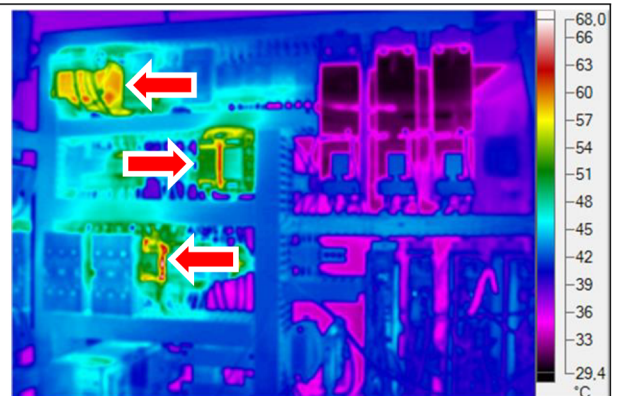
Díky možnosti pracovat i při snížené viditelnosti a tmě se termovizní systémy uplatňují i v aplikacích pro vojenské účely (obraz bojiště), záchranné operace (hledání ztracených osob) nebo zabezpečení objektů (detekce nepovolaných osob). [43], [44]

4.6 Ukázky využití termografie v Daikin Device Czech

V Daikin Device Czech se termodiagnostika pomocí termovizních kamer využívá pro diagnostiku zařízení a odhalování možných poruch. Nejčastěji se jedná o elektromotory a elektroinstalace.



Obr. 22 Elektromotor pohánějící hydraulickou pumpu

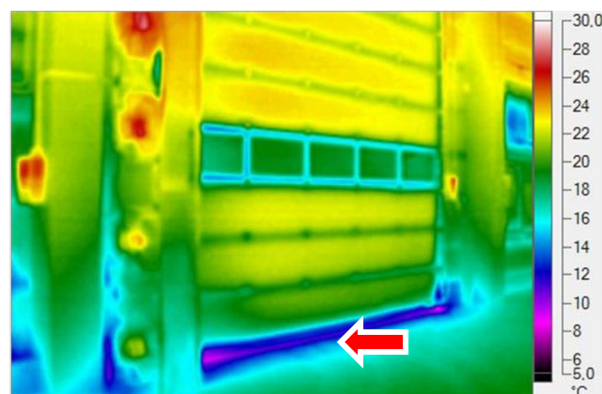


Obr. 23 Elektroinstalace

Na snímku elektromotoru pohánějícího hydraulickou pumpu (Obr. 22) můžeme vidět přehřívání této hydraulické pumpy, u níž došlo k poruše chladicího systému, a nižší teplotu chlazení elektromotoru. Včasné odhalení rozvíjející se závady umožňuje naplánovat opravu na vhodné období a minimalizovat tak náklady.

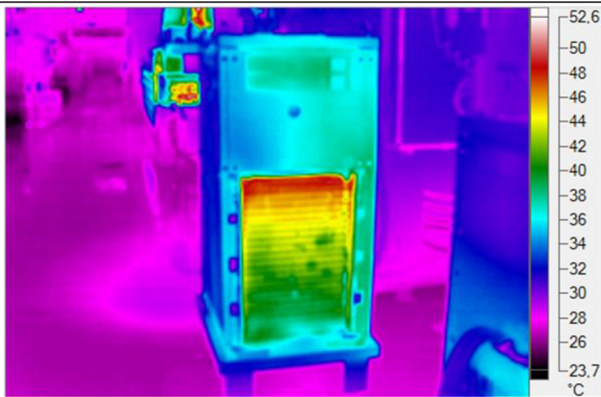
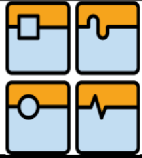
Při použití termokamery u elektroinstalace lze snadno odhalit kritická místa, jako jsou nadměrně se zahřívající prvky elektroinstalace, jak můžeme vidět na Obr. 23. Díky revizi elektroinstalace lze předejít možnému úrazu elektrickým proudem a snížit riziko nebezpečí požáru.

Mezi další využití termovize patří například rozložení teplot na povrchu stavebních konstrukcí a k určení míst, kterými dochází ke zvýšeným tepelným ztrátám, jak můžeme vidět například na následujícím obrázku (Obr. 24), kde dochází k netěsnosti u vstupních vrat.



Obr. 24 Vstupní vrata do haly s únikem tepla

Na dalších ukázkových snímkách můžeme vidět postupné ochlazování chladicího média v kondenzátoru (Obr. 25), případně jasně viditelný stoupající teplý odpadní vzduch z počítačových sestav (Obr. 26).



Obr. 25 Kompresorového chlazení



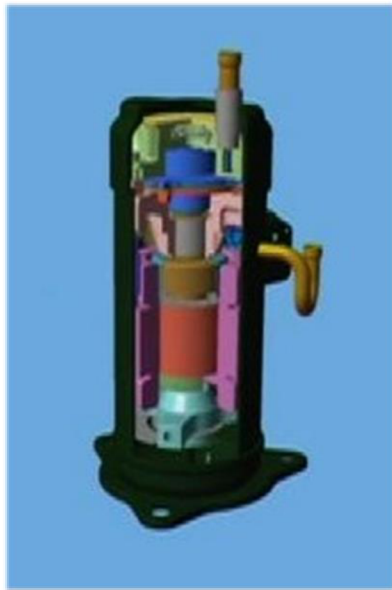
Obr. 26 Stanoviště serveru

5 PRAKTICKÁ MĚŘENÍ VE FIRMĚ DAIKIN DEVICE CZECH

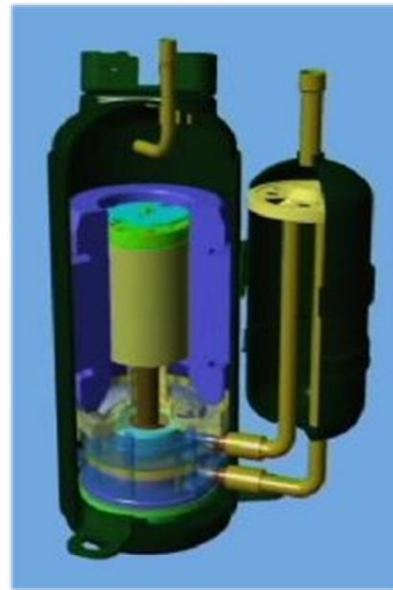
5.1 O společnost Daikin Device Czech

Společnost Daikin Industries Limited je nadnárodní korporace kótovaná na japonském akciovém trhu a předním světovým výrobcem a dodavatelem zařízení TVK (topení, ventilace a klimatizace), včetně řešení pro tepelná čerpadla a mražení pro soukromé, komerční i průmyslové účely.

Společnost Daikin Industries Ltd. byla založena v roce 1924 v japonské Ósace. V roce 1972 Daikin expanduje na evropský trh a zakládá dceřinou společnost Daikin Europe NV. V belgickém Oostende. Od roku 1992 je v Praze otevřena obchodní pobočka Daikin Airconditioning Central Europe a v roce 2004 se v Plzni na Borských polích spouští výroba malých klimatizačních jednotek v novém závodě Daikin Industries Czech Republic. Výroba kompresorů pro malé klimatizační jednotky v brněnské průmyslové zóně Černovické terasy v Daikin Device Czech Republic je spuštěna v roce 2006. Konkrétně se jedná o invertorové kompresory typu swing a scroll. [49]



Obr. 27 Kompresor typu scroll [49]

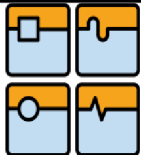


Obr. 28 Kompresor typu swing [49]

5.2 Použitá měřící zařízení

5.2.1 MOBIR M8

MobIR M8 je všestranná a cenově dostupná termovizní radiometrická kamera, která disponuje vysokokapacitním radiometrickým infračerveným obrazem, možností nahrávání videa s infračerveným obrazem a technologií směšování infračerveného a optického snímku.



Obr. 29 MobIR M8 [50]

Tab. 11 Technické parametry MobIR M8

Model	MobIR M8
Typ detektoru	Nechlazený mikrobolometr FPA (160 x 120 obrazových bodů, 25 μm)
Spektrální rozsah	8 – 14 μm
Teplotní citlivost	≤ 100 mK při 30 °C
Zorné pole	20,6° x 15,5°, 11 mm
Teplotní rozsah měření	-20 °C až 250 °C (volitelně +1200 °C)
Přesnost	± 2 °C nebo 2 % (při jmenovité teplotě 25 °C, platí vyšší hodnota)
Korekce emisivity	0,01 až 1,00

5.2.2 Fluke Ti27

Termovizní kamera Fluke Ti27 je ruční termovizní kamera sloužící k preventivní a prediktivní údržbě, řešení potíží se zařízeními, kontrole oprav, inspekci budov, rekonstrukčním pracím, energetickým auditům a pro účely implementace ochrany proti klimatickým vlivům. Kamera také disponuje technologií směšování infračerveného a optického snímku.



Obr. 30 Fluke Ti27 [51]

Tab. 12 Technické parametry Fluke Ti27

Model	Fluke Ti27
Typ detektoru	Nechlazený mikrobolometr FPA (240 x 180 obrazových bodů)
Spektrální rozsah	7,5 μm až 14 μm
Teplotní citlivost	≤50 mK při 30 °C
Zorné pole	23° x 17°
Teplotní rozsah měření	-20 °C až 600 °C
Přesnost	±2 °C nebo 2 % (při jmenovité teplotě 25 °C, platí vyšší hodnota)
Korekce emisivity	0,01 – 1,00

5.2.3 Anritsu HA-200K, teplotní sonda N-231K-00-1-TC1-ASP



Obr. 31 Anritsu HA-200K [52]



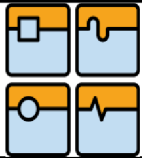
Obr. 32 N-231K-00-1-TC1-ASP [53]

Tab. 13 Technické parametry Anritsu HA-200K

Model	Anritsu HA-200K	
Vstupní konektor	ASP	
Rozsah měření	-200 až 1370 °C	
Přesnost měření	-200 až 0 °C	± (0,5% z měřené hodnoty + 1 °C)
	0 až 1370 °C	± (0,1% z měřené hodnoty + 1 °C)
Vzorkovací frekvence	App. 300 ms	
Analogový výstup	1 mV / °C	

Tab. 14 Technické parametry Anritsu HA-200K

Model	N-231K-00-1-TC1-ASP
Vstupní konektor	ASP
Rozsah měření	-50 až 500 °C
Přesnost měření	± 2,5 °C
Doba odezvy	1,5 s



5.3 Měření provedená ve firmě Daikin Device Czech

Aby bylo možné termokamery Fluke Ti27 a MobIR M8 bezpečně použít i pro zjištění konkrétních hodnot teplot, byla v rámci mé stáže ve firmě Daikin Device Czech stanovena způsobilost těchto kamer. Dále byla pomocí těchto kamer stanovena emisivita povrchů součástek používaných při procesu pájení, včetně vyřešení problému měření ocelového povrchu u kamery MobIR M8.

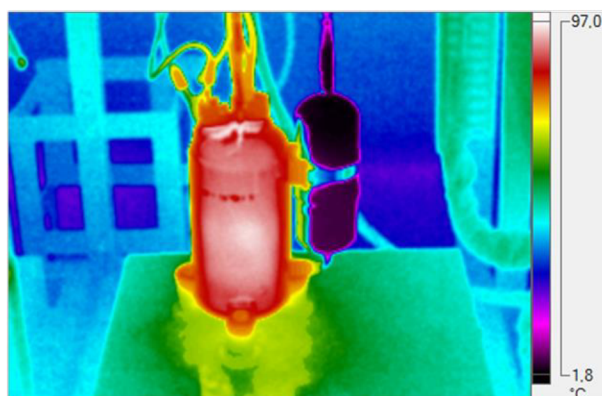
5.3.1 Hodnocení způsobilosti měřidla

Hodnoty pro hodnocení způsobilosti měřidla byly naměřeny při Durability testu kompresorové jednotky typu swing.

Durability test je tzv. test životnosti, při kterém je kompresor testován při extrémnějších podmínkách, než kterým bude vystaven během běžného provozu. Konkrétně se jedná o rozdílné vstupní a výstupní teploty. Teplota na vstupu se pohybuje okolo 2°C a na výstupu dosahuje teplota až 110°C. Tyto extrémní provozní podmínky mají za následek jiné provozní tlaky a větší opotřebení součástek. Po tomto testu, který trvá jeden týden a hodnoty teploty a tlaku se zaznamenávají pomocí testovacího zařízení, se kompresor rozřeže a veškeré součástky se prověří. Tento test se provádí přibližně jednou za měsíc.



Obr. 33 Durability test



Obr. 34 Durability test (Fluke Ti27)



Obr. 35 Durability test (MobIR M8)

Pro hodnocení způsobilosti byly použity indexy způsobilosti C_g a C_{gk} pro posouzení vhodnosti kamery MobIR M8 a Fluke Ti27 pro měření teploty.

Index způsobilosti C_g hodnotí přesnost kamery dle vztahu:

$$C_g = \frac{0,2T}{6s_g} \quad (19)$$

T = toleranční pásmo

s_g = směrodatná odchylka naměřených hodnot

Index způsobilosti C_{gk} hodnotí přesnost kamery dle vztahu:

$$C_{gk} = \frac{0,1T - |\bar{x}_g - x_e|}{3s_g} \quad (20)$$

\bar{x}_g = střední hodnota měření

x_e = skutečná hodnota

Indexy způsobilosti uvedené v předcházejících vztazích (19) a (20) určují, zda se výsledky měření provedené kamerou MobIR M8 a Fluke Ti27 nachází v rozsahu tolerance (20 %) s pravděpodobností 99,73 %.

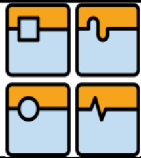
Existují i jiné postupy, hodnotící způsobilost měřidla, kdy je vybraný rozsah tolerance např. 15 % a pravděpodobnost je 99 % nebo 95 %. [8], [9]

Pro hodnocení způsobilosti měřidla byla použita následující tabulka [9]:

Tab. 15 Hodnocení způsobilosti měřidla

$C_g, C_{gk} \geq 1,33$	Přístroj je schopen měřit v požadované toleranci
$C_g, C_{gk} < 1,33$	Přístroj není schopen měření

Velikost tolerančního rozsahu byla nastavena na $T = 10$ v souladu s požadovanou přesností měření. Jako etalon byl použit kontaktní teploměr Anritsu HA-200K s teplotní sondou N-231K-00-1. Hodnota naměřená etalonem byla $t = 91,7$ °C. Měření bylo provedeno 10krát pro různé hodnoty úhlu.

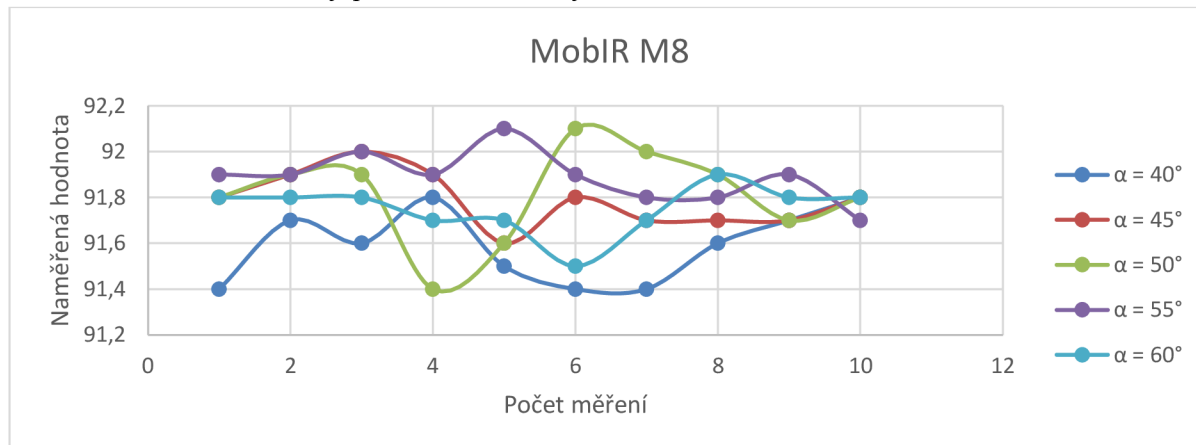


DIPLOMOVÁ PRÁCE

Tab. 16 Naměřené hodnoty

Anritsu HA-200K (N-231K-00-1)										
Naměřená hodnota [°C]										
91,7										
Fluke Ti27; $\varepsilon = 0,95$, $\varphi = 60 \%$, $l = 0,5 \text{ m}$										
Úhel	Naměřené hodnoty [°C]									
$\alpha = 30^\circ$	91,8	92,1	91,7	91,9	91,8	91,8	91,8	91,8	91,6	91,8
$\alpha = 40^\circ$	92,1	92,2	92,0	92,1	92,1	92,2	92,2	92,0	92,1	92,1
$\alpha = 50^\circ$	92,1	91,8	91,8	91,8	91,8	91,8	91,7	92,0	91,9	91,7
$\alpha = 60^\circ$	91,7	91,8	91,7	91,8	92,1	92,1	92,0	92,0	92,1	92,0
MobIR M8; $\varepsilon = 0,95$, $\varphi = 60 \%$, $l = 0,5 \text{ m}$										
Úhel	Naměřené hodnoty [°C]									
$\alpha = 40^\circ$	91,4	91,7	91,6	91,8	91,5	91,4	91,4	91,6	91,7	91,8
$\alpha = 45^\circ$	91,8	91,9	92,0	91,9	91,6	91,8	91,7	91,7	91,7	91,8
$\alpha = 50^\circ$	91,8	91,9	91,9	91,4	91,6	92,1	92,0	91,9	91,7	91,8
$\alpha = 55^\circ$	91,9	91,9	92,0	91,9	92,1	91,9	91,8	91,8	91,9	91,7
$\alpha = 60^\circ$	91,8	91,8	91,8	91,7	91,7	91,5	91,7	91,9	91,8	91,8

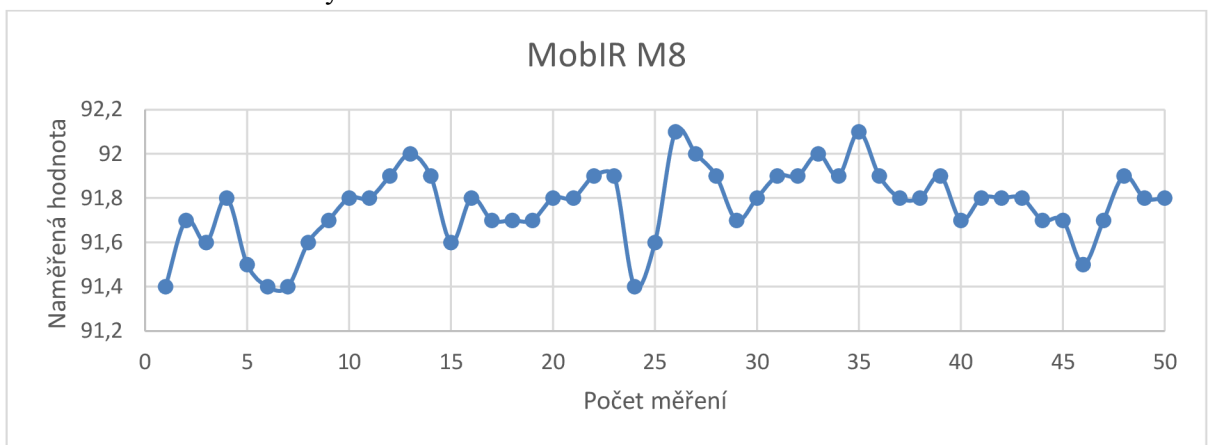
Graf 1 Naměřené hodnoty pro různé hodnoty úhlu



Tab. 17 Výsledky hodnocení způsobilosti měřidla pro různé hodnoty úhlu

$\alpha = 40^\circ$	T = 10 °C	$x_e = 91,7^\circ\text{C}$
	$S_g = 0,159513^\circ\text{C}$	$\bar{x}_g = 91,59^\circ\text{C}$
	$C_g = 2,09$	$C_{gk} = 1,86$
$\alpha = 45^\circ$	T = 10 °C	$x_e = 91,7^\circ\text{C}$
	$S_g = 0,119722^\circ\text{C}$	$\bar{x}_g = 91,79^\circ\text{C}$
	$C_g = 2,78$	$C_{gk} = 2,53$
$\alpha = 50^\circ$	T = 10 °C	$x_e = 91,7^\circ\text{C}$
	$S_g = 0,202485^\circ\text{C}$	$\bar{x}_g = 91,81^\circ\text{C}$
	$C_g = 1,65$	$C_{gk} = 1,47$
$\alpha = 55^\circ$	T = 10 °C	$x_e = 91,7^\circ\text{C}$
	$S_g = 0,110050^\circ\text{C}$	$\bar{x}_g = 91,89^\circ\text{C}$
	$C_g = 3,03$	$C_{gk} = 2,45$
$\alpha = 60^\circ$	T = 10 °C	$x_e = 91,7^\circ\text{C}$
	$S_g = 0,108012^\circ\text{C}$	$\bar{x}_g = 91,75^\circ\text{C}$
	$C_g = 3,09$	$C_{gk} = 2,93$

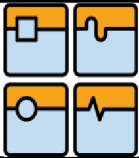
Graf 2 Naměřené hodnoty



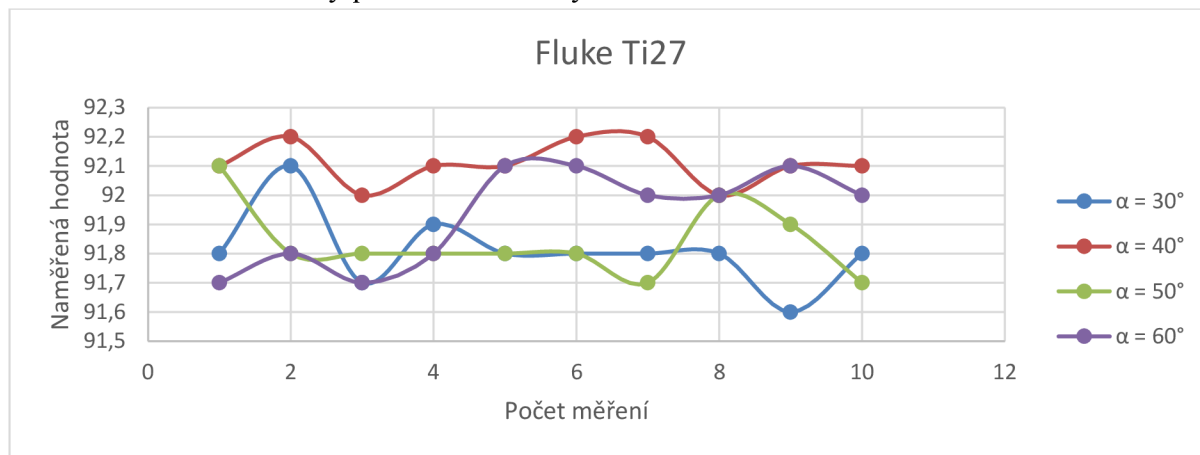
Tab. 18 Výsledky hodnocení způsobilosti měřidla

$\alpha = 40^\circ - 60^\circ$	T = 10 °C	$x_e = 91,7^\circ\text{C}$
	$S_g = 0,170200^\circ\text{C}$	$\bar{x}_g = 91,92^\circ\text{C}$
	$C_g = 1,96$	$C_{gk} = 1,52$

Na základě údajů v Tab. 18 Výsledky hodnocení způsobilosti měřidla, může být kamera MobIR M8 prohlášena za způsobilou k měření.



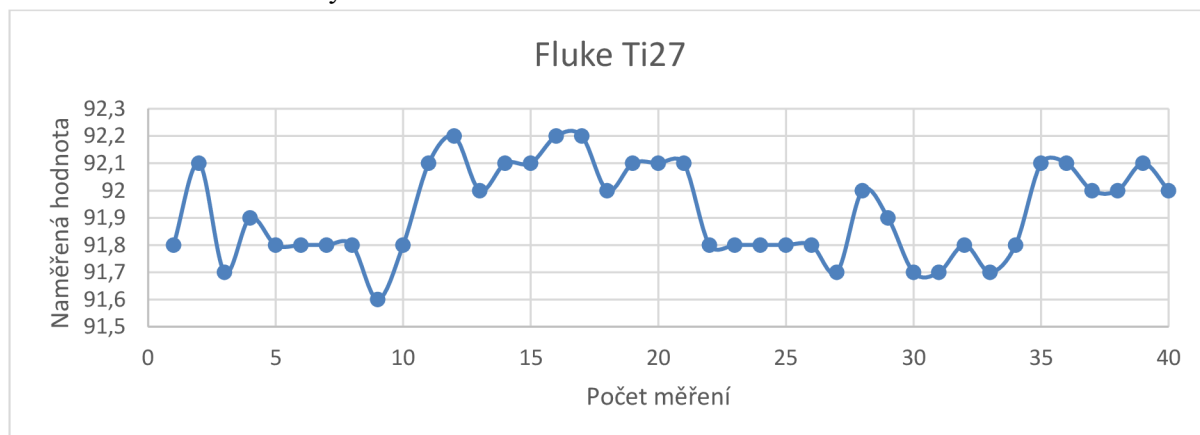
Graf 3 Naměřené hodnoty pro různé hodnoty úhlu



Tab. 19 Výsledky hodnocení způsobilosti měřidla pro různé hodnoty úhlu

$\alpha = 30^\circ$	$T = 10 \text{ }^\circ\text{C}$	$x_e = 91,7 \text{ }^\circ\text{C}$
	$S_g = 0,128668 \text{ }^\circ\text{C}$	$\bar{x}_g = 91,81 \text{ }^\circ\text{C}$
	$C_g = 2,59$	$C_{gk} = 2,31$
$\alpha = 40^\circ$	$T = 10 \text{ }^\circ\text{C}$	$x_e = 91,7 \text{ }^\circ\text{C}$
	$S_g = 0,073786 \text{ }^\circ\text{C}$	$\bar{x}_g = 92,11 \text{ }^\circ\text{C}$
	$C_g = 4,52$	$C_{gk} = 2,67$
$\alpha = 50^\circ$	$T = 10 \text{ }^\circ\text{C}$	$x_e = 91,7 \text{ }^\circ\text{C}$
	$S_g = 0,126491 \text{ }^\circ\text{C}$	$\bar{x}_g = 91,84 \text{ }^\circ\text{C}$
	$C_g = 2,64$	$C_{gk} = 2,27$
$\alpha = 60^\circ$	$T = 10 \text{ }^\circ\text{C}$	$x_e = 91,7 \text{ }^\circ\text{C}$
	$S_g = 0,163639 \text{ }^\circ\text{C}$	$\bar{x}_g = 91,93 \text{ }^\circ\text{C}$
	$C_g = 2,04$	$C_{gk} = 1,57$

Graf 4 Naměřené hodnoty



Tab. 20 Výsledky hodnocení způsobilosti měřidla

$\alpha = 30^\circ - 60^\circ$	$T = 10\text{ }^\circ\text{C}$	$x_e = 91,7\text{ }^\circ\text{C}$
	$S_g = 0,170964\text{ }^\circ\text{C}$	$\bar{x}_g = 91,77\text{ }^\circ\text{C}$
	$C_g = 1,95$	$C_{gk} = 1,82$

Na základě údajů v Tab. 20 Výsledky hodnocení způsobilosti měřidla, může být kamera Fluke Ti27 prohlášena za způsobilou k měření.

5.3.2 Stanovení emisivit povrchu komponent kompresoru nahříváných v peci

Jako způsob určení emisivit materiálů nejčastěji používaných v procesu pájení na automatech, byla zvolena metoda použití referenčního teploměru, v tom případě teploměru HA-200K a teplotní sondy N-231K-00-1-TC1-ASP. Zbylé metody získávání hodnot emisivity nebyly pro konkrétní případ vhodné.

Vyhledání hodnoty emisivity v tabulkách pro konkrétní materiál neposkytovalo dostatečně přesné výsledky, proto tabulkové hodnoty emisivit jsou spíše orientační. Použití nálepek nebo speciálního nátěru na část měřeného vzorku bylo oproti použité metodě použití referenčního teploměru zbytečně nákladné a metoda vytvoření otvoru ve vzorku nebyla technicky možná z důvodu nedostatečné tloušťky materiálu a měřených součástí.

Pro měření byly vybrány tři vzorky (Obr. 36). Jednalo se o vzorky ocelové součásti kompresoru bez povrchové úpravy, se zoxidovaným povrchem a s finálním lakovaným povrchem.

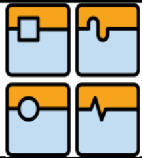
Měření bylo provedeno kamerami Fluke Ti27, MobIR M8 a kontaktním teploměrem Anritsu HA-200K s teplotní sondou N-231K-00-1. Vzorky byly nahřívány v elektrické horizontální peci Espec Corp PV 221 pomocí proudění horkého vzduchu o stanovené teplotě.



Obr. 36 Vzorky pro měření



Obr. 37 Espec Corp PV221



Pomocí kamery Fluke Ti27 a kontaktního teploměru Anritsu HA-200K byly stanoveny emisivity povrchů takto:

Tab. 21 Emisivity povrchů

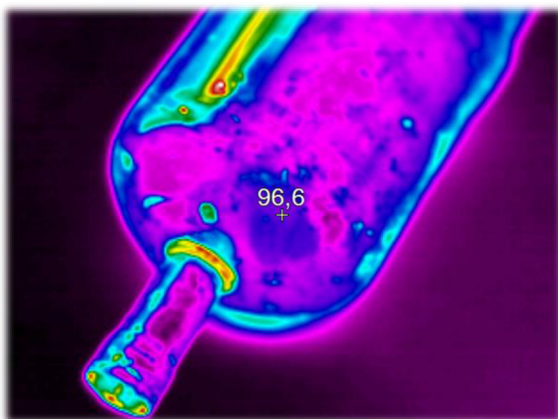
Druh povrchu	Emisivita	Tabulková hodnota emisivity
Bez povrchové úpravy	0,15	0,08 – 0,2
Zoxidovaný povrch	0,40	0,35 – 0,8
Finální lakovaný povrch	0,95	-----

U součástky bez povrchových úprav docházelo k odrazům okolních zdrojů záření, což představovalo pro kameru MobiIR M8 závažný problém, kvůli němuž nelze tento povrch přesně měřit (Obr. 39).

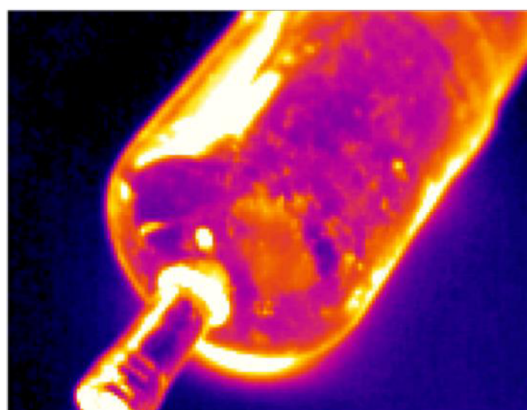
U zoxidovaného povrchu součástky se odrazy okolních zdrojů záření projevily již v menší míře. Kamera MobIR M8 ovšem měla s tímto povrchem také problém a přesnost měřených hodnot neodpovídala přesnosti udávané výrobcem (Obr. 41).

Při měření finálního lakovaného povrchu se žádné odlesky okolních zdrojů záření neprojevily a přesnost měřených hodnot odpovídala přesnosti udávané výrobcem (Obr. 43).

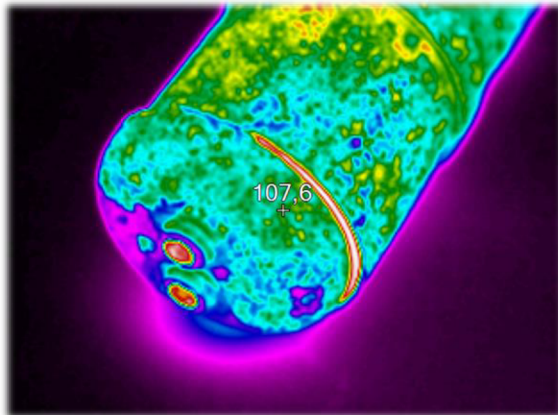
Snímky pořízené kamerou Fluke Ti27 a MobIR M8 měřených komponent:



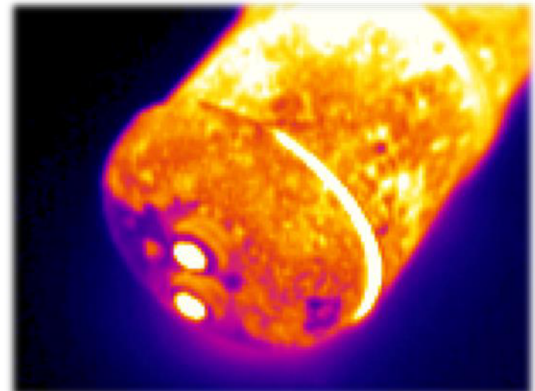
Obr. 38 Fluke Ti27, bez povrchových úprav



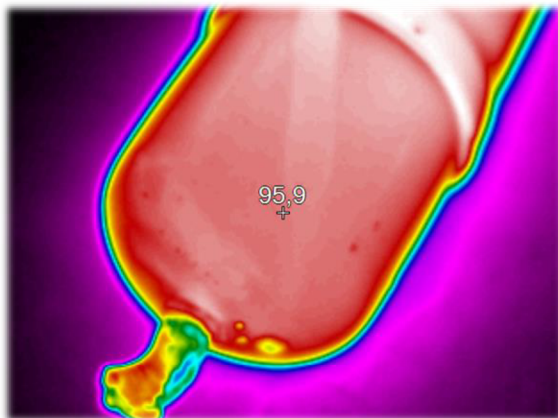
Obr. 39 MobIR M8, bez povrchových úprav



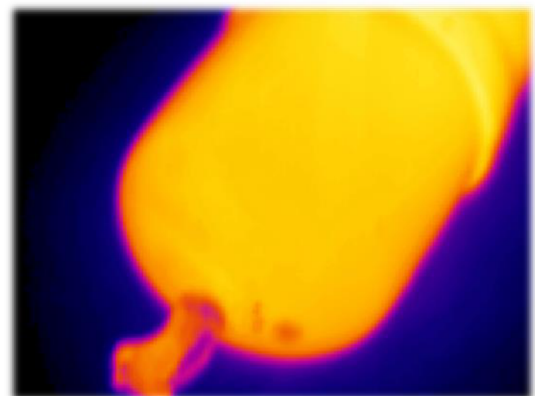
Obr. 40 Fluke Ti27, zoxidovaný povrch



Obr. 41 MobIR M8, zoxidovaný povrch



Obr. 42 Fluke Ti27, finální lakovaný povrch



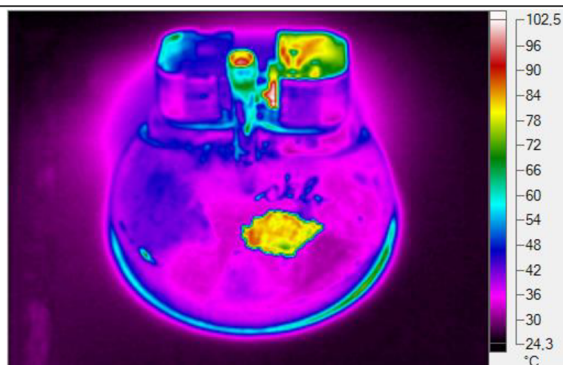
Obr. 43 MobIR M8, finální lakovaný povrch

5.3.3 Stanovení emisivity povrchu komponent kompresoru upravených lihovým fixem nahříváných v peci

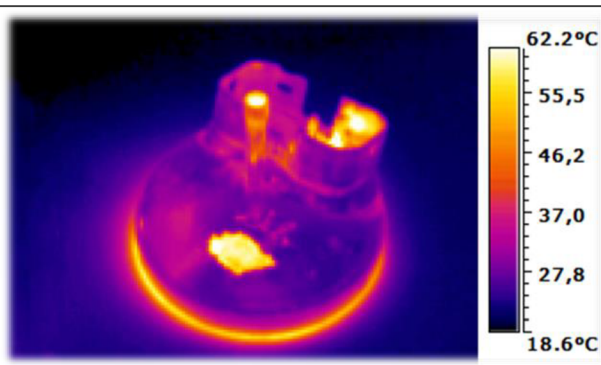
Z důvodů předešlého zjištění, že kamera MobIR M8 nedokáže správně měřit ocel bez povrchových úprav, byl proveden experiment, kdy byl povrch oceli upraven lihovým fixem Permanent Marker centropen 8566 (Obr. 44).



Obr. 44 Povrch upravený lihovým fixem



Obr. 45 Fluke Ti27 (upraveno lihovým fixem)



Obr. 46 MobIR M8 (upraveno lihovým fixem)

Pomocí kamery Fluke Ti27 a kontaktního teploměru Anritsu HA-200K byla stanovena emisivita povrchu oceli upravené lihovým fixem na hodnotu $\varepsilon = 0,67$. U kamery MobIR M8 způsobovala hodnota emisivity $\varepsilon = 0,67$ nepřesnost naměřených hodnot větší, než je udávána výrobcem. Proto byla emisivita upravena na hodnotu $\varepsilon = 0,62$, při které byla přesnost již na dostačující úrovni.

Tab. 22 Naměřené hodnoty

Povrch upravený lihovým fixem								
MobIR M8					Fluke Ti27			
$\varepsilon = 0,67$; $l=0,2m$; $\phi = 60 \%$; $\alpha = 45^\circ$			$\varepsilon = 0,62$; $l=0,2m$; $\phi = 60 \%$; $\alpha = 45^\circ$			$\varepsilon = 0,67$; $l=0,2m$; $\phi = 60 \%$; $\alpha = 45^\circ$		
HA-200K [°C]	MobIR M8 [°C]	Chyba [%]	HA-200K [°C]	MobIR M8 [°C]	Chyba [%]	HA-200K [°C]	Fluke Ti27 [°C]	Chyba [%]
91,0	86,0	5,5	82,2	84,0	2,2	86,0	86,9	1,0
88,8	86,5	2,6	79,7	79,5	0,3	83,1	84,1	1,2
85,7	80,2	6,4	77,3	76,9	0,5	81,7	82,0	0,4
81,9	76,1	7,1	76,4	75,4	1,3	79,9	79,4	0,6
80,1	76,4	4,6	75,6	76,6	1,3	78,4	78,6	0,3
78,0	72,6	6,9	74,3	73,3	1,3	77,6	77,9	0,4
76,1	71,6	5,9	74,1	73,7	0,5	76,0	75,7	0,4
74,5	69,6	6,6	72,8	73,8	1,4	74,5	74,2	0,4
74,4	69,3	6,9	72,8	71,8	1,4	74,4	73,9	0,7
72,0	67,8	5,8	71,5	71,6	0,1	72,2	72,4	0,3
71,7	66,7	7,0	71,4	70,5	1,3	71,4	70,8	0,8
70,5	67,4	4,4	69,9	69,9	0,0	69,4	69,4	0,0
69,0	67,3	2,5	69,4	68,1	1,9	67,8	67,8	0,0
68,8	63,5	7,7	67,2	66,8	0,6	67,0	67,5	0,7
67,3	68,7	2,1	65,8	66,5	1,1	65,4	64,8	0,9
Průměrná chyba [%]		5,2	Průměrná chyba [%]		1,1	Průměrná chyba [%]		0,5

Tab. 23 Průměrná chyba naměřených hodnot

Kamera	Hodnota emisivity	Průměrná chyba měření
MobIR M8	$\varepsilon = 0,67$	5,2 %
	$\varepsilon = 0,62$	1,1 %
Fluke Ti27	$\varepsilon = 0,67$	0,5 %

Z naměřených hodnot je patrné, že povrch oceli upravený pomocí lihového fixu je pro kameru MobIR M8 při vhodném nastavení hodnoty emisivity měřitelný.

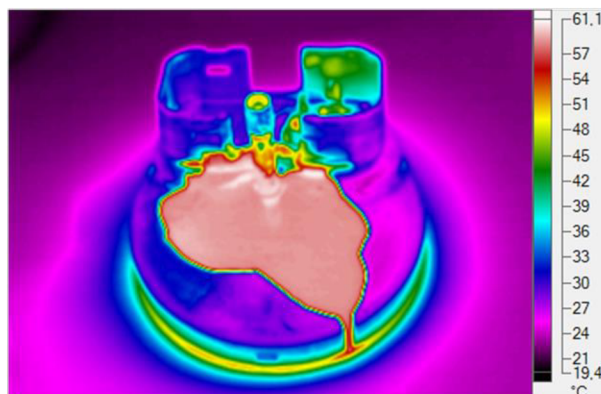
5.3.4 Stanovení emisivity povrchu komponent kompresoru upravených pájecí pastou (D60) nahříváných v peci

Dále byl proveden experiment, při kterém se stanovila hodnota emisivity povrchu oceli opatřené pájecí pastou. Pomocí kamery Fluke Ti27 a kontaktního teploměru Anritsu HA200K byla stanovena emisivita povrchu oceli opatřené pájecí pastou na hodnotu $\varepsilon = 0,94$.

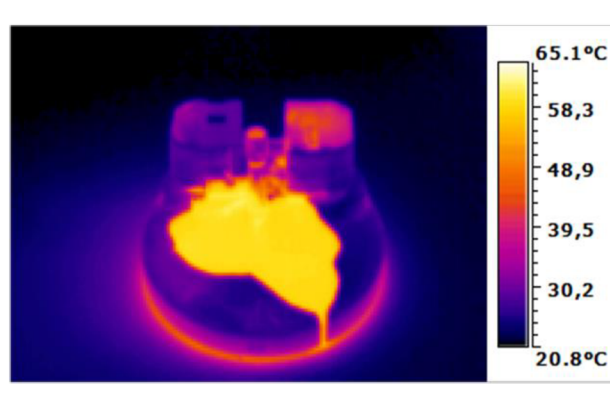
U kamery MobIR byla z důvodu nedostatečné přesnosti naměřených hodnot upravena emisivita na hodnotu $\varepsilon = 0,97$, při které byla přesnost již na dostačující úrovni.



Obr. 47 Povrch opatřený pájecí pastou D60



Obr. 48 Fluke Ti27 (pájecí pasta)



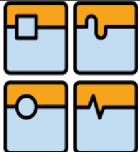
Obr. 49 MobIR M8 (pájecí pasta)

Tab. 24 Naměřené hodnoty

Povrch s nanesenou pájecí pastou D60								
MobIR M8					Fluke Ti27			
$\varepsilon = 0,94;$ $l=0,2m; \phi = 60 \%; \alpha = 45^\circ$			$\varepsilon = 0,97;$ $l=0,2m; \phi = 60 \%; \alpha = 45^\circ$			$\varepsilon = 0,94;$ $l=0,2m; \phi = 60 \%; \alpha = 45^\circ$		
HA-200K [°C]	MobIR M8 [°C]	Chyba [%]	HA-200K [°C]	MobIR M8 [°C]	Chyba [%]	HA-200K [°C]	Fluke Ti27 [°C]	Chyba [%]
88,7	87,5	1,4	89,6	89,7	0,1	76,6	76,8	0,3
83,8	82,3	1,8	85,6	85,1	0,6	75,1	75,2	0,1
83,5	85,6	2,5	82,3	82,3	0,0	73,1	73,4	0,4
81,8	80,4	1,7	77,0	76,0	1,3	72,6	72,5	0,1
80,4	83,2	3,5	75,6	75,2	0,5	71,6	71,6	0,0
79,7	78,8	1,1	74,9	73,9	1,3	71,3	71,1	0,3
78,2	78,6	0,5	73,3	73,8	0,7	69,9	70,2	0,4
75,8	75,1	0,9	72,4	71,3	1,5	69,3	68,4	1,3
74,4	75,9	2,0	71,0	71,8	1,1	68,0	67,6	0,6
73,8	73,5	0,4	69,0	68,9	0,1	66,5	66,5	0,0
72,9	74,0	1,5	68,4	68,3	0,1	65,4	65,1	0,5
72,2	71,0	1,7	67,6	66,9	1,0	64,2	63,5	1,1
69,6	68,5	1,6	67,3	67,2	0,1	63,0	62,4	1,0
67,1	65,1	3,0	66,2	66,2	0,0	61,5	61,0	0,8
65,6	63,7	2,9	64,3	64,0	0,5	60,0	59,3	1,2
Průměrná chyba [%]		1,8	Průměrná chyba [%]		0,6	Průměrná chyba [%]		0,5

Tab. 25 Průměrná chyba naměřených hodnot:

Kamera	Hodnota emisivity	Průměrná chyba měření
MobIR M8	$\varepsilon = 0,94$	1,8 %
	$\varepsilon = 0,97$	0,6 %
Fluke Ti27	$\varepsilon = 0,94$	0,5 %

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 65
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

ZÁVĚR

Diplomová práce je členěna na teoretickou a praktickou část. Výsledky těchto jednotlivých částí jsou uvedeny v následujících odstavcích.

Výsledky teoretické části:

- Popsání technické diagnostiky a jejího dělení, termodiagnostiky a její základní pojmy.
- Popsání jednotlivých typů kontaktních teploměrů, včetně jejich výhod, nevýhod a vhodných aplikací.
- Popsání jednotlivých typů bezkontaktních teploměrů, včetně jejich výhod, nevýhod a vhodných aplikací.
- Popsání využitelnosti termografie v praxi, včetně konkrétních aplikací ve firmě Daikin Device Czech.

Výsledky praktické části:

- Byla stanovena způsobilost obou termokamer

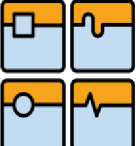
Dříve se ve firmě kamery používaly pouze pro zjišťování teplotního gradientu. Nyní se mohou bezpečně použít i pro zjištění konkrétní hodnoty teploty (bylo definováno, s jakou přesností termokamery měří). Byla stanovena emisivita materiálů používaný v procesu pájení a vyřešen problém, který se vyskytl u neupraveného povrchu ocelové součástky v případě kamery MobIR M8.

Termokamera MobIR M8 má být využita pro měření za účelem změny materiálu pájky na pájecích automatech. Konkrétně má být aktuální pájka Ag30 postupně nahrazena levnější pájkou Ag25 a následně Ag20. Tyto pájky (Ag25, Ag20) mají odlišné teploty nutné pro správné zapájení součásti. Termokamera bude proto využita pro zjištění času potřebného pro dosažení těchto teplot na pájecím automatu.

Náhradou pájky Ag30 se ušetří v případě pájky Ag25 30 % nákladů a v případě pájky Ag20 50 % nákladů za pájecí materiál. V delším časovém horizontu má být snaha nahradit stříbrnou pájku pájkou mosaznou, což by ušetřilo téměř 90 % nákladů za pájecí materiál. Při výrobě 60000 kusů měsíčně a nynější ceně pájky přibližně 6,-/kus se jedná o značné finanční úspory.

- Proškolení personálu

Personál z oddělení údržby a engineeringu používající termokamery MobIR M8 a Fluke Ti27 byl proškolen v oblasti používání termokamery. Konkrétně se jednalo o vysvětlení významu emisivity pro měření, její možné zjištění v praxi, významu nastavení dalších parametrů měření jako vzdálenost, relativní vlhkost, okolní teplota, způsobu měření termokamerou (vyvarování se odlesků, měření v úhlu max. 60° od kolmice a dalších možných chyb) a samotném vyhodnocování, případně úpravě termosnímků v softwaru dodávaném výrobcem.

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 66
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

- Doporučena pravidelná kalibrace kamer u výrobce

Výrobce je doporučena pravidelná kalibrace v intervalu 1 rok. Kamery nebyly do této doby pravidelně kalibrovány.

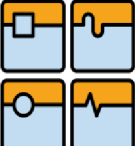
PŘÍLOHY

Tabulka emisivit

Intenzita vyzařování jednotlivých materiálů závisí na povrchové úpravě a teplotě. Tato tabulka je návodem pro základní nastavení hodnoty emisivity.

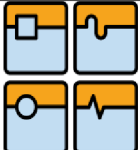
Tab. 26 Hodnoty emisivit pro povrch mědi a oceli

Materiál	Emisivita
Měď	
Hrubě leštěná	0,07
Leštěná	0,03
Vysoce leštěná	0,02
Válcovaná	0,64
Černá, zoxidovaná	0,78
Ocel	
Válcovaná za studena	0,75 – 0,85
Plech	0,55 – 0,61
Měkká ocel	0,10 – 0,15
Nezoxidovaná	0,08
Zoxidovaná	0,80

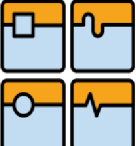
	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 68
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

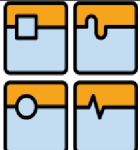
- 1 SVOBODA, Štěpán. Měření teploty – bezkontaktní teploměry a termovizní kamery. [online]. *Odborné časopisy* [cit. 2014-05-05]. 2014 Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=26549
- 2 SVOBODA, Štěpán. Termodiagnostika. *Strojirenství* [online]. [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: <http://www.engineering.sk/index.php/clanky2/stroje-a-technologie/1104-termodiagnostika>
- 3 KREIDL, Marcel. *Technická diagnostika: senzory, metody, analýza signálu*. 1. vyd. Praha: BEN, 2006, 406 s. Senzory neelektrických veličin. ISBN 80-730-0158-6.
- 4 VDOLEČEK, František. Technická diagnostika v systémech údržby. *Automa: časopis pro automatizační techniku*. Praha: FCC Public, 2008, roč. 2008, č. 5. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/37313.pdf>
- 5 VOŠTOVÁ, V. – HELEBRANT, F. – JEŘÁBEK, K. *Provoz a údržba strojů – II. část Údržba strojů*. Vydavatelství ČVUT v Praze, 2002, ISBN 80-01-02531-4.
- 6 VDOLEČEK, F.: Když se řekne spolehlivost a diagnostika. *Automatizace*, 2003, roč. 46, č. 4, s. 276–280.
- 7 KREIDL, Marcel. *Měření teploty: senzory a měřicí obvody*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2005, 239 s. Senzory neelektrických veličin. ISBN 80-730-0145-4.
- 8 INTEGROVANÁ STŘEDNÍ ŠKOLA, Kumburská 846, Nová Paka. *Automatizace: Snímače teploty* [online]. [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: <http://automatizace-issnp.wz.cz/Soubory/Snimace%20teploty.pdf>
- 9 ROBENEK, Jan. Běžně dostupné snímače teploty: od teorie k praktickému nasazení. *HW.cz* [online]. 2013 [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: <http://www.hw.cz/analogove-systemy/bezne-dostupne-snimace-teploty-od-teorie-k-praktickemu-nasazeni.html>
- 10 KADLEC, Karel. Měřicí a řídicí technika: Měření teploty [přednáška]. 2014. vyd. Ústav fyziky a měřicí techniky, Vysoká škola chemicko-technologická v Praze [cit. 2014-05-05].
- 11 KADLEC, Karel a Miloš KMÍNEK. *Měřicí a řídicí technika: Měření teploty* [online]. 2005 [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: <http://uprt.vscht.cz/kminekm/mrt/>
- 12 VLACH, Libor. *Moderní měření a regulace energetických veličin* [online]. Brno, 2013 [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: <http://www.e-automatizace.cz/ebooks/mmr/v/>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. František Vdoleček, CSc.

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 69
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

- 13 VOJÁČEK, Antonín. Historické snímače - jde to i bez elektřiny a integrovaných obvodů. *Automatizace.HW.cz* [online]. 2009 [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: <http://automatizace.hw.cz/historicke-snimace-jde-i-bez-elektriny-a-integrovanych-obvodu>
- 14 Teploměr. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Teplom%C4%9Br>
- 15 *Měření teploty* [online]. 2011 [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: <http://www.maryshfmmi.webzdarma.cz/mttd.htm>
- 16 Linear Expansion Thermometer Bimetallic Strips. In: *Department of Physics* [online]. 2010 [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: <http://physics.csustan.edu/Ian/HowThingsWork/Topics/Temperature/Thermometers/BimetallicStripThermometer.htm>
- 17 VŠETIČKA, Martin. Seebeckův jev. REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. *Encyklopedie fyziky* [online]. 2013 [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/910-seebeckuv-jev>
- 18 Thermocouple Color Codes. *Omega* [online]. 2012 [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: <http://www.omega.com/techref/colorcodes.html>
- 19 Úvod do termočlánků. *Omega* [online]. 2012 [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: <http://www.omegaeng.cz/prodinfo/thermocouples.html>
- 20 ADÁMEK, Martin. *Mikrosenzory: Odporové senzory teploty* [online]. 2002 [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: http://www.umel.feec.vutbr.cz/~adamek/uceb/DATA/s_3_2_4.htm
- 21 Technologie výroby senzorů. *EAmos* [online]. 2014 [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: http://www.eamos.cz/amos/kat_fyz/externi/kat_fyz_6544/html/cidla/vyroba/vyroby.htm
- 22 Odporový snímač teploty do jímký. *Mavis* [online]. 2014 [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: <http://www.mavis.cz/produkty/odporovy-snimac-teploty-do-jimky-mtr-8j>
- 23 WALKER, David. Cones: Cone Temperature Chart [online]. 2010 [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: <http://www.walkerceramics.com.au/cones.htm>
- 24 Nevratné tavné indikátory. *PS electronic* [online]. 2013 [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: <http://www.pselectronic.cz/s3701-nevratne.html>
- 25 SECHOVSKÝ, Štěpán. *Základní kurz fyziky pro distanční studium* [online]. 2013 [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: http://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/kurz_fyziky_pro_DS/display.php/molekul/9_2

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 70
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

- 26 MAYER, Daniel. *Pokroky matematiky, fyziky a astronomie*. Praha: Jednota českých matematiků a fyziků, 1978. ISBN 0032-2423. Dostupné z: http://dml.cz/bitstream/handle/10338.dmlcz/138536/PokrokyMFA_23-1978-6_4.pdf
- 27 Páskový indikátor teploty. *GM Electronic* [online]. 2014 [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: <http://www.gme.cz/paskovy-indikator-teploty-elchemco-7-level-horizontal-60-90-c-p729-066>
- 28 LANDIS a GYR. *Montáž čidel* [online]. Praha, 1998 [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: https://www.cee.siemens.com/web/sk/sk/priemysel/technologie-budov/katalogove-listy/Ostatnenavody_na_obsahu_montaz/montaz_snimacov.pdf
- 29 FRANCOVÁ, Hana. *Senzory* [online]. 2014 [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: <http://www.bhvsenzory.cz/index-cz.html>
- 30 JENČÍK, J.; VOLF, J. *Technická měření*. 1. vydání. Praha : Vydavatelství ČVUT, 2000. 212 s. ISBN 80-01-02138-6.
- 31 Elektromagnetické spektrum. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Elektromagnetick%C3%A9_spektrum
- 32 ŠVÁBENÍK, Petr a DORDOVÁ. Použití termokamery v technické praxi. *Elektro Revue*. 2011, roč. 13, č. 1.
- 33 BRZOBOHATÝ, Tomáš. *Měření emisivity vlhkých a suchých povrchů* [online]. Brno, 2012 [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/xmlui/bitstream/handle/11012/12539/DP%20Brzobohaty.pdf?sequence=1>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce prof. Ing. MILAN PAVELEK, CSc.
- 34 VAVŘIČKA, Roman. *Bezdotykové měření teploty* [skripta]. Praha: ČVUT, 2010 [cit. 2014-05-05].
- 35 HUŠEK, Miloš. Princip bezdotykového měření teploty. *QTest: Přístrojová a měřicí technika* [online]. 2013 [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: <http://www.qtest.cz/bezdotykove-teplomery/bezdotykove-mereni-teploty.htm>
- 36 Bezdotykové měření teploty. *Zpravodaj pro měření a regulaci*. 2005, č. 1, s. 83. Dostupné z: http://www.omegaeng.cz/literature/PDF/techinfo_1.pdf
- 37 ČECH, Jaroslav, Jiří PERNIKÁŘ a Kamil PODANÝ. *Strojírenská metrologie I*. Vyd.5., V Akademickém nakl. CERM vyd. 3. Brno: Akademické nakladatelství CERM,2009, 183 s. ISBN 978-80-214-4010-4.
- 38 Termogram. *Conversio* [online]. 2014 [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: <http://mereni-diagnostika.conversio.cz/uzitecne-informace/termogram>

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 71
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

39 SVOBODA, Jiří. Infračervené termografické (nedestruktivní) testování. *Czech Society for Nondestructive Testing* [online]. 2012 [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: [http://www.allforpower.cz/UserFiles/file/2011/249_p\(1\).pdf](http://www.allforpower.cz/UserFiles/file/2011/249_p(1).pdf)

40 NOVÁ, I., KRÝSLOVÁ, S., KRÝSLOVÁ, Z. *Metody bezdotykového měření teploty*. [online]. [cit. 2008-03-12]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/metody-bezdotykového-mereniteploty>.

41 OMEGA. *Zpravodaj pro měření a regulaci : Bezdotykové měření teploty*. 2. vyd. 83 s. 1. Dostupny z WWW: http://www.omegaeng.cz/literature/PDF/techinfo_1.pdf.

42 Hrazdírka I., Maryšková, V.: Termovize-její současny význam pro lékařskou diagnostiku. In: *Lékař a technika*, Praha: CLS, str.117-120, 1999

43 ŠIMKO, Milan.; CHUPÁČ, Milan. Aplikace možnosti termovize v praxi. *Elektro* [online]. 2006, č. 01 [cit. září 2008]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/>

44 Využití termografie v průmyslu: Informační příručka o aplikacích termografie v průmyslu. *Flir* [online]. 2012 [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: http://www.flirmedia.com/MMC/THG/Brochures/T820264/T820264_CZ.pdf

45 PAVELEK, Milan a Eva JANOTKOVÁ. *Vizualizační a optické měřicí metody: Termovizní systémy*[online]. Brno, 2001 [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: <http://ottp.fme.vutbr.cz/skripta/vlab/optika/0700.htm>

46 Měření termokamerou: Termovizní měření. *TZB-energ* [online]. 2014 [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: <http://www.tzb-energ.cz/mereni-termokamerou.html>

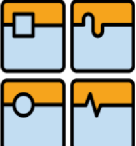
47 Porovnání simulací konstrukcí s vysokou tepelněakumulační schopností. BRZONĚ, Roman, Milan OSTRÝ. *TZB-info* [online]. Praha: ČVUT, 2012 [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: <http://stavba.tzb-info.cz/prostup-tepla-stavebni-konstrukci/9323-porovnani-simulaci-konstrukci-s-vysokou-tepelneakumulacni-schopnosti>

48 NOVOTNÝ, Jan. Termografie. *Fakulta sportovních studií Masarykovy univerzity: Ambulance tělovýchovného lékařství* [online]. 2012 [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: <http://www.fsps.muni.cz/~novotny/Termografie.htm>

49 *Daikin: Air Conditioning* [online]. 2010 [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: <http://www.daikinbrno.cz/index.php>

50 Infrared Camera MobIR M8: *Photobucket* [online]. 2014 [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: <http://s564.photobucket.com/user/ImpactInstruments/media/M8InfraredCamera.jpg.html>

51 Fluke Ti27 Industrial Infrared Digital Camera. *Fluke* [online]. 2014 [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: <http://www.fluke.com/fluke/inen/Thermal-Cameras/Fluke-Ti27.htm?PID=72281>

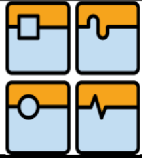
	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 72
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

- 52 Anritsu HA-200K. *Anritsu* [online]. 2014 [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: http://www.anritsu-meter.co.jp/instrument/ha_x/ha-200.htm
- 53 N-231K-00-1-TC1-ASP. *Anritsu* [online]. 2014 [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: <http://www.anritsu-meter.com/probe/n.html>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Tab. 27 Seznam použitých symbolů a zkratek

Zkratka	Jednotka	Popis
CCD	[-]	Charge Coupled Device
SI	[-]	System of units
T	K	Termodynamická teplota
t	°C	Celsiova teplota
ϑ	F	Fahrenheitova teplota
V	m ³	Objem
β	K ⁻¹	Součinitel teplotní objemové roztažnosti
l	m	Délka, vzdálenost
α	K ⁻¹	Teplotní součinitel délkové roztažnosti
U	V	Napětí
α_{12}	$\mu\text{V}\cdot\text{K}^{-1}$	Seebeckův (termoelektrický) koeficient
σ	$\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$	Konduktivita
n	[-]	Počet elektronů v jednotce objemu
e	[-]	Elementární náboj
m	kg	Hmotnost
R	Ω	Elektrický odpor
NTC	[-]	Negative temperature coefficient
PTC	[-]	Positive temperature coefficient
PN	[-]	Příměsový polovodič typu P a typu N
λ	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	Tepelná vodivost
ε	[-]	Emisivita
M	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	Intenzita vyzařování
τ	[-]	Propustnost záření
ϕ	W	Zářivý tok
α	[-]	Pohltivost
ρ	[-]	Odrazivost
c	$\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$	Rychlost světla
k	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$	Boltzmannova konstanta
h	J·s	Plancova konstanta
c_1	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	První vyzařovací konstanta
c_2	m·K	Druhá vyzařovací konstanta
λ	m	Vlnová délka záření
σ	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$	Stefan-Boltzmannova konstanta
FPA	[-]	Focal Plane Array
VVN	[-]	Velmi vysoké napětí
VN	[-]	Vysoké napětí
TVK	[-]	Topení, ventilace, klimatizace
\bar{x}_g	[-]	Střední hodnota



DIPLOMOVÁ PRÁCE

s_g	[-]	Směrodatná odchylka
C_g a C_{gk}	[-]	Indexy způsobilosti
ϕ	%	Relativní vlhkost