

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY**

**FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING**

TERMOVIZNÍ DIAGNOSTIKA ELEKTRICKÝCH ZAŘÍZENÍ A PRVKŮ DISTRIBUČNÍCH SÍTÍ

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS**

**AUTOR PRÁCE
AUTHOR**

PETR KOSTKAN

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

Student: Petr Kostkan
Ročník: 3

ID: 125113
Akademický rok: 2012/2013

NÁZEV TÉMATU:

Termovizní diagnostika elektrických zařízení a prvků distribučních sítí

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Technická termodiagnostika.
2. Teorie bezkontaktního měření teplot, měřicí technika.
3. Prvky distribučních sítí vhodné pro termodiagnostiku.
4. Postupy a metody termodiagnostiky prvků distribučních sítí.
5. Možnosti využití výsledků pro stanovení jejich životnosti a spolehlivosti.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 11.2.2013

Termín odevzdání: 31.5.2013

Vedoucí projektu: doc. Ing. Jiří Drápela, Ph.D.

Konzultanti bakalářské práce:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících, autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Bibliografická citace práce:

KOSTKAN, P. Termovizní diagnostika elektrických zařízení a prvků distribuční sítě. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 58 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jiří Drápela, Ph.D.

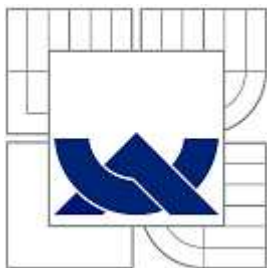
Prohlášení

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

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Jiřímu Drápelovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne: 23.května 2013

Podpis autora:



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**
ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

TERMOVIZNÍ DIAGNOSTIKA ELEKTRICKÝCH ZAŘÍZENÍ A PRVKŮ DISTRIBUČNÍCH SÍTÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

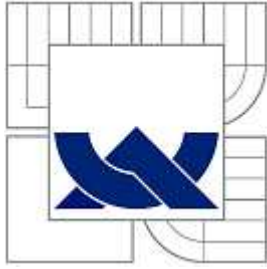
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Petr Kostkan

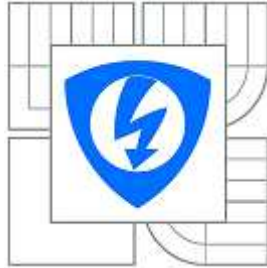
VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Drápela, Ph.D.

BRNO, 2013



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

INFRADIAGNOSTICS OF DISTRIBUTION SYSTEM APPARATUS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Petr Kostkan

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Drápela, Ph.D.

BRNO, 2013

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá využitím termografie v oblasti diagnostiky zařízení a prvků distribučních sítí elektrizační soustavy. Cílem práce je stanovení nejproblémovějších prvků využitím výsledků jednotlivých měření termodiagnostiky. Dosahuje toho zpracováním dat z termovizních měření a sestavením databáze závad. V následném kroku jsou analyzovány nejporuchovější prvky a zařízení a navržena opatření, která by zlepšila spolehlivost a bezporuchovost distribučních sítí elektrizační soustavy ČR.

KLÍČOVÁ SLOVA: emisivita; termokamera; měření; zářivý tok; protokol; data

ABSTRACT

The bachelor thesis deals with utilisation of thermovision in the field of diagnostics of equipment and components of the electricity distribution network. The aim of this work is to determine the most troublesome components by using results of individual thermovision measurements. It is achieved by processing data from thermovision measurements and subsequently establishing a database of defects. In the next stage, the most defective components and equipment are analysed and measures aimed to improve reliability and trouble-free operation of distribution networks in the Czech Republic are suggested.

KEY WORDS: emissivity; thermo camera; measurement; radiant flux; protocol; data

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	10
SEZNAM TABULEK	12
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	13
1 ÚVOD.....	15
2 TECHNICKÁ TERMODIAGNOSTIKA	15
2.1 POJMY TECHNICKÉ DIAGNOSTIKY	15
2.2 TERMOGRAFIE	16
2.2.1 INFRAČERVENÉ ZÁŘENÍ, IR ZÁŘENÍ.....	16
2.2.2 TERMOGRAFICKÝ SYSTÉM, TERMOVIZNÍ KAMERA	16
2.3 TEORIE TERMOGRAFIE.....	17
2.3.1 EMISIVITA	17
2.3.2 SPEKTRÁLNÍ EMISIVITA	17
2.3.3 ZÁŘ	19
2.3.4 POHLTIVOST.....	19
2.3.5 PROPUSTNOST	19
2.3.6 ODRAZNOST	20
2.3.7 ZÁKONY ZÁŘENÍ	21
2.4 POPIS REÁLNÝCH PODMÍNEK PŘI MĚŘENÍ.....	24
3 TERMOVIZNÍ SYSTÉMY	27
3.1 TERMOVIZNÍ SYSTÉMY S OPTICKO-MECHANICKÝM ROZKLADEM.....	27
3.2 TERMOVIZNÍ SYSTÉMY S MATICOVÝM DETEKTOREM	27
3.2.1 TEPELNÉ DETEKTORY	27
3.2.2 KVANTOVÉ DETEKTORY	29
3.3 TERMOGRAFICKÁ TECHNIKA FLIR SYSTEMS	30
4 PRVKY DISTRIBUČNÍCH SÍTÍ VHODNÉ PRO TERMODIAGNOSTIKU, POSTUPY A METODY TERMODIAGNOSTIKY	35
4.1 VŠEOBECNÉ INFORMACE O ZAŘÍZENÍ, KONTROLE A TECHNICE MĚŘENÍ	35
4.2 RUŠIVÉ FAKTORY TERMOGRAFICKÝCH MĚŘENÍ.....	38
4.3 TERMODIAGNOSTIKA PRVKŮ DISTRIBUČNÍ SOUSTAVY	39
4.3.1 ROZVODNY VVN, VN	39
4.3.2 VENKOVNÍ VEDENÍ VVN.....	39
4.3.3 VENKOVNÍ VEDENÍ VN	40
4.3.4 DISTRIBUČNÍ TRAFOSTANICE VN	40
4.3.5 ROZVODNÁ ZAŘÍZENÍ NN	40
4.4 VÝBĚR NAMĚŘENÝCH TERMOVIZNÍCH ZÁVAD	40
5 MOŽNOSTI VYUŽITÍ VÝSLEDKŮ TERMODIAGNOSTIKY PRO STANOVENÍ ŽIVOTNOSTI A SPOLEHLIVOSTI PRVKŮ DS.....	41
5.1 OBECNÉ INFORMACE O ZPRACOVÁNÍ DAT	41
5.2 DISTRIBUČNÍ TRANSFORMAČNÍ STANICE	42
5.3 VENKOVNÍ VEDENÍ VN	45

5.4 VENKOVNÍ VEDENÍ VVN	48
5.5 ROZBOR VÝSLEDKŮ	49
5.6 MOŽNOSTI VYUŽITÍ DATABÁZE	50
6 ZÁVĚR	50
POUŽITÁ LITERATURA	51
PŘÍLOHA	52

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 2-1</i> Hodnoty spektrální emisivity pro různé materiály [8]	18
<i>Obr. 2-2</i> Závislost emisivity materiálů	18
<i>Obr. 2-3</i> Atmosférická propustnost (teplota 25 °C, vzdálenost 30 m) [8]	20
<i>Obr. 2-4</i> Spektrální hustota intenzity vyzařování černého tělesa [10].....	22
<i>Obr. 2-5</i> Wienův posunovací zákon [11].....	23
<i>Obr. 2-6</i> Obecné termografické situace [1]	25
<i>Obr. 3-1</i> Mikrobolometr [5].....	28
<i>Obr. 3-2</i> Matice mikrobolometrů [5]	28
<i>Obr. 3-3</i> FPA mikrobolometrická matice řez [8].....	29
<i>Obr. 3-4</i> FPA mikrobolometrická matice detail [8].....	29
<i>Obr. 3-5</i> FPA matice s detektory QWIP [8].....	30
<i>Obr. 3-6</i> Rozdělení infračervené části elektromagnetického spektra (typy detektorů) [9]	30
<i>Obr. 3-7</i> Nechlazený mozaikový detektor FPA [12]	31
<i>Obr. 3-8</i> ThermaCam P65, 320x240 bodů, objektiv 12°x9°/1,2 m	33
<i>Obr. 3-9</i> ThermaCam P65, 320x240 bodů, objektiv 24°x18°/0,3 m	33
<i>Obr. 3-10</i> Flir P660, 640x480 bodů, objektiv 12°x9°/1,2 m	33
<i>Obr. 3-11</i> Flir P660, 640x480 bodů, objektiv 24°x18°/0,3 m	33
<i>Obr. 3-12</i> Srovnávací tabulka oblast vidění [7].....	33
<i>Obr. 3-13</i> Oblast vidění [7].....	34
<i>Obr. 3-14</i> Stanovení emisivity neznámého materiálu [7].....	35
<i>Obr. 4-1</i> Porovnání nalezené závady pro různá zatížení	36
<i>Obr. 4-2</i> Oteplení kotevních svorek.....	36
<i>Obr. 4-3</i> Odraz při termovizní kontrole	38
<i>Obr. 4-4</i> Oteplení pera kontaktní hlavice odpojovače	41
<i>Obr. 5-1</i> V-svorka pro V-třmen	49
<i>Obr. 0-1</i> Proudový spoj svorka AlFe lana	52
<i>Obr. 0-2</i> Proudový spoj mezi kabelovým okem a svorníkem transformátoru	52
<i>Obr. 0-3</i> Proudový spoj mezi kabelovým okem a svorníkem pojistkového spodku	53
<i>Obr. 0-4</i> Proudový spoj měřící transformátor proudu.....	53
<i>Obr. 0-5</i> Proudový spoj kabelové koncovky a pásového vodiče	53
<i>Obr. 0-6</i> Oteplení svorníku průchodky.....	54
<i>Obr. 0-7</i> Proudový spoj pásového vodiče a svorníkového oka transformátoru.....	54

<i>Obr. 0-8 Proudový spoj na odpojovači</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 0-9 Proudový spoj pojistkový spodek.....</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 0-10 Proudový spoj mezi kabelovým okem a připojovací svorkou odpínače</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 0-11 Oteplení žíly kabelu</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 0-12 Oteplení vinutí tlumivky.....</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 0-13 Proudový spoj měděného pásku a AlFe lana.....</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 0-14 Oteplení otočného čepu kontaktu vypínače</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 0-15 Proudový spoj pojistkový spodek.....</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 0-16 Oteplení hlavy kabelové koncovky.....</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 0-17 Proudový spoje svorky AlFe lana.....</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 0-18 Oteplení spojky AlFe lana</i>	<i>58</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 2-1 Napětí [1].....</i>	<i>26</i>
<i>Tab. 3-1 Rozdělení infračervené části spektra [9].....</i>	<i>30</i>
<i>Tab. 4-1 Stupeň závažnosti závady dle okamžitého.....</i>	<i>40</i>
<i>Tab. 5-1 Celkový počet změřených DTS vs. DTS, kde se vyskytuje alespoň jedna závada.....</i>	<i>42</i>
<i>Tab. 5-2 Počet prvků vn a nn strany (DTS).....</i>	<i>43</i>
<i>Tab. 5-3 Počet prvků pojistka nn (DTS).....</i>	<i>43</i>
<i>Tab. 5-4 Počet prvků jistič nn (DTS).....</i>	<i>43</i>
<i>Tab. 5-5 Počet prvků transformátor vn/nn (DTS).....</i>	<i>44</i>
<i>Tab. 5-6 Počet prvků přístrojový transformátor proudu TA vn a nn (DTS).....</i>	<i>44</i>
<i>Tab. 5-7 Počet prvků pojistka vn (DTS).....</i>	<i>44</i>
<i>Tab. 5-8 Počet prvků kabel vn (DTS).....</i>	<i>44</i>
<i>Tab. 5-9 Počet prvků odpínač a odpojovač vn (DTS).....</i>	<i>45</i>
<i>Tab. 5-10 Počet prvků ostatní (DTS).....</i>	<i>45</i>
<i>Tab. 5-11 Délka vedení vn.....</i>	<i>46</i>
<i>Tab. 5-12 Počet prvků 22 a 35 kV (Venkovní vedení vn).....</i>	<i>46</i>
<i>Tab. 5-13 Počet prvků (Venkovní vedení vn) rok 2009-2010.....</i>	<i>46</i>
<i>Tab. 5-14 Počet prvků (Venkovní vedení vn) rok 2011-2012.....</i>	<i>47</i>
<i>Tab. 5-15 Jednotlivé typy odpínačů a odpojovačů (Venkovní vedení vn).....</i>	<i>47</i>
<i>Tab. 5-16 Délka vedení vvn.....</i>	<i>48</i>
<i>Tab. 5-17 Počet prvků (Venkovní vedení vvn).....</i>	<i>48</i>

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

značka	veličina
L_{rel}	relativní vyjádření tj. poměr detekovaných popřípadě lokalizovaných poruch
L	počet detekovaných popřípadě lokalizovaných poruch na objektu
L_{max}	celkový počet možných na objektu definovaných poruch
ε	emisivita
ε_{λ}	spektrální emisivita
λ	vlnová délka záření
T	termodynamická teplota
M	intenzita vyzařování
M_0	intenzita vyzařování černého tělesa
M_{λ}	spektrální hustota intenzity vyzařování
$M_{0\lambda}$	spektrální hustota intenzity vyzařování černého tělesa
I	intenzita záření
L	zář
L_{λ}	spektrální hustota záře
E	intenzita ozáření
ϕ	zářivý tok zářivý výkon
S	plocha
Ω	prostorový úhel
α	pohltivost v úhrnném spektru
α_{λ}	spektrální pohltivost pro danou vlnovou délku
ϕ_a	pohlčený zářivý tok
ϕ_d	dopadající zářivý tok
$\phi_{\lambda a}$	spektrální pohlčený zářivý tok
$\phi_{\lambda d}$	spektrální dopadající zářivý tok
τ	propustnost v úhrnném spektru vlnových délek

značka	veličina
τ_{λ}	spektrální propustnost pro danou vlnovou délku
ϕ_t	prostupující zářivý tok
ϕ_d	dopadající zářivý tok
$\phi_{\lambda t}$	spektrální prostupující zářivý tok
vn, vvn	vysoké napětí, velmi vysoké napětí
$\phi_{\lambda d}$	spektrální dopadající zářivý tok
ρ	odraznost v úhrnném spektru vlnových délek
ρ_{λ}	spektrální odraznost pro danou vlnovou délku
ϕ_r	odražený zářivý tok
$\phi_{\lambda r}$	spektrální odražený zářivý tok
$L_{0\lambda}$	spektrální hustota záře černého tělesa
h	Planckova konstanta
c	rychlost světla
k	Boltzmannova konstanta
c_1	první vyzařovací konstanta
c_2	druhá vyzařovací konstanta
I_n	intenzita záření v kolmém směru
I_{α}	intenzita záření odchýleného o úhel α
L_{α}	zář odchýlená o úhel α
W	zářivý výkon
U	elektrické napětí
FPA	lineární (řádková nebo sloupcová) nebo dvourozměrná matice prvků
QWIP	typ detektoru
IFOV	skutečné okamžité zorné pole
HFOV	horizontální oblast zorného pole
IFOV	vertikální oblast zorného pole
PPOM	nejmenší měřitelný objekt

1 ÚVOD

Na zařízeních a prvcích distribučních sítí dochází k poruchám např. vlivem nepřiměřeného zatížení, přechodového odporu, deformacím funkčních částí nebo opotřebením zařízení. Termovizní diagnostika pomáhá odhalit tyto vady ve včasném stádiu dříve, než způsobí rozsáhlejší poruchy. Tím snižuje poruchovost a dobu přerušení dodávky elektrické energie. Velkou výhodou je provádění kontroly pod napětím za provozu, což má značný ekonomický přínos, neboť odběratelé nejsou dodávkami elektrické energie nijak omezeni. Včasným odhalením poruchy, klesají náklady na opravy v budoucnu.

Termovizní diagnostika tedy umožňuje bezdotykové měření rozložení teploty na povrchu objektu. V elektroenergetice nejde v takové míře o určení absolutní teploty, jako spíše o změření oteplení proti srovnávacímu prvku.

Cílem práce je zabývat se termodiagnostikou distribučních sítí se zaměřením na správné postupy měření a vyhodnocení stavu jednotlivých prvků. Dalším krokem bude použití těchto výsledků pro navržení opatření, která by zlepšila spolehlivost a bezporuchovost distribučních sítí elektrizační soustavy.

2 TECHNICKÁ TERMODIAGNOSTIKA

Technická diagnostika je diagnostika zabývající se metodami a prostředky zjišťování technického stavu objektu. Rozumí se jí většinou diagnostika bezdemontážní a nedestruktivní.

2.1 Pojmy technické diagnostiky

Diagnóza je vyhodnocování provozuschopnosti objektu za daných podmínek, neboli rozbor okamžitého stavu objektu. Úkolem diagnózy je:

- a) detekce poruchy – zjišťování úplné nebo částečné poruchy objektu.
- b) lokalizace poruchy – určení místa poruchy v objektu.

Diagnostické pokrytí (hloubka detekce) popřípadě **diagnostické rozlišení** (hloubka lokalizace) určuje počet detekovaných, popřípadě lokalizovaných poruch daným diagnostickým algoritmem.

$$L_{rel} = \frac{L}{L_{max}} \cdot 100 [\%]$$

Kde

- L_{rel} relativní vyjádření tj. poměr detekovaných popřípadě lokalizovaných poruch
 L počet detekovaných popřípadě lokalizovaných poruch na objektu
 L_{max} celkový počet možných, na objektu definovaných poruch

Prognóza je odhad vývoje technického stavu objektu do budoucnosti. Pomocí statistických vyhodnocení je předpovídána pravděpodobnost bezporuchového stavu v nadcházejícím období, nebo podle přicházejících poruch určení termínů dílčích a generálních oprav.

Geneze je vyhodnocení příčin poruchy nebo zhoršení technického stavu objektu.

Termodiagnostika je součástí technické diagnostiky, kterou lze z hlediska komplexního řešení rozdělit na odhalení existence vznikající poruchy – detekci, stanovení vadné součásti – lokalizaci a určení prognózy životnosti – predikci.

2.2 Termografie

Termografie je bezkontaktní měření (mapování) teplotních polí na povrchu snímaných těles na základě vysílaného elektromagnetického záření tělesem, to je reprezentováno energií a hustotou fotonů emitovaných z povrchu snímaného tělesa. Termografie využívá měření infračervené části (IČ) spektra.

2.2.1 Infračervené záření, IR záření

Vlnová délka infračerveného záření je delší než vlnová délka viditelného záření, ale kratší než mikrovlnného záření. Ve spektru záření je to oblast vlnových délek od 760 nm do 1 mm. Tuto oblast dále dělíme na jednotlivá pásma, obvykle na tři: IR-A (760 až 1400 nm), IR-B (1400 – 3000 nm) a IR-C (3 μ m až 1 mm). Infračervené záření je často považováno za tepelné záření. Povrchy těles však zahřívá absorpce libovolného elektromagnetického záření. Pravdou ale je, že tělesa s teplotou nižší než 4000 K vysílají maximum svého záření v infračervené části spektra, viz. Wienův posunovací zákon. IR záření snadno prostupuje vzduchem, mlhou, tenkým kovem, neprostupuje sklem. Zdrojem záření jsou také vesmírné objekty.

2.2.2 Termografický systém, termovizní kamera

Termografický systém přemění teplotní pole na povrchu tělesa v infračerveném spektru na obraz viditelný lidským okem. Propracovanější termovizní kamery umějí i kvantifikaci infračerveného záření vyzařovaného snímanými objekty. Termografický systém povrchovou teplotu neměří, ale vypočítává ji na základě změřeného infračerveného záření a ze zadaných okrajových podmínek, mezi které patří teplota atmosféry, vlhkost atmosféry, zdánlivě se odrážející teplota, emisivita snímaného objektu a jeho vzdálenost.

Nevýhody bezdotykového měření teploty:

- neznalost správné hodnoty emisivity povrchu měřeného objektu,
- neznalost správné hodnoty prostupnosti prostředí mezi čidlem a měřeným objektem,
- neznalost správné hodnoty vzdálenosti mezi termografickým systémem a měřeným objektem,
- neznalost správné hodnoty relativní vlhkosti a teploty vzduchu,
- nepřesná korekce parazitního odraženého záření z okolního prostředí na měřený objekt.

Výhody bezdotykového měření teploty:

- zanedbatelný vliv měřicí techniky na měřený objekt,
- možnost měření velkého množství objektů najednou,
- možnost měření teploty na rotujících nebo pohybujiících se objektech,
- možnost měření těžko dostupných nebo nedostupných objektů pro kontaktní měření,
- možnost měření velmi rychlých teplotních změn,
- možnost změřit a dále zaznamenat teploty celých povrchů těles.

2.3 Teorie termografie

2.3.1 Emisivita

Emisivita ε - vlastnost materiálu. Je poměr vyzařování tepelného zářiče k vyzařování černého tělesa při téže teplotě. Emisivita materiálu závisí na více faktorech. Patří sem teplota zdroje, vlnová délka, struktura povrchu zdroje, materiálu zdroje, úhlu odklonu od normály měřené plochy. Emisivita je číslo bezrozměrné nabývající hodnoty od 0 do 1, kdy 0 je rovna absolutně lesklému tělesu a hodnota 1 je rovna absolutně černému tělesu.[8]

Máme tři typy tepelných radiačních zdrojů:

- *Absolutně černé těleso* na všech vlnových délkách $\varepsilon(\lambda) = 1$
- *Šedé těleso* $\varepsilon(\lambda) < 1$, konstantní na všech vlnových délkách
- *Reálné těleso* $\varepsilon(\lambda)$ se mění v závislosti na λ

$$\varepsilon = \frac{M}{M_0} = \frac{\int_0^{\infty} \varepsilon(\lambda, T) M_{0\lambda} d\lambda}{\int_0^{\infty} M_{0\lambda} d\lambda} \quad (2.1)$$

Kde

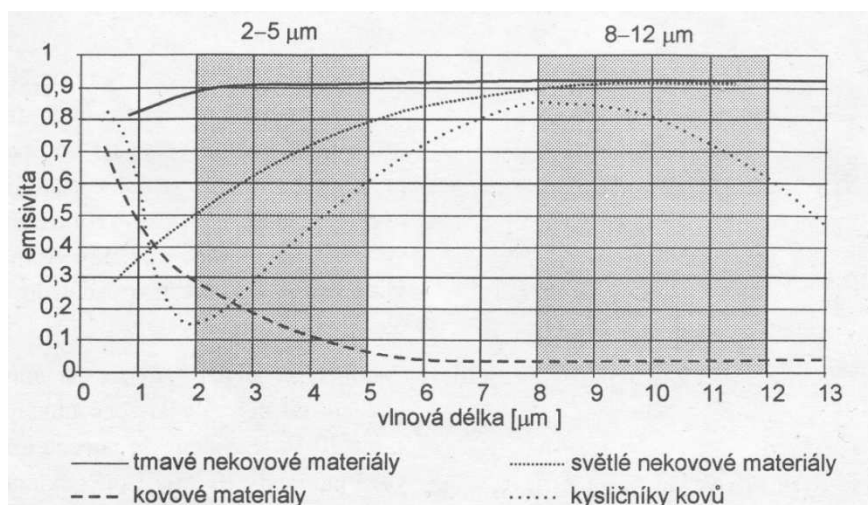
M_0	intenzita vyzařování černého tělesa
$M_{0\lambda}$	spektrální hustota intenzity vyzařování černého tělesa
$\varepsilon(\lambda, T)$	emisivita je funkcí vlnové délky a teploty

2.3.2 Spektrální emisivita

Vlastností emisivity je její spektrální selektivnost. Spektrální emisivita ε_λ je poměr spektrální hustoty intenzity vyzařování tepelného zářiče ke spektrální hustotě vyzařování černého tělesa při téže teplotě.

$$\varepsilon_\lambda = \frac{M_\lambda}{M_{0\lambda}} \quad (2.2)$$

Při termovizním měření nelze považovat měřené objekty za šedá tělesa, jejichž emisivita je nezávislá na vlnové délce *Obr. 2-1*.

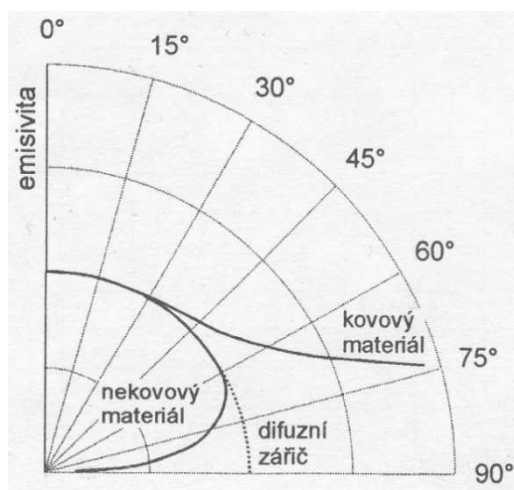


Obr. 2-1 Hodnoty spektrální emisivity pro různé materiály[8]

Závislost emisivity na úhlu odklonu od normály měřené plochy znázorňuje *Obr. 2-2*. Obecně kovové materiály lze měřit při odklonu do 30°, nekovové do 60°.

2.3.2.1 Směrová emisivita

Mezi další vlastnosti emisivity patří její směrová selektivnost. Směrová spektrální emisivita ε je poměr hustoty (spektrální hustoty) záře tepelného zářiče ve směrech φ (směrový úhel) a ϑ (stranový úhel) k hustotě (spektrální hustotě) záře černého tělesa při téže teplotě.



Obr. 2-2 Závislost emisivity materiálů a ideálního difuzního zářiče na úhlu od normály měřené plochy[8]

2.3.3 Zář

Zář L je zářivý tok ϕ v daném bodě povrchu a v daném směru.

$$L = \frac{d^2\phi}{d\Omega \cdot dS \cdot \cos\varphi} = \frac{dI}{dS \cdot \cos\varphi} \quad (2.3)$$

Pro monochromatické záření

$$L_\lambda = \frac{dL}{d\lambda} = \frac{d^3\phi}{d\Omega \cdot dS \cdot \cos\varphi \cdot d\lambda} \quad (2.4)$$

Kde

- ϕ zářivý tok
- dS zářivý tok dopadající na elementární plochu v daném bodě
- $d\Omega$ zářivý tok šířící se do elementárního prostorového úhlu
- I zářivost

2.3.4 Pohltivost

Pohltivost (absorbance) α záření je poměr: část z 1 zářivého toku ϕ dopadajícího na povrch objektu k zářivému toku ϕ , který je objektem pohlcen (absorbován).

$$\alpha_\lambda = \frac{\phi_{\lambda a}}{\phi_{\lambda d}} ; \alpha = \frac{\phi_a}{\phi_d} = \frac{\int_0^\infty \phi_{\lambda a} \cdot \alpha_\lambda \cdot d\lambda}{\int_0^\infty \phi_{\lambda d} \cdot d\lambda} \quad (2.5)$$

Kde

- α_λ spektrální pohltivost pro danou vlnovou délku
- α pohltivost v úhrnném spektru
- ϕ_a pohlcený zářivý tok
- ϕ_d dopadající zářivý tok

2.3.5 Propustnost

Propustnost (transmittance) τ záření je poměr zářivého toku ϕ prošlého objektem k celkovému zářivému toku ϕ dopadajícímu na objekt. Součet propustnosti τ , pohltivosti α a odrazivosti ρ je roven jedné. U absolutně černého tělesa je $\tau = 0$, $\rho = 0$.

$$\tau_{\lambda} = \frac{\phi_{\lambda t}}{\phi_{\lambda d}} ; \tau = \frac{\phi_t}{\phi_d} = \frac{\int_0^{\infty} \phi_{\lambda t} \cdot \tau_{\lambda} \cdot d\lambda}{\int_0^{\infty} \phi_{\lambda d} \cdot d\lambda} \quad (2.6)$$

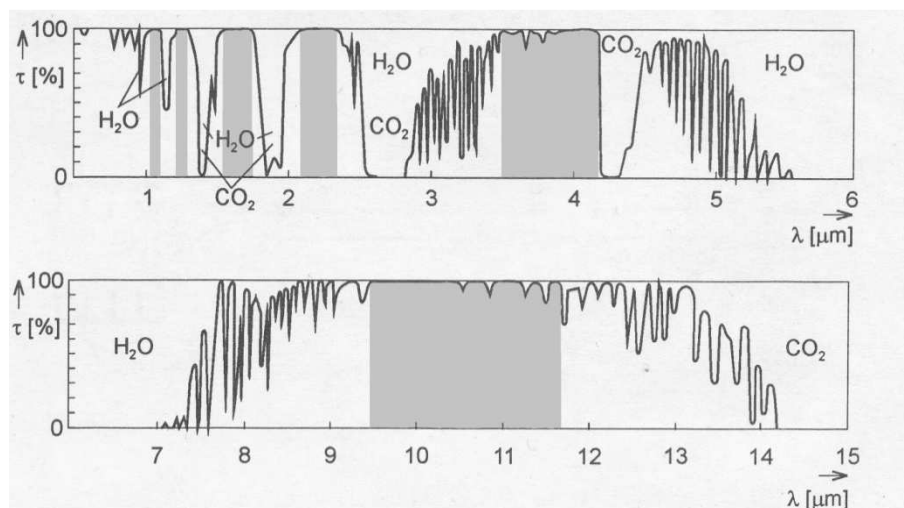
Kde

- τ_{λ} spektrální propustnost pro danou vlnovou délku
- τ propustnost v úhrnném spektru vlnových délek (také vážený průměr τ_{λ})
- ϕ_t prostupující zářivý tok
- ϕ_d dopadající zářivý tok

Při termovizním měření dochází k absorpci tepelného toku mezi objektem a kamerou. Absorpce je dána prostupností prostředí, která závisí na:

- pásma vlnové délky
- vzdálenosti
- relativní vlhkosti prostředí
- teplotě objektu

Volba pásma (tj. krátkovlnné 2 - 5 μm nebo dlouhovlnné 8 - 12 μm) při termovizním měření je dána především prostupností atmosféry. Při vysoké teplotě objektu od 1000 °C a vysoké hodnotě relativní vlhkosti je vhodné zvolit krátkovlnné pásmo.[8]



Obr. 2-3 Atmosférická propustnost (teplota 25 °C, vzdálenost 30 m)[8]

2.3.6 Odraznost

Odraznost (reflektance) ρ záření je poměr odraženého zářivého toku ϕ na objektu k celkovému dopadajícímu zářivému toku ϕ .

$$\rho_\lambda = \frac{\phi_{\lambda r}}{\phi_{\lambda d}} ; \rho = \frac{\phi_r}{\phi_d} = \frac{\int_0^\infty \phi_{\lambda r} \cdot \rho_\lambda \cdot d\lambda}{\int_0^\infty \phi_{\lambda d} \cdot d\lambda} \quad (2.7)$$

Kde

- ρ_λ spektrální odraznost pro danou vlnovou délku
- ρ odraznost v úhrnném spektru vlnových délek (také vážený průměr ρ_λ)
- ϕ_r odražený zářivý tok
- ϕ_d dopadající zářivý tok

2.3.7 Zákony záření

Tepelné záření je výsledkem chaotického pohybu elektronů. Energie tepelného záření pochází z transformace volných stupňů, nebo stupňů volnosti atomů a volných elektronů látky. Tzn., pakliže ne příliš pevná krystalická struktura dovoluje jednotlivým atomům této vazby kmitání, potom je tato látka schopna vytvářet tepelné záření.

Spektrum tepelného záření je spojitě – látka vyzařuje elektromagnetické záření na všech vlnových délkách. Na každé vlnové délce potom vyzařuje s určitou pravděpodobností, která vychází z jejich chaotického pohybu. Tepelné záření je generováno tepelnou energií (teplotou), kterou látka má.

2.3.7.1 Planckův zákon

Spektrum hustoty elektromagnetického záření v závislosti na teplotě a vlnové délce je popsáno Planckovým zákonem.

$$M_{0\lambda} = 2 \cdot \pi \cdot h \cdot c^2 \cdot \lambda^{-5} \cdot \left(e^{\frac{h \cdot c}{\lambda \cdot k \cdot T}} - 1 \right)^{-1} = c_1 \cdot \lambda^{-5} \cdot \left(e^{\frac{c_2}{\lambda \cdot T}} - 1 \right)^{-1} \quad (2.8)$$

Resp. pro kosinový zářič

$$L_{0\lambda} = \frac{1}{\Omega_0 \cdot \pi} \cdot 2 \cdot \pi \cdot h \cdot c^2 \cdot \lambda^{-5} \cdot \left(e^{\frac{h \cdot c}{\lambda \cdot k \cdot T}} - 1 \right)^{-1} = \frac{1}{\Omega_0 \cdot \pi} \cdot c_1 \cdot \lambda^{-5} \cdot \left(e^{\frac{c_2}{\lambda \cdot T}} - 1 \right)^{-1} \quad (2.9)$$

Kde

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

$L_{0\lambda}$ spektrální hustota záře černého tělesa

c rychlost světla ($c = 299792458 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)

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

h Planckova konstanta ($h = 6,6260755 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$)

c_1 první vyzařovací konstanta

$$c_1 = 2 \cdot \pi \cdot h \cdot c^2 = (3,7417749 \pm 0,0000022) \cdot 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

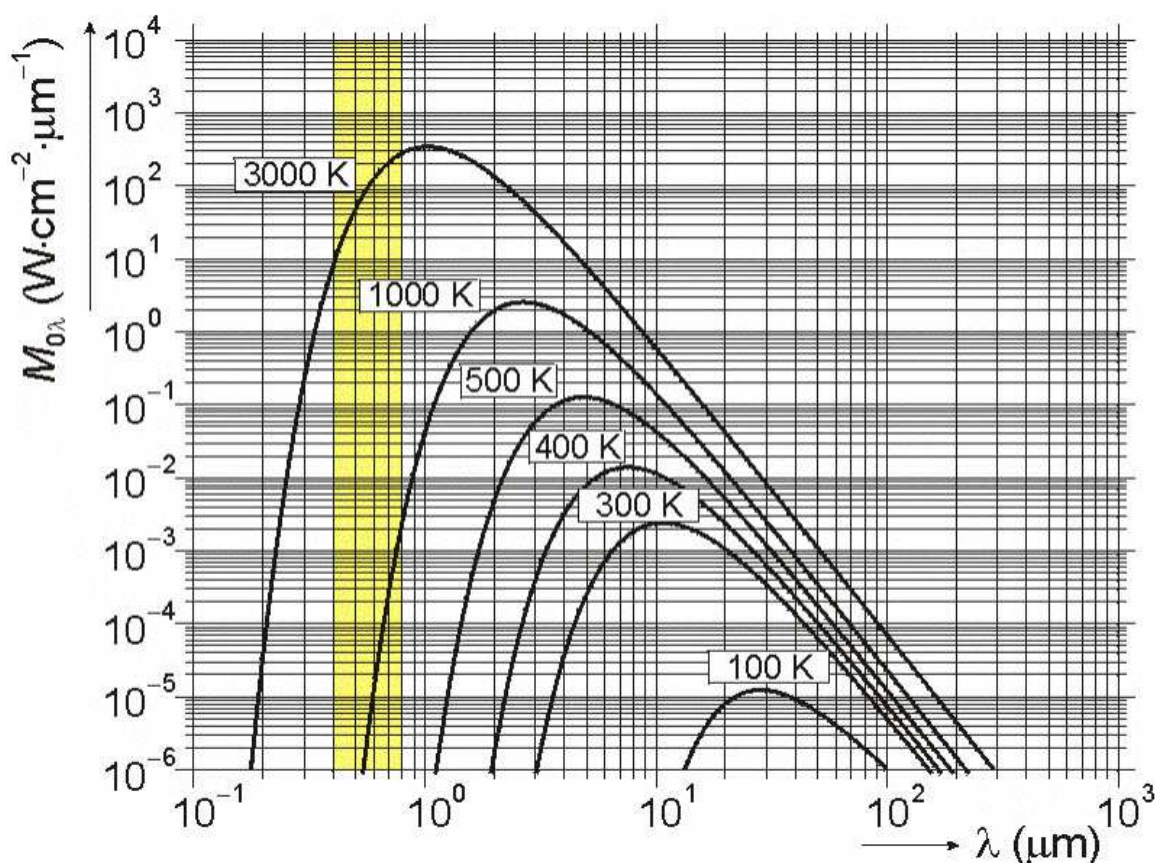
c_2 druhá vyzařovací konstanta

$$c_2 = h \cdot \frac{c}{k} = (1,438769 \pm 0,000012) \cdot 10^{-2} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

λ vlnová délka záření (m)

T termodynamická teplota černého tělesa (K)

$\Omega_0 = 1 \text{ sr}$



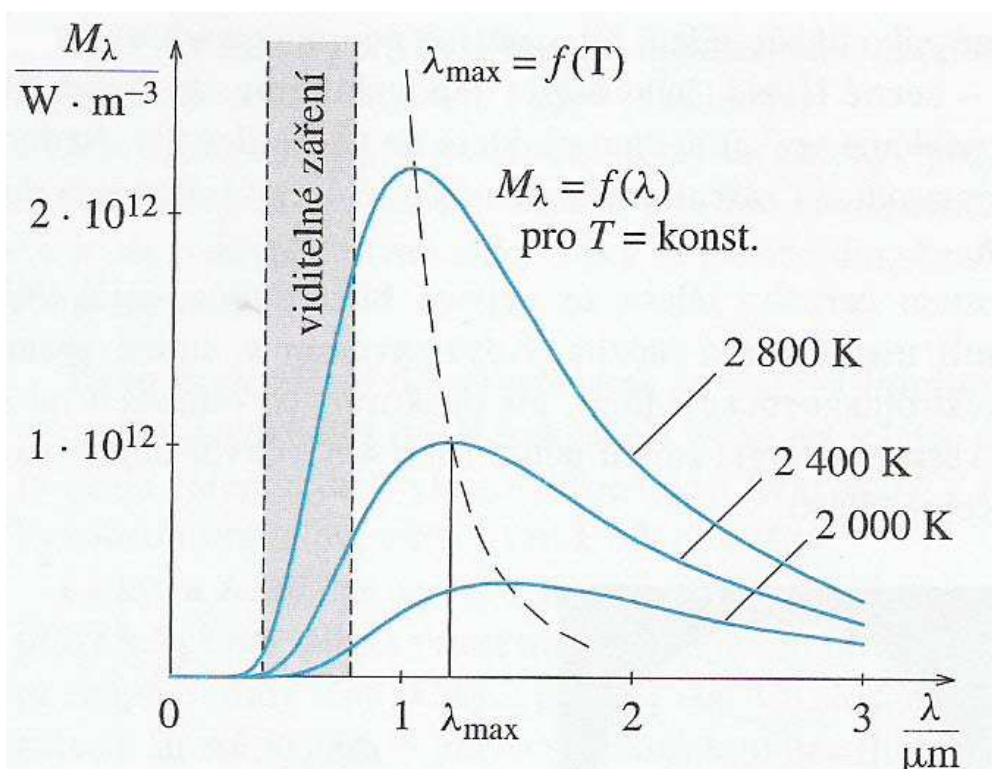
Obr. 2-4 Spektrální hustota intenzity vyzařování černého tělesa [10]

2.3.7.2 Wienův zákon

O posunu maxima spektra vyzářené energie absolutně černého tělesa v závislosti na jeho teplotě, vypovídá Wienův zákon. Je použitelný v krátkovlnné oblasti spektra, podle kterého se spektrální hustota záře $L_{e\lambda}$ v závislosti na vlnové délce λ a na termodynamické teplotě T počítá z rovnice:

$$M_{o\lambda} = c_1 \cdot \lambda^{-5} \cdot e^{-\frac{c_2}{\lambda T}} \quad (2.10)$$

$$L_{o\lambda} = \frac{c_1}{\pi} \cdot \lambda^{-5} \cdot e^{-\frac{c_2}{\lambda T}} \quad (2.11)$$



Obr. 2-5 Wienův posunovací zákon [11]

2.3.7.3 Stefan – Boltzmannův zákon

Celkovou vyzařovanou energii teplotního zářiče při dané emisivitě a teplotě vyjadřuje Stefan - Boltzmannův zákon – zákon udává intenzitu vyzařování pro danou teplotu v celém rozsahu vlnových délek.

$$M_0 = \int_0^{\infty} M_{o\lambda} d\lambda = \sigma \cdot T^4 \quad (2.12)$$

Kde

$$\sigma = (5,67051 \pm 0,00019) \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$$

$$\Omega_0 = 1 \text{ sr}$$

2.3.7.4 Lambertův zákon

Lambertův zákon – vyjádření směrové závislosti zářivosti zdrojů záření. Je-li I_n intenzita záření plochy S v kolmém směru, potom intenzita záření (v tepelném spektru sálání) ve směru odchýleném o úhel α od normály k této ploše je $I_\alpha = I_n \cdot \cos \alpha$. Povrchy vyzařující podle tohoto zákona se nazývají též kosinové zářiče.

$$L_\varphi = \frac{I_n}{\Delta S} = \frac{I_\varphi}{\Delta S \cdot \cos \varphi} = \frac{I_\varphi}{\Delta S_n} \quad (2.13)$$

2.3.7.5 Kirchhoffův zákon

Kirchhoffův zákon – uvádí závislost termodynamické teploty tělesa na poměru intenzity vyzařování M tepelného zářiče k pohltivosti α a nezávisí na jeho chemickém složení, úpravě a oxidaci.

Pro zář

$$\frac{M}{\alpha} = f(T) \quad \text{resp.} \quad \frac{L}{\alpha} = f(T) \quad (2.14)$$

Pro černé těleso

$$M = f(T) \quad \text{resp.} \quad L = f(T) \quad (2.15)$$

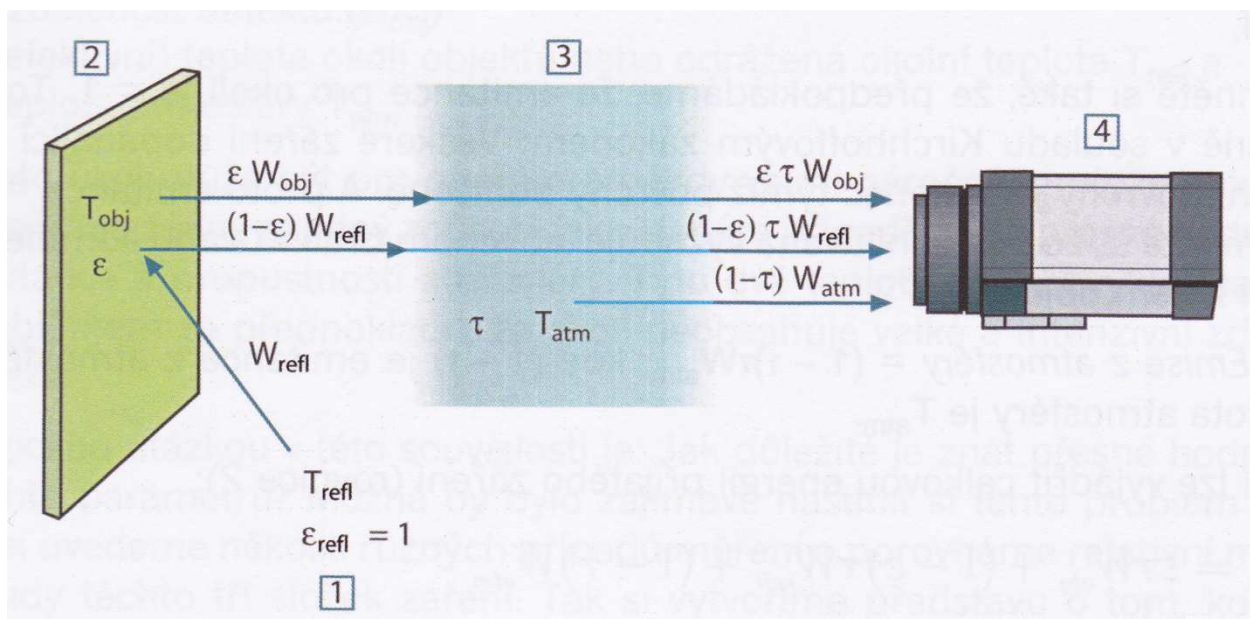
Intenzita vyzařování a zář černého tělesa závisí jen na termodynamické teplotě. Kirchhoffův zákon neplatí pro optické jevy, kde dochází k energetickému posuvu spektra (např. luminiscence) a jestliže není dosaženo termodynamické rovnováhy.

2.4 Popis reálných podmínek při měření

Při měření objektu přijímá kamera záření nejen z objektu, ale i teplotu okolí odraženou od povrchu objektu. Obě tato záření jsou zeslabována atmosférou mezi kamerou a měřeným objektem. Je nutno brát v úvahu i záření atmosféry. Na *Obr. 2-6* byl zanedbán vliv slunečního světla rozptýleného v atmosféře a bludného záření ze zdrojů intenzivního záření mimo zorné pole. Je těžké tyto vlivy kvantifikovat a ve velké většině případů jsou malé, takže je můžeme zanedbat.

Z *Obr. 2-6* je zřejmé jakým způsobem nám zadání parametrů, vzdálenost, zdánlivě odrážející teplota, teplota atmosféry, vlhkost atmosféry ovlivní výpočet teploty. Parametry kvantifikují jednotlivé toky dopadající na detektor termovizního systému. Tyto toky nám přispívají k sálavému toku tělesa nebo jej utlumují.

V reálných podmínkách se relativně malé chyby (do 15%) dopouštíme při chybně zadané atmosférické teplotě, vlhkosti a vzdálenosti. Naopak velké chyby při zadání emisivity a zdánlivě odrážející teploty.



Obr. 2-6 Obecné termografické situace [1]

1 – okolí, 2 – objekt, 3 – atmosféra, 4 – kamera

Předpokládejme, že přijatý výkon záření W z černého zdroje s teplotou T_{zdroj} , je vůči vstupní energii proporcionální (lineární energetická kamera). Pak můžeme napsat (rovnice 1):

$$U_{source} = C \cdot W \cdot (T_{source}) \quad (2.16)$$

nebo ve zjednodušeném zápisu

$$U_{source} = C \cdot W_{source} \quad (2.17)$$

Kde

C konstanta

Jestliže je zdrojem šedé těleso s emitancí ε , přijaté záření bude v důsledku toho $\varepsilon \cdot W_{zdroj}$.

Nyní můžeme vyjádřit tři složky přijatého záření:

$$1 - \text{Emise z objektu} = \varepsilon \cdot \tau \cdot W_{obj}$$

Kde

ε emitance z objektu
 τ propustnost atmosféry
 T_{obj} teplota objektu

$$2 - \text{Odražené záření z okolních zdrojů} = (1 - \varepsilon) \cdot \tau \cdot W_{refl}$$

Kde

$(1 - \varepsilon)$ odrazivost objektu

T_{refl} teplota okolních zdrojů

Předpokládáme, že teplota T_{refl} je stejná pro všechny emitující povrchy v polokouli viděné z určitého bodu na povrchu objektu. Skutečnou situaci tím zjednodušujeme, abychom mohli sestavit rovnici a teplotě T_{refl} přiřadili alespoň teoreticky hodnotu představující efektivní teplotu komplexního okolí. Předpokládáme, že emitance pro okolí je rovna 1. Veškeré záření dopadající na okolní povrchy je nakonec týmiž povrchy pohlceno. To je v souladu s Kirchhoffovým zákonem.

$$3 - \text{Emise z atmosféry} = (1 - \tau) \cdot \tau \cdot W_{atm}$$

Kde

T_{atm} teplota atmosféry

$(1 - \tau)$ emitance z atmosféry

Nyní lze vyjádřit celkovou energii přijatého záření (rovnice 2):

$$W_{tot} = \varepsilon \cdot \tau \cdot W_{obj} + (1 - \varepsilon) \cdot \tau \cdot W_{refl} + (1 - \tau) \cdot W_{atm} \quad (2.18)$$

Každou složku vynásobíme konstantou C z rovnice 1 a podle stejné rovnice nahradíme $C \cdot W$ odpovídajícímu U a získáme (rovnici 3):

$$U_{tot} = \varepsilon \cdot \tau \cdot U_{obj} + (1 - \varepsilon) \cdot \tau \cdot U_{refl} + (1 - \tau) \cdot U_{atm} \quad (2.19)$$

Vyřeším rovnici 3 pro U_{obj} (rovnice 4)

$$U_{obj} = \frac{1}{\varepsilon \cdot \tau} \cdot U_{tot} - \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} \cdot U_{refl} - \frac{1 - \tau}{\varepsilon \cdot \tau} \cdot U_{atm} \quad (2.20)$$

U_{obj}	Vypočítané výstupní napětí kamery pro teplotu T_{obj} černého tělesa, tj. napětí, které lze přímo převádět na skutečnou teplotu požadovaného objektu.
U_{tot}	Naměřené výstupní napětí na kameře pro skutečný případ.
U_{refl}	Teoretické výstupní napětí kamery pro teplotu T_{refl} černého tělesa podle kalibrace.
U_{atm}	Teoretické výstupní napětí kamery pro teplotu T_{atm} černého tělesa podle kalibrace.

Tab. 2-1 Napětí [1]

Osoba provádějící výpočet musí dodat hodnoty parametrů:

- emitance objektu ε
- relativní vlhkost
- teplotu atmosféry T_{atm}
- vzdálenost objektu
- (efektivní) teplotu okolí objektu nebo odráženou okolní teplotu T_{refl}

3 TERMORIZNÍ SYSTÉMY

Systémy pro snímání teploty. Nebavíme se pouze o jednom bodu, potřebujeme obraz, více bodů a znát rozložení teploty.

Rozdělení termovizních systémů, snímání teplotních polí:

- termovizní systémy s opticko-mechanickým rozkladem
- termovizní systémy s maticovým detektorem

3.1 Termovizní systémy s opticko-mechanickým rozkladem

Optický systém snímá jeden určitý bod, přenesený na jeden čip, zobrazený v okamžitém zorném poli přístroje. Postupně tak zobrazuje všechny body měřeného objektu. Rozklad se provádí pomocí pohyblivých optických částí (hranolů, zrcadel).[8]

3.2 Termovizní systémy s maticovým detektorem

Měření in-time (v jednom čase). Podle interakce záření s látkou detektoru je lze rozdělit do dvou základních skupin:

- tepelné detektory (mikrobolometry) - integrací absorbované zářivé energie dochází k oteplení odporové vrstvy a tím i ke změně odporu. Jsou neselektivními, patří mezi ně např. termoelektrický, bolometrický, pyroelektrický detektor.[2]
- kvantové detektory (fotodetektory) - reagují na absorbované fotony excitací volných nosičů náboje (fotoelektrický jev). Patří mezi selektivní typy, jako např. fotoodpor, fotodioda.[2]

3.2.1 Tepelné detektory

Výstupní signál tepelných detektorů je v principu (téměř) nezávislý na vlnové délce dopadajícího záření. Absolutní neselektivnosti nelze dosáhnout, protože povrch detektoru má pro různé vlnové délky rozdílnou absorpci. Časová konstanta tepelného detektoru je řádově několikrát větší (ms) než konstanta fotodetektoru (μs). Nemusí být chlazeny. Jsou radiometrické. Nejvíce používané jsou VOx (oxid vanadu) a odporový amorfní křemík (nitrid křemíku).[2]

Teplotu detektoru nelze měřit přímo, používané typy převodníků:

- *termoelektrické detektory* – využívají změnu termoelektrického napětí dvojice vodičů vlivem rozdílu teplot mezi měřícím (ozářeným) spojem a srovnávacím (zatměným) spojem,[2]
- *bolometry* – využívají změnu elektrického odporu elementu detektoru na základě změny jeho teploty,[2]

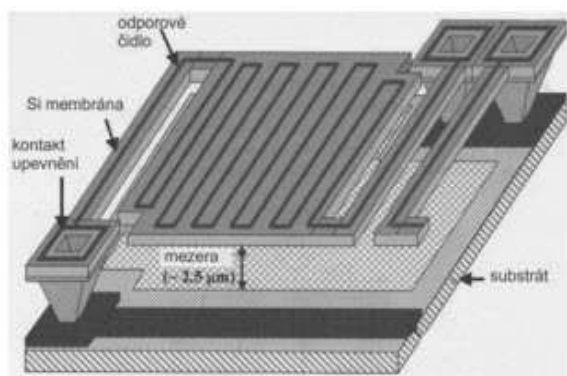
- *pyroelektrické detektory* – využívají teplotní změnu elektrostatické polarizace.[2]

3.2.1.1 Termoelektrické detektory

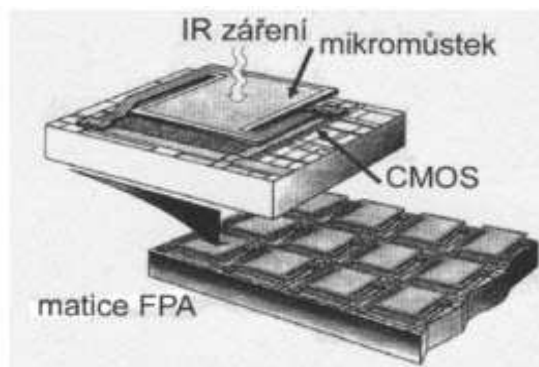
Jsou sériově řazené termoelektrické články, jejich konstrukce jsou kovové pásky tloušťky cca 0,03 mm, pásky zhotovené technologií tenkých vrstev nebo Si technologií.[4]

3.2.1.2 Bolometry

Používají se tenkovrstvé mikroelektronické technologie na bázi odporových materiálů z kysličníků MgO, MnO, NiO, TiO₂, chalkogenidové sklo aj. Miniaturní bolometry, které jsou uspořádány do matice detektorů FPA se nazývají mikrobolometry. Používají se v termovizních kamerách. Hustota pixelů mikrobolometrických detektorů je od matice 4 x 4 až po dnešních 640 x 480 pixelů. Mikrobolometrický senzor na *Obr. 3-1* má odporový meandr z kysličníku titanu s teplotním součinitelem odporu $2,7 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$. Membrána má rozměr 49,2 x 43,6 mm. Uspořádání mikrobolometrických senzorů 320 x 240 elementů do plochy je na *Obr. 3-2*.

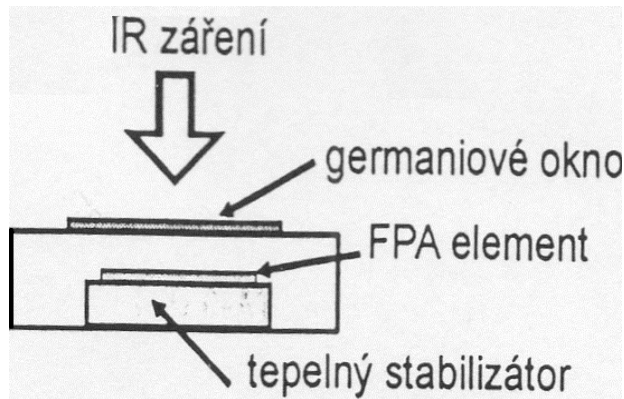


Obr. 3-1 Mikrobolometr [5]

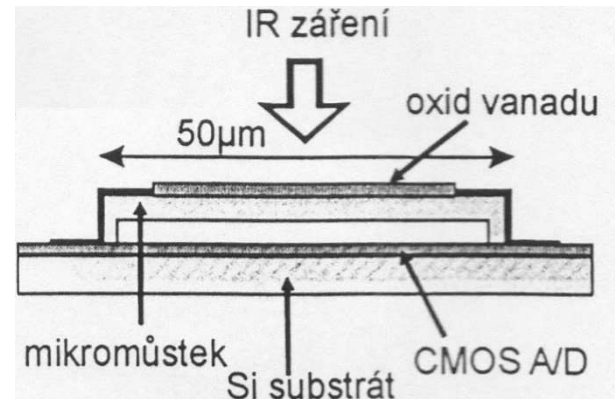


Obr. 3-2 Matice mikrobolometrů [5]

Uspořádání FPA mikrobolometrické matice je na *Obr. 3-3 a Obr. 3-4*. Odporovou vrstvu tvoří oxid vanadu. Germaniový filtr vymezuje vlnové délky na nižší než $7,5 \mu\text{m}$. Detektor je vhodný pro dlouhovlnnou oblast. Výhoda je, že detektivita není závislá na vlnové délce, nevýhoda časová konstanta (kolem 12 ms).[8]



Obr. 3-3 FPA mikrobolometrická matice řez [8]



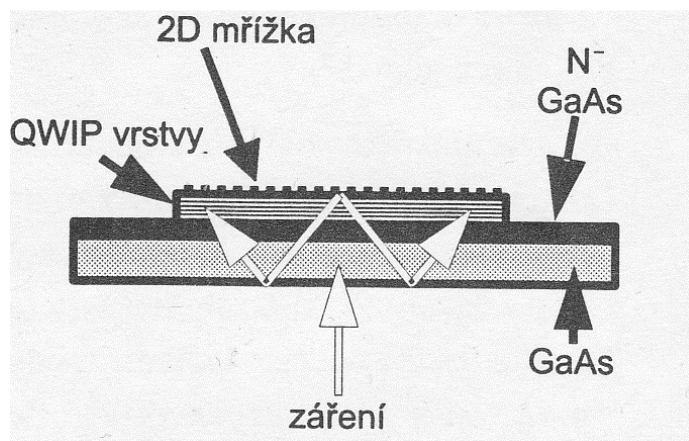
Obr. 3-4 FPA mikrobolometrická matice detail [8]

3.2.1.3 Pyroelektrické detektory

Využívají pyroelektrického jevu spočívajícího ve změně spontánní polarizace feroelektrických krystalických materiálů, způsobenou změnou teploty pyroelektrického detektoru. Pyroelektrický jev se vyskytuje u pyroelektrik s trvalou polarizací, nebo u některých feroelektrik, u nichž se orientace domén vytvoří silným elektrickým polem. Používané materiály triglycin-sulfát (TGS), keramické materiály na bázi titaničitanu a zirkoničitanu olovnatého (PZT), polyvinylfluorid (PVDF).[4]

3.2.2 Kvantové detektory

Podstatou je fyzikální jev, při kterém vzájemným působením dopadajících fotonů dojde ke generaci párů elektron – díra. Jestliže foton dopadající na detektor má dostatečně velkou energii a předá ji valenčnímu pásu elektronů, tak se elektron dostane do vodivostního pásma. Jestliže počet elektronů dosáhne určité míry, tak obvodem detektoru začne protékat určitý proud úměrný počtu dopadajících fotonů a jejich energii. Detektory musí být chlazeny, aby nedocházelo k samovolnému přechodu elektronů z valenčního pásma do vodivostního. Nejčastěji používané jsou typy: PtSi, InSb. PtSi (Schottkyho bariéra) v krátkovlnném pásmu 3,6 až 5 μm . FPA matice chlazená Stirlingovým chladičem (miniaturní heliový kompresorový agregát). Pro dlouhovlnné pásmo se používá detektor typu QWIP Obr. 3-5 (*Quantum Well Infrared Photon Detector*). Pro posun pásma slouží vrstvy AlGaAs a GaAs na substrátu GaAs. Pracovní oblast detektoru je kolem 0,92 μm . Další charakteristickými vlastnostmi kvantových detektorů je jejich citlivost a stabilita. Jsou radiometrické.[4][8]



Obr. 3-5 FPA matice s detektory QWIP [8]

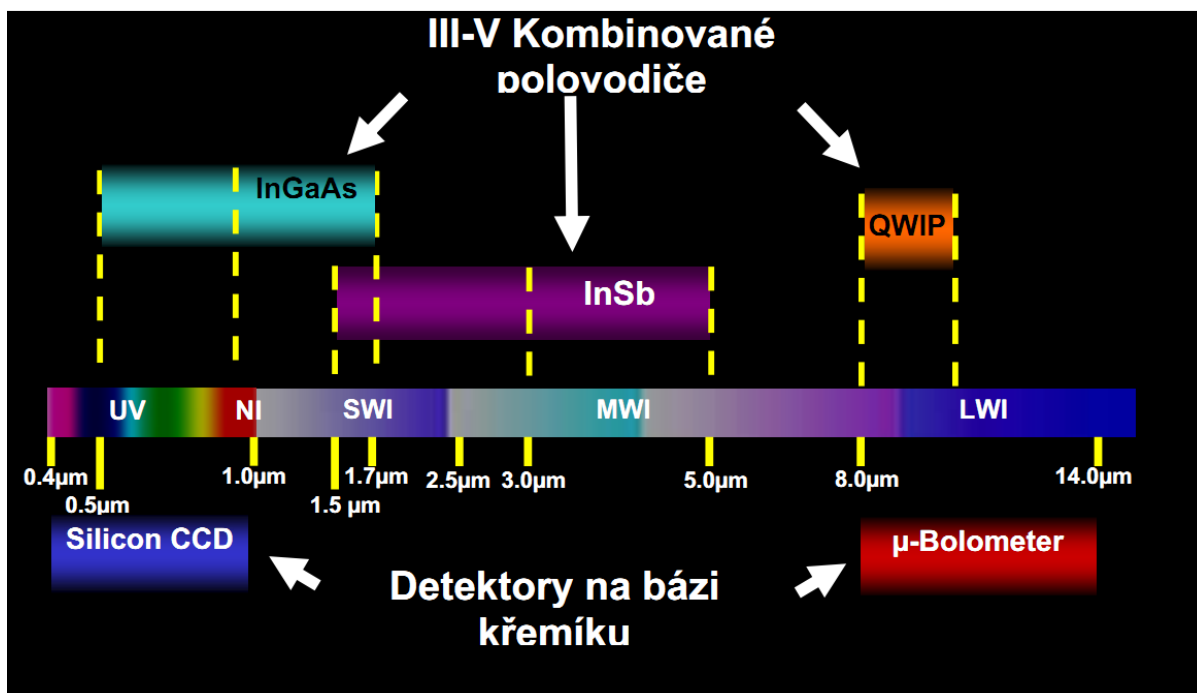
3.3 Termografická technika Flir Systems

Firma Flir Systems vyrábí termografickou techniku pracující ve spektrálních oblastech o vlnových délkách od 0,9 μm (resp. již od 0,4 μm) do 13 μm .

Zkratka	Název	Vlnová délka [μm]
NIR	blízká oblast	0,8 až 2,0
SWIR	krátkovlnná oblast	2,0 až 3,0
MWIR	střední oblast	3,0 až 5,0
LWIR	vzdálená (dlouhovlnná) oblast	5,0 až 15
VLWIR	velmi vzdálená oblast	15 až 1000

Tab. 3-1 Rozdělení infračervené části spektra [9]

Vyráběná technika má své charakteristické vlastnosti pro každou oblast infračerveného spektra. Zařízení se liší typem použitého detektoru, optickým systémem i možnostmi či způsoby jejich využití. Na Obr. 3-6 je uvedeno rozdělení určité části elektromagnetického spektra, včetně jednotlivých typů používaných detektorů.[9]



Obr. 3-6 Rozdělení infračervené části elektromagnetického spektra (typy detektorů) [9]

Systémy pracující v blízké oblasti NIR využívají mozaikový detektor typu InGaAs a běžnou (fotografickou) optiku. Základní spektrální rozsah těchto zařízení je 0,9 až 1,7 μm , popř. u detektoru typu VisGaAs™ 0,4 až 1,7 μm . [9]

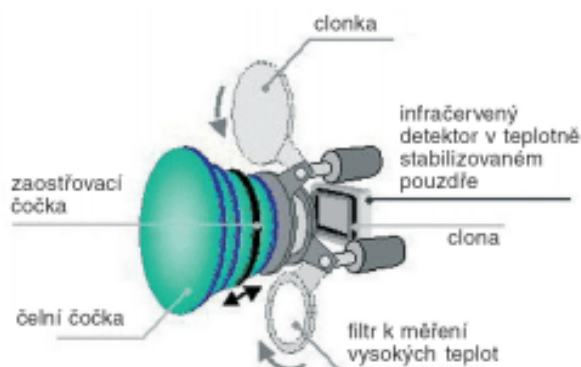
Pro zobrazení v oblasti NIR je charakteristické zobrazování odraženého záření od objektů, jejichž teploty jsou nižší než 250 °C. Některé materiály mají při svém osvětlení v oblasti NIR specifické vlastnosti: např. křemík je transparentní při vlnových délkách delších než 1,1 μm , voda silně pohlcuje záření na vlnové délce 1,45 μm , mnohé barevné pigmenty jsou v oblasti NIR transparentní apod. [9]

Využití techniky pracující v oblasti NIR je např. v umění (přemalby a podmalby obrazů) nebo v kriminalistice („odstranění“ přetisků či „zачernění“ textu). Zde lze využít dodatečně selektivní spektrální filtry, jimiž je možné rozdělit oblast NIR na jednotlivá pásma, a tak v podstatě získat zobrazení v úzkých spektrálních pásmech a „odfiltrovávat“ jednotlivé barvy. [9]

Termografická technika NIR je speciální technika, jejímž výstupem – zobrazením není „klasický“ termální obraz – termogram, ale zobrazení, které při teplotách zobrazovaného objektu nižších než 250 °C nese určité informace, které sice nejsou „radiometricky kalibrovatelné“, ale mají svoji výpovědní hodnotu. [9]

Firma FLIR vyrábí také termografické systémy s označením SW (Short Wave) se spektrální citlivostí 3,5 až 5 μm a LW (Long Wave) se spektrální citlivostí 7,5 až 13 μm . Při měření vysokých teplot se uplatňují krátkovlnné systémy. Řada SW využívá chlazené platinokřemíkové (PtSi) detektory FPA s rozlišením 256x256 obrazových bodů. Teplotní citlivost při 30 °C je menší než 0,07 °C a měřicí rozsah je -10 až +2000 °C. Kamery řady LW - nechlazené mikrobolometrické detektory FPA s rozlišením 160x120 nebo 320x240 obrazových bodů. Teplotní citlivost LW systémů je menší než 0,08 °C při měřicím rozsahu -40 až +2000 °C.

Matice detektorů obsahuje 160x120, 320x240 až po dnešních 640x480 obrazových bodů. Uspořádání termokamery FLIR s mikrobolometrickým nechlazeným detektorem je na Obr. 3-7.

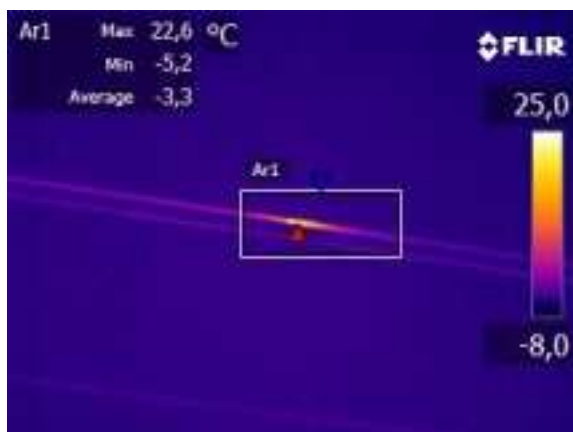


Obr. 3-7 Nechlazený mozaikový detektor FPA [12]

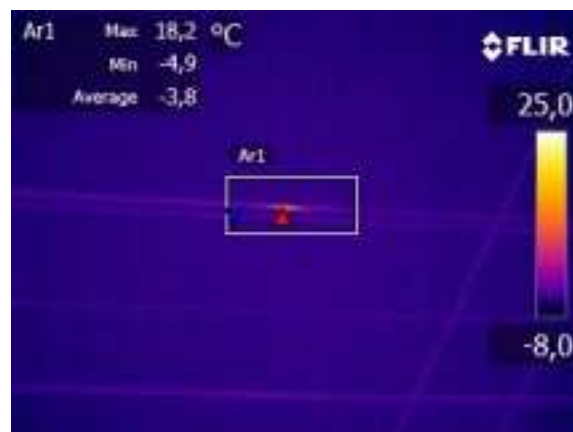
Pomocí vstupní germaniové optiky je zářivý tok měřeného objektu zaostřen na detektor. Do optické cesty se vkládá filtr pro měření vysokých teplot, clonka pro kalibraci detektoru a v určitých případech spektrální filtr.

Geometrické rozlišení nám určuje kolik bolometrů je na povrchu celého mikrobolometru. Jestliže je velikost detektoru přibližně stejně velká, mění se velikost pixelu. Detailnější termogram se schopností lépe detekovat menší změny teploty na větší vzdálenosti tedy dosáhneme při menším pixelu a stejné velikosti detektoru. Jaký vliv má na výsledky měření geometrické rozlišení miko-bolometru a použitý objektiv (zorné pole/min. ohnisková vzdálenost) je demonstrováno na následujících termogramech *Obr. 3-8, Obr. 3-9, Obr. 3-10, Obr. 3-11*. Měřeným objektem je spojka venkovního vedení 110 kV. První dva termogramy jsou snímány termovizní kamerou se čtvrtinovým rozlišením 320x240 bodů. Druhé dva s rozlišením 640x480 bodů. Měření je provedeno při stejných provozních parametrech. Vidíme, že naměřené teploty se liší až o 6,4 °C.

Vlastnosti termokamery tedy nejsou dány pouze použitým čipem a teplotním rozsahem, ale také vlastnostmi optiky, která obraz na čip přivede. Je tu analogie s klasickými fotoaparáty. S klasickým objektivem lze vidět větší oblast, ale s teleobjektivem je možné rozlišit více detailů. V tabulce je uveden příklad dvou termokamer, rozlišení čipu 160x140 a 384x288. Oblast vidění a velikost jednotlivých bodů pak závisí na vzdálenosti měřeného objektu od místa měření (HFOV/VFOV- Horizontal/Vertical field of view – horizontální a vertikální oblast vidění, IFOV je velikost jednoho pixelu v dané vzdálenosti) *Obr. 3-12*. PPOM se označuje jako SMO – Smallest measurable object – tedy nejmenší měřitelný objekt (většinou 3xIFOV).[7]



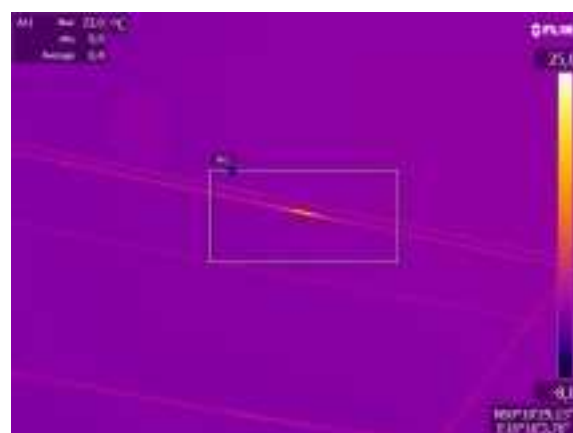
Obr. 3-8 ThermaCam P65, 320x240 bodů, objektiv 12°x9°/1,2 m



Obr. 3-9 ThermaCam P65, 320x240 bodů, objektiv 24°x18°/0,3 m



Obr. 3-10 Flir P660, 640x480 bodů, objektiv 12°x9°/1,2 m



Obr. 3-11 Flir P660, 640x480 bodů, objektiv 24°x18°/0,3 m

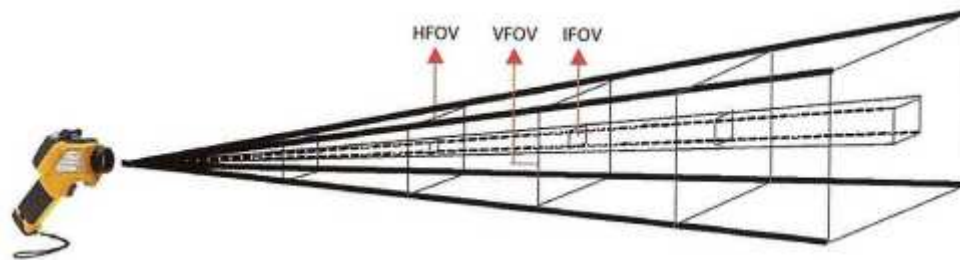
			0.1 m	0.3 m	0.5 m	1 m	2 m	6 m	10 m	30 m	100 m
20°x15° 2.2 mrad 10 cm	HFOV (m)		0.03	0.10	0.17	0.35	0.70	2.11	3.52	10.57	35.26
	VFOV (m)		0.02	0.07	0.13	0.26	0.52	1.57	2.63	7.89	26.33
	IFOV (mm)		0.22	0.66	1.10	2.20	4.40	13.22	22.04	66.12	220.40
	PPOM (mm)		0.66	1.98	3.30	6.60	13.20	39.66	66.12	198.36	661.20
24°x18° 1.3 mrad 10 cm	HFOV (m)		0.05	0.15	0.25	0.5	1	5.99	4.99	14.98	49.92
	VFOV (m)		0.04	0.11	0.19	0.37	0.75	4.49	3.74	11.23	37.44
	IFOV (mm)		0.13	0.39	0.65	1.3	2.6	7.8	13	39	130
	PPOM (mm)		0.39	1.17	1.95	3.9	7.8	23.4	39	117	390

HFOV/VFOV – Horizontal/Vertical field of view, horizontální a vertikální oblast vidění

IFOV je velikost jednoho pixelu v dané vzdálenosti

PPOM se označuje také jako SMO – Smallest measurable object – tedy nejmenší měřitelný objekt (většinou 3× IFOV)

Obr. 3-12 Srovnávací tabulka oblast vidění [7]



Obr. 3-13 Oblast vidění [7]

Při snímání malých objektů (například slabších vodičů v rozvaděči) je nutné přistoupit dostatečně blízko, pokud je to z hlediska bezpečnosti možné. Záměrně zde hovoříme o snímání a ne o měření. U objektu o velikosti IFOV nelze korektně změřit teplota. Termokamerám totiž nestačí k určení teploty pouze jeden bod, ale bodů několik (typicky 3x3, označované také jako 3xIFOV, nebo SMO – Smallest measurable object – tedy nejmenší měřitelný objekt). Z větší vzdálenosti můžeme problém identifikovat (teplý bod bude vidět), ale nejsme schopni jej změřit.

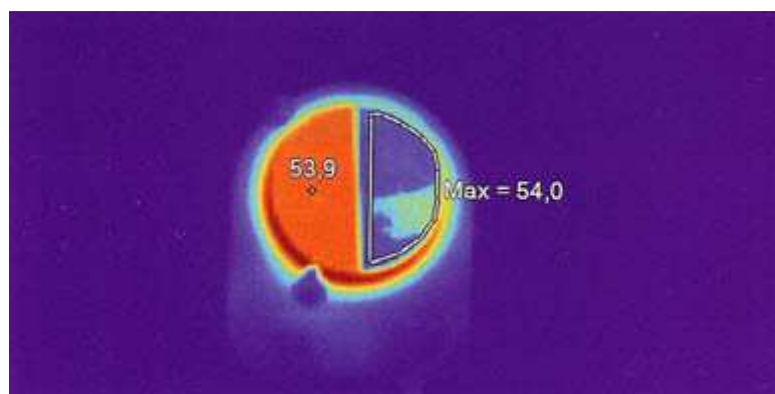
V těchto případech pak taková inspekce probíhá ve 2 fázích. Nejdříve problém identifikujeme (uděláme si obrázek celého zařízení) a následně jej z větší blízkosti změříme.[7]

Vlastnosti a stav samotného měřeného objektu musíme v čase měření znát, protože jsou důležité pro správnou interpretaci výsledků. Už z principu činnosti termokamery je nutné zajistit diferenci mezi měřeným objektem a okolím (měřit na vypnutém elektrickém zařízení, nebo měření nehomogenity plochy domu při stejné vnitřní a venkovní teplotě je bezúčelné).[7]

Zařízení, u kterého chceme provést měření, by mělo být zatíženo alespoň na 40 % maximální zátěže po dobu 2 h. Čím vyšší bude zátěž a délka ustálení, tím budou výsledky přesnější. Ke snímku je potom nutné si velikost zátěže zaznamenat (kamery s rozsáhlejší funkční výbavou nabízejí například možnost hlasového záznamu u každého snímku), aby bylo měření opakovatelné za stejných podmínek.[7]

Pokud tyto údaje nejsou zjistitelné, například z přístrojů přímo v rozvaděči, tak by měl být technik vybaven měřicím přístrojem, který je schopen změřit výkon.[7]

Důležitým parametrem je takzvaná emisivita měřeného objektu (schopnost pohlcovat dopadající záření a přeměňovat ho v teplo). Emisivita je udávána tabulkově pro většinu běžných materiálů, ale může se stát, že materiál není známý nebo není uvedený v tabulkách. Emisivitu si však můžete ve většině případů stanovit sami. Na měřený objekt nalepte černou elektrikářskou pásku, nebo jej můžete nasprejovat černou matnou barvou. Emisivita těchto materiálů je známá (je to 0,95). Na této známé části změříte teplotu a pak nastavíte emisivitu materiálu tak, aby se hodnoty teploty shodovaly. Na obrázku je na ploténce umístěný lesklý kruh, který je v levé části nastříkaný černou barvou. Aby teplota na pravé straně byla stejná, bylo nutné nastavit emisivitu na 0,55. To je tedy emisivita neznámého povrchu.[7]



Obr. 3-14 Stanovení emisivity neznámého materiálu [7]

Poté je nutné brát v potaz další parametry: teplotu okolí, vlhkost, denní dobu a zejména sílu větru. Vítr významně ovlivní teplotu tělesa. Podle pravidla se přibližně dá říci, že rozdíl teplot je redukován o 1/2 už při 5 m/s a o 2/3 při rychlosti 7 m/s. Klíčem k úspěchu je pak správné zaostření obrazu. Špatné zaměření je to jediné, co u dobrých termokamer nemůžete vzít zpět. Zaostřujte proto na ostré hrany objektů. Je také dobré zapnout černobílou paletu, protože lidské oko je na odstíny šedé citlivější než na barevné.[7]

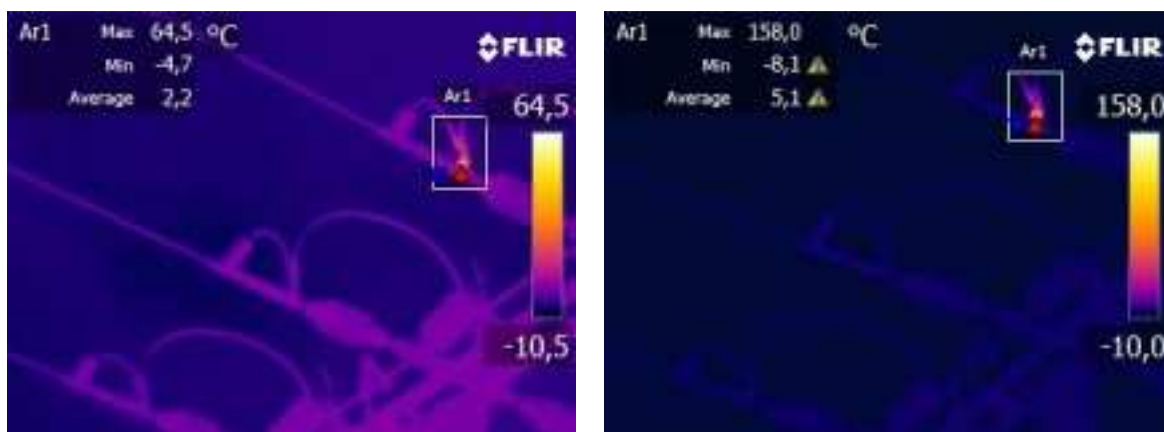
4 PRVKY DISTRIBUČNÍCH SÍTÍ VHODNÉ PRO TERMODIAGNOSTIKU, POSTUPY A METODY TERMODIAGNOSTIKY

V energetice se termovizní měření využívá v oblastech:

- výroby elektrické energie
- přenosu elektrické energie
- rozvodu elektrické energie

4.1 Všeobecné informace o zařízení, kontrole a technice měření

Kontroly jsou prováděné za normálních provozních podmínek, přičemž společnosti zabývající se distribucí elektrické energie se snaží provádět měření během období vysokého zatížení. Na Obr. 4-1 srovnávám nalezenou závadu, proudový spoj měděného pásku a AlFe lana venkovního vedení 35 kV, při různém zatížení. Levý termogram při 91 A, pravý 58 A. Všechny ostatní parametry jsou totožné. Můžeme konstatovat, že při nízkém zatížení, by závady s nízkým stupněm klasifikace byly neidentifikovatelné.



Obr. 4-1 Porovnání nalezené závady pro různá zatížení

Termíny pravidelných kontrol se u jednotlivých distributorů liší a jsou i závislé na typu kontrolovaného zařízení.

Měřené zařízení má určité teplotní chování, které by mělo být známé osobě vykonávající termografické měření. U elektrických zařízení jsou všeobecně dobře známy fyzikální principy detekce poruch v podobě lišícího se tepelného charakteru, založené na tom, že dochází k zvýšení elektrického odporu, nebo k zvýšení odběru elektrického proudu. Obecným pravidlem je, že místa se zvýšenou teplotou jsou pravděpodobně potenciální lokalizace oblastí poruch.

Teplota a zatížení v okamžiku kontroly poskytují důležité informace o tom, jak závažná je porucha, případně jak se může vyvíjet v jiných podmínkách. Správné vyhodnocení každého případu vyžaduje detailní informace o tepelném chování (např. znát maximální povolenou teplotu apod.). Platí, že čím více technik termokamery o daném zařízení, které kontroluje zná, tím je vyšší kvalita kontroly. Například při měření zatíženého venkovního vedení vn by bylo nesprávné považovat oteplení kotevních svorek jako závadu, viz. Obr. 4-2. Toto oteplení je dáno konstrukcí kotevní svorky.



Obr. 4-2 Oteplení kotevních svorek

Na druhé straně je však nemožné, aby osoba provádějící termografické měření měla detailní informace o všech typech kontrolovaného zařízení.

V případě zřetelně identifikované poruchy (např. pokud nejde o odraz, nebo přirozený teplý bod), můžeme začít se sběrem dat. V měřicím protokolu je potřebné uvést pektorální emisivitu měřeného objektu, její přesnou identifikaci, provozní podmínky spolu s naměřenou teplotou, stupeň klasifikace, včetně reálné fotografie lokalizovaného místa.

Klasifikace poruchy popisuje podrobný význam poruchy, přičemž musíme brát do úvahy nejen situaci v době měření. Obvykle se však uvádí teploty pro okamžité zatížení.

Oprava lokalizovaných poruch je nejdůležitější úkol preventivní údržby. Opravená část by měla být co nejdříve zkontrolována. Statistika účinnosti oprav přitom ukazuje, že až třetina opravených poruch bude i nadále ukazovat přehřívání. Protože další zkoumání určení příčiny poruchy vede často k zlepšení postupu oprav, pomáhá ve výběru odběratelů a zjišťuje nedostatky konstrukčního řešení elektrické instalace. Pracovník údržby může rychle vidět účinek a úspěšnost opravy, přičemž se může poučit ze svých chyb.

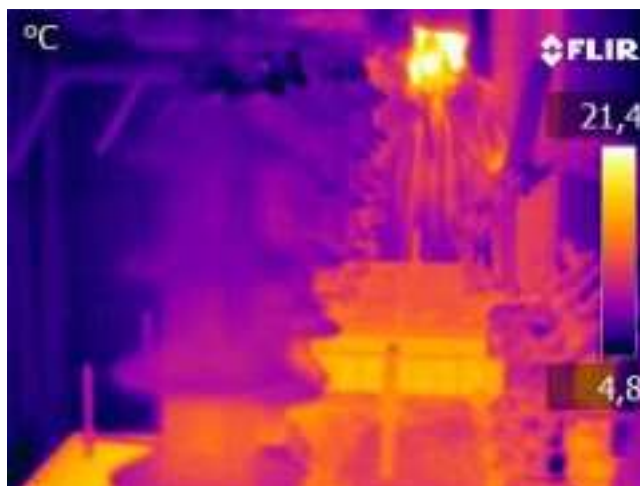
Správné měření teploty někdy nezávisí jen na funkci kamery, jeho vyhodnocovacím softwaru nebo lidském faktoru. V praxi se může stát, že skutečná porucha na spoji není vidět, na kameře ji nevidíme. Můžeme však naměřit teplo, které je vedené na určitou vzdálenost. V tomto případě volíme jiné úhly tak, aby byl měřený bod viditelný. Příkladem jsou spoje ukryté uvnitř skříní, pod krytem apod.

Termografická kontrola v energetice je založena na porovnávání různých předmětů (např. porovnávání tří fází mezi sebou při souměrném zatížení apod.). Menší rozdíly v barvě termogramu se mohou objevit ve spojení dvou různých materiálů, nebo místě měnicího se průřezu vodičů.

V případě zjištění poruchy mohou být provedena nápravná opatření. Pro doporučení nejvhodnějších opatření je potřebné vyhodnotit následující kritéria:

- hodnotu zatížení při měření
- souměrné či nesouměrné zatížení
- polohu poruchové části na elektrickém zařízení
- očekávané následující zatížení
- zda je zvýšená měřená teplota měřená přímo v poruchovém bodě, nebo nepřímo prostřednictvím vedeného tepla, způsobeného obvykle nějakou vnitřní poruchou zařízení

Termovizní kamera detekuje veškeré záření, které se dostane do objektivu, ale i záření vycházející z jiných zdrojů, popřípadě které bylo odražené. Typickým příkladem elektrických částí, které se chovají jako zrcadlo infračerveného záření, je velmi lesklý holý kov. Odraz pracovníka od nerezové desky rozvaděče, který provádí kontrolu zděné distribuční transformační stanice *Obr. 4-3*.



Obr. 4-3 Odraz při termovizní kontrole

Opakem jsou části lakované, izolované, plastové. Odraz jednoduše zjistíme změnou pohybu a sledujeme teplé místo.

Měřený povrch s poměrně vysokou emisivitou může mít zvýšenou teplotu vlivem slunečního záření.

V současnosti jsou bez výjimky všechny termografické kontroly dokumentované vytvořenými zprávami.

4.2 Rušivé faktory termografických měření

Měření různých částí elektrických instalací ovlivňují rušivé faktory (vítr, déšť, sníh, vzdálenost předmětu apod.)

Při venkovních podmínkách je potřebné uvažovat s chladícím účinkem větru. Diagnostikované přehřátí prvku při rychlosti větru $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ je přibližně dvojnásobné než při rychlosti $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Je mnoho míst s větší rychlostí větru, kde se musí kontrolovat zařízení. V tomto případě nám pomáhají korekční součinitele. Oteplení vynásobené korekčním součinitelem nám poskytuje naměřenou teplotu v případě bezvětří.

Také déšť a sníh mají na elektrické části chladící účinek. Kontroly můžeme s přijatelnými výsledky realizovat i při sněžení. Musí být však suché. Kvalita obrazu se bude zhoršovat v silném sněžení, mlze a dešti. Měření v těchto podmínkách se nedoporučuje. Stává se, že měříme teplotu sněhových vloček a kapek (ty jsou pro infračervené záření prakticky nepropustné).

Pravidelnou diagnostikou a včasným odhalením poruch např. v počátečním stádiu, je možné předcházet opravám velkého rozsahu (např. včasná výměna ložiska předchází jeho shoření nebo havárii elektrického motoru, ventilátoru atd.).

Na elektrických strojích a generátorech se pomocí termovize kontroluje velmi často i magnetický obvod. Například v odstaveném stroji (vybraný rotor) je navinuté okolo statoru magnetizační vinutí. Při zatížení tohoto vinutí je nasycený magnetický obvod stroje. V případě,

např., že mezi jednotlivými plechy, z kterých je magnetický obvod složen jsou ztráty, dochází k zahřátí, které je možné velmi dobře změřit termovizní technikou.

Při kontrole transformátorů se kontroluje, zda nedochází k zahřátí jeho určitých částí. Mimo jiné se kontrolují průchodky transformátoru, ale i rozložení teplotního pole na nádobách olejových transformátorů apod. Zkušenosti dokazují, že spojením termovizní diagnostiky, chromatografie olejů a i ostatních diagnostických metod, se vytvářejí velmi dobré podmínky pro provedení kvalitní a nedestruktivní defektoskopie těchto strojů. Termovizní technika dále nachází široké použití při kontrole elektrických strojů a přístrojů jako např. zjišťování teploty na sběracích ústrojích a budících soustavách generátorů, silových částí elektrických strojů, zjišťování teplotních rozdílů na polovodičových ventilech a jednotlivých paralelních větvích zařízení apod. Jinými slovy všude tam, kde fyzikální veličina jako je teplota, hovoří o technickém stavu daného zařízení nebo některé jeho části.

Povrch měření s poměrně vysokou speciální emisivitou může mít zvýšenou teplotu i vlivem slunečního záření. Jak již bylo zmíněno při metodě porovnávání - je potřeba se přesvědčit, zda zatížení všech tří fází je rovnoměrné. Typický příklad je, když dvě fáze v dobrém stavu jsou přehřáté, což signalizuje nesymetrické zatížení. V případě několika kabelů ve svazku může dojít až k zvýšení jejich teploty nedostatečným chlazením.

Při montáži spoje, v důsledku opotřebením materiálu, nebo naopak při velmi vysokém silovém zatížení spoje, může dojít k nízkému kontaktnímu přítlaku (tím se sníží napnutí pružiny a opotřebovávají se závity matic a šroubů).

4.3 Termodiagnostika prvků distribuční soustavy

4.3.1 Rozvodny vvn, vn

Na rozvodnách vvn, vn měříme veškeré viditelné spoje a svorky silové proudové dráhy s proudovým zatížením. Přípojnice lanové, trubkové, profilové – tvaru U, T, L, obdélník. U odpojovačů, odpínačů, vypínačů potom hlavní kontakty, pohyblivé a pevné proudové spoje. Součástí měření výkonových transformátorů je měření průchodek, rozložení teplotního pole na nádobách olejových transformátorů. U přístrojových transformátorů proudu, napětí nebo kombinovaných - přípojovací svorky, svorkovnice nastavení rozsahu, vinutí vlastních přístrojů. Jsou měřeny svodiče přepětí a kabelová vedení vn včetně koncovek. Součástí kontroly rozvodny je kontrola vn a nn rozvaděčů vlastní spotřeby (včetně veškerého vybavení – přípojnice, kabelová oka, pojistky, jističe, přístrojové transformátory proudu atd.).

4.3.2 Venkovní vedení vvn

U venkovních vedení vvn měříme oteplení svorek a spojek AlFe lana na kotevních stožárech a vodič v jejich bezprostředním okolí. Dále potom proudové spoje vodičů v poli vedení.

4.3.3 Venkovní vedení vn

Součástí kontroly venkovních vedení vn je oteplení svorek na stožárech s proudovými spoji (přeponky, odbočky apod.), úsekové odpojovače, odpínače, konce kabelů vn včetně koncovek, kontrola známých proudových spojů vodičů v průběhu vedení.

4.3.4 Distribuční trafostanice vn

Měření oteplení veškerých přístupných (viditelných) spojů a svorek silové proudové dráhy se zatížením – výkonové transformátory, přípojnice, vypínače, odpínače, odpojovače, pojistky, jističe, kabelová oka, průchodky, přístrojové transformátory proudu atd. - strana vn i nn.

4.3.5 Rozvodná zařízení nn

Kontrola rozvodných zařízení nn se provádí pouze u zařízení vlastní spotřeby rozvoden vvn, vn a nn rozvaděčů distribučních trafostanic.

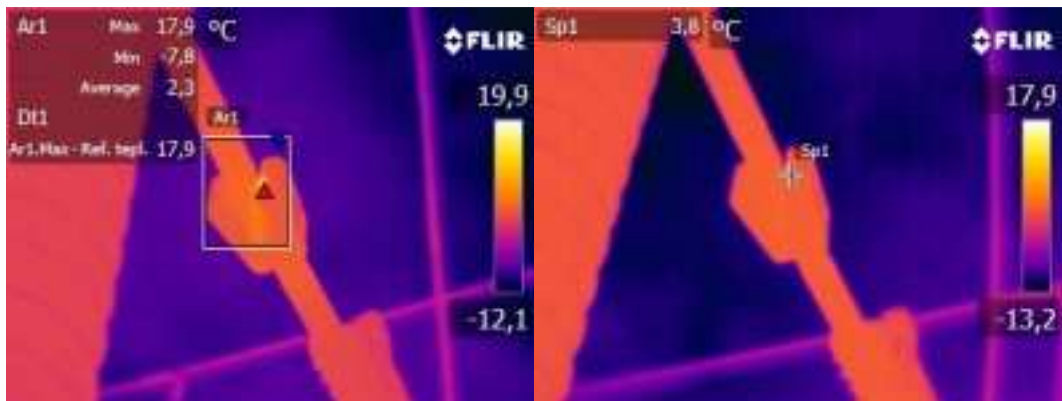
U ostatních zařízení nn se kontrola provádí pouze ve výjimečných případech – pokud nelze použít termopointy nebo je použití TMV kamery efektivnější (např. svorky venkovních vedení nn v případě podezření na závadu způsobující nekvalitní dodávku elektrické energie).

4.4 Výběr naměřených termovizních závad

V této kapitole uvádím příklady z jednotlivých měření. Každá jednotlivá závada obsahuje termogram, snímek skutečného stavu, popis závady, poruchový prvek, stupeň závady dle okamžitého oteplení proti srovnávacímu prvku *Tab. 4-1* a podmínky při měření. Další příklady z měření jsou uvedeny v příloze této bakalářské práce.

Oteplení proti srovnávacímu prvku	Stupeň závažnosti
$\Delta T \geq 65^{\circ}\text{C}$	4
$40^{\circ}\text{C} \leq \Delta T < 65^{\circ}\text{C}$	3
$10^{\circ}\text{C} \leq \Delta T < 40^{\circ}\text{C}$	2
$\Delta T < 10^{\circ}\text{C}$	1

Tab. 4-1 Stupeň závažnosti závady dle okamžitého oteplení proti srovnávacímu prvku



Klasifikační stupeň: 2

$$\Delta t_1 = 14,1^{\circ}\text{C}$$

**Závada: vadné pero kontaktní
hlavice odpojovače**

*Popis: přípojnicový odpojovač 110 kV
Teplota, vlhkost vzduchu, rychlost
větru: 3°C, 69%, 1 m/s*



Obr. 4-4 Oteplení pera kontaktní hlavice odpojovače

5 MOŽNOSTI VYUŽITÍ VÝSLEDKŮ TERMODIAGNOSTIKY PRO STANOVENÍ ŽIVOTNOSTI A SPOLEHLIVOSTI PRVKŮ DS

Informace uložené v protokolu měření můžeme použít pro stanovení nejproblémovějších prvků distribuční sítě, následnými kroky údržby snížit poruchovost a tím i kontinuitu dodávky elektrické energie.

Termodiagnostika v distribuci je užitečným zdrojem informací. Využíváme ji především pro údržbu a opravy. Další využití je pro statistické zpracování dat ohledně defektů a četnosti selhání jednotlivých prvků. Při dlouhodobém monitorování můžeme sledovat teplotní degradaci a teploty mohou naznačit konec životnosti části vybavení.

5.1 Obecné informace o zpracování dat

V této práci zpracovávám data z měření, z rozsáhlého distribučního území. Vstupní informací pro tuto databázi je protokol, který obsahuje důležité naměřené informace, konkrétní oteplení oproti srovnávacímu prvku, podmínky při měření (počasí, zatížení) a další data. V této práci jsem zpracoval data z těchto systémů distribuční soustavy:

- Distribuční transformační stanice
- Venkovní vedení vn
- Venkovní vedení vvn

Tyto systémy mohou být dále rozděleny do podskupin podle napěťové hladiny, koncepce, provedení atd.

Nejdříve jsem, za určité období, vytvořil v MS Excel databázi zařízení, kde byla provedena termovizní kontrola. Poté jsem procházel termovizní protokoly a do vytvořeného seznamu dopisoval informace z protokolu – napěťová hladina závady, konkrétní prvek, klasifikace závady podle oteplení vůči srovnávacímu prvku. Nutno podotknout, že termovizní protokol může obsahovat i několik závad, proto je zpracování časově náročné.

5.2 Distribuční transformační stanice

Transformační stanice vn/nn je zařízení sloužící především k transformaci ze jmenovitého napětí nad 1 kV do 38,5 kV. Většinou jsou umístěny v místě odběru. Kromě transformátoru je obvykle TS vybavena rozváděči vn a nn, někdy i dálkovým ovládním a řídicí technikou. Rozdělit je můžeme podle různých kritérií např. dle účelu poskytování dodávek elektrické energie, způsobu obsluhy (přístupu), dle provedení tělesa TS.

Dle provedení tělesa TS:

1. Stožárové nebo sloupové
 - Betonové TS
 - Příhradové TS
2. Blokované transformační stanice (kabelové)

Tyto TS se liší komplexitou, výkonem, věkem atd.

Zpracovaná databáze distribučních transformačních stanic je z let 2011 a 2012, kdy bylo změřeno 4432 DTS. V *Tab. 5-1* srovnávám počet změřených trafostanic vůči TS, kde se vyskytla alespoň jedna závada. V roce 2011 9,2 %, 2012 9,6 % závadových.

	2011		2012	
	Počet DTS změřeno	Počet DTS závada	Počet DTS změřeno	Počet DTS závada
Vnitřní	639	108	756	138
Venkovní	1403	115	1634	112
Celkem	2042	223	2390	250

Tab. 5-1 Celkový počet změřených DTS vs. DTS, kde se vyskytuje alespoň jedna závada

Co se týče počtu prvků, strana vysokého napětí je značně jednodušší než strana nízkého napětí. V *Tab. 5-2* uvádím počet poruchových prvků na vn a nn straně u jednotlivého typu TS. Z 371 defektů v roce 2011, jich 55 (přibližně 15%) připadá na stanu vn, zbytek na nn. V roce 2012 je to 13% z celkového počtu závad na straně vn.

vn	2011	2012
	Počet prvků	Počet prvků
Vnitřní	49	52
Venkovní	6	6
nn	Počet prvků	Počet prvků
	Vnitřní	149
Venkovní	167	173
Celkem	371	463

Tab. 5-2 Počet prvků vn a nn strany (DTS)

Nejproblémovější vybavení jsem vynesl do jednotlivých tabulek, kde uvádím, v jakém stupni závady se vyskytuje příslušný prvek.

Pojistka nn	2011				2012			
	Stupeň závady			Celkem	Stupeň závady			Celkem
	2	3	4		2	3	4	
pojistkový spodek nn, svorník	71	26	8	105	67	28	9	104
pojistkový spodek nn, šroub. spoj	44	10	1	55	82	21	3	106
pojistkový spodek nn, kontakt	1	3	1	5	1	0	0	1
pojistkový spodek nn, V-svorka	0	0	0	0	2	0	0	2

Tab. 5-3 Počet prvků pojistka nn (DTS)

Jistič nn	2011				2012			
	Stupeň závady			Celkem	Stupeň závady			Celkem
	2	3	4		2	3	4	
hl. jistič, svorník	28	6	4	38	18	3	1	22
hl. jistič, šroub. spoj	3	3	0	6	13	7	0	20
hl. jistič, kontakt	0	2	2	4	0	1	1	2
hl. jistič, V-svorka	0	0	0	0	1	0	0	1
jistič, šroub. spoj	2	0	0	2	5	0	0	5
jistič, svorník	1	0	0	1	0	0	0	0

Tab. 5-4 Počet prvků jistič nn (DTS)

Transformátor vn/nn	2011				2012			
	Stupeň závady			Celkem	Stupeň závady			Celkem
	2	3	4		2	3	4	
transformátor, svorník nn	18	9	3	30	24	11	5	40
transformátor, svorník nn (sv. oko)	16	6	4	26	19	9	4	32
transformátor, svorník vn	2	0	0	2	1	0	0	1

Tab. 5-5 Počet prvků transformátor vn/nn (DTS)

Přístrojový transformátor proudu TA	2011				2012			
	Stupeň závady			Celkem	Stupeň závady			Celkem
	2	3	4		2	3	4	
TA nn	1	2	0	3	0	1	1	2
TA nn, šroub. spoj	18	4	22	22	18	13	5	36
TA vn	0	0	0	0	1	1	0	2

Tab. 5-6 Počet prvků přístrojový transformátor proudu TA vn a nn (DTS)

Pojistka vn	2011				2012			
	Stupeň závady			Celkem	Stupeň závady			Celkem
	2	3	4		2	3	4	
pojistka vn	0	1	0	1	1	0	0	1
pojistkový spodek vn, kontakt	5	0	2	7	2	1	1	4
pojistkový spodek vn, šroub. spoj	0	1	1	2	0	0	1	1

Tab. 5-7 Počet prvků pojistka vn (DTS)

Kabel vn	2011				2012			
	Stupeň závady			Celkem	Stupeň závady			Celkem
	2	3	4		2	3	4	
žíla kabelu	10	1	0	11	8	3	3	14
kabelová koncovka	9	5	0	14	6	1	0	7
kabelová koncovka, šroub. spoj	2	0	0	2	2	1	0	3
kabel, rozdělovací hlava	3	0	0	3	2	0	0	2

Tab. 5-8 Počet prvků kabel vn (DTS)

Odpínač, odpojovač vn	2011				2012			
	Stupeň závady			Celkem	Stupeň závady			Celkem
	2	3	4		2	3	4	
odpínač, kontakt	1	3	0	4	3	1	0	4
odpínač, šroub. spoj	1	0	0	1	8	0	0	8
odpojovač, šroub. spoj	0	0	0	0	2	1	0	3
odpojovač, kontakt	2	0	1	3	0	0	0	0

Tab. 5-9 Počet prvků odpínač a odpojovač vn (DTS)

Ostatní	2011				2012			
	Stupeň závady			Celkem	Stupeň závady			Celkem
	2	3	4		2	3	4	
proudová svorka vedení nn	0	1	0	1	0	0	0	0
šroub. spoj kabelového oka nn	0	1	0	1	0	0	0	0
lisovaný spoj kabelového oka nn	2	0	1	3	0	0	0	0
přípojnice nn, šroub. spoj	3	1	0	4	3	0	0	3
přípojnice PEN, šroub. spoj	0	0	0	0	0	1	0	1
průchodka vn, svorník	0	1	0	1	1	1	2	4
omezovač přepětí	0	0	0	0	1	0	0	1
izolátor vn	1	3	0	4	2	1	0	3
pákový vypínač nn, šroub. spoj	10	0	0	10	15	9	2	26
pákový vypínač nn, kontakt	0	0	0	0	0	2	0	2

Tab. 5-10 Počet prvků ostatní (DTS)

5.3 Venkovní vedení vn

Venkovní elektrické vedení vn je zařízení pro přenos elektrické energie na hladině vysokého napětí. Mezi jeho základní prvky patří podpěrné body, konzole, armatury, izolátory a vodiče. Dále obsahuje spínací prvky, svodiče, omezovače přepětí, uzemnění atd. Sítě vn rozumíme venkovní vedení 22 a 35 kV, 6 a 10 kV jsou provozovány v omezeném množství a určeny na dožití.

Venkovní vedení vn začíná na průchodkách transformoven vvn/vn, spínacích stanic vn nebo na kabelových koncovkách vývodů z těchto zařízení a končí na prvním proudovém spoji zděných, stožárových transformačních stanic nebo na koncovkách kabelových svodů do kabelových sítí.

Síť venkovních vedení vn je tvořena kombinací hlavního vedení, spojovacího vedení, odbočky a přípojky.

Databáze venkovních vedení 22 a 35 kV o délce 8117 km je z let 2009 až 2012. Změřené délky vedení podle jednotlivých let zachycuje *Tab. 5-11*

rok	2009	2010	2011	2012
délka vedení [km]	1857	2109	2172	1979

Tab. 5-11 Délka vedení vn

Nejsložitějším prvkem u vedení vn jsou odpínače a odpojovače. To se potvrdilo i vyhodnocením informací, kdy počtem zjištěných závad patří k nejproblematictější. Z *Tab. 5-12* procentní podíl odpínačů a odpojovačů na celkovém počtu závad je 67 až 90%.

	2009		2010		2011		2012	
	22 kV	35 kV	22 kV	35 kV	22 kV	35 kV	22 kV	35 kV
odpínače a odpojovače	7	13	17	19	7	21	9	15
spojky a svorky AlFe lana	1	8	1	3	0	10	1	8
svorník průchodky	0	1	0	0	0	1	0	0
kabelová koncovka připojení	0	0	0	0	0	2	0	0
celkem prvků podle napěťové hladiny	8	22	18	22	7	34	10	23
celkem prvků	30		40		41		33	

Tab. 5-12 Počet prvků 22 a 35 kV (Venkovní vedení vn)

Následující *Tab. 5-13* a *Tab. 5-14* pojmenovávají konkrétní prvky vedení vn a stupně závady v jakých se vyskytují.

		2009				2010			
		Stupeň závady			Celkem	Stupeň závady			Celkem
		2	3	4		2	3	4	
Odpínače a odpojovače	kontakt odpojovače	3	2	1	6	9	5	3	17
	kontakt odpínače	2	0	0	2	2	0	0	2
	spoj kabelové oko AlFe lana - připojovací svorka odpínače (šroub)	0	1	0	1	0	0	0	0
	spoj kabelové oko AlFe lana - připojovací svorka odpojovače (šroub)	0	0	0	0	1	2	2	5
	spoj AlFe lano - připojovací svorka odpojovače (svorka)	0	0	0	0	0	0	0	0
	spoj páska - AlFe lano (svorka)	3	2	1	6	3	2	1	6
	spoj páska - kabelové oko AlFe lana (šroub)	1	2	2	5	1	1	1	3
	spoj páska - kontakt odpojovače (svorka)	0	0	0	0	1	1	1	3
Ostatní prvky	spoj na přeponě (svorka AlFe lana)	4	1	1	6	1	2	0	3
	spoj na přeponě (spojka AlFe lana)	1	0	0	1	0	0	0	0
	svorka AlFe lana	2	0	0	2	0	0	1	1
	svorník průchodky	1	0	0	1	0	0	0	0
	svorka AlFe lana (PPN)	0	0	0	0	0	0	0	0
	izolátory	0	0	0	0	0	0	0	0
	kabelová koncovka, šroub. spoj	0	0	0	0	0	0	0	0

Tab. 5-13 Počet prvků (Venkovní vedení vn) rok 2009-2010

		2011				2012			
		Stupeň závady			Celkem	Stupeň závady			Celkem
		2	3	4		2	3	4	
Odpínače a odpojovače	kontakt odpojovače	0	0	2	2	4	1	0	5
	kontakt odpínače	0	1	0	1	2	1	0	3
	spoj kabelové oko AlFe lana - připojovací svorka odpínače (šroub)	4	1	2	7	0	2	0	2
	spoj kabelové oko AlFe lana - připojovací svorka odpojovače (šroub)	1	1	0	2	0	0	0	0
	spoj AlFe lano - připojovací svorka odpojovače (svorka)	0	0	0	0	0	0	0	0
	spoj páska - AlFe lano (svorka)	6	3	4	13	0	3	2	5
	spoj páska - kabelové oko AlFe lana (šroub)	1	1	0	2	2	2	1	5
	spoj páska - kontakt odpojovače (svorka)	0	0	0	0	1	0	0	1
Ostatní prvky	spoj na přeponě (svorka AlFe lana)	5	2	1	8	3	1	3	7
	spoj na přeponě (spojka AlFe lana)	0	0	0	0	0	0	0	0
	svorka AlFe lana	1	1	0	2	2	0	0	2
	svorník průchodky	1	0	0	1	0	0	0	0
	svorka AlFe lana (PPN)	1	0	0	1	0	0	0	0
	izolátory	0	0	0	0	3	0	0	3
	kabelová koncovka, šroub. spoj	1	1	0	2	0	0	0	0

Tab. 5-14 Počet prvků (Venkovní vedení vn) rok 2011-2012

Počty poruchových prvků na jednotlivých typech odpínačů a odpojovačů uvádí Tab. 5-15. Tato tabulka je pouze informativní, protože celkové počty jednotlivých typů databáze neobsahuje.

	2009	2010	2011	2012	Celkem
Fla 15/60 (Dribo Brno)	5	4	7	8	24
Fla 15/60 GB (Dribo Brno)			3		3
Fla 15/60 P (Dribo Brno)				1	1
Fla 15/6400 (Dribo Brno)				1	1
Flb 15/60 (Dribo Brno)	2	9			11
2060R25A (Thevia Rožnov pod Radhoštěm)	3		8		11
UO 22 (SEZ Krompachy)	1	1	2	1	5
UO 35 (SEZ Krompachy)	5	7	6	6	24
US 22 (SEZ Krompachy)	3	6		3	12
US 35 (SEZ Krompachy)	1	9		4	14
USV 25 (SEZ Krompachy)			2		2

Tab. 5-15 Jednotlivé typy odpínačů a odpojovačů (Venkovní vedení vn)

5.4 Venkovní vedení vvn

Venkovní elektrické vedení vvn je zařízení pro přenos elektrické energie na hladině velmi vysokého napětí. Základní prvky venkovního vedení jsou podpěrné body, konzole, armatury, izolátory, zemní lana a vodiče.

Venkovní vedení vvn je páteřní síť distributora mezi jednotlivými oblastmi osídlení. Spojuje transformovny vvn/vvn, vvn/vn a napájecí vedení pro jednotlivé a odběratelské TR vvn/vn a elektrárny. Venkovní vedení vvn začíná a končí kotevními izolátory na transformovně vvn/110 kV, případně na kabelových koncokách kabelových vývodů 110 kV a kotevními izolátory na rozvodně odběratele.

Síť venkovních vedení vvn je tvořena kombinací páteřního vedení, přípojky, zasmyčkování a T odbočení.

Pokrytí oblasti vedením vvn je nižší než u vedení vn, což má za následek jeho menší celkovou délku. Na rozdíl od vedení vn, postrádá odpínače a odpojovače. Má zásadní význam pro distributora. Zpracovaná databáze je z let 2009 a 2012, obsahuje 1724 km venkovního vedení vvnN, členění podle jednotlivých let zachycuje *Tab. 5-16*

rok	2009	2010	2011	2012
délka vedení [km]	448	458	427	391

Tab. 5-16 Délka vedení vvn

S jednoduchostí venkovního vedení vvn, se nám zúžil počet i pestrost závad. Počty prvků podle stupňů klasifikace uvádí *Tab. 5-17*. Záměrně je v tabulce uveden řádek se spojkou AlFe lana na přeponě, tato závada v období čtyř let nebyla nalezena.

	2009				2010			
	Stupeň závady			Celkem	Stupeň závady			Celkem
	2	3	4		2	3	4	
spoj na přeponě (svorka AlFe lana)	1	0	0	1	0	0	1	1
spoj na přeponě (spojka AlFe lana)	0	0	0	0	0	0	0	0
spoj mezi podpěrnými body (spojka AlFe lana)	0	2	0	2	1	0	1	2
celkem prvků	1	2	0	3	1	0	2	3
	2011				2012			
	Stupeň závady			Celkem	Stupeň závady			Celkem
	2	3	4		2	3	4	
spoj na přeponě (svorka AlFe lana)	0	2	1	3	3	1	0	4
spoj na přeponě (spojka AlFe lana)	0	0	0	0	0	0	0	0
spoj mezi podpěrnými body (spojka AlFe lana)	0	1	0	1	0	0	0	0
celkem prvků	0	3	1	4	3	1	0	4

Tab. 5-17 Počet prvků (Venkovní vedení vvn)

5.5 Rozbor výsledků

Pro záruku kvalitní databáze závad je nutné používat co možná nejpřesnějších metod měření teploty. Důležitá je i zkušenost pracovníků, provádějících termodiagnostiku.

Rozbor výsledků v případě DTS ukázal, že v případě nn strany je převážná většina závad na svornících a šroubových spojích připojení jednotlivých vývodů. Zmenšení počtu závad by vyřešilo rozšířené použití V-svorek. Nutno podotknout, že je mnoho výrobců a mnoho typů. Proto pouze ilustrativně *Obr. 5-1*. Princip je u všech stejný - připojení kabelů bez použití kabelových ok. Svorka vytváří velice kvalitní spoj a v naší databázi se vyskytuje minimálně. Většina závad má za příčinu lidský faktor. Je to buď opomenutí pracovníka montážní firmy dotáhnout spoj, nebo jeho přetažení. V důsledku toho dochází k destrukci svorky.



Obr. 5-1 V-svorka pro V-třmen

V případě venkovních vedení vn, je nejčastější výskyt závad na úsekových odpojovačích a odpínačích. Pro snížení poruchovosti by byly vhodné častější kontroly a soustředění pozornosti na tyto úkony:

- dotažení proudových spojů,
- dotažení proudového spoje vodič – měděný pásek,
- kontrola a seřízení pohyblivých částí, seřízení dotyku styčných ploch hlavních a pomocných kontaktů,
- kontrola stavu opálení, provedení očištění nebo obroušení brusným papírem a namazání kontaktních ploch vazelínou dle doporučení výrobce,
- kontrola stavu vodičů upevněných v kotevních svorkách,
- kontrola vůle kyvných izolátorů.

U venkovních vedení vvn není počet závad tak rozsáhlý, jako u jiných systémů distribuční soustavy. Databáze by měla být rozšířena o další roky. Z toho co víme, se jeví provedení spojování AlFe lana přepon u kotevních izolátorů výhodnější než svorkování. Jiná je situace spojek AlFe lana v polích mezi podpěrnými body, kde musí odolávat tahu vodičů. Řešení tohoto problému přinese budoucnost, kdy vodiče nových, nebo nově rekonstruovaných vedení jsou nataženy mezi kotevními body bez přerušení.

5.6 Možnosti využití databáze

Data je dále možné zpracovat ve smyslu statistické analýzy pro vyjádření poruchovosti a životnosti. Rozšíření databáze v budoucnu, by se stala zdrojem informací sloužící např. pro porovnání problematického charakteru stejného vybavení různých výrobců nebo pro vyhodnocení vlivu věku vybavení na rozložení jeho teplotního pole. Další možností je porovnání oblastí s různými klimatickými podmínkami a jejich vlivu na degradaci jednotlivých prvků distribuční soustavy. Zároveň můžeme sledovat životnost prvku vlivem déletrvajícího proudového zatížení.

6 ZÁVĚR

V bakalářské práci na téma *Termovizní diagnostika elektrických zařízení a prvků distribuční sítě* jsem se zabýval nejen využitím v oblasti elektroenergetiky, ale také teorií termografie, popisem reálných podmínek při měření, používanými termovizními systémy, termografickými postupy, ale i rozbohem nalezených závad za určité časové období.

Termovizní měření se prosazuje v celé radě odvětví průmyslu. Důkazem toho je rychlý nárůst termografických systémů v České republice v různých odvětvích, při různých aplikacích (jako je prediktivní údržba, diagnostika zařízení strojů, řízení technologických procesů, výzkumu a vývoji).

Výhoda kontroly termovizní kamerou v energetice spočívá v procesu snímání a vyhodnocování tepelného záření, které je přítomné a generované v každém místě zvýšeného přechodového odporu. Provádění termografického měření nabývá v poslední době na důležitosti, zachováním výroby (dodávky elektrické energie).

Využití termovizních kamer v procesu údržby, diagnostiky a monitorování elektrických distribučních zařízení, které má nejen bezpečnostní význam, ale hlavně významný ekonomický efekt, protože ze získaných poznatků je možné předpokládat výpadek vvn a vn zařízení s přesností až na několik hodin. Uvedený poruchový stav má následně dopad na ekonomiku jiných sekundárně závislých odběratelů.

Při pravidelných kontrolách mohou být případné poruchy objevené už v počátečním stádiu (vliv na plánování náhradních dílů apod.). Hlavním kritériem pro rozhodnutí, či jde o nedokonalý spoj, není jen absolutní teplota spoje, ale zejména teplotní rozdíl oproti ostatním spojům, případně rostoucí trend.

Termovizní měření využívá tedy výrobce elektrické energie jako prostředek na identifikování a hledání problémových oblastí při přenosu a distribuci elektrické energie.

Také je úspěšně rozšířeno jako nástroj elektrických kontrol, protože jeho předností je, že se kontrola provádí při normálním provozu bez zásahu do zařízení (měření je bezkontaktní a nedestruktivní). Při pravidelných kontrolách jsou případné poruchy objevené už v počátečním stádiu, což má značný vliv na ekonomiku provozu. Měřením, postupným sledováním a porovnáváním s archivovanými hodnotami je možné rozhodnout o kvalitě sledovaného spoje.

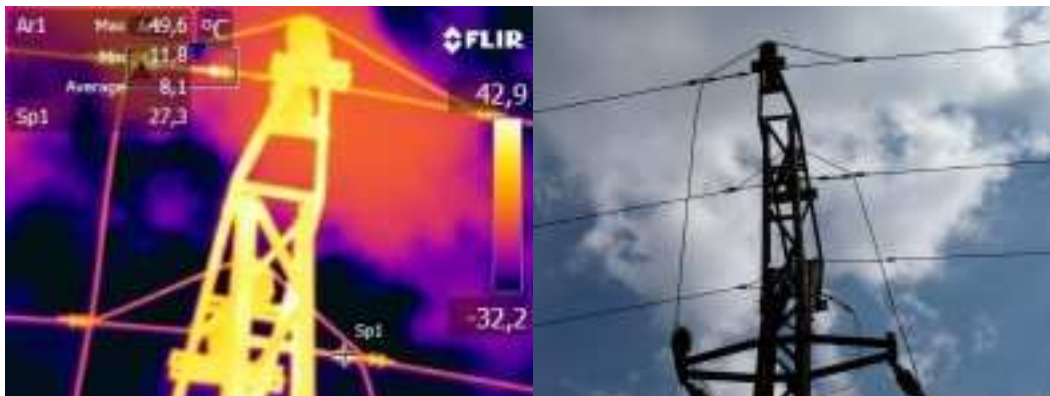
Současné termovizní systémy jsou výkonným pomocníkem při kontrolách a revizích, přičemž umožňují velmi rychle informovat provozovatele přímo na místě o zjištěné poruše a o její závažnosti.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] ThermaCAM P65 Příručka uživatele. Flir, str. 137 – 139, Publ. No. 1 557 965 Rev. a62 August 19, 2004
- [2] Vladimír Lysenko, Detektory pro bezdotykové měření teplot. BEN-technická literatura, Praha 2005, ISBN 80-7300-180-2
- [3] Aleš Drastich, Netelevizní zobrazovací systémy. VUT Brno 2001
- [4] Marcel Kreidl, Měření teploty – sensory a měřící obvody. BEN-technická literatura
- [5] Bezdotykové měření teploty, ÚSTAV FYZIKY A MĚŘÍCÍ TECHNIKY VŠCHT Praha prosinec 2009
- [6] Technický slovník naučný, díl 1-7, ENCYKLOPEDICKÝ DŮM 2002
- [7] PROREVIZE, číslo 1/2011, Ing. Jan KANČO
- [8] Marcel Kreidl, Diagnostické systémy, Vydavatelství ČVUT, Praha 2001, ISBN 80-01-02349-4
- [9] Automa, číslo 11/2005, Ing. Jiří Svoboda,
http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=30771
- [10] Šmíd, Termovize, 2007, <http://measure.feld.cvut.cz/usr/staff/smid/Lectures/>
- [11] Petr Brabec, Gymnázium Benešov,
<http://fyzika.gbn.cz/phprs/view.php?cislocclanku=2005011001>
- [12] Automa, číslo 1/2003, Ing. Jiří Svoboda,
http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=28670
- [13] ETM – Elektrotechnický magazín, M. Chupáč, M. Šimko srpen a říjen 2011

PŘÍLOHA

Výběr termovizních závad



Klasifikační stupeň: 2

$\Delta t_1 = 22,3^\circ\text{C}$

Závada: oteplení svorky AlFe lana

Popis: Vedení 35 kV

Teplota, vlhkost vzduchu, rychlost větru: 25 °C, 50 %, 1,5 m/s



Obr. 0-1 Proudový spoj svorka AlFe lana



Klasifikační stupeň: 3 $\Delta t_1 = 45,9^\circ\text{C}$ *Popis: transformátor vn/nn*

Závada: oteplení svorníku nn

Teplota, vlhkost vzduchu, rychlost větru: 18 °C, 50 %, 1 m/s

Obr. 0-2 Proudový spoj mezi kabelovým okem a svorníkem transformátoru

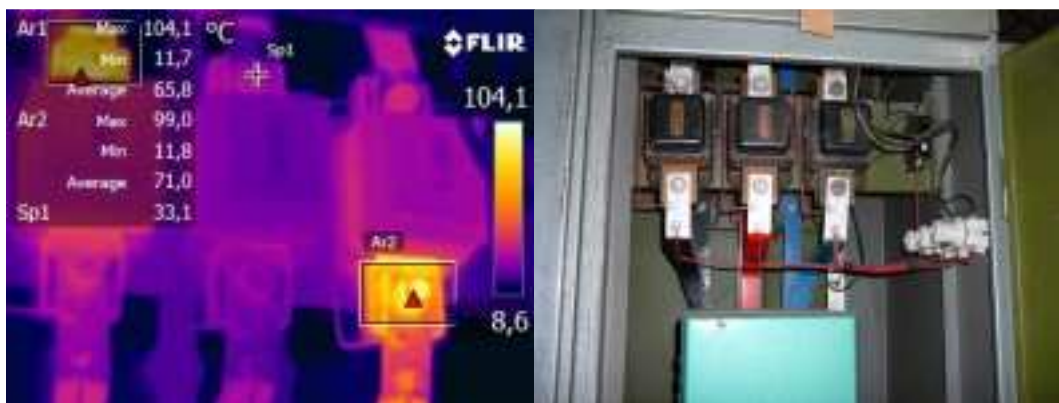


Klasifikační stupeň: 4 $\Delta t_1 = 122,9^\circ\text{C}$ Popis: rozvaděč nn

Závada: oteplení svorníku pojistkového spodku

Teplota, vlhkost vzduchu, rychlost větru: 18 °C, 50 %, 1 m/s

Obr. 0-3 Proudový spoj mezi kabelovým okem a svorníkem pojistkového spodku

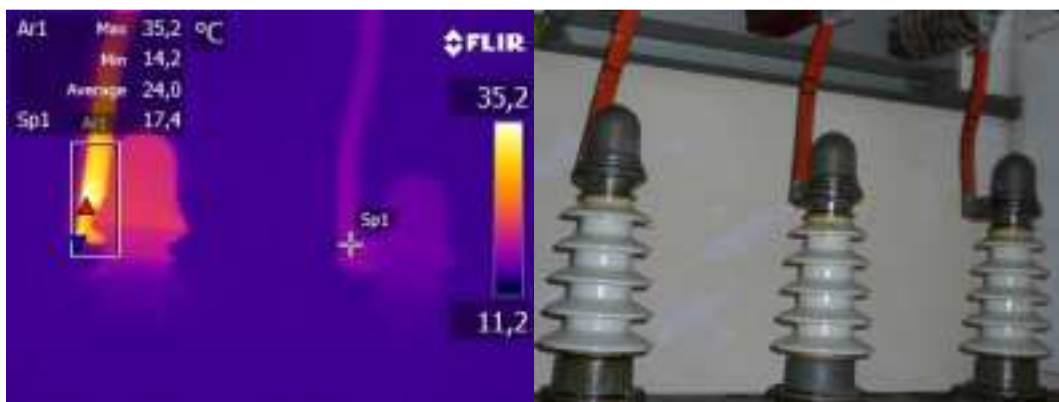


Klasifikační stupeň: 4 $\Delta t_1 = 71^\circ\text{C}, \Delta t_2 = 65,9^\circ\text{C}$ Popis: rozvaděč nn

Závada: oteplení šroub. spoje TA

Teplota, vlhkost vzduchu, rychlost větru: 2 °C, 70 %, 0 m/s

Obr. 0-4 Proudový spoj měřící transformátor proudu

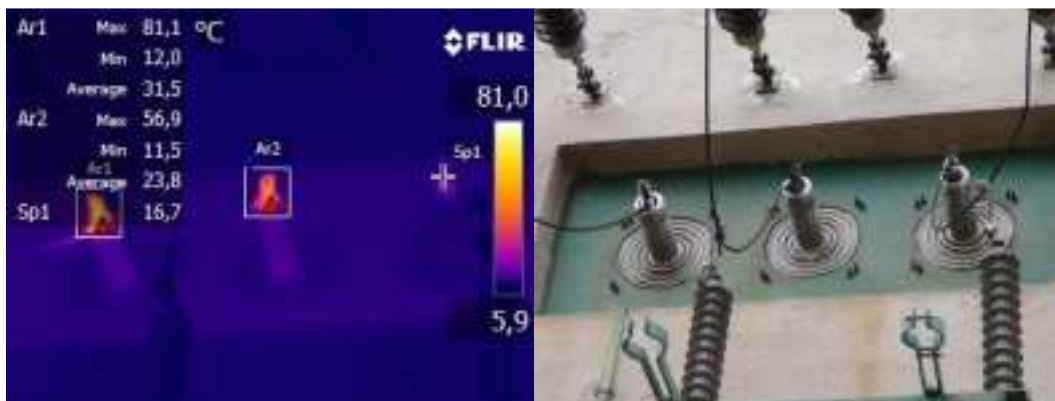


Klasifikační stupeň: 2 $\Delta t_1 = 17,8^\circ\text{C}$ Popis: kabelová koncovka 35 kV

Závada: oteplení šroub. spoje

Teplota, vlhkost vzduchu, rychlost větru: 8 °C, 59 %, 0 m/s

Obr. 0-5 Proudový spoj kabelové koncovky a pásového vodiče

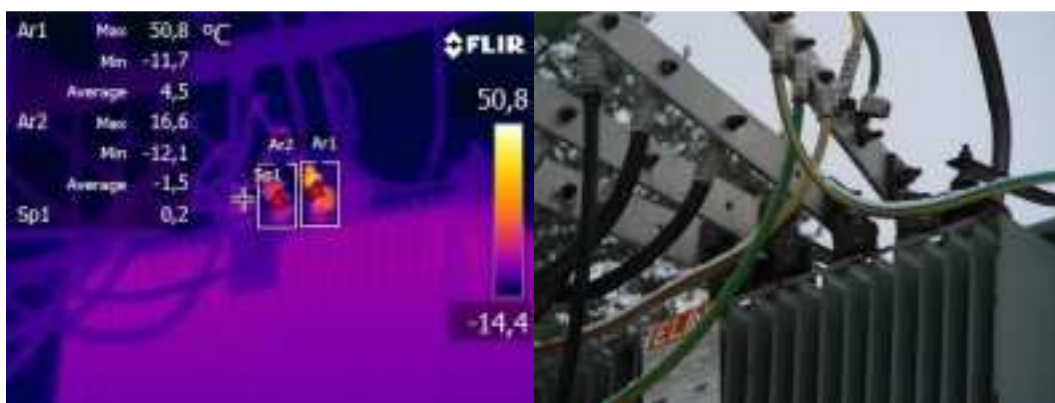


Klasifikační stupeň: 4 $\Delta t_1 = 64,4^\circ\text{C}$, $\Delta t_2 = 40,2^\circ\text{C}$ Popis: průchodka 35 kV

Závada: oteplení svorníku průchodky

Teplota, vlhkost vzduchu, rychlost větru: 9 °C, 56 %, 1 m/s

Obr. 0-6 Oteplení svorníku průchodky



Klasifikační stupeň: 3 $\Delta t_1 = 50,6^\circ\text{C}$, $\Delta t_2 = 16,4^\circ\text{C}$ Popis: transformátor vn/nn

Závada: oteplení šroub. spoje

Teplota, vlhkost vzduchu, rychlost větru: 0 °C, 53 %, 1 m/s

Obr. 0-7 Proudový spoj pásového vodiče a svorníkového oka transformátoru

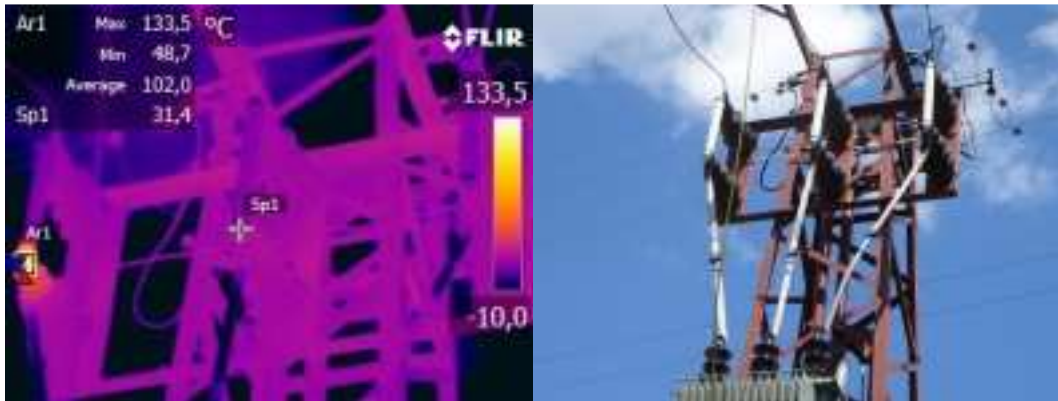


Klasifikační stupeň: 2 $\Delta t_1 = 16,7^\circ\text{C}$ Popis: odpojovač 22 kV

Závada: oteplení šroub. spoje

Teplota, vlhkost vzduchu, rychlost větru: 10 °C, 58 %, 0 m/s

Obr. 0-8 Proudový spoj na odpojovači

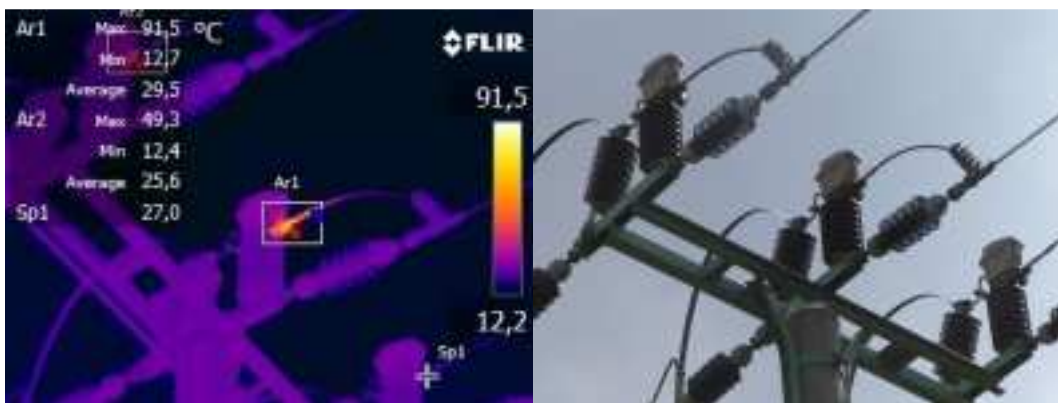


Klasifikační stupeň: 4 $\Delta t_1 = 102,1^\circ\text{C}$ Popis: pojistka 35 kV

Závada: oteplení pera pojistkového spodku

Teplota, vlhkost vzduchu, rychlost větru: 24 °C, 53 %, 0,5 m/s

Obr. 0-9 Proudový spoj pojistkový spodek

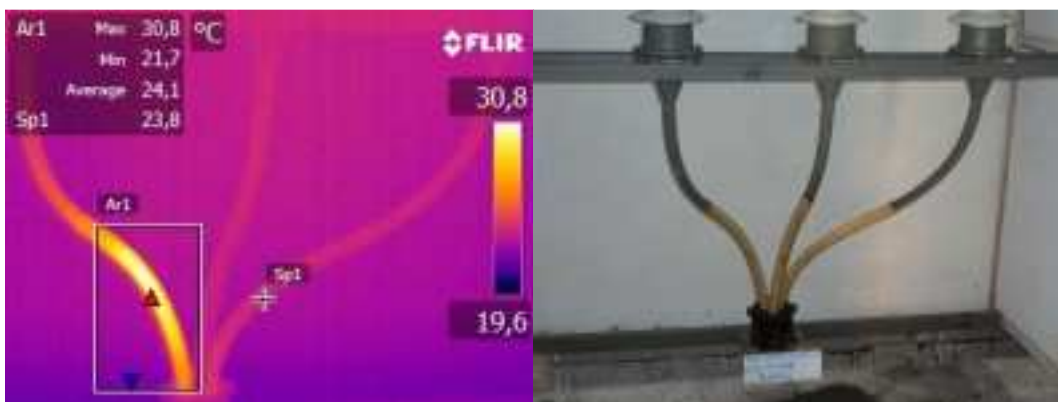


Klasifikační stupeň: 4 $\Delta t_1 = 64,5^\circ\text{C}, \Delta t_2 = 22,3^\circ\text{C}$ Popis: odpínač 35 kV

Závada: oteplení připojovací svorky odpínače

Teplota, vlhkost vzduchu, rychlost větru: 26 °C, 62 %, 1 m/s

Obr. 0-10 Proudový spoj mezi kabelovým okem a připojovací svorkou odpínače



Klasifikační stupeň: 2 $\Delta t_1 = 7^\circ\text{C}$ Popis: kabel 35 kV

Závada: oteplení žíly kabelu

Teplota, vlhkost vzduchu, rychlost větru: 16 °C, 56 %, 0 m/s

Obr. 0-11 Oteplení žíly kabelu



Klasifikační stupeň: 4 $\Delta t_1 = 63,2^\circ\text{C}$ Popis: střídač

Závada: oteplení vinutí tlumivky

Teplota, vlhkost vzduchu, rychlost větru: 20 °C, 33 %, 0 m/s

Obr. 0-12 Oteplení vinutí tlumivky

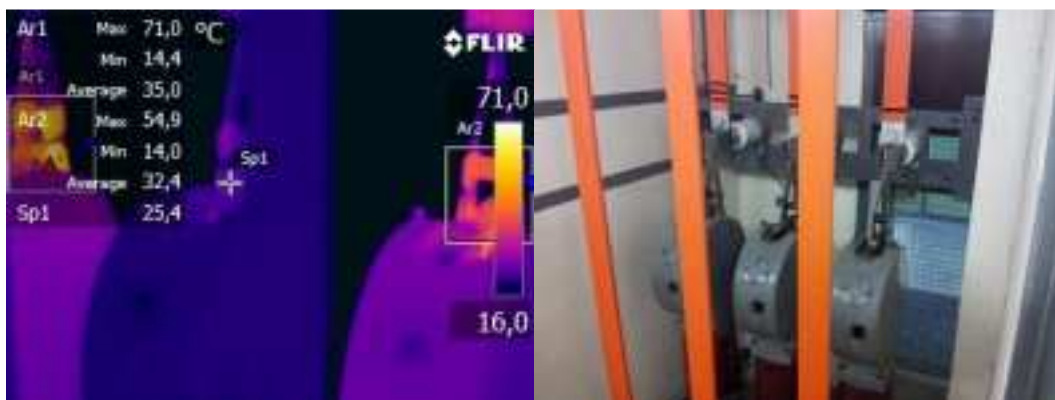


Klasifikační stupeň: 4 $\Delta t_1 = 86,2^\circ\text{C}$ Popis: odpínač 22 kV

Závada: oteplení svorky odpínače

Teplota, vlhkost vzduchu, rychlost větru: 4 °C, 67 %, 1,5 m/s

Obr. 0-13 Proudový spoj měděného pásku a AlFe lana

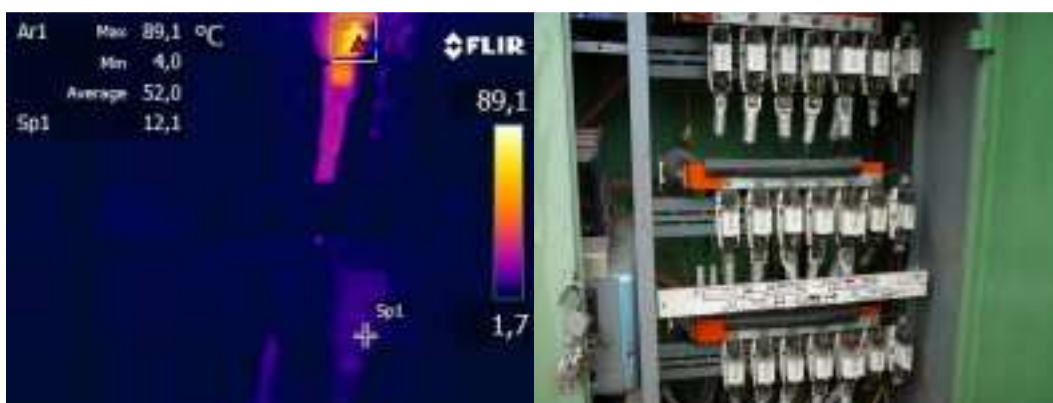


Klasifikační stupeň: 3 $\Delta t_1 = 45,6^\circ\text{C}, \Delta t_2 = 29,5^\circ\text{C}$ Popis: vypínač 6 kV

Závada: oteplení otočného čepu kontaktu vypínače

Teplota, vlhkost vzduchu, rychlost větru: 12 °C, 45 %, 0 m/s

Obr. 0-14 Oteplení otočného čepu kontaktu vypínače



Klasifikační stupeň: 4 $\Delta t_1 = 86,2^\circ\text{C}$ Popis: rozvaděč nn

Závada: oteplení kontaktu pojistky

Teplota, vlhkost vzduchu, rychlost větru: 3 °C, 69 %, 1 m/s

Obr. 0-15 Proudový spoj pojistkový spodek

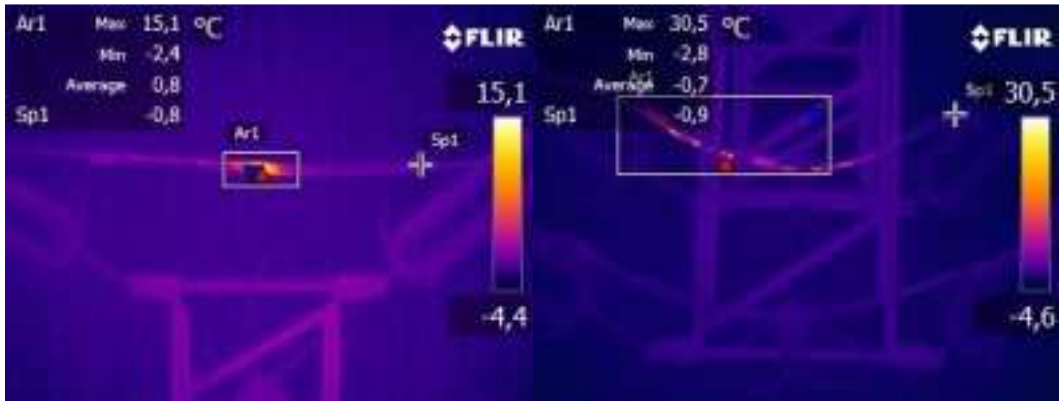


Klasifikační stupeň: 3 $\Delta t_1 = 56,5^\circ\text{C}$ Popis: kabel 35 kV

Závada: oteplení hlavy kabelové koncovky

Teplota, vlhkost vzduchu, rychlost větru: 15 °C, 57 %, 0 m/s

Obr. 0-16 Oteplení hlavy kabelové koncovky



Klasifikační stupeň: 2

$$\Delta t_1 = 15,9^\circ\text{C}, \Delta t_2 = 31,4^\circ\text{C}$$

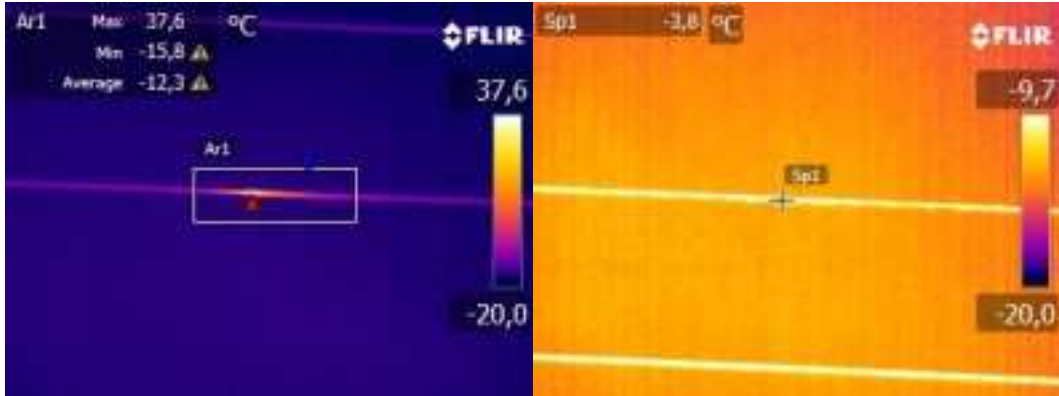
Závada: svorky AlFe lana

Popis: vedení 110 kV

Teplota, vlhkost vzduchu, rychlost větru: -1 °C, 50 %, 1,5 m/s



Obr. 0-17 Proudový spoje svorky AlFe lana



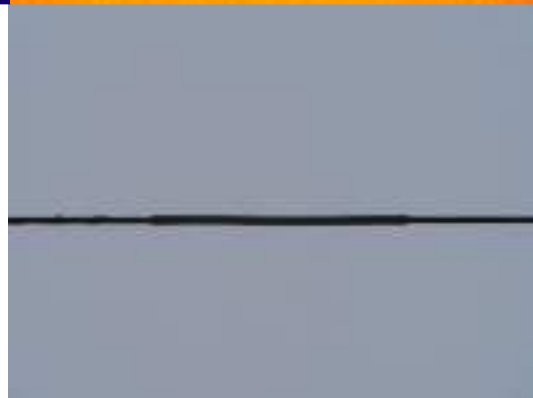
Klasifikační stupeň: 3

$$\Delta t_1 = 41,4^\circ\text{C}$$

Závada: spojka AlFe lana

Popis: vedení 110 kV

Teplota, vlhkost vzduchu, rychlost větru: -4 °C, 66 %, 2 m/s



Obr. 0-18 Oteplení spojky AlFe lana