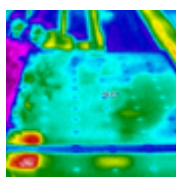


## Využitie termokamery pri inšpekcii solárnej elektrárne

Prekop Juraj · Elektrotechnika

19.05.2014



Problematika sa zaoberá možnosťami rýchlej a bezkontaktnéj kontroly funkčnosti fotovoltaických polí a príslušných energetických rozvodov. Porovnávajú sa jednotlivé optické metódy, ich prednosti a nevýhody. V článku sa popisuje použitie infračervenej metódy termografickej kontroly panelov, ktorá je v praxi najpoužívanejšia. Posudzujú sa faktory ktoré ovplyvňujú meranie a popisuje sa správny postup ako efektívne vykonávať termografickú kontrolu. Na záver sa uvádzajú praktické merania s vysvetlenými detailami na jednotlivých snímkach.

### 1. Úvod

V praxi sme sa pri inštaláciách solárnych elektrární zaoberali s problematikou ich kontroly. Solárna elektráreň pozostáva zo samotných fotovoltaických polí, ktoré sú rozmiestnené vo veľkých vzdialenostiach od rozvodne. Na viac polia sú v záujme zachovania čo najvyššieho zisku počas celého roka rozmiestnené podľa orientácie terénu a v takých vzdialenostiach, aby si navzájom netienili ani v čase keď sa slnko nachádza už nízko nad horizontom. Z týchto dôvodov narastá dĺžka kabeláže a pribúda množstvo pripojovacích bodov - potenciálnych chybových miest. Solárne pole je rozdelené do niekoľkých vetiev tak, aby súčet napätí a výkonov panelov v jednej vetve neprekročil maximálne prevádzkové hodnoty na vstupe meniča.

Každá vetva solárneho poľa musí byť istená proti prepätiam jednosmernými prepäťovými ochranami. Ochrany sa umiestňujú blízko solárnych panelov a ďalšie ochrany sú na konci vedenia pri vstupoch do meničov alebo v jednotlivých meničoch. Menič na konci vedení mení jednosmerný prúd panelov na striedavý. Zvyčajne sa v jednej elektrárni nachádza viac ako jeden menič. V elektrárňach s vysokým výkonom pribudne ešte transformátor ktorý umožňuje pripojenie systému na vn. Každá elektráreň disponuje množstvom istiacich obvodov (prepäťové ochrany DC a AC), kabeláže a elektromera, prípadne aj meracích prístrojov na sledovanie a reguláciu výkonov.

### 2. Pravidelná prehliadka komplexu

Podnetom pre kontrolu býva predovšetkým znížená účinnosť elektrárne. Solárne moduly sú zhotovené zo svetlo citlivých polovodičových článkov, ktoré generujú

jednosmerný prúd. V závislosti od výrobcov sa na trhu stretávame s rozličnými technológiami a použitými materiálmi, napr. poly kryštalickej kremík, tenko vrstvom materiál CdTe a GaAs. Solárne články sú v paralelných radoch modulov spolu zapojené tak, aby sa dosiahlo potrebné napätie a výkon panela. Počas normálnej prevádzky pri slnečnom žiarení každý solárny článok generuje napätie, ktoré sa vhodným pospájaním s ostatnými článkami sčítava a tak sa zaistí potrebné výstupné napätie solárneho modulu. Pri sériovom zapojení jednotlivých fotovoltaických článkov i celých panelov, v rámci tzv. stringu, tečie všetkými článkami rovnaký prúd. Ak nie sú všetky články homogénne ožiarené slnkom (vplyvom oblačnosti apod.) alebo ak je ich výkonnosť znížená vplyvom chyby (napr. poškodená bunka panela) alebo nečistoty, vyrábajú jednotlivé články rôzne prúdy.

Pretože v sériovom zapojení musí byť prúd pretekajúci všetkými článkami rovnaký, dáva celý string iba taký prúd, aký je produkovaný najhoršie fungujúcim solárnym článkom. Vzniknuté jednosmerné napätie sa v striedači zmení na požadované striedané napätie. Ak solárny článok nepracuje alebo nevyrába žiadnu energiu, pretože neabsorbuje žiadne slnečné žiarenie, alebo môže napr. vykazovať opačnú polaritu, prejavuje sa ako spotrebič namiesto generátora, takže môže vo zvýšenej miere premieňať energiu na teplo. Zo skúseností môže teplota poškodeného článku vystúpiť aj na 100°C. Prináša to so sebou riziko požiaru. Ďalším dôvodom prečo pravidelne kontrolovať solárne polia je bezpečnosť prevádzky celého komplexu. Hlavnými príčinami chýb na fotovoltaických paneloch sú spôsobené:

- Nedodržaním jednotnej technológie pri výrobe
- Mechanické namáhanie pri preprave panelov
- Pôsobením deštruktívnych činidiel
- Nesprávnou inštaláciou
- Falzifikát panela

### 3. Metódy kontrolných meraní solárnych panelov

Solárne panely možno kontrolovať priamymi a nepriamymi metódami. Priame metódy vyžadujú odpájanie jednotlivých panelov od poľa. Metódy sú vhodné predovšetkým na porovnávanie jednotlivých typov, prípadne na časové porovnanie panelov. Zároveň sa dajú týmito metódami zistiť i nepatrné rozdiely v chovaní panelov a overiť ich reálnu funkčnosť. Pri využívaní týchto metód sa dá využiť to, že vieme zaistiť konkrétne podmienky prostredia. Zafažovaním panela vieme overiť dynamickú charakteristiku. Priame metódy: použitie analyzátoru solárnych panelov - VA charakteristika panelov

- Meranie výkonu
- Napätie naprázdno
- Napätie pri maximálnom výkone
- Skratový prúd
- Prúd pri maximálnom výkone

#### 3.1 Flash test

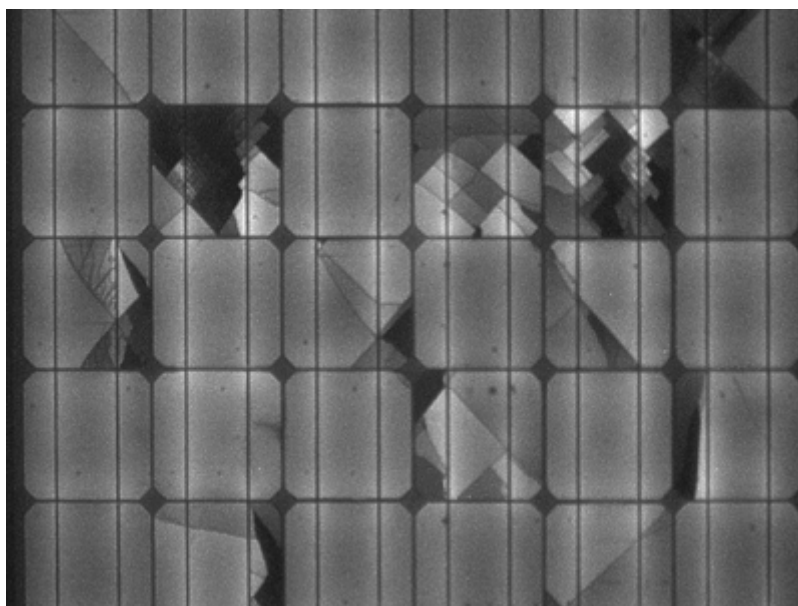
Patrí medzi základné merania výkonových charakteristík fotovoltaických panelov. Každý panel by mal za svoj život absolvovať aspoň jedno meranie a to vo výrobe,

prakticky je to však inak. Výstupom merania sú tzv. flashdata, ktoré sú určené minimálne výstupným špičkovým výkonom, napätím naprázdno, prúdom nakrátko, pracovným napätím, prúdom, výkonom a prípadne účinnosťou alebo fill faktorom. Panely sú testované za podmienok STC deklarovanej normami IEC - intenzita 1 000 W/m<sup>2</sup>, AM 1,5, teplota 25 °C. (1) O priamych metódach merania účinnosti panelov nemá význam uvažovať vzhľadom na obrovskú rozsiahlosť celého komplexu. Do úvahy pripadajú iba nepriame - pozorovacie metódy.

### 3.2 Elektroluminiscenčný test

Je to skúška pre zistenie poškodenia solárnych panelov monokryštalických, polykryštalických ale aj amorfných. Zisťuje presnú príčinu zníženého výkonu panela a analyzuje kvalitu panela a chybu životnosti. Použitá metóda svojou podstatou umožňuje detekciu, zviditeľnenie materiálových a výrobných chýb solárneho článku (2). Chyby, ktoré umožňuje tento test zistiť:

- Mikropraskliny, praskliny
- Lokálne odtrhnuté zberacie pásy
- Prerušené sieťotlačou nanášané Ag zberacie prúžky
- Prasklinami oddelené plochy
- Skraty medzi plochami polovodiča



Obr.1. Ukážka poškodeného panela zisteného elektroluminiscenčným testom

Aj popraskaný článok emituje svetlo homogénne takmer z celej svojej plochy, čo nepriamo znamená, že jeho fotovoltaiický výkon je nezmenený oproti nominálnemu. Je to spôsobené tým, že sa jednotlivé úlomky kremíkového kryštálu dotýkajú a náboj tak medzi nimi môže voľne prechádzať. Avšak v dôsledku striedania nízkych a vysokých teplôt behom prevádzky panelu a rozdielných rozťažností kremíku a okolitého materiálu časom môže dôjsť k zväčšeniu jednotlivých prasklín a k vytvoreniu bariér pre prechod náboja. Výsledkom je dramatické zníženie účinnosti celého článku a tým i zníženiu výkonu celého panela, ktorý môže byť vlastne úplne znehodnotený. Skúška dokáže overiť homogenitu a pomer prímiesí v kryštalickom kremíku. Touto skúškou získa zákazník obraz o kvalite panelu alebo výsledok poruchy živelnej katastrofy od

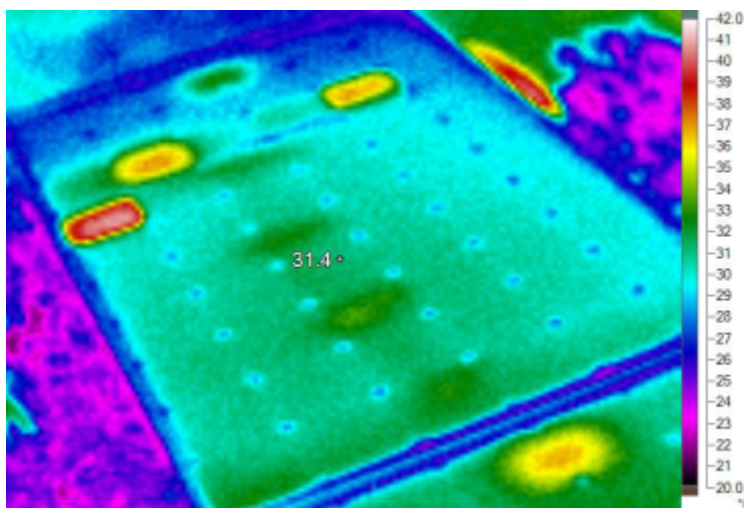
vetra, vody, ladovca alebo havarovaného kamióna.

### 3.3 Termografický test

Najbežnejšou metódou kontroly solárnych polí je meranie pomocou termokamery. Takéto meranie prináša so sebou množstvo výhod. Výsledky meraní sa okamžite odčítajú z prehľadných snímok na ktorých jasne vidno vzniknuté defekty. Na rozdiel od väčšiny iných metód - termokameru možno použiť na meranie inštalovaných solárnych panelov behom ich normálnej prevádzky. Nesporne jednou z najväčších výhod je to, že meranie trvá veľmi krátky čas. Už z diaľky sa dá jednoduchým pohľadom určiť či bude potrebná bližšia analýza poľa.

Súčasťou každého snímku je zobrazené použité spektrum snímky na ktorom vidno teplotné rozloženie farieb. Treba si uvedomiť, že ak je použité automatické prestavovanie spektra, každý snímok má iné rozloženie teploty zobrazenej vo farbách a na prvý pohľad sa zdá že na snímke je anomália, pritom rozdiel vo farbe nemusí predstavovať dramatickú zmenu teploty. Je preto dobré ponechať si manuálny rozsah stále nemenný. V skutočnosti sa však počas dlhého merania počasie mení a spektrum treba často prestavovať. Zjednotiť farebné spektrum sa dá dodatočne v priloženom softwéri.

S termokamerou bude vznikajúci defekt zachytený ešte pred tým ako sa prerastie do skutočného problému. Na nasledujúcom obrázku sú jasne viditeľné postupne degradujúce solárne články. Na snímke sú zachytené tri štádiá postupne sa zhoršujúcej účinnosti na článkoch. S istotou možno predpokladať, že články zafarbené na zeleno budú postupne degradovať vplyvom zaťažovania a meniacou sa teplotou, až napokon prestanú produkovať prúd a začnú sa správať ako záťaž.



Obr.2. Snímka zachytáva tri štádiá postupne sa zhoršujúcich fotovoltaických článkov na solárnom paneli

### 4. Podmienky ovplyvňujúce termografickú kontrolu solárnych panelov

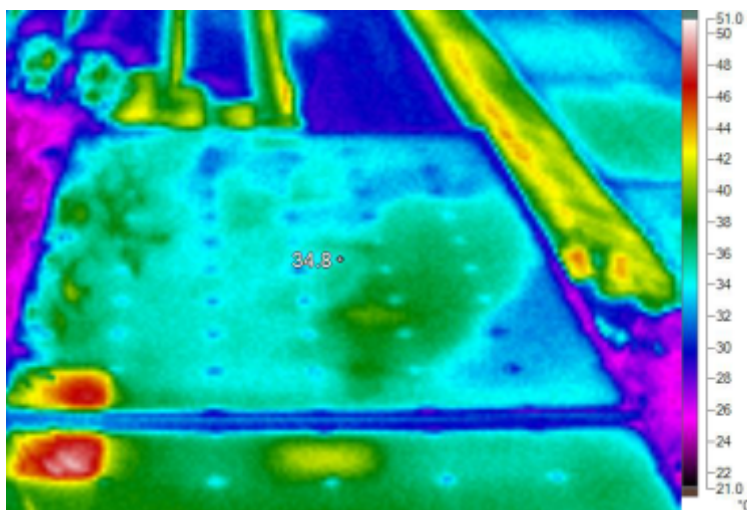
Každá termokamera nie je vhodná pre kontrolu solárnych článkov. Existujú určité zásady a postupy, ktoré je treba dodržiavať, aby kontroly boli účinné a bolo zaistené aby boli správne interpretované výsledky meraní. Popíšeme si najdôležitejšie faktory vplyvajúce na presnosť merania. Okrem toho je pri používaní termokamery potrebná

určitá prax. Obsluha si musí správne interpretovať odrazy a tieň dopadajúce na merané objekty. Pri meraní vykonávanom na streche alebo v nezaistených polohách môže ísť o značný problém. Dôležité je poukázať aj na charakter povrchu - materiálu na ktorom odčítavame teplotu.

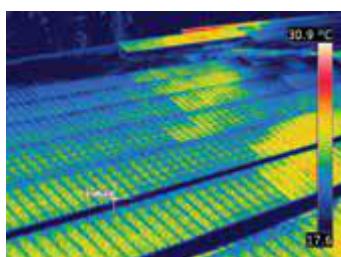
#### 4.1 Atmosférické podmienky prostredia

Pre dosiahnutie dostatočného teplotného kontrastu pri kontrole solárnych panelov v teréne je potrebné slnečné ožiarenie aspoň  $500 \text{ W/m}^2$  alebo viac. Pre kvalitnejšie výsledky je odporúčané slnečné ožiarenie  $700 \text{ W/m}^2$ . Slnečné ožiarenie je definované ako okamžitý výkon dopadajúci na povrch v jednotkách  $\text{kWh/m}^2$ , ktorý môže byť meraný buď pyranometrom - merané je priame slnečné žiarenie a žiarenie rozptýlené atmosférou vrátane žiarenia odrazeného od alebo pyrliometrom - merané je priame slnečné žiarenie. Dôležité je umiestnenie solárneho poľa, ako sa na ňom prejavujú tieň a odrazy od okolitých predmetov. Ideálne je bezoblačné počasie.

Oblačnosť sa prejavuje na povrchu ako tieň, avšak závisí od povrchu panela. Nízka teplota prostredia dopomôže k zvýšeniu teplotného kontrastu snímok. Pri termografickej kontrole by mala byť jasná obloha, pretože mraky znižujú intenzitu slnečného žiarenia a tiež spôsobujú rušenie v dôsledku vzniknutých odrazom. Informatívne snímky možno získať aj pri zatiahnutej oblohe, za predpokladu, že termokamera je dostatočne citlivá. Potrebné je bezvetrie, pretože prúdenie vzduchu pri povrchu solárneho modulu pôsobí konvenčné chladenie, a tým sa znižuje teplotný gradient. Čím je nižšia teplota vzduchu, tým je vyšší potenciálny teplotný kontrast. Preto sa tieto merania vykonávajú väčšinou v skorých ranných hodinách.



Obr.3. Snímka zobrazuje odraz oblakov a vegetácie na paneli s chybným článkom



Obr. 4. Tento termogram ukazuje veľké plochy sa zvýšenými teplotami. Bez bližšej informácie, nie je zjavné, či sa jedná o teplotné anomálie alebo tieň / odrazy.

Ďalším spôsobom ako zvýšiť teplotný kontrast je odpojiť panel od záťaže, čo zamedzí prietoku prúdu a následne dochádza k ohrevu len samotným slnečným žiarením. Potom je záťaž pripojená a články sú pozorované pri ohreve. Za normálnych okolností by však mal byť systém kontrolovaný za bežných prevádzkových podmienok a pri zaťažení. V závislosti od typu fotovoltaiického panelu a druhu poruchy, môžu merania bez zaťaženia alebo pri skrate poskytnúť doplňujúce informácie.

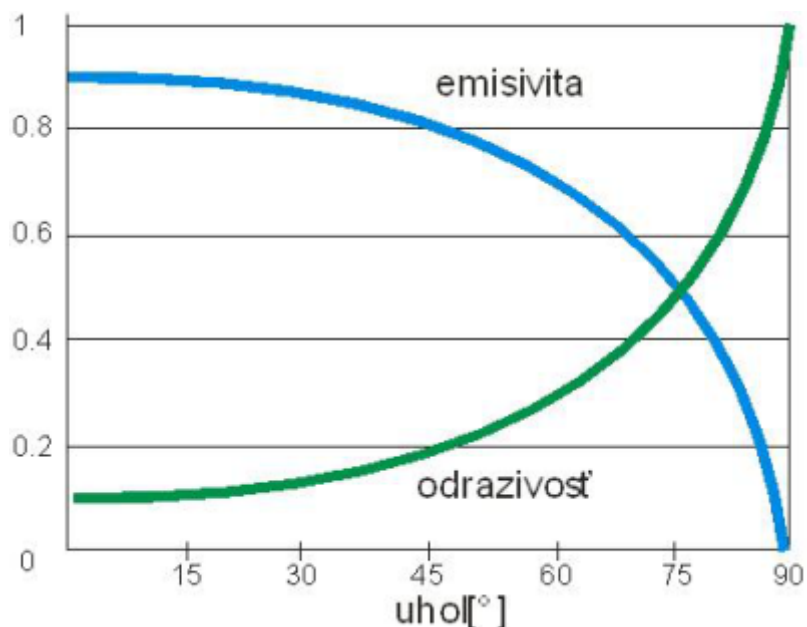
## 4.2 Typ kamery

Ručné termokamery pre inšpekciu stavieb majú zvyčajne nechladený detektor typu Mikrobolometer ktorý je citlivý vo vlnovom pásme 8-14 mikrometrov (3). Sklo v tejto oblasti ale nie je transparentné. Ak sú solárne články kontrolované z prednej strany, termokamera vidí rozloženie teplôt na povrchu skla, ale len nepriamo rozloženie teploty v podkladových článkoch. Preto sú teplotné rozdiely na sklenenom povrchu solárneho panela, ktoré možno merať a vidieť, malé. Aby tieto rozdiely boli dostatočné, musí mať používaná termokamera pre tieto kontroly teplotnú citlivosť  $\leq 80\text{mK}$ . Ak je treba na termograme jasne zobrazíť malé teplotné rozdiely, mala by kamera tiež umožňovať manuálne nastavenie úrovne a rozsahu.

Fotovoltaiické panely bývajú namontované v vysoko tepelne reflexných hliníkových rámoch. Tie sa javia na snímkach ako extrémne chladné časti, pretože odrážajú tepelné žiarenie z oblohy. V praxi to znamená, že termokamera bude v týchto oblastiach zobrazovať teplotu pod  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Termokamera prispôsobuje meraný rozsah prostrediu, resp. vyhodnocuje maximálnu a minimálnu úroveň na snímke. Ak v takejto snímke zachytíme objekt s extrémne nízkou alebo vysokou teplotou, nezachytíme v obraze drobné detaily a panel vyhodnotíme ako bezchybný. Na dosiahnutie vysokého kontrastu termogramu je potrebná neustála ručná korekcia meracieho rozsahu. Riešením je tzv. DDE (Digital Detail Enhancement - digitálne zvýraznené detailov) funkcia, ktorá automaticky optimalizuje kontrast obrazu v scénach s vysokým dynamickým rozsahom a ten už nie je treba nastavovať ručne. Termokamera s funkciou DDE je preto vhodná pre rýchle a presné kontroly solárnych panelov.

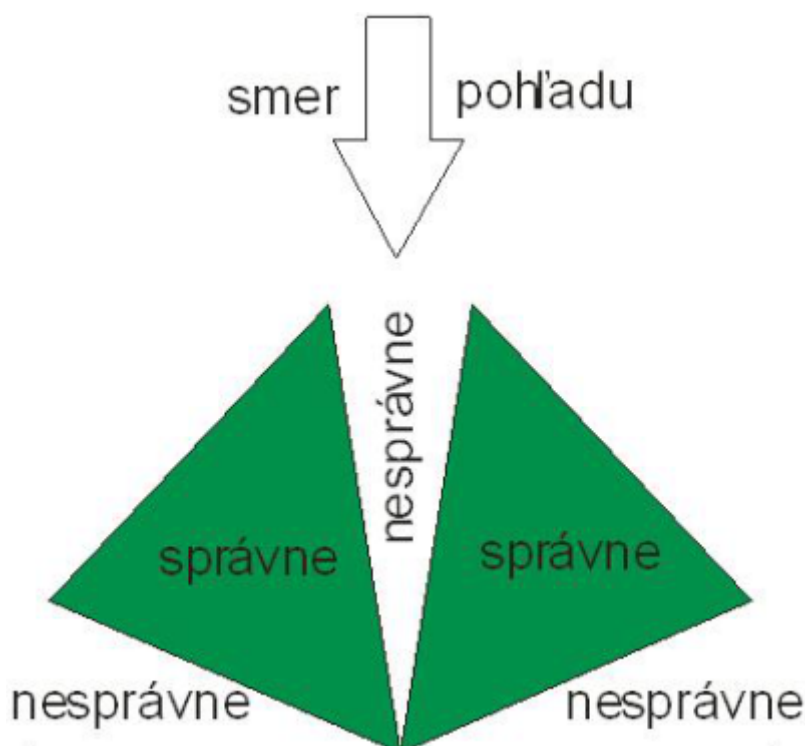
## 4.3 Uhol merania

Jedným z výrazných faktorov merania je odrazivosť a emisivita materiálu. Aj keď sklo má vo vlnovom pásme 8-14  $\mu\text{m}$  emisivitu v rozsahu 0.85-0.9, bezdotykové meranie teploty jeho povrchu nie je jednoduché. Odrazy okolitého tepelného žiarenia na jeho povrchu môžu viesť k chybnéj interpretácii nameraných údajov a nesprávnemu stanoveniu horúcich miest. Aby sa zabránilo odrazom termokamery a jej obsluhy v skle, nemalo by meranie prebiehať kolmo ku kontrolovanému panelu. Emisivita je však kolmo najvyššia, a klesá s rastúcim uhlom. Zorný uhol  $5\text{-}60^{\circ}$  je preto dobrým kompromisom ( $0^{\circ}$  tu zodpovedá kolmému pohľadu).



Obr. 5. Závislosť uhla merania na emisivite skla.

Odporúčané uhly merania sú vyznačené zelenou farbou. V praxi sa ale často stáva, že nie je možné docieľiť správny pozorovací uhol.



Obr. 6. Odporúčaný uhol merania (zelená) a uhol, ktorého je nutné sa pri termografickom meraní vyvarovať.

#### 4.4 Meranie z diaľky

Pri meraní nie je vždy ľahké docieľiť vhodný uhol. V mnohých prípadoch možno dosiahnuť uhol použitím statívu. V náročnejších podmienkach je nevyhnutné použitie mobilnej pracovnej plošiny alebo dokonca letu vrtuľníkom nad solárnymi panelmi. V takýchto prípadoch môže byť väčšia vzdialenosť od cieľa výhodou, pretože je vidieť väčšiu plochu naraz. Pre zaistenie dostatočnej kvality snímok by ale mala byť pre tieto



väčšie vzdialenosti použitá termokamera s rozlíšením obrazu aspoň 320 × 240 pixlov, najlepšie však 640 × 480 pixlov. Kamera by mala mať tiež vymeniteľný objektív, aby technik mohol prejsť na meranie teleobjektívom, t.j. napríklad pri meraní zo spomínaného vrtulníka. Teleobjektív je však vhodné používať iba s termokamerou, ktoré majú dostatočne vysoké rozlíšenie obrazu. Termokamery s nízkym rozlíšením nebudú schopné pri diaľkovom meraní rozlíšiť drobné teplotné obrazce, ktoré ukazujú na chyby solárnych panelov.

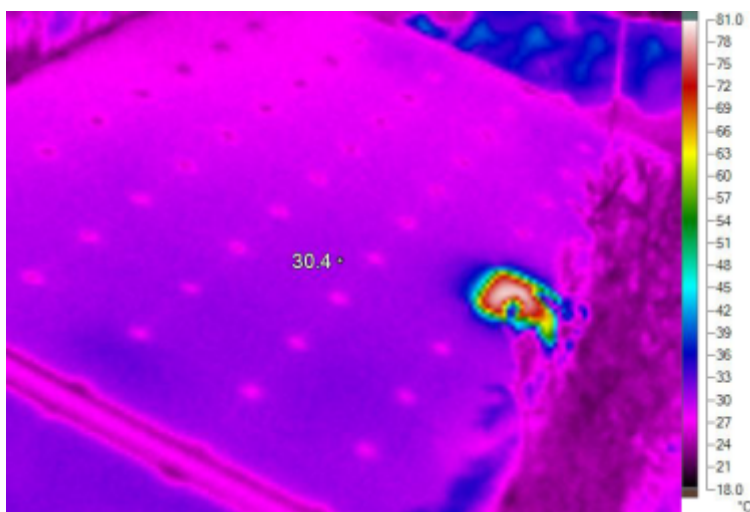
#### 4.5 Kontrolné meranie zo zadnej strany

Vo väčšine prípadov možno termokamerou kontrolovať inštalované fotovoltaické moduly z ich zadnej strany. Táto metóda eliminuje rušivé odrazy od slnka a mrakov. Navyše môžu byť teploty namerané na zadnej strane vyššie, pretože bunka je meraná priamo a nie cez povrch skla. (4)

#### 4.6. Čo možno pozorovať na termografických snímkach

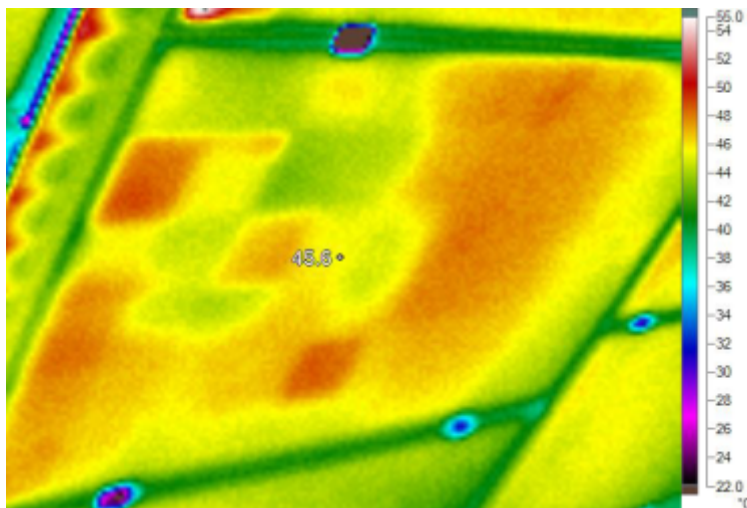
Ak sú niektoré časti solárneho panelu teplejšie než ostatné, budú teplé oblasti jasno rozpoznateľné termokamerou. Podľa toho kde sa horúce miesta nachádzajú a aký majú tvar, dá sa definovať o aký typ v tomto prípade ide.

- Celý panel je teplejší ako zvyčajne zrejme by to mohlo naznačovať problémy s pripojením.
- Jednotlivé bunky alebo reťazce buniek sa prejavujú ako horúce miesta alebo ako teplejšia určitá blízka skupina článkov v paneli, pravdepodobne je chybná bypassová dióda alebo trpia články vnútornými skratmi
- Miestne malé flaky - môže sa jednať o dutiny alebo o drobné znečistenie

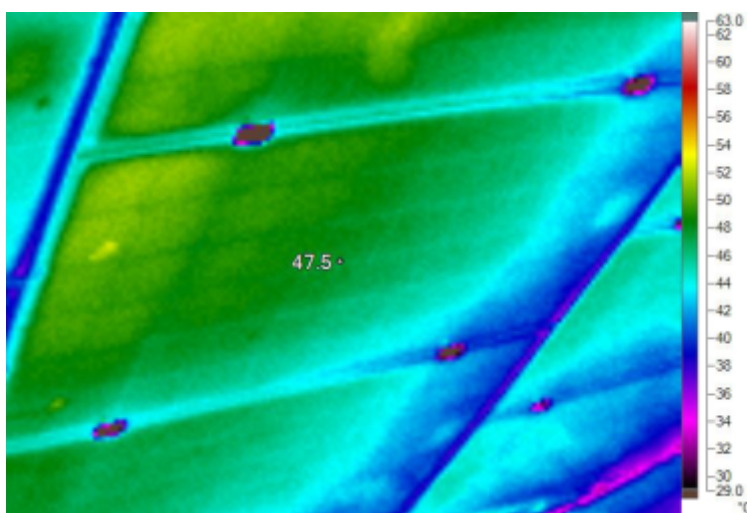


Obr.7. Viditeľne zničený článok dosiahol teplotu na povrchu až 81°C





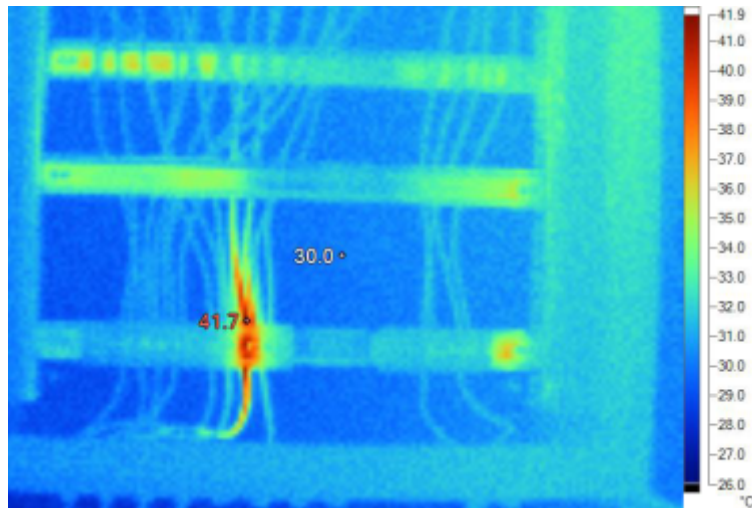
Obr. 8. Skupina článkov sa začína prehrievať. Postupom času sa úplne znehodnotia. Meranie poukazuje na problém s bypassovými diódami.



Obr. 9. Malá škvrna na paneli je iba drobné znečistenie, nejde o chybu vo fotovoltaickom článku

#### 4.7. Merania v rozvádzačoch

Ďalším miestom, kde bude termografia veľmi užitočná pri vykonávaní preventívnej a prediktívnej údržby, sú spojovacie body v rozvádzačoch, ktoré sa môžu časom uvoľňovať. Vedie to k prevádzkovým problémom a zbytočným poruchám obzvlášť, ak má fotovoltaická elektráreň väčšie množstvo pripojení jednosmerného a striedavého prúdu. Opäť sa kladie dôraz predovšetkým na bezpečnosť. Každé uvoľnené miesto vytvára tepelnú stratu vo forme Joulovho efektu. Ako vidno na nasledujúcich snímkach, termografická kontrola vie rýchlo odhaliť slabo dotiahnutý spoj v spleti pripojení.



Obr.10. Ukážka slabo zaisteného prípojného miesta.

Termokamera sa uplatní aj pri kontrole striedačov a transformátorov pri hľadaní problémov so zvyšujúcim sa oteplením ich súčastí. Pri transformátoroch pre stredné napätie môžu byť problémy na nízkonapäťovej alebo na vysokonapäťovej strane, alebo môže ísť o problémy so samotným vinutím. Termokamera sa dá využiť, napríklad pri monitorovaní stavu polohovacích motorov. Umožní totiž odhalenie rôznych príčin ako sú napríklad podmienky okolia, nesprávne dimenzovanie alebo poruchovú prevádzku, ktorá sa odhalí zvýšeným zahrievaním, čím je ohrozená ich dlhodobá životnosť. Celkový pohľad do rozvodne tiež naznačí teplotné pomery v miestnosti. Napovie o účinnosti vetrania a prúdenia vzduchu.

## 5. Zhrnutie

Termografické kontroly fotovoltaických systémov umožňujú rýchlu lokalizáciu chýb na úrovni panelov i jednotlivých buniek, rovnako tak ako detekciu možných problémov elektrického pripojenia. Kontroly sa vykonávajú pri prevádzke elektrárne bez potreby odpájať jednotlivé celky od rozvodne. Pre vypovedajúce snímky musia byť dodržané minimálne spomínané podmienky. Potrebná je taktiež určitá skúsenosť pri vyhodnocovaní merania. Pri meraní by mala byť použitá vhodná termokamera so správnymi doplnkami. Je dôležité aby sa meranie vykonávalo v dostatočnom slnečnom žiarení a najlepšie pri nemennom počasí. Uhol merania musí byť zachovaný v rámci primeraných medzí (medzi 5° a 60°). Musia sa eliminovať odrazy a tieň na meranom objekte.

Termokamery slúžia primárne na vyhľadanie chýb. Klasifikácia a hodnotenie zistenie anomálií vyžaduje dôkladné pochopenie solárnej technológie, znalosť kontrolovaného systému a možnosť dodatočných elektrických meraní. Nutnosťou je príslušná dokumentácia, ktorá by mala obsahovať všetky podmienky kontroly, hodnoty dodatočných meraní a ďalšie relevantné informácie. Kontroly termokamerou - počnúc kontrolou kvality vo fáze inštalácie a končiac pravidelnými prehliadkami - predstavujú úplný a jednoduchý systém. Ten pomôže udržať vysokú účinnosť solárnych panelov a predĺžiť ich životnosť. Použitie termokamery pre kontrolu solárnych panelov preto výrazne zvýši prevádzkovateľovi návratnosť jeho investície.

## Podakovanie

Táto publikácia bola vytvorená v rámci projektu Výskum technologickej základne pre návrh aplikácií využívania obnoviteľných zdrojov energie v praxi, ITMS kód 26220220083 Operačného programu Výskum a vývoj hradený z Európskeho fondu regionálneho rozvoja.

## Literatúra

1. Ing. Stanislav Kubáč. [Online]  
<http://www.solartechnika.sk/solartechnika-12011/kontrola-kvality-fotovoltaických-modulu-.html>
  2. ABOT fotovoltická zařízení s.r.o., [Online]  
<http://www.abot.cz/cs/sluzby/diagnostika-fv-modulu-a-fve>
  3. GEOTRONICS Praha, s.r.o., [Online]  
<http://www.geotronics.cz/termokamery/kontrola-solarních-panelu>
  4. FLIR Systems Inc, [Online]  
<http://www.flir.com/cs/emea/en/view/?id=41872>
-