

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Termografické měření FV elektrárny

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Petr BEDNARČÍK**
Osobní číslo: **E14N0001P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Termografické měření FV elektrárny**
Zadávací katedra: **Katedra technologií a měření**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Popište základní vlastnosti fotovoltaických článků.
2. Rozeberte základní typy vad FV článků a metody jejich detekce a diagnostiky.
3. Vysvětlete možnosti použití termografie pro diagnostiku FV systémů.
4. Proveďte a zhodnoťte termografické měření reálné FV elektrárny.



Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího
Rozsah kvalifikační práce: 40 - 60 stran
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:


1. přednášky z předmětu KEE/SOES

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Milan Bělík, Ph.D.**
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2015**
Termín odevzdání diplomové práce: **16. května 2016**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2015

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá popisem a základními vlastnostmi nejpoužívanějších fotovoltaických článků. Vysvětluje také související pojmy, kterými jsou např. fotoelektrický jev a sluneční záření na Zemi. Poukazuje na základní parametry a používané materiály, z nichž jsou fotovoltaické články vyráběny. Popisuje vyskytující se defekty a vady. Ve stěžejní části práce vysvětluje metody jejich diagnostiky se zaměřením na termografické měření. Tato metoda je využita jako jedna z možností diagnostiky fotovoltaických článků také v experimentální části práce. V této souvislosti práce upozorňuje na možnost využití bezpilotních letounů při aplikaci zmiňované metody. V poslední kapitole je zpracovaná experimentální část. Zde jsou popsány a shrnuty postupy a výsledky měření fotovoltaické elektrárny obci Pěčnov termografickou metodou.

Klíčová slova

Fotovoltaika, fotovoltaický článek, fotovoltaický panel, fotovoltaická elektrárna, diagnostika, defekty, termografie, termokamera, bezpilotní letoun, dron

Abstract

The master thesis describes the basic properties of the most widely used photovoltaic cells. It also explains the related concepts, which are e.g. the photoelectric effect and solar radiation on the Earth. It points out the basic parameters and the materials from which the photovoltaic cells being manufactured. Describing existing defects and faults. The most important part of the thesis explains methods of diagnostics, focusing on thermographic measurement. This method is used as one of the diagnostic possibilities of photovoltaic cells also in the experimental part of the thesis. Note as well the possibility of use of drones in the application of the mentioned method. The last chapter is the experimental part. Here are described and summarized the results of the measurement procedures on the photovoltaic power plant in village Pěčnov using thermographic method.

Key words

Photovoltaics, solar cell, solar panel, photovoltaic power plant, diagnostics, defects, thermography, thermographic camera, unmanned aerial vehicle, drone

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 10.5.2016

Bc. Petr Bednarčík

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Milanu Bělíkovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Dále bych rád poděkoval panu Jaroslavu Řešátkovi ze společnosti TELINK, spol. s r.o., za úvod do problematiky bezpilotních letounů a za profesionální rady a připomínky.

Obsah

OBSAH	7
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
ÚVOD	11
1 ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKŮ	12
1.1 HISTORIE FV ČLÁNKŮ A FOTOELEKTRICKÝ JEV.....	12
1.2 FOTOELEKTRICKÝ JEV VNĚJŠÍ - FOTOEMISE.....	13
1.3 FOTOELEKTRICKÝ JEV VNITŘNÍ – FOTOVOLTAICKÝ JEV	14
1.4 PN PŘECHOD	15
1.5 SHOCKLEYŮV – QUEISSERŮV LIMIT	16
1.6 SLUNEČNÍ ZÁŘENÍ	17
1.7 STRUKTURA FV ČLÁNKU A PANELU	20
1.7.1 Struktura FV článku.....	20
1.7.2 Struktura FV panelu	22
1.8 PARAMETRY FV ČLÁNKU	23
1.9 ROZDĚLENÍ FV ČLÁNKŮ.....	28
1.9.1 Články z monokrystalického křemíku	29
1.9.2 Články z polykrystalického křemíku	29
1.9.3 Články HIT.....	30
1.9.4 Tenkovrstvé články	30
2 METODY DETEKCE A DIAGNOSTIKY FV ČLÁNKŮ	34
2.1 LABORATORNÍ DIAGNOSTIKA	34
2.1.1 Flash test - měření VA charakteristik	34
2.1.2 ELCD test	34
2.1.3 Fotoluminiscenční test.....	35
2.1.4 Metoda luminiscenční mikroplazmy	36
2.1.5 Metoda LBIC a LBIV.....	36
2.1.6 Izolační zkouška.....	37
2.1.7 Klimatické zkoušky	37
2.2 DIAGNOSTIKA V TERÉNU.....	38
2.2.1 Vizuální kontrola	38
2.2.2 Diagnostika solárním analyzátozem.....	38
2.2.3 Diagnostika pomocí termografie	38
3 DEFEKTY A VADY FV ČLÁNKŮ	39
3.1 MECHANICKÉ DEFEKTY	39
3.2 NEHOMOGENITA DIFUZNÍ VRSTVY.....	40
3.3 PNUTÍ V ČLÁNKU.....	40
3.4 VÍROVÝ DEFEKT	41
3.5 ŠNEČÍ CESTIČKY	41
3.6 NEDOKONALÉ GALVANICKÉ PROPOJENÍ	42
3.7 NEČISTOTY	42
3.8 POTENCIÁLOVÁ INDUKOVANÁ DEGRADACE	43
3.9 DEGRADACE ZPŮSOBENÁ DOPADAJÍCÍM ZÁŘENÍM.....	44
3.10 HOT SPOT ZKRATY	44
4 TERMOGRAFIE PRO DIAGNOSTIKU FV SYSTÉMŮ	45
4.1 TERMOGRAFICKÁ ROVNICE	47
4.2 TERMOGRAFICKÁ DIAGNOSTIKA FV SYSTÉMU	48
4.3 TERMOKAMERA.....	49
4.4 ANALÝZA VAD	51
4.5 POSTUP MĚŘENÍ.....	54

4.6	MĚŘENÍ POMOCÍ BEZPILOTNÍHO LETOUNU	56
5	TERMOGRAFICKÉ MĚŘENÍ FV ELEKTRÁRNY	62
5.1	FVE PĚČNOV	62
5.1.1	Měření	62
5.1.2	Výsledky měření.....	70
ZÁVĚR.....		72
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ.....		73

Seznam symbolů a zkratek

A	[J]	Výstupní práce
c	[m/s]	Rychlost světla ve vakuu ($3 \cdot 10^8$ m/s)
E	[J]	Energie fotonu
E_{kin}	[J]	Kinetická energie emitovaného elektronu
FF	[-]	Faktor plnění
H_λ	[W·m ⁻² ·mm ⁻¹]	Spektrální hustota intenzity vyzařování
I	[W/m ²]	Intenzita vyzařovaného výkonu
I_{tot}	[W/m ²]	Intenzita vyzařovaného výkonu zaznamenaná termokamerou
I_{mp}	[A]	Proud maximálního výkonu
I_{sc}	[A]	Proud nakrátko
M_{mp}	[-]	Pracovní bod při maximálním výkonu
P_{mp}	[W]	Maximální výkon
U_{mp}	[V]	Napětí maximálního výkonu
U_{oc}	[V]	Napětí naprázdno
T	[K]	Teplota
ΔE	[J]	Energetické ztráty při emisi elektronu z krystalové mřížky

ΔI	[W/m ²]	Rozdíl hodnot intenzity vyzařovaného výkonu
$\Delta \lambda$	[m]	Rozdíl hodnot vlnové délky fotonu
ε	[-]	Emisivita tělesa
η	[%]	Účinnost
λ	[m]	Vlnová délka fotonu
τ_{atm}	[-]	Transmitance atmosféry
AM		Air mass
DLARC		Double layer anti reflection coatings
ELCD		Electroluminescence crack detection
EVA		Ethylene – vinyl acetate
FV		Fotovoltaický
FVE		Fotovoltaická elektrárna
HIT		Heterojunction with intrinsic thin layer
LBIC		Light beam induced current
LBIV		Light beam induced voltage
RC		Radio controlled
VA		Volt ampérová

Úvod

Diplomová práce volně navazuje na moji předchozí bakalářskou práci, která se zabývá možnostmi termografie pro diagnostiku fotovoltaických článků. Téma termografické měření fotovoltaické elektrárny jsem si zvolil z důvodu prohloubení svých znalostí v oblasti fotovoltaiky, termografické diagnostiky a její aplikaci při měření reálné fotovoltaické elektrárny. Jsem přesvědčený, že fotovoltaika má velký význam v oblasti zdrojů elektrické energie.

Práce je zaměřena především na rozbor diagnostiky fotovoltaických elektráren metodou termografie a na termografické měření reálné fotovoltaické elektrárny v terénu. První kapitola je věnována milníkům historie vývoje fotovoltaických článků. Vysvětluje fotoelektrický jev, popisuje základní parametry fotovoltaických článků. V jejím závěru jsou rozebrány a popsány jednotlivé druhy nejpoužívanějších fotovoltaických článků z křemíku včetně článků, které se využívají pro speciální aplikace. Následující kapitola rozebírá jednotlivé diagnostické metody používané v laboratorních podmínkách i v terénu, kde není možné provést diagnostiku v laboratoři. Třetí kapitola popisuje a řeší defekty a vady, které lze za pomoci rozebraných diagnostických metod analyzovat. Mezi defekty a vady patří ty, které vzniknou během procesu výroby fotovoltaických článků, při jejich instalaci, v důsledku stárnutí či působením atmosférických vlivů. Předposlední kapitola představuje bezkontaktní termografii s použitím termokamery. Uvádí základní principy, které pomohou termografické měření popsat a pochopit. Upozorňuje na jednotlivé defekty, které lze za pomoci termokamery identifikovat. Popisuje postup měření včetně chyb, ke kterým může dojít. Závěr kapitoly se zaměřuje na možnost využití bezpilotních letadel a nejnovějších trendů pro diagnostiku rozlehlých nebo hůře přístupných fotovoltaických elektráren. V této kapitole jsou uvedeny veškeré legislativní náležitosti, které je potřeba dodržet pro měření za pomoci bezpilotních letadel. Poslední kapitola je věnována experimentu. Jeho cílem je termografické měření reálné fotovoltaické elektrárny. V kapitole je popsán a vysvětlen použitý postup termografické diagnostiky a následné analýzy fotovoltaické elektrárny v Pěčnově. Fotovoltaická elektrárna byla diagnostikována ruční termokamerou a pořízené termografické snímky byly analyzovány v programu, který je součástí termokamery.

1 Základní vlastnosti fotovoltaických článků

1.1 Historie FV článků a fotoelektrický jev

Fyzikální proces, při kterém dochází k přeměně světelného záření na elektrickou energii, se nazývá fotoelektrický jev, nebo také fotovoltaický jev. [1]

První zmínka o fotoelektrickém jevu pochází z roku 1839. Popsal jej devatenáctiletý mladík, Alexandre Edmond Becquerel (1820 - 1891) spolu se svým otcem, francouzským fyzikem Antoinem Césarem Becquerelem (1788 – 1878). Naměřili malé hodnoty proudu mezi kovovými elektrodami v roztoku elektrolytu, v závislosti na změně osvětlení. O svém objevu informovali v článku uvedeném ve vědeckém sborníku akademie věd.

Roku 1877 vytvořili na King's College v Londýně student Richard Evans Day a jeho profesor William Gryll Adams (1788 - 1915) první fotovoltaický článek v pevném stavu na bázi platiny a polovodivého selenu, tyto dva materiály vytvořily PN přechod. Na PN přechodu vznikalo elektrické napětí již pouze působením světelného záření. Jednalo se o fotoelektrický jev vnitřní.

Dalším milníkem v oblasti fotovoltaiky byl rok 1883. Americký vynálezce Charles Fritts (1850 - 1903) začal hromadně vyrábět FV články. Jejich plocha byla velká, až 30 m². Články dosahovaly účinnosti pouze kolem 1 % a nedošlo k rozšíření výroby. Konstrukce článku byla založena na bázi polovodivého selenu s velmi tenkou vrstvou vodivého zlata. Charles Fritts věřil, že bude úspěšným konkurentem Edisonových uhelných elektráren.

Heinrich Rudolf Hertz (1857 - 1894) roku 1887 při provádění jednoho ze svých experimentů zjistil, že výboj mezi elektrodami vznikne při menším napětí, pokud mezi elektrody dopadá ultrafialové záření.

Důležitý krok učinil Albert Einstein (1879 - 1955). Dne 17. března 1905 dokázal objasnit fotoelektrický jev vnější. Albert Einstein vycházel z kvantové teorie, kterou publikoval Max Karl Ernst Ludwig Planck. Z Einsteinova zjištění plyne, že závislost energie uvolněného elektronu je závislá pouze na vlnové délce fotonů. Počet fotonů

je závislý na intenzitě záření. Za tento objev obdržel Albert Einstein v roce 1921 Nobelovu cenu za fyziku.

První FV článek s PN přechodem na křemíku si nechal roku 1940 patentovat Russell Shoemaker Ohl (1898 - 1987) v USA. Tyto články dosahovaly účinnosti kolem 1 %. Křemíkové články s účinností 6 % byly vyvinuty v Bellových laboratořích roku 1954. Od roku 1958 se FV články začaly hojně využívat na Mezinárodních kosmických stanicích a komunikačních satelitech. Do současnosti jsou zde zdroji elektrické energie. [2, 3, 4, 5]

1.2 Fotoelektrický jev vnější - fotoemise

Elementární částice elektromagnetického záření se nazývá foton. Při dopadu fotonu na povrch materiálu s kovovou vazební mřížkou dochází k interakci mezi fotonem a elektronem. Foton předá energii elektronu a následně zanikne. Předaná energie je využita k uvolnění elektronu z vodivostního pásu a následnému opuštění krystalu kovového materiálu. Energie fotonu musí dodat elektronu takové množství energie, které je alespoň rovno energii vazební. Pak nastane fotoelektrický jev vnější neboli fotoemise. Fotoelektrický jev vnější je popsán zákonem o zachování energie, ze kterého plyne:

$$E = A + \Delta E + E_{kin} \leftrightarrow h \cdot \frac{c}{\lambda} = A + \Delta E + E_{kin} \quad (1.1)$$

A – výstupní práce [J]

c – rychlost světla ve vakuu ($3 \cdot 10^8$ m/s)

E – energie fotonu [J]

E_{kin} – kinetická energie emitované elektronu [J]

h – Planckova konstanta ($6,626\ 176 \cdot 10^{-34}$ J·s)

ΔE - ztráty při emisi elektronu z krystalové mřížky [J]

λ - vlnová délka fotonu [m]

Počet emitovaných elektronů je závislý na intenzitě osvětlení a vlnové délce elektromagnetického záření λ . Vlnová délka stanoví velikost kinetické energie elektronu E_{kin} . Jev lze snadno interpretovat za předpokladu nulových ztrát při interakci mezi fotonem a elektronem. Podle vztahu 1.2 pro výpočet energie fotonu E je zřejmé, že fotony s menší energií nemohou vyvolat emisi elektronů. Emise elektronů nastane, pokud je hodnota vlnové délky nižší než mezní hodnota vlnové délky λ_0 .

$$E = h \cdot \frac{c}{\lambda_0} [eV] \quad (1.2)$$

λ_0 – mezní vlnová délka fotonu [m]

V odvětví vývoje FV panelů se fotoemise nevyužívá z důvodů malé účinnosti. Z pohledu fyziky se ale jedná o důležitý poznatek. Energie fotonů představuje velmi malé množství energie. Z tohoto důvodu byla zavedena jednotka 1 eV, jedná se o vedlejší jednotku soustavy SI. Elektronvolt představuje množství energie elektronu urychleného napětím 1 V ve vakuu. Pro přepočtení energie se používá přepočtení: $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$. [6]

1.3 Fotoelektrický jev vnitřní – fotovoltaický jev

Fotoelektrický jev vnitřní je takový jev, při kterém fotony dopadají na povrch polovodičového materiálu a předávají energii na uvolnění valenčním elektronům. Volné elektrony v materiálu zůstávají, a tím zvyšují elektrickou vodivost materiálu.

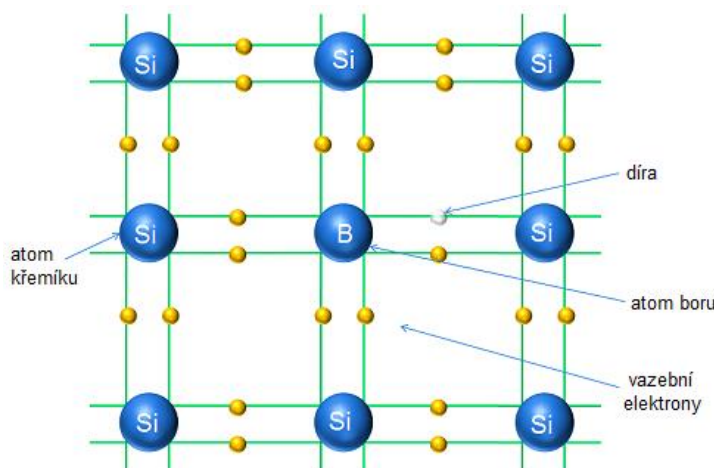
Křemík je nejpoužívanější polovodičový materiál pro výrobu FV článků. Má krystalickou strukturu diamantu a obsahuje čtrnáct elektronů, z toho jsou kovalentní vazbou sdíleny čtyři valenční elektrony. Šířka zakázaného pásu křemíku je 1,12 eV. To znamená, že foton musí dodat elektronu energii stejnou nebo vyšší, aby byl uvolněn z valenční vrstvy. Po dosazení hodnoty do vztahu pro výpočet energie fotonu zjistíme, že hodnota mezní vlnové délky je 1107 nm. Jde tedy o oblast neviditelného infračerveného záření. Energie fotonů, procházející zemskou atmosférou dosahuje hodnoty

od 0,5 eV (2480 nm) do 3,3 eV (375 nm). Je tedy patrné, že křemíkový FV článek dokáže absorbovat většinu elektromagnetického záření dopadajícího na zem. Největší problém je v účinnosti. Ta je omezena přibližně na 55 % u křemíkových článků z důvodu ztrátové tepelné energie. Ztrátovou tepelnou energii způsobují fotony s hodnotou energie vyšší, než 1,12 eV. Energie s vyšší hodnotou není využita a přemění se na teplo. [5, 7, 9, 10, 11, 12, 13, 14]

1.4 PN přechod

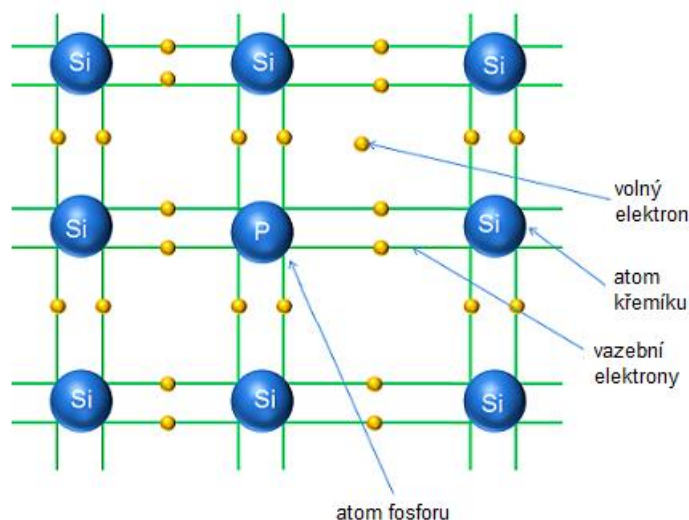
Polokov je materiál, chovající se jako polovodič. Jeho elektrická vodivost je závislá na vnitřních nebo vnějších podmínkách. Čistý polovodič, například křemík, je tvořen mřížkou atomů, které jsou spojeny kovalentními vazbami. Křemík je čtyřmocný prvek. To znamená, že každý atom křemíku je obklopen čtyřmi atomy křemíku. Vazby mezi atomy nejsou tak pevné a i malá vnější energie usnadní přesun elektronů ze zakázaného pásu do vodivostního pásu. Zvyšováním energie slunečního záření nebo tepelné energie vzniká větší koncentrace volných elektronů a polovodič se stává více vodivým.

Dopováním, tj. nahrazováním některých atomů křemíků jinými atomy s různým počtem valenčních elektronů, například fosforu, boru nebo germania, zvyšujeme elektrickou vodivost samotného křemíku. Polovodič, dopovaný atomy třímocného prvku, obsahující tři valenční elektrony, se nazývá polovodič typu P (positiv). Příměsi jsou akceptory. V důsledku absence jedné vazby mezi atomy vzniká prázdné místo, viz Obr. 1.1. Nazývá se díra. Do díry se může dostat valenční elektron ze sousedního atomu křemíku a tím se díra pohybuje krystalem.



Obr. 1.1 Vnitřní struktura polovodiče typu P [15]

Polovodič křemíku, který je dopován pětimocným polovodivým prvkem, se nazývá polovodič typu N (negativ). Příměsi jsou donory. Díky příměsi tak vznikne volný elektron, viz Obr. 1.2.



Obr. 1.2 Vnitřní struktura polovodiče typu N [15]

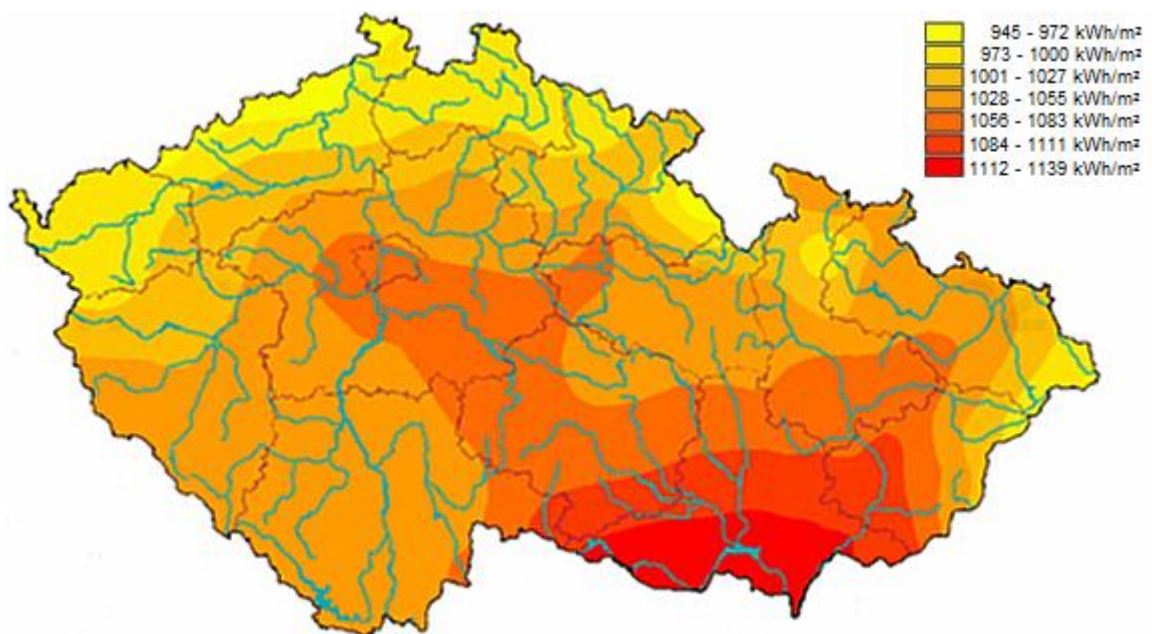
PN přechod vznikne v oblasti spoje dvou polovodičů P a N. V oblasti přechodu, který je široký zhruba 1 μm , vzniká prostorový náboj. Ve fotovoltaice je umožněno dopadu slunečního záření na PN přechod, tím dochází k rozdělení děr a elektronů. Vlivem rozdělení se na předních kontaktech FV článku shromažďují elektrony a vzniká napětí U_{oc} , přibližně 0,6 V. Po připojení zátěže na svorky článku začne zátěží protékat proud. Velikost proudu je závislá na ploše článku, intenzitě elektromagnetického záření a počtu absorbovaných fotonů s optimální vlnovou délkou. [5, 7, 9, 10, 11, 12, 13, 14]

1.5 Shockleyův – Queisserův limit

Shockleyův – Queisserův limit uvádí teoretickou maximální možnou účinnost, kterou je FV článek s PN přechodem schopen vyvinout. Hodnota byla stanovena v roce 1961 Williamem Shockleyem a Hansem Queisserem. Je závislá na spektru slunečního záření a na šířce zakázaného pásu použitého polovodičového materiálu. Křemík, se šířkou zakázaného pásu 1,12 eV, má teoretický limit účinnosti 30 %. V praxi je limitu zvýšeno použitím vícenásobných přechodů. Například u vícevrstevných článků každá vrstva absorbuje pouze fotony s vlnovou délkou, pro něž je účinnost v daného článku nejvyšší. [16, 17]

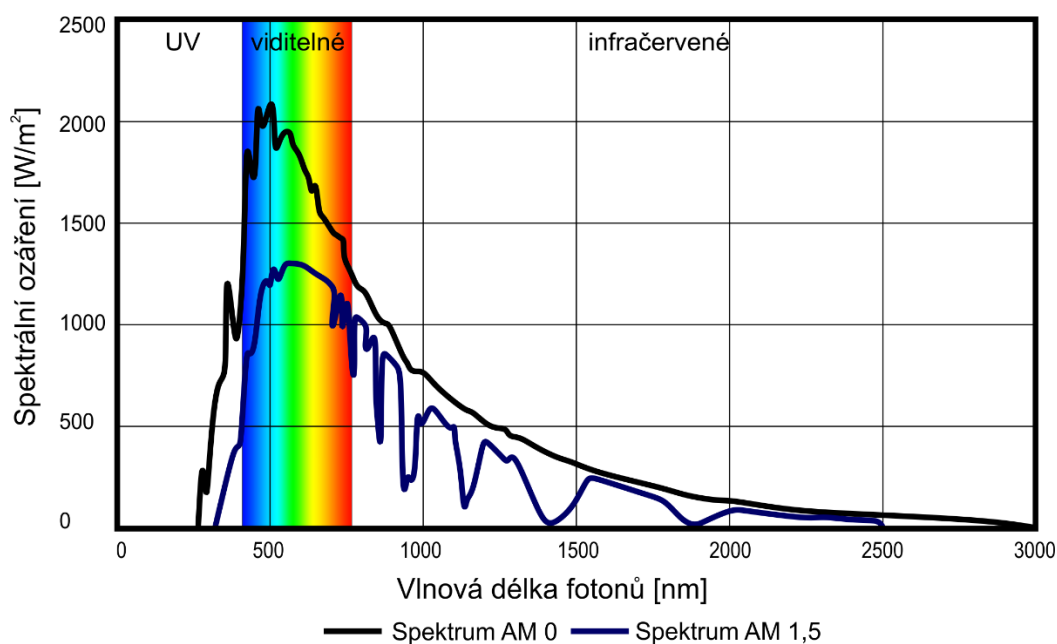
1.6 Sluneční záření

Hodnota intenzity slunečního záření ve vesmíru, která dopadá na Zemi ve formě energie, má velikost průměrně 1367 W/m^2 . Tuto hodnotu nazýváme solární konstantou. Průchod slunečního záření přes zemskou atmosféru tuto hodnotu sníží v důsledku vodních par, prachu a molekul vzduchu, až na hodnotu menší než 1000 W/m^2 . Záření, dopadající na zemskou kůru, se nazývá globální záření. Pro praktické použití je rozděleno na záření přímé a záření difuzní. Přímé záření pozorujeme při jasné obloze, ze směru od Slunce. Naproti tomu difuzní záření pozorujeme při neviditelném Slunci, při oblačnosti, nebo v důsledku mlhy. Oblačnost způsobí filtraci a lom přímého záření. Pro standardizovaná měření FV článků je stanovena referenční hodnota 1000 W/m^2 . Jedná se o průměrnou hodnotu slunečního dne kolem poledne. Pro měření intenzity slunečního záření je používáno zařízení zvané pyranometr, nebo pyrhelimetr. Součtem přímého a difuzního záření veškerých slunečných hodin za rok, dostáváme hodnotu celkového slunečního záření v kilowatthodinách na 1 m^2 plochy za rok. Hodnota je uváděna pro horizontální plochu a je velmi odlišná v závislosti na regionu. Hodnota je velice závislá na čistotě ovzduší a nadmořské výšce. V České republice je dosahováno hodnot přibližně od 950 do 1200 kWh/m^2 , viz *Obr. 1.3*. V Německu se hodnota pohybuje v rozmezí od 900 do 1200 kWh/m^2 . V pouštních oblastech je dosahováno hodnoty až 2500 kWh/m^2 . V České republice připadá téměř 80 % dopadajícího záření na dobu od dubna do září. [10, 14, 18]



Obr. 1.3 Roční suma slunečního záření v ČR [14]

Sluneční záření dopadající na Zemi má vlnovou délku od 30 do 3000 nm, a je znázorněné na Obr. 1.4. Při vlnové délce nižší než 300 nm se jedná o velice nebezpečné UV záření, které je však pohlcováno atmosférou. Záření s vlnovou délkou přibližně od 400 – 780 nm odpovídá spektru záření, které je viditelné pro lidské oko. Záření s vlnovou délkou vyšší než 800 nm je infračervené světlo a od hodnoty přibližně 2500 nm je pohlcováno atmosférou. Záření dopadající na Zemi, které je filtrováno atmosférou, se značí AM 1,5. Tato hodnota udává roční střední hodnotu slunečního spektra dopadajícího na zemskou kůru. Ve vesmíru platí hodnota AM 0.

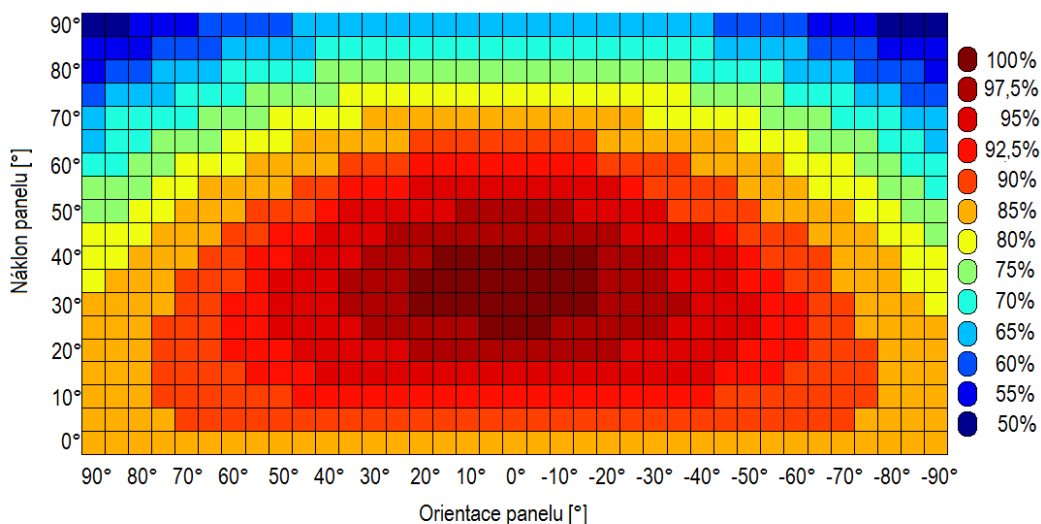


Obr. 1.4 Spektrum slunečního záření [18]

Umístění FV elektrárny

Pro využití maximálního potenciálu FV modulů je nutné vybrat umístění s minimem zastíněných ploch. U budov je výběr umístění omezen na plochu, orientaci, tvar a sklon střechy nebo fasády. Zcela ploché střechy nabízí volnost oproti budovám se šikmou střechou, které mají různý úhel sklonu a jsou orientovány různými směry. Nejideálnějším směrem orientace pro FV panely je jih. Pro maximální účinnost FV panelů je nutné zajistit, aby byly instalovány kolmo směrem ke Slunci. Avšak poloha Slunce není v průběhu dne ani roku ustálená a mění se i dopadový úhel slunečního záření. To má za následek nutnost posouzení umístění, dle hodnoty ozáření v průběhu celého roku v daném umístění. Ve fotovoltaické terminologii je azimut 0° označován jako orientace na jih. Orientace

na východ má azimut -90° a naopak na západ je azimut 90° . Z následujícího obrázku je tedy patrné, že ideální sklon panelu v České republice je 35° jižním směrem. Nicméně nedodržení přesného azimutu 0° není na celkovém výkonu výrazně patrné. V případě výchyly 70° dochází k poklesu ročního zisku energie zhruba o 10 %, viz *Obr. 1.5*.



Obr. 1.5 Zisk energie v závislosti na sklonu a orientaci FV panelu [19]

To je platné pouze v případě, nevyskytují-li se v blízkosti FVE žádné objekty, které by mohly vrhat na panely stín. Jako například budovy, stromy nebo terénní nerovnosti. Stínění, které snižuje účinnost FV modulů, nastává i u velkých FVE umístěných na zemi nebo na rovné střeše. Jednotlivé řady panelů se v ranních a odpoledních hodinách vzájemně stíní. Záleží však na vzdálenosti mezi jednotlivými řadami. Často se u velkých FVE volí hodnota sklonu 20° . Při sklonu, který dosahuje alespoň 12° , pozorujeme samočisticí efekt deštěm a gravitací. FV panely není pak nutné dodatečně čistit. Samočisticí efekt se rostoucím úhlem zvyšuje. Znečištění je zejména způsobeno prachem, pylem, listím nebo i ptačím trusem. Ztráty, které způsobí znečištění, jsou zhruba 1 – 5 % ročně.

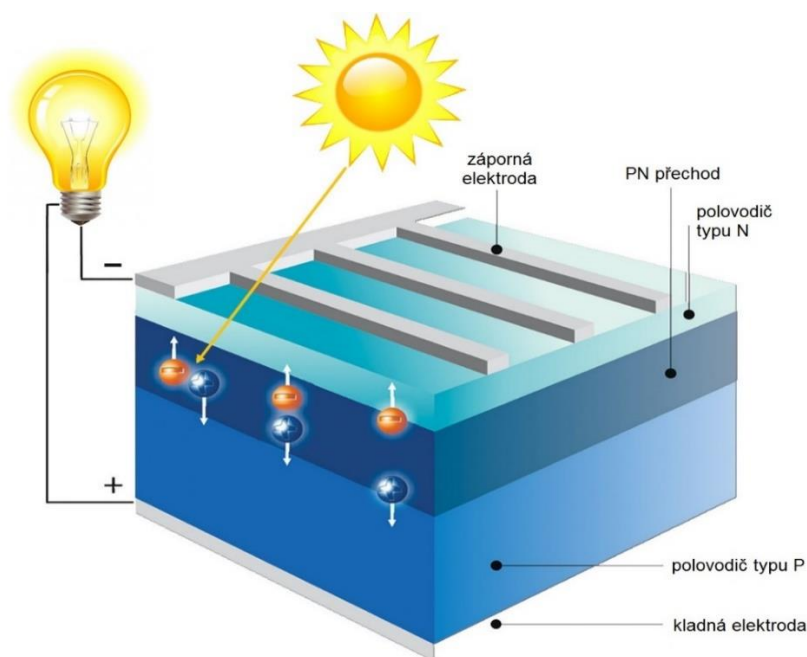
V případě, že budoucí FVE bude stíněna blízkými objekty, například v městské zástavbě, je nutné určit vhodnost sklonu pomocí počítačové simulace. Pro zvýšení účinnosti se na pevných a rovných základech používají FV panely s trackery. Tracker je systém, sledující pohyb Slunce po obloze a umožní natáčet FV panely tak, aby byly v každý okamžik kolmo ke Slunci. [5, 16, 17, 19, 20]

1.7 Struktura FV článku a panelu

Struktura ukazuje vnitřní uspořádání FV článku podle pravidel k maximálnímu využití. Parametry FV článku jsou soubory pravidel, které charakterizují konkrétní stav či jev. Parametry jsou důležité veličiny pro selekci.

1.7.1 Struktura FV článku

FV článek je komponent sloužící k přeměně slunečního záření na elektrickou energii, svojí konstrukcí připomíná velkou plošnou polovodičovou diodu. Struktura FV článku je vyobrazena na *Obr. 1.6*. Základ tvoří tenký plát polovodičového křemíku typu P s nanesenou vrstvou polovodiče typu N. Polovodič typu N je umístěn na přední straně článku, kde dochází k absorpci slunečního záření. Vytvořený PN přechod je z obou stran vybavený elektricky vodivými kontakty. Sluneční záření dopadá na PN přechod a vznikne pár elektron díra, který se následně oddělí. Díry se přesunou do polovodiče typu P, kde vytvoří kladný pól. Elektrony putují do vrstvy typu N, kde vznikne pól záporný.



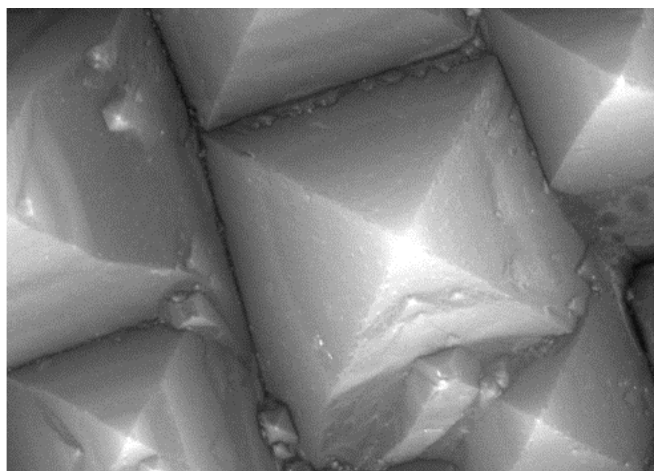
Obr. 1.6 Struktura fotovoltaického článku [14]

Tvar křemíkových článků je většinou čtvercový. Důvodem je maximální využití plochy panelu. V současné době se často používají články s délkou hrany 6 palců, tj. 15,24 cm. Takové články dosahují hodnoty I_{sc} kolem 9 A. Sluneční záření, dopadající

na článek, produkuje napětí a proud. K dosažení co nejvyšší účinnosti procesu přeměny je potřeba eliminovat ztráty. To znamená přizpůsobit materiál pro pohyb elektronu a umožnit co největší absorpci světelného záření. [5, 11, 12, 13, 14]

Optické ztráty

Ztráty, způsobené odrazy, jsou optické ztráty. Ty způsobují nedokonalou absorpci slunečního záření a snižují I_{sc} článku. Pro konstrukci FV článků je důležité tyto ztráty minimalizovat. Fotony, které vedou ke vzniku páru elektron díra, bývají často odraženy od článku nebo nejsou zcela absorbovány. Křemíkový článek má vysokou povrchovou odrazivost, více než 30 %. Snížení hodnoty až na 10 % umožňuje používání antireflexních skel z anorganického materiálu v konstrukci panelu. Další metoda snížení odrazivosti článku funguje na principu změny indexu lomu dopadajícího světla na povrch článku. Jedná se o dvouvrstvou antireflexní vrstvu zvanou DLARC. Vrstva je vyrobena ze sulfidu zinečnatého s fluoridem hořečnatým. Tato metoda však není příliš efektivní a je velice nákladná. Dnešní články pro komerční využití používají velice tenkou vrstvu nitridu křemíku. Vrstva nitridu křemíku dodává článku specifickou tmavě modrou barvu a snižuje odrazivost. Další možností, jak snížit hodnotu odrazivosti, je leptání povrchu křemíkového článku. V závislosti na technologii leptání je možné na povrchu vytvořit různé struktury či textury. Například jehlanovitou strukturu, ta je vyobrazena na *Obr. 1.7*, nebo invertovanou jehlanovitou strukturu. Jehlanovitá struktura umožní lepší vniknutí fotonů do článku.

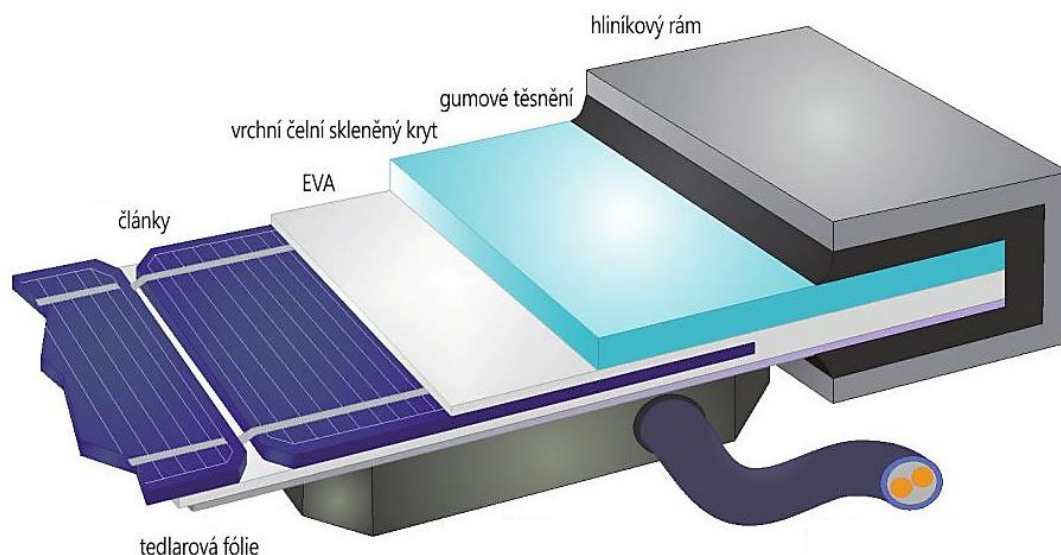


Obr. 1.7 Struktura vyleptaného povrchu křemíkového článku [21]

Kontakty na přední straně článku slouží pro odběr volných elektronů, které jsou často vytvořeny z oxidu cínu. Měrný odpor křemíku je příliš vysoký pro přenos, proto musí mít sběrné kontakty mezi sebou co nejmenší rozteč. Kontakty brání článku vstřebat maximální záření, proto zde vzniká kompromis mezi roztečí vodičů a plochou křemíku. Kontakty na zadní straně nepředstavují žádný problém. Zvýšení výkonu produkce elektrické energie umožní transparentní články, produkce vzroste až o 30 %. [5, 11, 12, 13, 14, 22]

1.7.2 Struktura FV panelu

FV panel je složen z několika FV článků, které jsou sériově propojeny a zapouzdřeny do jediného celku. Pro praktické využití je typický počet článků v panelu buď 36, 60 nebo 72. V případě takového zapojení dokáží články dosáhnout hodnoty napětí 21,6 V, 36 V a 43,2 V. FV články jsou velmi tenké a náchylné na mechanické poškození. Mimo to, elektrické propojení mezi články velmi často reaguje s vlhkostí a oxiduje. Je proto nezbytné zajistit ochranu FV článků a připojovacího boxu před vlhkostí a atmosférickými jevy. Z tohoto důvodu jsou na konstrukci a zapouzdření kladeny nároky vztahující se k trvanlivosti, odolnosti a hermetického uzavření. Proto existuje mnoho typů FV panelů s odlišnou vnitřní strukturou. Jedna ze struktur je znázorněna na *Obr. 1.8*.



Obr. 1.8 Struktura fotovoltaického panelu [14]

Články pro velké výkony jsou opatřeny předním ochranným sklem. Ochranné sklo je tvrzené a má za úkol chránit články proti kroupám, prachu a dešti. Sklo musí být velmi dobře transparentní, aby nedocházelo k odrazům paprsků slunečního záření. Sekundární

ochrannou vrstvou je fólie z materiálu EVA. Tento materiál je vysoce transparentní a odděluje tvrdé sklo od křehkých křemíkových článků, kterým vytváří mechanickou podporu a ochranu proti vlhkosti. EVA fólie je nanášena laminací z obou stran článků ve vakuu při teplotě 150 °C. V další vrstvě jsou již umístěné křemíkové články, které jsou mezi sebou galvanicky propojeny. Zadní strana panelu je tvořena fólií z Tedlaru® či skleněnou deskou. Fólie z Tedlaru® je velice odolná proti povětrnostním podmínkám, mechanickému namáhání, UV záření a chemickým procesům. Celý FV panel je zajištěn v hliníkovém rámu, který zajišťuje pevnou a zároveň lehkou podporu. Hliníkový rám je odolný vůči korozi a slouží jako nosná konstrukce pro uchycení a instalaci panelů.

Tenkovrstvé články, například z amorfního křemíku, bývají zapouzdřeny do pevného nebo flexibilního substrátu. Pevná nosná vrstva je tvořena ze skla silného až 4 mm. Flexibilní nosné vrstvy jsou vyrobeny z polymeru. Nástřikem na nosnou plochu je vytvořena transparentní vodivá vrstva, která je následně rozdělena za pomoci laseru nebo mikrofrézy na pásy, v závislosti na budoucím uspořádání článků. Tyto pásy tvoří vrchní sběrný kontakt. Následně jsou dotované polovodiče napájeny za vysokých teplot. V dalším kroku jsou vytvořeny pomocí sítotisku zadní kontakty. Ochrannou zadní vrstvu tvoří polymer, který chrání před povětrnostními vlivy a vniknutí vlhkosti.

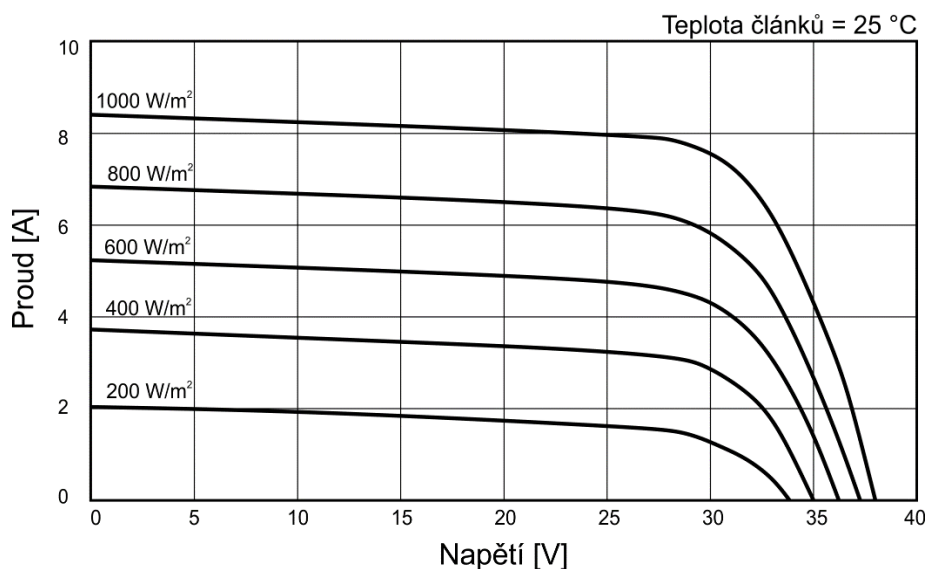
Průměrná životnost panelu pro velké výkony se pohybuje od 25 až do 30 let. Ve většině případů křemíkové panely produkují 90 % v prvních 10 letech a následujících 15 let produkují 85 % jmenovitého výkonu. [5, 12, 13, 14]

1.8 Parametry FV článku

Parametry jsou různorodé informace, které specifikují určitý objekt nebo oblast. Pro případ FV článku je vhodné rozdělit parametry na mechanické a elektrické. Mezi mechanické parametry patří zejména rozměry, tvar, plocha dopadu slunečního záření, hmotnost a především materiál FV článku. Elektrické parametry více vypovídají o účinnosti přeměny slunečního záření na elektrickou energii. Zejména se jedná o VA charakteristiku, napětí naprázdno, proud nakrátko, maximální výkon a účinnost. Parametry jsou velmi často uváděny v katalogových listech výrobce článků.

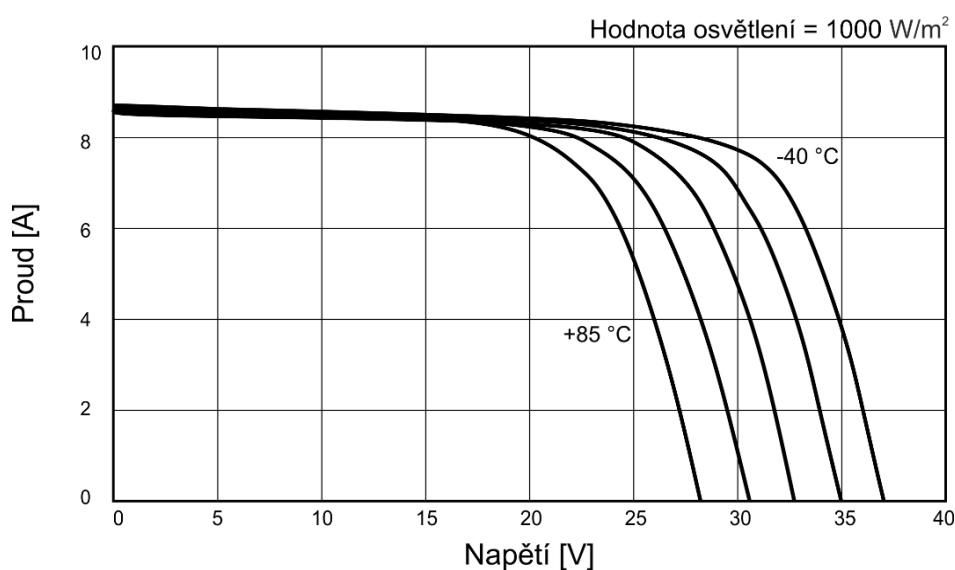
VA charakteristika

VA charakteristika je nejdůležitější grafické znázornění závislosti proudu na napětí, viz *Obr. 1.9*. VA charakteristika článku je shodná s VA charakteristikou polovodičové diody. Jediný rozdíl je ten, že VA charakteristika FV článku je posunuta do IV. kvadrantu.



Obr. 1.9 Průběh VA charakteristiky v závislosti na osvětlení panelu [23]

VA charakteristika je závislá na parametrech článku, intenzitě osvětlení a na teplotě. S vzrůstajícím osvětlením roste výstupní proud a roste i celková účinnost, jak je patrné na *Obr. 1.10*.



Obr. 1.10 Průběh VA charakteristiky v závislosti na teplotě článků [23]

Oproti tomu při vzrůstající teplotě článku účinnost klesá. Proto je provoz při vysokých teplotách jedním z největších problémů FV článků. Měření FV článků i panelů probíhá za standardizovaných testovacích podmínek (STC) kdy jsou zjištěny základní parametry včetně VA charakteristiky. Standardizovanými testovacími podmínkami se rozumí teplota článku 25 °C a jeho ozáření v hodnotě 1000 W/m² při spektru AM 1,5. Při provozu, zejména v letních měsících dosahuje teplota článků až 50 °C. Takové hodnoty mají zásadní vliv na výstupní napětí. VA charakteristika je jeden z nejdůležitějších parametrů. Výrobci průběh charakteristiky uvádí v katalogových listech svých výrobků.

Napětí naprázdno U_{oc}

Hodnota napětí naprázdno je maximální hodnota napětí článku v zapojení naprázdno, při rozpojených svorkách. Ve VA charakteristice je hodnota výchozím bodem pro napětí. Napětí naprázdno je závislé na okolní teplotě a nepatrně pak na množství dopadajícího záření. Proto musí být hodnota měřena za předem určených podmínek, aby nedošlo ke zkreslení. Jak již bylo zmíněno, ve FV panelu dosahuje hodnota napětí naprázdno až několika desítek voltů, v závislosti na počtu instalovaných článků.

Proud nakrátko I_{sc}

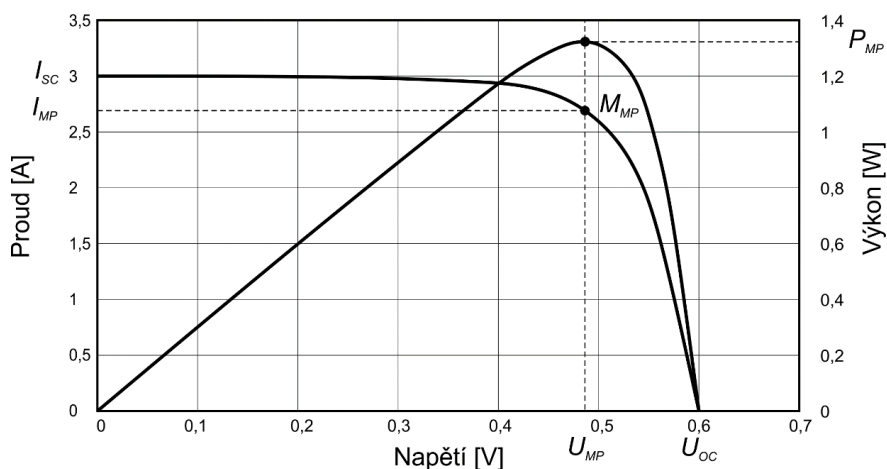
Hodnota proudu nakrátko, nebo také zkratového proudu, představuje maximální možnou hodnotu proudu v zapojení nakrátko, tedy při zkratu. Ve VA charakteristice je hodnota výchozím bodem pro proud. Proud nakrátko je hodnota závislá na intenzitě dopadajícího záření, kdy se vzrůstající intenzitou hodnota I_{sc} roste. Hodnota je také nepatrně závislá na teplotě článku. Hodnota dosahuje hodnot jednotek A.

Napětí a proud maximálního výkonu U_{mp}, I_{mp}

Napětí a proud maximálního výkonu jsou hodnoty, které ukazují proud a napětí při maximálním možném výkonu článku. Tyto hodnoty nemají vliv na průběh VA charakteristiky.

Maximální výkon P_{mp}

Maximálního výkonu je dosaženo při hodnotách I_{mp} a U_{mp} , které jsou zároveň souřadnicemi pro bod maximálního výkonu M_{mp} , ležící na VA charakteristice, viz Obr. 1.11. Hodnoty veličin I_{mp} a U_{mp} jsou menší než hodnoty I_{sc} a U_{oc} z důvodu parametru faktoru plnění. Hodnota veličiny je závislá na intenzitě osvětlení, teplotě článku a na spektru elektromagnetického záření. Hodnota je hlavním údajem pro porovnání jednotlivých článků či panelů mezi sebou.



Obr. 1.11 Znárodnění maximálního výkonu ve VA charakteristice [14]

Aby mohla být veličina použitelná pro porovnání, musí její měření probíhat za standardizovaných podmínek. K veličině maximálního výkonu bývá často uvedena i hodnota tolerance, ta nabývá hodnot v rozmezí až $\pm 10\%$. V reálných atmosférických podmínkách nebývá hodnoty maximálního výkonu dosaženo.

$$M_{mp} = U_{oc} \cdot I_{sc} \cdot FF \leftrightarrow M_{mp} = U_{mp} \cdot I_{mp} [W] \quad (1.3)$$

Faktor plnění FF

Parametr faktor plnění je definován jako poměr maximálního výkonu P_{mp} k součinu napětí naprázdno U_{oc} a proudu nakrátko I_{sc} . Někdy je nazýván faktor plnění z anglického fill factor. Ideální bezeztrátový článek má hodnotu $FF = 1$.

Běžné křemíkové články dosahují hodnoty kolem 0,8. Článek z Arsenidu gallia má hodnotu FF blížící se 0,89.

$$FF = \frac{P_{mp}}{U_{oc} \cdot I_{sc}} [-] \quad (1.4)$$

Účinnost η

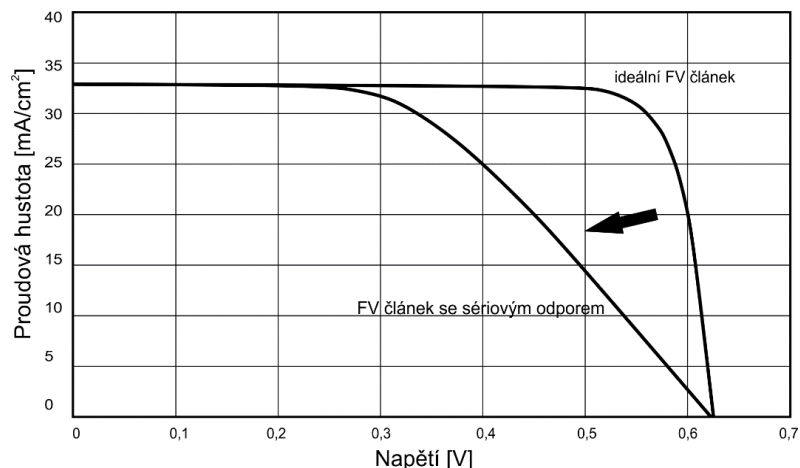
Účinnost je dalším důležitým parametrem pro porovnání článků. Účinnost je definována jako podíl výstupní energie a vstupní energie slunečního záření. Hodnota veličiny je závislá na spektru, intenzitě záření a výrobním materiálu článku. Samotné měření probíhá za standardizovaných podmínek. Měření musí být pečlivě kontrolováno. Pro FV články používané pro vesmírné aplikace, probíhá měření při spektru AM 0, pro články používané na povrchu zemském je spektrum AM 1,5. [11]

$$\eta = \frac{P_{mp}}{P_z} [\%] \quad (1.5)$$

P_z – hodnota výkonu ozáření [W/m^2]

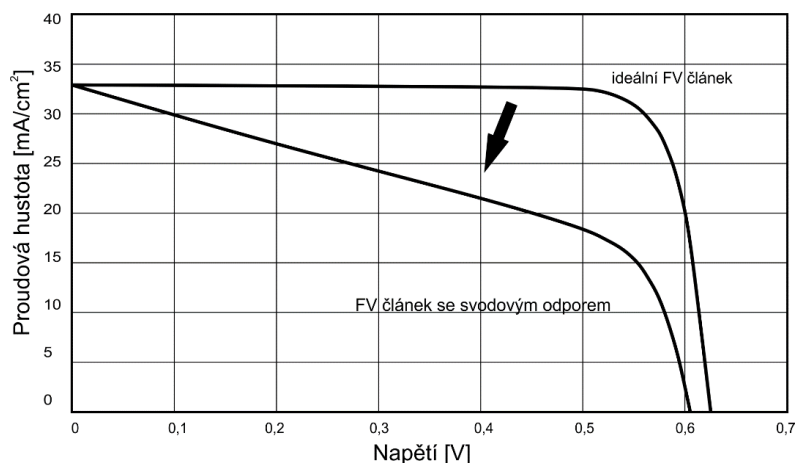
Sériový odpor a svodový odpor

Sériový odpor a svodový odpor jsou parazitními odpory, které snižují účinnost. Ideální článek má sériový odpor roven nule, jak je patrné na *Obr. 1.12*.



Obr. 1.12 Znárodnění růstu sériového odporu na vliv VA charakteristiky článku [11]

A svodový odpor má maximální, viz *Obr. 1.13*. Velikost sériového a svodového odporu je závislá na použitých materiálech při výrobě článku, geometrii a především na ploše. Rostoucí velikost sériového odporu má za následek snížení hodnoty faktoru plnění a příliš vysoké hodnoty odporu snižují zkratový proud. Oproti tomu svodový odpor ovlivňuje hodnotu napětí naprázdno. Obě tyto veličiny mají vliv na tvar VA charakteristiky. Změna tvaru způsobí snížení pracovního bodu a tím i snížení výkonu. Ztráty způsobené sériovým odporem lze snížit maximálním využitím plochy článku. Naopak, ztráty způsobené svodovým odporem lze snížit pomocí optimalizací technologie výroby, respektive lepší konstrukcí článku. Nízký svodový odpor způsobuje výkonové ztráty. [11, 24]



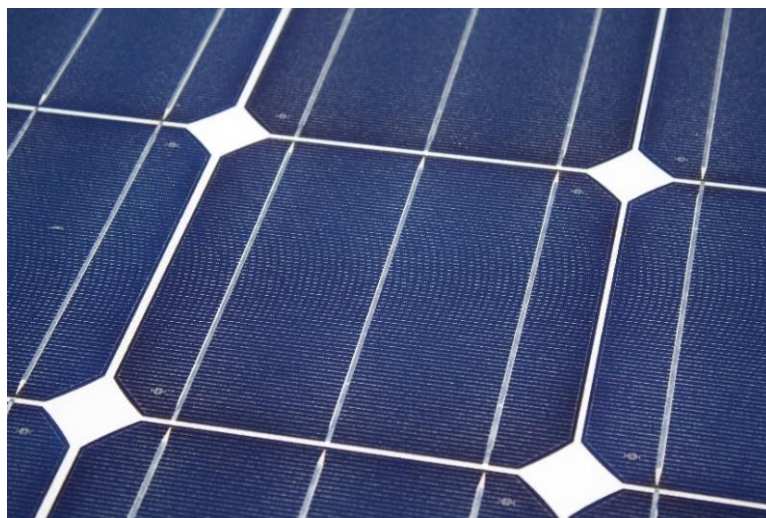
Obr. 1.13 Znárodnění poklesu svodového odporu na vliv VA charakteristiky [11]

1.9 Rozdělení FV článků

Na trhu je dnes mnoho druhů FV článků, které se liší tvarem, použitým materiálem, ale především svými parametry. V roce 2009 bylo na trhu přibližně 86 % článků na bázi křemíku. Křemík je netoxický materiál s výbornými vlastnostmi pro použití v elektronice. Je druhým nejrozšířenějším prvkem v zemské kůře, je zde zastoupen 26 %. Křemík se na Zemi nevyskytuje jako čistý prvek, ale v podobě křemenných písků. Proto musí projít energicky náročnými technologiemi, které zajistí křemík o čistotě až 98 %. Následnými chemickými procesy je získán křemík o čistotě až 99,999 999 %. Ten je již vhodný pro výrobu FV článků. V oblasti fotovoltaiky jsou také známé tenkovrstvé články, organické články a také vícevrstvé články. V závislosti na použitém typu materiálu mají články rozdílné parametry, které jsou vhodné při použití v různých aplikacích. [5, 12, 13, 14]

1.9.1 Články z monokrystalického křemíku

Články z monokrystalického křemíku jsou vyrobeny, jak název napovídá, z jednoho kusu krystalu křemíku, jehož povrch je homogenně zbarvený. Jedná se základní a nejstarší používaný typ článku. Jak je patrné z *Obr. 1.14*, tvary článků jsou většinou čtvercové se zaoblenými rohy. Tvar článků plyne z technologie výroby monokrystalů. Monokrystaly křemíku, zvané ingoty, jsou vyráběny Czochralského metodou. Czochralského metodu vyvinul polský chemik Jan Czochralski začátkem 20. století.



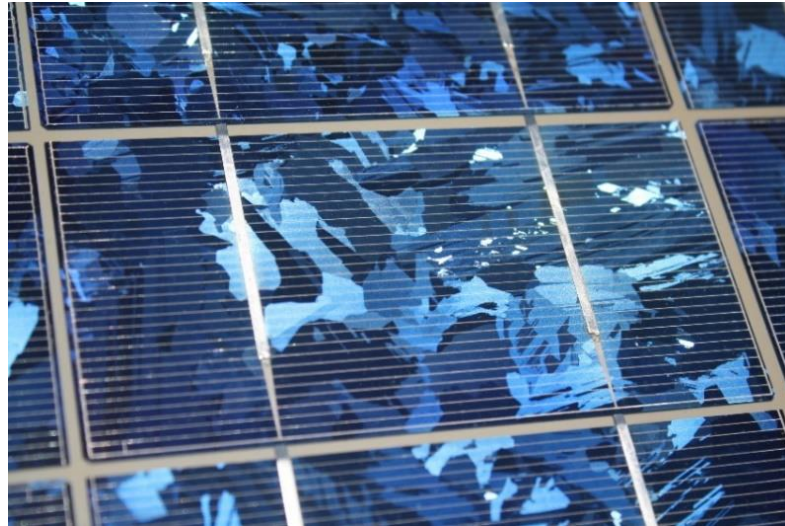
Obr. 1.14 Monokrystalický článek

Článek z monokrystalického křemíku má velmi dobré elektrické vlastnosti, v laboratorních podmínkách dosahuje účinnosti až 25 %. V praxi se hodnota účinnosti pohybuje kolem 17 %. Tyto články se vyznačují výbornou stabilitou výkonu, nicméně pro využití maximálního potenciálu potřebují články přímé sluneční záření, z důvodu homogenního povrchu. Tloušťka článku se pohybuje v rozmezí 200 – 400 μm .

1.9.2 Články z polykrystalického křemíku

Technologie výroby monokrystalického křemíku byla náročná a drahá s velkým množstvím odpadního materiálu. Proto se hledalo nové řešení, které urychlí ekonomickou návratnost investice. V roce 1981 byl vyvinut článek z polykrystalického křemíku. Výroba takového článku je jednodušší a levnější, navzdory horší výkonnostní stabilitě a nižší účinnosti. Povrch článků je nehomogenní, připomínající texturu leštěného kamene. Tvar článků je čtvercový s ostrými rohy. Polykrystalický křemík se vyrábí procesem blokového lití. Proces blokového lití způsobí vznik různě velkých krystalů s rozdílnou orientací.

Rozdílná orientace krystalů má za následek lepší absorpci difuzního záření, ale přechody mezi krystaly způsobují nižší účinnost. Při výrobě je proto snaha vyrobit články s většími krystaly, které mají méně přechodů. Polykrystalický článek je uveden na *Obr. 1.15*.



Obr. 1.15 Polykrystalický článek

Nejvyšší účinnost tohoto článku dosahuje 21,3 % a byla naměřena v laboratorních podmínkách. V praxi se pak účinnost pohybuje kolem 15 %. Polykrystalické články jsou tenké až 77 μm . [5, 12, 13, 14, 29]

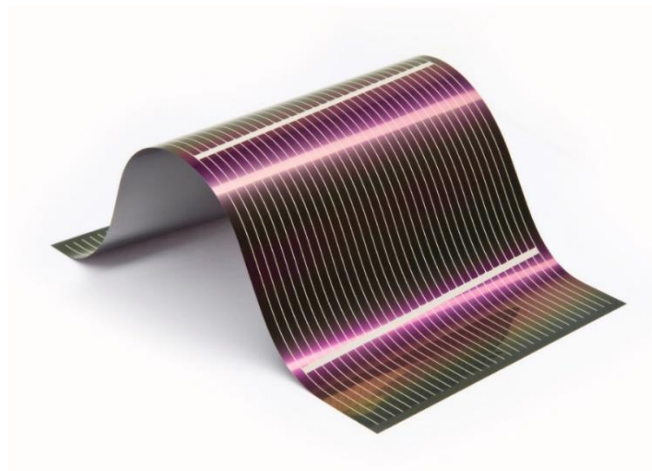
1.9.3 Články HIT

Články HIT se řadí mezi hybridní články. Základní vrstvu tvoří článek z monokrystalického křemíku typu N s nanosenou oboustrannou ultratenkou vrstvou amorfního křemíku. Díky oboustranné tenkovrstvé technologii a konstrukci má panel i zadní stranu transparentní. To umožní části slunečního záření projít skrze panel a odrazit se od země, nebo okolních předmětů zpět do panelu. Na první pohled není článek rozeznatelný od monokrystalického článku. Články HIT se také vyznačují výbornou teplotní stabilitou výkonu. Tím se liší od monokrystalických a polykrystalických článků. Společnost Panasonic v roce 2013 oznámila, že na článku HIT o tloušťce 98 μm s plochou 101,8 cm^2 , byla naměřena účinnost 24,7 % za laboratorních podmínek. [25]

1.9.4 Tenkovrstvé články

Koncem 20. století byl kladen požadavek na posílení vývoje článků tak, aby byly dostupné pro širokou veřejnost. Hlavními argumenty vývoje byly minimální

náklady na výrobu a jednoduché použití i ve speciálních aplikacích. Nově vyvinuté materiály byly většinou tenkovrstvé s možností napaření, nebo tisku na ohebný substrát, viz *Obr. 1.16*. Tenkovrstvé moduly mají v porovnání s krystalickými moduly pro svoji konstrukci vyšší toleranci vůči zastínění. Krystalické moduly vykazují při malém zastínění až poloviční úbytek výkonu.



Obr. 1.16 Tenkovrstvý článek [29]

Amorfní křemík

Články z amorfního křemíku byly vyhotoveny již v roce 1974. Staly se efektivní náhradou pro aplikace v energeticky méně náročných aplikacích. Články mají mnoho výhod i nevýhod. Struktura amorfního křemíku se vyznačuje neuspořádanými atomy křemíku. To má za následek nižší účinnost, kolem 7 %. Výhoda těchto článků spočívá ve vyšší absorpci slunečního záření, je až čtyřicetkrát vyšší oproti klasickým křemíkovým článkům. Většina slunečního záření je absorbována v 1 μm článku. Takto tenké články zaručují úsporu materiálu. Teplotní závislost článků je dobrá, nicméně výkonnostní stabilita těchto článků je horší. V průběhu několika měsíců, kdy jsou vystaveny slunečnímu záření, mohou články ztratit až 15 % z výkonu. [5, 12, 13, 14]

Arsenid gallia

Arsenid gallia nebo také galiumarsenid je sloučenina pro výrobu tenkovrstvých článků s monokrystalickou strukturou s jedním přechodem. Díky šířce zakázaného pásu o hodnotě 1,424 eV, má arsenid gallia velmi dobrou absorpci slunečního záření a také výbornou

teplotní závislost. Při teplotě 100 °C se účinnost zanedbatelně sníží. Díky této vlastnosti se články používají v koncentrátorových zařízeních, kde je potřeba pouze malá plocha článku. Arsenid gallia je také velice využíván ve vesmírných aplikacích z důvodu odolnosti vůči kosmickému záření. Nevýhodou článků je toxicita arsenu a vzácnost gallia. Účinnost článků dosahuje až 27,5 %. Hodnota účinnosti byla naměřena začátkem roku 2016 v laboratorních podmínkách. [5, 26, 29]

Telurid kadmia

Sloučenina teluru a kadmia je velice vhodná pro výrobu tenkovrstvých článků s jedním přechodem. Výzkum této sloučeniny začal již po roce 1950 a řadí se tak mezi první tenkovrstvé články. Tato sloučenina má šířku zakázaného pásma 1,5 eV, proto články o tloušťce 1,2 – 1,5 μm dokáží absorbovat až 90 % slunečního záření. Účinnost článků je vyšší než účinnost amorfního křemíku. V roce 2016 byla změřena účinnost 21,5 % v laboratorních podmínkách. Hlavní nevýhodou je toxicita a výkonová nestabilita. [5, 14, 27, 29]

Diselenid mědi a india

Sloučenina mědi, selenu a india se vyznačuje dobrou absorpcí slunečního záření. Až 99 % slunečního záření se absorbuje v 0,5 μm . Šířka zakázaného pásu diselenidu mědi a india má velikost 1,0 eV. Články se proto vyznačují lepší teplotní stabilitou v porovnání s křemíkovými články. Degradace výkonu v průběhu životnosti je také velice nízká, někteří výrobci uvádí pokles výkonu menší než 0,5 % za rok. Díky struktuře materiálu a propojení článků je článek více odolný vůči poklesu výkonu při zastínění. V laboratorních podmínkách je dosahováno účinnosti až 20 %. Nevýhodou tohoto materiálu je cena. Ta se odvíjí od složitějšího výrobního procesu, při kterém vzniká velice toxický selen. [5, 14, 27, 28, 29]

FV články z organických polymerů

Články z organických materiálů jsou vyrobeny na bázi uhlíku. Nejvyšší hodnota účinnosti s hodnotou 8,3 %, byla zaznamenána na článku o ploše větší než 1 cm^2 . Tyto články jsou tvořeny dvěma elektrodami, horní elektroda je konstruována tak,

aby propouštěla světelné záření. Struktura je specifická tím, že je vytvořena ze dvou článků v tandemovém uspořádání, které jsou vzájemně odděleny oxidem titanu. Články jsou vyrobeny z polovodivého polymeru a molekul fullerenu. Vrstva oxidu titanu slouží jako transportní vrstva pro volné elektrony a je částečně transparentní. Díky tomu je každý z článků citlivý v jiné části slunečního spektra. Články se vyznačují především nízkými výrobními náklady a vysokou mechanickou odolností. Nízké náklady jsou dosaženy procesem výroby, který je podobný tisku. Technologie se nazývá roll-to-roll. Z důvodu velmi nízké účinnosti nejsou články z organických polymerů tolik rozšířeny. [31, 32]

Vícepřechodové FV články

Vícepřechodové, neboli vícevrstvé FV články, mají ve struktuře více než jeden PN přechod. Každá vrstva struktury je optimalizována pro danou část slunečního spektra, je tedy i vyšší dosažitelná účinnost článku. Se vzrůstajícím počtem vrstev je redukován generovaný proud, což je kompenzováno zvýšením napětí článku. V praxi je používána struktura, kde vrchní vrstva zachycuje fotony s nízkou vlnovou délkou, a fotony s vyšší vlnovou délkou jsou absorbovány v nižších vrstvách. Teoreticky je tedy možné využít celé spektrum slunečního záření. Na vícepřechodových člancích byla do roku 2016 dosažena maximální účinnost 38,8 %, bez použití koncentrátoru, v laboratorních podmínkách. Za použití koncentrátoru byla dosažena maximální účinnosti až 46 %. [5, 14, 29]

2 Metody detekce a diagnostiky FV článků

Metody detekce a diagnostiky jsou soubory pravidel a postupů pro určení míry poškození materiálu nebo zařízení. Diagnostiku provádíme pro maximální využití FV článků nebo panelů. Defekty a vady snižují produkci elektrické energie a tím i celkovou účinnost systémů.

2.1 Laboratorní diagnostika

Diagnostika v laboratořích probíhá při daných laboratorních podmínkách, které jsou nezbytné pro správné vyhodnocení článků. V laboratořích probíhají hlavně měření, která nelze uskutečnit v terénu, především z důvodu klimatických podmínek a imobility měřících zařízení. Všechna diagnostická měření by měla být v souladu s technickými normami pro fotovoltaické součástky.

2.1.1 Flash test - měření VA charakteristik

Měření VA charakteristik pomocí flash testu je základní metodou pro stanovení parametrů FV článku. Měření probíhá při simulovaném osvětlení FV článku nebo modulu elektromagnetickým zářením, které je svým spektrem podobné slunečnímu záření. Nejpoužívanějším přístrojem pro měření je sluneční simulátor pulzního typu. Přístroj za pomoci krátkých záblesků světla proměří a vyhodnotí VA charakteristiku. Takový simulovaný světelný paprsek má výkon 1000 W/m^2 při spektru AM 1,5. Při měření musí mít panel konstantní teplotu $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Tyto přístroje jsou velmi přesné a podávají velmi korektní informace o konkrétním modulu či článku. Mimo VA charakteristiky jsou přístroje schopny určit napětí naprázdno, proud nakrátko, napětí a proud maximálního výkonu, maximální výkon, účinnost a faktor plnění. Postupy a požadavky na měření VA charakteristik jsou popsány v normě ČSN EN 60904-1 ed. 2. [33, 34]

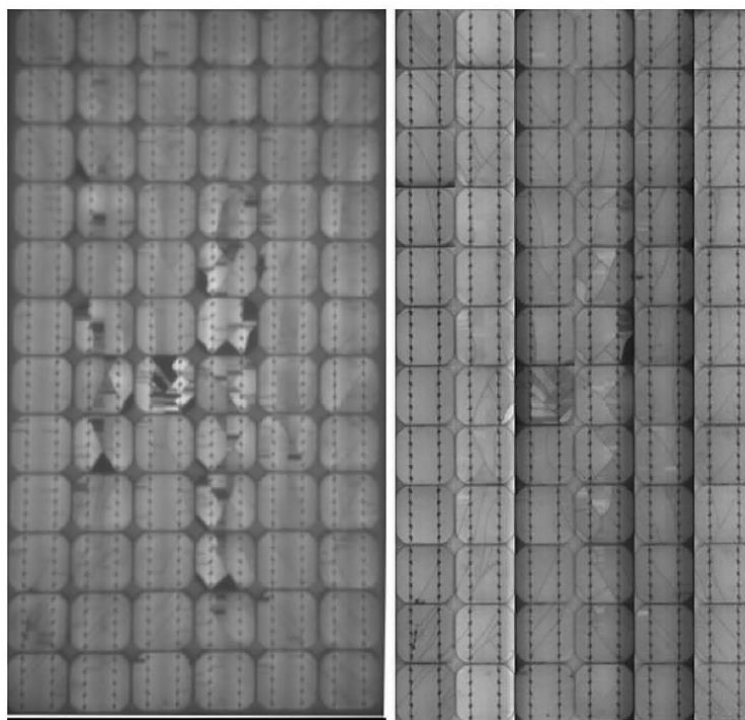
2.1.2 ELCD test

ELCD neboli elektroluminiscenční test je založen na principu vyzařování fotonů z článku a jejich zachycení speciálním záznamovým zařízením. Pomocí této metody lze identifikovat malé prasklinky a zlomy pouhým okem neviditelné. Ty představují velký problém v oblasti výkonu a životnosti. Také lze identifikovat nehomogenitu difuzní vrstvy, oxidaci a defekty v předních elektrických kontaktech článku. Metoda je vhodná

pro křemíkové články, tak i pro tenkovrstvé články. Měření probíhá tak, že je FV modul připojen na stejnosměrné napětí o takové velikosti, aby došlo k rekombinaci, neboli k spontánní emisi fotonů, pohybující se v infračervené oblasti elektromagnetického záření. Fotony jsou následně zachyceny speciálním typem záznamového zařízení. Na záznamové zařízení jsou kladeny nároky v oblasti spektrální citlivosti a teplotní stability proto zařízení obsahují CCD nebo InGaAs čip pro snímání. Článek lze snímat celoplošně, nebo bodově, kdy je pohyb zajištěn pomocí souřadnic X a Y. Na výsledných elektroluminiscenčních snímcích můžeme vidět vyzářené fotony jako světlá místa, oproti tomu tmavá místa fotony nevyzařují. [35]

2.1.3 Fotoluminiscenční test

Fotoluminiscenční test spočívá podobně jako ELCD test v zaznamenání vlastních vyzařovaných fotonů. Výsledek z měření metodou ELCD i fotoluminiscenční testem je vyobrazen na *Obr. 2.1*. Oproti předchozí metodě není luminiscence vybuzena elektrickým polem, ale pomocí externího elektromagnetického zdroje záření. Proniknutí fotonu do hloubky PN přechodu je závislé na teplotě článku a vlnové délce externího záření. Z externího zdroje záření musí vyzařovat fotony s minimální vlnovou délkou 1107 nm, tedy 1,12 eV.

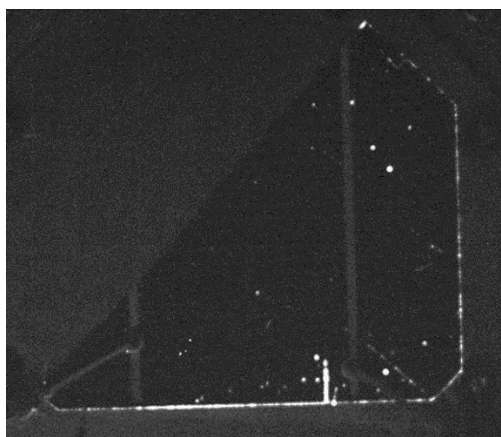


Obr. 2.1 Výstup z měření, vlevo metoda ELCD, vpravo metoda fotoluminiscence [36]

Externí světelný tok musí zajišťovat monochromatický zdroj elektromagnetického záření, například pole LED diod nebo laser. Proces měření je velice podobný jako u metody ELCD, vyvolané záření fotonů je rastrově zaznamenáno CCD čipem a fotoluminiscenční snímky jsou následně ve speciálním počítačovém programu zpracovány a vyhodnoceny. [36, 37]

2.1.4 Metoda luminiscenční mikroplazmy

Jedná se o metodu pro identifikaci defektů využívající luminiscenci mikroplazmy. Pro tuto metodu měření musí být článek zapojený v závěrném směru k napájecímu zdroji napětí. Velikost napětí se musí blížit velikosti průrazného napětí. Pokud se v článku vyskytuje nedokonalá struktura PN přechodu, protékají místem nedokonalosti větší proudy a vzniká zde lavinový výboj. Lavinový výboj je doprovázen šumem, ten je závislý na velikosti napájecího závěrného napětí. Vlivem šumu dochází k vyzařování vlastních fotonů. FV článek je celý snímán snímacím zařízením s CCD čipem a následně softwarově analyzován a vyhodnocen. Vyzařované fotony jsou na výsledných snímcích pozorovány jako bílé útvary, viz *Obr. 2.2*. Při měření touto metodou může dojít nenávratnému poškození a průrazu vlivem velikosti závěrného proudu. [37]

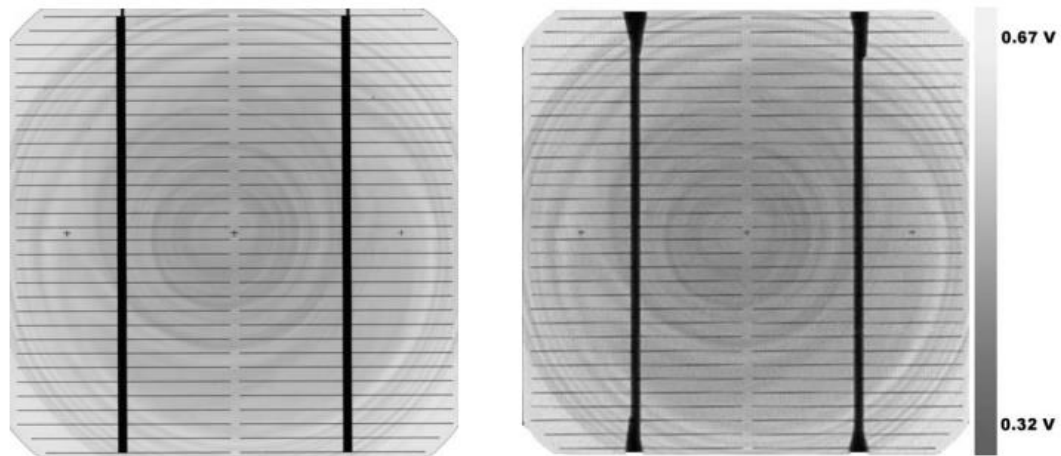


Obr. 2.2 Článek měřený metodou luminiscence mikroplazmy [37]

2.1.5 Metoda LBIC a LBIV

Obě diagnostické metody LBIC a LBIV se využívají pro diagnostiku nehomogenity difuzní vrstvy a k rozpoznání mikrotrhlin. Metoda LBIC je založena na měření proudu I_{sc} a metoda LBIV je založena na měření napětí U_{oc} . Obě metody využívají externího monochromatického zdroje záření, kterým jsou články osvětleny. Použití zdroje světla s proměnnou vlnovou délkou umožňuje identifikovat nehomogenitu v různých hloubkách.

Se zvyšující se hodnotou vlnové délky roste i hloubka vniku. Povrch článku je po daném rastru skenován zdrojem světla a následně je měřena odezva článku buď na proud, nebo na napětí. Díky tomu získáme data, která jsou dále softwarově zpracována. Výsledky z měření jsou uvedeny na *Obr. 2.3*. [38, 39]



Obr. 2.3 Výsledky měření, vlevo metoda LBIC, vpravo metoda LBIV [40]

2.1.6 Izolační zkouška

Pomocí izolační zkoušky se testují FV moduly, měří se, zda je elektrická izolace mezi stejnosměrnými vodiči a rámem panelu, nebo okolním prostředím dostatečná. Izolační zkouška se provádí ve shodě s normou ČSN EN 61215 ed. 2, nebo ČSN EN 61646 ed. 2. V závislosti na druhu měřeného FV modulu. Nedostatečná izolace může ohrozit bezpečnost, nebo způsobit vniknutí vlhkosti a tím dochází k rychlejší degradaci a snížení výkonu FV modulu. Izolační zkouška je vykonávána měřidlem izolačního stavu. [41]

2.1.7 Klimatické zkoušky

Klimatické zkoušky se provádí ve speciálních klimatických komorách. Ty mají za úkol urychlit stárnutí a degradaci FV panelu pomocí měnících se klimatických podmínek. Zkouška zahrnuje cyklování vlhkostí a mrazem, zkoušku vlhkým teplem a teplotním cyklováním. Podstatou měření při cyklování vlhkostí a mrazem je zjistit, zda je FV panel schopen snést vlhkost a teploty pod bodem mrazu. Zkouška vlhkým teplem zjišťuje, zda je panel schopen odolat pronikající vlhkosti. Oproti tomu teplotní cyklování zjišťuje, zda panel a materiály v něm použité jsou schopny odolat stresu teplotním namáháním a únavě materiálu, a to za neustále se opakující změny teplot.

FV panely jsou po klimatické zkoušce vizuálně kontrolovány. Následně jsou vystaveny izolační zkoušce a měření VA charakteristik. Poté jsou diagnostikovány flash testem, metodou luminiscence a termografickou metodou. Výsledky z měření jsou porovnávány s výsledky před klimatickou zkouškou. Klimatické zkoušky musí být ve shodě s normou ČSN EN 61215 ed. 2. [41]

2.2 Diagnostika v terénu

Diagnostika v terénu je prováděna, pokud není možné uskutečnit diagnostiku v laboratoři. Ve většině případů se diagnostika provádí u již nainstalovaných modulů. Výhody diagnostiky v terénu spočívají především v tom, že není nutné FV moduly odpojit od sítě v případě zapojení grid – on a odpojení od spotřebiče v případě zapojení grid – off. Jedinou nevýhodou je absence měřících metod, které zajistí podrobnější diagnostiku.

2.2.1 Vizuální kontrola

Vizuální kontrola je základní, nejlevnější a nejvyužívanější diagnostickou metodou, která využívá pouze lidský zrak. Pomocí vizuální diagnostiky lze identifikovat pouze viditelné vady, jako jsou praskliny, lomy, trhliny, delaminace i zastínění, které způsobují pokles výkonu FV panelu. Výsledná zpráva obsahuje soupis všech vad a nedostatků včetně přiložené fotodokumentace. Zkouška je prováděna ve shodě s normou ČSN EN 61215 ed. 2. [41]

2.2.2 Diagnostika solárním analyzátozem

Solární analyzátozem je multifunkční měřicí přístroj pro efektivní a bezpečné měření parametrů FV panelu nebo jednotlivého řetězce. Přístroj poskytuje základní parametry měřeného panelu v reálném čase, které lze dále zpracovávat v počítači pomocí příslušného softwaru. Mezi hlavní přednosti přístroje jsou jeho rozměry a hmotnost. [41]

2.2.3 Diagnostika pomocí termografie

Termografie je bezkontaktní metoda měření, která vyobrazuje povrchové teploty zkoumaného tělesa. Diagnostika objektů je prováděna s pomocí termografické kamery. Vadné články jsou vyobrazeny jako články s výrazně vyšší teplotou. Termografická metoda měření je podrobněji popsána ve 4. kapitole.

3 Defekty a vady FV článků

Vady FV článků jsou nežádoucí, ovlivňují životnost a účinnost FV systémů a představují bezpečnostní riziko. Proto je nutné je detekovat a identifikovat před instalací článku do modulu. Vady FV článků vznikají při procesu výroby, ale především při manipulaci a instalaci.

3.1 Mechanické defekty

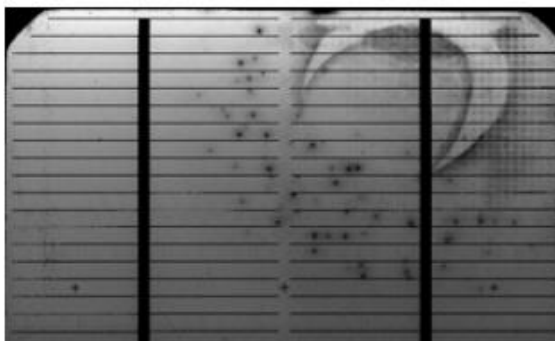
Křemíkové FV články jsou velmi tenké, a proto jsou velmi náchylné na mechanické namáhání. Mezi mechanické defekty patří mikropraskliny, praskliny, škrábance a lomy. Ty nejčastěji vznikají neopatrnou nebo špatnou manipulací, případně vlivem atmosférických podmínek. Při výrobním procesu velmi často vznikají praskliny uvnitř struktury článku, které nejsou viditelné lidským okem. V závislosti na tvaru prasklin mohou vznikat tzv. mrtvé plochy, které nepřeměňují sluneční energii na energii elektrickou a způsobující ztrátu výkonu. Zpravidla platí, že pokud je mrtvá plocha článku menší než 8 %, úbytek účinnosti je zanedbatelný. Na *Obr. 3.1* jsou vyobrazeny mechanicky poškozené články. [43, 44]



Obr. 3.1 Mechanicky poškozené články [42]

3.2 Nehomogenita difuzní vrstvy

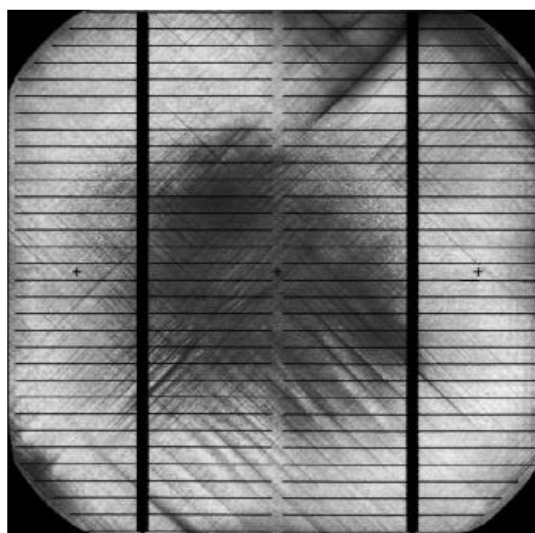
Nehomogenita difuzní vrstvy, viz *Obr. 3.2*, je závažná vada, vznikající při výrobě PN přechodu. Nehomogenita vzniká při tvorbě polovodiče typu N, kdy do plynu fosforu vniknou nečistoty. Vlivem nehomogenity dochází ke snížení generovaného proudu. [8, 44, 45]



Obr. 3.2 Nehomogenita difuzní vrstvy [45]

3.3 Pnutí v článku

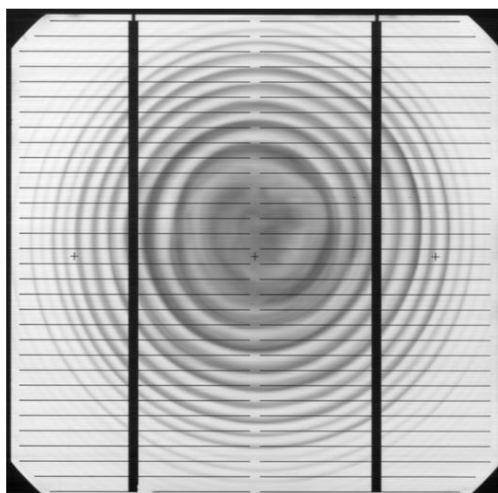
Pnutí v článku je dalším z materiálových vad, je vyobrazeno na *Obr. 3.3*. Pnutí v článku je způsobeno špatně nastaveným procesem výroby ingotu Czochralského metodou. Vzniká nerovnoměrným tuhnutím ingotu křemíku při výrobě. [8, 44, 45]



Obr. 3.3 Pnutí v článku způsobené při výrobě [44]

3.4 Vírový defekt

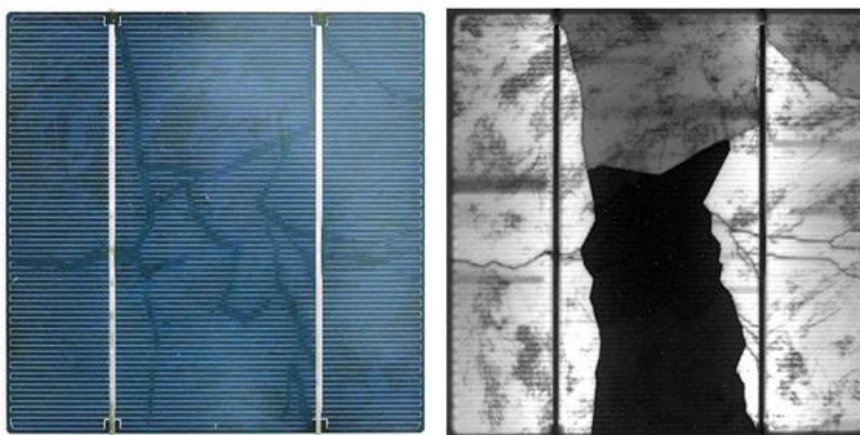
Vírový defekt je vada v článku, která tvarem soustředných kružnic v článku připomíná vír. Vírový defekt je vyobrazen na *Obr. 3.4*. Defekt vzniká při výrobě monokrystalu křemíku Czochralského metodou. Způsobena je tím, že se oxid křemičitý dostane do taveniny čistého křemíku. Vlivem příměsi dochází ke snížení generovaného proudu článku, a tím i snížení účinnosti. [8, 44, 45]



Obr. 3.4 Vírový defekt způsobený při výrobě monokrystalu křemíku [45]

3.5 Šnečí cestičky

Šnečí cestičky (snail tracks), viz *Obr. 3.5*, jsou okem viditelné cestičky na přední straně panelu, připomínající cestičku šneka. Na galvanickém propojení se cestičky vyznačují šedou až černou barvou. Ke zbarvení cestiček obvykle dochází do 1 roku od instalace FV panelů. Cestičky vznikají na hranách neviditelných prasklin v článku.

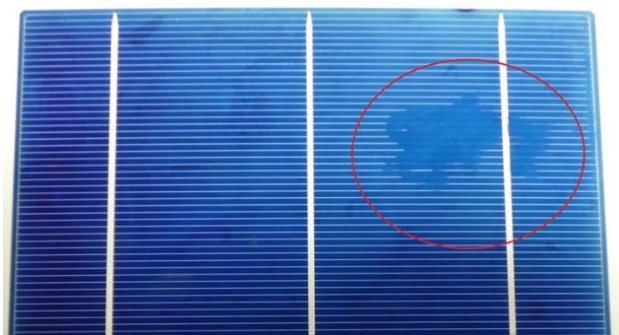


Obr. 3.5 Šnečí cestičky, vpravo totožný článek měřený metodou ELCD [46]

Tmavý vzhled destiček je způsoben reakcí vlhkosti a galvanické mřížky článku s plynem oxidu uhličitého, který je uložen v neviditelných mikroprasklinách. Rychlost růstu destiček je ovlivněna teplotou, vlhkostí a UV zářením. Jaký vliv mají destičky na články, není dosud jasné. Existují dvě teorie. Jedna tvrdí, že vada je pouze vizuální a na výkon nemá prakticky žádný vliv. Druhá teorie tvrdí, že vada způsobuje snížení výkonu článku. Záleží ovšem na typu praskliny. Některé praskliny vytvoří mrtvou plochu, jiné nikoliv. [43, 46]

3.6 Nedokonalé galvanické propojení

Jak bylo zmíněno, z důvodu dosažení potřebného napětí, jsou jednotlivé články galvanicky propojené do řetězců. Články jsou propojeny z přední i zadní strany. Nedokonalé propojení vzniká v důsledku nekvalitního pájení, nebo nedokonalého sítotisku, viz *Obr. 3.6*. Následkem je neúplný odvod generovaného proudu z článku, nebo nedokonalé propojení článků. [43, 45]



Obr. 3.6 Nedokonalé natištěné sběrné kontakty [47]

3.7 Nečistoty

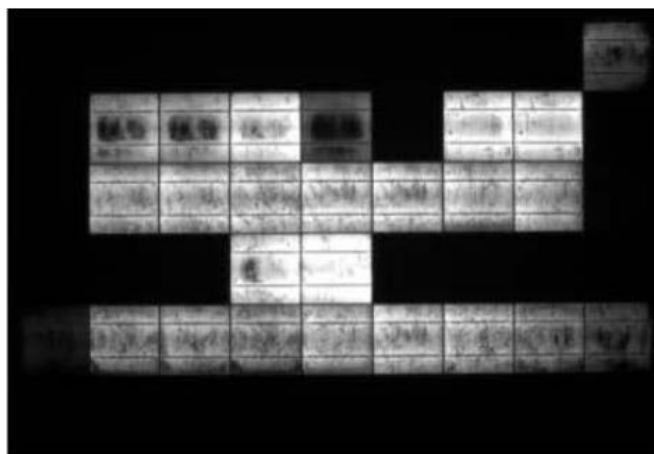
Nečistoty v podobě prachu vnikají do struktury článku při výrobě. Prach může do materiálu vniknout při výrobě samotných plátů nebo při difuzi N vrstvy. Nečistoty snižují kvalitativní zpracování FV článků, jak je patrné z *Obr. 3.7*. [8, 44, 45]



Obr. 3.7 Nečistoty vzniklé při výrobě [45]

3.8 Potenciálová indukovaná degradace

Potenciálová indukovaná degradace, která je známá pod zkratkou PID, je vyvolána rozdílem napětí v řetězci a urychlena vysokou vlhkostí a vysokými teplotami. Jedná se o nepříznivý jev, který způsobuje úbytek výkonu FV panelů v řádech až desítek procent a je pozorován u křemíkových FV panelů. Jev se začíná projevovat v průměru po 2 až 4 letech od instalace a spuštění FVE. Degradace je způsobena svodovými proudy, které vznikají v důsledku rozdílu potenciálu mezi články a uzemněnou částí rámu. Svodové proudy, tvořené zápornými nosiči náboje, migrují od místa vyššího potenciálu do míst nižšího potenciálu. Četnost vzniku svodových proudů je závislá na výběru použitých materiálů při konstrukci panelu. Ochranné sklo a zapouzdření článků negativně přispívá ke tvorbě svodových proudů. Podle výzkumů se negativně projevuje ochranné sklo s obsahem sodíku, naopak pozitivně se projevují křemenná skla. Materiál EVA, který je použit pro zapouzdření článků, obsahuje kyselinu octovou. Ta reaguje s vlhkostí a přispívá k rozpuštění kovových iontů. Typickým projevem PID je snížení výkonu při snížení hodnoty napětí naprázdno, včetně změn v zobrazení v infračervené oblasti. Jev může být vratný, nebo nevratný, v závislosti na příčině vzniku. Nevratný efekt vzniká elektrochemickými procesy, které vedou k delaminaci fólie FV modulů, a tím ke snížení celkové účinnosti. Vratný efekt je známý také pod pojmem povrchová polarizace nebo polarizační efekt. Vratná forma efektu byla zdokumentována v roce 2005. Povrchová polarizace vzniká na povrchu článku s vysokým účinkem přeměny. Testování článků ukázalo, že přivedením stejnosměrného napětí opačné polarity lze povrchovou polarizaci zvrátit. Vratné změny jsou patrné většinou mezi 40 - 60 dny. PID jev zaznamenaný pomocí metody ELCD je patrný na *Obr. 3.8*. [43, 48, 49]



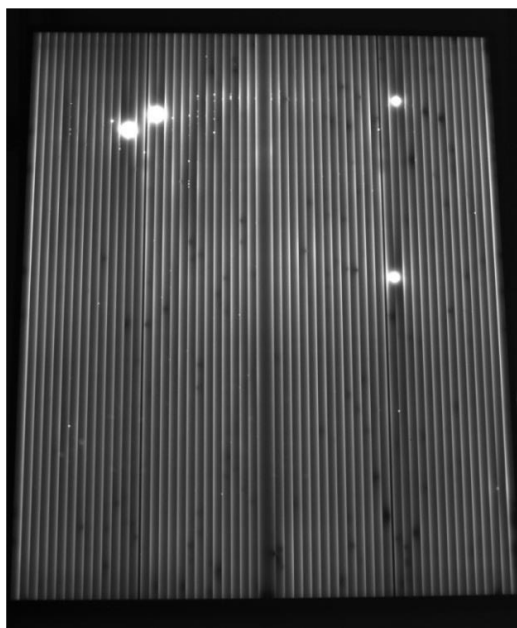
Obr. 3.8 Postižený FV panel PID jevem, diagnostikovaný metodou ELCD [43]

3.9 Degradace způsobená dopadajícím zářením

Dopadající záření způsobuje zbarvení a degradaci EVA fólie nebo jiných materiálů použitých k zapouzdření článků. Nejedná se tedy o vadu samotných článků, ale o vadu celých modulů. Materiál EVA obsahuje mnoho přísad, včetně tepelných a UV stabilizátorů. Jejich poměr nemusí být vždy správný. Vlivem působení dopadajícího záření může dojít k zbarvení a samotné degradaci. Při zvýšených teplotách a vlivem UV záření dochází ke žloutnutí až hnědnutí fólie. Takto znehodnocený materiál se pak stává více náchylným na poškození a způsobuje zastínění článků. Degradované EVA fólie mohou způsobit pokles výkonu v řádu jednotek procent. [43]

3.10 Hot spot zkraty

Hot spot zkraty se objevují hlavně u tenkovrstvých článků. Vady vznikají již během výroby vlivem nečistot nebo vlivem rozdílné krystalizace při vyvážení sběrných kontaktů. Vznikají také za provozu při vysoké hodnotě závěrného proudu. Závěrný proud vzroste, pokud je článek zastíněn. Zkraty v článku jsou identifikovatelné pomocí ELCD diagnostiky, nebo pomocí termografické metody. Zkraty jsou vyobrazeny jako tečky, plochy nebo cestičky, viz *Obr. 3.9*. Hot spot zkraty dosahují vysokých teplot, v mezních případech může dojít až k poškození článku. Pokles výkonu je závislý na počtu poškozených buněk. [43]



Obr. 3.9 Hot spot zkraty, diagnostikované metodou ELCD [43]

4 Termografie pro diagnostiku FV systémů

Termografie je obor, který se zabývá bezkontaktním měřením rozložení teplot na analyzovaném objektu. Termografie pracuje s elektromagnetickým zářením, jehož vlnová délka se pohybuje v oblasti infračerveného záření. Toto záření označujeme jako tepelné záření. Umožňuje přesnou lokalizaci chybných míst, která jsou charakterizována výrazně odlišnou teplotou. Termografická metoda je velice účinným pomocníkem nejen ve fotovoltaice, ale i v dalších odvětvích elektrotechniky. Uplatňuje se také v průmyslu, stavebnictví, medicíně nebo i při ochraně osob a majetku. Pro pochopení základů termografického měření je důležité znát a pochopit Stefanův – Boltzmannův zákon, pojem absolutně černé těleso, Wienův posunovací zákon a Planckův vyzařovací zákon.

Stefanův – Boltzmannův zákon

Stefanův – Boltzmannův zákon říká, že každé těleso vyzařuje tepelné záření. To se týká i těles, která jsou velmi studená, například kostka ledu. Pro aplikaci zákona je nutno znát pojem emisivita. Emisivita popisuje schopnost tělesa vyzařovat elektromagnetické záření. Nabývá hodnot 0 - 1. Pomocí Stefanova – Boltzmannova zákona jsme schopni stanovit intenzitu vyzařovaného výkonu tělesa I , známe-li jeho teplotu. Výpočet intenzity vyzařovaného výkonu I je dán vztahem:

$$I = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (4.1)$$

ε - emisivita tělesa [-]

σ – Stefanova – Boltzmannova konstanta ($5,6704 \cdot 10^{-8} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$)

T – teplota [K]

Každé těleso je schopno vyzařovat elektromagnetické záření, ale také ho i odrážet nebo pohlcovat. Ve fyzice je pro snadnější popis zdrojů elektromagnetického záření zaveden pojem absolutně černé těleso. Veškerá energie dopadající na absolutně černé těleso je dokonale pohlcena a nedochází k odrazu. Současně je absolutně černé těleso

i dokonalým zářičem s jednotkovou emisivitou. Při různých teplotách T absolutně černé těleso do svého okolí vyzařuje elektromagnetické záření s různým spektrálním rozložením, které nemá konstantní intenzitu vyzařování. Veličina spektrální hustota intenzity vyzařování H_λ stanovuje, jaká část celkové energie vyzářené zdrojem za 1 sekundu přísluší záření o vlnové délce λ při dané teplotě zdroje T . Spektrální hustota intenzity vyzařování je dána podílem rozdílů hodnot intenzity vyzařovaného výkonu ΔI a vlnové délky $\Delta\lambda$ při konstantní teplotě T .

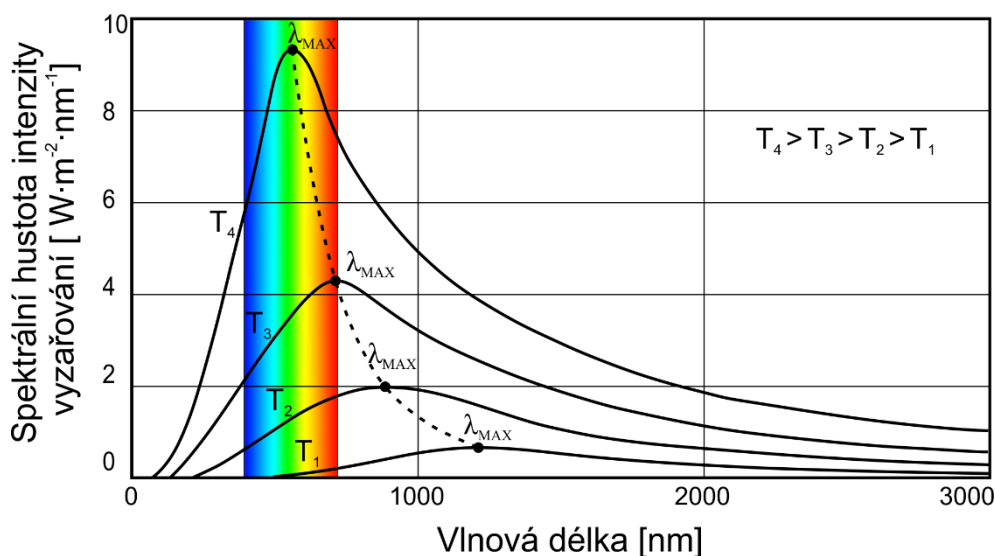
$$H_\lambda = \frac{\Delta I}{\Delta\lambda} [W \cdot m^{-2} \cdot nm^{-1}] \quad (4.2)$$

ΔI – rozdíl hodnot intenzity vyzařovaného výkonu [W/m^2]

$\Delta\lambda$ – rozdíl hodnot vlnové délky [nm]

Wienův posunovací zákon

Ze vztahu pro výpočet intenzity vyzařovaného výkonu plyne, že se vzrůstající teplotou prudce roste spektrální hustota intenzity vyzařování. Maximální hodnota H_λ nastává při hodnotě vlnové délky λ_{\max} a je nepřímo úměrná velikosti teploty absolutně černého tělesa. Se vzrůstající teplotou se hodnota H_λ přesunuje ke kratším vlnovým délkám, jak lze pozorovat na Obr. 4.1.



Obr. 4.1 Závislost spektrální hustoty intenzity vyzařování absolutně černého tělesa na vlnové délce [50]

To vysvětluje poznatek, že zahřátá tělesa, která dosáhnou Draperova bodu, přibližně 525 °C, začínají vyzařovat viditelné záření. Například tělesa s teplotou nad 600 °C se nám jeví jako červená. Tělesa s teplotou přibližně 1 300 °C se nám jeví jako bílá, a to pro zastoupení všech vlnových délek viditelného spektra. Při vyšších teplotách se barva těles jeví jako bílá až modrá. Závislost popsal fyzik Wilhelm Wien, a je dána Wienovým posunovacím zákonem.

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T} [m] \quad (4.3)$$

b – Wienova konstanta (2,897 729 mm·K)

Planckův vyzařovací zákon

Planckův vyzařovací zákon říká, že zdroje elektromagnetického záření vyzařují nebo pohlcují po kvantech energie E , a to nespojitě. Velikost vyzařovaných kvant závisí na vlnové délce záření. Na základě tohoto jednání přiřadil ke každému kvantu záření energii, která je úměrná k vlnové délce záření. [50, 51]

$$E = h \cdot \frac{c}{\lambda} [J] \quad (4.4)$$

4.1 Termografická rovnice

Pro formulaci termografické rovnice použijeme Stefanův – Boltzmannův zákon. Při snímání informací z měřeného objektu pomocí termokamery nejsou nikdy pro měření zajištěny ideální podmínky. Do termografické rovnice musíme proto zahrnout mimo intenzitu vyzařování měřeného tělesa také intenzitu vyzařování okolních objektů a intenzitu vyzařování atmosféry včetně její teploty. Při výpočtu je důležité počítat i s transmitancí atmosféry, která ovlivňuje propustnost záření. Všeobecně se hodnota transmitance atmosféry blíží jedné. Celkové zaznamenané infračervené záření termokamerou I_{tot} je součtem intenzit zmíněných parametrů.

$$I_{tot} = \varepsilon \cdot \tau_{atm} \cdot \sigma \cdot (T_{obj})^4 + (1 - \varepsilon) \cdot \tau_{atm} \cdot \sigma \cdot (T_{refl})^4 + (1 - \tau_{atm}) \cdot \sigma \cdot (T_{atm})^4 \quad (4.5)$$

τ_{atm} – transmitance atmosféry [-]

T_{obj} – teplota objektu [K]

T_{refl} – odražená teplota [K]

T_{atm} – teplota prostředí [K]

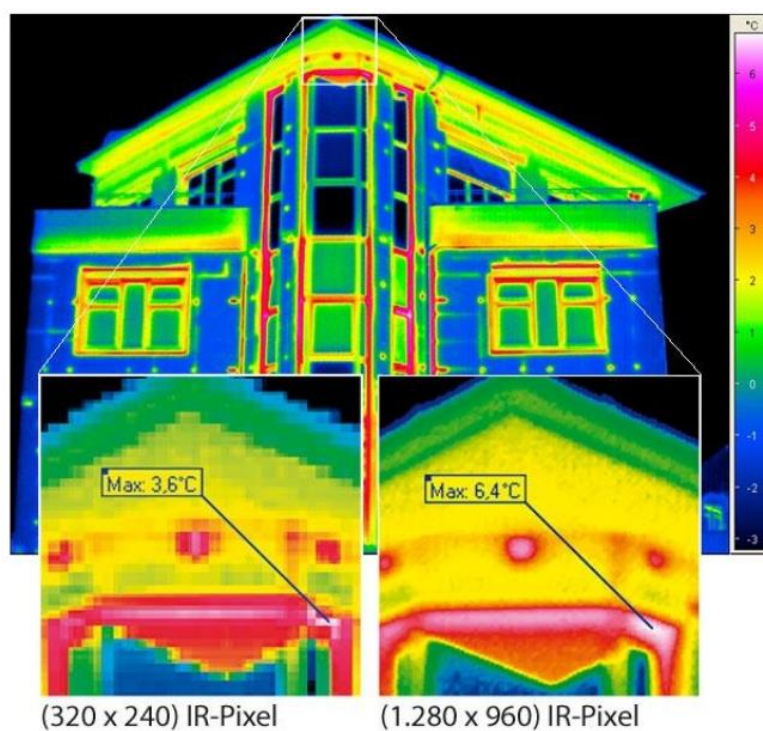
Termografická rovnice platí, pokud zanedbáme spektrální závislost na infračerveném záření a úhel dopadu infračerveného záření na měřený objekt. [52]

4.2 Termografická diagnostika FV systému

Termografická diagnostika FV systému je diagnostika patřící do skupiny diagnostik prováděných v terénu. Měření probíhá za pomoci termokamery, která snímá plochu FV panelů v infračerveném spektru a převádí ji do viditelného spektra. Termografie je jednoduchá, přesto velice významná diagnostická metoda, která umožňuje rychlé zjištění závad nebo defektů. Diagnostiku je možno provádět bez nutnosti odpojení měřeného panelu od sítě či spotřebiče. Termografické měření navíc umožňuje v krátkém časovém intervalu měřit velké plochy s vysokou přesností. Principem termografie je analyzovat stav FV modulů nebo FVE pomocí termokamery a z následných termogramů (termografických snímků) vyhodnotit rozložení teploty na článcích. Vady nebo defekty jsou na termogramu zobrazeny jako místa s vyšší teplotou. Tato místa se nazývají hot spoty. Zdravé články fungují jako generátory elektrické energie. Oproti tomu vadné články působí jako spotřebiče. Pro brzké zjištění závad je vhodné použít tuto metodu ihned po instalaci FV panelů. Diagnostiku je také vhodné použít v průběhu provozu. Samotné měření je velice rychlé, jednoduché a relativně nízkonákladové. [43, 44, 53, 54, 55]

4.3 Termokamera

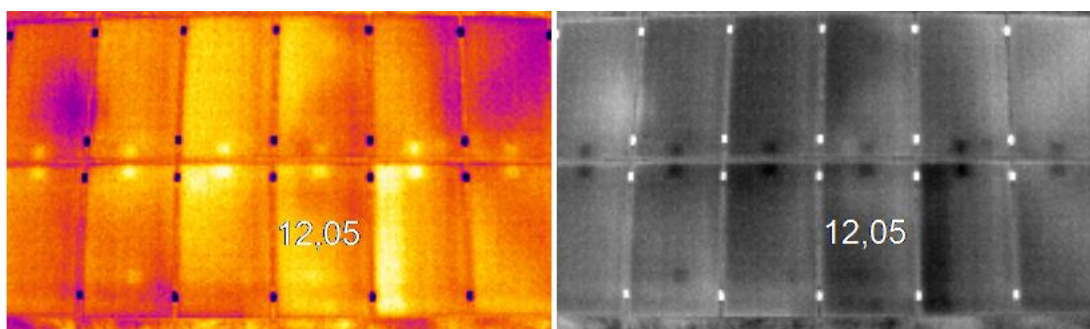
Termokamera je přístroj pracující na principu bezkontaktního měření teploty. Je důležité, že termokamera neměří teplotu přímo, ale je dopočítána pomocí zadaných parametrů v přístroji. Stanovuje teplotu na povrchu objektu, která se šíří radiací. Radiace je proces, při kterém předměty s teplotou vyšší než je hodnota absolutní nuly 0 K (-273,15 °C) emitují energii ve formě elektromagnetického záření do okolí. Termokamera zaznamenává informace v infračerveném spektru a převádí je do viditelného spektra. Hodnoty teplot jsou od sebe rozlišeny barevnou škálou. Pro termografickou diagnostiku jsou termokamery vybaveny nechlazeným detektorem infračerveného záření typu mikrobolometr. Takové detektory jsou citlivé ve vlnovém spektru mezi 8 a 14 μm , avšak ochranné sklo na panelu není v tomto pásmu propustné. Termokamera tedy snímá teplotu na ochranném sklu, nikoliv přímo na člancích. Pro vyobrazení nízkých teplotních rozdílů je nutné používat termokamery s teplotní citlivostí ≤ 80 mK. Teplotní citlivost udává nejmenší teplotní rozdíl na měřeném povrchu, který je zaznamenatelný termokamerou. Důležitým parametrem, který ovlivňuje nejen cenu, ale také spektrum použití, je rozlišení infračerveného detektoru termokamery. Nedostatečné rozlišení detektoru může vést k chybným interpretacím výsledků. Vliv rozlišení na přesnost měření je patrný z Obr. 4.2.



Obr. 4.2 Vliv rozlišení termokamery na přesnost měření [56]

Malé rozlišení detektoru se projevuje většinou při měření vzdálených objektů. Na těch pak mohou vzniknout chybně naměřené hodnoty v řádech jednotek až desítek procent, a to v závislosti na vzdálenosti měřeného objektu od termokamery.

Pro správné vyhodnocení výsledků z termokamer je potřeba respektovat chybu měření, která je stanovena výrobcem, a správně stanovit emisivitu. Jak již bylo uvedeno, emisivita popisuje schopnost tělesa vyzařovat elektromagnetické záření a nabývá hodnot 0 - 1. Emisivita je závislá na materiálu a pro korektní výsledky měření musí být správně nastavena. Nekovy a plasty mají vysokou emisivitu, blíží se 1. To znamená, že mají schopnost vyzařit maximální množství tepelného záření. Proto je snadné měřit jejich povrchovou teplotu. Při emisivitě rovné 1 vyzaří povrch veškeré množství tepelné energie. Z fyzikálního hlediska se tak jedná o absolutně černé těleso. Naopak lesklé kovy a jejich oxidy se měří velice špatně, jejich emisivita dosahuje hodnot blízkých 0. Zde je proto nutné počítat s nepřesnými výsledky měření. Přední ochranné sklo FV panelu má v infračerveném spektru emisivitu mezi hodnotami 0,85 - 0,9. Parametry termokamery ovlivňují její použitelnost pro dané aplikace. Mezi základní parametry, které ovlivňují i její pořizovací cenu, patří teplotní rozsah, spektrální rozsah, přesnost teploty, teplotní citlivost, optické rozlišení a způsoby ostření. Spolu s termokamerou je dodáván i speciální software, který umožňuje pozdější úpravu termografických snímků, například změnu emisivity, změnu barevné škály pro lepší kontrast rozdílných teplot, viz *Obr. 4.3*, nebo také změnu rozsahu teplotní stupnice.



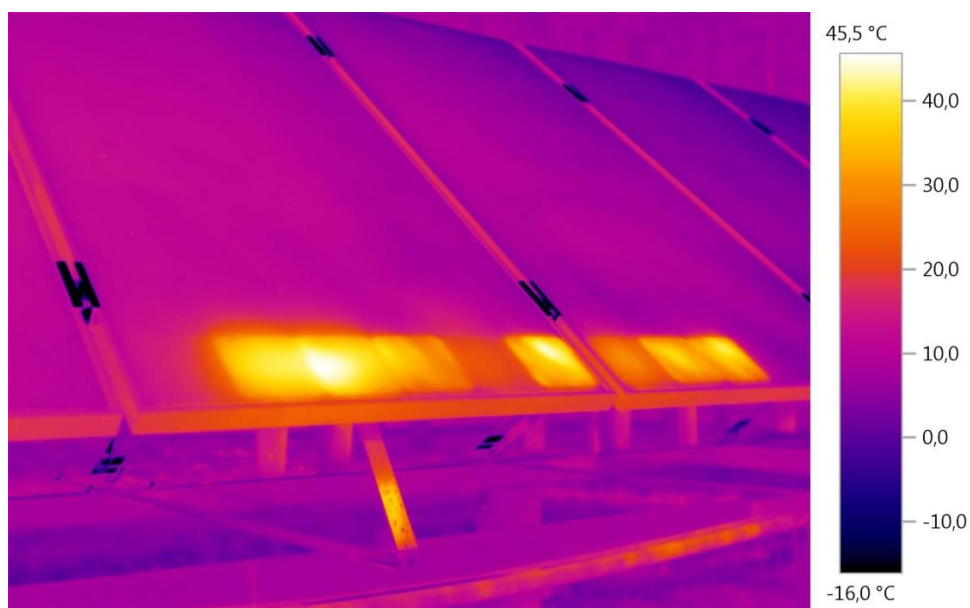
Obr. 4.3 Porovnání kontrastu termogramů s různou barevnou škálou (uvedené teploty jsou ve °C)

Vzhledem k tomu, že je termokamera měřicí přístroj, je nutné, aby také jako každý měřicí přístroj byla kalibrována. Nutnost kalibrace je individuální. Záleží na četnosti použití a na okolních podmínkách, například při použití v nízkých teplotách. Nekalibrovaná nebo nedostatečně kalibrovaná termokamera způsobuje nepřesné měření

teplot, a tím i špatnou interpretaci výsledků. Kalibrace by měla probíhat v souladu s normou ČSN EN ISO/IEC 17025:2005. Pro kalibraci termokamer se používají tři černá tělesa s různými teplotními rozsahy. [57, 58]

4.4 Analýza vad

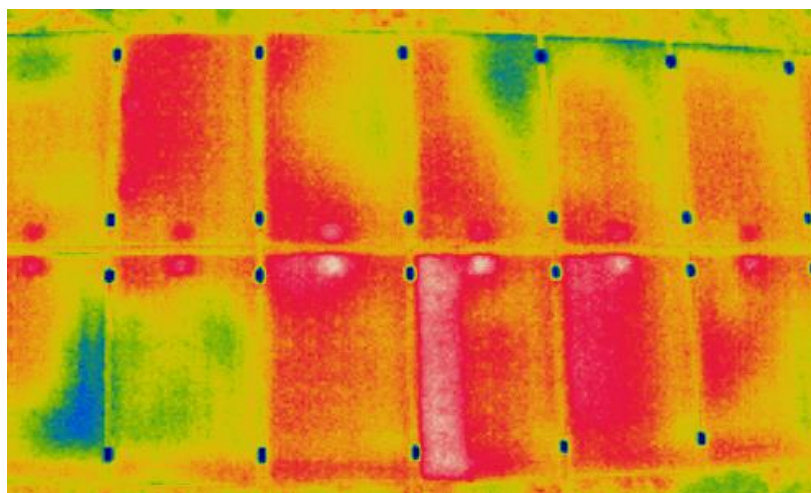
Hot spoty jsou místa s vyšší teplotou, jak lze pozorovat na *Obr. 4.4*. Vznikají z důvodu nehomogenity hustoty proudu v článcích. V místě s vyšší hustotou proudu vzniká oblast s vyšší teplotou. Pokud je teplota vysoká, dochází často k nevratnému poškození článku, např. prasknutí, přetavení galvanických spojů nebo poškození ochranného skla.



Obr. 4.4 Vadné články - hot spoty [59]

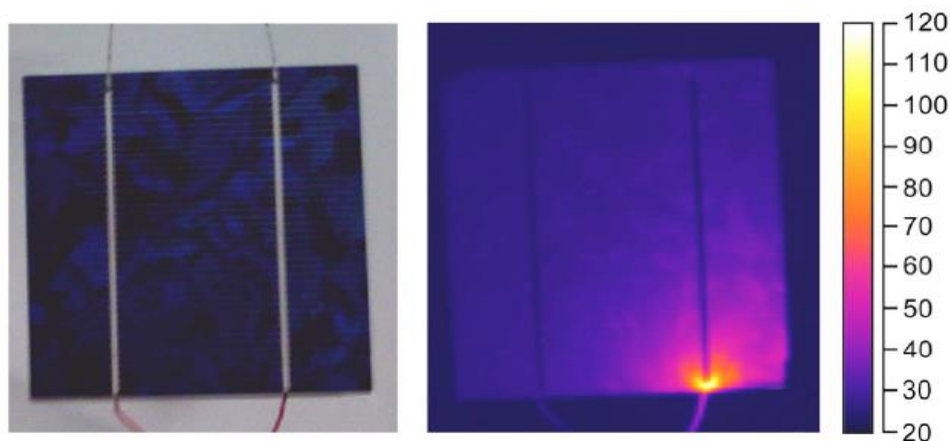
V praxi teplota poškozeného článku dosahuje i více než 100 °C. Takto vysoké teploty mohou zapříčinit požár FVE a následný vznik škod na majetku nebo dokonce na životech. Hot spoty se vyskytují u vadných článků, které produkují méně proudu. Články jsou zapojené do řetězce v sérii, produkují tedy stejnou hodnotu proudu a řetězec má lineární rozložení teploty. Pokud je v řetězci připojen vadný článek, dochází v něm k disperzi energie ze zdravých článků. To má za následek úbytek výkonu a lokální přehřátí. Vadné články se vyznačují především mrtvými plochami, které jsou způsobeny mechanickými defekty, delaminací ochranné fólie, nebo zastíněním. Vady identifikovatelné metodou termografie jsou doprovázeny změnami elektrických parametrů. Dochází k poklesu maximálního výkonu P_{mp} , a to z důvodu snížení proudu nakrátko I_{sc} nebo snížením napětím naprázdno U_{oc} nebo zmenšením faktoru plnění FF .

Pro ochranu článků v řetězci před zastíněním se využívá zapojení jednotlivých řetězců s bypassovými diodami. V praxi se používá zapojení až se 6 diodami, a to v závislosti na konstrukci a produkovaném výkonu panelu. Bypassové diody jsou umístěné v přípojovacím boxu na zadní straně panelu. Bypassová dioda je dioda zapojená v závěrném směru. V případě zastínění je jejím úkolem přemostit řetězec. Pomocí termografie lze identifikovat vadnou bypassovou diodu. Články či řetězce, s nimiž je zapojena vadná bypassová dioda, se na termogramu FV panelu projevují také jako hot spoty, viz *Obr. 4.5*.



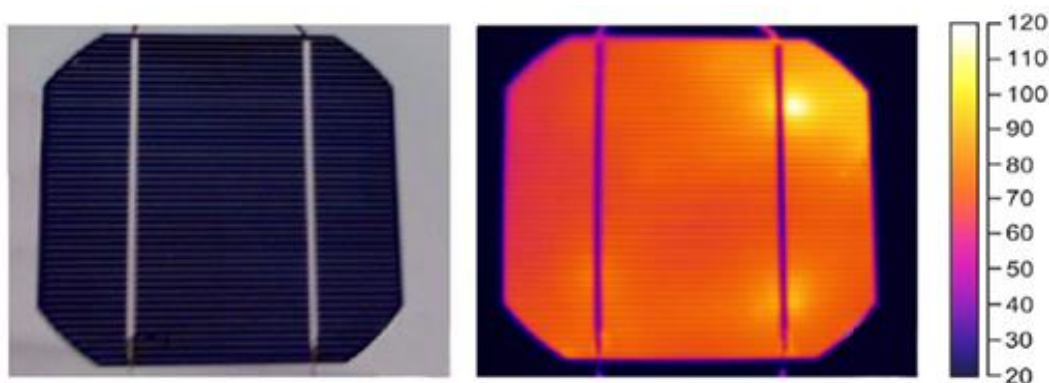
Obr. 4.5 Řetězec s výrazně vyšší teplotou poukazuje na vadnou bypassovou diodu

Horká místa mohou také detekovat degradaci v galvanickém propojení mezi článkem a přípojným kontaktem. Degradaci propojení způsobuje především stárnutí, nebo také nedokonale připájené kontakty. V místě úzkého spoje se vyskytuje vyšší hustota proudu. Ta je doprovázena lokálním nárůstem tepelné energie, jak je patrné na *Obr. 4.6*.



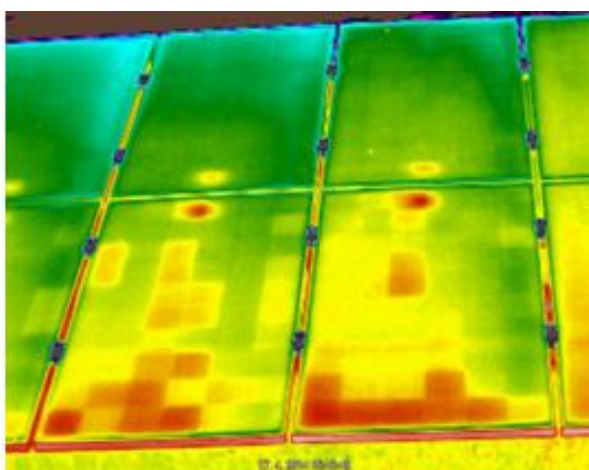
Obr. 4.6 Defekt v galvanickém propojení (uvedené teploty jsou ve °C) [55]

Pro lepší detekci je nutné měření provádět v dostatečné blízkosti. Pomocí termokamery lze měřit i hot spot zkrat. Ty jsou způsobeny nečistotami při výrobě článků a projevují se vysokými teplotami. Měření je ovšem odlišné od ostatních. Diagnostikovaný článek musí být napájen stejnosměrným zdrojem proudu v závěrném směru a bez vnějšího zdroje osvětlení. Proud nejprve teče místy, kde dochází ke zkratům. Na postižených místech je vyšší teplota a tyto zkratky jsou viditelné s pomocí termokamery. Hot spot zkrat je viditelný na *Obr. 4.7*. Měření hot spot zkratů musí probíhat kontrolovaně, aby nedošlo k nenávratnému poškození článku.



Obr. 4.7 Hot spot zkrat (uvedené teploty jsou ve °C) [55]

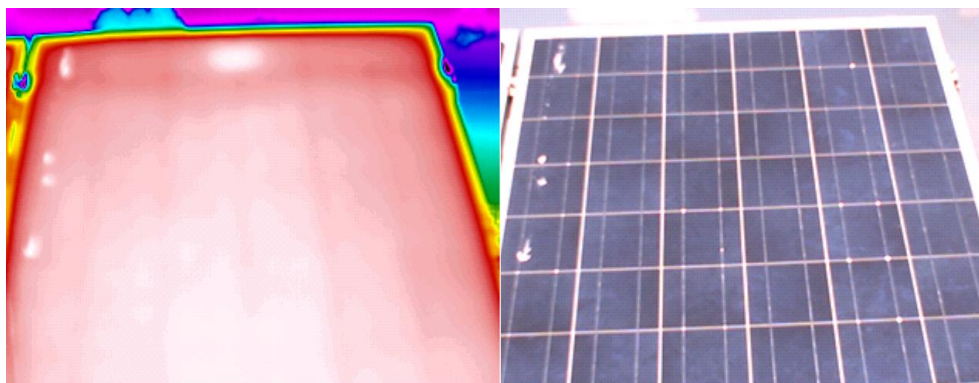
Potenciálová indukovaná degradace, neboli PID jev, lze také snadno identifikovat pomocí termokamery, viz *Obr. 4.8*. Postižené články vykazují vyšší teplotu oproti článkům nepostiženým. Tato vada se na termogramu projevuje tzv. mozaikovým vzorem.



Obr. 4.8 PID jev [60]

Přítomnost delaminace, rozbité ochranné sklo, zbarvení EVA fólie nebo znečištění patří mezi závady, které lze identifikovat termografickou metodou. Takové závady

se také projevují zvýšenou teplotou v místě poruchy. Na *Obr. 4.9* jsou vyobrazeny hot spoty způsobené znečištěním. [43, 44, 53, 54, 55, 57, 60]



Obr. 4.9 FV panel znečištěný ptačím trusem

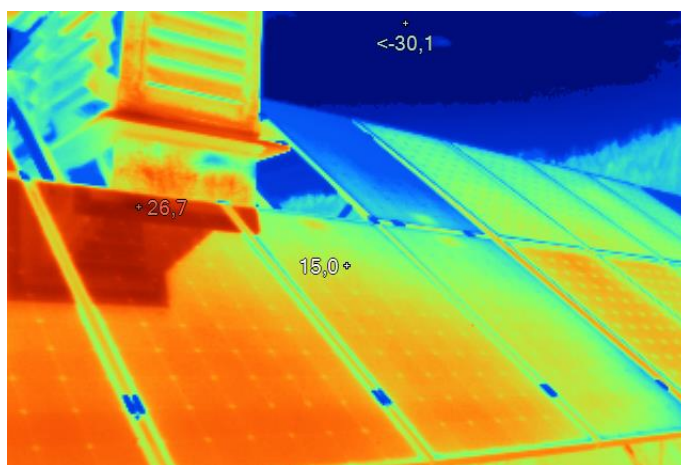
4.5 Postup měření

Pro bezchybnou analýzu a správnou interpretaci výsledků je potřeba dodržet stanovený postup, aby byly eliminovány chyby měření. Pro dosažení vysokého teplotního kontrastu na termogramech je potřeba měření provádět za jasného slunného dne, popřípadě i za polojasna. Za jasné oblohy dosahuje intenzita slunečního záření hodnot od 800 do 1000 W/m², za polojasné oblohy je dosahováno hodnot od 400 do 700 W/m². Minimální hodnota pro dostatečně čitelné termogramy je 500 W/m². Ideálně by se hodnota měla pohybovat nad 700 W/m². Kontrast termogramů mohou zvýšit nízké venkovní teploty nebo dostatečně nízká hodnota teplotní citlivosti termokamery.

Jak již bylo uvedeno, termografické měření umožňuje měřit velké plochy za krátký časový úsek. To omezuje použití termokamer s nízkým rozlišením termogramů. Je doporučováno používat termokamery s minimálním rozlišením obrazu 320 x 240 pixelů, optimálně pak 640 x 480 pixelů. Špatně přístupné, nebo nedostupné FVE umístěné například na střeše budov, je nutno měřit z vysoko zdvižné plošiny. Zde se doporučuje použít termokameru s vyměnitelnými teleobjektivy nebo termokameru s vysokým rozlišením. Měření rozlehlé FVE je uskutečňováno pomocí bezpilotního letounu (dronu) vybaveného speciální termokamerou. Takové měření provádí až dva lidé. Jeden ovládá dron a druhý termokameru. V některých případech může být termokamera připevněna staticky a je ovládán pouze bezpilotní letoun. Měření modulu ze zadní strany je možné, pouze za předpokladu, že je modul z této strany dostupný. Například FV moduly umístěné na pohyblivých stojanech, které sledují pohyb Slunce po obloze,

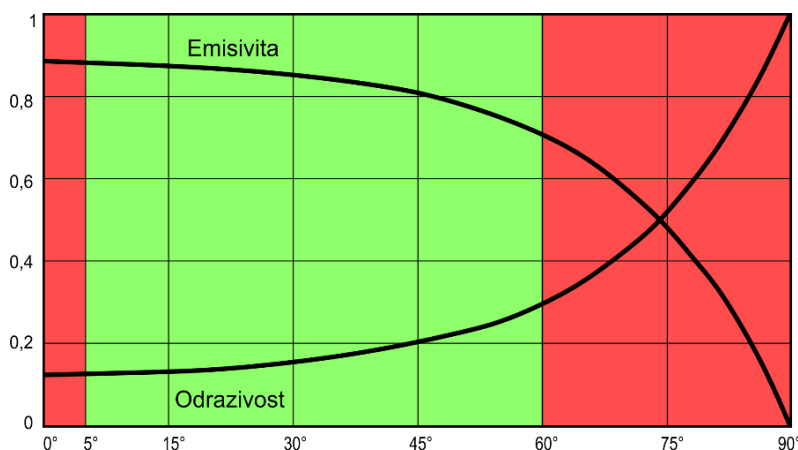
lze diagnostikovat i ze zadní strany. Vyhneme se tak problému s odrazy zdánlivé teploty okolních předmětů a nízkým kontrastem teplot, protože článek není měřen přes ochranné sklo.

Důležitým opatřením pro správné měření je zabezpečení vhodného úhlu mezi termokamerou a měřeným FV panelem. Nedodržení správného úhlu vede k odrazům zdánlivého tepelného záření okolních předmětů a může dojít k chybné interpretaci výsledků. Tepelné odrazy okolních předmětů mohou vyvolat domnění hot spotů, jak je patrné z Obr. 4.10.



Obr. 4.10 Falešné hot spoty způsobené odrazem okolního objektu (uvedené teploty jsou ve °C)

Pro zamezení odrazu obsluhy a termokamery na termografickém snímku není vhodné diagnostikovat FV panel kolmo. Avšak emisivita FV panelu je kolmo nejvyšší a s rostoucím úhlem dochází k jejímu poklesu, viz Obr. 4.11. Z těchto důvodů je dostatečný měřicí úhel mezi 5 °–60 °.

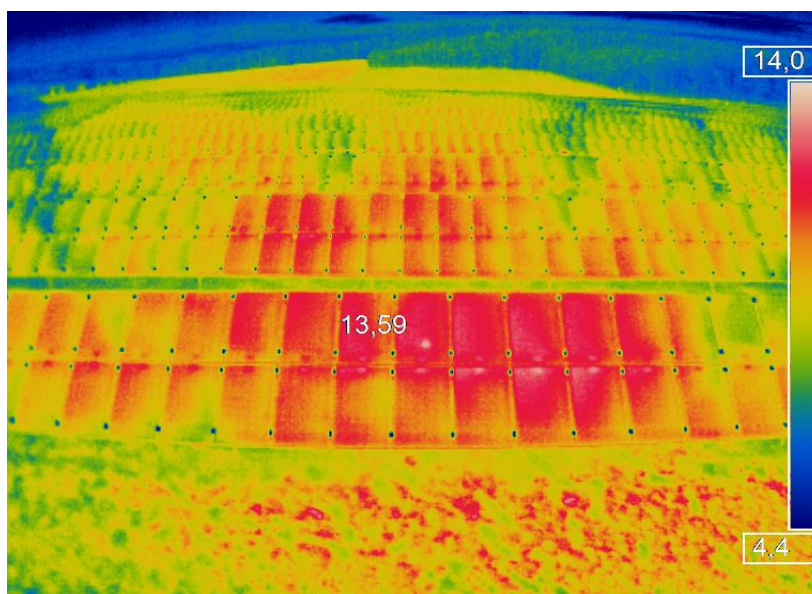


Obr. 4.11 Závislost úhlu na emisivitě a odrzivosti ochranného skla FV panelu [57]

Pro správnou analýzu termogramů je důležitá nejen vhodná termokamera, ale i monitor s věrnou reprodukcí barev. Je tedy potřeba volit monitor s rozšířeným barevným gamutem, aby byly zaznamenány veškeré rozdíly barevných odstínů. V praxi může nastat případ, že nevýrazné teplotní rozdíly, které dokáže termokamera zaznamenat, nemusí být na klasických monitorech reprodukovány. [43, 44, 53, 54, 55, 57, 61]

4.6 Měření pomocí bezpilotního letounu

Termografické měření pomocí bezpilotního letounu, neboli dronu, je v poslední době velice oblíbené a rozšířené. Je prováděno pomocí speciální termokamery, která je připevněna na bezpilotním letounu. Oblastí vývoje, výroby, prodeje a legálním létáním dronů se zabývá společnost TELINK s. r. o. se sídlem v Praze. Společnost byla založena v roce 1997 se zaměřením na RC modely. V roce 2010 konvertovala k prodeji, vývoji a výrobě vlastních bezpilotních letounů pro profesionální i amatérské uživatele. Společnost nabízí komplexní řešení v oblasti bezpilotních letounů, které umožní kvalifikovaný let s bezpilotním letounem v souladu s platnou legislativou České republiky. Společnost TELINK s. r. o. je také schopna zajistit kompletní termografické měření FVE. Uvedené termogramy byly zaznamenány při zkušebním měření FVE Všemyslice, viz *Obr. 4.12*. Ta disponuje maximálním výkonem 1,497 MWp. Podmínky při měření nebyly pro termografické měření zcela ideální, teplota okolí se pohybovala okolo 9 °C. Na obloze se vyskytovala vysoká oblačnost a intenzita slunečního záření dosahovala maximálně hodnoty 400 W/m².



Obr. 4.12 Termogram FVE z bezpilotního letounu (uvedené teploty jsou ve °C)

K měření byl použit bezpilotní letoun TELINK GRID 720 určený pro průmyslové snímání. Letoun může být vybaven záznamovou kamerou a zároveň termokamerou Optris PI 450. TELINK GRID 720 je 6rotorový letoun vyznačující se nízkou hmotností. Je vyobrazen na *Obr. 4.13*. Dlouhou dobu letu zajišťují vestavěné baterie o kapacitě 16 000 mAh. Tento typ bezpilotního letounu byl vyvinut a vyroben společností TELINK s. r. o. Obsahuje řídicí systémy s maximální podporou pro programování letu při využití softwaru UgCS. Software UgCS umožňuje s předstihem naplánovat trasy letu po tzv. waypointech. Waypointy připomínají protnuté body v mřížce. Z toho je odvozen název letounu GRID. Protnuté body v mřížce, tzv. waypointy, jsou vytvořeny pomocí softwaru UgCS, který je vybaven mapovým podkladem. Vytvořený program se uloží do řídicí paměti letounu. Takové řešení šetří čas i letovou dobu bezpilotního letounu. Vzhledem ke konstrukci FVE, které jsou postaveny do tvaru rovnoběžných přímk nebo mřížky, je tento způsob záznamu velice vhodný pro následnou analýzu. Díky rovnoběžnému pohybu lze na sledovaných FV panelech udržet optimální úhel pro měření a zamezit tak odrazům zdánlivé teploty od oblohy nebo okolních předmětů. Výška, ve které letoun snímá záznam, je závislá na rozložení FV panelů v každé řadě FVE. Proto je nutné zvolit vhodnou vzdálenost pro dosažení dostatečné čitelnosti a vyobrazení co největší plochy FVE v termografických záznamech. Výhodou programu, ve kterém je zaznamenán signál z GPS modulu, údaje o trase i výšce letu, je to, že může být na stejném měřeném objektu spuštěn znovu. To zaručuje, že další kontrolní měření bude probíhat rychleji a sofistikovaněji.



Obr. 4.13 Bepilotní letoun TELINK GRID 720 [62]

Termokamera Optris PI 450 je speciálním typem termokamery určeným pro práci s drony. V porovnání s běžnými ručními termokamerami, které váží okolo 1000 g, se vyznačuje malými rozměry (46 x 56 x 90 mm) a velmi nízkou hmotností. Váží 320 g včetně objektivu. Termokamera Optris PI 450, viz *Obr. 4.14*, disponuje nechlazeným detektorem infračerveného záření s rozlišením až 382 x 288 pixelů a velmi dobrou teplotní citlivostí o hodnotě 40 mK. Díky vyměnitelným objektivům a nízké hodnotě teplotní citlivosti je možno dostatečně zjistit rozdílné teploty na FV panelu i z výšky, ve které se bezpilotní letoun nachází. Termokamera je určena pro měření teplot v rozmezí od 20 do 900 °C s tolerancí ± 2 °C. Napájení je zajištěno pomocí USB portu. Termokamera může být ovládána nezávisle na řízení letounu. Na rozdíl od termokamer do ruky, je záznam pořizován do termografických video záznamů ve formátu RAVI. Důvodem je větší flexibilita při měření a následné analýze. Odpadá nutnost pořizovat snímky přímo při měření. Video záznamy z měření je možno upravovat pomocí speciálního programu, stejně jako je tomu u programů pro ruční termokamery. Z video záznamů lze pořádit jednotlivé snímky, které poslouží pro interpretaci výsledků měření. [63]

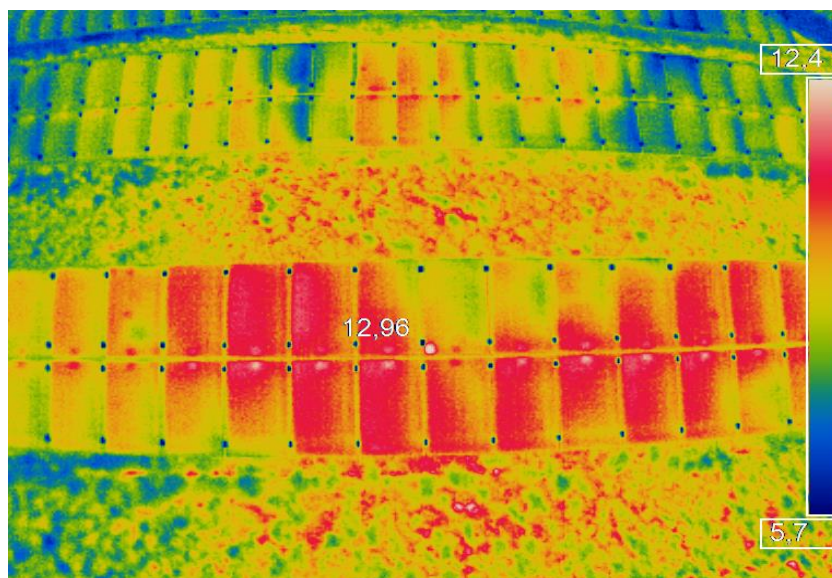


Obr. 4.14 Termokamera Optris PI 450 na bezpilotním letounu TELINK GRID 720 [64]

Výhody, nevýhody a legislativa

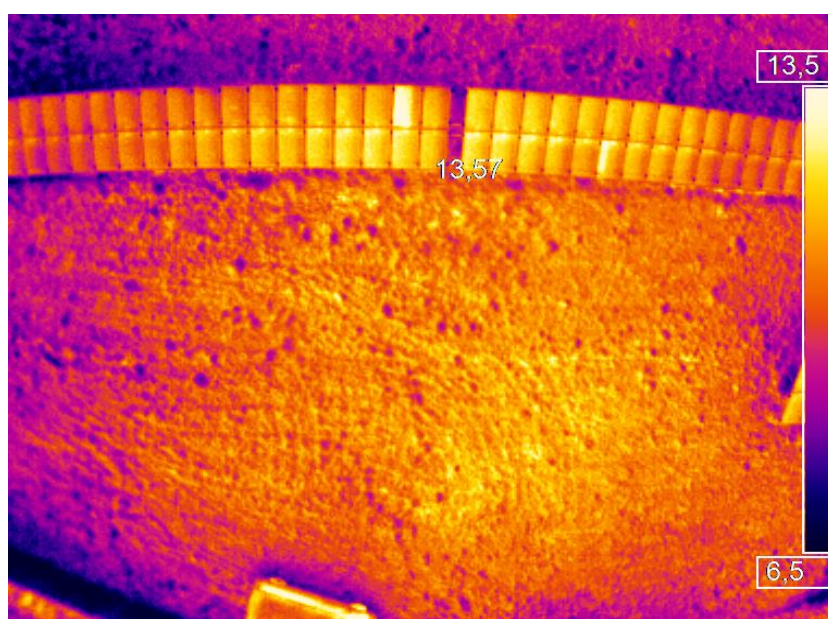
Výhodou termografického měření pomocí bezpilotních letounů je fakt, že měření probíhá rychleji a pohodlněji, především na větších FVE. Další výhodou je určité sofistikované řešení na základě GPS bodů pomocí řídicího programu UgCS. Ten umožňuje budoucí kontrolní měření provádět za kratší čas. Čitelnost termogramů a termografických záznamů z dronů je dobrá, a to kvůli výborným parametrům dostupných termokamer pro

bezpilotní letouny, zejména díky vyměnitelným teleobjektivům, vysokým rozlišením infračerveným detektorů a velmi nízké tepelné citlivosti. Platí, že čitelnost termogramů je lepší, pokud termokamera snímá v co nejmenší vzdálenosti od měřených objektů. Na Obr. 4.15 je vyobrazen termogram z bezpilotního letounu.



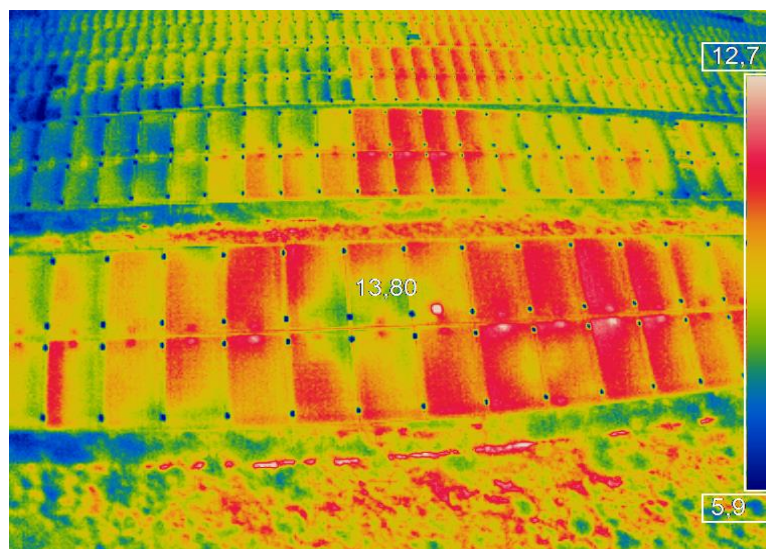
Obr. 4.15 Termogram s viditelným hot spotem a s tepelnými odrazy od oblačnosti (uvedené teploty jsou ve °C)

Se vzrůstající vzdáleností termokamery od měřeného FV panelu se na okrajích termogramu vyskytují FV panely s vysokou hodnotou odrazivosti. To je patrné na Obr. 4.16, kde jsou pozorovatelné i vadné bypassové diody.



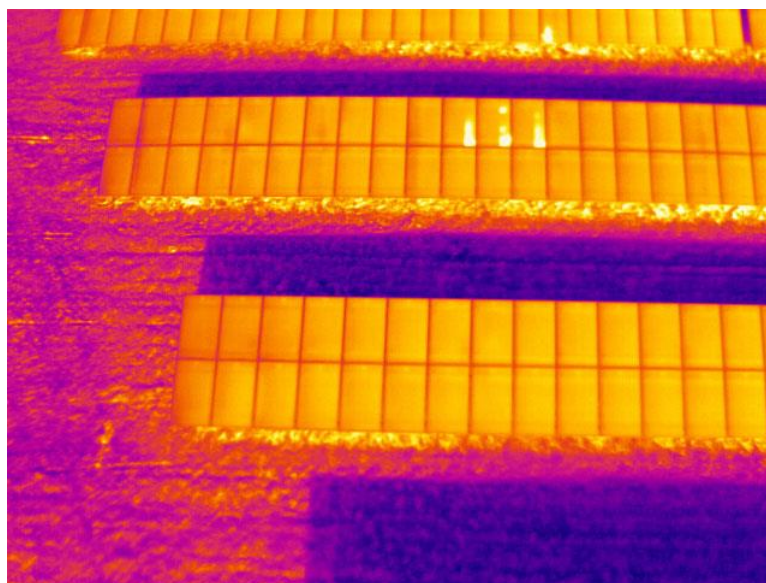
Obr. 4.16 Vadné bypassové diody zaznamenané z dronu (uvedené teploty jsou ve °C)

Na okrajích termogramu může tedy dojít ke špatné interpretaci výsledků. Je ověřeno tvrzení, že emisivita s rostoucím úhlem pozorování klesá a roste odrazivost zdánlivé teploty od okolních předmětů, v našem případě oblačnosti. Odražená oblačnost, včetně vadného článku a vadné bypassové diody je patrná na *Obr. 4.17*.



Obr. 4.17 Ukázka vadného článku (střed) a bypassové diody (vlevo) na termogramu z bezpilotního letounu (uvedené teploty jsou ve °C)

Existují i nevýhody, mezi které se řadí již zmiňované počasí. Je nevhodné měřit při oblačném počasí. To je v termogramech odraženo a způsobuje tak zhoršenou analýzu a výslednou interpretaci výsledků. Odrazy oblačnosti lze potlačit, pokud je záznam pořizován v menší vzdálenosti. Snímek na *Obr. 4.18*, byl pořízen za jasného počasí.



Obr. 4.18 Termogram z bezpilotního letounu bez výskytu tepelných odrazů od oblačnosti [65]

U bezpilotních letadel je nutno dbát zvýšené pozornosti při nárazovém větru. V porovnání s běžnou ruční termokamerou je nevýhodou i vysoká pořizovací cena bezpilotního letounu a termokamery k tomu určené. Další nevýhodou, či spíše nezbytností, je dodržování platné legislativy pro používání dronů pro komerční účely. Každý dron, určený pro komerční účely, musí být evidován Úřadem pro civilní letectví. Na takový přístroj je ze zákona povinnost platit povinné ručení, stejně jako u automobilů. Obsluha zařízení musí mít platné Povolení k létání bezpilotního letadla. Pro komerční účely je navíc specifické to, že obsluha dronu musí být držitelem Povolení k provozování leteckých prací. V České republice je provoz bezpilotních letadel stanoven zákonem č. 49/1997 Sb. o civilním letectví, především pak Doplňkem X – bezpilotní systémy a předpisem L 2 - pravidla o létání.

5 Termografické měření FV elektrárny

Diagnostika FV elektrárny metodou termografie byla provedena na FVE Pěčnov pomocí ruční termokamery. Obec Pěčnov se nachází v okrese Prachatice v Jihočeském kraji.

5.1 FVE Pěčnov

Instalace a spuštění FVE Pěčnov proběhla v roce 2009. FVE disponuje maximálním výkonem 14 kWp. Tohoto výkonu je dosaženo 63 FV panely, každý panel je schopný dosáhnout výkonu až 220 Wp. Články jsou vyrobeny z polykrystalického křemíku. FVE je umístěna na střeše objektu garáže, viz *Obr. 5.1*. FVE je orientována jižním směrem, pro maximální využití jejího potenciálu. Je provozována v zapojení grid - on. Část vyprodukované elektrické energie je spotřebována vlastníkem FVE a část, která není spotřebována, je distribuována do veřejné sítě.



Obr. 5.1 FVE Pěčnov

5.1.1 Měření

Měření se uskutečnilo 12. října 2015, za jasného počasí, bez oblačnosti. V době měření se hodnota intenzity slunečního záření pohybovala těsně pod hodnotou 500 W/m^2 , což je minimální hodnota pro optimální kontrast vadných článků. Venkovní teplota ve stínu v době měření dosahovala $12,5 \text{ }^\circ\text{C}$ a byla naměřena na teplotním čidle v místě měření. Hodnota slunečního záření byla naměřena na amatérské meteostanici v městě

Volary. Volary se nachází nedaleko FVE Pěčnov, vzdušná vzdálenost mezi místy je 16,5 km. Vlhkost vzduchu dosahovala v době měření 70 %. Tento údaj nemá na měření zásadní vliv. Může ovšem dojít k malému zkreslení teplotních údajů, které byly naměřeny. V době měření byly však okolní podmínky v souladu s doporučenými podmínkami od výrobce termokamer. V případě měření mimo rozsah doporučených podmínek může dojít k výraznému zkreslení výsledků.

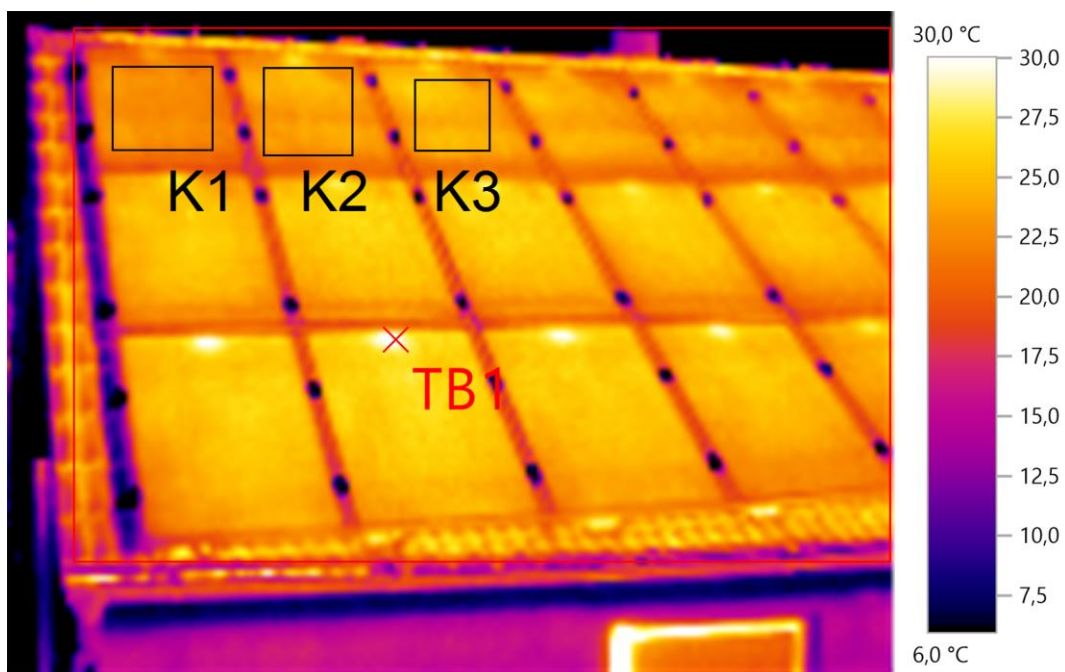
K měření byla použita termokamera od výrobce TESTO typu 875 – 2 s manuálním ostřením. Termokamera je vybavena detektorem infračerveného záření s rozlišením až 320 x 240 pixelů a teplotní citlivostí 50 mK. Senzor termokamery je schopný měřit až do teplot 550 °C, v rozmezí od -22 do 350 °C se teplotní odchylka pohybuje ± 2 °C. Termokamera je vybavena záznamovým zařízením, které je schopno pořídit fotografie o rozlišení 640 x 480 pixelů. Dále disponuje LCD displejem o velikosti 3,5 palce. Firmware, kterým je termokamera vybavena, umožňuje použití funkce Solar. Funkce Solar je vhodná pro měření FV panelů, automaticky vyznačí nejteplejší místo. Pokud je k přístroji připojen kompatibilní detektor intenzity slunečního záření, umožňuje do termogramu naměřenou hodnotu uložit. Termokamera komunikuje s počítačem pomocí rozhraní USB 2.0. Spolu s termokamerou je dodáván software pro pozdější podrobnou analýzu. Z důvodu dobré dostupnosti FVE probíhalo samotné měření z přední strany modulů, a to pouze s ruční termokamerou bez dalších pomocných prostředků. Všechny doporučené postupy pro správnou diagnostiku byly dodrženy. Optimální úhel při měření mezi termokamerou a FV panely byl dodržen. Díky tomu se na termogramech nevyskytly tepelné odrazy od okolních předmětů, ani od oblohy, které by vyvolávaly dojem hot spotů, a mohly by zapříčinit chybnou interpretaci výsledků.

Pořízené termografické snímky byly analyzovány pomocí programu Testo IRSoft. Ten byl součástí použité termokamery. Při úpravě snímků byly do programu zadány doplňující parametry k měření, které zajistily lepší kontrast snímků. Vzhledem k tomu, že přední ochranné sklo FV modulů má emisivitu v rozmezí od 0,85 do 0,9, byla emisivita v programu nastavena na hodnotu 0,87. Dále byla nastavena teplota okolí a vlhkost. Snímky byly zkoumány s různými barevnými paletami a s různým rozsahem teplotní stupnice pro zajištění co nejlepší čitelnosti snímků, a tím i co nepřesnější interpretaci výsledků měření. V této části práce jsou uvedeny termogramy s pevným rozsahem teplotní stupnice. Z důvodu velikosti rozlohy FVE a rozlišení objektivu termokamery bylo pořízeno

celkem šest termografických snímků, aby byla zajištěna jejich dostatečná čitelnost a výsledky mohly být zřejmé.

Analýza termogramů

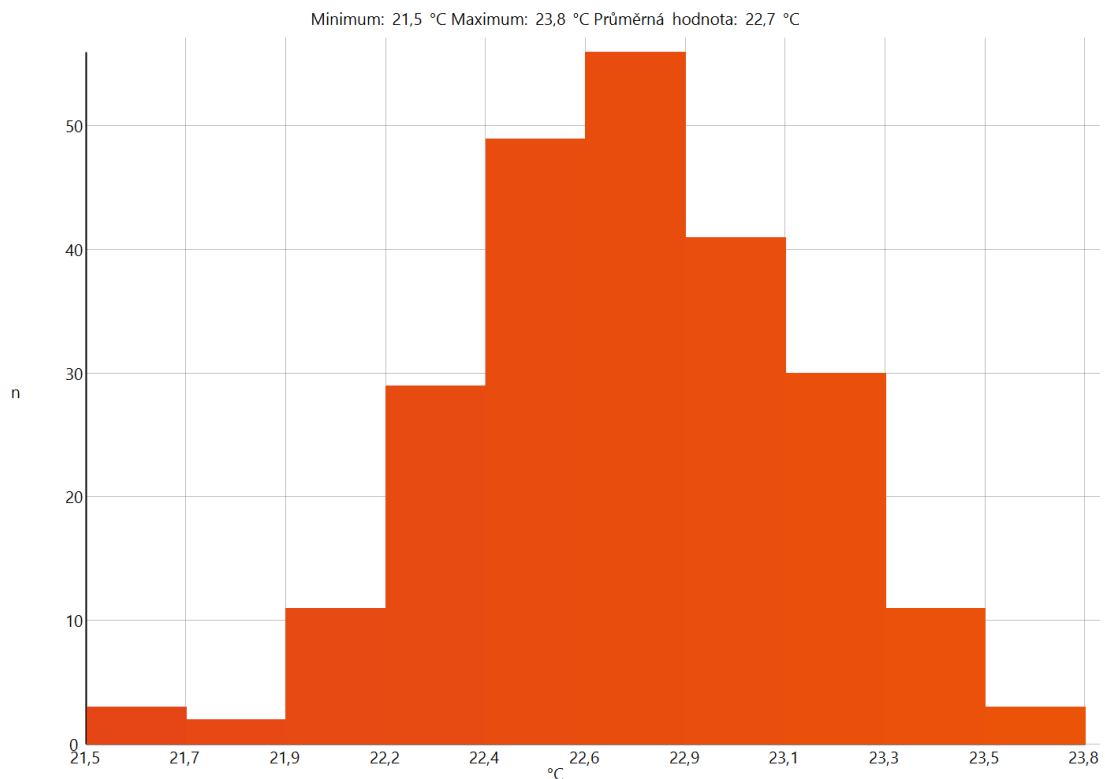
Analýza termogramů proběhla v programu Testo IRSoft. Termogramy byly kontrolovány vizuálně. Bylo sledováno, zda se na FV panelech nevyskytuje jeden nebo více článků, které by vykazovaly zvýšenou teplotou. Poté na každý FV panel na snímku byla aplikována funkce histogram, viz *Obr. 5.2*. Ta umožnila zobrazit četnost rozložení teplot v daném intervalu. Funkce histogram také zobrazila maximální, minimální a průměrnou hodnotu teploty. Data histogramu byla získána pro určitou oblast. Oblasti, které lze v programu pro získání dat použít, je kruh, obdélník, elipsa, polygon, nebo celý snímek.



Obr. 5.2 Vyznačené oblasti měření teploty

Z oblasti K1 použité pro první FV panel, byl vygenerován histogram, z něhož je patrná četnost naměřených hodnot teploty v daných intervalech, a to včetně stanovení maximální, minimální a průměrné teploty, viz *Obr. 5.3*. V teoretické části práce je uveden pojem maximální rozdíl teplot na FV panelu. Ten vyjadřuje nejvyšší rozdílovou hodnotu mezi maximální a minimální hodnotou teploty po aplikaci oblasti K1 až K_n na všechny FV panely, které se v termogramu vyskytují. Maximální rozdíl teplot na FV panelu nelze

uvádět jako rozdíl maximální a minimální teploty z celé oblasti termogramu. Z důvodu odlišné emisivity panelů v termogramu by mohlo dojít ke zkreslení výsledků. Každý FV panel má vůči termokameře různý úhel pozorování, a tím i odlišnou emisivitu a odrazivost.

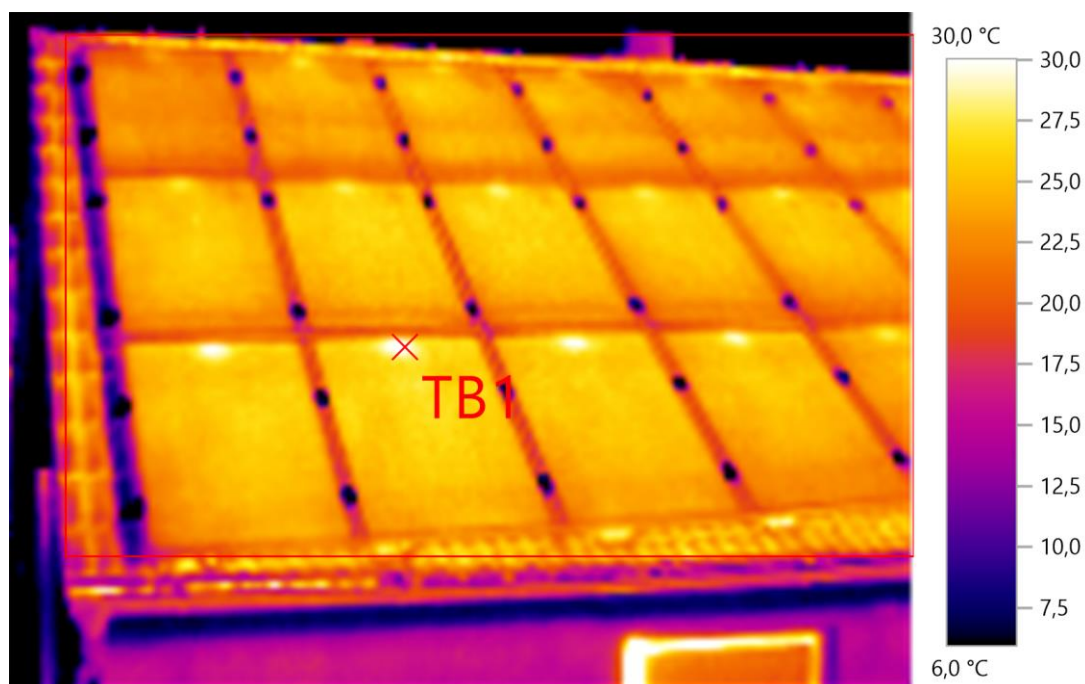


Obr. 5.3 Histogram oblasti K1

Pro určení maximální hodnoty teploty v termogramu byla použita funkce teplý bod. Ta umožňuje najít nejteplejší místo v určité oblasti. Funkce teplý bod byla v každém termogramu aplikována na celou oblast FV panelů, jak lze vidět na Obr. 5.2. Po nalezení nejteplejšího místa byl následně určen rozdíl mezi nalezeným nejteplejším bodem a nejvyšší teplotou v oblasti FV panelu, kde byl nejteplejší bod zjištěn.

Na prvním termogramu, viz Obr. 5.4, vidíme, že rozložení teploty na měřených panelech je téměř homogenní. Maximální rozdíl teplot na FV panelu byl 2,4 °C. Průměrný rozdíl teplot na všech FV panelech se pohyboval kolem 2 °C. Rozdíl teplot je způsoben především měřicí chybou termokamery. Chyba je v menší míře způsobena i malým rozlišením termokamery a vlivem atmosféry. Místa s vyšší teplotou, která jsou

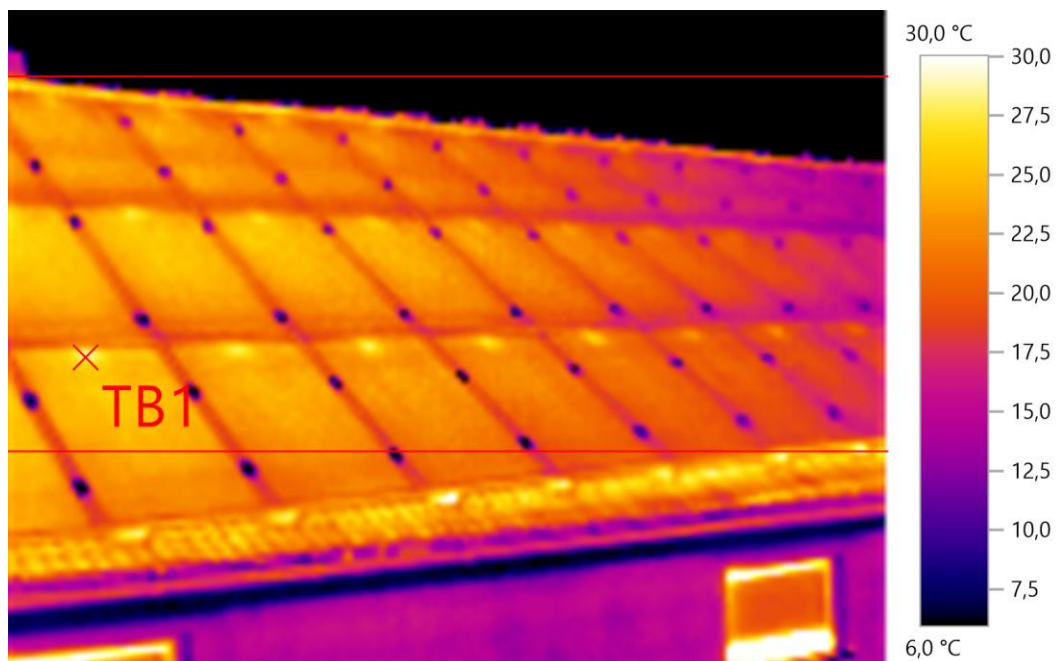
na termogramech vidět, byla zaznamenávána v prostoru, v němž se na zadní straně panelu nachází přípojovací box se třemi bypassovými diodami.



Obr. 5.4 První termogram z termografického měření FVE Pěčnov

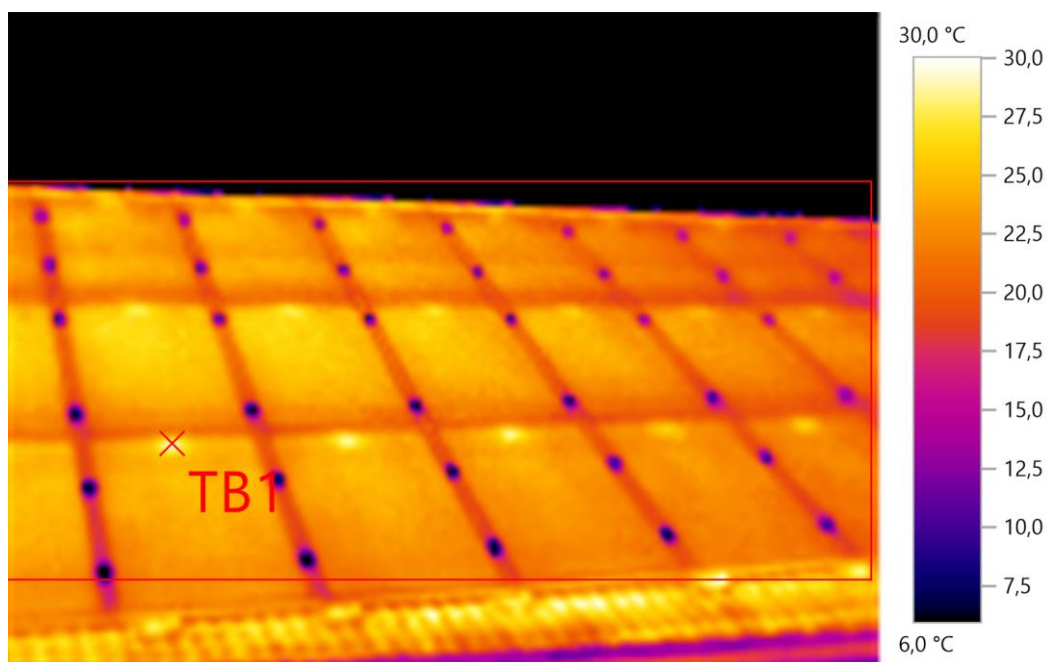
Nejteplejší místo, označené TB1, dosahovalo teploty 30,8 °C. Zde byl naměřen teplotní rozdíl až 5,1 °C, oproti průměrné teplotě FV panelu, která činila 25,7 °C. Vyšší teplota přípojovacích boxů je způsobena přechodovými odpory v místě připojení. Nicméně lze konstatovat, že přípojovací boxy dosahují provozních teplot.

Na druhém termogramu, viz Obr. 5.5, můžeme pozorovat téměř homogenní rozložení teplot na jednotlivých panelech. Maximální rozdíl teplot na panelech byl 2,3 °C. Nejteplejší místa byla opět zaznamenána v místě, kde se nachází přípojovací box. Nejteplejší místo TB1 dosahovalo teploty 28,4 °C. Průměrná teplota FV panelu s TB1 činila 23,6 °C. Rozdíl teploty TB1 a průměrné teploty, kde se TB1 nachází, dosahoval 4,8 °C. Na vzdálenějších FV panelech se začíná projevovat pokles emisivity a růst odrazivosti. Důvodem je vyšší hodnota úhlu mezi termokamerou a těmito panely. Na zmíněných FV panelech může dojít vlivem růstu odrazivosti k chybné analýze. Z důvodu nulové oblačnosti se na těchto FV panelech neprojevuje odražená teplota od mraků. Aby byly eliminovány možné chyby v měření, byl pro tyto FV pořízen třetí termogram.



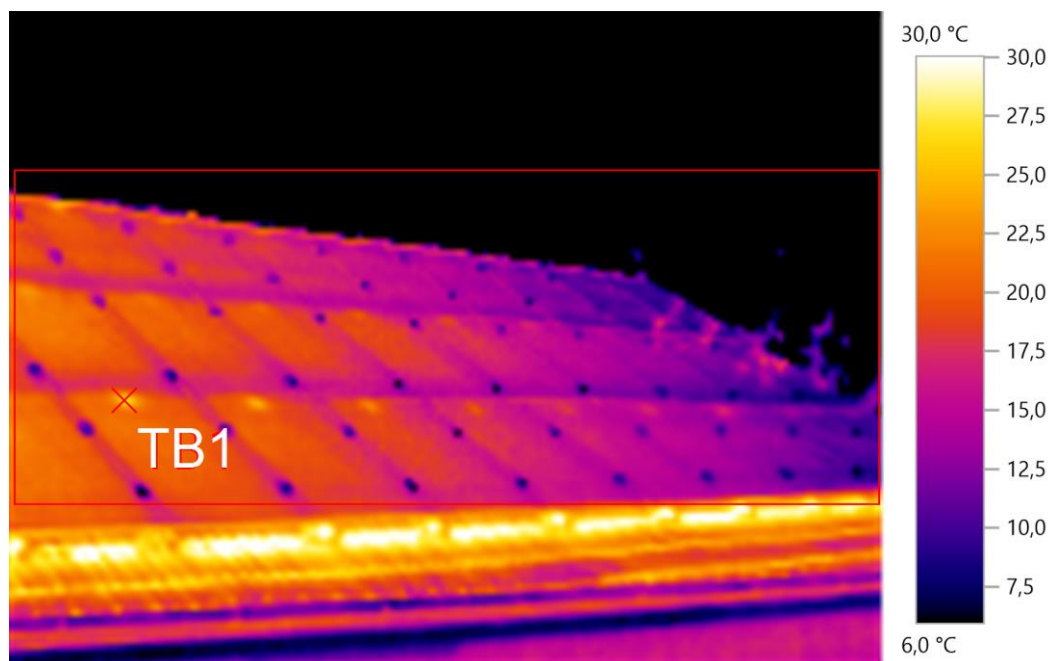
Obr. 5.5 Druhý termogram z termografického měření FVE Pěčnov

Na třetím termogramu, viz Obr. 5.6, dosahuje rozložení teploty na FV panelech maximálního teplotního rozdílu 1,9 °C. V místě TB1 bylo naměřeno nejteplejší místo s hodnotou 28,7 °C. Rozdíl mezi TB1 a průměrnou teplotou panelu, kde se TB1 nachází, činil 4,9 °C. Průměrná teplota FV panelu, kde se TB1 nachází je 23,8 °C. Je zde také vidět téměř homogenní rozložení teploty. Malá nehomogenita může být způsobena měřicí chybou termokamery.



Obr. 5.6 Třetí termogram z termografického měření FVE Pěčnov

Na FV panelech, které jsou vyobrazeny na čtvrtém termogramu, viz *Obr. 5.7*, byl zaznamenán nejvyšší teplotní rozdíl, dosahující hodnoty 5,9 °C. Tato výše teplotního rozdílu je způsobena především poklesem emisivity z důvodu vysokého měřicího úhlu. Na tomto snímku lze také pozorovat nejvyšší naměřenou teplotu TB1 v místě, kde se nachází přípojovací box. TB1 dosahuje hodnoty 26,5 °C.

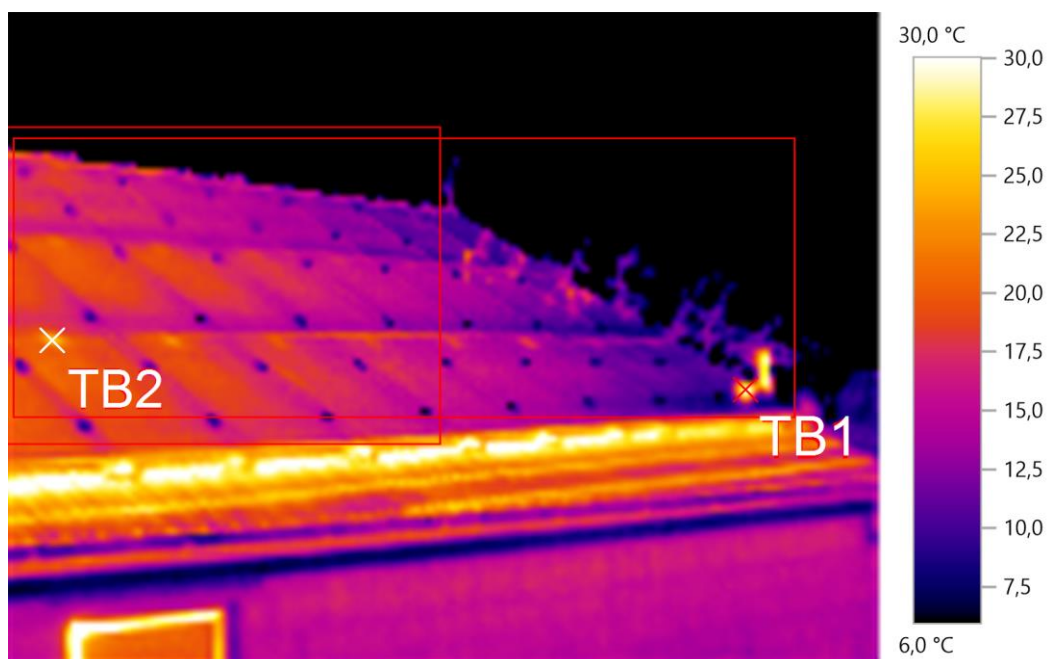


Obr. 5.7 Čtvrtý termogram z termografického měření FVE Pěčnov

Průměrná teplota FV panelu, kde se TB1 nachází, je 20,4 °C. Nicméně ani tyto hodnoty teplot neukazují na poruchový stav, rozdíl těchto hodnot je 6,1 °C. V pravé části termogramu jsou viditelné teplotní anomálie, které nelze z důvodu vysokého měřicího úhlu s jistotou identifikovat. Z důvodu vysokého poklesu emisivity, a tím i možného zkreslení výsledků tohoto termogramu, byl pořízen pátý termogram.

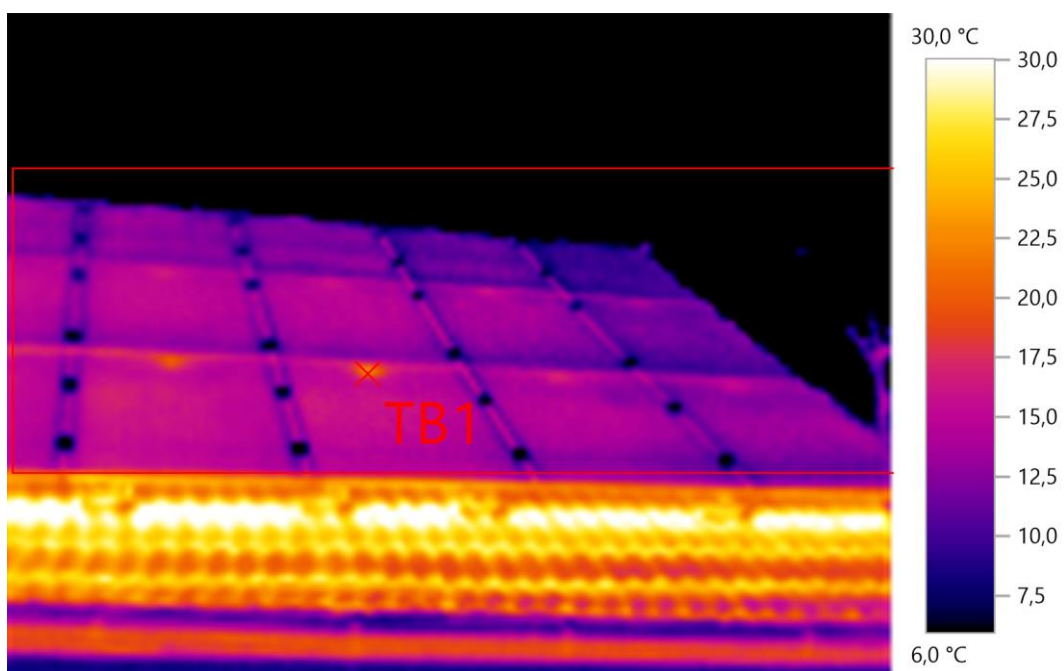
Na pátém pořízeném termogramu, viz *Obr. 5.8*, můžeme také pozorovat v pravé části snímku výrazně vyšší hodnoty teploty, které by mohly značit poruchový stav. Vzhledem k vysokému pozorovacímu úhlu dochází k poklesu emisivity a nárůstu odrazivosti. Proto tyto anomálie nemusí znamenat poruchový stav. Z tohoto důvodu byl pořízen i šestý termogram. Funkcí teplého místa bylo zjištěno, že teplota v bodě TB1 na pátém termogramu dosahuje hodnoty 29,9 °C. Na FV panelech, které nejsou tolik postiženy poklesem emisivity, byl maximální teplotní rozdíl naměřen 3,1 °C. Nejteplejší místo

na těchto panelech je označeno bodem TB2 a dosahuje teploty 25,5 °C. Průměrná teplota FV panelu s TB2 dosahovala 19,9 °C. Jedná se tedy o teplotní rozdíl 5,6 °C.



Obr. 5.8 Pátý termogram z termografického měření FVE Pěčnov

Na posledním, tedy šestém termogramu bylo ověřeno, viz Obr. 5.9, že teplotní anomálie, viditelné na čtvrtém a pátém termogramu, byly zdánlivými teplotními odrazy od okolních předmětů.



Obr. 5.9 Šestý termogram z termografického měření FVE Pěčnov

Teplotní odrazy vznikly od kovového komína a přilehlého stromu. Průměrná teplota na FV panelu s vyznačeným bodem TB1 dosahovala hodnot 17,2 °C. TB1 dosahoval hodnoty 23,5 °C. Jedná se tedy o teplotní rozdíl 6,3 °C. Maximální teplotní rozdíl byl naměřen 2,1 °C. Hodnoty teplot jsou na tomto termogramu nižší než na předchozích termogramech, protože měřící úhel dosahuje vyšších hodnot. Z tohoto důvodu poklesla emisivita a FV panely se zdají chladnější.

Tab. 5.1 Souhrn naměřených dat

Termogram	Počet sledovaných FV panelů	Nejteplejší bod TB [°C]	Průměrná teplota FV panelu s TB [°C]	Průměrná teplota FV panelů [°C]	Rozdíl TB a průměrnou teplotou panelu s TB [°C]
1.	13	30,8	25,7	24,7	5,1
2.	13	28,4	23,6	23,5	4,8
3.	16	28,7	23,8	24,0	4,9
4.	7	26,5	20,4	19,7	6,1
5.	6	25,5	19,9	20,2	5,6
6.	12	23,5	17,2	14,6	6,3

5.1.2 Výsledky měření

Experimentální měření se uskutečnilo 12. října 2015 a probíhalo na menší fotovoltaické elektrárně v obci Pěčnov, která disponuje maximální hodnotou výkonu 14 kWp. Takové hodnoty výkonu je dosaženo 63 fotovoltaickými panely, které jsou umístěné na střeše objektu garáže. Pro dobrou dostupnost nebylo nutné použít pomocné zařízení, kterým je například vysokozdvizná plošina. Samotné měření tak probíhalo pouze za použití ruční termokamery. Obloha se v době měření vyznačovala nulovou oblačností. Intenzita slunečního záření se pohybovala těsně pod hodnotou 500 W/m², což je daná minimální hodnota pro dostatečnou čitelnost termogramů. Okolní teplota dosahovala 12,5 °C. Vzájemnou kombinací nízké intenzity slunečního záření a nízké teploty okolí bylo dosaženo dostatečných podmínek pro měření. Fotovoltaické panely se vyznačují téměř homogenním rozložením teploty na povrchu. Ovšem naměřené hodnoty teplot nemusí být přesné, a to z několika důvodů. Jedním z nich je vyšší vlhkost vzduchu, která ovlivňuje transmitanci, neboli propustnost okolního prostředí. V době měření vlhkost dosahovala 70 %. Přesnost naměřených hodnot teploty také klesá s rostoucí vzdáleností od FV panelů. Termokamera je vybavena detektorem s menším rozlišením, který v takové vzdálenosti nemusí být schopen přesně rozlišit hodnoty teplot. Přesnost naměřených hodnot také ovlivňuje emisivita panelů. Ta s rostoucím úhlem klesá.

Čtvrtý, pátý a šestý termogram byl pořízen s vyšším pozorovacím úhlem. Na těchto snímcích dosahuje měřicí chyba vyšších hodnot. V *Tab. 5.1* jsou uvedena naměřená data, na kterých je vidět pokles teploty na těchto termogramech. Pokles teploty je způsoben poklesem emisivity. Z uvedených důvodů se může měřicí chyba pohybovat v jednotkách až desítkách procent. Z pořízených termogramů je patrné, že fotovoltaické panely neobsahují články s abnormálně vyšší teplotou.

V práci jsou uvedeny také termografické snímky FVE Všemyslice, které byly pořízeny pomocí bezpilotního letounu při zkušebním měření. Tyto snímky byly pořízeny 4. listopadu 2015, okolní teplota v dobu měření dosahovala 9 °C, intenzita slunečního záření dosahovala maximálně hodnoty 400 W/m² a na obloze se vyskytovala vysoká oblačnost. Měřicí podmínky nebyly ideální. Vzhledem k vysoké oblačnosti byla i složitější analýza pořízených termogramů z důvodu vysoké odrazivosti zdánlivých teplot od mraků. Fakt, že hot spoty byly jasně identifikovatelné, je dán výbornou teplotní citlivostí termokamery, která dokáže zaznamenat i nepatrné rozdíly teplot, a nízkou teplotou okolí. Termokamera použitá na bezpilotním letounu disponuje teplotní citlivostí 40 mK. Ruční kamera použitá při experimentálním měření disponuje teplotní citlivostí 50 mK. Doporučená teplotní citlivost termokamer pro měření fotovoltaických systému je ≤ 80 mK. To platí za podmínky minimální intenzity slunečního záření 500 W/m².

Při zohlednění těchto faktů můžeme s jistotou konstatovat, že fotovoltaická elektrárna v Pěčnově byla v době měření bez vad či defektů. Vyšší teploty byly naměřeny v místech, kde jsou ze zadní strany panelu umístěny přípojovací boxy. Nicméně teploty v místech s přípojovacími boxy nedosahují takových hodnot, aby vykazovaly poruchový stav. Z tabulky *Tab. 5.1* je patrné, že nejvyšší hodnota rozdílu teploty mezi nejteplejším bodem a průměrnou teplotou panelu byla 6,3 °C a vyskytovala se na šestém termogramu. Naopak nejnižší hodnota rozdílu byla na druhém termogramu a dosahovala rozdílu teplot 4,8 °C. Z těchto argumentů můžeme konstatovat, že FV panely jsou bez jakékoliv poruchy a defektu, které lze metodou termografie zjistit. Další kontrolní termografické měření by bylo vhodné provést spolu s pravidelnou revizí elektrického zařízení, a to z důvodu zajištění bezpečnosti, bezproblémového provozu a rychlé návratnosti investice FVE.

Závěr

Diplomová práce se kromě popisu základních vlastností a parametrů fotovoltaických článků věnovala i popisu nejčastěji se vyskytujících defektů a vad. Zároveň uvedla metody jejich detekce. Podrobně se zaměřila na použití termografie pro diagnostiku fotovoltaických systémů. Cíl práce spočíval v experimentu, který ověřoval a aplikoval získané poznatky o měření termografickou metodou na fotovoltaické elektrárně v Pěčnově.

Bylo ověřeno, že termografie je jedna z diagnostických metod, kterou lze využít v terénu za provozu fotovoltaické elektrárny. Vadné články, které se vyskytují ve fotovoltaickém panelu, dosahují výrazně vyšších teplot než články zdravé. Termografické metoda je poměrně rychlá, přesná a nepřilíš nákladná. Pokud je diagnostická metoda aplikována častěji, můžeme rychleji identifikovat vady. V praxi bylo potvrzeno, že důležité pro správný postup měření je především respektování pravidel. V opačném případě může dojít k chybné interpretaci výsledků. Pro dosažení dostatečného teplotního kontrastu je důležité, aby měření probíhalo za vhodného počasí. Dále bylo ověřeno, že například i vysoká oblačnost zhorší analýzu termogramů z důvodu odrazů. Další podmínkou pro dostatečně čitelné termografické snímky je nutná volba termokamery s náležitými parametry. Nicméně nejdůležitější je, jako u jiných diagnostických metod, naměřená data správně vyhodnotit a výsledky správně interpretovat. Pro rozlehlé, nebo těžko přístupné fotovoltaické elektrárny se využívá bezpilotních letadel se speciálním druhem termokamer. Bepilotní letouny dokáží automaticky létat po předem určené trase a dokáží změřit rozlehlou fotovoltaickou elektrárnu bez větší námahy a za poměrně krátký čas.

Experiment provedený na FVE v Pěčnově potvrdil teoretické poznatky zmiňované v této práci. Prostřednictvím termografické metody bylo zjištěno, že FVE v Pěčnově je bez defektů a vad.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] This Month in Physics History. APS NEWS [online]. 2009, 18(4), 2 [cit. 2016-03-01]. ISSN 1058-8132. Dostupné z: <http://www.aps.org/publications/apsnews/200904/upload/April-2009-Volume-18-Number-4-Entire-Issue.pdf>
- [2] Stručná historie fotovoltaiky. TZB-info - stavebnictví, úspory energií, technická zařízení budov [online]. 2014 [cit. 2016-03-01]. Dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/11652-strucna-historie-fotovoltaiky>
- [3] FEJFAR, Antonín. HISTORIE A PERSPEKTIVY FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKŮ PRO VYUŽITÍ SLUNEČNÍ ENERGIE. In: Matematika, fyzika - minulost, současnost: sborník z XII. semináře o filozofických otázkách matematiky a fyziky: Velké Meziříčí, srpen 2004. V Brně: VUTIUM, 2006, 70 - 80. ISBN 80-214-3208-x.
- [4] CRADDOCK, David. Renewable energy made easy: free energy from solar, wind, hydropower, and other alternative energy sources. Ocala, Fla.: Atlantic Pub. Group, c2008. ISBN 16-013-8240-5.
- [5] MURTINGER, Karel, Jiří BERANOVSKÝ a Milan TOMEŠ. Fotovoltaika, elektřina ze slunce. 1. vyd. Brno: ERA, 2007. 21. století. ISBN 978-80-7366-100-7.
- [6] BĚLÍK, M. *KEE/SOES - Solární elektroenergetické systémy* (přednáška) Plzeň: ZČU FEL, [2010]
- [7] BEISER, Arthur. Úvod do moderní fyziky: vysokošk. učebnice. 1. vyd. Překlad Josef Čada. Praha: Academia, 1975. ISBN Úvod do moderní fyziky.
- [8] KLEČKA, Tomáš. Metody identifikace vad FV panelů. Plzeň, 2013. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektroenergetiky a ekologie. Vedoucí práce Ing. Milan Bělík, Ph.D.
- [9] Solární (fotovoltaické) články. Skupina ČEZ [online]. c 2016 [cit. 2016-03-01]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/edee/content/microsites/solarni/k32.htm>
- [10] HASELHUHN, Ralf. Fotovoltaika: budovy jako zdroj proudu. 1. české vyd. Ostrava: HEL, 2011. ISBN 978-80-86167-33-6.
- [11] HONSBURG, Christiana a Stuart BOWDEN. PVEducation [online]. c 2014 [cit. 2016-03-01]. Dostupné z: <http://pveducation.org>
- [12] CENEK, Miroslav. Obnovitelné zdroje energie. 2. upr. a dopl. vyd. Praha: FCC Public, 2001. ISBN 80-901-9858-9.
- [13] BERANOVSKÝ, Jiří a Jan TRUXA. Alternativní energie pro váš dům. 2., aktualiz. vyd. Brno: EkoWATT, 2004. Edice 21. století. ISBN 80-865-1789-6.
- [14] QUASCHNING, Volker. Obnovitelné zdroje energií. 1. vyd. Praha: Grada, 2010. Stavitel. ISBN 978-80-247-3250-3.
- [15] Extrinsic semiconductor. Physics and Radio - Electronics [online]. Rajampet (Indie): c 2013-2015 [cit. 2016-03-01]. Dostupné z: <http://www.physics-and-radio-electronics.com/electronic-devices-and-circuits/semiconductor/extrinsic-semiconductor/extrinsic-semiconductors.html>
- [16] Historie a perspektivy OZE - fotovoltaika, méně rozšířené technologie. BECHNÍK, Bronislav. TZB-info - stavebnictví, úspory energií, technická zařízení budov [online]. 2009 [cit. 2016-03-01]. Dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/5517-historie-a-perspektivy-oze-fotovoltaika-mene-rozsirene-technologie>
- [17] Dějiny fotovoltaiky. SUNNY POWER s.r.o. specialista na fotovoltaické elektrárny [online]. c 2009 [cit. 2016-03-01]. Dostupné z: <http://www.sunnypower.cz/cs/historie-a-soucasnost-fv>

- [18] The Sun as an Energy Resource. QUASCHNING, Volker. Volker Quaschnig: Erneuerbare Energien und Klimaschutz [online]. 2003 [cit. 2016-03-01]. Dostupné z: http://www.volker-quaschnig.de/articles/fundamentals1/index_e.php
- [19] Optimální orientace a sklon fotovoltaických panelů. BECHNÍK, Bronislav. TZB-info - stavebnictví, úspory energií, technická zařízení budov [online]. 2014 [cit. 2016-03-01]. Dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/114865-optimalni-orientace-a-sklon-fotovoltaickych-panelu>
- [20] Vliv sklonu a orientace. EkoWATT [online]. 2008 [cit. 2016-03-01]. Dostupné z: <http://fotovoltaika.ekowatt.cz/vliv-sklonu-orientace.php>
- [21] GUNAM AS AN EXCELLENCE CENTER. Center for Solar Energy Research and Applications [online]. Ankara (Indie): c 2016 [cit. 2016-03-01]. Dostupné z: <http://gunam.metu.edu.tr/old/index.php/89-top-news/169-sun-bus>
- [22] HAMŘÍK, Miloslav. Fotovoltaické panely čeká zlepšení účinnosti. In: E15.cz [online]. 2012 [cit. 2016-03-01]. Dostupné z: <http://magazin.e15.cz/veda-a-technika/fotovoltaicke-panely-ceka-zlepseni-ucinnosti-927365>
- [23] Fotovoltaický solární panel Samsung S-energy SM-250 PC8, 250 Wp. Soul (Korea), SAMSUNG corp. Datasheet.
- [24] DHASS, A. D., E. NATARAJAN a Lakshmi PONNUSAMY. Influence of shunt resistance on the performance of solar photovoltaic cell. In: 2012 International Conference on Emerging Trends in Electrical Engineering and Energy Management (ICETEEEM). IEEE, 2012, s. 382-386. DOI: 10.1109/ICETEEEM.2012.6494522. ISBN 978-1-4673-4633-7. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6494522>
- [25] TAGUCHI, Mikio, Ayumu YANO, Satoshi TOHODA, Kenta MATSUYAMA, Yuya NAKAMURA, Takeshi NISHIWAKI, Kazunori FUJITA a Eiji MARUYAMA. 24.7% Record Efficiency HIT Solar Cell on Thin Silicon Wafer. In: IEEE Journal of Photovoltaics. IEEE, 2014, 4(1), s. 96-99. DOI: 10.1109/JPHOTOV.2013.2282737. ISSN 2156-3381. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6620960>
- [26] YAMAGUCHI, M., Y. OHMACHI, T. OH'HARA, Y. KADOTA, M. IMAIZUMI a S. MATSUDA. GaAs-on-Si solar cells for space use. In: Conference Record of the Twenty-Eighth IEEE Photovoltaic Specialists Conference - 2000 (Cat. No.00CH37036). IEEE, 2000, s. 1012-1015. DOI: 10.1109/PVSC.2000.916057. ISBN 0-7803-5772-8. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=916057>
- [27] JOHANSSON, Thomas B a Laurie BURNHAM. Renewable energy: sources for fuels and electricity. Washington, D. C.: Island Press, c1993. ISBN 15-596-3138-4.
- [28] WHAT IS CIS? Solar Frontier Europe GmbH [online]. [cit. 2016-03-01]. Dostupné z: <http://www.solar-frontier.eu/en/cis-technology/what-is-cis/>
- [29] JUNAIDI, Haroon. Most Efficient Solar Panels in 2016 for all Technologies. Synergy Files | Student's Portal for Renewable Energy and Sustainability information [online]. c 2016 [cit. 2016-03-01]. Dostupné z: <http://synergyfiles.com/2016/02/most-efficient-solar-cells-in-2016-for-all-categories/>
- [30] INNOVATION: THIN FILM SOLAR CELLS AT MX2016 Innovation: Thin Film Solar Cells at MX2016 1 Innovation: Thin Film Solar Cells at MX2016 2. Materia: global network in the area of innovative materials [online]. 2016 [cit. 2016-03-01]. Dostupné z: <http://materia.nl/article/innovation-thin-film-solar-cells-at-mx2016/>

- [31] HAVRÁNEK, Miroslav. Organické polymery jako zdroj energie. Aldebaran. Praha, 2007, 2007(30). ISSN 1214-1674.
- [32] ZEDDA, Alessandro a Jim BUNTAINE. Technical progresses and commercial pathway for printed organic photovoltaics. In: 2011 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference. IEEE, 2011, s. 003676-003678. DOI: 10.1109/PVSC.2011.6185948. ISBN 978-1-4244-9965-6. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6185948>
- [33] Flash Test: technical background and importance. SINOVOLTAICS | Solar Technology [online]. Hong Kong: 2011 [cit. 2016-03-01]. Dostupné z: <http://sinovoltaics.com/learning-center/testing/flash-test-technical-background-and-importance/>
- [34] Flash test. ČVUT FEL - Laboratoř diagnostiky fotonvoltaických systémů [online]. Praha: 2011 [cit. 2016-03-01]. Dostupné z: <http://pasan.feld.cvut.cz/flash.html>
- [35] PENG XU, WENJU ZHOU a MINRUI FEI. Detection methods for micro-cracked defects of photovoltaic modules based on machine vision. In: 2014 IEEE 3rd International Conference on Cloud Computing and Intelligence Systems. IEEE, 2014, s. 609-613. DOI: 10.1109/CCIS.2014.7175807. ISBN 978-1-4799-4720-1. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=7175807>
- [36] PENG, Cheng-Yu, Shang-Yeh WEN, Zhong-Jia JI a Chao-Ping HUANG. Non-destructive displaying defects for luminescence image of photovoltaic panel arrays. In: 2015 International Conference on Advanced Robotics and Intelligent Systems (ARIS). IEEE, 2015, s. 1-4. DOI: 10.1109/ARIS.2015.7158373. ISBN 978-1-4799-1851-5. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=7158373>
- [37] DIAGNOSTICKÉ METODY FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKŮ. VANĚK, Jiří. Odborný portál pro profesionály v oblasti stavebnictví [online]. 2010 [cit. 2016-03-01]. Dostupné z: <http://www.asb-portal.cz/tzb/fotovoltaika/diagnosticke-metody-fotovoltaickych-clanku>
- [38] SALINGER, Jan, Vitezslav BENDA a Zdenek MACHACEK. Optimal resolution of LBIV/LBIC methods for diagnostics of solar cell homogeneity. In: 2008 26th International Conference on Microelectronics. IEEE, 2008, s. 251-253. DOI: 10.1109/ICMEL.2008.4559271. ISBN 978-1-4244-1881-7. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4559271>
- [39] VANĚK, Jiří. Diagnostické metody fotonvoltaických článků založené na generačně-rekombinačních jevech: Diagnostic methods of photovoltaic cells based on generation-recombination effects : zkrácená verze habilitační práce. Brno: VUTIUM, 2008. ISBN 978-80-214-3666-4
- [40] DIAGNOSTIKA FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKŮ POMOCÍ LBIV. Brno, 2008. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie. Vedoucí práce Ing. JIŘÍ VANĚK, Ph.D.
- [41] PV test web [online]. c 2015 [cit. 2016-03-01]. Dostupné z: <http://www.pvtest.cz/cs/index>
- [42] LEE, Hak - Gu. Broken solar cell. In: Plastics, polysilicon, PV solar cell and solar panel in Korea [online]. Soul (Korea): 2009 [cit. 2016-03-01]. Dostupné z: <http://recyclingtrade.blogspot.cz/2009/03/broken-solar-cell.html>
- [43] KÖNTGES, Marc a kol. Review of Failures of Photovoltaic Modules. 2014. ISBN 978-3-906042-16-9.

- [44] MAČÁT, Jakub. Vlivy ovlivňující degradaci instalovaného výkonu fotovoltaické elektrárny. Brno, 2015. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce doc. Ing. Jiří Vaněk, Ph.D.
- [45] JANDOVÁ, Kristýna. DIAGNOSTICKÉ METODY PLOŠNÉHO ROZLOŽENÍ DEFEKTŮ SOLÁRNÍCH ČLÁNKŮ. Brno, 2008. Doktorská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie. Vedoucí práce Ing. JIŘÍ VANĚK, Ph.D.
- [46] Snail track effect on photovoltaic modules. PV production lines & making photovoltaic modules [online]. Padova: [cit. 2016-03-01]. Dostupné z: <http://www.ecoprogetti.com/en/newsroom/tech/203-snail-track-effect-on-photovoltaic-modules.html>
- [47] Solar cell grading (A, B, C, D). DE ROOIJ, Dricus. SINOVOLTAICS | Solar Technology [online]. Hong Kong: 2013 [cit. 2016-03-02]. Dostupné z: <http://sinovoltaics.com/quality-control/grading-of-solar-cells-a-b-c-d/>
- [48] Pokles výkonu fotovoltaických elektráren v důsledku vysokonapětového stresu. LAHKÝ, Martin. TZB-info - stavebnictví, úspory energií, technická zařízení budov [online]. 2015 [cit. 2016-03-02]. Dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/12260-pokles-vykonu-fotovoltaickyh-elektren-v-dusledku-vysokonapetoveho-stresu>
- [49] EICERO PID Doctor vrátí degradovaným FV panelům rychle jejich původní výkon. TZB-info - stavebnictví, úspory energií, technická zařízení budov [online]. 2015 [cit. 2016-03-02]. Dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/13177-eicero-pid-doctor-vrati-degradovanym-fv-panelum-rychle-jejich-puvodni-vykon>
- [50] SVOBODA, Emanuel. *Přehled středoškolské fyziky*. 3. vyd. Praha: Prometheus, 1998. ISBN 80-719-6116-7.
- [51] Tepelné záření. *Termokamera.cz Portál pro uživatele termokamery* [online]. c2016 [cit. 2016-03-16]. Dostupné z: <http://www.termokamera.cz/princip-a-funkce/tepelne-zareni/>
- [52] USAMENTIAGA, Rubén, Pablo VENEGAS, Jon GUEREDIAGA, Laura VEGA, Julio MOLLEDA a Francisco BULNES. Infrared Thermography for Temperature Measurement and Non-Destructive Testing. *Sensors* [online]. 2014, 14(7), 12305-12348 [cit. 2016-03-21]. DOI: 10.3390/s140712305. ISSN 14248220. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1424-8220/14/7/12305/>
- [53] SCHIRRIPA SPAGNOLO, G., P. DEL VECCHIO, G. MAKARY, D. PAPALILLO a A. MARTOCCHIA. A review of IR thermography applied to PV systems. In: 2012 11th International Conference on Environment and Electrical Engineering. IEEE, 2012, s. 879-884. DOI: 10.1109/EEEIC.2012.6221500. ISBN 978-1-4577-1829-8. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6221500>
- [54] SCHIRRIPA SPAGNOLO, G., P. DEL VECCHIO, G. MAKARY, D. PAPALILLO a A. MARTOCCHIA. A review of IR thermography applied to PV systems. In: 2012 11th International Conference on Environment and Electrical Engineering. IEEE, 2012, s. 879-884. DOI: 10.1109/EEEIC.2012.6221500. ISBN 978-1-4577-1829-8. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6221500>

- [55] DENIO, Harley. Aerial solar Thermography and condition monitoring of photovoltaic systems. In: 2012 38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference. IEEE, 2012, s. 000613-000618. DOI: 10.1109/PVSC.2012.6317686. ISBN 978-1-4673-0066-7. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6317686>
- [56] SOVA, J. *Chyby a omyly - aneb motivační část* (přednáška) Praha, [2013]
- [57] Kontrola solárních panelů. GEOTRONICS Praha, s.r.o. [online]. Praha: c 2008 [cit. 2016-03-02]. Dostupné z: <http://www.geotronics.cz/termokamery/kontrola-solarnich-panelu>
- [58] Kalibrace. TMV SS [online]. Praha, c 2016 [cit. 2016-03-02]. Dostupné z: <http://www.tmvss.cz/sluzby/kalibrace/>
- [59] Solar panel inspection. Testo, Inc [online]. c 2016 [cit. 2016-03-02]. Dostupné z: https://www.testo.com/en/home/products/thermography/applications/solar_panels/solar_panels.jsp
- [60] No confidence in manufacturer tests. PV magazine [online]. 2013 [cit. 2016-03-02]. Dostupné z: http://www.pv-magazine.com/archive/articles/beitrag/no-confidence-in-manufacturer-tests-_100012909/572/
- [61] Údržba fotovoltaických elektráren. TZB-info - stavebnictví, úspory energií, technická zařízení budov [online]. 2013 [cit. 2016-03-02]. Dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/10154-udrzba-fotovoltaickych-elektaren>
- [62] GRID 720 TELINK, HEXACOPTER PRO PRŮMYSLOVÉ SNÍMÁNÍ. TELINK.EU [online]. Praha, c 2016 [cit. 2016-03-02]. Dostupné z: <http://www.telink.eu/cs/Novinky-clanky/novinky/grid-720-telink-hexacofter-pro-prumyslove-snimani>
- [63] DATASHEET INFRARED CAMERAS. Optris GmbH. Berlín, 2016.
- [64] TERMOVIZNÍ KAMERY A SYSTÉMY. TELINK.EU [online]. Praha, 2015 [cit. 2016-03-02]. Dostupné z: <http://www.telink.eu/cs/Novinky-clanky/clanky/termovizni-kamery-a-systemy>
- [65] Multicopter für Infrarotmessungen "Thermocopter PI 640". Thermografie an PV-Anlagen, Luftaufnahmen, Imagefilme! [online]. Calau (Německo), c2014 [cit. 2016-04-21]. Dostupné z: <http://www.kitawa.de/thermocopter-pi-640>