

# **Optimalizace fotovoltaické elektrárny**

Optimization of photovoltaic power plant

Bc. Aleš Východský

---

Diplomová práce  
2013



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta aplikované informatiky

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta aplikované informatiky  
akademický rok: 2012/2013

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Aleš VÝCHODSKÝ**  
Osobní číslo: **A09530**  
Studijní program: **N3902 Inženýrská informatika**  
Studijní obor: **Bezpečnostní technologie, systémy a management**  
Forma studia: **kombinovaná**

Téma práce: **Optimalizace fotovoltaické elektrárny**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte literární rešerši na dané téma a popište současný stav problematiky.
2. Vytipujte a popište slabá místa v oblasti fotovoltaických elektráren.
3. Vymezte význam použití termovize ve fotovoltaickém průmyslu.
4. Navrhněte vlastní řešení optimalizace výkonu fotovoltaické elektrárny.
5. Provedte měření na reálné fotovoltaické elektrárně.
6. Zpracujte a vyhodnoťte dosažené výsledky experimentálních měření.

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. HENZE, Andreas a Werner HILLEBRAND. Elektrický proud ze slunce: fotovoltaika v praxi : technika, přehled trhu, návody ke stavbě. 1. české vyd. Překlad Václav Losík. Ostrava: HEL, 2000, 136 s. ISBN 80-861-6712-7.
2. Solar generation 6. EPIA. Solar photovoltaic electricity empowering the world [online]. EPIA, Greenpeace, 2011 [cit. 2013-02-05]. Dostupné z: <http://www.greenpeace.org/international/Global/international/publications/climate/2011/Fina>
3. ZOBAA, Ahmed F a R BANSAL. Handbook of renewable energy technology. Hackensack, N.J.: World Scientific, c2011, xxii, 851 p. ISBN 98-142-8906-X.
4. QUASCHNING, Volker. Understanding renewable energy systems. Sterling, VA: Earthscan, 2005, xix, 272 p. ISBN 18-440-7136-7.
5. Skupina ČEZ: Obnovitelné zdroje. Energie z obnovitelných zdrojů [online]. 2013 [cit. 2013-02-05]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/obnovitelne-zdroje.html>

Vedoucí diplomové práce:

**Ing. Milan Navrátil, Ph.D.**

Ústav elektroniky a měření

Datum zadání diplomové práce:

**8. února 2013**

Termín odevzdání diplomové práce:

**3. června 2013**

Ve Zlíně dne 8. února 2013

prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.  
*děkan*



doc. RNDr. Vojtěch Křesálek, CSc.  
*ředitel ústavu*

## **ABSTRAKT**

V diplomové práci je zpracována literární rešerše týkající se problematiky současného stavu fotovoltaických elektráren a jejich optimalizace. Je popsáno elektromagnetické záření Slunce jakožto obnovitelný zdroj energie. Jsou popsány prvky fotovoltaického systému. Důraz je kladen na křemíkové fotovoltaické moduly, princip jejich činnosti a přístup k vyhodnocení jejich funkčnosti z titulu optimalizace. Dále je nastíněna současná problematika týkající se standardizace ve fotovoltaickém průmyslu. V praktické části je vymezen význam termovizního měření na fotovoltaické elektrárně, jakožto formy optimalizace spolu s experimentálním měřením voltampérových charakteristik. Shrnutím práce je vyhodnocení vlivu slabých míst a návrhu na možnosti jejich minimalizace.

Klíčová slova:

Slunce, fotovoltaický modul, fotovoltaická elektrárna, termovizní měření, ozáření, teplota

## **ABSTRACT**

The work is processed literature review on the current problematic situation of photovoltaic power plants and their optimization. It describes the electromagnetic radiation of the sun as a renewable energy source. Describes the elements of a photovoltaic system. Emphasis is placed on silicon photovoltaic modules, the principle of their activities and approach to the evaluation of their functionality due to optimization. Furthermore, the present state of the issue concerning standardization in the photovoltaic industry. In the practical part defines the meaning of thermography measurements on solar power as a form of optimization along with experimental measurements of current-voltage characteristics. Summary of the work is to evaluate the impact of vulnerabilities and design options to minimize them.

Keywords:

Sun, photovoltaic modules, photovoltaic power plant, thermal measurement, irradiance, temperature

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Milanu Navrátilovy. Ph.D. za pomoc a rady při jejím zpracování. Dále bych rád poděkoval rodině a přátelům, kteří mě podporovali ve studiu.

### **Prohlašuji, že**

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

### **Prohlašuji,**

- že jsem na diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze ~~diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.~~

Ve Zlíně

.....  
podpis diplomanta

## OBSAH

<b>1</b>	<b>SLUNCE A JEHO ZÁŘENÍ .....</b>	<b>11</b>
<b>1.1</b>	<b>SOLÁRNÍ KONSTANTA .....</b>	<b>12</b>
<b>1.2</b>	<b>SOLÁRNÍ SPEKTRUM .....</b>	<b>13</b>
<b>1.3</b>	<b>PRŮCHOD SLUNEČNÉHO ZÁŘENÍ ATMOSFÉROU.....</b>	<b>14</b>
1.3.1	SLUNEČNÍ OZÁŘENÍ PODLE ČSN EN ISO 9488 .....	16
1.3.2	SOLÁRNÍ GEOMETRIE.....	17
1.3.3	OPTIMÁLNÍ ÚHEL FV MODULU .....	19
<b>1.4</b>	<b>MĚŘENÍ SLUNEČNÍHO OZÁŘENÍ.....</b>	<b>20</b>
1.4.1	FOTOVOLTAICKÝ POTENCIÁL .....	21
1.4.2	PYRANOMETR.....	22
1.4.3	OPTIMÁLNÍ UMÍSTĚNÍ PYRANOMETRU .....	24
1.4.4	REFERENČNÍ ČLÁNEK .....	25
1.4.5	VOLBA PRVKU PRO MĚŘENÍ OZÁŘENÍ .....	25
<b>1.5</b>	<b>SBĚR DAT Z FVE .....</b>	<b>26</b>
1.5.1	TELEMETRIE FVE .....	26
<b>2</b>	<b>FOTOVOLTAICKÝ SYSTÉM.....</b>	<b>29</b>
<b>2.1</b>	<b>FOTOVOLTAICKÝ JEV .....</b>	<b>29</b>
<b>2.2</b>	<b>FOTOVOLTAICKÝ ČLÁNEK.....</b>	<b>29</b>
2.2.1	OBJEMOVÉ FV ČLÁNKY .....	31
2.2.2	TENKOVSTVÉ STRUKTURY.....	32
<b>2.3</b>	<b>FOTOVOLTAICKÝ MODUL.....</b>	<b>34</b>
2.3.1	ZÁKLADNÍ PARAMETRY FV MODULU .....	35
2.3.2	PROUD $I_{SC}$ .....	36
2.3.3	NAPĚTÍ $U_{OC}$ .....	36
2.3.4	FILL FACTOR .....	36
2.3.5	ÚČINNOST .....	37
2.3.6	SÉRIOVÝ ODPOR $R_S$ .....	38
2.3.7	PARALELNÍ ODPOR $R_P$ .....	38
2.3.8	NOMINÁLNÍ OPERAČNÍ TEPLOTA NOCT.....	38
2.3.9	TEPLOTNÍ KOEFICIENTY FV MODULŮ .....	39
<b>2.4</b>	<b>FOTOVOLTAICKÉ POLE A STRINGY .....</b>	<b>40</b>
<b>2.5</b>	<b>STRÍDAČE .....</b>	<b>41</b>
2.5.1	CENTRÁLNÍ STRÍDAČE .....	42
2.5.2	DECENTRÁLNÍ STRÍDAČE.....	43
<b>2.6</b>	<b>KOMPONENTY ELEKTROINSTALACE FVE .....</b>	<b>43</b>
<b>2.7</b>	<b>HODNOCENÍ VÝTĚŽNOSTI FV SYSTÉMU .....</b>	<b>44</b>
<b>3</b>	<b>FVE V ČR .....</b>	<b>45</b>

<b>3.1</b>	<b>STANDARDIZACE VE FOTOVOLTAICKÉM PRŮMYSLU .....</b>	<b>47</b>
3.1.1	EXISTUJÍCÍ STANDARDY .....	48
<b>4</b>	<b>VYBRANÁ SLABÁ MÍSTA FOTOVOLTAICKÝCH ELEKTRÁREN.....</b>	<b>51</b>
4.1.1	TERMOVIZNÍ KAMERA TESTO 882 .....	51
4.1.2	MĚŘÍCÍCH PŘÍSTROJ V-A CHARAKTERISTIK HT ITALIA SOLAR I-V .....	52
4.1.3	MULTIMETRFLUKE 177 .....	53
4.1.4	PYRANOMETR SG 420 .....	54
<b>4.2</b>	<b>TERMOVIZNÍ MĚŘENÍ NA FVE .....</b>	<b>55</b>
4.2.1	TERMOVIZNÍ MĚŘENÍ FVE DRÍNOV .....	55
4.2.2	TERMOVIZNÍ MĚŘENÍ FVP 21 .....	55
<b>5</b>	<b>VYHODNOCENÍ VLIVU DEFEKTNÍCH MODULŮ NA VÝSTUPNÍ VÝKON STRINGU .....</b>	<b>60</b>
<b>6</b>	<b>NÁVRH OPTIMALIZACE FVE.....</b>	<b>67</b>
<b>6.1</b>	<b>ANALÝZA DAT Z MONITORINGU.....</b>	<b>67</b>
<b>6.2</b>	<b>FYZICKÁ OBHLÍDKA FVE.....</b>	<b>68</b>
<b>6.3</b>	<b>MĚŘENÍ NA FVE.....</b>	<b>69</b>
<b>6.4</b>	<b>LABORATORNÍ MĚŘENÍ FV MODULŮ .....</b>	<b>71</b>
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>72</b>
	<b>ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ.....</b>	<b>74</b>

## ÚVOD

Fotovoltaický průmysl je v současnosti dynamicky se vyvíjejícím oborem, jehož uplatnění se rozšiřuje do mnoha odvětví. Jedním z nich je jistě bezpečnostní průmysl, jelikož ať chceme nebo ne je naše společnost závislá na dodávce energií z vyčerpatelných zdrojů energie jako fosilní paliva, či atomová energie.

Jako student kombinované formy studia pracuji ve fotovoltaickém průmyslu. Z tohoto důvodu jsem se rozhodl věnovat tuto práci problematice optimalizace fotovoltaických elektráren.

S tímto pojmem se v praxi setkávám velmi často, je to z důvodu současného stavu v ČR, která svou diskutabilní podporou pro fotovoltaiku dala vzniknout během krátkého času enormního počtu fotovoltaických zdrojů. Vzniknuvší objem instalovaného výkonu s sebou nese mnohá až latentní slabá místa, která v případě neodborného přístupu vlastního servisu či servisu neodbornou servisní organizací může způsobit v 20-ti letém časovém horizontu značné ztráty na výstupním výkonu. V teoretické části se proto věnuji Slunci a jeho elektromagnetickému záření, jeho průchodu a dopadu na zemský povrch. Jsou rozebrány technologie pro měření ozáření a je nastíněn současný stav standardizace v tomto průmyslu. Dále jsou v rámci rešerše popsány fotovoltaické systémy a jejich prvky, zejména potom křemíkové fotovoltaické moduly a jejich vlastnosti.

V praktické části se věnuji termoviznímu měření na konkrétní FVE, které odhaluje jedno ze slabých míst této technologie obnovitelných zdrojů. Dále je potom provedeno experimentální měření VA charakteristik na identifikovaných zdokumentovaných slabých místech a je vyhodnocen dopad na výstupní výkon.

Výstupem práce je shrnutí poznatků z teoretické a praktické části s ohledem na výsledky termovizního a experimentálního měření VA charakteristik. Dále je vyhodnocen význam provedených měření danými technologiemi z titulu optimalizace fotovoltaické elektrárny.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 SLUNCE A JEHO ZÁŘENÍ

Slunce je nejvýznamnějším zdrojem energie, jeho dopadající energie představuje drtivou většinu energie, která se na Zemi nachází a využívá. Energie vzniká termojadernými reakcemi v nitru Slunce. Vzhledem k tomu, že vyčerpání zásob na Slunci je očekáváno až řádu miliard let, je tento zdroj energie označován jako obnovitelný. [1]

Dopadající sluneční energie se u fotovoltaických (dále jen FV) a fototerických systémů používá přímo. Nepřímé využití je potom například u větrných a vodních elektráren, které využívají kinetickou energii vzdušných mas a potenciální energii vody. Nepřímé využití najdeme i u energie biomasy a u fosilních paliv, kde akumulace energie probíhala řádově miliony let.

Slunce je centrálním bodem naší sluneční soustavy, skládá se z 80% vodíku, 20% hélia a jen 0,1% dalších prvků. Zářivý výkon slunce má původ v termojaderné fúzi vodíku a hélia, jde o proces jaderné syntézy během, kterého dva ze čtyř atomů vodíku přejdou do atomového obalu hélia. Dva další elektrony a pozitrony se přemění přímo v energii. [2]

Slunce touto reakcí ztrácí hmotnost 4,3 milion tun za sekundu, vzniká tak solární zářivý výkon  $\varphi_{e,S}$  :

$$\varphi_{e,S} = m \cdot c^2 = 3,845 \cdot 10^{26} W \quad (1)$$

Zářivý výkon slunce je rozložen po slunečním povrchu  $A_S$  a vykazuje charakteristické záření  $M_{e,S}$  :

$$M_{e,S} = \frac{\varphi_{e,S}}{A_S} = 63,11 \frac{MW}{m^2} \quad (2)$$

Sluneční záření může být přibližně vyjádřeno vyzařováním černého tělesa, pro které platí Stefan Boltzmannův zákon:

$$M_e(T) = \sigma \cdot T^4 W \cdot m^{-2} \quad (3)$$

Odvozením lze získat vztah pro odhad povrchové teploty Slunce  $T_{min}$  :

$$T_{min} : \sqrt[4]{\frac{M_{e,S}}{\sigma}} = 5777 K \quad (4)$$

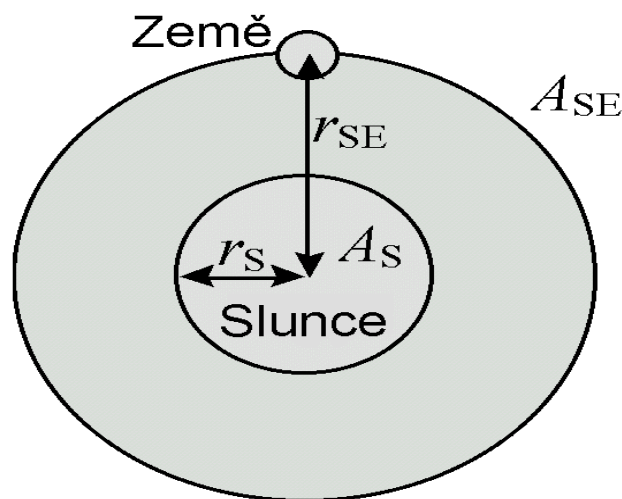
Zářivý výkon slunce lze popsat následujícím vztahem, jenž vyjadřuje zářivý výkon vyzářený z povrchu slunce a zářivý výkon dopadající na zemský povrch. Pro vyjádření je

použít model koule viz obr.1, jejíž povrch  $A_{SE}$  se středem ve středu Slunce o poloměru průměrné vzdálenosti Země a Slunce ( $r_{SE} = 1,5 \cdot 10^8 \text{ km}$ ) emituje celkový zářivý výkon se stejnou intenzitou jako na povrchu Slunce  $A_S$  :

$$M_{e,S} \cdot A_S = E_e \cdot A_{SE}, \text{ kde } A_{SE} = 4\pi \cdot r_{SE}^2 \quad (5)$$

Energie záření dopadající na zem  $E_e$  je potom dána vztahem:

$$E_e = \frac{M_{e,S} \cdot A_S}{A_{SE}} = M_{e,S} \cdot \frac{r_S^2}{r_{SE}^2} \quad [\text{W/m}^2] \quad (6)$$



Obr. 1 Zářivý výkon Slunce a zářivý výkon dopadající na povrch Země [2]

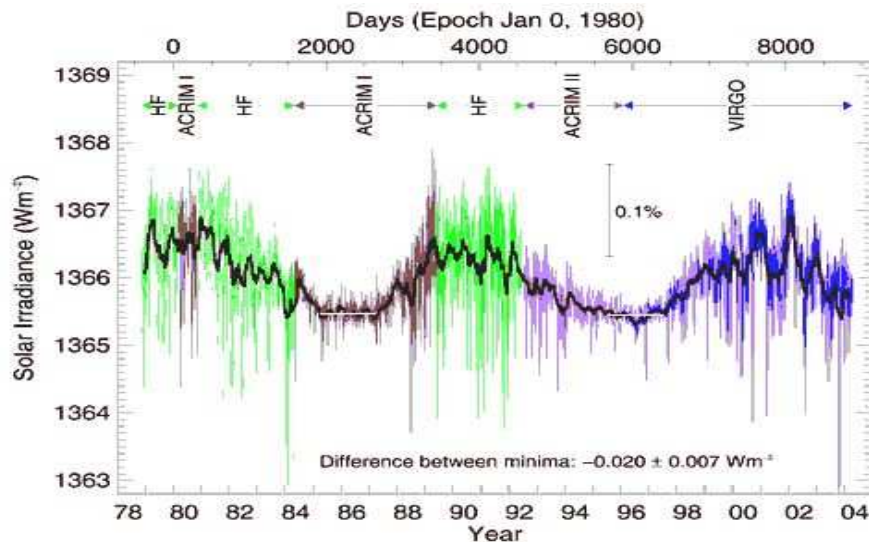
## 1.1 Solární konstanta

Vzdálenost mezi Sluncem a Zemí se v průběhu roku vlivem mírně excentrické oběžné dráhy Země mění, v rozsahu  $1,47 \cdot 10^8 \text{ km}$  a  $1,52 \cdot 10^8 \text{ km}$ . Se změnou vzdálenosti se mění i hodnota záření  $E_e$  v rozmezí  $1325 \text{ W/m}^2$  a  $1420 \text{ W/m}^2$ . Průměrná hodnota se nazývá solární konstanta, hodnotu solární konstanty  $E_0$  stanovila Světová meteorologická organizace (WMO, komise pro přístroje a metody pozorování, 8 zasedání, Mexiko City, 1981) jako:

$$I_0 = 1367 \pm 2 \text{ W/m}^2 \quad (7)$$

Solární konstanta (též sluneční konstanta) je tok sluneční energie procházející plochou  $1 \text{ m}^2$ , kolmou na směr paprsků, za 1s ve střední vzdálenosti  $r_{SE}$  Země od Slunce. Konstanta zahrnuje celé spektrum slunečního záření, nejen viditelné světlo. [2]

Hodnota se může lišit nejen vlivem změny vzdálenosti  $r_{SE}$ . Aktuální data ukazují skutečnost, že se sluneční konstanta může měnit o 0,2% až 0,4%, v závislosti na probíhajících cyklech na Slunci a množství černých skvrn.



Obr. 2 Graf proměnlivé solární konstanty [3]

V minulosti byla solární konstanta měřena na povrchu Země, zejména ve vysokých nadmořských výškách. V současnosti se solární konstanta měří na oběžné dráze Země, jelikož při pozemním měření bylo nutno počítat s chybou až 2% vlivem atmosférické nestability a skutečnosti, že atmosféra nepropouští celé spektrum dopadajícího záření. [4]

## 1.2 Solární spektrum

Na obr. 4 je zobrazeno spektrum slunečního záření. Křivky zobrazují záření absolutně černého tělesa o teplotě 6000K. Spektrum AM0 (air mass) vyjadřuje sluneční záření v kosmickém prostoru ve vzdálenosti 150 milionů kilometrů od Slunce bez ovlivnění atmosférou (solární konstanta). AM1.5 potom vyjadřuje spektrum slunečního záření po průchodu bezoblačnou atmosférou. Intenzita dopadajícího slunečního záření na zemském povrchu závisí na čistotě atmosféry a úhlu, pod kterým záření dopadá. [2]

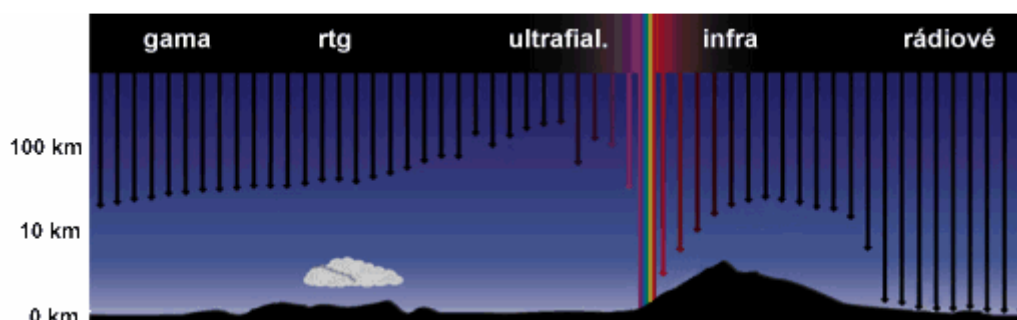
AM0 značí kosmické spektrum, AM1,5 je spektrum zemského povrchu pro výšku Slunce nad obzorem  $\gamma_s = 41,5^\circ$

$$AM = \frac{1}{\sin \gamma_s} \quad (8)$$

AM poměrná jednotka délky cesty slunečního paprsku atmosférou, je vyjádřena v násobcích tloušťky atmosféry. Pokud je slunce právě v zenitu ( $0^\circ$ ) AM je rovno 1, jinými slovy sluneční záření prochází vertikálně atmosférou. [2]

### 1.3 Průchod slunečního záření atmosférou

Atmosféra, respektive její ozonová vrstva chrání Zemi před škodlivými účinky krátkovlnných záření, jako je UV záření, rentgenové záření a gama záření viz. Obr 3. Na zemský povrch dopadá jen viditelné světlo, část infračerveného záření a rádiové vlny. [2]



Obr. 3 Průchod slunečního záření atmosférou [2]

Další útlum záření průchodem atmosférou je Rayleighův rozptyl, který způsobují molekuly plynu menší než je vlnová délka světla. Velikost tohoto rozptylu potom vzrůstá se zmenšující se vlnovou délkou.

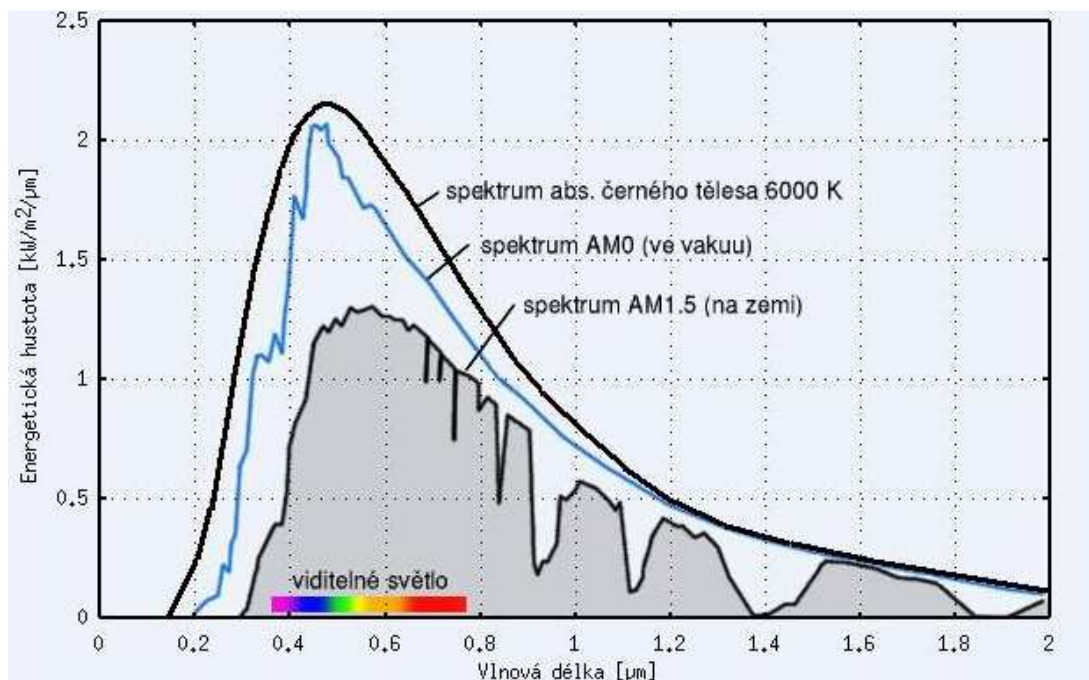
Nečistoty v ovzduší a částičky prachu potom způsobují Mieův rozptyl, který významně závisí na geografické poloze, ve vysokohorských oblastech je relativně nízký, zatímco v průmyslových oblastech je obvykle vysoký.

V tabulce 3 jsou zobrazeny útlumy slunečního záření, které nastávají během dne v závislosti na poloze Slunce nad obzorem.

Výška slunce nad obzorem $\gamma$ s[°]	Poměrná délka světla prostupujícího atmosférou (AM)	Absorbce [%]	Rayleighův rozptyl [%]	Mieův rozptyl [%]	Celkový útlum [%]
90	1,00	8,7	9,4	0-25,6	17,3-38,5
60	1,15	9,2	10,5	0,7-29,5	19,4-42,8
30	2,00	11,2	16,3	4,1-44,9	28,8-59,1
10	5,76	16,2	31,9	15,4-74,3	51,8-85,4
5	11,50	19,5	42,5	24,6-86,5	65,1-93,8

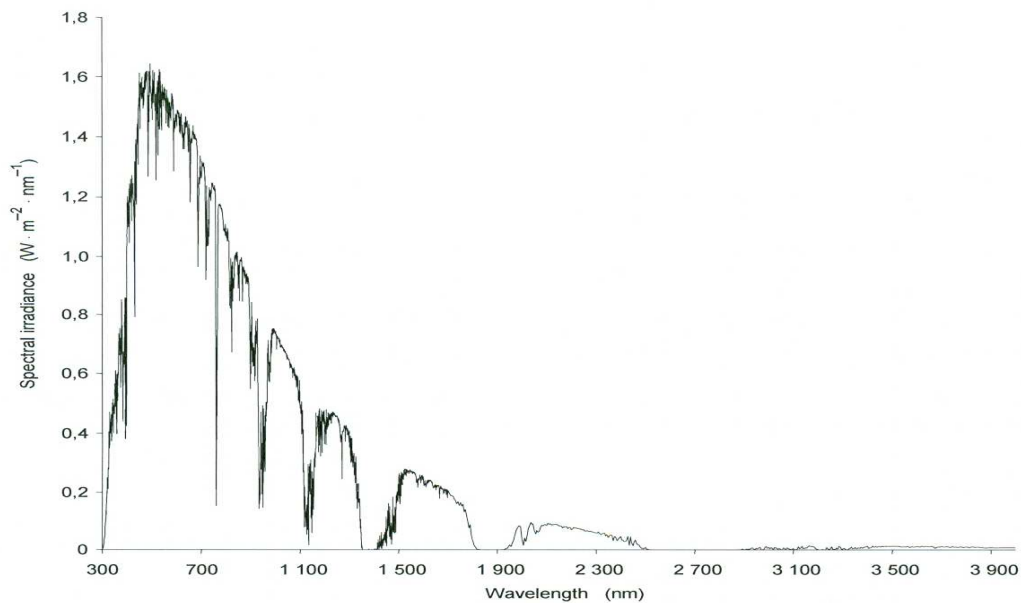
Tabulka 1 slunečního záření v závislosti na poloze [2]

Záření dopadající na zemský povrch je na Obr. 4 zobrazeno pod křivkou AM 1.5.



Obr. 4 Solární spektrum [5]

Solární spektrum a jeho křivku lze též popsat distribuční křivkou elektromagnetického záření vyzařovaného sluncem podle vlnových délek, viz. Obr. 5.



Obr. 5 Referenční spektrální distribuční křivka solárního záření podle ČSN EN 60904-3

### 1.3.1 Sluneční ozáření podle ČSN EN ISO 9488

Jelikož je FV obor relativně mladým je na místě stanovit užívání termínů. Problematikou termínů, definic a značek se zabývá norma ČSN CLC/TS 61836 z Března 2012. V této kapitole uvedu nejužívanější termíny a značky.

#### Ozáření G

Globální ozáření dopadající na vodorovnou plochu, vyjádřené jako výkon globálního záření na jednotku plochy. Přibližně 99% globálního záření dopadajícího na zemský povrch je v rozsahu vlnových délek od  $0,3 \mu\text{m}$  do  $3 \mu\text{m}$ , viz. Obr. 5.

Globální ozáření se skládá ze dvou složek, z přímého ozáření  $G_b$  a difuzního ozáření  $G_d$ .

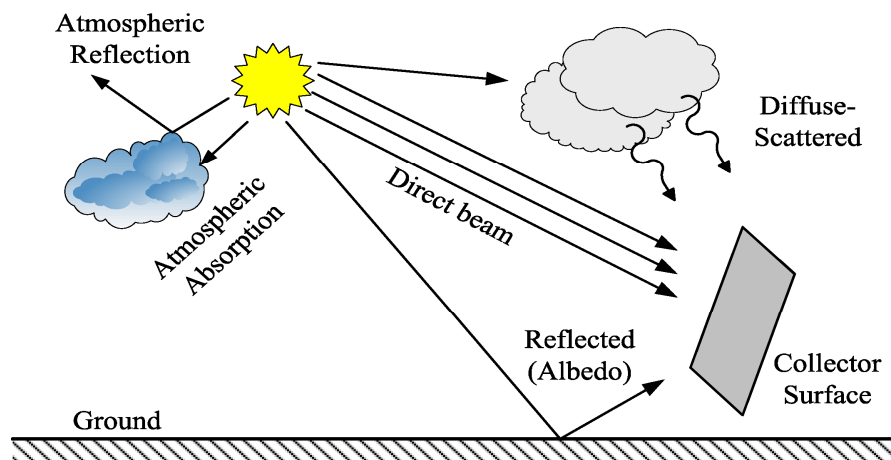
$$G = G_b + G_d \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (9)$$

#### Přímé ozáření $G_b$

Tok slunečního záření dopadající na kolmou plochu bez jakéhokoliv rozptylu v atmosféře ( $\text{W m}^{-2}$ ). Při jasné obloze až  $0,9 \cdot G$

**Difuzní sluneční ozáření  $G_d$**  – tok slunečního záření dopadající na plochu po změně směru záření vlivem rozptylu v atmosféře ( $\text{Wm}^{-2}$ ). Difuzní záření vzniká v atmosféře

odrazem o molekuly plynů a o prach ve vzduchu a mracích. K difuznímu záření se počítá i odražené přímé záření od okolních ploch. Při silně zatažné obloze platí  $G = G_d$



Obr. 6 Ilustrace globálního ozáření a jeho složek [5]

### Dávka ozáření $H$

Zářivá energie dopadající na jednotku plochy za určitou dobu, která se zjistí integrací ozáření v určitém časovém intervalu, např. za hodinu nebo den ( $\text{kWh m}^{-2}$ )

### 1.3.2 Solární geometrie

#### Zeměpisná šířka $\varphi$

Je úhel mezi přímkou od středu Země k místu pozorovatele a rovinou rovníku. Hodnoty na sever od rovníku jsou pozitivní a na jih negativní: Spolu se zeměpisnou délkou tvoří souřadnicový systém. V PV oboru je však směrodatná právě zeměpisná šířka.

#### Úhel sklonu $\beta$

Úhel mezi vodorovnou rovinou a rovinou určitého povrchu. V našem případě jde o povrch pole FV modulů. Viz obr. 8.

#### Úhel orientace plochy $\gamma$ (azimut plochy)

Průmět úhlu mezi přímkou od zjevné pozice slunce k místu pozorování a vodorovnou přímkou kolmou na rovník. Azimut se měří od směru přesně na sever na jižní polokouli a od směru přesně na jih na severní polokouli. Záporné hodnoty azimutu ukazují orientaci na východ a kladné hodnoty představují orientaci na západ.

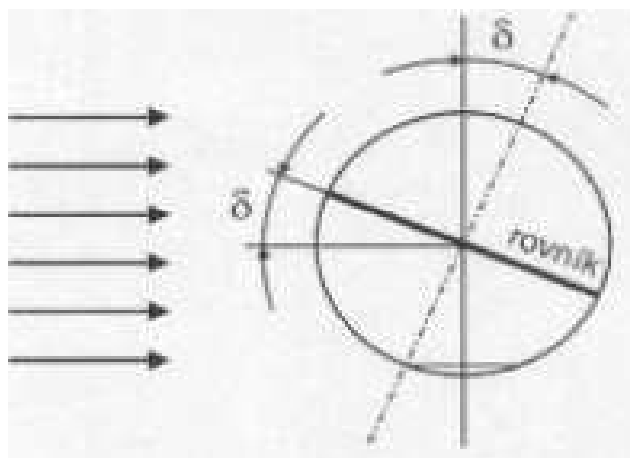
#### Sluneční časový úhel $\omega$

Úhel mezi průmětem spojnice pozorovatele a Slunce v určitém čase na rovinu proloženou zemským rovníkem a mezi průmětem této spojnice při slunečním polední.

### Sluneční deklinace $\delta$

Úhel, který svírá spojnice středu Země a Slunce s rovinou zemského rovníku (odchylka od rovníku na sever se značí znaménkem +) viz. obr. 7.

Sluneční deklinace je nulová ve dnech rovnodennosti a v průběhu roku kolísá mezi hodnotami  $+23,45^\circ$ , tj. 22. června a  $-23,45^\circ$  tj. 22. prosince tj. zimní slunovrat.



Obr. 7 Znárodnění sluneční deklinace [6]

### Sluneční azimut $\gamma_s$

Průmět úhlu mezi přímkou od zjevné pozice slunce k místu pozorování a vodorovnou přímkou kolmou na rovník. Azimut se měří od směru přesně na sever na jižní polokouli a od směru přesně na jih na severní polokouli. Záporné hodnoty azimutu ukazují orientaci na východ a kladné hodnoty představují orientaci na západ.

### Úhel slunečního zenitu $\theta_z$

Úhel mezi přímým slunečním paprskem a vodorovnou rovinou

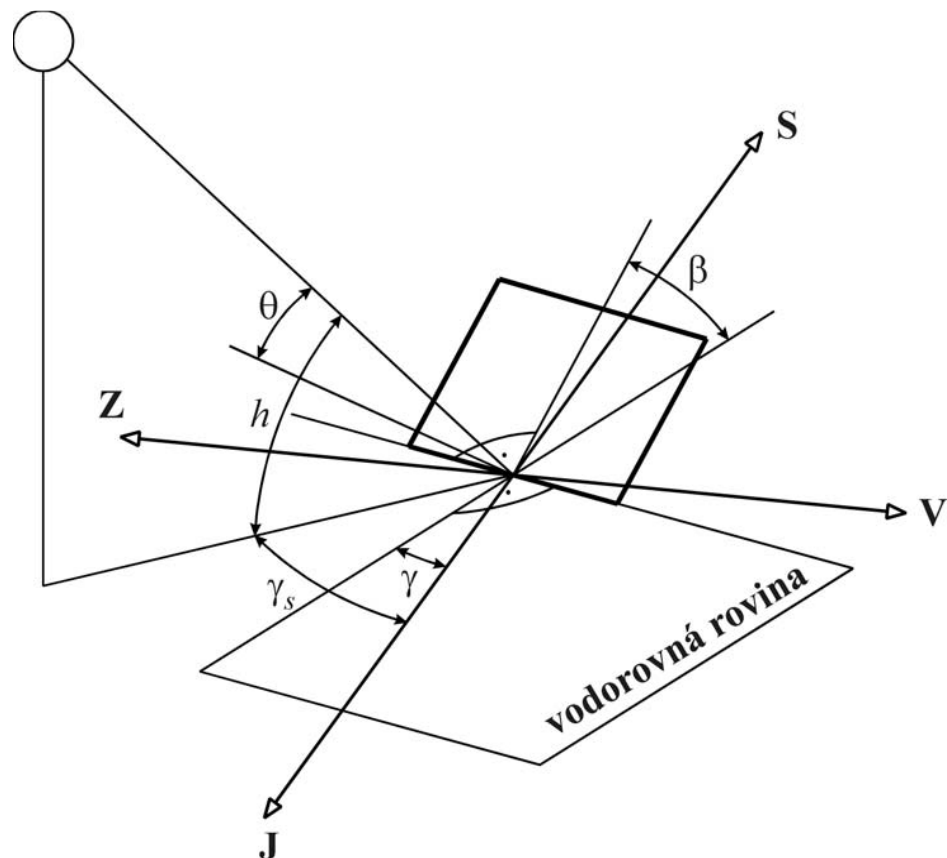
### Výška slunce nad obzorem $h$

Doplňkový úhel slunečního zenitu

$$h = 90^\circ - \theta_z \quad (10)$$

### Úhel dopadu $\theta$

Vztahuje se jen pro přímé solární záření. Úhel mezi spojnici středu Slunce a ozářené plochy a vnější kolmicí vztyčenou nad ozářenou plochou



Obr. 8 Zobrazení základních úhlů solární geometrie [6]

### 1.3.3 Optimální úhel FV modulu

Výpočet optimálního úhlu FV modulu je založen na předpokladu dopadu slunečního záření kolmo na plochu panelu v poledne každého dne, tj. v okamžiku kdy je Slunce nejvýše nad obzorem, tzn. úhel zenitu  $\theta_z$  je maximální.

Ve výpočtu optimálního úhlu figuruje zeměpisná šířka  $\varphi$  a sluneční deklinace  $\delta$  v daný moment, rovnice pro výpočet optimálního úhlu je dán vztahem:

$$\beta = \varphi - \delta \quad (11)$$

Kde:

$\varphi$  je zeměpisná šířka

$\delta$  sluneční deklinace v daném okamžiku

Výpočet sluneční deklinace v daném okamžiku je dán vztahem:

$$\delta = 23.5^\circ \sin((T / 365.25) * 360^\circ) \quad (12)$$

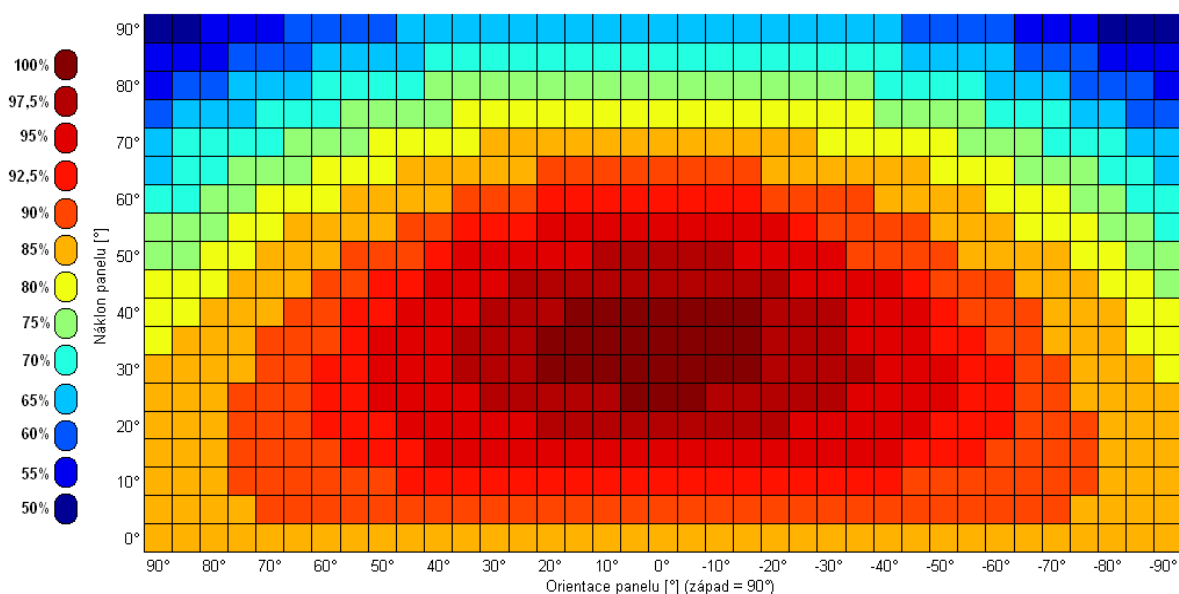
Kde:

$\delta$  sluneční deklinace

T číslo dne, počítáno do jarní rovnodennosti (21. Březen))

Z výpočtu je zřejmé že úhel dopadu slunečního záření se mění s časem, proto je při instalaci FVE volit neoptimálnější kompromis, který závisí na použité technologii konstrukcí, FV modulů a situaci umístění FV systému.[5]

V obr. 9 níže je indikován vliv orientace a sklonu FV modulů na jejich účinnost.



Obr. 9 Závislost orientace a sklonu FV modulů na účinnosti v zeměpisných šířkách ČR [6]

Empiricky lze stanovit pravidlo pro podmínky ČR, kdy odchylka až 10% od náklonu modulů při dodržení orientace na jih neznamena problém, kterému by se měl analytik provádějící optimalizaci věnovat. Orientace na jih je u pozemních FVE dodržena bez větších problémů, může však vzniknout ke změně náklonu FVP vlivem „sedání“ konstrukcí či betonových patek.

#### 1.4 Měření slunečního ozáření

Měření ozáření G má zásadní význam při vyhodnocování účinnosti FVE. Měřením se zabývá v rámci své činnosti Český hydrometeorologický ústav (CHMI). V meteorologických stanicích je měřena globální ozářenost, tj. elektromagnetický výkon slunečního záření dopadající na vodorovnou plochu, které CHMI poskytuje zákazníkům jako službu formou měsíčních reportů.

Stanice	Indikativ	Zeměpisná délka	Zeměpisná šířka	Nadmořská výška [m]	Začátek měření
Tušimice	438	13 20 E	50 23 N	322	01.01.1985
Churáňov	457	13 37 E	49 04 N	1122	01.01.1984
Kocelovice	487	13 50 E	49 28 N	519	01.01.1984
Ústí n. Labem	502	14 02 E	50 41 N	375	01.01.1984
Praha - Karlov	519	14 25 E	50 04 N	262	01.01.1984
Košetice	628	15 05 E	49 32 N	470	01.01.1984
Hradec Králové	649	15 50 E	50 11 N	285	01.01.1984
Svratouch	683	16 02 E	49 44 N	737	01.01.1984
Kuchařovice	698	16 05 E	48 53 N	334	01.01.1984
Luká	710	16 57 E	49 39 N	510	01.01.1984
Ostrava Poruba	- 790	18 15 E	49 48 N	242	01.01.1984

Tabulka 2 Meteorologické stanice CHMI pro měření globální ozáření [6]

Měření jsou prováděna pomocí pyranometrů ve spojení s integrátory, které jsou kalibrovány vůči Národnímu radiačnímu standardu ČR - k Angströmovu pyrliometru č. 565. Základní měřenou veličinou jsou hodinové sumy globálního záření integrované podle pravého slunečního času. Přesnost měření je na úrovni  $\pm 2\%$  a jsou mezinárodně porovnatelné.[6]

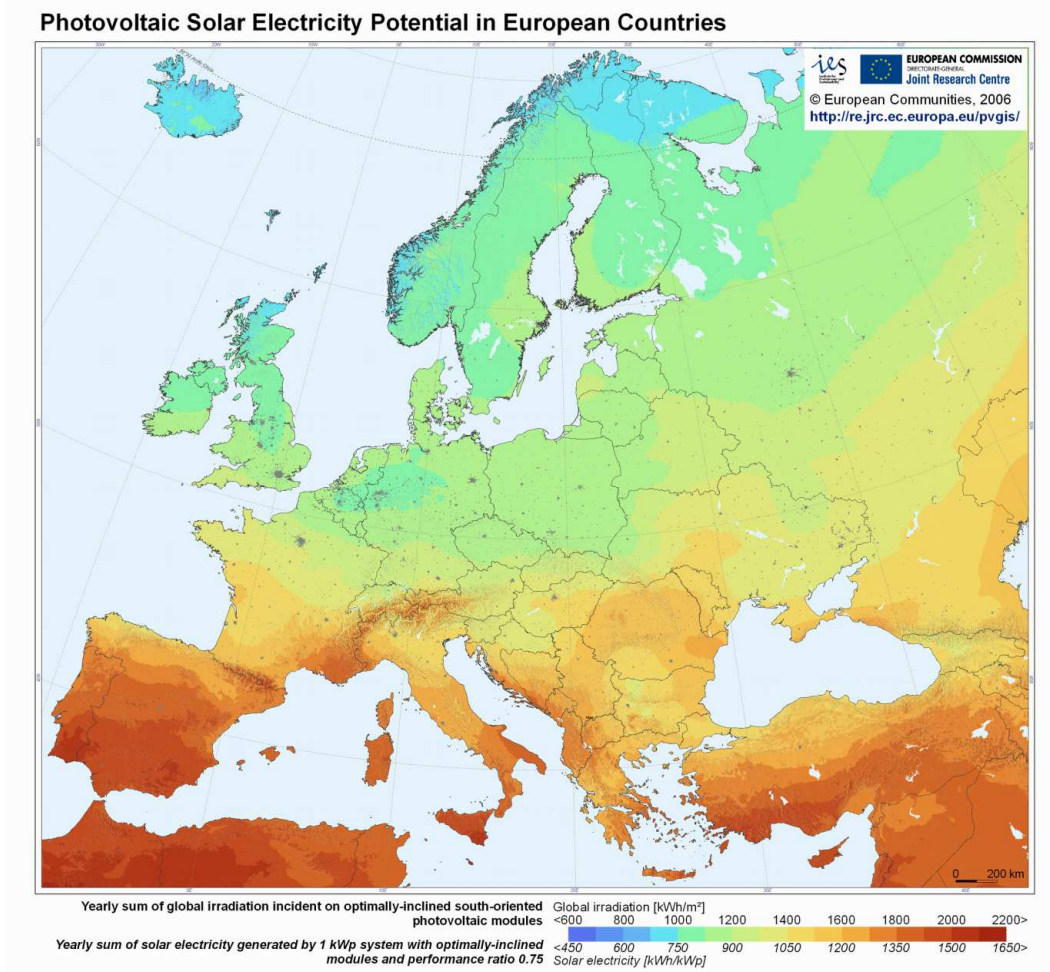
V tabulce výše je uveden seznam meteorologických stanic vybavených přesným pyranometrem, je zřejmé že naměřená data nemohou pokrýt potřeby pro diagnostiku FVE

Pro potřeby optimalizace a diagnostiky FV modulů je nezbytné monitorovat a zpětně vyhodnocovat energetický výnos v závislosti na dávce ozáření H, jež je integrací ozáření G v čase.

Problematika měření slunečního ozáření prostřednictvím pyranometrů a referenčních článků je popsána ve standardech IEC 60904, IEC 61215 a IEC 61646. Charakteristika a kalibrace přesných pyranometrů je založena na standardech ISO 9060 a ISO 9847.

#### 1.4.1 Fotovoltaický potenciál

Pro realizaci FV systémů je vhodné znát FV potenciál v příslušné lokalitě. V rámci EU, Afriky a Jihovýchodní Asii k účelům mapování účinnosti FV systémů slouží projekt PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System) operující pod záštitou JRE (Joint research centre) v rámci programu EU SOLAREC, jež má za úkol dlouhodobě monitorovat provoz a vývoj FV systémů. [7]



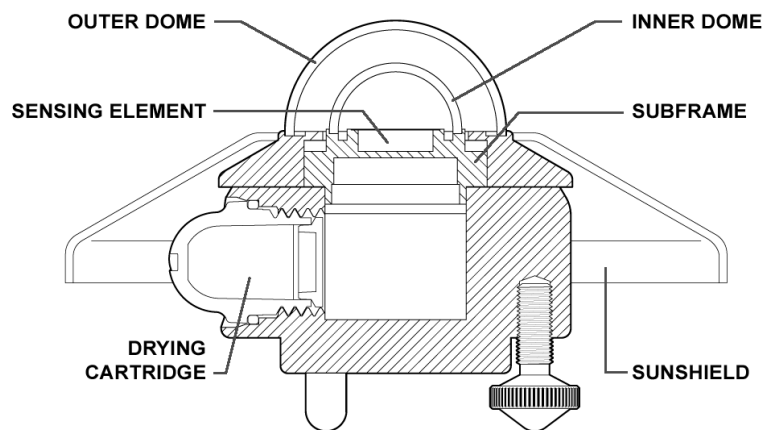
Obr. 10 Fotovoltaický potenciál zemí EU [7]

Na obr. 10 je výstup z PVGISu charakterizující FV potenciál pro FV moduly orientované na J a s optimálním sklonem. Pro podmínky ČR je to cca 1000-1100 kWh/m<sup>2</sup> meziroční dávka ozáření H.

Model PVGIS využívá historických dat z meteorologických stanic. Slouží proto k orientačním účelům. Pro účely vyhodnocování účinnosti Y proto slouží data naměřená lokálně v areálu FVE, či naměřená data v kalibrovaných meteorologických stanicích CHMI. [6]

#### 1.4.2 Pyranometr

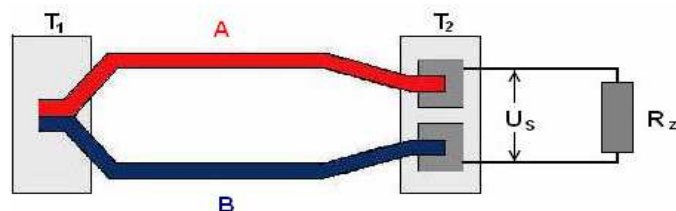
Pyranometr je zařízení radiometrického typu určené k měření globální ozáření G. Využití pyranometru nalezneme v oboru meteorologie, s nímž souvisí zkoumání slunečního záření ve FV průmyslu, využití nalezneme dále i v moderním stavebnictví a v různých odvětvích průmyslu kde se pyranometru využívá ke zkoušení materiálu. Obrázek níže ilustruje typické složení pyranometru.



Obr. 11 Typické složení pyranometru [8]

Princip pyranometru je založen na teplotní diferenci vzniklé slunečním zářením na černé a bílé ploše. Ideální černá barva úplně pohltí sluneční záření, ideální bílá barva úplně odrazí sluneční záření. Skutečné barvy však nikdy dokonalé nejsou, takže nikdy nepohltí ani neodrazí veškeré záření. Na termočláncích pak vzniká napětí, které je po zesílení přímo závislé na intenzitě slunečního záření.[8]

Termočlánek (viz. obr. 12) využívá principu termoelektrického jevu (Seebeckův jev).

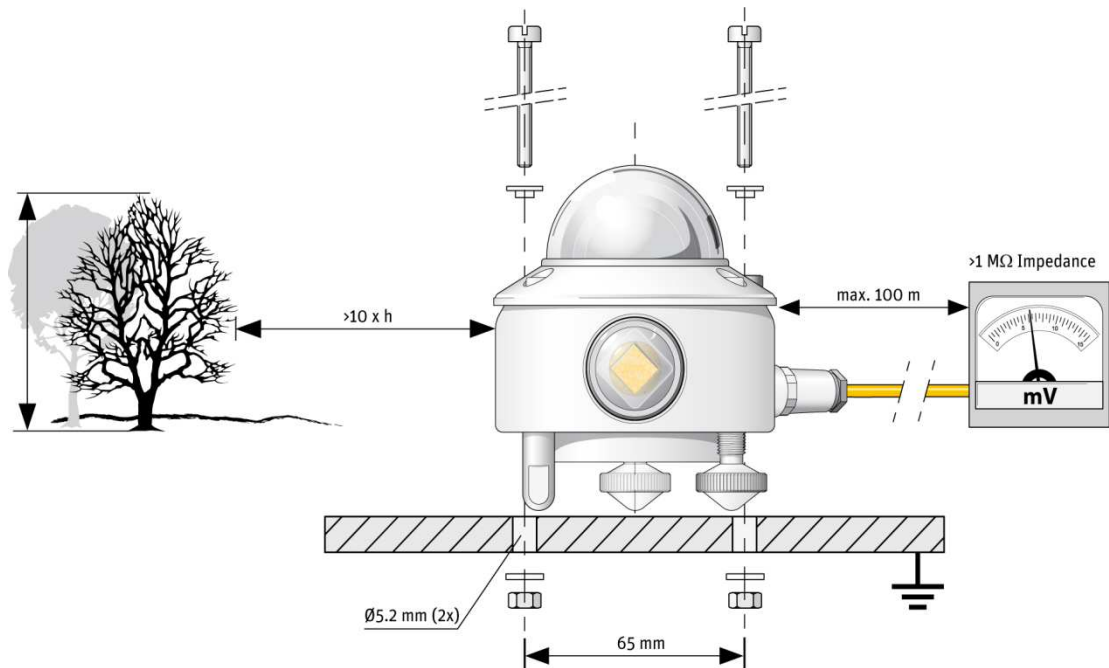


Obr. 12 Termočlánek [8]

Je tvořen vodivým spojením dvou různých vodivých materiálů A a B. Materiály mohou být kovy nebo polovodiče vodivě spojeny na jednom konci s teplotou  $T_1$ . Nespojené konce obou ramen termočláneku jsou uchovány na jiné teplotě  $T_2$ . V případě teplotního gradientu na konci o teplotě  $T_1$ , se vytváří na vývodech termoelektrické, resp. Seebeckovo napětí  $U_s$ . [8]

### 1.4.3 Optimální umístění pyranometru

Je zřejmé, že umístění pyranometru je potřeba pečlivě vybírat. Ideálně by v azimutu zorného pole pyranometru neměla překážet jakákoliv překážka, která by způsobovala zastínění a tím i vznik nepřesnosti měření. Pro umístění pyranometru platí, že nejbližší překážka, která by mohla způsobovat zastínění, může být od pyranometru vzdálená minimálně desetinásobkem její výšky.



Obr. 13 Optimální umístění pyranometru podle KIPP&ZONNEN[8]

Toto pravidlo je důležité při měření přímého slunečního ozáření G. V případě že vyhodnocujeme difuzní záření, překážky v zorném poli azimutu pyranometru nemají tak zásadní vliv výsledné měření. Například překážka, která zasahuje  $5^\circ$  do zorného pole pyranometru může zkreslit měření o 0,8%. [8]

Další zkreslení může vzniknout vlivem tepelných zdrojů, jako jsou páry, které při teplotě vyšší než  $100^\circ\text{C}$  produkují tepelné záření. Nežádoucí zkreslení a offset pyranometru způsobují i světlé zdi a plochy odrážející sluneční záření.[8]

Orientace pyranometru nepodléhá žádným speciálním požadavkům, světová meteorologická organizace (WMO) však doporučuje orientovat přívodní kabel k nejbližšímu světovému pólu, důvodem je minimalizace vzniku tepla na elektrických kontaktech.[8]

Náklon pyranometru je pro potřeby měření globálního ozáření G nastavit přesně na  $0^\circ$ . Výrobce Kipp&Zonnen udává, že zkreslení při měření dopadu na nakloněnou rovinu, v našem případě na FV moduly je  $\pm 0,2\%$  v souladu s požadavky WMO. Tato skutečnost předurčuje pyranometry k nasazení k měření slunečního ozáření G ve FV průmyslu.

#### 1.4.4 Referenční článek

Referenční článek je dalším řešením pro měření ozáření, princip měření článku spočívá v měření proudu  $I_{SC}$ ; respektive úbytku napětí na odporu. Proud  $I_{SC}$  je přímo úměrný ozáření. Referenční článek zobrazený na obr.14 umožňuje kromě ozáření měřit i teplotu. Měření teploty modulů je ve FV průmyslu bráno jako měření podpůrné, primární je měřit ozáření a sledovat zda výroba křivku ozáření kopíruje.



Obr. 14 Příklad referenčního článku jako externího čidla ozáření G přístroje SOLAR I-V

#### 1.4.5 Volba prvku pro měření ozáření

Z výše uvedených kapitol není patrné, který prvek je vhodné použít k měření ozáření. Odpověď na tuto otázku je závislá na potřebách majitele FVE, pokud je vyžadováno přesné měření je samozřejmě jedinou volbou instalovat pyranometr. Pokud měření slouží pouze k orientaci je volba referenčního článku korektní. Z faktorů které pro referenční článek hovoří bych uvedl zejména pořizovací cenu, pokud potom provádíme měření na FVE kde jsou použity FV moduly z mono-Si, lze považovat variantu měření s referenčním článkem za relevantní, viz obr. 14.

Pyranometr disponuje nezávislostí na technologii FV modulů, měří v širším spektru dopadajícího slunečního záření, respektive elektromagnetického záření (200 – 3600 nm).

V meteorologii je využíván více než 80 let. Existují standardy ISO 9060 a ISO 9847 pro kalibraci, díky kterým je zajištěna vyšší přesnost. Nepřesnost měření se pohybuje podle použitého modelu mezi 1-5%. [8]

## 1.5 Sběr dat z FVE

Pro zajištění provozu a provádění optimalizace je nezbytné pracovat s relevantními daty. Pro řadu investorů jsou relevantní pouze data vyrobené energie v kWh odečtená z elektroměru. K odečítání z elektroměru slouží portály společností poskytující distribuční soustavu. Tyto data jsou však dostupná minimálně den zpětně. Z dat se vyhodnocuje tzv. energetická výtěžnost, dále se vyhodnocují ztráty, které vznikají na kabelovém vedení a na vynutí transformátorů, které předávají energii do distribuční soustavy.

Optimalizaci je však neefektivní provádět u velkých FVE pouze odečítáním dat z elektroměru, FVE musí být vybavena zařízením zajišťující telemetrii, tzn. sběr dat z jednotlivých částí, ideálně až z úrovně FV modulů, respektive jejich řetězců.

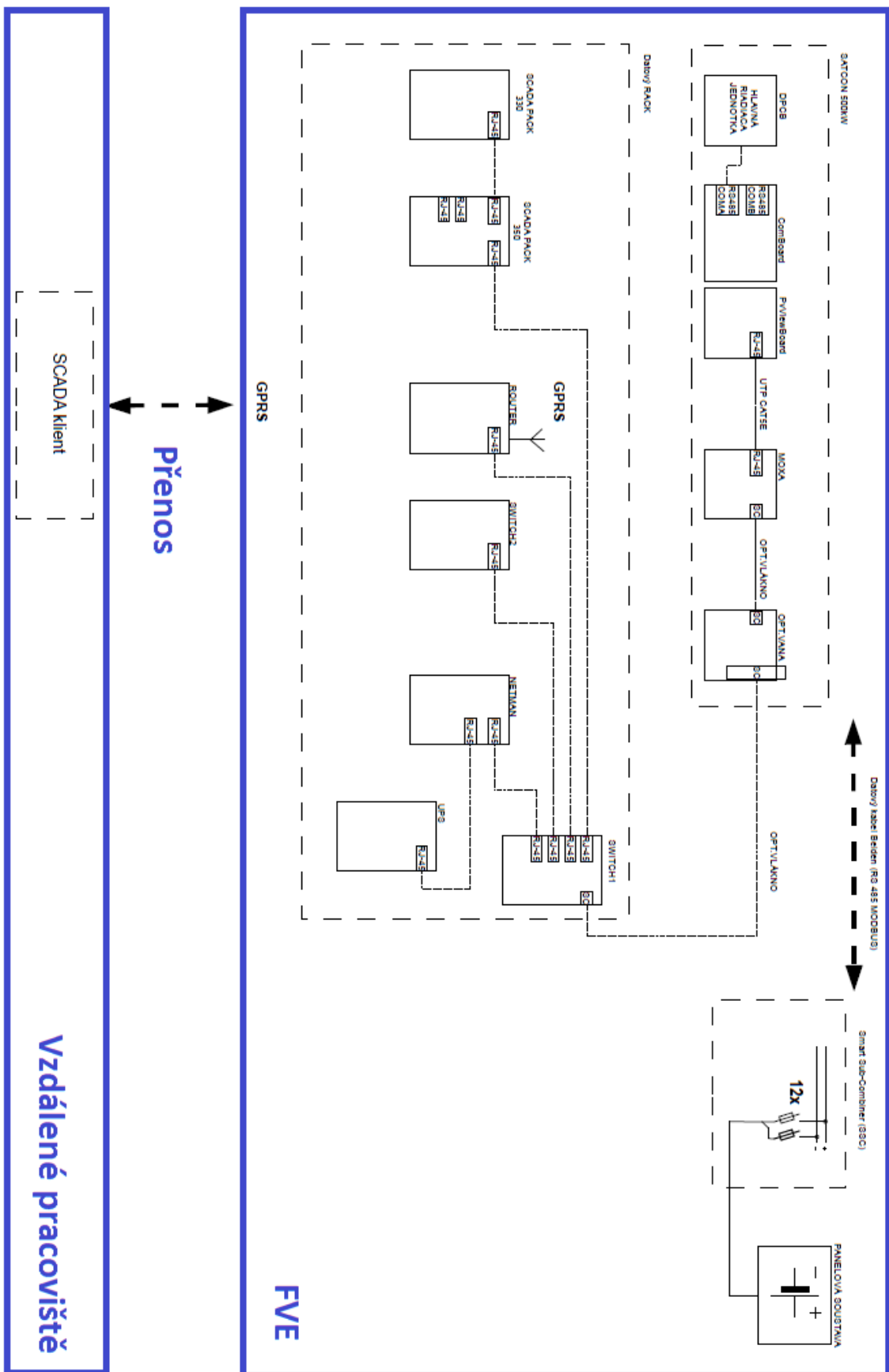
### 1.5.1 Telemetrie FVE

Telemetrie je technologie měření elektrických i neelektrických veličin na dálku a dálkový přenos dat. Telemetrie se ve FV průmyslu týká zejména přenosu informací o vyrobené energii. Údaje o vyrobené energii se mohou lišit v závislosti na použité technologii. Ideálním případem je wattmetr na výstupu každého střídače a dále měření proudu na subsystémech jednotlivých střídačů. Údaje o vyrobené energii v kWh jsou ukládány v registrech střídačů.

Data z FV systému jsou ukládány v závislosti na použité technologii například do CSV souborů, které lze použít v databázích. K tomuto účelu slouží tzv. data doggery, například SMA WEBBOX, FRONIUS DATCOM atd. Pokud technologie FV střídačů neposkytuje nativně svůj systém sběru a interpretování dat, lze použít tzv. SCADA systém (Supervisory Control And Data Acquisition, tzn. „dispečerské řízení a sběr dat“).

Telemetrie je zajištěna prostřednictvím průmyslových zařízení, jedná se o síťové prvky, tzn. switch, router atd., tyto síťové prvky musejí splňovat parametry požadované v průmyslovém nasazení, zejména je žádoucí široký rozsah pracovních teplot, obvykle -20 °C až + 60 °C.

Na Obr. Níže je prezentován příklad telemetrie FVE s centrálním střídačem SATCON 500 KW. Obrázek popisuje datový rack, jako rozvaděč pro sběr dat, slouží k sběru dat ze střídače prostřednictvím zařízení SCADAPACK a optického spoje ke střídači. Jelikož střídače jsou obecně zdroje harmonické interference, jsou k propojení používány optické spoje a pro datovou komunikaci RS-485 (MODBUS) je zapotřebí stíněných a kroucených kabelů.



Obr. 15 Příklad telemetrie FVE s centrálním střídačem Satcon 500 KW

## 2 FOTOVOLTAICKÝ SYSTÉM

FV systémem je souhrn všech technologických zařízení, které slouží ke generování elektrické energie. V případě FV systémů jde o sériově či sériovo-parallelně zapojené FV moduly do FV polí, které jsou následně připojeny do střídačů, které přeměňují stejnosměrný (DC) proud získaný FV konverzí na střídavý proud (AC) jenž má parametry pro připojení do distribuční sítě, nebo pro lokální účely. Alfou a omegou FV systému jsou FV moduly, jenž tvoří až 80% investice celého FV systému, proto se následující kapitola bude zabývat vlastním FV jevem, FV článkem, FV modulem a FV polem.

### 2.1 Fotovoltaický jev

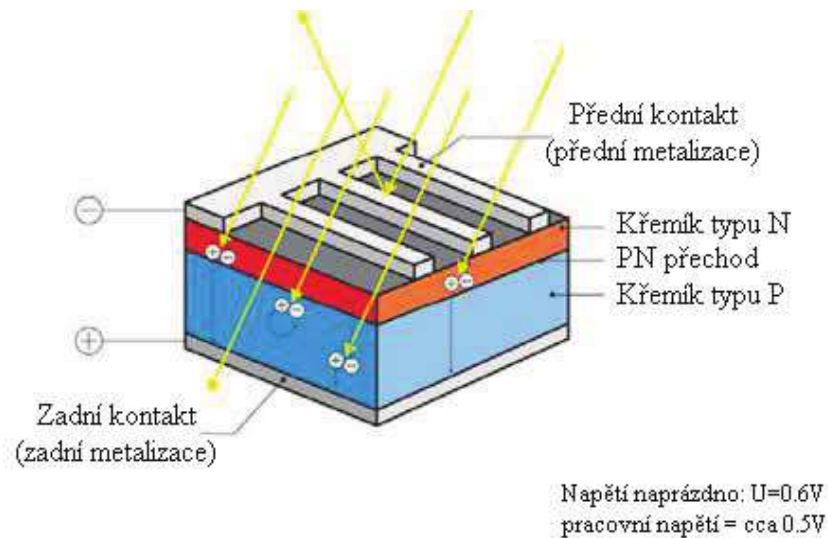
Fotovoltaický jev objevil v roce 1839 francouzský fyzik Alexandre Edmond Becquerel. První FV článek však byl sestaven až v roce 1883 Charlesem Frittssem, který potáhnul polovodivý selen velmi tenkou vrstvou zlata. Jeho zařízení mělo pouze jednocentní účinnost. V roce 1946 si nechal patentovat konstrukci solární článku Russel Ohl. Současná podoba solárních článků se zrodila v roce 1954 v Bell Laboratories. Při experimentech s dopovaným křemíkem byla objevena jeho vysoká citlivost na osvětlení.

Výsledkem byla realizace FV článku s účinností 6%. Význam fotovoltaiky se projevil zvláště v kosmonautice, kde FV moduly tvoří prakticky jediný zdroj elektrické energie pro umělé družice země. Prvou družicí s FV články byla sovětská družice Sputnik 3, vypuštěná na oběžnou dráhu 15. května 1958.

Na začátku sedmdesátých let se FV články dostaly z laboratoří a z kosmického prostoru i na zem, z velké části díky ropným společnostem těžícím v Mexickém zálivu. Na automatických ropných plošinách je elektrická energie potřebná pro osvětlení (maják) a pro ochranu proti korozi. FV články zcela vytlačily do té doby používané primární články elektrické energie.[6]

### 2.2 Fotovoltaický článek

FV články používané v současnosti jsou v podstatě polovodičové diody. Na obrázku je zobrazen řez FV článkem, pro odvod generovaného proudu slouží kontakty přední a zadní metalizace. Uprostřed těchto kontaktů se nachází vrstva křemíku typu N nanesená na vrstvě křemíku typu P. Vzniklá přechodová vrstva P-N obsahuje elektrické pole, které uvádí do pohybu volné nosiče náboje, které vznikají absorpcí světla. [6]

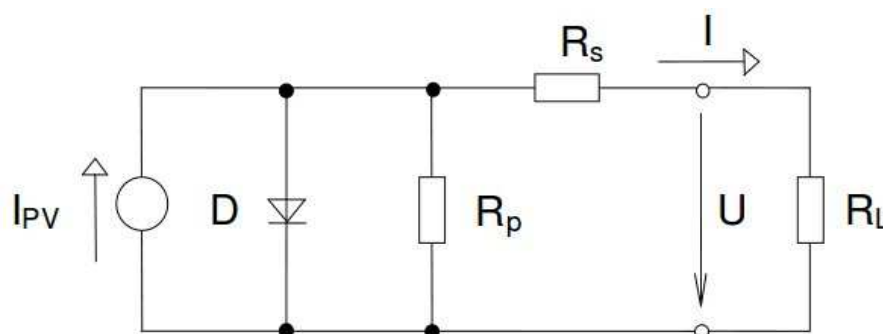


Obr. 16 Princip FV článku

V ozářeném FV článku tedy vznikají fotony generované elektricky nabitě částice (pár elektron – díra). Některé elektrony a díry jsou poté separovány vnitřním elektrickým polem PN přechodu. Rozdělení náboje má za následek napěťový rozdíl mezi předním (-) a zadním (+) kontaktem FV článku, typické napětí jednoho FV článku je 0,6V.[6]

Pokud připojíme na kontakty FV článku zátěž, prochází jím stejnosměrný elektrický proud, jež je přímo úměrný ploše solárního článku a ozáření G.

Na obr. 17, je zobrazeno náhradní schéma, z tohoto náhradního schématu lze odvodit, že k dosažení maximálního výstupního výkonu je potřeba dosáhnout maximálního generovaného proud  $I_{PV}$ , přičemž je žádoucí dosáhnout minimálního sériového odporu  $R_S$  a maximálního paralelního (svodového) odporu  $R_P$ . [9]



Obr. 17 Jedno-diodové náhradní schéma FV článku [9]

V komerčním použití jsou výrobci FV článků, potažmo modulů vystaveni problému s optimalizací ztrát na sériovém odporu, tyto ztráty se řeší optimalizací účinné plochy článku. Mezi další ztráty patří ztráty při rekombinaci nosičů náboje v objemu článku, tyto

problémy mají své fyzikální omezení, jejich omezení je přímo úměrné nákladům na výrobu FV článku. [9]

### 2.2.1 Objemové FV články

Krystalický křemík c-Si

- Monokrystalické
- Multikrystalické

Objemové články jsou nejčastěji využívány ve FV průmyslu, je tomu dáno zejména vlastnostmi křemíku, který je v elektrotechnice díky svým vlastnostem hojně využívaný, a tudíž technologie používané pro zpracování jsou na vysoké úrovni. Mezi požadované vlastnosti patří šířka zakázaného pásu valenčních elektronů čímž lze dosáhnout relativně vysoké účinnosti vlastního článku.

Téměř doslova stavebním kamenem FV článku tohoto typu jsou *křemíkové ignoty*, Je to válec z monokrystalického křemíku o hmotnosti asi 100 kg, průměru kolem 14 cm a délce přes 80 cm. Křemík s příměsí bóru (polovodič typu P) musí splňovat velmi přísná kritéria - 1 atom bóru připadá přibližně na 5 000 000 křemíkových atomů.

Z křemíkových ignotů se řezou křemíkové destičky o tloušťce asi 0,3 mm. Tyto destičky jsou základem budoucích FV článků. Rozřezáním ingotu se získá asi 750 destiček o celkové hmotnosti kolem 40 kg. Zbytky ingotu se vrací k roztavení a opětovnému zpracování.

*Leptáním destiček* se potom odstraní poškození jejich povrchu při řezání. Výsledkem je texturovaný povrch. Na povrchu se vytvoří miniaturními křemíkové pyramidy, snižující odraz světla. Touto operací se výrazně zvyšuje účinnost budoucího fotočlánku.

Dalším krokem v technologii výroby FV článků je *difundování fosforu* na připravenou destičku. Difundováním se vytvoří velmi tenká vrstva polovodiče typu N. Tloušťka této vrstvy je přibližně 500 nm. V tomto okamžiku procesu je vytvořen požadovaný přechod PN.

V rámci minimalizace ztrát vlivem odrazu dopadajícího záření je nanášena *antireflexivní vrstva* z nevodivého nitridu křemíku. Tato vrstva rovněž chrání článek před mechanickým poškozením, její tloušťka je asi 80 nm a způsobuje modravé zbarvení povrchu FV článků.

Finálním krokem při výrobě FV článku je nanesení vodivých kontaktů, které slouží k připojení kladného a záporného potenciálu viz. obr 18. Kontakty jsou na FV článek nanášeny metodou sítotisku, na zadní neosvětlené ploše je vytvořena hustá mřížka, kontakty na přední osvětlené části mají potom podobu tenkých vodivých spojů.

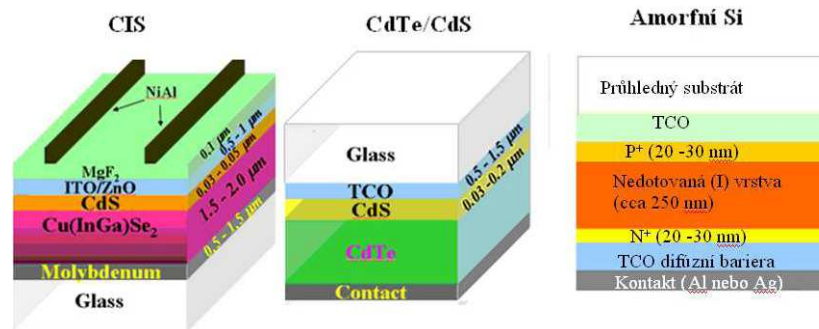
Uvedená technologie multi-Si a mono-Si článků je řazena do první generace. Jde o nejrozšířenější technologii FV článků, popularita je dána dostupností technologií výroby monokrystalického křemíku Czochralského metodou. Potřeba snižovat náklady na výrobu a tím i finální cenu FV modulů vedla k přechodu ke článkům z polykrystalického křemíku (multi-Si). Na obrázku níže jsou zobrazeny typické mono a polykrystalické c-Si články.[10]



Obr. 18 Typický vzhled mono a polykrystalického c-Si článku [10]

### 2.2.2 Tenkovrstvé struktury

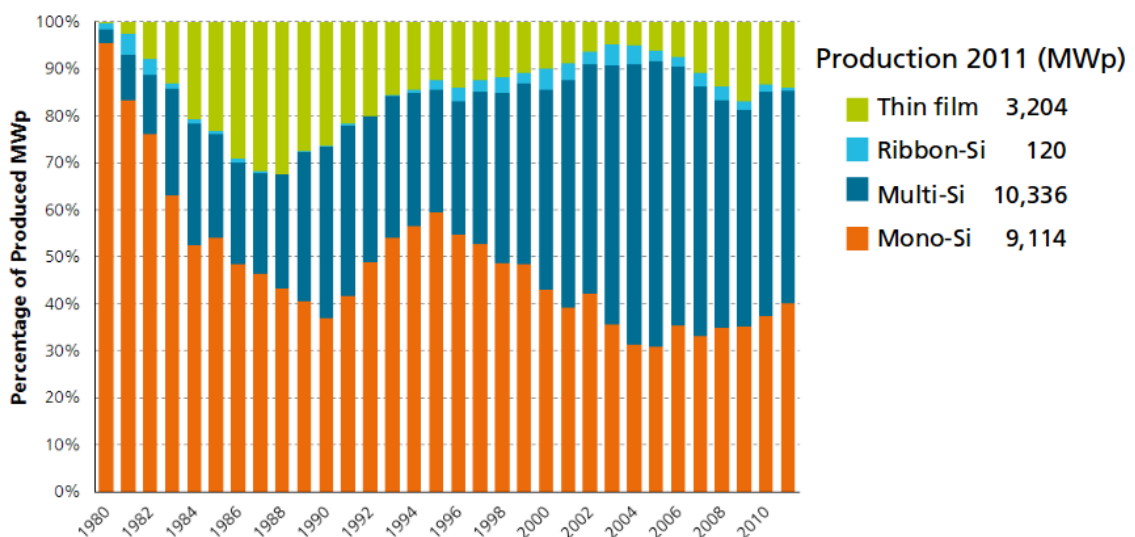
FV jev lze využít i u materiálů s vysokým absorpčním koeficientem a to ve vrstvě o tloušťce několika  $\mu\text{m}$ , což znamená výrazné úspory v polovodičových materiálech. Produkce této technologie je z celkového objemu trhu cca 10-15% viz obr.21. Tenkovrstvé články jsou vyráběny z CdTe, amorfního křemíku (a-Si) a  $\text{CuInSe}_2$ . Pro tenkovrstvé články a moduly je nutná technologie výroby, umožňující realizovat reprodukovatelně tenké vrstvy o vysoké účinnosti FV přeměny energie a vysoké stabilitě. [10]



Obr. 19 Typické zastoupení tenkovrstvých FV článků [10]

Pro tenkovrstvé články je nutná technologie výroby, jež umožňuje realizovat reprodukovatelně tenké vrstvy o vysoké účinnosti a vysoké stabilitě. Tenké vrstvy nejsou samonosné, tudíž je potřeba deponovat na vhodný substrát. Při deponování je potom žádoucí dosažení nízkého sériového odporu  $R_s$ , je tak dosaženo aplikací transparentního vodivého oxidu, který slouží k odvádění proudu z vodivé vrstvy. Rovněž slouží jako antireflexní vrstva. Na obr. 19 jsou zobrazeny typické řezy tenkovrstvých struktur. [10]

Z použitých materiálů převládá využití multi-Si, popřípadě mono-Si křemíku viz. obr. 20. Důvodem je vyšší ekonomická návratnost případné investice, která je dána vyšší účinností FV článku. Tenkovrstvé články však mají své místo pod sluncem, jejich využití je zejména tam, kde není možné vyhnout se nežádoucím stínům, či není splněna orientace na jižní stranu. V takovém případě je rozhodnutí pro tenkovrstvé (Thin film) články racionální, ztráty vzniklé právě stínem či nevhodnou orientací nejsou tak markantní jako u účinnějších mono-Si či poly-Si modulů. [10]



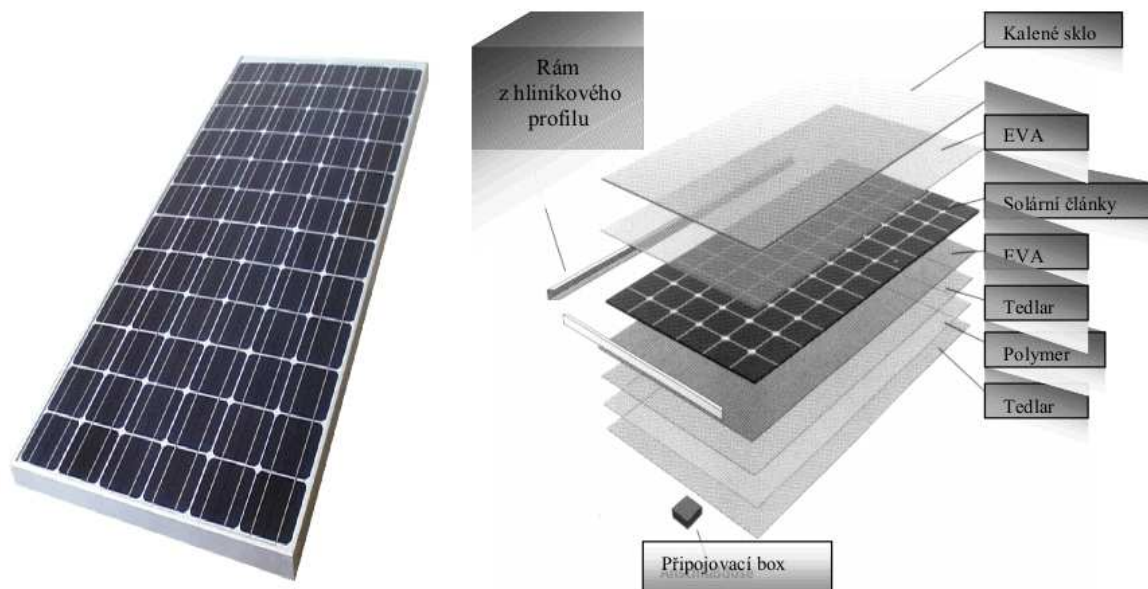
Obr. 20 Rozdělení používaných technologií za posledních 20 let [10]

V následujících kapitolách se budu zabývat rozбором a měřením FV modulů na bázi multi-Si a mono-Si, které jsou v instalacích po České Republice zastoupeny v drtivé většině.

### 2.3 Fotovoltaický modul

V kapitole o FV článku byly popsány současné nejpoužívanější technologie výroby článků, samostatné c-Si články jsou schopny generovat pracovní napětí cca 0,5V s proudovou hustotou cca 35 mA/cm<sup>2</sup>. Články je proto potřeba spojovat sériově pro dosažení vyššího napětí a dále paralelně pro dosažení vyššího proudu.

Modul musí zajistit hermetické zapouzdření solárních článků, musí zajišťovat dostatečnou mechanickou a klimatickou odolnost (např. vůči silnému větru, krupobití, mrazu apod.). Konstrukce solárních panelů jsou značně rozmanité podle druhu použití. Obvykle jsou po obvodu FV panely opatřeny duralovými rámy pro zpevnění celé konstrukce FV modulu a zároveň k usnadnění realizace uchycení panelů ke konstrukci FV systému. Přední krycí materiál je speciální kalené sklo, které odolává i silnému krupobití. [10]



Obr. 21 Řez komerčním křemíkovým modulem [10]

Fotografie FV panelu a popis jeho konstrukce jsou patrné z obr. 21. Z obrázku je také patrná poměrně složitá konstrukce panelu realizovaná v průběhu procesu výroby panelů – laminace.

### 2.3.1 Základní parametry FV modulu

V kapitolách výše byl popsán princip nepoužívanějších technologií FV modulů. V této kapitole budou prezentovány vlastnosti elektrické vlastnosti FV modulu. Jsou to parametry deklarované za standardních zkušebních podmínek (Standard Test Conditions, dále jen STC). Tyto podmínky jsou vymezeny normou ČSN EN 61215 pro FV moduly z krystalického křemíku, pro moduly z amorfního křemíku jsou tyto parametry vymezeny v normě ČSN EN 61646.

STC určují elektrické vlastnosti FV modulu při podmínkách:

$$G_{\text{STC}} = 1000 \text{ W/m}^2$$

$$T_{\text{cell}} = 25^\circ\text{C}$$

$$\text{AM} = 1$$

$$v_a = 1 \text{ m/s}$$

Výkon naměřený za těchto podmínek je označován za špičkový (peak), setkáváme se proto s označením  $W_p$  jako označení instalovaného výkonu.

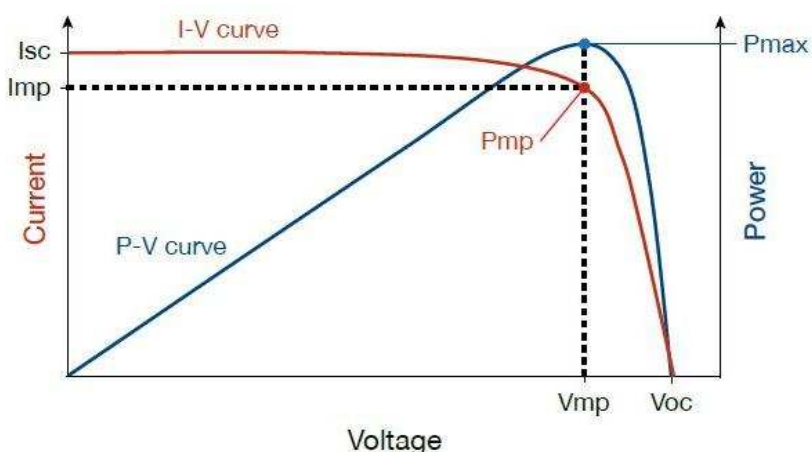
Elektrické parametry FV modulů udává výrobce v katalogových listech a na štítcích každého z modulů viz. obr. 22.



Obr. 22 Informace na zadním štítku FV modulu

Katalogové listy dále obsahují informace o závislosti výkonu na aktuálním ozáření. Jinými slovy grafy, které reprezentují V-A charakteristiku i při nižších osvitcích. V-A charakteristika je znázorněním chování FV článku, FV modulu i FV pole. Obecně slouží k charakterizaci polovodičů při různých podmínkách proudu a napětí za účelem určení pracovního bodu. V případě FV techniky jde o výkon  $P_{mp}$  (Power at maximum power point), který je dán součinem pracovního napětí a proudu:

$$U_{MP} = I_{MP} \cdot U_{MP} \quad (13)$$



Obr. 23 VA a P charakteristika FV modulu [11]

### 2.3.2 Proud $I_{sc}$

Proud na krátko je proud, který prochází FV modulem v případě že napětí je rovno nule, tento případ nastane, pokud je FV module zapojen do zkratu, z čehož plyne označení  $I_{sc}$  (short-circuited). Proud na krátko je roven proudu generovaném světlem  $I_{sc} = I_L$ , za podmínek nulového sériového odporu  $R_s$ .

### 2.3.3 Napětí $U_{oc}$

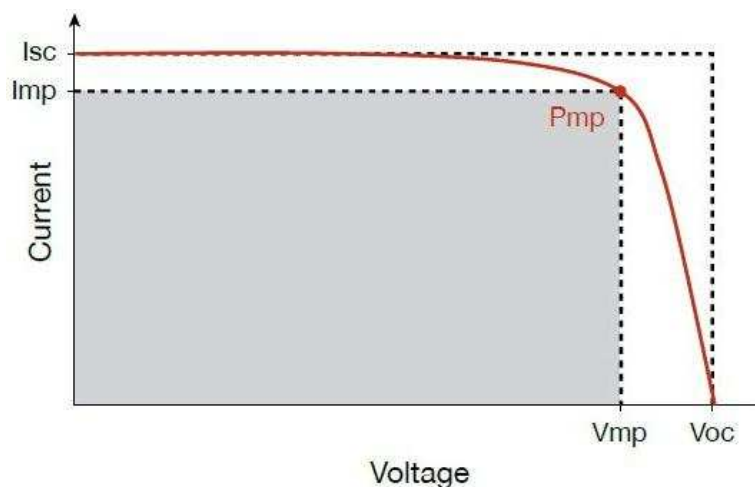
Napětí na prázdko je označováno jako  $U_{oc}$  (open circuited), je získáno při nulovém proudu  $I$ . Pouze za předpokladu  $I_{sr} = 0$ ,  $R_s = 0$  a  $R_p = 0$  je napětí na prázdko dáno poměrem  $I_L$  a  $I_s$  tj. absorpcí a procesem generace světlem a účinností, se kterou nábojové nosiče dosáhnou ochuzené oblasti.

### 2.3.4 Fill factor

Pro hodnocení FV modulů se používá tzv. Fill factor (dále jen FF), jde o bezrozměrnou jednotku udávanou v %. Jedná se „faktor plnění“ FV modulu, jde o ukazatel

elektrické jakosti FV modulů, respektive FV článků. Čím je jeho hodnota vyšší tím je FV modul kvalitnější. Hodnoty FF se u současných FV modulů z krystalického křemíku pohybují v rozsahu 60-80%. V rovnici níže je uveden výpočet FF. Jde o podíl obsahu čtverců viz. obr. 25, které reprezentují skutečný maximální výkon (obsah šedého čtverce) a ideální výkon (obsah vnějšího čtverce), který však není z fyzikálních vlastností polovodičů možný.

$$FF = \frac{I_{MP} \cdot U_{MP}}{I_{SC} \cdot U_{OC}} = \frac{P_{MAX}}{P_O} \cdot 100[\%] \quad (14)$$



Obr. 24 Ukázka poměru čtverců výkonu činitele plnění fill factor [11]

Předpokladem pro využití FF je vyhodnocení FV modulů v rámci FVE, jelikož hodnoty FF FV modulů jsou téměř shodné. Hodnotu FF lze taky chápat jako schopnost FV modulu generovat výkon, proto je jeho empirickým porovnáváním v rámci FVE odhalit problém.

K měření  $P_{MAX}$  FF slouží v rámci FV článků laboratorní testery, v rámci FV modulů jsou to solární simulátory.

### 2.3.5 Účinnost

Jedná se o nejpoužívanější parametr pro porovnávání FV modulů. Účinnost je definována jako poměr výstupního výkonu generovaného FV modulem a vstupního výkonu, respektive dávky ozáření H, viz vztah:

$$\eta = \frac{V_{OC} \cdot I_{SC} \cdot FF}{P_{vstup}} = \frac{U_m \cdot I_m}{P_{vstup}} \cdot 100[\%] \quad (15)$$

Stanovení účinnosti se vztahuje k podmínkám STC. Například účinnost FV modulů pro kosmonautiku je měřena ve spektru AM0.

Dnešní průmyslově vyráběné FV moduly dosahují účinnosti cca 15%, v současnosti je rekordní účinnost 24,7 % u FV článku společnosti Panasonic. [11]

### 2.3.6 Sériový odpor $R_S$

Sériový odpor  $R_S$  ovlivňuje tvar volt-ampérové charakteristiky FV modulu, v ideálním případě se jeho hodnota blíží nule. Na sériový odpor má vliv zejména plošné uspořádání FV článků v modulu, protože kontaktní odpor na zadním přechodu kov-polovodič má zanedbatelnou výšku a je vyroben z materiálu typu P. [11]

V praktickém nasazení FV modulů sériový odpor zvyšuje odpor kabelových tras, tento problém lze minimalizovat již ve fázi projekce instalace FVE.

Nežádoucí vliv  $R_S$  se projevuje při vzniku defektu v instalaci, může jít o závadu na kabelové trase (poškozené konektory a pojistkové odpojovače) či na FV modulech (poškozené bypass diody, defektní články v modulu).

Zvýšení sériového odporu některého ze článků v modulu má za následek snížení proudu na krátko  $I_{SC}$ . Napětí  $U_{OC}$  zůstává beze změny, výsledkem je snížení fill factoru a tedy i účinnosti FV modulu.[11]

### 2.3.7 Paralelní odpor $R_P$

Ideální  $R_P$  se blíží nekonečnu, reálně může být způsoben jeho pokles defekty v krystalické mřížce FV článků či svodovým proudem na okrajích článků. Stále dokonalejší technologie výroby FV článků potlačuje zmenšování paralelního odporu a tudíž je jeho hodnota v praxi zanedbatelná. [11]

### 2.3.8 Nominální operační teplota NOCT

Výstupní výkon modulu je měřen a hodnocen za podmínek STC, výrobce i na základě těchto podmínek FV modul prodává. Koncový uživatel se však hodnot výstupního výkonu deklarovaným výrobcem však dočká jen ve velmi minimální míře, proto se zavádí nominální operační teplota článku (Nominal Operation Cell Temperature, dále jen NOCT).

Teplota NOCT se stanovuje za těchto podmínek:

$$G_0 = 800 \text{ W/m}^2$$

$$AM = 1$$

$v_a = 1 \text{ m/s}$

Výrobci FV modulů ve svých katalogových listech udávají i parametry za podmínek NOCT. Tyto parametry potom mohou pomoci jak při návrhu systému tak při jeho provozování.

### 2.3.9 Teplotní koeficienty FV modulů

V rámci měření teploty NOCT jsou dle normy ČSN EN 61215 výrobcem mimo požadovanou operační teplotu stanoveny i teplotní koeficienty. Koeficienty slouží k charakterizaci chování modulu v různých teplotách. Modul tedy ztrácí na svém výkonu při teplotách vyšších než  $25^\circ\text{C}$ , je to dáno vlastnostmi křemíku, které je teplotně závislý. V tabulce 3 jsou uvedeny teplotní koeficienty.

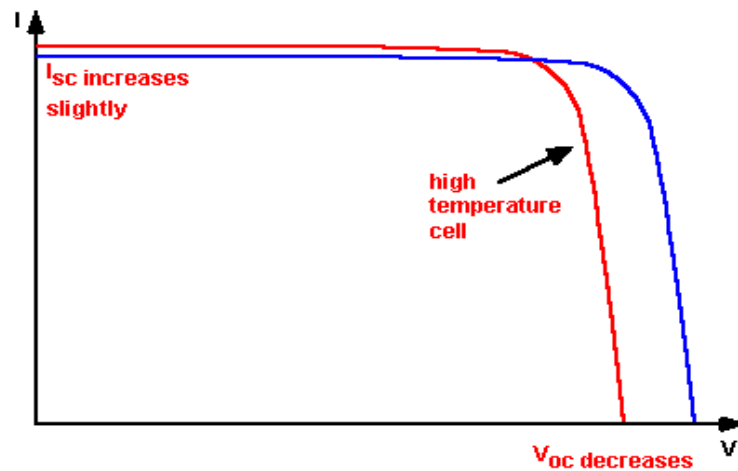
Parametr	FV moduly série LDK-P
NOCT	$45 \pm 2^\circ\text{C}$
Teplotní koeficient $P_{\max} \gamma$	$-0,47 \text{ \%/}^\circ\text{C}$
Teplotní koeficient $U_{OC} \beta$	$-0,34 \text{ \%/}^\circ\text{C}$
Teplotní koeficient $I_{SC} \alpha$	$+0,06 \text{ \%/}^\circ\text{C}$
Provozní teplota T	$-40^\circ\text{C}$ až $+85^\circ\text{C}$

Tabulka 3 Teplotní koeficienty FV modulu LDK 235

Z uvedených hodnot je zřejmé, že vlivem teploty je primárně ovlivněno napětí  $U_{OC}$ , z čehož vyplývá i pokles  $P_{MAX}$ . NOCT teplota při  $800 \text{ W/m}^2$  je  $45^\circ\text{C}$  což je o  $20^\circ$  více než při  $P_{MAX}$  deklarovaném při STC,  $P_{\max}$  v letních dnech může být vlivem teploty degradován až o 10%. Z těchto důvodů je proto vhodné při návrhu FV systému vstupní instalovaný výkon naddimenzovat a to maximálně o 10%.

Pro nasazení FV modulů na střechách je proto vhodné dbát na zajištění odvětrání instalovaných FV modulů. Zastavění exponované plochy za každou cenu se majiteli nemusí vyplatit.

Na obr. 25 je zobrazena teplotní závislost FV modulů, z grafu je patrná závislost  $U_{OC}$  na vyšší teplotě,  $I_{SC}$  z důvodu zúžení zakázaného pásma valenčních elektronů roste. [11]



Obr. 25 Ilustrace teplotní závislosti FV modulu [11]

## 2.4 Fotovoltaické pole a stringy

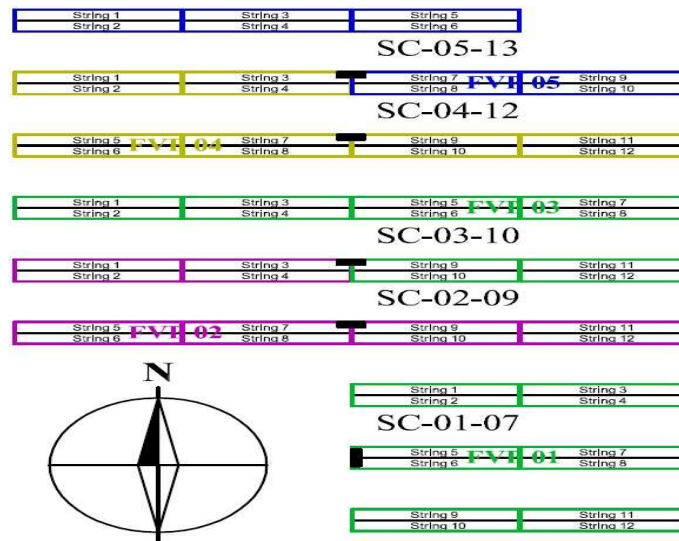
Jak již byla odůvodněna potřeba spojovat články do modulů za dosažením vyššího výstupního výkonu, ze stejného důvodu se seskupují moduly do FV polí (dále FVP). Dle ČSN CLC/TS 61836 je definice FVP jako sestava mechanicky integrovaných a elektricky vzájemně propojených FV modulů a jejich nosné konstrukce.

Topologie FVP závisí na použité technologii střídače, respektive na parametru vstupního napětí  $U_{VSTUP}$ .

Vstupní napětí  $U_{DC}$  se nejčastěji pohybuje v rozmezí 700-800V. FV moduly jsou zapojeny do sérových řetězců, tzv. stringů. Počet modulů je dán součtem napětí  $U_{OC}$  všech modulů ve stringu. Například sériové 20 modulů LDK 235P s  $U_{OC}$  dle STC 36,8 V vygeneruje napětí  $U_{DC}=736V$ , počítáme s hodnotami za STC podmínky, které v reálném nasazení nastávají jen minimálně a to v chladných slunných zimních dnech, tímto způsobem navrhnuté a realizované pole potom vylučuje nebezpečí přepětí během provozu FVE.

Stringy jsou dále v závislosti na rozměrech použitých modulů a technologii nosné konstrukce kladeny do mechanických bloků. Na obr. níže je zobrazena část FVE pro ilustraci rozmístění stringů ve FVP. Mechanický blok je tvořen dvěma stringy, což

znamená vytvoření FVP 4x10 modulů. Stringy jsou sdruženy v podružném rozvaděči (Sub-Combiner) a každý pól je jištěn 12A jistící vložkou.



Obr. 26 Rozdělení FVP a stringů

## 2.5 Střídače

Střídač je základním elektrickým zařízením FV systému, slouží k přeměně stejnosměrného proudu (DC) na proud střídavý (AC), který je dále transformován dle požadavku systému. Pokud je střídač provozován paralelně s distribuční sítí, musí splňovat příslušné parametry pro zajištění bezpečnosti provozu a to z hlediska sledování napětí, frekvence a impedance sítě, základním kritériem pro provoz paralelně se sítí je tzv. Anti-islanding, což je standard který zajišťuje vypnutí výstupu střídače v případě poruchy na distribuční síti.

Střídače jsou vybaveny technologií pro vzdálený monitoring a to alespoň v minimální míře kdy se monitoruje aktuální výstupní výkon či ostatní provozní parametry.

Dále jsou na střídače kladeny požadavky a to z hlediska účinnosti konverze z DC na AC proud, spolehlivosti, odolnosti dle příslušného krytí IP.

Střídače se rozdělují z hlediska výkonů na centrální, decentrální a modulové, dále dle počtu fází na 1-f a 3-f. Z hlediska provozu rozdělujeme střídače, jež pracují paralelně s distribuční sítí (on-grid), či v systémech autonomních kde figuruje akumulátor a regulátor nabíjení baterie a v systémech kombinovaných, kdy střídač po nabití akumulátorů je schopen dodávat proud do sítě. Vzhledem k orientaci této práce se dále budu zabývat výlučně střídači prvního typu (on-grid).

### 2.5.1 Centrální střídače

Jedná se o střídače se jmenovitým výstupním výkonem vyšším než 100 kW, typicky se můžeme v ČR setkat se střídači centrálního typu o výkonu 500 kW. Na obr. Níže je zobrazen střídač Satcon PowerGate Plus.

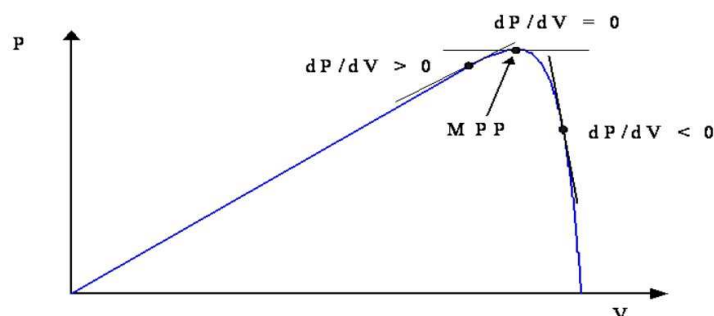


Obr. 27 Centrální FV střídač Satcon Powergate Plus 500kW [12]

Mezi vybrané parametry, které hrají roli optimalizaci je práh pro maximální vstupní napětí, které u tohoto střídače činí  $900V_{DC}$  a dále pracovní rozsah vstupního napětí  $420 - 850 V_{DC}$ . Účinnost střídače je 97%.

Střídač o jmenovitém výkonu 500 kW je schopen pojmout instalovaný výkon více než z 2000 ks FV modulů (LDK 235-P), které jsou seskupeny do více než 180 stringů, jenž jsou sdruženy v podružných rozvaděčích.

Pro zajištění optimální výtěžnosti tak velkého množství instalovaných FV modulů je nezbytné, aby centrální střídač byl vybaven zařízením a algoritmem pro vyhledávání pracovního bodu maximálního výkonu (Maximum Power Point Tracker). Tento bod je závislý na provozních podmínkách, algoritmus spočívá v měření výstupního výkonu, krokově provádí drobné odchylky ve vstupním napětí  $U_{DC}$  a proudu  $I_{DC}$ . V případě zjištění derivace  $dP/dV > 0$  je aktuální vstupní napětí  $U_{DC}$  příliš malé a naopak, viz. obr. 28.



Obr. 28 Princip vyhledávání bodu maximálního výkonu [10]

### 2.5.2 Decentrální střídače

Decentrální střídače, často také nazývané stringové, jsou svojí koncepcí předurčeny na malé FV instalace, v podmínkách ČR se s nimi můžeme hojně setkat i u velkých FVE. Označení stringové, čili řetězcové střídače pramení z faktu, že na vstup lze připojit jeden či více stringů v závislosti na jmenovitém výkonu střídače. Na obr.29 je zobrazen velmi populární střídač SMA MINI CENTRAL 4600A.



Obr. 29 Decentrální střídač SMA MINI CENTRAL 4600A [13]

Nespornou výhodou u decenterálních střídačů je možnost flexibility a fakt že u menších střídačů výrobci poskytují i více než jeden vstup pro vyhledávání bodu maximálního výkonu.

Mezi vybrané parametry u tohoto střídače patří maximální napětí  $U_{DC}$ , které činí 600V a rozsah pracovních napětí  $U_{MPP}$  220-420 V. Uvedené parametry signalizují že na rozdíl od centrálního střídače budou stringy tvořeny menším počtem modulů a tudíž i rozdělení FVP bude odpovídat právě použité technologii střídače. Účinnost střídače je 96,1%, jde o účinnost nižší než u centrálních střídačů, které jsou obecně považovány za optimálnější volbu pro velké FVE.

## 2.6 Komponenty elektroinstalace FVE

Komponenty pro elektroinstalaci FVE jsou běžně užívané při rozvodu a distribuci elektrické energie. Jsou to zařízení VN, které slouží k transformaci na požadované napětí distribuční sítě.

V kategorii NN jsou to rozváděčové skříně s jistíci prvky a kabeláž. Tato kategorie má svá specifika, důvodem je stejnosměrné napětí do 1000V nasazené ve venkovním prostředí, ve kterém FVE odolává všem klimatickým podmínkám. Použité komponenty

musejí být vybírány s ohledem odolnosti vůči UV záření, teplotním výkyvům a požadavku na životnost minimálně 20 let s ohledem na zajištění maximální bezpečnosti.

Dalším specifikem je ochrana proti blesku a přepětí, dle normy ČSN EN 62305-2 FVE spadá do 3. kategorie rizikovosti. Ochranou mimo soubor technických zařízení může být i pojištění kdy se kromě instalace pojistí i ušlý zisk. U velkých FVE je potřeba navíc zajistit zákaz vstupu osob při bouřce a to formou poučení pracovníků.

## 2.7 Hodnocení výtěžnosti FV systému

K hodnocení výtěžnosti systému se nejčastěji využívá poměru vyrobené energie v kWh a instalovaného výkonu v kWp, tento ukazatel slouží k vyhodnocení systému bez ohledu na dávku ozáření H, která na FV moduly ve sledovaném období dopadla. Navzdory tomu, že v této metodě je zanesena systematická chyba je tato metoda využívána k empirickému porovnání výtěžnosti energetických bloků v rámci systému i v rámci několika FVE využívající příbuzné technologie. Jedná se o bezrozměrnou veličinu, viz. vztah níže: [6]

$$Y = \frac{P_{OUT}}{P_{MAX(STC)}} \quad (15)$$

Kde:

$P_{OUT}$  Výstupní výkon ve Wh za určitý časový interval

$P_{MAX(STC)}$  Normalizovaný výkon, daný součtem maximálního výkonu měřeného za podmínek STC všech FV modulů ve sledovaném systému

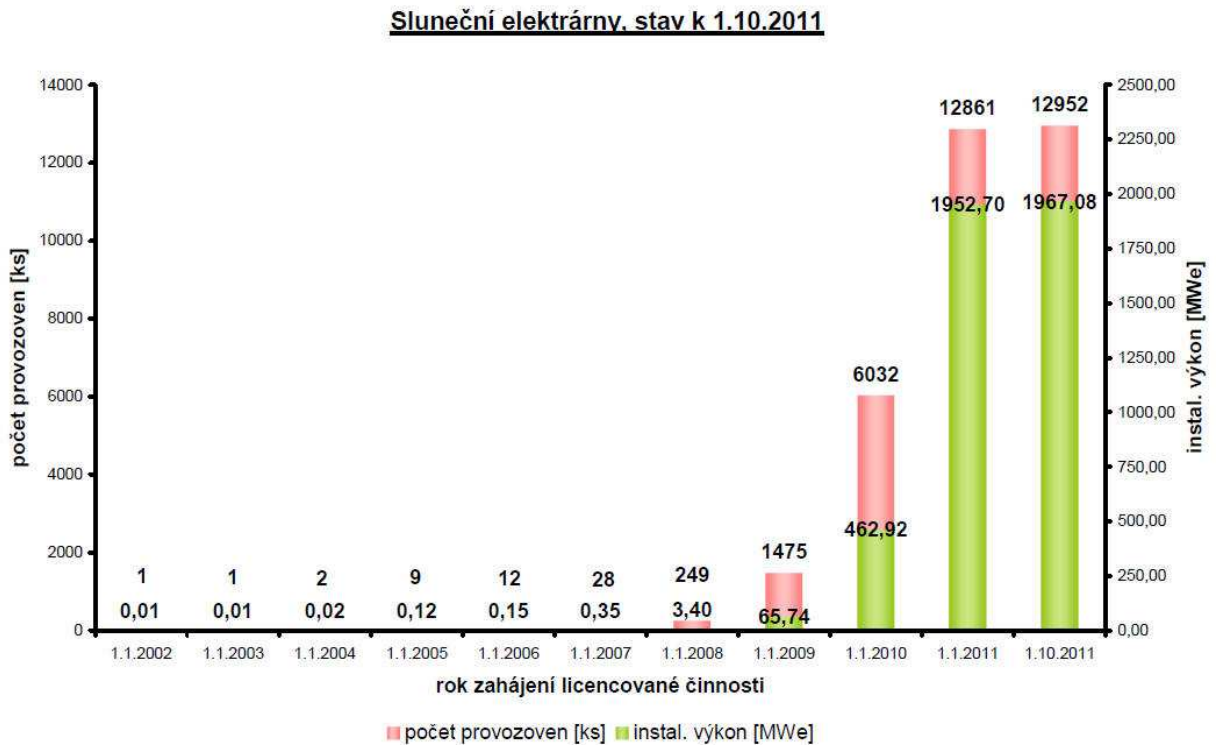
### 3 FVE V ČR

Česká republika se jako členský stát Evropské unie zavázala ke zvýšení výroby elektrické energie z obnovitelných zdrojů energie (OZE). Stanovení potenciálu obnovitelných zdrojů, diskuse o reálně dosažitelném podílu, o formách a výši podpory byly v letech 2003 až 2004 významným tématem při projednávání Státní energetické koncepce, novely energetického zákona. Po více než ročním projednávání v Poslanecké sněmovně Parlamentu vyústily v přijetí zákona č. 180/2005 Sb. o podpoře výroby elektřiny z obnovitelných zdrojů.

Zákonem byly vytvořeny stabilní podmínky pro podnikatelské rozhodování tím, že zákon definuje systém podpory formou pevných výkupních cen, případně příplatků k tržním cenám elektřiny. Zároveň garantuje vyšší výnosů z jednotky vyrobené elektřiny po dobu 15 let. Systém podpory OZE, doplněný od roku 2004 o možnost podpory ze strukturálních fondů EU, pomáhá ke splnění cíle 8% podílu obnovitelných zdrojů na hrubé domácí spotřebě elektřiny. Na splnění stanoveného podílu obnovitelných zdrojů má velký vliv samostatná hrubá domácí spotřeba. [14]

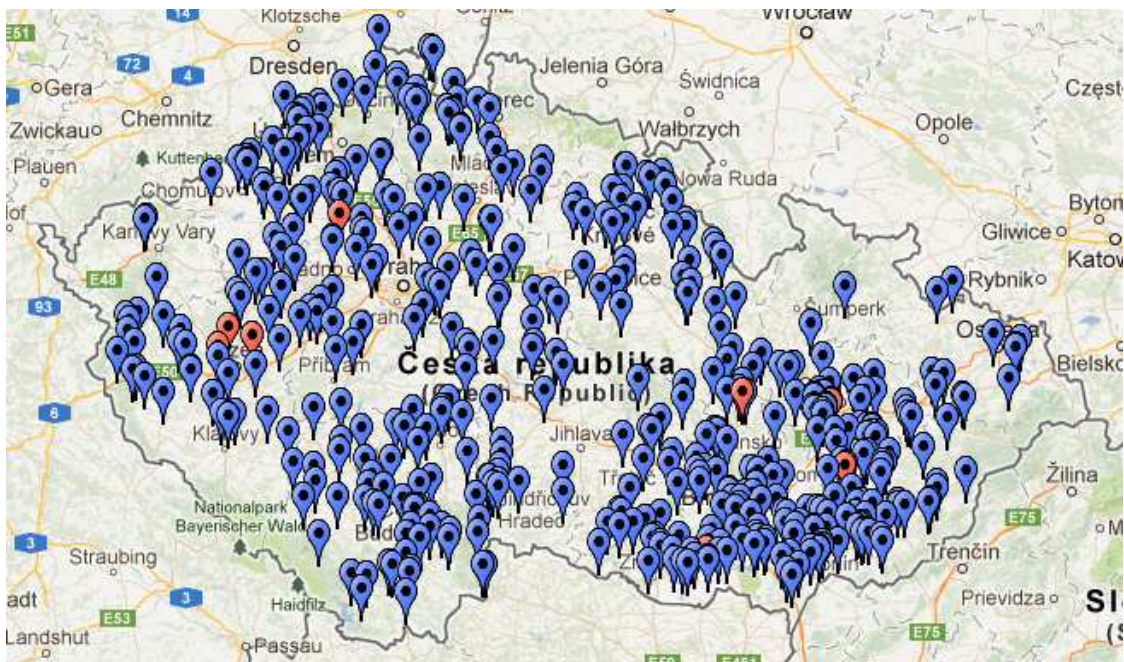
Podmínky tzv. solárního zákona č. 180/2005 Sb. vytvořily prostředí pro masivní investice do výstavby velkých FV instalací. Na obr. 31 je zobrazen nárůst počtu provozoven FVE a počtu instalovaného výkonu v MWp. Solární boom vyvrcholil v roce 2010, do konce tohoto roku byly připojeny všechny velké FVE. Z níže uvedeného průběhu výstavby FVE v ČR je zřejmé, že během jednoho roku bylo postaveno masivní množství instalací, tyto instalace v mnoha případech nebyly realizovány odborníky, z důvodů jejich nedostatku.

Stav FVE v ČR postavené v letech solárního boomu není v mnoha případech ideální, praktická zkušenost hovoří, že cca 20% FVE nepotřebuje provádět optimalizaci. V dalších kapitolách budou popsány vybraná slabá místa s experimentálním měřením jako podpůrným materiálem pro zajištění optimálního chodu FVE.



Obr. 30 Počet FVE dle přijatých licencí [15]

Stav FVE v ČR rovněž dokumentuje obr. 31, jsou na něm zobrazeny FVE s instalovaným výkonem nad 1MW. Je zřejmá vyšší koncentrace FVE v regionu Jižní Moravy, z důvodů vyšší roční dávky ozáření H (až 1200 kW/m<sup>2</sup> za rok). Menší dávka ozáření H investory však neodradila a FVE najdeme i v severních regionech ČR.



Obr. 31 Rozmístění velkých FVE na území ČR [15]

Jak jsem již zmínil v kapitole o střídačích, tato práce se zaměřuje na optimalizaci FVE v podmínkách ČR jde tedy o FVE připojené paralelně do distribuční sítě. Jedná se z 99% o FVE na fixních konstrukcích, v době výstavby masivního počtu FVE šlo o nejrychlejší variantu jak FVE včas, respektive do konce roku 2010 zrealizovat.

Existují varianty s 1-osým či 2-osým natáčením, jedná se o tzv. „Trackery“. Jejich použitím lze zvýšit meziroční výtěžnost z FVE minimálně o 10%. Negativním aspektem této technologie jsou náklady na samotnou technologii a náklady na provoz jelikož se jedná o velké množství pohyblivých částí, servo-motorů atd. Z těchto důvodů se s touto technologií setkáváme v ČR jen velmi zřídka.

Samostatnou kapitolou je problematika střešních FVE, kdy existuje řada jak fixních technologií pro uchycení na stávající střešní krytiny či stěny objektů.

### 3.1 Standardizace ve fotovoltaickém průmyslu

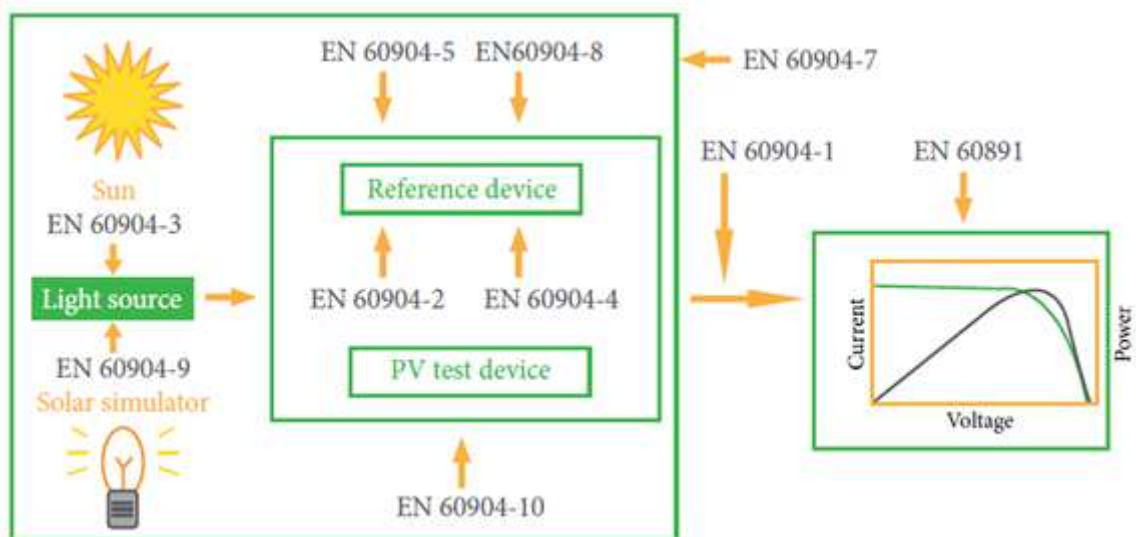
V této kapitole nastíním situaci se standardizací ve FV průmyslu, jedná se samozřejmě o velmi široké téma, proto jsem se rozhodl uvést standardy, které se týkají hodnocení energetické výnosnosti FV systému, a tak i jejich správné funkčnosti, což je kritériem optimalizace.

Základním stavebním kamenem FV systémů jsou FV moduly, jejich energetický výstup je charakterizován špičkovou hodnotou  $W_p$ . Tato hodnota je deklarovaná za podmínek STC. Pro výrobce, provozovatele a investory je nezbytně nutné znát přesnost a tolerance deklarovaných hodnot parametrů FV modulů.

Měření FV panelů probíhá v rámci procesu výstupní kontroly přímo u výrobce, u křemíkových modulů je to na základě normy ČSN EN 61215 a u tenkovrstvých struktur jde o normu ČSN EN 61646. FV moduly jsou dle jakosti rozděleny do tříd na základě jakosti výroby. Typicky jsou hodnoty tolerance  $\pm 3\%$  či  $\pm 5\%$  od špičkového výkonu. Tyto tolerance se mohou lišit v závislosti na výrobce a jeho garancích a platných záručních podmínkách.

### 3.1.1 Existující standardy

FV průmysl je relativně mladým odvětvím, již 30 let se této problematice věnuje Mezinárodní Elektrotechnická Komise (International Electrotechnical Commission dále jen IEC), konkrétně potom její technické komitě 82 a příslušné pracovní skupiny. Na obr. 32 je zobrazena struktura standardů týkajících se měření výkonu FV modulů.



Obr. 32 Struktura standardů týkajících se měření FV modulů [16]

V tabulce 4 jsou popsány vybrané standardy, které se týkají měření a zkoušení FV modulů s krystalického křemíku jak v naturálních podmínkách, tak v podmínkách zkoušení v solárních simulátorech.

Popis	ČSN EN (IEC)Standard	Poznámka
Zdroj světla	60904-3 Zásady měření pro fotovoltaické (PV) solární součástky pro pozemní použití, včetně referenčních údajů o spektrálním rozložení ozařování	Definuje standardní spektrum pro STC
	60904-9 Požadavky na výkon solárního simulátoru	Rozděluje solární simulátory do tříd A, B nebo C, v závislosti na přesnosti vyzařovaného spektra a na jeho stabilitě
Referenční zařízení	60904-2 Požadavky na referenční solární součástky	Doporučuje výběr, konstrukční detaily a doporučenou aplikaci.
	60904-4 Postupy pro stanovení	Obsahuje různé kalibrační

	kalibrační návaznosti	procedury vztahující se k měření FV součástek.
Zkušební a referenční zařízení	60904-5 Určení ekvivalentní teploty článku (ECT) fotovoltaických (FV) součástek metodou napětí naprázdno	Podpora pro determinaci teploty FV modulů
	60904-8 Měření spektrální citlivosti fotovoltaické (FV) součástky	Stanovuje standardní metodu pro determinaci spektrální charakteristiky
	60904-10 Metody měření linearit	Metody pro stanovení linearit elektrických vlastností PV modulů v závislosti na ozáření a teplotě.
Zdroje světla a FV zařízení	60904-7 Výpočet chyby spektrálního nepřizpůsobení při zkouškách fotovoltaické součástky	Zahrnuje kalkulace s experimentálním spektrem světelného zdroje a se standardním spektrem dle 60904-3
Měření V-A křivek	60904-1 Měření fotovoltaických voltampérových charakteristik	Standardní metody pro měření V-A charakteristik v závislosti na zdroji ozáření (přírodní nebo v simulátoru)
Vyhodnocení V-A křivek	60891 Postupy pro korekce teploty a ozařování na změřených voltampérových charakteristikách	Zahrnuje podpůrné postupy korekcí experimentálních měření V-A charakteristik

Tabulka 4 Vybrané standardy vztahující se k měření výkonu Si FV modulů [16]

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 4 VYBRANÁ SLABÁ MÍSTA FOTOVOLTAICKÝCH ELEKTRÁREN

V této kapitole se zaměřím na vybrané problémy FVE, zejména na jejich detekci a vyhodnocení vlivu na výnosnost FV systému a jeho bezpečnost. Výstupem experimentálních měření bude návrh na zlepšení, čili optimalizaci FV systému s daným problémem.

K detekci byla použita termovizní kamera TESTO 882, měřící přístroj V-A charakteristik HT ITALIA SOLAR I-V, který slouží k diagnostice FV stringů a jednotlivých modulů v naturálních podmínkách, kalibrovaný multimetr FLUKE 175 pro měření skutečné efektivní hodnoty (true-rms).

Dále bude k vyhodnocení vlivu využito stávajícího SCADA systému, ke sběru a interpretaci dat o výrobě problémových částí FVE.

### 4.1.1 Termovizní kamera Testo 882

- Rozlišení čipu 320 x 240
- Rozsah měření -20°C až +350°C
- Spektrální rozsah 8 - 14  $\mu\text{m}$ ;
- Technologie SuperResolution - velké vylepšení zobrazení (jako 640 x 480 px);
- Teplotní citlivost < 60 mK
- Obnovovací frekvence 33 Hz
- Interní paměť + 2 GB SD karta;
- Ruční/motor. Zaostřování
- Zobrazení izoterm
- Objektiv 32° x 23°;
- Integrovaný fotoaparát
- Zvukový záznam (poznámky); integrované osvětlovací LED diody; analytický software součástí balení; výdrž baterií 4h; krytí IP 54; rozhraní USB. [17]



Obr. 33 Termovizní kamera TESTO 882 [17]

#### 4.1.2 Měřicích přístroj V-A charakteristik HT ITALIA SOLAR I-V

- Napěťový výstup z modulu/zařízení do 1.000V s přesností  $\pm 1\%$
- Proudový výstup z modulu/zařízení do 10A /DC s přesností  $\pm 1\%$
- Měření ozáření G ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) s přesností  $\pm 1\%$
- Měření teploty modulu automaticky anebo pomocí externí sondy
- Měření výstupu DC a nominálního výkonu modulu/zařízení
- Synchronizace s dálkovou jednotkou SOLAR 02
- Numerické a grafické zobrazení VA charakteristik na displeji
- Měření resistance FV modulů ( $R_s$ )
- Mechanický měřič sklonu pro detekci úhlu ozáření modulu
- Extrapolace naměřených hodnot na standardní provozní podmínky
- Vyhodnocení křivek na základě standardu ČSN EN60891
- Vyhodnocení výsledku měření: OK/NOK
- Vyhodnocení a vytvoření reportu v software Topwiev [18]



Obr. 34 Přístroj pro měření VA charakteristik SOLAR I-V [18]

#### 4.1.3 MultimetrFLUKE 177

- LCD displej 3 3/4 místa
- zobrazení: 6000 dílků
- obnovení displeje 4 krát za sekundu
- analogový bargraf/segmenty, obnovení 40 krát za sekundu
- manuální a automatický rozsah
- převod: TRMS AC
- vstupní impedance: 10 M $\Omega$
- šířka pásma: napětí - 45 Hz...500Hz, proud - 45 Hz...1 kHz
- funkce HOLD a Auto HOLD
- zachycení Min/Max/Avg, záznam Min/Max s alarmem
- režim vyhlazování filtruje rychle se měnící signály
- zvukový test kontinuity a test diod
- spojitost: bzučák < 25  $\Omega$  rychlá reakce
- alarm nesprávně zapojených měřících hrotů
- indikace vysokého napětí pro napětí nad 30V
- indikace vybité baterie
- ergonomický kryt s integrovaným pouzdrém
- přístup k bateriím bez demontování přístroje
- úsporný režim
- vyhovuje ČSN EN 61010-1, CAT IV 600 V, CAT III 1000 V
- napájení na 1 ks 9 V baterie
- 185 x 90 x 43 mm
- váha: 420 g
- krytí: IP52 [19]



Obr. 35 Multimetr FLUKE 177 [19]

#### 4.1.4 Pyranometr SG 420

- Měřicí rozsah 0 - 1200W/m<sup>2</sup>
- Spektrální rozsah 300 - 3000 nm
- Výstupní proud 4 až 20 mA
- Napájecí napětí na čidle 9 – 30 V DC
- Časová konstanta 50 s pro 95%
- Rozsah pracovních teplot -30 až +60°C
- Chyba vlivem nelinearity v rozsahu 100 – 1000 W/m<sup>2</sup> 0,25% max
- Max. zatěžovací impedance 500
- Připojení dvoudrátové
- Výrobce Tm J. Tlust'ák



Obr. 36 Pyranometr SG 420

## 4.2 Termovizní měření na FVE

Termovizní měření slouží k identifikaci defektních FV modulů, či defektu prvků elektroinstalace jako je kabeláž či jistící prvky. Možné defekty či nedostatky mají vliv na energetickou výnosnost a bezpečnost FVE z toho důvodu je považují za formu optimalizace FVE, jelikož korektně spravovaná FVE nejenom že svému majiteli může vygenerovat vyšší zisky, ale rovněž přispěje k zajištění bezpečnosti FV zdroje jako takového.

Detekované defektní FV moduly potom v závislosti na typu defektu lze reklamovat u výrobce, důvodem může být snížení výkonu celého stringu. Právě tento vliv bude níže vyhodnocen a to právě z pohledu vlastní detekce a následného vyhodnocení.

K termoviznímu měření byla použita termovizní kamera TESTO 882, během měření byly dodržovány následující zásady:

- Ozáření G v době provádění termovizního měření nekleslo pod hranici  $700\text{W}/\text{m}^2$
- Byl vybrán den s minimální oblačností pro minimalizaci zkreslení
- Byl prověřen stav homogenního znečištění FV modulů
- Bylo dodrženo pozicování termovizní kamery, optimální úhel termovizní kamery proti měřenému FV modulu je mezi  $5^\circ$  až  $60^\circ$  kde  $0^\circ$  je kolmé naklonění k modulu.

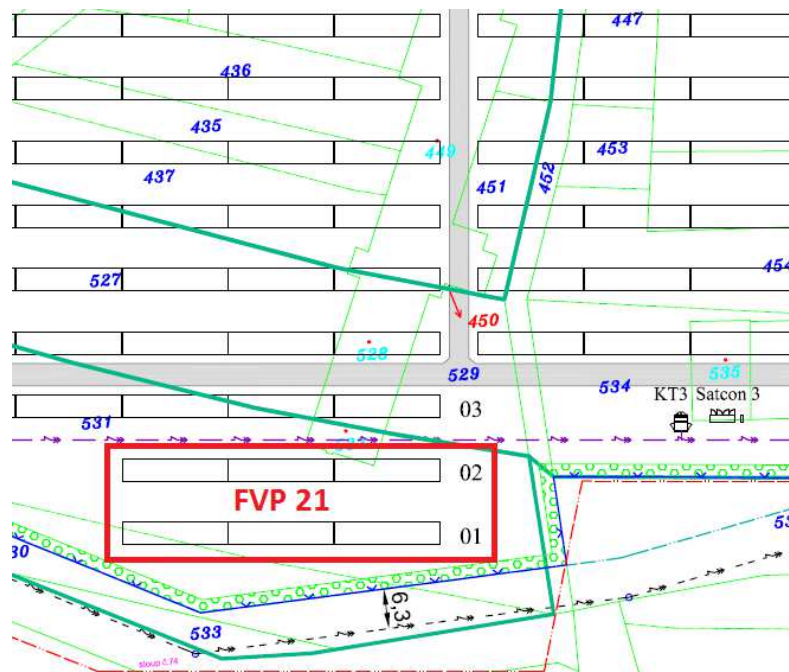
### 4.2.1 Termovizní měření FVE Dřínov

V lokalitě FVE Dřínov byla provedena ve dnech 23.5. až 23.7 2012 provedena první etapa termovizní měření FVP. Tato FVE je osazena jak mono-Si tak multi-Si moduly, jmenovitě jde o moduly LDK 245D, LDK 250D, LDK 210P, LDK 220P, LDK 230P, LDK 235P. Celkové množství FV modulů na FVE je 10960 ks. Instalovaný výkon FVE činí 2518 kWp. Druhá etapa termovizní měření proběhla 14.5.2013.

### 4.2.2 Termovizní měření FVP 21

Pro demonstraci přínosu termovizního měření FV modulů jsem vybral jedno konkrétní FV pole (FVP 21). Právě toto pole bylo termovizním měřením kontrolováno i v rámci 2. etapy.

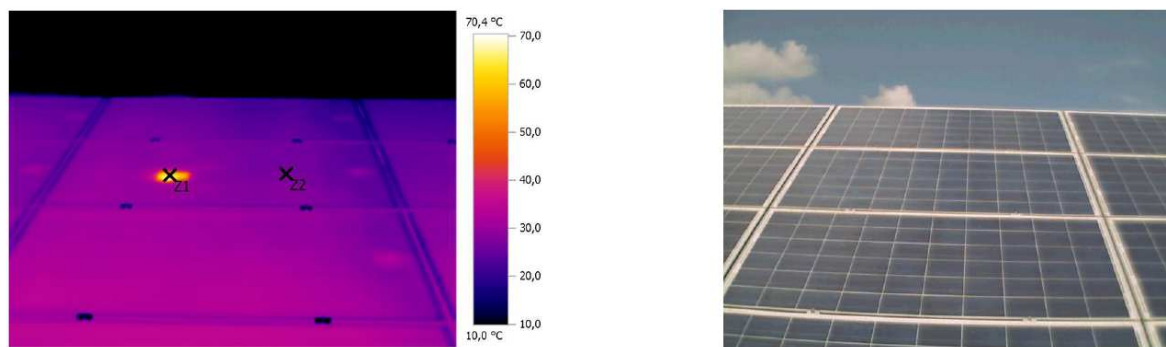
Na obr. 37 je zobrazena situace rozdělení stringů v rámci FVP 21. FVP rozděleno do dvou řad, do řady 1 a do řady 2. SC-21-02 značí podružný rozvaděč, kde jsou všechny stringy sdruženy a odkud je FVP zapojeno do centrálního střídače Satcon 500kW.



Obr. 37 Situace FVP 21

Níže jsou zobrazeny výsledky termovizního měření v rámci první etapy. Z obrázků je patrný vliv případných mraků a sklonu termovizní kamery a vlastního FV modulu. Jelikož je FV modul kryt tvrzeným sklem je nastavena u všech snímků emisivita na hodnotu 0,94, jenž odpovídá emisivitě skla. Odražené mračna mohou skreslit výslednou odraženou teplotu. Hliníkový rám disponuje jinou emisivitou proto se na termogramu jeví jako extrémně chladný.

Termogramy byly pořízeny za standardního provozu FVE, je nutno podotknout fakt, že měření bylo provedeno v zapnutém stavu, čili pod zátěží. Vyhodnocování a identifikace závad, které mají teplotní projev je ve vypnutém stavu nemožné identifikovat termovizním měřením. Obr. Níže ilustruje termografické měření, tzv. termogram. Termogramy jsou prezentovány v příloze P1.



Data obrázku:	Datum:	24.5.2012	Stupeň emisivity:	0,94
	Čas:	13:05:23	Teplota okolí [°C]:	22,0
			Intenzita [W/m <sup>2</sup> ]:	950

Obr. 38 ID 1 #S10PM10811502856; LDK-235P-20 čelní pohled na hotspot defekt

V tabulce 5 je jsou shrnuty poznatky měření identifikovaných modulů s vadou „hotspot“, což je vada kdy jeden ze článků v modulu nevykazuje napětí a jeho vlastnosti jsou ryze rezistivní, procházející proud má však díky ostatním článkům vyšší napětí, tudíž je mu umožněn průchod přes defektní článek, který emituje zvýšenou teplotu oproti jeho okolí v rámci FV modulu. V rámci měření a následného vyhodnocení a vytvoření termogramů v software IR SOFT byl dokumentován bod Z1 reprezentující defektní místo vykazující zvýšenou emisivitu tepla a bod Z2 jenž reprezentuje okolí v rámci FV modulu vykazující korektní činnost. Pro přehlednost jsem modulům přiřadil jednoznačné číslo ID.

ID	Měření	Z1 [°C]	Z2 [°C]	Z1-Z2 [°C]	G [W/m <sup>2</sup> ]	T <sub>a</sub> [°C]
1	Přední strana	64,7	27,1	37,6	950	22
1	Zadní strana	100	53,4	46,6	950	22
2	Přední strana	63,5	24,1	39,4	900	22
2	Zadní strana	86,7	41,1	45,6	900	22
3	Přední strana	42	14,2	27,8	950	22
3	Zadní strana	89,9	48,8	41,1	950	22
4	Přední strana	45,8	14,6	31,2	950	22
4	Zadní strana	81,1	39,7	41,4	950	22
5	Přední strana	84,1	37	47,1	1100	25
5	Zadní strana	100	51,2	48,8	1100	25
6	Přední strana	100	35,2	64,8	1100	25
6	Zadní strana	100	52,7	47,3	1100	25

Tabulka 5 Výsledky měření ze přední a zadní strany

Z tabulky 5 jsou patrné rozdílné teploty jak z přední tak ze zadní strany modulu, respektive přístupu odkud je měřen. Nižší teploty z měření z přední strany jsou dány především faktem, že jde o otevřenou stranu, dále možným odrazem tepla od tvrzeného

čelního skla FV modulu. Měření ze přední části FV modulů je empiricky považováno za vhodnější, jelikož měření nepřekáží nosná konstrukce FV pole. Měření ze zadní strany má význam až při bližší identifikaci závady. V tabulce je prezentován rozdíl teplot Z1 - Z2.

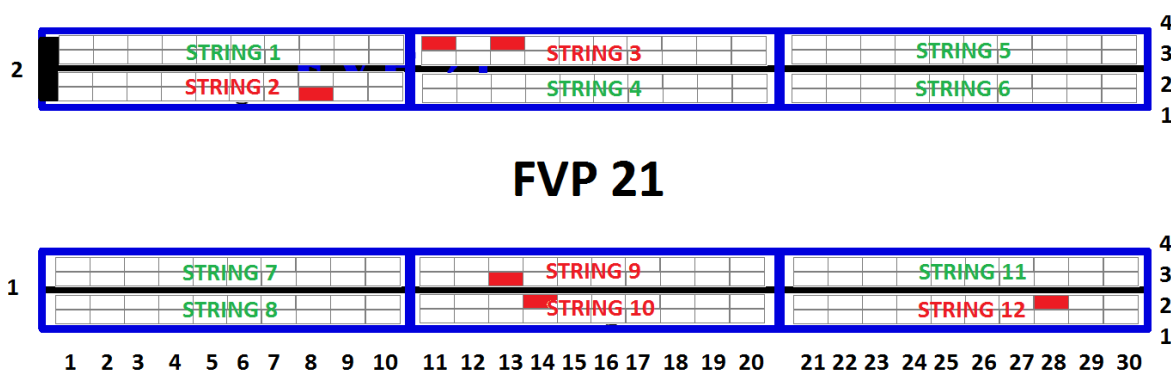
Dále je z tabulky patrný vliv ozáření G na teplotu modulu a teplotu jeho defektního místa. Tabulka dokumentuje skutečnost, že během jednoho roku přibýly další defektní moduly.

V tabulce 6 jsou zobrazeny informace týkající se umístění defektních modulů, tyto informace jsou ověřeny jak místní inspekcí na FVE ve dne 14.5.2013.

ID	Sériové číslo	Typ	Řada	STRING	FVP	Etapa
1	S10PM10811502856	LDK-235P-20	01	9	21	2012
2	S10PM10811502777	LDK-235P-20	01	10	21	2012
3	S10PM10743501848	LDK-235P-20	02	3	21	2012
4	S10PM10743501855	LDK-235P-20	02	3	21	2012
5	S10PM10832203554	LDK-235P-20	01	12	21	2013
6	S10PM10811502438	LDK-235P-20	02	2	21	2013

Tabulka 6 Sériová čísla defektních modulů a jejich pozice

Na základě provedené inspekce a termovizního měření jsem vadné FV moduly zanesl do rozmístění konkrétního FVP 21. Z obr. 39 je patrné rozdělení FVP a to do řady 1 a 2, přičemž moduly jsou kladeny nad sebou ve čtyřech úrovních. Modře je ohraničen jeden mechanický blok, který je tvořen dvěma stringy.



Obr. 39 Situace rozmístění defektních modulů FVP 21

V následující tabulce 7 jsou vyhodnoceny rozdíly teplot v bodech Z1 a Z2, na základě předchozích úvah jsou uvažovány měření ze zadní strany modulů, tato měření nejsou zkreslena vlivem odrazu oblohy či sklonu mezi termovizní kamerou a FV modulem.

ID	Z1 [°C]	Z2 [°C]	Z1-Z2 [°C]	G [W/m2]	Ta [°C]	Sekce 1 [V]	Sekce 2 [V]	Sekce 3 [V]
1	100	53,4	46,6	950	22	7,6	0,2	9,2
2	86,7	41,1	45,6	900	22	8,9	8,6	0,2
3	89,9	48,8	41,1	950	22	1,3	8,8	9,1
4	81,1	39,7	41,4	950	22	8,7	0,2	8,8
5	100	51,2	48,8	1100	25	8	0	8,3
6	100	52,7	47,3	1100	25	8,2	0,2	8,2

Tabulka 7 Naměřené hodnoty na sekcích FV modulů

Dále bylo změřeno napětí za zapnutého stavu na otevřené propojovací krabici, tzv. „Junction box“ ze zadní strany modulu, viz obr. 40. Z fotografie je patrná přítomnost polovodičových diod, tyto diody plní funkci překlenovacích diod, tzv. „bypass diody“ slouží k umožnění průchodu proudu v případě závady v dané sekci za účelem eliminovat omezení průchodu proud  $I_{mpp}$ . Sekce byly měřeny na aluminiových vývodech patrných ve spodní části obrázku ilustrujícího „junction box“.



Obr. 40 Detail propojovací krabice „Junction box“ modulu LDK-235-P

Naměřené hodnoty prezentované v tabulce výše potvrzují empirickou zkušenost pro identifikaci defektního modulu získanou při provádění termovizního měření:

$$\Delta T(Z1 - Z2) > 20 \text{ } ^\circ\text{C}$$

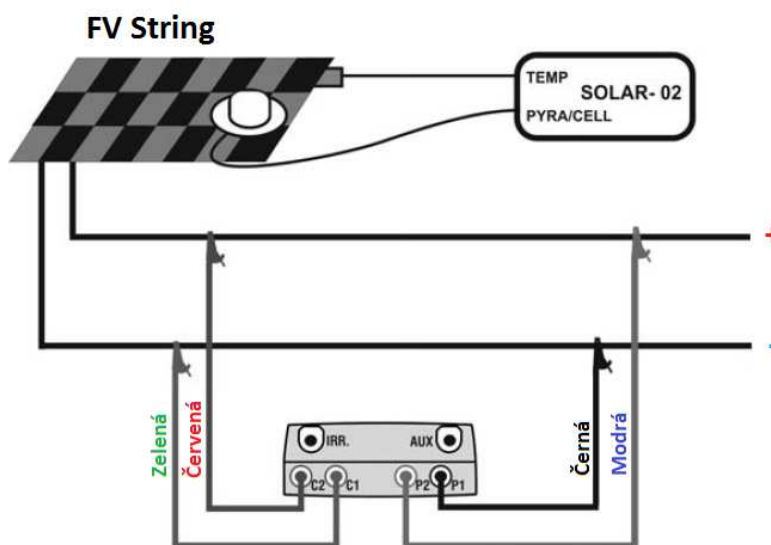
Pokud je tedy rozdíl teplot defektního článku a jeho funkčního okolí v rámci FV modulu vyšší než 20°C, je relevantní provádět měření na propojovací krabici. Námi měřené moduly měli vždy vadnou jednu ze tří sekcí.

## 5 VYHODNOCENÍ VLIVU DEFEKTNÍCH MODULŮ NA VÝSTUPNÍ VÝKON STRINGU

Vyhodnocení vlivu na výstupní výkon u tohoto typu defektu je problematické z titulu identifikace závady, většina velkých FVE je vybavena měřením proudů pomocí hallových sond. Je tomu tak i v rámci FVE Dřínov, měření však dlouhodobě nevykazuje přesné výsledky, proto jsem se ho rozhodl považovat ho za irelevantní a podrobil jsem FVP 21 experimentálnímu měření prostřednictvím přístroje pro měření V-A charakteristik HT ITALIA SOLAR I-V.

Dne 14.4.2013 bylo mimo 2. etapu termovizního měření provedeno měření přístrojem SOLAR I-V. Jde o měření V-A charakteristiky, měření je založeno v měření průběhu proudu a napětí v rozsahu od proudu nakrátko po napětí naprázdno. Měření je tedy prováděno při odpojené zátěži, přístroj sám vytváří elektronickou zátěž pro vytvoření I-V charakteristiky. Z titulu měření na prázdno byl zkoumán projev horkých míst, které se projevují pouze při připojené zátěži, tzn. zapnutém stavu.

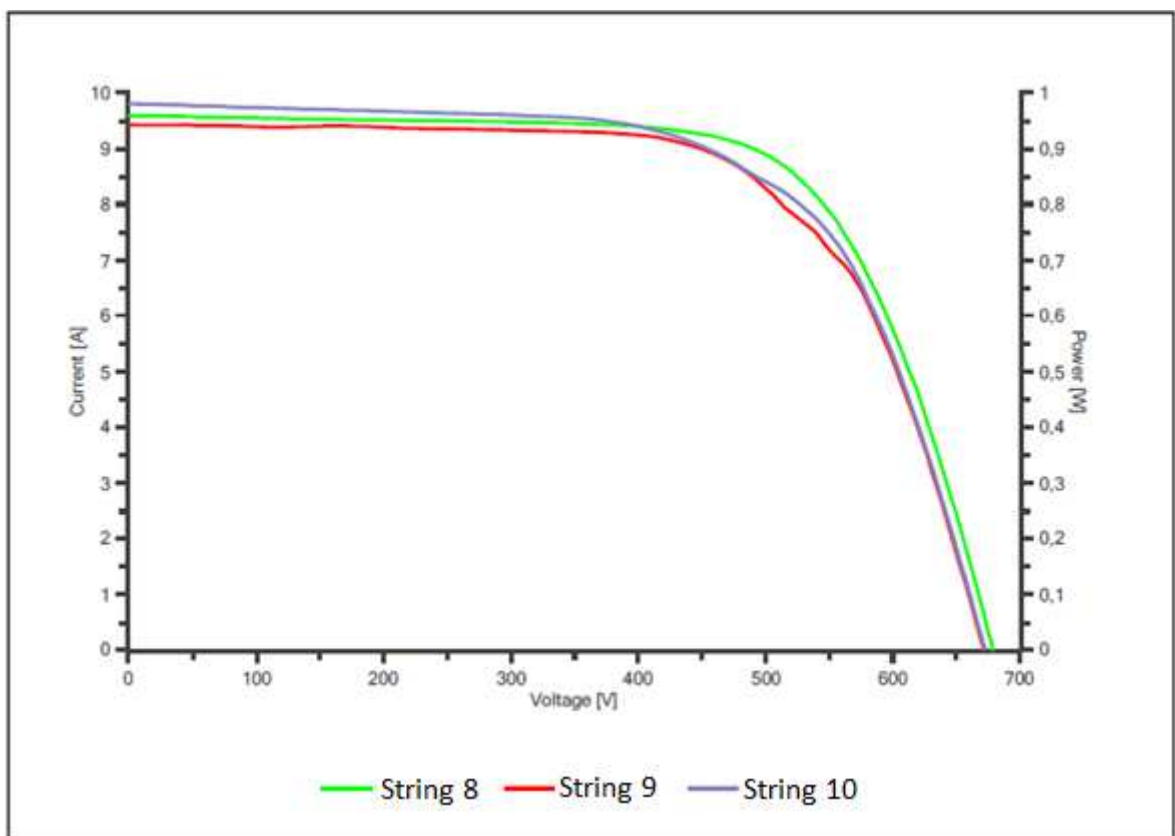
Na obr. 41 je zobrazeno blokové schéma měření VA a P charakteristiky FV stringu. Aby bylo měření relevantní, je nutné v reálném čase zajistit sběr dat o ozáření G a teplotě modulu  $T_{cell}$ . K tomuto slouží jednotka Solar-02 který bezdrátově prostřednictvím optického portu komunikuje s modulem Solar I-V. Co se týče vlastního měření je modul Solar IV připojen 4-vodičovým zapojením na kladný a záporný pól FV stringu. Fotodokumentace z měření je prezentována v příloze P2.



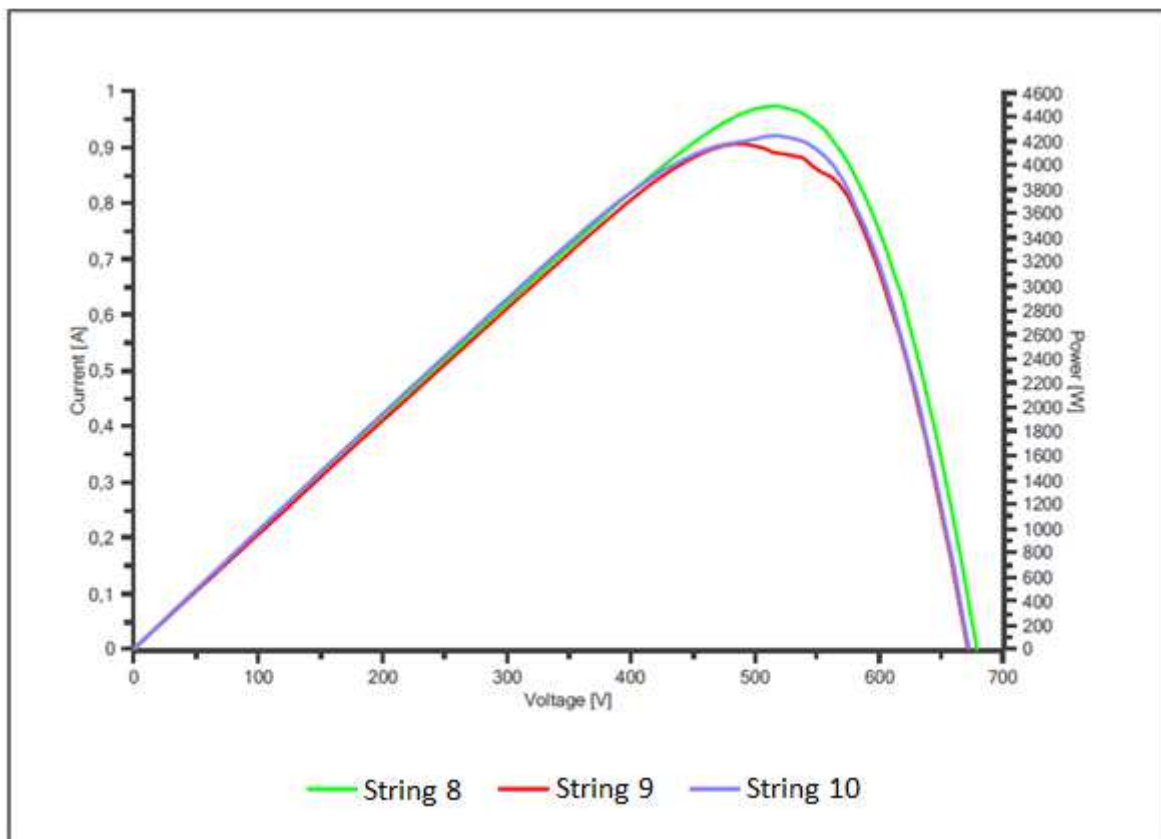
Obr. 41 Schéma zapojení měření VA charakteristiky

V rámci experimentálního měření bylo provedeno několik měření, pokud ale mělo být měření relevantní bylo nutno splnit následující podmínky, minimální ozáření  $800\text{W}/\text{m}^2$ , které v době měření nekolísá v rozmezí  $\pm 1\%$ . Z důvodu nepřízně klimatických podmínek byly vybrány měření na třech stringích. Jde o porovnání stringu 8, 9 a 10, přičemž string 8 vykazuje 100% funkčnost. String 9 a 10 mají v sérii zapojený modul s defektem „hotspot“.

Níže je prezentována VA a výkonová charakteristika uvedených stringů. Z průběhů je evidentní pokles již za hranicí 400V, pokud vezmeme v úvahu fakt, že stringy jsou v rámci FVP připojeny na centrální střídač Satcon 500kW, který operuje v rozsahu  $U_{\text{mpp}}$  420V až 800V zjistíme, že vlivem defektních modulů dochází ke ztrátám vlivem nepřizpůsobení stringů, potažmo FVP.



Obr. 42 VA charakteristika stringů 8, 9 a 10



Obr. 43 Výkonová charakteristika stringů 8, 9 a 10

Výsledky měření jsou uvedeny ve vyexportované tabulce 6 ze SW HT Italia TOPVIEW, viz. níže:

	Nmod	Pmax	Voc	Vmpp	Impp	Isc	Irradiance	Module Temp.	FF	Temp	alpha	beta	tol+	tol-
Meas. 156 - LDK 235P-20	14.5.2013 13:19	Not Ok (15,43%)												
156 Measures@OPC	20	4476,02	679,70	519,20	8,62	9,59	885	42,3	69	AUX	0,0599	-0,34	3	3
156 Meas Avg@OPC	1	223,80	33,99	25,96	8,62	9,59	885	42,3	69	AUX	0,0599	-0,34	3	3
156 STC	1	271,26	36,25	27,71	9,79	10,72	1000	25,0	70	AUX	0,0599	-0,34	3	3
156 Nominal	1	235,00	36,79	30,00	7,84	8,35	1000	25,0	77	AUX	0,0599	-0,34	3	3
Meas. 158 - LDK 235P-20	14.5.2013 13:21	Not Ok (8,95%)												
158 Measures@OPC	20	4161,27	672,20	492,40	8,45	9,42	887	45,4	66	AUX	0,0599	-0,34	3	3
158 Meas Avg@OPC	1	208,06	33,61	24,62	8,45	9,42	887	45,4	66	AUX	0,0599	-0,34	3	3
158 STC	1	256,03	36,21	26,76	9,57	10,49	1000	25,0	67	AUX	0,0599	-0,34	3	3
158 Nominal	1	235,00	36,79	30,00	7,84	8,35	1000	25,0	77	AUX	0,0599	-0,34	3	3
Meas. 161 - LDK 235P-20	14.5.2013 13:23	Not Ok (9,13%)												
161 Measures@OPC	20	4232,88	673,20	518,10	8,17	9,80	905	48,0	64	AUX	0,0599	-0,34	3	3
161 Meas Avg@OPC	1	211,64	33,66	25,91	8,17	9,80	905	48,0	64	AUX	0,0599	-0,34	3	3
161 STC	1	256,46	36,52	28,39	9,03	10,68	1000	25,0	66	AUX	0,0599	-0,34	3	3
161 Nominal	1	235,00	36,79	30,00	7,84	8,35	1000	25,0	77	AUX	0,0599	-0,34	3	3

Tabulka 8 Vyexportovaný report měření na stringu 8, 9 a 10

Kde:

Nmod Počet modulů ve stringu

Irradiance Ozáření G

Module temp. Teplota FV modulu

Tol +, Tol- Tolerance deklarovaná výrobcem

Z tabulky 8 je zřejmé hodnocení NOK u všech měřených stringů, je to dáno skutečností, že se naměřené hodnoty nepatří, nesplňují podmínku níže:

$$- Tol_{(-)} + \varepsilon_{Meter} \leq \varepsilon_{Meas} \leq Tol_{(+)} - \varepsilon_{Meter}$$

Kde:

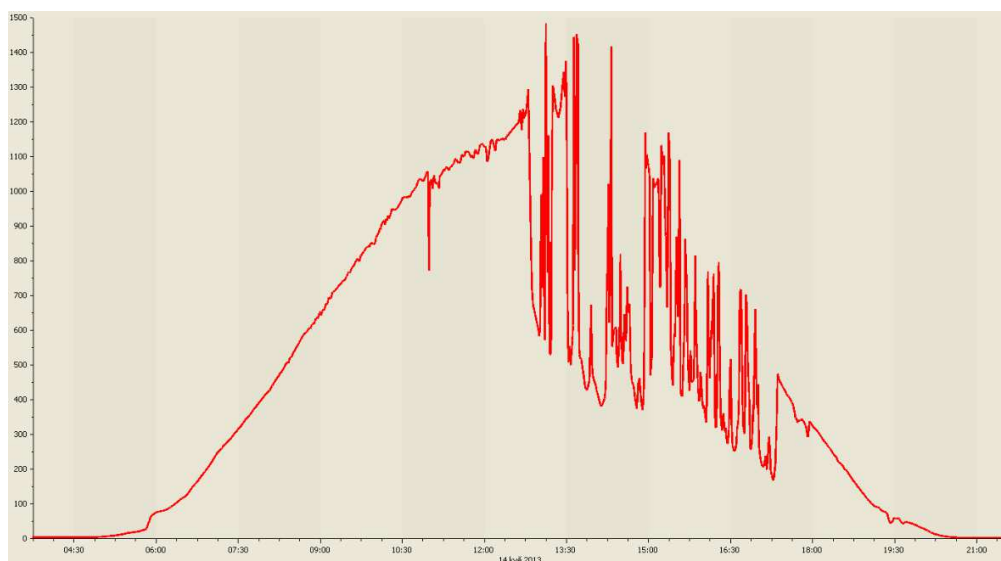
$Tol_{(-)} = Tol_{(-)}(\%) * P_{nom}$       Absolutní záporná tolerance deklarovaná výrobcem

$Tol_{(+)} = Tol_{(+)}(\%) * P_{nom}$       Absolutní záporná tolerance deklarovaná výrobcem

$\varepsilon_{Meas} = P_{max} - P_{nom}$       Rozdíl mezi naměřenou a deklarovanou hodnotou  $P_{max}$

$\varepsilon_{Meter}$       Absolutní chyba měření

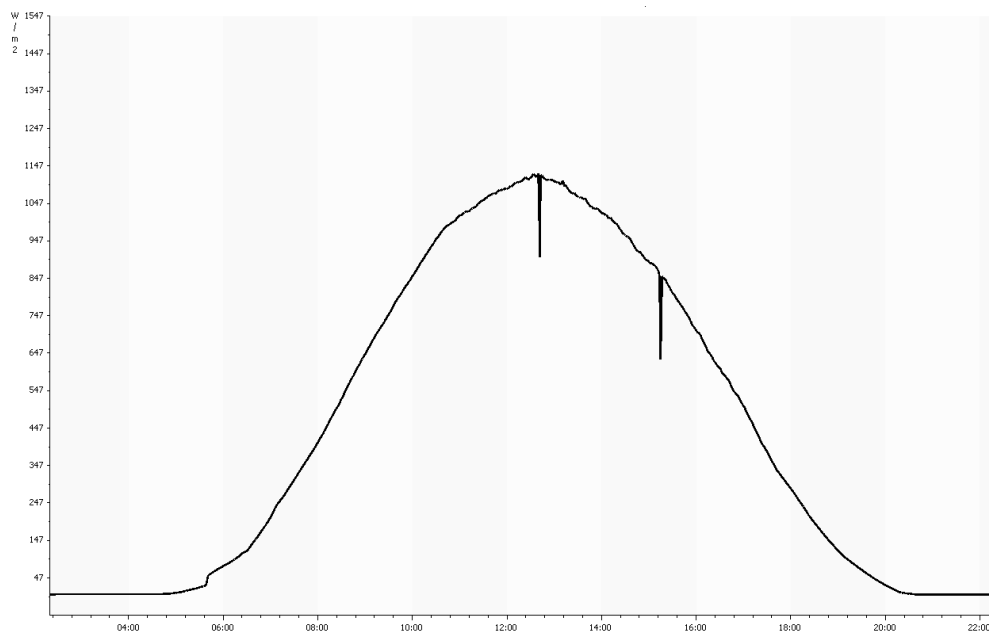
Důvodem proč jsou stringy po přepočtu na STC podmínky ohodnoceny NOK jsou dány vyššími proudy  $I_{mpp}$  a  $I_{sc}$  jenž jsou přímo úměrné dopadajícímu ozáření a jeho energetickému spektru. Na obr. 44 je zobrazen záznam měření pyranometru SG 420 v lokalitě FVE Dřínov, v době měření se hodnota ozáření pohybovala nad prahem  $1200\text{W}/\text{m}^2$ , tato hodnota nebyla zachycena měřicím přístrojem SOLAR I-V respektive jeho referenčním článkem, je to dáno spektrální citlivostí referenčního článku. Zvýšenou hodnotu ozáření přisuzují vyšší hladině sluneční aktivity a zejména oslabením ozonové vrstvy, díky čemuž ve dnech 14.5 až 18.5 2013 dopadalo na oblast ČR až o pětinu více ozáření G.[21]



Obr. 44 Průběh ozáření v lokalitě FVE Dřínov ze dne 14.5.2013

Dle výše prezentovaných grafů IV a P charakteristik je zřejmé, že stanovení ztráty vlivem této závady je komplikované. Komplikace jsou dány skutečností a vlastním principem činnosti centrálního střídače s pouze jedním vstupem pro hledání bodu maxima výkonu. Střídač je schopný nalézt hladinu napětí kdy všechny stringy vykazují maximální proud, při podmínkách vyšší ozářenosti však tento proud může dosahovat vyšších hodnot, v případě že string neobsahuje defektní moduly.

K vyhodnocení vlivu defektních modulů jsem zvolil den 19.5.2013, tento den byla bezoblačná azurová obloha, právě tyto dny jsou vhodné pro vyhodnocování výtěžnosti FVE. Je tomu dáno tím, že se projeví závady, které mají vliv na výstupní výkon FVE.



Obr. 45 Průběh ozáření během dne 19.5.2013

Výkonová charakteristika vadných stringů vykazuje 7,5% ztrátu  $P_{MAX}$  u stringu 9 a 5,7% ztrátu  $P_{MAX}$  u stringu 10 oproti stringu 8, jenž není zatížen vadnými moduly. Dále z grafu P vyčteme, že se tato vada projevuje právě ve vyšších výkonech. Na základě těchto faktů jsem se rozhodl vyhodnotit ztrátu vlivem defektních modulů takto:

- 1) Stanovením doby kdy měřený vstupní výkon vykazoval více než 80% svého jmenovitého výkonu.
- 2) Vyhodnocení průměrné hladiny napětí  $U_{MPP}$  v tomto časovém intervalu.
- 3) Odhad ztrát odečtením z výkonové charakteristiky.

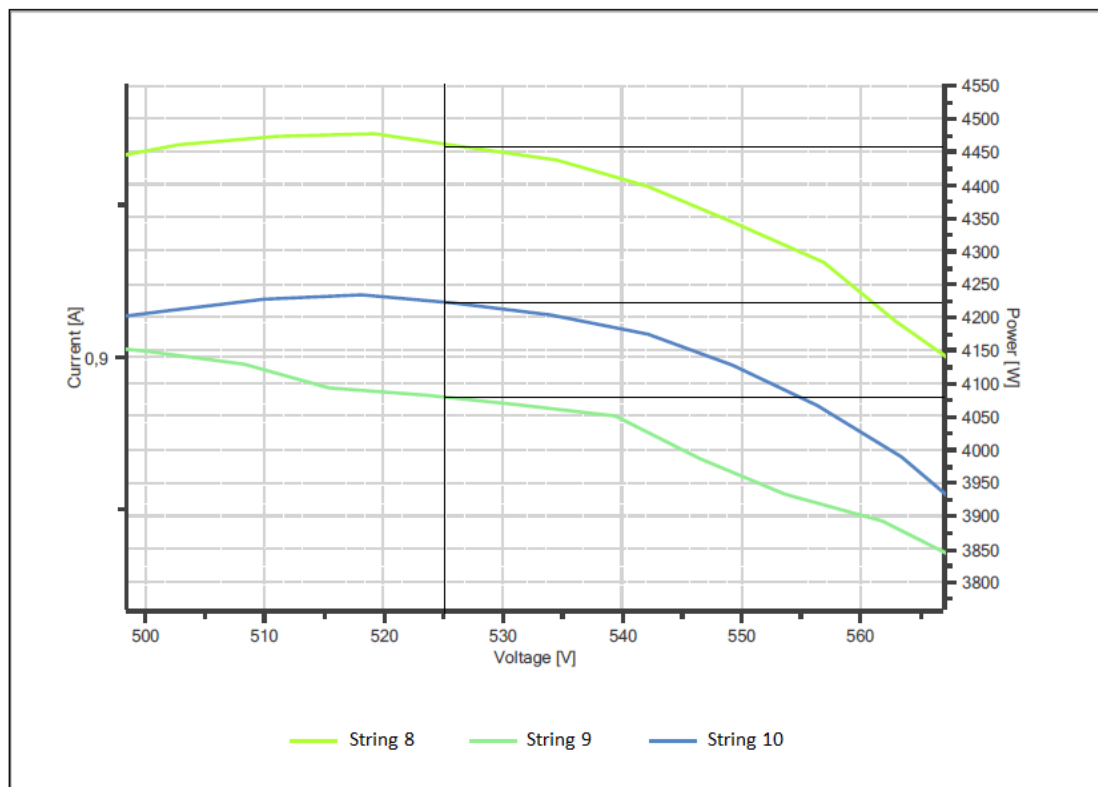
Výše uvedeným postupem jsem z stanovil čas kdy výkon na vstupu střídače přesahoval 400kW: 19.5.2013 10:47 až 19.5.2013 14:28 (Tabulka s hodnotami  $P_{IN}$  a  $U_{MPP}$

je vzhledem k rozsáhlému obsahu prezentována v příloženém CD) čímž je definován časový interval:

$$\Delta t \approx 3,75 \text{ h}$$

V tomto časovém intervalu byl vypočten aritmetický průměr pro napěťovou hladinu:

$$U_{MPP\Delta t} = 425 \text{ V}$$



Obr. 46 Detail výkonové charakteristiky v úrovni  $U_{mpp} = 525\text{V}$

Na obr. 46 je zobrazen detail výkonové charakteristiky v místě napěťové hladiny  $U_{MPP} 525\text{V}$ . Odečtením z grafu jsem vytvořil tabulku:

String	$P_{max}$	Ztráta	$Y_{\Delta t}$ [kWh/kWp]	kWp	$P_{\Delta t}$ [kWh]	$L_{\Delta t}$ [kWh]
8	4455	0,00%	0,75	4,74	3,56	0
9	4055	-9,80%	0,75	4,72	3,54	0,34
10	4220	-5,56%	0,75	4,72	3,54	0,19

Tabulka 9 Odhad ztrát na stringu 9 a 10

Vypočtená ztráta  $L_{\Delta t}$  prezentuje odhad ztráty stringů za uvedenou dobu  $\Delta t$ . Jde o výpočet ztráty ve slunečný den 19.5.2019.

Na FVE Dřínov je instalováno 548 stringů, rozdělených do 49 FVP, s ohledem na tento rozsah jsem se věnoval pouze jednomu konkrétnímu FVP, pro demonstraci problému. V současném stavu je detekováno 180 stringů s jedním nebo více defektními moduly.

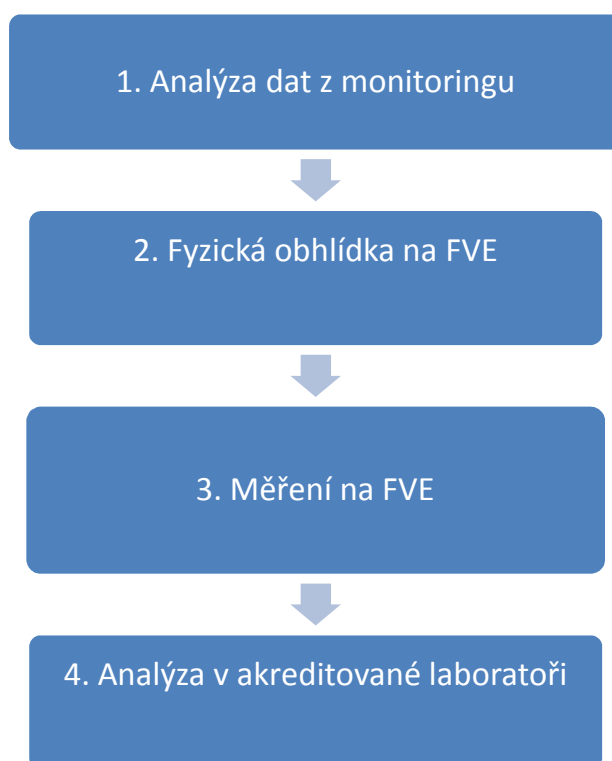
Nabízí se úvaha pro empirický vztah pro odhad ztráty v intervalu  $\Delta t$  pro celou FVE Dřínov:

$$L_{\Delta t, FVE} \approx 180 * L_{\Delta t \min} = 180 * 0,2 = 36 \text{ kWh}$$

Kde  $L_{\Delta t \min}$  uvažují minimální spočtenou ztrátu u stringu 10, FVP 21.

## 6 NÁVRH OPTIMALIZACE FVE

Na základě poznatků z teoretické práce a naměřených údajů během termovizního měření a měření V-A charakteristik navrhuji optimalizaci FVE na úrovni správy provozu. Optimalizací se rozumí nalezení maximálního možného stavu výstupního výkonu. Základním stavebním kamenem FVE jsou FV moduly, z tohoto důvodu považuji za důležitou formu optimalizace jejich diagnostiku. K diagnostice modulů je vhodné přistupovat v následující posloupnosti:



Obr. 47 Návrh postupu optimalizace FVE

### 6.1 Analýza dat z monitoringu

Analýza dat z monitoringu je podmíněna vybaveností tímto systémem, všechny současné FV střídače umožňují vzdálenou správu, ke které patří monitoring vyrobené energie, v závislosti na požadavcích zákazníka mohou tyto systémy být vybaveny měřením na úrovni FVP či stringů. Takové měření je podpůrným nástrojem pro vyhodnocování denních a celoročních výnosů celého systému a jeho segmentů. K vyhodnocení je vhodné využít bezrozměrné jednotky výtěžnosti  $Y$ , která slouží jako ukazatel při empirickém porovnávání výtěžnosti v rámci FVE nebo taky v rámci několika FVE jež disponují stejnou technologií FV modulů a střídačů. K vyhodnocení slabých míst slouží porovnávání

denních výnosů, měsíčních, ročních atd., vzhledem k závislosti FV technologie na aspektech klimatických podmínek je vhodné analyzovat chod FVE ve dnech s jasnou oblohou, vhodným příkladem je i situace kdy takové podmínky panují po celém území ČR a je tedy možné empirické porovnávání jednotlivých FV systémů mezi sebou.

Tato analýza může být rovněž slabým místem přístupu, jelikož prvky zajišťující přenos, sběr dat a vlastní měření mohou do vyhodnocení zanášet chybu, která výsledek znehodnotí do nepřijatelných mezí.

Jistota přesného měření nebo alespoň znalost odchylky měření je tedy pro analýzu systému pro účely optimalizace naprosto klíčovou, z tohoto titulu je v rámci pravidelné údržby nutné sledování přesnosti měření a jejich případné kalibrace.

Co se týče metodiky vyhodnocení slabých míst, neboli tzv. propadů výroby, je nejefektivnější vyhodnocovat anomálie výroby od největších, pomoci si můžeme popřípadě vygenerováním historie výpadků jednotlivých bloků.

K tomuto účelu slouží SCADA systémy, které jsou však nákladné, jistým kompromisem může být instalace pager zařízení, které informují o výpadcích energetických bloků na základě ztráty napájecího napětí. Informace pager vysílá prostřednictvím GSM/GPRS sítě na přednastavenou GSM bránu. Tyto zařízení, které slouží k informování o výpadcích energetických bloků je potřeba zálohovat vhodným záložním zdrojem.

## 6.2 Fyzická obhlídka FVE

Během fyzické obhlídky je nutno zkontrolovat použitý elektroinstalační materiál, respektive jeho kvalitu a shodu se skutečnou projektovou dokumentací, jedná se zejména o kontrolu dimenzí kabeláže, zapojení FV panelů včetně kontroly jejich typu, kontrolu chodu střídačů se zaměřením na kalibraci veličin vstupního a výstupního proudu a napětí.

Žádoucí je rovněž kontrola nežádoucích stínů, které způsobuje okolní vegetace jako jsou travnaté porosty, stromy či objekty ze sousedících pozemků. Zpravidla kácení stromů nebo demolice objektů není přípustná, čemuž přisuzují vliv stínů jako slabé místo pro FVE v ČR. Vliv stínů, který v rámci optimalizace lze eliminovat je stín z travnatých porostů na pozemku FVE, vhodným a pravidelným způsobem sekání lze tento problém eliminovat.

Dalším nežádoucím faktorem, který je možné při fyzické obhlídce FVE odhalit je míra znečištění FV modulů, který je dána lokalitou FVE. Pokud je FVE nablízku agrárním

objektů jako jsou sýpky, zpracování biomasy atd. Je tento problém nutné sledovat a provoz FVE přizpůsobit včasnému mytí FVP demineralizovanou vodou, která díky svému složení nezpůsobuje nežádoucí „mapy“.

Důležité je sledování anomálií v nosné konstrukci, ačkoliv vliv změny úhlu modulů na účinnost systému není tak markantní, jde především o včasné zachycení problému tzv. sedající si konstrukce atd.

Během fyzické obhlídky se rovněž sleduje stav perimetru, jakožto mechanického zábranného systému provádí se funkční zkouška PZTS. Na FVE se setkáváme s aplikací infra bariér či perimetrických systému vyhodnocující narušení na základě vyhodnocení tenzometrického namáhání jednoho z jeho segmentů. Vzhledem k rozlohám FVE je vhodné tuto zkoušku provádět z titulu zjištění spolehlivosti systému, v mnoha případech je vlivem nežádoucích falešných poplachů nastavena citlivost systému do mezí, které však vylučují jeho funkčnost, kterou je detekce narušení. V kombinaci s kamerovým systémem CCTV je potom pro bezpečnostní agenturu zajištění objektu efektivní. Aplikace technologií PZTS či CCTV závisí na zvolené třídě bezpečnosti, potažmo požadavku pojišťovny.

### 6.3 Měření na FVE

V předchozích kapitolách jsem naznačil, že pro provádění optimalizace FVE nezbytné umět relevantně vyhodnocovat energetický výstup z FV modulů, výstup ze střídače je dán právě vstupním napětím a proudem z FVP a účinností střídače. Proto považuji za primární předmět optimalizace a měření právě zkoumání FV modulů popřípadě zkoumání polohy pracovního bodu, respektive maximálního pracovního bodu střídače.

K měření FV systému doporučuji používat kalibrované měřicí přístroje, je to zejména z titulu relevantnosti a dokazování věrnosti naměřených hodnot před dodavatelem popřípadě výrobcem vadných FV modulů či ostatních technologií. Přesnost měřících přístrojů by měla být minimálně  $\pm 1\%$ . Z tohoto titulu jsem vyhodnotil jako další slabé místo současných FVE v podmínkách ČR.

Měření na FVE by mělo vycházet z analýzy slabých míst prostřednictvím vzdáleného monitoringu, tzn. na FVE by mělo dojít k měření konkrétních FVP, stringů a modulů, je tomu tak z důvodu zajištění jisté efektivity této činnosti. Skupina norem ČSN

EN 60904 se zabývá problematikou FV modulů, tato sada norem mimo jiné doporučuje provádění měření při ozáření  $800 \text{ W/m}^2$  a rychlosti větru méně než  $1 \text{ m/s}$  z těchto kritérií vyplývá, že podmínky kdy lze provádět měření jsou skutečně omezené.

Právě z důvodu problémů, které vznikají při operaci FVE v praxi je vhodné využívat termovizní měření, jak je uvedeno v praktické části, slouží k detekci defektních FV modulů, dále pak k detekci špatně navržené dimenzi kabeláže, popřípadě závadách na šroubových spojích a jistících prvcích v elektrických rozvaděčích. Termovizní měření slouží tedy jako preventivní opatření, které je vhodné provádět na pravidelné bázi. Význam termovizního měření spočívá v poměrně rychlé detekci defektních modulů a problémových míst.

Měření VA charakteristik FV stringů a FV modulů lze považovat za nadstandard v údržbě a provozování FVE. Toto měření však při splnění podmínek ozáření a povětrnostních vlivů dokáže analyzovat stav stringu, jelikož jde o certifikovaný měřicí přístroj jsou naměřená data považována za relevantní. Přístroj SOLAR I-V dokáže při splněných operačních podmínkách extrapolovat naměřené hodnoty na hodnoty měřené v laboratorních podmínkách dle STC a to na základě normy ČSN EN60891. Význam a přínos tohoto měření dále tkví v použití v měření amorfních modulů, které díky svému konceptu nelze jednoduše snímat termovizní kamerou. Měření VA charakteristik na pravidelné bázi může dále posloužit k sledování degradace FV modulů během jejich 20-ti leté životnosti. Tímto přístrojem lze dále vyhodnocovat, zda střídače pracují v optimálním bodě maximálního výkonu.

Vzhledem k přesnosti měření na  $\pm 1\%$  je možné tímto přístrojem odhalit i latentní vady jako například defektní moduly ve stringu, v praktické části byly vyhodnoceny ztráty na stringu cca  $5\%$  až  $10\%$ , přičemž tolerance výstupního výkonu FV modulů deklarována výrobcem je  $\pm 3\%$ . Současné technologie monitoringu vyhodnocují pouze proud  $I_{MPP}$  popřípadě  $U_{MPP}$  na vstupu střídače, zda jsou tyto hodnoty optimální je obtížné zjistit, navíc pokud je stejnou závadou postižena i ostatní FVP či FVE je detekce zamlžena systematickou chybou a nezbyvá než prověřit FVP a stringy právě kombinací termovizního měření a měření VA charakteristik.

Svůj význam má i měření klasickým klešťovým ampérmetrem či voltmetrem s třídou přesnosti  $\pm 1$ . Jde o měření v reálném čase, při splnění operačních podmínek může toto

měření posloužit k detekci hrubých vad, pokud chceme odhalit defektní modul tak bez termovizního měření ke taková detekce časově náročnější.

#### 6.4 Laboratorní měření FV modulů

Analýza FV modulu v certifikované laboratoři je posledním možnou činností, která může prokázat defektní modul. Jedná se o měření v speciální komoře splňující podmínky STC prostřednictvím tzv. solárního simulátoru, jedná se o zábleskové zařízení, které je dle ČSN EN 60904-9 klasifikováno do tříd A, A+, A++. Minimální požadavky jsou:

- Nehomogenita záření < 1%
- Dlouhodobá stabilita < 1%
- Kvalita spektrálního rozložení < 12,5%
- $G = 1000 \text{ W/m}^2$
- $T = 25 \text{ °C} \pm 3\text{°C}$
- Délka záblesku xenonové výbojky až 90 ms

Laboratorním měřením lze přesně analyzovat příčinu poklesu výstupního výkonu, mezi tyto příčiny patří mikropraskliny, horká místa, přechodové odpory atd.

Vzhledem k nákladnosti měření je toto měření vhodné pro vytipované FV moduly právě analýzou viz. body výše.



Obr. 48 Solární simulátor třídy A++ Berger Lichttechnik [20]

## ZÁVĚR

Fotovoltaika je obnovitelným zdrojem energie a jedním ze zdrojů energetického mixu, který v rámci světa i EU bude v příštích desetiletích pomáhat pokrýt spotřebu civilizace. Jedná se o dynamicky se vyvíjející obor, který ke svému „boomu“ vyžadoval podporu na státní úrovni, řeč je o tzv. „feed-in tarifu“. V podmínkách ČR jde o kritizovanou a nešťastnou podporu na základě zákona č. 180/2005 Sb. o podpoře výroby elektřiny z obnovitelných zdrojů, která vyústila v masivní zastavění nevyužitých pozemků, ale i orných ploch FV moduly. Z hlediska vývoje této technologie hodnotím tuto skutečnost jako nutné zlo.

V rámci tohoto solárního boomu v letech 2006-2010 bylo postaveno na území ČR přes 1900 MWp instalovaného výkonu což je až 100 milionů FV modulů. Jelikož byly FVE stavěny za velkého tlaku a mnohdy v pionýrských podmínkách. Rozhodl jsem se přijmout výzvu, kterou je problematika optimalizace těchto elektráren. Vzhledem k počtu a vlastních nákladů na FV moduly jsem optimalizaci pojal právě ve zkoumání a vyhodnocování jejich výstupního výkonu.

Teoretická část se zabývá Sluncem jako zdrojem energie pro tuto technologii, měření slunečního ozáření, seznamuje se způsobem vyhodnocování a provozem FVE v praxi. Jsou dále rozebrány nejpoužívanější křemíkové FV moduly a jejich vlastnosti. Dále je čtenář seznámen s problematikou FV střídačů. Je nastíněna problematika standardizace v tomto oboru, jelikož se v praxi setkávám s neznalostí a jistým individuálním přístupem k této technologii považuji moji teoretickou rešerši za přínos.

V teoretické části bylo provedeno termovizní měření kamerou TESTO 882 na FVE Dřínov, toto měření odhalilo defektní moduly LDK-235. Dále pak byly tyto moduly respektive jejich stringy měřeny přístrojem pro měření VA charakteristik SOLAR I-V. Zpracováním a vyhodnocením výsledků byly odhadnuty vzniklé ztráty, dále pak v rámci zpracování výsledků byl vliv defektních modulů posouzen jako latentní jelikož omezuje výkon stringů v závislosti na ozáření v rozsahu 5% až 10% což jsou čísla neslučitelná s optimálním provozem FVE.

Shrnutím práce je potom vyhodnocení slabých míst, kterými jsou FV moduly a hodnocení jejich výtěžnosti, dále potom skutečnost, že měření lze provádět jen v omezených klimatických podmínkách. Návrhem optimalizace je potom postup, který se zabývá vyhodnocením chodu a výtěžnosti FVE z dostupného monitoringu, dále pak

fyzické obhlídky FVE a vlastním měření pomocí standardních měřících přístrojů tak i nadstandardních měřících přístrojů jako jsou termovizní kamera a měřící přístroj IV charakteristik. Přínosem praktické práce je vymezení použití těchto nadstandardních přístrojů.

## ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ

Photovoltaics is a renewable energy source and one source of energy mix in the EU and the world in the coming decades to help cover the consumption of civilization. This is a rapidly evolving field, which to its "boom" required support at the state level, we are talking about the so-called "feed-in tariff". In the CR terms of criticism and unfortunate support pursuant to Act No. 180/2005 Coll. on the promotion of electricity from renewable sources, which resulted in a massive built-up of unused land, but also arable land by PV modules. In terms of development of this technology is this a necessary evil.

In this solar boom in 2006-2010 were built in the Czech Republic over 1,900 MWp of installed capacity which is up to 100 million PV modules. Since the PVP built for high pressure and often in pioneer conditions. I decided to take the challenge, which is the optimization of these plants. Given the number of its own costs and to optimize the PV modules I just took the examination and evaluation of their power output. The theoretical part deals with the Sun as a source of energy for this technology, solar irradiance measurements, introduces a method for evaluating and operation of PV in practice. They also discussed the most widely used silicon PV modules and their properties. In addition, the reader is familiar with the problems of PV inverters. It outlined the problems of standardization in this field, since in practice confronted with ignorance and a certain individual access to this technology. I think my search for a theoretical contribution.

In the theoretical part the measurement of thermal imaging camera TESTO 882 for PVP Dřínov was done, which revealed defective modules LDK-235. Furthermore these modules and their strings was measured with I-V curve tracer SOLAR I-V. Processing and evaluation of the results was estimated incurred losses, then the processing of the results, the effect of defective modules assessed as latent as it limits the output strings depending on irradiation in the range of 5% to 10% which numbers are incompatible with the optimal operation.

Summary of the work is then assess vulnerabilities, which include PV modules and assessment of their recovery, further, the fact that measurements can be made only in limited conditions. Design optimization procedure is then, that deals with the evaluation and operation of photovoltaic yield from the available monitoring, as well as a tour of PVP and physical self measurement using standard measuring devices and superior

measurement equipment such as thermal imaging camera and measuring device IV characteristics. The benefit of practical work is to define the use of extra equipment.

---

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] Sluneční záření. [online]. [cit. 2013-06-02]. Dostupné z: [http://vega.fjfi.cvut.cz/docs/sfbe/opt\\_jevy/node4.html](http://vega.fjfi.cvut.cz/docs/sfbe/opt_jevy/node4.html)
- [2] QUASCHNING, Volker. *Understanding renewable energy systems*. Sterling, VA: Earthscan, 2005, xix, 272 p. ISBN 18-440-7136-7.
- [3] World Radiation Center WRC. [online]. [cit. 2013-06-02]. Dostupné z: [http://www.pmodwrc.ch/pmod.php?topic=world\\_radiation\\_center](http://www.pmodwrc.ch/pmod.php?topic=world_radiation_center)
- [4] Proměnná sluneční konstanta. [online]. [cit. 2013-06-02]. Dostupné z: <http://svanda.astronomie.cz/prace/clanky/ian/ian468.html>
- [5] ZOBA, Ahmed F a R BANSAL. *Handbook of renewable energy technology*. Hackensack, N.J.: World Scientific, c2011, xxii, 851 p. ISBN 98-142-8906-X.
- [6] EKOWATT, Středisko pro obnovitelné zdroje a úspory energie. *Metody hodnocení vhodnosti a vátěžnosti OZE pro účely energetických bilancí a energetické statistiky a pro účely regionálního územního plánování a energetických generelů*. 1. vydání. Bubenská 6 170 00 Praha 7: EkoWATT, 2000.
- [7] Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS). [online]. [cit. 2013-06-02]. Dostupné z: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>
- [8] KIPP&ZONNEN.  
*KippZonen\_Manual\_CMP\_CMA\_series\_Pyranometers\_Albedometers\_V1007* [pdf]. 2010. vyd.
- [9] VANĚK, J., KŘIVÁK, P., NOVÁK: *Alternativní zdroje energie*. Brno. Vysoké učení technické v Brně, 1996. 158 stran.
- [10] BENDA, CSC, Prof. Ing. Vítězslav, Ing. Kamil STANĚK a Ing. Petr WOLF. *ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ. Fotovoltaické systémy: Učební texty k semináři* [pdf]. 2011. vyd.
- [11] A collection of resources for the photovoltaic educator. [online]. [cit. 2013-06-02]. Dostupné z: <http://pveducation.org/>
- [12] SATCON Utility ready solar. [online]. [cit. 2013-06-02]. Dostupné z: <http://www.satcon.com/en>

- 
- [13] SMA solar technology. [online]. [cit. 2013-06-02]. Dostupné z: <http://www.sma-czech.com/cs.html>
- [14] MINISTERSTVO PRŮMYSLU A OBCHODU. *Zpráva o plnění indikativního cíle výroby elektřiny z obnovitelných zdrojů za rok 2010* [pdf]. 2010. vyd.
- [15] Solární elektrárny v ČR. [online]. [cit. 2013-06-02]. Dostupné z: <http://elektrarny.pro/>
- [16] JOINT RESEARCH CENTRE. *Guidelines for PV Power Measurement in Industry: Compiled by the European Commission Joint Research Centre, together with its partners in the PERFORMANCE FP6 Integrated Project, Sub-Project 1: «Traceable Performance Measurements of PV Devices»*. 2010. vyd. ISBN 978-92-79-15780-6.
- [17] We measure it. Testo. [online]. [cit. 2013-06-02]. Dostupné z: [www.testo.cz](http://www.testo.cz)
- [18] HT Italia. [online]. [cit. 2013-06-02]. Dostupné z: <http://www.ht-instruments.com/>
- [19] FLUKE. [online]. [cit. 2013-06-02]. Dostupné z: HT Italia. [online]. [cit. 2013-06-02]. Dostupné z: <http://www.ht-instruments.com/>
- [20] BERGER LICHTTECHNIK. [online]. [cit. 2013-06-02]. Dostupné z: <http://www.bergerlichttechnik.de/HOME.html>
- [21] Meteocentrum. [online]. [cit. 2013-06-03]. Dostupné z: <http://www.meteocentrum.cz/zpravy/page.php?page=13051400>

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

FV	Fotovoltaika, fotovoltaický
FVE	Fotovoltaická elektrárna
$\varphi_{e,S}$	Solární zářivý výkon.
$M_{e,S}$	Charakteristické zážení
$I_0$	Solární konstanta
AM	Air mass
$\gamma$	Výška slunce nad obzorem
G	Sluneční ozáření
H	Dávka ozáření
$\varphi$	Zeměpisná šířka
$\beta$	Úhel sklonu
$\omega$	Sluneční časový úhel
$\delta$	Sluneční deklinace
$\theta_Z$	Úhel slunečního zenitu
$\theta$	Úhel dopadu
WM	Světová meteorologická organizace
O	
SCA	Supervisory
DA	Control And Data Acquisition
multi	Multikrystalický křemík
-Si	
Mon	Monokrystalický křemík
o-Si	
STC	Standard Test Conditions
FVP	Fotovoltaické pole

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

Obr. 1 Zářivý výkon Slunce a zářivý výkon dopadající na povrch Země [2].....	12
Obr. 2 Graf proměnlivé solární konstanty [3].....	13
Obr. 3 Průchod slunečního záření atmosférou [2] .....	14
Obr. 4 Solární spektrum [5] .....	15
Obr. 5 Referenční spektrální distribuční křivka solárního záření podle ČSN EN 60904-3...	16
Obr. 6 Ilustrace globálního ozáření a jeho složek [5] .....	17
Obr. 7 Znázornění sluneční deklinace [6].....	18
Obr. 8 Zobrazení základních úhlů solární geometrie [6] .....	19
Obr. 9 Závislost orientace a sklonu FV modulů na účinnosti v zeměpisných šířkách ČR [6] .....	20
Obr. 10 Fotovoltaický potenciál zemí EU [7].....	22
Obr. 11 Typické složení pyranometru [8].....	23
Obr. 12 Termočlánek [8] .....	23
Obr. 13 Optimální umístění pyranometru podle KIPP&ZONNEN[8] .....	24
Obr. 14 Příklad referenčního článku jako externího čidla ozáření G přístroje SOLAR I-V25	
Obr. 15 Příklad telemetrie FVE s centrálním střídačem Satcon 500 KW .....	28
Obr. 16 Princip FV článku.....	30
Obr. 17 Jedno-diodové náhradní schéma FV článku [9] .....	30
Obr. 18 Typický vzhled mono a polykrystalického c-Si článku [10].....	32
Obr. 19 Typické zastoupení tenkovrstvých FV článků [10].....	33
Obr. 20 Rozdělení používaných technologií za posledních 20 let [10].....	33
Obr. 21 Řez komerčním křemíkovým modulem [10].....	34
Obr. 22 Informace na zadním štítku FV modulu .....	35
Obr. 23 VA a P charakteristika FV modulu [11].....	36
Obr. 24 Ukázka poměru čtverců výkonu činitele plnění fill factor [11].....	37
Obr. 25 Ilustrace teplotní závislosti FV modulu [11] .....	40
Obr. 26 Rozdělení FVP a stringů.....	41
Obr. 27 Centrální fotovoltaický střídač Satcon Powergate Plus 500kW [12] .....	42
Obr. 28 Princip vyhledávání bodu maximálního výkonu [10] .....	42
Obr. 29 Decentrální střídač SMA MINI CENTRAL 4600A [13] .....	43
Obr. 30 Počet FVE dle přijatých licencí [15] .....	46
Obr. 31 Rozmístění velkých FVE na území ČR [15] .....	46

Obr. 32 Struktura standardů týkajících se měření FV modulů [16].....	48
Obr. 33 Termovizní kamera TESTO 882 [17].....	52
Obr. 34 Přístroj pro měření VA charakteristik SOLAR I-V [18] .....	53
Obr. 35 Multimetr FLUKE 177 [19] .....	54
Obr. 36 Pyranometr SG 420 .....	54
Obr. 37 Situace FVP 21 .....	56
Obr. 38 ID 1 #S10PM10811502856; LDK-235P-20 čelní pohled na hotspot defekt.....	57
Obr. 39 Situace rozmístění defektních modulů FVP 21 .....	58
Obr. 40 Detail propojovací krabice „Junction box“ modulu LDK-235-P .....	59
Obr. 41 Schéma zapojení měření VA charakteristiky .....	60
Obr. 42 VA charakteristika stringů 8, 9 a 10 .....	61
Obr. 43 Výkonová charakteristika stringů 8, 9 a 10 .....	62
Obr. 44 Průběh ozáření v lokalitě FVE Dřínov ze dne 14.5.2013 .....	63
Obr. 45 Průběh ozáření během ze dne 19.5.2013 .....	64
Obr. 46 Detail výkonové charakteristiky v úrovni $U_{mpp} = 525V$ .....	65
Obr. 47 Návrh postupu optimalizace FVE.....	67
Obr. 48 Solární simulátor třídy A++ Berger Lichttechnik [20].....	71

---

**SEZNAM TABULEK**

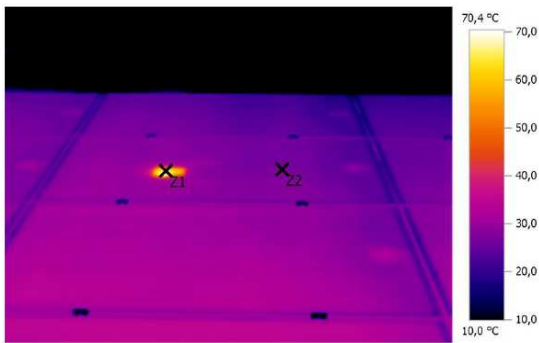
Tabulka 1 Teplotní koeficienty FV modulu LDK 235 .....	39
Tabulka 2 Vybrané standardy vztahující se k měření výkonu Si FV modulů .....	49
Tabulka 3 Výsledky měření ze přední a zadní strany .....	57
Tabulka 4 Sériová čísla defektních modulů a jejich pozice.....	58
Tabulka 5 Naměřené hodnoty na sekcích FV modulů.....	59
Tabulka 6 Vyexportovaný report měření na stringu 8, 9 a 10 .....	62
Tabulka 7 Odhad ztrát na stringu 9 a 10.....	65

## **SEZNAM PŘÍLOH**

**Příloha P I:** Termogramy FVP 21

**Příloha P2:** Měření FVP Dřínov

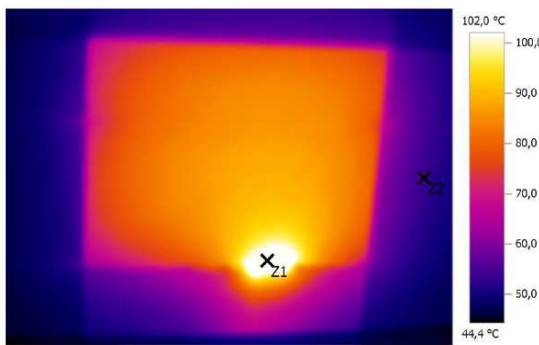
**PŘÍLOHA P I: TERMOGRAMY FVP 21**



Data obrázku: Datum: 24.5.2012  
Čas: 13:05:23

Stupeň emisivity: 0,94  
Teplota okolí [°C]: 22,0  
Intenzita [W/m<sup>2</sup>]: 950

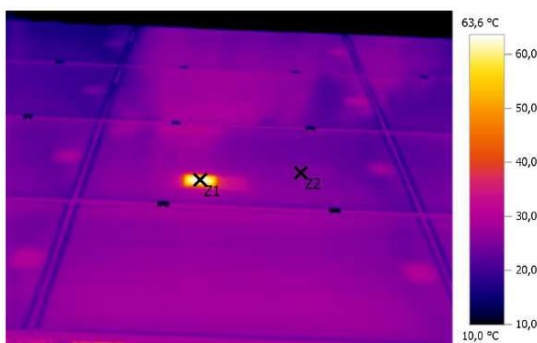
*ID 1 #S10PM10811502856; LDK-235P-20 čelní pohled na hotspot defekt*



Data obrázku: Datum: 24.5.2012  
Čas: 13:06:17

Stupeň emisivity: 0,94  
Teplota okolí [°C]: 22,0  
Intenzita [W/m<sup>2</sup>]: 950

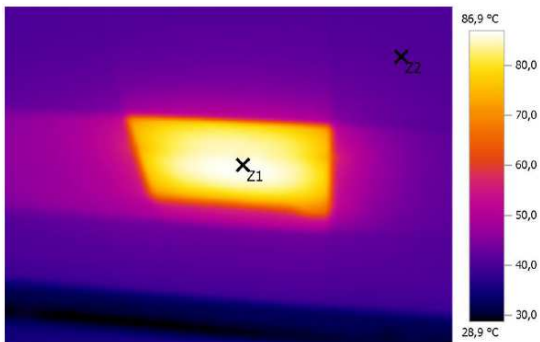
*ID 1 #S10PM10811502856; LDK-235P-20 detail ze zadní strany, hotspot defekt*



Data obrázku: Datum: 24.5.2012  
Čas: 12:52:48

Stupeň emisivity: 0,94  
Teplota okolí [°C]: 22,0  
Intenzita [W/m<sup>2</sup>]: 900

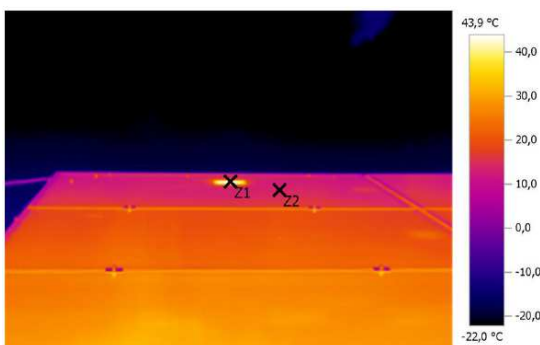
*ID 2 #S10PM10811502777; LDK-235P-20 čelní pohled na hotspot defekt*



Data obrázku: Datum: 24.5.2012  
Čas: 12:53:47

Stupeň emisivity: 0,94  
Teplota okolí [°C]: 22,0  
Intenzita [W/m<sup>2</sup>]: 900

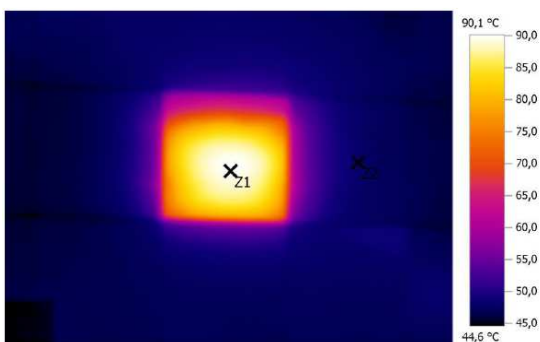
*ID 2 #S10PM10811502777; LDK-235P-20 detail ze zadní strany, hotspot defekt*



Data obrázku: Datum: 24.5.2012  
Čas: 13:13:16

Stupeň emisivity: 0,94  
Teplota okolí [°C]: 22,0  
Intenzita [W/m<sup>2</sup>]: 950

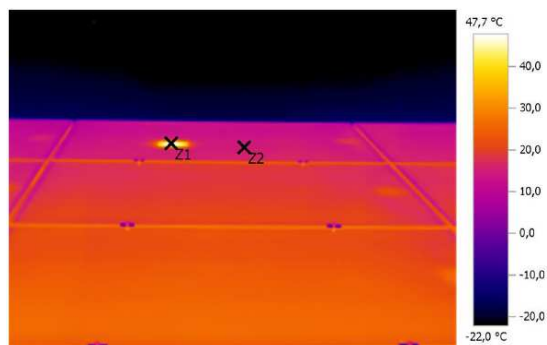
*ID 3 #S10PM10743501848; LDK-235P-20 čelní pohled na hotspot defekt*



Data obrázku: Datum: 24.5.2012  
Čas: 13:13:56

Stupeň emisivity: 0,94  
Teplota okolí [°C]: 22,0  
Intenzita [W/m<sup>2</sup>]: 950

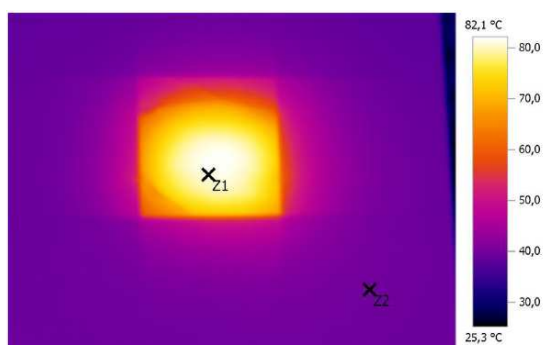
*ID 3 #S10PM10743501848; LDK-235P-20 detail ze zadní strany, hotspot defekt*



Data obrázku: Datum: 24.5.2012  
Čas: 13:16:01

Stupeň emisivity: 0,94  
Teplota okolí [°C]: 22,0  
Intenzita [W/m²]: 950

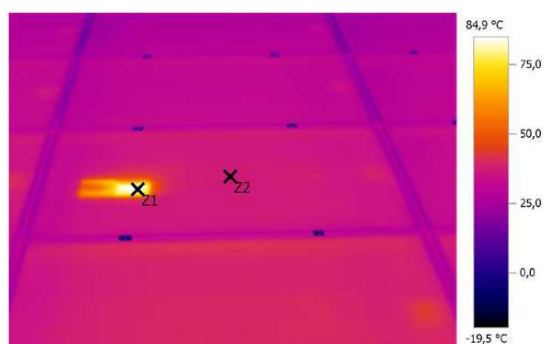
*ID 4 #S10PM10743501855; LDK-235P-20 čelní pohled na hotspot defekt*



Data obrázku: Datum: 24.5.2012  
Čas: 13:16:17

Stupeň emisivity: 0,94  
Teplota okolí [°C]: 22,0  
Intenzita [W/m²]: 950

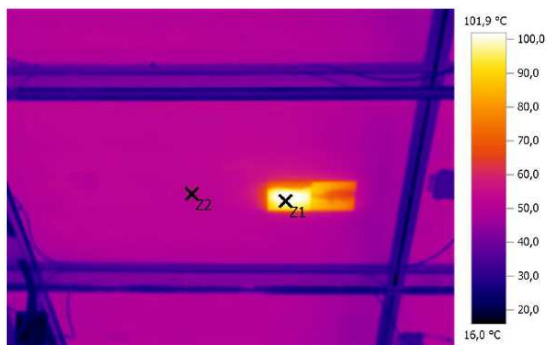
*ID 4 #S10PM10743501855; LDK-235P-20 detail ze zadní strany, hotspot defekt*



Data obrázku: Datum: 14.5.2013  
Čas: 12:19:31

Stupeň emisivity: 0,94  
Teplota okolí [°C]: 25,0  
Intenzita [W/m²]: 1100

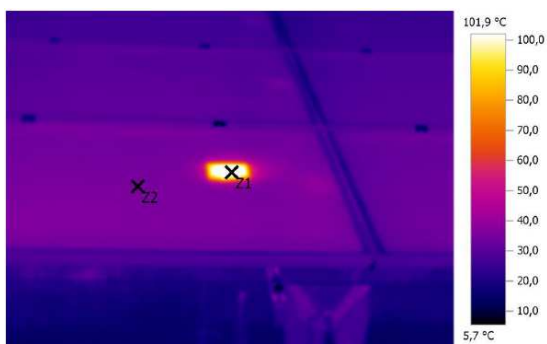
*ID 5 #S10PM10832203554; LDK-235P-20 čelní pohled na hotspot defekt*



Data obrázku: Datum: 14.5.2013  
Čas: 12:20:31

Stupeň emisivity: 0,94  
Teplota okolí [°C]: 25,0  
Intenzita [W/m²]: 1100

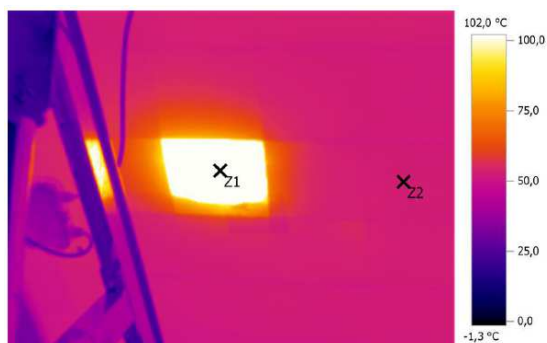
*ID 5 #S10PM10832203554; LDK-235P-20 detail ze zadní strany, hotspot defekt*



Data obrázku: Datum: 14.5.2013  
Čas: 12:38:38

Stupeň emisivity: 0,94  
Teplota okolí [°C]: 25,0  
Intenzita [W/m²]: 1100

*ID 6 #S10PM10811502438; LDK-235P-20 čelní pohled na hotspot defekt*



Data obrázku: Datum: 14.5.2013  
Čas: 12:41:26

Stupeň emisivity: 0,94  
Teplota okolí [°C]: 25,0  
Intenzita [W/m²]: 1100

*ID 6 #S10PM10811502438; LDK-235P-20 detail ze zadní strany, hotspot defekt*

## PŘÍLOHA P2 MĚŘENÍ FVP DŘÍNOV



*FPV 21*



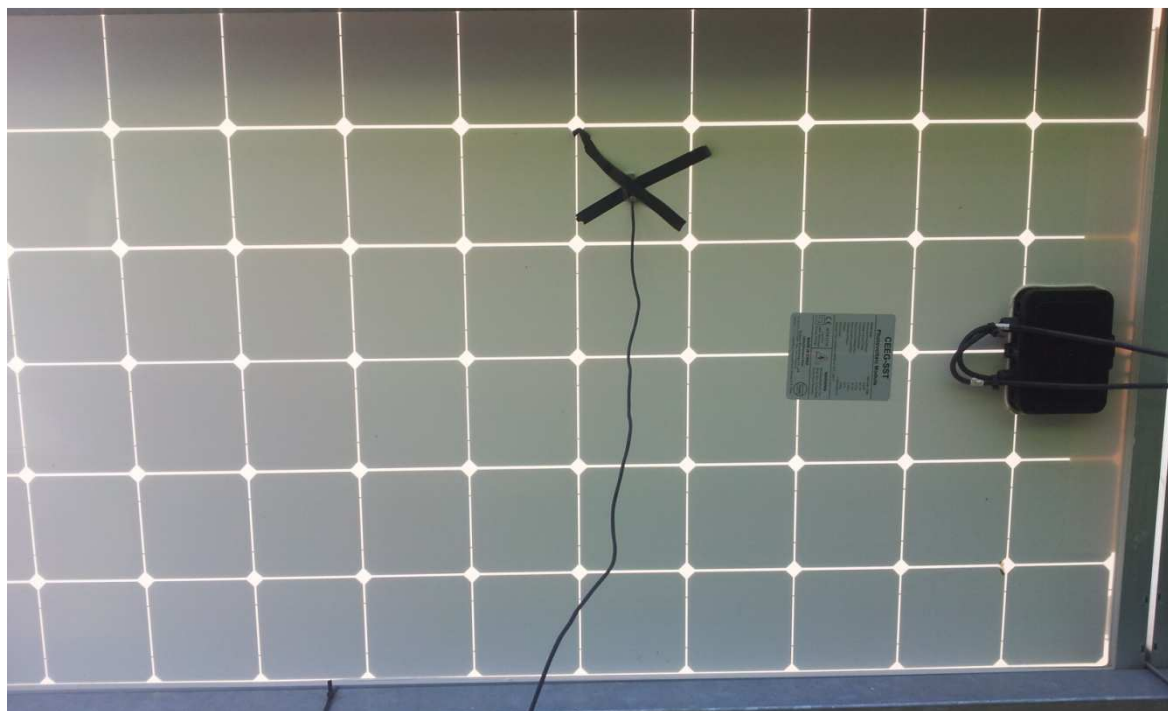
*Měření VA charakteristik*



*Inklinometr a jeho použití*



*Měření ozáření jednotkou SOLAR-02*



*Připevněné čidlo teploty PT1000N*