

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Užití termografie v diagnostice
fotovoltaických systémů**

2013

Bc. Václav KOPP

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Václav KOPP**
Osobní číslo: **E11N0195P**
Studijní program: **N2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Užití termografie v diagnostice FV systémů**
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

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

1. Popište základní vlastnosti fotovoltaických článků a dalších komponent FV systémů.
2. Zhodnoťte jednotlivé používané metody diagnostiky FV systémů.
3. Rozeberte možnosti použití termografie pro diagnostiku FV systémů.
4. Proveďte a vyhodnoťte termografické měření reálného FV systému.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího
Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:


1. přednášky z předmětu KEE/SOES

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

Datum zadání diplomové práce: 15. října 2012
Termín odevzdání diplomové práce: 9. května 2013


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




Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

Abstrakt

Tématem diplomové práce bylo popsat základní vlastnosti fotovoltaických článků a dalších komponent fotovoltaických systémů. Používané metody diagnostiky fotovoltaických systémů jednotlivě zhodnotit. Z těchto metod vybrat termografii a rozebrat možnosti termografie pro diagnostiku fotovoltaických systémů. Najít reálný fotovoltaický systém a na tomto provést a následně také vyhodnotit termografické měření reálného fotovoltaického systému.

Klíčová slova

Fotovoltaika, fotovoltaický systém, fotovoltaický panel, fotovoltaická elektrárna, fotovoltaický generátor, solární článek, solární panel, světlo, difuzní záření, PN přechod, polovodič, účinnost, výtěžnost, střídač, akumulátor, polykrystal, monokrystal, tenké vrstvy, amorfnní křemík, organický polovodič, diagnostika, V-A charakteristika, termovize, termograf.

Abstract

The topic of the thesis was to describe the basic characteristics of photovoltaic cells and other components of photovoltaic systems. The methods used diagnostic photovoltaic systems individually assessed. Of these methods, choose thermography and analyze the possibilities of thermography for diagnosis of photovoltaic systems. The photovoltaic system find and the make and subsequently evaluate thermographic measurement of real photovoltaic system.

Key words

Photovoltaics, solar system, solar panel, solar power plant, solar cell, solar generator light, diffuse radiation, PN junction, semiconductor, efficiency, yield, inverter, accumulator, polycrystalline, monocrystalline, thin film, amorphous silicon, organic semiconductor, diagnostics, IV characteristics, thermal imaging, thermograph.

Prohlášení

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 8.5.2013

Václav Kopp

Poděkování

Rád bych poděkoval všem, kteří mi pomohli a byli ochotni se podílet na tvorbě této diplomové práce. Pedagogickým pracovníkům Západočeské univerzity a také vedoucímu mé diplomové práce za jeho pomoc při vypracování této práce. Dále bych chtěl poděkovat pracovníkům společnosti Jufa s.r.o. a Intersekce s.r.o. za poskytnutí zkušenosti z reálného provozu. Také děkuji p. Marku Zemanovi za umožnění měření jeho fotovoltaické elektrárny. Svým rodičům za podporu při studiu.

Obsah

Obsah	8
1. Seznam v práci použitých symbolů a zkratek	10
2. Úvod.....	12
2.1. Úvod do problematiky	13
3. Fotovoltaický systém.....	15
3.1. Fotovoltaický článek.....	15
3.1.1. Křemíkové články	19
3.1.2. Tenkovrstvé články (TF)	22
3.1.3. Články z jiných polovodičů	24
3.1.4. Články z organických sloučenin (Organic).....	25
3.2. Připojení FVE.....	28
3.2.1. Připojení na distribuční soustavu.....	28
3.2.2. Ostrovní systém.....	29
3.2.3. „Zelený bonus“.....	30
3.3. Střídač.....	31
3.4. Regulátor nabíjení akumulátorů	34
3.5. Akumulátor	34
3.5.1. Startovací akumulátor (autobaterie)	35
3.5.2. Trakční akumulátor se zaplavenými elektrodami.....	36
3.5.3. Akumulátory bezúdržbové (VRLA)	36
3.6. Vodíkové hospodářství.....	37
3.7. Kabely pro FVE	38
3.8. Konektory pro FVE.....	39
4. Diagnostika FV systému	40
4.1. Vizuální kontrola	40
4.2. Flash test	41
4.3. Elektroluminiscenční test (ELCD)	42
4.4. Měření V-A charakteristik.....	42
4.5. Diagnostika pomocí termovize	44
4.6. Metoda LBIC	45
5. Měření.....	46
5.1. Princip měření termovizní kamerou.....	46
5.2. Interpretace termografů.....	49
5.3. Měření reálného fotovoltaického systému.....	52
5.3.1. Fotovoltaická elektrárna Radnice	52

6. Závěr.....	60
Použitá literatura a informační zdroje.....	62
Seznam obrázků	66
Seznam grafů.....	67
Seznam tabulek	68

1. Seznam v práci použitých symbolů a zkratek

<i>AGM</i>	Akumulátor s elektrolytem ze skelné hmoty
<i>AM</i>	Air Mass
<i>a – Si</i>	Amorfní křemík
<i>c</i>	Rychlost světla ve vakuu $c = 299792458 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
<i>CdTe</i>	Telurid kademnatý
<i>CIS</i>	Copper-Indium-diSelenid
<i>D_N</i>	Difuzní koeficient elektronů [–]
<i>D_P</i>	Difuzní koeficient děr [–]
<i>E</i>	Energie fotonu [J]
<i>ELCD</i>	Elektroluminiscenční test
<i>EVA</i>	Ethylen-vinylacetát
<i>f</i>	Frekvence [Hz]
<i>FV</i>	Fotovoltaika
<i>FVE</i>	Fotovoltaická elektrárna
<i>FVS</i>	Fotovoltaický systém
<i>h</i>	Planckova konstanta $h = 6,62606876 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$
<i>J_N</i>	Proudová hustota elektronů [$\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$]
<i>J_P</i>	Proudová hustota děr [$\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$]
<i>k</i>	Boltzmannova konstanta $k = 1,3806503 \cdot 10^{-23} \text{ [–]}$
<i>LBIC</i>	Light Beam Induced Current
<i>L_N</i>	Difuzní délka elektronů [–]
<i>L_P</i>	Difuzní délka děr [–]
<i>mo – Si</i>	Monokrystalický křemík
<i>MPP</i>	Bod maximálního výkonu
<i>n_i</i>	Koncentrace nosičů v rovnovážném stavu [–]
<i>NIR</i>	Blízko infračervené záření
<i>N_{P0}</i>	Koncentrace elektronů v polovodiči v rovnovážném stavu [–]
<i>Organic</i>	Fotovoltaické články z organických sloučenin
<i>P_{N0}</i>	Koncentrace děr v polovodiči v rovnovážném stavu [–]

<i>po – Si</i>	Polykrystalický křemík
<i>q</i>	Náboj elektronů [C]
<i>T</i>	Termodynamická teplota [K]
<i>TF</i>	Tenkvrstvé články
<i>u</i>	Hustota zářivé energie v jednotce objemu [$J \cdot m^{-3}$]
<i>v</i>	Rychlost [$m \cdot s^{-1}$]
<i>VRLA</i>	Valve Regulated Lead Acid
<i>W</i>	Šířka depletiční vrstvy [m]
<i>Wp</i>	Wattpeak
ε	Poměrná emisivita objektu [–]
η	Účinnost [–]
λ	Vlnová délka [m]
σ	Stefanova-Boltzmannova konstanta $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$
τ_{SC}	Efektivní doba života nosičů [s]

2. Úvod

Téma diplomové práce mě zaujalo, protože s diagnostikou pomocí termovizní kamery jsem měl již zkušenosti z mé předcházející bakalářské práce. Volně jsem navázal na předchozí bakalářskou práci a prohloubil si své znalosti o tomto typu diagnostiky.

Diplomová práce má nejprve za cíl čtenáře informovat o jednotlivých složkách fotovoltaického systému. Fotovoltaický systém, aby pracoval efektivně, je potřeba kontrolovat.

Ke kontrole slouží různé metody diagnostiky fotovoltaických systémů. Čtenář zde najde přehled nejpoužívanějších diagnostických metod.

Diplomová práce je primárně zaměřena na metodu diagnostiky pomocí termovize. Popularita termovizního měření v posledních několika letech roste. Tento růst je dán několika faktory:

- komplexností měření
- zvyšující se dostupností termovizních kamer
- lze velice snadno pozorovat v delším časovém horizontu určitý trend stavu fotovoltaického systému

Při měření termovizní kamerou se neměří pouze jeden bod, ale téměř nekonečná množina bodů. Díky tomu získáváme výstup z termovizní kamery tzv. termograf. Místa s teplotními anomáliemi jsou pak velice snadno identifikovatelná. Právě u fotovoltaických panelů je potřeba dosáhnout co nejhomogeničtější teploty fotovoltaického panelu. V této práci čtenář najde příklad, na kterém jsou rozebrány možnosti využití termovizní kamery při diagnostice fotovoltaického systému. Čtenář se dále dočte o praktickém měření na reálném fotovoltaickém systému, které je podrobně rozebráno. Díky letošní dlouhodobé mimořádné nepřízní počasí toto měření neproběhlo za ideálních podmínek. Navzdory nepřízní počasí bylo dosaženo velice zajímavých výsledků.

2.1. Úvod do problematiky

Solární články nedokážou využít celé spektrum slunečního světla. Účinnost komerčně prodávaných fotovoltaických článků se pohybuje od 11% do 17%. Ke ztrátám dochází vlivem rekombinace, odrazem (reflexí), zastíněním od kontaktů. Největší podíl ztrát má dlouhovlnné sluneční záření.

Dlouhovlnné záření článkem prochází, dochází k tzv. transmisi a nepřispívá k vytváření nosičů náboje. Energie fotonů závisí na vlnové délce. [1]

$$E = h \cdot f = h \cdot \frac{v}{\lambda} \quad (2.1)$$

kde:

E - energie fotonu [J]

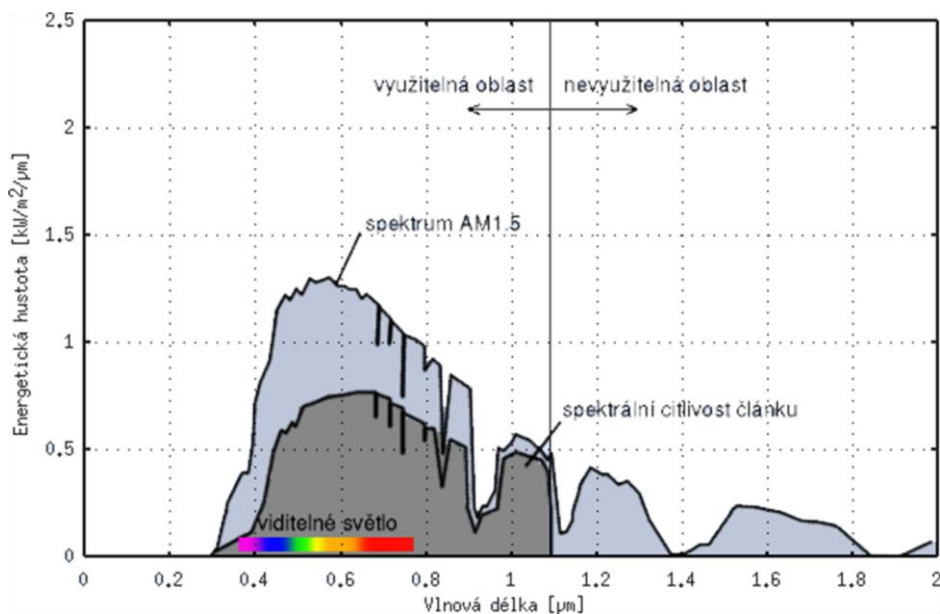
h - Planckova konstanta $h = 6,62606876 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$

f - frekvence světelného vlnění [Hz]

v - rychlost světla [$m \cdot s^{-1}$]

λ - vlnová délka [m]

Podle vztahu (2.1) energie fotonů je závislá na vlnové délce světla. Čím je vlnová délka dopadajícího světla kratší, tím mají fotony větší energii.



Obr. 1: Spektrální složení dopadajícího záření [2]

Hodnota energetické hustoty slunečního záření ve vakuu je $1367 \mp 7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. Tato hodnota energie je rozložena do spektra přibližně odpovídající pro absolutně černé těleso 5700 K . Při průchodu atmosférou se asi $300 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ z této energie absorbuje v atmosféře a $100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ se rozptýlí. Rozptýlená část energie je vidět jako difuzní záření – nebeská modř.

Air Mass (AM) je spektrum, které ve vakuu a ve vzdálenosti 150 milionů km vytváří sluneční záření. Energetická hustota takového záření je $1367 \mp 7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

Spektrum AM 1.5 vzniká po průchodu slunečního světla bezoblačnou atmosférou. Energetická hustota spektra AM 1.5 je $1 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$. Tato hodnota je hodně závislá na průhlednosti atmosféry. Spektrum AM 1.5 se nejčastěji používá pro fotovoltaiku, protože odpovídá úhlu Slunce cca. 45° nad obzorem. [3]

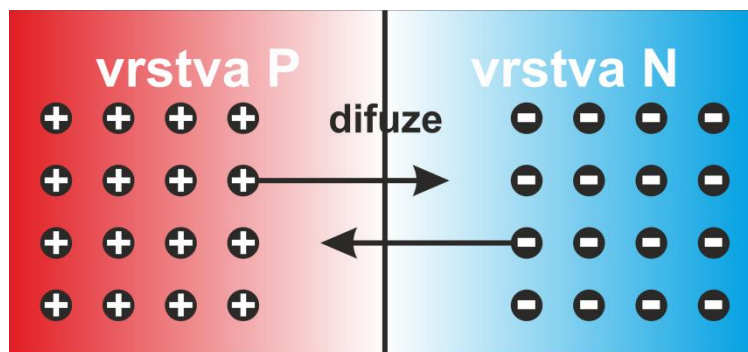
3. Fotovoltaický systém

3.1. Fotovoltaický článek

Polovodičová součástka, která přeměňuje dopadající světlo na elektrickou energii. K této přeměně se používá tzv. fotovoltaického jevu. Fotovoltaický jev je znám od roku 1839. Pozoroval ho Edmond Becquerel.

Moderní fotovoltaické články se vyrábí z křemíku. Křemíku je na Zemi po kyslíku druhým nejvíce zastoupeným prvkem v zemské kůře. Čistý křemík se v přírodě nevyskytuje, a proto jej třeba vyčistit. Křemík je možno vyčistit až na čistotu 99,99998%. [4]

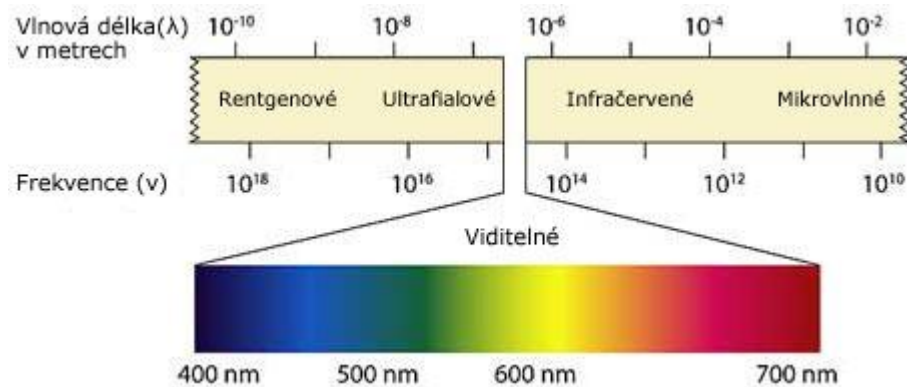
Princip běžného křemíkového (Si) fotovoltaického článku je, že se skládá ze dvou křemíkových vrstev, které jsou různě dotované. Strana obrácená ke Slunci je záporně dotovaná fosforem vrstva N. Vrstva P na opačné straně je kladně dotovaná bórem. Mezi těmito dvěma vrstvami vznikne P-N přechod. P-N přechod vede elektrický proud pouze jedním směrem. [1]



Obr. 2: Tvorba prostorového náboje v polovodiči [5]

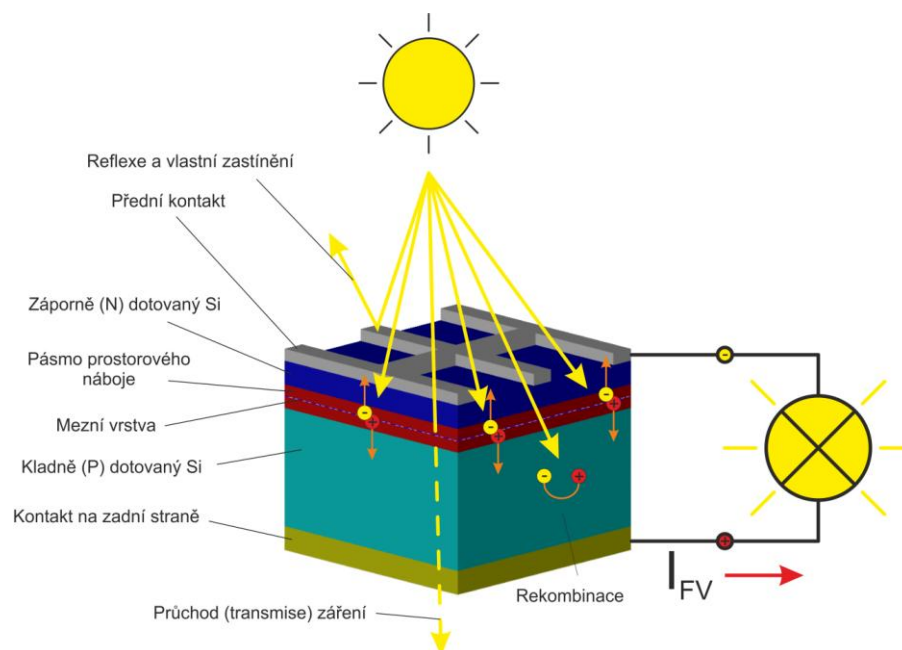
Elektrody na fotovoltaické panelu sloužící jako kontakty pro odběr elektrického proudu (I) jsou umístěny na přední a zadní straně. Na zadní straně jsou většinou provedeny celoplošně pomocí hliníkové nebo stříbrné pasty. Na přední straně, která musí propouštět co nejvíce světla, jsou provedeny ve formě mřížky. Tím je zaručena co největší propustnost světla. Co největší absorpci fotonů zaručuje antireflexní vrstva. Ta dává šedým křemíkovým článkům jejich typickou černou (monokrystalické články) nebo modrou (polykrystalické články) barvu. Fotony pokud mají dostatečnou

energii uvolňují z vrstvy N elektrony. Fotony jsou částice záření a jejich energie je závislá na vlnové délce záření. Čím kratší je vlnová délka, tím větší energii fotony mají. Fotony, které uvolňují elektrony z vrstvy N Si polovodiče musí mít energii alespoň 1,12 eV. Této energii odpovídá vlnová délka 1105 nm a to je infračervené (IR) záření. [1][4]



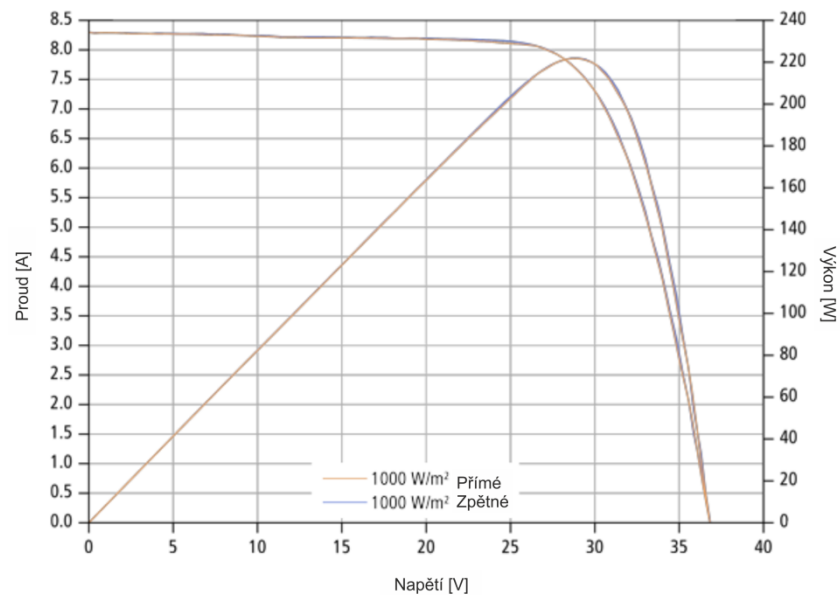
Obr. 3: Spektrum slunečního světla a spektrum viditelného světla [6]

Dopadá li světlo na vrstvu N, tak z ní uvolňuje elektrony. Tyto elektrony se hromadí na rozhraní vrstev P a N. Nahromaděním volných elektronů v křemíkovém polovodiči vznikne zde difuzní elektrické napětí o velikosti 0,6 V. Přechod PN se stává vodivým a křemíkový fotovoltaický článek začíná vyrábět elektrický proud. [5]



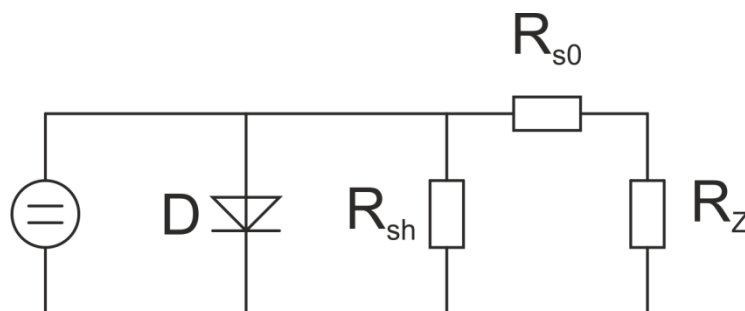
Obr. 4: Konstrukce a přeměna solární energie v křemíkovém fotovoltaickém článku [1]

Při dopadu světla dochází ke ztrátám vlivem odrazu (reflexe) záření a vlastním zastíněním předními kontakty. Solární článek neumí využít všechno záření ze slunečního spektra. Největší ztráty vznikají vlivem dlouhovlnného nebo naopak krátkovlnného slunečního záření, které nemůže být solárním článkem využito. [1]



Obr. 5: V-A charakteristika [7]

Fotovoltaický článek můžeme nahradit následujícím náhradním schématem:



Obr. 6: Náhradní schéma FV článku [3]

- R_{sh} paralelní svod článku
- R_{s0} sériový odpor článku
- R_Z odpor zátěže

Solární článek je PN přechod a tedy můžeme psát pro proudovou hustotu J vztah (3.1) [3]:

$$J = J_N + J_P = q \cdot \left(\frac{D_N}{L_N} \cdot N_{P0} + \frac{D_P}{L_P} \cdot P_{N0} \right) \cdot \left(e^{\frac{q \cdot U}{k \cdot T}} - 1 \right) \quad (3.1)$$

kde:

- J_N, J_P - proudová hustota elektronů a děr $\left[\frac{A}{m^2} \right]$
- D_N, D_P - difuzní koeficienty elektronů a děr $[-]$
- L_N, L_P - difúzní délka elektronů a děr $[-]$
- N_{P0}, P_{N0} - koncentrace elektronů a děr v polovodiči v rovnovážném stavu $[-]$
- k - Boltzmanova konstanta $k = 1,3806503 \cdot 10^{-23} [-]$
- q - náboj elektronu $[C]$
- T - teplota $[K]$

Vztah (3.1) lze upravit do podoby, která je v literatuře označována jako dvoubodový model fotovoltaického článku.

$$J = q \cdot \left(\frac{D_N}{L_N \cdot P_{P0}} + \frac{D_P}{L_P \cdot N_{N0}} \right) \cdot n_i^2 \cdot e^{\frac{q \cdot U}{k \cdot T}} + \frac{q \cdot d}{2 \cdot \tau_{SC}} \cdot e^{\frac{q \cdot U}{2 \cdot k \cdot T}} \quad (3.2)$$

kde:

- n_i - koncentrace nosičů v rovnovážném stavu $[-]$
- τ_{SC} - efektivní doba života nosičů $[s]$
- d - $d = W \cdot n_i$ kde W je šířka depletiční vrstvy $[m]$

Depletiční vrstva je oblast PN přechodu bez volných nosičů náboje. Při malých napětích se uplatňuje rekombinační složka proudu. Difuzní složka se prakticky vyskytuje při vyšších napětích. [3]

Fotovoltaické články jsou vyráběny různými technologiemi.

Technologie výroby fotovoltaických článků podle [2]:

Křemíkové články:

- monokrystalické články
- polykrystalické články
- amorfni články

Tenkvrstvé články

Články z jiných polovodičů

Články z organických sloučenin

3.1.1. Křemíkové články

3.1.1.1. Monokrystalické články

Monokrystalické jsou vyrobeny z jednoho krystalu křemíku. Většina elektronických zařízení dnes tuto technologii využívá. Ať už se jedná o mikrovlnou troubu, mobilní telefon, televizi, aj. všude se setkáme s monokrystalickým křemíkem.

Pro výrobu monokrystalického křemíku je potřeba připravit polykrystalický křemík řádové čistoty ppm. Ten se získá redukcí písku koksem.



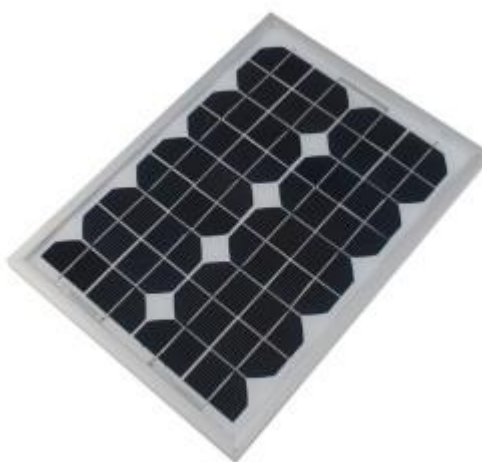
Takto získaný křemík se převede působením plynného chlorovodíku na trichlorsilan za vzniku vodíku. Následnou redukcí trichlorsilanu vodíkem získáme křemík požadované čistoty. Monokrystalický křemík se vyrábí ve formě tzv. „ingotů“. V dnešní době se vyrábí monokrystalové o průměru 450 mm. [8]

Monokrystalické články jsou většinou čtvercové nebo čtvercové se zaoblenými rohy. Délky hran čtvercových článků jsou 10, 12,5 a 15 cm. Mezinárodně se používají rozměry v palcích. Jedná se o rozměry 4, 5 a 6 palců.

Barva těchto článků je dána použitou antireflexní vrstvou a má homogenní zabarvení v barvách (tmavomodré až černé). Díky homogenní barvě dochází k lepší absorpci fotonů. Monokrystalické články také pomaleji stárnou. Výkon panelu časem klesá pomaleji.

Účinnost monokrystalických článků se průměrně pohybuje kolem 15% až 17%.

[1]



Obr. 7: Fotovoltaický panel z článků monokrystalického křemíku [9]

3.1.1.2. Polykrystalický článek

Polykrystalické články na první pohled lze poznat jednoduše. Tyto články se nevyrábějí z jednoho krystalu křemíku. Tento fakt jim dává charakteristický vzhled. Jejich barva je povětšinou v barvách modré. Vyrábí se čtvercové s hranami o délkách 4, 5, 6 a 8 palců. Důvodem výroby polykrystalických článků je cena. Jejich výrobní proces je jednodušší a levnější.

K výrobě polykrystalického křemíku se využívá metoda blokového lití. Křemík se ve vakuu zahřeje na teplotu 1500°C a v grafitovém kelímku se regulovaně ochlazuje až do blízkosti bodu tání 1414°C. Takto vzniknou polykrystalické křemíkové hranoly o velikosti 40x40x30cm. Tyto hranoly se nejprve nařezou na tyče a ty pak na destičky. [1]

Daní za jednodušší a levnější výrobu je nižší účinnost. Účinnost se zde pohybuje mezi 13 a 16%. [1]



Obr. 8: Fotovoltaický článek z polykrystalického křemíku [10]

3.1.1.3. Amorfni křemíkové články (a-Si)

První funkční amorfni křemíkový článek byl vyroben v roce 1974. Od této doby si našel cestu do mnoha elektronických aplikací běžného života. Amorfni křemíkový článek můžete potkat v hodinkách, kalkulačkách, kapesných svítilnách, atd. V současnosti se tyto moduly uplatňují stále více i ve velkých fotovoltaických zařízeních. [1]

Amorfni křemík netvoří pravidelnou krystalickou strukturu, nýbrž jakousi neuspořádanou síť. Při výrobě se používá teplota 200°C. Při této teplotě dochází k chemickému odlučování z plynného silanu. Kvůli velmi krátké difúzní vrstvě dotovaného amorfniho křemíku dochází ihned k rekombinaci volných nosičů náboje. Tento problém odstraňuje intrinsická (nedotovaná) vrstva I, která se vkládá mezi vrstvy P a N. Vznikne struktura PIN. V této nedotované vrstvě I je životnost náboje podstatně vyšší. Zde se také odehrává absorpce světla a vytváření náboje. Zatímco vrstvy P a N vytvářejí elektrické pole, které uvolněné náboje odděluje. [1]

Nevýhodou těchto amorfních článků je malá účinnost. Tato účinnost ještě v důsledku stárnutí vyvolané světlem klesá (Staeblerův – Wronského jev). Toto počáteční klesání účinnosti trvá prvních šest až dvanáct měsíců, pak se ustálí na stabilní hodnotě kolem 7%. Výrobci s tím, ale počítají a dodávají články s udávaným výkonem po této degradaci. V praxi to znamená, že amorfní články jsou dodávány s asi o 15% s vyšším výkonem, než je jmenovitý výkon.



Obr. 9: Návrh umístění solárních modulů Uni-Solar na autobusovou zastávku [11]

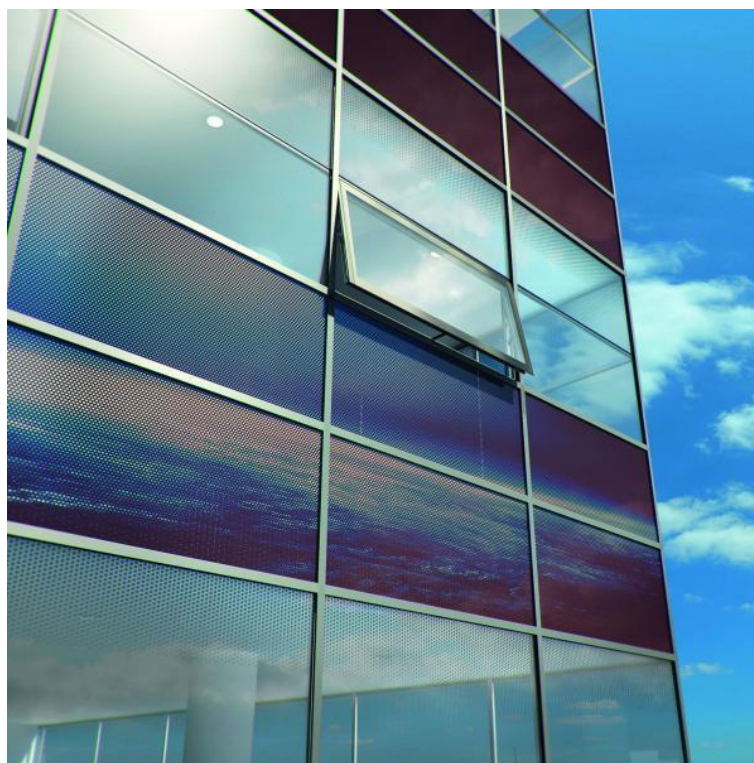
3.1.2. Tenkovrstvé články (TF)

Tenkovrstvé články se vyrábějí nejenom z křemíku. Jejich systematické zařazení není proto jednoduché. Podíl tenkovrstvých solárních článků na trhu v roce 2008 byl 12%. Dá se, ale předpokládat, že tento podíl se bude do budoucna zvyšovat. Přispívat k tomu jistě bude jejich vysoký fyzikální a technologický potenciál. Především jejich energetická návratnost. Tyto články nejsou tak citlivé na teplotu a zastínění. Tenkovrstvé solární články jsou flexibilnější, mají lepší využití spektrální nabídky slunce. Nabízejí investorovi geometrickou volnost nebo třeba průhlednost. Nevýhodou těchto článků je, že pro stejný výkon jaký nabízejí monokrystalické nebo polykrystalické solární panely, musíte tenkovrstvými panely obsadit větší plochu. U větších fotovoltaických zařízení nad 50 kW už dnes tenkovrstvé solární panely mohou směle konkurovat monokrystalickým či polykrystalickým solárním panelům. Dá se tedy předpokládat, že do budoucna budou konkurenceschopné i u malých fotovoltaických zařízení. [1]

Při výrobě tenkovrstvých solárních článků se materiál nanáší ve velmi tenké vrstvě (několik mikrometrů) na sklo. Kromě skla lze použít i jiné nosné materiály,

například umělé hmoty nebo kovové fólie. Při výrobě si vystačíme s teplotami pouze mezi 200°C a 500°C. Na rozdíl od krystalických solárních článků, kde byla zapotřebí teplota i 1500°C. Dalším rozdílem je absence pájených spojů. Všechny spoje určené k propojení už jsou integrovány do výrobního procesu. Tenkovrstvé články se vyrábějí v pruzích o šířce 1 cm. Pro ochranu se celá konstrukce opatří skleněnou tabulí. Na závěr se systém zapouzdří do ochranné vrstvy z kompozitního materiálu kopolymer etylén – vinylacetát (EVA).

Co do účinnosti tyto články dosahují zatím pouze polovičních hodnot krystalických článků. Navzdory nízké účinnosti, která je zatím jen 8%, může být energetický výnos z takových článků opravdu vysoký. Jejich technologický potenciál dovoluje integraci přímo do budov. Tenkovrstvé články za zhoršených meteorologických podmínek pracují lépe než monokrystalické či polykrystalické články. [1]



Obr. 10: Integrované TF solární články do izolačních oken s různým stupněm transparentnosti [12]

3.1.3. Články z jiných polovodičů

3.1.3.1. Články CIS

Zkratka CIS znamená Copper-Indium-diSelenid česky dvojselenid mědi-india. Tyto články dosahují nejvyšší účinnosti u tenkovrstvých solárních článků.

Při výrobě se používá teplota 500°C. Při této teplotě se ve vakuové komoře nosné sklo potáhne tenkou kontaktní vrstvou. Na tuto vrstvu se nanese vrstva CIS s vodivostí typu P. Pak následuje další nárazníková vrstva kadmia s vodivostí typu N. Tato vrstva snižuje ztráty způsobené chybami v krystalové mřížce.

Solární panely vyrobené technologií CIS nepodléhají procesu stárnutí světlem, ale prokazují jistou nestabilitu ve vlhkém a horkém prostředí. Tyto články tedy musí být velice dobře a pečlivě zapouzďeny.

Články CIS mají barvu tmavošedou až černou. Jejich účinnost se udává 11%. Globálnějším rozšíření brání použití india, který je v zemské kůře velice vzácným prvkem. Průměrný obsah india činí pouze 0,1 ppm (mg/kg). Zatímco křemík tvoří 26% - 28% zemské kůry. [1]



Obr. 11: Fotovoltaický článek CIS [13]

3.1.3.2. Články CdTe

Články na bázi teluridu kademnatého (CdTe) jsou také velice účinné oproti amorfním článkům. Účinnost se pohybuje od 10% do 11%. Jejich největší předností je relativně jednoduchá výroba a tím i příznivá cena.

Při teplotě 700°C probíhá vakuovou metodou vylučování polovodičových vrstev. Tyto články mají tmavozelenou až černou lesknoucí se barvu. [1]

Hlavními výhodami těchto článků je nízká citlivost na zastínění. Dokáží využít velkou část spektra denního světla. Další výhodou je doba energetické návratnosti. Doba energetické návratnosti je doba, za kterou článek vyrobí tolik energie, kolik bylo spotřebováno na jeho výrobu. U těchto článků výrobci uvádějí hodnotu 1,5 roku a dále klesá. Poslední výhodou je vysoká odolnost vůči teplotám.

Tyto výhody jsou ale vykoupeny obsahem nebezpečných kovů a to především kadmia. To z nich, po vyřazení z provozu, činí nebezpečný odpad, se kterým také podle toho musí být odborně zacházeno. Výrobci, proto do své ceny uvádějí ještě cenu za ekologickou likvidaci. Křemík na rozdíl od kadmia není toxický a jeho zdroje jsou na Zemi v podstatě nevyčerpatelné. Evropská unie směřuje k vyřazení kadmia úplně z elektroniky. Výjimku tvoří právě CdTe solární panely. Výroba těchto panelů navzdory tomu se neustále zvyšuje a tím se zvyšuje i tržní podíl na celkovém trhu. [1]

3.1.4. Články z organických sloučenin (Organic)

Tyto články pracují na bázi aktivního polymeru, případně nízkomolekulárních látek nebo elektrolytu. Jednotlivé vrstvy jsou nanášeny na transparentní fólii opatřenou tenkou transparentní elektrodou. Na straně od Slunce je kovová elektroda. Celá sendvičová struktura je překryta další polymerní fólií, která chrání solární článek před působením okolního prostředí. Polymerní články lze vyrábět metodami podobným tisku (roll to roll, rotační tisk, apod.). Tisk kovové elektrody na straně od Slunce dnes již také nepředstavuje větší problém a dnes jsou již zvládnutou technologií. Tento proces by měl solární články výrazně zlevnit a zrychlit jejich výrobu. [14][15][16]

Účinnosti těchto organických solárních článků se pohybují v laboratořích do 12%. Ve Švýcarské laboratoři Empa vyrobili vědci článek o účinnosti 18,7%. Problémem organických článků je životnost, která je pouze několik let. Tento problém spolu s účinností se, ale vědcům daří odstraňovat, a proto se můžeme těšit na velice zajímavé a hlavně cenově dostupné solární články. Články nejsou náchylné na intenzitu okolního osvětlení a dovedou pracovat i s difuzním světlem (pod mrakem). Nejsou ani nijak významně teplotně závislé. Instalace takových článků probíhá pomocí obyčejné oboustranné lepenky nebo je možná i přímo integrovat do materiálů. Do budoucna se mohou objevit fasády domů s integrovanými solárními

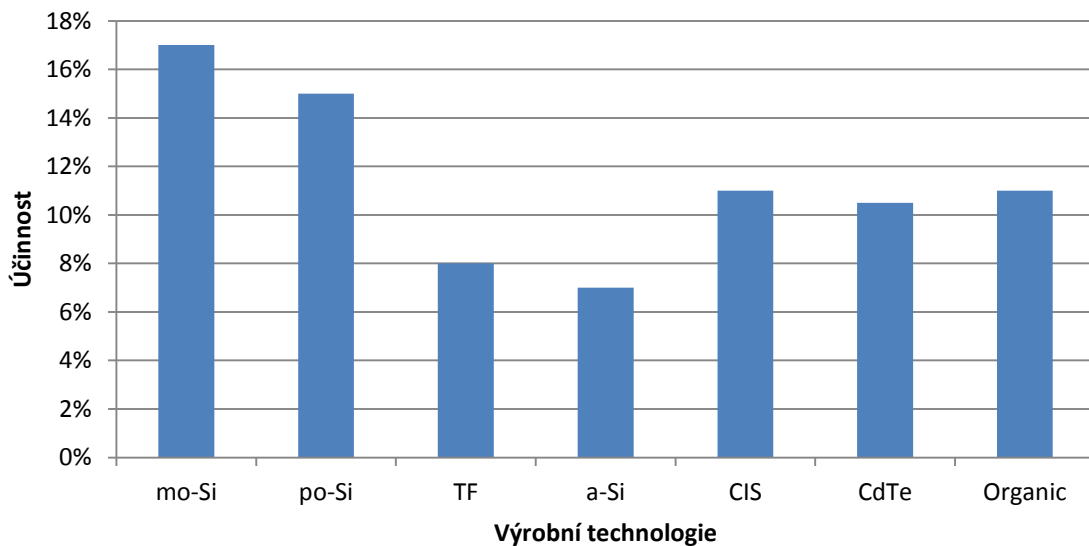
články, střešní krytiny, oblečení, mobilní telefony s integrovanými solárními nabíječkami, apod. [14][15][16]



Obr. 12: Stroj na výrobu organických fotovoltaických článků technologií R2R (Roll to Roll) [17]

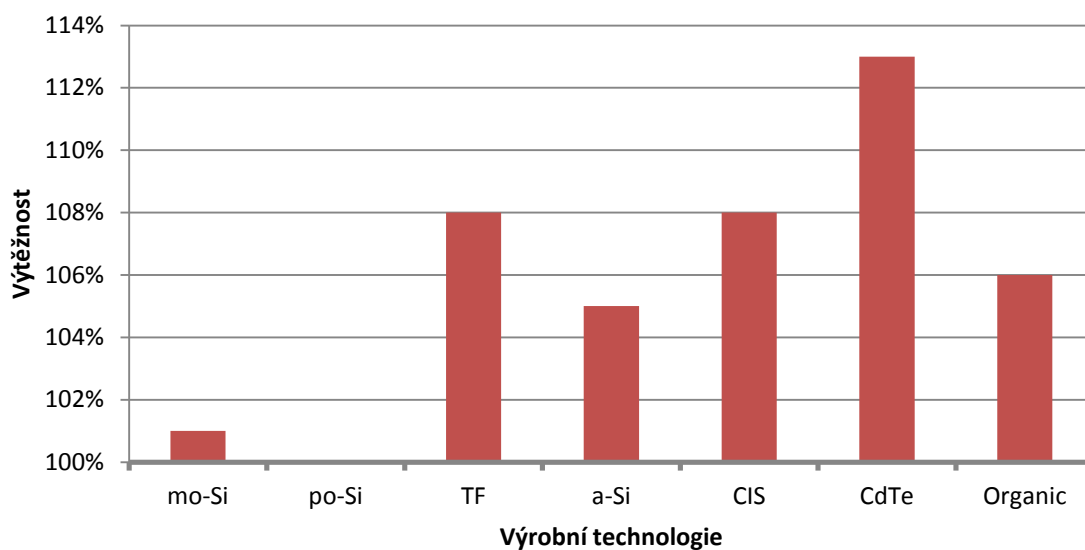
Na závěr malé přehledné shrnutí jednotlivých popsaných technologií výroby solárních článků.

Účinnost technologií



Graf 1: Účinnost technologií [18]

Výtěžnost technologií



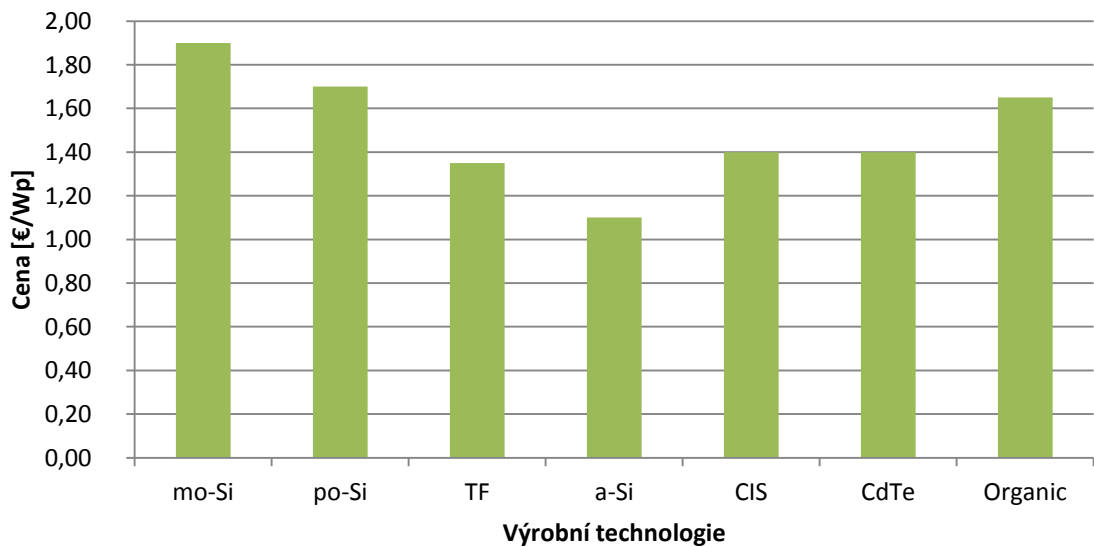
Graf 2: Výtěžnost technologií [18]

Výtěžnost nám udává kolik elektrické energie ve Wh instalovaný výkon 1kWp fotovoltaická elektrárna vyrobí za rok, při konkrétních meteorologických podmínkách.

Srovnání bylo provedeno vůči výrobní technologii polykrystalického křemíku (po-Si), tato technologie je brána jako referenční. [18]

Graf srovnání výtěžností jednotlivých technologií se může zdát být v protikladu vůči předchozímu grafu srovnání účinností jednotlivých výrobních technologií. Při pohledu na grafy si musíme uvědomit, že technologie TF, a-Si, CIS, CdTe a Organic dokážou mnohem lépe pracovat i s nepřímým slunečním zářením. Zatímco technologie mo-Si a po-Si potřebují přímé sluneční světlo, které musí dopadat na fotovoltaický panel.

Cena solárních panelů



Graf 3: Cena solárních panelů [18]

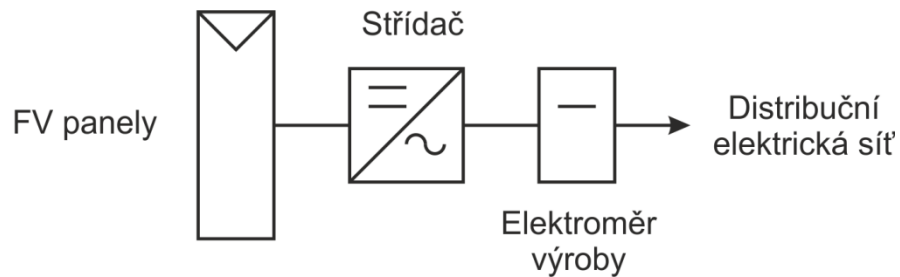
3.2. Připojení FVE

3.2.1. Připojení na distribuční soustavu

V tomto případě fotovoltaická elektrárna (FVE) veškerou energii, kterou vyrobí, dodá do sítě. Toto připojení je vhodné pro účelově stavěné fotovoltaické elektrárny. Výhodou je vysoká výkupní cena za kWh.

Pro připojení fotovoltaické elektrárny k distribuční soustavě jsou potřeba následující základní komponenty dle [19]:

- fotovoltaické články
- střídač
- elektroměr výroby
- kabely vhodný průřezů



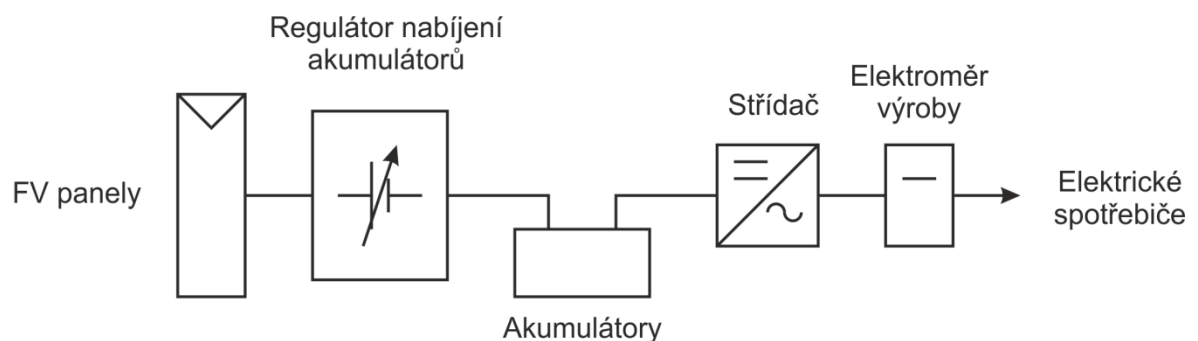
Obr. 13: Blokové schéma přímého připojení na veřejnou elektrickou síť [19]

3.2.2. Ostrovní systém

Toto připojení se někdy také nazývá „Off Grid“ připojení. Je vhodné tam kde investor nemůže vybudovat elektrickou přípojku k distribuční elektrické síti. Zde veškerá vyrobená energie musí být buď okamžitě spotřebována, nebo ukládána v solárních akumulátorech.

Pro zapojení fotovoltaické elektrárny do vlastního ostrovního systému investor potřebuje tyto nezbytné komponenty podle [19]:

- fotovoltaické články
- střídač
- regulátor nabíjení akumulátorů
- akumulátory
- kabely vhodných průřezů

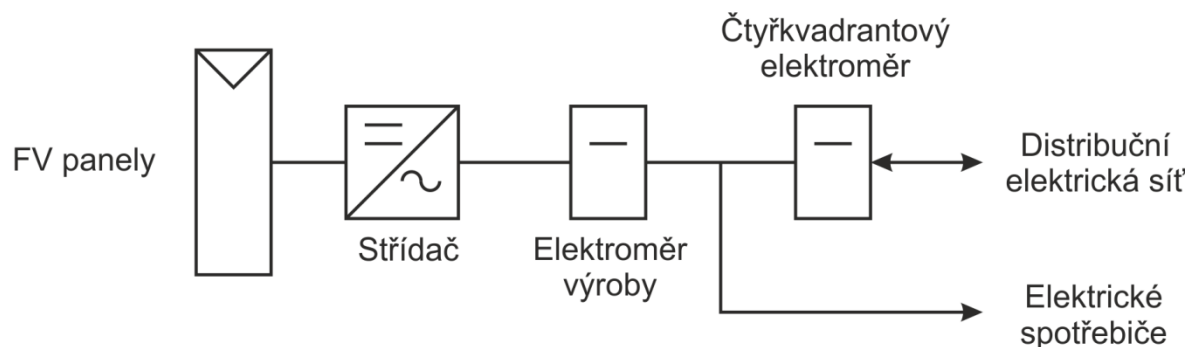


Obr. 14: Blokové schéma zapojení ostrovního systému [19]

3.2.3. „Zelený bonus“

Toto připojení je vhodné u objektů, kde větší část vyrobené energie se spotřebuje v objektu. Přebytky vyrobené elektrické energie pak může fotovoltaická elektrárna dodat do distribuční elektrické sítě. Jedná se o nejjednodušší připojení fotovoltaické elektrárny bez nutnosti zřizování nové elektrické přípojky nebo nového odběrného místa. Tento „Zelený bonus“ je vhodný u fotovoltaických systémů na rodinných domech do 10 kWp nebo u továrních hal až do 30 kWp. Fotovoltaický systém v tomto případě se skládá z podle [19]:

- střídače
- elektroměr výroby
- čtyřkvadrantový elektroměr
- fotovoltaických panelů
- kabelů vhodných průřezů



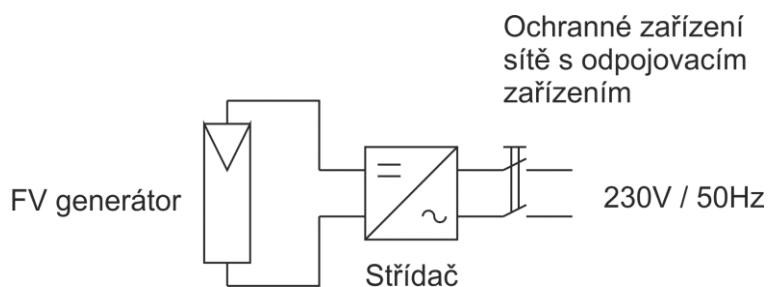
Obr. 15: Blokové schéma zapojení "Zelený bonus" [19]

Problémem všech solárních panelů napříč výrobním spektrem je, že vyrábějí stejnosměrné (DC) napětí a proud. Pokud chceme využívat solární elektrárnu v ostrovním provozu nebo dodávat elektrický proud do veřejné sítě, nevyhneme se koupi a instalaci zařízení, kterému se říká střídač (někdy také měnič nebo invertor). [19]

3.3. Střídač

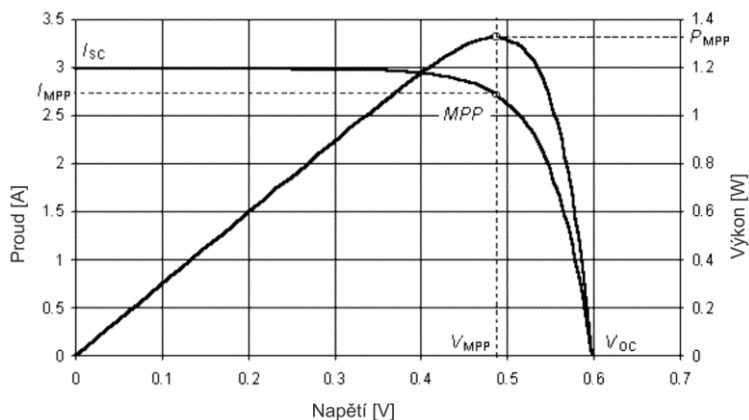
Střídač primárně slouží k přeměně stejnosměrného (DC) napětí a proud na střídavé (AC) napětí a proud a přizpůsobuje jej na frekvenci a velikost napětí veřejné sítě. Díky moderní elektronice tato přeměna probíhá jen s malými ztrátami. Správná volba střídače pro fotovoltaickou elektrárnu je velice důležitá. Investoři si mnohdy neuvědomují, že fotovoltaická elektrárna je investice na několik desetiletí a nejde po pár letech prodat stejně jako auto. Volbě správného a dobrého střídače, proto musí investor věnovat náležitou pozornost.

U fotovoltaických elektráren do výkonu 5 kWp nebo do plochy modulů 50 m² je možno připojit střídač do veřejné sítě přímo. Střídač bývá napojen na síť nízkého napětí (NN) jednofázově. U větších solárních zařízení je snahou stejnoměrně napájet všechny tři fáze veřejné sítě. Toto zajišťuje centrální třífázový měnič.



Obr. 16: Princip střídače připojeného na elektrickou síť [1]

Další funkce střídače je, aby do sítě dodával maximální výkon. Střídač musí pracovat v bodě maximálního výkonu (MPP) fotovoltaického generátoru. [1]



Obr. 17: Určení bodu MPP [20]

Výkon fotovoltaického generátoru (spojení více solárních panelů dohromady) se vlivem teploty a intenzity osvětlení mění. Moderní střídače mají integrován do sebe regulátor MPP. Regulátor MPP vyrovnává pracovní bod přizpůsobením napětí solárního generátoru. Někteří výrobci dokonce nabízejí zachytávání provozních dat, střídače mají displej nebo dokonce nabízejí dálkovou správu provozních dat přes počítač připojený k internetu. Střídače mají také různé stejnosměrné i střídavé ochrany např. proti přepólování, přepětové ochrany, ochrany před přetížením, apod.

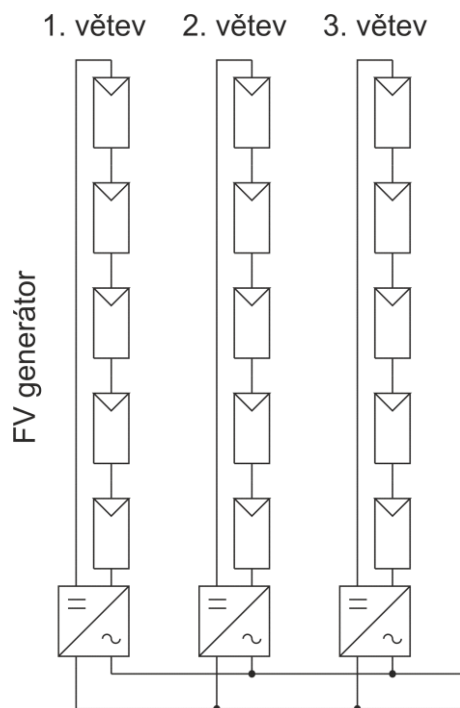
Podle principu funkce můžeme střídače dělit na řízené sítě a samostatně řízené střídače. Střídač řízený sítí odvozuje ze síťového napětí zapínací a vypínací pulzy pro výkonové spínací prvky. Tyto prvky spínají a vypínají v taktu 50 Hz. Takto vznikne obdélníkový střídavý proud, který je fázově posunutý vůči frekvenci sítě. Takto by mohlo dojít k rušení sinusového síťového napětí, a proto se používají elektronické filtry. Tyto střídače se prakticky nepoužívají.

V praxi se více používají samostatně řízené střídače. Samostatně řízené střídače mají vysokou účinnost a výstupní napětí má dobrou kvalitu. U těchto střídačů se o tvarování pulzů stará mikroprocesor. Mikroprocesor výstupní stejnosměrné napětí rozdělí a vytvaruje. Používá k tomu impulzní šířkovou modulaci a frekvenci vyšší než 50 Hz. V mezerách mezi impulzy se proud ukládá do vstupního kondenzátoru. Výstupní průběh se tak nejvíce podobá sinusovému průběhu. Samostatně řízené střídače fungují i při výpadku síťového napětí. Toto představuje velké riziko pro elektrikáře, který provádí opravu na rozvodné síti. Aby nedošlo k zranění je z bezpečnostních důvodů předepsané zařízení pro síťovou ochranu. Zařízení pro síťovou ochranu je běžně implementováno do střídače.

U malých fotovoltaických elektráren od 5 kWp se často používají centrální střídače. Centrální střídače jsou tak připojeny na mnoho větví. Některé střídače používají jako systémové napětí bezpečné malé napětí. Výhoda je ta, že nejsou potřeba další stejnosměrná ochranná opatření. Při tomto zapojení se do větve (sériově) zapojuje jen 3 až 5 solárních panelů. Nevýhodami nízkého napětí jsou vysoké náklady na propojení. Nízké napětí znamená vysoké proudy. Abychom snížili ztráty ve vedení, musíme použít větší průřezy vodičů.

U velkých fotovoltaických zařízení se používá systém zapojení Master-Slave. Při malém ozáření pracuje pouze jeden střídač - master. Pokud se světelné podmínky zlepší připojí se i ostatní zařízení - slave. Díky tomuto zapojení se i při horších světelných podmínkách dosahuje vysoké účinnosti. [1]

Dalším typem zapojení jsou tzv. větvové střídače. V praxi to znamená, že každá větev má svůj střídač. Větvové střídače umožňují lepší výkonové přizpůsobení v závislosti na měnících se světelných podmínkách. Je zde, ale potřeba dbát na to, aby do větve byli zapojeny moduly s podobnou orientací a stejným zastíněním. Větvové střídače usnadňují instalaci na stejnosměrné straně, zkracují se délky vodičů a tím i náklady na instalaci. [1]



Obr. 18: Fotovoltaické zařízení s větvovými střídači [1]

Nacházíme se v prostředí se střeoevropským klimatem. Střeoevropské klima je charakteristické svými častými změnami. V tomto klimatu se většina fotovoltaické energie vyrábí ve středním rozsahu jmenovitého výkonu fotovoltaického generátoru. Výrobci střídačů na toto reagovali vyroběním střídačů s větším počtem výkonových dílů. Zlepšuje se tím účinnost a životnost střídače se také nezanedbatelně prodloužila. Vyšší účinnost střídače při částečném zatížení zaručuje zapnutí nižšího výkonového stupně. Pokud by se změnily světelné podmínky, pak se operativně zapnou i ostatní stupně. Navíc, pokud nastane porucha některého výkonového stupně, ostatní výkonové stupně převzou jeho funkci a investor tak nic nepozná. Oprava pak probíhá pouze výměnou vadného výkonového stupně. [1]

Díky specifickému středoevropskému klimatu se u střídačů zavádí pojem Evropská účinnost. Při výpočtu této účinnosti (3.4) se přihlíží k různým charakteristickým parametrům při statistickém vážení různých fází provozu. [1]

$$\eta_{Euro} = 0,03 \cdot \eta_{5\%} + 0,06 \cdot \eta_{10\%} + 0,13 \cdot \eta_{20\%} + 0,1 \cdot \eta_{30\%} + 0,48 \cdot \eta_{50\%} + 0,2 \cdot \eta_{100\%} \quad (3.4)$$

Hodnota $\eta = 100\%$ udává účinnost ve jmenovitém případě. V průměru dochází ke 100% zatížení střídače jen ve 20% roku. Střídače dosahují Evropské účinnosti v 94% až 97,5%

Investoři zapomínají na velmi důležitou věc: kontrolu a servis. Základem je dobře sepsaná servisní smlouva. Hlavní je zastoupení výrobce v ČR nebo servisní místo výrobce. Z praxe jsou známy případy, že dodavatel nebyl schopen v rozumné době střídač opravit. Každý den odstávky fotovoltaické elektrárny totiž stojí investora jeho peníze. Investor by proto měl volit optimální poměr cena/výkon. [1][21]

3.4. Regulátor nabíjení akumulátorů

Srdcem a mozkiem každého ostrovního systému je regulátor nabíjení akumulátorů. Regulátor nabíjení akumulátorů se stará o správné nabíjení a vybíjení solárních akumulátorů. Podobné jako střídače i regulátory nabíjení akumulátorů výrobci vybavují řadou nadstandardních funkcí. Nadstandardními funkcemi regulátorů nabíjení akumulátorů mohou být např. ochrana proti přepólování, priority napájení spotřebičů při nedostatku energie, programovatelné funkce, atd. Regulátor je volen podle výstupního napětí ze solárních článků buď 24V nebo 12V a podle maximálního výstupního proudu. [22]

3.5. Akumulátor

Investoři koupi akumulátoru berou jako nutné zlo. Vhodnou volbou akumulátoru, ale mohou ze své fotovoltaické elektrárny hodně vytěžit. Důležitá u akumulátorů není pouze jejich kapacita, ale i počet nabíjecích a vybíjecích cyklů a s tím související

životnost. Nejlépe se u fotovoltaických ostrovních systémů osvědčily olověné akumulátory. Na výběr máme hned z několika výrobních provedení. [23]

- startovací akumulátor (autobaterie)
- trakční akumulátor se zaplavenými elektrodami
- akumulátor bezúdržbový (VRLA)

Kapacitu akumulátorů je potřeba volit tak, aby pokryla elektrickou spotřebu na dobu 4 – 6 dní. Dále je potřeba přihlídnout k proudovým nárokům. Může se stát, že pokud hospodyňka zapne souběžně proudově náročnější spotřebiče např. pračku, rychlovarnou konvici, indukční varnou desku a ještě bude vysávat podlahu vysavačem, akumulátory nebudou schopné tuto spotřebu pokrýt. Akumulátory se nikdy nesmí úplně vybit. Pokud se tak stane výrazně se zkracuje jejich životnost. O vybíjení akumulátorů by se měl starat výše zmíněný regulátor nabíjení akumulátorů, na kterém by měla být možnost nastavit minimální napětí. Pokud investor použije akumulátory na 12 V doporučuje se minimální napětí cca 10,5 V. Pokud se investor o toto postará může předpokládat, že mu akumulátory budou dobře sloužit i 10 let.

Zapojování akumulátorů probíhá buď sériově pro vyšší napětí nebo paralelně pro větší elektrický proud. Běžně se používá to druhé – paralelní zapojení. V opravdu výjimečných případech se používá sérioparalelní zapojení.

Samotná koupě akumulátorů, také není lehká záležitost. Akumulátory by měly mít stejné štítkové hodnoty, měly by být od stejného výrobce a pokud to jde i ze stejné výrobní série. Hrozí zde nebezpečí, že pokud poskládáme akumulační systém z různých akumulátorů o různých parametrech, pak se zpravidla stane, že silnější akumulátory budou nabíjet ty slabší. Slabší akumulátory nemusí unést vyšší proudy od silnějších akumulátorů a v krajním případě může dojít až k explozi akumulátoru. [23]

3.5.1. Startovací akumulátor (autobaterie)

Startovací akumulátor je konstruován tak, aby na krátkou dobu dodal co možná největší proud. Vnitřní konstrukce startovacího akumulátoru toto umožňuje díky tomu, má velmi mnoho tenkých mřížek (desek). Velký počet mřížek (desek) zaručuje velkou elektrochemickou reakční plochu a tím i veliký krátkodobý proud. Autobaterie také

lépe snáší vyšší nabíjecí proud. Startovací akumulátor se nesmí nikdy úplně vybit. Pokud dojde k úplnému vybití autobaterie a nedojde k rychlému úplnému dobití do 1 až 2 dnů. Dojde uvnitř autobaterie ke zkroucení mřížek (desek) a dojde také k sulfataci. Sulfatace způsobí pokrytí elektrod krystaly síranu olovnatého. Životní cyklus autobaterie je přesně takový pro jaký byl konstruovaný. Krátkodobě ze sebe dostat co nejvíce energie – nastartovat auto, pak se rychle nabít a udržovat se v nabitém stavu. Dalším problémem klasické autobaterie je její nízký vnitřní odpor. Nízký vnitřní odpor má za následek velké vnitřní proudy a tedy i vysoké samovybíjení. Udává se hodnota až 30% kapacity za 1 měsíc, ale samozřejmě tato hodnota je orientační a závisí na stáří autobaterie.

Startovací akumulátor je díky těmto svým vlastnostem pro fotovoltaické systémy naprosto nevhodný. [23]

3.5.2. Trakční akumulátor se zaplavenými elektrodami

Trakční akumulátor má uvnitř sebe méně desek než autobaterie. Díky této konstrukci má 2,5 krát menší elektrochemickou reakční plochu. Nedokáže dodávat vysoké proudy, ale proud který produkuje dokáže dodávat stabilně po dlouhou dobu provozu. Trakční akumulátor také podstatně méně trpí samovybíjením. Plně nabitý akumulátor se do vybitého stavu dostane za dva roky.

Akumulátor se zaplavenými elektrodami není hermeticky uzavřený. Dochází při nabíjení k odpařování vodíku. Tyto akumulátory musí být v odvětraných prostorách, protože vodík ve spojení s kyslíkem je velice výbušný. Podobně jako u obyčejné autobaterie je s ním obtížná manipulace. Akumulátor se nesmí převrhnout jinak hrozí vylití elektrolytu – kyseliny sírové. Výhodou těchto akumulátorů jsou vyšší nabíjecí proudy než u akumulátorů bezúdržbových. [23]

3.5.3. Akumulátory bezúdržbové (VRLA)

Akumulátory VRLA (Valve Regulated Lead Acid) jsou akumulátory, u kterých elektrolyt je buď ve formě gelu nebo je nasáknut do skelné hmoty (AGM). Na rozdíl od akumulátorů s kapalným elektrolytem z těchto akumulátorů neuniká při nabíjení žádný vodík, a proto mohou být i v obyčejných částech domu. Mají také menší

samovybíjení a větší kapacitu. Manipulace s těmito akumulátory je bezproblémová. Při transportu se mohou otočit například dnem vzhůru a nic se jim nestane. [23]

3.5.3.1. Gelové akumulátory

Tyto akumulátory mají o cca 10% vyšší životnost než akumulátory AGM. Gelové akumulátory lépe čelí hlubokému vybití. Pokud nastane odstávka nemají tak veliké samovybíjení. [23]

3.5.3.2. Akumulátory AGM

Akumulátory AGM jsou lepší do nízkých teplot, i při nízkých teplotách dokážou dodávat vysoký výkon. Akumulátory AGM jsou lepší na manipulaci, neboť jsou lehčí než gelové akumulátory. Pokud se jedná o okamžitý výkon, dokážou dodat vyšší než gelové akumulátory. Akumulátory AGM ztrácejí, ale rychleji svou kapacitu než je tomu u gelových akumulátorů. [23]

3.6. Vodíkové hospodářství

Fotovoltaická elektrárna vyrobí elektrickou energii a tato energie slouží k elektrolýze vody. Elektrolýzou získaný vodík se ukládá do nádrží a v případě potřeby slouží jako palivo pro palivové články. Palivové články slouží jako zdroj elektrické energie v době, kdy fotovoltaická elektrárna není schopna dodávat dostatečný výkon.

Toto zapojení, má ale dosud stále více nevýhod než výhod. Účinnost celého systému se pohybuje kolem 50% (účinnost elektrolýzy cca 70%, účinnost palivového článku 60%). Další nevýhodou je použití samotného vodíku. Vodík v určité koncentraci se vzduchem (30% vodík a 70% kyslík) je silně explozivní. Nádrže, proto musí být umístěny v dobře odvětraných prostorách. [19][24]

3.7. Kabely pro FVE

Správné dimenzování vodičů k propojení jednotlivých komponentů je zárukou spolehlivé práce celého fotovoltaického systému. Při dimenzování vodičů musí investor brát v potaz, že proud dodávaný fotovoltaickou elektrárnou není stálý. Mění se v závislosti na teplotě solárních panelů a na intenzitě slunečního záření. Při projektování fotovoltaické elektrárny se mnohdy berou průměrné roční hodnoty. Takto získané hodnoty mohou být velice nepřesné a proud protékající pak vodiči může být mnohem vyšší než projektovaný. Vyšší protékající proud ohřívá kovové jádro vodiče a to ohřívá izolaci, kterou je izolovaný. Ohřátí vodiče na vyšší teplotu způsobuje elektrické ztráty. Zahřívání izolace i mění její izolační vlastnosti. Vodiče se proto mírně naddimenzovávají, aby se předešlo nepříjemným situacím. V praxi se pro připojování jednotlivých komponent fotovoltaického systému volí vhodné průřezy solárních vodičů takto:

- FV systém do 10A kabel o minimálním průřezu 2,5 mm²
- FV systém do 20A kabel o minimálním průřezu 4 mm²
- FV systém do 40A kabel o minimálním průřezu 10 mm²

Vodiče pro fotovoltaické systémy jsou speciální vodiče. Vyrábí se ve formě měděných lan, jednotlivé žíly lana jsou potaženy vrstvou cínu. Pocínování vodiče zabraňuje jeho oxidaci a tím se jeho odpor v čase nemění. Vnější izolaci tvoří kopolymer polyolefin. Díky této izolaci je vodič odolný proti UV záření a působení ozonu, kyselému prostředí, produktům organického rozkladu, čpavku a extrémním teplotním výkyvům (-50 °C – +120°C). [25][26][27][28]



Obr. 19: Solární kabel [29]

3.8. Konektory pro FVE

Konektory pro FVE musí stejně jako vodiče odolávat extrémním podmínkám provozu. Zároveň manipulace s nimi musí být jednoduchá.

Konektory pro FVE musí mít vysokou provozní spolehlivost při vysokých protékajících elektrických proudech a vysokých elektrických napětích. Provozní bezpečnost je dalším důležitým parametrem solárních konektorů. S konektory se musí jednoduše zacházet. Snadné musí být spojování a rozpojování konektorů. Konektory se vyrábí pro montáž pomocí krimpovacích kleští přímo v provozu. Konektory musí zaručovat co nejmenší přechodový odpor kvůli minimalizaci provozních ztrát a to po co nejdelší dobu své životnosti. Životnost a neměnnost parametrů konektorů se od solárních konektorů vyžaduje nejméně po dobu 20 let. [30]



Obr. 20: Solární konektor Male [31]

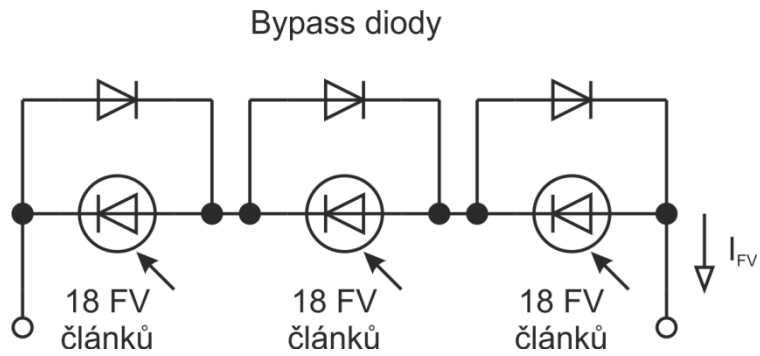
4. Diagnostika FV systému

Pořizovací náklady fotovoltaických systémů nejsou malé, a proto se vyplatí investovat do diagnostiky. Při zkoumání katalogových hodnot je zřejmé, že fotovoltaické panely mají víceméně stejné parametry a liší se pouze svou cenou. Fotovoltaické panely jsou vyráběny sériově, a proto se může stát a stává se, že trpí skrytou výrobní vadou. Pokud je tato vada už např. při výrobě krystalu monokrystalického křemíku, pak se může stát, že vadou bude trpět celá výrobní série fotovoltaických panelů. Rozdíly jsou i ve výrobních postupech jednotlivých výrobců a každý výrobce bude samozřejmě sebevědomě tvrdit, že právě ten jeho postup je ten nejlepší. Poškození panelů může nastat při přepravě nebo při neodborné manipulaci s nimi. Povětrnostní vlivy jako jsou např. výkyvy teplot, větry, kroupy, atd. taky mohou nadělat značné škody. Právě diagnostika a její různé metody mohou tyto negativní faktory odhalit a výrazně snížit. [7] [32]

4.1. Vizuální kontrola

Nejjednodušší, nejdostupnější a nejlevnější způsob diagnostiky. Investor, nebo jím pověřená osoba, sama zkontroluje, zda fotovoltaické panely nejsou poškozené mechanicky, zda jsou správně zapojené, správně umístěné, atd.

Vizuální kontrolou jde dále velice snadno zkontrolovat, zda instalované panely nejsou nevhodně zastíněny například narůstající vegetací. Vliv zastínění na výkon panelu může být značný. Fotovoltaické panely mají v sobě bypass diody, které tento vliv minimalizují. Fotovoltaické články v panelu jsou zapojeny do série. Zapojení do série se volí kvůli výstupnímu napětí fotovoltaického panelu. Pokud zastíníme pouze část článku, omezíme množství proudu, které sériovým zapojením fotovoltaických článků prochází. Pokud takový článek zastíníme celý, proud neteče žádný. Takto velice snadno můžeme odstavit i jednu třetinu fotovoltaického panelu. Pak zasáhne bypass dioda, která umožní, aby proud mohl procházet od zbývajících článků.



Obr. 21: Zapojení bypass diod ve fotovoltaickém panelu [2]

Další závadou, kterou můžete odhalit pomocí vizuální kontroly je delaminace. Delaminace je oddělení jednotlivých vrstev sendvičové struktury fotovoltaického panelu.

4.2. Flash test

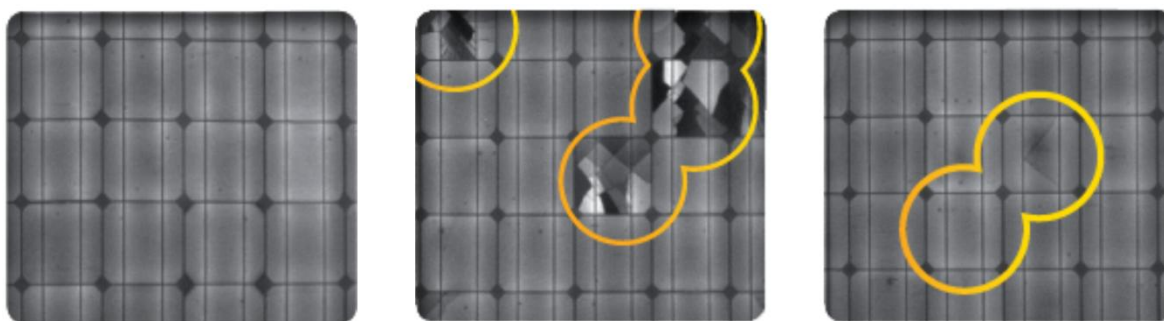
Flash test se provádí v laboratoři za standartních specifických podmínek. Panely jsou ozařovány intenzitou světla 1000 W/m^2 , nastavené spektrum slunečního záření AM1.5 (dle normy IEC 60904-9). Naměřené hodnoty jsou následně konfrontovány s údaji od výrobce. Zařízení pro diagnostiku Flash může být součástí výrobní linky na fotovoltaické panely. Výrobce tak může sám kontrolovat jím vyráběné fotovoltaické panely a předejít tak případným reklamacím. Flash test je jediné uznávané kritérium určující elektrické vlastnosti fotovoltaických panelů a sloužící jako podklad pro reklamace. [7] [32] [33]



Obr. 22: Pracoviště pro Flash test [34]

4.3. Elektroluminiscenční test (ELCD)

ELCD (Electroluminescence Crack Detection) test se provádí v laboratorních podmínkách. Solární panel v normálním provozu je ozářen a následně je zdrojem elektrického proudu. Elektroluminiscenční test pracuje na opačném principu. Solární panel je napájen a záření dodává. Solární panel je snímán vědeckou CCD kamerou. CCD kamera snímá světlo v blízkém infračerveném (NIR) spektru. Snímky jsou pořízené ve stupni šedi. Tmavé snímky značí, že tímto místem proud neprochází. Účelem tohoto testu je nahlédnutí do vnitřní struktury panelů a odhalení skrytých vad. Vady odhalené touto metodou jsou pro jiné diagnostické metody neviditelné. Test ELCD odhaluje zlomené články, ze kterých se panel skládá a mikropraskliny ve struktuře článků. Detekuje odtržené kontakty páskové sběrnice (busbar). Test ELCD zviditelňuje nehomogenity nebo případné příměsi v krystalickém křemíku. Odhaluje chybějící nebo přetržený sítotiskový sběrný proužek. [7] [32] [33]



Obr. 23: Z leva: FV panel bez závad, FV panel nefunkční, FV panel, který na Flash diagnostice nevykazoval žádné abnormality [7]

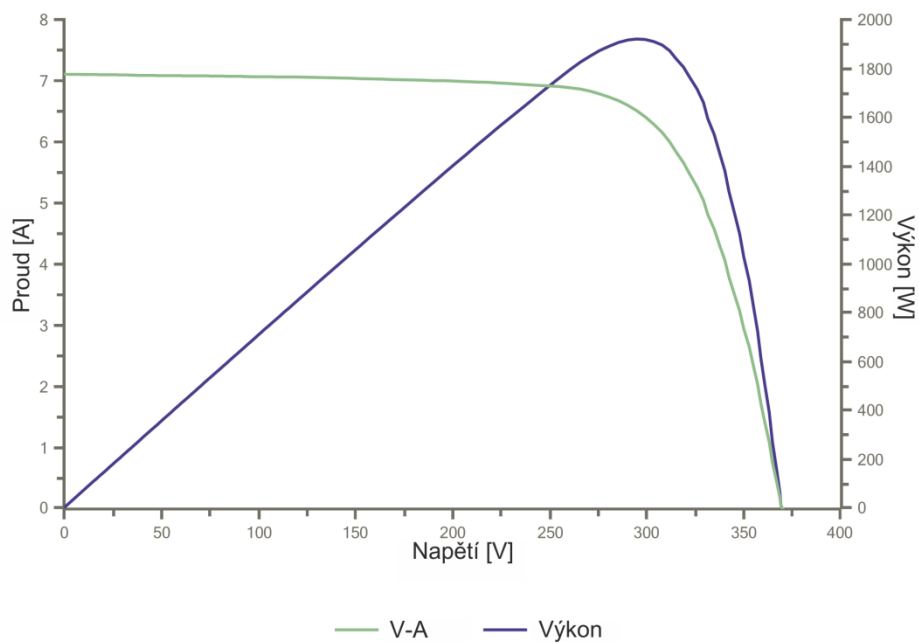
4.4. Měření V-A charakteristik

Měření V-A charakteristik někdy také označováno jako I-V charakteristik. Fotovoltaický článek je v podstatě dioda a tak se poměrně snadno dá změřit jeho V-A charakteristika. Měření může probíhat v terénních podmínkách. Pracovník provádějící diagnostiku potřebuje jen přístup ke konektorům fotovoltaických panelů. Měření probíhá pomocí analyzátoru solárních panelů. Analyzátor solárních panelů je vybaven automatickým scanem. Výstupem z analyzátoru je V-A charakteristika při

pracovních podmínkách. Analyzátor pro konstrukci V-A charakteristiky změří následující hodnoty:

- maximální výkon
- napětí naprázdno
- napětí pro maximální výkon
- zkratový proud
- proud pro maximální výkon

Měření V-A charakteristik ukáže odchylky ve V-A charakteristikách fotovoltaických panelů popř. doplní měření při podezření na aktivovanou překlenovací diodu tzv. vadný string (větev). [7] [32] [33]



Obr. 24: V-A charakteristika

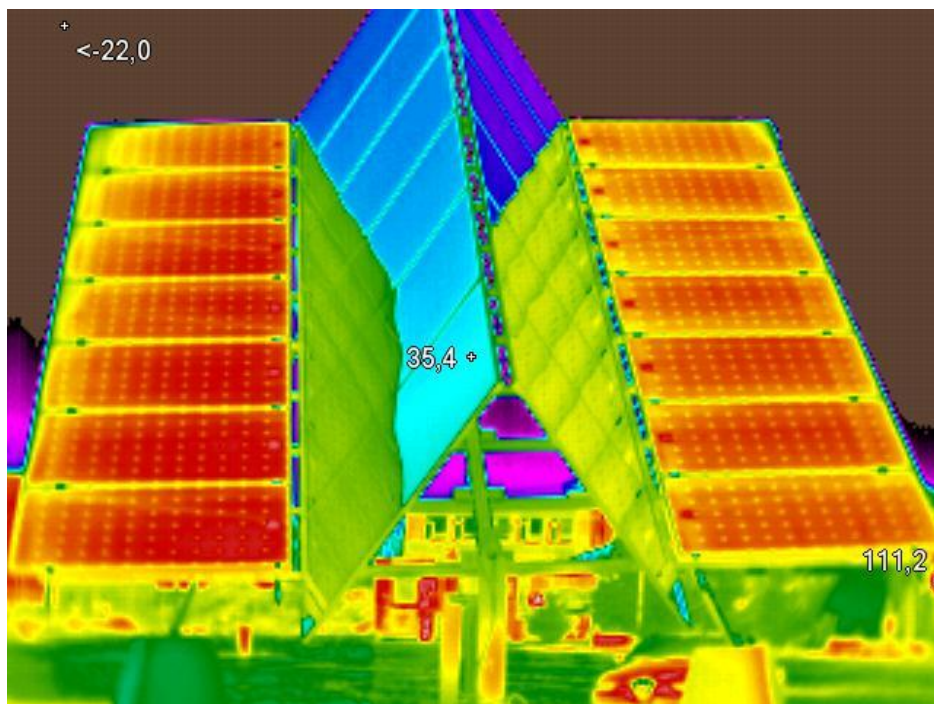
4.5. Diagnostika pomocí termovize

Měření pomocí termovize probíhá terénně a bez omezení provozu na fotovoltaické elektrárně. Termovizní měření je nejjednodušší způsob jakým lze odhalit současné defekty anebo odhalit do budoucna problematická místa. Zároveň, pokud taková měření provádíme pravidelně, můžeme sledovat i jistý trend ve zlepšování nebo v zhoršování stavu fotovoltaických článků. [7] [32] [33]

Termovize snímá obraz v IR spektru pro lidské oko neviditelné. Obraz v IR spektru převádí do tzv. termografu. Zároveň termovizní měření bývá prvotním impulzem pro některá přesnější laboratorní měření. Termovize je rychlá a efektivní metoda pro odhalování problematických míst, která mohou způsobovat ztrátu výkonu fotovoltaické elektrárny. Důležité je výsledný termograf správně interpretovat! [7] [32] [33]

Termovizní měření se využívá zejména u:

- identifikaci vadných pájených spojů mezi jednotlivými fotovoltaickými články
- odhalování vadných článků způsobené předčasným zestárnutím nebo špatnou kvalitou křemíku
- porušené bypass diody

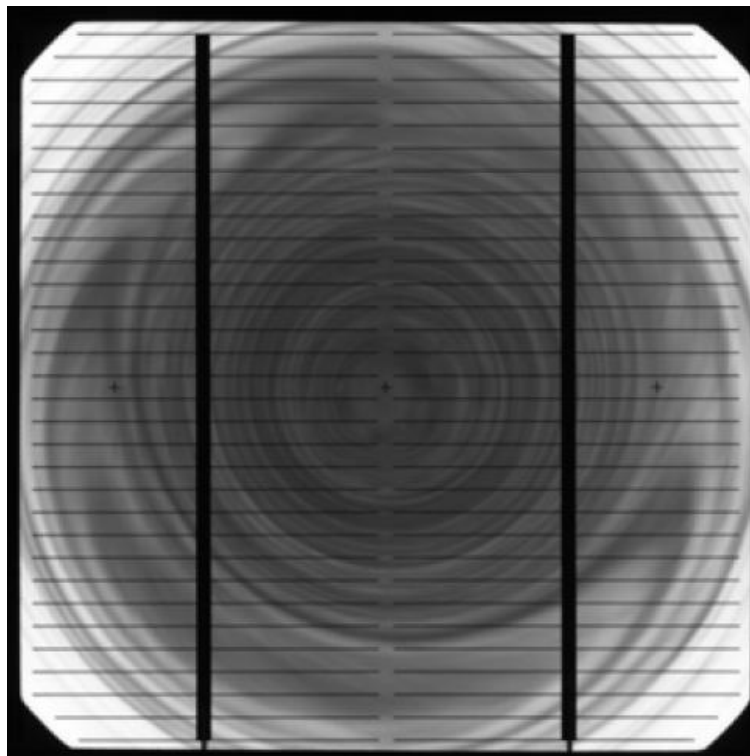


Obr. 25: Termograf pořízený termovizní kamerou

4.6. Metoda LBIC

Metoda LBIC (Light Beam Induced Current) se využívá k vizuálnímu určování lokálních vad a jejich rozložení v ploše. Nad měřeným fotovoltaickým článkem přejíždí v ose X zdroj světla. Poté co zdroj světla dojde na konec vzorku posune se o definovaný krok v ose Y. Jako zdroj světla lze použít laserovou nebo LED diodu, jejíž světlo se pomocí čočky usměrňuje do jediného bodu. K fotovoltaickému článku je připojen A/D převodník proud-napětí, kterým měříme proudovou odezvu. Signál je pak dále posílán do počítače, který sestaví mapu odezvy na světelný paprsek. Výsledná mapa je zobrazována ve stupních šedi. Závady fotovoltaického článku jsou zobrazovány jako barevné anomálie vůči okolní barvě.

Nevýhoda této diagnostiky je ve své zdlouhavosti. Měření fotovoltaického článku může trvat i několik hodin. [35]



Obr. 26: Metoda LBIC [3]

5. Měření

5.1. Princip měření termovizní kamerou

Měření termovizní kamerou představuje zcela zásadní posun v oblasti termografie. Nemáme již pouze lokální výsledky měření, ale naopak díky téměř nekonečné množině měřících míst nám poskytuje mnohem komplexnější výsledky. Díky tomu můžeme hlouběji zkoumat tepelné procesy v měřeném objektu.

Termografie je známa už 30 let, ale díky vědeckotechnickému pokroku se dnes stává mnohem levnější a tedy i dostupnější. S termografií se můžeme setkat v mnoha lidských činnostech např. lékařství, průmyslu a vojenství. [36] [37]

Nejznámější termografickým měření patří termovize. Termovizní měření se provádí pomocí termovizní kamery, která pomocí infradetektoru snímá měřeným objektem vyzařené infračervené záření do prostoru. Infračervené záření je pro lidské oko neviditelné. Infračervené záření je elektromagnetické vlnění částic o vlnové délce od μm až po mm . Infračervené záření vyzařuje do svého okolí každý objekt s teplotou vyšší než 0K (-273°C). Jedná se o bezkontaktní měření. Výstupem takové termovizní kamery je analogový a digitální obraz tzv. termograf. Nedílnou součástí je proto vhodné hardwarové a softwarové vybavení.

Vývoj infrakamer se v poslední době ubírá dvěma cestami. První, kde se vyžaduje extrémní přesnost a rychlost se širokou škálou analytických možností. a ta se používá hlavně ve výzkumu a v diagnostice. Druhá cesta jsou infrakamery ne tak přesné, ale výrazně jednodušší na ovládání a jejich použití.

Při měření termovizní kamerou získáme obraz v infračerveném spektru (pro lidské oko neviditelné). Proto je nutno ještě pořídit klasickým fotoaparátem nebo kamerou ještě jednu tzv. kontrolní fotografii ve viditelném spektru. [36] [37]

Před započítím samotného měření je však třeba určit emisivitu povrchu ε . Emisivita povrchu udává schopnost materiálu vyzařit do prostoru elektromagnetické záření odpovídající teplotě materiálu. Emisivita se pohybuje v intervalu od nuly do jedné.

Přesněji jde o podíl intenzity vyzařování teplotního zářiče a intenzity vyzařování absolutně černého tělesa o stejné teplotě. Emisivita dosahuje hodnoty

jedna pro tzv. absolutně černé těleso. Absolutně černé těleso je pojem z termodynamiky. V praxi se realizuje jako malý otvor do velké dutiny. Ideálně by ústí takového otvoru mělo být ohraničeno ostrým břitem. Pak platí Stefanův-Boltzmannův zákon, podle kterého intenzita vyzařování z povrchu černého tělesa (emitovaný zářivý tok dělený obsahem vyzařující plochy) je roven násobku Stefanovy-Boltzmannovy konstanty $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ a čtvrté mocniny (absolutní) teploty tělesa. Povrchy běžných těles mají emisivitu nižší než jedna. Běžně se emisivita nastavuje v rozmezí 0,9 – 0,99. Výjimku tvoří čisté kovové povrchy zde se emisivita pohybuje kolem hodnoty $\varepsilon = 0,1$. [36] [38]

Výpočet Stefan-Boltzmannův zákona by podle [39] pak vypadal následovně:

$$u = \int_0^{\infty} \frac{8\pi hc}{\left(\frac{hc}{e k T \lambda_{-1}}\right)} \cdot \frac{d\lambda}{\lambda^5} = 7,56464 \cdot 10^{16} \cdot [T(K)]^4 \quad (5.1)$$

kde:

u - hustota zářivé energie v jednotce objemu [$J \cdot m^{-3}$]

T - termodynamická teplota [K]

h - Planckova konstanta $h = 6,62606876 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$

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

k - Boltzmannova konstanta $k = 1,3806503 \cdot 10^{-23}$

λ - vlnová délka [m]

Na povrchu pevné látky nebo kapaliny, v níž je přítomno záření o hustotě energie podle předešle výše uvedeného vztahu, uniká rychlostí světla tepelné záření ven. Je-li tento povrch rovný, lze unikající záření jednoduše spočítat podle vztahu (5.2):

$$i = \frac{1}{4} u \cdot c = \sigma \cdot T^4 \quad (5.2)$$

kde:

$\sigma = 0,25 \cdot 7,56464 \cdot 10^{-16} \cdot c = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ což je Stefanova-Boltzmannova (někdy jen Stefanova) konstanta.

Uvedený vztah (5.2) je druhý tvar Stefanova-Boltzmannova zákona, který je v technické praxi mnohem známější. Vztah (5.2) udává intenzitu vyzařování z povrchu absolutně černého tělesa. Pokud těleso není absolutně černé (tzn. že dopadající světlo částečně odráží zpět do prostoru) pak vztah (5.2) dostává tvar:

$$i = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (5.3)$$

Vztah (5.3) lze přepsat do tvaru:

$$\varepsilon = \frac{i}{\sigma \cdot T^4} \quad 5.4$$

kde:

ε je poměrná emisivita tělesa, tato nabývá hodnot od 0 do 1. Pro leštěné kovy je hodnota pod 0,1. Nekovové povrchy nebo kovy s hrubým oxidovaným povrchem mají poměrnou emisivitu většinou nad 0,9. [36] [39]

Výrobci termovizních kamer ke kamerám běžně přikládají tabulku emisivit všech běžných povrchů, s kterými se setkáváme v běžném životě.

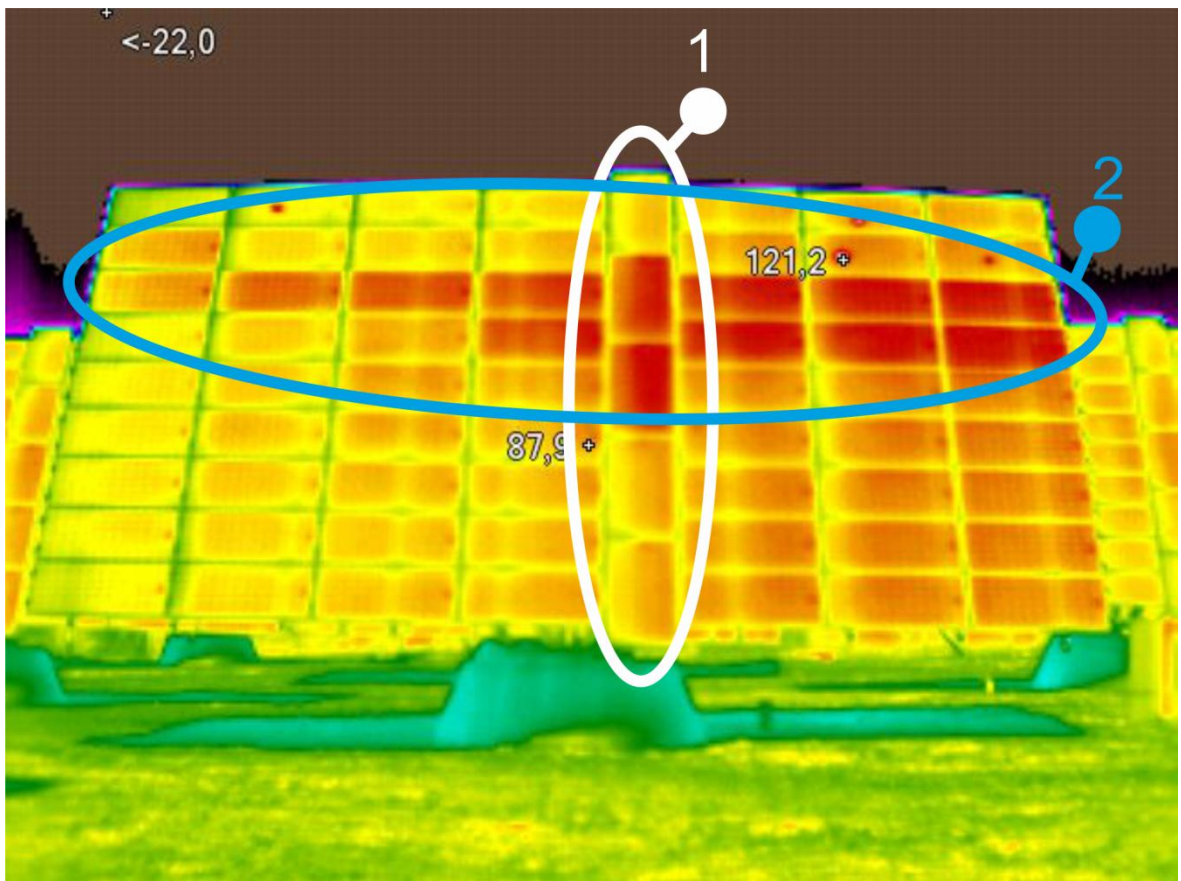
Tabulka 1: Příklady emisivit povrchů různých materiálů

Povrch	ε [–]
Měď, leštěná	0,01
Zinek, plech	0,20
Barva stříbrná	0,31
Půda, zmrzlá	0,93
Voda	0,98

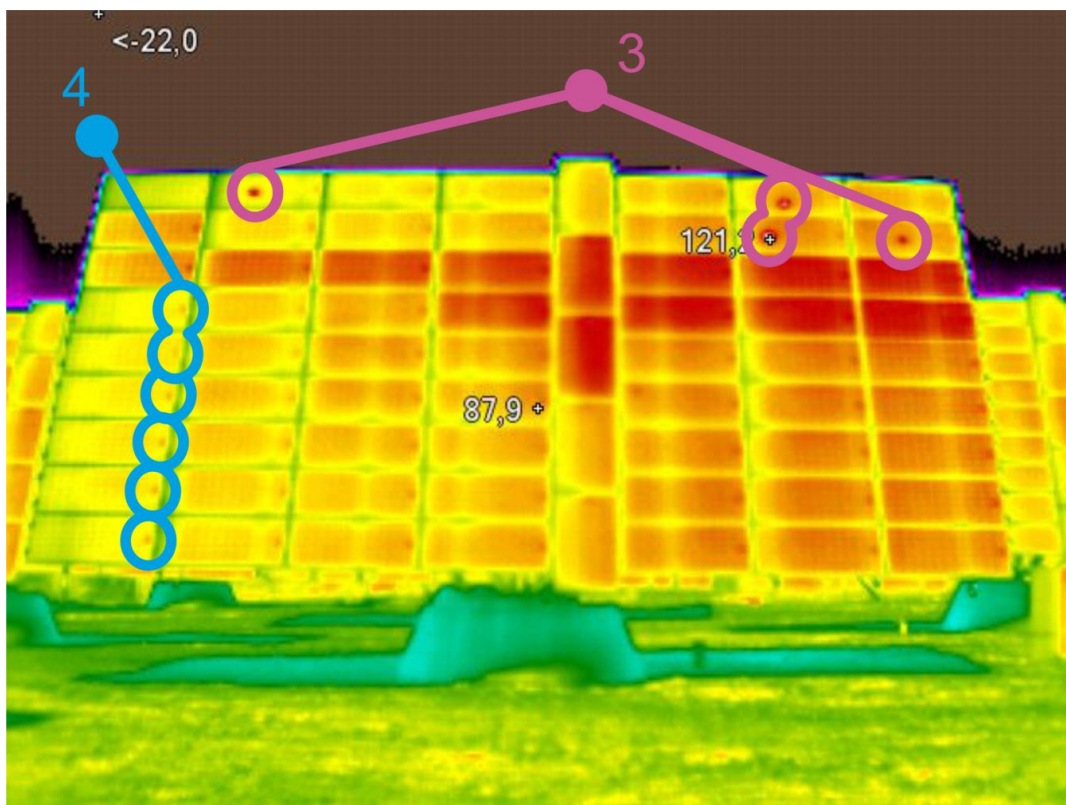
Další faktor, který ovlivňuje určení emisivity povrchu je v jakém úhlu se na takový povrch termovizní kamerou díváme. Pokud se na povrch díváme termovizní kamerou hodně z boku může se nám zdát méně teplý než ve skutečnosti je. Platí, ostatně jako u všech fyzikálních měření, že na měřený objekt se díváme kolmo. [36] [38]

5.2. Interpretace termografů

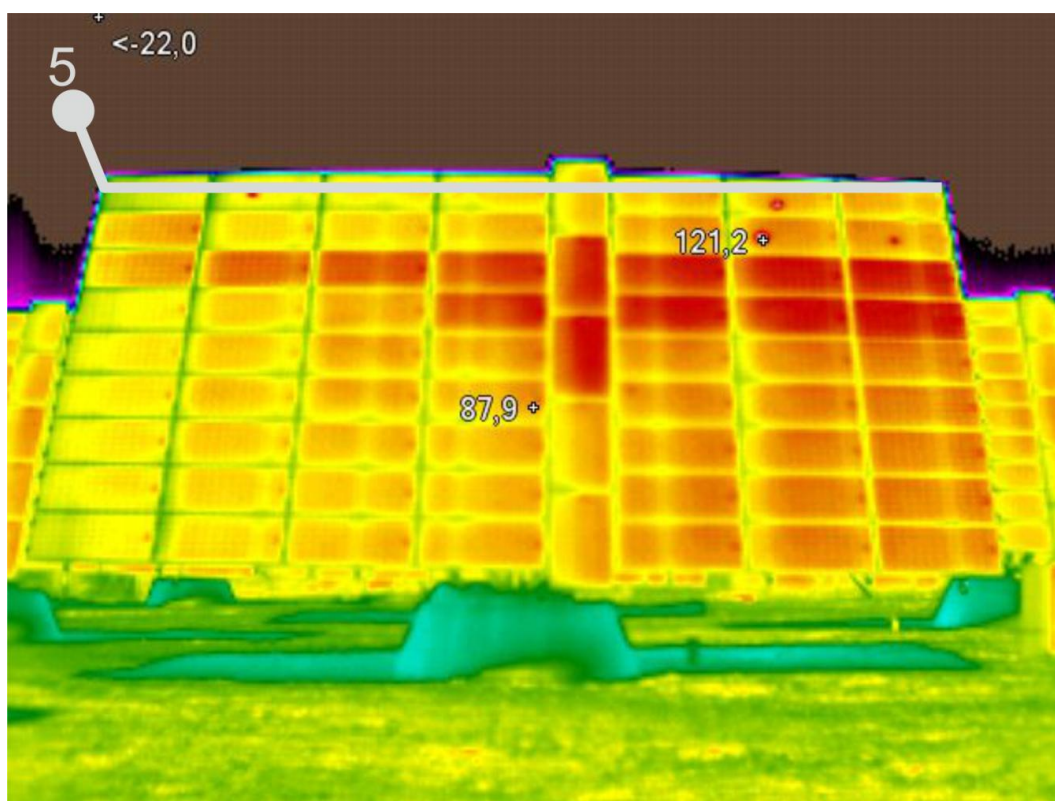
Na prvním termografu je vidět hned několik zajímavých pasáží. Pro lepší přehlednost jsou nejzajímavější pasáže barevně okroužkovány a očíslovány čísly 1 – 5. Na uvedeném termografu je ovšem vidět tolik chyb, že je uveden třikrát.



Obr. 27: Termograf solárního generátoru



Obr. 28: Termograf solárního generátoru



Obr. 29: Termograf solárního generátoru

1. Špatná orientace - fotovoltaické panely otočené o 90° je doporučováno, aby fotovoltaické panely v solárním generátoru měly stejnou orientaci.
2. jiná teplota FV panelů – tyto FV panely nejsou stejných elektrických parametrů typu jako ostatní.
3. Teplejší místa ve FV panelech – vadné fotovoltaické články, z kterých jsou panely složeny. Tyto vadné fotovoltaické články se mění z generátorů na spotřebič, a které vyzařují tepelnou energii do okolí.
4. Pravidelně se opakující teplejší místa FV panelů – instalační krabice na zadní straně fotovoltaického panelu. Uvnitř krabic jsou spojeny solární kabely s fotovoltaickým panelem a jsou zde přechodové odpory, které také generují tepelnou energii.
5. Výrazně vyšší teplota jedné strany FV generátoru – Referenční šedivá linka je kolmá k hraně termografu. Celá konstrukce FV generátoru je vyboulená, proto na jednu stranu dopadá více slunečního záření než na opačnou stranu.

Nápravou by mohlo být jiné konstrukční provedení stojanu. Nový stojan by měl mít takovou velikost, aby se na něj vešlo osm panelů vodorovně. Nikoliv jako je tomu u tohoto stojanu, že jedna řada panelů musela být otočena o 90°. Stojan by měl být zhotoven z masivnějšího materiálu, aby unesl hmotnost všech fotovoltaických panelů. Tento stojan je pravděpodobně poddimenzovaný, a proto dochází k jeho průhybu. Dále by měl investor vyreklamovat u dodavatele fotovoltaické panely s vadnými fotovoltaickými články.

Toto měření nebylo mnou prováděno a termografy jsem dostal od svého vedoucího diplomové práce. Uvedená doporučení jsou pouze příklady, jak by se mohlo postupovat při nápravě problémů vzniklých na fotovoltaickém systému

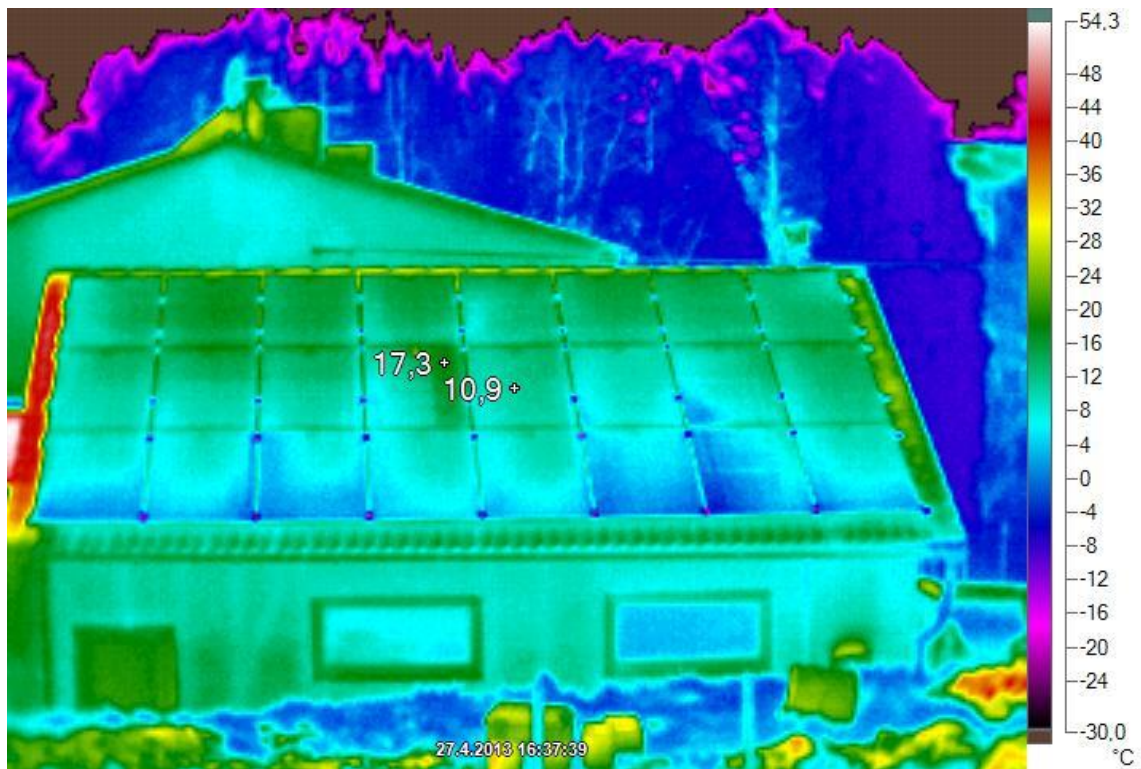
5.3. Měření reálného fotovoltaického systému

5.3.1. Fotovoltaická elektrárna Radnice

Lokalita:	Radnice, okres Rokycany
GPS:	49°51'12.490"N, 13°36'4.425"E
Orientace:	jihovýchod
Instalovaný výkon:	5040 Wp
Technologie FV panelů:	Polykrystalický křemík
Teplota okolí:	15,5 °C
Vlhkost:	75%
Termovizní kamera:	Fluke Ti55
Emisivita	$\varepsilon = 0,34$

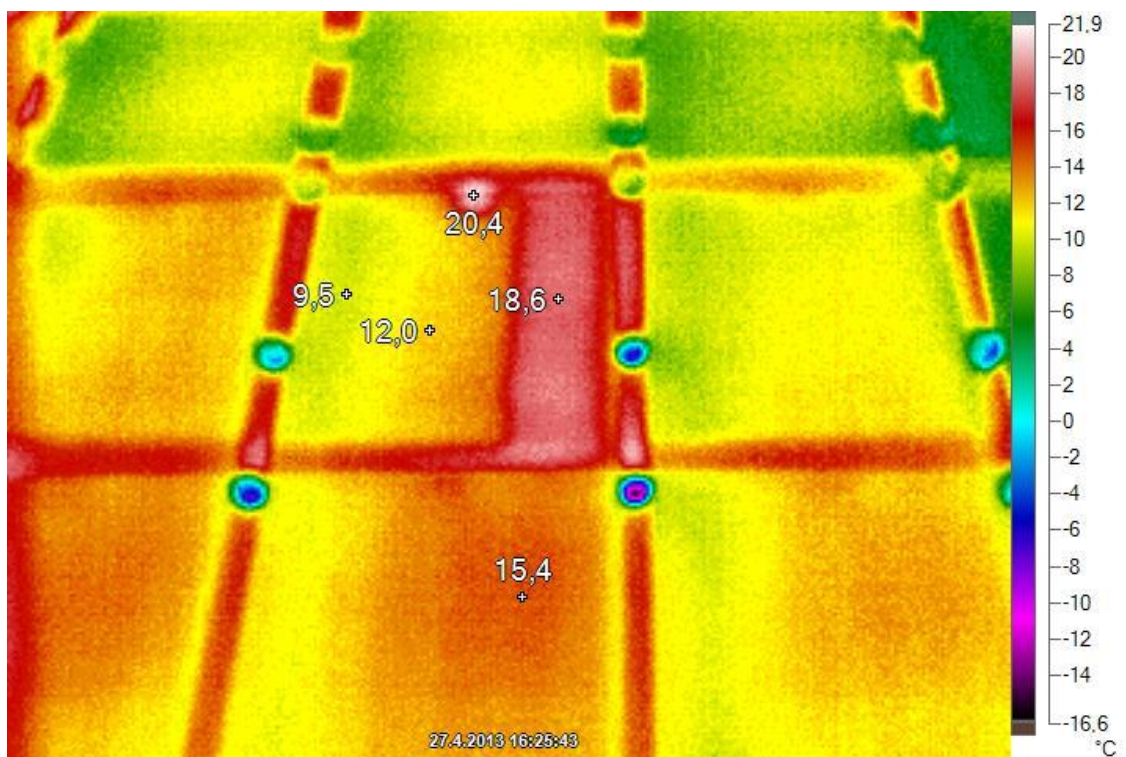


Obr. 30: Reálná situace na FVE Radnice



Obr. 31: Termograf FVE Radnice

Fotovoltaický generátor čítající 24 solárních panelů je rozdělen do dvou větví. Každá větev obsahuje 12 panelů.

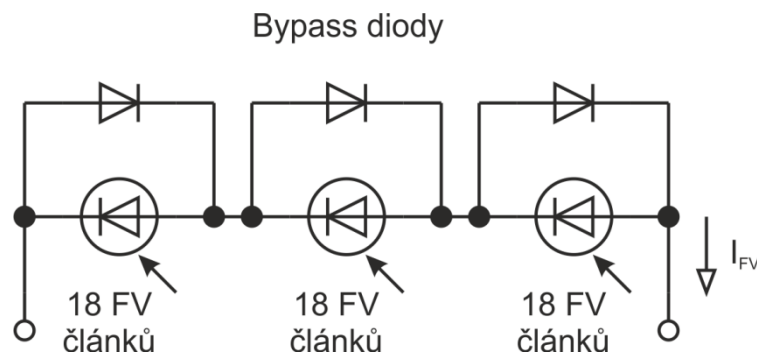


Obr. 32: Poškozená třetina FV článku

Na výše uvedených obrázcích obr. 31 a obr. 32 je vidět, že jeden fotovoltaický panel má jednu třetinu výrazně teplejší. Instalační krabice na zadní straně fotovoltaického panelu také vykazuje vyšší teplotu.

Teplejší třetina fotovoltaického článku je dána pravděpodobně poškozenou nebo propustně zapojenou bypass diodou. Jedna třetina fotovoltaických článků zapojené do série v tomto fotovoltaickém panelu se chová jako spotřebič. Fotovoltaické články přeměňují spotřebovanou energii na teplo. Tento vadný fotovoltaický panel pravděpodobně svou energií dotují i ostatní panely v celé větvi. Na snímku je vidět výrazný nárůst teploty v okolí krabice na zadní straně fotovoltaického panelu. Nárůst teploty je dán většími proudy, které touto oblastí protékají. Na tomto nárůstu teploty se dále podílí také přechodový odpor mezi připojením fotovoltaického panelu a solárními kabely.

Vadný fotovoltaický panel pracuje na dvě třetiny svého maximálního výkonu. Jedná se o pokles výkonu z 210 *Wp* na 140 *Wp*.



Obr. 33: Zapojení bypass diod měřeného FV panelu [9]

Bypass diody se používají, aby se snížil vliv zastínění fotovoltaických článků.

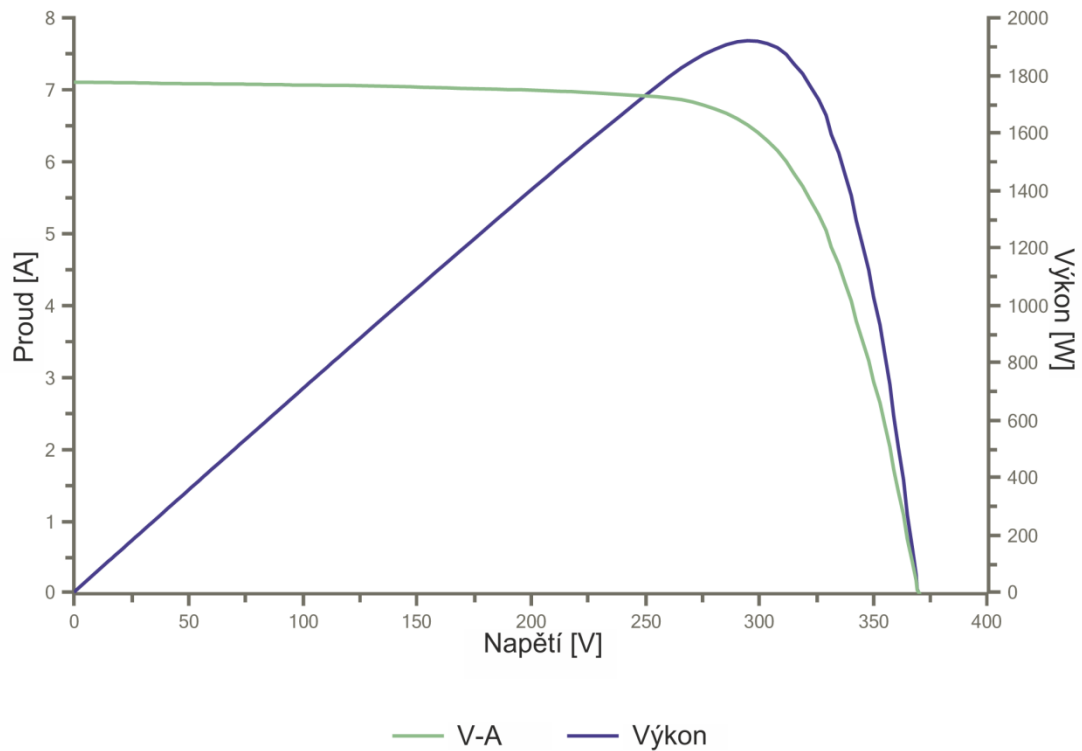
Později bylo provedeno měření V-A analyzátozem. Měření neprobíhalo na jednotlivých panelech, ale na celé větvi. Hodnoty proto byly přepočítávány pro celou větev. Měřením pomocí V-A analyzátoru defekt na fotovoltaickém panelu nebyl vyvrácen, ale ani potvrzen. Pro přesnější určení defektu fotovoltaického panelu by byla potřeba demontáž, abychom se dostali k elektrické instalaci a mohli tak provést detailnější diagnostiku.

Tabulka 2: Měření V-A analyzátozem na zdravé větvi FV generátoru

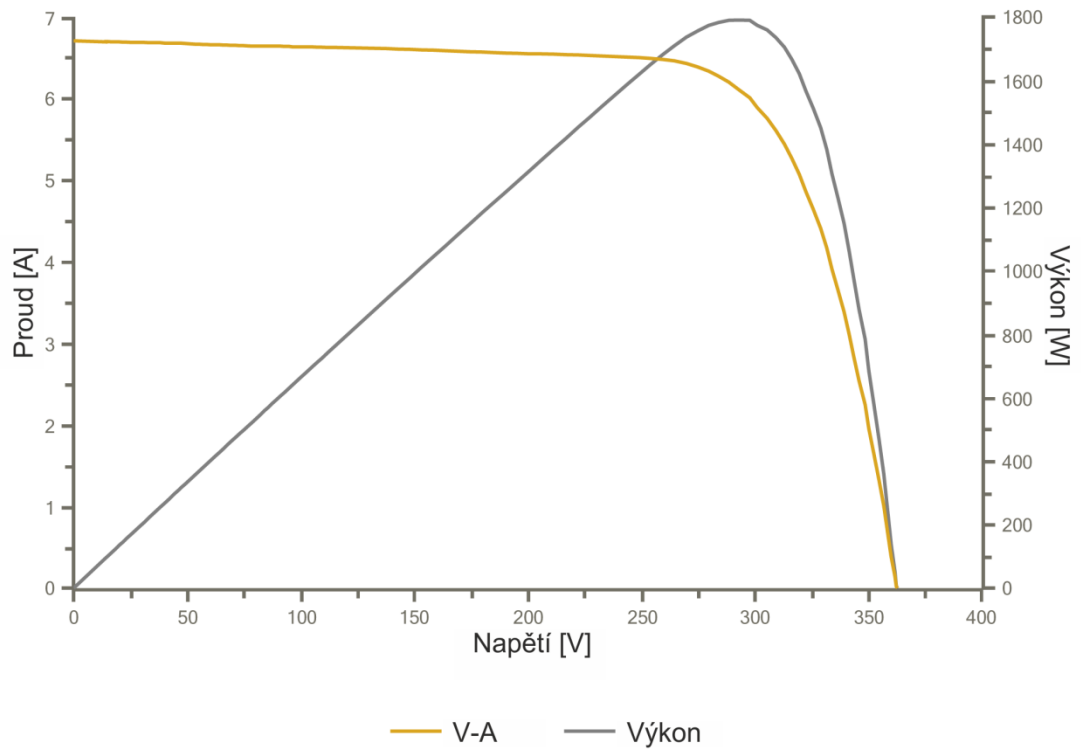
Měření	P_{max} [W]	V_{OC} [V]	V_{mpp} [V]	I_{mpp} [A]	I_{SC} [A]	Osvětlení [W/m ²]	Teplota [°C]	FF
1	1911,11	370,80	295,70	6,46	7,05	634	29,8	73
2	1920,31	369,80	295,16	6,51	7,10	641	31,1	73
3	1906,13	369,10	294,61	6,47	7,06	640	31,9	73

Tabulka 3: Měření V-A analyzátozem na větvi s defektním FV panelem

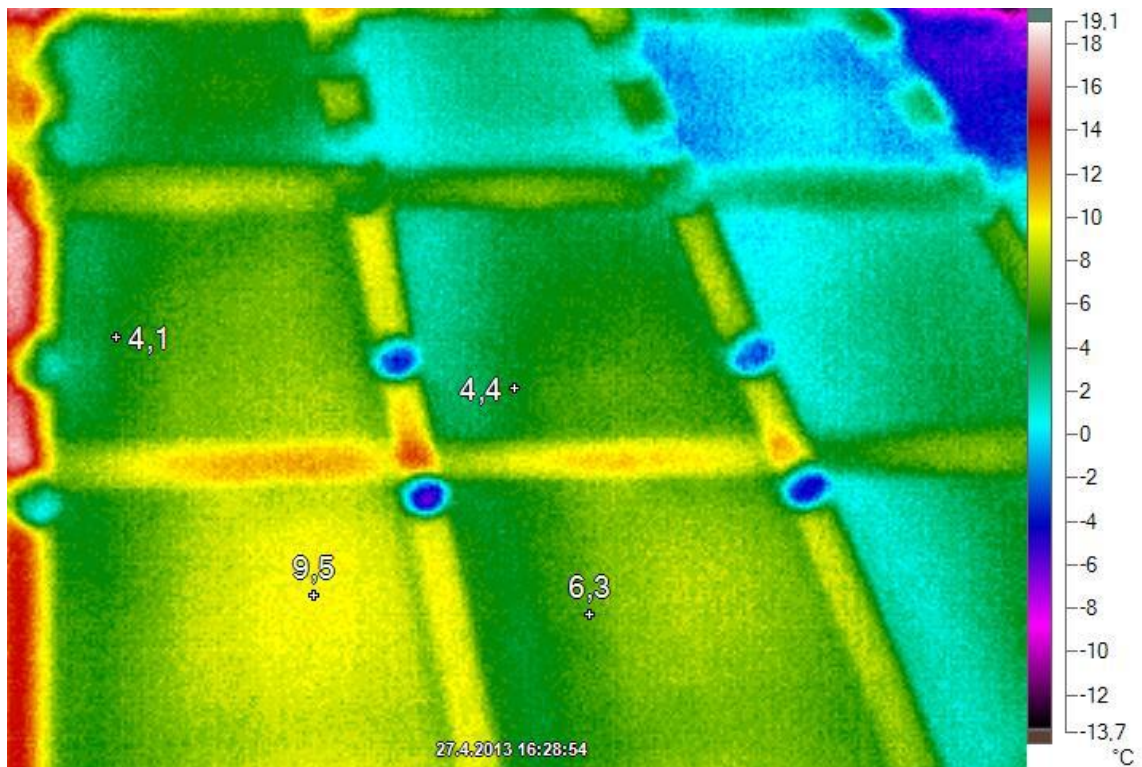
Měření	P_{max} [W]	V_{OC} [V]	V_{mpp} [V]	I_{mpp} [A]	I_{SC} [A]	Osvětlení [W/m ²]	Teplota [°C]	FF
4	1790,34	362,90	292,97	6,11	6,71	608	29,0	74
5	1741,06	362,30	291,88	5,97	6,59	594	29,5	73
6	1729,27	360,90	290,78	5,95	6,60	592	30,3	73
7	1690,60	359,80	289,14	5,85	6,47	572	31,1	73



Obr. 34: V-A charakteristika a výkon zdravé větve FV generátoru

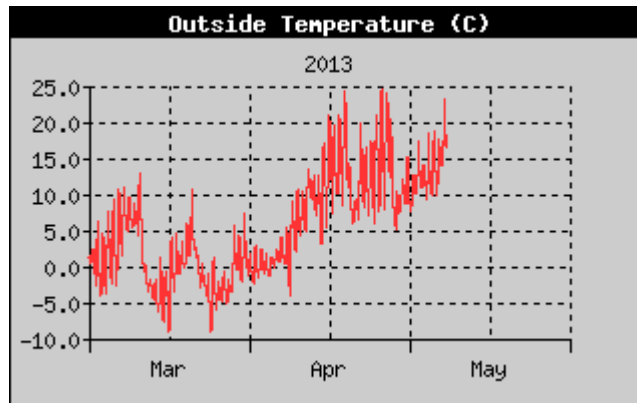


Obr. 35: V-A charakteristika a výkon ve větvi s defektním FV panelem



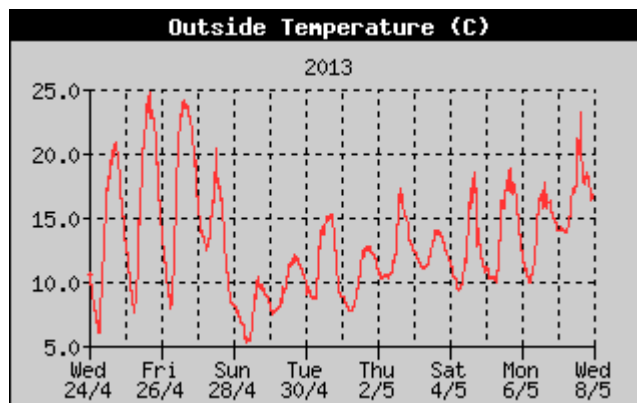
Obr. 36: Termograf zdravé větve FVE

Měření probíhalo v časové tísní z důvodu termínu odevzdání diplomové práce a rozhodně neprobíhalo za ideálních meteorologických podmínek. Okolní teplota 15,5 °C a náhle se měnící počasí nezaručovalo dosažení relevantních výsledků.



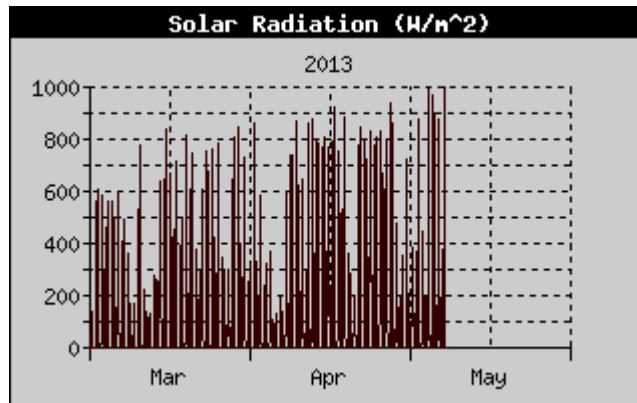
Graf 4: Průběh venkovních teplot od března 2013 do května 2013 [40]

Z grafu 4 je vidět, že počasí opravdu nebylo ideální. Venkovní teploty zaznamenaly přechod přes hranici 20°C pouze v několika málo dnech. Z grafu 4 je také vidět, že pouze jeden den v měsíci dosáhl teploty 25 °C. Teplota 25 °C je jeden z faktorů, které jsou ideální pro diagnostiku fotovoltaických panelů.



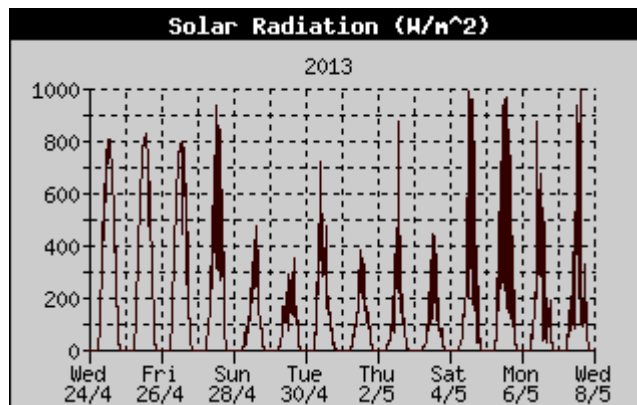
Graf 5: Průběh venkovních teplot od 24. 4. do 8. 5. [40]

Podíváme-li se graf 5, který ukazuje detailněji průběh venkovních teplot, tak zjistíme, že v den měření 27. 4. teplota dosahovala v krátkém časovém úseku teplot nad 20 °C. Pak nastává strmý propad až pod 10 °C.



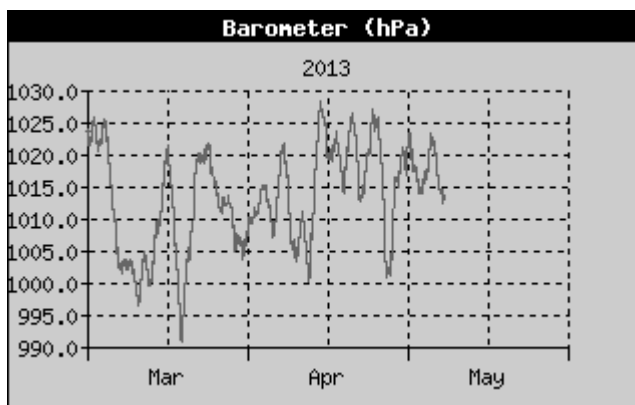
Graf 6: Průběh intenzity osvětlení od března 2013 do května 2013 [40]

Na grafu 6 je vyobrazen průběh intenzity osvětlení. Intenzita osvětlení zřídka přesáhla hodnotu $800 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. Ideální intenzita osvětlení pro diagnostiku je hodnota $1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. Hodnota $1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ byla dosažena pouze dvakrát v měsíci květnu.



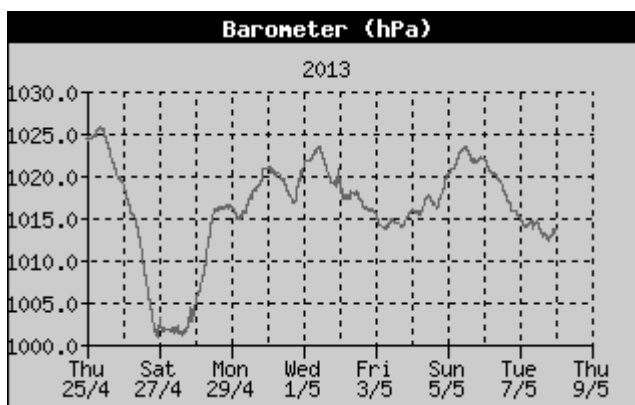
Graf 7: Průběh intenzity osvětlení od 24.4. do 8.5. [40]

Podrobnější průběh intenzity osvětlení je na grafu 7. V oblasti mezi 26.4 a 28. 4. je vidět propad intenzity osvětlení až k hodnotě $400 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. Tato hodnota je naprosto nevyhovující.



Graf 8: Průběh atmosférického tlaku od března 2013 do května 2013 [40]

Atmosférický tlak je důležitý k tomu, abychom zjistili kolik bylo oblačnosti. Pokud je atmosférický tlak nízký, pak je oblačnosti hodně. Vysoký atmosférický tlak naopak zaručuje, že oblačnost nebude žádná. Normální atmosférický tlak má hodnotu 1013,25 hPa. Z grafu 8 je vidět, že až do poloviny dubna byl atmosférický tlak častěji pod hodnotou 1013,25 hPa. Oblačnosti bylo opravdu hodně a tedy pro nedostatek přímého slunečního světla nešlo měřením získat relevantní údaje.



Graf 9: Průběh atmosférického tlaku od 25.4. do 8.5. [40]

Z tohoto podrobného grafu 9 je velmi názorně vidět pokles atmosférického tlaku v den měření. Zatímco ve čtvrtek 25. 4. se dostává atmosférický tlak i nad hodnotu 1025 hPa náhle nastává strmý pád a tedy i nárůst oblačnosti. V den měření 27. 4. se atmosférický tlak dostává těsně nad hodnotu 1000 hPa. Takovýto atmosférický tlak zaručuje velkou oblačnost a tedy i velmi málo přímého slunečního světla.

6. Závěr

Diagnostika fotovoltaického systému pomocí termovize je pouze jednou z diagnostických metod, kterými můžeme fotovoltaický systém kontrolovat. Na rozdíl od všech používaných metod poskytuje metoda termovize rychlé a relativně přesné výsledky. Významnou výhodou této diagnostiky je, že není potřeba fotovoltaický systém rozpojovat a odstavovat. Měření se provádí přímo v terénu u fotovoltaické elektrárny. Pokud takové měření provádíme pravidelně lze sledovat určitý trend stavu fotovoltaického systému. Díky sériové výrobě a stále se zvyšující konkurenci na trhu s termovizními kamerami, má jejich cena klesající trend. Termovizní kamery se tak stávají stále dostupnějšími. Obsluha termovizních kamer není dnes již tak složitá. Problémem u termovizní diagnostiky fotovoltaického systému je dosažení geometrie kolmého pohledu na měřený fotovoltaický článek. Pokud situace dovoluje lze úspěšně měřit i ze zadní strany fotovoltaických panelů. Pokud ale tomu tak není, pak je třeba hledat vyvýšená místa a pokusit se co nejvíce přiblížit kolmému pohledu. Emisivita materiálu se nemusí nastavovat u tohoto měření přesně na určitou hodnotu. Důležité je výsledný termograf pořízený termovizní kamerou správně interpretovat!

Měření na reálném fotovoltaickém systému neprobíhalo za ideálních meteorologických podmínek. Okolní teplota $15,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ a nízká intenzita osvětlení pod hodnotou $450\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. Takovéto podmínky se ani neblíží ideálním. Ideální podmínky pro měření FVS jsou teplota $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ a intenzita osvětlení $1000\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. Pokles atmosférického tlaku na hodnotu kolem 1000 hPa zaručoval nárůst oblačnosti a tedy úbytek přímého slunečního světla.

Navzdory nepříznivým meteorologickým podmínkám byla ale fotovoltaická elektrárna změřena. Fotovoltaická elektrárna se skládá z 24 kusů fotovoltaických panelů, které jsou rozděleny do dvou větví. Každá větev obsahuje 12 kusů fotovoltaických panelů. Na druhé větvi byla objevena závada na fotovoltaickém panelu. Jedná se pravděpodobně o defekt na bypass diodě obr. 33. K tomuto závěru mě vede fakt, že celá jedna třetina panelu má vyšší teplotu než zbývající dvě třetiny fotovoltaického panelu. Také v okolí instalační krabice, je vidět nárůst teploty. V instalační krabici jsou konektory k připojení fotovoltaického panelu k solárním kabelům. Nárůst teploty v této oblasti je pravděpodobně způsoben většími proudy,

kteřé touto oblastí protékají. Větší proudy zvyšují přechodový odpor, který na konektorech je a tím vzniká nárůst teploty. Vadná oblast fotovoltaického panelu se tedy nechová jako generátor, ale jako spotřebič. Tento spotřebič místo, aby dodával elektrickou energii, spotřebovává elektrickou energii a přeměňuje ji na teplo. Tato tepelná energie je pak vidět na výsledném termografu obr. 31 a obr. 32. Panely použité v tomto fotovoltaickém systému jsou o výkonech 210 Wp . V tomto případě se tedy jedná o pokles výkonu fotovoltaického panelu z hodnoty 210 Wp na hodnotu 140 Wp . Fotovoltaický systém byl pak ještě jednou měřen V-A analyzátozem. Kvůli technickému řešení umístění panelů na střeše nebylo možné měřit každý panel zvlášť. Měřila se proto vždy jen celá větev. Výsledné hodnoty proto jsou přepočty panelů na větev. Toto měření defekt na panelu ve větvi dvě nepotvrdilo. Opět je, ale nutné podotknout, že ani toto měření neprobíhalo za ideálních podmínek. Svítivost se pohybovala od hodnoty $572 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ do hodnoty $641 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. Pro potvrzení nebo naopak vyvrácení bych doporučoval další diagnostiku při lepších meteorologických podmínkách. Měření za lepších meteorologických podmínek by mohlo nastat v měsících červnu až srpnu. Termín odevzdání této diplomové práce byl začátek měsíce května. Jednalo by se o měření po termínu odevzdání diplomové práce.

Na závěr poznatek z praxe diagnostiky fotovoltaických systémů. Tento poznatek je ale negativní. Málokterý investor chce znát pravdu o skutečném stavu svého fotovoltaického systému. Mnoha investorům zřejmě stačí, že jejich fotovoltaická elektrárna vyrábí nějakou elektrickou energii. Fakt, že by jejich fotovoltaická elektrárna mohla pracovat optimálněji, není pro ně zatím zajímavý. Nenutí je k tomu ani případná možnost urychlení návratnosti jimi vložených nemalých investic do výstavby.

Použitá literatura a informační zdroje

- [1] HASELHUHN, Ralf. *Fotovoltaika – Budovy jako zdroj proudu*, 1. vyd. Ostrava: HEL, 2010. 176 s. ISBN 978-80-86167-33-6
- [2] BĚLÍK, Milan. *Přednášky SOES*, Plzeň: ZČU FEL, [2011]
- [3] JANDOVÁ, Kristýna. *Diagnostické metody plošného rozložení defektů solárních článků* [online]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=10267 [cit. 23.4.2013]
- [4] Skupina ČEZ. *Fotovoltaický jev* [online]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/eede/content/microsites/solarni/f8.htm> [cit. 16.4.2013]
- [5] GEŠNÁBEL, Marek. *Meranie na fotovoltických panelech* [online]. Dostupné z: <http://uloz.to/x7aAjCKw/fotovoltaika-rar> [cit. 16.4.2013]
- [6] Netcam.cz. *Denní a noční vidění síťových kamer* [online]. Dostupné z: <http://www.netcam.cz/encyklopedie-ip-zabezpeceni/denni-a-nocni-videni.php#content> [cit. 16.4.2013]
- [7] KUBÁČ, Stanislav. *Diagnostika FV modulů a FVE* [online]. Dostupné z: <http://www.abot.cz/cs/sluzby/diagnostika-fv-modulu-a-fve> [cit. 22.4.2013]
- [8] Materiálová věda. *Kde se bere monokrystalický křemík? Tažení monokrystalů křemíku Czochralského metodou* [online]. Dostupné z: <http://materialovaveda.blogspot.cz/2011/07/kde-se-bere-monokrystalicky-kremik.html> [cit. 16.4.2013]
- [9] GM Electronic. *Monokrystalický solární panel TPS-105S 10W, 16,8V, 0,59A* [online]. Dostupné z: <http://www.gme.cz/solarni-panely-do-20w/monokrystalicky-solarni-panel-tps-105s-10w-16-8v-0-59a-p522-044/> [cit.: 17.4.2013]
- [10] Hofman elektro. *Fotovoltaický solární panel polykrystalický GWL/Power SCHUTTEN Poly 240Wp /7,67A (MPPT 30V), ANTIDUMP* [online]. Dostupné z: http://www.elektro-hofman.cz/index.php?sekce=detail&id_zbozi=875082 [cit. 17.4.2013]
- [11] Sundial Energy. *Solar Powered Bus Shelters* [online]. Dostupné z: http://www.sundialenergy.com/se_css_pages/product_bus_shelt.htm [cit. 18.4.2013]

- [12] StavbaWEB. *Fasádní moduly ProSol TF s tenkovrstvou fotovoltaikou* [online]. Dostupné z: <http://www.stavbaweb.cz/Produkty/Fasadni-moduly-ProSol-TF-s-tenkovrstvou-fotovoltaikou.html> [cit. 23.4.2013]
- [13] Solar Frontier. *Produktürbesicht* [online]. Dostupné z: <http://www.solar-frontier.eu/index.php?id=17> [cit. 18.4.2013]
- [14] WEITER, Martin. *Vývoj a aplikace organických fotovoltaických systémů* [online]. Dostupné z: <http://www.solartechnika.sk/solartechnika-22010/vyvoj-a-aplikace-organickych-fotovoltaickych-systemu.html> [cit. 18.4.2013]
- [15] Votum. *CIGS technologie* [online]. Dostupné z: <http://www.votum.cz/technologie-cigs/> [cit. 18.4.2013]
- [16] GROHMANN, Jan. *Plastické solární články – cesta pro budoucnost?* [online]. Dostupné z: <http://www.ekobydleni.eu/solarni-energie/plasticke-solarni-clanky-%E2%80%93-cesta-pro-budoucnost> [cit. 18.4.2013]
- [17] GAUDIANA, Rusell. *Organic Photovoltaics* [online]. Dostupné z: <http://www.photonics.com/Article.aspx?AID=33901> [cit. 18.4.2013]
- [18] ČADA, Roman. *Jakou fotovoltaickou elektrárnu zvolit na dům?* [online]. Dostupné z: <http://www.solartechnika.sk/solartechnika-12011/jakou-fotovoltaickou-elektrarnu-zvolit-na-dum.html> [cit. 18.4.2013]
- [19] CNE. *Fotovoltaické systémy pro výrobu elektřiny* [online]. Dostupné z: <http://www.cne.cz/fotovoltaicke-systemy/uvod-do-fv-systemu/> [cit. 16.4.2013]
- [20] QUASHING, Volker. *Photovoltaic systems* [online]. Dostupné z: <http://www.volker-quaschning.de/articles/fundamentals3/index.php> [cit. 1.5.2013]
- [21] Czech RE Agency. *Fotovoltaický střídač – účinnost není vše* [online]. Dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/5571-fotovoltaicky-stridac-ucinnost-neni-vse> [cit. 18.4.2013]
- [22] HRŇA, Lukáš. *Fotovoltaický systém pro ostrovní provoz* [online]. Dostupné na: https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/3340/fotovoltaicky_system_pro_ostrovni_provoz_Lukas_Hrna.pdf?sequence=1 [cit. 18.4.2013]

- [23] HNILICA, Pavel. *Jaké akumulátory (trakční baterie) budu potřebovat pro solární ostrovní systém* [online]. Dostupné z: <http://www.solarnimoduly.cz/jaky-akumulator.html> [cit. 20.4.2013]
- [24] MURTINGER, Karel. *Ukládání elektřiny z fotovoltaických a větrných elektráren* [online]. Dostupné z: <http://www.nazeleno.cz/energie/energetika/ukladani-elektřiny-z-fotovoltaických-a-větrných-elektřin.aspx> [cit. 20.4.2013]
- [25] HNILICA, Pavel. *Kabely, konektory, svorky* [online]. Dostupné z: <http://www.solarnimoduly.cz/propojeni-a-montaz-panelu.html> [cit. 20.4.2013]
- [26] TermoWatt. *Fotovoltaika pro chaty* [online]. Dostupné z: http://www.termowatt.cz/fotovoltaicke-elektřiny/FVE_pro_chaty.aspx [cit. 20.4.2013]
- [27] TZB info. *Ucelený systém kabelů a konektorů pro fotovoltaiku* [online]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/5145-uceleny-system-kabelu-a-konektoru-pro-fotovoltaiku> [cit. 20.4.2013]
- [28] Encables. *Výhody použití speciálních solárních kabelů* [online]. Dostupné z: http://www.encables.cz/data/Vyhody_solarnich_kabelu.pdf [cit. 20.4.2013]
- [29] GM Electronic. *Solární kabel 1X4 mm² červený HELUKABEL* [online]. Dostupné na: <http://www.gme.cz/kabely-pro-solarni-techniku/solarni-kabel-1x4-mm2-cervený-helukabel-p653-032/> [cit. 20.4.2013]
- [30] SLÁMA, Pavel. *EPIC SOLAR – světová elita mezi konektory pro fotovoltaická zařízení* [online]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=37151 [cit. 22.4.2013]
- [31] LappGroup Česká republika. *EPIC® SOLAR 4 M* [online]. Dostupné z: <http://lappczech.lappgroup.com/produkty/katalog/epic-prumyslove-konektory/solarni-konektory/epic-solar-4/epic-solar-4-m.html> [cit. 22.4.2013]
- [32] KUBÁČ, Stanislav. *Kontrola kvality fotovoltaických modulů* [online]. Dostupné z: <http://www.solartechnika.sk/solartechnika-12011/kontrola-kvality-fotovoltaických-modulů.html> [cit. 22.4.2013]
- [33] TZB-energ. *Měření fotovoltaiky termokamerou* [online]. Dostupné z: <http://www.tzb-energ.cz/mereni-fotovoltaiky.html> [cit. 22.4.2013]

- [34] Spire Solar. *Spi-Sun Simulator 5600SLP Blue* [online]. Dostupné z: <http://www.spirecorp.com/spire-solar/solar-manufacturing-equipment/test-module-performance/Spi-Sun-Simulator-5600SLP-Blue.php> [cit. 20.4.2013]
- [35] PALLA, Martin. *Pracoviště pro měření solárních panelů v řízeném prostředí* [online]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=42858 [cit. 22.4.2013]
- [36] KOPP, Václav, 2009. *Energetická bilance nízkoenergetických staveb*, Plzeň Bakalářská práce. Západočeská univerzita. Fakulta elektrotechnická. Katedra technologií a měření
- [37] ZČU. *Měření statického teplotního pole* [online]. Dostupné z: <http://ftp.zcu.cz/cz/vyuka/mereni-ve-fyzikalnich-technologiich/laboratorni-cviceni> [cit. 19.2.2009]
- [38] ŠŤASTNÍK, Stanislav, HOLLAN, Jan, STEUER, Radek. *Možnosti určení emisivity materiálů pomocí infračervené termografie* [online]. Dostupné z: <http://amper.ped.muni.cz/LW-infrared/omitky06.pdf> [cit. 28.2.2009]
- [39] HEJHÁLEK, Jiří. *Přestupové tepelné odpory obvodové konstrukce* [online]. Dostupné z: <http://www.stavebnictvi3000.cz/pdf/2418.pdf> [cit. 20.2.2009]
- [40] Meteo.zcu.cz. *Monthly Graphs From Automatic Meteo Station at ZCU FEL* [online]. Dostupné z: <http://meteo.zcu.cz/monthly.php> [cit. 7.5.2013]
- [41] Meteocentrum. *Tlak vzduchu* [online]. Dostupné z: <http://www.meteocentrum.cz/encyklopedie/tlak-vzduchu.php> [cit. 8.5.2013]

Seznam obrázků

Obr. 1: Spektrální složení dopadajícího záření [2]	13
Obr. 2: Tvorba prostorového náboje v polovodiči [5].....	15
Obr. 3: Spektrum slunečního světla a spektrum viditelného světla [6]	16
Obr. 4: Konstrukce a přeměna solární energie v křemíkovém fotovoltaickém článku [1].....	16
Obr. 5: V-A charakteristika [7]	17
Obr. 6: Náhradní schéma FV článku [3]	17
Obr. 7: Fotovoltaický panel z článků monokrystalického křemíku [9]	20
Obr. 8: Fotovoltaický článek z polykrystalického křemíku [10]	21
Obr. 9: Návrh umístění solárních modulů Uni-Solar na autobusovou zastávku [11] .	22
Obr. 10: Integrované TF solární články do izolačních oken s různým stupněm transparentnosti [12]	23
Obr. 11: Fotovoltaický článek CIS [13]	24
Obr. 12: Stroj na výrobu organických fotovoltaických článků technologií R2R (Roll to Roll) [17].....	26
Obr. 13: Blokové schéma přímého připojení na veřejnou elektrickou síť [19]	29
Obr. 14: Blokové schéma zapojení ostrovního systému [19]	29
Obr. 15: Blokové schéma zapojení "Zelený bonus" [19]	30
Obr. 16: Princip střídače připojeného na elektrickou síť [1].....	31
Obr. 17: Určení bodu MPP [20]	31
Obr. 18: Fotovoltaické zařízení s větvovými střídači [1]	33
Obr. 19: Solární kabel [29]	38
Obr. 20: Solární konektor Male [31]	39
Obr. 21: Zapojení bypass diod ve fotovoltaickém panelu [2]	41
Obr. 22: Pracoviště pro Flash test [34].....	41
Obr. 23: Zleva: FV panel bez závad, FV panel nefunkční, FV panel, který na Flash diagnostice nevykazoval žádné abnormality [7]	42
Obr. 24: V-A charakteristika	43
Obr. 25: Termograf pořízený termovizní kamerou.....	44
Obr. 26: Metoda LBIC [3]	45
Obr. 27: Termograf solárního generátoru.....	49
Obr. 28: Termograf solárního generátoru.....	50
Obr. 29: Termograf solárního generátoru.....	50
Obr. 30: Reálná situace na FVE Radnice	52
Obr. 31: Termograf FVE Radnice.....	53
Obr. 32: Poškozená třetina FV článku.....	53
Obr. 33: Zapojení bypass diod měřeného FV panelu [9].....	54
Obr. 34: V-A charakteristika a výkon zdravé větve FV generátoru.....	55
Obr. 35: V-A charakteristika a výkon ve větvi s defektním FV panelem	56
Obr. 36: Termograf zdravé větve FVE	56

Seznam grafů

Graf 1: Účinnost technologií [18]	26
Graf 2: Výťažnost technologií [18]	27
Graf 3: Cena solárních panelů [18]	28
Graf 4: Průběh venkovních teplot od března 2013 do května 2013 [40].....	57
Graf 5: Průběh venkovních teplot od 24. 4. do 8. 5. [40]	57
Graf 6: Průběh intenzity osvětlení od března 2013 do května 2013 [40]	58
Graf 7: Průběh intenzity osvětlení od 24.4. do 8.5. [40]	58
Graf 8: Průběh atmosférického tlaku od března 2013 do května 2013 [40].....	59
Graf 9: Průběh atmosférického tlaku od 25.4. do 8.5. [40]	59

Seznam tabulek

Tabulka 1: Příklady emisivit povrchů různých materiálů.....	48
Tabulka 2: Měření V-A analyzátozem na zdravé větvi FV generátoru	55
Tabulka 3: Měření V-A analyzátozem na větvi s defektním FV panelem.....	55