

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Termovizní měření fotovoltaického systému

2013

Bc. Michal Vokatý

Anotace

Tato diplomová práce se zabývá termovizním měřením a analýzou stavu fotovoltaického systému umístěného na střeše budovy Západočeské univerzity fakulty FEL. Dále jsou v práci popsány chyby fotovoltaických panelů, které lze určit pomocí termokamery. Některé z těchto chyb se projevily při měření této fotovoltaické elektrárny. V poslední kapitole jsou tyto chyby analyzovány a vyhodnoceny.

Klíčová slova

Fotovoltaické systémy, fotovoltaické panely, fotovoltaické články, termovizní měření, termokamera.

Abstract

This thesis deals with thermovision measurement and analysis of the state of the photovoltaic system located on the roof of the University of West Bohemia Faculty of Electrical Engineering. Furthermore, this work describes the errors of photovoltaic panels, which can be determined by using the thermal imager. Some of these errors are reflected in measuring this photovoltaic power plant. In the last chapter, these errors are analyzed and evaluated.

Key words

Photovoltaic systems, photovoltaic panels, photovoltaic cells, thermal measurements, thermal Imager.

56 pages

31 figures

5 pages appendices

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

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.

V Plzni dne 8.5.2013

Jméno příjmení

.....

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Milanu Bělíkovi za velké množství rad, připomínek a námětů. Dále bych rád poděkoval rodině za všestrannou podporu při mém studiu.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	9
1 MOŽNOSTI TECHNICKÉHO VYUŽITÍ SOLÁRNÍHO ZÁŘENÍ	10
1.1 ENERGIE ZE SLUNCE	10
1.2 FYZIKÁLNÍ PODSTATA SVĚTLA	10
1.3 MOŽNOSTI VYUŽITÍ SOLÁRNÍ ENERGIE	13
1.4 PASIVNÍ SOLÁRNÍ SYSTÉMY	13
1.5 AKTIVNÍ SOLÁRNÍ SYSTÉMY	15
1.5.1 Sluneční kolektory	15
1.5.2 Fotovoltaické panely	17
2 MĚŘENÍ REÁLNÉHO FV SYSTÉMU POMOCÍ TERMOKAMERY	32
2.1 MĚŘENÝ FV SYSTÉM	32
2.2 PODMÍNKY MĚŘENÍ	33
2.3 TEORIE ANALÝZY TERMOGRAFICKÝCH SNÍMKŮ FV PANELŮ	34
2.4 PRŮBĚH MĚŘENÍ	36
2.5 VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ	38
3 ANALÝZA MĚŘENÍ	39
3.1 ANALÝZA FV ELEKTRÁRNY NA BUDOVĚ ZČU FEL	39
3.2 ANALÝZA UKÁZKOVÉ FV ELEKTRÁRNY NA BUDOVĚ ZČU FEL	47
ZÁVĚR	49
POUŽITÁ LITERATURA	50
PŘÍLOHA	51

Úvod

Tuto práci jsem si zvolil, kvůli mému zájmu o alternativní zdroje energie. Toto téma se mi také zdálo zajímavé, díky možnému přínosu poznatků do praktického provozu fotovoltaických elektráren.

Nedílnou součástí provozu fotovoltaických elektráren je samozřejmě kontrola jejich účinnost přeměny slunečního záření na elektrickou energii a elektrického výkonu. Tento způsob kontroly nemusí být dostačující. Pokud poklesne výkon elektrárny, která se skládá z velkého množství panelů, je velmi složité zjistit přesnou polohu závady, aby ji bylo možno odstranit. Termovizním měření je jednou z metod, která nám může odhalit přesnou polohu vadného panelu a tím pomoci k lepšímu provozu fotovoltaických elektráren.

Termovizní měření je jednoduchá metoda pomocí, které se dají odhalit a dokumentovat, jak malé tak i velké poruchy fotovoltaických panelů a sledovat jejich postupnou degradaci v průběhu jejich provozu. Termovize může pomoc také při spouštění nových fotovoltaických elektráren. Tímto způsobem se můžou odhalit již vadné panely, které přišly od výrobce a výměna a reklamační proces je tím zjednodušen.

Termografie je vhodná pro kontrolu všech fotovoltaických elektráren, ať jsou to rozbíhající se elektrárny, nebo elektrárny v průběhu provozu, nebo elektrárny, které již překročily svou životnost.

V této práci pomocí termokamery změřím a analyzuji stav fotovoltaické elektrárny umístěné na budově Západočeské univerzity fakulty FEL. Po mém měření bude možné porovnat mé zjištění s dalšími kontrolami této FV elektrárny a tak sledovat její degradaci průběhu jejího provozu.

1 Možnosti technického využití solárního záření

1.1 Energie ze Slunce

Naše nejbližší hvězda Slunce je největším zdrojem energie, kterou je zásobovaná celá Země. Tato energie je vyzařovaná z nitra Slunce, kde probíhá jaderná přeměna. Slunce neustále produkuje ohromné množství energie. Jeho odhadovaný výkon je zhruba $4 \cdot 10^{26}$ W, z něhož na Zemi dopadá jen malá část. I přesto tok energie ze Slunce na Zemi činí asi $1,4 \text{ kW/m}^2$. Teplota na povrchu činí asi 5800 K. U nás se intenzity dopadajícího záření v celoročním průměru pohybují okolo 620 W/m^2 , ve výjimečných případech můžeme krátkodobě naměřit i více než 1000 W/m^2 . Každý rok na Zemi dopadá 20 000 krát více energie, než lidstvo spotřebuje. Sluneční energii se v dnešní době zejména využívá, na výrobu elektrické energie, pro ohřev teplé užitkové vody a vytápění. V Česku se počet solárního svitu bez oblačnosti pohybuje okolo 1 460 hodin za rok. Na plochu jednoho čtverečního metru dopadne za rok průměrně 1 100 kWh energie [1,2]

1.2 Fyzikální podstata světla

Světlo můžeme vnímat jako naprostou samozřejmost a nad jeho fyzikální podstatou ani nezamyslíme. Přesto je tato problematika zajímavá a složitá. Učenci ve starověku se zabývali problematikou optického rozhraní, ale vážnější úvahy o podstatě světla se řadí až do 17. Století. V roce 1678 Christian Huygens předložil pojednání o povaze světla jako podélného vlnění. Isaac Newton však považoval světlo za tok částic a tato teorie převládala až do konce 18. Století. Teprve v 19. Století začal velký rozvoj vlnové teorie podepřený experimenty s interferencí s ohybem a vědeckými objevy v oborech elektřiny a magnetismu[4].

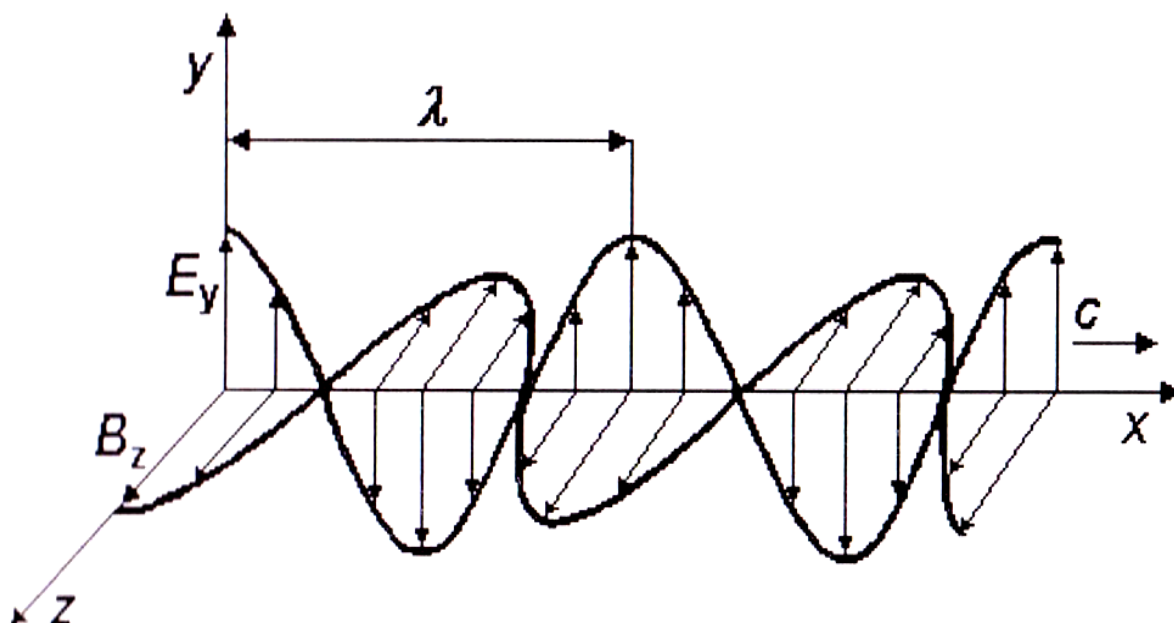
Světlo jsou příčné elektromagnetické vlny v úzké oblasti vlnových délek, a současně se projevují jako tok fotonů. Obě teorie se tedy dají použít.

Jednotnou teorii elektromagnetického pole vytvořil James Clerk Maxwell, který ve svých čtyřech rovnicích shrnul vše, co bylo známo z elektřiny a magnetizmu [3].

Z této teorie vyplývá, že časová změna elektrického pole budí pole magnetické a naopak. Rozruch těchto dvou polí se tedy šíří formou vln rychlostí světla c . Maxwellovi nepodařilo odvodit ze svých rovnic i základní zákony optiky a tím sjednotit optiku s teorií elektromagnetického pole [4].

Maxwellova teorie byla ověřena H. R. Hertzovem, který prováděl experimenty s jiskrovým výbojem mezi dvěma hrotovými elektrodami a odezvu detekoval anténou. Experimentálně prokázal elektromagnetické vlny s vlnovou délkou kratší než jeden metr [4].

Tímto vznikla ucelená fyzikální teorie elektromagnetického pole. Jak vypadá elektromagnetická vlna, můžeme vidět na obr. 1.



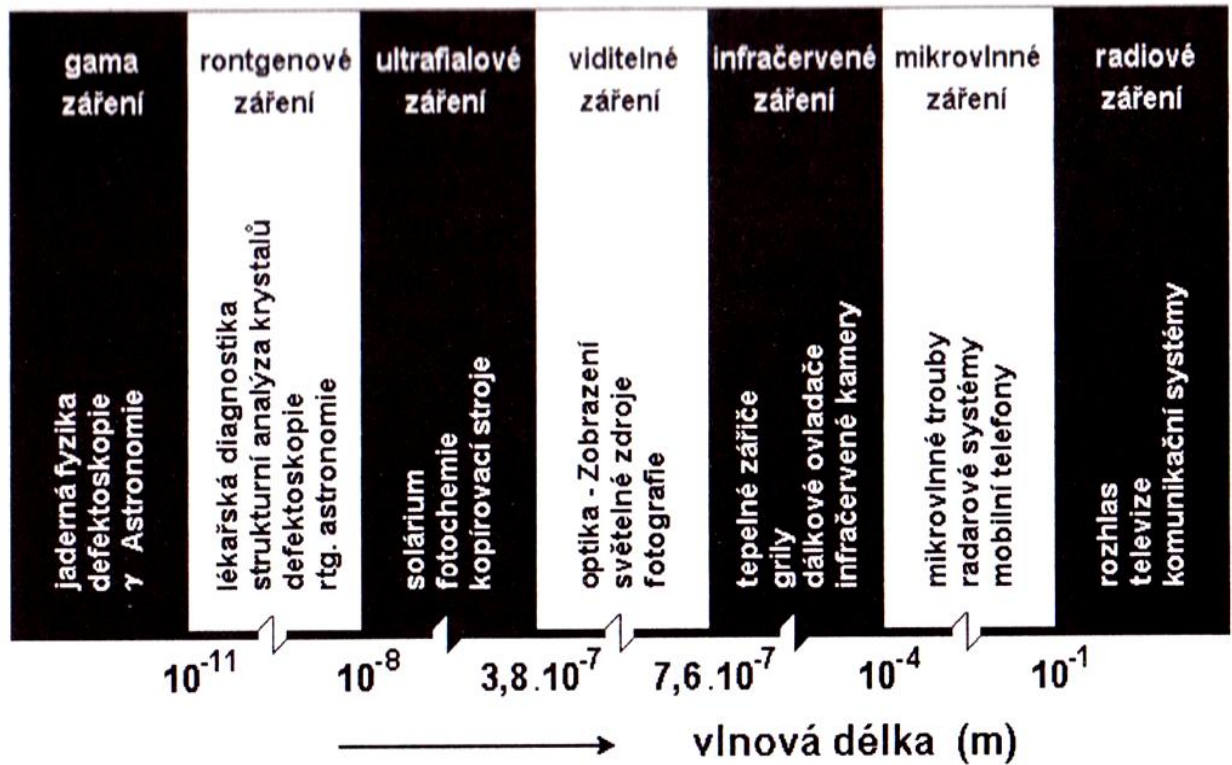
Obr. 1 – Elektromagnetická vlna [4]

Vektory intenzity elektrického pole a magnetické indukce kmitají v navzájem kolmých směrech a navzájem budí jeden druhý. Elektromagnetické vlny mají vlnové délky ve velmi širokém rozmezí od řádu 10^{-13} m až po stovky či tisíce metrů nebo delší. Z toho tvoří viditelné záření neboli světlo jen malou oblast v intervalu vlnových délek $\lambda \in < 380 \text{ nm}; 760 \text{ nm} >$ a každá vlnová délka odpovídá určité barvě [4].

Spektrum elektromagnetického záření můžeme vidět na obr. 2, jsou tu přehledně seřazeny jednotlivé oblasti. Všechny uvedené druhy záření mají stejnou podstatu, ale jejich

vlastnosti se velice liší, proto jsou různé druhy záření využitelné v různých oborech fyziky a techniky [4]. Příklady využití jsou také uvedeny v obr. 2.

V této kapitole sem čerpal ze zdroje [4].



Obr. 2 – Oblasti spektra elektromagnetického záření a typické technické aplikace [4]

1.3 Možnosti využití solární energie

Máme několik možností jak přeměnit sluneční energii na jiné formy energie. Za tímto účelem se používají solární systémy, které mohou být pasivní nebo aktivní.

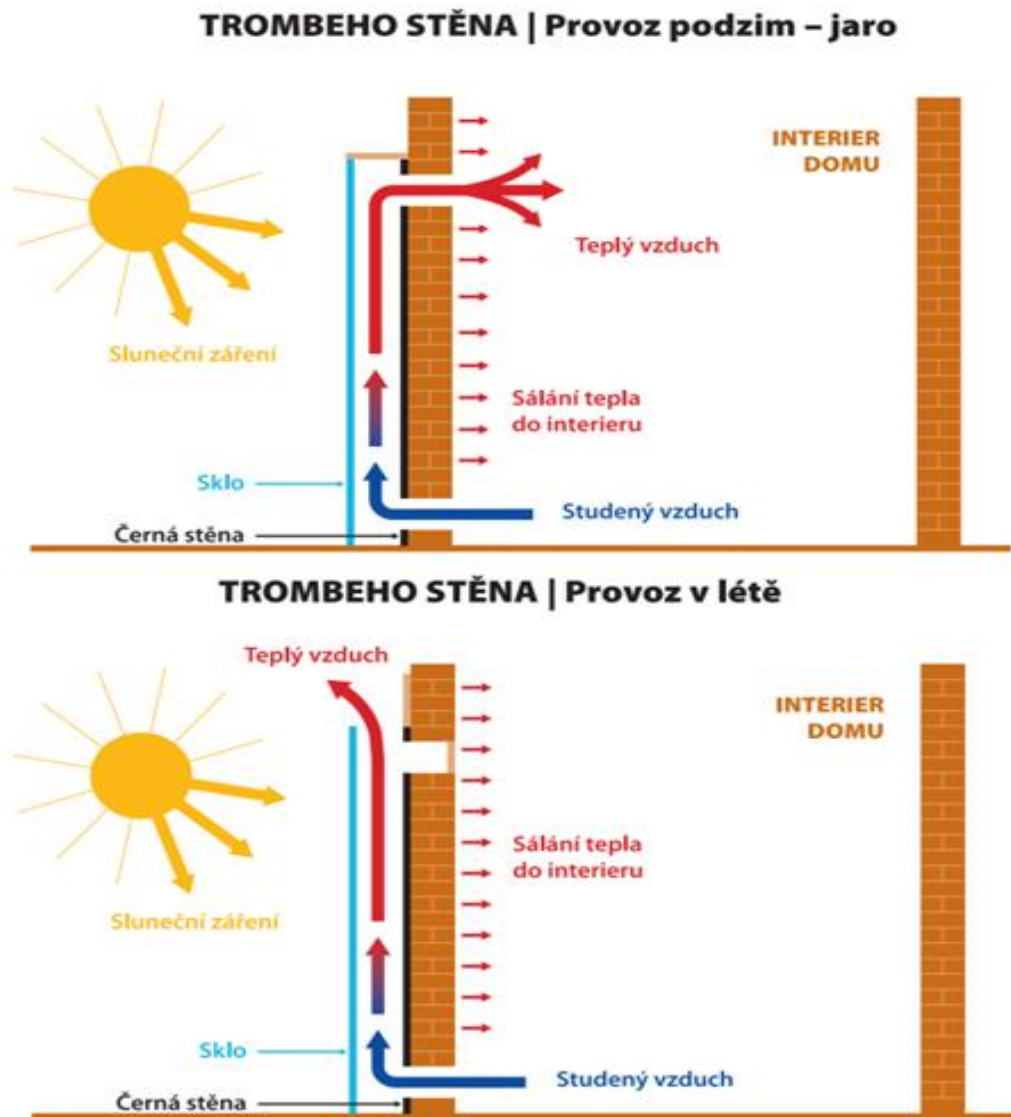
U pasivních systémů dochází k transformaci solární energie na teplo vhodnými architektonickými úpravami budovy.

Aktivní systémy transformují energii solárního záření buď na tepelnou, nebo elektrickou energii. Tepelná neboli termická přeměna je uskutečňována solárními kolektory. Elektrickou energii můžeme získat pomocí fotovoltaických článků nebo solárně termickou přeměnou.

1.4 Pasivní solární systémy

U pasivních solárních systémů se tedy transformuje solární energie na teplo. To se uskutečňuje vhodnými architektonickými opatřeními, jako jsou např. prosklené jižní stěny, skleníky apod. Přenos energie je přirozený, nenucený bez pomoci technických zařízení. Pasivní solární systém může být i celá budova nebo její část. Návrh objektů s pasivním využíváním slunečního záření by měl zvažovat umístění budovy, tvar budovy, využití termoregulační funkce zeleně, využití bariérových prvků (např. stromy) apod.

Pasivních solárních systémů je celá řada. Známým příkladem je Trombeho stěna (obr 3). Skládá se z masivní akumulární stěny, před kterou je skleněná plocha. Mezi těmito plochami vzniká vzduchová mezera. Povrch akumulární stěny je opatřen černou barvou umožňující dobře pohlcovat sluneční záření. Teplo se následně může šířit do interiéru místnosti radiací nebo přirozenou konvekcí přes otvory ve stěně. Otvory se dají uzavírat, například pomocí klapek. Toto je princip provozu Trombeho stěny v zimním období. V letním období může nastat přehřívání vzduchu v interiéru. Proto je klapkou uzavřen horní otvor a tím je zamezeno proudění teplého vzduchu ze vzduchové mezery do interiéru. Současně je ve vzduchové mezeře otevřena další horní klapka a tím je umožněno proudění teplého vzduchu ze vzduchové mezery ven do exteriéru [5].



Obr. 3 – Trombeho stěna – provoz v létě, na podzim a na jaře [5]

1.5 Aktivní solární systémy

1.5.1 Sluneční kolektory

Fototermální přeměna

Energie slunečního záření je fototermální přeměnou transformována na tepelnou energii. K tomuto účelu se používají solární kolektory. Tato zařízení jsou konstruována tak aby s co největší efektivitou přeměňovali sluneční záření na teplo, to je následně odváděno pomocí teplotnosného média do místa, kde je teplo spotřebováno nebo ukládáno.

Princip slunečního kolektoru

Solární kolektor pracuje na principu skleníkového efektu. Skládá se z absorberu, skříně, izolace, krycího skla a soustavy trubic s teplotnosným médiem.

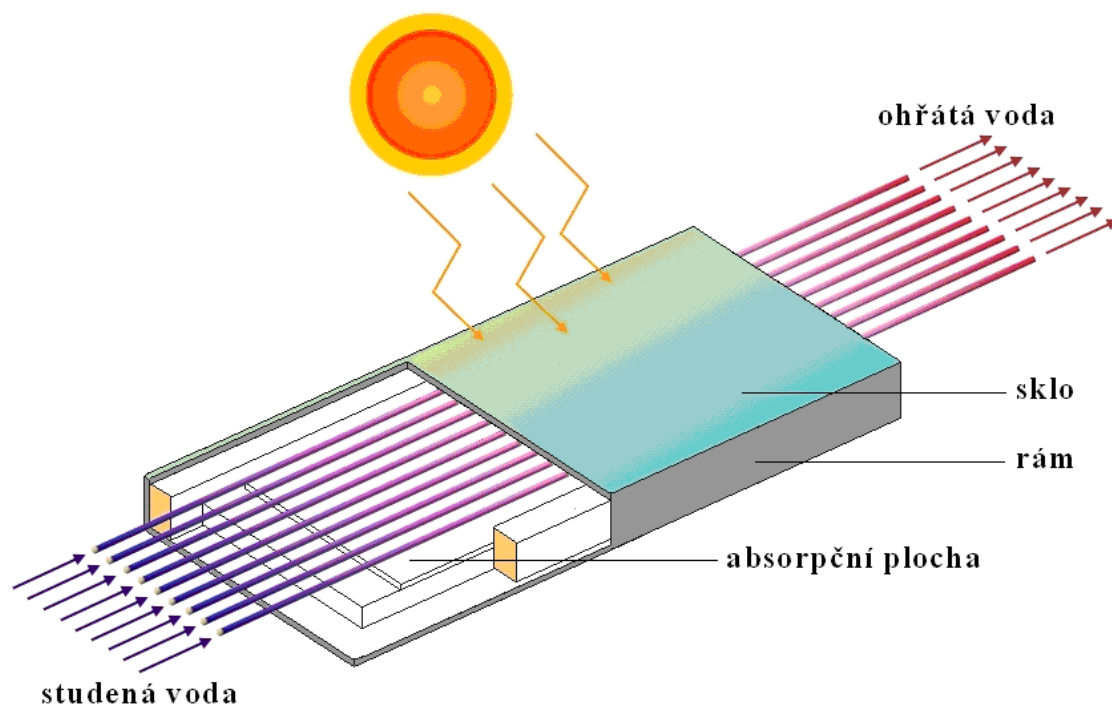
Absorbér je zpravidla vyroben z měděného nebo hliníkového plechu. Na jeho zadní straně jsou připevněné měděné trubice. Aby absorbér pohlcovao co největší množství záření, musí být speciálně upraven. Jednoduší absorbéry dostačující pro letní období jsou pouze natřeny matnou černou barvou. Kvalitní typy se opatřují selektivním spektrálním nátěrem. Povrch absorberu pak pohlcuje až 96 % záření a teplo vyzařuje jen minimálně. Teplo, které tím získáme, je odváděno teplotnosným médiem například vodou nebo nemrznoucí kapalinou [6].

Další součástí kolektoru je skříň. Vana vyrobená z kovu, plastu nebo dřeva určená pro uložení absorberu a dalších prvků. Skříň slouží k ochraně uložených prvků před nepříznivými vlivy a také ke spolehlivému uchycení kolektoru na stěnu nebo střechnu [6].

Důležitou součástí kolektoru je také izolace. Izolace omezuje tepelné ztráty a zabraňuje úniku tepla z absorberu stěnami skříně. Za tímto účelem se používá izolace z minerální vlny nebo polyuretanu. Důležitými vlastnostmi takovéto izolace by měli být odolnost vůči teplotám do 200 °C a nízká propustnost vlhkosti z okolního prostředí [6].

Krycí sklo má podobnou funkci jako izolace. Omezit tepelné ztráty přední stěnou kolektoru. Sklo by nemělo být nejen maximálně propustné pro viditelné záření, ale také by mělo zabránit úniku dlouhovlnného tepelného záření ven. Díky těmto vlastnostem vzniká

žádoucí skleníkový jev. Požívá se speciální bezpečnostní solární sklo s velkou propustností a dlouhou životností [6].

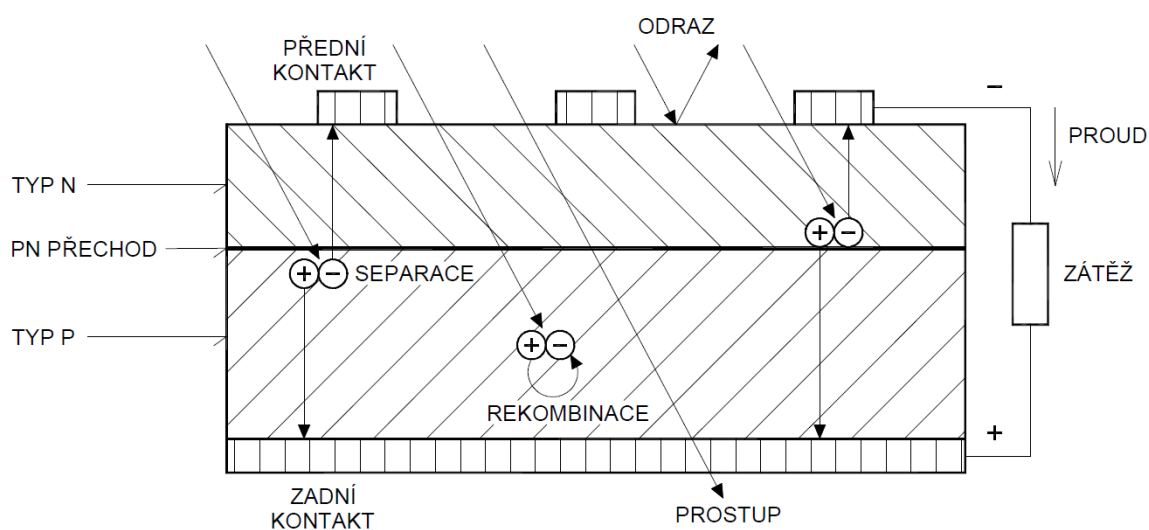


Obr. 4 – Princip slunečního kolektoru [7]

1.5.2 Fotovoltaické panely

Fotovoltaická přeměna

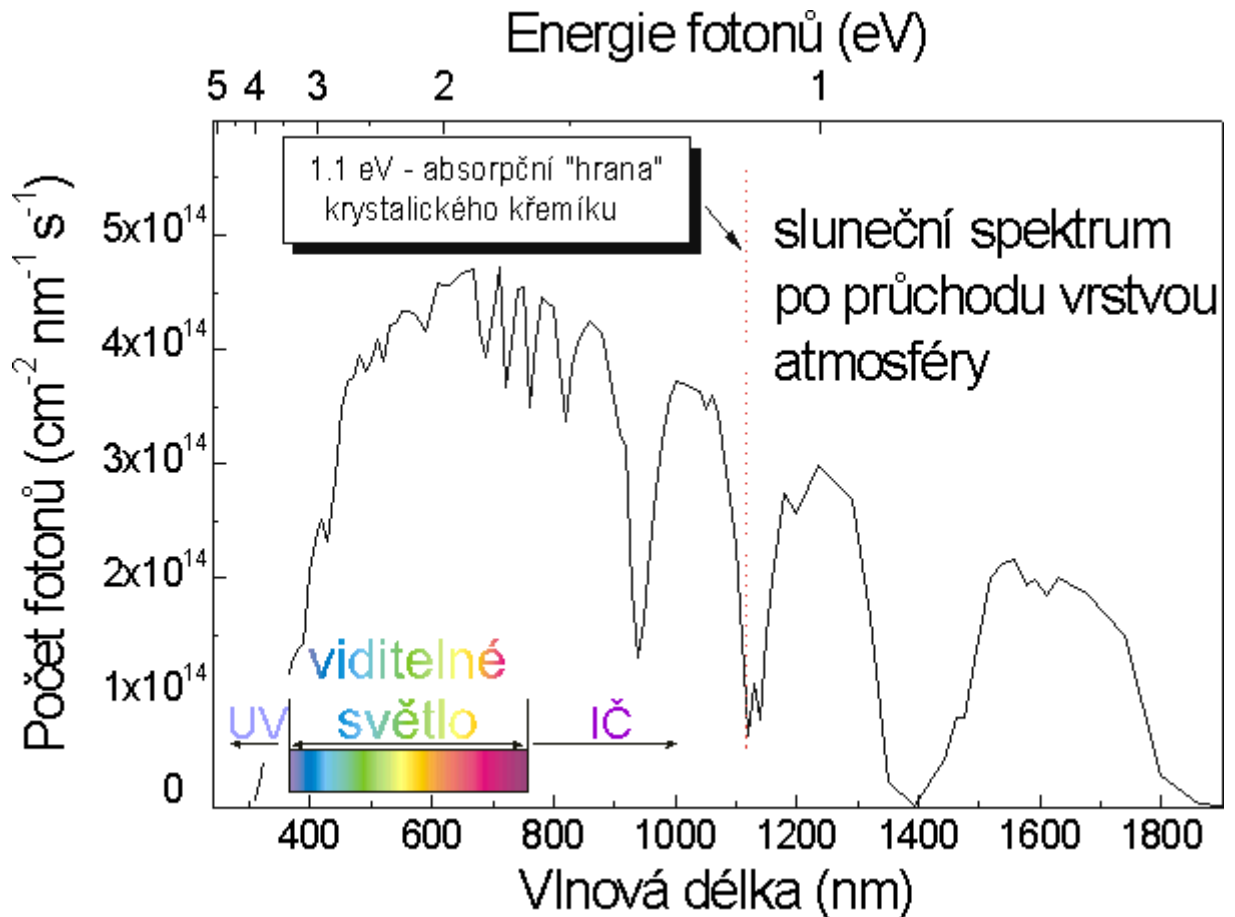
Transformace energie solárního záření na elektrickou energii byla objevena Edmundem Becquerelem již v roce 1839. Tento proces se uskutečňuje ve vhodném polovodičovém prvku (především krystalickém křemíku) označovaném jako fotovoltaický nebo též solární článek. Fotovoltaický článek je v podstatě velkoplošná polovodičová dioda s PN přechodem. Princip činnosti fotovoltaického článku je znázorněn na obr. 5. Vzájemným působením solárního záření a hmoty dochází k pohlcování fotonů a uvolňování elektronů. V blízkosti PN přechodu jsou generovány vodivostní páry elektron – díra. Elektrony a díry jsou separovány vnitřním elektrickým polem PN přechodu. Dopadající fotony pak uvolňují volné elektrony směrem k oblasti typu N a vzniklé díry k oblasti typu P. Rozdělení náboje má za následek napěťový rozdíl mezi předním a zadním kontaktem. V oblasti typu N je potom přebytek elektronů, naopak v oblasti typu P jejich nedostatek. Propojí-li se obě oblasti vnějším elektrickým obvodem se zátěží, začnou se elektrony, z oblasti typu N přemísťovat přes zátěž do oblasti typu P. Vnější obvodem tedy protéká stejnosměrný elektrický proud, jehož velikost je úměrná druhu materiálu článku, ploše fotovoltaického článku, intenzitě dopadajícího solárního záření aj. Fotovoltaické články se používají k přímé transformaci solární energie na elektrickou energii [7].



Obr. 5 – Princip fotovoltaického článku [7]

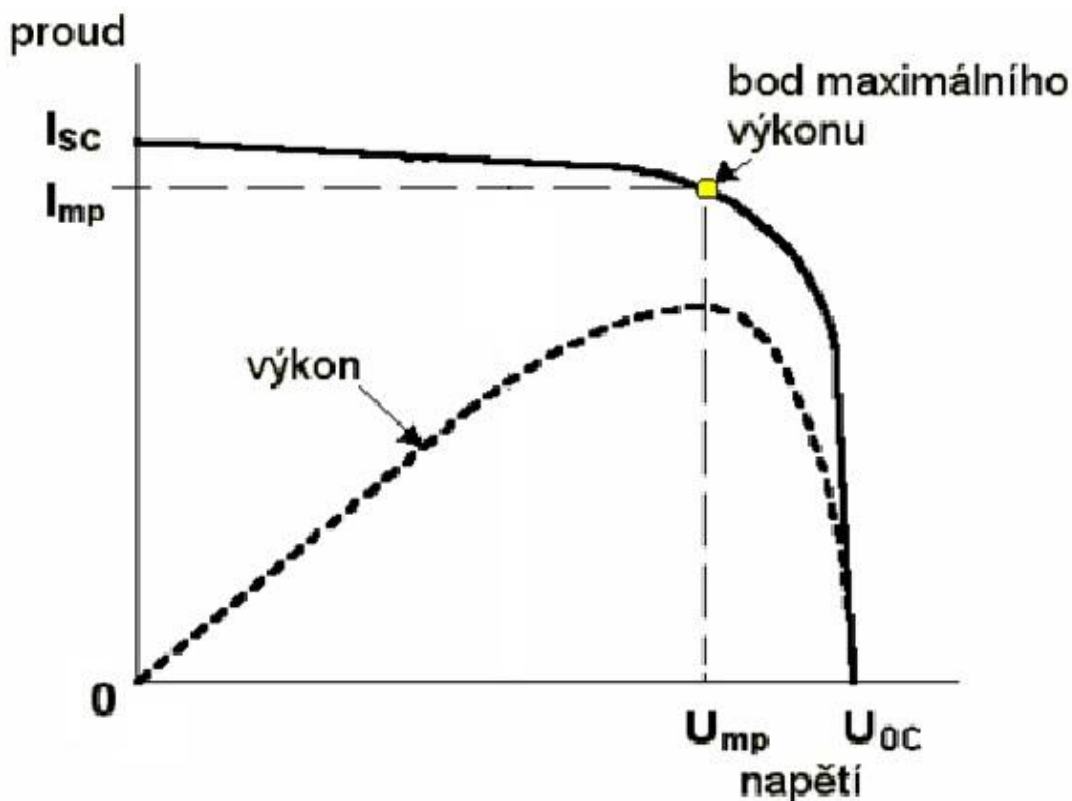
Při transformaci solární energie na elektrickou energii dochází k poměrně velkým energetickým ztrátám u fotovoltaických článků, jejichž účinnost se běžně pohybuje okolo 15 %. Část slunečního záření se odráží od povrchu článků nebo prochází skrz článek bez využití (viz obr. 5). Kromě toho může nastat rekombinace elektronů a děr před jejich separací. Dále v případě nízké energie fotonu nedojde k uvolnění elektronů. Naopak při velké energii fotonu se využije pouze část energie na uvolnění elektronu a ostatní energie se přemění v teplo. Z výše uvedených důvodů je účinnost přeměny solární energie na elektrickou energii velmi nízká. Fotovoltaické články mají malou účinnost z důvodu odrazu a prostupu světla, rekombinace elektronů a děr, nízké energie fotonu nebo přeměny solární energie v tepelnou energii. Rozměry jednoho fotovoltaického článku jsou obvykle 10 cm x 10 cm. Protože pracovní napětí tohoto článku je příliš nízké, zapojují se tyto články sériově za účelem získání dostatečně vysokého napětí. Podobně se články zapojují paralelně za účelem získání většího elektrického proudu. Sérioparalelním zapojením fotovoltaických článků vznikne fotovoltaický panel, který je elementárním prvkem fotovoltaických systémů. Požadavky na umístění (tj. orientaci a sklon) fotovoltaických panelů jsou stejné jako u solárních kolektorů. Fotovoltaický panel se získá sérioparalelním zapojováním fotovoltaických článků. Fotovoltaické články se uplatňují v mnoha odvětvích, např. ve vesmírných aplikacích, bývají součástí pohonu čerpacích zařízení, parkovacích automatů, zahradních svítidel, tachometrů, kalkulaček apod. [7].

Při připojení osvětleného FV článku do elektrického obvodu dochází k poklesu fotovoltaického napětí a díky tomu začne obvodem protékat proud a tak se FV článek stává zdrojem energie. Šířka zakázaného pásu krystalického křemíkového FV článku je přibližně 1,1 eV. Proto křemíkové FV články využívají fotony viditelného záření a infračerveného záření s vlnovou délkou kratší než 1100 nm, jak je vidět na obr. 6. Na obr. 6 je dále spektrum slunečního záření prošlého atmosférou s vyznačenými vlnovými délkami, energiemi fotonů a absorpční hranou křemíku [4].



Obr. 6 – Spektrum slunečního záření po průchodu atmosférou s vyznačením vlnových délek a energií fotonů i s vyznačením šířky zakázaného pásu křemíku neboli absorpční hrany [9]

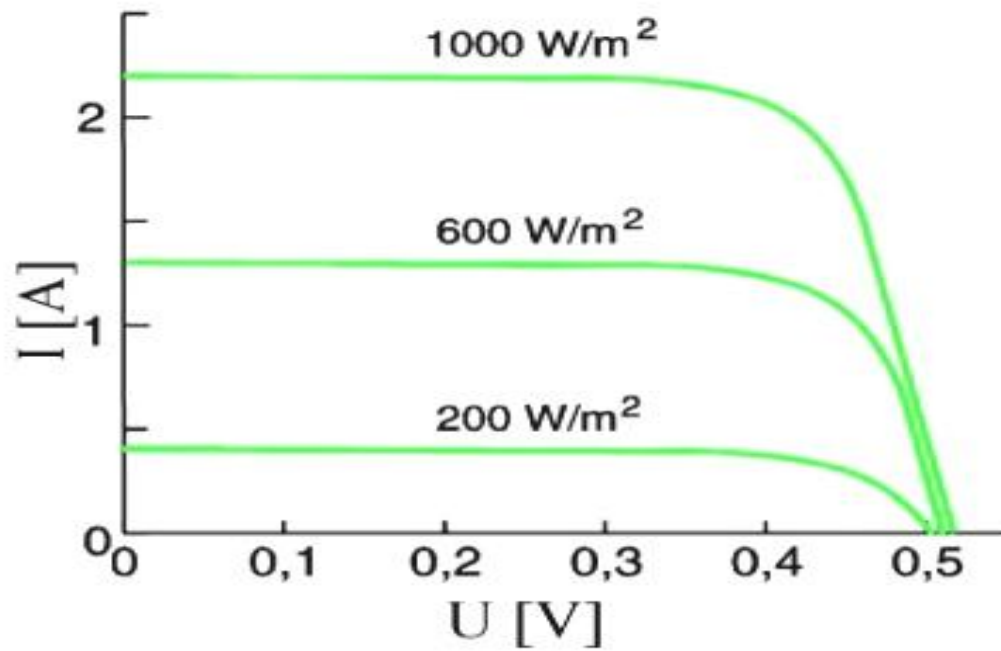
Volt-ampérová charakteristika FV článku je znázorněna na obr. 7. Je zde vyznačen maximální bod výkonu. Tento pracovním bod FV článku je určen součinem napětí U_{mp} a proudu I_{mp} . Výkon dodáván do elektrického obvodu je dále závislý na ozáření FV článku, spektru dopadajícího světla a teplotě článku. Zkratováním FV článku lze dosáhnout nejvyššího možného proudu označeného zkratový proud I_{sc} . FV článek provozován naprázdno bez připojené zátěže má na svorkách maximální napětí, napětí na prázdno U_{oc} . Velikosti napětí naprázdno a proudu na krátko jsou také závislé na intenzitě ozáření článku [4].



Obr. 7 - Voltampérová charakteristika fotovoltaického článku [8]

Jako parametry článků se udávají hodnoty I_{sc} , U_{oc} , U_{mp} , I_{mp} a P_m , dále pak ještě fill factor $FF = U_{mp} \cdot I_{mp} / U_{oc} \cdot I_{sc}$ a účinnost $\eta = U_{mp} \cdot I_{mp} / P_{in}$ (P_{in} je výkon dopadajícího záření) stanovené za standardních testovacích podmínek, tj. při teplotě 25°C , intenzitě záření 1000 W/m^2 a spektru AM 1,5 [4].

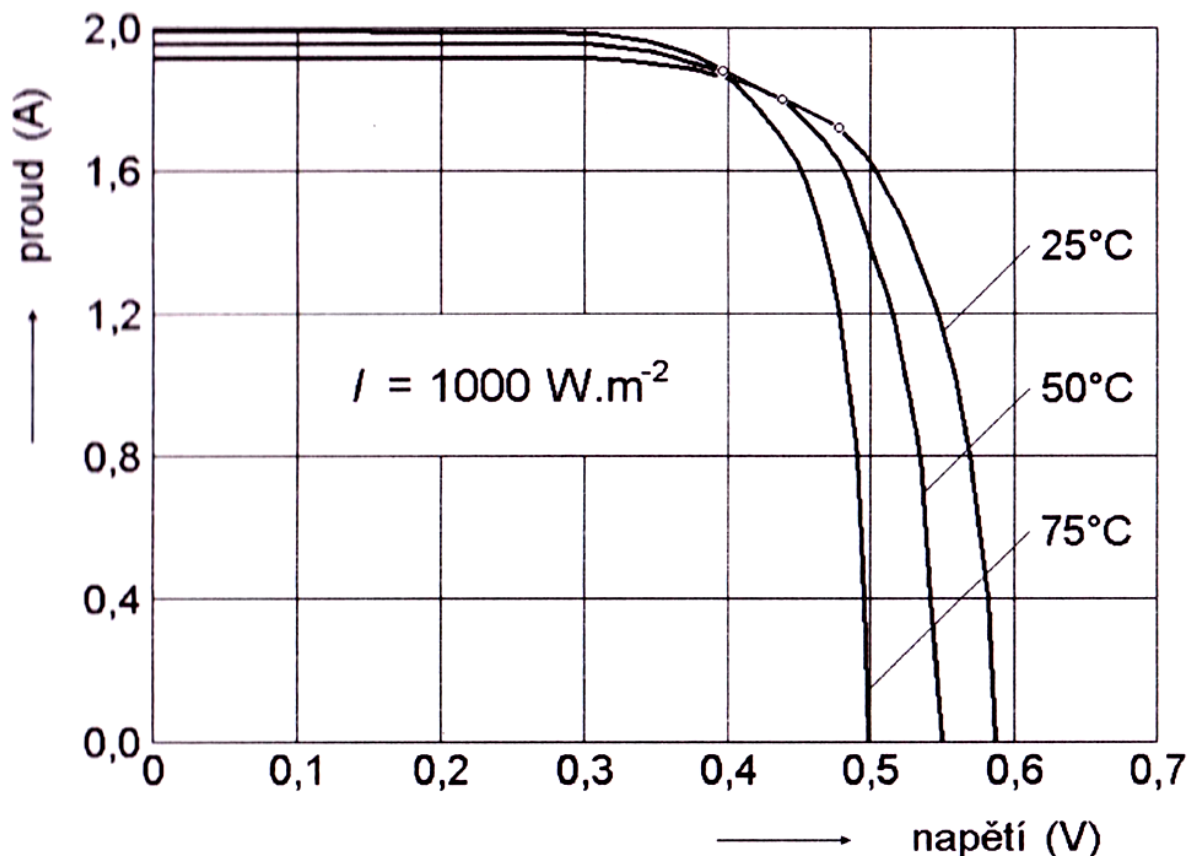
Volt-ampérová charakteristika s různými intenzitami ozáření FV článku, který je zapojen do elektrického obvodu, je ukázána na obr. 8. Z charakteristiky je vidět, že změna proudu na krátko stoupá s intenzitou záření stejně jako napětí na prázdko. Poloha pracovního bodu a tedy maximální možná hodnota výkonu dodávaná FV článkem je samozřejmě závislá na hodnotě intenzity záření, jak je naznačeno na obr. 8.



Obr. 8 – Voltampérová charakteristika osvětleného FV článku při různých intenzitách osvětlení při konstantní teplotě $t = 50\text{ °C}$ [4]

Na obr. 9 je ukázána volt-ampérová charakteristika FV článku na bázi krystalického křemíku. Tento článek je ozářen konstantním osvětlením o intenzitě $1000\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. Na této charakteristice je vidět vliv teploty na parametry článku. Při rostoucí teplotě roste proud na krátko, ale klesá napětí na prázdno. Na křivkách jsou také znázorněny pracovní body, při rostoucí teplotě a konstantní intenzitě záření klesá maximální výkon dodávaný FV článkem a tím klesá i účinnost fotovoltaické přeměny energie [4].

Pokud blíže prozkoumáme obr. 8, můžeme vidět, že napětí nepřesáhne hodnotu 0,6 V, což je fotovoltaické napětí. Tato hranice je určena materiálem, použitým pro polovodič. V tomto případě křemík, který má právě fotovoltaické napětí 0,6 V. I při vyšších intenzitách osvětlení článku se toto napětí dále nezvyšuje.



Obr. 9 - Voltampérová charakteristika osvětleného FV článku na bázi krystalického křemíku při různých teplotách při konstantní intenzitě osvětlení $I = 1000 \text{ W.m}^{-2}$ [4]

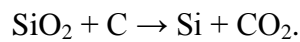
Konstrukce a výroba fotovoltaických článků a panelů

V dnešní době se nejvíce využívají fotovoltaické panely na bázi křemíku, ať už křemík monokrystalické, polykrystalické či amorfni na bázi tenkých vrstev. Křemík má mnoho výhod. Tohoto prvku máme v zemské kůře velké množství, dokonce je jedním z nejrozšířenějších a díky tomu je relativně levný, snadno dostupný, nejedovatý a je nejvíce používaným a asi i nejlépe prozkoumaným polovodičem. Z velké části se v přírodě vyskytuje ve formě křemene neboli oxidu křemičitého (SiO_2). Šířka zakázaného pásu čistého křemíku je 1,1 eV [4].

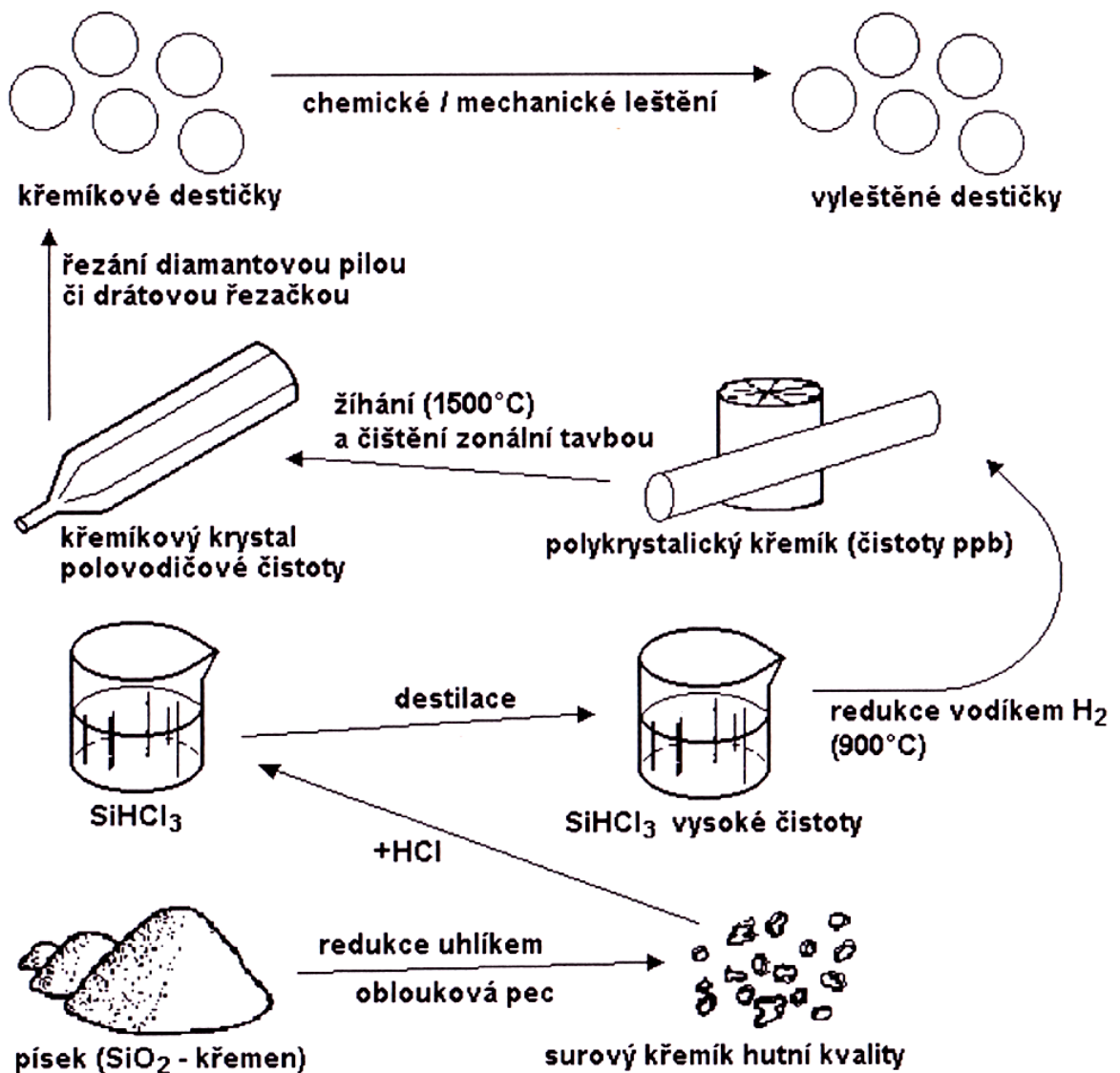
Fotovoltaické panely založené na jiných materiálech lze rozdělit do dvou kategorií. Jedny mají menší účinnost přeměny energie, ale například panely na bázi organických polymerních vrstev či nanovláken. Druhé mají vyšší účinnost přeměny, ale jsou mnohem

dražší. Takové panely se používají většinou ke speciálním účelům, například panely na bázi GaAs jsou použity na mnoha vesmírných zařízeních jako zdroje energie [4].

Surový křemík je vyráběn z písku redukcí uhlíkem v obloukové peci. Tam dochází k celé řadě chemických reakcí. Pokud vezmeme v úvahu pouze vstupní a výstupní produkty, můžeme vše popsat jedinou rovnicí

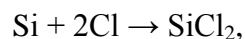


Písek promíchaný s mletým koksem se do obloukové pece dopravuje nepřetržitě ze shora. Směrem dolů stoupá teplota a v jednotlivých oblastech probíhají chemické reakce. Ve spodní zóně s teplotou přibližně 2 000 °C se hromadí roztavený křemík, který se v pravidelných intervalech odlévá. Takto získaný surový křemík má čistotu až 99 %, zhruba 1 % nečistot tvoří příměsi, nejvíce Fe, Al a C. Pro potřeby polovodičové výroby je však nutná mnohem větší čistota. Až vyčištěním surového křemíku může být vytvořen finální polotovar pro použití v další polovodičové výrobě. K tomu účelu existují různé technologie, příklad jedné z nich je schematicky znázorněn na obr. 6. Převodem na kapalnou fázi a její destilací lze získat polotovar až čistoty tzv. ppb (nečistoty řádově 10⁻⁹), která je potřebná pro výrobu integrovaných obvodů. Pro výrobu PV článků běžně postačuje i nižší čistota, tzv. čistota ppm (nečistoty řádově 10⁻⁶) [4].

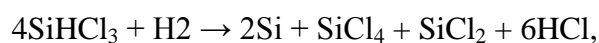


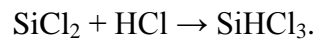
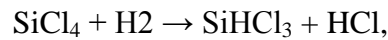
Obr. 10 – Schematické znázornění postupu při výrobě Si polotovaru pro výrobu FV článku [4]

V současnosti je nejpoužívanější technologií čištění křemíku technologie Siemens s chlórovým cyklem. Jako první proběhne převod na trichlórorgan podle zjednodušených rovnic



Po destilaci se z trichlórorganu opět vyredukuje čistý křemík podle zjednodušených rovnic:





Takovýto proces má velkou spotřebu energie a musí zde být zajištěna bezpečnost obsluhy a ochrana životního prostředí. V současnosti jsou ve vývoji technologie výroby čistého křemíku, které nejsou založeny na chlórovém cyklu, a tím tyto problémy odstraňují. Nyní jsou tyto technologie ve stádiu testování. V případě že by se osvědčily, mohou podstatně snížit energetickou náročnost výroby čistého křemíku a tím i jeho cenu. Po vyčištění obvykle vzniknou hrudky čistého křemíku. Z tohoto polotovaru je třeba vytvořit polykrystalické či monokrystalické ingoty [4].

Výroba polykrystalických ingotů je jednodušší. Roztavený materiál nalije do formy, kde se nechá pomalu, přesně určenou rychlostí chladnout. Chladnutí musí být pomalé a řízené induktivním ohřevem, aby se získala co možná největší monokrystalická zrna a aby bylo v materiálu minimum dislokací, pnutí a podobně. Hranice zrn a další poruchy krystalu totiž tvoří pro elektrony potenciálové bariéry a je tedy dobré minimalizovat jejich přítomnost [4].

Výroba monokrystalických ingotů probíhá tzv. Czochralskiho metodou. Do taveniny se ponoří malý monokrystal jako zárodek. Tato tavenina má teplotu přibližně 1 415 °C. Zárodek se z taveniny velmi pomalu vytahuje a přitom se otáčí kolem podélné osy. Celý proces probíhá za sníženého tlaku v inertní atmosféře [4].

Dále je polykrystalický či monokrystalický ingot nakonec příčně nařezán na destičky, které jsou základem fotovoltaických článků. Díky vylepšení drátových řezaček a dalších technologií, došlo v posledních letech k výraznému posunu kvality v řezání. Zatímco dříve technologie umožňovala řezat destičky o minimální tloušťce 300 μm, nyní je to až 100 μm. Ve stejném poměru se zmenšil i prořez. Úspora křemíku, energie potřebné k jeho výrobě a zefektivnění výroby jsou důvody, proč křemík zůstane ještě dlouho nejpoužívanějším materiálem [4].

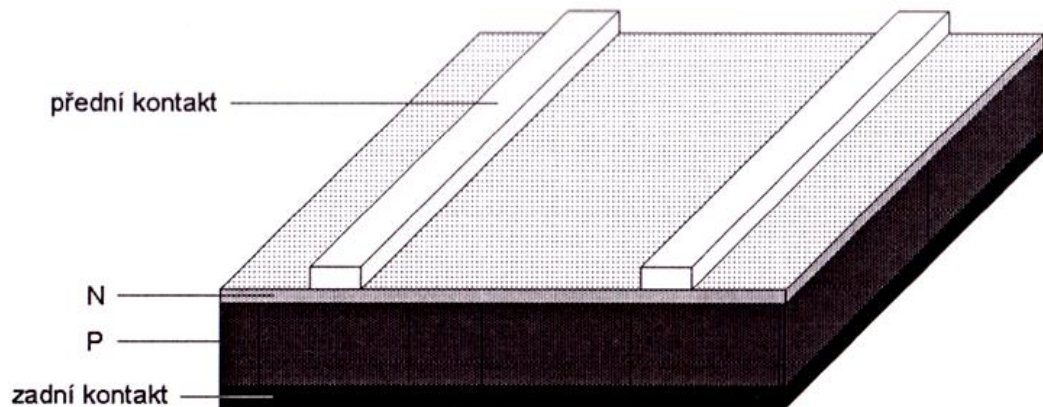
V difúzních pecích se odehrává difúze příměsí donorů či akceptorů do materiálu polovodiče pro vytvoření přechodu PN. Přední část fotovoltaického článku, by měla mít antireflexní úpravu povrchu kvůli minimalizaci odrazu, aby se využila maximální energie dopadajícího záření. Články s nejvyšší účinností tedy mívají tmavou barvu. Pro určité dekorační účely se může nanést na přední stranu tenká průhledná vrstva pro zesílení

odraženého záření určité vlnové délky v důsledku interference vln elektromagnetického záření na této vrstvě. Takové články v odraženém světle vykazují určitý barevný odstín [4].

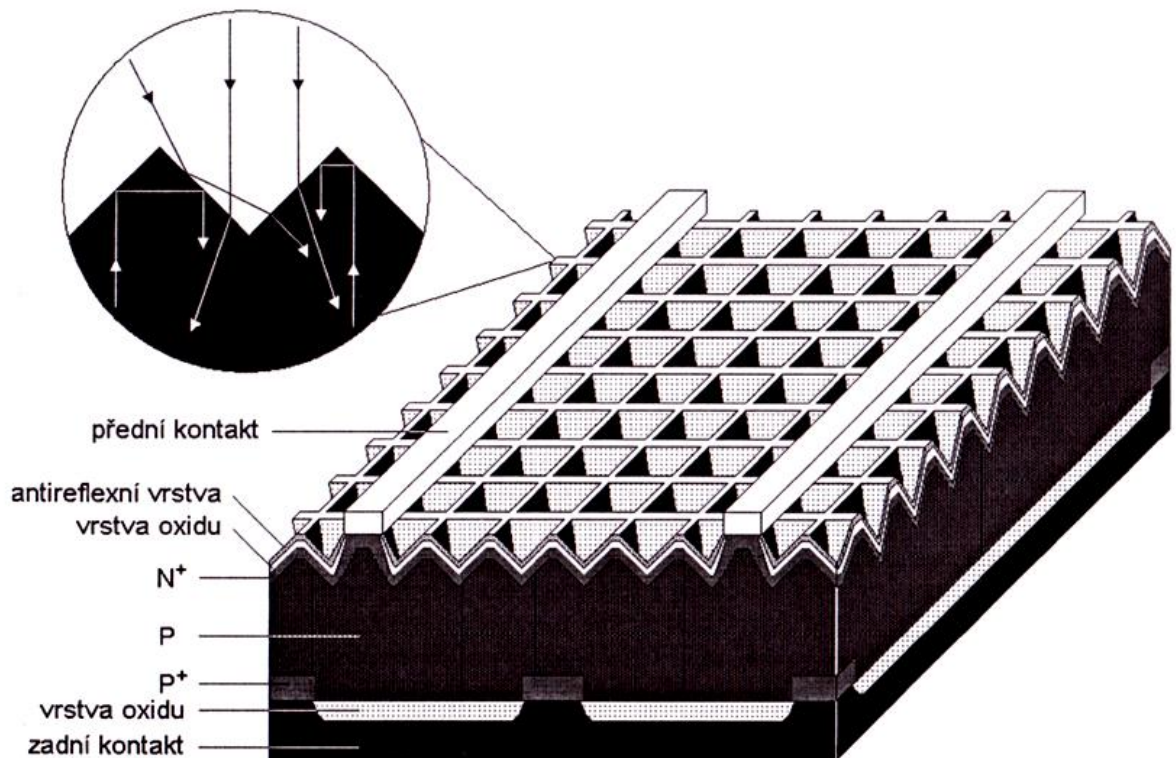
Přední kontakt musí být co nejmenší, aby neblokoval sluneční záření a to mohlo dopadat na co největší plochu, proto bývá ve tvaru mřížky či hřebínku. Zadní kontakt bývá standardně celoplošný. Kontakty se nanášejí na články buď sítotiskem, nebo náročnějšími vakuovými technologiemi, například vakuovým napařováním. Speciální články určené například pro systémy s velkou koncentrací záření se vytvářejí kontakty vnořené do materiálu polovodiče [4].

Schéma křemíkového fotovoltaického článku je na obr. 7. Na obr. 7 a) je schematicky znázorněn jednoduchý model. Takto konstruovaný článek sice funguje podle výše popsaného principu, ale má nižší účinnost fotovoltaické přeměny energie hlavně v důsledku rekombinačních ztrát. Pro zvýšení účinnosti slouží u kvalitnějších článků mnoho konstrukčních zdokonalení patrných z obr. 7 b). Antireflexní vrstva na přední straně minimalizuje odraz, aby maximum fotonů vniklo do PV článku a proniklo až do oblasti přechodu PN. Vrstvy nevodivého oxidu (SiO_2) chemicky pasivují povrch a jen v určitých místech je vrstva proleptána a jen zde se odvádí elektrický náboj. Vyleptaná struktura malých jehlanů na přední straně způsobuje, že fotony snadno vstupují do článku. Pokud ale projdou, aniž vyvolají fotovoltaickou přeměnu, a odrazí se od zadní elektrody, nemohou na přední straně vystoupit ven z článku a jsou totálním odrazem vráceny zpět, jak je znázorněno v detailu obr. 7 b). Znovu pak procházejí přechodem PN a pravděpodobnost fotovoltaické přeměny energie se zvyšuje. Oboustranné články mají na zadní straně stejnou strukturu jako na přední straně, fotony tedy mohou dopadat současně z obou stran (na zadní stranu například po odrazu od země) a množství vyrobené elektrické energie je potom větší. Pro záření dopadající na zadní stranu je však účinnost fotovoltaické přeměny nižší, neboť fotony kratších vlnových délek jsou pohlcovány už v silnější vrstvě polovodičového substrátu a nedorazí až k přechodu PN [4].

a) jednoduchý model



b) článek s vysokou účinností



Obr. 11 – Schéma polovodičového fotovoltaického článku [4]

V polykrystalech hranice zrn zhoršují transportní vlastnosti polovodiče, u amorfních polovodičů je situace ještě horší. Účinnost nejkvalitnějších fotovoltaických článků na bázi monokrystalického křemíku se v současnosti pohybuje kolem 20 % u sériové výroby,

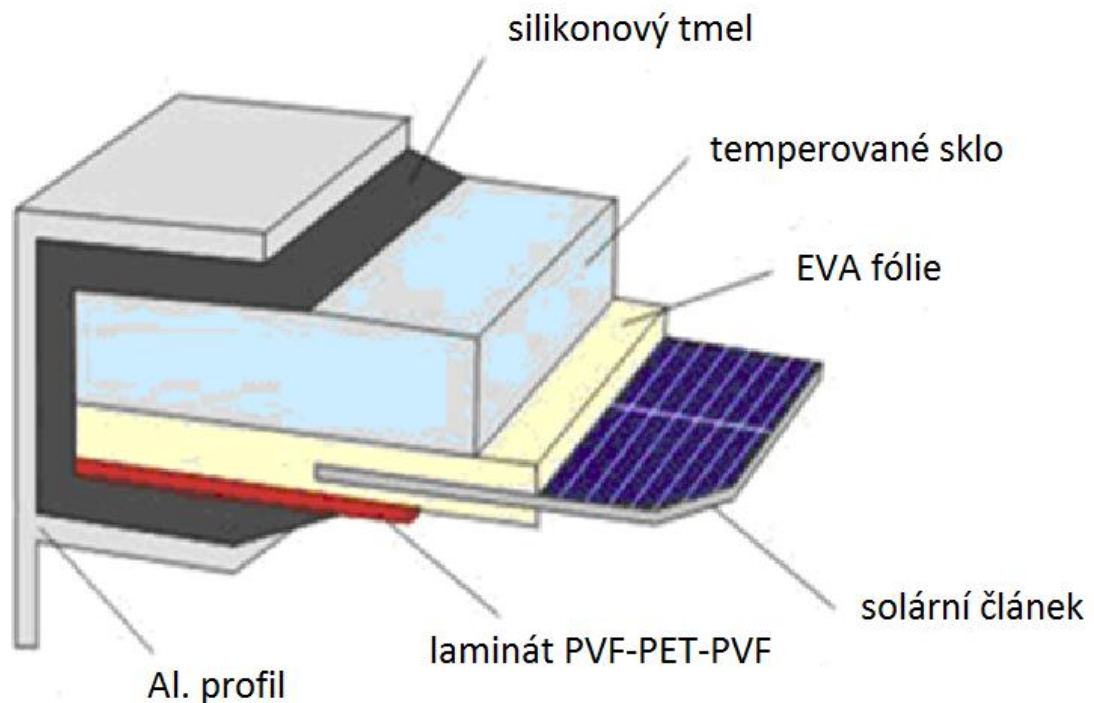
účinnost některých laboratorních vzorků s výše uvedenými zdokonalujícími prvky již převyšuje 30 %. Účinnost článků na bázi jiných polovodičů (např. GaAs, InP) je ještě vyšší. Pohybuje se kolem 25 % u sériové výroby, avšak cena je několikanásobně vyšší. Proto se takové články používají především v kosmických aplikacích, kde cena není limitujícím parametrem, je však nezbytná maximální účinnost a odolnost proti kosmickému záření. Zde se používají především monokrystalické články na bázi InP či epitaxně připraveného GaAs/Ge. Zvláště GaAs má větší odolnost proti kosmickému záření a při rostoucí teplotě článků klesá účinnost fotovoltaické přeměny mnohem pomaleji, než je tomu u jiných polovodičů. Existuje i tzv. tandemové uspořádání, kdy články na odlišné bázi jsou umístěny za sebou, a každý využívá jinou oblast spektra [4].

Tenkovrstvové články bývají kromě křemíku např. na bázi CuInSe, CdTe či na bázi heteropřechodů mezi různými druhy polovodičů. Takové články jsou sice relativně levné, ale mají nižší účinnost kolem 10 % a navíc největším problémem bývá stabilita parametrů. Lze vyrobit takový článek s přijatelnou účinností až 15 %, ale účinnost brzy klesá a po relativně krátké době je nižší než 10 %. To znamená, že solární systém by musel zaujímat větší plochu. Cena půdy v evropských zemích je však obvykle vysoká, a proto se použití těchto článků v solárních fotovoltaických systémech příliš nerozšířilo. Dobře se ale tenkovrstvové články uplatňují v kapesních kalkulačkách napájených elektrickou energií z fotovoltaické přeměny záření. Při malých intenzitách osvětlení totiž pracují lépe [4].

Fotovoltaické panely

Do fotovoltaických panelů se jednotlivé články skládají v sério-paralelní kombinaci, aby při definovaném osvětlení poskytovaly žádané stejnosměrné napětí a výkon. Maximální výkon závisí především na velikosti celkové plochy článků, tedy na velikosti panelů. Nejběžnější konstrukce fotovoltaického panelu je znázorněna schematicky v řezu na obr. 8 a výrobní postup je následující. Na přední straně fotovoltaického panelu je temperované (tzv. kalené) sklo. Tato skla jsou velmi odolná proti nárazu a odolávají i poměrně velkým kroupám. Na sklo se pokládá plastová EVA (etylvinylacetát) fólie a na ni se skládají propojené články. Kovový pásek spojuje přední kontakt jednoho článku se zadním plošným kontaktem druhého článku. Přes propojené články se znovu pokládá plastová EVA fólie a

zadní stěnu tvoří zpravidla laminátová kompozice PVF-PET-PVF (polyvinylidenfluorid-polyetyléntereftalát-polyvinylidenfluorid). Poté se vyčerpá vzduch mezi těmito vrstvami a panel se zahřeje nad teplotu tání EVA fólie. Etylvinylacetát se po teplotním zpracování rozteče a jako zalévací hmota zalije články v prostoru mezi předním sklem a zadní laminátovou stěnou panelu. Nakonec se panely rámují a zatmelují silikonovým tmelem do hliníkových profilů a opatřují krabicí s výstupními kontakty. Hotové fotovoltaické panely jsou tak utěsněny proti vodě či jiným nečistotám. Životnost kvalitních panelů na bázi krystalických polovodičů bývá 20 až 30 let [4].

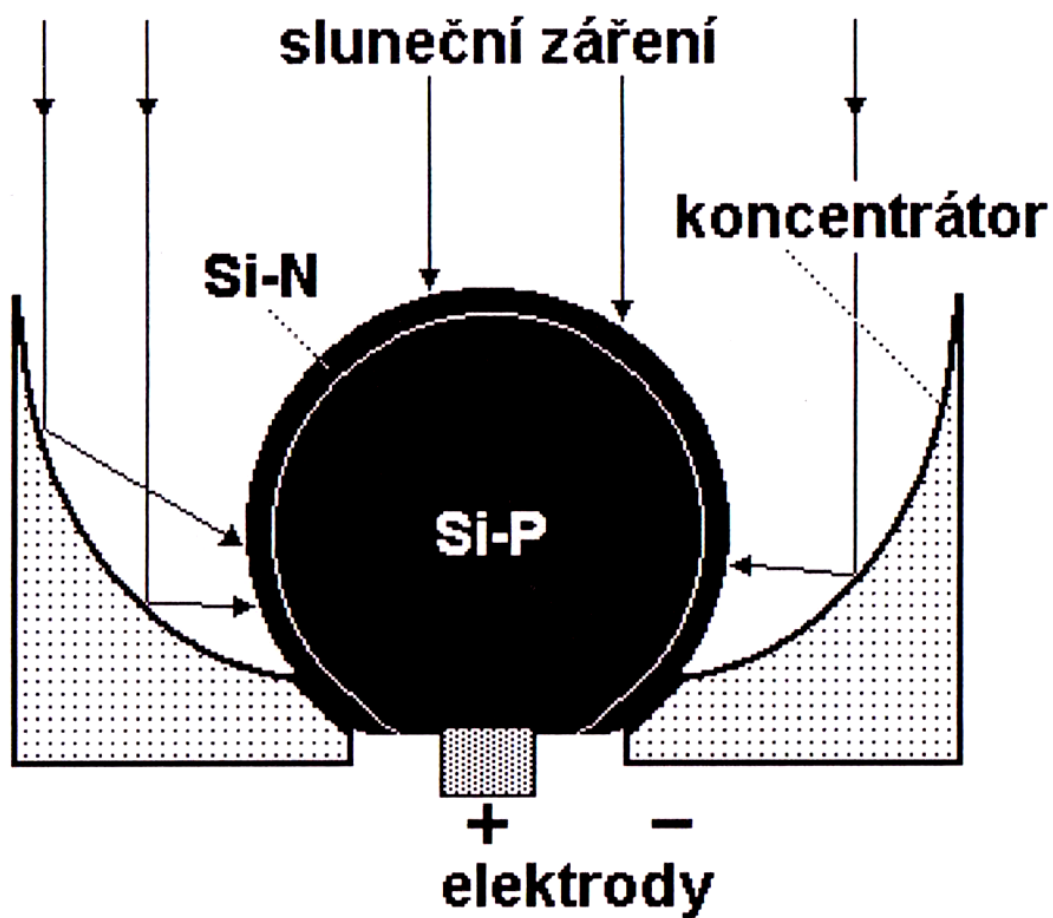


Obr. 12 – Schéma běžného fotovoltaického panelu v řezu [8]

Oboustranné fotovoltaické panely složené z oboustranných fotovoltaických článků jsou výhodnější než dosud používané panely standardní. Přitom jejich cena se příliš neliší, u některých se dokonce vůbec neliší od ceny jednostranných panelů. V dnešní době, ale tento typ panelů ustoupily do pozadí a výroba se spíše soustředí na masové vyrábění klasických panelů. I když rozdíl ve výrobní technologii spočívá pouze v tom, že na zadní straně je použit průhledný laminát a zadní kontakty článků nejsou celoplošné, jak bylo řečeno. Panel je sice

optimalizován na dopad záření z přední strany, ale účinnost fotovoltaické přeměny při dopadu záření na zadní stranu je jen o málo nižší. Navíc oboustranné (bifaciální) panely na bázi c-Si jsou v infračervené oblasti spektra transparentní pro záření s vlnovou délkou $\lambda > 1\ 100$ nm, tedy s energií fotonů menší, než jaká odpovídá šířce zakázaného pásu. Toto záření představuje více než 20 % energie slunečního záření a úměrně tomu se tedy v oboustranných panelech absorbuje méně energie transformované na teplo v porovnání s jednostrannými panely. Tyto panely mají proto nižší pracovní teplotu. S tím souvisí i vyšší účinnost fotovoltaické přeměny energie, což jednak plyne z teorie polovodičů, jednak to bylo i experimentálně potvrzeno [4].

Další technologie zlepšující účinnost FV panelů jsou články na bázi propojených monokrystalických křemíkových kuliček se sférickým přechodem PN. Technologie je sice známá už několik let, ale teprve nedávno začala sériová výroba a komerční prodej. Mohou být jak tuhé se skleněnou čelní stranou, tak i flexibilní zapouzdřené v plastu obvykle s teflonovou čelní stranou. Kuličky křemíku o průměru ca 0,6 mm jsou uvnitř typu P a na povrchu typu N, mají tedy pod povrchem sférický přechod PN. Vyrábějí se odkapáváním taveniny dopované příměsí typu P z kapiláry, která ztuhne během volného pádu. Poté probíhá difúze a předopování povrchové vrstvy příměsí typu N. Kuličky jsou umístěny na hliníkové fólii v dírkách o menším průměru, kterými nemohou projít, v prohlubních tvořících malý parabolický koncentrátor záření. Hliníková kostra tvoří jednu zápornou elektrodu, dole je v každé kuličce část oblasti typu N odleptána a do oblasti typu P je zaveden kontakt, který tvoří druhou kladnou elektrodu. Toto uspořádání je schématicky znázorněno na obr. 9. Celý článek je zapouzdřen a z těchto článků jsou vyráběny různě velké tuhé či flexibilní panely. Ty flexibilní je možné srolovat a vzít do terénu. Výhodou je jednak skladnost, flexibilita a menší hmotnost, ale největší předností je asi sedmkrát menší spotřeba křemíku v porovnání se standardními panely. Ale je možné, že technologická náročnost této výroby by mohla tyto výhody převážít. Navíc při šikmém osvětlení s velkým úhlem dopadu je potlačen efekt soustředění záření koncentrátorem na kuličku, což vede ke snížení účinnosti panelu. U těchto panelů by se proto zvláště dobře uplatnil sledovač Slunce a automatický pohyblivý stojan. Účinnost těchto panelů je zatím nižší, pohybuje se kolem 14 %. Konstrukteři ale věří, že se časem dostanou na hodnoty účinnosti kolem 18 %, které jsou běžné u standardních panelů [4].



Obr. 13 – Schéma uspořádání křemíkové kuličky se sférickým přechodem PN s koncentrátorem záření [4]

2 Měření reálného FV systému pomocí termokamery

2.1 Měřený FV systém

Provedl jsem měření fotovoltaického systému umístěného na budově Západočeské univerzity fakulty FEL v Plzni. Tato FV elektrárna má výkon 20 kW a je v provozu od roku 2004. To znamená, že její panely jsou staré téměř 10 let, a i když jsou přibližně jen po třetině své životnosti, je možné, že některé z nich mohou být ve špatném stavu. Fotovoltaické panely použité pro tuto elektrárnu jsou z monokrystalického křemíku modré barvy. Celková plocha FV panelů je 163 m². Panely jsou položeny na dvě velké kovové konstrukce a jsou nasměrovány na Jih pod úhlem 45°. Na obr. 14 je vidět, že panely jsou uspořádány nad sebou v šesti dlouhých řadách.



Obr. 14 – Snímek fotovoltaické elektrárny umístěné na střeše budovy ZčU FEL

Dále jsem kontroloval i panely, které jsou umístěné také na budově ZčU fakulty FEL, ale tvoří samostatný systém. Tento systém je složený z typově různých panelů a jsou zde i u některých použity pomocné prvky, jako jsou například sledovače slunce s různými rozsahy pohybu. Jeden těchto panelů je ukázán na obr. 15.



Obr. 15 – Ukázka fotovoltaického panelu

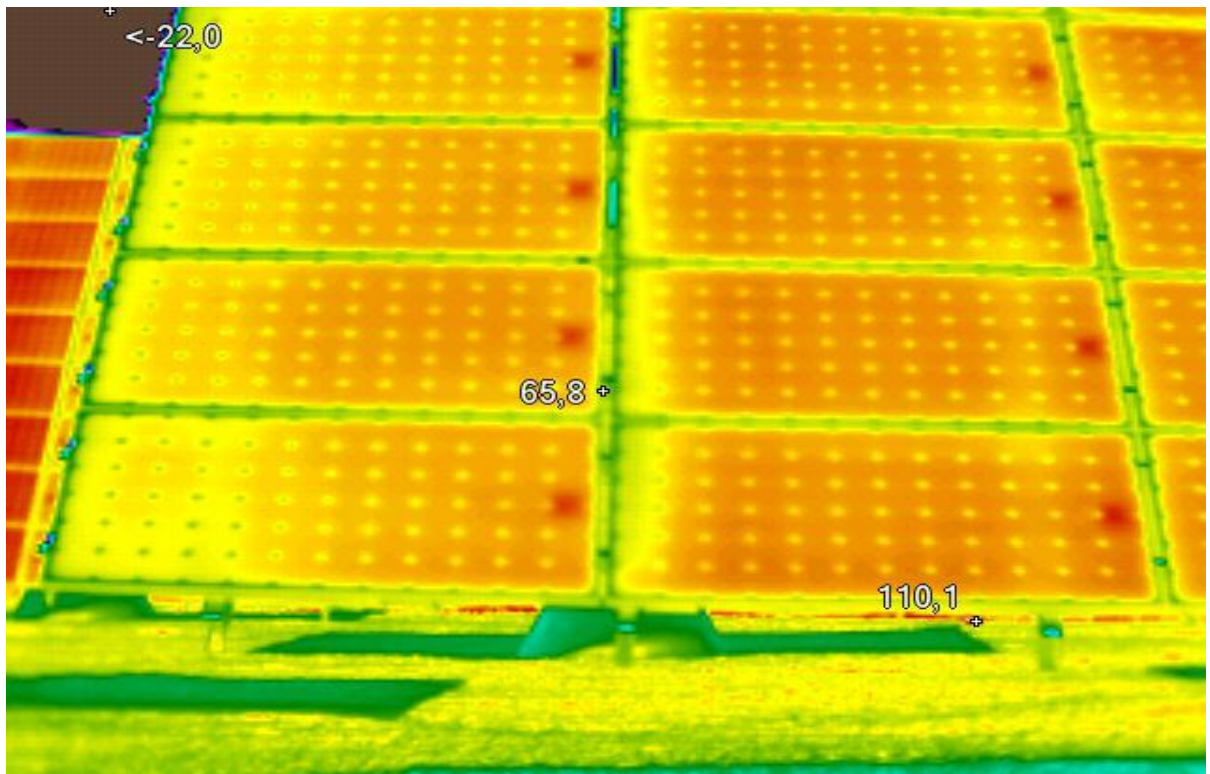
2.2 Podmínky měření

Podmínky měření byly vcelku dobré. Měření jsem prováděl po dvanácté hodině, takže slunce bylo v ideální poloze vůči panelům. Tento den pátek 26. 4. bylo slunečno a oblačnost byla velice nízká, i když intenzita záření se pohybovala někde pod 800 W/m^2 . Panely nebyly výrazně ochlazovány prouděním vzduchu, jelikož nebyl skoro žádný vítr. Teplota vzduchu byla kolem $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Teplota panelů se pohybovala přibližně mezi $60 \text{ }^\circ\text{C}$ až $70 \text{ }^\circ\text{C}$.

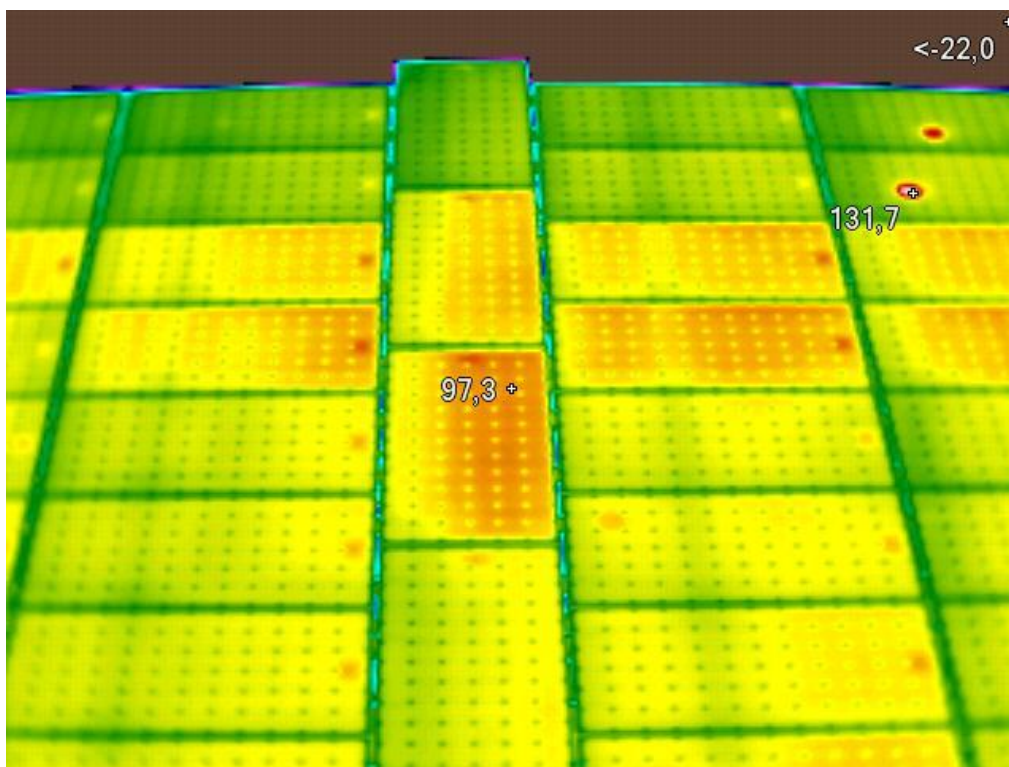
2.3 Teorie analýzy termografických snímků FV panelů

Základním znamením při měření termokamerou fotovoltaických panelů je, že při nějaké poruše, chybě či nečistotě se objeví na termografickém snímku zvýšená teplota v bodě a okolí anomálie. Zvýšení teploty nastává zjednodušeně díky tomu, že pokud fotovoltaický článek má poruchu a není schopen převádět energii dopadajícího slunečního záření na elektrickou je tato energie převedena na energii tepelnou. Takovéto projevy jsem hledal na fotovoltaické elektrárně na budově Zcu FEL.

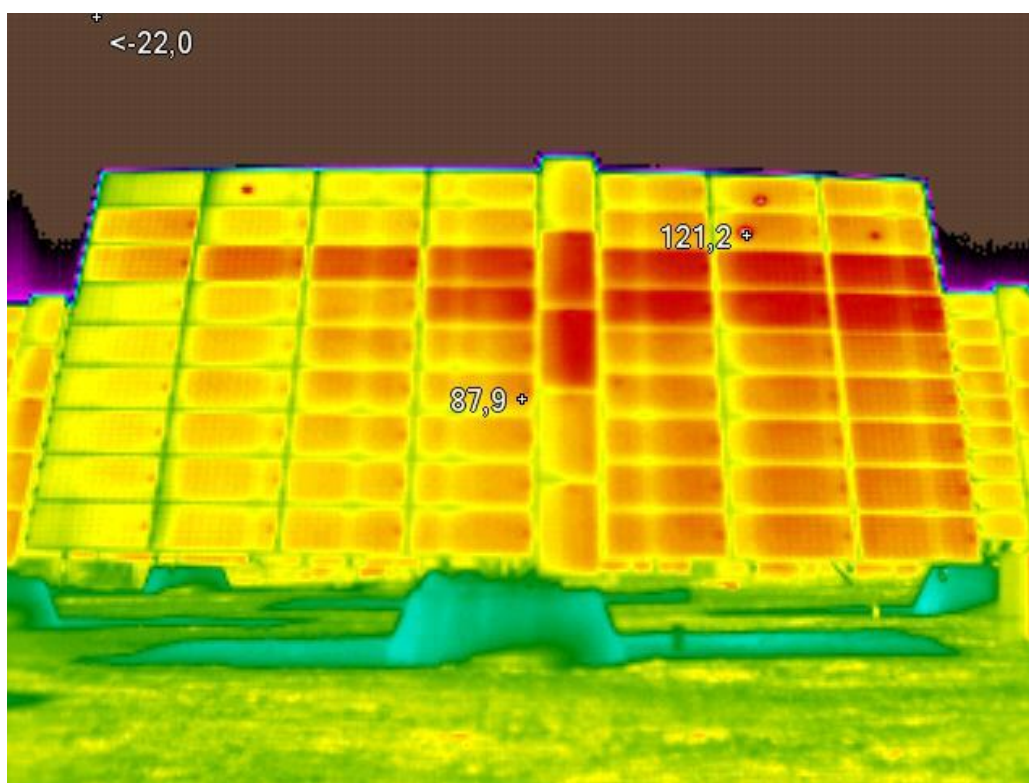
Při pohledu termokamerou na fotovoltaické panely můžeme nejčastěji zaznamenat zvýšenou teplotu v místě připevnění krabičky na vyvedení kontaktů (obr. 16). Také lze vidět vliv konstrukce, na které jsou panely posazeny (obr. 16 a 17). Termovizní snímek může také odhalit ohnuté panely, díky různému zbarvení jejich povrchu, tedy zdánlivě změně teploty (obr. 16 a 18). Dále jsou poznat od sebe různé druhy panelů, díky jejich rozdílné teplotě povrchu (obr. 17 a 18).



Obr. 16 - Infračervený snímek s vyznačenými teplotami důležitých bodů FV panelů na FV elektrárně v Strašicích (teploty jsou ve $^{\circ}\text{C}$)



Obr. 17 - Infračervený snímek s vyznačenými teplotami důležitých bodů FV panelů na FV elektrárně v Strašicích (teploty jsou ve °C)



Obr. 18 - Infračervený snímek s vyznačenými teplotami důležitých bodů FV panelů na FV elektrárně v Strašicích (teploty jsou ve °C)

Na obr. 19 a 20 jsou také znatelné narušené fotovoltaické články v horních částech elektrárny. Tyto chyby lze určit podle jejich zvýšené teploty oproti zbylému povrchu panelu a jejich náhodného rozmístění. Proto se dá říci, že jsou s největší pravděpodobností způsobeny vadnými FV články.

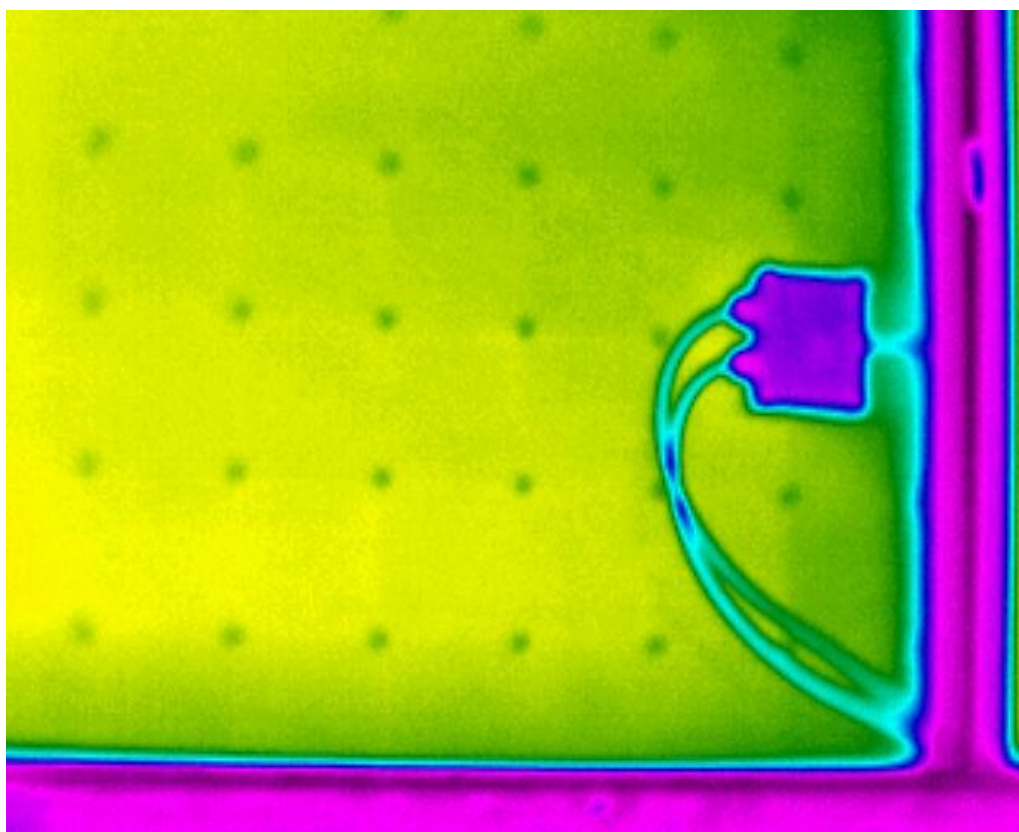
2.4 Průběh měření

Fotovoltaická elektrárna na budově Západočeské univerzity fakulty FEL ještě nebyla diagnostikována pomocí termovize. Měření bylo pilotní bez předchozích dat, se kterými by se dalo porovnávat. Také proto jsem nevěděl, co přesně můžu očekávat. Předěšlá diagnostika této FV elektrárny se prováděla jen pomocí měření jejího výkonu respektive vyrobené energie, jako je to v dnešní době u většiny FV elektráren. Pokud by byly panely kontrolovány od počátku, dala by se určit jejich postupná degradace a bylo by známo, jak se mění jejich stav v průběhu provozu.

Měření jsem prováděl pomocí termokamery Fluke Ti55. Díky uspořádání FV panelů a umístění elektrárny blízko okraje střechy nebylo snadné zhodnotit stav jednotlivých panelů, zvláště těch, které jsou v horních částech konstrukce. Proto jsem panely, které byly nedostupné z přední strany, měřil ze strany zadní jak je například vidět na obr. 19 a 20.



Obr. 19 – Snímek zadní části FV panelu ve viditelném spektru světla



Obr. 20 – Snímek zadní části FV panelu v infračerveném spektru záření

I přes velikost fotovoltaické elektrárny bylo měření poměrně rychlé. I když se v dnešní době tato elektrárna řadí spíše k malým zdrojům elektrické energie, po nedávném rychlém rozvoji těchto obnovitelných zdrojů. Manipulace s termokamerou byla poměrně jednoduchá. Musel jsem si dát pozor na přímý odraz slunce od fotovoltaických panelů, který se občas objevoval při určitém natočení termokamery proti panelu. Odraz slunce se projevoval na termografickém snímku jako oblast s vysokou teplotou. Při měření z přední strany panelů jsem měl problém s displejem termokamery, který byl ozářen přímým sluncem a díky špatně viditelnému obrazu, bylo provádění diagnostiky panelů složitější. Měřením ze zadní strany byly tyto obtíže, odraz slunce i špatný obraz, eliminovány. Ze zadní strany panelů byla diagnostika jednodušší, ale takováto metoda je méně přesná díky dalším materiálům chránícím zadní stranu panelů a také se nezachytí povrchové vady panelů, jako jsou například nečistoty uchycené na přední straně panelu.

2.5 Vyhodnocení měření

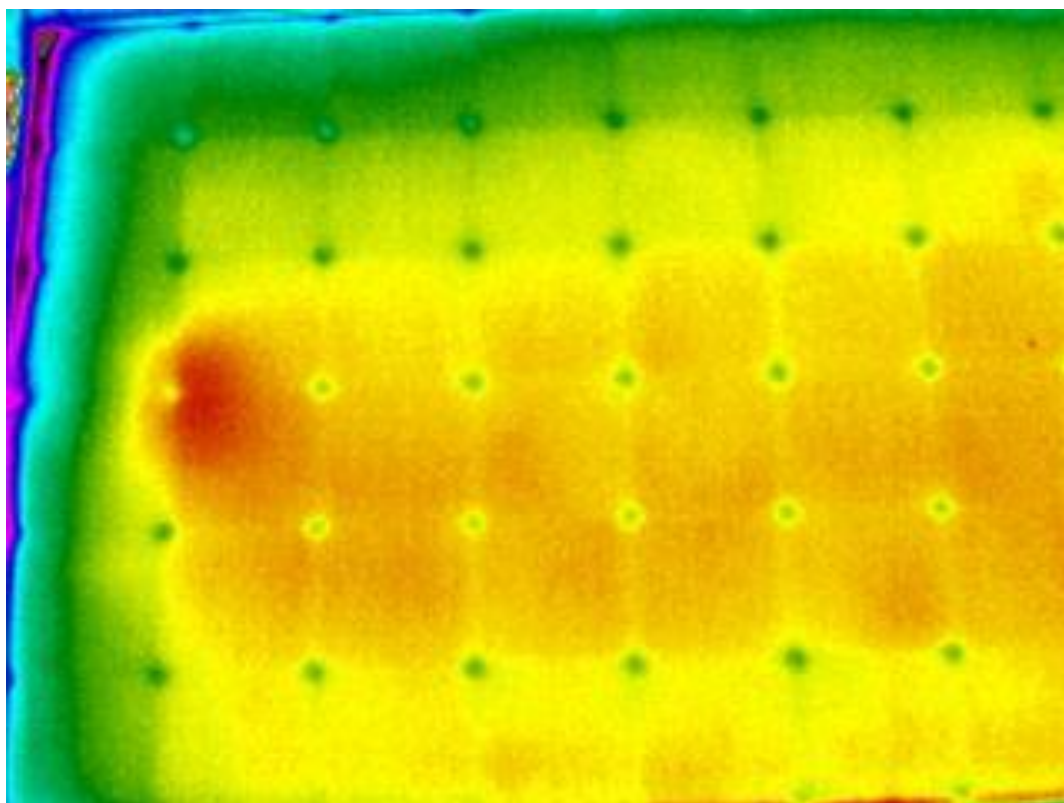
Měření jsem vyhodnocoval pomocí softwaru, který je součástí vybavení termokamery Fluke Ti55. Tento software se jmenuje SmartView verze 1.9. Za pomoci tohoto programu se dají editovat naměřené snímky. Například může být Infračervený snímek převeden na viditelné záření, označena teplota určitého místa, ve vybrané oblasti spočítána průměrná teplota a další užitečné funkce.

3 Analýza měření

3.1 Analýza FV elektrárny na budově Zču FEL

V průběhu měření jsem narazil na tři panely, které vykazovali známky nefunkčních fotovoltaických článků.

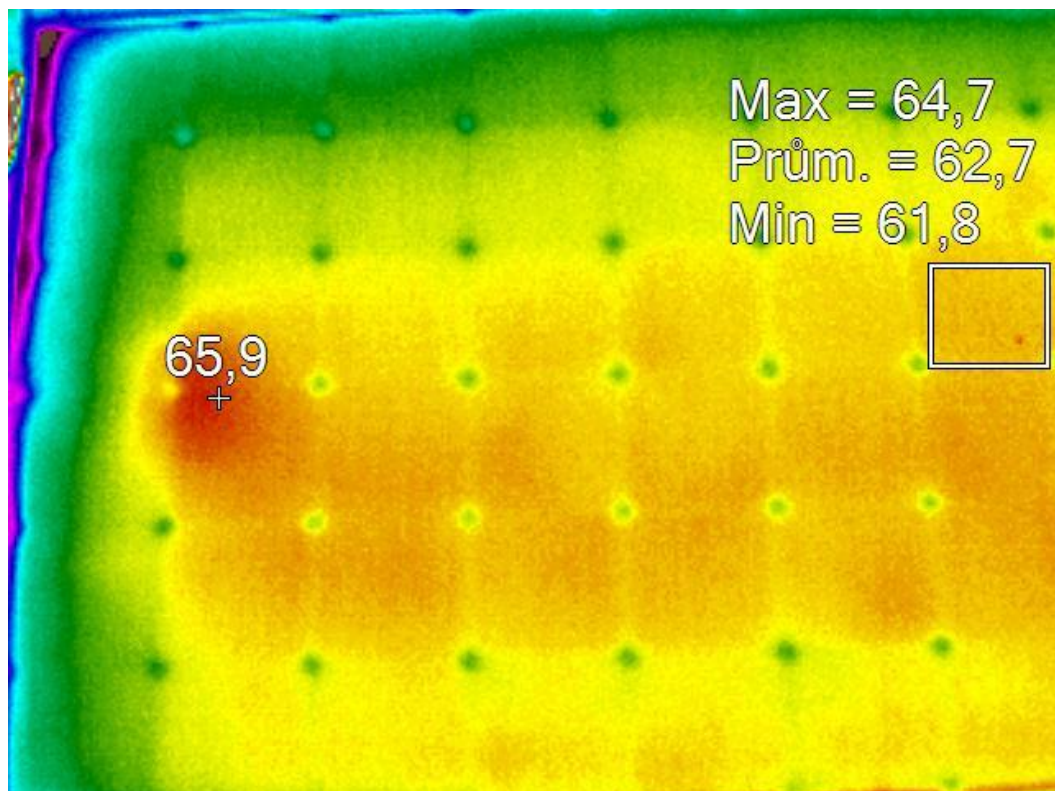
První panel, který je ukázán na obr. 21, je poškozen velice nepatrně. Porucha se projevuje jako bod se zvýšenou teplotou.



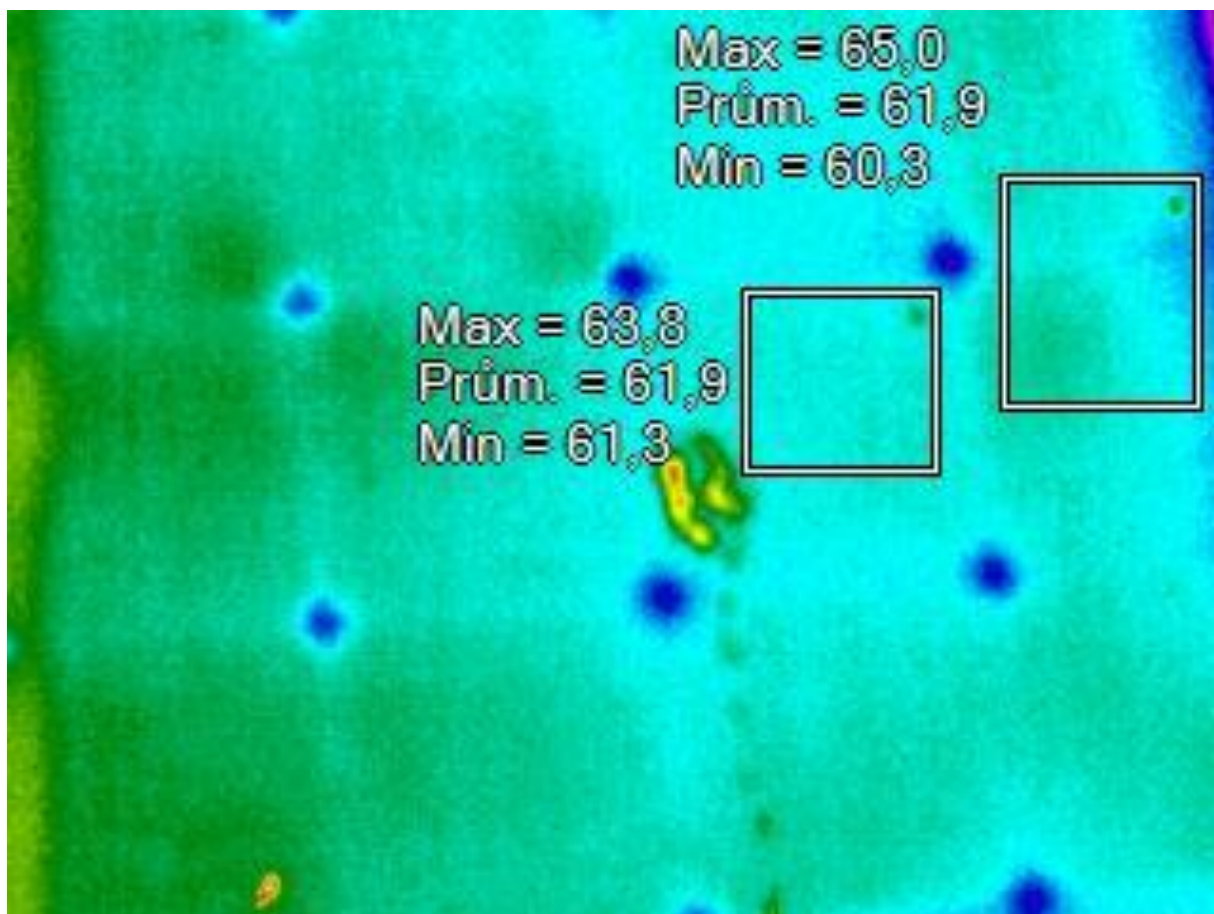
Obr. 21 – Příklad infračerveného snímku FV panelu

Při analýze této poruchy jsem zjistil, že teplota bodu se zvedla oproti průměrné teplotě okolních článků o 2 °C a to jsem vyznačil na obr. 22 pomocí obdélníku, který ohraničuje oblast, ze které je počítána její průměrná teplota, minimální teplota a maximální teplota. Maximální teplota je právě teplota poruchového článku. Na tom to snímku na levé straně je

také vidět místo s větším oteplením. Toto je způsobeno krabičkou na vyvedení kontaktů, která je připevněna ze zadní části panelu, jako je ukázáno na obr. 16 a 17. Proto se tento jev projevoval na každém měřeném panelu. Teplota těchto míst byla zvýšena až o 5 °C. To znamená, že každý panel má úsek kde je zvýšená teplota a tam dochází ke snížení účinnosti zasažených článků díky vyšším pracovním teplotám a také k většímu tepelnému namáhání, které by mohlo způsobit rychlejší degradaci fotovoltaických článků. Pokud by zde nastala porucha článků, nebylo by možné ji jednoduše zachytit pomocí měření termokamerou. Pokud bychom chtěli udělat opravdu důkladné měření fotovoltaických panelů, museli bychom tento problém vyřešit. Jedno řešení by mohlo být odmontování krabičky, tak aby se dotýkala panelu jen minimálně a až poté provést samotné měření. Takovéto měření fotovoltaické elektrárny by, ale bylo zdlouhavé a v některých případech i neproveditelné. Jelikož je zasaženo jen něco kolem 1 % plochy panelu, dal by se tento jev zanedbat.

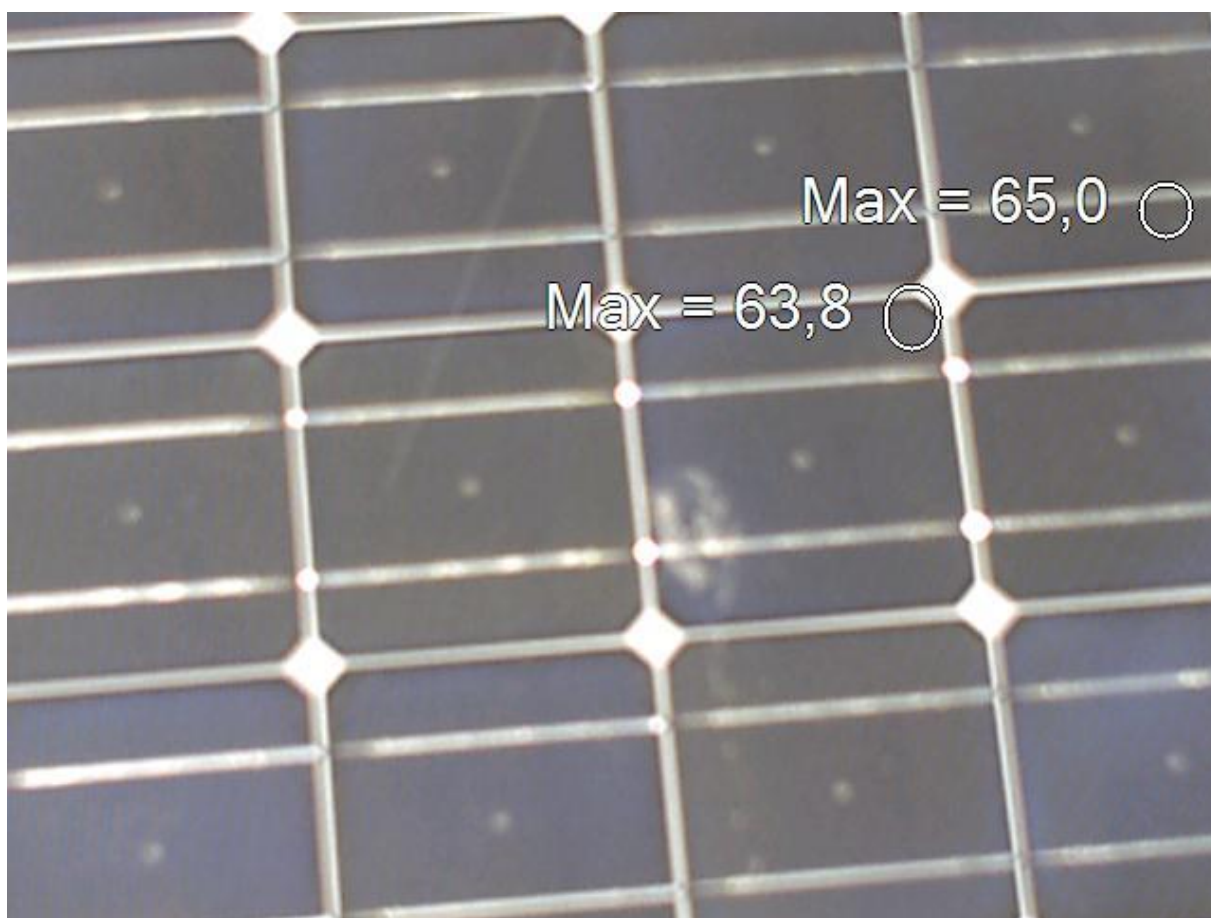


Obr. 22 – Infračervený snímek s vyznačenými teplotami důležitých bodů FV panelů
(teploty jsou ve °C)



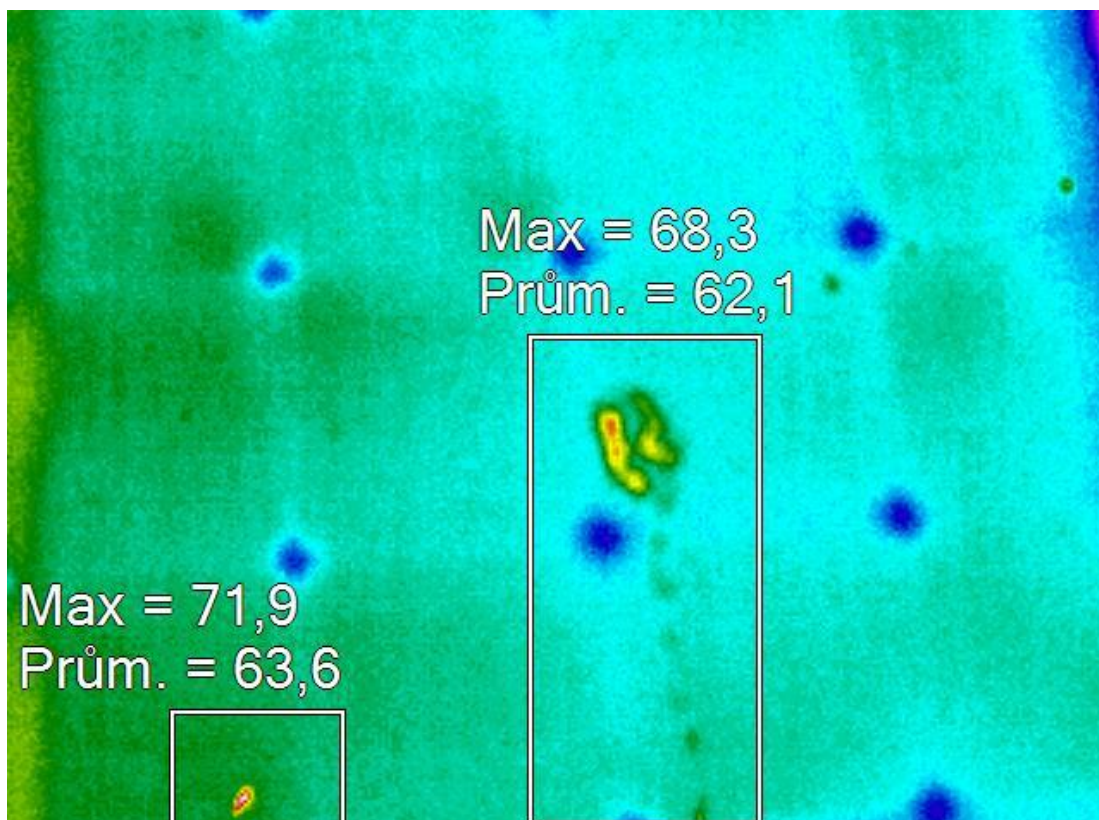
Obr. 23 - Infračervený snímek s vyznačenými teplotami důležitých bodů FV panelů
(teploty jsou ve °C)

Další náález je ukázaný na obr. 23. Opět jsou zde body s větší teplotou, než je v jejich bezprostřední blízkosti. Oba body jsou označeny obdélníky a nachází se v jejich pravém horním rohu. Jsou zde znázorněny průměrné teploty, ale hlavně maximální teploty odpovídající teplotám vyšetřovaných bodů. Maximální teploty byly zvýšené oproti průměrným teplotám, asi o 1,9 °C a o 3,1 °C. Na tomto snímku je také zachycen další problém se kterými se můžeme setkat při kontrole fotovoltaických panelů a to jsou nečistoty, které brání průchodu světla k fotovoltaickým článkům. Bylo možné, že zvýšená teplota posuzovaných poruch může být způsobena pouze nečistotami povrchu. Proto jsem tento snímek dále převedl na viditelné záření (obr. 24) a ukázalo se, že jsou to opravdu poruchy fotovoltaických článků. Na obr. 24 nejsou žádné známky znečištění v těchto bodech.

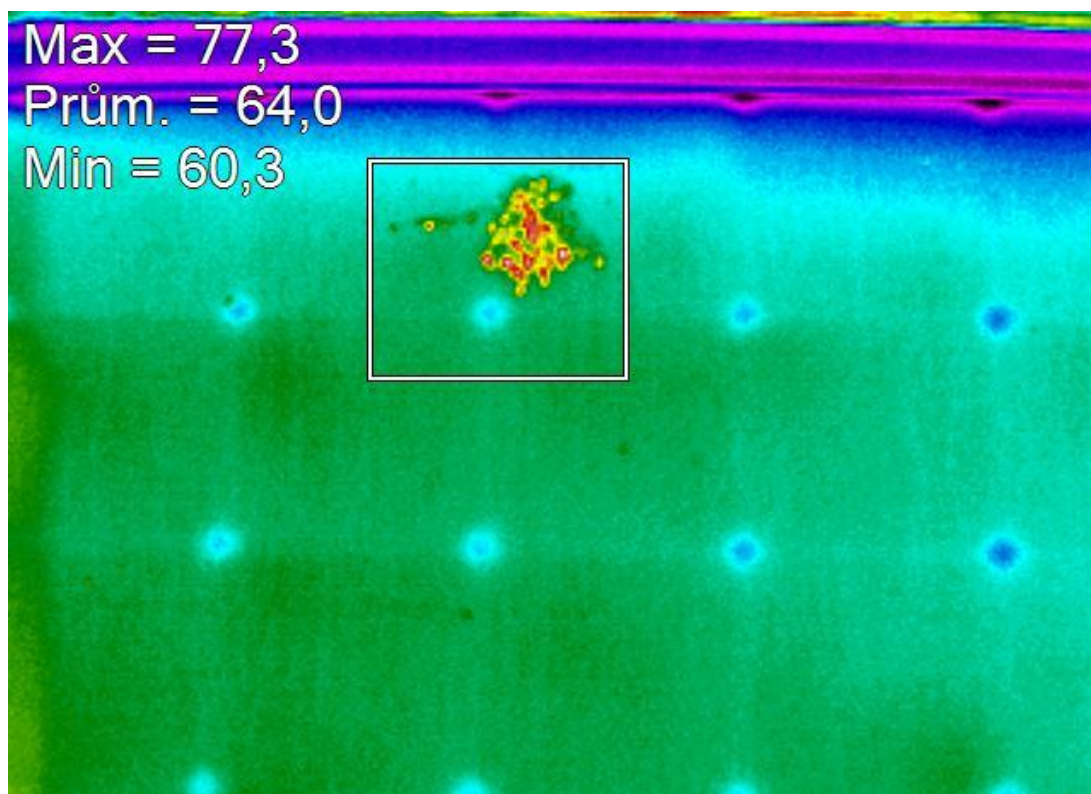


Obr. 24 - Snímek ve viditelném spektru s vyznačenými teplotami důležitých bodů FV panelů (teploty jsou ve °C)

Při velkém znečištění panelů by mohla účinnost výrazně klesnout. V mém případě jsem takovéto nečistoty málem přehlédnul, ale díky termografickým snímkům se tento problém na nich opět projevil zvýšenou teplotou zasaženého místa. Jak to můžeme vidět na obr. 25 a 26.



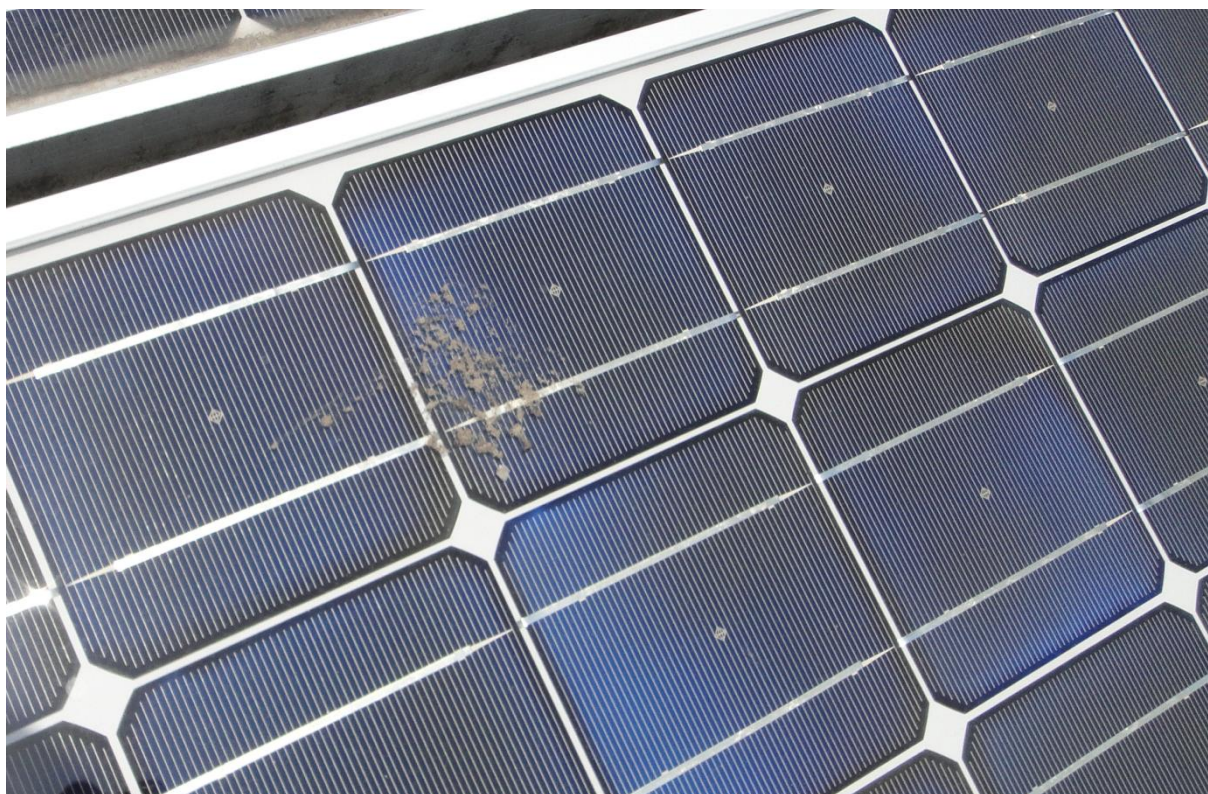
Obr. 25 - Infračervený snímek s vyznačenými teplotami důležitých bodů FV panelů
(teploty jsou ve °C)



Obr. 26 - Infračervený snímek s vyznačenými teplotami důležitých bodů FV panelů
(teploty jsou ve °C)

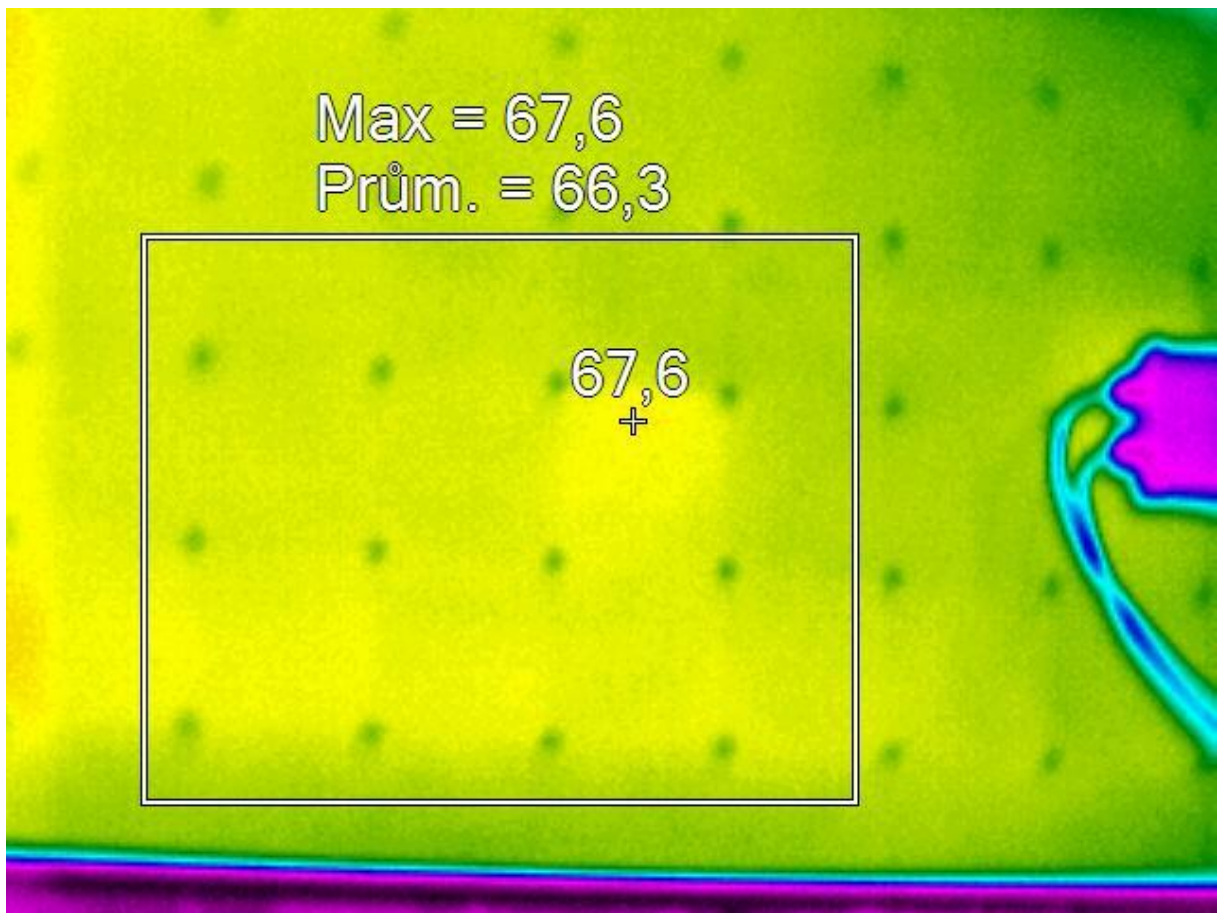
Jak je vidět na obr. 25 a 26 teplota panelů v místech znečištění se od průměrné liší více než, když je nefunkční FV článek. Z těchto snímků je patrné, že teplota byla zvýšena až o 13,3 °C. Jelikož jsou to teploty povrchu panelů a mezi znečištěním a fotovoltaickými články je sklo, které je do určité míry tepelně izoluje, je jejich účinnost přeměny solární energie na elektrickou snížena jen nepatrně nebo vůbec. Samozřejmě je znečištěním zabráněno průchodu slunečního záření, ale okolní nezastíněné články nejsou vůbec těmito zvýšenými teplotami ovlivněny.

Z fotky (obr. 27) se dá říci, že nečistoty byly nejpravděpodobněji způsobeny ptačími exkrementy, díky umístění elektrárny, která je vysoko na střeše budovy v úrovni šestého patra a nad korunami stromů, takže zde nehrozí zakrytí panelů listy a přístup je k této elektrárně omezen, takže je minimalizována možnost znečištění nebo poškození lidským vlivem, na rozdíl od fotovoltaických elektráren umístěných na polích a více přístupných místech.

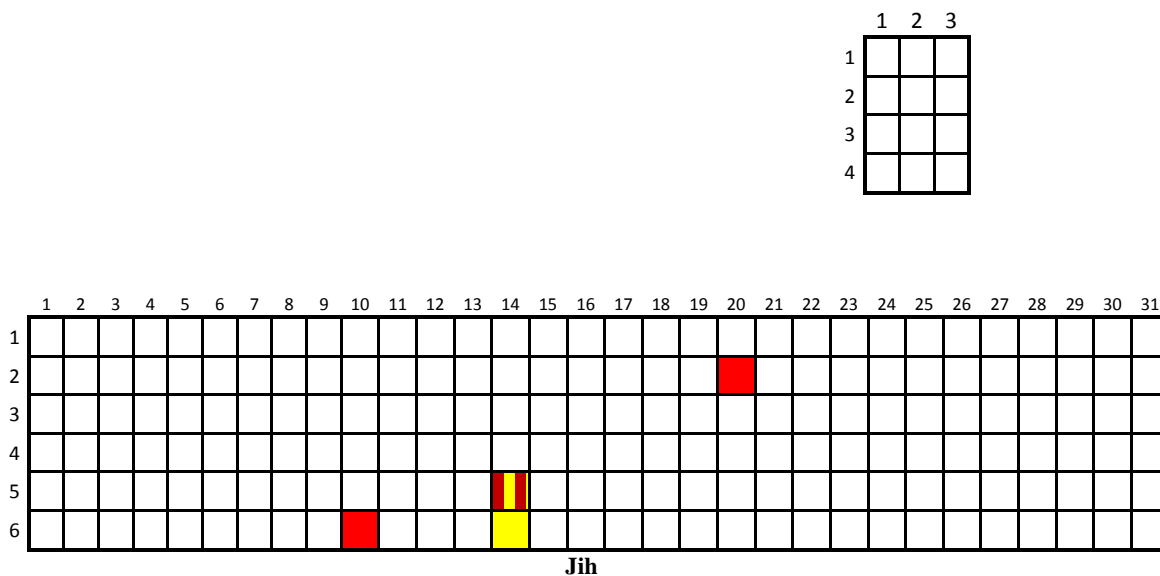


Obr. 27 – Snímek nečistoty uchycené na FV panelu

Další panel, který vykazoval poruchu fotovoltaických článků je vidět na obr. 28. Jsou zde označeny opět teploty maximální teploty a průměrné. Rozdíl těchto teplot je zde jen 1,3 °C a to je způsobeno tím, že se zde nejedná o bodovou poruchu, ale o částečnou poruchu pěti bloků FV článků, kde je vyšší teplota a tím se zvedá i průměrná teplota a rozdíl mezi nimi klesá. Jelikož se panel skládá ze sedmdesáti dvou takovýchto bloků, je zasaženo něco kolem 3,5 % panelu a to už se může na výkonu panelu projevit více.



Obr. 28 - Infračervený snímek s vyznačenými teplotami důležitých bodů FV panelů
(teploty jsou ve °C)



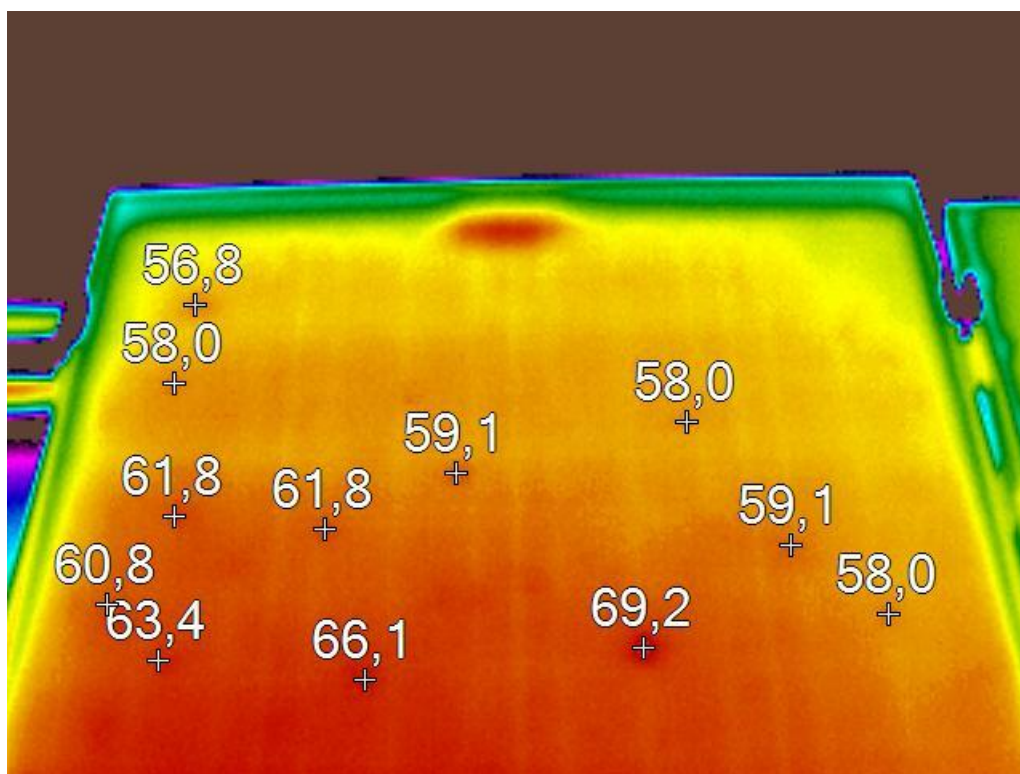
Obr. 29 – Schematické znázornění polohy panelů FV elektrárny Zču FEL (bráno z přední strany)

Na obr. 29 je schematicky znázorněna poloha poškozených panelů na fotovoltaické elektrárně na budově Zču FEL. Červeně zbarvení znázorňuje poškozené panely, žlutý panel je zašpiněný a červenožlutý panel je jak zašpiněn tak i poškozený.

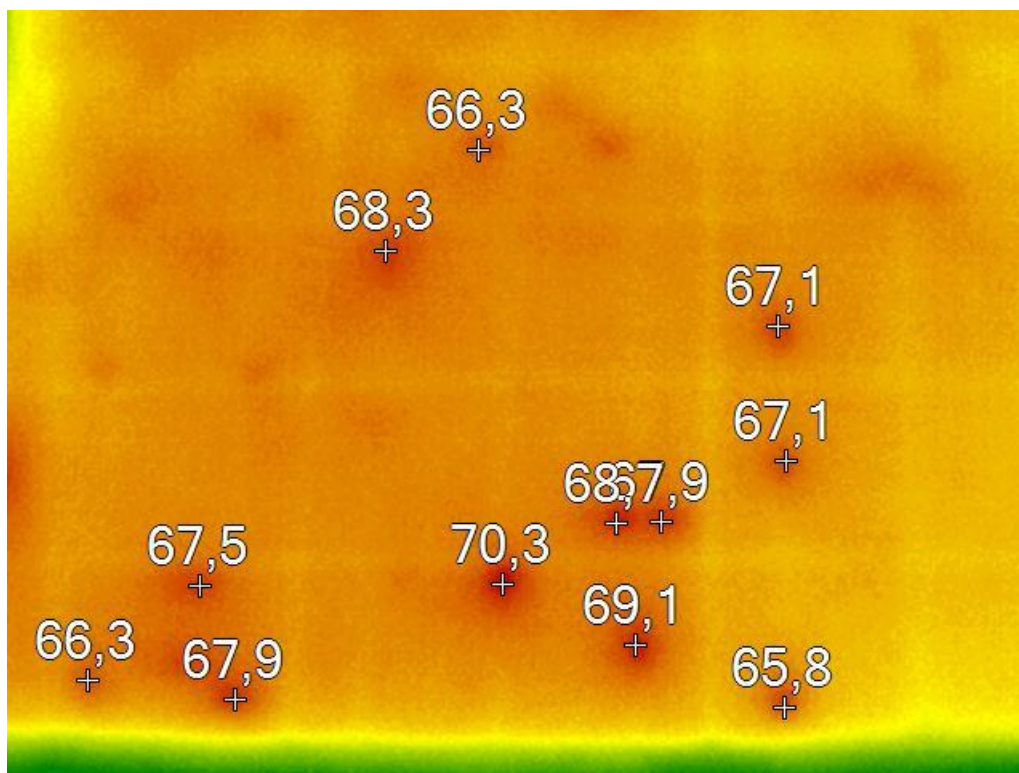
3.2 Analýza ukázkové FV elektrárny na budově ZčU FEL

Tato FV elektrárna je složena z různých typů FV panelů. Během její kontroly jsem objevil pouze jeden chybný panel. Jak je vidět z obr. 30 a 31, tento panel je zasažen velice znatelně.

Obr. 30 ukazuje horní část tohoto panelu. Je zde zaznamenáno velké množství bodů, které vykazují zvýšenou teplotu od ostatních správně fungujících FV článků. Obr. 31 je snímek spodní části tohoto panelu. Také jsou zde vyznačeny další zasažená místa a jejich teploty. Jak je z těchto snímků vidět, je tento panel znatelně poškozený a jeho výkon musí být velice snížen oproti jeho počátečnímu stavu.



Obr. 30 - Infračervený snímek s vyznačenými teplotami důležitých bodů FV panelů
(teploty jsou ve °C)



Obr. 31 - Infračervený snímek s vyznačenými teplotami důležitých bodů FV panelů
(teploty jsou ve °C)

Závěr

Hlavním cílem této diplomové práce bylo změřit a analyzovat současný stav fotovoltaické elektrárny umístěné na střeše budovy Západočeské univerzity fakulty FEL pomocí termokamery. Tento systém tímto způsobem ještě kontrolován nebyl. Proto jsem provedl pilotní měření. Díky mému měření již bude možnost porovnání výsledných analýz a bude také možné pozorovat postupnou degradaci těchto panelů.

Měřicí podmínky nebyly úplně ideální. Tento rok bylo velice málo slunečních dní a tak bylo velmi málo příležitostí pro provedení měření. I když jsem měřil za slunečného počasí, intenzita slunečního záření nedosahovala ani 800 W/m^2 . Díky tomu bylo měření a následná analýza snímků složitější a termokamera mohla pracovat s menší přesností.

Měřením jsem odhalil tři vadné panely velké FV elektrárny a jeden vadný panel u ukázkové FV elektrárny. Po analýze snímku jsem zjistil, že dva panely jsou zasaženy jen minimálně, chyby se projeví jako zvýšená teplota v malých bodech oproti ostatnímu povrchu panelu. Takovéto poruchy FV článků ovlivní vyráběný výkon pouze minimálně a nemusí se projevit vůbec při jeho měření. Třetí panel byl již poškozen více. Zvýšenou teplotu projevilo přibližně 3,5 % FV článků tohoto panelu. Takovéto poškození se již může na vyráběném výkonu panelu projevit. Na termografických snímcích se také projeví nečistoty povrchu panelů. Díky zvýšené teplotě těchto míst jsem mohl odhalit i špatně viditelné nečistoty. Tyto nečistoty byly nejspíše způsobeny ptačími exkrementy.

Poslední měřený panel je zasažen nejvíce. Tento panel je součástí ukázkové FV elektrárny. Termokamerou jsem odhalil více než 20 bodových poruch FV článku. Výkon tohoto panelu by měl být znatelně snížen.

Velká 20 kW FV elektrárna je i po skoro 10 letech provozu ve velmi dobrém stavu. Její panely ukázali jen minimum chybných FV článků. Dle mých odhadů se tyto chyby ve výsledném výkonu elektrárny neprojeví. Zde bych doporučil další kontrolu stavu těchto poškozených panelů a sledování jejich postupné degradace.

Na ukázkové FV elektrárně je chybný FV panel ve velmi špatném stavu a jeho stav může ovlivnit celkový vyráběný výkon celé elektrárny. Tento panel bych doporučoval odstavit, nebo vyměnit.

Použitá literatura

- [1] CIHELKA, J. *Solární tepelná technika*. Praha, 1994.
- [2] Skupina ČEZ [online]. 2009 [cit. 2013-09-03]. *Slunce a jeho energie*.
Dostupné z WWW: <<http://fotovoltaika.falconis.cz/slunce>>
- [3] SEDLÁK, B. - ŠTOLL, I. *Elektřina a magnetismus*. Academia, Praha, 2002,
ISBN 80-200-1004-1.
- [4] LIBRA, M. – POULEK, V. *Solární energie, Fotovoltaika – prospektivní trend současnosti I blízké budoucnosti*. Praha, 2006, ISBN 80-213-1488-5.
- [5] ENVIC, občanské sdružení [online]. 2009 [cit. 2013-25-03] *Trombeho stěna*
Dostupné z WWW: <<http://www.envic-sdruzeni.cz/aktuality/aktuality-obsah/trombeho-stena-zakladni-informace.htm>>
- [6] Skupina ČEZ [online]. 2009 [cit. 2013-29-03]. *Princip solárního kolektoru*.
Dostupné z WWW: <<http://www.cez.cz/edee/content/microsites/solarni/k21.htm>>
- [7] *Sluneční energie* [online]. Zlín, 2011. [cit. 2013-14-03]. Učební text. Universita Tomáše Bati.
Dostupné z WWW: <http://ufmi.ft.utb.cz/texty/env_fyzika/EF_13.pdf>.
- [8] Prof. Benda, V. - Ing. Staněk, K. - Ing. Wolf, P., [online]. 2011 [cit. 2013-04-04].
Fotovoltaické systémy.
Dostupné z WWW: <http://www.crr.vutbr.cz/system/files/brozura_04_1104.pdf>
- [9] Vaněček, M., [online]. 2000 [cit. 2013-11-04]. *Přeměna sluneční energie v energii elektrickou*
Dostupné z WWW: <<http://www.fzu.cz/popularizace/premena-slunecni-energie-v-energii-elektrickou>>

Příloha



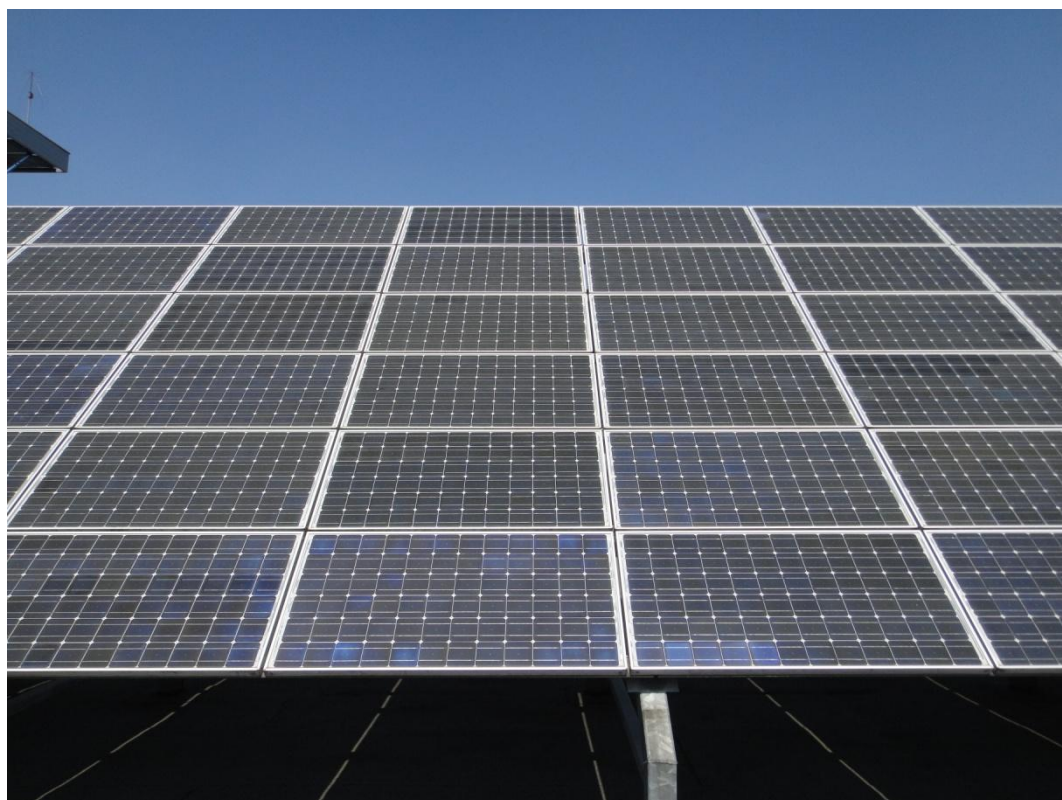
Obrázek 1 - Snímek FV elektrárny umístěné na střeše budovy ZčU FEL



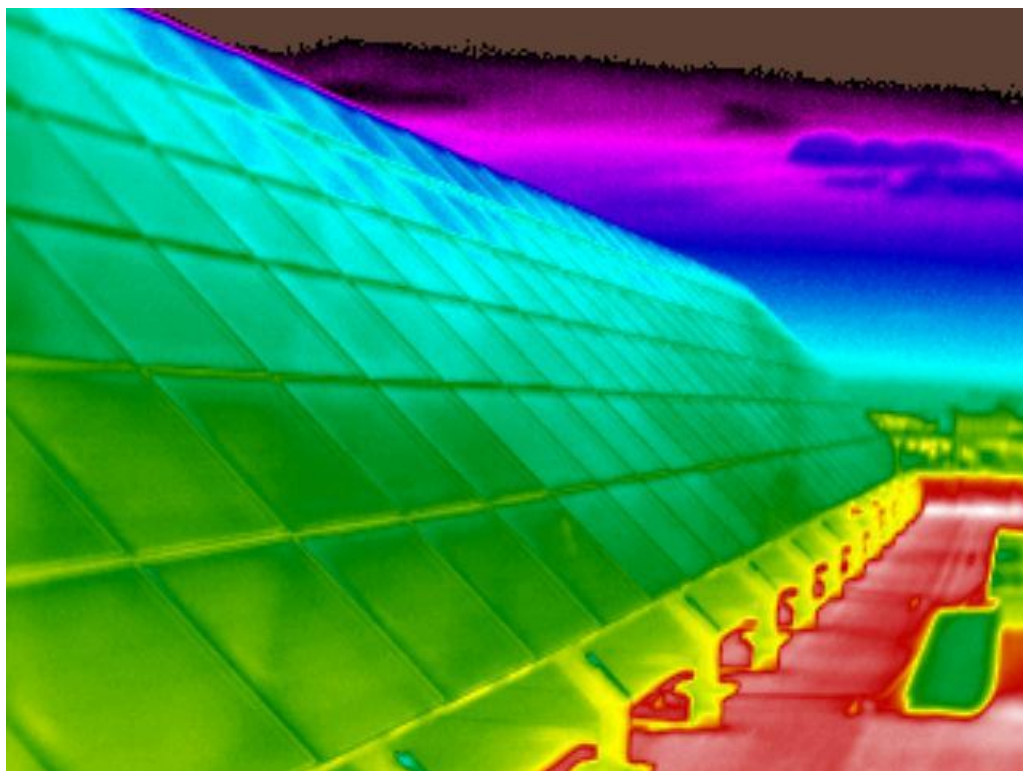
Obrázek 2 – Snímek zadní strany FV elektrárny umístěné na střeše budovy ZčU FEL



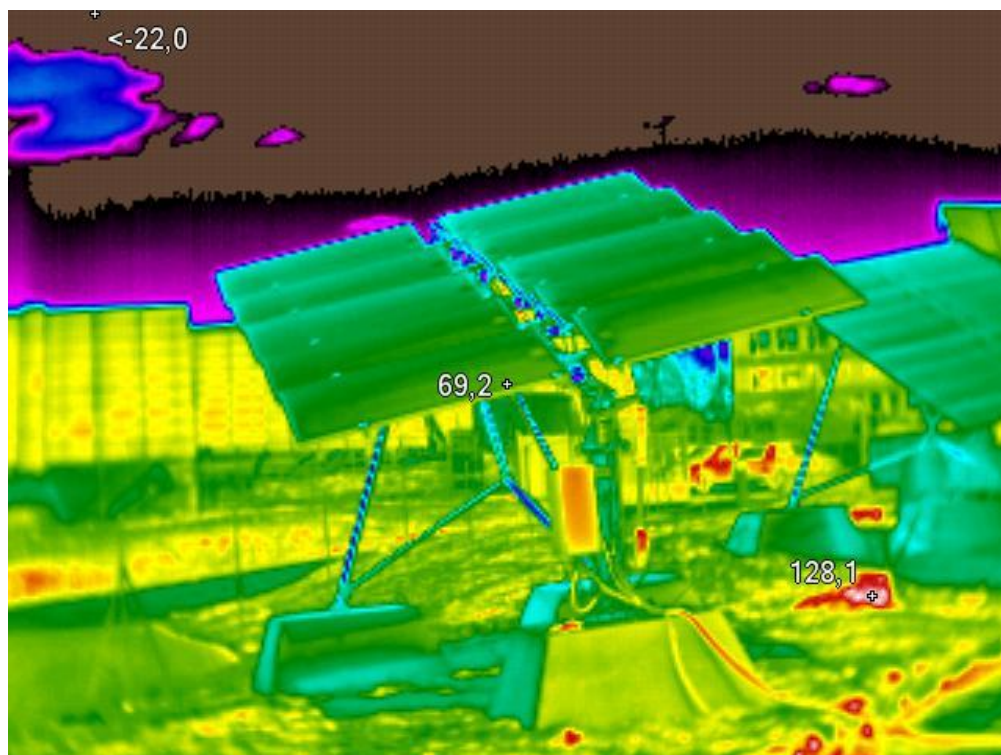
Obrázek 3 - Snímek FV elektrárny umístěné na střeše budovy ZčU FEL



Obrázek 4 - Snímek FV elektrárny umístěné na střeše budovy ZčU FEL



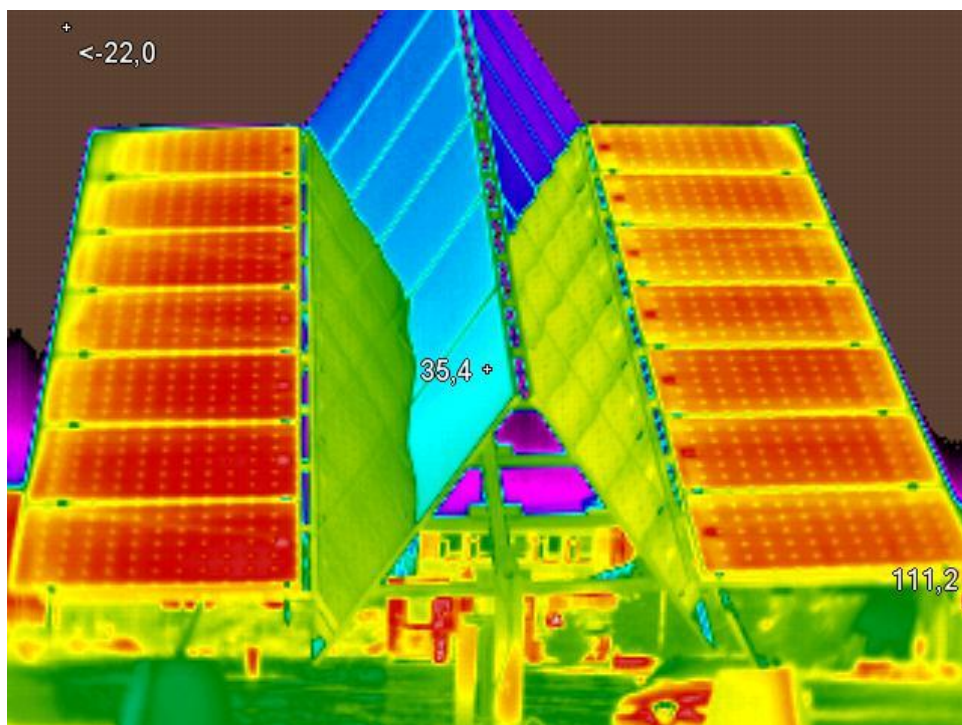
Obrázek 5 - Infračervený snímek elektrárny umístěné na střeše budovy ZčU FEL



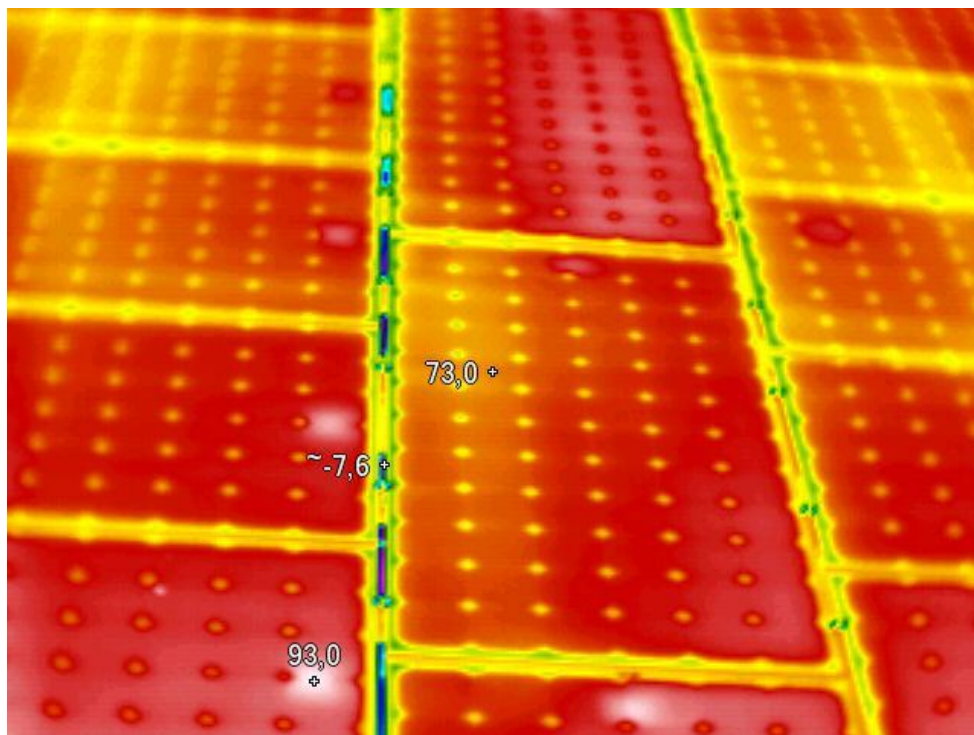
Obrázek 6 - Infračervený snímek FV panelů na FV elektrárně v Strašicích (teploty jsou ve $^{\circ}\text{C}$)



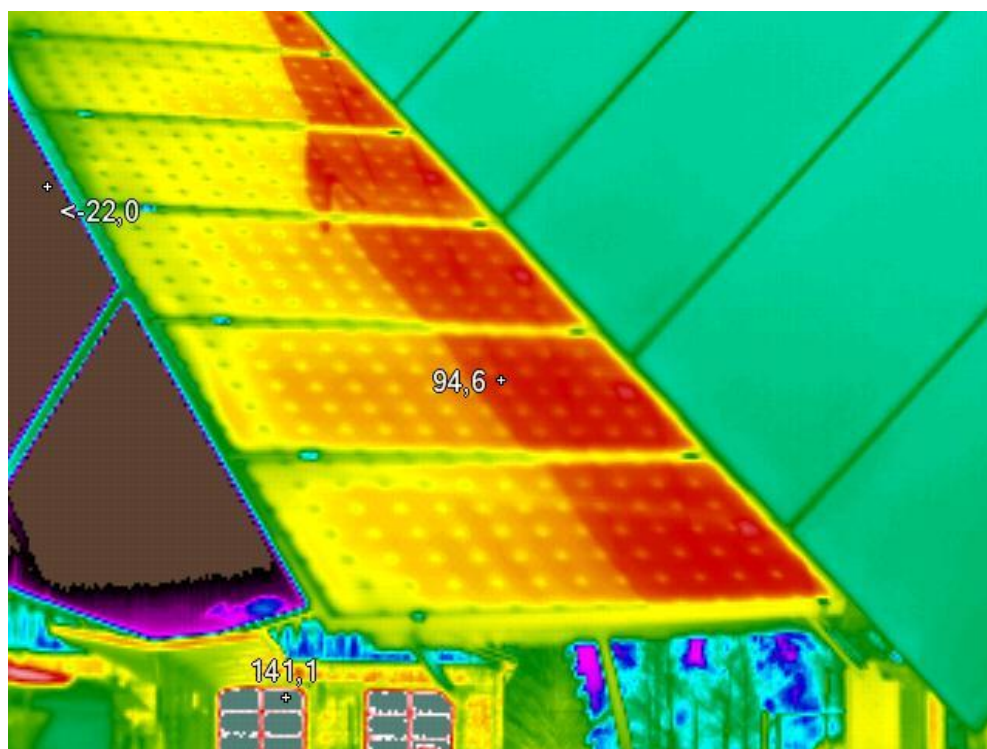
Obrázek 7 - Infračervený snímek FV panelů na FV elektrárně v Strašicích (teploty jsou ve °C)



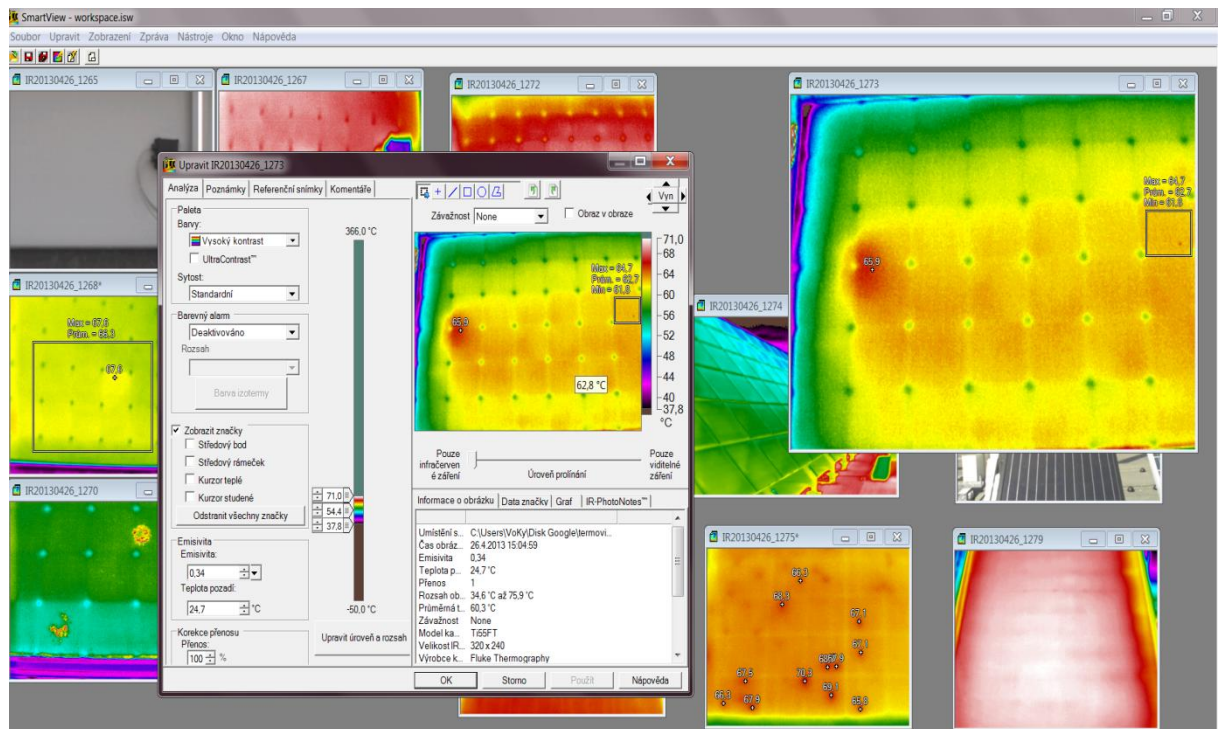
Obrázek 8 - Infračervený snímek FV panelů na FV elektrárně v Strašicích (teploty jsou ve °C)



Obrázek 9 - Infračervený snímek FV panelů na FV elektrárně v Strašicích (teploty jsou ve °C)



Obrázek 10 - Infračervený snímek FV panelů na FV elektrárně v Strašicích (teploty jsou ve °C)



Obrázek 11 – Ukázka softwaru SmartView 1.9 pro úpravu IF snímků