

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra technologií a měření

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Analýza degradace 20 kWp FV systému

Originál (kopie) zadání BP/DP

Abstrakt

Tato diplomová práce je zaměřena na možnosti využití solárního zařízení a na analýzu stavu 20 kWp FV systému. Provedením měření analyzátozem a termokamerou je vyhodnocena úroveň degradace jednotlivých komponent FV systému a jejich možné poškození.

Klíčová slova

Fotovoltaika, solární systém, degradace, termosnímek, termokamera, panely

Abstract

This thesis is aimed to possibilities of using the solar device and analyzing of its 20kWp state of the FV system. Measuring the device by analyzer or thermo camera we evaluate level of degradation of the FV device's components and their possible damage.

Key words

Photovoltaic, solar system, degradation, thermal image, thermal imager, panels

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 12.5.2014

Walter Schmidt

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Milanovy Bělíkovi, Ph.D. za vedení práce.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
ÚVOD	10
1 SOLÁRNÍ ELEKTRÁRNY	11
1.1 SOLÁRNÍ ZAŘÍZENÍ	11
1.1.1 FV panely	13
1.1.2 Termočlánek	14
1.1.3 Stirlingův motor	15
1.1.4 FV elektrárna na oběžné dráze	16
1.2 SOLÁRNÍ ČLÁNKY	17
1.2.1 Fotovoltaická přeměna	17
1.2.2 Dostupné technologie	18
1.2.3 Monokrystalické	19
1.2.4 Polykrystalické	19
1.2.5 Tenkovrstvé panely	20
1.3 APLIKACE FV SYSTÉMŮ	21
1.3.1 Používané aplikace	21
1.3.2 S pevným stojanem a pohyblivým stojanem	22
1.3.3 S pohyblivým stojanem	22
1.3.4 Akumulace solární energie	23
1.3.5 Možnosti využití FV systémů	24
1.3.6 Elektronické měniče	28
1.4 PARAMETRY FOTOVOLTAICKÉHO PANELU	28
1.5 VADY FV PANELŮ	29
2 ANALÝZA FV SYSTÉMU	30
2.1 POPIS FV ELEKTRÁRNY	30
2.2 TECHNICKÉ PARAMETRY	31
2.2.1 Umístění	32
2.3 MĚŘENÍ PARAMETRŮ	33
2.3.1 Vizuální kontrola	34
2.3.2 Termografie	34
2.3.3 Měření VA charakteristik	36
2.3.4 Výsledky měření termokamerou	37
2.3.5 Výsledky měření VA charakteristik	43
3 ZHODNOCENÍ MĚŘENÍ	46
3.1 POROVNÁNÍ PARAMETRŮ	46
3.1.1 Původní parametry	47
3.1.2 Změřené hodnoty	47
3.2 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ A DEGRADACE	48
ZÁVĚR	49
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	1
PŘÍLOHY	3

Seznam symbolů a zkratk

<i>FV</i>	Fotovoltaický systém
W_p	Výkon vyrobený solárním panelem
<i>I – V</i>	Ampér-voltová charakteristika
<i>VA</i>	Volt-ampérová charakteristika
<i>OPC</i>	Hodnoty naměřené za reálných provozních podmínek
<i>STC</i>	Hodnoty převedené ke standardním podmínkám (1000 W/m ² , 25°C)
<i>MJ / kg</i>	Jednotka výhřevnosti
<i>FF</i>	Faktor plnění

Úvod

Tato diplomová práce je zaměřena na možnosti využití solárního zařízení a na analýzu stavu 20 kWp FV systému. Provedením měření je vyhodnocena úroveň degradace jednotlivých komponent FV systému.

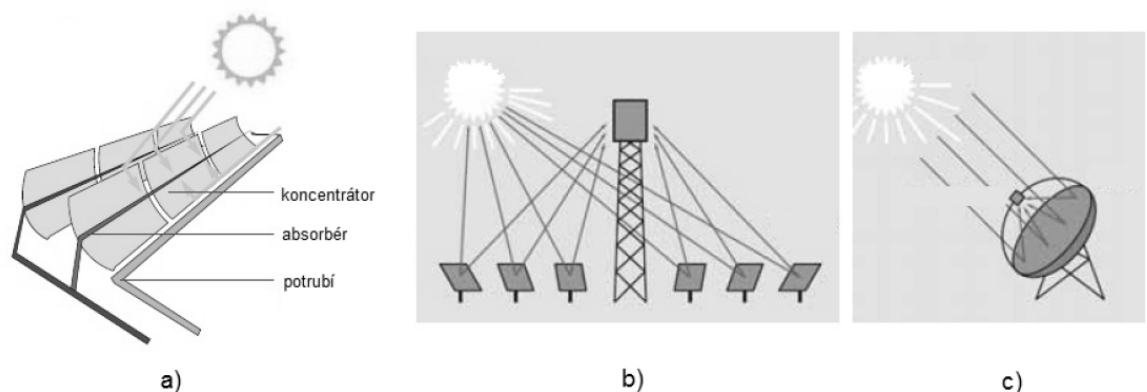
Text je rozdělen do tří částí na teoretickou část, praktické měření a analýzu výsledků měření. V teoretické části jsou probrány jednotlivé možnosti využití dostupných solárních systémů. V druhé části je samotné měření fotovoltaické elektrárny umístěné na střeše Elektrotechnické fakulty Západočeské univerzity. Měření je provedeno termokamerou a analyzátozem.

V poslední části je provedené měření analyzováno a vyhodnoceno. Jsou zhodnoceny defekty a stanovena degradace FV článků.

1 Solární elektrárny

1.1 Solární zařízení

Za solární zařízení se dá považovat jakékoli zařízení, která využívá nebo přeměňuje sluneční záření na jiný druh energie. Sluneční záření můžeme využívat buď k ohřevu jako zdroj tepla, nebo přímé přeměně elektromagnetického záření na elektrickou energii pomocí PV článků. Nejstarší způsoby využití slunečního záření byly již ve starověku, kdy ho lidé začali využívat k ohřevu vody nebo oleje. Některé systémy na ohřev vody se využívají dodnes. Například kovový zásobník na vodu natřený černou barvou, která pohlcuje nejvíce slunečního záření. Takováto zařízení se v dnešní době používají na ohřev vody například pro domácí bazénové systémy na ohřev vody. Avšak v dnes se více používají plastové trubky místo kovových. V roce 1883 předvedli A. Mouchot a A. Piffr z Francie na Světové výstavě v Paříži zařízení, které produkovalo páru, a ta poháněla parní stroj. Parní stroj dále poháněl tiskařský stroj na tisk novin. Toto zařízení pracovalo na stejném principu jako některé pokusné elektrárny, které využívají koncentrované sluneční záření k tvorbě páry. V koncentrátoru dochází k cílenému odrazu záření na absorber. Stejný princip je na obrázku *obr. 1c*. [1]

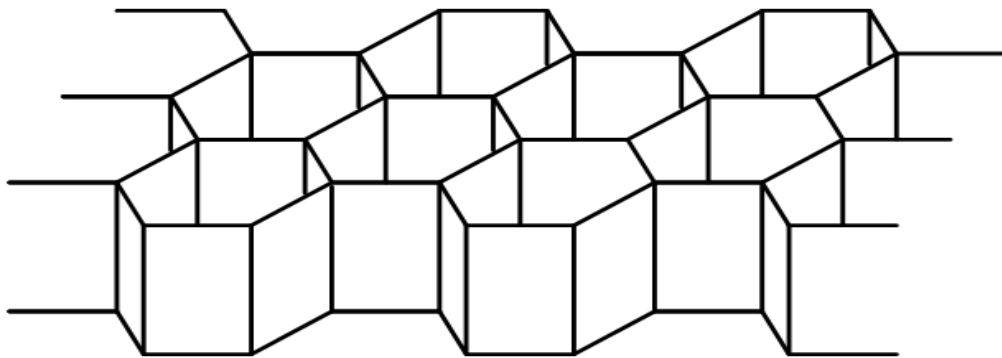


Obr. 1 Způsoby ohřevu absorberu koncentrovaným slunečním zářením [8]

Některé vystavěné pokusné elektrárny pracují na principu podle *obr 1b*, kde se sluneční záření používá k tvorbě páry, která poté pohání parní turbínu spojenou s rotorem generátoru elektrické energie. To je tzv. věžové uspořádání. Tyto elektrárny pracují s maximálními výkony $P_{\max}=10 - 30 \text{ MW}_p$. Jsou vystavěny v Kalifornii a Novém Mexiku, kde je průměrně 320 slunečných dní v roce. Ovšem některé z nich jsou i v Evropě. Po zdokonalení optimalizace dosahují elektrárny účinnosti až 17%. Některé věžové systémy mohou

obsahovat ještě akumulátor, aby mohlo zařízení pracovat ještě nějakou dobu po západu slunce. Akumulátory mohou být olejové nebo šterkové. U těchto typů elektráren je velkým problémem nastavování zrcadel s přesností $0,1^\circ$ a jejich čištěním. [1]

V roce 2009 dokonce vybudovali věžovou sluneční elektrárnu v Německu s výkonem 1,5 MW. Elektrárna slouží hlavně jako pokusná a demonstrační elektrárna tohoto typu. Na pozemku o rozloze 8 hektarů je umístěno 2153 pohyblivých rovinných zrcadel. Aktivní plocha zrcadel je $18\,000\text{m}^2$. Plocha absorberu je 22m^2 . Ten je ohříván na teplotu až $700\text{ }^\circ\text{C}$ a vytváří páru o teplotě $480\text{ }^\circ\text{C}$ a tlaku 26 bar. Pára prochází přes dvoustupňovou parní turbínu. Absorbér je z porézních keramických článků s voštinovou strukturou. Voštinová struktura na obr. 2 připomíná včelí úl. Mezi články proudí nasávaný okolní vzduch, který je ohříván. Výhodou této elektrárny je instalovaný akumulátor tepla, vyrovnává kolísání výkonu elektrárny. Pokud je absorbér ohříván, proudí mezi keramickými tělisky teplý vzduch a ohřívá je. Pokud není dostatek slunečního záření, pak probíhá proces obráceně a tělíska ohřívají vzduch nasávaný z okolí. Tímto způsobem je možné vyrábět elektřinu po dobu až 8 hodin bez slunečního svitu. [2]



Obr. 2 Voštinová struktura [9]

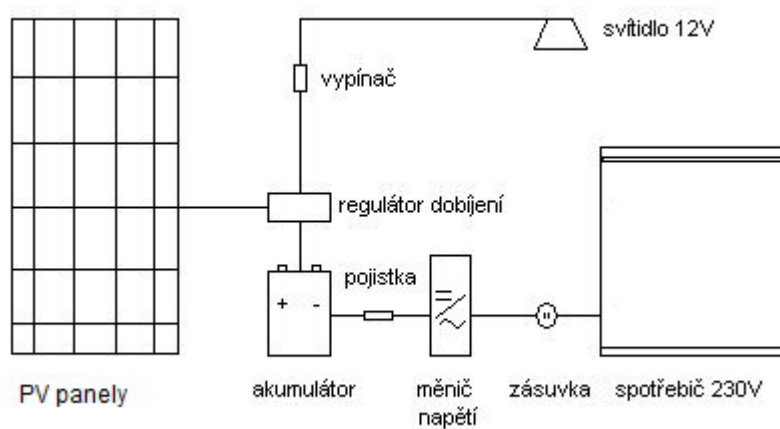
Ovšem dnes nejpoužívanější jsou systémy s parabolickým koncentrátorem a válcovým absorberem zobrazený na obrázku obr. 1b. Odrazem slunečního záření je ohříván dutý válcový absorbér, který je naplněn kapalinou. Kapalina je vlivem tepla přetvořena v páru a pohání parní turbínu. Účinnost těchto systémů je okolo 14%. Ve spojených státech je v provozu devět žlabů s generátorem o výkonu 350 MW. [1][3]

Podobný systém je i u Fresnelových kolektorů. Fungují na stejném principu jako parabolické koncentrátoři ovšem s plochými zrcadly. To znamená jednodušší technologii výroby a tedy i menší pořizovací náklady. [3]

1.1.1 FV panely

Dnes nejrozšířenější a nejspíše i nejperspektivnější způsob přeměny solární energie je přímá přeměna na elektrickou energii ve fotovoltaických panelech. V dnešní době již dosáhl instalovaný výkon solárních elektráren ve světě 100 GW, jak uvádějí zprávy Evropské fotovoltaické průmyslové asociace (EPIA). Z toho jen v roce 2012 bylo instalováno 30 GW. Z toho 17 GW náleží Evropě, kde vede Německo s 7,6 GW, následují Itálie s 3,3 GW a Francie se 1,2 GW. Mimo Evropu jsou největší trhy s fotovoltaikou Čína, Spojené státy americké a Japonsko. Čína s 3,5 až 4,5 GW, Spojené státy americké s 3,2 GW a Japonsko 1,2 GW. [1][5]

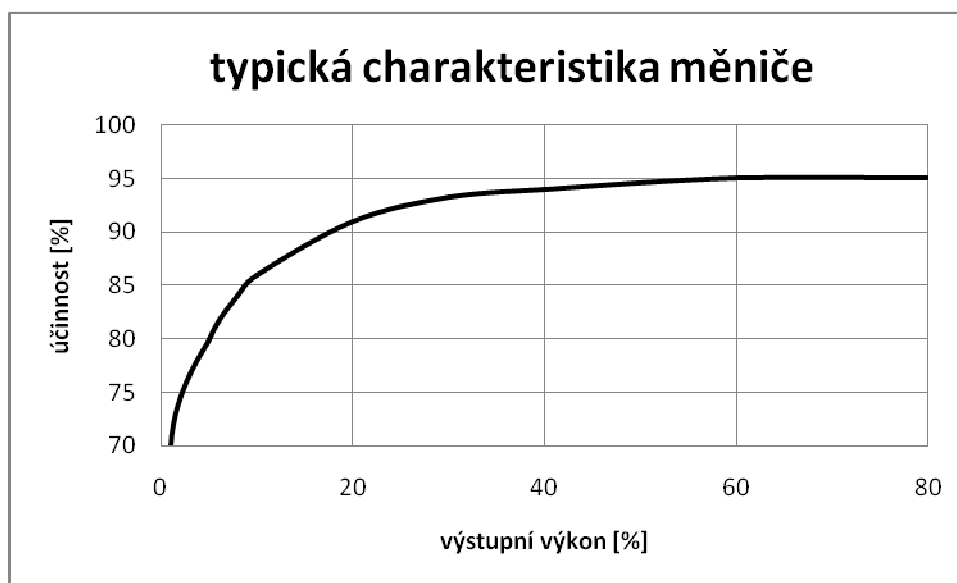
Solární elektrárny z FV panelů se instalují od malých systémů po velké systémy s výkony několika MW. Vyrobena elektrická energie ve formě stejnosměrného proudu lze použít pro napájení spotřebičů, k akumulaci energie výrobou vodíku nebo dobíjením akumulátorů. Nejčastěji je ale stejnosměrný proud pomocí měničů transformován na střídavý. Fotovoltaické systémy jsou konstruovány buď jako ostrovní (*obr. 3*) nebo síťové. [1]



Obr. 3 Ostrovní solární systém [10]

V případě ostrovních solárních systémů jsme limitováni množstvím vyrobené energie fotovoltaickým systémem. S tím souvisí i průměrné hodnoty slunečního svitu v místě instalace, se kterými musíme při volbě systému počítat. Síťové solární systémy jsou napojeny na rozvodnou síť a v případě přebytku výkonu dodávají elektřinu do rozvodné sítě. V opačném případě zase energii pro spotřebiče čerpáme ze sítě. To je možné díky moderním měničům. Datový výstup sleduje okamžitý dodávaný výkon i množství vyrobené energie. [1]

Důležitým aspektem měničů je jejich účinnost, která se mění s odebíraným výkonem. Podle obrázku *obr. 4* je vidět že účinnost roste s odebíraným výkonem. Je vidět že okolo 50% odebíraného maxima už dosahuje účinnost maxima. Ovšem pokud se hodnoty odběru blíží k maximu tak účinnost mírně klesá. Tento pokles uvádějí všichni renomovaní výrobci měničů a to jak u malých výkonů řádově desítek wattů tak i u velkých výkonů několika megawattů. [1]

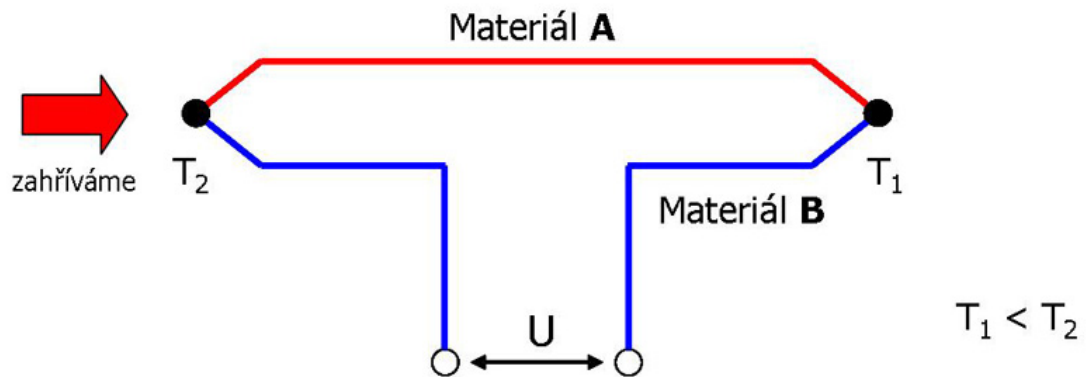


Obr. 4 Typická závislost účinnosti kvalitního měniče na odebíraném výkonu

1.1.2 Termočlánek

Princip termočláneku pracuje na principu termoelektrického jevu. Ten vzniká na rozhraní dvou materiálů o různých teplotách. Například konstantan a měď. Je-li v materiálu teplotní gradient, mají nosiče náboje v místě s vyšší teplotou vyšší střední energii a hlavně v polovodičích roste i koncentrace nosičů náboje. Tok volných nosičů se snaží kompenzovat

vliv teploty a stanovit rovnováhu. Tento jev se nazývá Seebeckův. Pokud svaříme konce nehomogenních vodičů například mědi a konstantanu a jedno svařené místo budeme zahřívat, pak se na svorkách jednoho přerušného vodiče objeví napětí, jak je zobrazeno na obr. 5. Toto napětí je úměrné rozdílu teplot $U = T_2 - T_1$. Předpokládáme že $T_2 > T_1$. Tento jev funguje i obráceně a nazývá se Peltierův. Vlivem procházejícího proudu vzniká teplotní gradient.



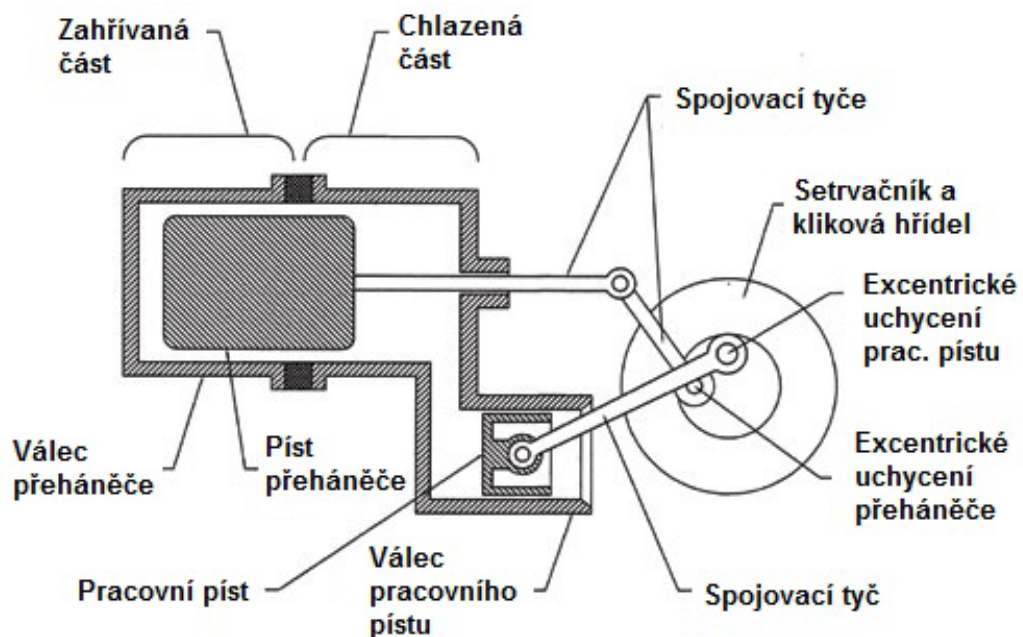
Obr. 5 Seebeckův jev [11]

Tento způsob výroby elektrické energie se ale v pozemských podmínkách téměř nepoužívá a nemá téměř žádný význam. Jeho využití je ale mimo zemskou atmosféru a to ve vesmírných podmínkách tam, kde PV články nepřicházejí v úvahu. Ohřev teplejšího spoje ale místo koncentrovaného záření zajišťuje jaderná energie uvolňovaná samovolnou radioaktivní přeměnou radioaktivního materiálu. [1]

1.1.3 Stirlingův motor

Stirlingův motor je v podstatě tepelný stroj. Byl vynalezen už v roce 1816 skotským vynálezcem Robertem Stirlingem jako konkurence parního stroje. Dodnes je několik modifikací tohoto motoru, ale všechny fungují na principu tepelné roztažnosti plynu. Pracuje v uzavřeném okruhu a regenerativním ohřevu. Jedná se o pístový motor. Píst je buď jeden nebo jsou dva. V případě jednoho pístu. Jako pracovní plyn je většinou vodík nebo helium.

Plyn se v ohřívací části rozpíná a pohybuje pístem. Přepouštěcím ventilem je ohřátý plyn přepuštěn do chladné části, kde se smrští a děj se opakuje. Regenerátor uchovává energii mezi expanzí a kompresí pracovního plynu, a také zvyšuje účinnost. Tímto se odlišuje od ostatních horkovzdušných motorů. Jeho výhodou je poměrně dobrá účinnost 40% a možnost využití libovolného zdroje tepla. Je také velmi tichý a toho se využívalo u pohonu ponorek. V současnosti se využívá ve spojení s obnovitelnými zdroji energie. V případě solární energie je sluneční záření koncentrováno pomocí zrcadel nebo Fresnelových čoček na ohřívanou část stroje. [1][2]



Obr. 6 schéma a popis Stirlingova motoru typu Alfa [15]

1.1.4 FV elektrárna na oběžné dráze

Existuje také zatím neuskutečněný projekt fotovoltaické elektrárny umístěné na oběžné dráze. Takováto elektrárna by mohla mít velkou plochu okolo 50 km² s hmotností tisíce tun. Elektrárny by přeměňovanou energii měnily na mikrovlny a vysílala je na zemi. K tomu by byla zapotřebí speciální vysílací anténa. Na zemi by muselo být vybudována přijímací anténa, která by zachycené mikrovlny zachytila a opět přeměnila na elektrickou energii. Velkou výhodou tohoto systému je téměř trvalé vystavení panelů stálému slunečnímu záření v ideálních podmínkách okolního prostředí. Panely by byly zastíněny pouze v období

rovnodenností a to jen několik hodin. Ovšem nevýhody jsou mnohem větší než výhody. Hlavně z ohledu plochy zařízení na zemi. Přijímací anténa by musela mít plochu 100 km² a k tomu by muselo být okolo ještě bezpečnostní pásmo 100 km široké. Takové neobydlené plochy by byly v úvahu jedině v poušti. Při dvojí transformaci energie a vedením by docházelo k velkým ztrátám. Docházelo by k ohřevu vzduchu nad přijímací anténou, protože toto zařízení by byla jedna obrovská mikrovlnná trouba. Dalším hlediskem jsou obrovské náklady na výstavbu, což zahrnuje i vynesení zařízení na oběžnou dráhu a smontování. K tomu by bylo zapotřebí 100 startů nejvýkonnějších raket. Dále by byla nutná obsluha a údržba na oběžné dráze. To je složité protože lidská posádka může bez ochrany magnetického pole země zůstat ve vesmíru jen několik dní. Asi nejhorší by byla situace, kdyby se stanice vychýlila a směřovala mikrovlnné záření mimo přijímací anténu. V současné době není realizace takového projektu výhodná. [1]

1.2 Solární články

1.2.1 Fotovoltaická přeměna

K přeměně elektromagnetického záření na elektrickou energii dochází v polovodičových fotovoltaických člancích. Jako polovodičový materiál je nejběžnější krystalický křemík. Ten může být v různých formách. Křemík má krystalovou strukturu diamantu a obsahuje 14 elektronů. Každý atom křemíku je tedy obklopen čtyřmi sousedními atomy. Kovalentní vazbu vytvářejí 4 valenční elektrony. Důležité jsou pásy vodivosti a valenční. Valenční pás se sestává z energetických stavů valenčních elektronů. Za ním následuje tzv. zakázaný pás, kde nemůže být žádný elektron. Nejvyšší energetická hladina valenčního pásu se nazývá EV a nejnižší značíme EC. Šířka zakázaného pásu je tedy $\Delta EG = EC - EV$. Důležitou hladinou je Fermiho energie, která je u křemíku uprostřed zakázaného pásu. Dodáním energie např. ve formě fotonů se některé elektrony uvolní od svého atomu, čímž přejdou do vodivostního pásu. Valenční a vodivostní pás se tím stanou částečně obsazenými. To se projeví v energetickém schématu tak, že tyto elektrony se uvolní z nižší energetické hladiny ve valenčním pásu a obsadí hladiny s vyšší energií ve vodivostním pásu. Mohou se tak volně pohybovat a zprostředkovat tak vedení elektrického proudu. [1]

V podstatě fotovoltaický článek je velkoplošná dioda s PN přechodem orientovaným k čelní ploše mezi přední a zadní stranou. Pokud na článek dopadají fotony s větší energií než je šířka zakázaného pásu, tak generují páry elektron- díra a tím odevzdají svoji energii a pohltnou se. Páry elektron-díra jsou od sebe odděleny elektrickým polem mezi vázanými prostorovými náboji. Díry jsou urychleny ve směru pole a elektrony opačným směrem. Mezi póly PV článku se objeví elektrické napětí a po zapojení do obvodu, teče stejnosměrný elektrický proud. Článek se tak stává zdrojem elektrické energie. [1]

1.2.2 Dostupné technologie

Pro solární články existuje spousta materiálů a koncepcí, které se liší hlavně výkonovými parametry, ale mohou se lišit například i barvou. Největší část trhu zabírají články z krystalického křemíku s podílem 86%. Jsou dvě možnosti úpravy křemíku. Buď monokrystalická, nebo polykrystalická výroba křemíkových ingotů. Výroba polykrystalického je jednodušší a tím pádem levnější. Vzniklé ingoty se poté řezou na co nejtenčí destičky. S příchodem drátových řezaček se dají řezat destičky o tloušťce 100 μm a zmenšil se i prořez materiálu. Účinnost kvalitních fotovoltaických článků na bázi monokrystalického křemíku se dnes pohybuje u sériové výroby okolo 20%. Se zdokonalujícími prvky lze dosáhnout i přes 30% účinnosti. V polykrystalech jsou zhoršené transportní vlastnosti polovodiče hranicemi zrn. U amorfních polovodičů je situace ještě horší. [1] [12]

Nejúčinnější fotovoltaické články jsou složené multispektrální články na bázi polovodičů, které jsou určeny především pro koncentrátorové systémy. Tyto systémy jsou ideální pro oblasti bez mraků. Proto nejsou vhodné pro naše klimatické podmínky. Nejvyšší účinnosti bylo dosaženo u těchto systémů a to 40%. Na území ČR by využívaly pouze asi polovinu dopadajícího slunečního záření. [7]

1.2.3 Monokrystalické

Nejstarší články byly vyráběny z amorfního křemíku a ty se používají až dodnes. Při výrobě monokrystalického křemíku se nejčastěji využívá Czochralského proces. Z vysoce čisté křemíkové taveniny se za pomoci křemíkového zárodku vytahuje kulatá monokrystalická tyč. Ta může mít průměr až 30 cm a délku až několik metrů. Z tvaru tyče se pak odvíjí i tvar článků. Ten může být kruhový, ale nebude tak dobré využití plochy panelu. Nejvýhodnější jsou proto čtvercové články. Tím je ale vyšší procento odpadu při vyřezávání. Povrch článků má jednolitou barvu díky tomu, že je článek pouze z jednoho krystalu. Destičky jsou dotovány příměsí typu P a napaří se na ně tenká vrstva dotování difuzí fosforu. Poté se dodá zadní kontakt, kontaktní palec, antireflexní vrstva a článek je kompletní. Antireflexní vrstva je velice důležitá, zvyšuje účinnost článků. Využívají se různé antireflexní vrstvy a skla, ale používají se také povrchové úpravy materiálu. Pomocí laseru, mechanickým nebo chemickým zpracováním se tvoří v materiálu malé pyramidální nebo rýhované struktury. Ty značně snižují reflexi. Průměrná účinnost monokrystalických článků je 15 až 17 % ale lze dosáhnout i 21%. [12]

Pokud vyrobíme křemík s vyšší čistotou, můžeme vyrobit tzv. vysoce výkonný solární článek. Křemík s vysokou čistotou se získává pomocí metody zonální tavby. Tím získáme kvazi-monokrystalický křemík o vysoké čistotě. Tyč z vysoce čistého polykrystalického křemíku s monokrystalickým zárodkem o vysoké čistotě je vedena skrze elektromagnetickou cívku. Pomocí vysokofrekvenčního elektromagnetického pole je tyč prstencově tavena směrem od monokrystalického hrotu. Monokrystalická struktura se vytvoří po ochlazení tyče. Tento způsob zvyšuje účinnost článku o 1 až 2%. Ovšem tato metoda je pracnější a dražší. [12]

1.2.4 Polykrystalické

Polykrystalický křemík se vyrábí snadněji a tedy i levněji než monokrystalický. Většinou se pro výrobu využívá metoda blokového lití. Křemík se ve vakuu ohřeje na 1500°C a regulovaně se ochlazuje v grafitovém kelímku do blízkosti bodu tání. Výsledkem jsou čtvercové bloky. Je zde menší odpad při řezání destiček a lepší využití plochy panelu. Následný postup výroby je stejný jako u monokrystalických článků. Blokovým litím se tvoří krystaly s rozdílnou orientací. To můžeme vidět na článku, že je různě barevný díky různě

odrazivosti světla. Aby se snížili ztráty materiálu a zvýšilo jeho využití, musí být články tenké. Metody tažení pásů dosahují tloušťky až 0,1 mm. Destičky se potom řezou pomocí laseru. Tyto metody šetří energii i materiál oproti blokovému lití nebo tažením z kelímku. Ještě existují metody jako strong gibbon nebo tažení pomocí osmiúhlého tvarovacího nosiče. Účinnost polykrystalických článků se pohybuje mezi 13 a 16%. [12]

(V současné době jsou v poměru cena/výkon nejvýhodnější polykrystalické články z teluridu a kadmia (CdTe). Jejich hlavní nevýhodou je že obsahují nebezpečné kovy, díky kterým se po jejich vyřazení z provozu stává nebezpečný odpad. Ovšem jejich cena se pohybuje pod 1 USD za W_p a účinnost až 11%. V jejich ceně je zahrnuta i cena za kompletní recyklaci. V Evropské unii se kadmium nesmí používat v elektronické výrobě s výjimkou článků z teluridu kadmia (CdTe). Ale z dlouhodobého hlediska nemohou konkurovat křemíkovým článkům, kde není žádná toxicita. Zdroje pro výrobu křemíku jsou téměř neomezené. [7])

1.2.5 Tenkovrstvé panely

Kromě křemíku bývají často na bázi CuInSe, CdTe nebo s heteropřechody mezi různými druhy polovodičů. U těchto článků je problém se stabilitou parametrů a nízkou účinností kolem 10%. Avšak bývají relativně levné. Sice lze vyrobit tyto články s účinností 15%, ale ta brzy klesá a po krátké době je nižší než 10%. Díky své nízké účinnosti by články museli zaujímat větší plochu, a proto se použití těchto článků nerozšířilo. Používají se ale například pro napájení kalkulaček, protože pracují lépe při nižších intenzitách osvětlení. [1]

Další články s relativně vysokou účinností okolo 20 % (v laboratoři, v poloprovozní výrobě pak okolo 10-15 %) jsou tenkovrstvé články z $CuInSe_2$, resp. z komplikovanějšího systému $CuInGaSSe$. Komplikovanost celého systému je prozatím důvodem, že ještě nenastala masová výroba těchto článků a omezené světové zásoby india možná znamenají, že k výrobě ve větším měřítku ani nedojde. [4]

Ostatní druhy tenkovrstvých fotovoltaických článků (tak zvané "dye sensitized cells" či organické články) nejsou ještě ve skutečné hromadné výrobě a vzhledem k problémům se stabilitou není jisté, zda jejich použití nezůstane omezené na drobné aplikace.) [1]

Dostupné komerčně dostupné panely jsou z monokrystalického křemíku od americké firmy SunPower. Jedná se o typ panelů, jehož účinnost se blíží 20 % (účinnost jednotlivých monokrystalických křemíkových článků na tomto panelu je až 22 %). Jednotlivé články i celý panel jsou celé černé, veškeré kontakty jsou na zadní ploše. Panel, který by měl účinnost vztahenou na celkovou plochu 22% či více ještě nikdo nevyrobil. [5]

1.3 Aplikace FV systémů

1.3.1 Používané aplikace

Nejčastější využití solárních článků je přímo k přeměně na elektrickou energii a její následnou spotřebu nebo distribuci do rozvodné sítě. Vyrobena elektrická energie se také může využít na přeměnu nebo uchování energie ve formě, která se dá lépe skladovat. U toho ale vznikají ztráty a tím klesá účinnost celého systému.

Využití solárních panelů u rodinných domů nebo staveb tam, kde není připojení do veřejné rozvodné sítě nebo je preferována vlastní výroba elektrické energie, se nazývá ostrovní systém. Ve většině případů se spolu s tím používají i solární systémy na ohřev vody. Vyrobena energie je využita na vlastní spotřebu a přebytek je uchován do akumulátorů. I v našich zeměpisných podmínkách je možné být nezávislý na elektrické energii. V těchto případech je vhodné mít energetickou zálohu. Nejčastěji se používá benzínový nebo dieselový generátor. [16]

Dalším a dnes nejrozšířenějším je zapojení jako síťový systém, kde je přebytek el. Energie distribuován do rozvodné sítě. Distributor je povinen pak tuto energii vykupovat. V naší republice byly nastaveny velmi výhodné výkupní ceny elektřiny z obnovitelných zdrojů, což zapříčinilo vznik spousty větších fotovoltaických elektráren.

1.3.2 S pevným stojanem a pohyblivým stojanem

Nejvíce rozšířené jsou FV panely s pevným stojanem. U těch je důležité zvolit ideální sklon a orientaci panelů. Ideální volba je taková, že přední strana je orientována na jih a sklon je takový, aby v poledne byl nulový úhel dopadu, aby sluneční záření dopadalo kolmo na panel. Ovšem pokud chceme lepší celoroční výkon je měnit sklon na zimní a letní provoz. Pokud sklon měnit nelze, pak je systém nastaven na zimní provoz kdy je sluneční energie nejméně. Pokud chceme využít i odražené části záření můžeme použít oboustranné panely, které dokáží využít odraženého záření. Pro tyto systémy bývá vhodnější kolmé uložení panelů pro lepší odraz. Dobrou odrazivost má například beton, křemenný písek a také sněh. V zeměpisných podmínkách ČR konkrétně na 50°sš vyrobí oboustranné panely o 25% více energie než standardní panel. Tato hodnota je vztažená k měsíci Prosinci a svislému uložení panelů. Proto oboustranné panely jsou vhodné pro použití tam, kde není možné si zvolit orientaci a sklon. Pro jejich použití vzrůstá i jejich výroba. [1]

1.3.3 S pohyblivým stojanem

Fotovoltaické systémy s pohyblivým stojanem dokáží výrazně zvýšit efektivitu solárního systému. Dokáží využít maximální intenzitu slunečního záření po celý den. Tyto systémy dokážou navýšit účinnost maximálně o 40%. To ovšem závisí na vlivech jako je denní sluneční svit, difúzní záření a zeměpisná poloha. Slunce může svítit i více jak 12 hodin denně ve vyšších zeměpisných šířkách. Při východu a západu slunce musí sluneční záření projít hustější vrstvou atmosféry a proto není nutné otáčení $\pm 90^\circ$. Od natočení $\pm 60^\circ$ výše se prakticky neprojeví zvýšené množství energie. Na území České republiky můžeme dosáhnout maximálně 30% navýšení účinnosti, a proto se používá jen zřídka. [1]

Sledovače podle principu:

1. Sledovače na principu hodinových strojků
2. Sledovače na principu vypařování a kondenzace freonu
3. Sledovače na principu diferenciálního porovnání intenzity slunečního záření na PV článcích tvořících senzor

4. Sledovače na principu pružin z paměťových slitin
5. Sledovače typu TRAXLE

Další používanou aplikací na navýšení množství vyrobené energie jsou koncentrátorové systémy. U těchto systémů dochází spolu s vysokou koncentrací záření k nadměrnému oteplování a tím snižování účinnosti přeměny. Proto jsou vhodnější do vyšších nadmořských výšek, kde je nižší okolní teplota. Tvar a provedení koncentrátorů je stejný jako v kapitole 1.1. Koncentrátory s rovinnými zrcadly, žlabovité nebo s Fresnelovými čočkami. [1]

1.3.4 Akumulace solární energie

Pokud vyrábíme elektrickou energii pomocí solárních panelů, musíme počítat s tím, že ji musíme ihned spotřebovat nebo uložit například na dobu, kdy slunce nesvítlí nebo je zataženo. Nerovnoměrnost slunečního svitu je hlavní nevýhodou. Vyrobenou elektrickou energii můžeme uchovat v kondenzátorech nebo v bateriích.

- Kondenzátory jsou pro použití téměř bezvýznamné, protože i veliký kondenzátor má malou kapacitu. Je vhodný jen pro speciální účely a to k pohonu pouze drobných zařízení. [1]
- Elektrochemické akumulátory nebo akumulátorové baterie jsou nejrozšířenější a nejpoužívanější. Klasický olověný akumulátor je nejlevnější variantou. Kromě olověných akumulátorů jsou také akumulátory s alkalickým elektrolytem. Nabíjí se přes solární nabíječky, které jsou například i řízené počítačem a hlídají stav nabití, teplotu a spousty dalších parametrů. Nevýhodou akumulátorů je jejich ztráta kapacity a problém s nadměrným vybíjením. [1]
- Další možností akumulace je například princip přečerpávací elektrárny. Když je nadbytek energie tak se čerpá voda do nádrže, která je umístěna ve vyšším bodě. Když je nedostatek energie tak se otevře horní vodní nádrž a pomocí vodní turbíny se vyrábí elektrická energie. Tento princip se využívá v energetice pro vykrývání

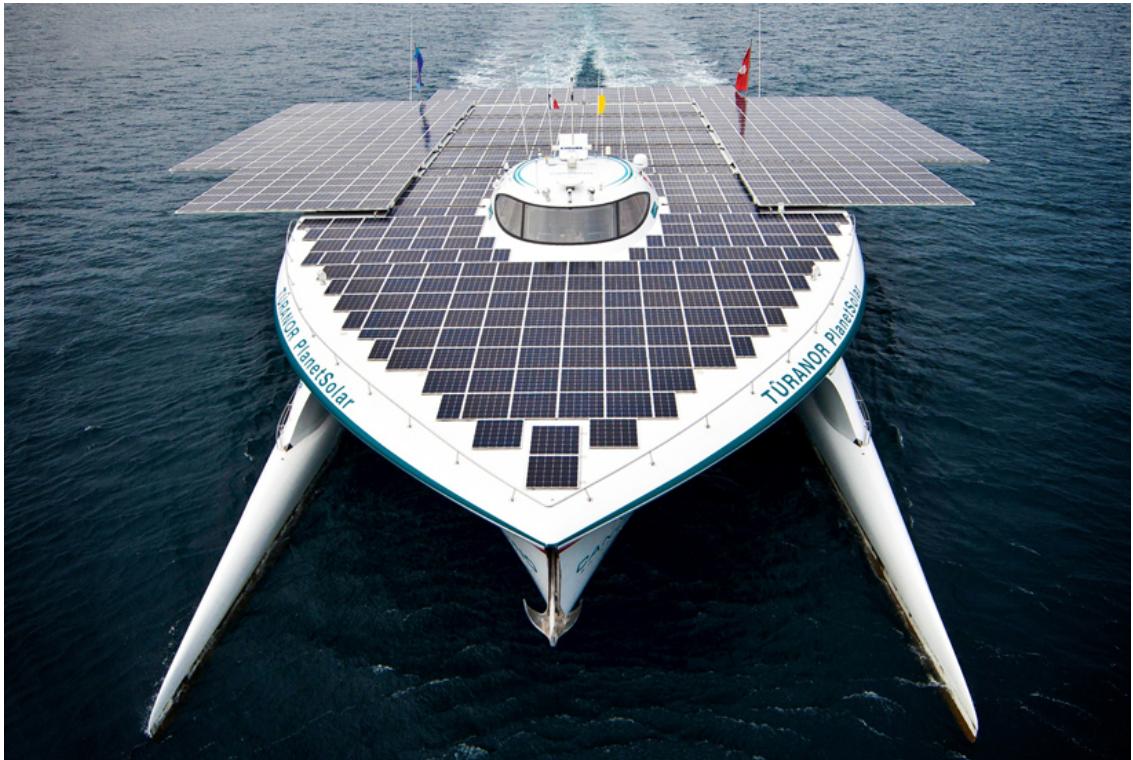
energetických skoků. V případě použití ve spojení solárních článků je třeba volit velikosti nádrží podle velikosti elektrárny. [1]

- Nejperspektivnější variantou uchování energie je do výroby vodíku pomocí elektrolýzy vody. Vodík má spousty výhod. Zkapalněný vodík se používá jako palivo. Je hlavní složkou zplynováním biomasy i fosilních paliv. Má nejvyšší výhřevnost ze všech paliv a to 96 MJ/kg. Vodík se používá ve spalovacích motorech, kde dokonce zvyšuje výkon. Ovšem musí se přímo vstříkovat do válců, takže pro moderní automobily to znamená jen použití jiných vstříkovacích trysek. Velkou výhodou je, že spalováním vodíku nevznikají žádné škodliviny, pouze vodní pára. Díky palivovým článkům se dá vodík pomocí řízené elektrochemické reakce přeměnit na elektrickou energii. [1][17]

1.3.5 Možnosti využití FV systémů

Možností využití FV systémů je obrovské. Hlavně při zapojení do ostrovního systému. Při tomto využití je dobré ale používat takové zařízení, které nejsou tolik náročné na spotřebu elektrické energie. Například použít pro osvětlení úsporné žárovky, anebo ještě lepší LED světelné zdroje, které mají dvakrát vyšší účinnost než úsporné žárovky a osmkrát delší životnost. [1]

Solární automobily nemají příliš příznivé vyhlídky do budoucna a sériová výroba nejspíš ani nezačne. Spíše automobily na vodík, který se získává například, i z fotovoltaických systémů jsou již k dispozici. Vhodnější použití FV systémů je na lodích než automobilech, jak ukazuje například projekt PlanetSolar na obr. Tato loď byla vytvořena k tomu, aby obeplula kolem světa během 80 dní podle románu Julese Vernea. Loď je téměř celá pokrytá panely. Jejich plocha je 537 m². Generují 93,5 kW a spotřeba motorů je kolem 20 kW. Kolem země urazili 60 006 km. Má 6 bloků lithium-iónových baterií. Loď je zobrazena na obrázku *Obr. 7*. [20]



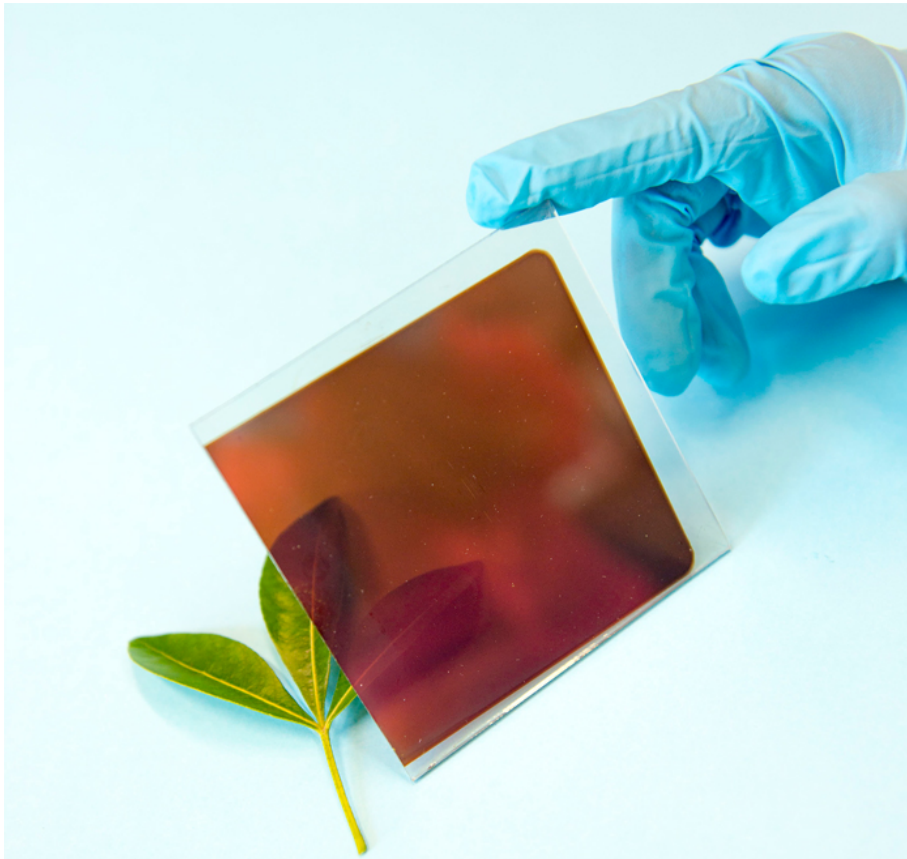
Obr. 7 Plavidlo PlanetSolar [20]

Velmi užitečnou aplikací je využití solárních panelů na čerpání vody. Čím více svítí slunce, tím je větší sucho a je potřeba zavlažování. V tomto případě se vyplatí použití systémů s pohyblivým stojanem, protože systém pak déle čerpá vodu. Není závislý na množství vyrobené elektřiny ale na délce výroby. Zejména pro africké státy kde denně umírá 6000 lidí na následky pití kontaminované vody, je výhodné použití FV systém na čerpání a sterilizaci vody tvrdým UV zářením. Tvrdé UV záření hubí bakterie a produkuje ho nejvíce nízkotlaká rtuťová výbojka. Ta poskytuje UV záření nejvíce v tvrdé oblasti UV-C s vlnovou délkou $\lambda = 253,7$ nm. Za slunného dne lze sterilizovat až 2000 litrů vody se zařízením zvaným NAIDAE. Zařízení je přenosné, váží 44 kilogramů a obsahuje akumulátor, zásobník na 100 litrů vody, křemenné pouzdro s výbojkou a filtr na pevné nečistoty. Celé zařízení je zobrazeno na obrázku Obr. 8. [1]



Obr. 8 NAIADÉ – mobilní čistička vody

Na akademické půdě se objevil nový materiál na přeměnu solárního záření na elektřinu. Podle vědců jde prý o skutečný převrat. Materiál má název perovskit. Ten by měl být revolučním především pro to, že je levná a nenáročná jeho výroba. Perovskit je obecný název pro skupinu látek, které mají stejnou krystalovou strukturu jako CaTiO_3 (oxid titaničito-vápenatý). V článkách se ovšem používá $(\text{CH}_3\text{NH}_3)\text{PbX}_3$, kde X zastupuje chlór, brom nebo jód. Z počátku byl perovskit použit ve článkách pouze jako barvivo a ve spojení s použitým tekutým elektrolytem se rozpouštěl. Tento článek měl účinnost pouze 3,5%. Ovšem v červenci 2013 vytvořil tým ze švýcarského Lausanne články s perovskitem, které dosáhli účinností 15%, a už není potřeba kapalného elektrolytu. Henry Snaith z Oxfordské univerzity, který představil první perovskitový článek bez kapalného elektrolytu také prohlásil, že nebude problém vytvořit články s účinností od 20 do 25%. Pokud by se to podařilo, mohly by konkurovat křemíkovým článkům v účinnosti. [13]



Obr. 9 Materiál perovskit [18]

Velká výhoda těchto článků by měla být v tom, že by mělo být teoreticky možné je vyrobit průhledné. Ovšem zatím se to nepodařilo ale díky tomu že technologie perovskitových článků vychází z Grätzelových článků u kterých toto možné je. Taková budoucnost by nabídla obrovské množství využití. U klasických solárních článků na bázi křemíku je nejdražší vodivé sklo a to by se dalo nahradit prohlednou vrstvou perovskitového článku. Také by bylo možné například potáhnout těmito články okenní tabule. [13]

Jedna velká nevýhoda, která tyto články tíží je přítomnost jedovatého olova. Ovšem když bude levná výroba a dostatečná účinnost pak půjde tento problém ošetřit legislativně. Například úsporné žárovky obsahují nebezpečnou rtuť. Také stále zůstává klasický problém všech fotovoltaických elektráren a to je že výroba končí se západem slunce. Proto je třeba také řešit způsob uchování energie. Způsobů existuje několik. Buď ji uchovat ve formě elektrického náboje v chemických bateriových člancích, které jsou dnes většinou příliš drahé, nebo v jiné formě než elektrické. [13]

1.3.6 Elektronické měniče

Elektrotechnické měniče transformují stejnosměrný proud na střídavý, abychom ho mohli dále zpracovávat pro běžné užití. Stejnosměrné napětí a proud z fotovoltaických panelů jsou změněny na střídavé napětí a proud stejných parametrů jako jsou v rozvodné síti. Pro střední Evropu to je $U_{ef} = 230/400V$ s frekvencí 50 Hz. Měniče jsou buď ostrovní, na který nemusí být kladeny takové nároky na kvalitu a síťové. U síťových jsou kladeny nároky na kvalitu výstupu. Musí synchronizovat svůj kmitočet s kmitočtem sítě. A velmi důležité je, aby při výpadku sítě byl odpojen i měnič aby nedodával energii do odpojené sítě kvůli pracovníkům, co by na vedení případně pracovali. [1]

1.4 Parametry fotovoltaického panelu

U fotovoltaických článků jsou důležité jeho parametry elektrické parametry:

- Maximální výkon (P_{mp})
- Napětí na prázdko (V_{oc})
- Zkratový proud (I_{sc})
- Maximální systémové napětí (V_{max})
- Optimální napětí (V_{mp})
- Optimální proud (I_{mp})
- Účinnost panelu (%)

Maximální výkon je brán při normalizovaných podmínkách a to dopadající energii $1000W/m^2$ a teplotě $25,5^{\circ}C$. Těchto parametrů se v realu těžko dosahuje. Dopadající energie se dá dosáhnout ale s mnohem vyšší pracovní teplotou článků. Ta bývá běžně okolo $50^{\circ}C$ a vyšší při dostatečném dopadajícím výkonu. [24]

Napětí na prázdko a zkratový proud se měří při analýze FV panelů. Z těchto hodnot poznáme, zda není panel poškozen nebo nejsou poškozeny články v panelech. To se projeví na změřeném výkonu. [24]

1.5 Vady FV panelů

- **PID (Potenciální Indukovaná degradace)**

K té může dojít při vysokém negativním napětí mezi články a zemí. Může ovlivnit výkon jednotlivých článků nebo celé elektrárny.

- **Koroze**

Ta vzniká pronikáním vlhkosti skrz zadní krycí vrstvu panelu a následná koroze kontaktů a vodičů.

- **Delaminace**

Vytvoří se dutiny v panelech a následně se v nich tvoří vlhkost. Nastává pokud jsou nečistoty na článcích během nanesení krycí vrstvy.

- **Šnečí cesty**

Původ vzniku tohoto jevu je prozatím velkou neznámou. Zatím je několik verzí co tento fenomén způsobuje. Buď to jsou mikrotrhliny článků, vlhkost, použitá EVA folie, fyzikální a chemické jevy probíhající při dlouhodobé expozici slunečnímu záření a okolním teplotám. [25]

- **Lokální zkratky**

2 Analýza FV systému

2.1 Popis FV elektrárny

Fotovoltaická elektrárna je umístěna na střeše budovy Elektrotechnické fakulty Západočeské univerzity v Plzni. Byla instalována v roce 2003 v rámci programu EU „PV Enlargement“ jako jedna z pěti největších instalací v České republice v té době.



Obr. 10 Fotovoltaická elektrárna (6x30 panelů)

Celkový instalovaný výkon je 20352 Wp. FV panely jsou od firmy ISOFOTÓN typového označení I-110. Celková plocha panelů je 164 m² a jsou situovány na jih se sklonem 45°. Konstrukce, na níž jsou panely uloženy je ocelová s povrchovou ochranou žárovým zinkem. Panely jsou v šesti řadách a 30 sloupcích. Elektrárna je rozdělena na osm polí E1 až E8. V každém poli je 24 panelů a celkem je instalováno 192 panelů.. Těchto 24 panelů je dále rozděleno na 3 části po osmi panelech. Ty jsou zapojeny sérioparalelně a svedeny do vlastního střídače. Střídače jsou použity SP 2500-450 od firmy SunProfi. Panel se skládá ze 72 křemíkových monokrystalických článků. Kvůli účinnosti a výhodné ceně jsou použité tmavě modré články z monokrystalického křemíku.

Elektrické parametry uváděné výrobcem jsou uvedeny v **Tab.1**. Tyto hodnoty jsou vztaženy na ideální podmínky, které se oproti realitě dosti liší. Jako například STC výkon je výkon v co nejlepších podmínkách. Nejlepší podmínky znamenají, že tato hodnota je při 25,5 °C. V Reálu těchto podmínek nedosáhneme, pouze s použitím dodatečného chlazení. To ale snižuje účinnost systému, protože je potřeba energie například k pohánění chladicího média. [22]

2.2 Technické parametry

Každý výrobce udává základní elektrické hodnoty ke svým panelům. Většinou jsou tyto parametry uvedeny na štítku umístěném na zadní straně panelu.

Tab. 1 Elektrické parametry solárního panelu I 110 [24]

Elektrické parametry	
STC výkon P_{mp}	110 W
Napětí naprázdno U_{oc}	43.2 V
Zkratový proud I_{sc}	3.38 A
Optimální napětí U_{mp}	34.8 V
Optimální proud I_{mp}	3.16 A
Účinnost panelu	12,9 %
Faktor plnění	75,3 %
Tolerance výkonu	neuvádí
Maximální systémové napětí U_{max}	760 V
Maximum Series Fuse Rating	neuvádí

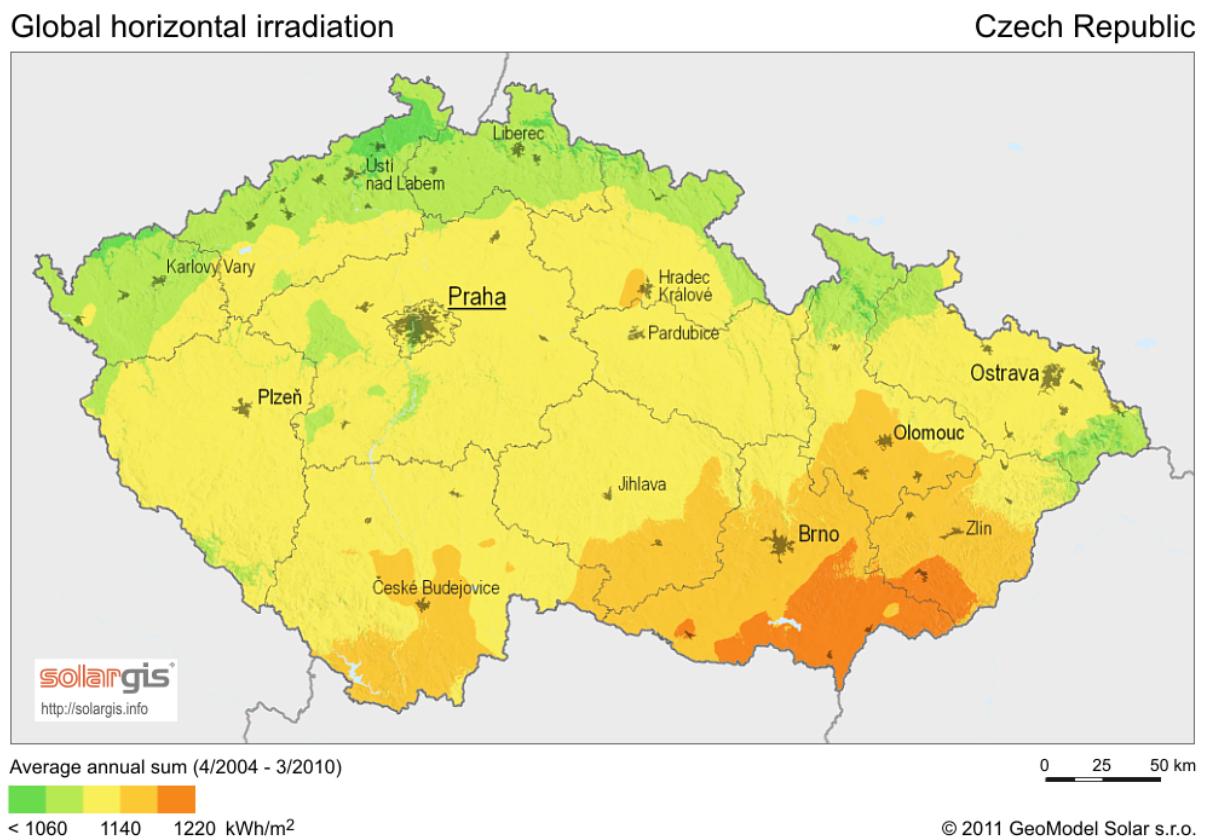
Tab. 2 Tepelné koeficienty panelu I 110 [24]

Tepelné koeficienty	
Tepelný koeficient I_{sc}	neuvádí
Tepelný koeficient U_{oc}	-0,37 %/°C
Tepelný koeficient P_{mp}	neuvádí

Jak je vidět z tabulky **Tab. 2** tak při každém stupni navíc klesne napětí o 0,37%.

2.2.1 Umístění

Elektrárna je umístěna na střeše Elektrotechnické fakulty Západočeské univerzity v Plzni. Panely jsou natočeny na jih se sklonem 45°. Z hlediska průměrného ročního výkonu dopadajícího na zemi spadá Plzeň do průměru vzhledem k ČR jak je vidět na obrázku *Obr. 10*. Vzhledem ke světovému měřítku je to spíše podprůměrné. Tyto hodnoty mohou být různé pro každý rok. Na obrázku je zobrazeno období od roku 2004 do roku 2010. Z tohoto období je brán průměr záření. Jde tedy o dlouhodobé sledování a z toho odvozených dat.



Obr. 11 Mapa dopadajícího záření na území České Republiky pro rok 2011 [21]

2.3 Měření parametrů

Díky nastavení velkých výkupních cen za elektřinu v roce 2009 se u nás rapidně zvýšil počet fotovoltaických elektráren. To způsobilo nadměrnou poptávku na našem území po fotovoltaických systémech. Ovšem nabídka nedokázala tuto poptávku pokrýt a tak se objevily nové firmy a dodavatelé FV systémů. Investoři hleděli na co nejnižší náklady a tak vznikalo spousta nedostatků a defektů s tím spojených. Problémy začínají již u projektování, kde se v některých případech nebral zřetel na půdní podloží na místě výstavby. Tím dochází k nedostatečné pevnosti stojanů na panely. Dalším problémem jsou nekvalitní levné panely z Asie. Výrobce sice garantuje záruku na životnost 25 let, ale jiná věc je vymahatelnost záruky. U těchto levných panelů dochází jak k mechanickým defektům tak je problém s klesajícím výkonem. Vnitřní swingování většinou obsahuje tři zpětné diody, které omezují ztrátu výkonu při částečném zastínění. Při špatném swingování může dojít ke ztrátě téměř celého výkonu. [14]

Díky snižování nákladů některé elektrárny obsahují pouze povinné vybavení a to jsou sledování aktuálního výkonu střídačů, zaznamenávání a vyhodnocování dat. Může dojít například k tomu, že při poruše dojde k výpadku výroby energie a majitel se o tom dozví až po dlouhé době nebo pokud se jedná o krátký výpadek, pak se to nemusí dozvědět vůbec. Ideálně by měly být všechny elektrárny osazeny řídicím systémem. [14]

Díky diagnostice fotovoltaických panelů je možné následné řízení a také detekce vad. Mezi základní prvky diagnostiky patří:

- Vizualní kontrola
- Termografie
- Měření VA charakteristik
- Elektroluminiscence [14]

2.3.1 Vizuální kontrola

Spolu s diagnostikou je velmi důležitá i vizuální kontrola, která se častokrát zanedbává a může nám dát okamžitý signál, že je něco v nepořádku. Můžeme pozorovat defekty na skle jako je znečištění nebo poškození. Pokud je sklo poškozeno, vniká dovnitř panelu vlhkost. Ta vzniká i při špatném utěsnění z výroby, nebo při použití špatné EVA folie.

Po celkovém shlédnutí všech panelů FV elektrárny nebyly shledány žádné na první pohled viditelné defekty. Například nejsou zde tzv. „šnečí cesty“.

Na první pohled viditelná delaminace na těchto panelech také není. Ta je nebezpečná z toho důvodu, že vzniklá dutina se může naplnit vlhkostí s chloridy. Také zde nejsou žádné viditelné praskliny.

2.3.2 Termografie

Tímto měřením se dají zjistit nečistoty a plynové kapsy, trhliny, vlhkost, ptačí trus, nebo zda je nebo není panel připojen. Také lze detekovat možné problémy s elektrickým připojením. Výhodou je že se kontrola provádí za provozu a není potřeba odpojení systému. Defekty se projevují jako teplejší nebo chladnější místa. Záleží na typu poruchy. Pro získání správných informativních výsledků by měly být dodrženy určité podmínky a postupy jako:

- Použití vhodné kamery
- Dostatečná intenzita slunečního záření (nejméně 500W/m^2 , ale nejlépe více jak 700W/m^2)
- Úhel měření v rozmezí 5 až 60°
- Musí být zabráněno stínění a odrazům [19]

Je třeba se také vyvarovat chyb měření, které mohou vzniknout za těchto okolností:

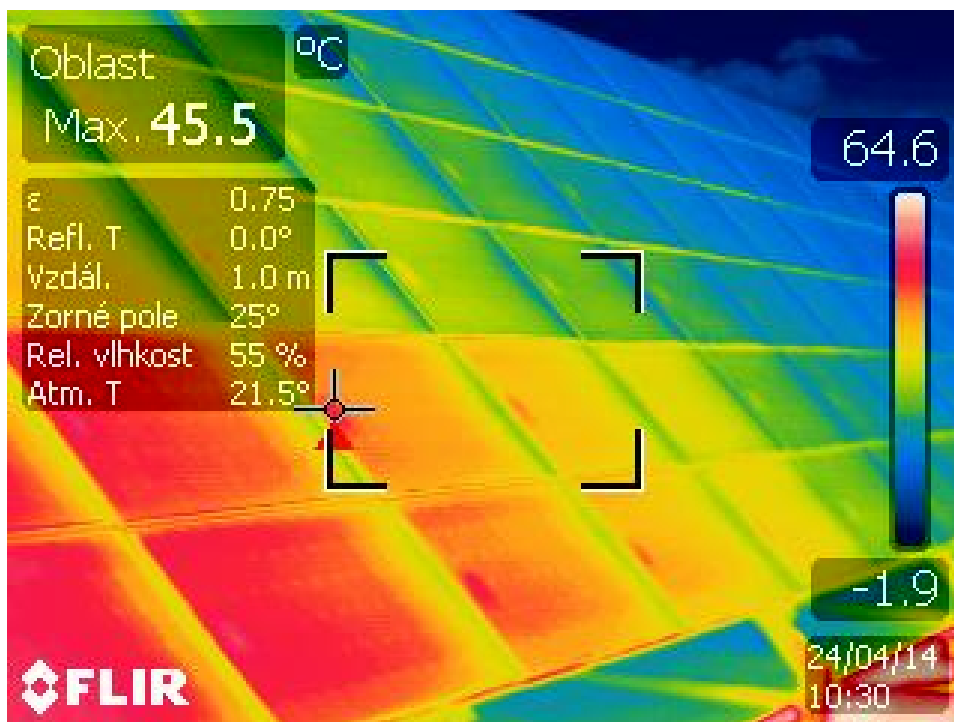
- Částečné stíny (například od budov)
- Odrazy (od slunce, od mraků, od budov)

- Příliš malý úhel při měření
- Změna intenzity záření v průběhu měření [19]

Pokud se budeme držet těchto zásad tak získáme rychlé a jasné výsledky o aktuálním stavu článků. Zda jsou v pořádku nebo jsou na nich nějaké tepelné anomálie.

Vady, které se dají zjistit pomocí termokamery:

- Přechodový odpor v pájeném spoji,
- přechodový odpor v konektoru,
- nízký paralelní odpor jednotlivého solárního článku (interní zkrat ve struktuře solárního článku)
- vadnou nebo propustně pólovanou překlenovací (bypass)diodu,
- rozdíly ve voltampérových charakteristikách jednotlivých fotovoltaických článků v jednom modulu,
- zastínění jednotlivých článků nebo jejich částí. [19]



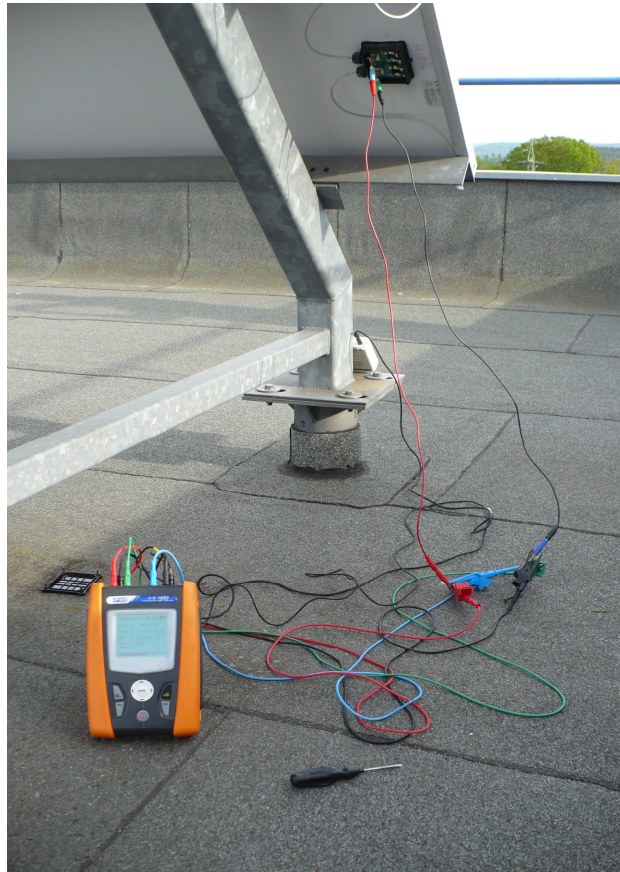
Obr. 12 Snímek z termokamery, pohled na elektrárnu

Termografická diagnostika FV elektrárny byla provedena za řekněme průměrnějších podmínek. V druhé polovině měsíce Dubna. Bohužel nemám k dispozici data z meteostanice, protože byla mimo provoz. Důležité je že panely měly teplotu okolo 50°C. Byly dodrženy všechny podmínky a postupy, které jsou popsány výše, pro získání správných výsledků. Nebylo lehké dosáhnout optimálních úhlů měření díky tomu, že elektrárna je umístěna 2 metry od okraje střechy elektrotechnické fakulty. Tato metoda je velmi rychlá, ovšem je zapotřebí relativně drahé termokamery, která byla zapůjčena od fakulty. I když je měření termokamerou rychlé tak změřit všech 196 panelů zabralo několik hodin měření.

2.3.3 Měření VA charakteristik

Měřením VA charakteristik můžeme zjistit parametry FV panelu a tím skutečný stav. Tím se mohou zjistit defekty, které nejsou vidět při vizuální kontrole a ani na snímku z termokamery. Rozhodující je výkonová charakteristika. Výkon se měří v laboratoři tzv. „flashtestem“. Abychom daný panel otestovali, musíme ho odvézt do laboratoře a cena tohoto měření se pohybuje okolo 1300 za jeden panel. Problém nastává, že pokud není vada viditelná, musí se odhalit jiným způsobem. K tomu slouží právě měření VA charakteristik. Další problém může nastat s uznáním reklamace panelů. [23]

Měření se provádí za pomoci analyzáru, který kromě charakteristik měří také teplotu panelů a osvit.



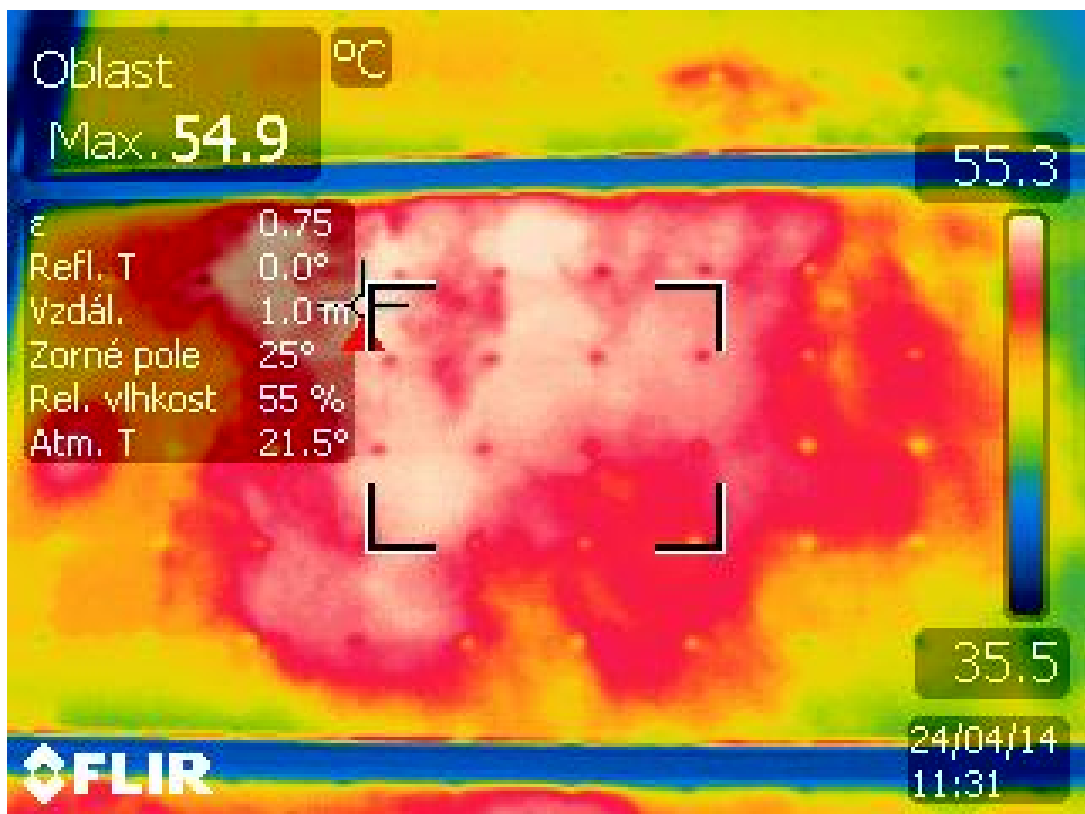
Obr. 13 Ukázka měření analyzérem

2.3.4 Výsledky měření termokamerou

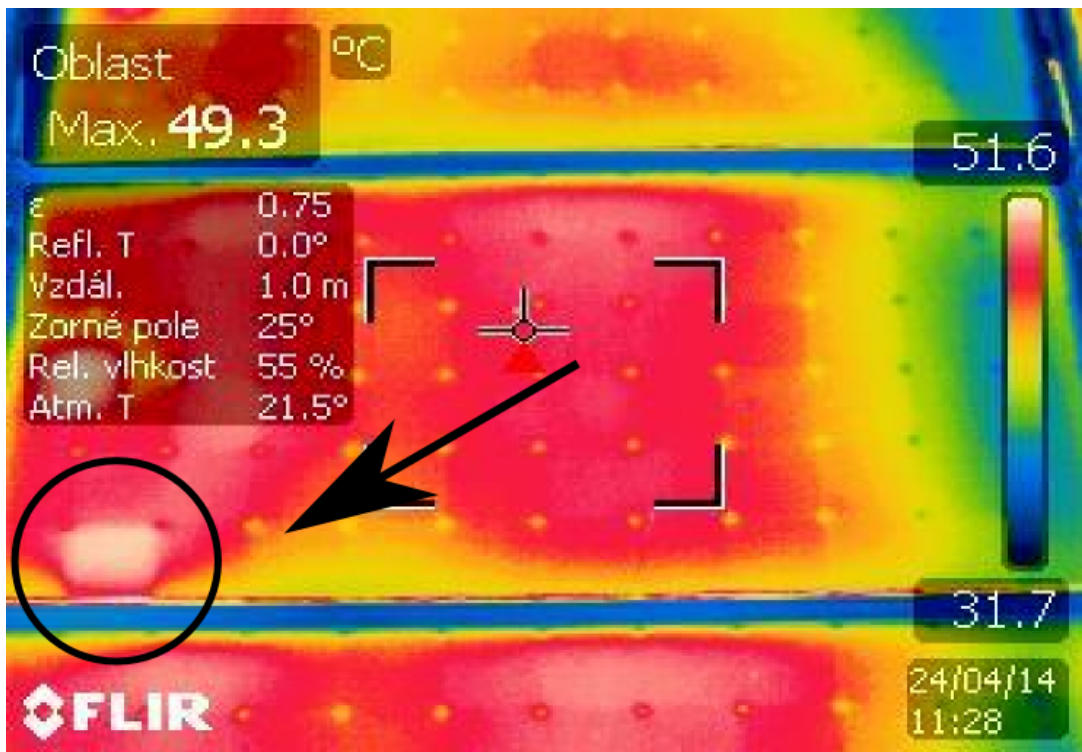
Cílem tedy bylo zjistit, zda nejsou vady na jednotlivých článcích umístěných v panelech. Jak vypadá správný snímek se správným tepelným rozložením je vidět na *Obr. 14*. Všechny panely mají přibližně stejnou teplotu. Chladnější okraje Panelu jsou způsobeny jednak ochlazováním okolí. Snažil jsem se dodržovat podmínky pro měření. Avšak občas sem se nevyhnul odrazům od mraků. Ty se projevují jako mlhovina jak je vidět na obrázku *obr. 15*. Vadné články se více zahřívají a to se projeví na termosnímku jako výraznější místo. To je zobrazeno na obrázku *Obr. 16* a *Obr. 17*. Jeden článek je teplejší než ostatní, což naznačuje vadné spoje článku. Na celé FV elektrárně bylo zjištěno několik defektů. Také je ale vidět že přípojné krabičky nejsou ideálně tepelně odděleny od panelů.



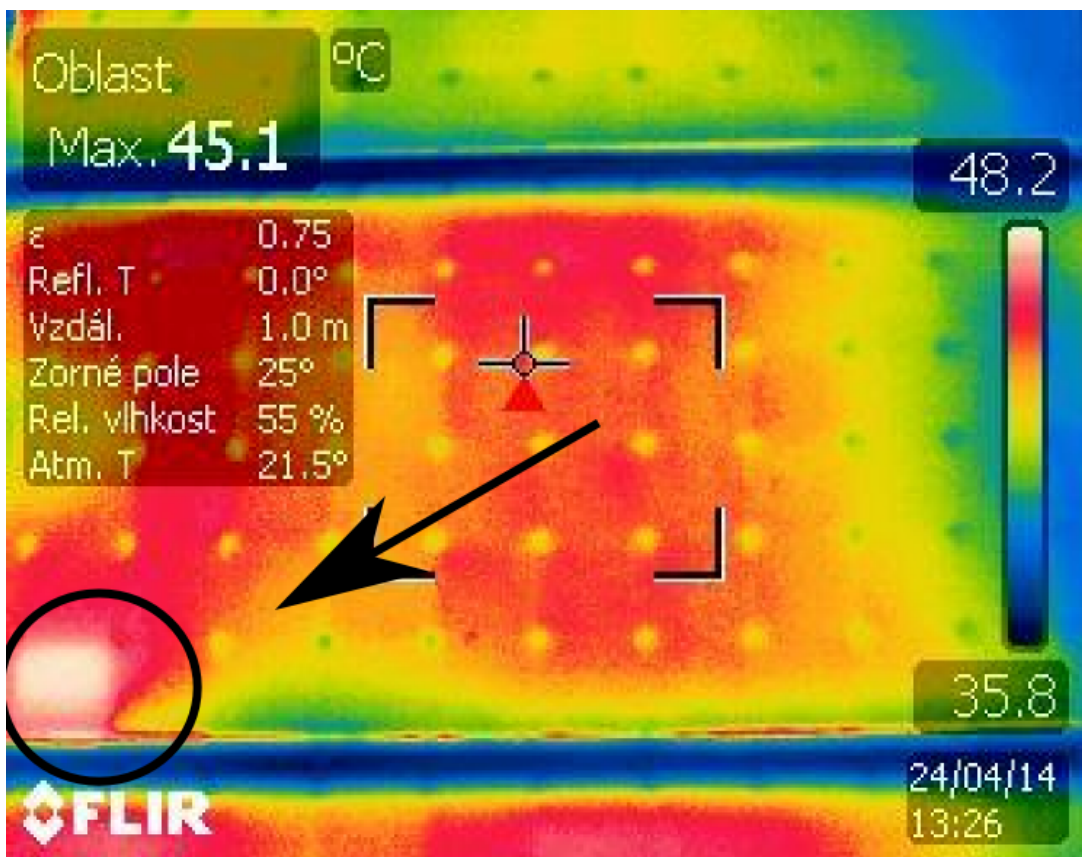
Obr. 14 Termosnímek správně fungujícího panelu



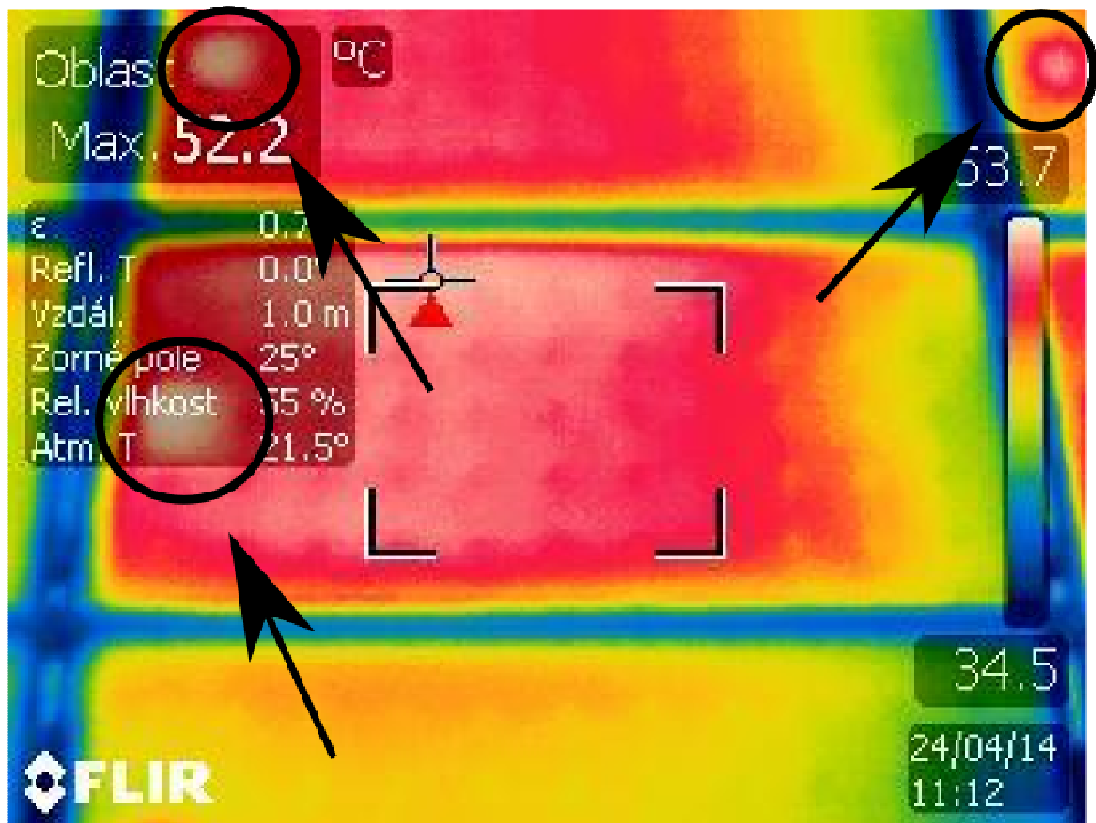
Obr. 15 Milhovina na termosnímku způsobená odrazem mraků



Obr. 16 Vyšší teplota jednoho článku v panelu, vadné spoje ve článku (pozice 10.4.)



Obr. 17 Vadný článek v panelu, vadné spoje (pozice 10.5.)



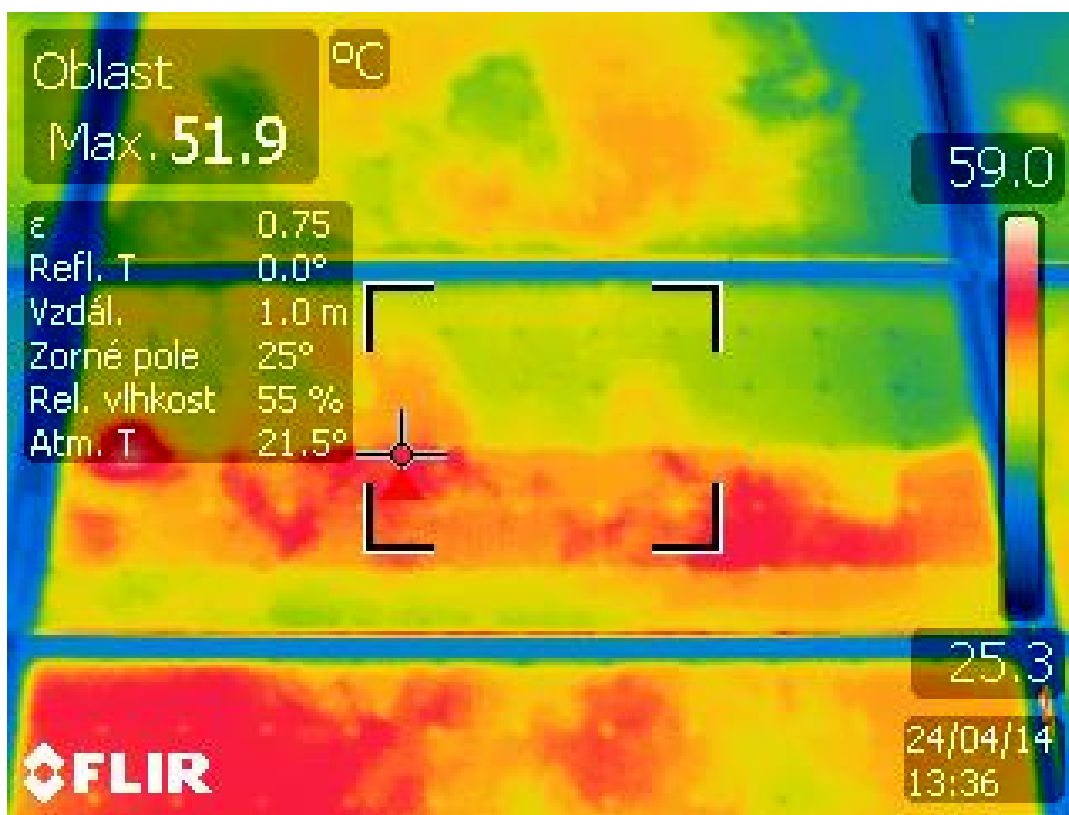
Obr. 18 Umístění přípojných krabiček na panelech

Jak je vidět na obrázku *Obr. 18*, tak na každém panelu jsou jasně teplejší body, které se jeví jako defekty. Defekty to ale nejsou. Jedná se o to, že tyto místa se zahřívají z toho důvodu, že jsou na zadní straně panelu umístěny přípojné krabičky. Tyto místa nejsou dostatečně tepelně odizolovány. Také díky tomu, že jsou pevně spojeni s panelem je toto místo hůře chlazeno okolním vzduchem.

Další defekty jsou zobrazeny na obrázcích *Obr. 19* a *Obr. 20*. Na nich se ukázaly výrazné pásy. To ukazuje na možné vady spojů nebo na vadné bypassové diody. Na tuto vadu ale výrazněji upozornily až I-V charakteristiky z analyzátoru. Na první pohled by se daly přehlédnout díky tomu, že je umístění u středu panelu a okraje jsou více chlazeny větrem.



Obr. 19 Výrazně teplejší dva pásy článků (pozice 19.1.)



Obr. 20 výrazné pásy (pozice 24.5.)

Dané vady byly zkontrolovány ještě ze zadní strany panelů. Kde je kontrast trochu lepší. První vada článku s vadnými spoji se potvrdila (pozice 4.10), ovšem druhá vada na obrázku *Obr. 17* se nepotvrdila. Při druhé kontrole již panel vykazoval normální stav a neměl žádné články s vyšší teplotou než ostatní.

Panel na obrázku *Obr.16* vykazuje i nižší proud jak je vidět z naměřených dat.

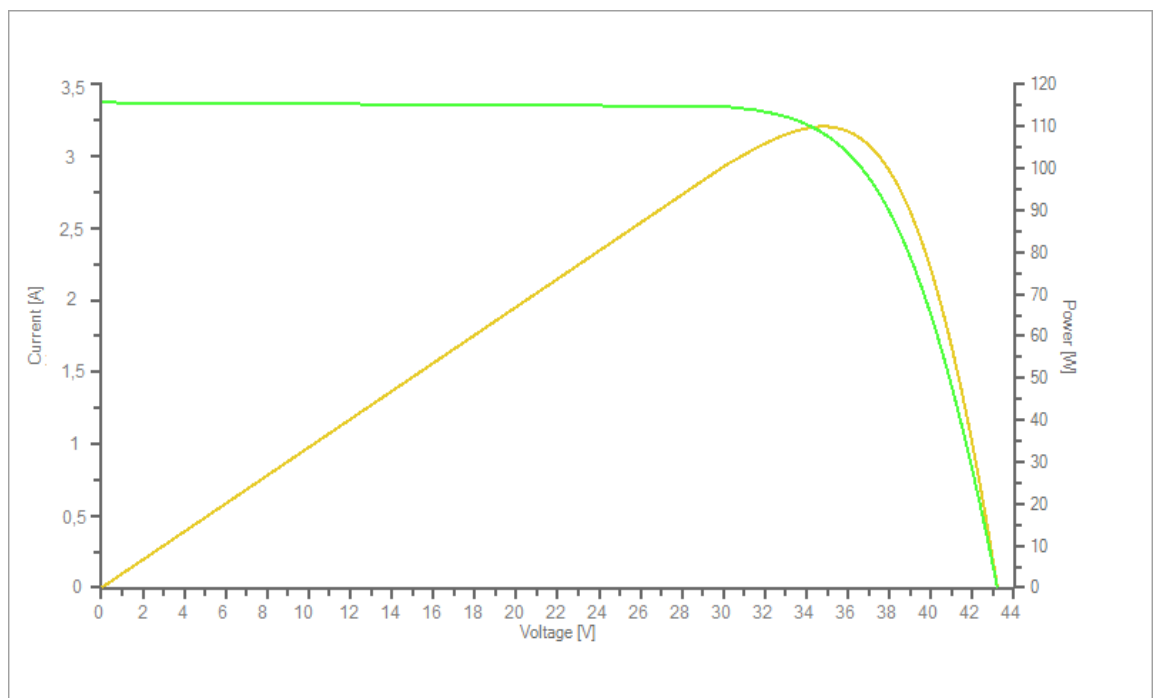


Obr. 21 Zadní kontrola vadného článku (pozice 10.4.)

2.3.5 Výsledky měření VA charakteristik

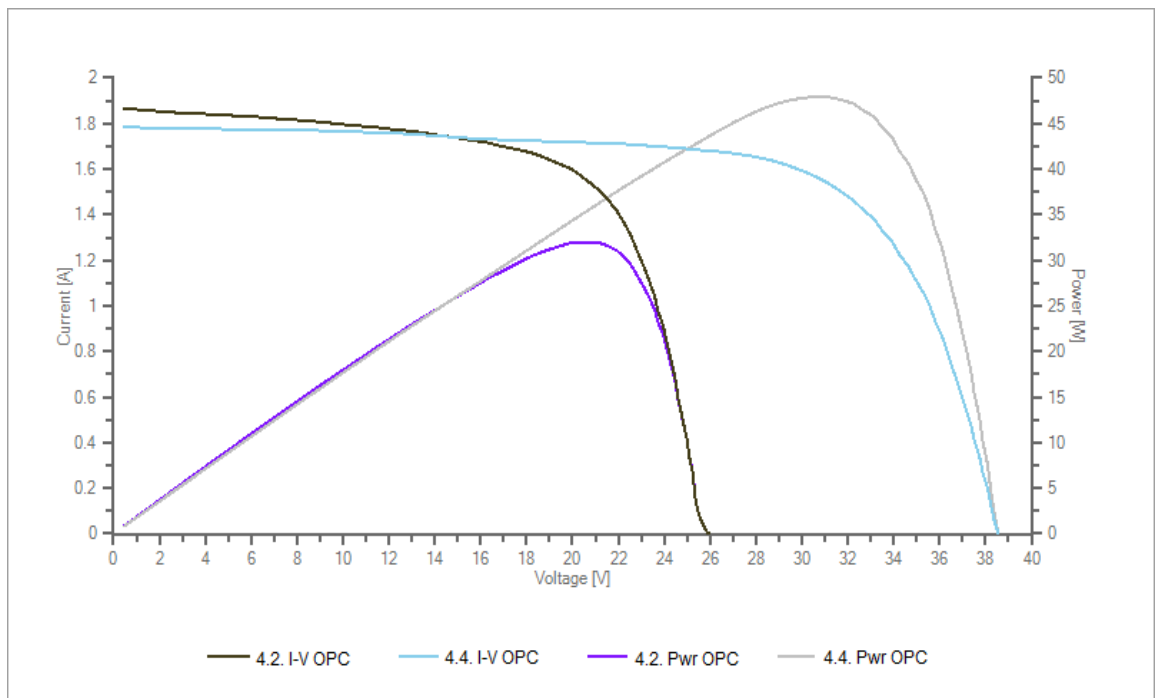
Při měření VA charakteristik analyzérem nebylo zrovna ideální počasí. Není jednoduché vytipovat ideální počasí k měření. Ale tento problém zná každý, kdo kdy měl něco dočinění s fotovoltaikou. Podmínky tedy nebyly příliš dobré. Pro měření je nejlépe osvětlení více jak $700\text{W}/\text{m}^2$. Těchto hodnot jsme dosáhli pouze ráno a to jen na pár minut.

Při měření jsem zadal omylem do analyzáru elektrické parametry jiného panelu s podobným označením jako měřený isofoton I-110. Místo I-110/24 jsem omylem zadal hodnoty I-110/12. To ale na výsledcích vůbec nic nemění. Pouze se změnil I-V charakteristika za ideálních podmínek. Tvar charakteristiky je nezměněn, pouze napětí je dvakrát krát vyšší a proud dvakrát nižší. Správná charakteristika je na obrázku *obr. 22*.

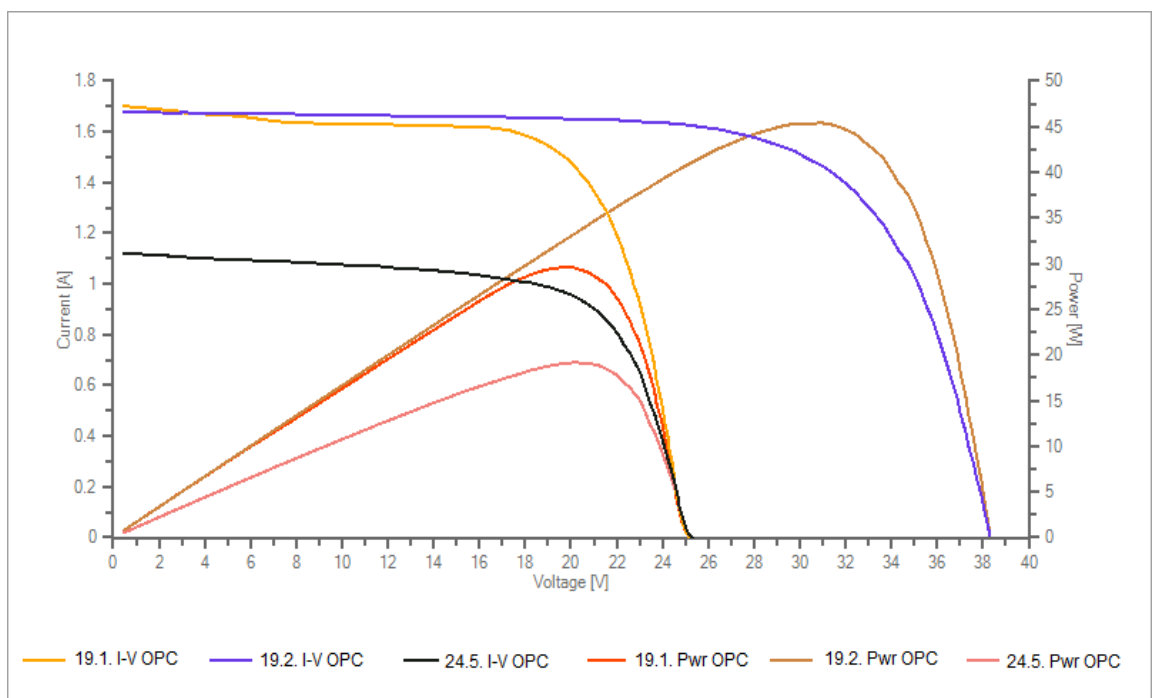


Obr. 22 I-V charakteristika a výkonová charakteristika

Z naměřených charakteristik můžeme zjistit aktuální stav panelů. Lze zjistit například vady při porovnání charakteristik. Například při analýze dat byly zjištěny závady na třech panelech. Projevili se tak že jejich pracovní bod se rapidně snížil. To znamená, že poklesl i proud a napětí na panelu.



Obr. 23 Porovnání I-V charakteristik poškozeného a nepoškozeného panelu



Obr. 24 Další vady dvou panelů na pozicích 19.1. a 24.5.

Na obrázcích *Obr. 23* a *Obr. 24* jsou vidět stejné vady FV panelů. Liší se pouze v amplitudě, která se liší díky rozdílnému osvitu. U panelu 19.1 byl osvit 315 W/m^2 a u panelu 24.5 byl jen 224 W/m^2 . U všech třech článků spadlo napětí na 25V. To může ukazovat na stejnou vadu. Po analýze snímků z termokamery těchto panelů bylo zjištěno, že panely 19.1 a 24.5 vykazují stejnou chybu i na termosnímčích. Mají výrazně teplejší pásy. To

ukazuje na vadné bypassové diody. Při vizuální kontrole diod nebylo vidět žádné fyzické poškození. Mohou být tedy poškozeny ve vnitřní struktuře diody.

$$FF = \frac{V_{mp} \cdot I_{mp}}{V_{OC} \cdot I_{SC}}$$

(1)

Dobrým ukazatelem aktuálního stavu panelů může být faktor plnění (Fill Factor). Získáme rychlou představu o kvalitě poměřovaného panelu. Ten se dá jednoduše určit z VA charakteristiky. Jsou potřeba základní měřené parametry jako P_{mp} , U_{mp} , I_{mp} , I_{SC} , U_{OC} . Díky nim lze Faktor plnění neboli činitel naplnění vypočítat podle následujícího vztahu. [27]

Faktor Plnění představuje elektrickou účinnost FV článku. Tím pádem ho můžeme použít jako jeden ukazatel aktuálního stavu. FF je závislý na řadě parametrů. Hlavní je technologická kvalita výroby. Závisí na morfologii materiálu, kvalitě kontaktů, odporu aktivní plochy a dalších. Dá se říci, že kvalitněji vyrobený panel má vyšší faktor plnění. Jeho maximální hodnota může nabývat 1 nebo 100% avšak to pouze teoreticky. [27]

Hodnoty činitele naplnění (FF) udávané výrobcem jsou 75,3 %. Nejvyšší naměřená hodnota byla 75 %, což je velmi dobré, i když to bylo jen u dvou panelů. Největší pokles je o 13 % u jednoho panelu. Průměrná hodnota činitele naplnění je 69,8 %. Počty panelů s daným faktorem plnění jsou uvedeny v tabulce Tab. 3.

Tab. 3 Počet panelů pro daný faktor plnění

FF [%]	75	74	73	72	71	70	69	68	67	66	65	64	62
Počet panelů	2	4	11	26	28	31	40	30	9	3	4	1	1

3 Zhodnocení měření

Měření termokamerou proběhlo během jednoho dne. Bylo slunečné počasí po většinu měření a ke konci měření se objevily mraky, od kterých vznikly v několika případech odrazy.

Při měření VA charakteristik bylo zpočátku slunečné počasí, které se poté změnilo na polojasno. Snažil jsem se měřit pokaždé, když slunce vykouklo ale i tak nebyl osvit vyšší než 400 W/m^2 . Nebyly dostatečné hodnoty pro to, aby analyzátor přepočítal změřené hodnoty na hodnoty při ideálních podmínkách. Proto jsem se zaměřil na porovnání činitele naplnění neboli faktoru naplnění. Toto měření bylo velice náročné na čas. Bylo zapotřebí rozebrat přípojné krabičky na všech 192 panelech a odpojit ze svorek vodiče. Poté na každém panelu změřit hodnoty.

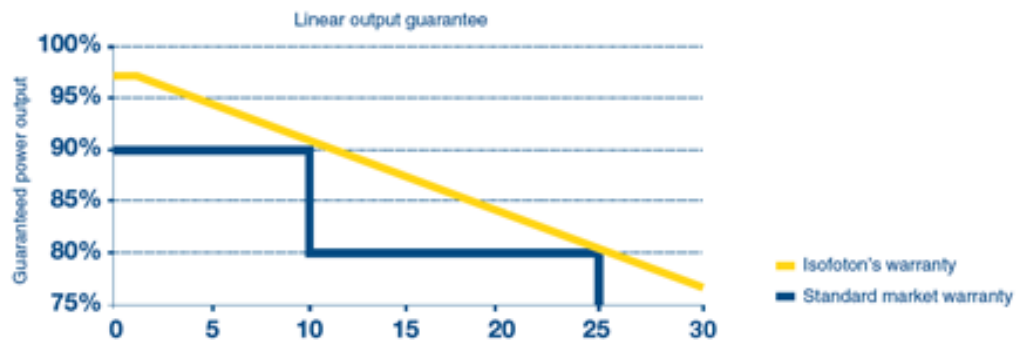
3.1 Porovnání parametrů

Každý panel měl mít v době pořízení elektrické parametry, jaké jsou uvedeny v *Tab. 1*. Pokud chceme porovnat tyto parametry s aktuálními parametry je potřeba mít naměřené hodnoty přepočítané na ideální podmínky. Tyto hodnoty jsme ale z analyzátoru nezískali. Jednak byl příliš malý osvit, který byl v průměru 300 W/m^2 . Pro dobře vypovídatelné hodnoty by měl být osvit větší než 700 W/m^2 .

Porovnání tedy proběhlo ve formě porovnání faktoru plnění (FF). Původní hodnota u každého panelu byla 75,3 %. Tuto hodnotu bereme za referenční. Jelikož průměrná hodnota činitele plnění byla 69,8 %, tak průměrně klesla účinnost panelů o 6,9 %. Tuto hodnotu sráží jeden horší panel na pozici 24.6, u kterého byla zjištěna ohořelá izolace vodiče. To ukazuje na to, že zde tekla nadměrný proud. Při shlednutí termosnímků tohoto panelu se nezdá, že by bylo něco v nepořádku s tepelným vyzařováním.

Záruka na výkon od výrobců bývá na 80 % výkonu na 25 let. Někteří to ale mají tak že tato doba je rozdělena na 12, 20 a 25let. Kde po 12 letech dávají záruku na 90 % výkonu panelu nebo celého systému. V našem případě je elektrárna v provozu od roku 2003, což je

nyňí 11 let. Firma Isofoton udává garanci 10 let na 90 % výkonu jak je vidět z obrázku *Obr. 25*. To elektrárna splňuje. Výkon celé elektrárny klesl o 7,3 %.



Obr. 25 Garance firmy Isofotón [27]

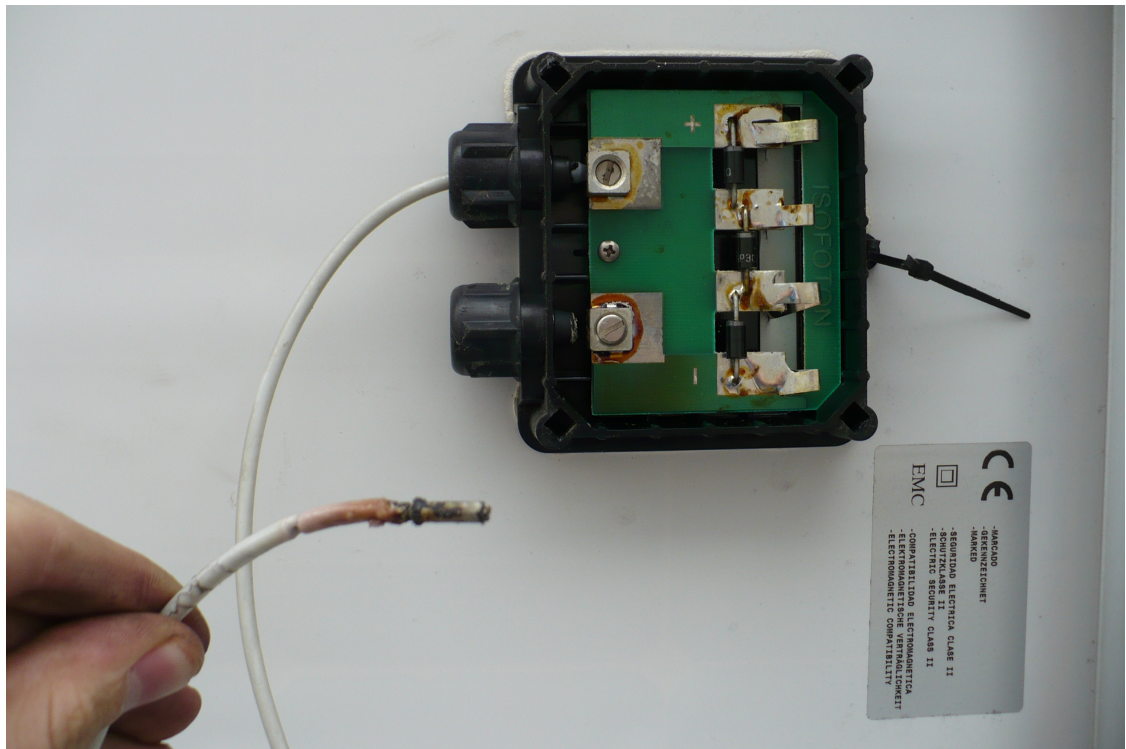
3.1.1 Původní parametry

Jako původní parametry jsou brány parametry od výrobce panelů, protože elektrárna zatím nebyla měřena tímto způsobem. Tabulky *Tab. 1* a *Tab. 2* jsou uvedeny v kapitole 2.2.

3.1.2 Změřené hodnoty

Všechny změřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce, která je v příloze.

U jednoho panelu jsem objevil opálenou izolaci na přípojném vodiči. Vodič s opálenou izolací je zobrazen na obrázku *Obr. 26*. U tohoto panelu se po změření hodnot ukázalo, že má nejnižší faktor plnění a to jako jediný hodnotu 62 %.



Obr. 26 Opálená izolace vodiče (24.6)

3.2 Vyhodnocení výsledků měření a degradace

Výkonově a v počtu defektů na tom není celá elektrárna nijak tragicky. V jednom panelu jsou na jednom článku vadné spoje a tím se více zahřívá a snižuje výkon panelu o 1,4 %. V dalších třech panelech je trvalý snížený výkon zřejmě vadnými bypassovými diodami, které zabraňují tomu, aby do článků tekla proud při nedostatečném osvětlení a snižovaly by účinnost.

Degradace materiálu není je v rámci garance od dodavatele panelů firmou Isofoton. Ne všechny ztráty výkonu jsou ale dány degradací. Spíše větší ztráty jsou způsobeny vadami nebo vadnými komponenty. Jestliže výkon elektrárny klesl o 7,3 % tak převedením na wattů je to ztráta 1486 W. Ve výsledku nyní dosáhneme maximálního výkonu při dobrých podmínkách 18 866 W.

Tento výsledek není nijak alarmující, ale pokud jde o komerční využití a elektrárna je jako prostředek pro zisk, pak by bylo vhodné co nejrychleji odstranit vady a zvýšit tím výkon systému. Pokud by byly vady rozsáhlejší, bylo by nutné nahradit některé panely novými.

Závěr

Na závěr bych zhodnotil možnosti využití solárního záření. V první řadě je důležité vědět, jaké máme v daném místě na zemi podmínky. Podle toho volíme různá solární zařízení. Nejperspektivnější jsou přeměny slunečního záření na elektrickou energii v podobě jakéhokoli FV panelu a na ohřev solární kolektory. Jako energetický zdroj se neobejde bez podpory jiného zdroje energie pro masivní využití. Velký potenciál vidím ve spojení s vodíkovým hospodářstvím. Pokud dojde v oblasti palivových článků k většímu rozvoji a tím i k rozšíření do komerční sféry, pak bude mít větší podporu výroba vodíku elektrolýzou. Protože tímto způsobem se dá získat vodík o vysoké čistotě.

Diagnostika FV elektrárny proběhla vizuální kontrolou, měřením termokamerou a VA charakteristik. To ukázalo na několik defektů.

Po vizuální stránce bylo vše v pořádku až na několik nečistot na panelech a na jednom vodiči byla ohořelá izolace. Měření termokamerou ukázalo v první řadě vady dvou článků, z nichž druhý se po opakovaném měření neprojevil a dvě vady bypassových diod z celkového počtu tří. Ovšem to je jen jedna část. Na měření termokamerou navazuje měření VA charakteristik analyzátozem. Diagnostika odhalila tři panely s výraznou vadou. Bylo naměřeno nízké napětí a proud. Napětí se u všech tří pohybovalo na téměř stejné hodnotě okolo $25 \text{ V} \pm 1 \text{ V}$.

V celku je na tom elektrárna z hlediska kvality panelů dobře. Je v provozu už 11 rokem a nejsou zde žádné velké rozsáhlé vady, které by znamenaly výměnu panelů. Vadné bypassové diody jsou častým problémem a dají se snadno vyměnit.

Z hlediska materiálové degradace článků vlivem působení času, slunečního záření a teploty u celé elektrárny klesl výkon o 7.3%. To splňuje garanci danou od výrobce na ztrátu výkonu za 10 let na 90 %.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] LIBRA, Martin a Vladislav POULEK. *Fotovoltaika: teorie i praxe využití solární energie*. 1. vyd. Praha: ILSA, 2009, 160 s. ISBN 978-80-904311-0-2.
- [2] První sluneční věžová elektrárna v Německu. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=41578
- [3] Elekřina ze slunce: Fotovoltaika a solárně termické elektrárny. [online]. 03.06.2012 [cit. 2013-12-11]. Dostupné z: <http://www.ekobonus.cz/elektrina-ze-slunce-fotovoltaika-a-solarne-termicke-elektrarny>
- [4] Solární elektrárny překonaly výkon Temelína. Vyrábí však podstatně méně. [online]. 17.11. 2012 [cit. 2013-12-11]. Dostupné z: http://technet.idnes.cz/solarni-elektrarny-temelin-dfy-/tec_technika.aspx?c=A121115_123429_tec_technika_mla
- [5] HORČÍK, Jan. *Fotovoltaika ve světě přesáhla 100 GW instalovaného výkonu: solární elektrárny* [online]. 12. 2. 2013 [cit. 2013-12-11]. Dostupné z: <http://www.ekobydleni.eu/solarni-elektrarny/fotovoltaika-ve-svete-presahla-100-gw-instalovaneho-vykonu>
- [6] Stirlingův motor. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2013, 12. 9. 2013 [cit. 2013-12-14]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Stirling%C5%AFv_motor
- [7] VANĚČEK, Milan a Antonín FEJFAR. FYZIKÁLNÍ ÚSTAV AKADEMIE VĚD ČR, v.v.i., Praha. *Fotovoltaika - jaká je nejlepší dostupná technologie?*. 22.3.2010. Dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/6327-fotovoltaika-jaka-je-nejlepsi-dostupna-technologie>
- [8] [online]. [cit. 2014-02-24]. Dostupné z: <http://www.ekoblog.cz/soubory/img/conctypes.jpg>
- [9] Vořtina (kompozit). In: [online]. [cit. 2014-02-24]. Dostupné z: <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b2/CompositeSandwich.png>
- [10] Ostrovní fotovoltaické systémy. In: [online]. [cit. 2014-02-24]. Dostupné z: <http://www.enerfinplus.cz/files/fotovoltaika/ostrovní-systémy-akumulace.jpg>
- [11] Schéma Seebeckova obvodu. In: [online]. [cit. 2014-02-24]. Dostupné z: http://3pol.cz/img/pic/0/2010/02/elektrina_z_tepla_01.jpg
- [12] HASELHUHN, Ralf. *Fotovoltaika: budovy jako zdroj proudu*. 1. české vyd. Ostrava: HEL, 2011, 176 s. ISBN 978-80-86167-33-6.
- [13] LÁZŇOVSKÝ, Matouš. Fotovoltaika může radikálně zlevnit. Díky materiálu, který asi neznáte. [online]. [cit. 2014-03-04]. Dostupné z: http://technet.idnes.cz/levnejsi-fotovoltaika-0br-/veda.aspx?c=A131003_133549_veda_mla
- [14] Alternativní energie: Informace o úsporách paliv a energie a využívání netradičních zdrojů energie v domácnostech a podnikání. 2012, roč. 15, č. 4, s. 10-22. DOI: 1212-1673.
- [15] FOSTER, Phillip R. Innovative Rotary Displacer Stirling Engine: Sustainable Power Generation for Private and Fleet Vehicle Applications. In: [online]. 2011 [cit. 2014-04-09]. Dostupné z: <http://scholar.lib.vt.edu/ejournals/JOTS/v37/v37n2/images/foster3.jpeg>

- [16] FOJT, Pavel. [online]. [cit. 2014-04-11]. Dostupné z: ostrovnidum.cz
- [17] SCHMIDT, Walter. *Vývoj systému pro automatické řízení experimentálního palivového článku StaXX*. Západočeská univerzita, 2012. Bakalářská práce. Elektrotechnická fakulta. Vedoucí práce Pavel Štekl.
- [18] Ultrathin solar cell is efficient and easy to make. In: [online]. [cit. 2014-04-16]. Dostupné z: <http://images.iop.org/objects/ntw/news/12/9/22/pic1.jpg>
- [19] *Kontrola solárních panelů: Využití termokamer při kontrole solárních panelů* [online]. [cit. 2014-04-28]. Dostupné z: <http://www.geotronics.cz/termokamery/kontrola-solarnich-panelu>
- [20] *Planetsolar: the first solar powered boat around the world* [online]. 2012 [cit. 2014-04-28]. Dostupné z: <http://www.designboom.com/technology/planetsolar-the-first-solar-powered-boat-around-the-world/>
- [21] [online]. [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: http://solargis.info/doc/_pics/freemaps/1000px/ghi/SolarGIS-Solar-map-Czech-Republic-en.png
- [22] [online]. 2011 [cit. 2014-05-06]. Dostupné z: <http://www.dnyvedy.zcu.cz/2011/detail.php?expozice=90>
- [23] SOLARNINOVINKY.CZ. *Výkon FVE – stárnutí a defekty FV panelů* [online]. [cit. 2014-05-07]. Dostupné z: <http://www.solarninovinky.cz/?zpravy/2014041001/vykon-fve-starnuti-a-defekty-fv-panelu>
- [24] [online]. [cit. 2014-05-08]. Dostupné z: http://www.posharp.com/i-11024-solar-panel-from-isofoton_p367821021d.aspx
- [25] JAKUBES, Ing. Jaroslav. ENA, s. r. o. *Fenomén „Snail Trails“* [online]. 8.9.2012 [cit. 2014-05-08]. Dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/9020-fenomen-snail-trails-sneci-cesticky>
- [26] [online]. [cit. 2014-05-09]. Dostupné z: http://www.cne.cz/data/editor/27cs_9_big.jpg
- [27] [online]. [cit. 2014-05-11]. Dostupné z: <http://www.isofoton.com/sites/default/themes/cherrytelbase/images/img-02-calidad-en.png>
- [28] *Vliv intenzity záření na výkon článků*. In: [online]. [cit. 2014-05-11]. Dostupné z: http://www.ueen.feec.vutbr.cz/cz/images/stories/images_laboratory/H2aFVE/Files/Laboratorni_uloha_c11.pdf

Přílohy

Tabulka naměřených hodnot

řádek	sloupec	Pmax [W]	Voc [V]	Vmpp [V]	Imp [A]	Isc [A]	Osvícení [W/m ²]	teplota panelu [°C]	FF [%]
1	1	59,53	39,74	31,44	1,89	2,12	484,00	35,30	71,00
	2	49,61	39,30	31,52	1,57	1,78	468,00	31,40	71,00
	3	49,88	39,74	31,87	1,57	1,75	431,00	28,20	72,00
	4	48,78	39,46	32,23	1,51	1,74	427,00	26,40	71,00
	5	47,32	39,84	32,44	1,46	1,78	445,00	25,10	67,00
	6	51,08	40,23	32,08	1,59	1,83	440,00	24,70	69,00
2	1	46,79	38,84	31,94	1,46	1,74	378,00	29,00	69,00
	2	48,13	38,87	31,30	1,54	1,83	392,00	28,10	68,00
	3	54,16	39,36	31,66	1,71	1,92	415,00	28,10	72,00
	4	32,00	25,96	20,37	1,57	1,87	405,00	27,60	66,00
	5	51,36	39,33	31,30	1,64	1,88	402,00	27,50	70,00
	6	53,85	39,47	31,87	1,69	1,86	407,00	27,50	73,00
3	1	44,63	38,47	30,66	1,46	1,71	349,00	26,90	68,00
	2	46,04	38,51	30,30	1,52	1,69	354,00	26,10	71,00
	3	44,93	38,69	31,66	1,42	1,69	339,00	26,00	69,00
	4	45,64	38,53	31,16	1,46	1,67	340,00	26,10	71,00
	5	48,19	38,67	30,73	1,57	1,82	359,00	25,40	68,00
	6	50,01	39,09	31,59	1,58	1,81	373,00	24,90	71,00
4	1	46,44	38,54	30,87	1,50	1,75	360,00	24,30	69,00
	2	48,88	38,66	30,87	1,58	1,77	360,00	24,60	71,00
	3	48,62	38,81	31,37	1,55	1,82	367,00	24,80	69,00
	4	47,96	38,56	30,59	1,57	1,79	363,00	24,90	70,00
	5	50,99	38,70	30,73	1,66	1,86	386,00	24,30	71,00
	6	46,02	38,36	30,23	1,52	1,73	356,00	24,30	70,00
5	1	39,94	38,61	31,44	1,27	1,48	299,00	23,20	70,00
	2	41,55	38,99	31,87	1,30	1,48	304,00	23,30	72,00
	3	40,41	39,10	31,66	1,28	1,54	306,00	23,40	67,00
	4	40,50	39,01	31,66	1,28	1,48	301,00	23,20	70,00
	5	40,81	38,80	30,94	1,32	1,54	306,00	22,80	68,00
	6	42,14	39,06	31,73	1,33	1,58	318,00	22,70	68,00
6	1	36,41	38,60	31,44	1,16	1,37	286,00	23,70	69,00
	2	36,72	38,87	31,30	1,17	1,33	279,00	23,50	71,00
	3	37,30	38,80	31,23	1,19	1,38	286,00	23,80	70,00
	4	38,72	38,94	31,23	1,24	1,43	301,00	23,80	69,00
	5	39,57	39,23	32,23	1,23	1,44	300,00	23,40	70,00
	6	40,32	39,16	31,52	1,28	1,47	311,00	23,40	70,00
7	1	39,35	39,01	31,66	1,24	1,49	318,00	22,70	68,00
	2	43,38	39,67	32,15	1,35	1,51	323,00	22,60	72,00

	3	37,97	39,17	31,87	1,19	1,42	299,00	22,30	68,00
	4	37,79	39,04	31,80	1,19	1,39	297,00	22,60	70,00
	5	35,24	38,70	30,52	1,15	1,38	293,00	22,80	66,00
	6	35,79	39,01	31,16	1,15	1,33	278,00	25,70	69,00
8	1	40,16	39,47	32,15	1,25	1,44	287,00	24,50	70,00
	2	40,53	39,04	31,02	1,31	1,51	305,00	25,10	69,00
	3	38,37	38,74	30,80	1,25	1,42	288,00	26,00	70,00
	4	37,88	38,94	31,09	1,22	1,37	276,00	26,30	71,00
	5	39,39	38,81	31,09	1,27	1,41	264,00	25,70	72,00
	6	39,38	38,99	31,37	1,26	1,50	278,00	25,50	67,00
9	1	45,96	39,01	31,44	1,46	1,66	367,00	24,50	71,00
	2	47,80	39,27	31,59	1,51	1,71	382,00	24,50	71,00
	3	46,44	39,06	31,44	1,48	1,66	372,00	24,70	72,00
	4	46,65	39,13	31,59	1,48	1,71	368,00	24,80	70,00
	5	44,99	38,69	30,59	1,47	1,71	360,00	24,60	68,00
	6	46,57	38,93	31,09	1,50	1,66	310,00	24,60	72,00
10	1	53,04	38,16	30,73	1,73	2,06	424,00	33,70	67,00
	2	54,35	38,30	30,16	1,80	2,11	437,00	36,20	67,00
	3	54,62	38,16	30,16	1,81	2,13	439,00	37,30	67,00
	4	54,09	37,97	30,59	1,77	2,16	437,00	38,20	66,00
	5	57,37	38,23	29,73	1,93	2,21	458,00	37,90	68,00
	6	59,07	38,10	30,52	1,94	2,25	463,00	36,80	69,00
11	1	55,63	38,40	30,87	1,80	2,09	448,00	33,90	69,00
	2	58,43	38,23	30,23	1,93	2,17	446,00	33,10	70,00
	3	58,38	38,21	30,44	1,92	2,19	462,00	32,00	70,00
	4	57,19	38,30	29,87	1,91	2,10	452,00	31,50	71,00
	5	57,94	38,49	30,80	1,88	2,12	447,00	32,20	71,00
	6	54,87	37,87	29,94	1,83	2,12	444,00	32,00	68,00
12	1	57,09	38,24	30,16	1,89	2,18	464,00	32,40	69,00
	2	57,59	38,31	31,02	1,86	2,21	461,00	33,20	68,00
	3	46,71	37,74	29,73	1,57	1,83	373,00	34,70	68,00
	4	45,99	37,90	30,09	1,53	1,76	380,00	35,50	69,00
	5	48,94	37,96	30,44	1,61	1,88	393,00	36,80	68,00
	6	51,74	38,09	29,87	1,73	1,98	396,00	36,80	69,00
13	1	43,67	37,81	30,44	1,43	1,66	365,00	36,10	70,00
	2	45,10	37,89	29,80	1,51	1,69	355,00	35,80	71,00
	3	42,13	37,66	29,94	1,41	1,60	339,00	35,20	70,00
	4	42,99	37,81	30,23	1,42	1,66	342,00	34,70	69,00
	5	40,53	38,09	31,02	1,31	1,57	312,00	34,90	68,00
	6	40,80	37,93	30,37	1,34	1,57	314,00	34,70	68,00
14	1	40,06	38,01	30,80	1,30	1,52	315,00	34,10	69,00
	2	41,62	38,01	30,30	1,37	1,58	328,00	34,30	69,00
	3	44,06	38,01	30,59	1,44	1,69	337,00	34,60	68,00
	4	49,01	38,16	30,09	1,63	1,86	386,00	35,00	69,00

	5	57,25	38,81	31,09	1,84	2,14	460,00	35,60	69,00
	6	59,23	38,67	31,09	1,91	2,15	479,00	35,60	71,00
15	1	44,74	37,83	29,80	1,50	1,72	353,00	36,10	69,00
	2	43,20	37,64	30,44	1,42	1,62	357,00	36,60	71,00
	3	39,13	37,34	30,01	1,30	1,49	326,00	36,80	70,00
	4	28,25	36,90	29,80	0,95	1,11	169,00	32,40	69,00
	5	28,50	37,26	30,16	0,95	1,10	230,00	28,30	70,00
	6	29,46	37,17	29,94	0,98	1,22	250,00	28,00	65,00
16	1	39,84	38,59	31,52	1,26	1,49	320,00	28,50	69,00
	2	42,33	38,66	31,30	1,35	1,54	330,00	28,10	71,00
	3	43,10	38,57	31,80	1,36	1,63	342,00	27,80	69,00
	4	41,92	38,64	30,66	1,37	1,53	328,00	27,50	71,00
	5	39,66	38,40	31,37	1,26	1,48	322,00	27,10	70,00
	6	39,59	38,30	30,80	1,29	1,53	317,00	26,90	68,00
17	1	38,28	39,31	31,73	1,21	1,41	260,00	25,90	69,00
	2	34,83	38,77	31,23	1,12	1,29	239,00	26,10	70,00
	3	35,05	38,76	31,52	1,11	1,25	226,00	26,50	72,00
	4	55,80	39,01	31,66	1,76	2,04	372,00	27,80	70,00
	5	48,41	38,57	30,87	1,57	1,75	306,00	28,10	72,00
	6	49,29	38,80	31,37	1,57	1,81	296,00	27,90	70,00
18	1	50,78	38,89	30,94	1,64	1,91	406,00	28,60	68,00
	2	54,93	38,99	31,66	1,74	2,03	445,00	32,80	69,00
	3	52,08	38,73	31,16	1,67	1,96	438,00	34,30	68,00
	4	50,80	38,69	31,02	1,64	1,93	427,00	35,30	68,00
	5	48,31	38,89	31,73	1,52	1,79	435,00	36,70	69,00
	6	46,74	38,26	30,52	1,53	1,79	430,00	37,30	68,00
19	1	29,61	25,23	19,72	1,50	1,70	315,00	37,80	69,00
	2	45,42	38,30	30,94	1,47	1,68	317,00	38,30	71,00
	3	47,82	38,61	31,16	1,53	1,74	312,00	38,50	71,00
	4	45,25	38,57	31,09	1,46	1,69	315,00	38,60	69,00
	5	40,15	37,97	30,59	1,31	1,52	301,00	38,70	70,00
	6	41,00	38,10	31,09	1,32	1,50	289,00	38,80	72,00
20	1	36,85	38,01	31,02	1,19	1,38	274,00	38,70	70,00
	2	36,77	38,26	30,87	1,19	1,37	259,00	38,60	70,00
	3	36,32	38,29	31,37	1,16	1,34	258,00	38,60	71,00
	4	38,21	38,16	30,37	1,26	1,48	268,00	38,50	68,00
	5	37,28	37,97	30,44	1,22	1,44	279,00	38,50	68,00
	6	37,22	37,86	29,94	1,24	1,44	272,00	38,50	68,00
21	1	34,99	38,09	30,87	1,13	1,33	289,00	36,50	69,00
	2	33,82	38,09	30,16	1,12	1,31	281,00	36,80	68,00
	3	27,54	37,61	30,23	0,91	1,02	251,00	37,20	72,00
	4	23,90	37,40	30,37	0,79	0,90	188,00	37,20	71,00
	5	21,73	36,88	29,44	0,74	0,84	176,00	37,20	70,00

	6	21,07	37,31	29,51	0,71	0,85	171,00	37,00	67,00
22	1	19,73	37,06	29,01	0,68	0,83	176,00	36,50	64,00
	2	22,56	37,49	30,09	0,75	0,93	189,00	36,20	65,00
	3	29,43	38,09	30,37	0,97	1,14	226,00	36,00	68,00
	4	34,35	39,03	31,66	1,08	1,23	267,00	35,70	72,00
	5	31,80	38,44	30,87	1,03	1,21	261,00	35,70	68,00
	6	31,53	38,23	31,44	1,00	1,21	255,00	35,60	68,00
23	1	29,86	37,99	30,16	0,99	1,16	238,00	33,90	68,00
	2	31,13	38,33	31,16	1,00	1,12	239,00	33,90	72,00
	3	31,01	38,37	31,80	0,98	1,17	238,00	34,30	69,00
	4	28,03	37,87	30,87	0,91	1,13	232,00	34,50	65,00
	5	29,77	38,30	31,02	0,96	1,13	232,00	34,70	69,00
	6	29,15	37,94	30,09	0,97	1,11	230,00	34,90	69,00
24	1	28,42	38,17	31,30	0,91	1,08	226,00	35,00	69,00
	2	29,31	38,16	31,02	0,95	1,15	227,00	35,00	67,00
	3	31,44	38,63	31,16	1,01	1,13	227,00	34,80	72,00
	4	30,73	38,61	30,94	0,99	1,15	226,00	34,80	69,00
	5	19,16	25,27	20,08	0,95	1,12	224,00	34,80	68,00
	6	27,92	38,23	31,16	0,90	1,17	227,00	34,80	62,00
25	1	31,82	38,54	30,80	1,03	1,20	240,00	34,50	69,00
	2	32,42	38,60	31,02	1,05	1,18	240,00	33,90	71,00
	3	30,15	38,31	31,02	0,97	1,15	234,00	34,10	69,00
	4	28,90	38,20	30,87	0,94	1,16	226,00	34,30	65,00
	5	31,63	38,54	31,44	1,01	1,14	236,00	34,50	72,00
	6	30,59	38,60	31,09	0,98	1,15	243,00	34,60	69,00
26	1	32,76	38,90	31,80	1,03	1,17	243,00	33,90	72,00
	2	33,97	38,87	31,23	1,09	1,24	253,00	33,80	70,00
	3	34,33	38,71	31,73	1,08	1,25	256,00	33,50	71,00
	4	33,77	38,87	31,66	1,07	1,25	256,00	33,40	69,00
	5	32,64	38,81	31,59	1,03	1,21	250,00	33,30	70,00
	6	32,47	38,80	31,52	1,03	1,19	247,00	33,10	70,00
27	1	32,42	38,87	31,66	1,02	1,21	244,00	32,90	69,00
	2	34,01	39,01	32,44	1,05	1,23	254,00	32,90	71,00
	3	34,93	39,10	32,65	1,07	1,22	256,00	32,70	73,00
	4	34,53	39,01	32,01	1,08	1,22	254,00	32,60	72,00
	5	35,69	39,23	31,66	1,13	1,23	259,00	32,50	74,00
	6	34,97	39,30	32,51	1,08	1,21	270,00	32,40	73,00
28	1	33,94	39,10	31,37	1,08	1,21	278,00	32,10	72,00
	2	32,03	38,81	31,94	1,00	1,17	253,00	32,70	71,00
	3	33,93	39,30	32,65	1,04	1,16	252,00	33,10	75,00
	4	32,91	39,03	32,23	1,02	1,20	253,00	33,30	70,00
	5	33,75	38,97	31,73	1,06	1,17	255,00	33,60	74,00
	6	32,41	38,90	32,44	1,00	1,15	239,00	33,90	72,00

29	1	29,46	38,73	32,23	0,91	1,07	263,00	34,00	71,00
	2	29,46	38,77	32,23	0,91	1,04	239,00	34,00	73,00
	3	29,24	38,67	31,37	0,93	1,04	245,00	34,00	73,00
	4	28,49	38,71	31,37	0,91	0,98	235,00	33,90	75,00
	5	25,35	38,44	31,37	0,81	0,95	221,00	33,90	70,00
	6	26,14	38,33	31,09	0,84	0,95	214,00	33,90	72,00
30	1	25,15	38,54	32,08	0,78	0,95	218,00	33,60	69,00
	2	26,25	38,94	32,73	0,80	0,92	212,00	33,40	74,00
	3	25,75	38,69	31,87	0,81	0,91	211,00	33,40	73,00
	4	23,30	38,44	30,94	0,75	0,84	191,00	33,10	72,00
	5	22,89	38,59	31,02	0,74	0,87	193,00	33,00	68,00
	6	23,50	38,51	31,09	0,76	0,85	192,00	32,90	72,00
31	1	20,96	38,59	31,94	0,66	0,81	159,00	29,30	67,00
	2	21,72	38,74	32,23	0,67	0,77	152,00	29,50	73,00
	3	21,99	38,66	30,80	0,71	0,80	150,00	29,70	72,00
	4	22,64	38,89	32,58	0,70	0,80	149,00	29,70	73,00
32	1	19,60	38,67	31,66	0,62	0,74	148,00	29,80	68,00
	2	20,34	38,47	31,73	0,64	0,74	142,00	29,80	72,00
	3	20,48	38,59	31,80	0,64	0,72	138,00	29,80	74,00
	4	20,67	38,70	31,94	0,65	0,73	136,00	29,90	73,00
33	1	18,89	38,83	31,59	0,60	0,67	135,00	29,90	72,00
	2	19,09	38,54	31,44	0,61	0,68	132,00	30,00	73,00
	3	20,13	38,89	32,01	0,63	0,71	132,00	29,90	73,00
	4	19,91	38,77	31,80	0,63	0,71	131,00	29,80	72,00

Všechny ostatní přílohy jsou v elektronické podobě na přiloženém DVD.