VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

VLIVY OVLIVŇUJÍCÍ DEGRADACI INSTALOVANÉHO VÝKONU FOTOVOLTAICKÉ ELEKTRÁRNY

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE Bc. JAKUB MAČÁT
AUTHOR

BRNO 2015

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

VLIVY OVLIVŇUJÍCÍ DEGRADACI INSTALOVANÉHO VÝKONU FOTOVOLTAICKÉ ELEKTRÁRNY

FACTORS AFFECTING THE DEGRADATION OF PHOTOVOLTAIC POWER PLANT

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE Bc. JAKUB MAČÁT
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE doc. Ing. JIŘÍ VANĚK, Ph.D.
SUPERVISOR

BRNO 2015

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav telekomunikací

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Telekomunikační a informační technika

Student:	Bc. Jakub Mačát	***ID:***	119517
Ročník:	2	***Akademický rok:***	2014/2015

NÁZEV TÉMATU:

Vlivy ovlivňující degradaci instalovaného výkonu fotovoltaické elektrárny

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

V diplomové práci navažte na semestrální projekt a proveďte analýzu činnosti fotovoltaické elektrárny v monitorovaném období vzhledem k průměrné intenzitě slunečního záření a analyzujte stav fotovoltaických panelů a dalších součástí elektrárny za účelem stanovení míry degradace fotovoltaického systému. Výsedky zpracujte do grafů a vyhodnoťte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Dle doporučení vedoucího diplomové práce

Termín zadání:	9.2.2015	***Termín odevzdání:***	26.5.2015

Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Vaněk, Ph.D.
Konzultanti diplomové práce:

doc. Ing. Jiří Mišurec, CSc.
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Diplomová práce se v teoretické části zabývá rozborem fotovoltaických článků, panelů, jejich vlastnostmi a defekty. Dále jsou zde popsány materiály, ze kterých se články a panely dnes vyrábí ale také materiály, které by mohly ovlivnit blízkou budoucnost. Jsou zde také uvedeny metody měření fotovoltaických článků. Praktická část se zabývá analýzou vybraných fotovoltaických panelů, určením míry degradace měřením a výpočtem pomocí intenzity slunečního záření. Dosažené výsledky jsou zaneseny v grafech a tabulkách.

KLÍČOVÁ SLOVA

fotovoltaický článek,fotovoltaický panel, parametry fotovoltaických panelů, LBIC, V-A, flash test, ELCD test,sluneční simulátor, termovizní měření

ABSTRACT

My diploma thesis focuses in its theoretical part on the analysis of photovoltaic cells, panels, their properties and defects . Further there are described materials from which the cells and panels are produced today but also there are mentioned materials which could affect the near future. There are also state the methods of measurement of photovoltaic cells . The practical part analyzes selected photovoltaic panels, determines the level of degradation by measurement and calculation with using the intensity of solar radiation. All results are entred into graphs and tables.

KEYWORDS

Solar cell, photovoltaic panel, characteristics photovoltaic panels, LBIC, V-A, flash test, ELCD test, sun sim, thermo scen

MAČÁT, Jakub *Vlivy ovlivňující degradaci instalovaného výkonu fotovoltaické elektrárny*: diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2015. 94 s. Vedoucí práce byl doc. Ing. Jiří Vaněk, Ph.d.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Vlivy ovlivňující degradaci instalovaného výkonu fotovoltaické elektrárny“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno ....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych velice poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Jiřímu Vaňkovi Phd. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci. Dále svým rodičům a přítelkyni za podporu při studiích.

Brno ....

(podpis autora)

Faculty of Electrical Engineering
and Communication

Brno University of Technology
Technicka 12, CZ-61600 Brno, Czechia

http://www.six.feec.vutbr.cz

Výzkum popsaný v této diplomové práci byl realizovaný v laboratořích podpořených projektem Centrum senzorických, informačních a komunikačních systémů (SIX); registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace.

OBSAH

Úvod **14**

1 Přeměna sluneční energie na elektrickou **16**

2 Fotovoltaika **18**
2.1 Historie fotovoltaiky 18
2.2 Princip fotovoltaických článků z fyzikálního hlediska 19
2.3 Generace fotovoltaických článků 21
2.3.1 První generace 21
2.3.2 Druhá generace 21
2.3.3 Třetí generace 22

3 Používané materiály k výrobě fotovoltaických článků **24**
3.1 Monokrystalické křemíkové články 24
3.1.1 Czochralského metoda 24
3.1.2 Zónová metoda 24
3.2 Polykrystalické křemíkové články 25
3.3 Články z amorfního křemíku 25
3.4 Arsenid Galia (GaAs) 26
3.5 Telurid kademnatý (CdTe) 26
3.6 Sulfid kademnatý (CdS) 26
3.7 Nové materiály 26
3.7.1 Nanokompozity - CIGS solární články 27
3.7.2 Barvivové solární články 27
3.7.3 Solární články s nanokrystaly 28
3.7.4 Polymerové solární články 29

4 Fotovoltaické panely **30**
4.1 Struktura fotovoltaických panelů 30
4.1.1 Rám 31
4.1.2 Těsnění 31
4.1.3 Vrchní materiál solárních panelů 32
4.1.4 Zapouzdřovací fólie 32
4.1.5 Krycí fólie 33
4.2 Důležité parametry fotovoltaických panelů 34
4.2.1 Proud nakrátko 34
4.2.2 Napětí naprázdno 34
4.2.3 Maximální výkon 35

4.2.4 Fill Faktor (FF) 35
4.2.5 Účinnost fotovoltaického článku (EFF) 36
4.2.6 Sériový odpor fotovoltaického článku 36
4.2.7 Paralelní odpor fotovoltaického článku 36
4.2.8 Reflexivita (R) 36

5 Defekty a detekce defektů fotovoltaických článků a panelů 37
5.1 Defekty fotovoltaických článků 37
5.1.1 Procesní defekty 37
5.1.2 Materiálové defekty 38
5.2 Defekty fotovoltaických panelů 39
5.2.1 Potenciálem indukovaná degradace(PID) 40
5.2.2 Degradace dopadajícím zářením (LID) 41
5.2.3 Delaminace FV panelu 41
5.2.4 Proražení/vyhoření diody 41
5.2.5 „Horká místa (Hot Spots)“ 42
5.2.6 „Šnečí cestičky (Snail trails)“ 43
5.3 Detekce defektů fotovoltaických panelů 44
5.3.1 Solární simulátor 44
5.3.2 Light Beam Induced Current (LBIC) 45
5.3.3 Elektroluminiscence (ELCD test) 45
5.3.4 Fotoluminiscence 46
5.3.5 Luminiscenční mikroplazmy 46
5.3.6 Měření termovizní kamerou 46
5.3.7 Vizuální kontrola 46

6 Praktická část 47
6.1 Historie fotovoltaické elektrárny Dukovany 47
6.2 Parametry fotovoltaické elektrárny 48
6.2.1 Konstrukce 48
6.2.2 Střídače 48
6.2.3 Kabeláž 49
6.2.4 Fotovoltaické panely Trimex Tesla 50
6.3 Měření fotovoltaických panelů 50
6.3.1 Termovizní analýza 51
6.3.2 Měření elektroluminiscence 51
6.3.3 Sluneční simulátor 52
6.3.4 Vizuální kontrola 55
6.4 Určení celkové vyrobené energie 55

6.4.1 Data z Českého hydrometeorologického ústavu 55
6.4.2 Data z fotovoltaické elektrárny Dukovany 58
6.4.3 Model výpočtu roční výroby energie fotovoltaických panelů . . 59

7 Výsledky analýzy panelů 60
7.1 Termovizní měření 60
7.2 Elektroluminiscence 60
7.3 Sluneční simulátor 61
7.3.1 V–A chrakteristiky 61
7.3.2 Aktuální výkonost článků 62
7.4 Vizuální kontrola 63
7.5 Graf modelu degradace fv elektrárny 64
7.6 Výpočet výroby energie 65
7.7 Poruchy snižující výkon fotovoltaické elektrárny Kosořín 67
7.7.1 Nedotažené čí vyhřáté spoje 67
7.7.2 Špatná volba vodičů 67
7.7.3 Překousané vodiče 67

8 Závěr 69

Literatura 71

Seznam symbolů, veličin a zkratek 74

Seznam příloh 76

A Termografický sken panelů 77

B Test Elektroluminiscence 81

C Měření PASAN 84

D Obsah přiloženého CD 94

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1 Zaplavení galaxie slunečním větrem[3] 16
2.1 Valenční,zakázaný a vodivostní pás polovodiče 19
2.2 Princip činnosti fotovoltaického článku 20
2.3 Pásové schéma p-n přechodu krystalického křemíku za osvětlení . . . 20
2.4 Závislost účinnosti jednotlivých generací na ceně 21
2.5 Technologie trojitého přechodu 22
3.1 Ingoty křemenného krystalu 25
3.2 Rozdíl mezi monokrystalickým článkem (vlevo) a polykrystalickým článkem(vpravo) 25
3.3 Panel z amorfního křemíku 26
3.4 Struktura CIGS 27
3.5 SONY demonstruje barevné možnosti barvivových článků v roli lampového stínidla, produkujícího elektrický proud, který vystačí k pohonu mini ventilátoru.[17] 28
3.6 Kvantové tečky mezi dvěma elektrodami 29
4.1 Schéma sériového zapojení solárních článků - náhradní schéma 30
4.2 Struktura solárního panelu 31
4.3 Obecná V–A charakteristika fv panelu 34
4.4 Modelové spektrum slunečního záření 34
4.5 Grafické zobrazení činitele plnění FF 36
5.1 Poškrábání povrch - metoda elektroluminiscence[23] 37
5.2 Nehomogenita difúzní vrstvy - metoda elektroluminiscence [23] 38
5.3 Skrytý lom fv článku [26] 38
5.4 Prachové částice ve fv článku [26] 38
5.5 Vírový defekt (Swirl Defect) - metoda elektroluminiscence [23] 39
5.6 Pnutí materiálu - metoda LBIC - IR barva [23] 39
5.7 Prasklina na solárním článku 40
5.8 V–A charakteristika fotovoltaického článu, působení PID v čase [26] . 40
5.9 Delaminace fotovoltaického panelu [25] 41
5.10 Změna V-A charakteristika bypassové diody chránící různý počet článků při zastínění jednoho článku z 75 % 42
5.11 Záznam horkých míst na panelu 43
5.12 Šnečí cestičky na fotovoltaickém panelu 44
5.13 Metoda Light Beam Induced Current 45
6.1 Fotovoltaická elektrárna Dukovany [28] 47
6.2 Vodiče typu SOLAR PLUS 49
6.3 Schéma zapojení Slunečního simulátoru 53

6.4 Foto osvitové komory s uchyceným panelem 53
6.5 Nastavování parametrů fotovoltaického panelu v programu 54
6.6 Program SPROT TESTER s výsledným měřením 54
6.7 Průměrná měsíční teplota vzduchu v jednotlivých letech 56
6.8 Počet hodin slunečního svitu v jednotlivých měsících a rocích 57
6.9 Úhrn půlroční globální intenzity 58
6.10 Výroba energie v jednotlivých letech a roční doby provozu 59
7.1 Termovizní měření panelu A5-07 60
7.2 Panel označený A5-07, který dosahl nejmenší účinnosti 61
7.3 Panel označený A5-13 s nejméně poškozenými články 61
7.4 V–A charakteristika panelu A5-07 a A5-13 62
7.5 Vypočtená hodnota Fill Faktoru zanesena v grafu 63
7.6 Porovnání zežloutnutí krycí fólie panelů 64
7.7 Graf zobrazující snižování roční výroby při stálosti teploty, intenzity a slunečním svitu 64
7.8 Porovnání snižování výroby v závislosti na poklesu účinnosti článků . 66
7.9 Snímek nedotaženého spoje v trafostanici 67
7.10 Termo snímek ukazující špatnou volbu vodičů 68
7.11 Překousaný vodič od hlodavců 68
A.1 Termovizní sken panelu s označením A5-06 77
A.2 Termovizní sken panelu s označením A5-07 77
A.3 Termovizní sken panelu s označením A5-17 78
A.4 Termovizní sken panelu s označením B3-12 78
A.5 Termovizní sken panelu s označením B4-18 79
A.6 Termovizní sken panelu s označením B4-20 79
A.7 Termovizní sken panelu s označením B5-19 80
B.1 Elektroluminiscenční snímek panelu s označením A1-05 81
B.2 Elektroluminiscenční snímek panelu s označením A3-15 81
B.3 Elektroluminiscenční snímek panelu s označením A5-06 81
B.4 Elektroluminiscenční snímek panelu s označením A5-07 82
B.5 Elektroluminiscenční snímek panelu s označením A5-13 82
B.6 Elektroluminiscenční snímek panelu s označením B3-12 82
B.7 Elektroluminiscenční snímek panelu s označením B4-14 82
B.8 Elektroluminiscenční snímek panelu s označením B4-18 83
B.9 Elektroluminiscenční snímek panelu s označením B4-20 83
B.10 Elektroluminiscenční snímek panelu s označením B5-20 83

SEZNAM TABULEK

1.1 Důležité parametry slunce 17
3.1 Účinnost jednotlivých typů FV článků[14] 24
6.1 Technické parametry fotovoltaické elektrárny 48
6.2 Technické parametry použitých střídačů 49
6.3 Technické parametry fv panelů při E=1000 W/m^2, AM = $1,5$, tc=25 °C 50
6.4 Technické parametry termokary FLIR i7 51
6.5 Technické parametry CCD kamery G2-3200 52
6.6 Pruměrné teplota vzduchu v jednotlivých měsících daného roku a průměrná roční teplota vzduchu [27] 56
6.7 Počet hodin slunečního svitu v jednotlivých měsících a roční úhrn [27] 57
6.8 Intenzita slunečního záření za pololetí v jednotlivých rocích [27] . . . 57
6.9 Přehled vyrobené energie a provozu fotovoltaické elektrárny 58
7.1 Změřené a vypočtené hodnoty programem SPROT TESTER 63
7.2 Porovnání roční vypočtené a změřené výroby energie 65
7.3 Vypočtená účinnost článků v závislosti na vyrobené energii 66

ÚVOD

Obnovitelné zdroje energie v dnešní době představují obrovský rozvoj nejen ve fotovoltaice, ale i dalších odvětvích. Je to hlavně způsobeno omezenými zdroji fosilních paliv, ropou, atd. Dále k tomu určitě přispívá strach z radioaktivity, se kterou jsou nedělitelně spjaty jaderné elektrárny a zatím nevyřešený problém se vzniklým jaderným odpadem.

Cílem této práce je monitorovat fotovoltaickou elektrárnu a začít zjišťovat možné vlivy ovlivňující výkon fotovoltaického systému. Důvodem proč je sledovaní fotovoltaických systémů důležité je celá řada. Jedním z nich je možnost zkvalitnit použité materiály, tím docílit vyšší využití sluneční energie. Nebo předcházet nechtěným jevům, vnikajícím nedostatečnou kontrolou a údržbou, které snižují výkon fotovoltaického systému.

Diplomová práce je rozdělena do několika kategorií. Nejdříve je vysvětlena přeměna sluneční energie na elektrickou, vypočten výkon, který dopadne každý den na zem a uvedeny základní informace o slunci, jež nám poskytuje neomezené množství energie, které nejsme zatím schopni naplno zpracovávat.

První kapitola krátce pojednává o historii fotovoltaiky a náhodném vzniku fotovoltaického článku při výrobě tranzistoru. Je zde rozebrán princip fotovoltaických článků z fyzikálního hlediska a rozdělení článků do jednotlivých generací.

Druhá kapitola se zabývá materiály pro výrobu článků, je zde uvedena tabulka účinnosti a nakonec jsou v kapitole zmíněny nové materiály, které snad v blízké budoucnosti budou dostupné každému.

Kapitola o fotovoltaických panelech zachycuje strukturu panelů a jejich důležité parametry, které můžeme měřit a měly by nás zajímat při výběru fotovoltaických panelů.

Poslední teoretická část je věnována defektům, ke kterým nejčastěji dochází u článků a panelů. V sekci jsou vysvětleny postupy a metody zjišťování těchto defektů.

Praktická část se zabývá měřením fotovoltaických článků pomocí několika metod. U každého měření je uveden přístroj a jeho technické parametry. Dále popis i jak měření probíhalo.

V další části je vyobrazená analyzovaná fotovoltaická elektrárna, její vlastnosti a parametry. Dále jsou zde uvedeny její nejdůležitější části jako jsou střídače, panely a vodiče.

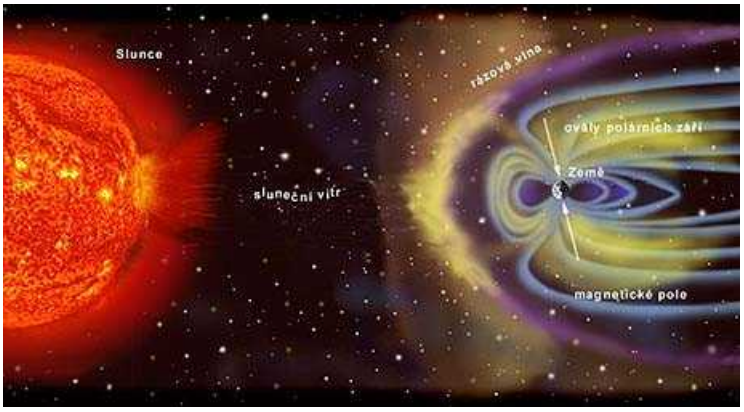
Dále je v praktické části popsán výpočet pro teoretickou roční výrobu energie, která se zakládá na znalosti o fotovoltaickém poli, intenzitě slunečního záření a ztrátách v celém systému.

Ve výsledcích jsou u každé metody popsány dosažené hodnoty a rozdíly mezi nejlepším a nejhorším měřeným článkem. Dále jsou zde uvedeny teoretické výpočty roční

výroby a porovnány s naměřenými hodnotami z fotovoltaické stanice. Nakonec jsou ještě vyobrazeny poruchy zjištěné na jiné fotovoltaické elektrárně, které nesouvisí s analýzou panelů ale mají fatální dopad na výrobu energie.

1 PŘEMĚNA SLUNEČNÍ ENERGIE NA ELEKTRICKOU

Slunce leží přibližně 30 000 světelných roků od středu galaxie a nijak významně se neliší svojí velikostí ani polohou od ostatních hvězd v galaxii. Slunce vzniklo asi před 4,6 miliardami let a k vyzařování energie dochází díky termonukleárním reakcím v jádře. Každou sekundu se přemění přibližně 700 miliónů tun vodíku na 695 miliónů tun helia a zbylých 5 miliónů tun hmotnosti se přemění na energii (96 % elektromagnetické záření, 4 % odnášejí elektronová neutria)[1]. Slunce ovlivňuje tělesa v Sluneční soustavě nejen gravitačně, ale i zářením v širokém spektru vlnových délek, magnetickým polem a slunečním větrem.[1]



Obr. 1.1: Zaplavení galaxie slunečním větrem[3]

Výkon vyzařovaný sluncem je poměrně stabilní. Mění se jen nepatrně v závislosti na slunečním cyklu. Ze záznamu vyplývá, že se vyzářený výkon mění pravidelně v jedenácti cyklech. Jeden cyklus trvá přibližně jeden rok. V jeho minimálním cyklu, kdy se na Slunci nevyskytují skoro žádné skvrny, je vyzařovaný výkon nepatrně nižší než v cyklu maxima, kdy se na slunečním prstenci permanentně objevuje několik skvrn.

Výkon, který dopadne na povrch Země za jeden den se vypočte podle vzorce (1.1):

$$\Delta P_s = \frac{\pi * r_z^2}{4 * \pi * R_{zs}^2} * P_s \approx 1,79 * 10^{17}\ W, \tag{1.1}$$

[1]Sluneční vítr je proud nabitých částic, které zaplavují celou sluneční soustavu. Jde zejména o elektrony a protony. Sluneční vítr dělíme na rychlý sluneční vítr(rychlost 800 km/h)vetšinou detekovaný v polárních oblastech a pomalý sluneční vítr(rychlost 400 km/h)detekovaný v rovníkové oblasti. Sluneční vítr, při výrazném slunečním vzplanutí, může narušit magnetické pole Země.

potom střední hodnota energie slunečního záření dopadajícího na Zem za jeden den je (1.2):

$$W_z = \Delta\, P_s * t \approx 1,79 * 10^{17}\ J/s * 86400\ s = 1,55 * 10^{22}\ J, \tag{1.2}$$

střední hodnota záření dopadající na jednotku plochy Země je (1.3):

$$I = \frac{\Delta P_s}{\pi * r_z^2} \approx 1367\ W/m^2. \tag{1.3}$$

Výsledná hodnota „I“ ve vzorci(1.3) se nazývá solární konstanta[2]. Její hodnota se může měnit řádově $\pm 0,1$ % v závislosti na slunečním cyklu, meteorologických podmínkách a zeměpisné šířce.

veličina	**hodnota**
vdálenost Země od Slunce	$R_{zs} = 1,49 * 10^{11}\ m$
hmotnost	$m_s = 1,98 * 10^{30}$ kg
teplota povrchu	$T_s = 5500$ °C
výkon Slunce	$P_s = 3,91 * 10^{26}\ W$
tíhové zrychlení na povrchu	$g_s \approx 274\ m * s^{-2}$
poloměr Slunce	$r_s \approx 6,96 * 10^8\ m$

Tab. 1.1: Důležité parametry slunce

[2] Solární konstanta je výchozí údaj pro využití sluneční energie. Udává výkon slunečního záření procházející na hranici zemské atmosféry jednotkou plochy nastavené kolmo ke slunečním paprskům[2].

2 FOTOVOLTAIKA

2.1 Historie fotovoltaiky

První zmínka o přeměně sluneční energie na elektrickou sahá až do první poloviny 19. století. V roce 1839 francouzský fyzik Alexander Edmond Becquerel objevil fotovoltaický jev. V roce 1876 byl objeven Williamem Grylls Adamsem a jeho studentem Richardem Evansem podobný jev pro krystaly selenu. O dalších 7 let později, tedy roku 1883, americký vynálezce Charles Fritts sestrojil první fotovoltaický článek. Článek byl vyroben ze selenového polovodiče, který byl potažen tenkou vrstvou zlata. Takto vyrobený článek dosahoval účinnosti pouze 1 %. Výroba fotovoltaických článků byla velmi drahá a s účinností 1 % neměla šanci na uplatnění výroby elektřiny. Nicméně tyto články se začali využívat ve fotoaparátech jako světelný senzor pro určování času expozice.
Solární články podobající se současným objevil a jako první si nechal patentovat, Russell Ohl, který ve 30. letech 20. století pracoval na výzkumu pro telekomunikační firmu AT&T Bell Labs. Právě roku 1939 při zkoumání materiálů na výrobu tranzistorů, kde mimo jiné objevil i P-N přechod, vznikl jako vedlejší produkt solární článek nazývaný „světlocitlivé záření“ s účinností 5-6 %. Na základech tohoto objevu jsou založeny například dnešní foto diody.
V 50. letech 20. století byly křemíkové solární články vylepšovány v Bell Laboratories, kde se náhodou přišlo na skutečnost, že křemíkový polovodič s některými příměsemi výrazněji reaguje na světlo. Z důvodu malé účinnosti a velkých nákladů na výrobu byly solární články použity pouze v kosmonautice, kde tvořili alternativní zdroj energie.První družice se solárním článkem nesla název „Vanguard 1“ a vzlétla na oběžnou dráhu v březnu 1958. Solární články pro výrobu elektřiny v pozemských podmínkách se začali využívat až v 80. letech 20. století. Problémem těchto prvních solárních článků byla nízká účinnost a vysoké pořizovací náklady. Teoretické hodnoty dosahovaly 31 %, ale jeho skutečné hodnoty byly okolo 20 %. Tyto křemíkové desky jsou označovány jako první generace. Menší spotřeba drahého vstupního materiálu a účinnost umožnily později vznik druhé a třetí generaci solárních panelů.

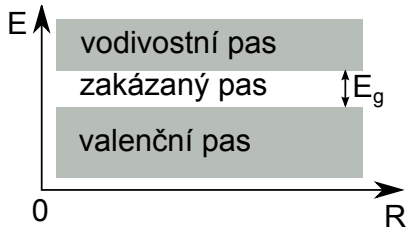
2.2 Princip fotovoltaických článků z fyzikálního hlediska

Princip fotovoltaických článků je založen na fotoelektrickém jevu, kde jsou elektrony uvolňovány z látky v důsledku absorpce elektromagnetického záření látkou. Absorpce je způsobena interakcí světla (fotony) s částicemi hmoty (elektrony a jádry) a mohou nastat tyto případy:

1. Interakce částice s mřížkou – vede pouze ke zvýšení teploty
2. Interakce s volnými elektrony – vede pouze ke zvýšení teploty
3. Interakce s vázanými elektrony – může dojít k uvolnění elektronu a vzniku volného náboje [10].

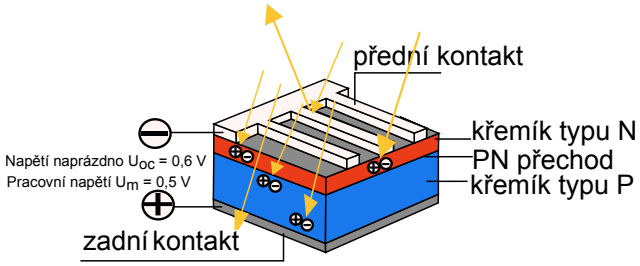
Pro správnou funkci fotovoltaických článků je zásadní třetí případ, kdy foton ze slunečního záření uvolní v látce elektron a vznikne pár elektron – díra. Pro tento účel se proto využívají polovodiče, protože u nich, jako u kovů, nedochází k rekombinaci, které je potřeba zabránit a uvolněný náboj odvést z článku. V polovodičích jsou elektrony a díry odděleny vnitřním elektrickým polem P–N přechodu.Tím vzniká rozdíl potenciálů mezi vrstvou P a N, a tedy i elektrické napětí, které lze pomocí vhodných elektrod připojit k vnějšímu obvodu. [10]

Velkou roli u polovodičového materiálu hraje šířka zakázaného pásu. Pro generaci nábojového páru fotonem je nutné tento pás překonat. Optimální hodnota šířky zakázaného pásu je od $1,1$ eV(absorpční hrana krystalického křemíku), při které maximální energie světelného toku způsobuje generování páru elektron – díra a zhruba polovina sluneční energie se přemění na teplo. Tento jev se nazývá fotogenerace. Následně je potřeba separovat generované páry elektronů a děr.[11] To je zajišťováno vnitřním elektrickým polem P–N přechodu. Elektrony jsou přitahovány k jedné a díry k druhé elektrodě. U křemíku, který má šířku zakázaného pásu přibližné 1,1 eV to znamená, že vlnová délka záření musí být kratší než 1000 nm, jde tedy o oblast infračerveného záření a celou oblast viditelného slunečního záření [13]. Na obrázku (Obr. 2.1) jsou zobrazeny jednotlivé pásy polovodiče.



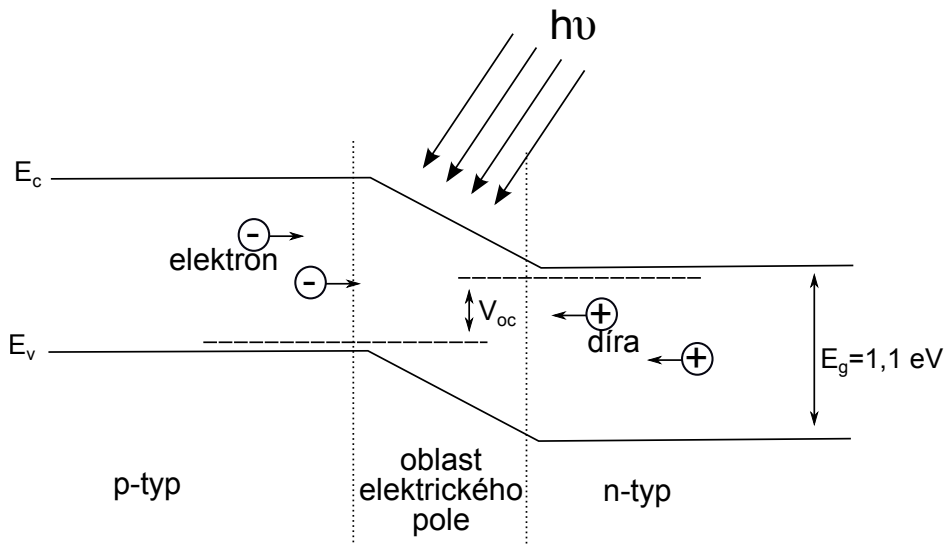
Obr. 2.1: Valenční,zakázaný a vodivostní pás polovodiče

Právě rozdělení náboje mezi předním (-) a zadním (+) kontaktem má za následek vytvoření napětí(v případě křemíku jde o napětí $0,5$–$0,6$ V) solárního článku (Obr. 2.2). Vnějším obvodem zapojeným mezi oba kontakty potom protéká stejnosměrný elektrický proud, který je přímo úměrný ploše solárního článku a intenzitě dopadajícího slunečního záření.[11] Pro dosažení vyššího napětí se následně články spojují v jeden fotovoltaický panel.



Obr. 2.2: Princip činnosti fotovoltaického článku

Na obrázku (Obr. 2.3) je pak vidět, pásové schéma při osvětlení krystalického křemíku, kde při osvětlení dojde k oddělení elektron–díra a tím vznikne napětí na přívodních kontaktech.

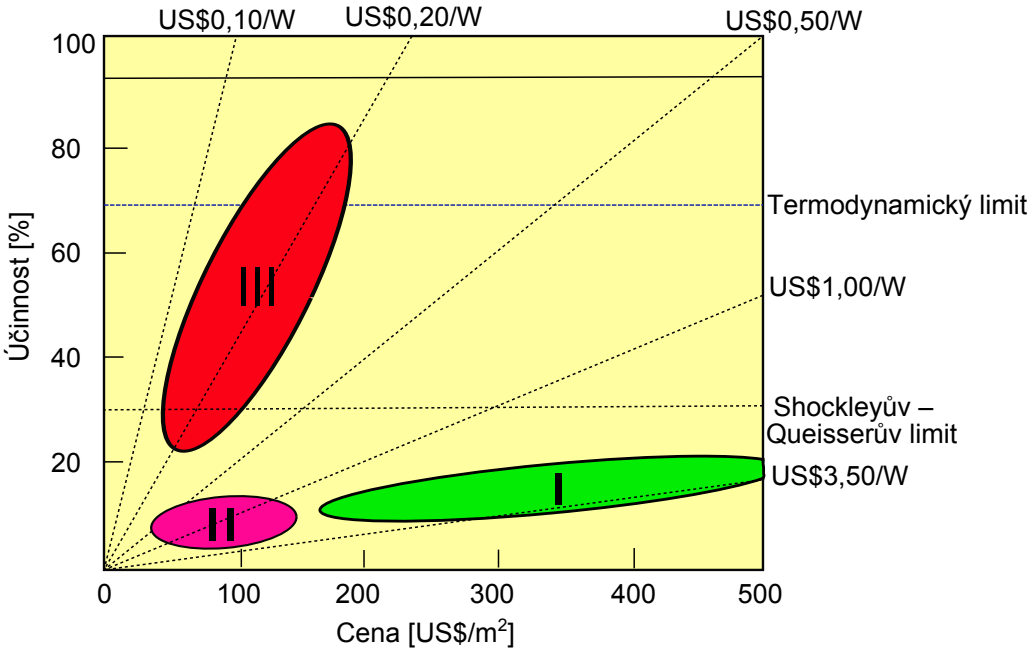


Obr. 2.3: Pásové schéma p-n přechodu krystalického křemíku za osvětlení

Ec–vodivostní pás, Ev–valenční pás, Eg–zakázaný pás(Eg=Ec-Ev), hυ–energie fotonů.

2.3 Generace fotovoltaických článků

Jak už bylo naznačeno v předešlé kapitole fotovoltaické články můžeme rozdělit do tří generací. Generace vznikaly postupně podle použitých materiálů, snížení spotřeby čistého křemíku, snahou zvýšit účinnost panelů a snížit výrobní cenu, která byla cca 76 Kč/Wp.



Obr. 2.4: Závislost účinnosti jednotlivých generací na ceně

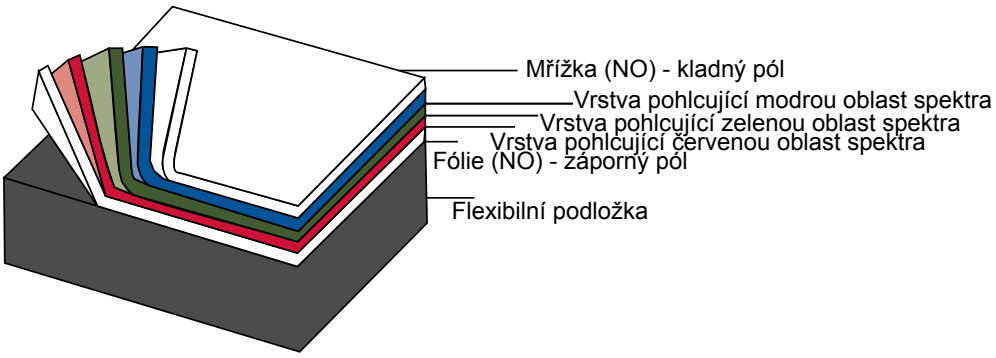
2.3.1 První generace

První generace fotovoltaických článků je vyráběna z destiček monokrystalického křemíku, kde je vytvořen velkoplošný P–N přechod. Tato generace článků se vyznačuje účinností dosahujících 20 % některé speciální struktory až 24 %. Články se na trhu objevily v 70. letech 19. století a dodnes je technologie využívaná pro velké instalace. Nevýhodu první generace článků je velká spotřeba čistého křemíku, s nímž je spjata výroba těchto článků.

2.3.2 Druhá generace

V druhé generaci bylo snahou snížit spotřebu čistého křemíku, zavést nové technologie, a tím zlevnit celý výrobní proces fotovoltaických článků. Hlavním principem je použití tenkovrstvých článků na bázi amorfního křemíku (a–Si), amorfních slitin

Si–Ge (a–Si–Ge), mikrokrystalického Si (μc–Si) nebo polykrystalického tenkovrstvého křemíku Si (poly-Si). Například fotovoltaické články na bázi a-Si jsou pružné, ohebné a podstatně tenčí a lehčí než krystalické články. Díky váze tyto články nepotřebují žádnou nosnou nebo podpěrnou konstrukci jak tomu bývá u krystalických systémů. Pro zlepšení a-Si článků se využívá technologie Triple Junction (Obr. 2.5) (trojitý přechod), která umožňuje oproti krystalickým článkům vyšší využití v širším spektru vlnových délek slunečního záření[4]. Právě využití celého spektra vlnových délek slunečního záření, přesněji využití červené, žlutozelené i modré složky dopadajícího světla, je výhodou při difuzním světle zastíněné či zatažené obloze. Mohou tak pracovat i na plochách odvrácených od slunce, kde není tolik slunečního svitu. Nevýhodou článků druhé generace je nižší účinnost v závislosti na příměsích křemíku.



Obr. 2.5: Technologie trojitého přechodu

2.3.3 Třetí generace

Třetí generace fotovoltaických článků v podstatě neexistuje, jde spíše o plán dalšího výzkumu,který směřuje k překročení Shockley–Queisserovy hranice[1] omezující účinnost FV přeměny.

Existuje řada směrů, kterým je ve výzkumu věnována pozornost:

- tandemovým tenkovrstvým článkům
- článkům s vícenásobnými pásy
- článkům, které by využívaly „horké“ nosiče náboje pro generaci více párů elektron a děr

[1]Shockleyův–Queisserův limit určuje teoretickou maximální účinnost přeměny slunečního záření na elektřinu pro fotovoltaické články s jedním P–N přechodem. Jedná se o jeden z nejdůležitějších limitujících faktorů při návrhu fotovoltaických článků[6]

- termofotovoltaické přeměně, kde absorbér je současně i radiátorem vyzařující selektivně na jedné energii
- článkům, které využívají kvantových jevů v kvantových tečkách nebo kvantových jamách
- prostorově strukturovaným článkům vznikající samoorganizací při růstu aktivní vrstvy
- organickým článkům [5]

Asi jediným příkladem dobře fungujících článků třetí generace (přímo vycházejících z druhé generace) jsou vícevrstvé struktury článků (tandemové články), kde každá substruktura pohltí určitou část světelného spektra a tak maximalizuje energetickou využitelnost fotonů. Příkladem může být tandemový článek skládající se z přechodu amorfního hydrogenovaného křemíku (a–Si:H) a přechodu mikrokrystalického hydrogenovaného křemíku (μc - Si:H) . Výsledkem této struktury je článek absorbující modrou, zelenou, žlutou složku spektra (a–Si:H), ale i oblast červenou a infračervenou (μc–Si:H). Základní podmínkou pro dobrou funkci vícevrstvých článků je, aby každý z článků generoval stejný proud. V opačném případě pak ten horší (příp. nejhorší) z článků limituje a celkově snižuje dosažitelnou účinnost[7].

3 POUŽÍVANÉ MATERIÁLY K VÝROBĚ FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKŮ

Materiály, které se v současnosti využívají ke konstrukci fotovoltaických článků jsou závislé na několika kritériích. Hlavním kritériem je šířka zakázaného pásu, která by měla dosahovat hodnot v rozmezí mezi 1,1 eV do 1,7 eV. Dalším kritériem je výrobní cena solárního článku, ale jistě také vhodnost použití pro určité geografické oblasti.
Dnes ovládají trh (asi z 90 %) křemíkové články. Tento fakt je ovlivněn hlavně účinnosti fotovoltaických článků a možnost vyrábět křemík s vysokou čistotou jež je pro fotovoltaické články nezbytná.

Přehled výrobních technologií podle účinnost je zanesen v tabulce (Tab. 3.1).

Technologie výroby článků	Běžná účinnost	Maximální laboratorní účinnost
Monokrystalické	14 – 17 %	25 %
Polykrystalické	13 – 16 %	20 %
Amorfní	5 – 7 %	12 %

Tab. 3.1: Účinnost jednotlivých typů FV článků[14]

3.1 Monokrystalické křemíkové články

Monokrystalické články patří mezi nejstarší typ vyráběných článků. Vyrábějí se z jednolitých ingotů(tyčí) křemenného krystalu a výrobu můžeme rozdělit na Czochralského a zónovou metodu.

3.1.1 Czochralského metoda

- Tažení monokrystalu metodou Czochralského (CZ) - nejčastěji využívaná metoda.
- Bridgemanova metoda - využívají se grafitové „lodičky“, které se vytahují z odporové pece.

3.1.2 Zónová metoda

- Zonální tavby (float zone) - Povrchové napětí umožňuje existenci roztavené zóny na konci dvou svislých křemíkových tyčí.

Obr. 3.1: Ingoty křemenného krystalu

3.2 Polykrystalické křemíkové články

Polykrystalické články se od monokrystalických liší výrobou ingotů, kde je jednodušší nechat menší krystaly křemíku vykrystalizovat a následně je slisovat v jeden celek. Poté se polykrystalické články vyrábějí stejně jako monokrystalické. Touto výrobou ingotů nelze docílit takové čistoty křemíku jako v případě monokrystalických článků. Na článku jsou pak patrné přechody mezi krystaly (Obr. 3.2).

Obr. 3.2: Rozdíl mezi monokrystalickým článkem (vlevo) a polykrystalickým článkem(vpravo)

3.3 Články z amorfního křemíku

Články z amorfního křemíku se liší již v samotné výrobě od monokrystalických či polykrystalických článků. Místo výroby ingotů a následného upravovaní se články z amorfního křemíku vyrábějí tak, že je ve vakuové komoře při teplotách kolem 200 °C napařováním nanášena vrstva amorfního křemíku na skleněnou, plastovou nebo kovovou tabuli. Amorfní články nesou označení „tenkovrstvá technologie“, je to proto, že na rozdíl od monokrystalických nebo polykrystalických článků, které mimo jiné dosahují tloušťky vrstvy cca $0,3$ mm, nepřesahují články z amorfního křemíku tloušťku vrstvy $0,001$ mm. Díky své tloušťce lze tyto články vyrábět ohebné a jedno z možných použití bývá v kalkulačkách.

Obr. 3.3: Panel z amorfního křemíku

3.4 Arsenid Galia (GaAs)

Dalším materiálem využívající se k tvorbě fotovoltaických článků je Arsenid Galia.Jeho výhodou je vyšší účinnost, schopnost odolávat kosmickému záření a schopnost pracovat bez snížení efektivity i při teplotě nad 100 °C. Nevýhodou je vysoká pořizovací cena, větší hustota GaAs oproti křemíku a křehkost materiálu.

3.5 Telurid kademnatý (CdTe)

Díky své šířce zakázaného pásu $1,5$ eV (při 25 °C) a činiteli absorpce se považoval Telurid kademnatý za velmi nadějný materiál. Jeho masivní rozšíření v energetickém průmyslu je ale nereálné kvůli nedostatečným zásobám surové hmoty. Uplatnění nalezl u zařízení s nízkým napětím pro svoji relativně nízkou cenu.

3.6 Sulfid kademnatý (CdS)

Díky své malé hmotnosti byl tento materiál dříve využívaný pro kosmické aplikace. Dnes se již nevyužívá z důvodu nestability článků. Pokročilejší variantou tohoto typu článků je kombinace s CdTe, kde N vrstvu tvoří právě CdS a vrstvu P tvoří CdTe.

3.7 Nové materiály

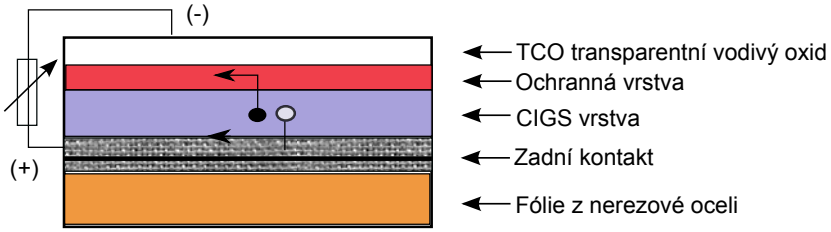
Budoucnost v plně ekologické výrobě elektřiny nabízí i jiné technologie, která je na výrobu méně náročná, navíc z levnějších materiálů a poskytuje velmi dobrou účin-

nost přeměny světla na elektřinu. Mezi současné nejperspektivnější technologie můžeme zařadit:

- nanokompozity - CIGS solární články,
- barvivové solární články,
- solární články s nanokrystaly (kvantovými tečkami),
- polymerové (plastové) solární články,
- nanosolární články ve formě antén.[14]

3.7.1 Nanokompozity - CIGS solární články

CIGS je pevný kompozitní polovodičový materiál (typ p) složený z mědi (Copper), india (Indium), gallia (Gallium) a selenu (Selenium) s šířkou zakázaného pásu od 1,0 do 1,7 eV. Odtud i název CIGS.[15] Jednotlivé vrstvy jsou nanášeny patentovanou napařovací technologií. Mezi hlavní výhody panelu patří jeho schopnost reagovat na červenou složku světla, která převládá při zatažené obloze nebo mlze. To představuje velkou výhodu v oblastech s počasím typickým pro střední Evropu. CIGS technologie je účinnější při malém osvitu, a proto množství vyrobené el. energie je větší než u křemíkových modulů.[17] Výhodou CIGS technologie je, že použitý materiál vysoce pohlcuje sluneční záření, a tak dokáže vyrobit více elektřiny než jiné tenkovrstvé systémy. Další nesporně velkou výhodou je stabilita CIGS systému, což znamená, že oproti jiným systémům nedegraduje, a tak neztrácí výkon s dobou užívání. Experimentální účinnost CIGS systému je 19%.



Obr. 3.4: Struktura CIGS

3.7.2 Barvivové solární články

Barvivové solární články se liší od křemíkových už na první pohled. Jsou průhledné, takže mohou přijímat světlo ze všech úhlů a navíc mohou být i ohebné. Sluneční energie procházející článkem nepůsobí jen na povrchu, jak je tomu u křemíkových článků, ale aktivuje náboje každé nanočástice ve všech vrstvách. Princip, jakým barvivové solární články fungují se dá přirovnat k rostlinám. V rostlinách je zelené barvivo nazývající se chlorofyl. Toto barvivo absorbuje světlo a tím vytváří elektrický

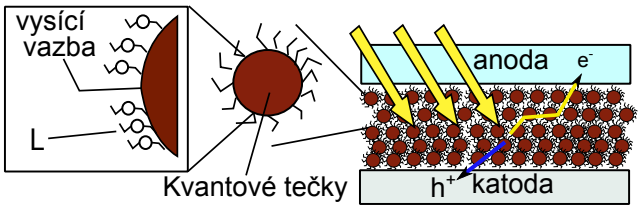
náboj. Stejné je to i u tohoto článku.Jediný rozdíl je v tom, že zde se využívá nanostruktura bílého pigmentu, která je obsažena například v zubní pastě nebo v bílé barvě. Jedná se o oxid titaničitý. Účinnost tohoto článku je $4,5-6$ %, což se s účinností křemíkových panelů nedá srovnávat. Na druhou stranu, díky své průhlednosti, mohou být barvivové články použity jako okna v budovách nebo displejích mobilních zařízení.

Obr. 3.5: SONY demonstruje barevné možnosti barvivových článků v roli lampového stínidla, produkujícího elektrický proud, který vystačí k pohonu mini ventilátoru.[17]

3.7.3 Solární články s nanokrystaly

Solární články s nanokrystaly (kvantovými tečkami) slibují velikou budoucnost. I když jejich účinnost je zatím cca 6 % předpokládá se, že tyto články by mohli přeměnit až 66 % dopadajícího záření. Solární články s nanokrystaly jsou vyrobeny ze selenidu olova. Je to sice,stejně jako křemík, polovodič,podstatným rozdílem je, že dokáže udržet „horké elektrony“[1] déle horké, a tím předejít ztrátám tepla. Horký elektron je pak vylákán oxidem titaničitým z kvantových teček, aby mohla být jeho energie přeměněna na elektrický proud. Výzkum dokázal, že nanokrystaly dokážou zvýšit životnost horkých elektronů až 1000 krát[19].

[1]Když sluneční světlo dopadá na solární buňku, část energie se absorbuje, excituje (vybudí) elektrony v materiálu fotobuněk a „vyrazí“ je z jejich místa. Volné elektrony pak putují v elektrickém poli daným směrem, a tím zjednodušeně vzniká elektrický proud. Energie, kterou materiál nedokáže využít, se mění do podoby vysokoenergetické formy elektronů, nebo také „horkých elektronů“. Ty jsou ale nestálé a energie se ztratí přeměnou na teplo.[19]



Obr. 3.6: Kvantové tečky mezi dvěma elektrodami

3.7.4 Polymerové solární články

Polymerové solární články můžeme rozdělit do čtyř skupin podle jejich složení:

- **solární články založené na bázi organických barviv** - barvivo Ruthenium je naneseno na anorganickém polovodiči a styčná plocha je tvořena organickým donorovým a anorganickým akceptorovým polovodičem. Ruthenium se v tomto případě využívá jako absorbující a následně vhánějící médium elektronů do vodivé vrstvy. Vodivá vrstva je pak tvořena oxidem titaničitým.

- **dvouvrstvé solární články** - jsou složeny z polovodičů typu P a N. První vrstva je zhotovena z měděného thalocyaninu (typ N) a druhá perylén-tetracarboxylového derivátu (typ P). Tento materiál je uložen mezi elektrodami, kde jedna je tvořena ze směsí oxidu india a cínu (ITO) a druhá stříbrnou elektrodou (Ag). Nevýhodou této struktury je omezená difuzní dráha, kterou je schopen urazit nosič náboje.

- **objemové heteropřechodové články** - objemové články jsou tvořeny smícháním materiálu elektron–donor a elektron–akceptor tzv. heteropřechod. Heteropřechod je rozhraní v polovodičích s různými šířkami zakázaného pásma, podmínkou je plynulá návaznost jednotlivých materiálů na úrovni krystalové mřížky.

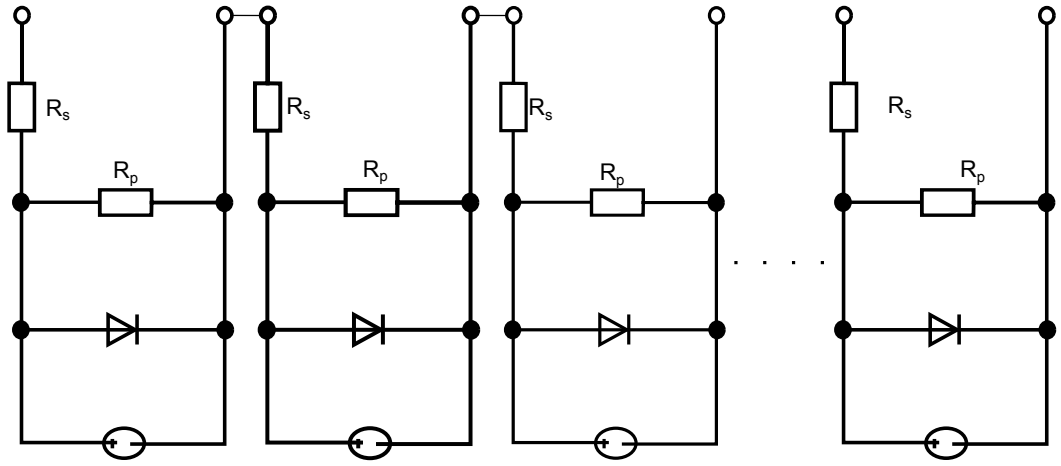
- **tandemová struktura polymerového článku**- princip tandemových článků je umístění dvou článků nad sebou oddělené vrstvou oxidu titaničitého, kde každý článek reaguje na jinou šířku slunečního spektra. Většinou má článek v horní vrstvě větší šířku zakázaného pásma, a tak absorbuje fotony kratších vlnových délek, zatímco fotony delších vlnových délek projdou do spodní vrstvy.

4 FOTOVOLTAICKÉ PANELY

Články, ze kterých jsou vyráběny fotovoltaické panely jsou velmi křehké, drahé a komplikované struktury. Pokud mají dobře fungovat několik let je nutné je chránit před povětrnostními vlivy, vlhkostí a mechanickým poškozením. Napětí jednoho článku je však příliš nízké (0, 5 V), a proto se několik, většinou desítek, článků zapojuje buď do sériové (Obr. 4.1) nebo sério–paralelní kombinace. Takto vytvořená kombinace už poskytuje žádané stejnosměrné napětí a maximální výkon. Články jsou následně hermeticky uzavřeny ve struktuře krycích materiálů do výsledného solárního panelu.

Hlavní požadavky kladené na fotovoltaické panely:

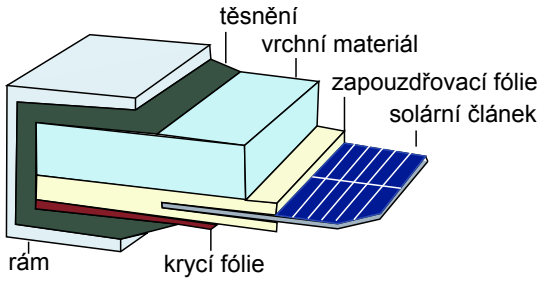
- vytvoření konstrukčně stabilního celku po celou dobu manipulace s panelem
- zabezpečit maximální možnou propustnost slunečního záření
- zajistit dostatečné elektrické vlastnosti FV modulu
- chránit články před degradačními vlivy prostředí[11]



Obr. 4.1: Schéma sériového zapojení solárních článků - náhradní schéma

4.1 Struktura fotovoltaických panelů

Aby byl fotovoltaický panel maximálně účinný a splňoval všechna kritéria použití je panel složen z jednotlivých materiálů, které k těmto vlastnostem přispívají. Vrstvy fotovoltaického panelu jsou patrné z obrázku (Obr. 4.2).Jednotlivě si je zde rozebereme.



Obr. 4.2: Struktura solárního panelu

4.1.1 Rám

Rám solárního článku bývá nejčastěji hliníkový nebo ocelový. Slouží k uchycení modulu k nosným konstrukcím. Na zadní stěně jsou rámy opatřeny svorkovnicí s kabelovými vývody a překlenovacími diodami.
Dnes se mimo těchto základních materiálů začíná využívat materiál Rynite PET. Je stabilní vůči povětrnostním a teplotním podmínkám, odolný vůči UV záření a tvarově stabilní. Jeho nespornou výhodou je snížení hmotnosti vůči hliníku o 30 %-40 %.

4.1.2 Těsnění

Těsnění vyplňuje mezeru mezi rámem a tvrzeným sklem. Bývá nejčastěji z těchto materiálů:

- **pryž** - pryž či guma je materiál, získávaný ze surového přírodního nebo syntetického kaučuku přídavkem vhodného síťovadla a působením tepla.

- **silikon** - Mezi hlavní vlastnosti, které silikony odlišují od jiných polymerů, patří relativní stálost vlastností v širokém rozmezí teplot.. Z dalších vlastností je dobré zmínit relativní nehořlavost, dobré elektroizolační vlastnosti, dlouhodobou odolnost vůči UV záření a povětrnostním podmínkám, vodoodpudivost (hydrofobnost) a paropropustnost, adheze.

- **FMK (Viton)** - tento pryžový materiál má vynikající odolnost při zvýšené teplotě bez větší degradace, má vynikající odolnost vůči ozónu a kyslíku a má dobré mechanické vlastnosti a nízkou deformaci v tlaku.

- **FFKM (Kalrez)** - Výjimečností tohoto materiálu je odolnost více jak 1800 chemikálií, rozpouštědel a plazmatu. Dále je odolný vůči vysokým teplotám.

4.1.3 Vrchní materiál solárních panelů

Materiály pro vrchní část solárních panelů se volí podle umístění panelů, klimakterických podmínek a intenzity slunečního záření tak, aby byla zachována jejich maximální výkonnost, odolnost a životnost panelu.

- **Tvrzené sklo** - někdy nazývané jako „kalené“. Jde o pevnostní sklo, odolávající velké tlakové pevnosti. Dále je sklo schopno odolávat rychlým změnám teplot. Používají se např. jako boční skla automobilů. Jejich výroba probíhá prudkým ochlazením zahřátého skla (600 °C).

- **SentryGlas** - je podobné tvrzenému sklu, ale jeho struktura je doplněna trojvrstvou folií z PVB, která poskytuje vysokou odolnost proti oděru.

- **PTFE (Teflon)** - je krystalický polymer. Patří mezi nejméně hořlavé plasty. Je teplotně stabilní v rozmezí od −170 °C do +250 °C. Má velmi dobré elektroizolační vlastnosti, které jsou jen málo závislé na teplotě a frekvenci. Má ve srovnání s jinými plasty dobrou pevnost za vyšších teplot a dostatečnou pružnost při velmi nízkých teplotách. Odolává kyselinám, zásadám, solím, rozpouštědlům, a to i za zvýšených teplot

- **FEP (teflon FEP)** - od klasického PTFE se liší například větší pružností a vyšším bodem tání. Ke stejným vlastnostem přidává ještě vyšší odolnost proti UV záření.

4.1.4 Zapouzdřovací fólie

Standardně a dlouhodobě se nejčastěji používají zapouzdřovací fólie EVA (Ethylen Vinyl Acetát), a to díky svým adhezivním vlastnostem vůči fotovoltaickým článkům. Jedná se o polymer, který vyniká svoji pružností. Má dobrou jasnost, lesklost, je houževnatý a odolný vůči pnutí. Dále je odolný vůči vlhkosti a UV záření. Zajímavostí je, že materiál má „octový“ zápach. Nevýhodou materiálu je časově náročné vytvrzování při laminaci a zapouzdřování článků.
Náhradou materiálu EVA je termoplastický polyuretan (TPU). Firmy využívají TPU z důvodů kratší doby vytvrzování a nižším nákladů než je tomu u materiálu EVA. Dalším materiálem, který se používá kvůli kratší laminaci je materiál PVB (polyvinyl butyrál). Tyto materiály ale nemají tak výborné vlastnosti jako EVA.

4.1.5 Krycí fólie

Z dlouhodobého hlediska jsou krycí fólie jedním z nejkritičtějším parametrem pro dlouhodobou a spolehlivou funkčnost elektrárny. Důraz je kladen především na těsnost, odolnost vůči povětrnostním podmínkám, UV záření, korozi a vlhkosti. Dalšími požadavky jsou stálost vůči žloutnutí, dobré mechanické vlastnosti, zejména pevnost, adheze k jiným polymerům a adhezivům, rozměrová stabilita a mimo jiné i požární certifikace.

Nejpoužívanější materiály na krycí fólie:

- **PVF (polyvinyl fluorid)** - materiál má nízkou propustnost páry, hoří velmi pomalu, má vynikající odolnost vůči povětrnostním vlivům a barvení a je také odolný vůči většině chemikálií. Mimo jiné se materiál díky své pomalé hořlavosti využívá pro nátěry letadel.

- **PVDF (polyvinyliden fluorid)** - je vysoce nereaktivní a čistý termoplastický fluor polymer. Materiál se využívá v aplikacích vyžadujících nejvyšší čistotu,pevnost, odolnost proti rozpouštědlům, kyselinám, zásadám a teplu. Má nízkou kouřivost při požáru.
  Při porovnání (společností Arkema) s PVF vykazoval materiál PVDF delší odolnost proti povětrnostním vlivům. Společnost uvádí, že PVF vykazoval první poškození povrchu již po 5000 hodinách zatímco PVDF byl beze změn. Rovněž menší vznik pórů jako důsledek působení UV záření je u PVDF menší. [20]

- **ECTFE (chlor trifluor ethylen)** - byl navržen tak, aby poskytoval vynikající chemickou odolnost. Materiál nabízí vysokou rázovitou houževnatost i při nízkých teplotách, má dobrou odolnost proti zahoření.

- **TPT** - předností tohoto materiálu je odolnost v nejrůznějších klimatických podmínkách (např. tropické pouště, pobřeží a hory). Je velice pevný a má stálé vlastnosti. Skládá se ze tří vrstev. První vrstva je z PVF, druhá z PET a třetí opět PVF.

- **TPE** - termoplastické elastomery jsou vyrobeny zpravidla ze směsi plastu a pryže. Výhodou tohoto elastomeru je, že spojuje vlastnosti obou použitých směsí a tím dosahuje vysoké elasticity.

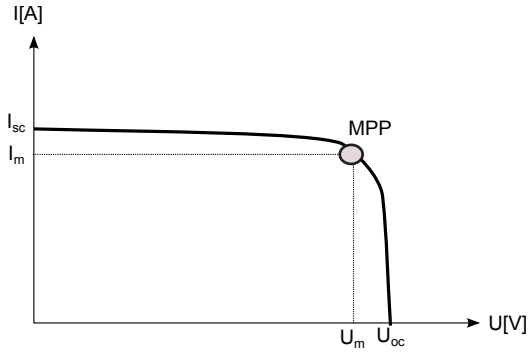
- **KPK** - třívrstvý materiál, kde vrchní a spodní vrstvu tvoří PVDF a prostřední vrstva bývá PET. Má podobné vlastnosti s PVDF.

4.2 Důležité parametry fotovoltaických panelů

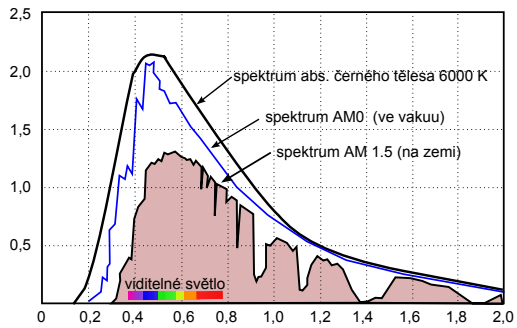
Vzhledem ke skutečnosti, že jsou fotovoltaické panely vyráběny z polovodičových součástek můžeme stejně jako u polovodičů, popsat parametry fotovoltaických panelů voltampérovou charakteristikou (Obr. 4.3). Data z V–A charakteristiky nám následně slouží k porovnávání FV panelů. Aby tato data byla korektní musíme měření provádět za přísně daných podmínek:

- intenzita osvětlení musí být 1000 W/m^2,
- spektrální složení světla musí odpovídat slunečnímu spektru (AM 1.5 Global)
- referenční teplota je 25 °C.

Základním parametrem pro rozlišení článků je proud při napětí 450 mV (I450). Kromě tohoto parametru měříme i další údaje.



Obr. 4.3: Obecná V–A charakteristika fv panelu



Obr. 4.4: Modelové spektrum slunečního záření

4.2.1 Proud nakrátko

Proud nakrátko je zkratový proud měřený při napětí 0 V, kde I_{sc} je maximální proud při daném osvětlení a je roven proudu generovanému světlu $I_{sc} = I_L$, za předpokladu, že odpor R_{SO} je nulový. Velikost proudu nakrátko je ještě závislá na intenzitě osvětlení, ozářené ploše, spektrální citlivosti.

4.2.2 Napětí naprázdno

Napětí naprázdno U_{OC} je napětí měřené bez zátěže na výstupních svorkách. V obecném dvou diodovém modelu při ideálních podmínkách ($I_{SR} = 0$, $R_S = 0$, $R_{sh} = \infty$)

můžeme spočítat transcendentní rovnici (4.1), která může být řešena pouze numericky.

$$U_{OC} = \frac{kT}{q} ln \left[\frac{I_{SC}}{I_S} + 1 \right] \ [V] \tag{4.1}$$

U_{OC} dáno poměrem I_{SC}/I_S - absorpcí a procesem generace světlem a činností, se kterou nábojové nosiče dosáhnou ochuzené oblasti.[21]

S rostoucím saturačním proudem I_S a danou hodnotou I_{SC} napětí naprázdno logaritmicky klesá. Ideální saturační proud pro běžné P–N přechody je dán vzorcem (4.2).

$$I_S = AN_cN_v \left(\frac{1}{N_A} \sqrt{\frac{D_n}{\tau_n}} + \frac{1}{N_D} \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}} \right) exp \left(\frac{-E_g}{kT} \right) \ [A] \tag{4.2}$$

Ze vzorce je patrné, že proud I_S klesá exponenciálně s energií zakázaného pásu E_G. Pro získání nízké hodnoty I_S je tedy nutné mít „široký“ zakázaný pas E_G.

4.2.3 Maximální výkon

Maximální výkon, je výkon, který může článek maximálně dodávat. Bod P_m by měl odpovídat bodu MPP(Maximum Power Point) a nachází se v ohybu V–A charakteristiky. Hodnota maximálního výkonu se vypočte podle vzorce (4.3),

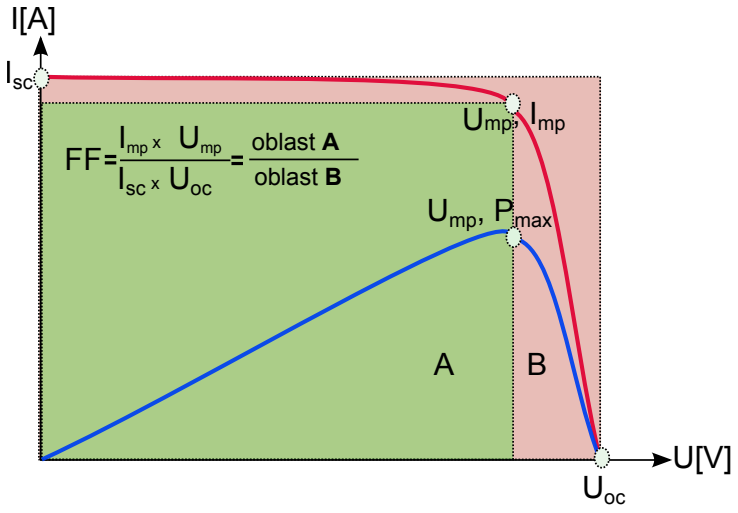
$$P_m = I_m * U_m \ [W] \tag{4.3}$$

kde I_m – je proud, při kterém fotovoltaický článek dodává maximální výkon, U_m – je napětí, při kterém fotovoltaický článek dodává maximální výkon.

4.2.4 Fill Faktor (FF)

Fill Fackor je parametr, který ve spojení s napětím naprázdno a proudem nakrátko určuje maximální výkon ze solárního článku. Graficky je FF mírou „pravoúhlosti“ solárního článku (Obr. 4.5). Fill Factor lze vyjádřit vztahem (4.4):

$$FF = \frac{P_m}{I_{SC} * U_{OC}} = \frac{U_{mp}}{I_{mp}} = \eta_{ef} \ [\%] \tag{4.4}$$



Obr. 4.5: Grafické zobrazení činitele plnění FF

4.2.5 Účinnost fotovoltaického článku (EFF)

Účinnost fotovoltaického článku je odvozena od přeměny slunečního záření fotovoltaického článku, která je dána vlastnostmi materiálu, ze kterého je článek vyroben. Účinnost solárního článku lze vypočítat podle vzorce (4.5):

$$\eta = \frac{P_m}{P_{rad}} = \frac{P_m}{E * A_c} \ [\%] \tag{4.5}$$

kde P_{rad} je výkon dopadajícího záření, E je intenzita osvětlení, A_c je plocha fotovoltaického článku $[m^2]$.

4.2.6 Sériový odpor fotovoltaického článku

Sériový odpor je dán součtem odporů kontaktů, substrátu, přechodů a vrstev.

4.2.7 Paralelní odpor fotovoltaického článku

Paralelní obvod je způsoben především ztrátami na hranách článku. Nízká hodnota odporu nás informuje o vadném článku. Článek se chová jako by byl zevnitř zkratován.

4.2.8 Reflexivita (R)

reflexivita je odvozena od indexu lomu polovodiče podle vztahu (4.6) [22]:

$$R = \left(\frac{n-1}{n+1}\right)^2 \ [-] \tag{4.6}$$

5 DEFEKTY A DETEKCE DEFEKTŮ FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKŮ A PANELŮ

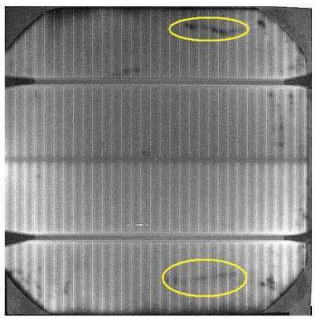
5.1 Defekty fotovoltaických článků

Nejčastější defekty fotovoltaických článků vznikají buď při samotné výrobě křemíku, nebo následně při technologickém procesu výroby článků. Defekty tak můžeme rozdělit do dvou skupin na:

- procesní defekty (Processing Induced Defects)
- materiálové defekty (Grow Defects)

5.1.1 Procesní defekty

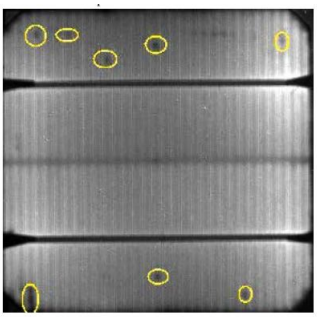
Tyto defekty vznikají při výrobě neopatrnou manipulací. Můžeme sem zařadit různá mechanická poškození při vlastní výrobě solárních článků. Především poškrábání povrchu, nebroušené rohy a okrajové štípnutí (Obr. 5.1).



Obr. 5.1: Poškrábání povrch - metoda elektroluminiscence[23]

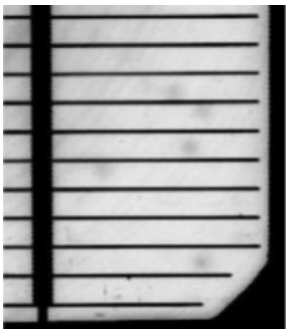
Dalším závažným defektem patřící do této skupiny je nehomogenita difúzní vrstvy. Ta vzniká při vlastní výrobě PN přechodu difuzí fosforu vnikem nečistot do plynné směsi fosforu (Obr. 5.2)[23].

Mezi procesní defekty můžeme také zařadit skrytý lom, který nemusí být na první pohled viditelný a projeví se až při testovaní (Obr. 5.3). Dále prachové částice, které se dostanou do panelu při výrobním procesu (Obr. 5.4). Nebo také chyba metalizace, která je způsobena nedotažením sítotisku.



Obr. 5.2: Nehomogenita difúzní vrstvy - metoda elektroluminiscence [23]

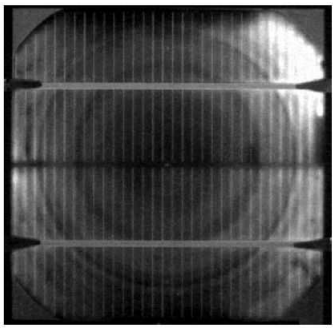
Obr. 5.3: Skrytý lom fv článku [26]



Obr. 5.4: Prachové částice ve fv článku [26]

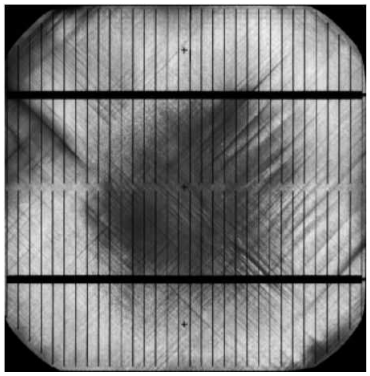
5.1.2 Materiálové defekty

Nejznámějším materiálovým defektem jsou tzv. vírové defekty (Swirl Defects). Jedná se o vadu, která má tvar soustředných kružnic, jež vznikají při výrobě křemíkových ingotů. Tyto kružnice vznikají z důvodu příměsí (např. kyslíku) do křemíku rozpouštěním křemenných nádob při rotačním pohybu během Czochralského metody[24]. Tyto prstence mají celou řadu negativních vlivů. Asi nejvážnějším vlivem je, že vytváří centrum pro generaci - rekombinaci, a tím zvyšují závěrný proud PN přechodu nebo snižují dobu života nosiče proudu (Obr. 5.5).



Obr. 5.5: Vírový defekt (Swirl Defect) - metoda elektroluminiscence [23]

Dalším materiálovým defektem je pnutí materiálu, tento defekt vzniká špatným řízením výroby (nerovnoměrným tuhnutím taveniny na monokrystalu). Snímek (Obr. 5.6) zobrazuje tepelné vyzařování kontaktních pásků.



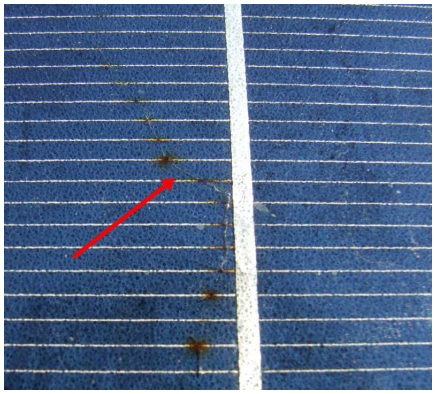
Obr. 5.6: Pnutí materiálu - metoda LBIC - IR barva [23]

5.2 Defekty fotovoltaických panelů

Defekty fotovoltaických panelů vznikají při provozu a výrazně negativně ovlivňují účinnost a výkon fotovoltaických panelů. Mezi nejčastěji vyskytující se defekty patří:

- Potenciálem indukovaná degradace (PID)
- Degradace dopadajícím zářením (LID)
- Delaminace FV panelu
- Proražení/vyhoření diody
- „Hot spot“
- „Šnečí cestičky“

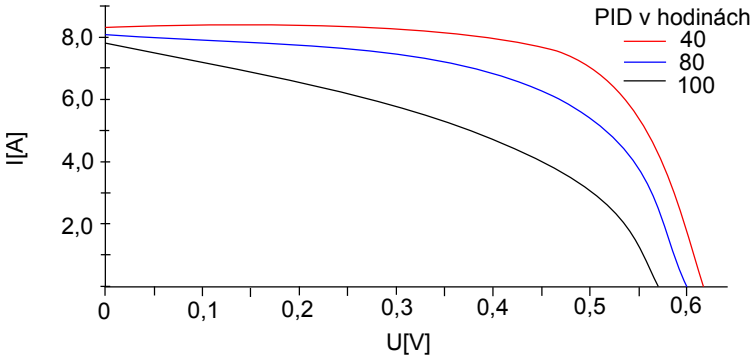
Dalšími defekty mohou být například prasklé sklo vlivem lokálního přehřátí, či fotovoltaické články s různými parametry v panelu nebo prasklé články (Obr. 5.7).



Obr. 5.7: Prasklina na solárním článku

5.2.1 Potenciálem indukovaná degradace(PID)

S potenciální indukovanou degradací se můžeme setkat jak u krystalické technologie tak i u tenkovrstvé technologie. Dochází k ní pokud je panel vystaven vysokému zápornému napětí mezi články a zemí. Potenciál napětí se oproti zemi pohybuje mezi −200 V a −350 V. Rozdíl je způsoben délkou jednotlivých stringů a typem použitého střídače. Rám musí být z bezpečnostních důvodů uzemněn a proto má potenciál 0 V. Toto negativní napětí může způsobit migraci kladných iontů z materiálů použitých v panelu do elektrického pole a následnému vybití přes uzemněný rám. Tento jev má za následek polarizaci elektrického náboje a tím pádem snížit výkon fotovoltaického panelu. Důsledek PID je vyobrazen na obrázku (Obr. 5.8).



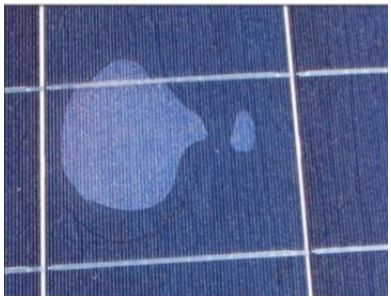
Obr. 5.8: V–A charakteristika fotovoltaického článu, působení PID v čase [26]

5.2.2 Degradace dopadajícím zářením (LID)

Tento jev se začal objevovat u standardních monokrystalických fotovoltaických článků založených na substrátu typu P. Podobně je tomu i u polykrystalických článků, který podlehl kontaminaci fosforem. Největší problém je u amorfních panelů, kde dochází k narušení vazby křemíku a vodíku. LID negativně ovlivňuje minoritní nosiče náboje tím, že jim zkracuje dobu životnosti. Tím ovlivňuje řadu parametrů například proud, napětí, atd.
Dalším podléhajícím materiálem dopadajícího, přesněji ultrafialového, záření je krycí fólie EVA. Prvním ukazatelem degradace je žloutnutí až k následnému hnědnutí článku. Na toto zabarvení článku nemusí mít vliv jen teplota či ultrafialové záření ale i vnitřní odpor a s ním spojené zahřívání článku. Změnou optické transparentnosti krycí fólie dochází k mírnému zastínění článku což má za následek pokles jeho výkonu.

5.2.3 Delaminace FV panelu

Vznik delaminace fotovoltaického panelu se projevuje oddělováním jednotlivých části panelu. Jedná se především o zapouzdřovací fólii EVA, která se separuje od fv článků, či tvrzeného skla. Oddělením EVA fólie dochází ke vzniku dutin, bublin. V dutinách vznikají korozivní účinky působením vody s chloridy a nastane poškození celého panelu. Delaminace FV panelu se řadí mezi nejzávažnější poruchy fotovoltaických panelů. Na snímku (Obr. 5.9) je zachycena delaminace panelu.

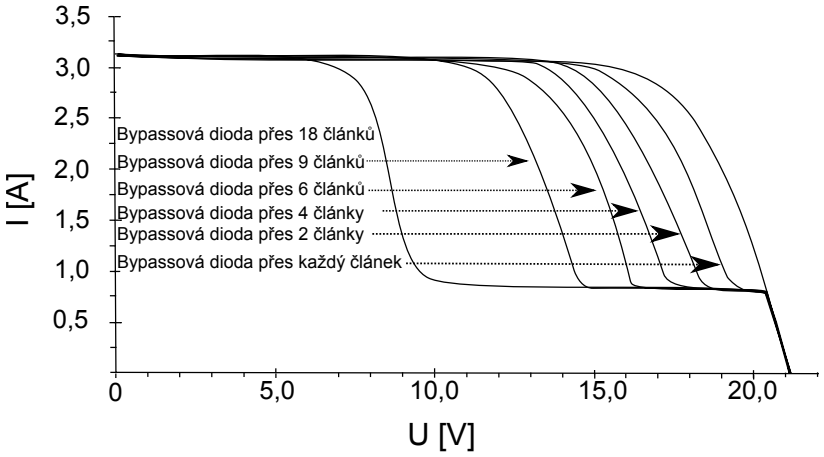


Obr. 5.9: Delaminace fotovoltaického panelu [25]

5.2.4 Proražení/vyhoření diody

Diody ve fotovoltaických panelech mají velký význam. Chrání jednotlivé články před tepelným zničením a značným poklesem výkonu. Ve fotovoltaických panelech se používají bypassové (překlenovací) diody. Tyto diody odpojí část panelu v případě jeho

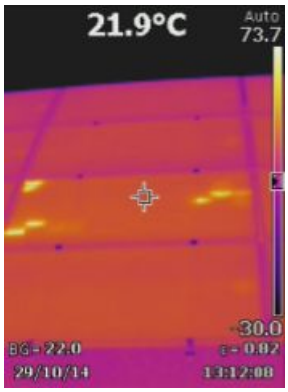
zastínění a eliminují tak změnu, kde články místo výroby elektrické energie elektrickou energii spotřebovávají. Může tak dojít k nevratnému poškození panelu. Porucha bypassové diody tak může ovlivnit výkon, či dokonce životnost celého panelu.
Diody se nejčastěji zapojují tak, aby překlenuli 18-24 článků. Je to proto, že v diodách dochází k proudovým ztrátám a kdyby chránila každý článek jedna dioda, bylo by to ekonomicky nákladné. Bypassové diody přecházejí do propustného směru při napětí cca $-0,6$ V v závislosti na typu diody. Toto záporné napětí se objeví, když je napětí zastíněných článků rovno napětí nezastíněných článků plus napětí na diodě. Na V–A charakteristice (Obr. 5.10) jsou znázorněny změny křivek při použití bypassové diody chránící různý počet článků. Z charakteristiky je patrné, že čím více dioda článků chrání, tím dochází k vyššímu úbytku výkonu.



Obr. 5.10: Změna V-A charakteristika bypassové diody chránící různý počet článků při zastínění jednoho článku z 75 %

5.2.5 „Horká místa (Hot Spots)“

Jedná se o velmi častý fotovoltaický defekt, kdy na panelu vznikají horká místa (hot spots). Jednou z možností vzniku horkých míst může být zastínění. Zastíněný článek se, místo zdroje, stává spotřebičem a vyrobenou energii ostatními články začne měnit na teplo. Z dlouholetých zkušeností vyplývá, že při překročení teploty článku o 50 °C oproti ostatním článkům může dojít k nevratnému poškození článku a snížení celkové účinnosti panelu. Na obrázku (Obr. 5.11) z termovizního měřeni jsou vidět horká místa na panelu.



Obr. 5.11: Záznam horkých míst na panelu

5.2.6 „Šnečí cestičky (Snail trails)“

Jedná se o poruchu povrchu fotovoltaického článku, kde dochází ke korozi kontaktů na fv článku a začnou se vytvářet tmavá zbarvení ve tvaru šnecích cestiček o šířce $0,5 - 1$ cm. Jev se vyskytuje u monokrystalických i polykrystalických článků. Cestičky jsou ohraničeny postiženými články. Jedná se většinou o více článků v jednom panelu a nejsou zasaženy rovnoměrně.
Výklad vzniku tohoto jevu je pořád ve výzkumu a není prozatím jednoznačný. Nejčastěji prezentovanou hypotézou je, že šnečí cestičky vznikají kombinací několika faktorů. Především mikrotrhliny ve fotovoltaickém panelu, použitím EVA fólie na spodní vrstvě článků, pravděpodobné vniknutí vlhkosti do panelu, fyzikálním a chemickým jevům ke kterým dochází v článcích při provozu. Zatímco jedni výrobci tvrdí, že vzniklý jev nijak nemění výkonové parametry panelu a jedná se jen o estetický problém, druzí mluví že se vznikem cestiček dochází ke změně elektrického odporu v mikrotrhlinách, a tím i k výkonovým ztrátám.

Obr. 5.12: Šnečí cestičky na fotovoltaickém panelu

5.3 Detekce defektů fotovoltaických panelů

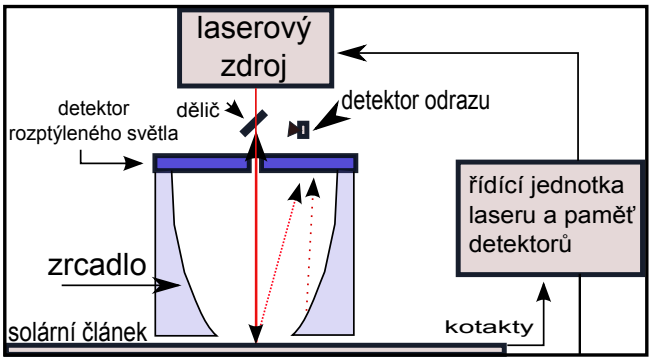
Abychom předešli negativním vlivům ovlivňujícím instalovaný výkon a účinnost je důležité tyto vlivy včas odhalit. Samotný postup výroby, od ingotů až po finální fotovoltaický panel, je velmi náročný, a proto je zapotřebí ověřovat jejich kvalitu už od počátku vzniku. Diagnostikou můžeme předejít zmetkovým kusům či upravit technologický postup.

5.3.1 Solární simulátor

Je základní test, kterým by měli projít veškeré panely při výstupní kontrole z výroby. Test odhaluje výrobní vady a zda panel splňuje kritéria daná výrobcem. K testování se používají speciálně vyvinutá zdroje světla simulující celé viditelné sluneční spektrum. Většinou se používá halogenová nebo xenonová výbojka, kde se vyzařované světlo nejvíce podobá slunečnímu světlu. Výstupní data (flash data) jsou určena špičkovým výkonem, napětím naprázdno, proudem na krátko, pracovním napětím, pracovním napětím, proudem a výkonem, případně hodnotou fill faktoru i účinností. Při testování musí být dodrženy zkušební podmínky STC (Intenzita osvětlení 1000 W/m^2, AM 1.5 Global a teplota okolí 25 °C).
Touto metodou lze zjistit parametry uvedené v kapitole (4.2). Parametry můžeme měřit přímo na stanovišti fotovoltaické elektrárny a následně je porovnat s hodnotami od výrobce. Aby ale data byla věrohodná, musí být dodrženy parametry pro měření.

5.3.2 Light Beam Induced Current (LBIC)

Celkovou účinnost solárního panelu můžeme stanovit měřením proudu indukovaným světlem. Metoda LBIC nám umožňuje vizualizaci a lokalizaci zkratů a jiných skrytých vad, které snižují výkon fotovoltaických panelů. LBIC tedy měří zkratový proud indukovaný světelným paprskem ze solárního článku a odrazivost téhož světla na stejné buňce. Využívají se k tomu čtyři lasery o různých vlnových délkách. Z výsledků lze zjistit vnitřní a vnější kvantovou účinnost pro každou vlnovou délku. Vnitřní kvantová účinnost (IQE) nám definuje vyrobený proud z fotonu vstupující do článku. Externí kvantová účinnost (EQE) nám potom definuje elektrický proud z fotonu dopadající na článek. Důvodem, proč jsou použity čtyři různé lasery je, že odlišné materiály mají různou schopnost absorpce vlnových délek. Nízká účinnost jednoho článku pak negativně ovlivňuje účinnost a výkon celého panelu.



Obr. 5.13: Metoda Light Beam Induced Current

5.3.3 Elektroluminiscence (ELCD test)

Test elektroluminiscence se zakládá na měření výkonových charakteristik FV panelů a dokáže odhalit skryté vady, které nelze vidět termokamerou ani změřit pomocí flash testu či pomocí V–A charakteristiky. Elektroluminiscence je světelná emise záření vznikající při zářivé rekombinaci křemíku. S jeho pomocí lze vyhodnotit jak kvalitu výrobního procesu článků, tak i případné defekty vzniklé pozdější manipulaci s fotovoltaickými moduly. Elektroluminiscence odhaluje především vznik mikrotrhlin, které mají velký vliv na stabilitu výkonových parametrů. Defekty nevyzařují žádné nebo slabé záření a jsou tak na snímcích velmi snadno pozorovatelné.

5.3.4 Fotoluminiscence

Metoda fotoluminiscence je velmi podobná ELCD testu. Lze ji provádět na stejném měřícím zařízení s patřičnou úpravou. Rozdíl je, že zde musíme energii pro zářivou rekombinaci dodávat vnějším světelným zdrojem.

5.3.5 Luminiscenční mikroplazmy

Vznik luminiscenční mikroplazmy je závislý na závěrném proudu v solárním článku a podílí se na něm i nedokonalost v krystalické mřížce P–N přechodu. Mikroplazma je nejčastěji prezentována bodovými poruchami, které ovlivňují právě závěrný proud a velikost průrazného napětí přechodu.

5.3.6 Měření termovizní kamerou

Měření je založeno na rozdílu teplot kde vadné články vydávají více tepla než články bez závad. Výhodou tohoto měření je, že se panely nemusí složitě demontovat a převážet do testovacích laboratoří protože měření lze provádět za normálního provozu pomocí termokamery. Teplotní rozdíly jsou na termokameře rozděleny pomocí barev. Z letitých zkušeností lze říci, že pokud teplota poškozeného článku dlouhodobě překročí hranici o 10 °C než je výrobcem doporučená teplota, může dojít až k 50 % snížení celkové životnosti panelu.

5.3.7 Vizuální kontrola

Nejjednodušší a nejlevnější metoda zjišťování závad. Mnoho vad fotovoltaického systému lze pozorovat pouhým zrakem. Ať už se jedná o zastínění panelů trávou, či různými nečistotami, tak i vetší praskliny a lomy jsou dobře viditelné.

6 PRAKTICKÁ ČÁST

Praktická část diplomové práce se zabývá analýzou fotovoltaických panelů na nejstarší elektrárně v České Republice, určení míry degradace za dobu provozu elektrárny, vypočtení současného výkonu fotovoltaické elektrárny a vyobrazení všech dosažených výsledků.

6.1 Historie fotovoltaické elektrárny Dukovany

V roce 1994 byla společností ČEZ zahájena výstavba komplexu obnovitelných zdrojů v Jeseníkách poblíž přečerpávací vodní elektrárny Dlouhé Stáně. V rámci projektu větrné farmy Mravenečník byla vystavěna i fotovoltaická elektrárna o výkonu 10 kW (při maximálním svitu). Monokrystalické panely byly dodané, dnes už neexistující, českou firmou Tesla Trimex z Rožnova pod Radhoštěm. Z důvodů nepříznivých klimatických podmínek se výstavba celého projektu protáhla až do roku 1998. Od října téhož roku byla spuštěna první fotovoltaická elektrárna v České republice. Z výkonu fotovoltaického systému je patrné, že elektrárna nebyla stavěna za výdělkem, nýbrž pro experimentální a ověřovací účely. Elektrárnu z počátku provázely nemalé problémy s měniči, které byly často odesílány dodavateli na servis do Německa. Důsledkem bylo časté odpojení sekcí a jejich neprovozuschopnost. V roce 2002 byla elektrárna přestěhována do areálu jaderné elektrárny Dukovany. Dalším důvodem jejího přesunu byly časté krádeže panelů a značné poničení panelů vandalismem.

Obr. 6.1: Fotovoltaická elektrárna Dukovany [28]

6.2 Parametry fotovoltaické elektrárny

Fotovoltaická elektrárna je rozdělena na 2 sekce „A“ a „B“, každá sekce disponuje vlastním střídačem, typ PV-WR 5000, a dále je rozdělena na 5 větví po 20 kusech fotovoltaických panelů. Více informací je zaneseno v tabulce (Tab. 6.1 a Tab. 6.3).

počet sekcí solárního pole	2
jmen. výkon elektrárny	10 kW
celkový počet panelů	200 ks
celková účinna plocha	75 m^2
předpokládaná roční výroba	10000 kWh
předpokládaný roční výděléк (dotovaná cena)	60 000 Kč
typ použitých střídačů	PV-WR 5000
typ použitých fv panelů	M-S 36-53

Tab. 6.1: Technické parametry fotovoltaické elektrárny

6.2.1 Konstrukce

Pozemní Konstrukce fotovoltaické elektrárny je vyhotovena z hliníkových profilů. Panely jsou připevněny speciálními úchyty tak, aby nemohlo dojít k pádu či jinému uvolňování například větrem. Dále je konstrukce postavena tak, aby panely v ní uloženy byly v náklonu 45 ° vůči vodorovné rovině. Tato hodnota je dána výrobcem panelů. Při snižování úhlu dochází k vyšší výrobě v letních měsících a naopak ke snížené výrobě v zimních měsících.

6.2.2 Střídače

Fotovoltaická panely jsou připojeny na dva střídače stejného typu PV-WR 5000 od německé firmy SMA Regelsysteme GmbH. Zjištěné technické parametry jsou uvedeny v tabulce (Tab. 6.2).

Vstupní hodnoty	
Jmenovitý příkon	5000W
Jmenovité vstupní napětí	300 V DC
Maximální vstupní napětí	450 V DC
Jmenovitý vstupní proud	17 A DC
Maximální vstupní proud	21 A DC
Rozsah MPP	240 - 400 V DC
Zvlnění stejnosměrného proudu	5 %
Ochrana proti přepětí	Varistor na vstupu
Nastavitelný práh uzemnění	20 kOhm až 500 kOhm
Výstupní hodnoty	
Napětí napajecího konektoru	230 V
Jmenovitý výstupní proud	$20A_{eff}/1\sim$
Frekvence napájení	50 Hz /±1 %
izolační napětí	2,5 kV
Cos phi	1

Tab. 6.2: Technické parametry použitých střídačů

6.2.3 Kabeláž

Panely jsou mezi sebou propojeny vodiči, které jsou určeny pro tento druh rozvodu. Zde jsou použity vodiče typu SOLAR PLUS. Jejich výhodou je odolnost vůči UV záření a ozónu, vysoká flexibilita, použití do +120 °C. Dále jsou odolné proti zkratu a plameni. Obrázek (Obr. 6.2) znázorňuje typ použitých vodičů.

Obr. 6.2: Vodiče typu SOLAR PLUS

6.2.4 Fotovoltaické panely Trimex Tesla

Solární panely Trimex Tesla jsou vyrobeny z monokrystalických křemíkových článků. Každý panel obsahuje 36 článků a ty jsou chráněny tepelně tvrzeným sklem o tloušťce 3 mm odolným proti statickému i rázovému namáhání. Články jsou vzduchotěsně uzavřeny v termosetické folii EVA odolné vůči povětrnostním podmínkám. Zespodu články chrání folie z trilaminátu PVF a celý systém je pomocí pružného silikonového tmelu zafixován do hliníkového rámu. Součásti panelu je i box obsahující bypassové diody a konektory pro připojení panelu. Panely odpovídají specifikaci ISPRA ESTI No 503.

výrobce panelů	Trimex Tesla
typ panelu	M-S 36-53
maximální výkon	53W
napětí naprázdno	21,5 V
proud nakrátko	3,42 A
optimální napětí	17,2 V
optimální proud	3,1 A
hmotnost jednoho panelu	5,9 kg
rozměry panelu D x L x H	1005 x 453 x 34 mm
teplotní koef. výstupního napětí modulu	-80 mV/°C
teplotní koef. výstupního proudu modulu	0,04 %/°C
mezní teplota modulu	- 40 až + 80 °C
maximální relativní vlhkost	100 %
mezní rychlost větru	více než 160 km/h
odolnost proti kroupám	do průměru 28 mm
předpokládaná životnost modulu	více než 20 let
záruka na funkci	5 let

Tab. 6.3: Technické parametry fv panelů při E=1000 W/m^2, AM = $1,5$, tc=25 °C

6.3 Měření fotovoltaických panelů

Měření panelů fotovoltaické elektrárny probíhalo ve třech etapách. První etapou bylo vytipování jednotlivých panelů termokamerou, druhá etapa byla založena na měření elektroluminiscence a třetí měření, slunečním osvitem, probíhalo v testovací komoře certifikované laboratoře.

6.3.1 Termovizní analýza

Vytipování jednotlivých panelů probíhalo pomocí termokamery FLIR i7. Technické parametry jsou zaneseny v tabulce (Tab. 6.4). Princip měření termokamerou je popsán v teoretické části práce (5.3.6). Samotné měření lze provádět za hezkého počasí, kdy elektrárna vyrábí energii. Tepelné rozdíly, ke kterým při výrobě dochází jsou termokamerou lépe identifikovatelné a snáze se tak určí míra poškození panelu. Měření by se mělo provádět z obou stran panelů tedy jak přední, která je nakloněna ke slunci, tak i zadní nakloněné k zemi.

	Optika (H x V)	29 ° x 29 °
	Rozlišení detektoru	140 x 140 px
	Měřící funkce	bod
	Zaostřování	> 60 cm
	Teplotní rozsah měření	- 20 °C až + 250 °C
	Přesnost	± 2 °C nebo ± 2 %
	Rozlišení teploty	0,1 °C
	Ochrana	IP 43

Tab. 6.4: Technické parametry termokary FLIR i7

V laboratoří před dalším zkoumáním a měřením panelů je potřeba vždy jejich povrch řádně očistit a umýt, aby se minimalizovaly chyby měření. Panely se myjí na doporučení ČIA pouze čistou vodou a jen vrchní část, kde jsou vidět jednotlivé články. Po umytí je potřeba panely řádně osušit, aby nešlo k zatečení čistícího prostředku mezi krycí fólii, v našem případě sklo a rám. Sice by měl být tento prostor utěsněn ale vzhledem ke stáří panelů a neznalosti kvalitě a stálosti použitého lepícího materiálu je lepší následnému defektu předcházet.

6.3.2 Měření elektroluminiscence

Popis této metody je uveden v teoretické části (5.3.3). Kamera snímá celý povrch fotovoltaického panelu a zobrazuje nejen kvalitu použitého křemíku, ale i mikrotrhliny vzniklé manipulací ať už při přepravě nebo postupným degradováním křemíku. Na snímcích jsou dobře viditelné části článku, které jsou poškozené a nedokáží přeměnit sluneční záření. Měření probíhá v temné komoře pomocí CCD kamery G2-3200 kam se jednotlivě panely umisťovaly a „fotily“, následně proběhl rozbor jednotlivých snímků. Technické parametry CCD kamery jsou uvedeny v tabulce (Tab. 6.5).

	CCD čip	KAF–3200ME
	Rozlišení (H x V)	2184 x 1472
	Velikost pixelu (H x V)	$6,8\ \mu m$ x $6,8\ \mu m$
	Obrazová plocha (H x V)	14,9 x 10 mm
	Plná kapacita pixelu	~55000 e^-
	Kapacita výstupního bodu	~110000 e^-
	Temný proud	0,8 $e^-/s/$ při 0 °C
	Zdvojení tepelného šumu	6 °C
	Čas stažení	~ 4,8 s

Tab. 6.5: Technické parametry CCD kamery G2-3200

6.3.3 Sluneční simulátor

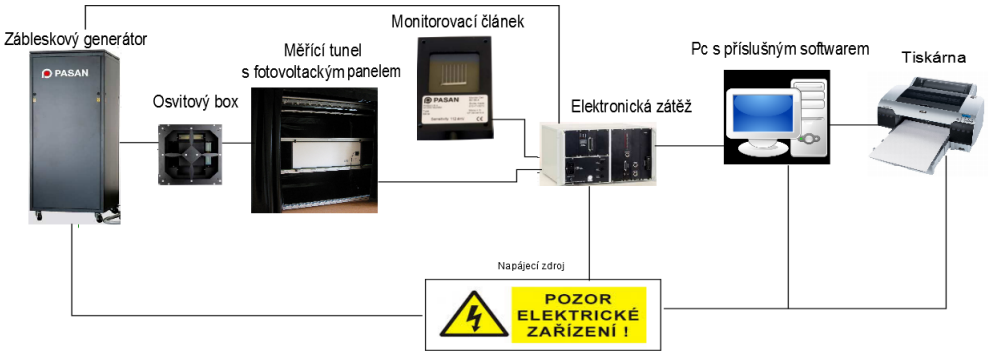
Sluneční simulátor Sun Sim 3C švýcarské firmy PASAN, kterým je vybavena laboratoř na VUT Brno je Akreditovaná Zkušební laboratoř, která vznikla za podpory CVVOZE. Simulátor spadá do nejvyšší třídy A+/A+/A+ dle normy IEC 60904-9. Tester pomocí krátkého světelného impulzu definované délky, intenzity a spektra proměří celou voltampérovou charakteristiku.

Simulátor se skládá z šesti částí, a to:

- Zábleskový generátor - je napájecí jednotkou pro osvitový box
- Osvitový box - vybaven dvěmy trubicemi pro uniformní rozložení světelného záření.
- Měřící tunel- černý tunel do kterého se připevňují fotovoltaické panely
- Monitorovací článek - monitoruje intenzitu slunečního záření v tunelu
- Elektronická zátěž - provádí změnu zatěžovacího odporu během záblesku
- Obslužné pc s příslušným programem a tiskárnou

Před samotným měřením na simulátoru je důležité provést několik kroků. Tím prvním a nejdůležitějším je nechat panely natemperovat na požadovaných 25 °C. Parametr definovaný normou. Temperování panelů probíhá okolo 4–6 hodin většinou je ale tato doba delší . Pokud panely mají požadovanou teplotu, mohou se připevnit do speciálního držáku v osvitové komoře (Obr. 6.4).

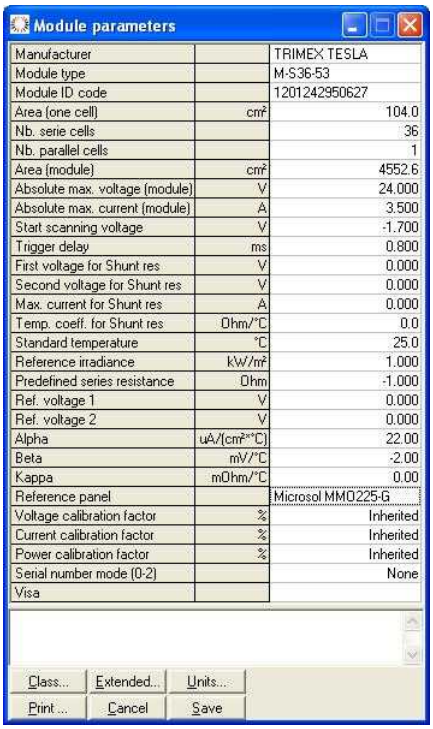
Dále je potřeba zvolit správnou masku u osvitového boxu, která nám zaručuje správnou intenzitu slunečního záření. V našem případě to je 1000 W/m^2. V neposlední řadě je potřeba panel připojit přes krokosvorky k elektronické zátěži, která je dále přes USB rozhraní připojena k počítači s potřebným softwarem.



Obr. 6.3: Schéma zapojení Slunečního simulátoru

Obr. 6.4: Foto osvitové komory s uchyceným panelem

Nakonec je potřeba v měřícím programu „SPROD TESTER“ nastavit hodnoty z technické specifikace fotovoltaického panelu (Obr. 6.5).
Hodnoty se nastavují v záložce „Config“ a následném odkazu „Module parameters“. V tomto poli je důležité nastavit výrobce, typ modulu, identifikační číslo modulu (které je odlišné pro každý panel), rozměry panelu, maximální napětí panelu, maximální proud, počáteční napětí, zpožděné spuštění měření(z důvodu „rozběhu“ panelu, standardní teplotu, zvolenou masku intenzity slunečního záření, hodnotu alfa a beta.
Po tomto nastavení stačí kliknout na tlačítko měření a systém zaznamená během 10 ms asi 500 hodnot, ze kterých následně vykreslí charakteristiku a vypočte důležité hodnoty (Obr. 6.6).

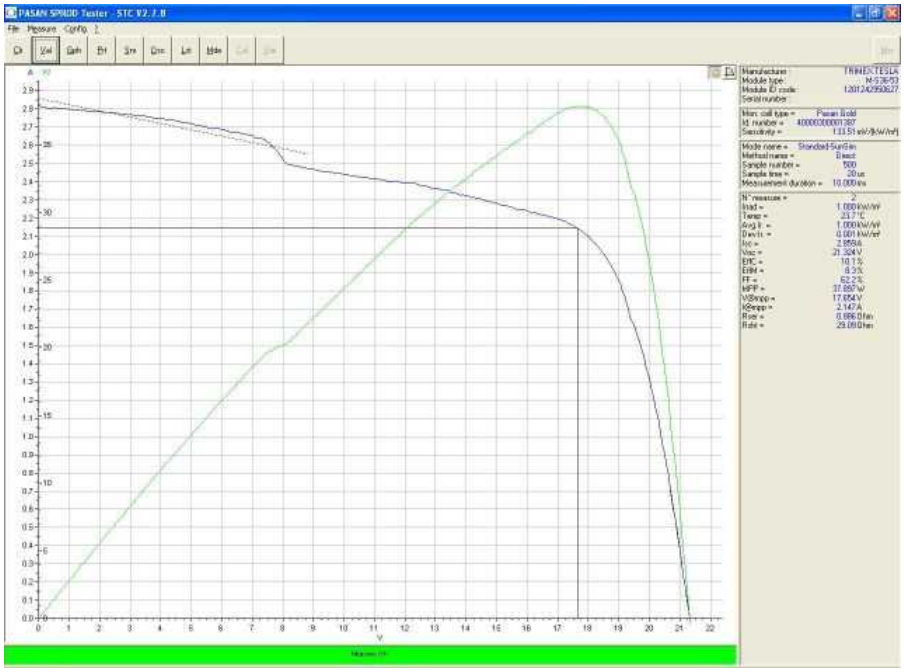


Module parameters

Manufacturer		TRIMEX TESLA
Module type		M-S36-53
Module ID code		1201242950627
Area (one cell)	cm²	104.0
Nb. serie cells		36
Nb. parallel cells		1
Area (module)	cm²	4552.6
Absolute max. voltage (module)	V	24.000
Absolute max. current (module)	A	3.500
Start scanning voltage	V	-1.700
Trigger delay	ms	0.800
First voltage for Shunt res	V	0.000
Second voltage for Shunt res	V	0.000
Max. current for Shunt res	A	0.000
Temp. coeff. for Shunt res	Ohm/°C	0.0
Standard temperature	°C	25.0
Reference irradiance	kW/m²	1.000
Predefined series resistance	Ohm	-1.000
Ref. voltage 1	V	0.000
Ref. voltage 2	V	0.000
Alpha	uA/(cm²*°C)	22.00
Beta	mV/°C	-2.00
Kappa	mOhm/°C	0.00
Reference panel		Microsol MMO225-G
Voltage calibration factor	%	Inherited
Current calibration factor	%	Inherited
Power calibration factor	%	Inherited
Serial number mode (0-2)		None
Visa		

Class... Extended... Units...
Print ... Cancel Save

Obr. 6.5: Nastavování parametrů fotovoltaického panelu v programu



Obr. 6.6: Program SPROT TESTER s výsledným měřením

Pro každé další měření stejných panelů je potřeba upravit v „Module parameters“ pouze pole s identifikačním číslem modulu. Ostatní parametry jsou totožné.
Měření se následně ukládá do předem připraveného souboru s datem a označením měřeného panelu. Pokud se jedná o akreditované měření musí laboratoř tento záznam archivovat po dobu pěti let. Tuto dobu stanovuje zákon.

6.3.4 Vizuální kontrola

Další kontrolou panelů bylo jejich pečlivé prohlédnutí zda není porušena krycí fólie a zda je dobře utěsněna v hliníkovém rámu, kam by mohla prostupovat voda či jiné nečistoty.

6.4 Určení celkové vyrobené energie

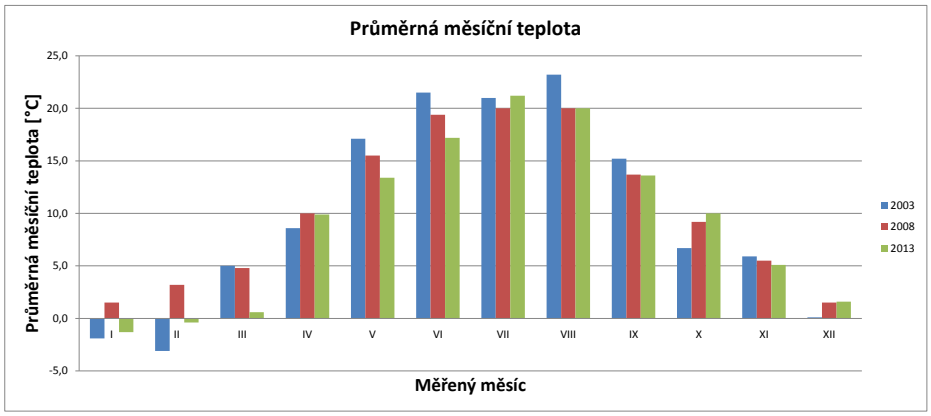
K výpočtu určení roční teoretické vyrobené energie jsou potřeba hodnoty intenzity slunečního záření. Bohužel fotovoltaická elektrárna nedisponuje vlastní meteorologickou stanicí a data byla poskytnuta Českým hydrometeorologickým ústavem (ČHMÚ). Protože výroba energie je závislá také na teplotě a době slunečního svitu byly i tyto údaje poskytnuty ČHMÚ. Bohužel cena intenzity slunečního svitu je tak ceněný údaj, že se nám podařilo do částky 5000 Kč (hodnota dat, které ČHMÚ poskytne pro studentské účely zdarma) získat pouze pololetní intenzitu slunečního záření pro rok 2003, 2008 a 2013. V této částce byly dále zahrnuty průměrné měsíční teploty a měsíční úhrn slunečního svitu pro tytéž roky.

6.4.1 Data z Českého hydrometeorologického ústavu

Důležitá data k výpočtu degradace fotovoltaických panelů a porovnání účinnosti byla poskytnuta ČHMÚ.Průměrná roční teplota je uvedena v tabulce (Tab. 6.6), měsíční doba slunečního svitu je uvedena v tabulce (Tab. 6.7) a intenzita slunečního záření za pololetí uvedená v tabulce (Tab. 6.8).

Rok/měsíc	2003 [°C]	2008 [°C]	2013 [°C]
Leden	-1,9	1,5	-1,3
Únor	-3,1	3,2	-0,4
Březen	5,0	4,8	0,6
Duben	8,6	10,0	9,9
Květen	17,1	15,5	13,4
Červen	21,5	19,4	17,2
Červenec	21,0	20,0	21,2
Srpen	23,2	20,0	20,0
Září	15,2	13,7	13,6
Říjen	6,7	9,2	10,0
Listopad	5,9	5,5	5,1
Prosinec	0,1	1,5	1,6
Průměrná roční teplota	9,9	10,4	9,2

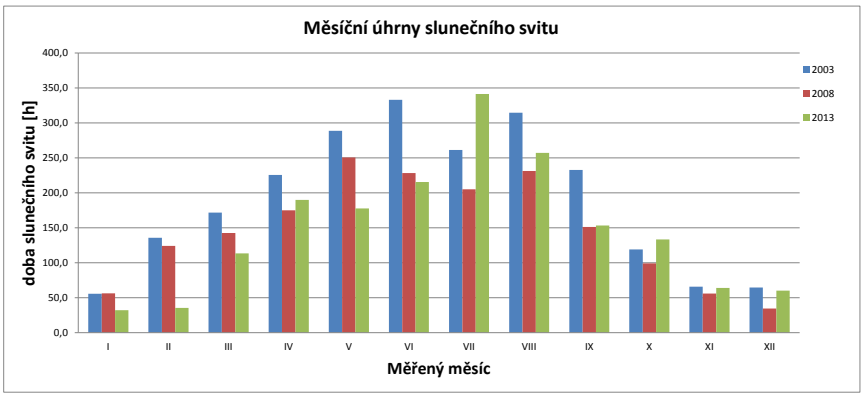
Tab. 6.6: Pruměrné teplota vzduchu v jednotlivých měsících daného roku a průměrná roční teplota vzduchu [27]



Obr. 6.7: Průměrná měsíční teplota vzduchu v jednotlivých letech

Rok/měsíc	2003 [h]	2008 [h]	2013 [h]
Leden	55,5	56,3	32,2
Únor	135,7	124,1	35,4
Březen	171,6	142,5	113,3
Duben	225,4	175,0	189,7
Květen	288,6	250,6	177,7
Červen	332,8	228,1	215,4
Červenec	261,3	204,9	341,3
Srpen	314,6	231,2	256,9
Září	232,5	151,0	153,3
Říjen	119,1	99,1	133,3
Listopad	65,6	55,8	64,0
Prosinec	64,4	34,4	60,0
Roční úhrn	2267,1	1753,0	1772,5

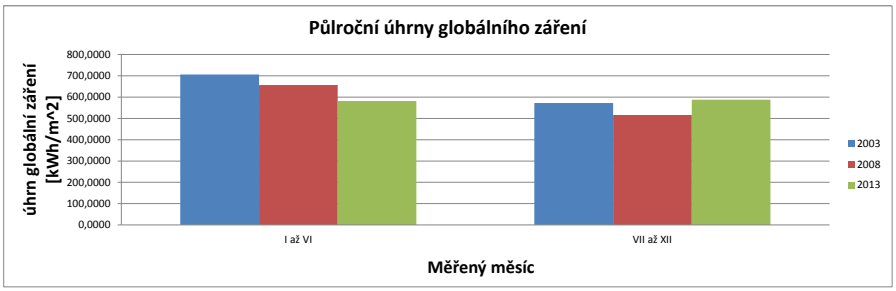
Tab. 6.7: Počet hodin slunečního svitu v jednotlivých měsících a roční úhrn [27]



Obr. 6.8: Počet hodin slunečního svitu v jednotlivých měsících a rocích

Rok/měsíc	2003 $[kWh/m^2]$	2008 $[kWh/m^2]$	2013 $[kWh/m^2]$
Leden až Červen	705,93	656,88	581,63
Červenec až Prosinec	572,28	515,94	587,84
Roční úhrn intenzity	1278,21	1172,82	1169,47

Tab. 6.8: Intenzita slunečního záření za pololetí v jednotlivých rocích [27]



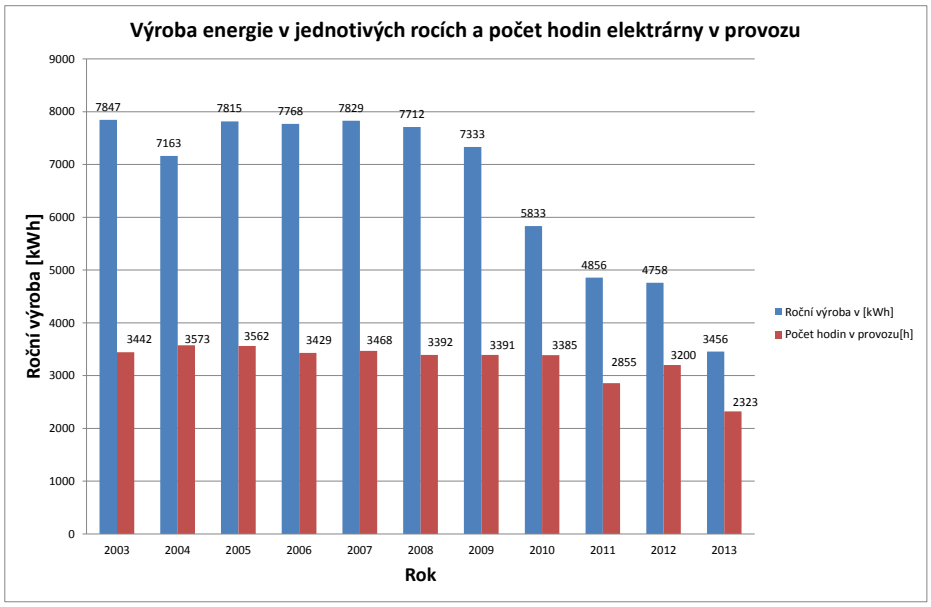
Obr. 6.9: Úhrn půlroční globální intenzity

6.4.2 Data z fotovoltaické elektrárny Dukovany

Elektrárna zaznamenává svoji měsíční výrobu a dobu v provozu od roku 2003 do současnosti. V tabulce (Tab. 6.9) jsou uvedeny pouze roky, které budou dále zpracovány. Celkový přehled výroby a doby elektrárny v provozu můžete vidět na obrázku (Obr. 6.10).

Měsíc/Rok	2003		2008		2013	
	Výroba [kWh]	provoz [h]	Výroba [kWh]	provoz [h]	Výroba [kWh]	provoz [h]
Leden	280	175	228	173	76	125
Únor	445	237	509	230	116	187
Březen	600	301	726	309	358	280
Duben	866	341	873	351	564	319
Květen	964	396	1039	403	539	375
Červen	939	396	1014	403	561	368
Červenec	933	363	955	393	806	382
Srpen	1055	375	967	370	664	350
Září	983	317	689	306	418	280
Říjen	437	233	464	249	362	246
Listopad	222	166	200	138	178	158
Prosinec	133	142	165	143	116	130
Celkem za rok	7847	3442	7829	3468	4758	3200

Tab. 6.9: Přehled vyrobené energie a provozu fotovoltaické elektrárny



Obr. 6.10: Výroba energie v jednotlivých letech a roční doby provozu

6.4.3 Model výpočtu roční výroby energie fotovoltaických panelů

Degradaci fotovoltaických panelů lze vypočítat z určení roční výroby energie, z dopadu globálního slunečního záření, aktivní celkové plochy fotovoltaického pole a celkové účinnosti panelů podle vzorce:

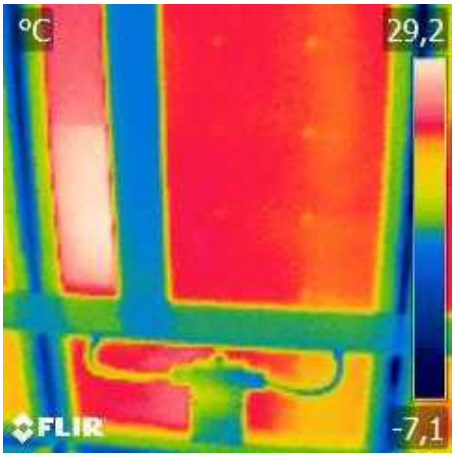
$$Ev = A * r * H * PR \; [kWh/rok] \tag{6.1}$$

kde Ev je vypočtená hodnota výroby elektřiny [kWh/rok], H je dopadající globální sluneční záření $[kWh/m^2/rok]$, A je aktivní celková plocha $[m^2]$, r účinnost panelů a PR je koeficient ztrátovosti(trafa, střídačů, vodičů) volí se v rozmezí $0,5$ až $0,9$, defaultní hodnota je $0,75$. Tabulka s teoretickou roční výrobou je uvedena v dosažených výsledcích (Tab.7.2).

7 VÝSLEDKY ANALÝZY PANELŮ

7.1 Termovizní měření

Měřením termokamerou bylo vybráno sedm panelů, které jevily známky největšího poškození a tři, které tyto známky poškození nejevily. Tyto panely byly demontovány a převezeny do laboratoře k dalšímu zkoumání. Všechny záznamy měření z termo kamery jsou uvedeny v příloze (A). Zde je vyobrazen článek (označen A5-07), který v dalších testech dopadl nejhůře.

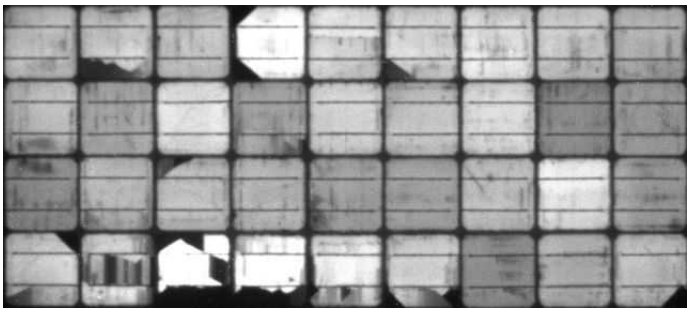


Obr. 7.1: Termovizní měření panelu A5-07

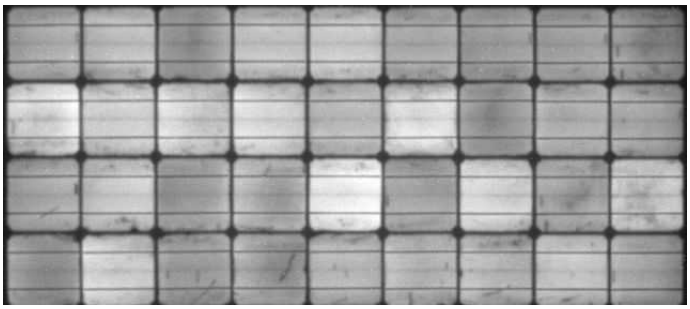
Panely označeny A5-13, B4-14 a B5-20 nejevily při kontrole žádné známky poškození a byly vybrány náhodně po měření. Bohužel z tohoto důvodu chybí snímky z termokamery. U ostatních byly patrné poruchy jednoho či více článků v panelu.

7.2 Elektroluminiscence

Metodou byly zjištěné časté rozpady článků, prasklé články, ale i chyby ve výrobním procesu. Snímky všech měřených panelů jsou uvedeny v příloze (B). Na snímcích jsou uvedeny články, které v testu vykazovaly největší a nejmenší poruchy článků.
Na snímku (Obr. 7.2) je vidět rozpad článků, což má za následek snížení výkonu panelu. Na druhém obrázku je naopak panel, kde je vše v pořádku (Obr. 7.3).
Další panel, který dopadl nejhůře je A5-06 (Obr. A.1), na snímku jsou vidět prasklé články i články, které už negenerují žádné fotony. U ostatních jsou patrné škrábance a nedokonalosti zpracování křemíku při výrobě.



Obr. 7.2: Panel označený A5-07, který dosahl nejmenší účinnosti



Obr. 7.3: Panel označený A5-13 s nejméně poškozenými články

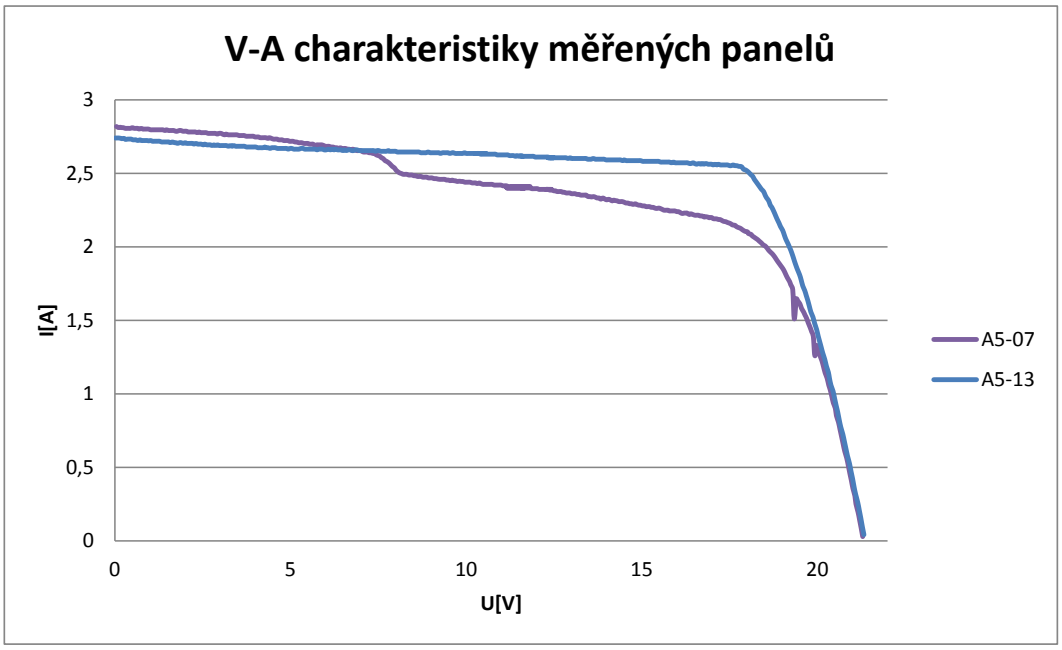
7.3 Sluneční simulátor

Měřením byla ověřena funkčnost jednotlivých panelů a změřena V–A charakteristika. Dále byla měřením zjištěna aktuální výkonnost jednotlivých panelů. Laboratoř, kde byly články ověřeny je jedním ze tří center v České republice provádějících toto měření. Výstup o provedené zkoušce lze využít pro případ reklamace. Jednotlivé výstupy jsou uvedeny v příloze (C).

7.3.1 V–A chrakteristiky

Protože bylo analyzováno deset fotovoltaických panelů, byly pro porovnání rozdílných výsledků vybrány dva, které dosáhli nejlepších a naopak nejhorších výsledků.

V horní části grafu je vidět pokles u panelu A5−07, tento jev je způsoben částečně proraženou bypassovou diodou.Význam bypassvých diod je uveden v teoretické části (5.2.4). Naopak na druhém průběhu nejsou známky poškození panelu patrné.



Obr. 7.4: V–A charakteristika panelu A5-07 a A5-13

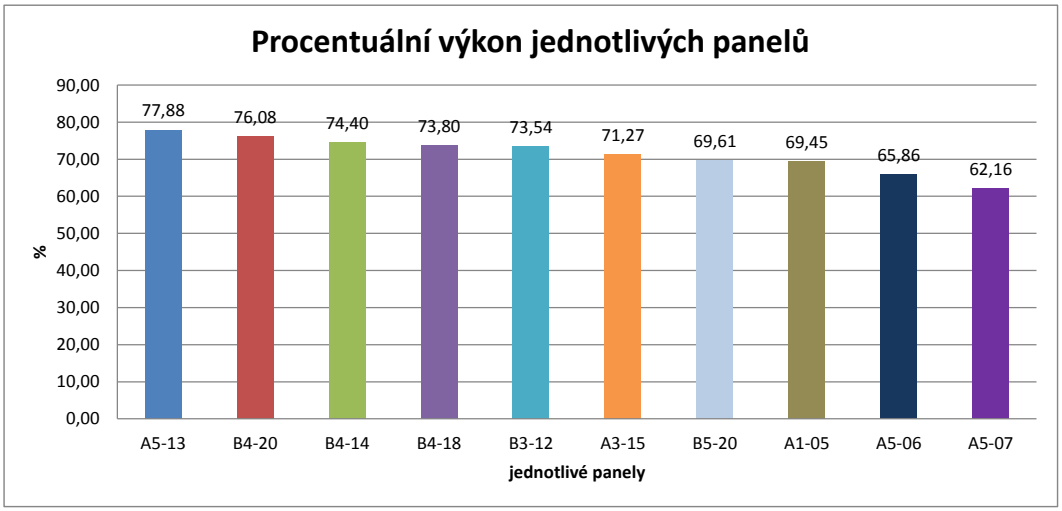
7.3.2 Aktuální výkonost článků

Program SPROT TESTER mimo vykreslení V–A charakteristiky dále změří i hodnoty napětí naprázdno, proudu nakrátko a maximální výkon. Z těchto hodnot můžeme vypočítat Fill Faktor (4.2.4), který nám určí maximální procentuální výkonnost panelu a účinnost článků EFF (4.2.5). V tabulce (Tab. 7.1) jsou zaneseny změřené hodnoty, vypočtena maximální výkonnost a účinnost článků.

Jak je vidět z uvedených hodnot, ne vždy maximální výkonnost panelu(FF) koresponduje s účinností článků (EFF). Zatímco článek A5-14 dosáhl nejvyšší hodnoty FF, panel B4-14 má nejvyšší účinnost článků. Pro lepší přehlednost jsou výsledky Fill Faktoru zaneseny v grafu (Obr. 7.5).

ozn. panelu	Pmpp [W]	Umpp [V]	Impp [A]	FF [%]	EFF [%]
A5-13	**45,387**	**17,852**	**2,542**	**77,88**	**9,97**
B4-20	43,305	17,335	2,498	76,08	8,52
B4-14	45,735	17,621	2,596	74,40	10,05
B4-18	42,602	17,358	2,454	73,80	9,36
B3-12	42,609	17,361	2,454	73,54	9,36
A3-15	43,478	17,372	2,503	71,27	9,55
B5-20	38,329	17,859	2,146	69,61	8,42
A1-05	43,505	16,951	2,567	69,45	9,56
A5-06	38,784	16,526	2,347	65,86	8,52
A5-07	**37,897**	**17,654**	**2,147**	**62,16**	**8,32**

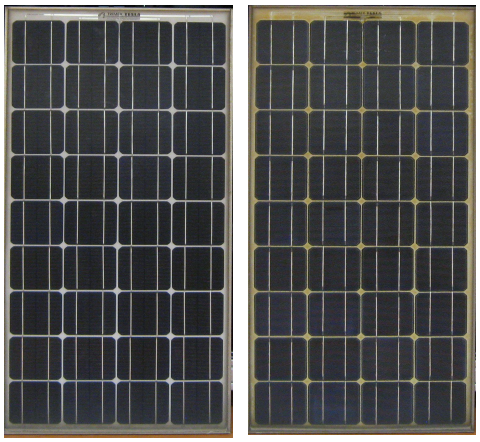
Tab. 7.1: Změřené a vypočtené hodnoty programem SPROT TESTER



Obr. 7.5: Vypočtená hodnota Fill Faktoru zanesena v grafu

7.4 Vizuální kontrola

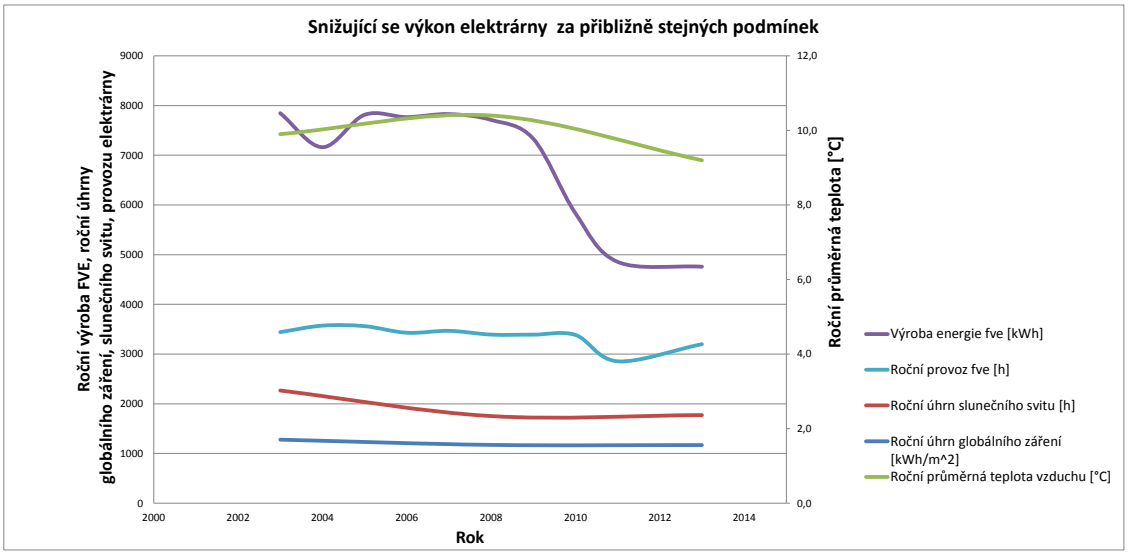
Metodou je na první pohled patrné, jak dochází na některých panelech ke žloutnutí krycí fólie, která následně tvoří překážku prostupu intenzitě slunečního záření (Obr. 7.6)



Obr. 7.6: Porovnání zežloutnutí krycí fólie panelů

7.5 Graf modelu degradace fv elektrárny

Přibližně od roku 2008 dochází u fotovoltaické elektrárny ke značnému poklesu výroby. Jak je vidět z grafu (Obr. 7.7) rapidní snižování výroby elektřiny není ovlivněno teplotou vzduchu, intenzitou slunečního záření ani dobou slunečního svitu, která se ve vyobrazených letech příliš nemění. Dokonce i doba provozu fotovoltaické elektrárny se od počátku měření výroby nemění kromě roku 2011.



Obr. 7.7: Graf zobrazující snižování roční výroby při stálosti teploty, intenzity a slunečním svitu

7.6 Výpočet výroby energie

Za předpokladu, že účinnost přeměny panelů v roce 1998 byla 14 %, můžeme ze vzorce (7.1) vypočítat, že elektrárna v roce 1998 mohla vyrábět okolo 9497 kWh/rok.

$$Ev = A * r * H * PR = 75 * 14 * 1206 * 0,75 = 9497\ kWh/rok \tag{7.1}$$

Hodnota intenzity (1206 $kWh/m^2/rok$) byla zvolena jako průměr z údajů, které máme k dispozici (Tab. 6.8). Aktivní plocha solárních panelů (75 m^2) je uvedena v údajích o fotovoltaické elektrárně (Tab. 6.1). Další výsledky výpočtů výroby elektrické energie jsou uvedeny v tabulce (Tab. 7.2). Bere se v úvahu, že panely snižují každý rok svoji účinnost o 0, 9 % až 1 %. Výrobce panelů garantuje pokles účinnosti panelů max. 20 % za 20 let.

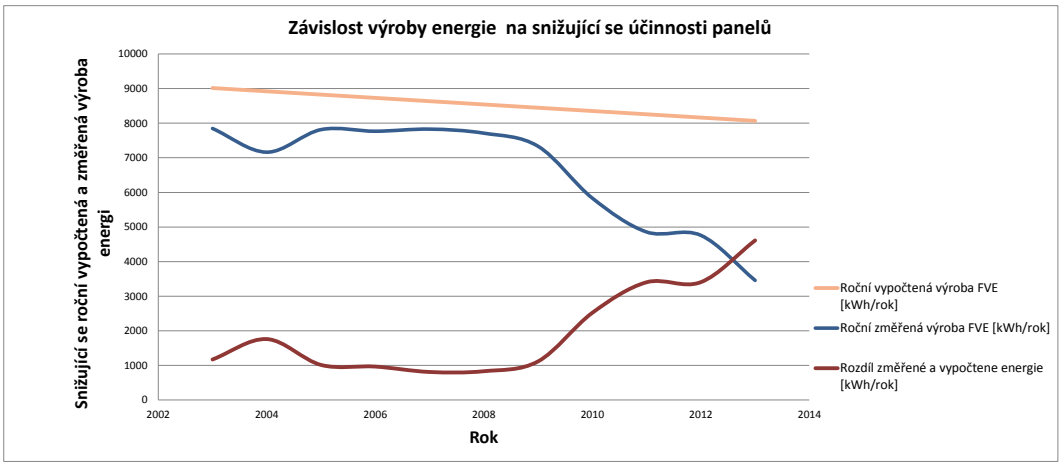
Rok	Účinnost panelů [%]	Výpočet roční výroba energie [kWh/rok]	Změřená roční výroba enerie [kWh/rok]	Rozdíl výroby [kWh/rok]
2003	13,30	9017	7847	1170
2004	13,16	8922	7163	1759
2005	13,02	8827	7815	1012
2006	12,88	8732	7768	964
2007	12,74	8637	7829	808
2008	12,60	8542	7712	830
2009	12,46	8447	7333	1114
2010	12,32	8353	5833	2520
2011	12,18	8258	4856	3402
2012	12,04	8163	4758	3405
2013	11,90	8068	3456	4612

Tab. 7.2: Porovnání roční vypočtené a změřené výroby energie

Z vypočtených a naměřených hodnot je patrné, že ke snižování účinnost by mohlo docházet rychleji než je garantováno výrobcem. Pro lepší přehlednost jsou hodnoty zaneseny v grafu (Obr. 7.8). U vypočtených hodnot není zahrnut sklon panelů, který tuto hodnotu může nepatrně snížit. Pro srovnání současné a teoretické výroby je však toto snížení zanedbatelné, neboť s panely nebylo od roku 2003 nijak manipulováno.

Pokud bychom tedy chtěli zjistit aktuální účinnost panelů vztaženou k změřeným hodnotám výroby energie, stačí ze vzorce (7.1) vytknout účinnost panelů takto:

$$r = \frac{Ev}{A * H * PR}\ [\%] \tag{7.2}$$



Obr. 7.8: Porovnání snižování výroby v závislosti na poklesu účinnosti článků

Výsledné hodnoty účinnosti jsou zaneseny v tabulce (Tab. 7.3)

Rok	Změřená vyrobená enerie [kWh/rok]	vypočtená účinnost [%]
2003	7847	11,56
2004	7163	10,55
2005	7815	11,51
2006	7768	11,44
2007	7829	11,53
2008	7712	11,36
2009	7333	10,80
2010	5833	8,59
2011	4856	7,15
2012	4758	7,01
2013	3456	5,09

Tab. 7.3: Vypočtená účinnost článků v závislosti na vyrobené energii

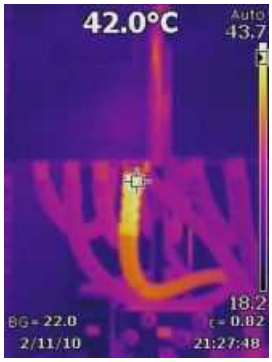
Vypočtené hodnoty účinnosti panelů v tabulce (Tab. 7.3) neodpovídají změřené účinnosti fotovoltaických panelů (Tab. 7.1), kde články dosahovaly průměrné účinnosti $9,17$ %. Díky této hodnotě můžeme říci, že panely za 17. let snížily svoji účinnost jakoby by byly v provozu více jak 34 let. Dále můžeme říci, že roční výroba není tolik ovlivněna degradací panelů a ve fotovoltaickém systému se nachazí další problém, díky kterému se výroba energie rapidně snižuje.

7.7 Poruchy snižující výkon fotovoltaické elektrárny Kosořín

V této části jsou uvedeny další poruchy, které nesouvisí s přeměnou energie fotovoltaických panelů, avšak se často vyskytují, rapidně snižují celkový výkon a mají obrovský vliv na funkčnost celého fotovoltaického systému. Tyto poruchy byly zjištěné na fotovoltaické elektrárně Kosořín, která měla být původně analyzována.

7.7.1 Nedotažené čí vyhřáté spoje

Přechodový odpor, který vzniká mezi vodičem a jeho uchycením má za následek přehřívání vodičů a občasné pády fotovoltaického systému. Tento problém může vzniknout už při montáži, ale i za normálního provozu. Proto je důležité jak kontrolovat fotovoltaické panely, tak i jejich vodiče a uchycení. Tento jev lze změřit běžnou termokamerou.



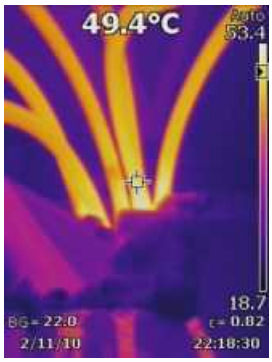
Obr. 7.9: Snímek nedotaženého spoje v trafostanici

7.7.2 Špatná volba vodičů

Tuto chybu nemůže investor ovlivnit. Chyba vzniká už při návrhu celého systému. Pokud je tato závada zjištěna, je nutná reklamace u dodavatele, který je za návrh a výstavbu odpovědný. Díky tomuto jevu dochází k pádům fotovoltaického systému právě tehdy, kdy elektrárna vyrábí nejvíce energie a investor tak přichází o své zisky.

7.7.3 Překousané vodiče

Nebývá tak častým jevem, ale je dobré si ho uvědomit. Bohužel mezi námi žijí i hlodavci, kterým nedělá problém vodič překousat. Je proto důležité dodržet správné postupy uložení vodičů a minimalizovat tak vznik tohoto problému. Zjištění závady



Obr. 7.10: Termo snímek ukazující špatnou volbu vodičů

ani následná oprava nebývají levnou záležitostí a přičteme-li k ceně opravy nulovou výrobu energie, můžeme se pohybovat ve statisících.

Obr. 7.11: Překousaný vodič od hlodavců

8 ZÁVĚR

V teoretické části diplomové práce jsou nejdříve popsány metody přeměny sluneční energie, princip fotovoltaických článků, používané materiály k výrobě fotovoltaických článků, složení a materiály fotovoltaických panelů. Dále jsou zde rozebrány měřené parametry fotovoltaických panelů, defekty, ke kterým u článků a panelů dochází a metody jejichž pomocí můžeme tyto vady analyzovat.
V praktické části je představena zkoumaná fotovoltaická elektrárna, její parametry, použité panely a střídače. Dále jsou v praktické části popsány měřící přístroje a jejich parametry. V neposlední řadě je zde uveden vzorec (7.1) jehož pomocí byla vypočtena teoretická roční výroba energie, ze které můžeme zjistit míru degradace fotovoltaických článků. Dále poruchy, k nimž často dochází u fotovoltaických systémů. Jednotlivá měření můžeme rozdělit do 4 kategorií.
První část se zabývá měřením pomocí termokamery. Touto metodou bylo vybráno několik panelů, které byly následně pozorovány v laboratoři.
Druhou částí je měření elektroluminiscence. Zde bylo změřeno deset panelů a u některých zjištěny rozpady článků, prasklé články a nedokonalost zpracování křemíku při výrobě.
Třetí část se zabývá měřením V–A charakteristiky jednotlivých panelů a zjištění dalších vad, jež nejsou předchozími testy zjistitelné. Výsledky tohoto měření jsou zaneseny v tabulce (Tab. 7.1), a jsou zde zvýrazněny panely, dosahující nejlepší a nejhorší účinnosti. Dále je vyobrazen graf (Obr. 7.5), který porovnává účinnost jednotlivých panelů.
Poslední analýzou byla kontrola povrchu fotovoltaických panelů. Tímto měřením nebyly zjištěné žádné viditelné vady kromě žloutnutí krycí fólie.
Dále je v praktické části zobrazen graf (Obr. 7.7), kde můžeme vidět, jak se snižuje roční výroba za přibližně stejných ročních klimatických podmínek. Vzhledem k této skutečnosti je v další části vypočtena roční výroba energie. Z tohoto výpočtu je patrné, že elektrárna už od roku 2003 vyrábí méně energie, než by měla. Dále byla vypočtena účinnost panelů vztažená k změřeným ročním hodnotám výroby energie. Vyplývající skutečnost, že by články v roce 2013 pracovali pouze na cca 4 % (Tab. 7.3) je nesmyslná. Z měření V–A chatakteristiky totiž víme, že průměrná účinnost článků měřených panelů je $9,17$ %. Dá se tedy předpokládat, že tuto průměrnou hodnotu dosahuje celý fotovoltaický systém. Díky těmto hodnotám můžeme říci, že problém s výrobou energie je hlavně ovlivněn jiným přístrojem zapojeným ve fotovoltaické soustavě a že garance, kterou nám dává výrobce panelů tj. maximální snížení účinnosti o 20 % za 20 let byla překročena už v předchozích letech. Nevýhoda spojená s reklamací a zárukou garance učinnosti je, že po 20. letech provozu nám nikdo nemůže zaručit existenci firmy dodávaných panelů. Stejně tak tomu je

i v případě již neexistující firmy Trimex Tesla.
Jednou z možností, jak si uživatel může zjistit přibližný stav svého fotovoltaického systému, poskytuje systém PVGIS. Je dostupný na internetu a ze základních informací o fotovoltaické elektrárně dokáže vypočítat roční výrobu energie. Je důležité si ale uvědomit, že systém nebere v úvahu lokální intenzitu osvětlení a údaje o intenzitě byly aktualizovány naposledy v roce 2012.

LITERATURA

[1] *Sluneční soustava: Slunce. 2002, s. 1.* [online]. Dostupné z: <http://www.aldebaran.cz/astrofyzika/sunsystem/slunce.html>.

[2] BUREŠ, Jiří. *Solární konstanta. 2002, s. 1.*[online]. Dostupné z: <http://www.converter.cz/jednotky/solarni-konstanta.htm>.

[3] DUŠEK, Jiří. *Anatomie vakua. 2003, s. 1.*[online]. Dostupné z: <http://www.converter.cz/jednotky/solarni-konstanta.htm>.

[4] *Pružné PV moduly: 2. generace fotovoltaických panelů. 2011, s. 1.*[online]. Dostupné z: <http://www.fdt.cz/wp-content/uploads/2011/12/Pružné-PV-moduly-2-generace.pdf>.

[5] FEJFAR, Antonín. *Fotovoltaika druhé a třetí generace. 2006.*[online]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/3506-fotovoltaika-druhe-a-treti-generace?>.

[6] BECHNÍK, Bronislav. *Historie a perspektivy OZE: fotovoltaika, méně rozšířené technologie. 2009.*[online]. Dostupné z:<http://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/5517-historie-a-perspektivy-oze-fotovoltaika-mene-rozsirene-technologie>.

[7] PETERA, Jiří a Jan HEŘMAN. *Fotovoltaika. 2010, s. 30.*[online]. Dostupné z: <http://www.rescompass.org/IMG/pdf/Fotovoltaika.pdf>.

[8] LIBRA, M; POULEK, V. *Solární energie – perspektivní trend současnosti. Praha, 2006. 149 s. Česká zemědělská univerzita v Praze, Technická fakulta, Katedra fyziky.*

[9] LIBRA, Martin a Vladislav POULEK.*Fyzikální podstata fotovoltaické přeměny solární energie. 2005, roč. 2005, č. 1, s. 36.*[online]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/download/sv010532.pdf>.

[10] HOFMAN, Jiří. *MĚŘICÍ SYSTÉM PRO SLEDOVÁNÍ EFEKTIVITY FOTOVOLTAICKÉHO PANELU. Brno, 2010.*[online]. Diplomová. VUT Brno. Vedoucí práce doc. Ing. JIŘÍ VANĚK, Ph.D. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=27669.>.

[11] CHLEBOUN, Jiří. *DEGRADAČNÍ TESTY POLYMERNÍCH MATERIÁLŮ VYSTAVENÝCH KLIMATICKÝM PODMÍNKÁM. Brno, 2013.*Diplomová. VUT Brno. Vedoucí práce doc. Ing. JIŘÍ VANĚK, Ph.D.

[12] VANĚČEK, M. *Přeměna sluneční energie v energii elektrickou. Přeměna sluneční energie v energii elektrickou. 2000.*[online]. Dostupné z: <http://www.fzu.cz/popularizace/premena-slunecni-energie-v-energii-elektrickou>.

[13] MURTINGER, Karel; BERANOVSKÝ, Jiří; TOMEŠ, Milan. *Fotovoltaika : Energie ze slunce. Vyd. 1. Praha : EkoWATT, 2007. 81 s. ISBN 978-80-7366-100-7.*

[14] *Energie slunce – výroba elektřiny.* [online] 2011[cit.2012-02-16]. Dostupné z: <http://www.ekowatt.cz/cz/informace/energie-slunce\T1\textemdashvyroba-elektriny>.

[15] VOJÁČEK, Antonín. *Nové technologie pro levné i výkonné solární články. 2009.*[online]. Dostupné z: <http://automatizace.hw.cz/nove-technologie-pro-levne-i-vykonne-solarni-clanky>.

[16] Green, M. A., Emery, K., Hishikawa, Y., Warta, W. and Dunlop, E. D. *Solar cell efficiency tables (Version 38). Prog. Photovolt: Res. Appl., 19: 565–572. doi: 10.1002/pip.1150, (2011)*

[17] *Představujeme druhou generaci CIGS tenkovrstvých fotovoltaických panelů. 2010.* [online] Dostupné z: <http://www.solarninovinky.cz/?home/2010032102/predstavujeme-druhou-generaci-cigs-tenkovrstvych-fotovoltaickych-panelu>.

[18] TŮMA, Jan. *Solární články kopírují rostliny. 2013.* [online] Dostupné z: <http://3pol.cz/1483-solarni-clanky-kopiruji-rostliny>.

[19] ADLEROVÁ, Iva.*Budeme mít na střechách nanokrystaly?. 2010.*[online]. [cit. 2014-12-15]. Dostupné z: <http://21stoleti.cz/blog/2010/09/17/budeme-mit-na-strechach-nanokrystaly/>.

[20] ABUŠINOV, Alexandr. *Plasty se podílejí na solárním boomu. 2010.*[online]. roč. 2010, č. 3 [cit. 2014-12-15]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/plasty-se-podileji-na-solarnim-boomu.html>.

[21] INDRA, Jiří. *DEGRADACE SOLÁRNÍCH ČLÁNKŮ SVĚTLEM. Brno, 2010.*[online]. Diplomová. VUT Brno. Vedoucí práce doc. Ing. JIŘÍ VANĚK, Ph.D. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/xmlui/bitstream/handle/11012/16762/DIPL-2010_web.pdf?sequence=2&isAllowed=y>.

[22] *CCD kamery G2-CCD. Moravské přístroje a.s. 2008.* [cit. 2009-05-12]

[23] VANĚK, Jiří. *Diagnostické metody fotovoltaických článků založené na generačně-rekombinačních jevech. Brno, 2008.*[online]. Habilitační práce. VUT Brno. Dostupné z: <http://www.vutium.vutbr.cz/tituly/pdf/ukazka/978-80-214-3666-4.pdf>.

[24] *Diplomová práce-Zbyněk Vala*

[25] TOMEŠ. Milan. *Zkušenost soudního znalce z posuzování FVE v roce 2011. Ostrava, 2012. Unie soudních znalců.*

[26] KLADIVA, Roman. *DLOUHODOBÉ SLEDOVÁNÍ PARAMETRŮ FOTOVOLTAICKÝCH PANELŮ. Brno, 2013.*[online]. Diplomová práce. VUT Brno. Vedoucí práce Ing. Roman Gvritishili. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=68659.>.

[27] POSKYTNUTÁ.data. *Český Hydrometeorologický ústav. Brno, 2015.*

[28] FOTO. FVE Dukovany *Zdroj Wikipedie*

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

Wp	Nominální výkon fotovoltaických panelů - Watt peak
V–A	Volt-Ampérová charakteristika
ELCD Test	Elektroluminiscence – Electroluminescence Crack Detection Test
LBIC	Měření proudu indukovaným světlem – Light Beam Induced Current
ČIA	Český institut pro akreditaci
CVVOZE	Centrum Výzkumu a Využití Obnovitelných zdrojů Energie
IEC 60904-9	Mezinárodní standard - Část 9: Požadavky na výkon solárního simulátoru
CCD	Elektronická součástka pro snímání obrazové informace – Charge Coupled Device
ČHMÚ	Český hydrometeorologický ústav
PVGIS	Photovoltaic Geographical Information System
STC	Zkušební podmínky dány normou
ISPRA ESTI No 503	Specifikace testování fv panelů

ΔP_s	Výkon, který dopadne na povrch Země za jeden den [W]
r_z	Poloměr Země [m]
R_{zs}	Vzdálenost Země od Slunce [m]
W_z	Střední hodnota energie slunečního záření dopadající za jeden den na Zem [J]
I	Solární konstanta [$W * m^{-2}$]
hυ	Energie fotonů [eV]
I_{sc}	Maximální proud při daném osvětlení [A]
I_s	Saturační proud [A]
U_{oc}	Napětí naprázdno [V]
P_m	Maximální výkon [W]
FF	Fill factor [%]
η	Účinnost [%]
R	Reflexivita [-]
A	Aktivní celková ozářená plocha [m^2]
Eυ	Roční výroba energie [kWh/rok]
H	Dopadající globální intenzita za jeden rok [kWh/m^2/rok]
PR	Koeficient ztrátovosti fv systému [-]

SEZNAM PŘÍLOH

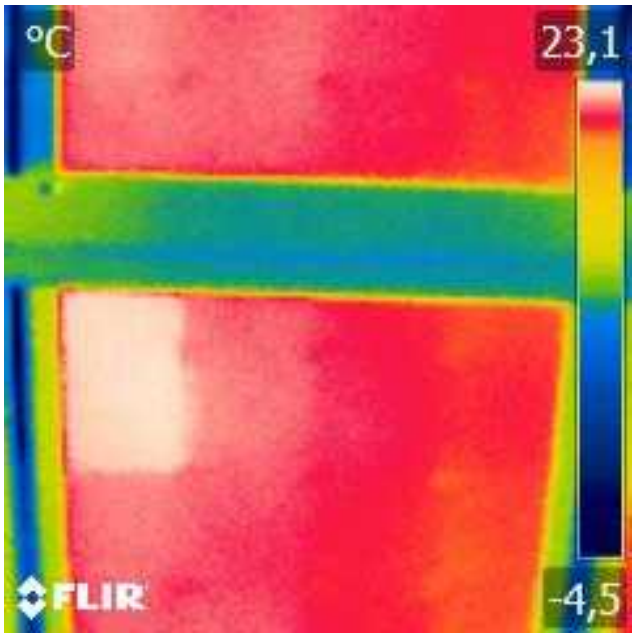
A Termografický sken panelů **77**

B Test Elektroluminiscence **81**

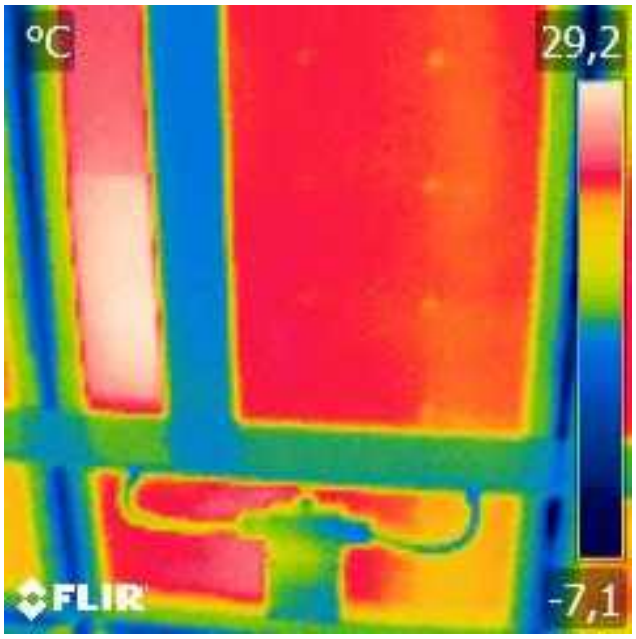
C Měření PASAN **84**

D Obsah přiloženého CD **94**

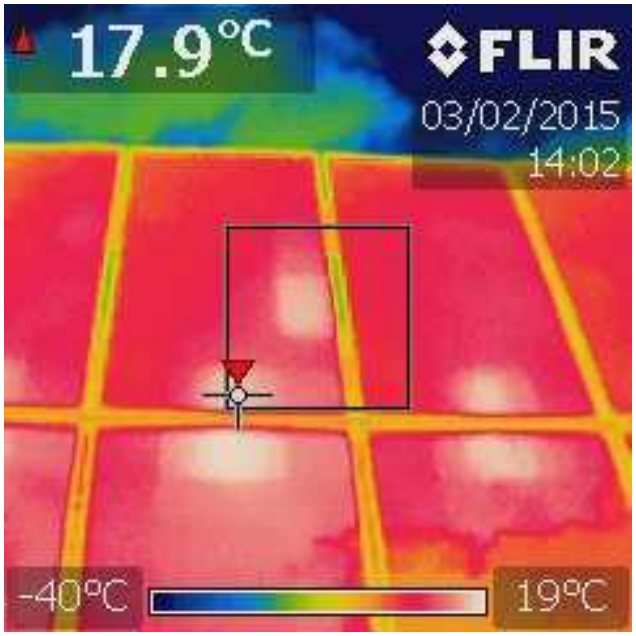
A TERMOGRAFICKÝ SKEN PANELŮ



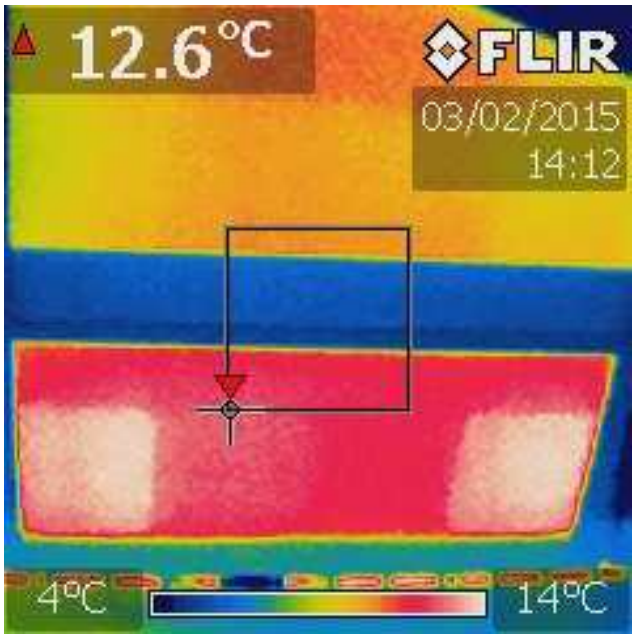
Obr. A.1: Termovizní sken panelu s označením A5-06



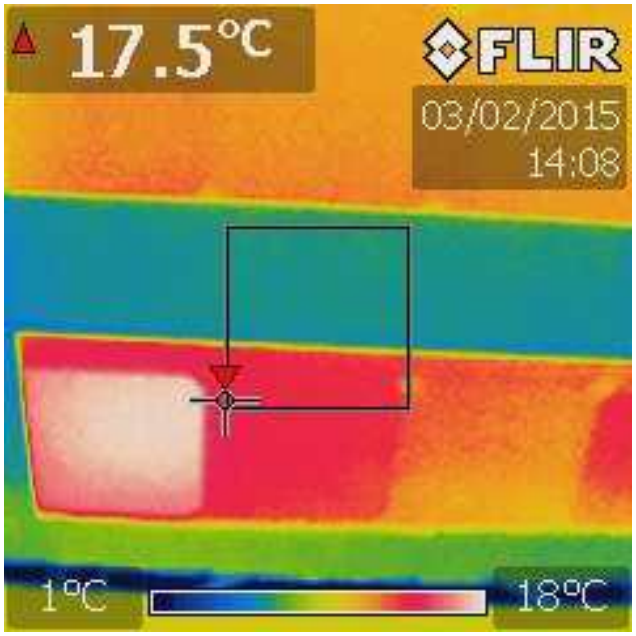
Obr. A.2: Termovizní sken panelu s označením A5-07



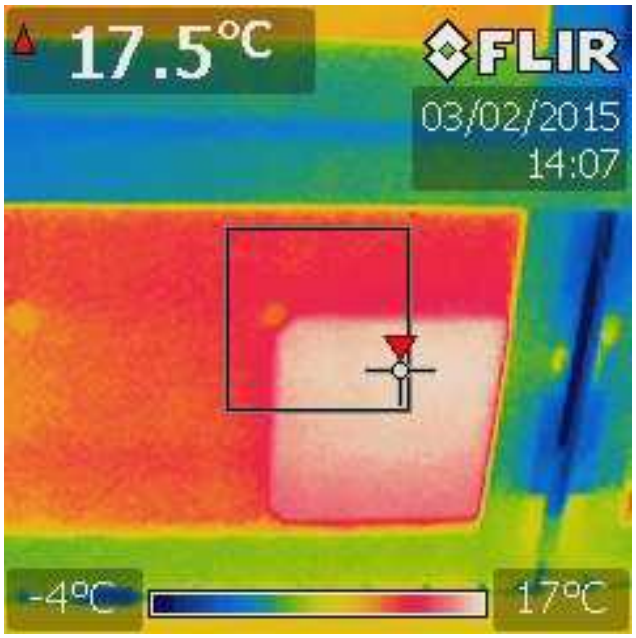
Obr. A.3: Termovizní sken panelu s označením A5-17



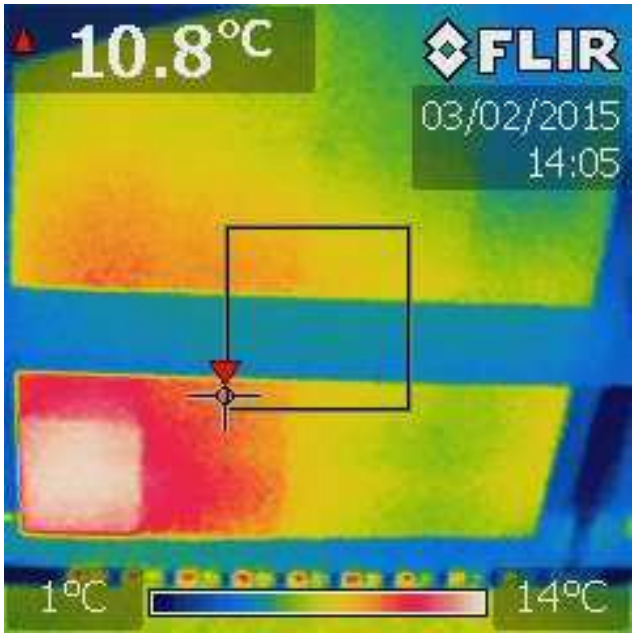
Obr. A.4: Termovizní sken panelu s označením B3-12



Obr. A.5: Termovizní sken panelu s označením B4-18

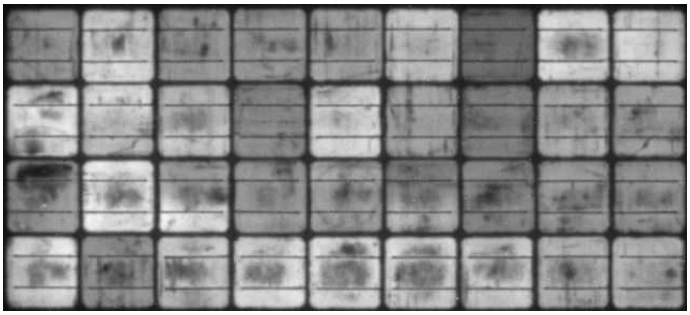


Obr. A.6: Termovizní sken panelu s označením B4-20

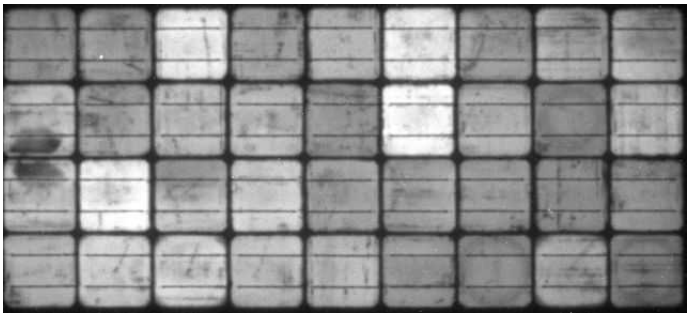


Obr. A.7: Termovizní sken panelu s označením B5-19

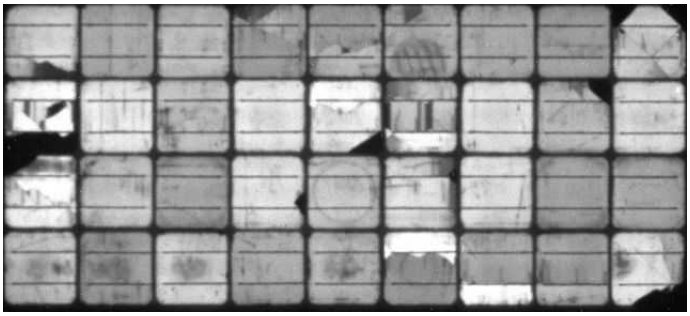
B TEST ELEKTROLUMINISCENCE



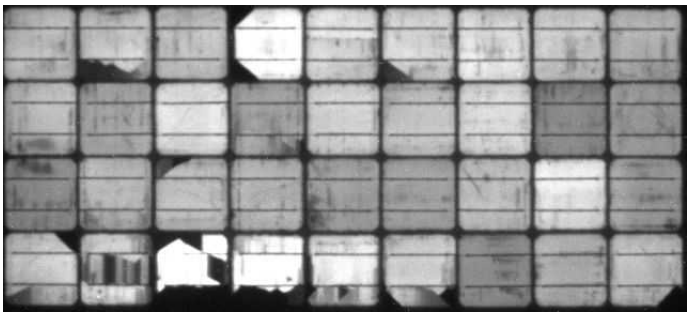
Obr. B.1: Elektroluminiscenční snímek panelu s označením A1-05



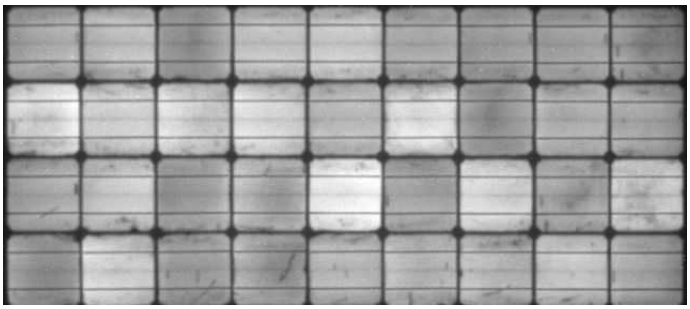
Obr. B.2: Elektroluminiscenční snímek panelu s označením A3-15



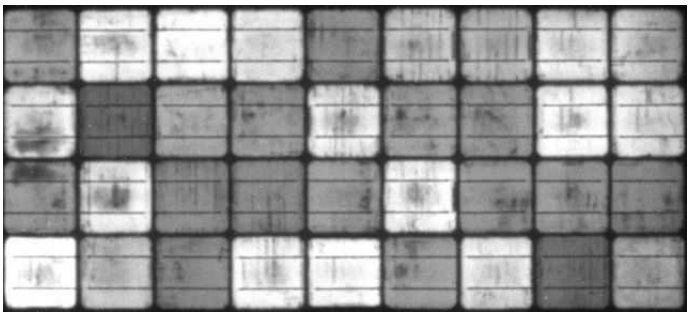
Obr. B.3: Elektroluminiscenční snímek panelu s označením A5-06



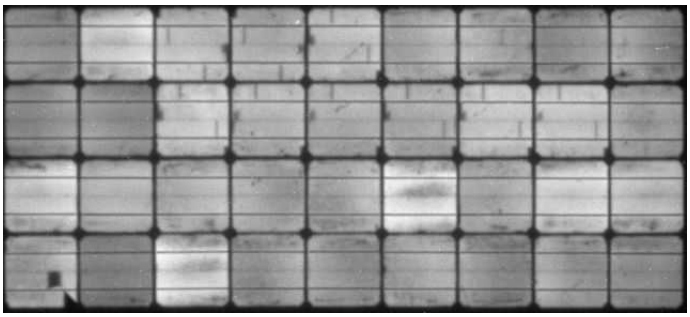
Obr. B.4: Elektroluminiscenční snímek panelu s označením A5-07



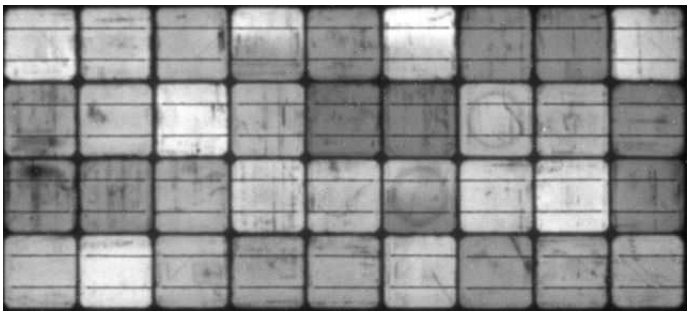
Obr. B.5: Elektroluminiscenční snímek panelu s označením A5-13



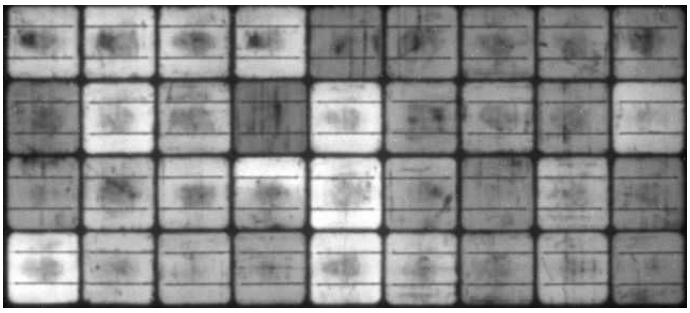
Obr. B.6: Elektroluminiscenční snímek panelu s označením B3-12



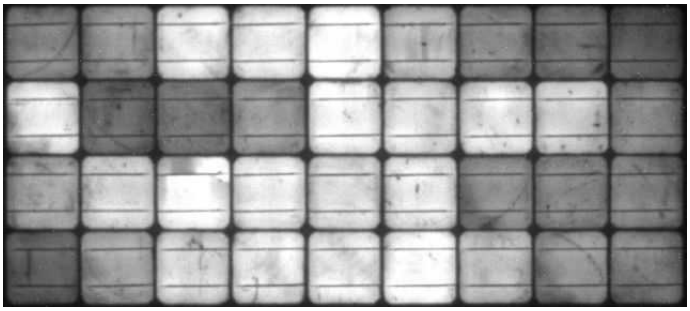
Obr. B.7: Elektroluminiscenční snímek panelu s označením B4-14



Obr. B.8: Elektroluminiscenční snímek panelu s označením B4-18



Obr. B.9: Elektroluminiscenční snímek panelu s označením B4-20



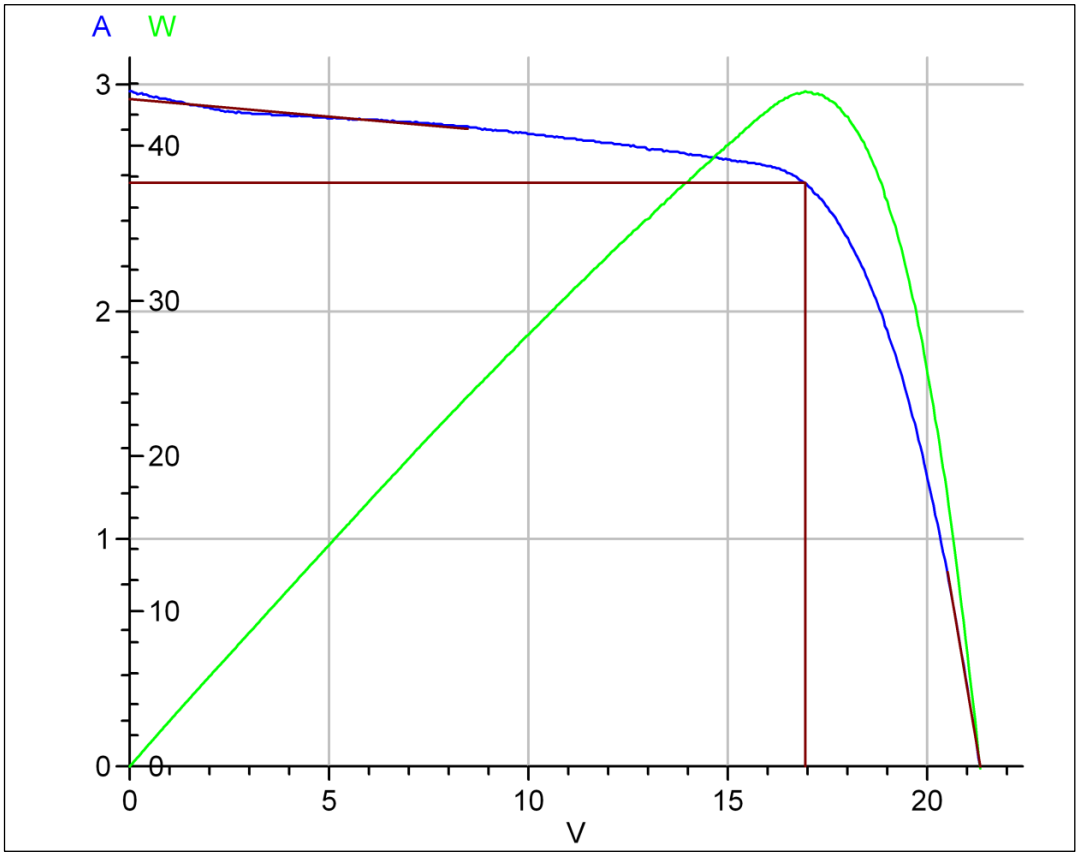
Obr. B.10: Elektroluminiscenční snímek panelu s označením B5-20

C MĚŘENÍ PASAN

Výsledky měření volt-ampérové charakteristiky

Datum a čas měření:	18-02-15, 11-01
Výrobce:	TRIMEX TESLA
S/N	1201311950711 (A1-05) bez vad
Typ modulu:	M-S36-53

T_p	25.0 °C
$G_{(i)}$	1.0 kW/m^2
I_{sc}	2.936 A
U_{oc}	21.335 V
Eff.	9.56 %
FF	69.45 %
P_{mpp}	43.505 W
U_{mpp}	16.951 V
I_{mpp}	2.567 A
R_{ser}	1.0 Ohm
R_{sh}	64.3 Ohm



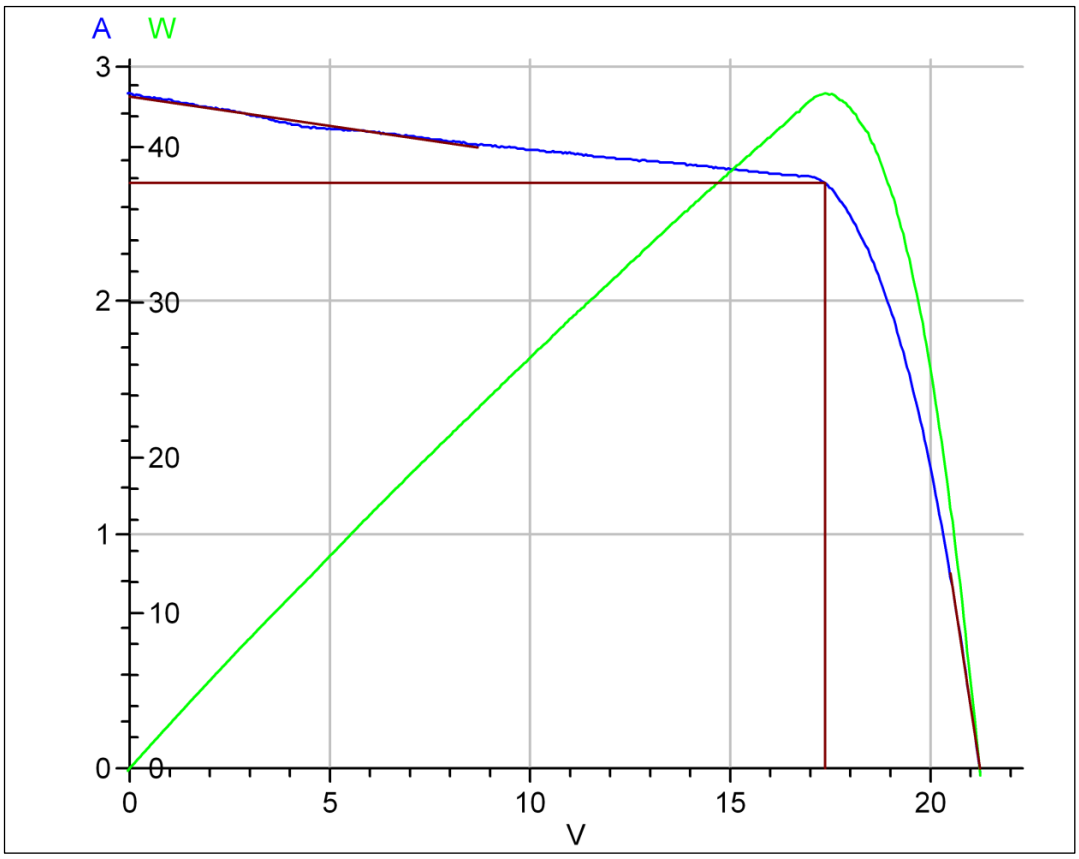
Podmínky měření:

Teplota okolí T_a:	23.7 °C
Ozářenost G	1.0 kW/m^2
Přepočtový koeficient TkU	-2.000 mV/K (mV/°C)
Přepočtový koeficient TkI	22.000 µA/cm^2/K (µA/cm^2/°C)

Výsledky měření volt-ampérové charakteristiky

Datum a čas měření:	18-02-15, 10-51
Výrobce:	TRIMEX TESLA
S/N	1201288950707 (A3-15) bez vad
Typ modulu:	M-S36-53

T_p	25.0 °C
$G_{(i)}$	1.0 kW/m^2
I_{sc}	2.873 A
U_{oc}	21.234 V
Eff.	9.55 %
FF	71.27 %
P_{mpp}	43.478 W
U_{mpp}	17.372 V
I_{mpp}	2.503 A
R_{ser}	0.9 Ohm
R_{sh}	39.9 Ohm



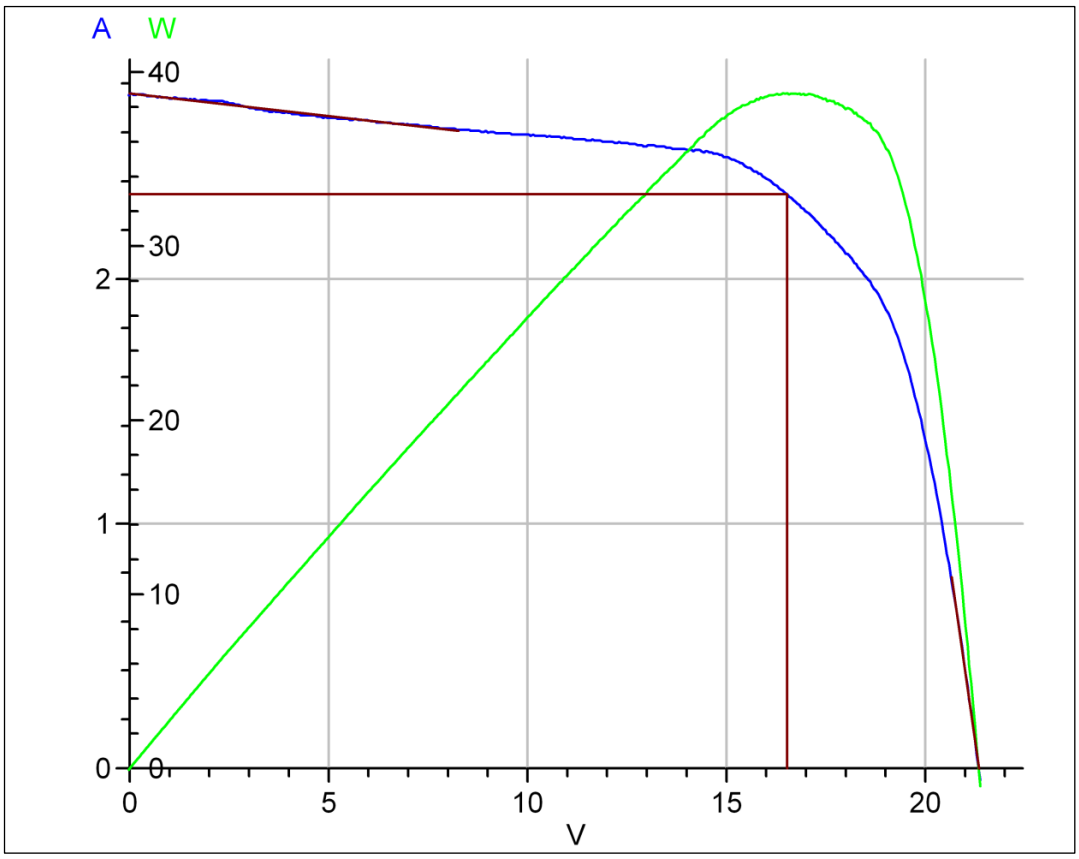
Podmínky měření:

Teplota okolí T_a:	23.8 °C
Ozářenost G	1.0 kW/m^2
Přepočtový koeficient TkU	-2.000 mV/K (mV/°C)
Přepočtový koeficient TkI	22.000 µA/cm^2/K (µA/cm^2/°C)

Výsledky měření volt-ampérové charakteristiky

Datum a čas měření:	18-02-15, 11-21
Výrobce:	TRIMEX TESLA
S/N	1201237950627 (A5-06)
Typ modulu:	M-S36-53

T_p	25.0 °C
$G_{(i)}$	1.0 kW/m^2
I_{sc}	2.759 A
U_{oc}	21.348 V
Eff.	8.52 %
FF	65.86 %
P_{mpp}	38.784 W
U_{mpp}	16.526 V
I_{mpp}	2.347 A
R_{ser}	0.9 Ohm
R_{sh}	54.0 Ohm



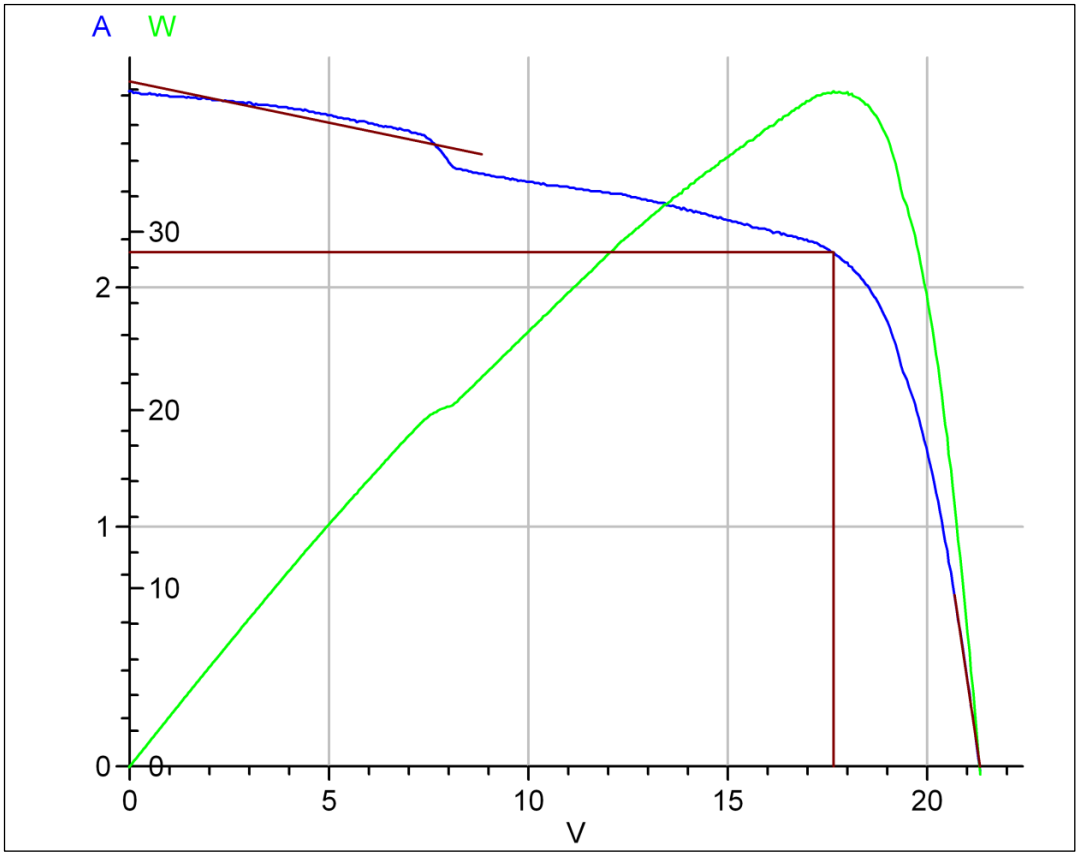
Podmínky měření:

Teplota okolí T_a:	23.7 °C
Ozářenost G	1.0 kW/m^2
Přepočtový koeficient TkU	-2.000 mV/K (mV/°C)
Přepočtový koeficient TkI	22.000 µA/cm^2/K (µA/cm^2/°C)

Výsledky měření volt-ampérové charakteristiky

Datum a čas měření:	18-02-15, 11-18
Výrobce:	TRIMEX TESLA
S/N	1201242950627 (A5-07)
Typ modulu:	M-S36-53

T_p	25.0 °C
$G_{(i)}$	1.0 kW/m^2
I_{sc}	2.859 A
U_{oc}	21.324 V
Eff.	8.32 %
FF	62.16 %
P_{mpp}	37.897 W
U_{mpp}	17.654 V
I_{mpp}	2.147 A
R_{ser}	0.9 Ohm
R_{sh}	29.1 Ohm



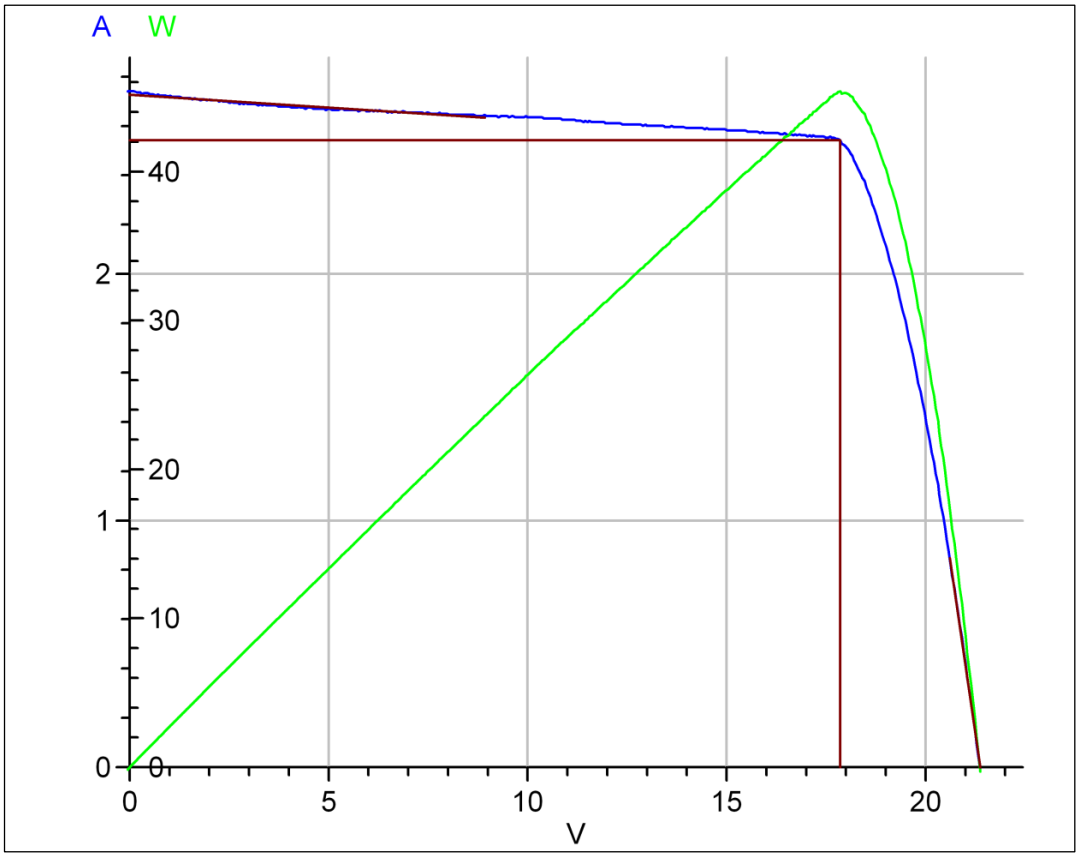
Podmínky měření:

Teplota okolí T_a:	23.7 °C
Ozářenost G	1.0 kW/m^2
Přepočtový koeficient TkU	-2.000 mV/K (mV/°C)
Přepočtový koeficient TkI	22.000 µA/cm^2/K (µA/cm^2/°C)

Výsledky měření volt-ampérové charakteristiky

Datum a čas měření:	18-02-15, 09-49
Výrobce:	TRIMEX TESLA
S/N	23012222021213 (A5-13) Nový bez vad
Typ modulu:	M-S36-53

T_p	25.0 °C
$G_{(i)}$	1.0 kW/m^2
I_{sc}	2.727 A
U_{oc}	21.372 V
Eff.	9.97 %
FF	77.88 %
P_{mpp}	45.387 W
U_{mpp}	17.852 V
I_{mpp}	2.542 A
R_{ser}	0.9 Ohm
R_{sh}	95.6 Ohm



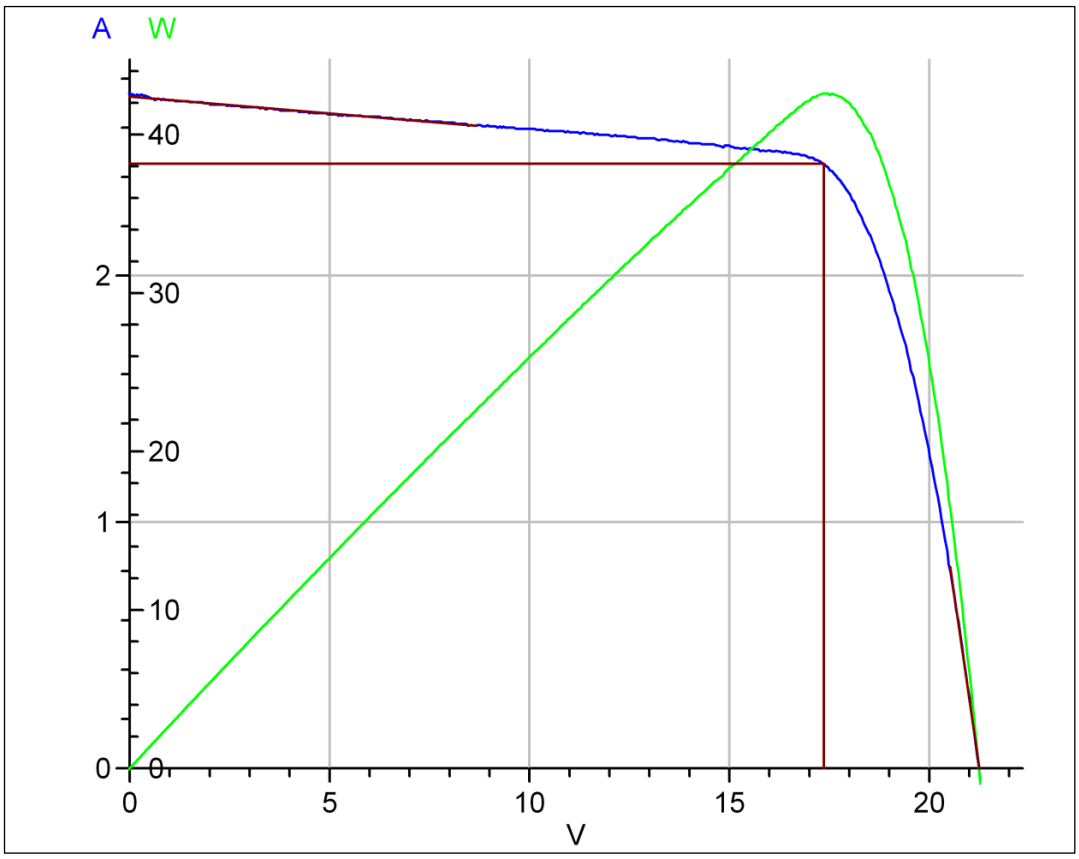
Podmínky měření:

Teplota okolí T_a:	23.6 °C
Ozářenost G	1.0 kW/m^2
Přepočtový koeficient TkU	-2.000 mV/K (mV/°C)
Přepočtový koeficient TkI	22.000 µA/cm^2/K (µA/cm^2/°C)

Výsledky měření volt-ampérové charakteristiky

Datum a čas měření:	18-02-15, 11-15
Výrobce:	TRIMEX TESLA
S/N	1201268950703 (B3-12)
Typ modulu:	M-S36-53

T_p	25.0 °C
$G_{(i)}$	1.0 kW/m^2
I_{sc}	2.727 A
U_{oc}	21.251 V
Eff.	9.36 %
FF	73.54 %
P_{mpp}	42.609 W
U_{mpp}	17.361 V
I_{mpp}	2.454 A
R_{ser}	0.9 Ohm
R_{sh}	73.4 Ohm



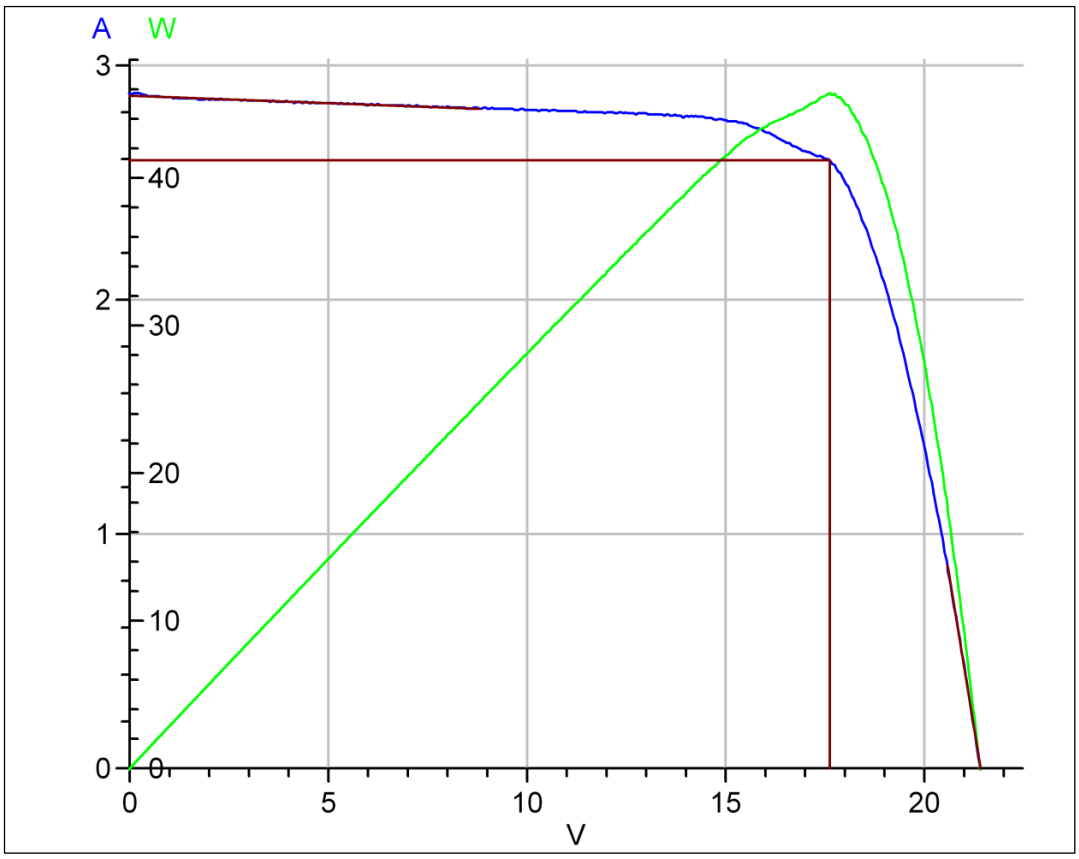
Podmínky měření:

Teplota okolí T_a:	23.7 °C
Ozářenost G	1.0 kW/m^2
Přepočtový koeficient TkU	-2.000 mV/K (mV/°C)
Přepočtový koeficient TkI	22.000 µA/cm^2/K (µA/cm^2/°C)

Výsledky měření volt-ampérové charakteristiky

Datum a čas měření:	18-02-15, 10-25
Výrobce:	TRIMEX TESLA
S/N	23012203021119 (B4-14) Nový bez vad
Typ modulu:	M-S36-53

T_p	25.0 °C
$G_{(i)}$	1.0 kW/m^2
I_{sc}	2.871 A
U_{oc}	21.410 V
Eff.	10.05 %
FF	74.40 %
P_{mpp}	45.735 W
U_{mpp}	17.621 V
I_{mpp}	2.596 A
R_{ser}	1.0 Ohm
R_{sh}	159.2 Ohm



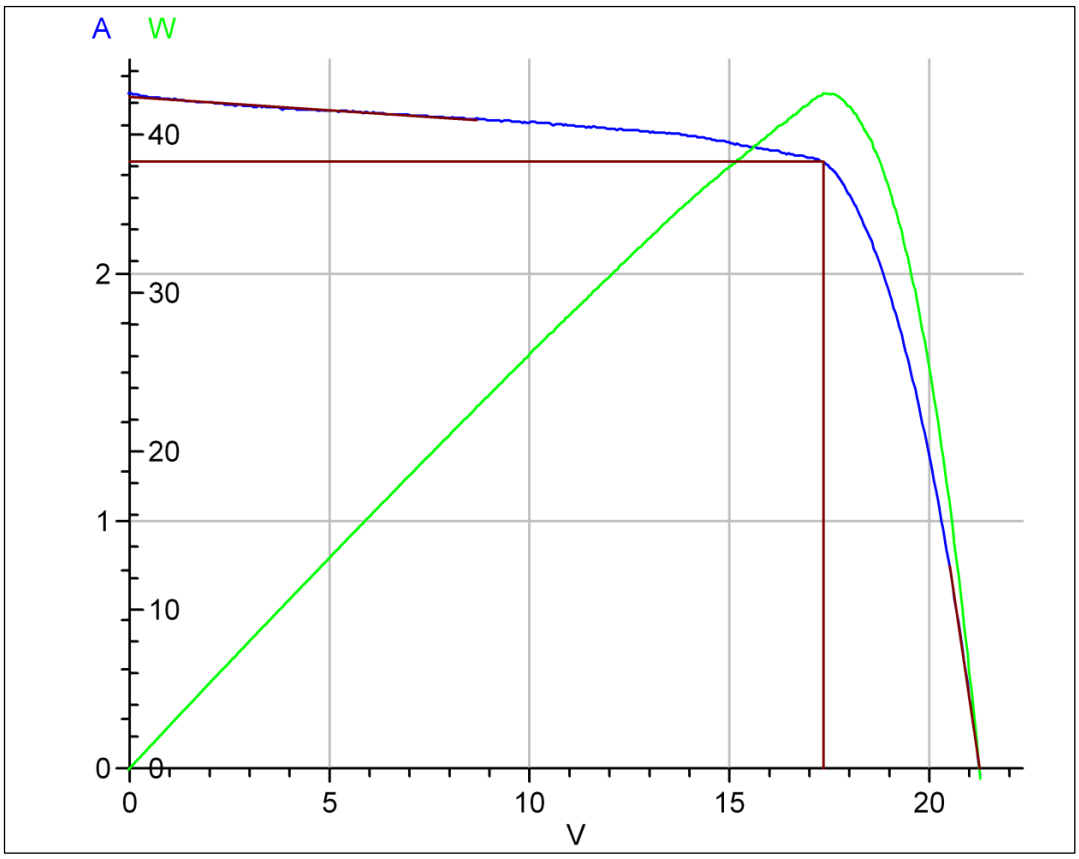
Podmínky měření:

Teplota okolí T_a:	23.8 °C
Ozářenost G	1.0 kW/m^2
Přepočtový koeficient TkU	-2.000 mV/K (mV/°C)
Přepočtový koeficient TkI	22.000 µA/cm^2/K (µA/cm^2/°C)

Výsledky měření volt-ampérové charakteristiky

Datum a čas měření:	18-02-15, 11-08
Výrobce:	TRIMEX TESLA
S/N	120152348950718 (B4-18)
Typ modulu:	M-S36-53

T_p	25.0 °C
$G_{(i)}$	1.0 kW/m^2
I_{sc}	2.716 A
U_{oc}	21.257 V
Eff.	9.36 %
FF	73.80 %
P_{mpp}	42.602 W
U_{mpp}	17.358 V
I_{mpp}	2.454 A
R_{ser}	0.9 Ohm
R_{sh}	92.9 Ohm



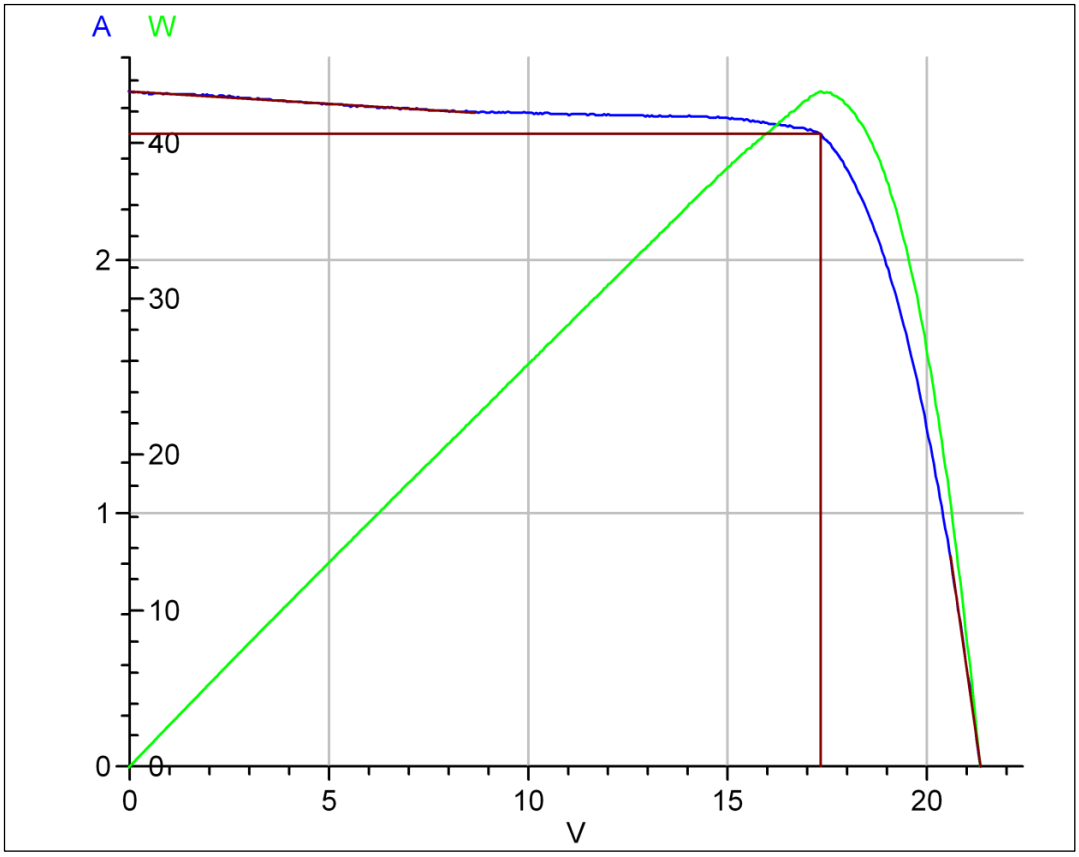
Podmínky měření:

Teplota okolí T_a:	23.6 °C
Ozářenost G	1.0 kW/m^2
Přepočtový koeficient TkU	-2.000 mV/K (mV/°C)
Přepočtový koeficient TkI	22.000 µA/cm^2/K (µA/cm^2/°C)

Výsledky měření volt-ampérové charakteristiky

Datum a čas měření:	18-02-15, 11-24
Výrobce:	TRIMEX TESLA
S/N	1201243950628 (B4-20)
Typ modulu:	M-S36-53

T_p	25.0 °C
$G_{(i)}$	1.0 kW/m^2
I_{sc}	2.666 A
U_{oc}	21.349 V
Eff.	9.51 %
FF	76.08 %
P_{mpp}	43.305 W
U_{mpp}	17.335 V
I_{mpp}	2.498 A
R_{ser}	0.9 Ohm
R_{sh}	102.7 Ohm



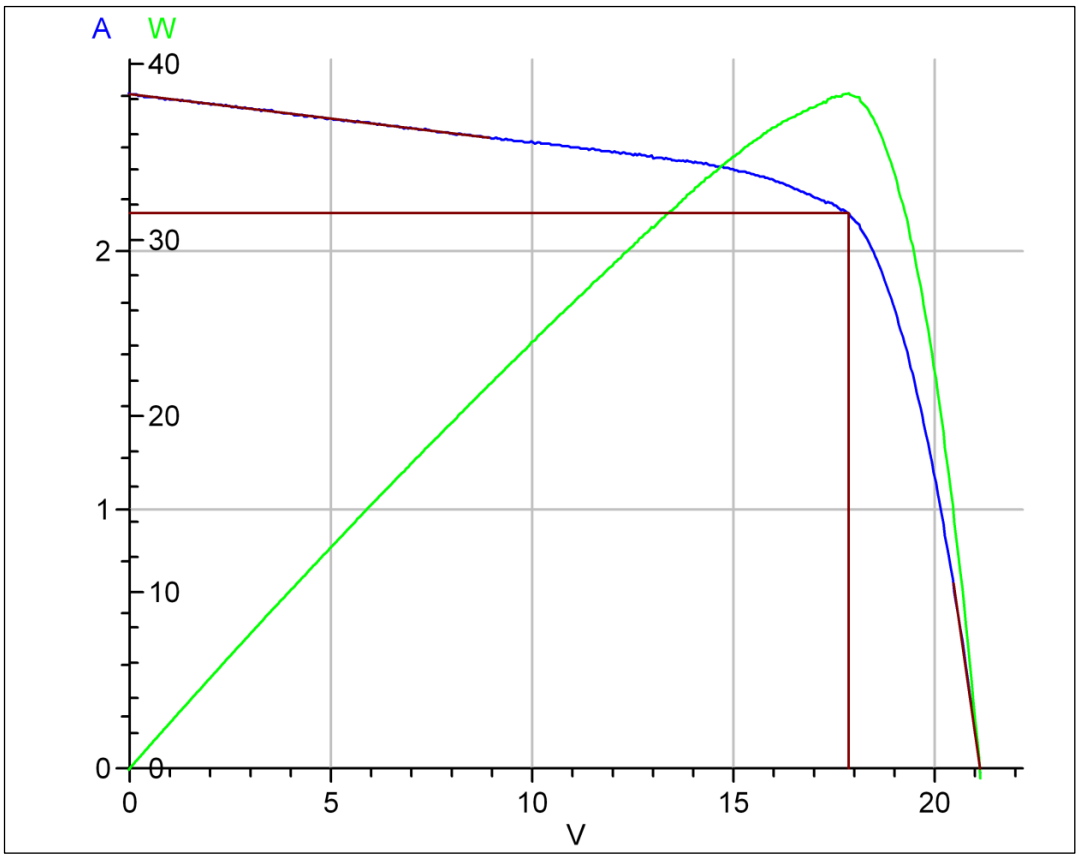
Podmínky měření:

Teplota okolí T_a:	23.7 °C
Ozářenost G	1.0 kW/m^2
Přepočtový koeficient TkU	-2.000 mV/K (mV/°C)
Přepočtový koeficient TkI	22.000 µA/cm^2/K (µA/cm^2/°C)

Výsledky měření volt-ampérové charakteristiky

Datum a čas měření:	18-02-15, 10-34
Výrobce:	TRIMEX TESLA
S/N	1201097940927 (B5-20) bez závad
Typ modulu:	M-S36-53

T_p	25.0 °C
$G_{(i)}$	1.0 kW/m^2
I_{sc}	2.607 A
U_{oc}	21.123 V
Eff.	8.42 %
FF	69.61 %
P_{mpp}	38.329 W
U_{mpp}	17.859 V
I_{mpp}	2.146 A
R_{ser}	0.9 Ohm
R_{sh}	52.9 Ohm



Podmínky měření:

Teplota okolí T_a:	23.8 °C
Ozářenost G	1.0 kW/m^2
Přepočtový koeficient TkU	-2.000 mV/K (mV/°C)
Přepočtový koeficient TkI	22.000 µA/cm^2/K (µA/cm^2/°C)

D OBSAH PŘILOŽENÉHO CD

Na přiloženém médiu v hlavním adresáři najdete hlavní dokument. Dále je v hlavním adresáři složka „přílohy“, zde najdete další tři složky nazývající se „priloha_a“, „priloha_b“, „mereni_pasan“. Ve složce „prilohy_a“ jsou všechny snímky z měření termokamerou, složka „prilohy_b“ obsahuje fotky ve vysokém rozlišení z měření elektroluminiscence. V poslední složce „mereni_pasan“ je výstupní dokument z měření slunečním simulátorem.