



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY

A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

DEGRADACE FOTOVOLTAICKÉHO MODULU
VLIVEM RŮZNÝCH KLIMATICKÝCH PODMÍNEK

PV MODULE DEGRADATION DUE TO DIFFERENT CLIMATIC CONDITIONS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Jiří Kuthan

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Kristýna Jandová, Ph.D.

BRNO 2017

Zadání

Seznamte se s principy činnosti fotovoltaických modulů se zaměřením na degrační vlivy, které ovlivňují činnost a životnost solárních systémů. Změřte různými diagnostickými metodami míru degradace solárního modulu při různých klimatických podmínkách. Proveďte analýzu a vyhodnocení naměřených dat.

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá teoretickým rozбором činnosti solárních článků a jejich rozdělením. Dále jsou probrány degradační vlivy a popisovány diagnostické metody používané k detekci chyb. V praktické části práce je proměřován fotovoltaický modul z OFF – GRID ostrovního solárního systému.

Klíčová slova

Fotovoltaika, fotovoltaický modul, degradace, diagnostické metody

Abstract

This Bachelor's thesis deals with the theoretical analysis of the function of solar links and their sorting. It further looks on the degradation impacts and describes the diagnostical methods used for detecting defects. The practical part of this project examines the photovoltaic module from OFF-GRID solar system.

Keywords

Photovoltaics, photovoltaic module, degradation, diagnostical methods

Bibliografická citace:

KUTHAN, J. *Degradace fotovoltaického modulu vlivem různých klimatických podmínek*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017. 51 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Kristýna Jandová, Ph.D.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Degradace fotovoltaického modulu vlivem různých klimatických podmínek jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské 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 bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si 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.

V Brně dne: **8. června 2017**

.....

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucí bakalářské práce Ing. Kristýně Jandové, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování projektu.

V Brně dne: **8. června 2017**

.....
podpis autora

Obsah

1	Úvod.....	1
2	Solární články.....	2
2.1	Princip činnosti.....	2
2.2	Druhy článků.....	3
2.2.1	Monokrystalický článek.....	3
2.2.2	Polykrystalický článek.....	3
2.3	Náhradní schéma FV článku.....	3
2.4	Solární systémy.....	4
2.4.1	ON – GRID spotřebitelský systém.....	4
2.4.2	ON – GRID hybridní systém.....	5
2.4.3	OFF – GRID ostrovní systém.....	5
3	klimatické podmínky.....	6
3.1	Sluneční záření.....	6
3.2	Počasí.....	9
3.2.1	Sníh.....	9
3.2.2	Děšť, kroupy.....	11
3.3	Vlhkost.....	11
3.4	Teplota.....	11
4	fv modul.....	15
4.1	Technologie křemíkového modulu.....	15
4.2	Technologie tenkovrstvých modulů.....	16
5	Defekty fotovoltaických modulů.....	17
5.1	Potenciálem indukovaná degradace.....	17
5.1.1	Co je to PID.....	17
5.1.2	PID resistantní moduly.....	17
5.1.3	Vznik PID.....	18
5.1.4	Vliv klimatických podmínek.....	19
5.1.5	Vliv použitých panelů.....	19
5.1.6	Důsledky PID.....	19
5.2	Hot Spots.....	20
5.3	Snail Trails.....	20
5.4	Degradace dopadajícím zářením.....	20
5.5	Delaminace FV modulu.....	21
5.6	Neobroušené hrany článků.....	21
6	Diagnostické metody.....	22
6.1	Optická měření.....	22

6.1.1	LBIC (Light Beam Induced Current)	22
6.1.2	Měření pomocí termokamery	22
6.1.3	Elektroluminiscence	24
6.2	Měření elektrických parametrů	24
6.2.1	Měření V-A charakteristik	24
6.2.2	Sluneční simulátor s testerem	25
7	Praktické měření	26
7.1	Měřený FV modul	26
7.2	Doba měření	27
7.3	Měření	27
7.3.1	V-A charakteristika -1. měření	27
7.3.2	V-A charakteristika - 2.měření	28
7.3.3	Elektroluminiscence - 1. měření	30
7.3.4	Elektroluminiscence - 2. měření	31
7.3.5	Měření termokamerou	32
7.3.6	Porovnání elektroluminiscence/termokamera	35
8	Závěr	36
9	seznam literatury	37

Seznam obrázků

Obrázek 1: princip činnosti FV článku (2).....	2
Obrázek 2: náhradní schéma FV článku (3).....	3
Obrázek 3: schéma zapojení ON-GRID spotřebitelského systému (4)	4
Obrázek 4: schéma zapojení ON-GRID hybridního systému (4).....	5
Obrázek 5: schéma zapojení OFF-GRID ostrovního systému (4)	5
Obrázek 6: spektrum slunečního záření (6).....	6
Obrázek 7: mapa dopadajícího slunečního záření (7).....	7
Obrázek 8: mapa doby trvání slunečního svitu (7).....	7
Obrázek 9: graf závislosti výstupního proudu na intenzitě záření (8).....	8
Obrázek 10: moduly pod sněhem (9)	9
Obrázek 11: tabulka sněhových oblastí (9)	10
Obrázek 12: mapa sněhových oblastí (10).....	10
Obrázek 13: závislost výstupního napětí a proudu modulu na teplotě (12)	12
Obrázek 14: závislost výkonu modulu na teplotě (12)	12
Obrázek 15: závislost efektivity FV článku na teplotě a intenzitě záření (12).....	13
Obrázek 16: závislost napětí modulu na teplotě (8)	13
Obrázek 17: složení FV modulu z c-Si (12)	15
Obrázek 18: složení křemíkového modulu (12).....	16
Obrázek 19: složení tenkovrstvého FV článku (13).....	16
Obrázek 20: vznik PID (15)	18
Obrázek 21: vliv PID na výkon modulu (15).....	19
Obrázek 22: jev Snail Trails (18)	20
Obrázek 23: delaminace FV modulu (19).....	21
Obrázek 24: Příklad špatného obroušení hran solárního článku	21
Obrázek 25: vliv emisivity na zdánlivou teplotu povrchu objektu (20)	23
Obrázek 26: ideální V-A charakteristiky (21).....	24
Obrázek 27: fotografie instalovaného modulu.....	26
Obrázek 28: V-A charakteristika	28
Obrázek 29: V-A charakteristika	29
Obrázek 30: výsledek měření elektroluminiscence 19.10.2016	30
Obrázek 31: výsledek měření elektroluminiscence 22.05.2017	31
Obrázek 32: měření pomocí termokamery 5.11.2016	32
Obrázek 33. měření termokamerou 6.3.2017	33
Obrázek 34: měření termokamerou 6.3.2017	33
Obrázek 35: měření termokamerou 2.5.2017	34
Obrázek 36: měření termokamerou 2.5.2017	34
Obrázek 37: porovnání elektroluminiscence/termokamera	35

Seznam tabulek

Tabulka 1: Výsledky měření V-A charakteristiky	27
Tabulka 2: Výsledky měření V-A charakteristiky	28

1 ÚVOD

Fotovoltaika jako ekologický zdroj energie se v poslední době rychle rozšiřuje, díky dotacím a jednoznačným výhodám sluneční energie, jakými jsou cena a snížení závislosti na globální síti. Z těchto a dalších důvodů se solární panely zapsaly do veřejného povědomí a dnes prakticky nenalezneme obec, ve které by se několik rodin, či firem neodvážilo investovat do solární energie. Samozřejmostí již jsou i celá pole posetá fotovoltaickými panely, tvořící solární elektrárny a elektrická energie jimi vyrobená bývá dodávána do energetické sítě za určené výkupní ceny regulované ERÚ (energetický regulační úřad).

Fotovoltaické moduly mají mnoho využití. Především jde o napájení elektrickou energií místa, která nejde například vzhledem k jejich poloze připojit do energetické sítě.

Vzhledem k tomu, že počáteční investice do této oblasti bývají nemalé, je třeba zajistit vysokou kvalitu fotovoltaických modulů a jejich dlouhou životnost, která se v současné době pohybuje mezi 20 a 30 lety nepřetržitého používání. V této oblasti se uplatňují různé diagnostické metody, například měření V-A charakteristiky, nebo elektroluminiscence. Pomocí nich se již při vývoji a výrobě fotovoltaických panelů kontroluje kvalita jednotlivých parametrů, a také se zkoumá možnost dalšího zlepšování kvality.

Bohužel, i ten nejkvalitnější fotovoltaický modul časem degraduje, a to zejména vlivem působících klimatických podmínek, jakým je během své činnosti vystaven. Těmito degračními vlivy a způsobem jejich měření se bude zabývat tato bakalářská práce.

Dlouhodobým cílem vědního oboru zabývajícího se fotovoltaikou je zvyšování výkonu solárních modulů, prodloužení životnosti, a vyšší odolnost proti degračním vlivům. Pro tyto cíle je více než důležité zkoumání těchto vlivů, jakož i vylepšování diagnostických metod, jejich zjednodušení, zvýšení efektivity. (1)

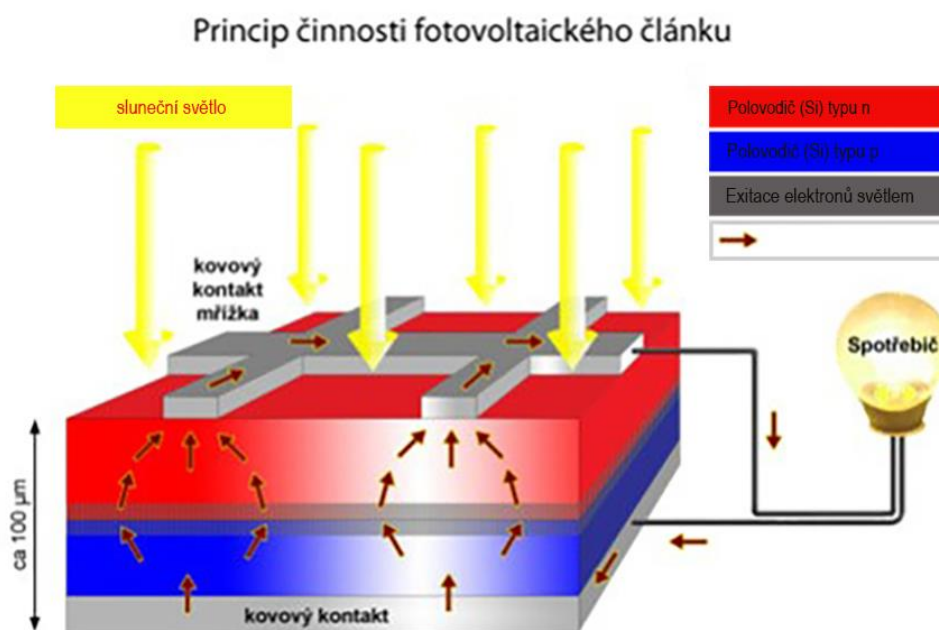
2 SOLÁRNÍ ČLÁNKY

V této části je popsán fyzikální princip činnosti článků a druhy článků.

2.1 Princip činnosti

Solární články využívají princip přeměny sluneční energie na energii elektrickou. Článek tvoří polovodičový materiál (nejčastěji křemík). Základní materiál je dotován příměsí N – typu (5. skupina periodické tabulky) a P – typu (3. skupina periodické tabulky). Vzniká P–N přechod, který je základním principem práce solárního článku. Za pokojové teploty dochází k ionizaci příměsí a volné elektrony přecházejí do P – typu polovodiče, volné díry přecházejí do N – typu. Dochází ke vzniku elektrického pole.

Dopadající fotony slunečního záření předávají energii elektronům v polovodiči a dochází ke generaci párů elektron – díra. Tyto páry jsou oddělovány elektrickým polem uvnitř polovodiče a vzniká napěťový rozdíl mezi kladnou a zápornou elektrodou článku, které jsou připojeny po obou stranách P–N přechodu, viz obrázek č. 1. Po připojení zátěže začne obvodem protékat stejnosměrný elektrický proud, jehož velikost je přímo úměrná ploše solárního článku a intenzitě dopadajícího záření. (2)



Obrázek 1: princip činnosti FV článku (2)

Typické napětí jednoho solárního článku činí asi 0,5 V. To je příliš malé pro praktické použití, proto se články spojují do sériového zapojení a typický výrobek obsahuje 24 článků (12 V), nebo 48 článků (24 V). Tyto pak tvoří fotovoltaický modul.

2.2 Druhy článků

V současnosti rozlišujeme články vyráběné pomocí krystalické technologie a pomocí tenkovrstvé technologie. Rozšířenější technologií je krystalická, která má oproti tenkovrstvé až 2,5 x vyšší účinnost. Z toho vyplývá, že panel vyrobený tenkovrstvou technologií vyžaduje 2,5 x větší plochu pro zachytávání slunečního záření. Jeho výhodou je ovšem lepší zachytávání rozptýleného světla. Díky tomu jeho celoroční účinnost převyšuje účinnost krystalických článků až o 10 %.

2.2.1 Monokrystalický článek

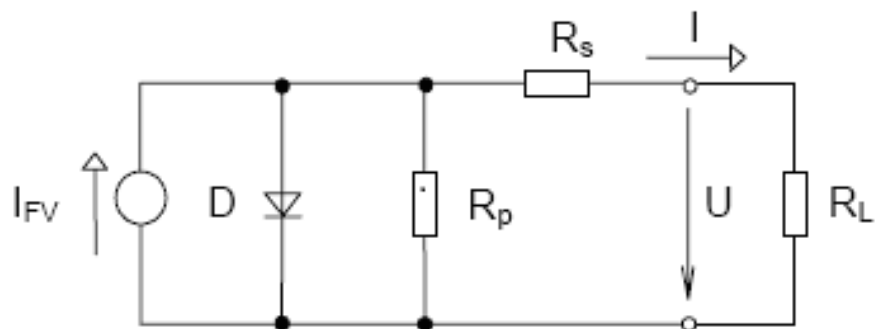
Skládá se z jednoho krystalu křemíku, to znamená, že všechny atomy jsou orientovány stejným směrem. Krystal je vyráběn pomalým tažením roztaveného křemíku a dosahuje zpravidla velikosti až 150 mm. Vyznačuje se stejnosměrnou strukturou a černým zabarvením. Takový článek dosahuje účinnosti 15–20 %. Monokrystalické články stárnou pomaleji než články polykrystalické.

2.2.2 Polykrystalický článek

Tvořen množstvím menších krystalků (zrn) různě orientovaných, o velikosti v řádu jednotek milimetrů. Polykrystalický článek je modře zbarven, struktura není stejnosměrná. Účinnost článku se pohybuje v rozmezí 12–14 %. Vzhledem k různé orientaci krystalů dokáže tento článek lépe absorbovat rozptýlené sluneční světlo, a tedy je vhodnější do míst se zhoršenými světelnými podmínkami, kde monokrystalický článek nemůže využít svou vyšší účinnost.

Výroba obou uvedených struktur se v minulosti lišila, výroba monokrystalů byla nákladnější. V současné době již technologický proces výroby pokročil a náklady na výrobu se zásadně neliší.

2.3 Náhradní schéma FV článku



Obrázek 2: náhradní schéma FV článku (3)

I_{FV} ... maximální generovaný proud

R_p ... svodový odpor

R_S ... sériový odpor

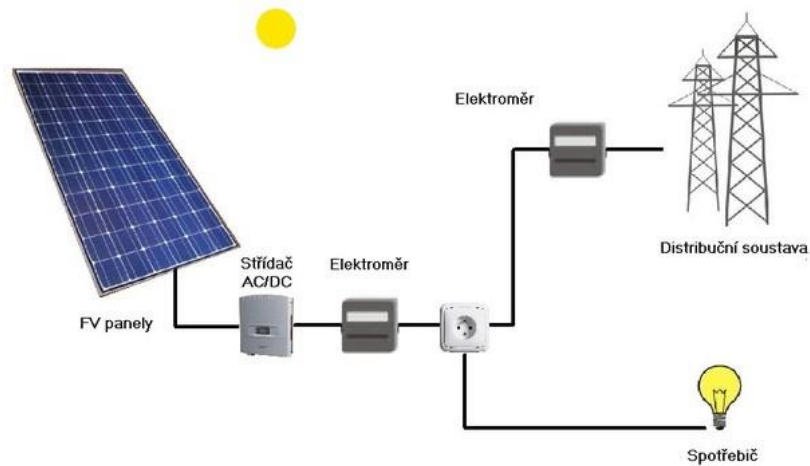
R_L ... zátěž

Z náhradního schématu na obrázku č. 2 vyplývá, že FV článek se chová jako fotodioda.

2.4 Solární systémy

Rozlišujeme několik druhů solárních systémů, lišících se především způsobem odvádění vyrobené energie. Schematické uspořádání těchto systémů je znázorněno na obrázcích č. 3, 4, a 5.

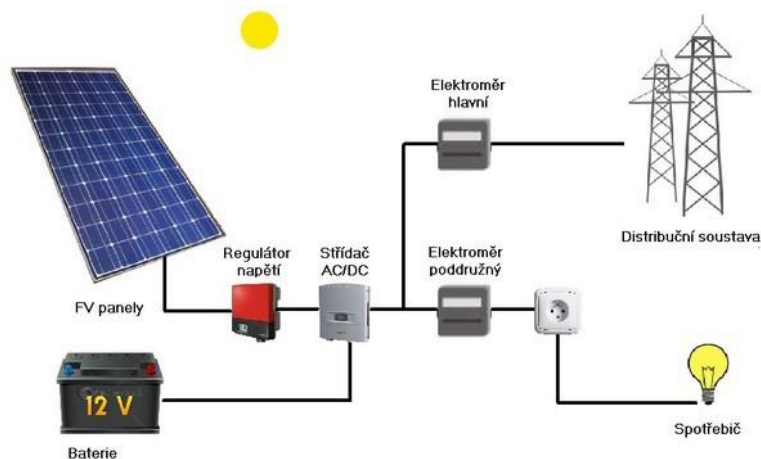
2.4.1 ON - GRID spotřebitelský systém



Obrázek 3: schéma zapojení ON-GRID spotřebitelského systému (4)

Většina vyrobené energie je produkována pro vlastní spotřebu. Přebytky jsou dodávány do veřejné distribuční sítě. ERÚ stanovuje výkupní částky za kWh odebrané energie, která je poté vyplacena dodavateli.

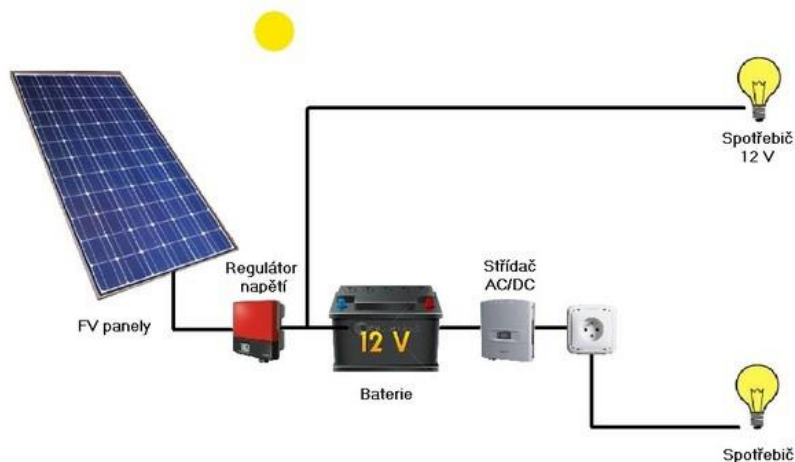
2.4.2 ON – GRID hybridní systém



Obrázek 4: schéma zapojení ON-GRID hybridního systému (4)

Tento systém primárně nabíjí baterii. Po jejím nabití je energie přeměrována do spotřebičů, případně do distribuční sítě.

2.4.3 OFF – GRID ostrovní systém



Obrázek 5: schéma zapojení OFF-GRID ostrovního systému (4)

Tento systém je využitelný primárně pro odlehlá místa, která není možno připojit do distribuční sítě. Například chaty, karavany. Využívá se ve vesmírném programu pro napájení mezinárodní vesmírné stanice, satelitů atd. energii z panelů je možno přímo využít pro napájení většinou 12 V spotřebičů (osvětlení). Zbytek energie je dodáván do baterie, ke které je připojen AC/DC střídač a napájí spotřebiče na 230 V.

3 KLIMATICKÉ PODMÍNKY

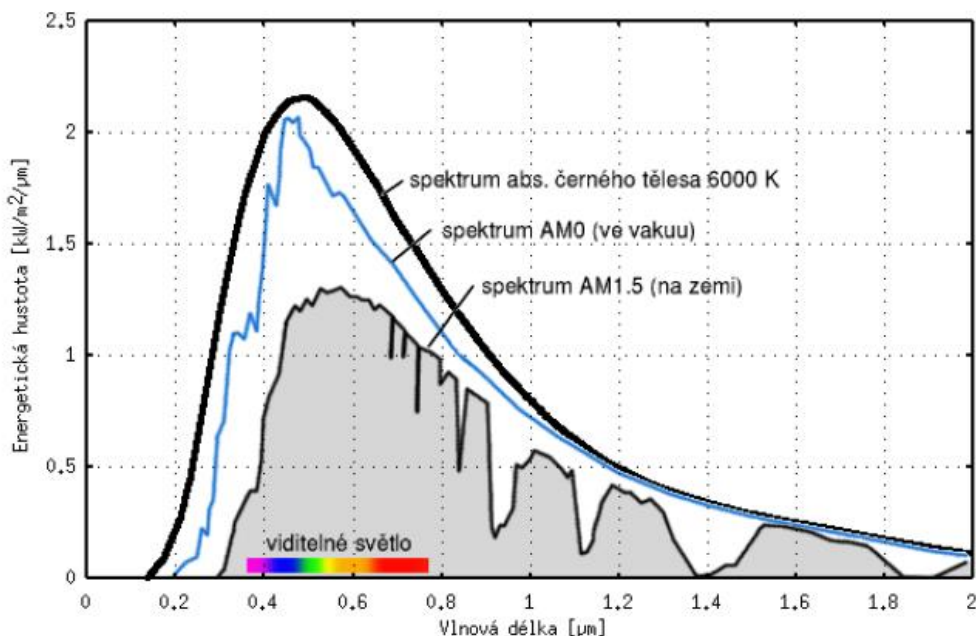
Na činnost FV modulů mají nemalý vliv klimatické podmínky panující v místě instalace. Pod pojem klimatické podmínky je možné zařadit například počasí, dalším druhem takových podmínek může být síla a druh dopadajícího slunečního záření, tlak, nebo teplota a vlhkost působící na moduly. V této části práce budou tyto jevy podrobněji rozebrány s ohledem na výkon modulů a na možný vznik defektů, na který mají tyto jevy vliv.

3.1 Sluneční záření

K uvolnění elektronů je zapotřebí, aby sluneční záření mělo dostatečnou energii. Šířka zakázaného pásu křemíku (Si) je asi 1,1 eV. Záření mající nižší energii není absorbováno. Záření mající energii vyšší než 1,1 eV je článkem absorbováno a dojde k vybuzení elektronů.

Počet fotonů je ve spektru slunečního záření rozložen nerovnoměrně, jak je vidět z obrázku č. 6. Energie fotonů pak klesá s rostoucí vlnovou délkou. Využitelná část záření tedy pokrývá celou část viditelného a část infračerveného záření. Hranice využitelnosti ve vztahu k šířce zakázaného pásu Si je přibližně 1100 nm.

Záření označované jako AM0 je záření procházející vesmírem, neovlivněné atmosférou země. Záření AM1.5 je spektrum záření po průchodu bezoblačnou, tedy ideální atmosférou. Toto má nižší energii, protože její část je pohlcena atmosférou a část se rozptýlí. Energie tohoto záření odpovídá 1 kW/m^2 . (5)

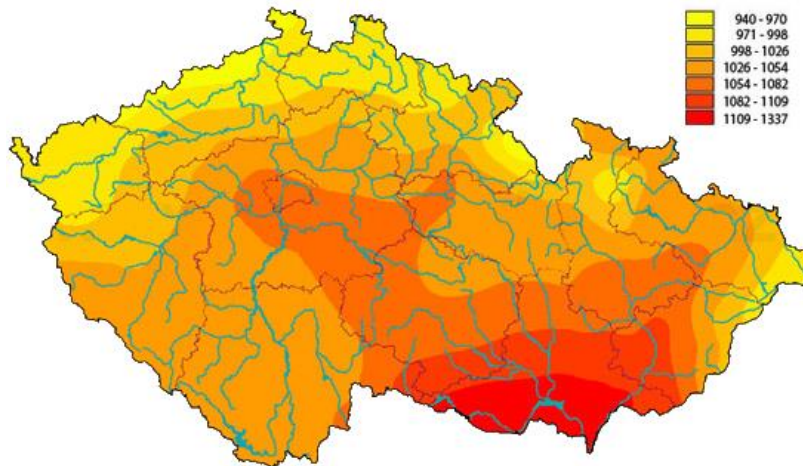


Obrázek 6: spektrum slunečního záření (6)

Intenzita a doba trvání slunečního záření se samozřejmě liší s ohledem na nadmořskou výšku, členitost krajiny (kopce, lesy) a zeměpisnou polohu. Výrazný vliv má rovněž čistota ovzduší.

Uvažujeme-li jako hlavní měřítko správného umístění zeměpisnou polohu, nejlépe vychází rovník, kde slunce svítí nejvíce a z nejlepšího úhlu. Zaměříme-li se na nadmořskou výšku a krajinu jako takovou, pak musíme uvažovat, že s rostoucí nadmořskou výškou obvykle přibývá terénních nerovností vytvářejících stín.

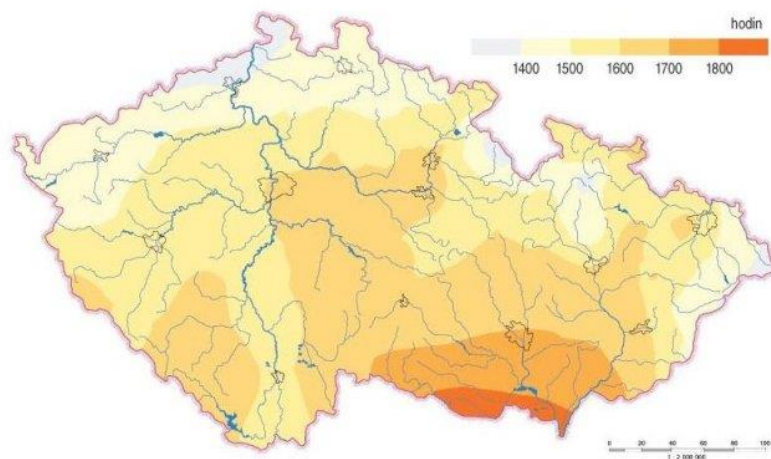
Mapka na obrázku č. 7 ukazuje intenzitu dopadajícího slunečního záření na 1 m². Údaje vycházejí z dlouhodobých meteorologických měření. Údaje na obrázku jsou v kWh.



Obrázek 7: mapa dopadajícího slunečního záření (7)

Vzhledem k tomu, že Česká republika leží v mírném podnebním pásmu s pravidelně se střídajícími ročními obdobími, je pravděpodobný vyšší výkon FV elektráren v letních měsících a výrazný útlum výkonu v podzimních měsících, kdy je největší oblačnost. Obrázek č. 8 ukazuje přibližnou celkovou dobu osvitů v různých částech České republiky.

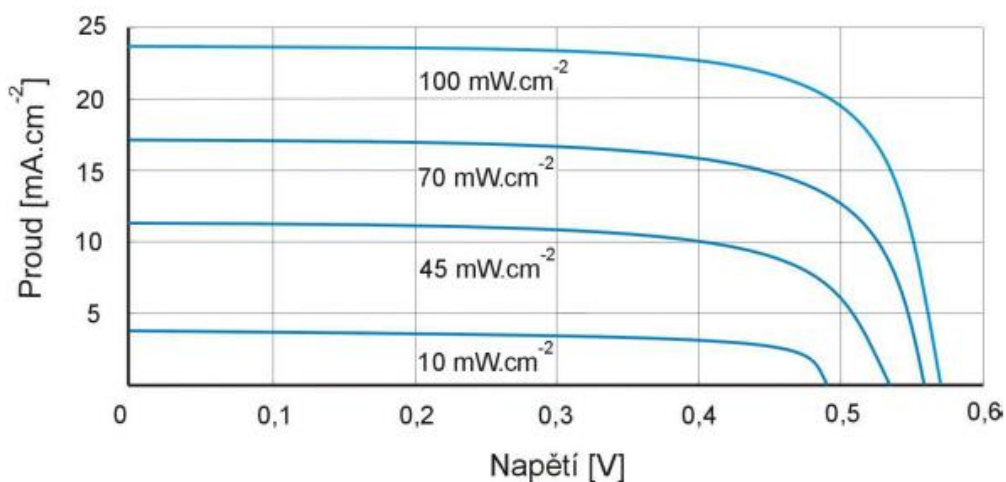
PRŮMĚRNÝ ROČNÍ ÚHRN DOBY TRVÁNÍ SLUNEČNÍHO SVITU



Obrázek 8: mapa doby trvání slunečního svitu (7)

Jak je vidět, obě mapky jsou ve srovnání intenzity osvitů velice podobné. Je z nich možno usoudit, že nejvíce účinné moduly budou při umístění na jihu Moravy, tedy v nejnižší nadmořské výšce v místech, kde je krajina rovinná, bez výrazných terénních nerovností. Mapky také velice dobře ilustrují vliv čistoty vzduchu na dopadající záření. Výrazně průmyslové oblasti Ostravska a Mostecká jsou průměrně osvětleny nejméně z celé republiky, přestože krajina by svým profilem jinak umožňovala podmínky vhodné pro instalaci FV modulů.

Můžeme tedy konstatovat, že pokud se rozhodujeme pro instalaci FV modulů, budeme vybírat lokalitu s minimální průmyslovou aktivitou a pokud možno rovinnou oblast.



Obrázek 9: graf závislosti výstupního proudu na intenzitě záření (8)

Graf na obrázku č. 9 ilustruje závislost výstupního proudu modulu na hodnotě dopadajícího slunečního záření. Se zvyšující se intenzitou slunečního záření se zvyšuje i hodnota výstupního proudu při zachování napětí jednotlivých článků.

3.2 Počasí

Pojmem počasí jsou myšleny převážně extrémní projevy počasí, jako krupobití, sníh, silný vítr a déšť. Typický výrobek by měl splňovat určité normy kvality, díky kterým je schopný odolat právě krupobití, sněhu a silnému větru bez poškození.

Dalším problémem mohou být nečistoty obsažené v ovzduší (úlomky větví, prach), které se na modulu usazují. Ty je třeba pravidelně odstraňovat, jinak snižují velikost plochy, která dokáže pohlcovat sluneční záření a tím i výkon modulu.

3.2.1 Sníh

Sníh je nebezpečný především samotným modulům, statice konstrukce. Nahromaděný sníh může v krajním případě ohrozit stabilitu, přimrzlý sníh a led může mít za následek deformaci modulu. Zasněžené moduly je možno vidět na obrázku č. 10.



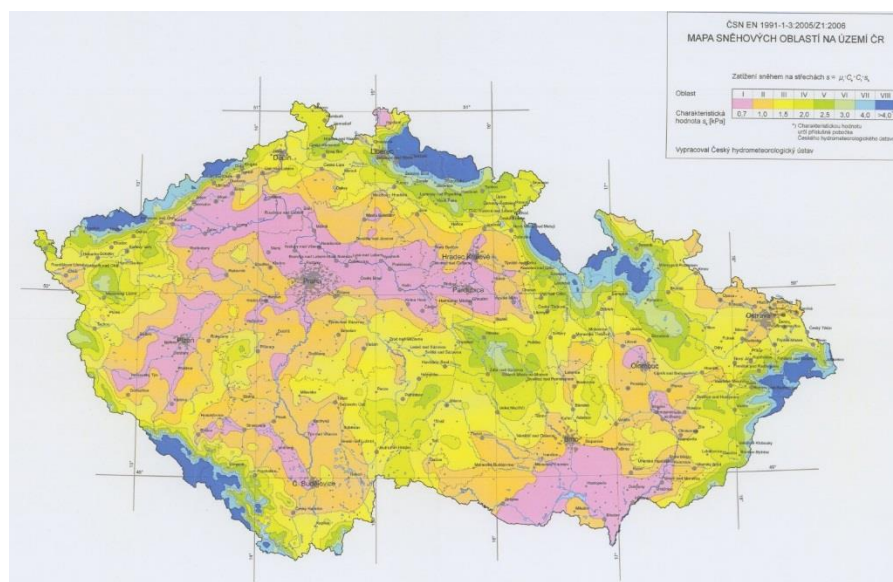
Obrázek 10: moduly pod sněhem (9)

Vzhledem k tomu, že moduly jsou instalovány nejčastěji ve sklonu 45° od země a poloze České republiky, není třeba se výrazně sněhem znepokojovat. Sklon a teplota FV modulů zajišťuje samovolný skluz sněhu z modulů. Případné zbytky je třeba smést ručně. Pokud modul leží v oblasti častého sněžení, je možno použít například tabulku níže, pomocí které se dá určit přibližná váha sněhu, spočívajícího na konstrukci. Tabulka je založena na normě ČSN EN 1991-1-3.

Sněhová oblast	Objemová hmotnost sněhu (kg/m ³)	I	II	III	IV	V	VI	VII	
Charakteristická hodnota zatížení sněhem na zemi (kPa)		0,7	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	4,0	
Hmotnost sněhu na střeše určená z charakteristické hodnoty (kg/m ²)		56	80	120	160	200	240	320	
Druh sněhu	Čerstvý	100	56 cm	80 cm	120 cm	160 cm	200 cm	240 cm	320 cm
	Ulehlý (několik hodin nebo dnů po napadnutí)	200	28 cm	40 cm	60 cm	80 cm	100 cm	120 cm	160 cm
	Starý (několik týdnů nebo měsíců po napadnutí)	300	19 cm	27 cm	40 cm	53 cm	67 cm	80 cm	107 cm
	Mokrý	400	14 cm	20 cm	30 cm	40 cm	50 cm	60 cm	80 cm

Obrázek 11: tabulka sněhových oblastí (9)

Tabulka na obrázku č. 11 vychází z určených sněhových oblastí, které jsou uvedeny na mapce na obrázku č. 12. Z tabulky lze poté vyčíst, jakou nejvyšší vrstvu sněhu dokáže modul unést bez poškození.



Obrázek 12: mapa sněhových oblastí (10)

3.2.2 Déšť, kroupy

Samotný déšť není pro FV moduly výraznější problém. Problémem se může stát vlhkost, kterou s sebou přináší deštivé podnebí v případě, že se na modulu objeví delaminace a ta není včas identifikována. Problémem delaminace se zabývá odstavec 5.5. V případě deště nás tedy nejvíce trápí snížený výkon modulu způsobený nedostatkem slunečního svitu.

Kroupy, respektive krupobití už představuje větší problém. Zabývá se jím i zvláštní norma, konkrétně IEC 61215 Ed. 2, která stanoví, že FV modul musí odolat bez poškození kroupám o průměru do 25 mm dopadajících na modul rychlostí 82,8 km/h.

Někteří výrobci ovšem podrobují své moduly mnohem náročnějším zkouškám, například firma JA solar v roce 2015 podrobila své výrobky zkoušce na krupobití o průměru krup 45 mm při rychlosti dopadu 110 km/h. K těmto krokům je kromě jiných může vést i zjištění, že v Německu (jeden z největších odběratelů solárních modulů) dopadají přibližně čtrnáctkrát ročně kroupy větší, než udává zmíněná norma. (11)

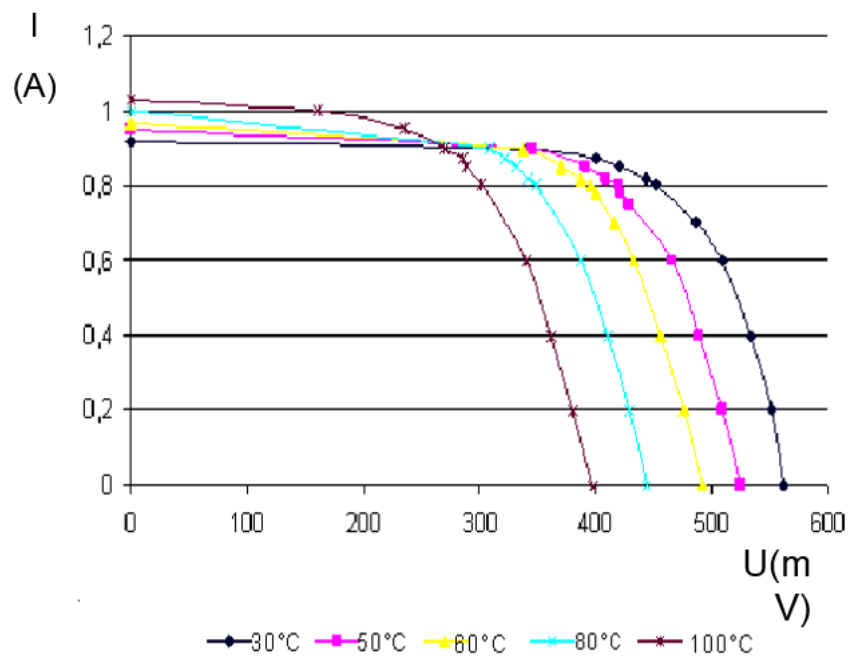
3.3 Vlhkost

Jak již bylo zmíněno, vlhké podnebí může způsobit poškození modulu, pokud se objeví delaminace. Vlhkost pak vniká pod ochranné sklo a způsobuje korozi elektrických částí modulu.

3.4 Teplota

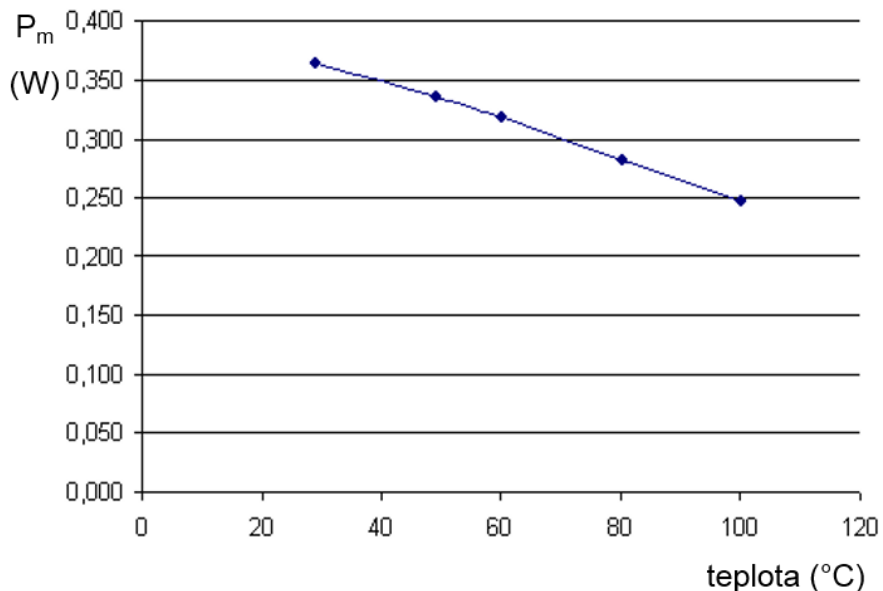
Mohlo by se zdát, že teplé počasí rovná se vysoký výkon FV modulů. Není to pravda.

Jak bylo popsáno v kapitolách výše, výkon modulu závisí především na intenzitě slunečního záření. Rostoucí teplota článku při osvětlení je spíše negativní vedlejší jev. Jak ukazují obrázky níže, rostoucí teplota článku způsobí zvýšení proudů uvnitř článků, ty začnou vyzařovat více výkonu do svého okolí ve formě tepelné energie a výstupní napětí článku klesá. Přímou úměrně s napětím klesá i celkový výstupní výkon modulu.



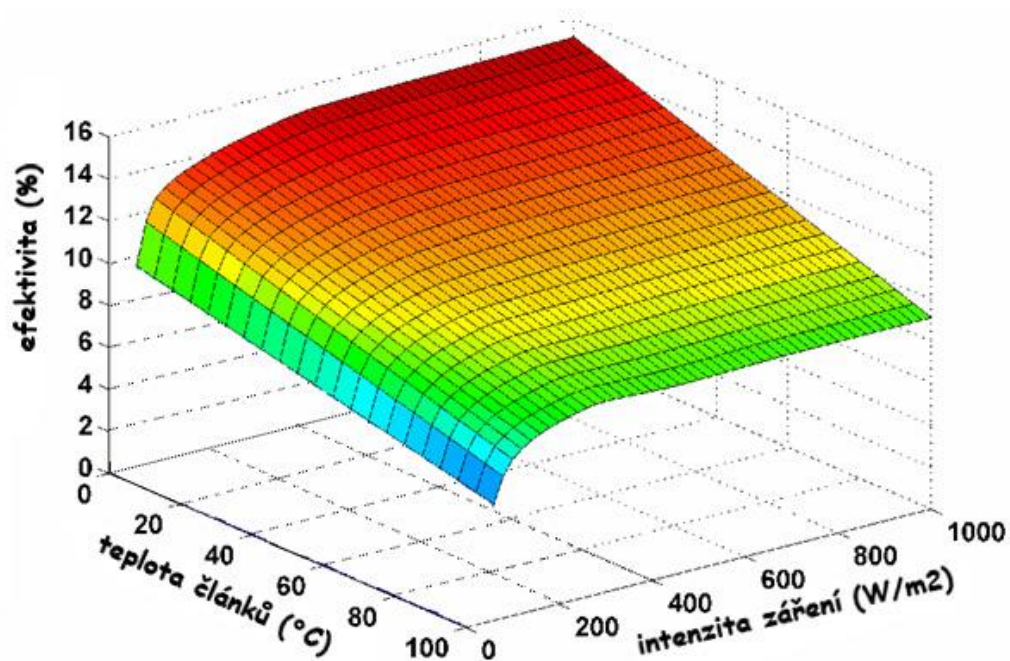
Obrázek 13: závislost výstupního napětí a proudu modulu na teplotě (12)

Obrázek č. 13 ukazuje klesající výstupní napětí při zvyšující se teplotě. Předpokládáme-li, že hodnota výstupního napětí solárního článku se pohybuje kolem hodnoty 500 mV, můžeme konstatovat, že teplota modulu 60 °C ještě neohrožuje očekávatelný výkon modulu.



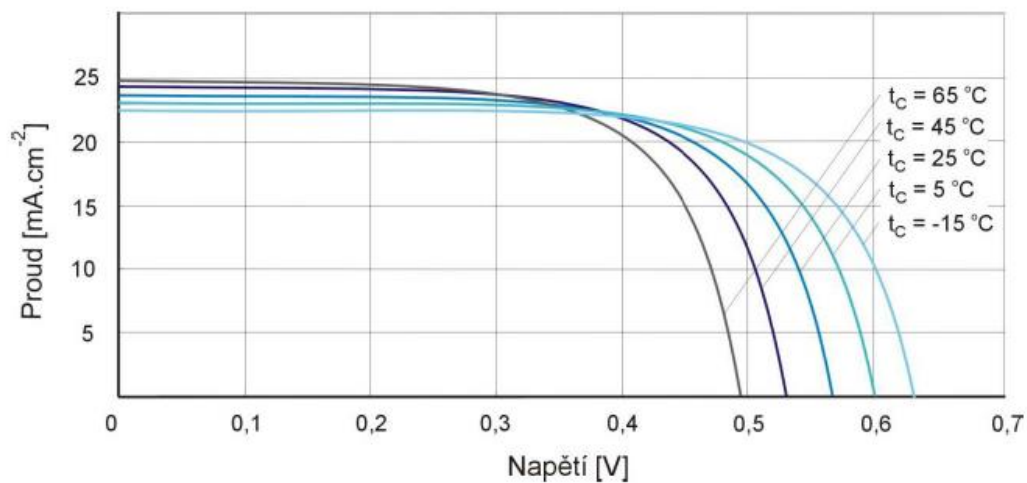
Obrázek 14: závislost výkonu modulu na teplotě (12)

Obrázek č. 14 znázorňuje klesající výstupní výkon s rostoucí teplotou.



Obrázek 15. závislost efektivity FV článku na teplotě a intenzitě záření (12)

3D graf na obrázku č. 15 ukazuje závislost efektivity solárního článku na teplotě při určité hodnotě slunečního záření.



Obrázek 16: závislost napětí modulu na teplotě (8)

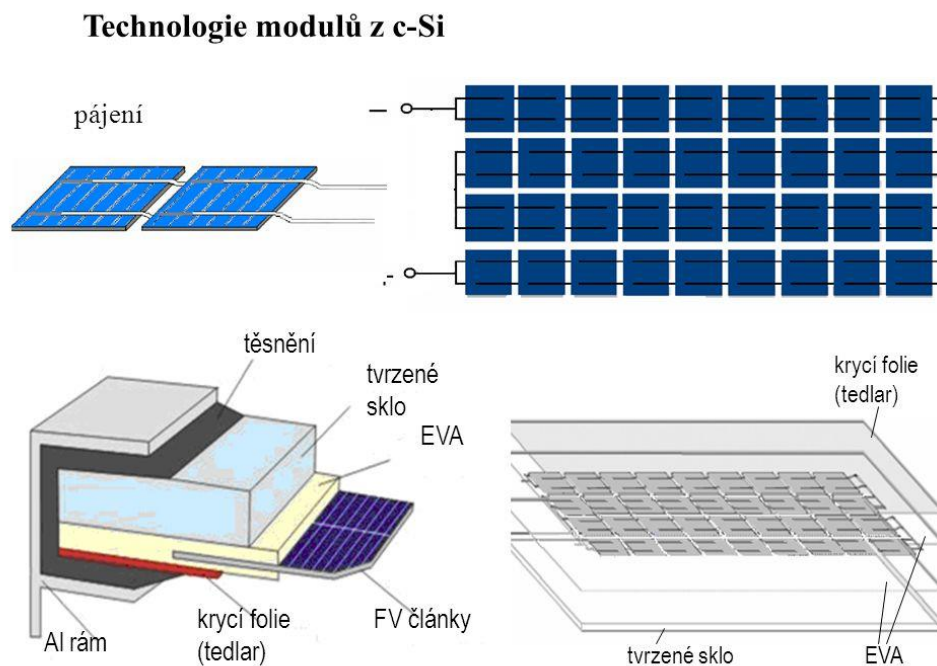
S rostoucí teplotou rostou proudy v článku (vycházíme z principu činnosti popsanému ve 2. kapitole), z toho plyne klesající napětí na výstupu, jak je vidět z grafu na obrázku č. 16. S klesajícím napětím klesá i celkový výkon modulu.

Znamená to tedy, že ohřívání modulu v letních měsících má za následek ztráty výkonu. Naopak nejvyšší výkon modul vykazuje při nízkých teplotách kolem 0 °C. Paradoxně tedy nastává situace, kdy nejvyšších výkonů dosáhneme při slunných zimních dnech. Jedná se samozřejmě o aktuální hodnotu výkonu, protože slunný zimní den trvá jen „pár hodin“, a slunný den v létě trvá třeba i 10 hodin. Proto celkový výkon v úhrnu bude i tak v létě mnohem vyšší než v zimě.

4 FV MODUL

Samotný FV modul se skládá z několika částí, které zde budou popsány. Rozeznáváme dva základní druhy technologie. Moduly křemíkové a moduly tenkovrstvé.

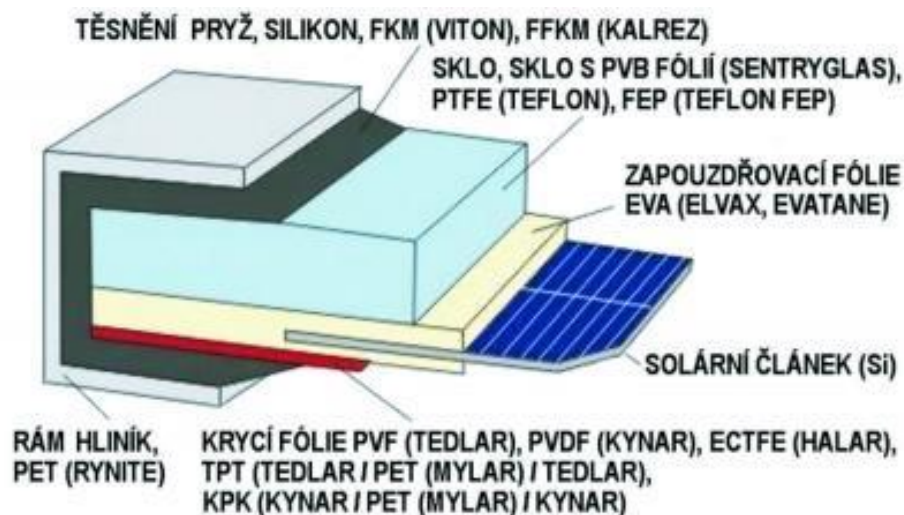
4.1 Technologie křemíkového modulu



Obrázek 17: složení FV modulu z c-Si (12)

Na obrázku č. 17 je vidět sériové zapojení článků v modulu a jednotlivé krycí vrstvy článků. První vnější vrstvou je nejčastěji hliníkový rám, který je lehký a zároveň pevný. Chrání modul před otřesy a poškozením při převozu a instalaci. Dále dodává potřebnou oporu a stabilitu.

Pod těsněním je umístěno ochranné tvrzené sklo, které chrání články před klimatickými vlivy, například kroupami, deštěm, sněhem. Mezi ochranným sklem a články se nachází ještě tenká, průhledná EVA folie, která je spojuje v tzv. vrstvené sklo. Ze spodní strany článků se nachází poslední vrstva, a tou je krycí folie (tedlar). (12)



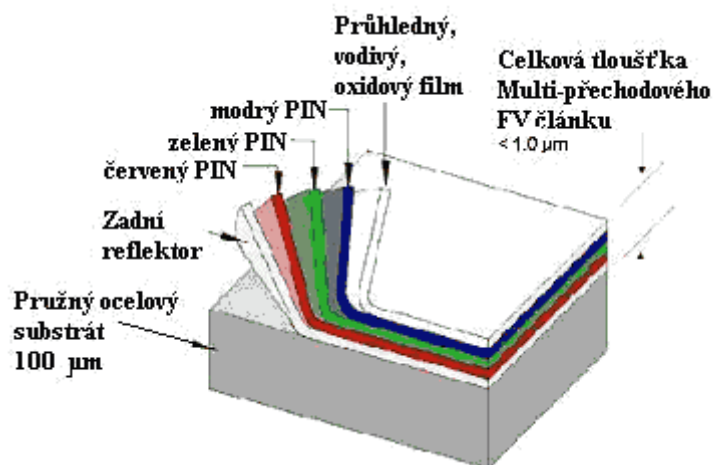
Obrázek 18: složení křemíkového modulu (12)

Obrázek č. 18 blíže ilustruje složení křemíkového modulu.

4.2 Technologie tenkovrstvých modulů

Technologie tenkovrstvých modulů se od té křemíkové nejvýrazněji liší ve flexibilitě modulů vyrobených pomocí tenkovrstvé technologie. Tyto moduly jsou ve formě tenkého pásu, který nepotřebuje samostatnou nosnou konstrukci. Lze ho aplikovat například přímo na ocelovou konstrukci střechy.

Výkonem se od křemíkových modulů výrazně neliší, jeho předností je právě ohebnost. Na obrázku č. 19 je možné vidět složení tenkovrstvého článku.



Obrázek 19: složení tenkovrstvého FV článku (13)

5 DEFEKTY FOTOVOLTAICKÝCH MODULŮ

Defekty fotovoltaických modulů vznikají často již při výrobě, přepravě. Další pak vznikají za provozu. Tyto výrazně negativně ovlivňují vlastnosti modulů a způsobují postupnou degradaci fotovoltaických článků a tím snižování výkonu modulů. Známe několik nejčastěji se objevujících druhů.

- Potenciálem indukovaná degradace (dále jen PID)
- Horká místa (Hot Spots)
- Snail Trails (někdy také šnečí cestičky)
- Degradace dopadajícím zářením
- Neobroušené hrany článků
- Delaminace FV panelu (14)

5.1 Potenciálem indukovaná degradace

PID zde bude věnováno nejvíce prostoru, a to z důvodu rozsáhlosti tohoto problému.

5.1.1 Co je to PID

PID je nežádoucí jev, který postihuje nejen krystalické moduly, ale objevuje se občas i na tenkostěnných modulech. Ve světě byl úplně poprvé zmíněn v roce 1970 a od té doby byl laboratorně zkoumán. Laboratorní výzkumy dokázaly, že je příčinou do té doby nevysvětlitelného úbytku výkonu instalovaných solárních elektráren.

Negativní působení PID se začíná u solárních modulů objevovat v průměru po 2–4 letech provozu a podle dosavadních zkušeností se může projevit až 70 % poklesem výkonu jednotlivých zasažených modulů. U celé elektrárny to pak může znamenat pokles o 5 až 15 %, v extrémních případech i o 30 % z původního instalovaného výkonu.

První cílené testování v praxi prováděl v roce 2012 v Německu Fraunhofer Institut. Podle výsledků z tohoto testu celých 46 procent z namátkově vybraných 95 fotovoltaických modulů různých výrobců bylo prokazatelně pozitivních na PID

. Jakmile laboratorní testy dokázaly existenci PID, výrobci začali s vývojem PID resistantních fotovoltaických modulů. Tyto moduly se na trh dostaly až po roce 2012. (15)

5.1.2 PID resistantní moduly

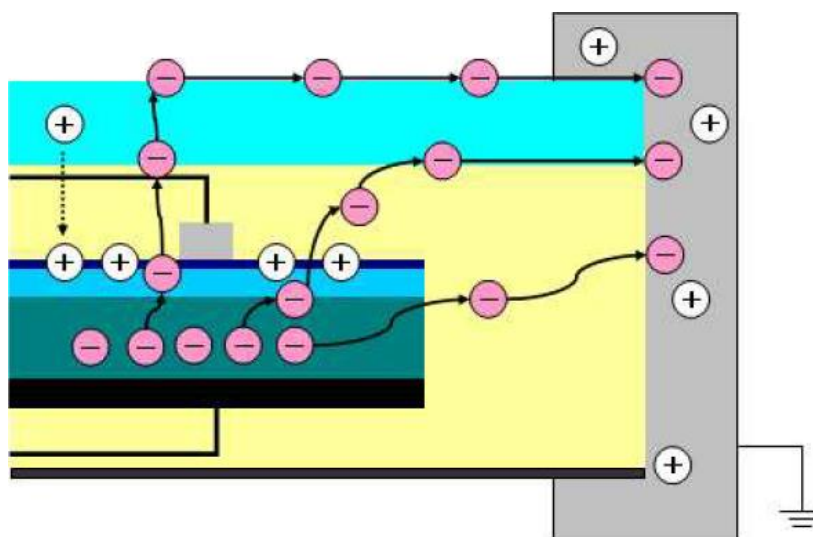
Výrobce si za nemalý poplatek nechá v laboratoři nasimulovat podmínky, které zvyšují riziko tohoto typu degradace. Pokud je ztráta výkonu do 5 procent, má nárok na použití označení PID free. Jde ale stále o zrychlený test v laboratorních podmínkách, výrobce zpravidla poskytuje jen časově omezenou garanci a každý, necht' posoudí sám, zda 5 % ztráta výkonu je málo nebo hodně. (16)

5.1.3 Vznik PID

V zásadě se jedná o mezivrstvou polarizaci vedoucí až k nevratné degradaci křemíku ve fotovoltaických modulech, která souvisí s rozdílem potenciálů vůči zemi.

PID způsobuje nevhodnou změnu polarizace nábojů fotovoltaického článku a díky tomu není tento článek schopen dodávat elektrický proud. K tomuto jevu dochází zejména na FV modulech, které jsou nejbližší u záporného pólu ve stringu (řada za sebou zapojených modulů). Zde se totiž potenciál (napětí vůči zemi) FV článků podle délky daného stringu (tzn. počtu modulů ve stringu) a typu používaného střídače obvykle pohybuje mezi -250 V až -450 V . Rám FV modulů má ale oproti tomu potenciál 0 V , protože z bezpečnostních důvodů musí být uzemněný. Kvůli tomuto elektrickému napětí mezi FV články a rámem může dojít k vzniku svodových proudů. To za sebou zanechá náboj (polarizaci), který může nevýhodným způsobem pozměnit charakteristickou křivku FV článků. Tento jev je znázorněn na obrázku č. 20.

S rostoucím rozdílem potenciálů přitom roste úměrně i riziko vzniku degradace křemíku a ztráta výkonnosti modulů. Čím více je tedy zapojených modulů ve stringu, tím je riziko degradace a výsledný úbytek výkonnosti vyšší. Nejdříve se tedy PID začne projevovat a největší poškození je pozorovatelné na posledním modulu na záporném konci stringu. Čím déle PID působí, tím více postupuje poškození na další moduly směrem ke kladnému konci stringu. (15)



Obrázek 20: vznik PID (15)

Svodový proud je způsoben napěťovým potenciálem a způsobují jej negativní (-) ionty migrující od polovodičů a pozitivní (+) ionty migrující z obalu skla a polovodičů a vnějšího prostředí.

5.1.4 Vliv klimatických podmínek

Vysoká teplota a vysoká vlhkost způsobuje urychlení degradačního efektu způsobeného PID. Bylo rovněž prokázáno, že nízké teploty a nízká vlhkost napomáhají regeneraci modulů zasažených PID. (15)

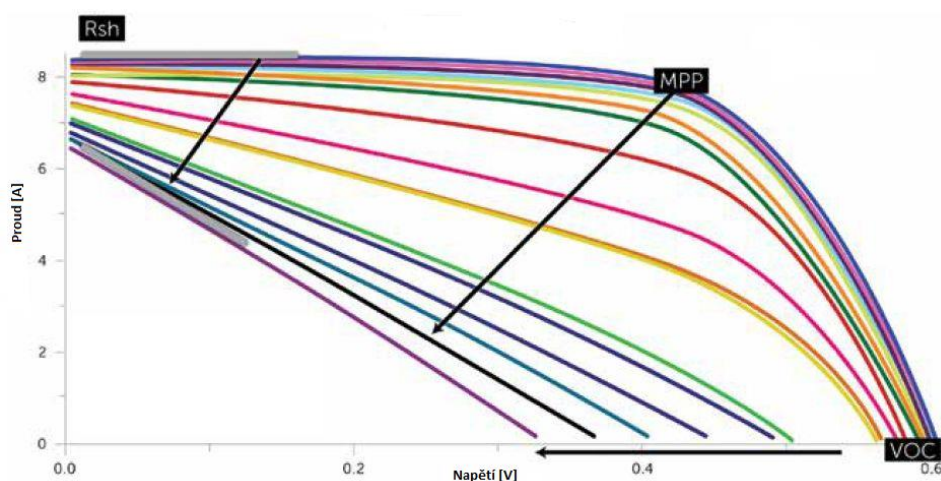
5.1.5 Vliv použitých panelů

Na odolnost modulů vůči PID má vliv volba použitého ochranného skla (sodnovápenaté), difuzní bariéra a pouzdrící materiál. Křemenné sklo, které je dražší má výrazně lepší vlastnosti než sklo s obsahem sodíku.

Materiál EVA (ethylen-vinyl acetát) má podle nejnovějších studií podíl na vzniku PID. Příčinou je kyselina octová v něm obsažená, která v kombinaci s vlhkostí rozpouští kovové ionty na rozhraní skla (koroze skla). (15)

5.1.6 Důsledky PID

Jev PID se projeví snížením paralelního odporu R_{sh} , z toho plyne snížení napětí naprázdno V_{OC} a snížení maximálního pracovního bodu modulu M_{PP} . Z náhradního schématu fotovoltaického modulu plyne, že snížením svodového odporu dojde ke snížení proudu tekoucího do zátěže, a tím i ke snížení maximálního výkonu modulu. Vše je vidět z obrázku č. 21. (15)



Obrázek 21: vliv PID na výkon modulu (15)

R_{SH} ...svodový odpor

M_{PP} ...maximální pracovní bod

V_{OC} ...napětí na prázdnou (17)

5.2 Hot Spots

Vznikají v místech defektů krystalické mřížky FV článku a projeví se při revizi pomocí termokamery jako bílé místo. Při dlouhodobém překročení teploty o 50 °C oproti sousedním článkům může dojít k nevratnému poškození.

5.3 Snail Trails

Tento fenomén byl poprvé podrobněji zdokumentován roku 2006. Projevuje se po několika měsících provozu zabarvením některých článků panelu ve tvaru klikatících se „cestiček“ o šířce 0,5 – 1 cm. Příklad takto postiženého modulu je vidět na obrázku č. 22.



Obrázek 22: jev Snail Trails (18)

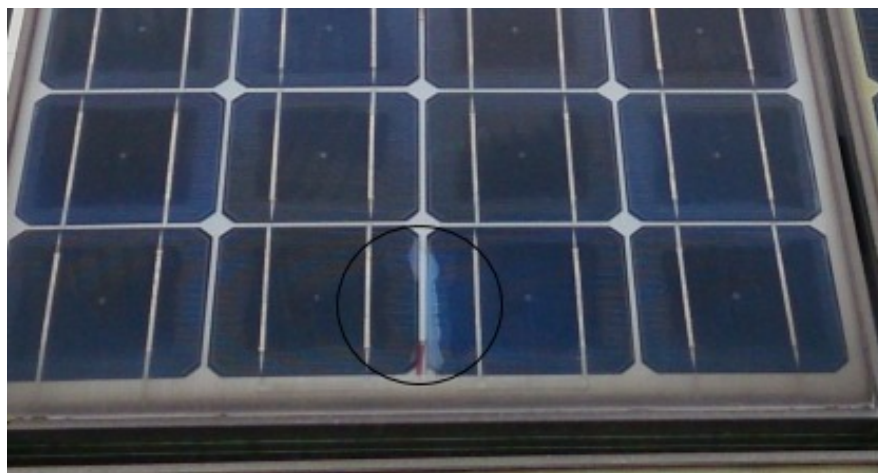
Vyskytuje se jak u monokrystalických, tak polykrystalických článků, avšak pouze u modulů některých výrobců. Naopak výrobky jiných výrobců takto postiženy nejsou. V současné době stále není jasné, co tento jev způsobuje. Stal se předmětem zvýšeného zájmu odborníků renomovaných výzkumných institutů. Majitelům takto postižených elektráren bylo prozatím doporučeno zvýšené sledování změn parametrů modulů. (18)

5.4 Degradace dopadajícím zářením

Ztráty výkonu způsobené zřejmě zvýšenou intenzitou dopadajícího infračerveného záření v kombinaci s vysokou teplotou. Projevuje se zežloutnutím až zhnědnutím krycí EVA folie. To má za následek snížení propustnosti pro světelné záření a tím úbytek generovaného výkonu. (19)

5.5 Delaminace FV modulu

Delaminace je odlepení krycí vrstvy modulu. Během provozu může působením vlhkosti dojít k poškození těsnění pod ochranným hliníkovým rámem a působení vlhkosti v kombinaci s chloridy dochází k poškození modulu. V krajním případě může dojít ke zničení FV modulu. Popisovaný problém je zobrazen na obrázku č. 23. (19)



Obrázek 23: delaminace FV modulu (19)

5.6 Neobroušené hrany článků

Solární článek tvoří přechod PN, jak bylo popsáno v kapitole 2.1. Tyto dvě vrstvy musejí být od sebe odděleny, jinak dochází ke zkratu. Proto se konce článků zabrušují. Vlivem nedokonalé výroby a nedostatečné výstupní kontroly se může stát, že některá hrana článku není dokonale zabroušena.

Na následujícím detailu (obr.24) je viditelný defekt, který je způsoben špatným obroušením hran solárního článku. Dochází tak ke zkratu spodní a vrchní části. Tuto vadu je možné opravit už ve výrobním procesu, ale jakmile se článek zalaminuje do modulu, tak už oprava není možná.



Obrázek 24: Příklad špatného obroušení hran solárního článku

6 DIAGNOSTICKÉ METODY

Jedná se o nedílnou součást vývoje FV modulů. Slouží k odhalení defektů a napomáhají dalšímu výzkumu.

Dle použité technologie měření se diagnostika v zásadě dělí na dva základní typy: měření elektrických vlastností a optické měření.

6.1 Optická měření

Základem optické diagnostiky je kontrola FV modulu pohledem. Takto je možno bez použití přístrojů odhalit defekty jako je např. delaminace krycí fólie, či jiné fyzické poškození modulu. Není-li modul viditelně poškozen, přichází na řadu další metody, které zde budou ve stručnosti popsány.

6.1.1 LBIC (Light Beam Induced Current)

Tato metoda slouží ke zmapování rozložení proudu v solárním modulu. Nad modulem je nainstalován zdroj světla, nejčastěji laser a jeho zaostřený paprsek přejíždí nad modulem. Pohybuje se bod po bodu v ose X a poté se posune o jeden bod v ose Y. Takto získané XY charakteristiky znázorní rozložení proudu v celém modulu včetně případných defektů. Tato metoda je poměrně zdlouhavá, v závislosti na požadované přesnosti (nastavení kroku laseru) může trvat i několik hodin. (5)

6.1.2 Měření pomocí termokamery

Touto metodou je možno mimo jiné odhalit například defekt hot spot. Termokamerou je snímán FV modul a v reálném čase na jejím displeji je možno pozorovat, jak jsou jednotlivé články modulu zahřáty. Pokud některý z nich vyzařuje více tepla než ostatní, naznačuje to jeho poškození. Vyrobená energie se v tomto místě mění na teplo a uniká.

Principem měření termokamerou je měření infračerveného záření. Všechny objekty s teplotou vyšší, než absolutní nula vyzařují elektromagnetické záření. Protože intenzita elektromagnetického záření je závislá na povrchové teplotě objektu, který toto záření vydává, lze změřením intenzity záření stanovit povrchovou teplotu objektu. Protože je zdrojem tohoto elektromagnetického záření termický pohyb částic, z nichž je objekt složen, nazýváme toto záření „tepelným zářením“, abychom jej odlišili od ostatního elektromagnetického záření, které vzniká z jiných příčin.

Existuje několik faktorů, které nepříznivě ovlivňují diagnostiku termokamerou. Ty nejčastější jsou popsány níže. (20)

6.1.2.1 Emisivita

Emisivita je v podstatě hodnota vyjadřující schopnost objektu vyzařovat do prostoru. Nejvyšší emisivita (hodnota rovna 1) je u tzv. absolutně černého tělesa, což je těleso, které pohlcuje veškeré na něj dopadající záření. U reálného tělesa je emisivita vždy menší než jedna.

V praxi to znamená, že takové těleso při stejné povrchové teplotě jako má absolutně černé těleso, vyzáří méně tepelného záření. S touto podmínkou je třeba při samotném měření počítat a upravit podmínky měření pro termokameru podle měřeného materiálu a hodnoty jeho emisivity.



Obrázek 25: vliv emisivity na zdánlivou teplotu povrchu objektu (20)

Na obrázku č. 25 můžeme vidět, že výsledek měření jinak konstantního povrchu zdi může ovlivnit nápis na něm nasprejovaný. Toto místo se poté jeví jako chladnější. V tomto případě můžeme chybu logicky odhalit, ovšem v jiných případech by se to podařit nemuselo. (20)

6.1.2.2 Lesklé plochy

Lesklé plochy se vyznačují vysokou odrazivostí. To může způsobit problémy, kdy termokamera změří teplotu objektu, který se v měřeném objektu jen odráží. Typickým příkladem je měření FV panelu, kdy se v lesklém povrchu měřeného panelu velice dobře odráží teplo vyzařované samotným pracovníkem, provádějícím měření.

6.1.2.3 Atmosféra

Klimatické podmínky (déšť, sníh) ovlivňují nepříznivě prováděná měření. Termokamera může místo měřeného objektu změřit teplotu dopadajících kapek vody. Další vážnou chybou je vliv východu slunce. Může se stát, že na polovinu měřené plochy svítí slunce a druhá část je ve stínu. Výsledky takového měření mohou být značně nepřesné.

6.1.3 Elektroluminiscence

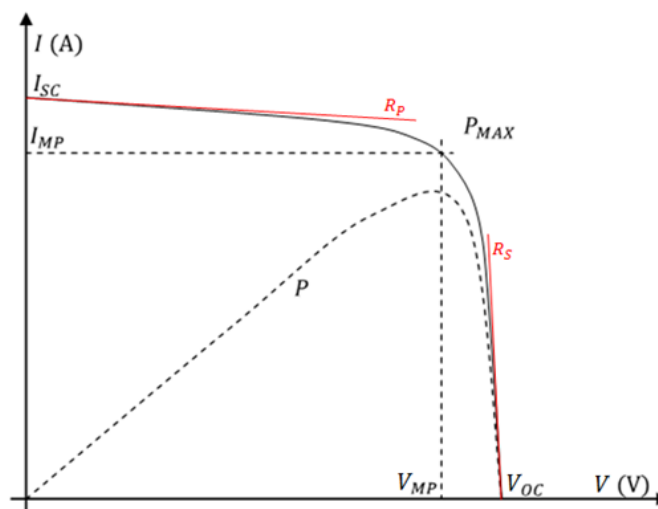
Test elektroluminiscence se zakládá na měření výkonových charakteristik FV modulů a dokáže odhalit skryté vady, které nelze vidět termokamerou ani změřit pomocí FLASH testu, či pomocí V-A charakteristiky. Elektroluminiscence je světelná emise záření, vznikající při zářivé rekombinaci křemíku. S jeho pomocí lze vyhodnotit jak kvalitu výrobního procesu článků, tak i případné defekty vzniklé pozdější manipulací s FV moduly. Elektroluminiscence odhaluje především vznik mikrotrhlin, které mají velký vliv na stabilitu výkonových parametrů. Defekty vyzařují silné tepelné ztráty a jsou tak na snímcích velmi snadno pozorovatelné. (14)

6.2 Měření elektrických parametrů

Do této kategorie spadá například měření V-A charakteristik, šumové charakteristiky, nebo měření pomocí tzv. FLASH testu.

6.2.1 Měření V-A charakteristik

Měření základních parametrů FV modulů. Je možno použít obyčejný multimetr připojený ke svorkám FV modulu. Pro získání odpovídajících charakteristik je doporučeno použít k tomu určený analyzátor, například PROVA 210. Ve spojení s vhodným softwarem vytváří typické charakteristiky, jejichž ukázka je na obrázku č. 26.



Obrázek 26: ideální V-A charakteristiky (21)

- P_{MAX} ...maximální pracovní bod
- V_{OC} ...napětí na prázdko
- V_{MP} ...napětí v bodě maximálního výkonu
- I_{MP} ...proud v bodě maximálního výkonu
- R_P ...sériový odpor
- R_P ...paralelní odpor
- I_{SC} ...maximální proud procházející modulem

6.2.2 Sluneční simulátor s testerem

V zásadě jde o zdroj světla, který má v laboratorních podmínkách simulovat sluneční světlo. Používá se většinou xenonová výbojka, která se svými vlastnostmi blíží skutečnému slunečnímu záření. Pomocí optických systémů je vytvořen homogenní svazek, který dopadá kolmo na zkoumaný modul.

Tyto zdroje splňují mnoho mezinárodních standardů. Například intenzita jimi generovaného světla je 1000 W/m^2 což odpovídá spektru AM1,5 slunečního záření. Měření dále probíhá při přesné konstantní teplotě $25 \text{ }^\circ\text{C}$.

Výstupem tohoto měření jsou pak elektrické charakteristiky FV modulu, jako je špičkový výkon, napětí na prázdko, proud nakrátko, pracovní proud, výkon atd. (14)

7 PRAKTICKÉ MĚŘENÍ

Součástí bakalářské práce je praktické měření vybraného modulu jak v laboratorních podmínkách, tak i v terénu.

7.1 Měřený FV modul

Pro měření v praktické části práce byl zvolen FV modul z ostrovního solárního systému. Modul vyrábí firma Amerisolar, jedná se o typ AS-6P30. Výrobce deklarovaný výstupní výkon má hodnotu 255 Wp.

Výrobce dále uvádí záruku 30 let pro 80,6 % jmenovitého výkonu. V příloze je přiložen datasheet.

Modul vyfotografovaný na obrázku č. 27 je instalován na střeše rekreačního objektu poblíž obce Smrčná na Jihlavsku. Byl dodán jako kompletní ostrovní systém včetně regulátoru, měniče, baterie a potřebného vybavení pro instalaci. K instalaci bylo přistoupeno z důvodu nemožnosti přivedení jiného zdroje energie.



Obrázek 27: fotografie instalovaného modulu

7.2 Doba měření

První měření proběhlo 19.10.2016, tedy v době, kdy byl systém instalován necelé tři měsíce. Poslední měření pak proběhlo 22.5.2017. Jedná se o rozsah sedmi měsíců, během kterých se měřil vliv klimatických podmínek na výkon FV modulu. Na podzim převládalo sychravé počasí s nízkými teplotami. Na jaře naopak bylo slunečno a vysoké teploty. V mezičase mezi měřicími obdobími proběhlo poměrně dlouhé zimní období, kdy dva měsíce vydatně sněžilo a modul prošel výraznou zatěžkávací zkouškou odolnosti. Během této doby nebylo měření možné.

7.3 Měření

Daný modul byl nejprve převezen do školní laboratoře, kde byla proměřena V–A charakteristika a dále byl podroben testu pomocí elektroluminiscence. Následně po opětovném nainstalování na původní místo byl měřen pomocí termokamery. Nakonec byl modul znovu převezen do laboratoře, kde byl podroben druhému měření V-A charakteristiky a testu elektroluminiscence. Výsledky měření jsou dále popsány.

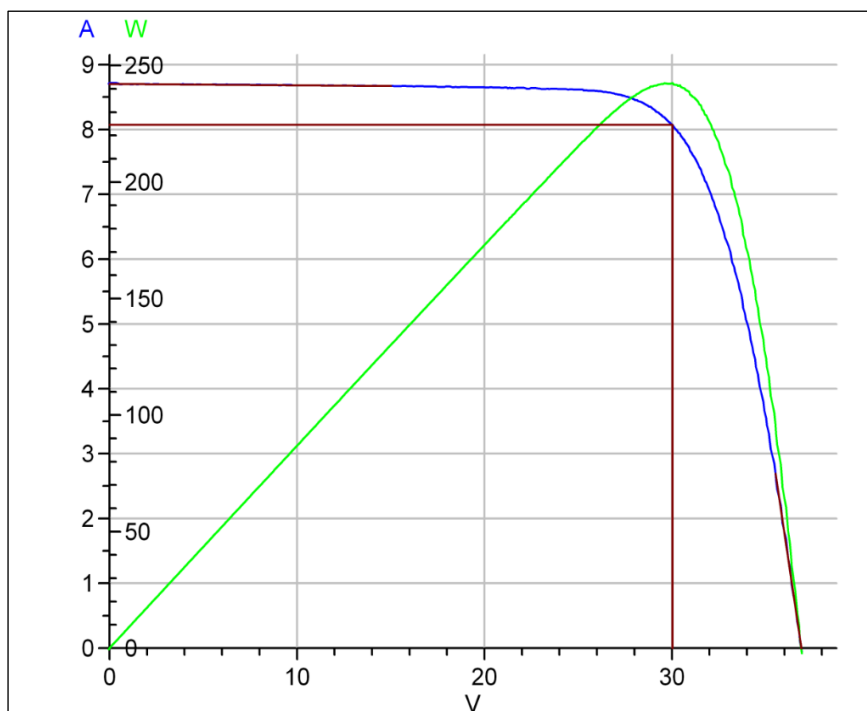
7.3.1 V-A charakteristika -1. měření

V následující tabulce č.1 jsou uvedeny veškeré hodnoty zjištěné během automatického měření V-A charakteristiky, včetně uvedení podmínek, které při měření panovaly.

Tabulka 1: Výsledky měření V-A charakteristiky

Modul-Amerisolar AS-6P30			
Změřené hodnoty		Základní data	
Tp	25.0 °C	Datum a čas měření	19.10.16, 10:44
G(i)	1.0 kW/ m2	Výrobce	Amerisolar
Isc	8.706 A	S/N	669431603101516
Uoc	36.905 V	Typ modulu	255 Poly
Eff	14.90 %		
FF	75.46 %		
Pmpp	242.443 W	Podmínky měření	
Umpp	30.037 V	PV module temperature Ta	23.8 °C
Impp	8.071 A	Irradiance intensity G	1.0 kW/ m2
Rser	0.5 Ohm	Voltage conversion factor TkU	-1.969 mV/K
Rsh	449.0 Ohm	Current conversion factor TkI	18.142 μA/cm2/K

Z měření volt ampérové charakteristiky vyplynulo, že po 3 měsících používání vykazuje modul výkon 242 W namísto výrobcem deklarovaných 255 W. Tato hodnota se však pohybuje ve výrobní odchylce 10 %. Samotná V-A charakteristika zobrazená na obrázku č. 28 svým tvarem odpovídá teoretickým předpokladům a značí správnou funkci FV modulu.



Obrázek 28: V-A charakteristika

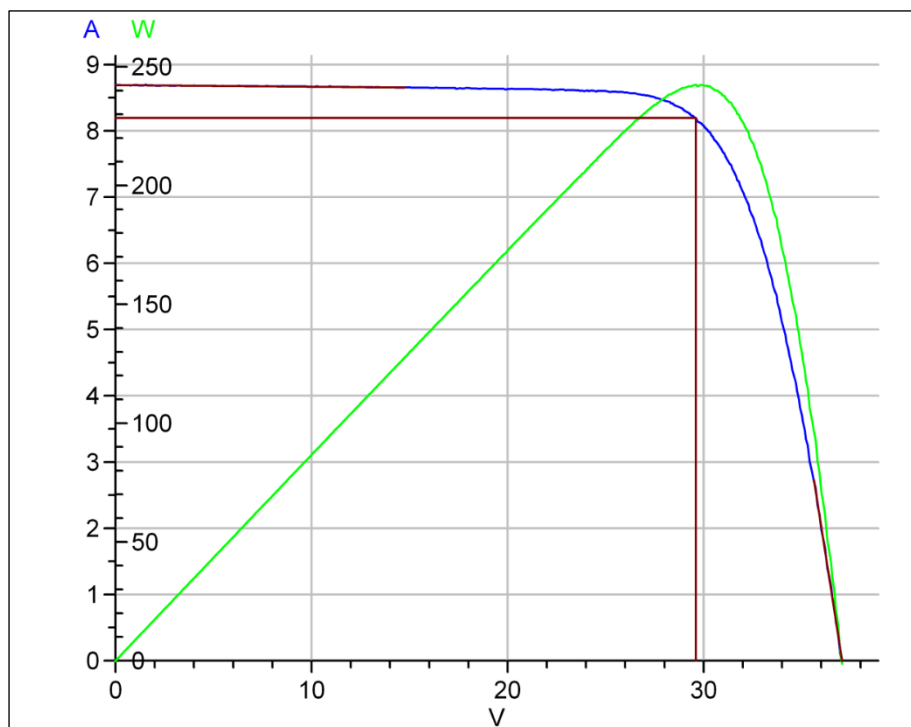
7.3.2 V-A charakteristika – 2.měření

V tabulce č. 2 jsou zaznamenané hodnoty druhého měření V-A charakteristiky, které proběhlo 7 měsíců po prvním měření.

Tabulka 2: Výsledky měření V-A charakteristiky

Modul-Amerisolar AS-6P30			
Změřené hodnoty		Základní data	
T_p	25.0 °C	Datum a čas měření	22.05.17, 10:59
$G(i)$	1.0 kW/ m ²	Výrobce	Amerisolar
I_{sc}	8.691 A	S/N	669431603101516
U_{oc}	37.056 V	Typ modulu	255 Poly
Eff	14.91 %		
FF	75.29 %		
P_{mpp}	242.492 W	Podmínky měření	
U_{mpp}	29.599 V	PV module temperature T_a	23.8 °C
I_{mpp}	8.192 A	Irradiance intensity G	1.0 kW/ m ²
R_{ser}	0.5 Ohm	Voltage conversion factor T_{kU}	-1.969 mV/K
R_{sh}	405.0 Ohm	Current conversion factor T_{kI}	18.142 μ A/cm ² /K

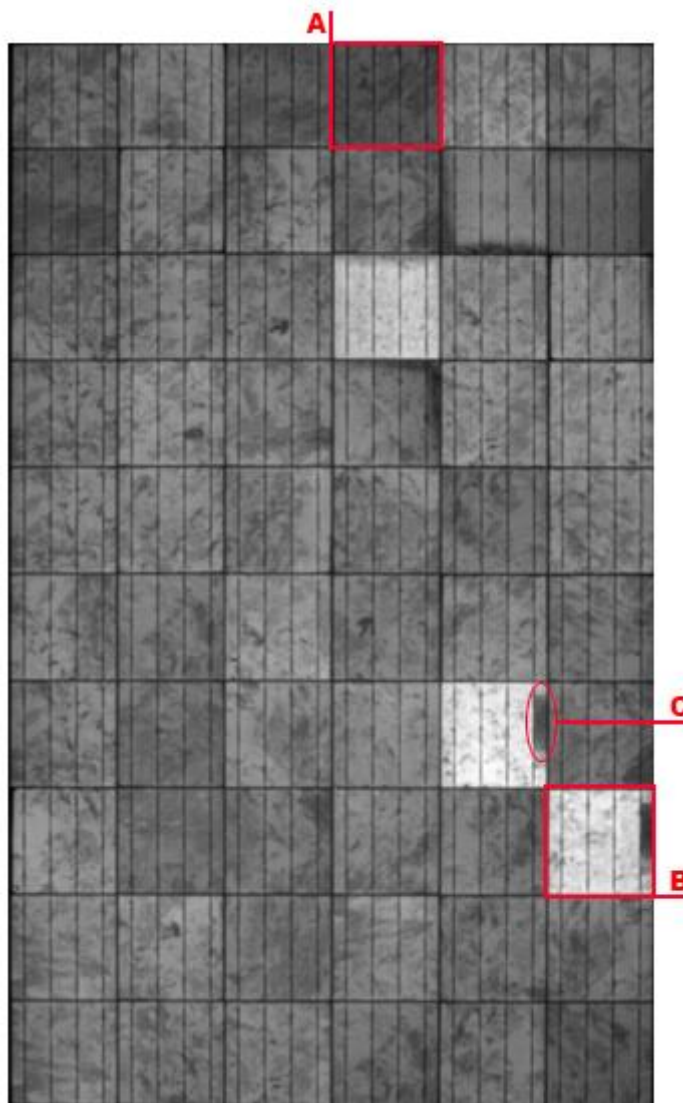
Druhé provedené měření V-A charakteristiky (obr. 29) ukazuje, že výkon od minulého měření zůstal beze změny. Hodnota výkonu stále činí 242 W. Změnila se však hodnota paralelního odporu Rsh. Ta nyní činí 405 Ohm. Po prvním měření však činila 449 Ohm. Nízká hodnota paralelního odporu může ukazovat na vadné články. Pravděpodobně zkratky. Obě měření byla provedena při stejných podmínkách. Z výsledků lze usuzovat, že nižší, než výrobcem deklarovaný výkon modulu není způsoben degradací modulu. Pravděpodobně je způsoben nedokonalou výrobou.



Obrázek 29: V-A charakteristika

7.3.3 Elektroluminiscence – 1. měření

Měření proběhlo 19.10.2016 společně s měřením V-A charakteristiky. Jak je popsáno v teorii výše, metoda elektroluminiscence dokáže odhalit poškozené FV články. Výsledný snímek pořízený při testu elektroluminiscence je, jak je na obrázku č. 30 vidět, vyobrazen ve stupních šedé. Světle šedá místa značí články s větší proudovou hustotou, tedy hůře pracující články. Naopak články, které jsou v pořádku jsou vyobrazeny tmavě šedou barvou. Dalším vadou, kterou elektroluminiscence dokáže odhalit jsou zkraty způsobené nedokonalým obroušením hran článků.



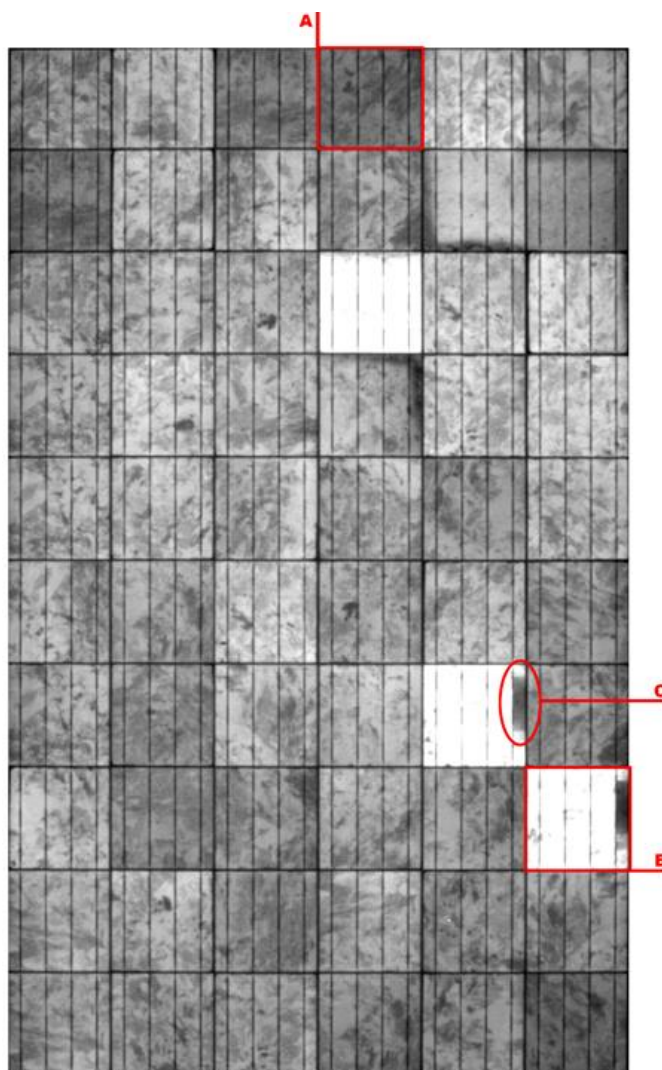
Obrázek 30: výsledek měření elektroluminiscence 19.10.2016

Článek označený **A** je viditelně tmavý. To znamená nízké tepelné ztráty a vyšší účinnost při přeměně světelné energie na elektrickou. Naopak článek označený **B** je výrazně světlejší. Lze předpokládat, že vyzařuje vyšší teplo do okolního prostředí, a tedy jsou zde ztráty energie.

Místo, naznačené **C** ukazuje zkrat, způsobený nejspíše nedokonalým zabroušením hran článků. Může se také jednat o nekvalitně provedenou difúzi, kdy se na článek dostala nečistota, nebo se několik článků nalepilo k sobě a při zakládání do difúzní pece tak vznikl defekt.

7.3.4 Elektroluminiscence – 2. měření

Druhé měření proběhlo 22.05.2017 společně s měřením V-A charakteristiky.



Obrázek 31: výsledek měření elektroluminiscence 22.05.2017

Výsledek druhého měření (obr.31) potvrzuje výsledky měření prvního. Na fotografiích pořízených během obou testů elektroluminiscence není patrný výrazný rozdíl.

Zkraty článků, které jsou zde výborně zřetelné (**C**) ukazují spojitost s výsledkem měření V-A charakteristiky, která ukázala klesající paralelní odpor R_{sh} . Ten může ukazovat právě na vadné články.

Dále jsou zde stále vidět tři výrazně světlé články (B), které svítí více než články okolní. Článek A je stále výrazně tmavší. To znamená, že vykazuje vyšší účinnost.

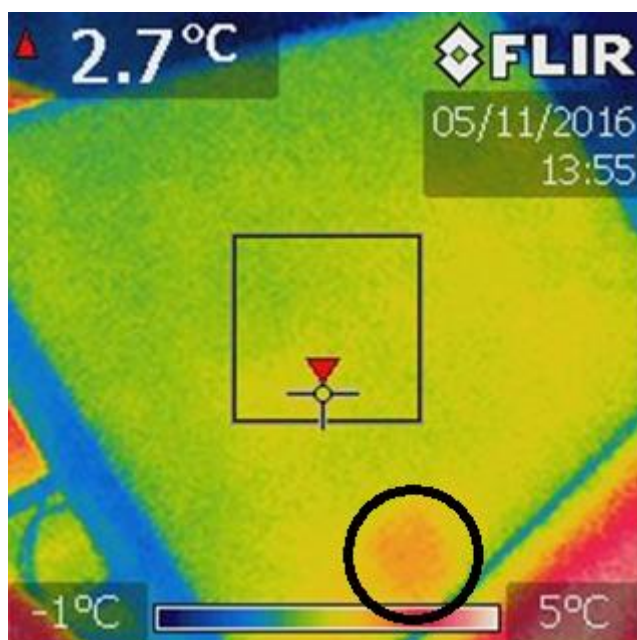
Není zde ovšem vidět žádné zhoršení těchto vad. Z toho je možno usuzovat, že popsané vady existují na měřeném modulu již z výroby.

7.3.5 Měření termokamerou

Během celého měřicího období byly realizovány celkově tři měření pomocí termokamery. První 5.11.2016, druhé 6.3.2017 a třetí 2.5.2017. Tato měření pokryla různé klimatické podmínky a jsou ideální pro znázornění funkce FV modulu při různých klimatických podmínkách.

7.3.5.1 Měření 5.11.2016

První měření proběhlo při oblačném počasí, krátce po dešti. Teplota byla 7 °C, vlhkost 65 %.

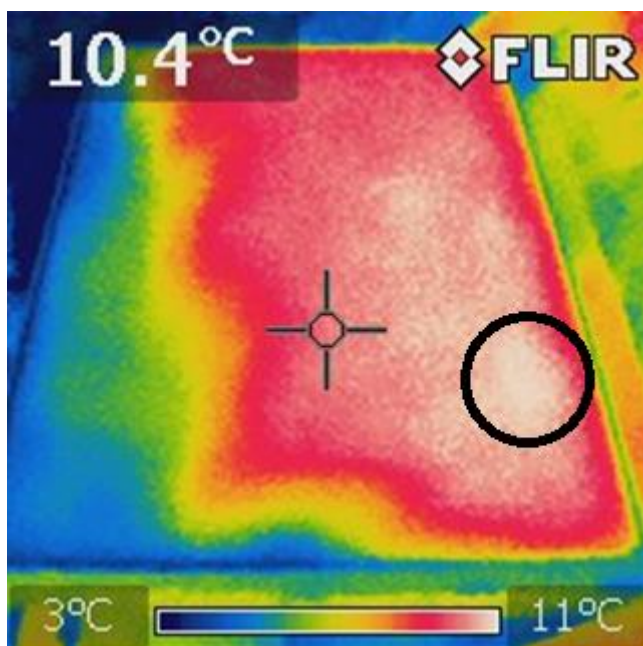


Obrázek 32: měření pomocí termokamery 5.11.2016

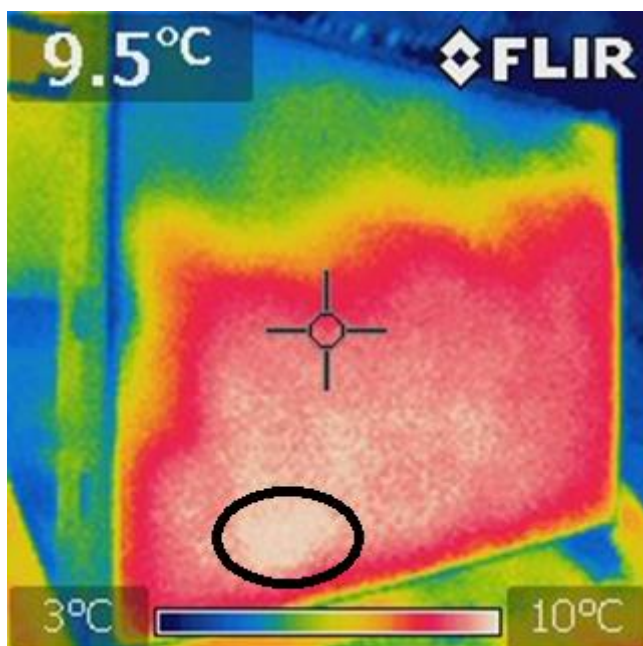
Měření pomocí termokamery potvrdilo 1. laboratorní měření elektroluminiscence. Na obrázku č. 32 pořízeném pomocí termokamery je vidět měřený modul při práci. Je zde jasně vidět jeden červeně zabarvený článek, což značí zvýšený proud a tím i ztráty v tomto článku.

7.3.5.2 Měření 6.3.2017

Toto měření proběhlo při oblačném počasí, jasno bylo hodinu před měřením, v době měření slunce nesvítilo. Teplota během měření činila 7,4 °C, vlhkost 77 %.



Obrázek 33. měření termokamerou 6.3.2017

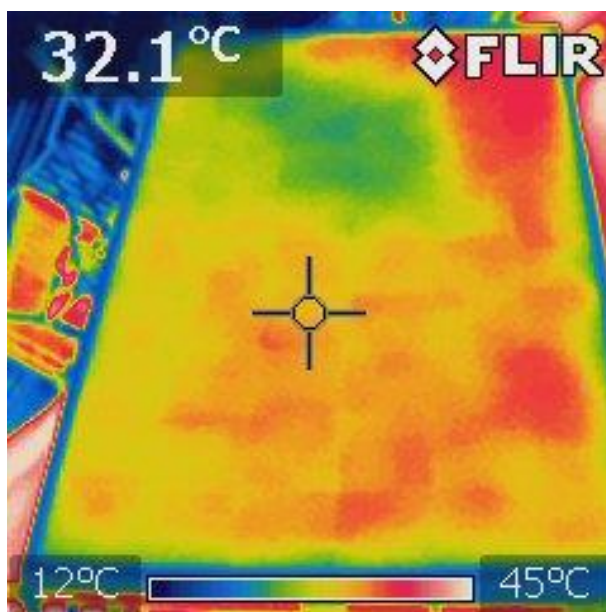


Obrázek 34: měření termokamerou 6.3.2017

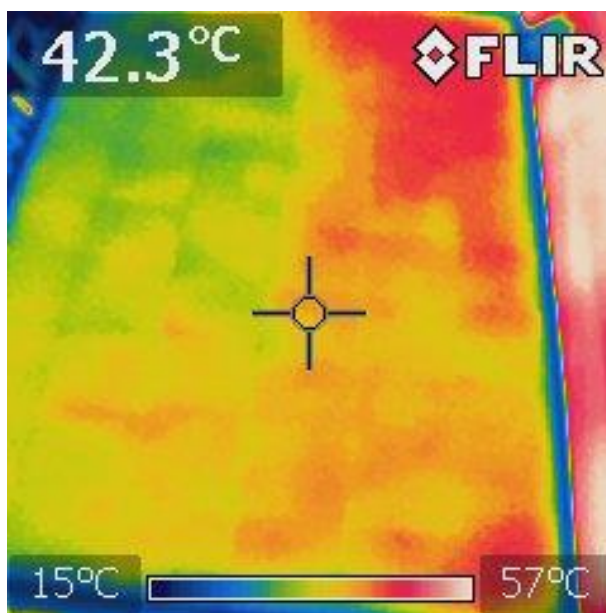
Jak vypovídají fotografie z termokamery na obrázcích č. 33 a 34, stále je možné vidět jeden ztrátový článek. Z rozložení teplot je dále možno usoudit, že slunečnímu záření je více vystavena spodní část modulu, než vrchní.

7.3.5.3 Měření 2.5.2017

Poslední měření proběhlo při jasném a slunečném počasí. Teplota 17 °C, vlhkost 50 %. FV modul byl zahřátý přibližně na 50 °C.



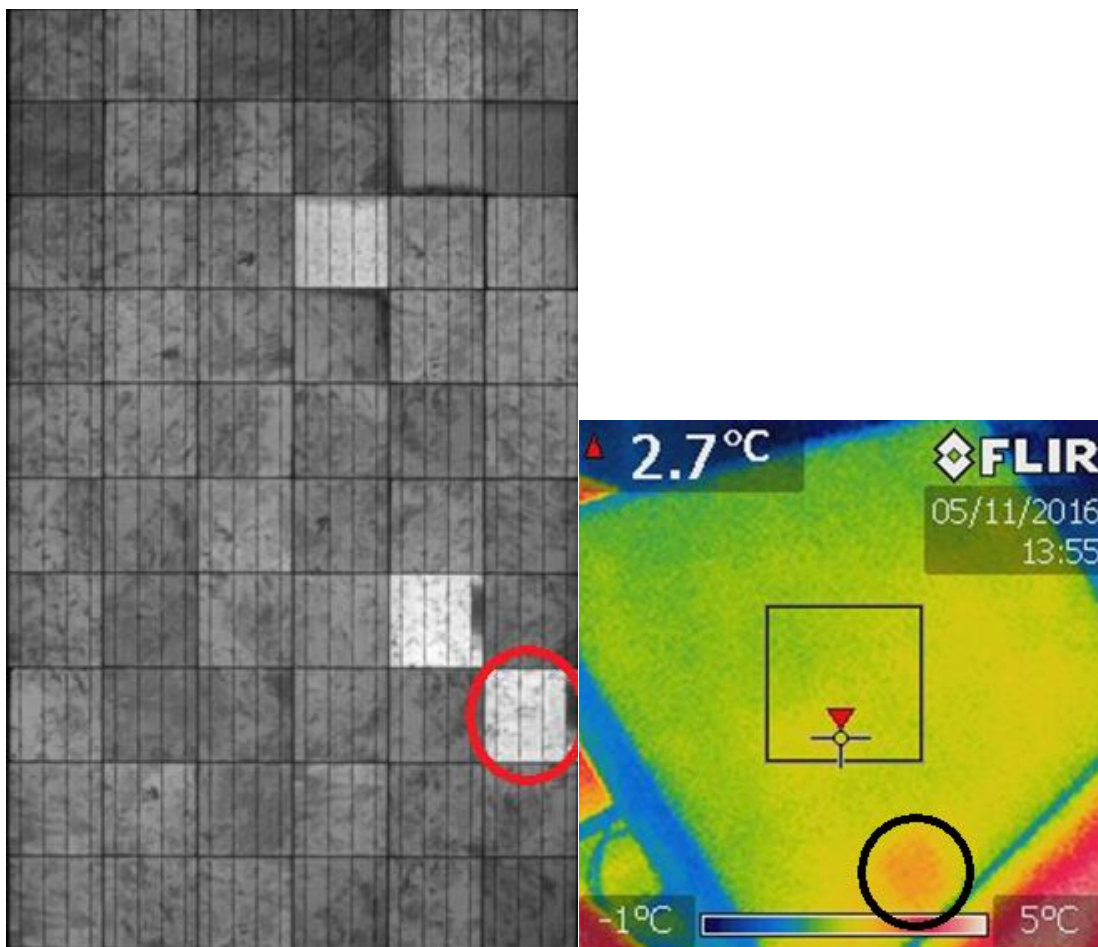
Obrázek 35: měření termokamerou 2.5.2017



Obrázek 36: měření termokamerou 2.5.2017

Z pořízených fotografií na obrázcích č. 35 a 36 je patrné, že modul je více zahřátý na spodní straně. Na tuto nerovnost může mít vliv postavení slunce v době měření, kdy již nesvítilo rovnoměrně na celý modul. Dále je z těchto obrázků patrné, že při vysokých teplotách se modul rozpálí celý a není ho tedy možné termokamerou kvalitně nasnímat.

7.3.6 Porovnání elektroluminiscence/termokamera



Obrázek 37: porovnání elektroluminiscence/termokamera

Jak je z obrázku č. 37 vidět, měření pomocí termokamery potvrdilo jedno výrazně teplejší místo. Dle mého odhadu se zakroužkovaná místa shodují. Existuje zde tedy hůře pracující článek, který může mít vliv na pokles výkonu modulu.

8 ZÁVĚR

Teoretická část bakalářské práce popisuje současný stav problematiky solárních modulů se zaměřením na degradační vlivy, které ovlivňují činnost a životnost solárních systémů. Tato bakalářská práce sleduje především vliv klimatických podmínek na chování FV modulu, proto je jim v teoretické části práce věnována vysoká pozornost.

Důležitou součástí teoretického zkoumání jsou diagnostické metody. Je zde popsána většina nejdůležitějších a nepoužívanějších metod, včetně elektroluminiscence, měření V-A charakteristiky a měření pomocí termokamery, které byly použity i při vlastním praktickém měření.

V praktické části práce byl nakonec měřen pouze jeden modul výrobce Amerisolar, který je součástí ostrovního solárního systému instalovaného na střeše rekreačního objektu v obci Smrčná na Jihlavsku. Byl vybrán, protože je instalován v místě se silnými a měnícími se klimatickými vlivy. Proto odpovídá mému záměru posouzení klimatických vlivů na fotovoltaické moduly. Dále se jedná o modul, který je v mém vlastnictví, a tedy k němu mám neomezený přístup.

Modul byl nejprve podroben testu elektroluminiscence a měření V-A charakteristiky v certifikované laboratoři na VUT v Brně. Toto měření proběhlo poprvé v říjnu roku 2016. Měření pomocí elektroluminiscence upozornilo na dva hůře pracující články a také na zkratky na některých článcích. Tyto výsledky jsou zaznamenány v kapitole 7.3.3. Změřená V-A charakteristika ukázala, že modul pracuje s výkonem 242 W namísto výrobcem deklarovaných 255 W. Výkon 242 W je ovšem v toleranci výrobce, který ve své dokumentaci uvádí výrobní odchylku 10 %. Dále efektivita modulu činí 14,9 %, což odpovídá hodnotě v dokumentaci výrobce pro daný výkon.

Následně bylo provedeno měření pomocí termokamery. Měření probíhalo přímo na místě, kde je modul instalován, za provozu. Celkově proběhla tři měření, postupně během listopadu 2016, března 2017 a května 2017. Tato měření potvrdila, že minimálně jeden článek nepracuje správně, jak je vidět v kapitole 7.3.6., kde jsou porovnány měření elektroluminiscence a měření termokamerou.

V květnu roku 2017 bylo provedeno druhé měření elektroluminiscence a V-A charakteristiky v laboratoři VUT v Brně. Výsledky měření jsou totožné s těmi z prvního měření. Lze z nich usuzovat, že vadami, které obě měření ukázala (světlejší články, tmavé pruhy značící zkratky, nižší výkon) trpí modul již z výroby.

Měření trvajících 7 měsíců neprokázalo výraznou degradaci modulu vlivem klimatických podmínek, na které byla tato práce zaměřena. A proto by bylo vhodné takovéto měření provádět dlouhodobě. Řádově v desítkách let, aby bylo možné získat vypovídající výsledky.

9 SEZNAM LITERATURY

- [1]. **Czech renewable energy agency.** Cenové rozhodnutí ERÚ. *Česká agentura pro obnovitelné zdroje energie.* [Online] 2009. [Citace: 21. Říjen 2016.] <http://www.czrea.org/cs/energetika-a-legislativa-v-cr/cenove-rozhodnuti/>.
- [2]. **Kladiva, Bc. Roman.** Závěrečné práce. *VUT Brno.* [Online] 2013. [Citace: 10. Listopad 2016.] https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=68659.
- [3]. **Ing. Benda, Vítězslav.** Solární články z krystalického křemíku - základní technologie současné fotovoltaiky. *tzbinfo.* [Online] ČVUT Praha, Fakulta elektrotechnická, katedra elektrotechnologie, 25. Zář 2006. [Citace: 15. Listopad 2016.] <http://www.tzb-info.cz/3553-solarni-clanky-z-krystalickeho-kremiku-zakladni-technologie-soucasne-fotovoltaiky>.
- [4]. **tzb-energ.** Fotovoltaika. *Tzb-energ.* [Online] [Citace: 25. Říjen 2016.] <http://www.tzb-energ.cz/fotovoltaika.html>.
- [5]. **Jandová, Ing. Kristýna.** [Online] 2008. [Citace: 20. Říjen 2016.] <https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/12779/DIS-jandova.pdf?sequence=1>.
- [6]. **Vlček, Bc. Josef.** [Online] 2014. [Citace: 29. Listopad 2016.] https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=103128.
- [7]. **Fotovoltaika v podmínkách České republiky.** *isofenergy.* [Online] ISOFEN ENERGY s.r.o. [Citace: 12. 04 2017.] <http://www.isofenenergy.cz/slunecni-zareni-v-cr.aspx>.
- [8]. **BC., Lejsek Jaroslav.** Digitální knihovna Západočeské univerzity v Plzni. [Online] 2014. https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/11025/15297/1/Lejsek_Jaroslav_B_C.pdf.
- [9]. **Ptáme se experta: Je sníh hrozbou pro konstrukci?** *Solárninovinky.cz.* [Online] 12. 02 2015. [Citace: 27. 04 2017.] <http://www.solarninovinky.cz/?zpravy/2015021001/ptame-se-experta-je-snih-hrozbou-pro-konstrukci>.
- [10]. **Mapa sněhových oblastí (platná od října 2006).** *snihnastrese.cz.* [Online] LLENTAB, spol. s r.o. . <http://www.snihnastrese.cz/mapa-snehovych-oblasti/>.
- [11]. **JA Solar Holdings Co., Ltd. .** Fotovoltaické panely JA Solar úspěšně prošly náročnými zkouškami odolnosti proti krupobití. *tzbinfo.* [Online] 30. 03 2015. [Citace: 21. 03 2017.] <http://oze.tzb-info.cz/solarni-kolektory/116574-fotovoltaicke-panely-ja-solar-uspesne-prosly-narocnymi-zkouskami-odolnosti-proti-krupobiti>.
- [12]. *slideplayer.cz.* [Online] <http://slideplayer.cz/slide/3370736/>.

- [13]. **Ing. Milan Tomeš, CSc.** Pružné fotovoltaické moduly ano či ne? *tzb-info*. [Online] 23. 07 2007. [Citace: 12. 05 2017.] <http://www.tzb-info.cz/4251-pruzne-fotovoltaicke-moduly-ano-ci-ne>.
- [14]. **Mačát, Jakub.** [Online] 2015. [Citace: 21. Říjen 2016.] <https://dspace.vutbr.cz/xmlui/handle/11012/40000>.
- [15]. **Ing. Lahký, Martin.** Pokles výkonu fotovoltaických elektráren v důsledku vysokonapětového stresu. *tzbinfo*. [Online] 26. Leden 2015. [Citace: 25. Říjen 2016.] <http://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/12260-pokles-vykonu-fotovoltaickych-elektren-v-dusledku-vysokonapetoveho-stresu>.
- [16]. **EICERO.** PID v centru pozornosti letošního veletrhu Intersolar. *EICERO*. [Online] 2016. [Citace: 14. Listopad 2016.] <https://eicero.cz/aktuality/pid-v-centru-pozornosti-letosniho-veletrhu-intersolar>.
- [17]. **Solar power world.** [Online] 11. Leden 2010. [Citace: 30. Listopad 2016.] <http://nature-log.blogspot.cz/2010/01/definitions-of-solar-power-terms.html>.
- [18]. **Ing. Jakubes, Jaroslav.** Fenomén „Snail Trails“ / „šnečí cestičky“. *tzbinfo*. [Online] ENA, s. r. o., 8. Zář 2012. [Citace: 25. Říjen 2016.] <http://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/9020-fenomen-snail-trails-sneci-cesticky>.
- [19]. **Ing. Hylský, Josef, Ing Stráchala, David a Doc. Vaněk, Jiří.** Analýza modulů fotovoltaické elektrárny Dukovany. *tzbinfo*. [Online] 15. Listopad 2015. [Citace: 15. Listopad 2016.] <http://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/13447-nejstarsi-fotovoltaicka-elektarna-v-ceske-republice>.
- [20]. **Tepelné záření.** *Termokamera.cz*. [Online] <http://www.termokamera.cz/princip-a-funkce/tepelne-zareni/>.
- [21]. **Prof. Ing. Benda, Vítězslav.** Podrobné principy fotovoltaiky. *Solárne noviny*. [Online] 30. Červen 2014. [Citace: 23. Listopad 2016.] <http://www.solarnenovinky.sk/technika/2014/07/30/podrobne-principy-fotovoltiky-ceska-vysoka-skola-technicka-praha-prof-ing-vitezslav-benda-csc>.
- [22]. **Mgr. Řiháček, Aleš.** Solární novinky. *Expert: Snížení výkonů panelů v důsledku PID lze eliminovat*. [Online] EICERO s.r.o., 25. Květen 2015. [Citace: 2. Listopad 2016.] http://www.solarninovinky.cz/indNR.php?zpravy/2015052001/experti-snizeni-vykonu-panelu-v-dusledku-pid-lze-eliminovat#.WCm7zMmlV_l.
- [23]. **Czech renewable energy agency.** Fotovoltaika pro každého. *Česká agentura pro obnovitelné zdroje energie*. [Online] 2009. [Citace: 21. Říjen 2016.] <http://www.czrea.org/cs/druhy-oze/fotovoltaika>.

Seznam zkratek

PID...potenciálem indukovaná degradace

ERÚ...energetický regulační úřad

R_{SH} ...svodový odpor

M_{PP} ...maximální pracovní bod

V_{OC} ...napětí na prázdko

P_{MAX} ...maximální pracovní bod

V_{OC} ...napětí na prázdko

V_{MP} ...maximální výstupní napětí

I_{MP} ...maximální výstupní proud

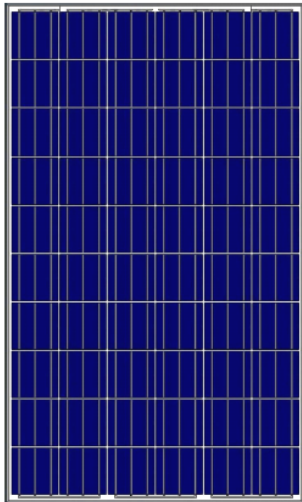
I_{SC} ...maximální proud procházející modulem

Příloha



AS-6P30

POLYCRYSTALLINE MODULE



Passionately
committed to
delivering innovative
energy solution

ADVANCED PERFORMANCE & PROVEN ADVANTAGES

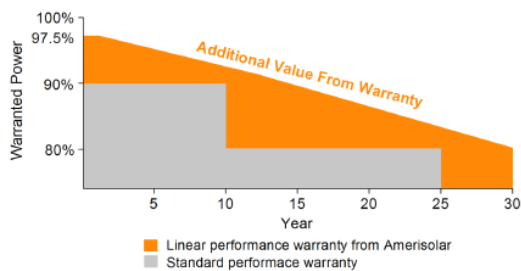
- High module conversion efficiency up to 16.90% through advanced manufacturing technology.
- Low degradation and excellent performance under high temperature and low light conditions.
- Robust aluminum frame ensures the modules to withstand wind loads up to 2400Pa and snow loads up to 5400Pa.
- Positive power tolerance of 0 ~ +3 %.
- High ammonia and salt mist resistance.
- Potential induced degradation (PID) resistance.

CERTIFICATIONS

- IEC61215, IEC61730, IEC62716, IEC61701, UL1703, CE, ETL(USA), JET(Japan), J-PEC(Japan), MCS(UK), CEC(Australia), FSEC(FL-USA), CSI Eligible(CA-USA), Israel Electric(Israel), Kemco(South Korea), InMetro(Brazil), TSE(Turkey)
- ISO9001:2008: Quality management system
- ISO14001:2004: Environmental management system
- OHSAS18001:2007: Occupational health and safety management system

SPECIAL WARRANTY

- 12 years limited product warranty.
- Limited linear power warranty: 12 years 91.2% of the nominal power output, 30 years 80.6% of the nominal power output.



ELECTRICAL CHARACTERISTICS AT STC

Nominal Power (P_{max})	240W	245W	250W	255W	260W	265W	270W	275W
Open Circuit Voltage (V_{oc})	37.7V	37.9V	38.0V	38.1V	38.2V	38.3V	38.4V	38.5V
Short Circuit Current (I_{sc})	8.57A	8.66A	8.75A	8.83A	8.90A	8.98A	9.06A	9.15A
Voltage at Nominal Power (V_{mp})	29.9V	30.1V	30.3V	30.5V	30.7V	30.9V	31.1V	31.3V
Current at Nominal Power (I_{mp})	8.03A	8.14A	8.26A	8.37A	8.47A	8.58A	8.69A	8.79A
Module Efficiency (%)	14.75	15.06	15.37	15.67	15.98	16.29	16.60	16.90
Operating Temperature	-40°C to +85°C							
Maximum System Voltage	1000V DC							
Fire Resistance Rating	Type 1(UL1703)/Class C(IEC61730)							
Maximum Series Fuse Rating	15A							

STC: Irradiance 1000W/m², Cell temperature 25°C, AM1.5

ELECTRICAL CHARACTERISTICS AT NOCT

Nominal Power (P_{max})	177W	180W	184W	188W	191W	195W	199W	202W
Open Circuit Voltage (V_{oc})	34.7V	34.9V	35.0V	35.1V	35.2V	35.3V	35.4V	35.5V
Short Circuit Current (I_{sc})	6.94A	7.01A	7.09A	7.15A	7.21A	7.27A	7.34A	7.41A
Voltage at Nominal Power (V_{mp})	27.2V	27.4V	27.6V	27.8V	27.9V	28.1V	28.3V	28.5V
Current at Nominal Power (I_{mp})	6.51A	6.57A	6.67A	6.77A	6.85A	6.94A	7.04A	7.09A

NOCT: Irradiance 800W/m², Ambient temperature 20°C, Wind Speed 1 m/s

MECHANICAL CHARACTERISTICS

Cell type	Polycrystalline 156x156mm (6x6inches)
Number of cells	60 (6x10)
Module dimensions	1640x992x40mm (64.57x39.06x1.57inches)
Weight	18.5kg (40.8lbs)
Front cover	3.2mm (0.13inches) low-iron tempered glass
Frame	Anodized aluminum alloy
Junction box	IP67, 3 diodes
Cable	4mm ² (0.006inches ²), 900mm (35.43inches)
Connector	MC4 or MC4 compatible

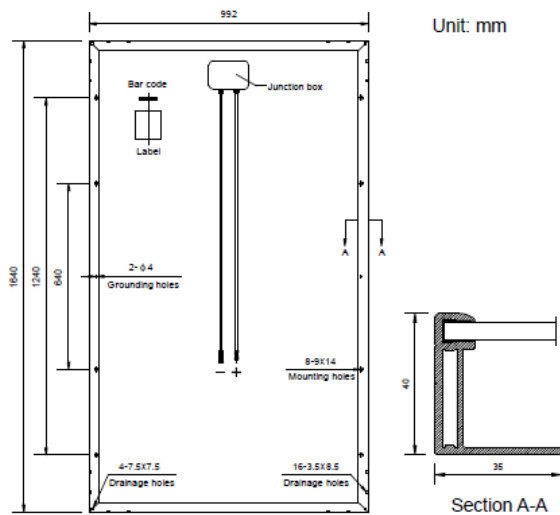
TEMPERATURE CHARACTERISTICS

Nominal Operating Cell Temperature (NOCT)	45°C±2°C
Temperature Coefficients of P_{max}	-0.43%/°C
Temperature Coefficients of V_{oc}	-0.33%/°C
Temperature Coefficients of I_{sc}	0.056%/°C

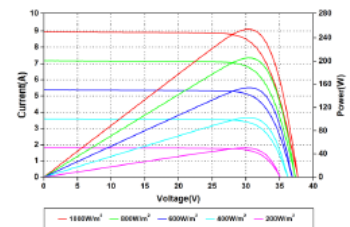
PACKAGING

Standard packaging	26pcs/pallet
Module quantity per 20' container	312 pcs
Module quantity per 40' container	728 pcs

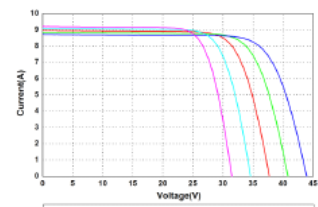
ENGINEERING DRAWINGS



IV CURVES



Current-Voltage and Power-Voltage Curves at Different Irradiances



Current-Voltage Curves at Different Temperatures

Specifications in this datasheet are subject to change without prior notice.

Amerisolar and Amerisolar logo denoted with ® are registered trademarks of Worldwide Energy and Manufacturing USA Co., Ltd.