



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická
Katedra elektrotechnologie

**Studium „Potential Induced Degradation“ (PID) na tenkovrstvých
a-Si:H modulech**

**Study of Potential Induced Degradation (PID) on Thin Film
a-Si:H modules**

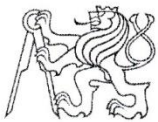
Diplomová práce

Studijní program: Inteligentní budovy

Vedoucí práce: Ing. Tomáš Finsterle

Bc. Maroš Bréda

Praha 2016



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. Maroš Bréda**

Studijní program: **Inteligentní budovy**

Název tématu česky: **Studium „Potential Induced Degradation“ (PID) na tenkovrstvých a-Si:H modulech**

Název tématu anglicky: **Study of Potential Induced Degradation (PID) on Thin Film a-Si:H modules**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Proveďte rešerši na téma Potential Induced Degradation (PID), a to zejména ohledně projevů této degradace u tenkovrstvých modulů.
- 2) Proveďte sérii experimentů na sadě tenkovrstvých modulů se snahou zhodnotit vznik PID efektu v závislosti na provozních podmínkách (napětí, teplota, vlhkost).
- 3) Pokuste se ze získaných dat vyvodit možné příčiny degradace a také jak degradaci zabránit, popřípadě regenerovat zasažené moduly.

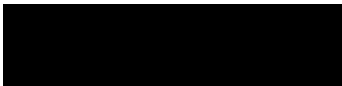
Seznam odborné literatury:

- [1] Gray, Jeffery L.: The Physics of the Solar Cell. A. Luque a S. Hegedus. *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*. Chichester : John Wiley & Sons, Ltd., 2003, 3.
- [2] Taylor, N. (Ed.): *Guidelines for PV Power Measurement in Industry*, Italy: European Commission, Joint Research Centre, Institute for Energy. 2010-04. Cite 2011. ISBN: 978-92-79-15780-6.
- [3] KÖNTGES, Marc, Sarah KURTZ, Corinne PACKARD, Ulrike JAHN a Karl A. BERGER: *Review of Failures of Photovoltaic Modules: Report IEA-PVPS T13-01:2014*. 2014. ISBN 978-3-906042-16-9.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Tomáš Finsterle (K13113)

Datum zadání diplomové práce: 18. ledna 2016

Platnost zadání do¹: 30. září 2017


Doc. Ing. Jan Holub, Ph.D.
vedoucí katedry




Prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 18. 1. 2016

¹ Platnost zadání je omezena na dobu tří následujících semestrů.

ABSTRAKT

Táto práca sa zaoberá štúdiou potenciálom indukovanej degradácie na tenkovrstvých a-Si:H moduloch. V teoretickej časti postupne popisuje princípy, parametre a technológie fotovoltaického článku a panelu. Ďalej sú objasnené metódy používané k diagnostike fotovoltaických panelov a spôsoby ich degradácie. V praktickej časti práca skúma a simuluje samotnú potenciálom indukovanú degradáciu na fotovoltaických moduloch. Výsledky meraní sú zhodnotené v záverečnej časti.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

Fotovoltaický článok, tenkovrstvé fotovoltaické panely, potenciálom indukovaná degradácia, flash test, elektroluminiscencia, impedančná spektroskopia

ABSTRACT

This thesis is focused on study of potential induced degradation on thin film a-Si:H modules. The theoretical part describes principles, parameters and technology of photovoltaic cell and panel. The next part clarifies methods use for diagnostic of photovoltaic modules and ways of degradation. Practical part is devoted to simulation of potential induced degradation of photovoltaic modules. The evaluation of results is provided in final chapter.

KEYWORDS

Photovoltaic cell, thin film solar panels, potential induced degradation, flash test, electroluminescence, impedance spectroscopy

PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že svoju diplomovú prácu na tému „*Studium „Potential Induced Degradation (PID) na tenkovrstvých a-Si:H modulech*“ som vypracoval samostatne pod vedením vedúceho diplomovej práce a s použitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej diplomovej práce ďalej prehlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto diplomovej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, hlavne som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a/alebo majetkových a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovení § 11 a nasledujúcich zákona č. 121/2000 Sb., o práve autorskom, o právach súvisiacich s právom autorským a o zmene niektorých zákonov (autorský zákon), v znení neskorších predpisov, vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovení časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákonníka č. 40/2009 Sb.

V Prahe dňa

.....

(podpis autora)

POĎAKOVANIE

Ďakujem vedúcemu diplomovej práce pánu Ing. Tomášovi Finsterlemu za účinnú metodickú, pedagogickú a odbornú pomoc a ďalšie cenné rady pri spracovaní mojej diplomovej práce.

V Prahe dňa

.....

(podpis autora)

OBSAH

ÚVOD	8
1 FOTOVOLTAIKA	10
1.1 Princíp fotovoltaického článku.....	10
1.2 Náhradná schéma fotovoltaického článku.....	11
1.3 Parametre fotovoltaického článku	12
1.4 Materiály pre výrobu fotovoltaického článku	14
1.4.1 Články z amorfného kremíku.....	15
1.4.2 Tenkovrstvé fotovoltaické technológie	16
2 DEGRADÁCIA FOTOVOLTAICKÝCH PANELOV	18
2.1 PID – Potenciálom indukovaná degradácia.....	18
2.1.1 Vznik PID efektu.....	18
2.1.2 Prejavy a možnosti riešenia PID efektu	20
2.1.3 PID na tenkovrstvých fotovoltaických paneloch	23
3 DIAGNOSTICKÉ METÓDY	25
3.1 Slniečny simulátor s testerom.....	25
3.1.1 Meranie FV panelov FLASH testom	26
3.2 Elektroluminiscencia	27
3.3 Impedančná spektroskopia	29
4 PRAKTICKÁ ČASŤ	32
4.1 Flash test - na začiatku merania.....	33
4.2 Elektroluminiscencia – na začiatku merania	37
4.3 Impedančná spektroskopia – na začiatku merania	38
4.4 Simulácia PID efektu.....	43

4.4.1 Simulácia PID efektu za štandardných klimatických podmienok.....	45
4.4.2 Simulácia PID efektu za zvýšenej vlhkosti.....	48
4.5 Zhodnotenie praktickej časti	56
ZÁVER	57
LITERATÚRA	60
ZOZNAM OBRÁZKOV	63
ZOZNAM TABULIEK	65
ZOZNAM SYMBOLOV, VELIČÍN A SKRATIEK.....	66
ZOZNAM PRÍLOH	67
A Protokol z merania flash testu v LDFS ČVUT	67
B Kompletný návod FV modulu Conrad TPS-103 4W (1. strana)	68
C Kompletný návod FV modulu Conrad TPS-103 4W (2. strana)	69
D Kompletný návod FV modulu Conrad TPS-103 4W (3. strana)	70
E Kompletný návod FV modulu Conrad TPS-103 4W (4. strana).....	71
F Namerané hodnoty pomocou impedančnej spektroskopie pre panely č. 1 a č. 2.....	72
G Namerané hodnoty pomocou impedančnej spektroskopie pre panely č. 3 a č. 4	73
H Namerané hodnoty pomocou impedančnej spektroskopie pre panely č. 5 a č. 6	74
I Namerané hodnoty pomocou impedančnej spektroskopie pre panely č. 7 a č. 8.....	75
J Namerané hodnoty pomocou impedančnej spektroskopie pre panely č. 9 a č. 10	76
K Namerané hodnoty pomocou impedančnej spektroskopie pre panely č. 11 a č. 12	77

ÚVOD

Energia sa v rôznych formách vyskytuje všade okolo nás a je dôležitým faktorom pre samotný život, rozvoj a pokrok spoločnosti na našej planéte. Jedným zo základných zdrojov energie je Slnko, ktorého potenciál je nevyčerpateľný a tak je vhodné vedieť túto energiu spracovať.

Prostriedkami na uskutočnenie premeny solárnej energie na energiu elektrickú sú fotovoltaické články, ktoré sa spájajú a vznikajú z nich fotovoltaické panely. V praxi existuje celá rada typov solárnych panelov, ktoré sa líšia použitím, technológiou výroby, veľkosťou, materiálom, atď.

V dnešnej dobe čoraz častejšie využívanou formou fotovoltaických modulov sú panely na báze tenkovrstvých technológií. Ich výhody sú nespochybniteľné a preto sú s obľubou využívané na miestach kde je ich potenciál naplno využitý. Rovnako ako z klasických kryštalických technológií aj z tenkovrstvých modulov sa stavajú solárne elektrárne, ktoré majú značné výhody a v 21. storočí sú všeobecne známe ako jeden zo základných prvkov výroby tzv. čistej energie, teda energie minimálne zaťažujúcej životné prostredie.

Za dobu životnosti fotovoltaickej elektrárne môže vzniknúť mnoho problémov a tak je im vhodné predchádzať správnym návrhom systému, využitím najvhodnejších komponentov, či už sa jedná o samotné fotovoltaické moduly, meniče, akumulátory, vodiče a pod. Ak sa zameriame na problémy, ktoré najčastejšie trápia majiteľov fotovoltaických elektrární zistíme, že mimo iné je jedným z nich aj pokles výkonu elektrárne s pribúdajúcou dobou činnosti systému. Dôvodov môže byť mnoho, no jedným z nich, prekvapujúco do dnešnej doby málo skúmaným, je potenciálom indukovaná degradácia, tzv. PID efekt. Jedná sa o závažným problém, ktorý vzniká z dôvodu veľkého napätia aktívnej štruktúry FV modulu v reťazci voči zemi. PID spôsobuje nevhodnú zmenu polarizácie nábojov fotovoltaického článku a vďaka tomu nie je tento článok schopný dodávať elektrický prúd.

V tejto práci sa venujem štúdiu „Potential Induced Degradation“ (PID) na tenkovrstvých fotovoltaických paneloch vyrobených z amorfného kremíku.

V prvej kapitole sa zaoberám samotným fotovoltaickým článkom, jeho parametrami, náhradnou schémou, princípom, na ktorom funguje a materiálmi, z ktorých sa

vyrába. Detailnejšie popisujem tenkovrstvé fotovoltaické technológie.

V druhej kapitole popisujem spôsob degradácie fotovoltaických panelov, konkrétne potenciálom indukovanú degradáciu. Zaoberám sa príčinami vzniku a možnosťami riešenia PID efektu. Uvádzam možné prejavy tejto degradácie na tenkovrstvých fotovoltaických paneloch.

V nasledujúcej kapitole teoreticky popisujem metódy, ktoré slúžia na diagnostiku fotovoltaických panelov. Venujem sa ich fyzikálnemu princípu, spôsobu akým vyhodnocujú namerané údaje, podrobne vysvetľujem v čom spočívajú výhody každej z diagnostických metód.

Obsahom štvrtej kapitoly je praktická časť, ktorá simuluje a následne skúma potenciálom indukovanú degradáciu na amorfných tenkovrstvých FV moduloch a to ako za štandardných klimatických podmienok, tak aj za zvýšenej vlhkosti okolitého prostredia.

Prácu uzatváram celkovým zhodnotením praktickej časti a formuláciou dosiahnutých výsledkov experimentu.

Cieľom tejto diplomovej práce je teoreticky aj prakticky priblížiť problematiku potenciálom indukovanej degradácie vznikajúcu na tenkovrstvých fotovoltaických moduloch, možnosti jej diagnostiky a následné spôsoby riešenia tohto problému.

1 FOTOVOLTAIKA

Fotovoltaika je vedný obor zaoberajúci sa procesom premeny slnečnej energie na energiu elektrickú. K premene využíva fotovoltaické články, ktoré je možné popísať ako polovodičové diódy s veľkou plochou P-N prechodu. Fotovoltaika sa radí do oblasti obnoviteľných zdrojov energie a vzhľadom k obrovskému potenciálu slnečnej energie, je možné do budúcnosti počítať s tým, že bude mať zásadnú rolu v energetickom hospodárstve našej planéty. Časom by mohla energia zo Slnka nahradiť fosílna palivá, tepelné elektrárne a ďalšie, dnes hojne využívané, zdroje energie. [5]

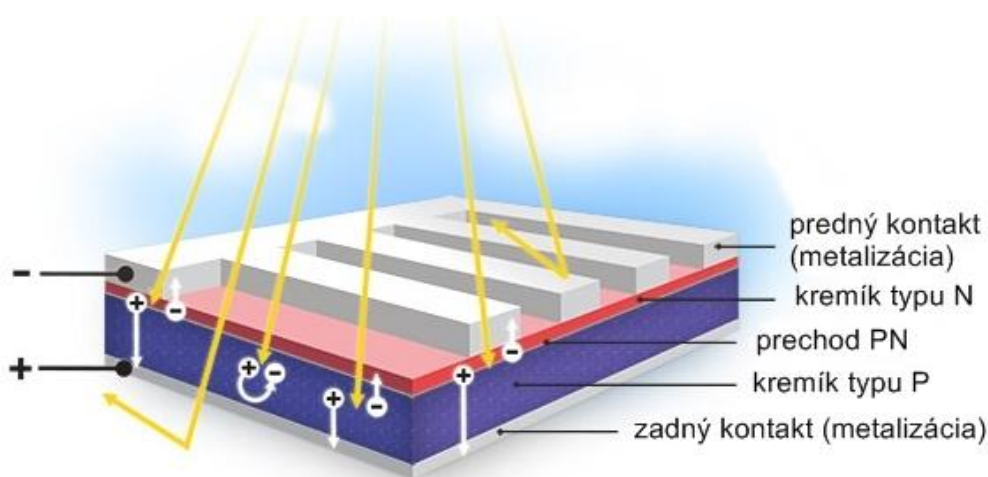
1.1 Princíp fotovoltaického článku

Premena slnečnej energie na energiu elektrickú prebieha pomocou tzv. fotovoltaického javu. Ten objavil v roku 1839 francúzsky vedec Alexandre Edmond Becquerel. Vedeckými pokusmi bolo neskôr zistené, že základom fotovoltaickej technológie je fotoelektrický jav.

Slnečné svetlo by sa dalo označiť ako prúd tzv. fotónov. Fotóny sú častice solárnej energie. Každý z nich má určitú vlnovú dĺžku, ktorá zároveň určuje, akú veľkú energiu daný fotón obsahuje. Z toho vyplýva, že energia fotónov je závislá na vlnovej dĺžke spektra svetelného žiarenia. Pokiaľ dopadne fotón na fotovoltaický článok, môžu nastať tri prípady reakcie:

- dopadnutý fotón sa od solárneho článku odrazí,
- fotón je článkom pohltý,
- fotón prejde skrz článok (v prípade, že má dostatok energie). [11] [20]

Celú situáciu dokumentuje Obr. 1.1, v pravej časti obrázku je možné sledovať odrazenie dopadajúceho fotónu, stredná časť obsahuje niekoľko fotónov, ktoré boli plne pohltené a v ľavej časti obrázku je naznačený fotón, ktorý mal natoľko veľkú energiu, že dokázal prejsť celým článkom skrz.



Obr. 1.1: Princíp fotovoltaického článku. [11]

Z hľadiska fotovoltaiky sú najdôležitejšie fotóny, ktoré sú článkom pohltené. Tie sú totiž schopné vytvárať elektrickú energiu. Pohltený fotón odovzdá svoju energiu elektrónu v atóme článku, ktorý sa vyrába z polovodičového materiálu. Elektrón, ktorý takto získal energiu z pohlteneho fotónu, je schopný uvoľniť sa od jadra atómu a stáva sa časťou elektrického obvodu. Ak elektrón opustí svoju pozíciu, zostáva po ňom diera, ktorá má kladný náboj, tým dôjde ku generácii páru elektrón - diera. Po generácii páru elektrón - diera sa na P-N prechode solárneho článku vytvorí elektrické pole.

Pokiaľ dopadá aj naďalej na fotovoltaický článok prúd fotónov, svetlo uvoľní ďalšie elektróny z kremíkovej mriežky. Tieto voľné elektróny a tiež vzniknuté diery sa elektrickým poľom oddialia tak, že v jednej vrstve kremíku vzniká prebytok elektrónov a v druhej ich je naopak nedostatok.

Ak v tomto stave dôjde k prepojeniu oboch vrstiev nejakým elektrickým spotrebičom, začne sa nedostatok a prebytok elektrónov vo vrstvách vyrovnávať – tečie elektrický prúd. Jeho veľkosť závisí na intenzite ožiarenia solárneho článku. K dispozícii pre vedenie elektrického prúdu je vždy toľko voľných elektrónov, koľko ich bolo uvoľnených energetickou výmenou vďaka dopadajúcim fotónom. [1] [11] [20]

1.2 Náhradná schéma fotovoltaického článku

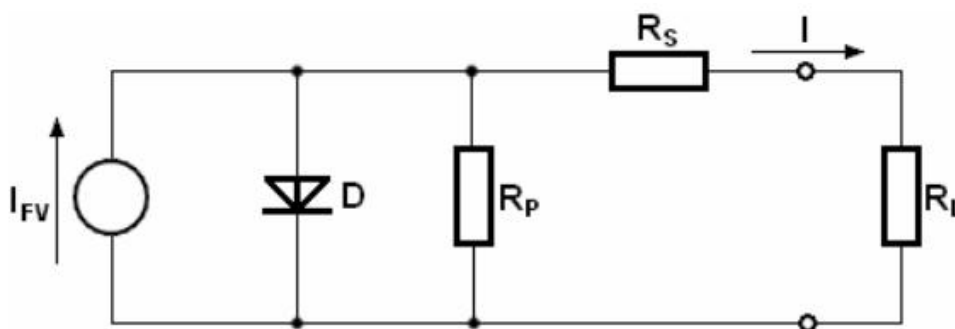
Princíp solárneho článku je možné popísať pomocou jeho náhradnej schémy, ktorá je zobrazená na Obr. 1.2. Solárny článok sa chová ako reálny zdroj prúdu. Čím vyššia bude intenzita dopadajúceho žiarenia, tým sa bude generovať väčší prúd I_{FV} a dôjde

k rastu výstupného výkonu.

Sériový odpor R_S reprezentuje prechodové odpory na jednotlivých kontaktoch, vplyvom odporu prívodných vodičov. V praxi sa tento odpor prejaví ako vnútorný odpor zdroja, na ktorom dochádza k úbytku napätia. Čím väčší je tento odpor, tým menej prúdu sa dostane do záťaže.

Paralelný odpor R_P reprezentuje parazitný jav, ktorý je spôsobený defektmi kryštalickej mriežky a zvodovým prúdom okolo okrajov článku. V ideálnom prípade by bola hodnota tohto odporu nekonečno. V praxi sa tento odpor prejaví úbytkom napätia na článku.

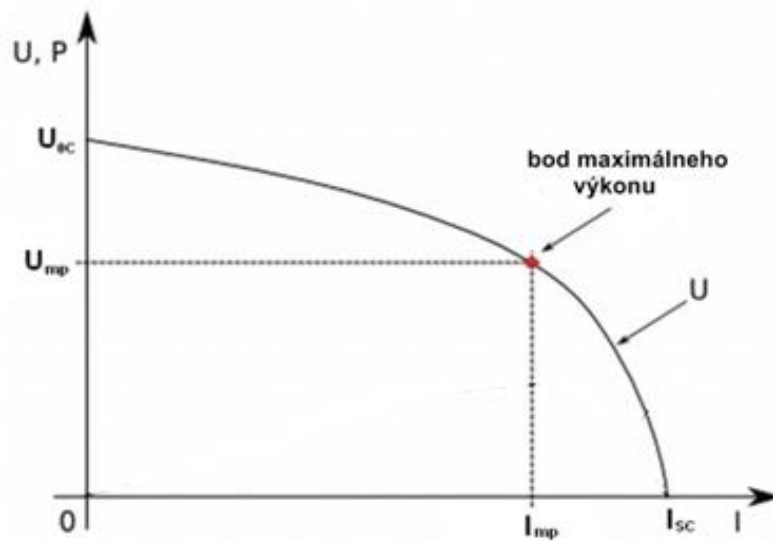
Odpor R_L predstavuje pripojenú záťaž solárneho článku. Maximálny výkon článku je daný čo najmenšou hodnotou sériového odporu R_S a čo najväčšou hodnotou paralelného odporu R_P . [13]



Obr. 1.2: Náhradná schéma solárneho článku. [13]

1.3 Parametre fotovoltického článku

Voltampérová charakteristika Obr. 1.3 je základnou informáciou o činnosti fotovoltických článkov. V-A charakteristika popisuje grafickú závislosť prúdu na napätí a je z nej možné vyčítať základné veličiny fotovoltického modulu.



Obr. 1.3: V-A charakteristika fotovoltaiického článku. [1]

- **Prúd nakrátko I_{SC} [A]**

Prúd nakrátko alebo tiež skratový prúd I_{SC} je prúd pri nulovom napätí. Jeho veľkosť je v rádoch jednotiek ampér a je závislý na intenzite osvetlenia, spektrálnej citlivosti, teplote a ploche panelu.

- **Napätie naprázdno U_{OC} [V]**

Napätie naprázdno U_{OC} je maximálne napätie na svorkách fotovoltaiického panelu bez pripojenej záťaže a teda aj pri nulovom prúde. Pohybuje sa v rozmedzí desiatok voltov.

- **Maximálny výkon P_{MP} [W]**

P_{MP} je maximálny výkon, ktorý je schopný panel dodávať. Maximálny výkon je v ohybe V-A charakteristiky v bode maximálneho výkonu (MPP) a je daný vzťahom

$$P_{MP} = U_{MP} \cdot I_{MP}, \quad (1.1)$$

I_{MP} je prúd v bode maximálneho výkonu a U_{MP} je napätie v bode maximálneho výkonu.

- **Faktor plnenia FF [-]**

Faktor plnenia (fill factor) je hodnotiaci parameter, ktorý sa vypočíta podľa vzťahu

$$FF = \frac{U_{MP} \cdot I_{MP}}{U_{OC} \cdot I_{SC}}. \quad (1.2)$$

Je to pomerové číslo maximálneho výkonu ku prúdu nakrátko vynásobeného napätím naprázdno a ukazuje ako veľmi je meraný článok efektívny.

- **Účinnosť η [%]**

Pre účinnosť FV článku platí vzťah

$$\eta = \frac{U_{MP} \cdot I_{MP}}{P_{in}} \quad (1.3)$$

a určuje ako veľmi je solárny článok účinný v pomere dopadajúceho svetla ku premenenej elektrickej energii.

- **Paralelný odpor R_P [Ω] a sériový odpor R_S [Ω]**

Vplyv paralelného a sériového odporu na FV článok je popísaný v predchádzajúcej podkapitole. [7] [23]

1.4 Materiály pre výrobu fotovoltaického článku

Viac ako 90 % komerčne dostupných fotovoltaických článkov sa vyrába z kremíku. Kremík je najviac využívaný materiál pre výrobu polovodičových súčiastok, preto je jeho technológia výroby na vysokej úrovni a je možné vyrábať kremík s vysokou čistotou, ktorá je pre fotovoltaické články nutná. Nároky na čistotu kremíku majú za následok pomerne vysokú cenu tohto materiálu.

Základný a najstarší typ fotovoltaických článkov sú články vyrobené z monokryštalického kremíku. Momentálne dosahujú najvyššiu účinnosť z dnes v praxi používaných FV článkov. Ich výroba je však energeticky náročná a finančne nákladná.

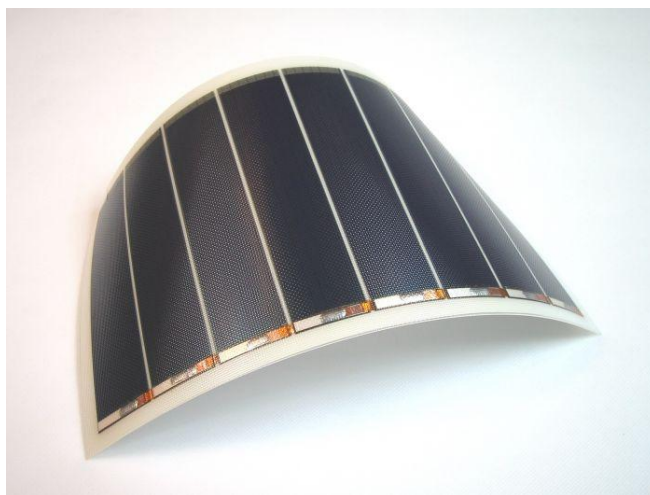
V súčasnosti najbežnejším typom FV článkov sú polykryštalické kremíkové články. Vyrábajú sa odlievaním čistého kremíku do vhodných foriem a rezaním vzniknutých ingotov na tenké plátky. Odlievanie je podstatne jednoduchšie než ťaženie monokryštálu a dajú sa tiež pripraviť bloky so štvorcovým alebo obdĺžnikovým prierezom (lepšie využitie materiálu). Takto vyrobené články majú trocha horšie elektrické vlastnosti (nižší prúd a účinnosť), pretože na styku jednotlivých kryštálových zŕn (ich rozmery sú v ráde milimetrov) je väčší odpor. Zásadnou výhodou je ale to, že začiatočná surovina je lacnejšia a dá sa vyrábať vo väčších rozmeroch a s obdĺžnikovým alebo štvorcovým tvarom. [5]

1.4.1 Články z amorfneho kremíku

Amorfne látky sú látky v pevnom skupenstve, ktoré nemajú pravidelnú (kryštalickú) štruktúru. Zásadná odlišnosť amorfnych solárnych modulov spočíva už v ich samotnej výrobe. Proces je založený na rozklade vhodných zlúčenín kremíku, silanu alebo dichlorsilanu vo vodíkovej atmosfére. Týmto spôsobom je možné pripraviť veľmi tenké vrstvy kremíku, ktoré sa nanášajú na sklenené, nerezové alebo plastové podložky.

Vzniknutá vrstva má však oproti kryštalickému kremíku ďaleko nepravidelnejšiu štruktúru s veľkým množstvom porúch. Niektoré atómy nemajú susedné atómy, s ktorými by mohli tvoriť väzbu. Na týchto miestach môže dochádzať k rekombinácii nábojov, čo má za následok zníženie prúdu a účinnosti. Čiastočne je tento problém odstránený naviazaním vodíku na tieto voľné väzby.

Ďalšou nevýhodou je nestabilita spôsobená z časti práve prítomnosťou vodíku, pretože štruktúra je narušovaná oxidáciou vzdušným kyslíkom. P-N prechod u článkov z amorfneho kremíku je zložený z hornej vrstvy s vodivosťou P, ktorá je veľmi tenká a tak zachytí iba malé množstvo fotónov, až pod ňou je ďalšia tenká vrstva, ktorá nie je dopovaná a v ktorej dochádza k pohlteniu väčšiny dopadajúceho slnečného žiarenia a následnému vytvoreniu voľných elektrónov a dier.



Obr. 1.4: Ohybný amorfny fotovoltaický modul. [24]

Pretože má amorfna vrstva väčšiu absorpciu slnečného žiarenia, môže mať podstatne tenšiu hrúbku. Je možné teda vyrábať veľmi tenké a ohybné fotovoltaické moduly (viď Obr. 1.4). Zatiaľ čo klasické kryštalické články majú hrúbku cca 0,3 mm, amorfny

kremík je nanášaný do vrstiev nepresahujúcich 0,001 mm, odtiaľ označenie “tenkovrstvá technológia”.

Výroba amorfneho modulu je teda lacnejšia, menej materiálovo a energeticky náročná oproti kryštalickým technológiám. Na druhú stranu dnešné amorfné moduly významne zaostávajú za kryštalickými v parametre účinnosti – dosahujú oproti monokryštálu približne polovičnú účinnosť.

Amorfny kremík má oproti kryštalickému jednu veľkú výhodu, netrpí totiž toľko na letné prehrievanie. Amorfny kremík má nižší teplotný súčiniteľ výkonu, jeho účinnosť teda s rastúcou teplotou klesá podstatne pomalšie, než ako je tomu u kryštalického kremíku. V letných mesiacoch je teda z amorfneho modulu lepšia vyťažiteľnosť.

Ďalšou výhodou je samotná vzhľadová odlišnosť modulov založených na amorfnom kremíku – môže byť použiteľný na miestach, kde bola z estetických, krajinárskych alebo podobných dôvodov úradníkmi výstavba slnečnej elektrárne zakázaná, týka sa to napríklad pamiatkovo chránených zón.

Amorfny kremík je tiež technológiou vhodnou na miesta, kde nie je možné splniť požiadavku optimálnej orientácie fotovoltaického systému, teda v prípadoch, kde je kolektorové pole nutné orientovať skôr k východu alebo k západu, teda u odchýlok viacej než 45° od juhu.

Cenové a výkonnostné výhody amorfneho kremíku pomáhajú kompenzovať straty, ktoré plynú z neoptimálnej orientácie panelov. V týchto podmienkach sú výhodnejšie než moduly z kryštalického kremíku. [1] [4] [20]

1.4.2 Tenkovrstvé fotovoltaické technológie

Tenkovrstvé fotovoltaické technológie sa od „klasických“ kryštalických c-Si technológií líšia vlastnou geometriou FV článku, spôsobom výroby, použitými výrobnými materiálmi a ich spotrebou či inými ďalšími vlastnosťami. Vznikajú ukladaním jednotlivých vrstiev polovodičov na podkladový materiál tak, že vznikne FV článok o hrúbke cca 2-5 μm . Nosným materiálom môže byť sklo, kov alebo plastová fólia. Úspory v spotrebe vstupných materiálov sú obrovské asi tisíckrát nižšie než c-Si. Základné technológie tenkovrstvej fotovoltaiky sa delia do niekoľkých skupín podľa použitých materiálov a ich možnosti využitia slnečného spektra.

Najčastejšie v praxi používanými tenkovrstvými technológiami okrem amorfných

FV modulov sú:

- články na báze CdTe (telurid kademnatý),
- články na báze GaAs (arzenid gália),
- FV články CI(G)S zložené z medi (Copper), india (Indium), galia (Gallium), selenu (Selenium),
- organické FV články,
- mikrokryštalické FV články,
- viacprechodové solárne články,
- farbivom senzitivované solárne články DSSC (Dye Sensitized Solar Cell).

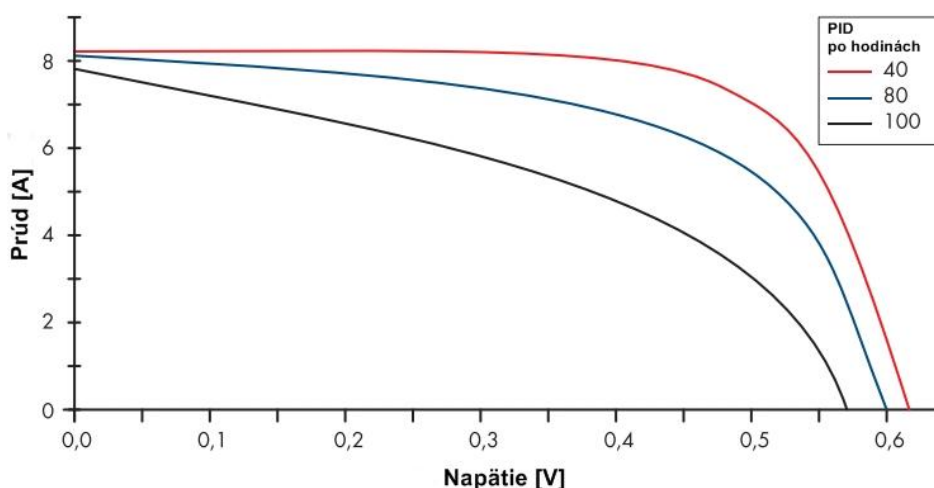
Jednou z hlavných výhod tenkovrstvých (TF) fotovoltaiických technológií je ich vysoká energetická vyťažiteľnosť. TF technológie v reálnom počasí vyrobia v priemere za rok až o 15 % viac energie než c-Si. Súvisí to s tým, že pri nižších intenzitách slnečného svetla relatívna účinnosť TF FV rastie, zatiaľ čo u c-Si klesá.

Ďalšou nemenej dôležitou výhodou je ich nízka teplotná závislosť. Fotovoltaiické technológie sú veľmi závislé na teplote. S rastúcou teplotou klesá napätie a tým aj vyrobený elektrický výkon. U TF FV sú tepelné koeficienty až dvakrát nižšie než u c-Si. Medzi ďalšie výhody TF FV patrí vysoká odolnosť proti zatieneniu. Na rozdiel od c-Si panelov, ktoré sú veľmi citlivé na zatienenie každého jednotlivého FV článku, sú TF FV vďaka inej technológii podstatne odolnejšie proti čiastočnému ale aj celkovému zatieneniu. Ďalšími výhodami sú nízka cena, nižšia citlivosť na uhle dopadu svetla na povrch FV modulu, vysoká samočistiaca schopnosť, príjemný vzhľad, možnosť veľkých rozmerov, krátka doba návratnosti vlozenej energie pri výrobe, atď. [7] [8]

2 DEGRADÁCIA FOTOVOLTAICKÝCH PANELOV

2.1 PID – Potenciálom indukovaná degradácia

Jedná sa o jeden z najvýznamnejších vplyvov, ktorý spôsobuje citeľnú stratu výkonnosti celého fotovoltaického systému. Potential Induced Degradation, skrátene PID, je závažný problém, ktorý sa vyvíja v priebehu životnosti FV modulu. Rozsah zasiahnutia modulu PID sa s postupom času zvyšuje (viď Obr. 2.1) a môže spôsobiť vysoké energetické straty a v konečnom dôsledku celkové zlyhanie modulu.



Obr. 2.1: V-A charakteristiky znázorňujúce priebeh PID s narastajúcim časom pôsobenia. [22]

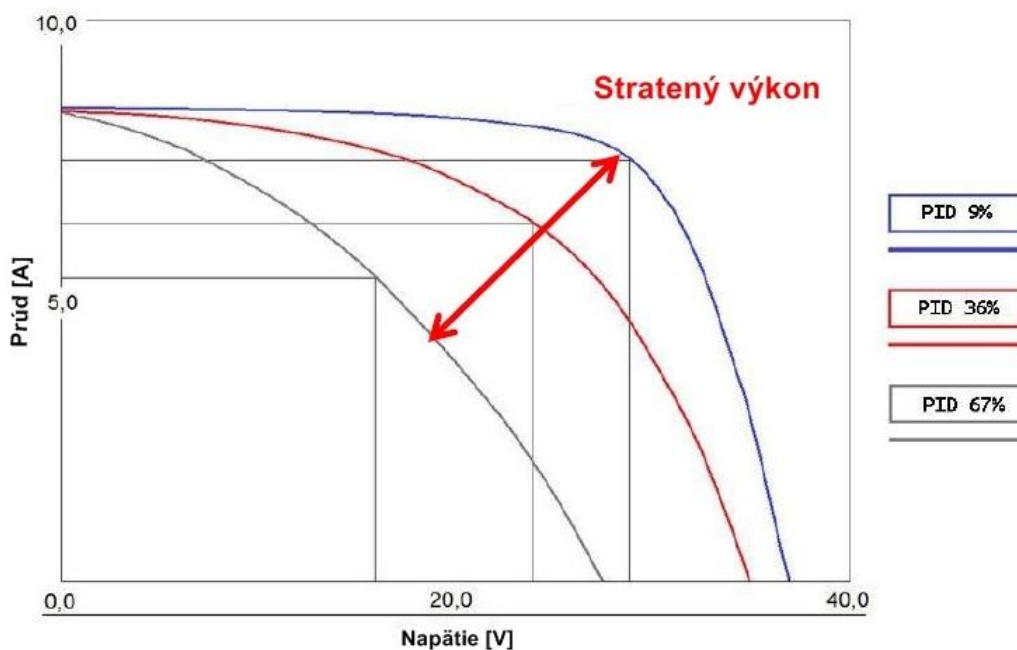
Existuje niekoľko druhov PID. Niektoré sú vratné, iné nie a rovnako tak u niektorých je princíp ich vzniku pomerne známy, zatiaľ čo u iných sa o princípe vzniku len špekuluje. Jedno však majú spoločné, a to že základnou podmienkou pre vznik PID je veľké napätie aktívnej štruktúry FV modulu v reťazci (stringu) voči zemi, preto je možné sa niekedy stretnúť s názvom High-Voltage stress. Hlavnými faktormi, ktoré umožňujú rozvoj PID sú vysoký rozdiel napätí v stringu, teplo a vlhkosť. [17]

2.1.1 Vznik PID efektu

V zásade sa jedná o medzivrstvovú polarizáciu vedúcu až k nevratnej degradácii kremíku vo FV paneloch. PID spôsobuje nevhodnú zmenu polarizácie nábojov fotovoltaického článku a vďaka tomu nie je tento článok schopný dodávať elektrický prúd.

K tomuto javu dochádza hlavne na FV paneloch, ktoré sú najbližšie u záporného pólu v stringu. Tu sa totiž potenciál (napätie voči zemi) FV článkov podľa dĺžky daného stringu (tzn. počtu panelov v stringu) a typu používaného striedača obvykle pohybuje medzi -250 V až -450 V. Rám FV panelov má ale oproti tomu potenciál 0 V, pretože z bezpečnostných dôvodov musí byť uzemnený. Kvôli tomuto elektrickému napätiu medzi FV článkami a rámom môže dôjsť k vzniku zvodových prúdov. To za sebou zanechá náboj (polarizáciu), ktorý môže nevhodným spôsobom pozmeniť charakteristickú krivku FV článku.

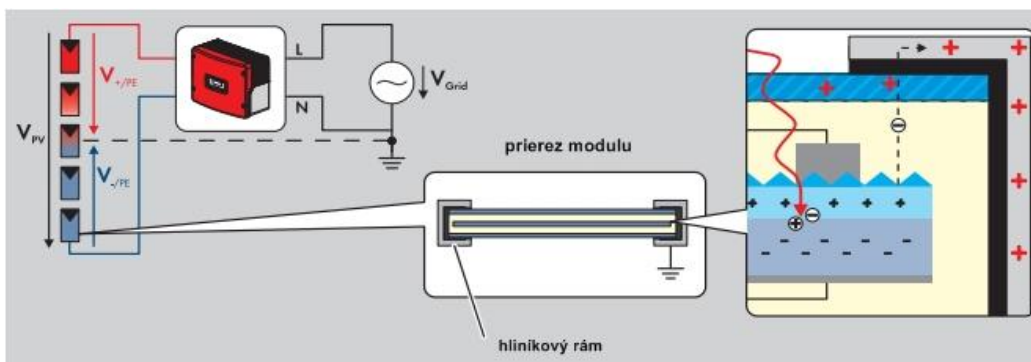
S rastúcim rozdielom potenciálov pritom rastie úmerne aj riziko vzniku degradácie panelu a strata ich výkonnosti (viď Obr. 2.2). Čím viac je teda zapojených modulov v stringu, tým je riziko degradácie a výsledný úbytok výkonnosti vyšší. Najskôr sa teda PID začne prejavovať a najväčšie poškodenie je pozorovateľné na poslednom paneli na zápornom konci stringu. Čím dlhšie PID pôsobí, tým viac postupuje poškodenie na ďalšie panely smerom ku kladnému stringu. [13]



Obr. 2.2: V-A charakteristiky znázorňujúce pokles výkonu FV panelu z dôvodu PID efektu. [15]

Ako už názov napovedá, k potenciálom indukovanej degradácií dochádza vplyvom napätia v module a zvodovému prúdu tvoreného iónmi prechádzajúcimi medzi polovodičový materiál a ďalšími prvkami modulu (napr. sklo, rám, konštrukcia) ako je znázornené na Obr. 2.3, čo spôsobuje znižovanie výstupného výkonu. Mobilita iónov sa

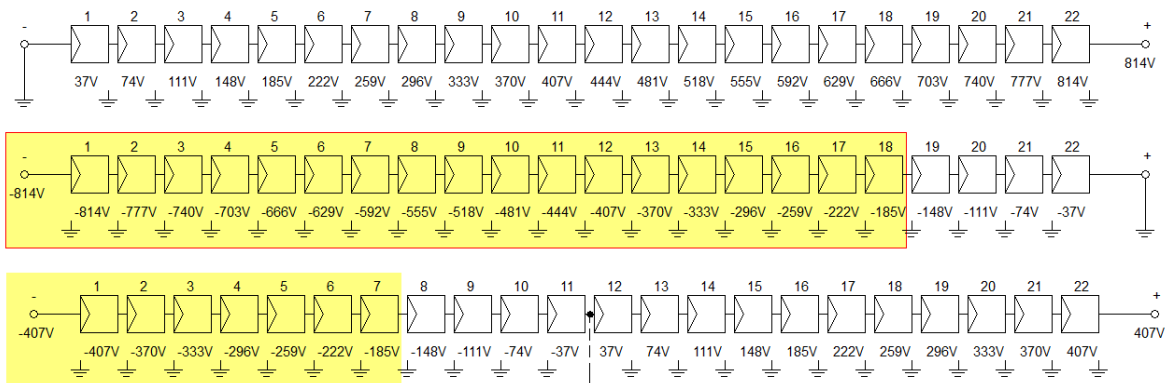
zrýchľuje s rastúcou vlhkosťou, teplotou a napäťovým potenciálom [13].



Obr. 2.3: Ukladanie el. nábojov v dôsledku stratového prúdu medzi článkom a rámom. [22]

2.1.2 Prejavy a možnosti riešenia PID efektu

Pre existenciu PID, ako už bolo spomenuté vyššie, je kľúčová intenzita poľa medzi rámom (v prípade bezrámových modulov medzi vlhkým povrchom modulu) a vnútornou (aktívnou) časťou modulu. S rastúcim počtom modulov v reťazci narastá veľkosť napätia, ktoré na daný modul pôsobí. Riešením je zníženie potenciálu medzi rámom a aktívnou štruktúrou FV modulu, napr. uzemnením záporného pólu, čo je možné o meničov s transformátorom. Naopak najhoršia možná situácia nastáva v prípade uzemnenia kladného pólu (viď Obr. 2.4). V prípade beztransformátorových meničov, kde nie je uzemnený žiaden pól, sa systém chová ako by bol uzemnený uprostred reťazca (viď Obr. 2.4). [17]

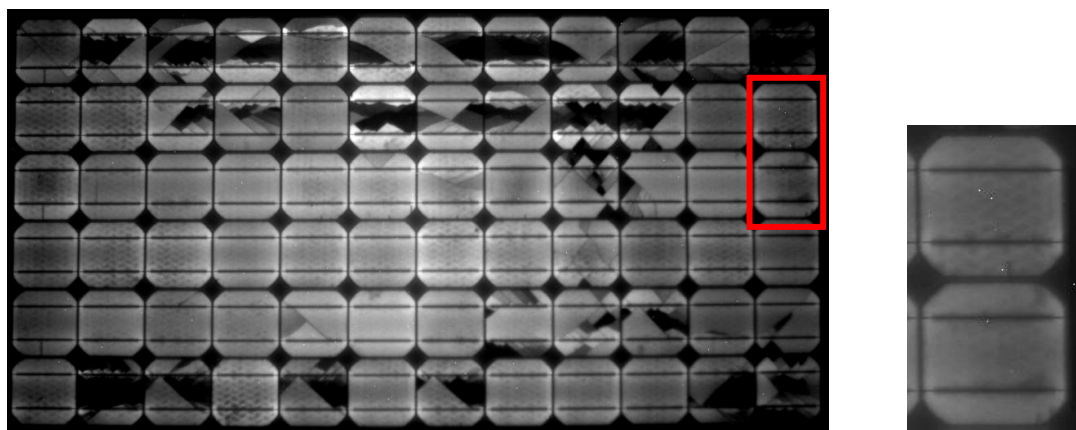


Obr. 2.4: Závislosť prejavu PID na veľkosti reťazca (postihnuté oblasti znázornené žltou farbou). [17]

Kritickou hodnotou napätia pre rozvoj PID efektu je napätie okolo 200 V. Konkrétna hodnota závisí na štruktúre daného modulu, hlavne na vlastnostiach EVA fólie a antireflexnej vrstvy. Pri tejto hodnote je možné pozorovať v relatívne krátkom časovom horizonte začínajúce prejavy PID. Tu je na mieste podotknúť, že v dlhodobom časovom horizonte je PID efektom postihnutá každá FV inštalácia. U tzv. PID free alebo inak povedané PID odolných systémov, iba degradácia za dobu garantovanej životnosti FV modulu neprekročí hodnotu zaručenú výrobcom. Dôvodom je samotný mechanizmus súvisiaci s migráciou iónov. Táto migrácia sa žiadnym technickým prostriedkom nedá zastaviť, ako už bolo spomenuté vyššie, je možné ju len spomaliť.

Na tvorbu PID majú vplyv tiež klimatické podmienky, kedy vyššia vlhkosť a teplota prejavy PID efektu výrazne zrýchľujú. V prípade zvýšenej vlhkosti dochádza k lepšej vodivosti povrchu modulu a tým k pôsobeniu elektrického poľa po celej ploche modulu. Migrácia sodíkových iónov rastie s rastúcou teplotou. To je využívané tiež pri tzv. „PID testoch“ [17].

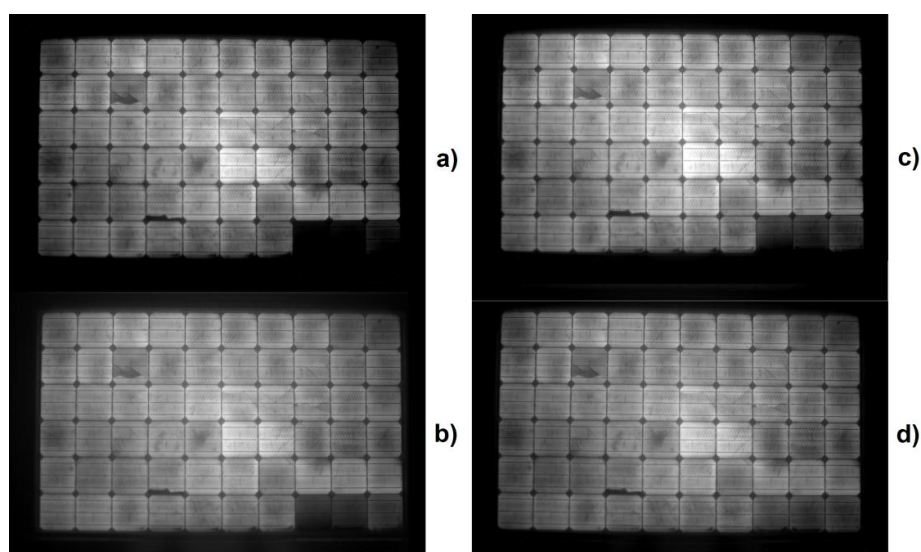
Účinok PID môže byť buď ireverzibilný alebo reverzibilný, v závislosti na jeho príčine. Je zrejmé, že nevratný účinok je omnoho vážnejší a vyžaduje detekciu a riešenie. Nevratný PID je zvyčajne spôsobený elektrochemickou reakciou, ktorá vedie k elektrokorózií alebo delaminácií fólie na FV moduloch. Tieto nevratné charakteristiky boli dokumentované predovšetkým u tenkovrstvých technológií. U modulov z kryštalického kremíku je elektrochemická korózia minoritný problém a býva najčastejšie pozorovaná na pájaných spojoch a môže byť pomerne ľahko odhalená vzhľadom k rastúcemu sériovému odporu. Príklad elektrochemickej korózie modulu z kryštalického kremíku je zrejмый z elektroluminiscenčného snímku Obr. 2.5 [17].



Obr. 2.5: Elektroluminiscenčný snímok defektného modulu a detail elektrochemickej korózie.

[17]

Reverzibilná forma PID, tiež známa ako „povrchová polarizácia“ alebo „polarizačný efekt“, bola objavená v roku 2005. Ide o povrchovú polarizáciu, označovanú ako PID-p, ktorá vytvára deštruktívne a reverzibilné hromadenie statického náboja na povrchu vysoko účinných solárnych článkov. Rozsiahle testovanie preukázalo schopnosť zvrátiť polarizačný efekt a tým plne obnoviť pôvodný výkon modulov. Z testu vyplynulo, že privedením opačnej polarizácie dosiahneme zvrátenie polarizačného efektu a to vo veľmi rýchлом čase. Postupné obnovenie zasiahnutého panelu PID-p efektom možno sledovať na Obr. 2.6. [13]



Obr. 2.6: Elektroluminiscenčný snímok modulu zasiahnutého PID – postupná regenerácia a) až d). [17]

Posledným mechanizmom, ktorý je v súčasnej dobe najviac diskutovaný je PID-s – „PID shunting“, ktorý je podobne ako PID-p spojený s migráciou kladných sodíkových iónov zo skla do EVA fólie a ďalej dovnútra štruktúry článku. Princíp mechanizmu vzniku spočíva v uvoľňovaní Na^+ iónov zo sodno-vápenatého skla, ktoré ďalej difundujú vrstvou EVA k povrchu FV článkov a ďalej do štruktúry, kde v prechode P-N vytvárajú lokálne straty. Následkom je pokles U_{OC} , I_{SC} , FF a tiež paralelného odporu R_p .

Pri potvrdení PID je potom nutné rozhodnúť akým spôsobom vplyv PID potlačiť a postihnuté moduly regenerovať. Z dôvodu legislatívnych obmedzení väčšinou nie je možné vymeniť moduly za novšie typy, zmeniť konfiguráciu elektrárne alebo zabezpečiť iné meniče, u ktorých je možné prizemniť záporný pól FV reťazca. Riešením sa tak stáva použitie obvodu, ktorý vytvorí opačné pole, ktoré bude pôsobiť na dané moduly (vysoké napätie, nízky prúd). Zatiaľ čo poškodenie PID sa vyvíja behom niekoľkých rokov fungovania FV systému, čiastočnú regeneráciu je možnú uskutočniť v ráde niekoľkých týždňov. Výsledok takejto regenerácie je zrejмый na Obr. 2.6. [17]

2.1.3 PID na tenkovrstvých fotovoltaických paneloch

Ako bolo uvedené vyššie, tenkovrstvé technológie sú náchylnejšie na PID spôsobený zvyčajne elektrochemickou reakciou, ktorá vedie k elektrochemickej korózii alebo delaminácií fólie (viď Obr. 2.7) a v dnešnej dobe často rozoberaným a pomerne neznámym PID-s – „PID shunting“.



Obr. 2.7: Tenkovrstvý solárny modul s nevratným PID. [16]

Technologickým opatrením na zmiernenie tohto javu je zníženie obsahu sodíka, ktorý má vlastnosti vynikajúceho absorbéru slnečného žiarenia, z predného skla alebo vytvárať panely so silnejšou izoláciou medzi vrstvami, čo by vytvorilo bariéru, ktorá by miernila migráciu iónov. Bolo zistené, že ióny sodíka migrujú z predného sodno-vápenatého skla SLG (soda-lime glass), ktoré sa bežne používa ako obal solárnych modulov, do transparentnej vodivej vrstvy oxidu TCO (transparent conducting oxid), slúžiacej ako predná elektróda. V tejto vrstve dochádza do značnej miery nezvratnej elektrochemickej korózií. Riešením by bolo využitie prednej vrstvy, ktorá by mala iné chemické zloženie. Týmto problémom sa v dnešnej dobe zaoberá množstvo výskumných spoločností, no jednoznačné riešenie zatiaľ nie je úplne jasné.

Pretože existuje mnoho rôznych tenkovrstvých technológií nie je možné zovšeobecniť ako sa budú jednotlivé použité materiály správať v závislosti na meniacich sa meraných parametroch. Rozhodujúcimi vlastnosťami, ktoré do značnej miery ovplyvňujú vznik PID sú zapúzdrenie materiálu, vlastnosti použitého skla, fólie, spôsob realizácie elektród ako aj samotná použitá technológia pri návrhu modulu. Tieto časti celého systému sa u každého výrobcu FV panelov značne líšia a tak by mala byť každá realizácia testovaná nezávisle od seba.

Testovania jednoznačne potvrdili, že tenkovrstvé moduly na báze kremíka a CdTe moduly, ktoré obsahujú priehľadné vodivé vrstvy oxidu (TCO) dotované SnO_2 môžu trpieť koróziou TCO vrstvy ak je modul vystavený vlhkému prostrediu. V tomto prípade sa Na^+ ióny hromadia na rozhraní vrstiev skla a TCO a ak v rovnaký čas do modulu vstupuje vlhkosť v podobe vodnej pary, dochádza k jej rýchlejšiemu šíreniu a vrstva SnO_2 sa chemicky stenčuje. [11] [16]

3 DIAGNOSTICKÉ METÓDY

Testovanie solárnych článkov je významnou súčasťou výrobného procesu, výskumu i vývoja. Diagnostické metódy majú odhaliť čo najväčší počet defektov a dopomôcť k ich rýchlej identifikácii. Základné rozdelenie diagnostických metód môže byť nasledovné:

- *Meranie elektrických parametrov* – metódy testujúce elektrické parametre solárneho článku (napr. slnečný simulátor s testerom, meranie kapacity, meranie V-A charakteristík, dynamické meranie, šumové charakteristiky, atď.)
- *Optická diagnostika* – metódy detekujúce defekt pomocou svetla v ploche solárneho článku využívajúce vizuálne zobrazenie výsledkov (napr. LBIC, elektroluminiscencia, atď.)

Ucelený prehľad o solárnom článku je najlepšie možné získať kombináciou metódy merania elektrických parametrov a metódy s vizuálnym zobrazením defektov. Základnými kritériami výberu sú následne cena, dostupnosť, rýchlosť a tiež množstvo získaných informácií. [9]

3.1 Slnečný simulátor s testerom

Slnečný simulátor je zariadenie, ktoré poskytuje uniformné svetlo o spektre blízke slnečnému žiareniu. Používa sa pre testovanie fotovoltaických článkov alebo celých panelov. Účelom tohto zariadenia je uskutočňovať kontrolné testy pri laboratórnych podmienkach. Svetlo vychádzajúce zo solárneho simulátoru je riadené v troch dimenziách:

- spektrum svetelného žiarenia,
- priestorová jednotnosť
- časová stabilita.

Solárne simulátory je možno rozdeliť do troch základných skupín: kontinuálne, zábleskové a impulzné. Prvý typ je bežná forma zdroja svetla, ktorej osvetlenie je spojité v čase.

Druhým typom solárneho simulátoru je tzv. zábleskový (flash) zdroj svetla. Princípiálne sa veľmi blíži klasickému blesku používanému pri fotografovaní. Charakteristickým rysom tohto simulátoru je veľmi krátka doba osvetlenia rádovo milise-

kundy o veľmi vysokej intenzite žiarenia. Najväčšou výhodou tohto zariadenia je práve veľmi krátka doba osvetlenia, vďaka ktorej nedochádza k akumulácii tepla pod svetelným zdrojom a tým nedochádza k prehrievaniu testovaných solárnych článkov a panelov.

Tretí typ solárnych simulátorov je pulzný simulátor, ktorý využíva špeciálnu závierku zablokovania a odblokovania kontinuálneho svetelného zdroja. Táto kategória je kompromisom medzi kontinuálnym a zábleskovým svetelným žiarením. [20]

3.1.1 Meranie FV panelov FLASH testom

Flash simulátor vytvára veľmi krátky záblesk o vysokej intenzite (1000 W/m^2) k simulácii slnečného žiarenia. Hlavným dôvodom pre využitie zábleskového svetla je, ako už bolo spomenuté, minimalizovať ohrev solárneho článku v priebehu testovania. Kompletná V-A charakteristika článku alebo modulu je zameraná v okamžiku optimálnej intenzity svetla.

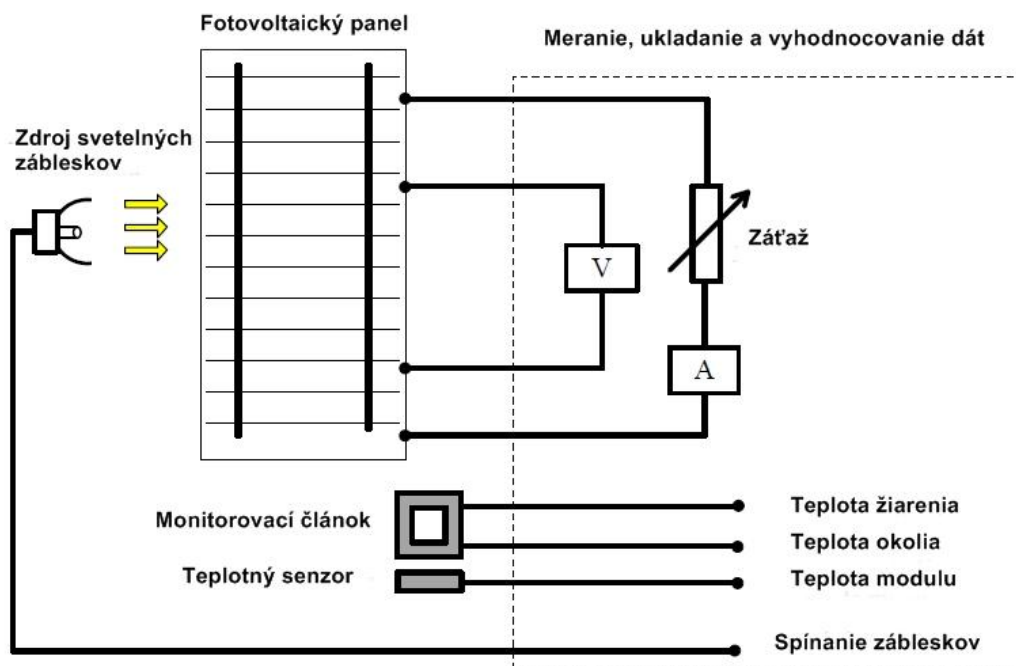
Najdôležitejšou časťou je tzv. flasher (zdroj svetelného záblesku), ktorý generuje presne kalibrovaný impulz svetla. Pre vytvorenie svetelného impulzu je použitá halogénová alebo xenonová výbojka, pretože jej spektrum žiarenia sa najviac podobá spektru slnečného žiarenia. Na skúmaný solárny článok dopadá kolmo homogénny zväzok rovnobežných lúčov, ktorý je vytvorený pomocou optických systémov.

Ďalšou časťou systému je elektronická záťaž, ktorá sníma reakciu FV modulu behom svetelného pulzu na úplnú V-A krivku. Záťaž sa reguluje automaticky na základe prvotnej kalibrácie podľa referenčného modulu. Monitorovací článok zaisťuje nutnú korekciu pre optimálne svetelné ožiarenie. Senzor pre meranie teplôt je súčasťou meracieho systému alebo ako samotný senzor. Dôležitou časťou systému je počítač, ktorý ukladá veľké množstvo nameraných dát (hodnoty intenzity svetelného žiarenia, elektrického prúdu a napätia), s ktorými uskutočňuje výpočty.

Výstupom FLASH testu sú tzv. flash dáta, ktoré sú určené výstupným špičkovým výkonom, napätím na prázdno, prúdom na krátko, pracovným napätím, prúdom a výkonom, prípadne účinnosťou alebo hodnotou fill faktoru.

Flash testery sú z pravidla používané v pulznom móde pre minimalizáciu spotreby elektrickej energie, minimalizáciu zahrievania testovaného modulu v priebehu merania a maximalizáciu času medzi nutnými výmenami lampy. Existujú jednopulzné SLP (single pulse) alebo viacpulzné MLP (multi pulse) zariadenia. U viacpulzných flash

testerov sa získava jeden bod V-A charakteristiky behom jedného záblesku, ktorý trvá 1 ms. Pre kompletnú V-A charakteristiku je vyžadovaných 100 bodov, teda musí prebehnúť 100 zábleskov. Jednopolzné zariadenie produkuje svetelné pulzy trvajúce asi 50 až 100 ms a celá V-A charakteristika je získaná v priebehu jedného pulzu. Súčasným priemyselným trendom je používanie jednopolzného zariadenia, kvôli menšej časovej náročnosti. [20] [23]



Obr. 3.1: Blokovaná schéma metódy flash testu. [23]

3.2 Elektroluminiscencia

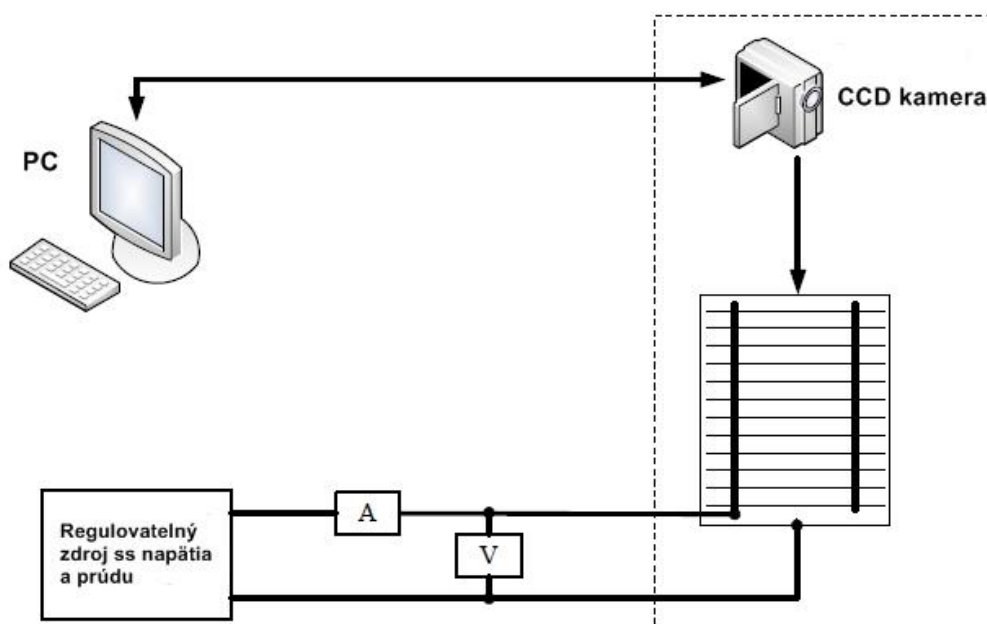
Elektroluminiscencia je jav, pri ktorom dochádza k emisii svetla zo substrátu FV článku alebo celého modulu. Tento jav vzniká vtedy, ak necháme FV článkom alebo modulom pretekať elektrický prúd o určitej minimálnej veľkosti. Vlnová dĺžka emitovaného svetelného žiarenia závisí na materiáli, z ktorého je FV panel vyrobený. Toto žiarenie je už mimo viditeľné spektrum a musí byť zaznamenané špeciálne upravenou CCD kamerou alebo Indium Galium Arsenidovou kamerou, ktorej citlivosť je v rozsahu 700 až 1600 nm. Pomocou tejto metódy sa dajú detekovať chyby vo vnútri FV modulov, ktoré inak nemusia byť viditeľné. Výsledkom tejto skúšky sú obrázky FV článkov alebo modulov v stupňoch šedej, kde tmavšie miesta znamenajú horšiu konverznú účin-

nosť prípadne menšiu prúdovú hustotu v danom mieste. Obidve značia chybu. Táto metóda ďalej dokáže odhaliť aj (mikro)praskliny, ktoré môžu odpojiť časť FV článku od zvyšku elektrického obvodu FV článku (modulu) a tým zamedziť výrobe elektrickej energie z tejto časti článku.

Metóda zviditeľňuje rozloženie prúdu v danom paneli a zvýrazňuje nehomogenity a prípadné lokálne poruchy. V prípade multikryštalických článkov zobrazí táto metóda i monokryštalické domény a ich prechody na domény susedné, inak orientované. Typy defektov, ktoré môžeme pomocou elektroluminiscencie odhaliť:

- praskliny a mikropraskliny v článku,
- prerušenú metalizáciu na jednotlivých článkoch,
- elektricky neaktívne časti panelu (časti článkov alebo celého reťazcu),
- ostatné nehomogenity – odhalenie technologických chýb vzniknutých ešte pred zapúzdrením článkov do fotovoltaického panelu (nehomogénny výpal vodivých pást, difúziu apod.).

Časová náročnosť tejto metódy sa pohybuje v ráde sekúnd. Nevýhodou tejto metódy je potreba temného prostredia, inak by nebolo možné sledovať rekombináciu elektrónov a preto sú nutné laboratórne podmienky. [10] [12] [20]



Obr. 3.2: Blokovaná schéma metódy elektroluminiscencie. [9]

3.3 Impedančná spektroskopia

Impedančná spektroskopia je experimentálna meracia metóda, ktorou sa dajú určiť elektrické vlastnosti študovaného systému. Metóda je založená na pertrubácií elektrochemického systému napäťovým signálom sínusového tvaru o malej amplitúde a následným meraním komplexnej impedancie Z v závislosti na frekvencii f .

$$Z = \frac{U(\omega)}{I(\omega)},$$

kde $U(\omega)$ je striedavé napätie, $I(\omega)$ je striedavý prúd o frekvencii ω . Počas merania je systém v rovnovážnom stave a impedancia $Z(\omega)$ je meraná v širokom rozsahu frekvencií (10^6 - 10^{-6} Hz), kde $f = \frac{\omega}{2\pi}$, čo dovoľuje postihnúť charakter nielen rýchlych elektródových dejov (prenos náboja) ale aj tých pomalých (difúzne deje).

Podmienkou správneho merania je vždy zvolenie takej amplitúdy aby odozva systému zostala lineárna, tj. aby nedochádzalo k nevratným zmenám na povrchu sledovaného objektu. Voľba amplitúdy závisí na charaktere študovaného systému, správny výber predstavuje kompromis medzi snahou minimalizovať šum v impedančnej odozve (použitím vysokej amplitúdy) a snahou minimalizovať nelineárnu odozvu (užitím malej amplitúdy).

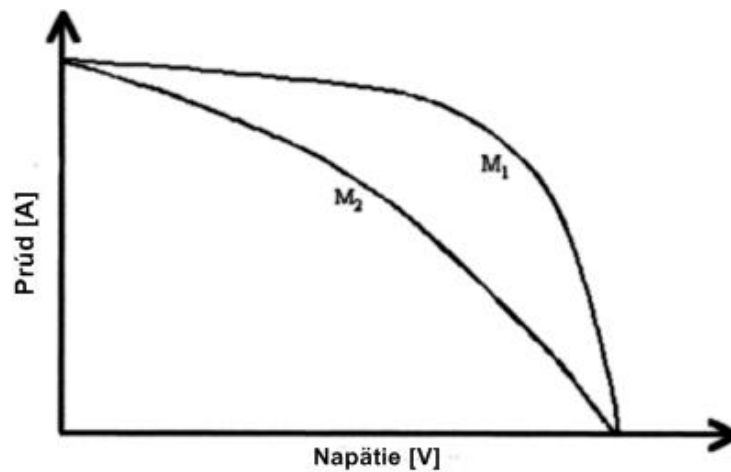
Výstupom z merania je impedančné spektrum. Obvykle sa využívajú dve grafické vyjadrenia impedančného spektra – v komplexnej rovine Nyquistov diagram alebo v semilogaritmickom zobrazení Bodeho diagram.

Stanovenie elektrických vlastností systému sa uskutočňuje aproximáciou (fitovaním) modelom ekvivalentného obvodu. Z tvaru impedančného spektra a z predstavy chovania systému sa dá vyvodit' vhodný ekvivalentný obvod. Jednotlivým prvkom ekvivalentného obvodu je potom priradený fyzikálny význam. Obvyklými prvkami sú odpor, kapacitancia a induktancia.

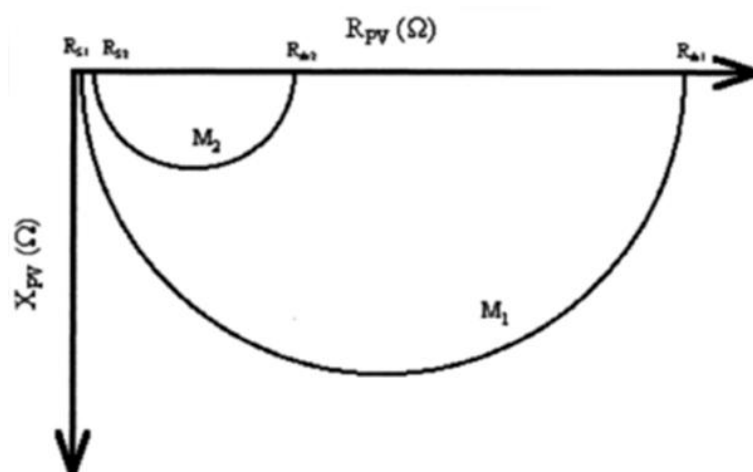
V prípade solárnych článkov alebo celých modulov, metóda impedančnej spektroskopie pomáha skúmať ich vlastnosti a kvalitu. Táto metóda vyhodnocuje energeticke hladiny hlavných majoritných nosičov náboja. Používaním týchto metód môžeme tiež získať dáta pre frekvenčné disperzie a vytvorit' tak lepšie výsledné zhodnotenie celého systému. Na to aby bolo meranie správne je dôležité overit' ustálený stav systému počas merania, pretože zmeny v rovnovážnom stave môžu spôsobiť zmeny v impedančných parametroch (odpor, kapacita) a dokonca aj zmena teploty môže znač-

ne ovplyvniť tieto parametre. Počas merania je nutné uskutočniť zápis hodnôt pre každý ustálený stav, preto je meranie pomerne časovo náročné. Získavanie hodnôt frekvencií umožňuje pozorovanie dynamických vlastností systému.

Meranie dynamickej impedancie solárnych článkov alebo modulov je v komplexnej rovine, to znamená, že kvalitu článku (modulu) môžeme zhodnotiť aj keď nepoznáme statické vlastnosti článku. Konkrétne Nízke R_S a vysoké R_{SH} sú články v lepšej kvalite než tie, ktoré majú vysoké R_S a nízke R_{SH} . Na obrázkoch (viď Obr. 3.3 a Obr. 3.4) sú porovnané dva články, jeden dobrej kvality označený M_1 a druhý nízkej kvality M_2 . Dobrá kvalita fotovoltaického článku má tvar podobný obdĺžniku kvôli vysokým FF a zlá kvalita má trojuholníkový tvar vďaka nízkej hodnote FF. [12] [20]



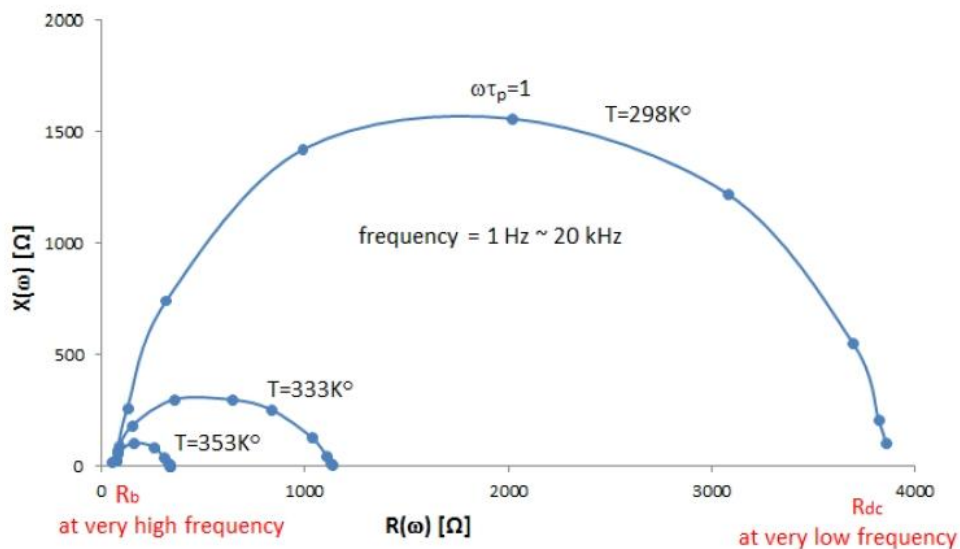
Obr. 3.3: Porovnanie M_1 a M_2 článkov pomocou statických charakteristík. [12]



Obr. 3.4: Porovnanie M_1 a M_2 článkov pomocou impedančných charakteristík. [12]

FV systémy môžu pracovať v teplotách od 10 °C do 50 °C. Zmeny teploty značne vplývajú na účinnosť a prevádzku systému. Analýza parametrov FV systému a štúdium ich správania pri zmenách prostredia, v ktorom sa nachádzajú vedcom pomáha postaviť viac spoľahlivé a účinné FV systémy. V tomto prípade sa javí impedančná spektroskopia ako veľmi užitočný nástroj pre charakterizáciu článkov a modulov. Presnejšie povedané, impedančnou spektroskopiou vieme merať a následne analyzovať niektoré alebo aj všetky súvisiace impedančné funkcie. Komplexná impedancia je $Z(\omega) = R(\omega) + jX(\omega)$, kde $R(\omega)$ je reálna zložka a $X(\omega)$ je imaginárna zložka impedancie $Z(\omega)$. Do systému je púšťané napätie sínusového priebehu o rôznych frekvenciách a meria sa fázový posun a amplitúda napätia a prúdu. Spočítaním pomeru medzi aplikovaným napätím a výsledným prúdom získame impedanciu testovaného zariadenia. Ak vykreslíme reálne a imaginárne hodnoty $R(\omega)$ a $X(\omega)$ namerali sme impedanciu v závislosti na frekvencií v komplexnej rovine. Vytvorili sme impedančné spektrum systému.

Nasledujúci obrázok (vid' Obr. 3.5) ukazuje vzťah medzi imaginárnou časťou $X(\omega)$ a reálnou časťou $R(\omega)$ komplexnej impedancie. Výsledkom sú polkruhy a zjednodušene by sme mohli povedať, že polkruhy sa znižujú s narastajúcou teplotou. To znamená, že vodivosť nameraných článkov sa zvyšuje s nárastom teploty. [12] [20]



Obr. 3.5: Impedančné spektrum multikryštalického kremíkového FV článku pri rôznych teplotách. [12]

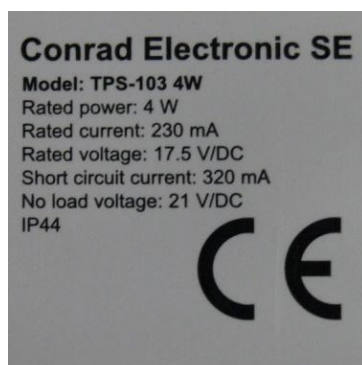
4 PRAKTICKÁ ČASŤ

Praktická časť a samotné meranie pozostáva z viacerých celkov. Hlavnou úlohou bolo pokúsiť sa nasimulovať zasiahnutie a-Si:H (hydrogenizovaný amorfný kremík) modulov PID-om, teda potenciálom indukovanej degradácie, ich opätovné “vyliečenie“, regeneráciu, z tejto poruchy a skúmanie vlastností týchto modulov počas a po skončení experimentu.

Meranie prebiehalo na katedre elektrotechnológie ČVUT na dvanástich kusoch amorfných kremíkových panelov (vid' Obr. 4.1) značky Conrad TPS-103 4W o štítkových hodnotách zobrazených na Obr. 4.2, uvedených v Tab. 4.1 a rozmeroch 315 x 315 x 19 mm. Kompletný návod na obsluhu tohto typu FV modulu s uvedenými všetkými parametrami je uvedený v prílohách B, C, D, E.



Obr. 4.1: Fotovoltaický modul Conrad TPS-103 4W odfotený z prednej a zadnej strany.



Obr. 4.2: Štítkové hodnoty uvedené na zadnej strane modulu Conrad TPS-103 4W.

Tab. 4.1: Parametre modulu Conrad TPS-103 4W

Parameter	Hodnota
P_{MAX}	4 W
U_{MP}	17,5 V
I_{MP}	230 mA
U_{OC}	21 V
I_{SC}	320 mA

Pretože sme nemali k dispozícii panely, ktoré boli touto poruchou už zasiahnuté, museli sme túto degradáciu nasimulovať v laboratórnych podmienkach. Na to aby sme mohli meranie uskutočniť, museli byť na začiatku tohto experimentu skontrolované parametre a vlastnosti každého meraného modulu a to pomocou vyššie spomínaných diagnostických metód, konkrétne, flash testom, impedančnou spektroskopiou a elektroluminiscenciou.

4.1 Flash test - na začiatku merania

Ako prvé sme panely podrobili flash testu aby sme skontrolovali najdôležitejšie parametre panelov na začiatku merania a to prúd nakrátko I_{SC} , napätie naprázdno U_{OC} , účinnosť η , faktor plnenia FF, maximálny výkon P_{MAX} , sériový odpor R_S a paralelný odpor R_P .

Meranie prebiehalo v Laboratóriu diagnostiky fotovoltaických systémov katedry elektrotechnológie na ČVUT. Vzhľad meracieho pracoviska je zobrazený na Obr. 4.3 a princíp, na ktorom pracuje je podrobne vysvetlený v teoretickom popise metódy flash testu.



Obr. 4.3: Ukážka pracoviska flash testu.

Ako bolo spomenuté v teoretickom opise tejto diagnostickej metódy, meranie prebieha pri STC (štandardných testovacích podmienkach) a to teplote panelov 25°C a intenzite žiarenia $1000\text{ W}/\text{m}^2$. Výsledky tohto merania sú zaznamenané v Tab. 4.2.

Tab. 4.2: Výsledky merania flash testu pre intenzitu žiarenia $1000\text{ W}/\text{m}^2$.

<i>panel č.</i>	I_{SC} [A]	U_{OC} [V]	η [%]	FF [%]	P_{MAX} [W]	R_S [Ω]	R_P [Ω]
1	0,266	28,871	3,49	45,18	3,464	25,9	252,0
2	0,264	28,707	3,21	42,03	3,183	43,5	367,1
3	0,252	29,636	2,07	27,49	2,053	63,9	200,8
4	0,279	28,145	4,56	57,51	4,522	27,7	692,4
5	0,311	27,399	4,80	55,93	4,761	25,0	862,7
6	0,287	26,989	3,93	50,34	3,900	25,5	457,8
7	0,273	29,469	4,90	60,39	4,865	24,1	906,2
8	0,250	24,140	1,84	30,25	1,823	102,4	145,6
9	0,263	27,819	3,66	49,61	3,631	34,6	1459,3
10	0,272	28,260	4,27	55,16	4,239	22,7	633,9
11	0,269	27,137	3,97	53,92	3,938	26,2	1631,7
12	0,257	29,852	2,63	33,99	2,609	94,5	250,8

Simulátor s flash testom v laboratóriu diagnostiky fotovoltaických systémov na katedre elektrotechnológie ČVUT umožňuje nastavenie rôznej intenzity žiarenia a tak sme túto možnosť využili a pre potvrdenie vlastností meraných modulov sme flash test uskutočnili aj pre intenzity 700 W/m^2 (viď Tab. 4.3) a 400 W/m^2 (viď Tab. 4.4). Nižšie intenzity žiarenia už neboli možné z dôvodu nedostatočnej citlivosti meracieho zariadenia.

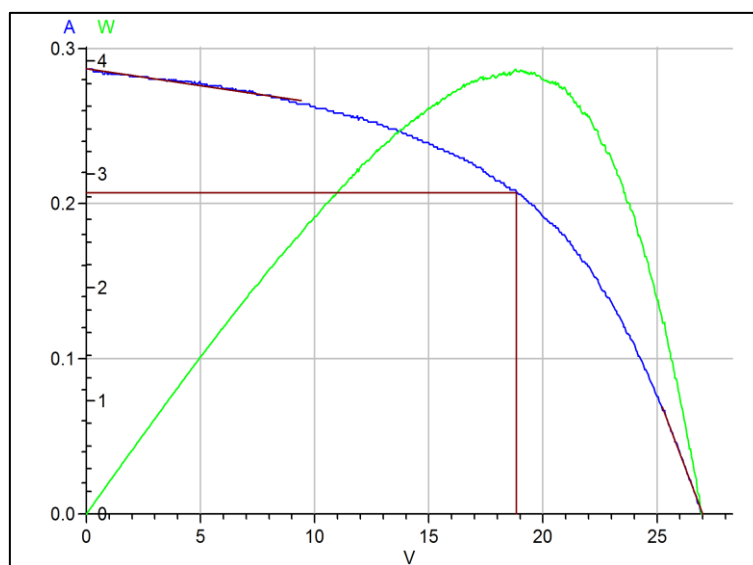
Tab. 4.3: Výsledky merania flash testu pre intenzitu žiarenia 700 W/m^2 .

<i>panel č.</i>	$I_{SC} [A]$	$U_{OC} [V]$	$\eta [\%]$	$FF [\%]$	$P_{MAX} [W]$	$R_S [\Omega]$	$R_P [\Omega]$
1	0,184	28,142	3,49	46,94	2,427	30,0	505,8
2	0,183	27,710	3,38	46,31	2,350	51,3	934,7
3	0,180	28,630	3,63	49,02	2,520	60,3	1039,7
4	0,191	27,858	4,71	61,46	3,269	33,9	1531,8
5	0,212	26,723	4,84	59,28	3,363	29,7	1392,4
6	0,198	26,109	3,69	49,66	2,561	34,2	569,8
7	0,186	28,620	4,12	53,93	2,863	31,7	504,0
8	0,187	23,924	2,11	32,80	1,467	112,3	224,1
9	0,180	27,311	3,80	53,61	2,642	44,1	2414,7
10	0,184	27,648	3,97	54,13	2,758	29,6	928,9
11	0,183	27,372	4,57	63,16	3,173	25,7	6904,5
12	0,185	28,523	3,23	42,60	2,244	76,2	1002,4

Tab. 4.4: Výsledky merania flash testu pre intenzitu žiarenia 400 W/m^2 .

panel č.	I_{SC} [A]	U_{OC} [V]	η [%]	FF [%]	P_{MAX} [W]	R_S [Ω]	R_P [Ω]
1	0,101	27,068	3,28	47,71	1,302	39,3	1232,7
2	0,101	26,533	3,57	52,74	1,416	66,7	2801,5
3	0,099	26,988	3,72	55,03	1,477	70,2	2140,6
4	0,107	26,891	4,67	64,53	1,854	46,4	2491,0
5	0,117	25,882	4,71	61,72	1,867	43,6	2915,4
6	0,110	24,233	3,00	44,82	1,191	61,9	677,5
7	0,101	26,970	3,38	49,15	1,341	66,8	800,4
8	0,111	23,311	2,37	36,40	0,941	147,5	464,3
9	0,099	26,150	3,90	59,77	1,548	59,0	5124,9
10	0,100	26,363	3,52	52,91	1,398	54,6	1531,5
11	0,101	26,477	4,39	65,10	1,741	38,3	5634,5
12	0,102	27,520	3,63	51,11	1,441	87,4	2315,2

Výstupom z tohto merania nie sú len konkrétne hodnoty ale aj grafické znázornenie V-A charakteristiky jednotlivých modulov vid' napríklad Obr. 4.4. Príklad oficiálneho protokolu z výsledku flash testu v Laboratóriu diagnostiky fotovoltaických systémov na fakulte elektrotechnickej je znázornený v prílohe A.

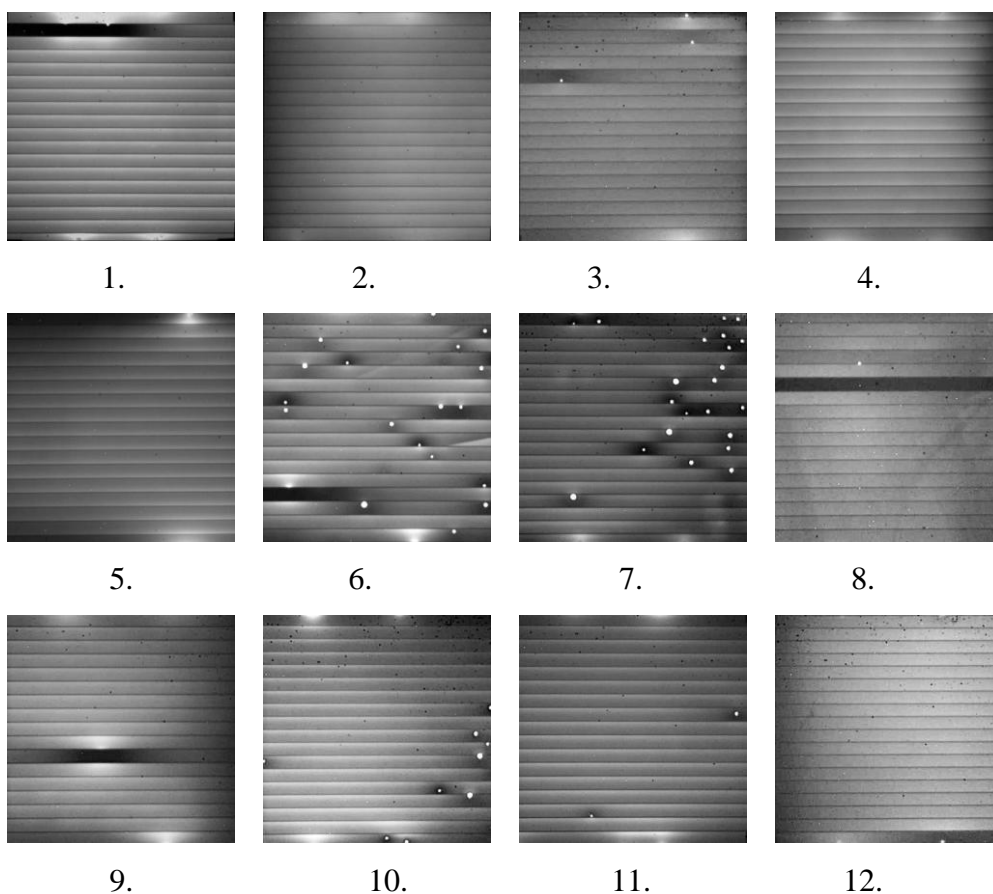


Obr. 4.4: Ukážka výslednej V-A charakteristiky po meraní flash testu.

Z výsledkov meraní je zrejmé, že najvyšší výkon majú panely č. 4, 5, 6, 7, 10, 11, a tak budú najvhodnejšie na pokračovanie v experimente.

4.2 Elektroluminiscencia – na začiatku merania

Rovnako ako flash test aj elektroluminiscencia slúži na diagnostiku fotovoltaických panelov. Aby bolo schopné vykonať záverečné zhodnotenie, bolo nutné najprv panely zdetekovať v ich počiatočnom stave. Na Obr. 4.5 sú znázornené snímky z elektroluminiscencie všetkých dvanástich amorfných panelov. Tieto snímky budú slúžiť ako porovnanie na záver merania a zároveň slúžia na potvrdenie metódy flash testu, ktoré panely budú najvhodnejšie na experiment.



Obr. 4.5: Elektroluminiscenčné snímky všetkých dvanástich testovaných modulov.

Fotky boli vytvorené pomocou špeciálnej Gálium Arzenidovej kamery (viď Obr. 4.6), ktorej citlivosť je v rozsahu 700 až 1600 nm.



Obr. 4.6: Gárium Arzenidová kamera použitá k meraniu metódou elektroluminiscencie.

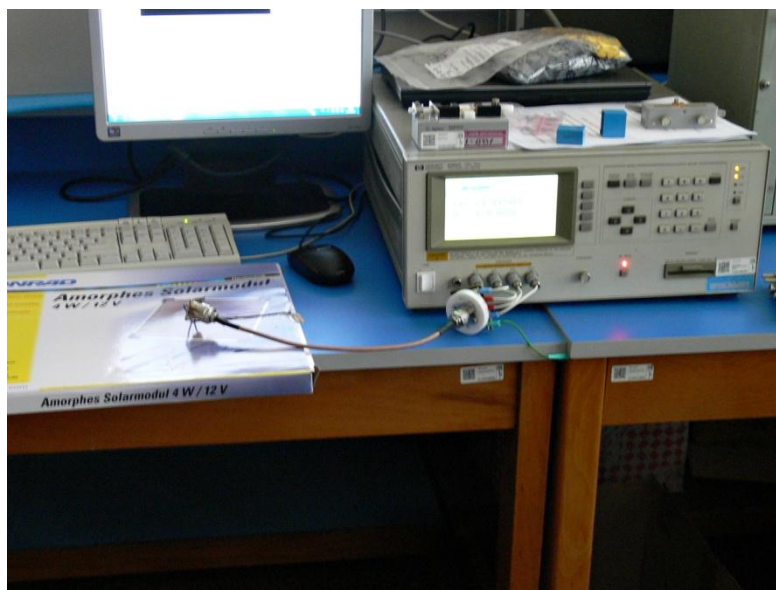
Z merania metódou flash testu vyplynulo, že najvyšší maximálny výkon P_{MAX} majú panely č. 4, 5, 6, 7, 10, 11 a tak sa očakávalo, že aj elektroluminiscenčné snímky týchto panelov budú v porovnaní s ostatnými meranými modulmi značne kvalitnejšie. Ako je možné vidieť na Obr. 4.5 teoretický predpoklad na paneloch č. 6, 7, 10, 11 nebol potvrdený. Biele miesta na snímkach jasne zobrazujú miesta, kde je v paneli problém, ktorý by mal spôsobovať stratu vo výkone a účinnosti, no ani opakovaný flash test tento predpoklad nepotvrdil. Keďže nepoznáme tepelnú ani optickú históriu meraných panelov, tento jav môže mať príčinu v tzv. Staebler-Wronski efekte, ktorý popísali páni Staebler a Wronski. Ti konštatovali, že vodivosť a fotovodivosť závisí na teplotnej a optickej histórii vzorku. Pokles účinnosti je spôsobený obmedzením fotovodivosti a-Si:H. Táto degradácia je však jav vratný a negatívne účinky pohlcovania svetla sa dajú zvrátiť žihaním za tmy pri 150 - 200 °C. A práve táto degradácia neumožňuje zvýšenie účinnosti nad približných 9 %. Takto zdegradovaný FV článok sa po zhruba jednom roku stabilizuje a ďalej nedegraduje, v letných mesiacoch naopak jeho účinnosť rastie a v zime zase klesá [18].

4.3 Impedančná spektroskopia – na začiatku merania

Poslednou z použitých diagnostických metód je impedančná spektroskopia, ktorej princíp je popísaný v teoretickej časti. Rovnako ako u metód flash test a elektroluminis-

cencia sme touto metódou diagnostikovali všetkých dvanásť modulov v stave, v ktorom boli pred akýmkoľvek experimentom.

Meracie pracovisko impedančnej spektroskopie je znázornené na Obr. 4.7 a pozostáva zo spektrálneho analyzátora umožňujúceho postupnú zmenu frekvencie, vodičov, počítača zaznamenávajúceho výsledky merania.

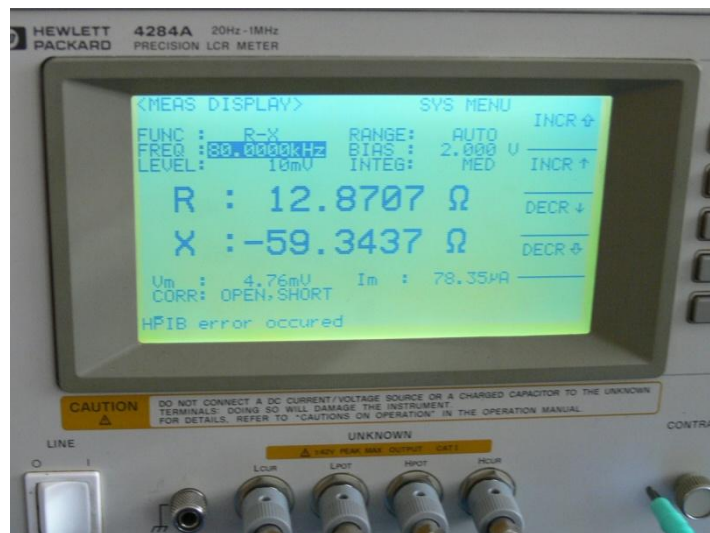


Obr. 4.7: Meracie pracovisko impedančnej spektroskopie.

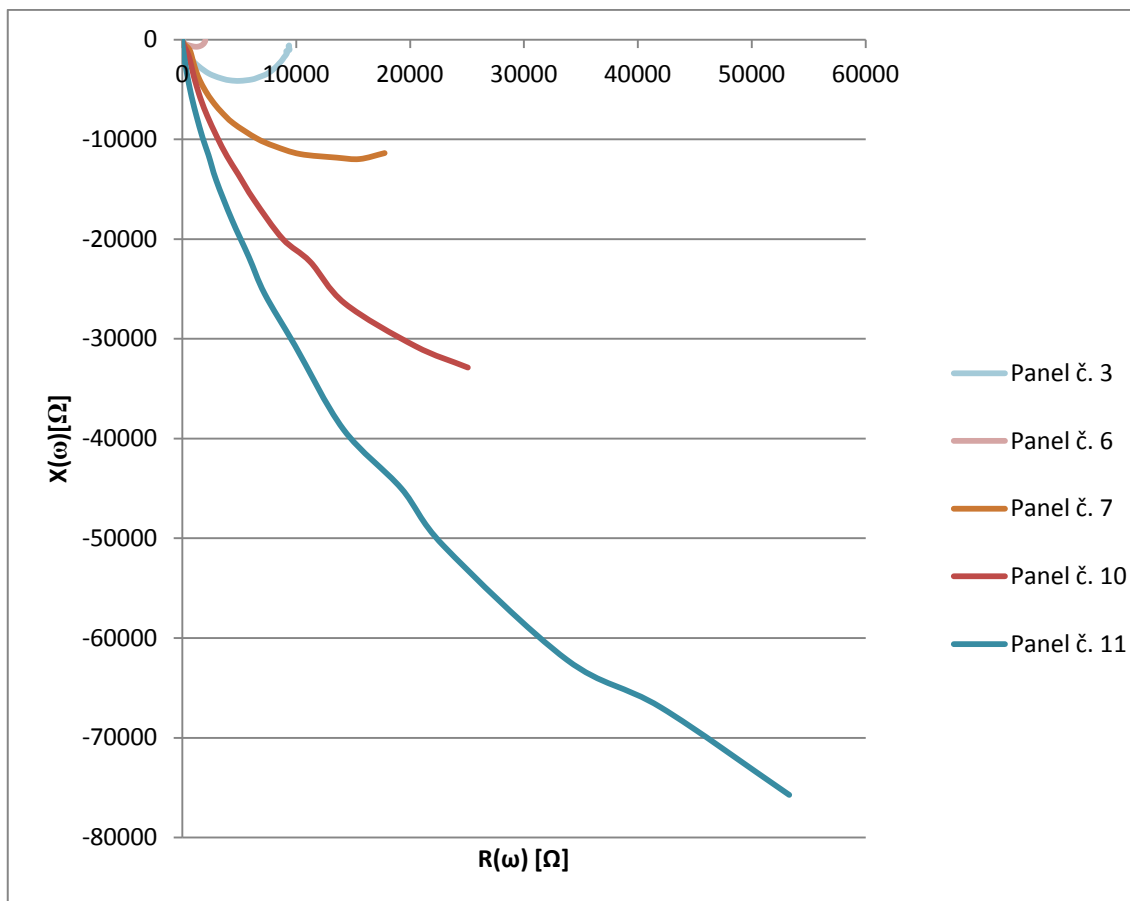
Výsledkom tohto merania sú impedančné spektrá, ktoré boli namerané v rozsahu frekvencií 20 Hz až 1 MHz, kde na vodorovnú os sú vynesené hodnoty reálnej zložky impedancie $R(\omega)[\Omega]$ a na zvislú osu hodnoty imaginárnej zložky impedancie $X(\omega)[\Omega]$, príklad nameraných hodnôt pre panel č.6 je uvedený v Tab. 4.5, kompletne namerané hodnoty pre všetkých dvanásť panelov sú zobrazené v prílohách F, G, H, I, J, K, názorná ukážka meraných hodnôt na displeji meracieho zariadenia na Obr. 4.8. Výsledné impedančné spektrá všetkých dvanástich panelov sú zobrazené na Obr. 4.9 a Obr. 4.10. Na Obr. 4.9 sú impedančné spektrá panelov, ktoré sú v poriadku a nevykazujú žiadnu nehomogenitu aktívnej štruktúry a sú teda vhodné k ďalšiemu experimentu. Na Obr. 4.10 sú impedančné spektrá panelov, pri ktorých v určitých frekvenciách dochádza k neprirodzenému zakriveniu kriviek, čo môže byť spôsobené nehomogenitou štruktúry nanesej tenkej vrstvy a teda nie sú vhodné k ďalšiemu testovaniu.

Tab. 4.5: Ukážka nameraných hodnôt pomocou impedančnej spektroskopie pre panel č. 6.

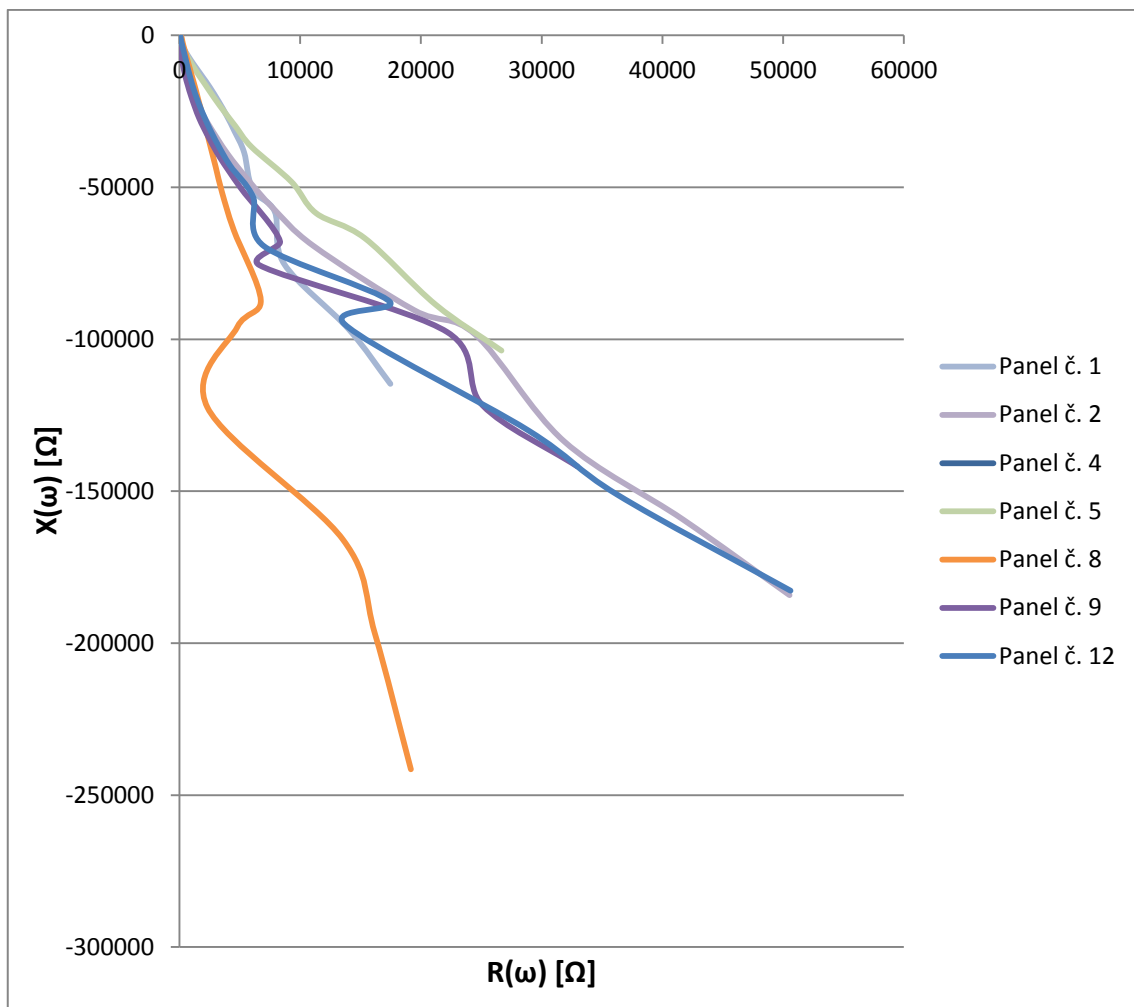
f [Hz]	R[Ω]	X[Ω]	f [Hz]	R[Ω]	X[Ω]
20	2029,810	-60,90	1500	759,9829	-635,97
25	2023,949	-87,05	2000	640,5609	-597,87
30	2018,150	-99,62	3000	481,7609	-543,25
40	1999,640	-129,39	5000	299,8450	-454,72
50	2007,040	-159,01	8000	171,1329	-354,06
60	1996,329	-184,42	10000	126,5810	-305,31
80	1966,839	-221,45	15000	70,62249	-223,98
100	1956,260	-280,38	20000	46,3577	-175,48
120	1926,589	-328,34	30000	26,42970	-121,68
150	1894,300	-392,82	50000	14,7131	-75,15
200	1810,339	-480,68	80000	10,0661	-47,75
250	1731,160	-554,25	100000	8,84339	-38,41
300	1645,560	-611,06	150000	7,46523	-25,72
400	1490,920	-680,81	200000	6,88759	-19,23
500	1353,709	-715,41	300000	6,38074	-12,52
600	1242,310	-725,54	400000	6,14819	-8,99
800	1071,689	-711,88	500000	6,01316	-6,74
1000	949,3129	-688,82	1000000	5,74082	-1,30



Obr. 4.8: Názorná ukážka hodnôt na displeji meracieho zariadenia.

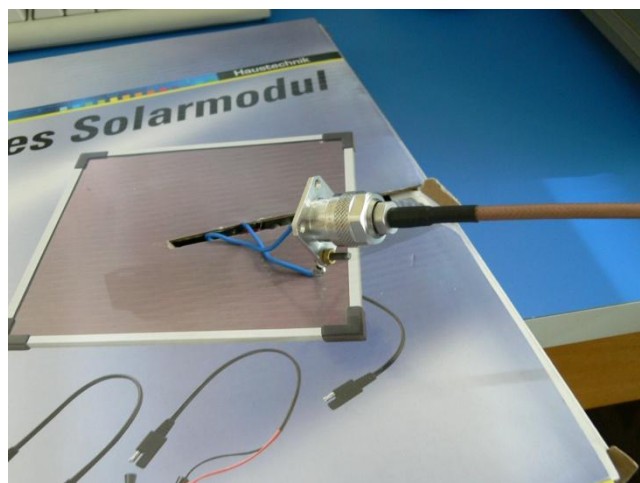


Obr. 4.9: Impedančné spektrá panelov č. 3, č. 6, č. 7, č. 10, č. 11.



Obr. 4.10: Impedančné spektrá panelov č. 1, č. 2, č. 4, č. 5, č. 8, č. 9, č. 12.

Na to aby bolo meranie správne je dôležité overiť ustálený stav systému počas merania, pretože zmeny v rovnovážnom stave môžu spôsobiť zmeny v impedančných parametroch (odpor, kapacita). Ustálený stav v prípade FV modulu znamená, že jeho teplota je stála a žiarenie dopadajúce na aktívnu plochu panelu je konštantné. Najjednoduchšie je možné tento stav dosiahnuť tým, že na modul bude dopadať nulová intenzita žiarenia, to sme dosiahli uzatvorením panelu do obalu, ktorý neprepúšťa slnečné žiarenie (viď Obr. 4.11) a tým sme teda zamedzili tomu aby bol niektorý z fotovoltaiických panelov meraný za iných podmienok.



Obr. 4.11: Ukážka spôsobu uzatvorenia modulu do obalu a spôsobu pripojenia kontaktov.

K tomu aby pri meraní došlo k čo najmenšej chybe sme použili štvorvodičové zapojenie modulu k spektrálnemu analyzátoru vid'. Obr. 4.12.



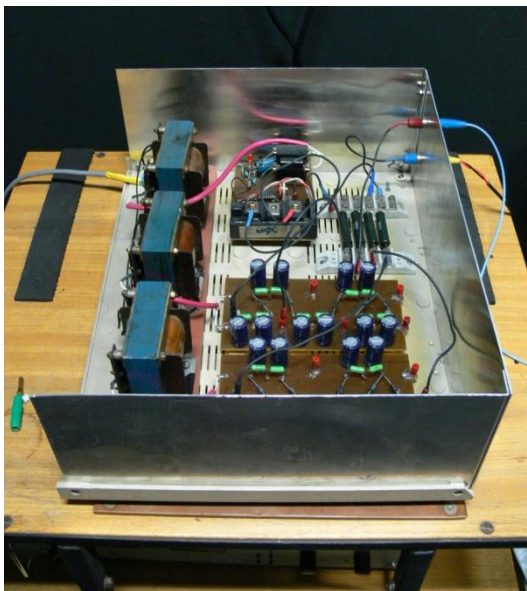
Obr. 4.12: Ukážka spôsobu zapojenie vodičov na strane modulu (vľavo) a na strane meracieho zariadenia (vpravo).

4.4 Simulácia PID efektu

Cieľom samotného experimentu bolo nasimulovať potenciálom indukovanú degradáciu na niekoľkých kusoch a-Si:H modulov a to za rôznych klimatických podmienok.

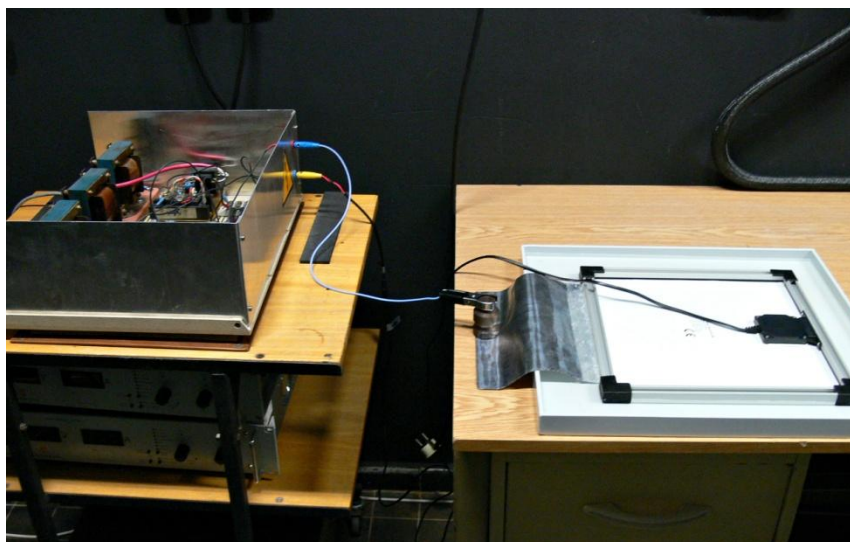
Na to aby bolo možné PID efekt vytvoriť a následne skúmať je potrebné priviesť na fotovoltaiický modul vysoké jednosmerné napätie. To bolo zabezpečené pomocou zdroja vysokého jednosmerného napätia (vid' Obr. 4.13), ktorý do panelu dodával napätie o hodnote 1000 V. Hodnota 1000 V bola stanovená z dôvodu nasimulovania čo naj-

reálnejších podmienok z bežnej praxe, kde sa na klasických fotovoltaických elektrárňach napätie pohybuje práve v okolí tejto hodnoty z dôvodu použitých meničov.



Obr. 4.13: Zdroj vysokého jednosmerného napätia.

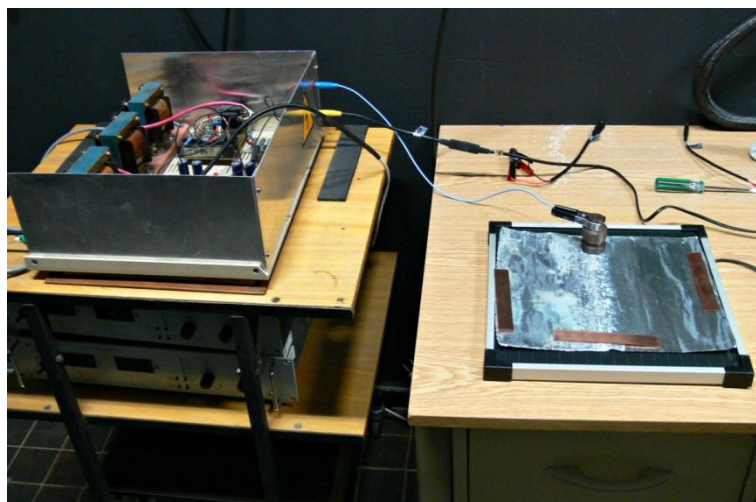
Pracovisko a spôsob zapojenia fotovoltaického modulu a zdroja jednosmerného napätia možno vidieť na Obr. 4.14. Kladný a záporný pól na module bol skratovaný a bola naňho privedená záporná polarita jednosmerného napätia. Kladná polarita bola privedená na samotný panel alebo jeho rám v závislosti na tom, či sa jednalo o meranie v štandardných podmienkach alebo v prostredí so zvýšenou vlhkosťou a teplotou.



Obr. 4.14: Meracie pracovisko a spôsob zapojenia FV modulu pre vytvorenie PID efektu.

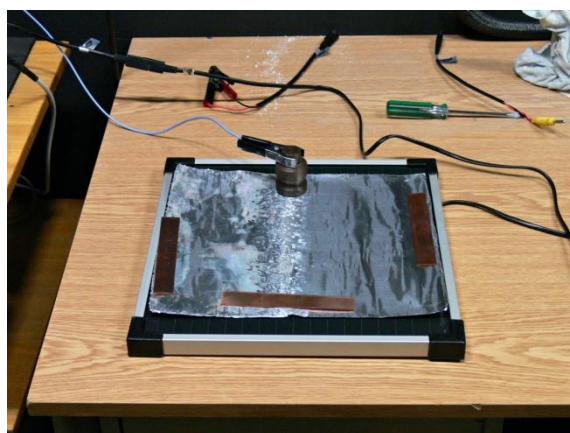
4.4.1 Simulácia PID efektu za štandardných klimatických podmienok

Prvý experiment prebiehal pri štandardnej teplote 25 °C a ideálnej vlhkosti vzduchu v miestnosti, odhadovanej v rozmedzí 40-60 % (vid' Obr. 4.15).



Obr. 4.15: Meracie pracovisko k simulácii PID efektu za štandardných klimatických podmienok.

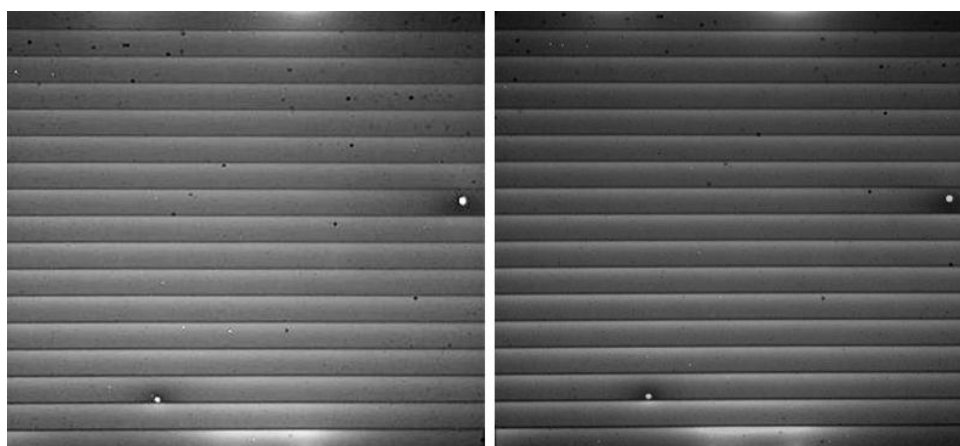
Ako bolo spomenuté vyššie, kladný a záporný pól výstupu z modulu bol skrátovaný a bolo naňho privedené záporné jednosmerné napätie. Na prednú, aktívnu časť modulu bolo privedené napätie o kladnej polarite. Pretože sme chceli dosiahnuť rovnomerný postup potenciálom indukovanej degradácie, nepoužili sme bodové pripojenie elektródy ale za pomoci staniolu sme sa snažili privedené kladné napätie rozložiť čo najrovnomernejšie po celej ploche prednej časti panelu (vid' Obr. 4.16).



Obr. 4.16: Ukážka spôsobu pripojenia kladnej elektródy k aktívnej časti modulu.

Do takto zapojeného modulu sme priviedli jednosmerné napätie o hodnote 1000 V a podľa teoretických predpokladov sa po určitej dobe mala začať tvoriť potenciálom indukovaná degradácia. Dôvody vzniku tejto degradácie sú zdôvodnené v teoretickom popise PID efektu.

Po 20 hodinách pôsobenia napätia sme uskutočnili kontrolnú diagnostiku modulu za pomoci flash testu a elektroluminiscencie aby sme zistili, či nedochádza k tvorbe PID efektu. Ani jedna z metód nepotvrdila vznik degradácie a tak sme pokračovali v experimente ďalej až po dobu 120 hodín pôsobenia jednosmerného napätia o hodnote 1000 V. Po tomto časovom intervale sme opätovne vykonali sériu diagnostických metód. Ako prvú sme uskutočnili elektroluminiscenciu. Na Obr. 4.17 môžeme vidieť elektroluminiscenčné snímky meraného panelu č.11 a to pred (vľavo) a po (vpravo) popisovanom experimente. Zo snímok môžeme jednoznačne určiť, že ku žiadnej viditeľnej zmene nedošlo, teda elektroluminiscencia neobjavila vznik akejkoľvek formy PID efektu.



Obr. 4.17: Porovnanie elektroluminiscenčných snímok panelu č. 11 pred (vľavo) a po (vpravo) experimente.

Pre potvrdenie, že nenastal vznik degradácie sme si zvolili metódu flash testu, kde sme zmerali základné parametre FV modulu ako pri štandardnej intenzite žiarenia 1000 W/m^2 (Tab. 4.6) tak aj pre hodnoty 700 W/m^2 (Tab. 4.7) a 400 W/m^2 (Tab. 4.8).

Tab. 4.6: Parametre panelu č.11 pred a po experimente pre intenzitu žiarenia 1000 W/m^2 .

panel č.	I_{SC} [A]	U_{OC} [V]	η [%]	FF [%]	P_{MAX} [W]	R_S [Ω]	R_P [Ω]
11 pred	0,269	27,137	3,97	53,92	3,938	26,2	1631,7
11 po	0,269	27,555	4,49	60,11	4,453	21,4	1532,4

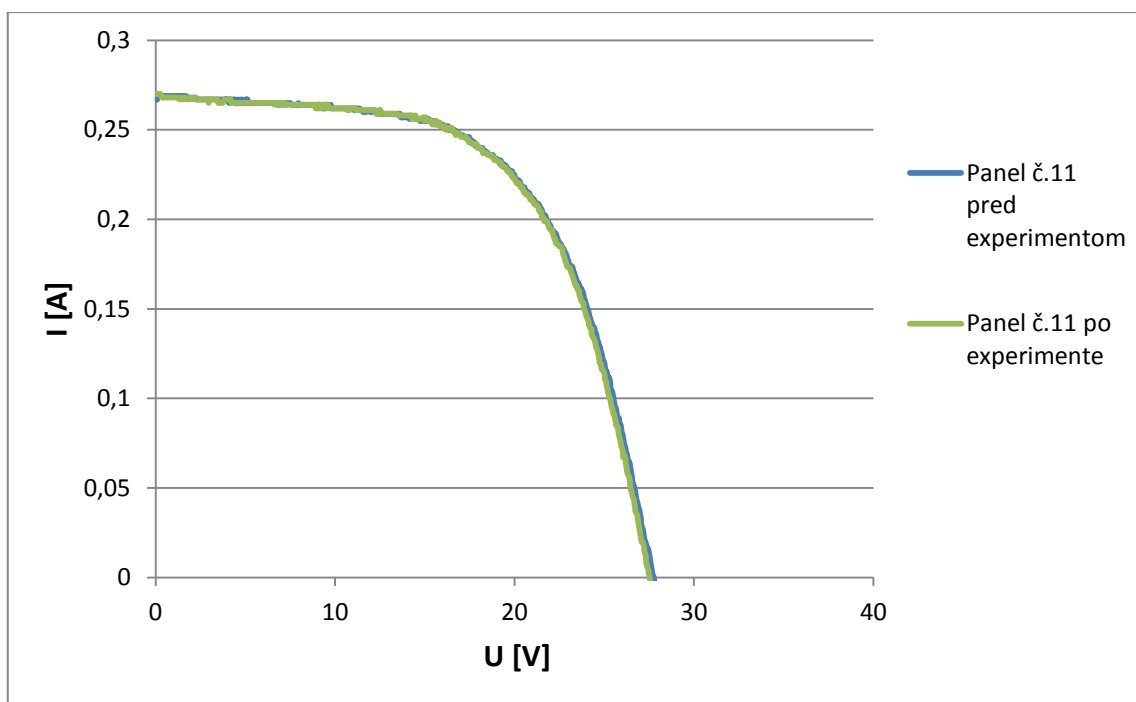
Tab. 4.7: Parametre panelu č.11 pred a po experimente pre intenzitu žiarenia 700 W/m^2 .

panel č.	$I_{SC} [A]$	$U_{OC} [V]$	$\eta [\%]$	$FF [\%]$	$P_{MAX} [W]$	$R_S [\Omega]$	$R_P [\Omega]$
11 pred	0,183	27,372	4,57	63,16	3,173	25,7	6904,5
11 po	0,185	27,083	4,52	62,74	3,141	26,0	2896,7

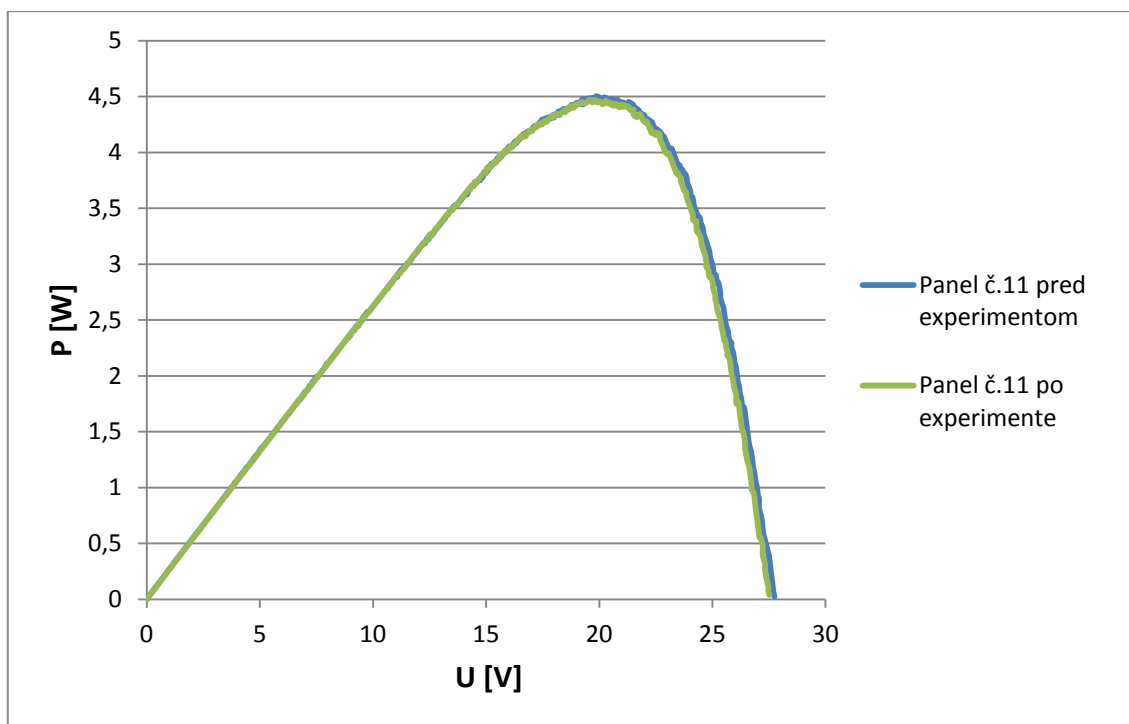
Tab. 4.8: Parametre panelu č.11 pred a po experimente pre intenzitu žiarenia 400 W/m^2 .

panel č.	$I_{SC} [A]$	$U_{OC} [V]$	$\eta [\%]$	$FF [\%]$	$P_{MAX} [W]$	$R_S [\Omega]$	$R_P [\Omega]$
11 pred	0,101	26,477	4,39	65,10	1,741	38,3	5634,5
11 po	0,104	26,330	4,53	65,70	1,796	37,0	4817,6

Z tabuliek Tab. 4.6, Tab. 4.7, Tab. 4.8 vyplýva, že nenastala žiadna citeľná zmena základných parametrov FV modulu a to ani pre jednu z intenzít žiarenia, teda môžeme vylúčiť vznik potenciálom indukovanej degradácie. To potvrdzujú aj priložené V-A charakteristiky (Obr. 4.18) a aj závislosti napätia na výkone (Obr. 4.19), ktoré sú skoro totožné pre panel pred a po experimente.



Obr. 4.18: V-A charakteristiky panelu č. 11 pred a po experimente.

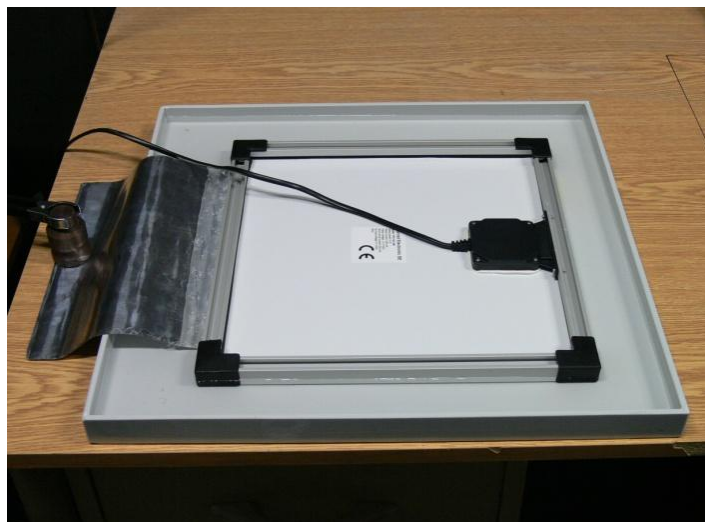


Obr. 4.19: Závislosť výkonu a napätia panelu č. 11 pred a po experimente.

4.4.2 Simulácia PID efektu za zvýšenej vlhkosti

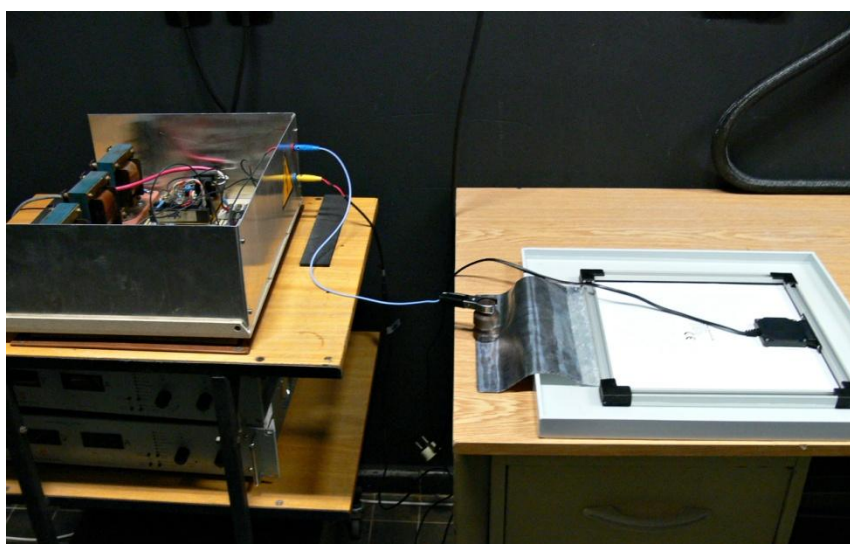
Pri štandardných klimatických podmienkach sa vznik PID efektu nepotvrdil. Z teoretických predpokladov vyplýva, že vznik potenciálom indukovanej degradácie značne urýchľuje zvýšená vlhkosť a teplota a tak sme v našom experimente skúsili zmeniť prvý z menovaných faktorov a to vlhkosť.

Keďže sa jedná o tenkovrstvé fotovoltaické panely, ich sklon v reálnej praxi nemusí byť vždy ideálnych 35° ale mnohokrát sú umiestňované pod oveľa miernejším sklonom. Čím je panel inštalovaný menej kolmo k základni, tým je náchylnejší na zadržiavanie dopadajúcej dažďovej vody a teda na prenikajúcu vlhkosť do jeho štruktúry. Takéto podmienky sme sa pokúsili napodobniť ponorením aktívnej časti panelu do nádoby s vodou a tým sme nasimulovali zvýšenie vlhkosti na hodnotu 100% (viď Obr. 4.20).



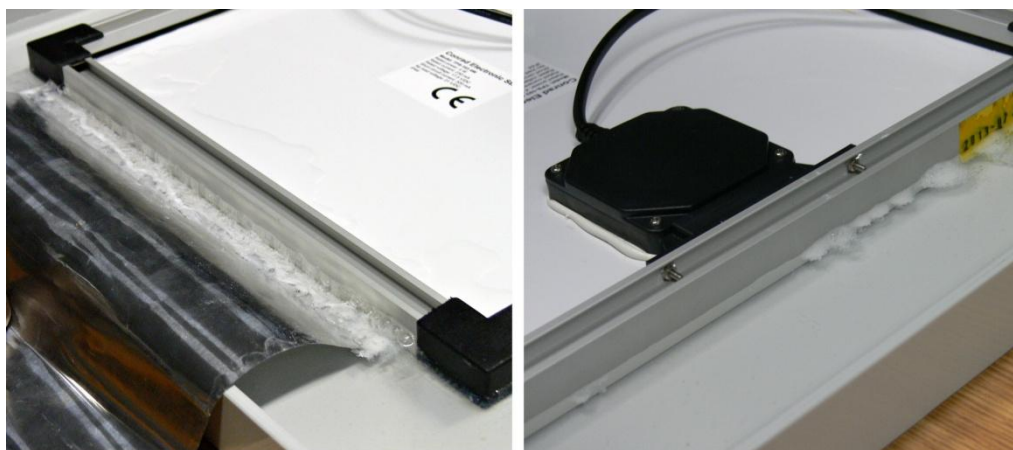
Obr. 4.20: Ponorenie aktívnej časti modulu do nádoby s vodou .

Rovnako ako pri štandardných klimatických podmienkach aj v tomto prípade boli výstupné svorky modulu skratované a bolo na nich privedené záporné napätie. Na rám modulu bolo privedené kladné napätie. Pretože sme znova chceli dosiahnuť rovnomerný postup potenciálom indukovanej degradácie smerom z dolného konca panelu k vrchnému (na Obr. 4.21 zľava doprava), nepoužili sme bodové pripojenie svoriek na rám modulu ale za pomoci staniolu sme kladnú polaritu napätia privedli po celej dĺžke spodnej časti rámu.



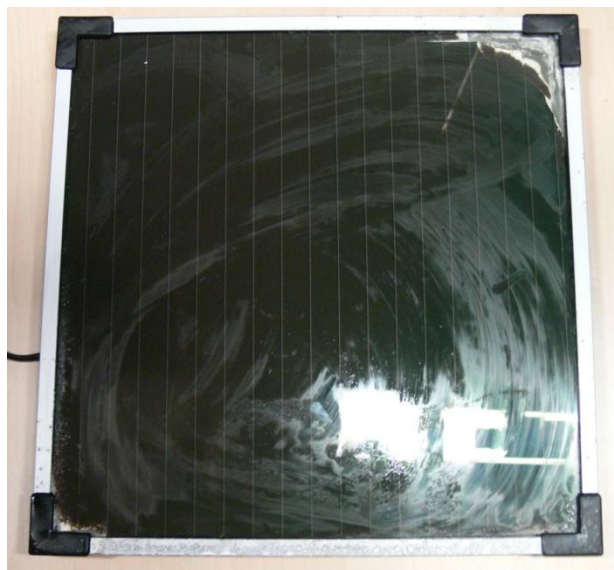
Obr. 4.21 Pracovisko pre vytvorenie PID efektu za zvýšenej vlhkosti.

Do takto zapojeného modulu sme opäť priviedli jednosmerné napätie o hodnote 1000 V. Po 3 hodinách pôsobenia sme uskutočnili diagnostiku panelu ale k žiadnym zmenám oproti pôvodnému stavu nedošlo a tak sme v experimente pokračovali až po dobu 48 hodín. Po uplynutí tohto časového úseku sme skúmaný panel odpojili od napätia a uskutočnili jeho diagnostiku. Už voľným okom bolo možné vidieť, že na kladnej aj zápornej elektróde sa vo vode vytvorili bublinky (viď Obr. 4.22). Jednoznačne môžeme konštatovať, že došlo k prierazu a následne k vytvoreniu elektrolyzy. Elektrolyza je fyzikálno-chemický rozkladný dej spôsobený priechodom elektrického prúdu cez roztok, pri ktorom dochádza k chemickým zmenám na elektródach [19].



Obr. 4.22: Vytvorenie elektrolyzy v dôsledku prierazu aktívnej časti FV modulu.

Po odpojení elektród od elektrického napätia sme panel vybrali z vody, usušili a uskutočnili jeho diagnostiku. Voľným okom bolo možné pozorovať značné zmeny v aktívnej časti panelu, najmä v jeho rohoch (viď Obr. 4.23, Obr. 4.24). Jedná sa o elektrochemickú koróziu a táto degradácia je ireverzibilná, teda nevratná.

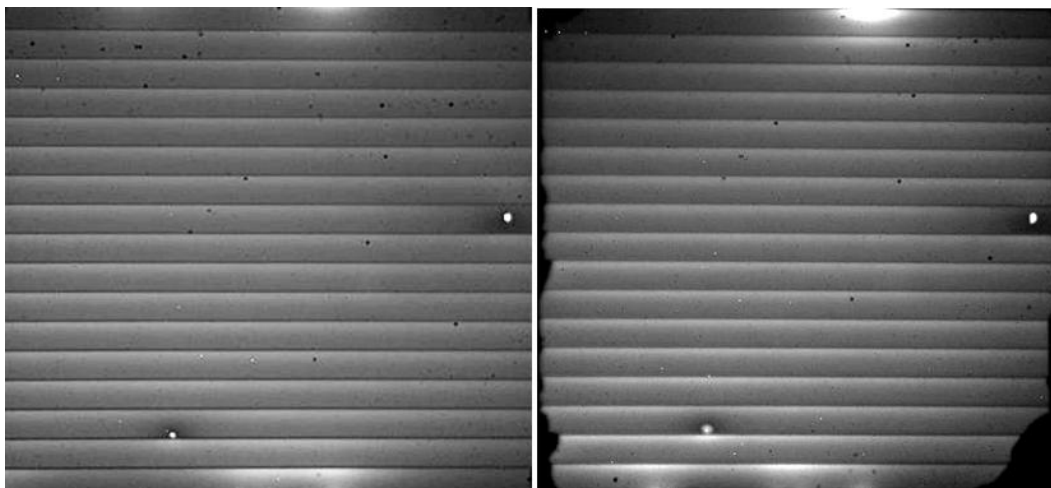


Obr. 4.23: Vzniknutá elektrochemická korózia.



Obr. 4.24: Vzniknutá elektrochemická korózia (detail).

Ako prvú sme zvolili diagnostiku pomocou metódy elektroluminiscencie. Na Obr. 4.25 môžeme vidieť porovnanie panelu č.11 pred a po uskutočnení experimentu. Zo snímky môžeme jednoznačne vidieť a potvrdiť náš prvý predpoklad, že panel je poškodený a to konkrétne elektrochemickou koróziou.



Obr. 4.25: Porovnanie elektroluminiscenčných snímok panelu č. 11 pred (vľavo) a po (vpravo) priereze.

Následne sme podrobili panel flash testu aby sme zistili jeho aktuálne parametre a k ich akým zmenám došlo oproti pôvodnému stavu. Namerané hodnoty pre rôzne intenzity žiarenia sú uvedené v Tab. 4.9, Tab. 4.10, Tab. 4.11. V-A charakteristiky a závislosti výkonu na napätí možno vidieť na Obr. 4.26 a Obr. 4.27.

Tab. 4.9: Parametre panelu č.11 pred a po experimente pre intenzitu žiarenia 1000 W/m^2 .

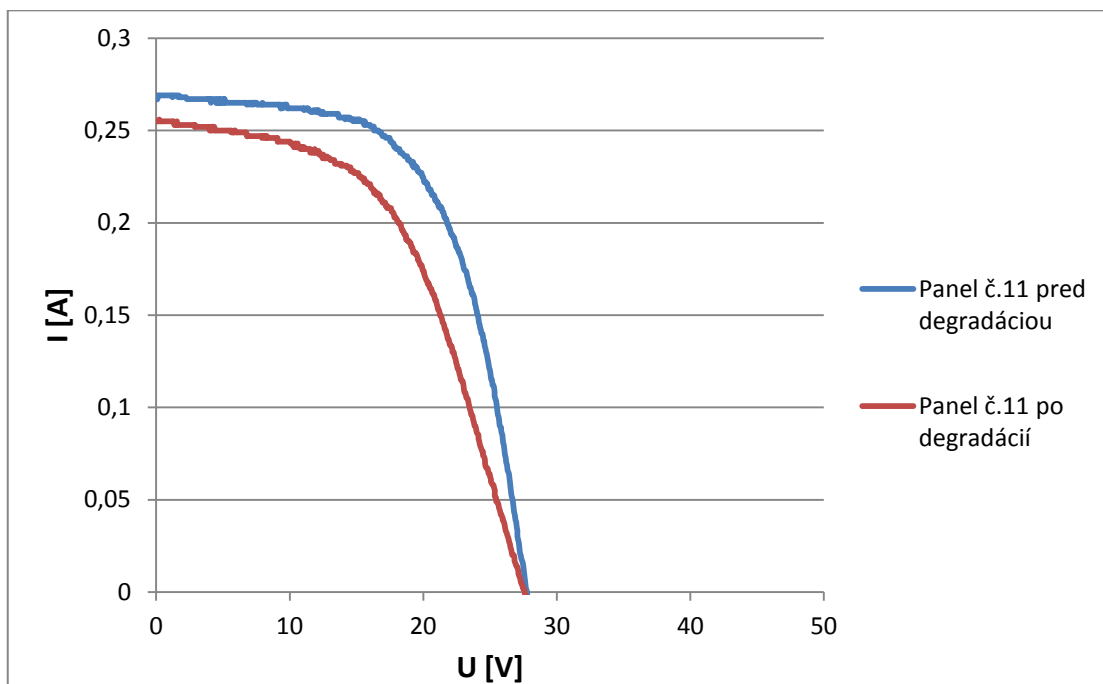
<i>panel č.</i>	I_{SC} [A]	U_{OC} [V]	η [%]	FF [%]	P_{MAX} [W]	R_S [Ω]	R_P [Ω]
11 pred	0,269	27,137	3,97	53,92	3,938	26,2	1631,7
11 po	0,256	27,560	3,66	51,51	3,629	41,2	885,2

Tab. 4.10: Parametre panelu č.11 pred a po experimente pre intenzitu žiarenia 700 W/m^2 .

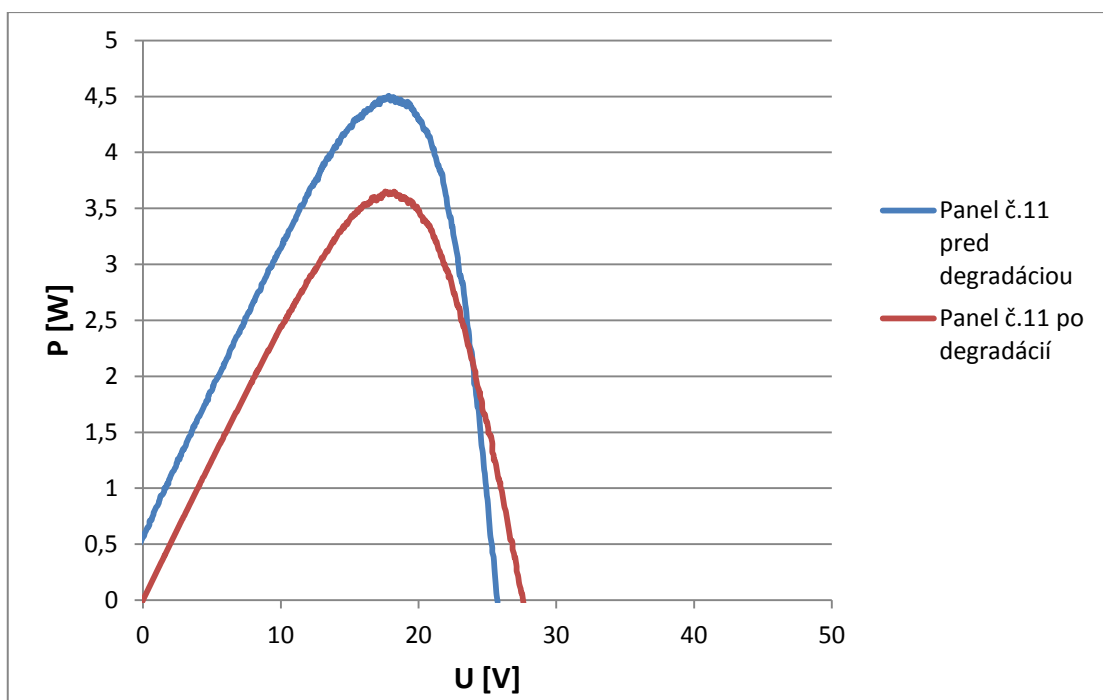
<i>panel č.</i>	I_{SC} [A]	U_{OC} [V]	η [%]	FF [%]	P_{MAX} [W]	R_S [Ω]	R_P [Ω]
11 pred	0,183	27,372	4,57	63,16	3,173	25,7	6904,5
11 po	0,178	27,131	3,77	54,06	2,616	47,0	1054,9

Tab. 4.11: Parametre panelu č.11 pred a po experimente pre intenzitu žiarenia 400 W/m^2 .

<i>panel č.</i>	I_{SC} [A]	U_{OC} [V]	η [%]	FF [%]	P_{MAX} [W]	R_S [Ω]	R_P [Ω]
11 pred	0,101	26,477	4,39	65,10	1,741	38,3	5634,5
11 po	0,099	26,278	3,79	57,80	1,505	62,9	1737,2



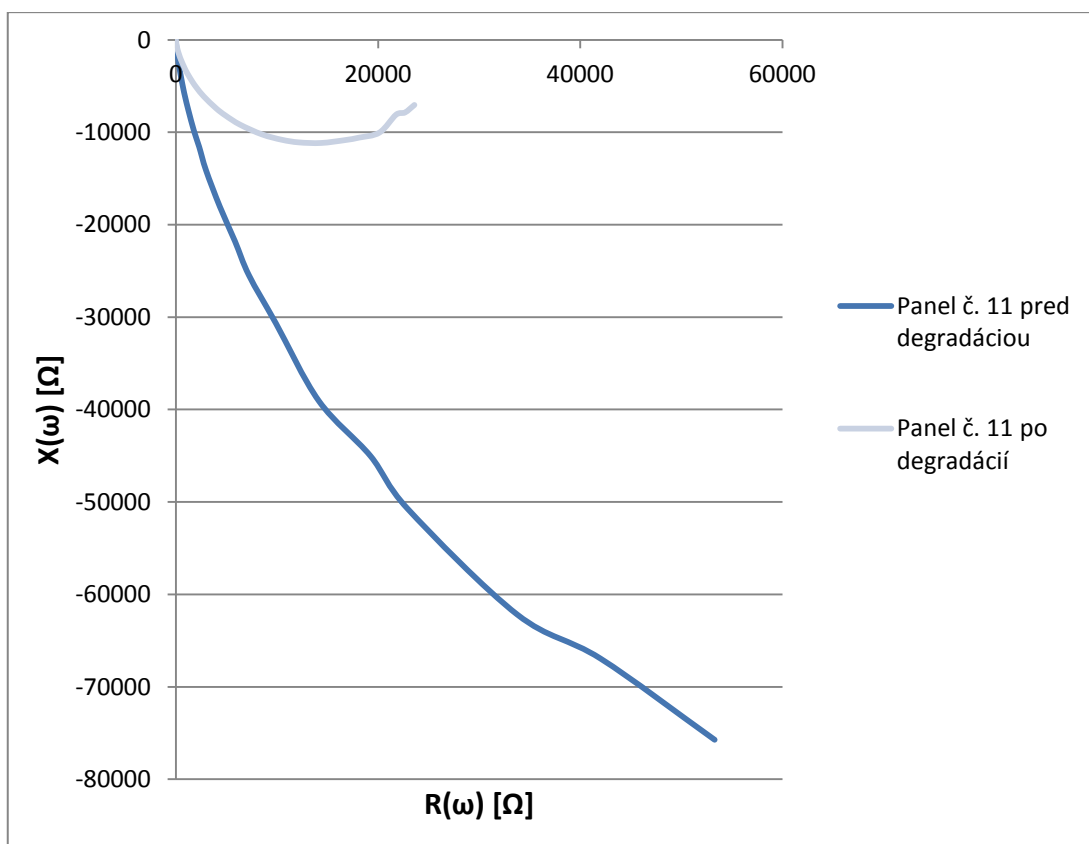
Obr. 4.26: V-A charakteristiky panelu č. 11 pred a po degradácii pre intenzitu žiarenia 1000 W/m^2 .



Obr. 4.27: Závislosť výkonu a napätia panelu č. 11 pred a po degradácii 1000 W/m^2 .

Z nameraných hodnôt môžeme konštatovať, že ku zmene jednotlivých parametrov v dôsledku elektrochemickej korózie určite došlo. Pokles výkonu môžeme jasne vidieť na Obr. 4.27.

Na porovnanie vlastností FV modulu pred a po meraní nám dobre poslúži aj diagnostická metóda impedančnej spektroskopie. Na Obr. 4.28 môžeme vidieť impedančné spektrum FV modulu č. 11 pred (tmavo modrá krivka) a po (svetlo modrá krivka) zasiahnutí panelu elektrochemickou koróziou. Namerané údaje v počiatočnom stave pred degradáciou sú zobrazené v Tab. 4.12 a po degradácii v Tab. 4.13. Podľa teoretických znalostí popísaných v kapitole venujúcej sa tejto diagnostickej metóde vieme, že čím je myslená plocha pod krivkou, predstavujúcou impedančné spektrum, menšia, tým je kvalita FV modulu horšia. V tomto prípade je na prvý pohľad možné jednoznačne konštatovať, že plocha pod krivkou, reprezentujúca impedančné spektrum panelu po zasiahnutí elektrochemickou koróziou, je oveľa menšia a značne sa líši od počiatočného stavu panelu.



Obr. 4.28: Impedančné spektrá panelu č.11 pred a po degradácii elektrochemickou koróziou.

Tab. 4.12: Namerané hodnoty pre panel č.11 pred degradáciou

f [Hz]	R[Ω]	X[Ω]	f [Hz]	R[Ω]	X[Ω]
20	53297,19	-75729,70	1500	241,14	-2245,01
25	42007,01	-66943,29	2000	168,35	-1716,61
30	33771,02	-62179,69	3000	98,78	-1171,46
40	22932,80	-50739,39	5000	49,56	-717,52
50	19256,09	-45024,10	8000	27,84	-453,68
60	14152,40	-39075,10	10000	22,11	-364,35
80	9887,83	-30647,69	15000	15,92	-244,21
100	7233,04	-25474,69	20000	13,48	-183,78
120	5848,56	-21786,90	30000	11,47	-123,09
150	4348,64	-18026,90	50000	10,13	-74,38
200	2986,68	-14113,20	80000	9,40	-46,87
250	2306,91	-11570,29	100000	9,10	-37,64
300	1794,19	-9852,37	150000	8,64	-25,23
400	1239,70	-7611,66	200000	8,33	-18,92
500	925,64	-6210,87	300000	7,96	-12,39
600	732,84	-5253,87	400000	7,70	-8,92
800	513,47	-4026,34	500000	7,51	-6,67
1000	391,91	-3273,53	1000000	7,07	-0,97

Tab. 4.13: Namerané hodnoty pre panel č.11 po degradácii

f [Hz]	R[Ω]	X[Ω]	f [Hz]	R[Ω]	X[Ω]
20	23582,90	-7030,56	1500	506,5209	-2138,91
25	22652,5	-7844,49	2000	348,0969	-1667,29
30	21773,40	-8077,47	3000	203,3979	-1162,79
40	20133,19	-10013	5000	105,0289	-726,16
50	18097,59	-10563,40	8000	61,52040	-465,31
60	16765,5	-10823,79	10000	49,7514	-375,85
80	14356,29	-11142,79	15000	36,53099	-254,58
100	12162,90	-11077,79	20000	30,97890	-193,19
120	10492,5	-10797,09	30000	26,03019	-131,42
150	8515,950	-10213,79	50000	21,95560	-81,88
200	6348,689	-9161,38	80000	18,8578	-53,81
250	4914,259	-8176,85	100000	17,4673	-44,25
300	3959,669	-7372,62	150000	15,142	-31,01
400	2765,600	-6111,93	200000	13,7538	-23,96
500	2083,560	-5207,540	300000	12,237	-16,35
600	1644,969	-4532	400000	11,4379	-12,18
800	1137,040	-3612,28	500000	10,942	-9,46
1000	853,0819	-3009	1000000	9,79659	-2,72

4.5 Zhodnotenie praktickej časti

Cieľom praktickej časti tejto diplomovej práce bolo za laboratórnych podmienok nasimulovať na a-Si:H fotovoltaiických moduloch potenciálom indukovanú degradáciu a skúmať jej príčiny a možnosti jej odstránenia. Na to aby sme mohli tento efekt vytvoriť sme museli poznať pôvodný stav skúmaných FV panelov. Na ich zhodnotenie nám výborne poslúžili nástroje diagnostických metód a to flash testu, elektroluminiscencie a impedančnej spektroskopie.

Experiment prebiehal na dvanástich kusoch tenkovrstvých a-Si:H modulov značky Conrad a type TPS-103 4W. Pomocou diagnostických metód sme vybrali päť panelov, ktoré mali z pomedzi všetkých najlepšie parametre a javili sa ako bezproblémové a ideálne na vytvorenie experimentu a ich následné testovanie.

Ako prvé sme sa pokúsili vytvoriť PID efekt za štandardných klimatických podmienok, teda teploty prostredia 25 °C a odhadovanej vlhkosti v miestnosti 40-60 %. Ani po 120 hodinách pôsobenia jednosmerného napätia o hodnote 1000 V k vytvoreniu PID efektu nedošlo. Dôvodom môže byť odolnosť amorfného kremíku práve voči tejto degradácii a skúmanie jeho vlastností by mohlo byť zaujímavým predmetom ďalšej štúdie.

Keďže z teoretických poznatkov vieme, že zvýšená vlhkosť napomáha tvorbe potenciálom indukovanej degradácie, naším následným experimentom bolo toto tvrdenie potvrdiť alebo vyvrátiť konkrétne na a-Si:H paneli. Nasimulovaním prostredia so 100 % vlhkosťou a dobou pôsobenia jednosmerného napätia 48 hodín sme dokázali vytvoriť PID efekt a to vo forme ireverzibilnej elektrochemickej korózie. Takto poškodený panel sme podrobili sériou diagnostických testov a zistili sme, že došlo k poklesu, pre FV modul najdôležitejších, parametrov. Tým sme dokázali, že zvýšená vlhkosť prostredia naozaj urýchľuje tvorbu potenciálom indukovanej degradácie a do značnej miery ovplyvňuje vlastnosti FV modulu.

ZÁVER

Táto diplomová práca bola rozdelená na dva veľké celky. A to na teoretickú časť a praktickú časť popisujúcu štúdium potenciálom indukovanej degradácie na fotovoltaických moduloch vyrobených z amorfného kremíku.

V prvej časti sa práca zaoberá uvedením do problematiky fotovoltaických modulov. Pre správne pochopenie princípu akým fotovoltaický panel vyrába jednosmerný prúd bol vysvetlený spôsob spracovania dopadajúceho slnečného žiarenia. O vlastnostiach fotovoltaického modulu nám najviac napovie jeho volt-ampérová charakteristika a tak práca popisuje jej najdôležitejšie parametre a následne náhradnú schému samotného fotovoltaického článku. Existuje celá rada typov v praxi používaných fotovoltaických modulov líšiacich sa parametrami, veľkosťou, materiálom, či spôsobom výroby. V dnešnej dobe je čoraz častejšie využívaná tenkovrstvá technológia fotovoltaických modulov pre jej jednoznačné výhody, najmä čo sa týka použitia v oblastiach, kde je väčšina dopadajúceho žiarenia difúzneho charakteru a na miestach, kde je ekonomicky a technologicky využitie klasických kremíkových modulov menej vhodné. Práve pre vysoký potenciál možnosti využitia tenkovrstvých technológií v praxi sa práca zameriava na panely vyrobené z amorfného kremíku.

V nasledujúcej časti práce je teoreticky popísaný jeden z najzávažnejších problémov postihujúci fotovoltaické elektrárne, ktorý spôsobuje značný pokles ich výkonu a to potenciálom indukovaná degradácia. Existuje viacero typov tohto problému, niektoré sú reverzibilné, iné po zasiahnutí modul nenávratne zničia. Spôsobov vzniku potenciálom indukovanej degradácie je viac ale z teoretických znalostí vieme, že hlavnými faktormi, ktoré umožňujú rozvoj PID sú vysoký rozdiel napätí v stringu, teplo a vlhkosť.

Na to aby sme vedeli určiť chybný modul a identifikovať príčinu vzniknutého problému slúžia diagnostické metódy. Spôsobov diagnostiky je celá rada ale práca teoreticky popisuje práve tie, ktoré sú v laboratórnych podmienkach najvhodnejšie na identifikáciu PID na tenkovrstvých a-Si:H moduloch a to metódu elektroluminiscencie, flash testu a impedančnej spektroskopie.

Nasledujúcou časťou práce je samotný experiment, ktorého cieľom bolo nasimulovať potenciálom indukovanú degradáciu na a-Si:H moduloch a pokiaľ by sa jednalo

o reverzibilnú formu tohto problému aj následnú regeneráciu. Pre správnosť merania sme museli najprv diagnostikovať panely v ich počiatočnom stave, keďže sme nepoznali ich optickú ani tepelnú minulosť. Pomocou metód elektroluminiscencie, flash testu a impedančnej spektroskopie sme vybrali z dvanástich kusov modulov značky Conrad modelu TPS-103 4W tie s parametrami čo najviac približujúcimi sa k menovitým hodnotám uvádzaných výrobcom.

Ako prvé sme sa pokúsili nasimulovať PID za štandardných klimatických podmienok, no ani po 120 hodinovom pôsobení jednosmerného napätia o hodnote 1000 V, ktoré malo podľa teoretických predpokladov jednoznačne túto degradáciu vytvoriť, sa potenciálom indukovaná degradácia nevytvorila, čo potvrdili všetky vyššie spomenuté diagnostické metódy. Dôvodom môže byť odolnosť amorfného kremíku voči tejto degradácii za štandardných podmienok, ktoré by mohli vzniknúť v praxi. Skúmanie tohto typu technológie by mohlo byť predmetom ďalšej štúdie.

Pretože je dokázané, že zvýšená vlhkosť napomáha vzniku PID efektu, nasimulovaním prostredia o 100 % vlhkosti ponorením modulu do nádoby s vodou, sme sa pokúsili o vytvorenie spomínaného typu degradácie za týchto klimatických podmienok. Po 48 hodinovom pôsobení došlo k prirazu elektrického prúdu cez aktívnu štruktúru FV modulu a následnej elektrolyze. Dôvodom bolo zasiahnutie modulu PID efektom a to konkrétne nereverzibilnou verziou tejto degradácie, elektrochemickou koróziou. Podrobením panelu všetkými diagnostickými metódami sa náš prvotný predpoklad potvrdil, došlo k poklesu najdôležitejších parametrov FV modulu. Z tejto časti experimentu jednoznačne vyplynulo, že zvýšená vlhkosť prostredia do značnej miery urýchľuje proces tvorby PID efektu. Skúmaním takto zasiahnutého modulu sme zistili, že sa jedná naozaj o veľmi závažný problém, ktorý v praxi postupne znižuje inštalovaný výkon FV elektrárne. Nanešťastie tento druh PID efektu nie je možné regenerovať a modul je definitívne touto degradáciou postihnutý.

Z výsledkov experimentu môžeme usúdiť, že a-Si:H moduly sú za štandardných podmienok odolnejšie voči potenciálom indukovanej degradácií než klasické kryštalické technológie, no za podmienok, ktoré urýchľujú vznik PID efektu sa ani ony tomuto problému nedokážu vyhnúť. V praxi používaným riešením, ktoré predchádza rýchlejšiemu vzniku tejto degradácie je zníženie potenciálu medzi rámom a aktívnou štruktúrou FV modulu, napr. uzemnením záporného pólu, čo je možné o meničov

s transformátorom. Ak sa však potenciálom indukovaná degradácia potvrdí je nutné rozhodnúť akým spôsobom vplyv PID potlačiť a postihnuté moduly regenerovať. Z dôvodu legislatívnych obmedzení väčšinou nie je možné vymeniť moduly za novšie typy, zmeniť konfiguráciu elektrárne alebo zabezpečiť iné meniče, u ktorých je možné prizemniť záporný pól FV reťazca. Riešením sa tak stáva použitie obvodu, ktorý vytvorí opačné pole, ktoré bude pôsobiť na dané moduly.

LITERATÚRA

- [1] MASTNÝ, Petr, Jiří DRÁPELA, Stanislav MIŠÁK, Jan MACHÁČEK, Michal PTÁČEK, Lukáš RADIL, Tomáš BARTOŠÍK a Tomáš PAVELKA. *Obnovitelné zdroje elektrické energie*. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04937-2.
- [2] QUASCHNING, Volker. *Obnovitelné zdroje energií*. 1. vyd. Grada, 2010, 296 s. Stavitel. ISBN 978-80-247-3250-3.
- [3] MURTINGER, Karel, Jiří BERANOVSKÝ a Milan TOMEŠ. *Fotovoltaika, elektrina ze slunce*. 2. vyd. Brno: ERA, 2008, vii, 81 s. ISBN 978-80-7366-133-5.
- [4] Solartec. *Princip fotovoltaiky: Fotovoltaický jev*. [online]. 2016 [cit. 2016-04-14]. Dostupné z: <http://www.solartec.cz/male-instalace-do-30kwp/informace-o-fotovoltaice/princip-fotovoltaiky>
- [5] Fotovoltaika. *Česká agentúra pro obnovitelné zdroje energie* [online]. 2009 [cit. 2016-04-17]. Dostupné z: <http://www.czrea.org/cs/druhyoze/fotovoltaika>
- [6] MATUSKA, T. *Solární soustavy pro bytové domy*. GradaPublishing, a.s., 2010. ISBN 978-80-247-3503-0.
- [7] LUQUE, A a Steven HEGEDUS. *Handbook of photovoltaic science and engineering*. 2nd ed. Chichester, West Sussex, U.K.: Wiley, 2011. ISBN 04-707-2169-3.
- [8] Tenkovrstvé FV technologie. In: *Votum Smart Energy* [online]. 2009 [cit. 2016-04-17]. Dostupné z: <http://www.votum.cz/Thin-film/>
- [9] JANDOVÁ, Kristýna. *Diagnostické metody plošného rozložení defektů solárních článků*. Brno, 2008. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Doc. Ing. Jiří Vaněk, Ph.D.
- [10] ZIMMERMANN, Martin. *Komplexní diagnostika fotovoltaických systémů*. Praha, 2015. Bakalárska práca. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. Tomáš Finsterle.
- [11] ROY, J.N., Govardhan Rao GARIKI a V. NAGALAKHSMI. *Reference module selection criteria for accurate testing of photovoltaic (PV) panels* [online]. In: .

- India, 2009 [cit. 2016-04-17]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X09002151>
- [12] PAPAIOANNOU, Georgios Ioannis. *Diagnostics of crystalline silicon photovoltaic modules*. Praha, 2015. Bakalárska práca. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. Karel Dušek, Ph.D.
- [13] LIBRA, Martin a Vladislav POULEK. *Solární energie: fotovoltaika - perspektivní trend současnosti i blízké budoucnosti*. 1. vyd. V Praze: ČZU, 2005. ISBN 80-213-1335-8.
- [14] ING. LAHKÝ, Martin. Pokles výkonu fotovoltaických elektráren v důsledku vysokonapěťového stresu. In: *Tzbinfo* [online]. 2015 [cit. 2016-04-17]. Dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/12260-pokles-vykonu-fotovoltaickych-elektraren-v-dusledku-vysokonapetoveho-stresu>
- [15] Co je PID. In: *Eicero Intelligent Power* [online]. 2016 [cit. 2016-04-17]. Dostupné z: <http://pid-doctor.eicero.cz/>
- [16] DIEHL, Matthias. Potential-induced degradation (PID) of photovoltaic panels. In: *PvServe* [online]. 2015 [cit. 2016-04-17]. Dostupné z: <http://pvserve.de/en/potential-induced-degradation-pid-of-photovoltaic-panels/>
- [17] ING. FINSTERLE, Tomáš, Ladislava ING. ČERNÁ, Pavel ING. HRZINA, PH.D. a Vítězslav PROF. ING. BENDA, CSC. *PID EFEKT NA FOTOVOLTAICKÝCH ELEKTRÁRNÁCH*. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektrotechnologie, 2015.
- [18] FINSTERLE, Tomáš. Vliv historie ozáření na amorfní Si fotovoltaické panely. Praha, 2012. Projekt 1. ČVUT. Vedoucí práce Ing. Ladislava Černá
- [19] Elektrolyza. *Web chemie* [online]. 2014 [cit. 2016-05-16]. Dostupné z: <http://www.webchemie.cz/elektrolyza.html>
- [20] BRÉDA, Maroš. *Fotovoltaický systém rodinného domu*. Praha, 2014. Bakalárska práca. České vysoké učení technické, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Ing. Ivan Cimbolínek.
- [21] BC. BRÉDA, Maroš. *Diagnostické metódy používané pri diagnostike tenkých vrstiev*. Praha, 2015. Projekt 2. České vysoké učení technické, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Ing. Tomáš Finsterle.
- [22] *Module Technology: SMA inverters provide the optimum solution for every mo-*

dule [online]. In: . [cit. 2016-05-17]. Dostupné z: <http://files.sma.de/dl/7418/Duennschicht-TI-UEN114630.pdf>

- [23] BC. KLADIVA, Roman. *Dlouhodobé sledování parametru fotovoltaických panelů*. Brno, 2013. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Roman Gvritishvili.
- [24] 8W/ 19V solární fotovoltaický panel ohebný, amorfní SO28. *Malapa* [online]. [cit. 2016-05-18]. Dostupné z: [http://www.malapa.cz/produkty/solarni-energie/SO28/#pictures\[gallery\]/2/](http://www.malapa.cz/produkty/solarni-energie/SO28/#pictures[gallery]/2/)

ZOZNAM OBRÁZKOV

Obr. 1.1: Princíp fotovoltaiického článku. [11].....	11
Obr. 1.2: Náhradná schéma solárneho článku. [13]	12
Obr. 1.3: V-A charakteristika fotovoltaiického článku. [1].....	13
Obr. 1.4: Ohybný amorfný fotovoltaiický modul. [24]	15
Obr. 2.1: V-A charakteristiky znázorňujúce priebeh PID s narastajúcim časom pôsobenia. [22]	18
Obr. 2.2: V-A charakteristiky znázorňujúce pokles výkonu FV panelu z dôvodu PID efektu. [15].....	19
Obr. 2.3: Ukladanie el. nábojov v dôsledku stratového prúdu medzi článkom a rámom. [22].....	20
Obr. 2.4: Závislosť prejavu PID na veľkosti reťazca (postihnuté oblasti znázornené žltou farbou). [17].....	20
Obr. 2.5: Elektroluminiscenčný snímok defektného modulu a detail elektrochemickej korózie. [17].....	22
Obr. 2.6: Elektroluminiscenčný snímok modulu zasiahnutého PID – postupná regenerácia a) až d). [17]	22
Obr. 2.7: Tenkovrstvý solárny modul s nevratným PID. [16].....	23
Obr. 3.1: Blokovaná schéma metódy flash testu. [23]	27
Obr. 3.2: Blokovaná schéma metódy elektroluminiscencie. [9]	28
Obr. 3.3: Porovnanie M_1 a M_2 článkov pomocou statických charakteristík. [12].....	30
Obr. 3.4: Porovnanie M_1 a M_2 článkov pomocou impedančných charakteristík. [12] ...	30
Obr. 3.5: Impedančné spektrum multikryštalického kremíkového FV článku pri rôznych teplotách. [12]	31
Obr. 4.1: Fotovoltaiický modul Conrad TPS-103 4W odfotený z prednej a zadnej strany	32
Obr. 4.2: Štítkové hodnoty uvedené na zadnej strane modulu Conrad TPS-103 4W. ...	32
Obr. 4.3: Ukážka pracoviska flash testu.	34
Obr. 4.4: Ukážka výslednej V-A charakteristiky po meraní flash testu.	36
Obr. 4.5: Elektroluminiscenčné snímky všetkých dvanástich testovaných modulov.....	37

Obr. 4.6: Gárium Arzenidová kamera použitá k meraniu metódou elektroluminiscencie.	38
Obr. 4.7: Meracie pracovisko impedančnej spektroskopie.....	39
Obr. 4.8: Názorná ukážka hodnôt na displeji meracieho zariadenia.	40
Obr. 4.9: Impedančné spektrá panelov č. 3, č. 6, č. 7, č. 10, č. 11.	41
Obr. 4.10: Impedančné spektrá panelov č. 1, č. 2, č. 4, č. 5, č. 8, č. 9, č. 12.....	42
Obr. 4.11: Ukážka spôsobu uzatvorenia modulu do obalu a spôsobu pripojenia kontaktov.	43
Obr. 4.12: Ukážka spôsobu zapojenie vodičov na strane modulu (vľavo) a na strane meracieho zariadenia (vpravo).	43
Obr. 4.13: Zdroj vysokého jednosmerného napätia.....	44
Obr. 4.14: Meracie pracovisko a spôsob zapojenia FV modulu pre vytvorenie PID efektu.	44
Obr. 4.15: Meracie pracovisko k simulácií PID efektu za štandardných klimatických podmienok.	45
Obr. 4.16: Ukážka spôsobu pripojenia kladnej elektródy k aktívnej časti modulu.	45
Obr. 4.17: Porovnanie elektroluminiscenčných snímok panelu č. 11 pred (vľavo) a po (vpravo) experimente.....	46
Obr. 4.18: V-A charakteristiky panelu č. 11 pred a po experimente.....	47
Obr. 4.19: Závislosť výkonu a napätia panelu č. 11 pred a po experimente.	48
Obr. 4.20: Ponorenie aktívnej časti modulu do nádoby s vodou.	49
Obr. 4.21 Pracovisko pre vytvorenie PID efektu za zvýšenej vlhkosti.	49
Obr. 4.22: Vytvorenie elektrolýzy v dôsledku prirazu aktívnej časti FV modulu.....	50
Obr. 4.23: Vzniknutá elektrochemická korózia.....	51
Obr. 4.24: Vzniknutá elektrochemická korózia (detail).	51
Obr. 4.25: Porovnanie elektroluminiscenčných snímok panelu č. 11 pred (vľavo) a po (vpravo) priraze.....	52
Obr. 4.26: V-A charakteristiky panelu č. 11 pred a po degradácií pre intenzitu žiarenia 1000 W/m ²	53
Obr. 4.27: Závislosť výkonu a napätia panelu č. 11 pred a po degradácií 1000 W/m ² .53	
Obr. 4.28: Impedančné spektrá panelu č.11 pred a po degradácií elektrochemickou koróziou.	54

ZOZNAM TABULIEK

Tab. 4.1: Parametre modulu Conrad TPS-103 4W	33
Tab. 4.2: Výsledky merania flash testu pre intenzitu žiarenia 1000 W/m^2	34
Tab. 4.3: Výsledky merania flash testu pre intenzitu žiarenia 700 W/m^2	35
Tab. 4.4: Výsledky merania flash testu pre intenzitu žiarenia 400 W/m^2	36
Tab. 4.5: Ukážka nameraných hodnôt pomocou impedančnej spektroskopie pre panel č. 6.	40
Tab. 4.6: Parametre panelu č.11 pred a po experimente pre intenzitu žiarenia 1000 W/m^2	46
Tab. 4.7: Parametre panelu č.11 pred a po experimente pre intenzitu žiarenia 700 W/m^2	47
Tab. 4.8: Parametre panelu č.11 pred a po experimente pre intenzitu žiarenia 400 W/m^2	47
Tab. 4.9: Parametre panelu č.11 pred a po experimente pre intenzitu žiarenia 1000 W/m^2	52
Tab. 4.10: Parametre panelu č.11 pred a po experimente pre intenzitu žiarenia 700 W/m^2	52
Tab. 4.11: Parametre panelu č.11 pred a po experimente pre intenzitu žiarenia 400 W/m^2	52
Tab. 4.12: Namerané hodnoty pre panel č.11 pred degradáciou	55
Tab. 4.13: Namerané hodnoty pre panel č.11 po degradácií	55

ZOZNAM SYMBOLOV, VELIČÍN A SKRATIEK

Ostatné symboly a skratky sa vyskytujú v texte s ich okamžitým vysvetlením.

<i>a-Si:H</i>	hydrogenizovaný amorfný kremík
<i>c-Si</i>	kryštalický kremík
<i>PID</i>	potenciálom indukovaná degradácia
<i>P-N</i>	oblasť na rozhraní prímiesového polovodiča typu P a polovodiča typu N
<i>FV</i>	fotovoltaický
<i>TF</i>	tenkovrstvý (thin film)
<i>EVA</i>	etylen vinyl acetát
<i>Na⁺</i>	sodík
<i>SnO₂</i>	oxid ciničitý
<i>LBIC</i>	Light Beam Induced method
<i>V-A</i>	volt-ampérová
<i>CCD</i>	nábojovo viazaná štruktúra (charge-coupled device)
<i>ČVUT</i>	České vysoké učení technické
<i>V</i>	Volt
<i>A</i>	Ampér
<i>W</i>	Watt
<i>Ω</i>	Ohm
<i>°C</i>	stupeň celzia
<i>MPP</i>	Maximum Power Point, bod maximálneho výkonu
<i>LDFS</i>	Laboratórium diagnostiky fotovoltaických systémov

ZOZNAM PRÍLOH

A Protokol z merania flash testu v LDFS ČVUT

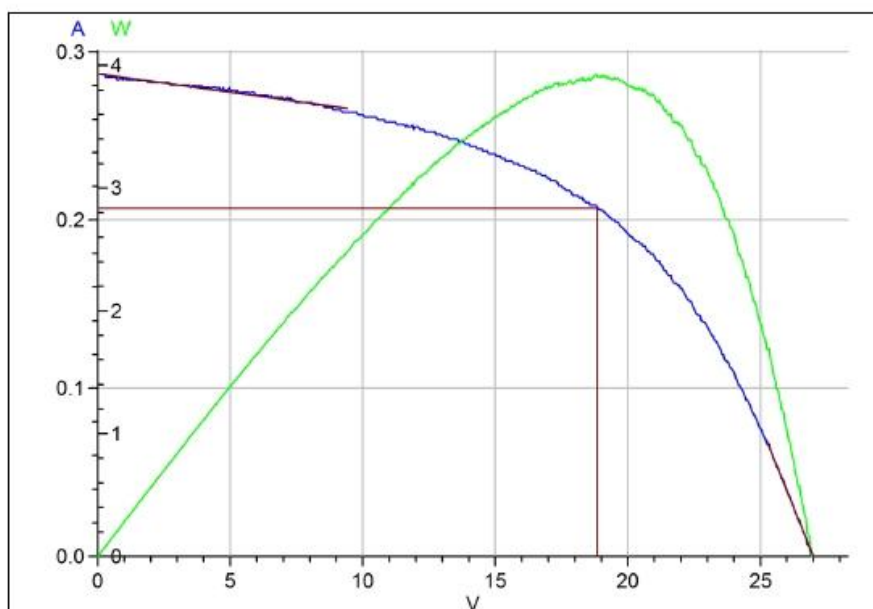


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická
Katedra elektrotechnologie
Technická 2, 166 27 Praha 6
Laboratoř diagnostiky fotovoltaických systémů

Měření modulu číslo 6

Výrobce:	Topray
Typ:	TPS-103
Sériové číslo:	6
Označení v LDFS:	
Datum měření:	11-04-16
Aktuální teplota:	20.7 °C
Hodnoty jsou přepočteny na teplotu:	25.0 °C
$G =$	1.0 kW/m ²
$I_{sc} =$	0.287 A
$V_{oc} =$	26.989 V
$\eta =$	3.93 %
FF =	50.34 %
$P_{MAX} =$	3.900 W
$V_{Pmax} =$	18.839 V
$I_{Pmax} =$	0.207 A
$R_s =$	25.5 Ω
$R_p =$	457.8 Ω





CZ NÁVOD K OBSLUZE

Amorfní fotovoltaický modul

Obj. č.: 11 04 67

TPS-103 17 V, 4 W



Obj. č.: 11 04 91

TPS-103 6 V, 3 W



Obj. č.: 11 04 92

TPS-103 12 V, 6 W



C Kompletní návod FV modulu Conrad TPS-103 4W (2. strana)

Vážený zákazníku,

děkujeme Vám za Vaši důvěru a za nákup solárního modulu.

Tento návod k obsluze je součástí výrobku. Obsahuje důležité pokyny k uvedení výrobku do provozu a k jeho obsluze. Jestliže výrobek předáte jiným osobám, dbejte na to, abyste jim odevzdali i tento návod.

Ponechejte si tento návod, abyste si jej mohli znovu kdykoliv přečíst!

Účel použití

Tento polykrystalický solární panel převádí světelné záření (obvykle sluneční) na elektrickou energii. Panel je zvláště vhodný pro nabíjení akumulátorů. Pro potřeby připojení solárního panelu k akumulátoru je přiložen u panelů obj. č. 11 04 67 a 11 04 92 kabel se svorkovnicí a kabel s autoadaptérem.

Rozsah dodávky

Solární panel

Kabel se svorkovnicí

Kabel s autoadaptérem (obj. č. 11 04 67, 11 04 92)

Návod k použití

Zprovoznění

1. Umístěte solární panel na slunečné místo. Abyste docílili optimální polohy a nastavení solárního panelu, tak doporučujeme obstarat si více informací o vhodném umístění a úhlu naklonění. Optimálního výkonu dosáhnete tehdy, pokud sluneční paprsky dopadají kolmo na solární panel.
2. Pokud chcete solární panel připevnit, je třeba, aby byl přichycen alespoň na čtyřech bodech. Rámeček je vhodný přichytit z boku. Potřebné otvory si musí každý uživatel vyvrtat sám.
3. Ujistěte se, že přes panel nebudou žádné stíny způsobené např. stromy nebo budovami.
4. Připojte konektor od solárního panelu k požadovanému adaptéru.
5. Připojte solární panel k akumulátoru:
 - Připojte svorkovnici k pólům baterie. Dodržujte správnou polaritu.
 - Připojte autoadaptér do autozásuvky ve Vašem voze (obj. č. 11 04 67, 11 04 92).
6. Po použití odpojte solární panel od akumulátoru. Odpojte adaptér od solárního panelu.

Čištění



Solární panel pravidelně čistěte, jinak může dojít ke snížení jeho výkonu nebo k nevratnému poškození jeho povrchu.

- K čištění povrchu používejte jemný, antistatický a suchý kartáč.
- Za žádných okolností nepoužívejte agresivní čisticí prostředky, jakými jsou prostředky na čištění skla nebo chemické prostředky na čištění solárních panelů, jinak může dojít k poškození povrchu.

D Kompletní návod FV modulu Conrad TPS-103 4W (3. strana)

Bezpečnostní pokyny

- Solární panel začne generovat elektrickou energii v okamžiku vystavení slunečnímu záření. Jeden panel generuje el. energii pod hranici tzv. nízkého napětí. Nicméně několik solárních panelů zapojených paralelně (součet proudů) nebo sériově (součet napětí) znamená již potenciální riziko. Vždy dodržujte následující bezpečnostní pokyny:
 - Solární panel/y nesmí být připojen/y pomocí mokrých nebo vlhkých zástrček nebo zásuvek.
 - Nikdy se nedotýkejte vodičů nebo svorkovnice vlhkýma nebo mokřýma rukama.
 - Nikdy nepoužívejte poškozené solární panely, nikdy panely nerozebírejte. Neodstraňujte typové štítky nalepené výrobcem.
 - Ujistěte se, že prostředí, ve kterém instalujete a připojujete solární panel/y je suché.
- Z bezpečnostních a schvalovacích důvodů (CE) není svévolné přestavování nebo pozměňování výrobku dovoleno.
- Výkon solárního panelu se může lišit v závislosti na počasí. Mějte to na paměti při provozu zařízení s tímto panelem.
- Vždy dodržujte při připojení akumulátoru správnou polaritu.
- Vyvarujte se přímého kontaktu s povrchem panelu. Jeho povrch je velmi citlivý a může být snadno poškrábán nebo poškozen znečištěním.
- Solární panely jsou určeny pro použití v mírném klimatickém pásmu. Solární panely jsou zařízení, která nejsou zabezpečena proti explozi. Tudiž by neměly být instalovány v blízkosti výbušných plynů a par.
- Výrobek není hračka, a proto by měl být udržován mimo dosah dětí a domácích zvířat! Součástí výrobku je sklo a další malé části, které by mohly být spolknuty.
- Nikdy nenechávejte obalový materiál v dosahu malých dětí, může se pro ně stát nebezpečnou hračkou.
- Chraňte výrobek před extrémními teplotami, silnými otřesy, vysokou vlhkostí, mokrem, výbušnými plyny, parami a rozpouštědly.
- Nevystavujte výrobek silnému mechanickému namáhání.
- Zacházejte s výrobkem opatrně. Otřesy, údery nebo pád i z malé výšky jej mohou poškodit.
- Dodržujte rovněž bezpečnostní pokyny týkající se zařízení, které je k solárnímu panelu připojeno.
- V případě, že máte jakékoliv pochybnosti k provozu, bezpečnosti nebo připojení tohoto výrobku, poraďte se s odborníkem.

Recyklace



Elektronické a elektrické produkty nesmějí být vyhazovány do domovních odpadů. Likviduje odpad na konci doby životnosti výrobku přiměřeně podle platných zákonných ustanovení.

Šetřete životní prostředí! Přispějte k jeho ochraně!

E Kompletný návod FV modulu Conrad TPS-103 4W (4. strana)

Technické údaje

Obj. č.	11 04 67	11 04 91	11 04 92
Jmenovité napětí:	17,5 V	7,5 V	17,5 V
Jmenovitý proud:	230 mA	428 mA	342 mA
Napětí naprázdno:	21 V	11 V	21 V
Zkratový proud:	320 mA	450 mA	450 mA
Třída ochrany:	IP44	IP44	IP44
Účinnost:	7%	7%	7%
Solární článek:	Amorfní	Amorfní	Amorfní
Provozní teplota:	-40 až +80°C	-40 až +80°C	-40 až +80°C
Provozní vlhkost:	Max. 90%	Max. 90%	Max. 90%
Délka kabelu:	2 m	2 m	2 m
Rozměry (Š x V x H):	315 x 315 x 19 mm	467 x 161 x 19 mm	315 x 467 x 22 mm
Hmotnost:	1,56 kg	1,07 kg	2,45 kg

Záruka

Na solární modul poskytujeme záruku 24 měsíců.

Záruka se nevztahuje na škody, které vyplývají z neodborného zacházení, nehody, opotřebení, nedodržení návodu k obsluze nebo změn na výrobku, provedených třetí osobou.

Příklad tohoto návodu zajistila společnost Conrad Electronic Česká republika, s. r. o.

Všechna práva vyhrazena. Jakékoli druhy kopíí tohoto návodu, jako např. fotokopie, jsou předmětem souhlasu společnosti Conrad Electronic Česká republika, s. r. o. Návod k použití odpovídá technickému stavu při tisku! **Změny vyhrazeny!**

© Copyright Conrad Electronic Česká republika, s. r. o.

KOV/7/2013

F Namerané hodnoty pomocou impedančnej spektroskopie pre panely č. 1 a č. 2

Panel č.1

f [Hz]	R[Ω]	X[Ω]	f [Hz]	R[Ω]	X[Ω]
20	21328,5	-1548742,5	1500	163,7700	-2641,34
25	17459,9	-114646	2000	104,4919	-1996,13
30	14018,4	-96704,10	3000	57,13790	-1340,61
40	8670,66	-75209,70	5000	29,84009	-809,38
50	7892,41	-58016,19	8000	18,83989	-508,37
60	6055	-50734,60	10000	15,8903	-407,67
80	5361,52	-38600,89	15000	12,4832	-273,10
100	4550,95	-31471,90	20000	10,8636	-205,71
120	3949,58	-26709,09	30000	9,1787	-138,12
150	3268,19	-21892,90	50000	7,61944	-83,70
200	2501,25	-17003,30	80000	6,61669	-52,71
250	1966,57	-13955,79	100000	6,26706	-42,26
300	1595,51	-11873	150000	5,79345	-28,12
400	1113,73	-9159,01	200000	5,57107	-20,91
500	830,039	-7466,31	300000	5,38665	-13,48
600	645,838	-6307,27	400000	5,32611	-9,60
800	427,681	-4818,24	500000	5,30951	-7,15
1000	306,561	-3900,41	1000000	5,3173	-1,43

Panel č.2

f [Hz]	R[Ω]	X[Ω]	f [Hz]	R[Ω]	X[Ω]
20	0	-648545	1500	112,1890	-4069
25	50544,39	-184166	2000	83,44259	-3058,18
30	41717,10	-159277	3000	60,49340	-2044,95
40	31857,5	-133525	5000	45,3027	-1233,45
50	24528,5	-98512,60	8000	37,3909	-776,70
60	19464,69	-90452	10000	34,3811	-624,58
80	11096,09	-69262,29	15000	29,32399	-421,69
100	7738,790	-56770,19	20000	25,7038	-320,09
120	5773,229	-47962,10	30000	20,57990	-217,66
150	3972,979	-38930,39	50000	15,0357	-133,74
200	2447,399	-29548,80	80000	11,7089	-84,91
250	1658,939	-23810,19	100000	10,6791	-68,28
300	1227,969	-19942,40	150000	9,42035	-45,74
400	758,4099	-15043,20	200000	8,85113	-34,26
500	526,3070	-12076,70	300000	8,31049	-22,51
600	392,4800	-10088,20	400000	8,0334	-16,42
800	254,6159	-7588,75	500000	7,85473	-12,60
1000	186,2209	-6084,04	1000000	7,42203	-3,70

G Namerané hodnoty pomocou impedančnej spektroskopie pre panely č. 3 a č. 4

Panel č.3

f [Hz]	R[Ω]	X[Ω]	f [Hz]	R[Ω]	X[Ω]
20	9428,980	-463,38	1500	1263,819	-2522,33
25	9385,639	-591,94	2000	886,4760	-2061,02
30	9324,570	-664,99	3000	540,4899	-1507,46
40	9418,690	-1029,42	5000	298,0299	-983,34
50	9136,980	-1158,70	8000	184,7290	-646,46
60	9182,650	-1398,17	10000	153,3280	-525,71
80	8932,219	-1789,96	15000	118,8280	-357,59
100	8729,599	-2121,39	20000	105,5630	-270,72
120	8477,860	-2442,65	30000	95,55310	-182,33
150	8111,100	-2867,63	50000	89,92579	-110,99
200	7449,509	-3434,81	80000	87,78559	-70,97
250	6761,140	-3759,48	100000	87,17659	-57,77
300	6117,930	-4001,91	150000	85,17579	-40,39
400	5034,850	-4144,37	200000	85,80349	-32,42
500	4207,959	-4091,86	300000	85,41120	-25,18
600	3551,100	-3936,66	400000	84,40010	-22,33
800	2639,270	-3577,87	500000	83,83000	-21,37
1000	2054,510	-3214,70	1000000	78,61930	-23,20

Panel č.4

f [Hz]	R[Ω]	X[Ω]	f [Hz]	R[Ω]	X[Ω]
20	27440,30	-151621	1500	68,25920	-2627,02
25	21115,40	-124849	2000	48,2286	-1974,33
30	17659,90	-106483	3000	32,11000	-1319,72
40	14998,20	-84740,20	5000	22,32329	-794,23
50	12002,20	-66459,70	8000	17,9494	-497,91
60	6789,209	-57638,5	10000	16,6856	-399,01
80	5398,899	-44343,39	15000	15,1181	-267,05
100	4046,649	-36046,80	20000	14,2557	-201,08
120	3167,040	-30434,40	30000	13,1774	-135,09
150	2314,939	-24691,59	50000	11,9092	-82,16
200	1528,260	-18839,09	80000	10,8376	-52,16
250	1098,599	-15228,59	100000	10,373	-42,06
300	815,0440	-12785,5	150000	9,60259	-28,39
400	510,9549	-9674,74	200000	9,13706	-21,37
500	356,2980	-7779,20	300000	8,61529	-14,06
600	264,1589	-6503,95	400000	8,33707	-10,19
800	167,1790	-4897,41	500000	8,1659	-7,71
1000	119,2490	-3927,61	1000000	7,76528	-1,76

H Namerané hodnoty pomocou impedančnej spektroskopie pre panely č. 5 a č. 6

Panel č. 5

f [Hz]	R[Ω]	X[Ω]	f [Hz]	R[Ω]	X[Ω]
20	0	0	1500	115,0630	-2389,65
25	26664,19	-103721	2000	73,7286	-1800,67
30	21206,5	-88586,39	3000	41,56880	-1205,93
40	15343,90	-66739,89	5000	23,5963	-726,34
50	11319,59	-58531,89	8000	16,55069	-455,45
60	9287,740	-48242,69	10000	14,6962	-365,04
80	5987,810	-36791,30	15000	12,5136	-244,39
100	4653,149	-29972,90	20000	11,4064	-184,04
120	3768,350	-25411	30000	10,1246	-123,58
150	2912,989	-20756,69	50000	8,84064	-74,91
200	2096,830	-15961,40	80000	7,96264	-47,22
250	1592,420	-13031,79	100000	7,63232	-37,89
300	1271,75	-11024,5	150000	7,13027	-25,27
400	875,1099	-8452,87	200000	6,83639	-18,80
500	639,5100	-6868,31	300000	6,49103	-12,04
600	488,5159	-5785,37	400000	6,28539	-8,40
800	314,1170	-4399,52	500000	6,14761	-6,01
1000	220,5319	-3548,62	1000000	5,85743	0,26

Panel č. 6

f [Hz]	R[Ω]	X[Ω]	f [Hz]	R[Ω]	X[Ω]
20	2029,810	-60,90	1500	759,9829	-635,97
25	2023,949	-87,05	2000	640,5609	-597,87
30	2018,150	-99,62	3000	481,7609	-543,25
40	1999,640	-129,39	5000	299,8450	-454,72
50	2007,040	-159,01	8000	171,1329	-354,06
60	1996,329	-184,42	10000	126,5810	-305,31
80	1966,839	-221,45	15000	70,62249	-223,98
100	1956,260	-280,38	20000	46,3577	-175,48
120	1926,589	-328,34	30000	26,42970	-121,68
150	1894,300	-392,82	50000	14,7131	-75,15
200	1810,339	-480,68	80000	10,0661	-47,75
250	1731,160	-554,25	100000	8,84339	-38,41
300	1645,560	-611,06	150000	7,46523	-25,72
400	1490,920	-680,81	200000	6,88759	-19,23
500	1353,709	-715,41	300000	6,38074	-12,52
600	1242,310	-725,54	400000	6,14819	-8,99
800	1071,689	-711,88	500000	6,01316	-6,74
1000	949,3129	-688,82	1000000	5,74082	-1,30

I Namerané hodnoty pomocou impedančnej spektroskopie pre panely č. 7 a č. 8

Panel č. 7

f [Hz]	R[Ω]	X[Ω]	f [Hz]	R[Ω]	X[Ω]
20	17772,30	-11376,5	1500	555	-877,63
25	15578,59	-11972,90	2000	459,7210	-760,75
30	13552,09	-11830,40	3000	325,9349	-617,27
40	10352	-11471,90	5000	186,3930	-453,65
50	8122,959	-10691,20	8000	99,71150	-322,73
60	6529,799	-9898,41	10000	72,08599	-269,34
80	4479,169	-8382,08	15000	39,4645	-189,02
100	3368,969	-7165,12	20000	26,24659	-144,88
120	2669,389	-6205,20	30000	15,9564	-98,35
150	2049,790	-5161,47	50000	10,2505	-59,74
200	1519,270	-4029,59	80000	8,09678	-37,58
250	1261,040	-3293,91	100000	7,5372	-30,12
300	1110,839	-2801,05	150000	6,87442	-20,08
400	950,5720	-2174,85	200000	6,55699	-14,95
500	864,8020	-1803,04	300000	6,22396	-9,61
600	809,2319	-1559,47	400000	6,04241	-6,75
800	733,1950	-1264,80	500000	5,92841	-4,88
1000	674,7280	-1096,16	1000000	5,71077	-0,048

Panel č. 8

f [Hz]	R[Ω]	X[Ω]	f [Hz]	R[Ω]	X[Ω]
20	19174,30	-241523	1500	369,4230	-3885,52
25	16194,59	-196868	2000	307,1050	-2944,40
30	13537,09	-165881	3000	250,9980	-1989,89
40	2322,889	-122456	5000	212,1510	-1221,01
50	4809,970	-95933,89	8000	188,7310	-791,90
60	6744,220	-87264,5	10000	177,7740	-650,85
80	4507,200	-64150,60	15000	155,4969	-464,49
100	3546,520	-51886,89	20000	137,6589	-371,22
120	3019,969	-43536,60	30000	111,0070	-275,44
150	2479,570	-35090,89	50000	78,51989	-192,13
200	1944,180	-26676,40	80000	53,187	-137,57
250	1591,130	-21571,09	100000	43,34949	-116,73
300	1369,699	-18119	150000	29,2889	-85,35
400	1063,189	-13770	200000	22,07710	-67,47
500	876,0850	-11127,40	300000	15,0561	-47,48
600	750,1959	-9347,66	400000	11,7548	-36,39
800	594,1300	-7097,81	500000	9,88934	-29,24
1000	498,3540	-5733,62	1000000	6,55521	-12,76

J Namerané hodnoty pomocou impedančnej spektroskopie pre panely č. 9 a č. 10

Panel č. 9

f [Hz]	R[Ω]	X[Ω]	f [Hz]	R[Ω]	X[Ω]
20	0	0	1500	66,94200	-2778,27
25	32957,80	-141839	2000	54,28929	-2087,83
30	25111,40	-121741	3000	43,2565	-1396,39
40	22175,19	-97625,20	5000	35,43709	-842,08
50	6638,950	-75635	8000	30,851	-530,19
60	8342,179	-67871,79	10000	29,1031	-426,31
80	5070,850	-50172,60	15000	26,1029	-287,88
100	3390,590	-40383,60	20000	23,819	-218,79
120	2456	-33829,60	30000	20,28630	-149,39
150	1631,540	-27202	50000	15,9102	-92,65
200	1011,359	-20503,59	80000	12,8707	-59,34
250	699,3930	-16458,59	100000	11,8682	-47,85
300	509,3890	-13737,20	150000	10,6341	-32,15
400	322,9230	-10330,09	200000	10,0859	-24,10
500	231,9830	-8276,87	300000	9,57774	-15,80
600	180,1080	-6906,97	400000	9,31916	-11,47
800	124,7379	-5189,77	500000	9,15034	-8,73
1000	97,07540	-4158,10	1000000	8,70666	-2,19

Panel č. 10

f [Hz]	R[Ω]	X[Ω]	f [Hz]	R[Ω]	X[Ω]
20	0	0	1500	493,4599	-1406,54
25	25073,80	-32889,39	2000	395,0220	-1143,10
30	20456	-30736,5	3000	268,8479	-851,69
40	14266,70	-26449,5	5000	148,6540	-573,35
50	11228	-22271	8000	80,88690	-385,44
60	8816,230	-19976,80	10000	60,39989	-316,10
80	6309,870	-16086	15000	36,52730	-217,73
100	4910,830	-13497,59	20000	26,6999	-166,02
120	3933,820	-11694,20	30000	18,69770	-112,67
150	3041,860	-9736,37	50000	13,7651	-68,84
200	2196,689	-7644,16	80000	11,531	-43,69
250	1729,869	-6290,70	100000	10,8526	-35,18
300	1449,219	-5355,29	150000	9,94614	-23,65
400	1131,489	-4149,60	200000	9,46408	-17,72
500	960,2919	-3405,78	300000	8,92314	-11,51
600	855,7730	-2906,98	400000	8,60967	-8,15
800	724,2260	-2281,89	500000	8,40009	-5,94
1000	638,0200	-1909,11	1000000	7,90537	-0,12

K Namerané hodnoty pomocou impedančnej spektroskopie pre panely č. 11 a č. 12

Panel č. 11

f [Hz]	R[Ω]	X[Ω]	f [Hz]	R[Ω]	X[Ω]
20	53297,19	-75729,70	1500	241,14	-2245,01
25	42007,01	-66943,29	2000	168,35	-1716,61
30	33771,02	-62179,69	3000	98,78	-1171,46
40	22932,80	-50739,39	5000	49,56	-717,52
50	19256,09	-45024,10	8000	27,84	-453,68
60	14152,40	-39075,10	10000	22,11	-364,35
80	9887,83	-30647,69	15000	15,92	-244,21
100	7233,04	-25474,69	20000	13,48	-183,78
120	5848,56	-21786,90	30000	11,47	-123,09
150	4348,64	-18026,90	50000	10,13	-74,38
200	2986,68	-14113,20	80000	9,40	-46,87
250	2306,91	-11570,29	100000	9,10	-37,64
300	1794,19	-9852,37	150000	8,64	-25,23
400	1239,70	-7611,66	200000	8,33	-18,92
500	925,64	-6210,87	300000	7,96	-12,39
600	732,84	-5253,87	400000	7,70	-8,92
800	513,47	-4026,34	500000	7,51	-6,67
1000	391,91	-3273,53	1000000	7,07	-0,97

Panel č. 12

f [Hz]	R[Ω]	X[Ω]	f [Hz]	R[Ω]	X[Ω]
20	50623,30	-182726	1500	214,0740	-3117
25	36250,39	-151097	2000	169,6020	-2356
30	28911,5	-130039	3000	129,6439	-1586,06
40	13666,29	-95027,79	5000	102,9530	-963,05
50	17410,40	-87614,70	8000	89,31240	-610,66
60	6985	-69360,5	10000	84,29840	-493,05
80	6099,779	-53278,5	15000	76,28790	-335,50
100	4206,740	-43003,30	20000	71,31069	-255,99
120	3180,280	-36063,39	30000	65,4235	-175,39
150	2288,179	-29013,90	50000	59,64020	-109,93
200	1543,920	-21947,59	80000	55,13140	-72,36
250	1165,849	-17669,40	100000	53,1903	-59,45
300	949,7399	-14776,70	150000	50,1525	-41,50
400	705,8480	-11169,09	200000	48,4795	-32,01
500	573,3489	-8993,91	300000	46,7547	-21,99
600	486,0459	-7541,64	400000	45,8619	-16,69
800	376,0769	-5715,85	500000	45,30199	-13,34
1000	307,3980	-4611,25	1000000	44,01419	-5,72