



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ**

**ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC  
TECHNOLOGY

## **DEGRADACE SOLÁRNÍCH PANELŮ**

DEGRADATION OF PHOTOVOLTAIC MODULES

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**TOMÁŠ POLEDNÍK**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**doc. Ing. JIŘÍ VANĚK, Ph.D.**

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav elektrotechnologie

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor  
**Mikroelektronika a technologie**

**Student:** Tomáš Poledník

**ID:** 120797

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2013/2014

## NÁZEV TÉMATU:

**Degradace solárních panelů**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte vlastnosti solárních modulů různých výrobců. Zjistěte základní rozdíly při výrobních procesech jednotlivých typů modulů a postupy při stanovení způsobu hodnocení kvality. Proveďte měření vybraných vlastností solárních panelů vzhledem k indukované degradaci potenciálem (PID). V závěru vyhodnoťte získané výsledky a navrhnete možné využití PID testu v procesech testování kvality a zlepšování výrobních procesů solárních panelů.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího bakalářské práce.

**Termín zadání:** 10.2.2014

**Termín odevzdání:** 5.6.2014

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Jiří Vaněk, Ph.D.

**Konzultanti bakalářské práce:** Ing. Radim Havelka,, Krannich Solar, s.r.o.

**doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.**

*Předseda oborové rady*

## UPOZORNĚNÍ:

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

# ABSTRAKT

Bakalářská práce byla zaměřena na konstrukční technologii solárních modulů a problematiku indukované degradace vlivem potenciálu. Specifikuje klíčovou problematiku a možné prvky ovlivňující působení prostředí vzhledem k možným příčinám vzniku degradace. Obsahuje popis měření polykrystalických a monokrystalických technologií odolných vůči svodovému potenciálu. Dále bylo provedeno měření na vybraných testovacích kusech, které byly postihnuty degradací výkonu.

# KLÍČOVÁ SLOVA

Degradace, indukovaná, potenciál, panel, modul, fotovoltaika, modul, článek, výroba, elektroluminiscence, termografie

# ABSTRACT

The bachelor diploma thesis is focused on the constructional technology of the solar modules as well as on the problems of the induced degradation under the influence of the potential. It specifies the key issues and possible elements that influence the effect of environment with regard to possible causes of the origin of degeneration. The thesis includes the description of measuring of the polycrystalline and monocrystalline technologies that are resistant to the leading potential. Furthermore, the measuring was carried out on the chosen testing pieces that had been affected by the degradation of the output.

# KEY WORDS

Degradation, induced potential, panel, module, photovoltaic module, article, production, electroluminescence, thermography

## **Bibliografická citace**

POLEDNÍK, T. *Degradace solárních panelů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 46 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jiří Vaněk, Ph.D, Konzultant Ing. Radim Havelka, Krannich solar s.r.o.

## Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „**Degradace solárních panelů**“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce, konzultanta a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením tohoto projektu jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 23. května 2014

.....  
podpis autora

## Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Jiřímu Vaňkovi, Ph.D. a konzultantovi Ing. Radimu Havelkovi ze společnosti Krannich solar s.r.o. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování bakalářské práce.

V Brně dne 23. května 2014

.....  
podpis autora

# Obsah

<b>1 Úvod</b> .....	- 1 -
<b>2 Technologie fotovoltaického článku</b> .....	- 2 -
2.1 Úvod .....	- 2 -
2.2 Kvalita fotovoltaických článků.....	- 3 -
2.3 Materiály pro solární panely.....	- 4 -
2.3.1 Pouzdra fotovoltaických modulů.....	- 5 -
2.3.2 IP ochrana, odvod tepla .....	- 6 -
2.4 Kontrola kvality fotovoltaických modulů .....	- 6 -
2.4.1 Flash test.....	- 7 -
2.4.2 Termografie .....	- 7 -
2.4.3 Elektroluminiscence .....	- 8 -
<b>3 Vzniku degradace vlivem potenciálu</b> .....	- 10 -
3.1 Faktory ovlivňující potenciál na úrovni fotovoltaického panelu.....	- 11 -
3.2 Faktory ovlivňující potenciál na úrovni fotovoltaického systému .....	- 11 -
3.3 Důsledky PID .....	- 12 -
3.3.1 TCO Koroze .....	- 13 -
3.4. Reverzibilizace degradace na úrovni topologie systému.....	- 14 -
3.5 Bezpečnostní předpisy pro připojení fotovoltaických elektráren.....	- 15 -
<b>4 Experimentální práce</b> .....	- 16 -
4.1 Hlavní informace o testovaných objektech.....	- 16 -
4.2 Popis testu.....	- 17 -
4.2.1 Stanovení A-V charakteristiky při standartních testovacích podmínkách.....	- 18 -
4.3 Výsledky testování .....	- 18 -
4.3.1 Detailní výsledky A-V charakteristik a ATC elektroluminiscenčních analýz polykrystalický a monokrystalický modul .....	- 19 -
4.4 Reverzibilní experiment .....	- 23 -
4.4.1 Zapojení reverzibilního experimentu.....	- 28 -
<b>5 Závěr</b> .....	- 30 -
<b>6 Použitá literatura</b> .....	- 31 -
<b>7 Seznam zkratk</b> .....	- 32 -
<b>8 Přílohy</b> .....	- 33 -

# Seznam obrázků

<b>Obr. 1.:</b> Princip fotovoltaického článku [1] .....	- 2 -
<b>Obr. 2.:</b> Energie fotonu [2].....	- 3 -
<b>Obr. 3.:</b> Záruky na degradaci výkonu fotovoltaických panelů [2] .....	- 4 -
<b>Obr. 4.:</b> Struktura FV panelu [3] .....	- 4 -
<b>Obr. 5.:</b> Skladba panelu s křemíkovými články a EVA (Etylen-Vinyl-Acetat).....	- 5 -
<b>Obr. 6.:</b> Vady na fotovoltaické instalaci.....	- 8 -
<b>Obr. 7.:</b> Vadné buňky fotovoltaického panelu, elektroluminiscence. ....	- 9 -
<b>Obr. 8.:</b> Buňky fotovoltaického panelu bez vad.....	- 9 -
<b>Obr. 9.:</b> Unikající potenciál proud a napětí ( zobrazen záporný náboj) .....	- 10 -
<b>Obr. 10.:</b> Řez fotovoltaickým modulem, úniky proudu skrze technologii[11] .....	- 11 -
<b>Obr. 11.:</b> Napěťový potenciál, čtyři klasifikace [5] .....	- 12 -
<b>Obr.12.:</b> V-A charakteristika fotovoltaického článku, působení PID v čase[12].....	- 12 -
<b>Obr. 13.:</b> Superstrátová struktura [12].....	- 13 -
<b>Obr. 14.:</b> Fotovoltaický systém využívající inverter s galvanickým oddělením od země(integrovaný transformátor) .....	- 14 -
<b>Obr.15.:</b> Fotovoltaický systém s invertorem bez integrovaného transformátoru.....	- 14 -
<b>Obr.16.:</b> Fotovoltaický modul, typ LX-240P/156-60 plus.....	- 16 -
<b>Obr.17.:</b> Fotovoltaický modul, typ LX-250M/156-60 .....	- 17 -
<b>Obr.18.:</b> V-A charakteristika modulu č. 1211262939.....	- 20 -
<b>Obr.19.:</b> Elektroluminiscenční analýza před a po PID (Doba měření 48h) SN: 1211262939 .....	- 20 -
<b>Obr.20.:</b> A-V charakteristika po PID měření, modul číslo 140887 .....	- 22 -
<b>Obr.21.:</b> Elektroluminiscenční analýza před a po PID (Doba měření 48h) SN: 140887 ..	- 22 -
<b>Obr.22.:</b> Elektroluminiscenční analýza před zkouškou reverzibility panelů Atersa.....	- 24 -
<b>Obr.23.:</b> A-V charakteristika panelu před zkouškou reverzibility (panel č. 000010344) ...	- 26 -
<b>Obr.24.:</b> A-V charakteristika panelu před zkouškou reverzibility (panel č. 000010319) ..	- 27 -
<b>Obr. 25.:</b> Zapojení reverzibilního experimentu.....	- 28 -
<b>Obr.26.:</b> Vytvoření svodového potenciálu , reverzibilitnost degradace .....	- 29 -

# Seznam tabulek

<b>Tab.1.:</b> Dostupné informace o testované fotovoltaické modulu.....	- 16 -
<b>Tab.2.:</b> Výsledky měření .....	- 18 -
<b>Tab.3.:</b> Výsledky V-A analýz před a po měření PID .....	- 19 -
<b>Tab.4.:</b> Výsledky V-A analýzy po před a po měření PID Monokrystal .....	- 21 -
<b>Tab.5.:</b> Katalogové hodnoty Modelu Atersa A-130 .....	- 23 -
<b>Tab.6.:</b> Podmínky pro měření A-V charakteristik .....	- 25 -
<b>Tab.7.:</b> Výsledky měření A-V charakteristiky (panel č. 000010344) .....	- 25 -
<b>Tab.8.:</b> Výsledky měření volt-ampérové charakteristiky (panel č. 000010319).....	- 26 -

# 1 Úvod

Elektrická energie je, byla a bude, již od devatenáctého století neodmyslitelnou součástí denního života každého moderního člověka. Náklady na určitou životní úroveň jsou v době využívání neobnovitelných zdrojů elektrické energie (fosilní paliva: uhlí, ropa, plyn) do značné míry ovlivněny jejich vyčerpatelností. Využívání těchto zdrojů je navíc spojeno se vznikem nežádoucích plynů (CO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub>, aj.). Při exponenciálním růstu populace, jsme se navíc dostali do doby, kdy musíme začít, uvažovat o alternativní výrobě elektrické energie. A to především o výrobě energie z ekologicky „čistých“ zdrojů. Mezi tyto zdroje patří mimo jiné i energie z fotovoltaických článků.

Fotovoltaické elektrárny jsou jedny z neekologičtějších výroben elektrické energie. Provoz fotovoltaických elektráren je tichý, ekologický a nenáročný. V době instalačního bůmu, kterým si po zavedení legislativ výkupních cen postupem času prošla nebo projde každá země. Bylo nainstalováno mnoho elektráren s životností daleko větší než je uzavřená smlouva vykupování elektrické energie. Do budoucna se s využitím fotovoltaické energie počítá v obrovském měřítku a taky technologie vývoje fotovoltaických panelů jde dopředu.

Ve spolupráci se společností Krannich solar s.r.o, přiblížím problém fotovoltaických panelů který prozatím není příliš zmapovaný, ale je třeba jej vytáhnout na světlo. Jako etalon své bakalářské práce použiji fotovoltaické panely Luxor od společnosti Luxor Solar GmbH které prošly nezávislým testem potenciální indukované degradace fotovoltaického institutu v Berlíně. Dále pak pro testování možného zvrácení účinků degradace panely Atersa AT 130.

Výkonová degradace je nežádoucí vlastnost některých solárních modulů. Mezi faktory které způsobují degradaci patří (napětí, teplo, vlhkost). Tyto faktory existují na všech fotovoltaických systémech, efekt potenciální indukované degradace, není však podmíněn vznikem při působení těchto faktorů. Všechny c-Si (krystalický křemík) moduly mají prvky podporující pochod PID nevratných mechanismů. Klíčem k zamezení vzniku a možnostem regenerace takto zasažených modulů je pochopení jak k těmto pochodům dochází. Tento jev popisuje snížení výkonu krystalických článků.

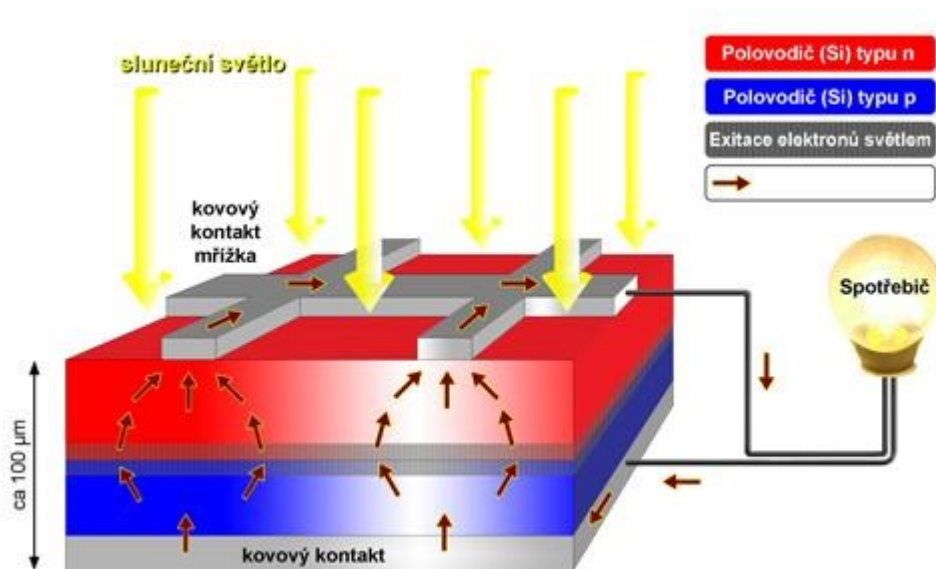
Efekt degradace fotovoltaických modulů je znám od roku 1970, kdy nebyl brán v potaz jeho důsledek, z důvodu neustále se snižující ceny FV modulů leckdy na úkor kvality. Přesný princip není zatím znám, dochází proto ke spekulacím v podobě pravděpodobným teoriím o vzniku. V posledních letech byly ztráty výkonu pozorovány u krystalických solárních modulů, kde intenzita degradace mohla přesáhnout až 30% a v ojedinělých případech klesla výkonnost až o 70% nominálního výkonu v průběhu prvních let.

# 2 Technologie fotovoltaického článku

## 2.1 Úvod

Na jeden metr čtvereční povrchu země dopadá po odečtení ztrát vlivem ohřívání atmosféry přibližně 600 W slunečního záření. Záření je ve vlnových délkách příznivých pro život na zemi (viditelné světlo a teplo). Využití tohoto záření je pro fotovoltaiku zásadní, tj. přeměna viditelného a blízkého infračerveného spektra na elektrickou energii.

Fotovoltaický článek slouží k přímé přeměně sluneční, světelné energie na energii elektrickou. Fotony slunečního záření dopadají na P-N přechod a svou energií vyrážejí elektrony. Takto vzniklé volné elektrony se pomocí elektrod odvedou ke střídači, který je převede na střídavé napětí. Od dob svého vynalezení se solární buňky změnily velmi málo. Jsou složeny ze dvou vrstev polovodičového materiálu (křemík), které jsou umístěny mezi dvěma kovovými elektrodami. Jedna z vrstev – materiál typu N obsahuje velké množství negativně nabitých elektronů, druhá vrstva – materiál typu P obsahuje velké množství „děr“, které se dají popsat jako prázdná místa, která snadno absorbují elektrony. V místě kde jsou tyto dvě vrstvy spojeny dojde ke spárování elektronů s dírami, čímž se vytvoří elektrické pole, které zabrání dalším elektronům v pohybu z N-vrstvy do P-vrstvy. Když dopadne foton o správné vlnové délce na toto spojení, vyrazí některé spárované elektrony z děr. Elektrické pole tlačí tyto volné díry v opačném směru což vede k přebytku volných elektronů v N-vrstvě a přebytku děr (nedostatek elektronů) v P-vrstvě. Pokud se elektrody propojí vnějším obvodem tak tento vytvoří cestu pro přebytečné elektrony a tím elektrický proud. Fotovoltaický článek je založen na principu fotovoltaického jevu. Fotovoltaický jev je část z celkového fotoelektrického jevu.

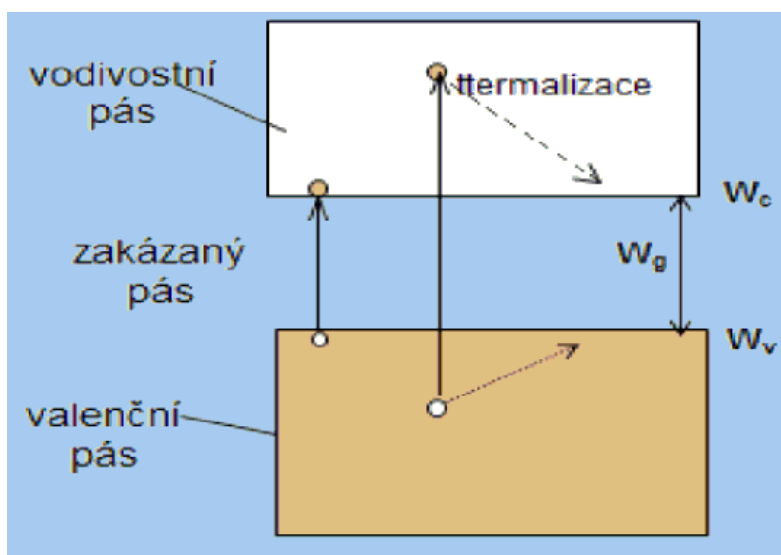


Obr. 1.: Princip fotovoltaického článku [1]

Konstrukce fotovoltaického článku je podle pojmů a teorie polovodičů, v podstatě velkoplošnou polovodičovou diodou. Při průchodu fotonu materiálem dochází k interakci mezi dopadajícím fotonem a materiálem. [2]

Pro generaci volného nosiče náboje, musí dopadnout na materiál foton s minimální energií  $h\nu > W_g$  což je šířka zakázaného pásu

- Interakce s mřížkou materiálu -> teplo
- Interakce s volnými elektrony -> teplo
- Interakce s vázanými elektrony -> uvolnění elektronu, vznik volného nosiče náboje

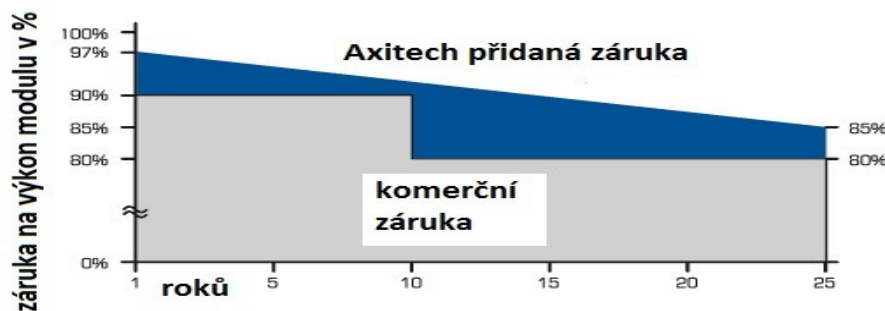


Obr. 2.: Energie fotonu [2]

Pokud záměrně znečistíme polovodičový materiál (např.) křemík určitými cizími atomy může materiál získat žádané elektrické vlastnosti. Dotace se provádí většinou tří nebo pětimocnými prvky, a mění se podle toho jaká je zapotřebí výsledná vodivost.

## 2.2 Kvalita fotovoltaických článků

Kvalita fotovoltaických článků přímo ovlivňuje, kolik energie ze slunce, můžeme vyrobit, popřípadě v globálním měřítku, kolik prostředků nám fotovoltaická instalace vygeneruje. Parametrům, které určují kvalitu fotovoltaických článků, bychom měli při výběru vhodné technologie věnovat patřičnou pozornost. Většina výrobců fotovoltaických panelů má standardní záruky na výkonové parametry 25 let. Existuje ale řada faktorů kdy fotovoltaické články pro panely nemusí odpovídat udávaným parametrům a tím může být v globálním měřítku ohrožena efektivita celého systému. Mezi hlavní příčiny vad se řadí nekvalita výroby, špatná manipulace při transportu, chyby instalátorů při instalaci. Kvalitní evropské výrobci panelů mají naopak záruku přidanou jako to je vidět na obrázku 3. Záruka je dána mírou poklesu výkonových parametrů článků. Bohužel v dnešní době nelze tyto parametry garantovat jinak než akreditovanou zkouškou ve státní zkušebně.

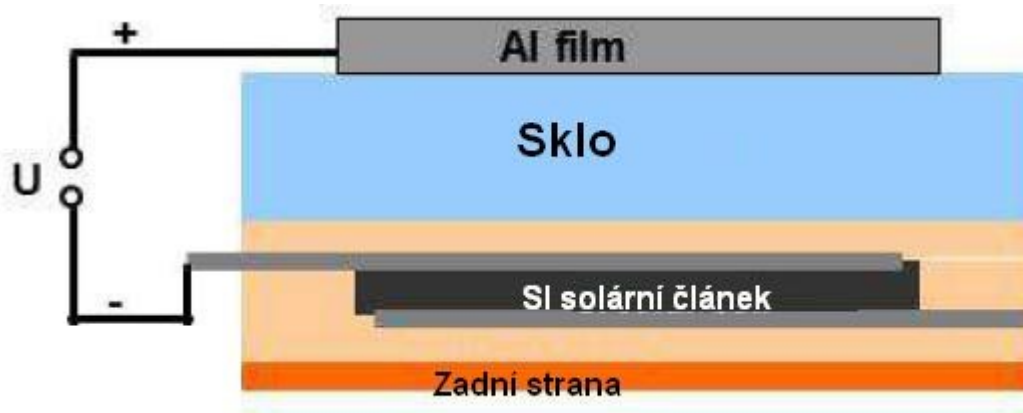


Obr. 3.: Záruky na degradaci výkonu fotovoltaických panelů [2]

### 2.3 Materiály pro solární panely

Elektrina je vyráběna při nárazu fotonu do polovodičových struktur. Pro dosažení vyššího napětí a výkonů jsou panely spojeny do větších jednotek. Sériově zapojené jednotky pak poskytují vyšší napětí, paralelně mají vyšší dodávku proudu. Tyto jednotky jsou pak označovány jako fotovoltaické panely. Fotovoltaický článek jako takový nedokáže dlouhodobě přežít v prostředí bez ochrany kvůli povětrnostním podmínkám a celkově jeho konstrukci.

Požadavky na zelenější formy energie se projevují vyšší výrobou a používáním solárních panelů pro průmyslové a domácí použití. Silikonové materiály se hojně používají při výrobě fotovoltaických (FV) panelů. Základ FV panelu je použití sendvičové topologie a polovodičového materiálu. [3]



Obr. 4.: Struktura FV panelu [3]

Do fotovoltaických panelů se jednotlivé články skládají v sério-paralelní kombinaci, aby při definované osvětlení poskytovaly žádané stejnosměrné parametry. Na přední straně panelu je temperované tvrzené sklo s co nejlepšími parametry pro propustnost světla. Tato skla jsou odolná vůči nárazu, povětrnostní vlivů a jsou především stále v čase. Na sklo se pokládá plastová EVA(ethylvinylacetát) folie která zlepšuje parametry a na folii se skládají PV články. Jednotlivé PV články jsou propojeny sériově sběrníci která vede skrze celý FV panel. Přes propojené články se opět pokládá EVA folie a následně je celá struktura přeložena Tedlar-Teflon-Kaptonovou folií která slouží jako ochranná folie zadní stěny FV modulu. Z celé struktury se následně vysaje vzduch a zahřeje se na teplotu tání EVA folie. [4]

Ethylvinylacetát se po teplotním zpracování rozlije do FV článků a vytvoří ochranu vrstvu mezi předním sklem a zadní ochranou folií. Nakonec se panely rámují a zatmelují silikonovým tmelem do hliníkových profilů a opatřují se Junction-Boxem s vývody pro normalizované připojení do FV systému.

Propojené solární články jsou pevně vsazeny v čirém ethylen-vinyl-acetátu, usazeném v hliníkovém či nerezovém rámu a zakrytém čirým sklem na čelní straně. Silikonové materiály se v těchto aplikacích používají jako:

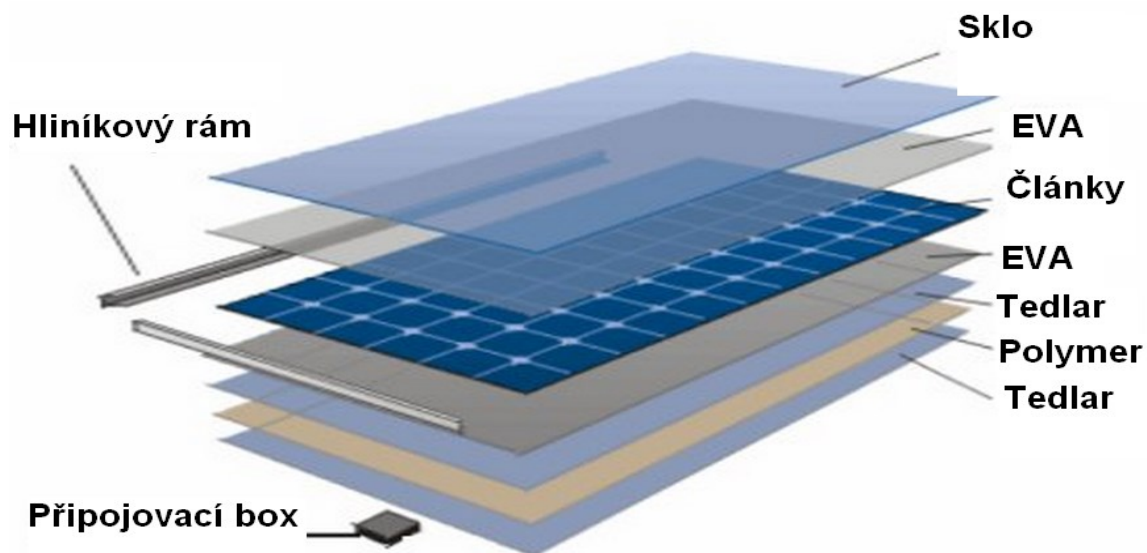
- Pojidlo při lepení článků do rámu
- Jako alternativní zalévací hmota k ethylen-vinyl-acetátu

Fotovoltaické články zalaminované ve skle či plastu jsou před vlastní montáží vlepovány do hliníkových rámu. Kvalitní průmyslové silikony vytvářejí v tomto směru velmi spolehlivý, pevný a pružný spoj, který je velmi odolný vůči vlivům prostředí. Silikonová lepidla v podobných aplikacích mají stálost desítek let při použití ve stavebnictví a v průmyslu. Nyní jsou již tradičním materiálem s vyzkoušenou odolností proti změnám teplotních cyklů. [5] Protože i v tomto případě jsou spojovány materiály s nestejnou tepelnou roztažností, přirozená pružnost silikonových materiálů bude rozdíly absorbovat bez mechanického namáhání FV článků. Odolnost silikonů oproti rozkladnému vlivu UV záření je dalším důvodem pro použití silikonových lepidel.

Ačkoliv někteří výrobci pro lepení volí stále tradiční levné Acetoxové silikony, tyto materiály není vždy možné doporučit kvůli korozivní povaze vedlejšího produktu, což je právě důvod vzniku degradace fotovoltaických panelů.

### 2.3.1 Pouzdra fotovoltaických modulů

Široce užívaným polymerem pro krytí článku mezi svrchní skleněnou deskou a spodním skleněným krytem je Etylen vinyl acetát (EVA). EVA se používá z důvodu své odolnosti, čirosti, odolnosti proti korozi a samozhášivým vlastnostem.



Obr. 5.: Skladba panelu s křemíkovými články a EVA (Ethylen-Vinyl-Acetát)

Určitý problém však představuje „secvičování“ EVA folie na skleněné desky. Nevýhodou této technologie jsou mezery na hranách, kudy vlhkost a vzduch mohou pronikat k fotoaktivním vrstvám a způsobit degradaci materiálu. Další nevýhodou tohoto procesu je také jeho nesnadná automatizace a časová, energetická a materiálová náročnost. [6]

### **2.3.2 IP ochrana, odvod tepla**

Pro řízení fotovoltaických článků se používá doplňková elektronika, kterou je třeba chránit před vlivy prostředí (kondenzující vlhkost, voda). Nejúčinnějším způsobem, jak poskytnout zařízení dostatečný stupeň krytí a také ochrany, je zalití nebo zapouzdření elektroniky do boxu. Tím se zamezí možnosti vnikání vody i kondenzaci vlhkosti uvnitř zařízení a ochrání DPS a součástky před poškozením. Zalévací hmotu lze v případě silikonového materiálu volit v celé široké řadě tvrdostí, rychlostí vytvrzování, adheze k povrchům, barev. Velmi měkké silikonové gely jsou tak schopny pohltit velká mechanická namáhání a také umožňují pozdější opravu zařízení, pokud tato oprava bude v budoucnosti potřeba. Tvrdší druhy materiálů poskytují naopak velmi robustní ochranu zalitím.

V případě, že některé z článků na panelu při provozu FV elektrárny jsou zastíněny, elektrickou energii spotřebovávají, namísto, aby ji vyráběli. Aby k tomuto nedocházelo, jsou články přemostěny diodami, které zastíněné články v takovémto případě odpojí. Takovéto diody jsou často umístěny ve zmiňovaném Junction Boxu a vyrábějí velké množství ztrátového tepla. Některé silikonové zalévací hmoty jsou plněny tepelně vodivým plnivem, aby zalévací hmota bylo schopna nadbytečné ztrátové teplo odvést. Toto je ovšem pravidlo jen u některých kvalitních výrobců modulů. Toto doporučení zatím nebylo zahrnuto jako standart pro výrobu.

## **2.4 Kontrola kvality fotovoltaických modulů**

Mezi hlavní příčiny vad na fotovoltaických modulech patří rozdílná technologická úroveň u výrobců, mechanický stres při dopravě a manipulaci, plagiátorství, působení nepříznivých vlivů a v neposlední řadě nevhodná instalace která má dopad v podobě postupné indukované degradace.

Ať už se investor rozhodne pro jakoukoli technologii, má vždy možnost provést technickou kontrolu nakoupených, či nainstalovaných fotovoltaických panelů. Pro vyhodnocení jakosti fotovoltaických modulů existuje řada sofistikovaných metod jejich výsledkem je objektivní pohled na kondici fotovoltaických panelů. Bohužel v dnešní době prokazatelnost jakýchkoli vad u výrobce je velice těžká. Reklamace probíhají přes dovozce tj firmu která daný panel uvedla na trh. Tyto reklamace jsou vždy zdlouhavé a často si samotný výrobce může vyžádat akreditované měření jedné či více zkoušek které daleko převyšuje cenu nákupu nového fotovoltaického modulu

### 2.4.1 Flash test

Každý panel by měl za svůj život absolvovat minimálně jedno měření a to ve výrobě. Dovozece panelů tj. firma která uvadí daný panel na trh což se rovná firmě která za daný panel zaplatila clo při dovozu musí při prodeji flash test ke každému panelu doložit, prakticky je tomu bohužel jinak.

Flash test patří mezi základní měření výkonových charakteristik fotovoltaických modulů. Výstupem měření jsou takzvaná Flashdata které jsou určeny minimálně výstupním špičkovým výkonem, napětím naprázdno, proudem nakrátko, pracovním napětím, výkonem a popřípadě účinností. Flashtest simuluje v laboratorních podmínkách ideální světelné a tepelné podmínky a na přesných měřicích přístrojích porovnává skutečné naměřené hodnoty s těmi které udává výrobce.

Všechny změřené parametry mají přesnost definovanou výrobcem flashtesteru. Laboratoř ve které se flashtester používá musí uvést třídu zařízení. Výsledek charakteristiky se na přání podrobují analýzám, na základě kterých se určují vady. Zkouška flashtesterem v akreditované zkušebně je základní "kámen" pro uplatnění pozdější reklamace u výrobce solárních panelů. Někteří výrobci mají dokonce definované měřicí střediska pro případné měření pro uznání reklamace. Věškeré střediska testují panely za standardizovaných podmínek STC deklarované normami IEC.

Norma IEC:

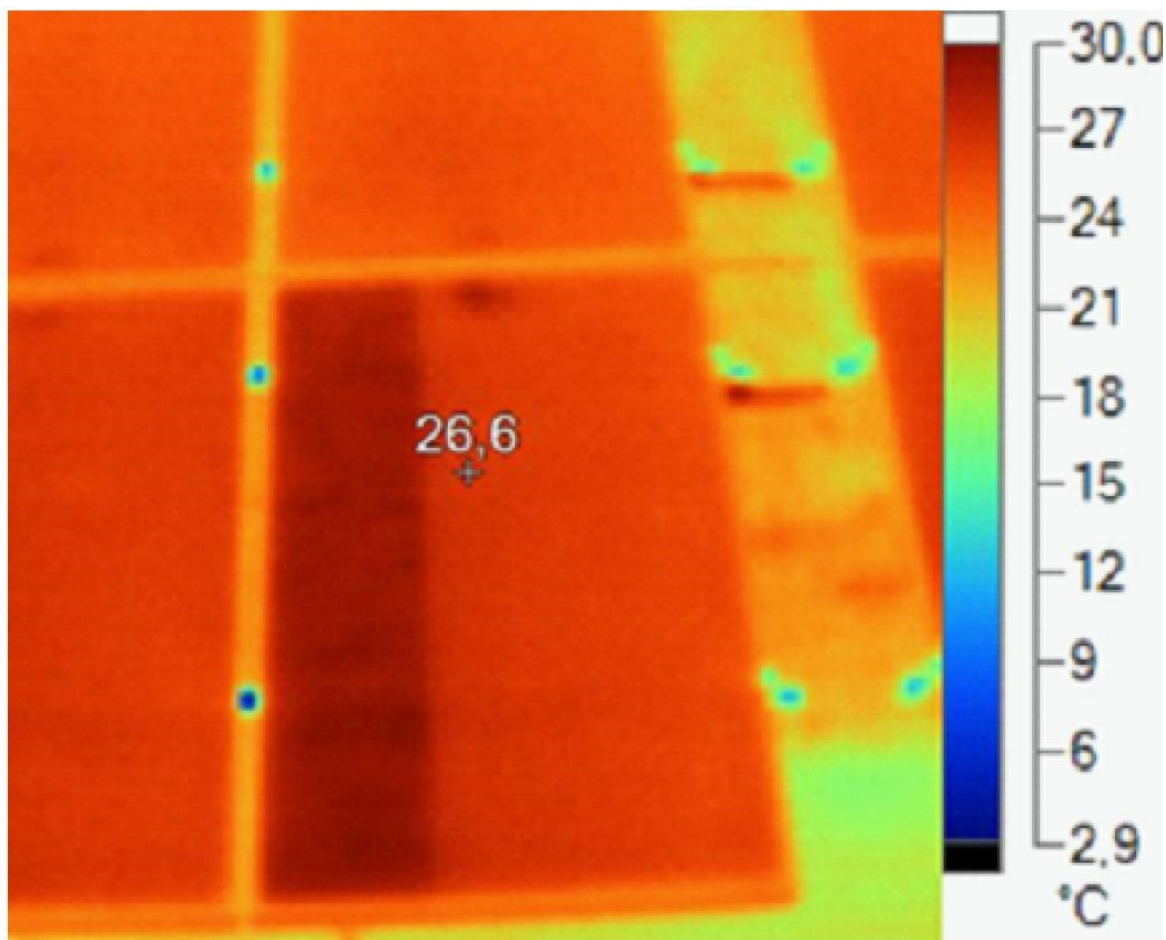
- Intenzita  $1000 \text{ W/m}^2$
- AM 1,5 (koeficient atmosferické masy)
- Teplota  $25 \text{ }^\circ\text{C}$

### 2.4.2. Termografie

Infračervená termografie je vědní obor, který se zabývá analýzou rozložení teplotního pole na povrchu tělesa a to bezkontaktním způsobem. Úkolem termografie je analýza infračervené energie vyzařované tělesem. Termografických měřicím systémem lze zobrazit teplotní pole měřeného objektu, ale pouze na jeho povrchu. [7]

Termokamera nebo také infračervená kamera umožňuje měřit teplotu povrchu fotovoltaických panelů. Výstupem kamery jsou snímky, které zobrazují ekvivalent teploty povrchu měřeného objektu do tzv. termografu. V podstatě, kamera převádí neviditelné infračervené záření do viditelného spektra vlnových délek. Každá barva definuje určitou teplotu. Termografie může odhalit problematická místa ve fotovoltaickém modulu jako jsou poruchy bypassových diod, praskliny vně článku, hot-spoty, poruchy kontaktních bodů a jiné. Tato metoda poskytuje jednoduše interpretované informace o fotovoltaickém modulu a zároveň může odhalit výskyt budoucích rizik. Měření termokamerou je neméně důležité pro správné selektování panelů postižených výkonovou degradací.

Fotovoltaické panely mají produkovat optimální a dlouhodobé energetické přínosy. Ztrátu výkonu je možné zjistit bezkontaktně a bez demontáže při plném provozu fotovoltaické elektrárny.

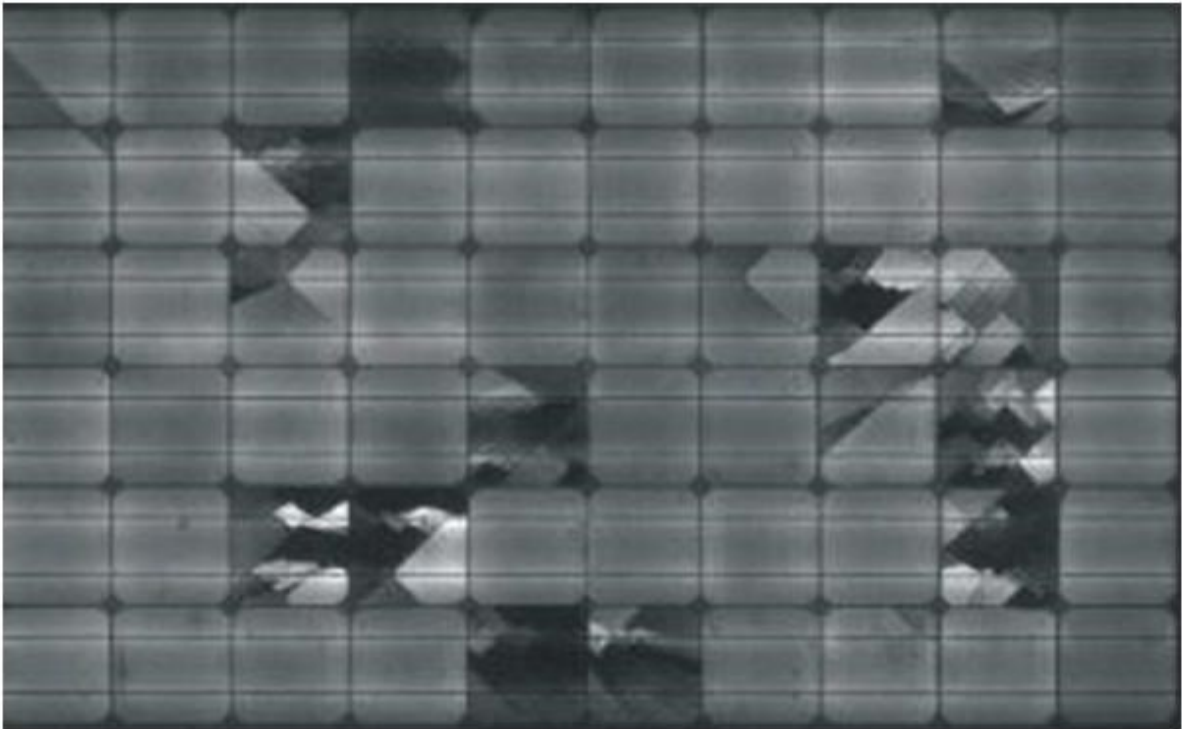


**Obr. 6.: Vady na fotovoltaické instalaci**

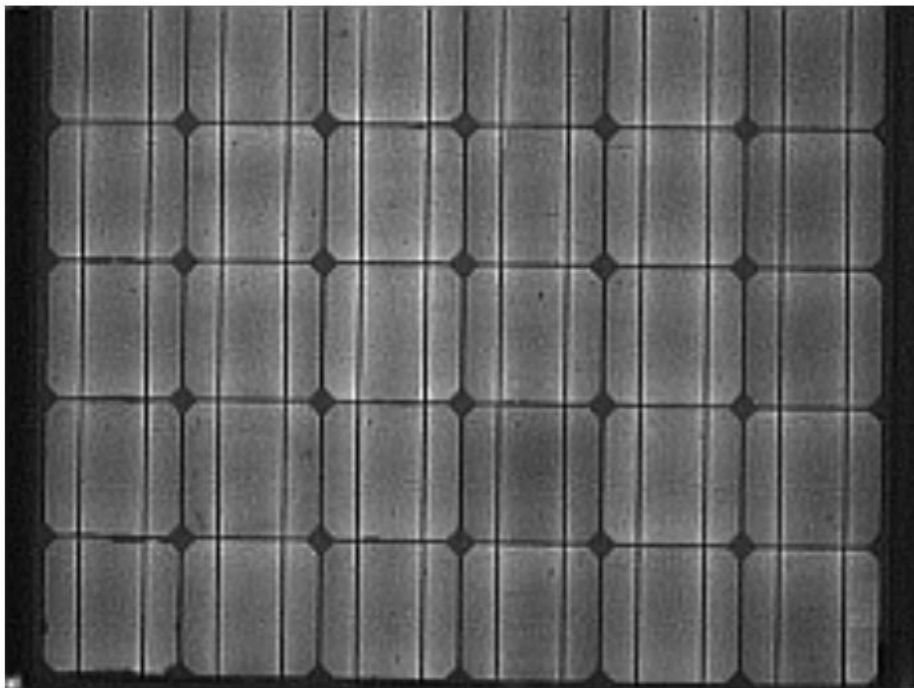
### 2.4.3 Elektroluminiscence

Elektroluminiscence je definovaná jako přímá přeměna elektrické energie na světlo při průchodu proudu. Je to v podstatě jev při kterém dochází k emisi světla ze substrátu FV článku. Tento jev vzniká tehdy, necháme-li FV článkem nebo modulem protékat elektrický proud o určité minimální velikosti. Vlnová délka emitovaného světelného záření závisí na materiálu, ze kterého jsou vyrobeny FV články. [13] U nás nejrozšířenější, křemík je to okolo 1100 nm. Toto záření je už mimo viditelné spektrum a musí být zaznamenáváno speciálně upravenou CCD kamerou. Pomocí této metody se dají detekovat vady uvnitř FV článků, které jinak nemusí být vidět. Výsledkem této zkoušky jsou obrazy FV článků nebo modulů ve stupních šedi, kde, zjednodušeně řečeno, tmavší místa znamenají horší konverzní účinnost případně menší proudovou hustotu v daném místě. Oboje značí vadu.

Tento test umožňuje detekci respektive zviditelnění materiálových a výrobních vad solárního článku. [7] S pomocí elektroluminiscence lze vyhodnotit jak kvalitu výrobního procesu článků, tak i případné defekty vzniklé manipulací s celými moduly. Především mikroprasklinky v materialu které nejsou viditelné pouhým okem ani termografií, které mají zásadní vliv na dlouhodobou výkonovou stabilitu fotovoltaických panelů. Dokáže odhalit skryté vady nezjistitelné jinými metodami.



**Obr. 7.: Vadné buňky fotovoltaického panelu, elektroluminiscence.**



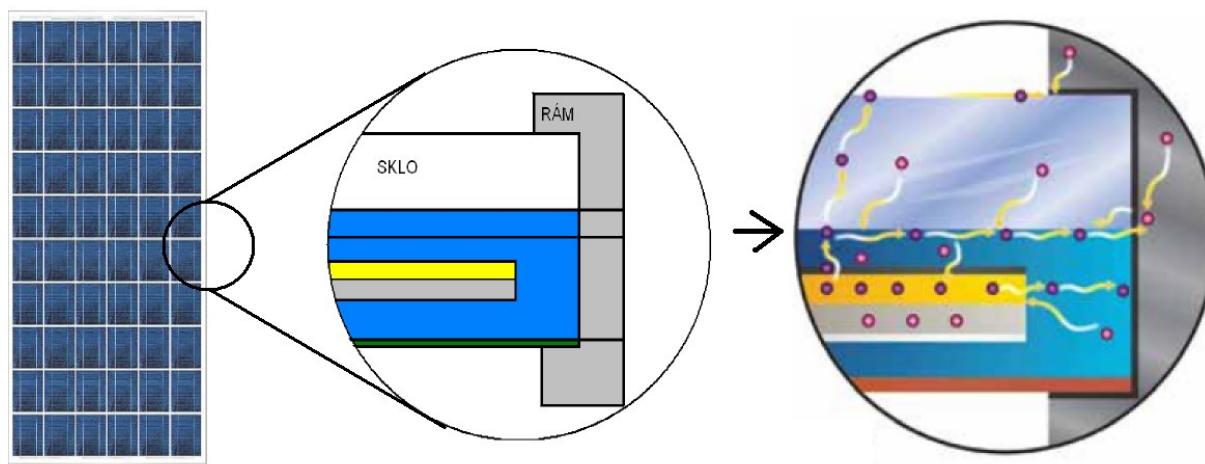
**Obr.8.: Buňky fotovoltaického panelu bez vad**

### 3 Vzniku degradace vlivem potenciálu

Účinek potenciální indukované degradace je problematický jak pro krystalickou technologii výroby tak pro tenkovrstvou technologii vrstev. To způsobuje vystavení celého systému modulu potenciálu a svodovému proudu kdy se umocní pohyblivost iontů v modulu mezi polovodičovým materiálem a dalšími prvky solárního modulu, jako je sklo nebo rám. Existují dva typy degradace výkonu :

- Reverzibilní (polarizací)
- Inverzibilní- TCO (elektro korozi)

Fotovoltaické panely mají záporný potenciál, tzn, vysoké záporné napětí mezi buňkami modulů a rámem, který je obvykle uzemněn z bezpečnostních důvodů. Toto elektrické napětí přitahuje elektrony z materialu použitých FV článků a propouští je přes uzemnění rámu, což má za následek male množství unikajícího proudu. Tento neočekávaný pohyb nosičů, ruší fotovoltaický efekt.



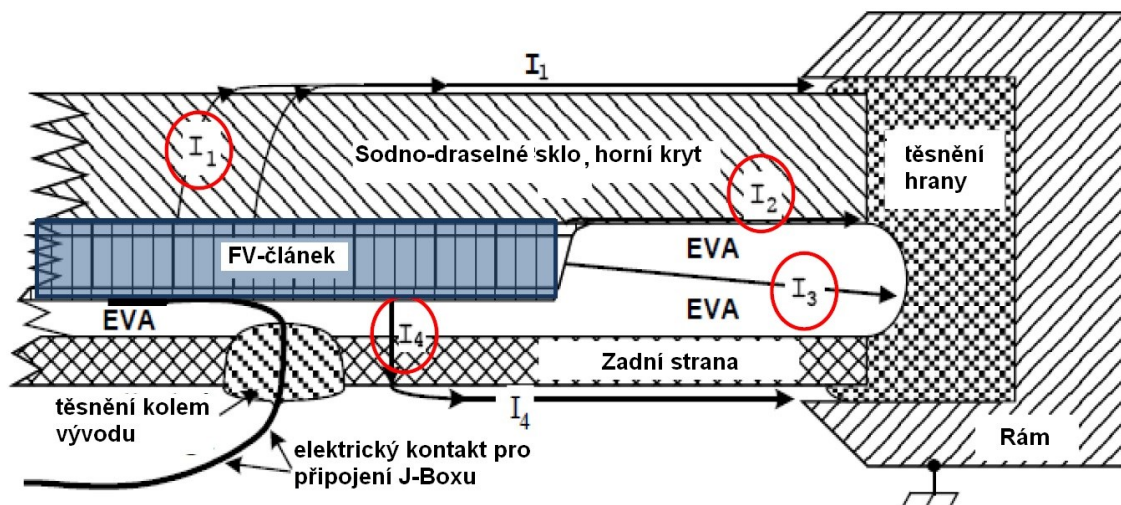
**Obr. 9 Unikající potenciál proud a napětí ( zobrazen záporný náboj)**

Tento jev může být urychlen vysokým napětím systému, vysokou teplotou a vlhkostí. PID může potenciálně ovlivnit výkon jednotlivých panelů stejně jako celého FV zařízení. [9]

### 3.1 Faktory ovlivňující potenciál na úrovni fotovoltaického panelu

Volba skla, zapouzdření je důležitá pro výsledné vytvoření difuzní bariéry pro zamezení vzniku svodového potenciálu. Bylo prokázáno, že tyto faktory mají zásadní vliv. Podle studií materiálu pro výrobu skla, látky obsažené v sodno-draselném sklu kladně podporují vznik svodového potenciálu. Látky obsažené v křemenném sklu mimo jiné v malém množství sodík, hliník, hořčík a vápník jsou součtu v menší koncentraci než procento sodíku v sodno-draselném sklu, právě sodík je díky tomuto jevu hlavní podezřelý ze vzniku PID.

Neméně významnou roli ve vlivech na svodový potenciál je octová kyselina vznikající z EVA (Ethyl vinnyl acetátu) vytvářející se z vlhkostí chemickou reakcí, tato kyselina může být zodpovědná za rozpouštění kovových iontů na skle neboli „korozi skla“. Po tomto jevu vznikají úniky proudů v jednotlivých panelech. [10]



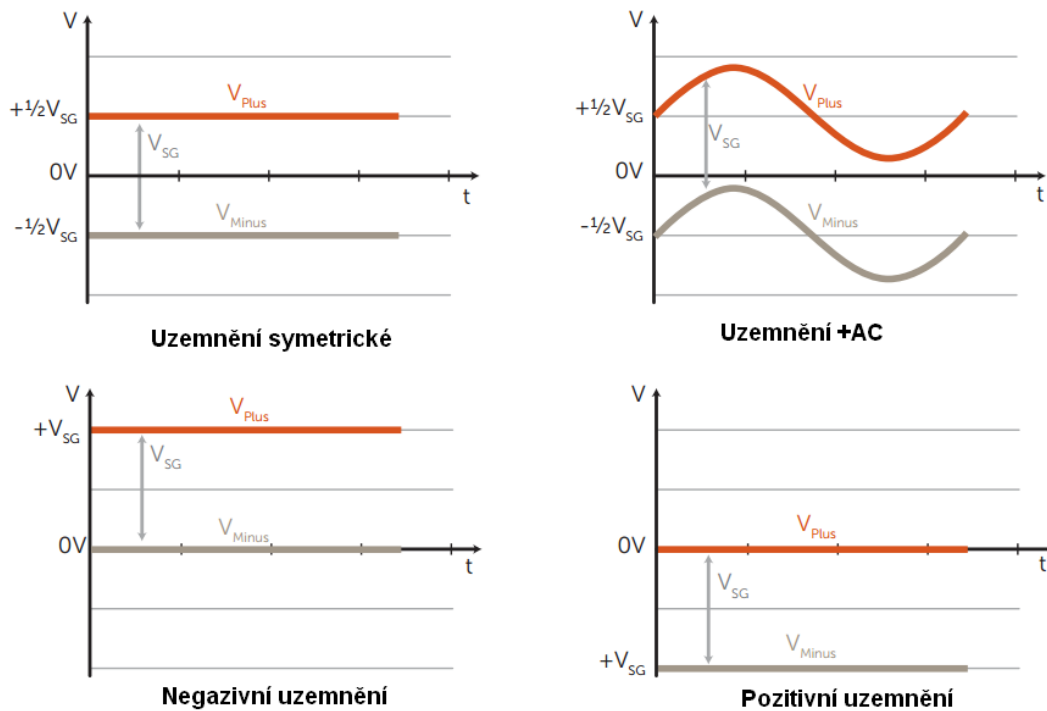
Obr. 10.: Řez fotovoltaickým modulem, úniky proudu skrze technologii[11]

Další testy ukazují na vzorky laminované polyvinyl - butyral (PVB) folií což je v dnešní době evropský standart pro fotovoltaické panely veškerých výrobců , tyto vzorky vykazují na svodový potenciál nejvyšší citlivost. Vlhkost zvyšuje vodivost panelů vůči okolí a ta přímo ovlivňuje vznik a následky potenciálu. Silikony v kombinaci s lepidly mají vynikající vlastnosti vůči svodovému proudu, který se tvoří následkem výše zmíněných pochodů.

Řešení a prevence problému s potenciální indukovanou degradací je v podstatě použití oxidu křemičitého jako difuzní bariéry mezi sklem a elektricky aktivní částí polovodičové destičky. Toto opatření bohužel značně prodraží výrobu celého fotovoltaického panelu. Toto technologické opatření začala u svých panelů využívat společnost Luxor GmbH Germany která začlenila difuzní bariéru mezi sklo a el. aktivní část panelu tj. Fv články. [11]

### 3.2 Faktory ovlivňující potenciál na úrovni fotovoltaického systému

Problémy vznikající na systémové úrovni jsou jedny z nejvýznamněji ovlivňující topologii FV systému. Napěťový potenciál který vzniká v podstatě v celé oblasti FV systému závisí jak na samotném solárním modulu ale také na postavení a uzemňovací topologii a klasifikaci měniče napětí. Napěťový potenciál systému je základní podmínkou vzniku PID.

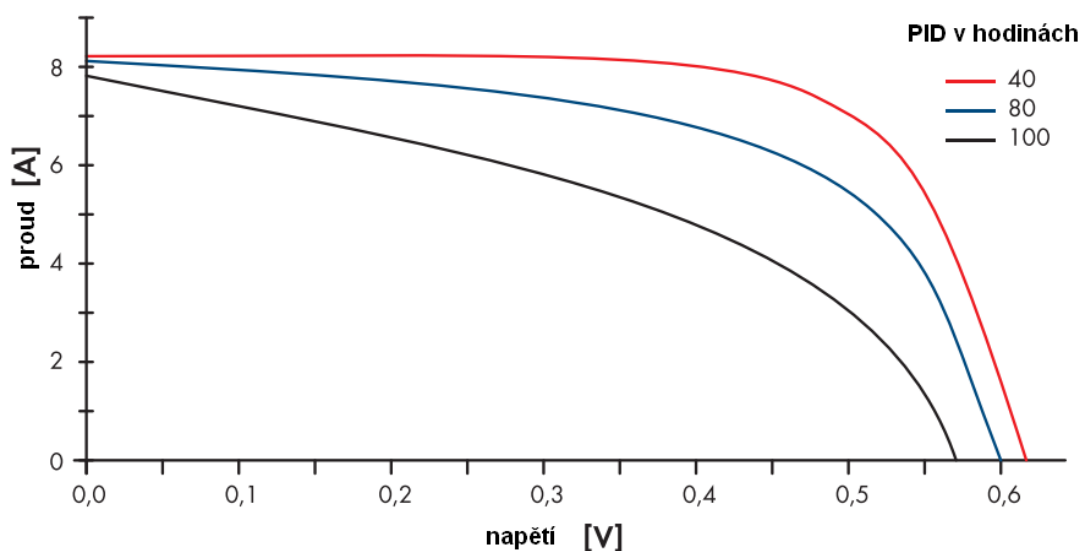


Obr. 11.: Napěťový potenciál, čtyři klasifikace [5]

Obrázek 11 ukazuje, že pole napětí se může lišit v závislosti na topologii uzemnění. Pojem PID je nejčastěji spojován se záporným napěťovým potenciálem, i když problémy vyplývají z pozitivního odkazu vůči zemi.

### 3.3 Důsledky PID

Na obrázku níže můžeme vidět V-A charakteristiku klasického fotovoltaického modulu. Vliv PID se projeví na snížení paralelního odporu  $R_{SH}$  který má přímý dopad na ztrátu garantovaného výkonu modulu tedy bodu MPP a jeho napětí naprázdno  $V_{oc}$ . [8]



Obr.12.:V-A charakteristika fotovoltaického článku, působení PID v čase[12]

Ztráta výkonu, je následkem svodového potenciálu. Měření panelů je velice nákladná záležitost která musí být podložena velkým množstvím technologií. Nejjednodušší a nejlevnější způsob jak odhalit degradaci je použití obyčejného voltmetru a měřit úroveň modulu Voc. Zatímco tvar diodové křivky nelze odvodit, degradace může být odhalena právě vynesáním Voc do grafu a porovnáváním jednotlivých napětí na panelech. Tato metoda je nejjednodušší.

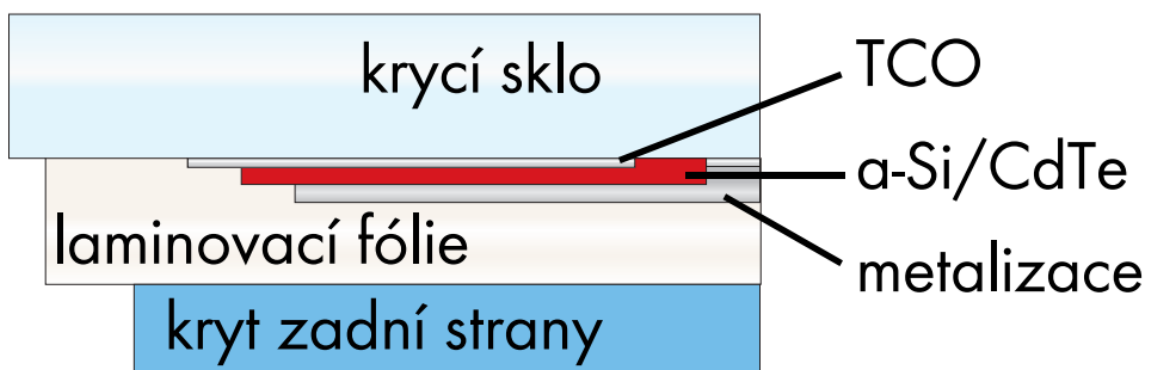
Důsledky potenciální degradace můžou být vratné a nevratné v závislosti na příčině která je způsobuje. Nevratné účinky jsou mnohem závažnější a obvykle jsou spojeny z elektrochemickou reakcí která vede k elektro-korozi tzv. (TCO korze) a nebo delaminaci folie v modulech[12]. Tyto charakteristické problémy byly dokumentovány především v tenkovrstvých modulech. Reverzibilní forma PID také známá jako polarizační efekt byl objeven v roce 2005[10]. Tato polarizace způsobuje na povrchu nahromadění statického náboje které následně způsobuje svodový proud. Polarizační efekt je od té doby spojován výhradně z křemíkovými moduly.

V důsledku zkoumání degradačního efektu na FV systémy se došlo na specifické účinky které vznikají u c-Si modulů. Model je založen na skutečnosti, že „mobilní“ ionty sodíku se mnou šířit z předního sklad do povrchu jednotlivých buněk v důsledku síly vyvolané napětím.[6] Rychlost pozitivně nabitých iontů jsou ovlivněny především zapouzdřením materiálu, teplotou a vlhkostí pod napětím.

Konkrétní mechanismy které toto způsobují nejsou tak dobře známy. Na jedné straně jsou nabití ionty na povrchu vrstvy. Na straně druhé se může sodík šířit do atomu a působit jako jeho dárce, to vede k rostoucí koncentraci sodíkových iontů v emitoru, takže negativní doping tohoto tranzistoru je neutralizován tzn. účinky PN přechodu, následně degraduje účinnost celé buňky. [6]

### 3.3.1 TCO Koroze

I po poměrně krátké době provozu FV panelu dokáže vzniknou poškození takzvaným TCO (transparent Conductive oxid). Vodivý oxid naleptává FV destičky, poškozena je vodivá vrstva na vnitřní straně krycího skla, kterou nelze opravit a má za následek značnou ztrátu výkonu. V institutu Florida Solar Energy Center (FSEC) zkoumali příčinu koroze od roku 2000. [12] Studie dokazuje, že moduly složené z článku křemíku Si a CdTe jsou ovlivněny nejvíce. V klasickém výrobním procesu jsou vrstvy uspořádány počínaje krycím sklem až po ochranou folii. TCO koroze vzniká především na okraji FV modulu v důsledku reakce na vlhkost, která je obsažena v krycím skle. V důsledku tohoto vzniká mléčná vrstva a postupné ztrácení elektrických vlastností se snižuje výkon FV panelu.

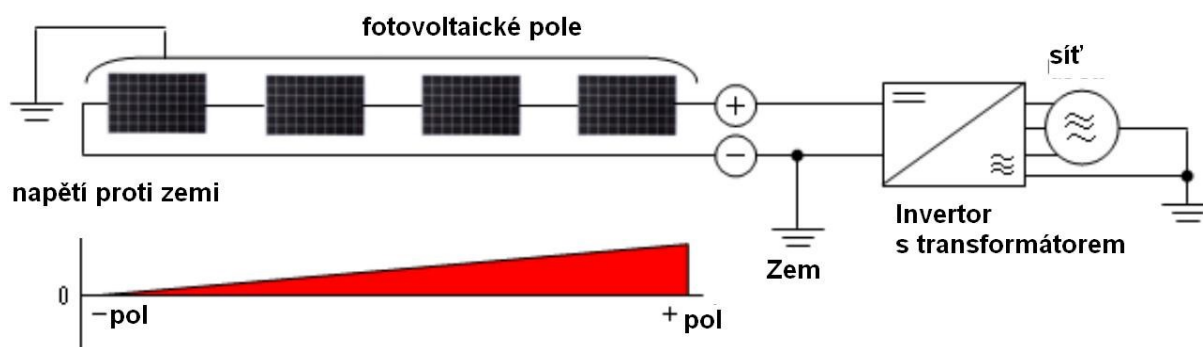


Obr. 13.: Superstrátová struktura [12]

### 3.4. Reverzibilizace degradace na úrovni topologie systému

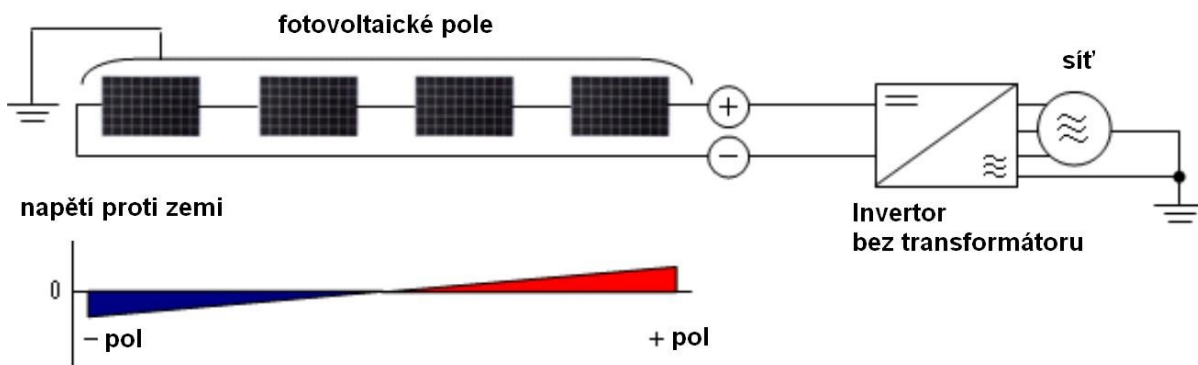
Nápravné opatření proti degradaci provádějí sami výrobci modulů jako i Luxor GmbH např. ochranou vrstvou. Další snaha má vyplynout z izolování rezistivní části od vodivé části použitím speciálních materiálů na utěsnění. Někdy jsou však tato protipatření nedostatečná proto aby se zabránilo PID s vysokým stupněm jistoty. Protože solární články nemají negativní napětí v porovnání s celou topologií systému.

Proto se tento problém řeší z hlediska celé topologie systému. Ve skutečnosti může uzemnění záporného polu invertoru definitivně vyřešit problematiku PID. V instalacích kde je nutnost použití měniče s galvanickým oddělením tj. integrovaný transformátor to zahrnuje centrální invertory a také invertory používané ve spojení s tenkovrstvými moduly je snadné uzemnit záporný pol.



**Obr. 14.: Fotovoltaický systém využívající invertor s galvanickým oddělením od země (integrovaný transformátor)**

U beztransformátorového měniče neexistuje žádný způsob jak jak zajistit nápravné řešení pro oblast panelů postihnutou problémem degradace, protože se vztahuje na záporné napětí fotovoltického invertoru. U beztransformátorových měničů určuje „design“ výrobce jak se rozdělí napětí k potenciálu země. Nicméně moduly v řetězovém zapojení s vyšším záporným napětím tj. nejbližší k negativnímu polu jsou ovlivněny nejvíce.



**Obr.15.: Fotovoltaický systém s invertorem bez integrovaného transformátoru**

### **3.5 Bezpečnostní předpisy pro připojení fotovoltaických elektráren.**

Kvůli striktním bezpečnostním předpisům pro připojování zdrojů elektrické energie do rozvodné sítě se nesmí záporný pol fotovoltaického pole v instalacích s invertorem bez transformátoru přímo připojovat na zem. Invertor jako takový by s tomto zapojení ihned zem detekoval a zastaví výrobu respective distribuci proudu, protože beztransformátorový měnič není izolovaný mezi DC a AC stranou. Z toho důvodu by okamžitě došlo ke zkratu mezi rozvodnou sítí a fotovoltaickým polem.

Jiná situace nastává při přeptutí těchto inverterů bez transformátoru do takzvaného ostrovního režimu, kdy je inverter nezávislý na připojené distribuční síti. Zde nelze ovšem po výpadku distribuční sítě zaručit bezpečnost například pracujícího technika, jelikož elektrárna jako taková stále generuje proud. Proto se na tento režim nevstahují záruky výrobců.

## 4 Experimentální práce

Ve spolupráci společnosti Krannich solar GmbH a Německého akreditovaného střediska DAR (Deutscher Akreditierungs Rat) byla provedena nezávislá zkouška solárních panelů Luxor. Podnět pro proměření panelů, bylo ověření pravdivosti odolnosti fotovoltaických panelů Luxor proti degradaci vytvořené svodovým potenciálem. Testy se skládaly z několika částí kdy každá měla odhalit odolnost solárních panelů Luxor proti degradačním vlivům.

Další testovací série byla provedena v Březnu roku 2014 kdy ve stejném akreditovaném středisku DAR byly opět testovány fotovoltaické panely od výrobce Luxor ale z řady monokrystalických panelů. Test se opět skládal z několika částí přičemž výrobce doposud neprozradil jakou technologii použil pro potlačení jevu PID na monokrystalické struktuře.

### 4.1 Hlavní informace o testovaných objektech

Tab.1.: Dostupné informace o testované fotovoltaické modulu

Sériové číslo	Výrobce	Typ	Materiál	Počet článků v panelu	Velikost modulu(m <sup>2</sup> )
1211261939	Luxor	240P156-60 plus	Poly-c-Si	60	1.6
140887	Luxor	LX-250M/156-60	Mono-c-Si	60	1.62



Obr.16.:Fotovoltaický modul, typ LX-240P/156-60 plus



Obr.17.: Fotovoltaický modul, typ LX-250M/156-60

## 4.2 Popis testu

Následující testovací sekvence byly použity v testu potencionální indukované degradace:

- Měření A-V charakteristiky v souladu s IEC60904-1 před degradačním testem
- Počáteční elektroluminiscenční analýza podle PI standardu
- Uzemnění modulu jak je popsáno v návodu výrobce (skrže rám)
- Teplota 85 °C
- Relativní vlhkost 85 %
- Napětí přivedené mezi buňky a rám koresponduje s maximálním systemovým napětím (podle labelu panelu)
- Perioda testování je 48 hodin
- Závěrečné měření A-V charakteristiky v souladu s IEC60904-1, do čtyř hodin po ukončení testu
- Finální elektroluminiscenční analýza

Pro posouzení testovaných fotovoltaických modulů byly specifikovány tři kategorie, A, B a C. Třída A klasifikuje modul s výkonovou degradací do 5%. B mezi 5 a 30% a C všechny moduly výkonovou degradací vyšší než 30%.

#### 4.2.1 Stanovení A-V charakteristiky při standartních testovacích podmínkách

Volt amperová charakteristika fotovoltaického modulu byla stanovena za zkušebních podmínek standardně (STC) v souladu s normou IEC 60904-3. Pro měření byl použit solární přístroj PASSAN typu a třídy SS3b. Kalibrace solárního simulátoru byla provedena se stabilizovanou buňkou s formátem WPVS ( World Photovoltaic Standart). Kalibrační buňky je navázáno na kalibraci z ISE Freiburg provedenou 2013/04/23, označení kalibrace 100446PIB-DKD-K-47101. Spektrum simulátoru je vždy ověřeno vnitřním spektrometrem kalibrovaným podle PTB. Chyba měřicího přístroje odkazuje na maximální výkon tj.  $\leq \pm 3\%$ . Nesoulad s měřenou hodnotou neboli hodnota korekce pro multi-c-Si moduly a solární simulátor je maximálně 1.007.

Teplotní koeficienty testovaných fotovoltaických modulů :

- Tcoeff (Voc)-poly: -0,326 %/K
- Tcoeff (Isc)-poly: 0,052 %/K
- Tcoeff (Voc)-mono: -0,334 %/K
- Tcoeff (Isc)-mono: 0,038 %/K

#### 4.3 Výsledky testování

Tab.2.: Výsledky měření

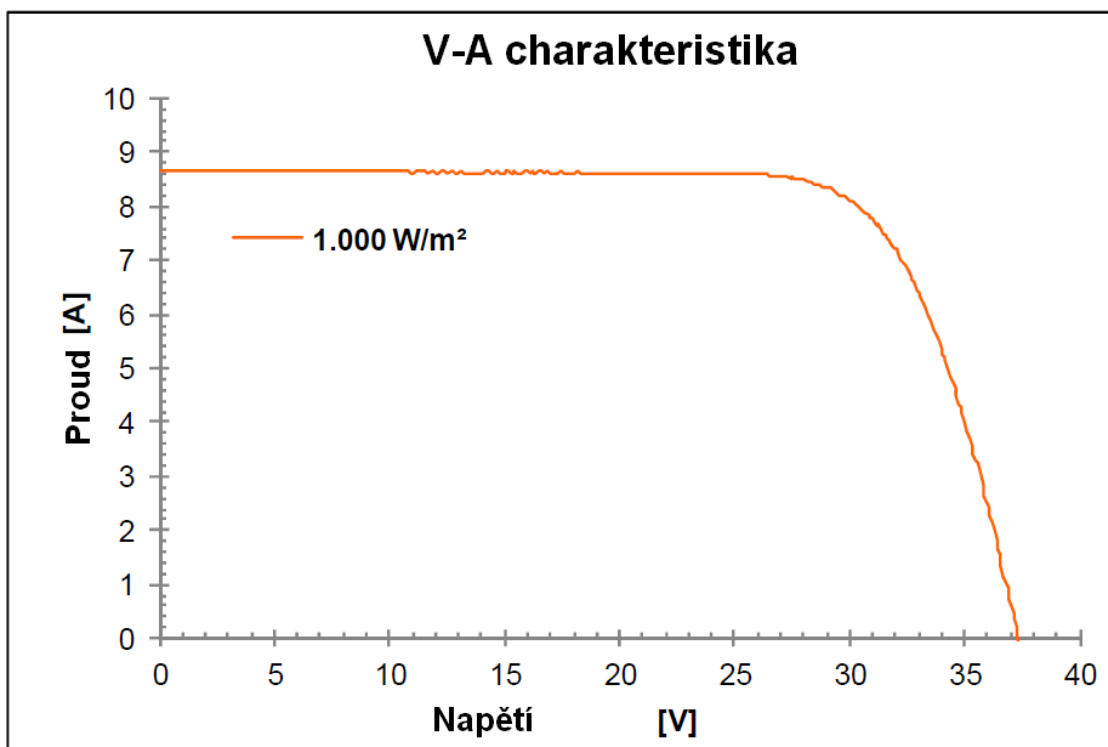
Seriové číslo	Stav	Pmpp[W]	Vmpp[V]	Impp[A]	Voc[V]	Isc[A]	FF[%]	Počáteční odchylka výpočtu [%]
1211262939	počáteční	244.0	293.73	8.205	37.27	8.660	75.58	1.7
	po PID	236.5	29.82	7.931	37.15	8.657	73.54	-3.1
140887	počáteční	252.1	30.60	8.239	38.01	8.848	74.95	0.8
	po PID	249.9	30.78	8.118	38.04	8.749	75.08	-0.9

### 4.3.1 Detailní výsledky A-V charakteristik a ATC elektroluminiscenčních analýz polykrystalický a monokrystalický modul

Pro polykrystalický modul bylo měření provedeno s osvitem 1000W/m<sup>2</sup> a dobou záblesku 8ms (1-flash) , výsledky jsou korigovány na 25 °C.

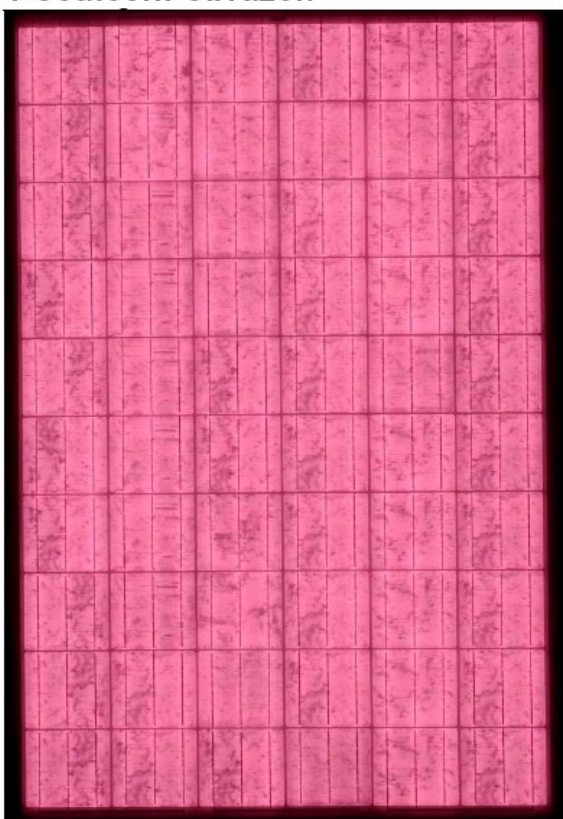
**Tab.3.: Výsledky V-A analýz před a po měření PID**

	Label data				
<b>Výrobce:</b>	<b>Luxor</b>				
<b>Sériové číslo:</b>	<b>1211262939</b>				
Typ modulu:	LX-240P/156-60	Výsledky testu		Odchylka od labelu[%]	
		Před PID	Po PID		
<b>Pmpp [W]</b>	240	244,0	236,5	1,7	-3,1
<b>Vmpp [V]</b>	30,4	29,73	29,82	-2,2	0,3
<b>Impp [A]</b>	7,96	8,205	7,931	3,1	-3,3
<b>Voc [V]</b>	37,76	37,27	37,15	-1,3	-0,3
<b>Isc [A]</b>	8,49	8,660	8,657	2,0	0,0
<b>FF [%]</b>	75,48	75,58	73,54	0,1	-2,7

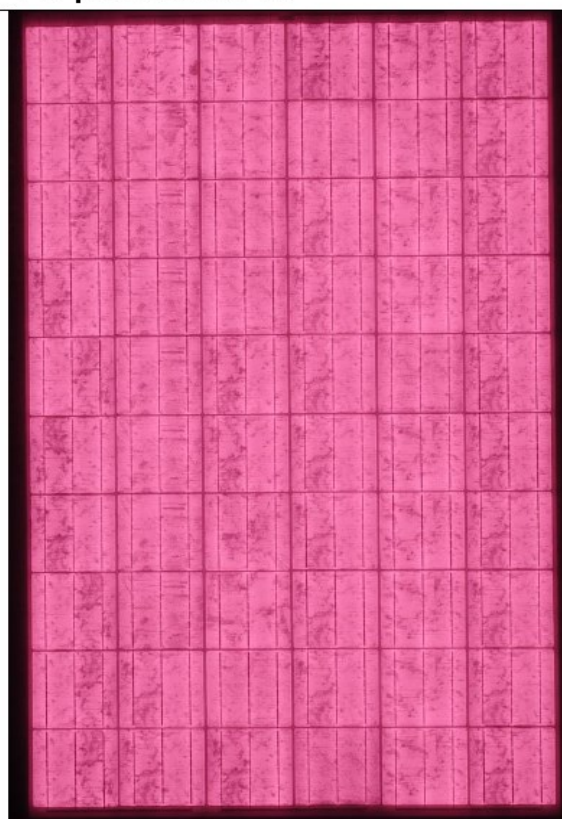


Obr.18.: V-A charakteristika modulu č. 1211262939"

Počáteční obrázek



Po působení PID

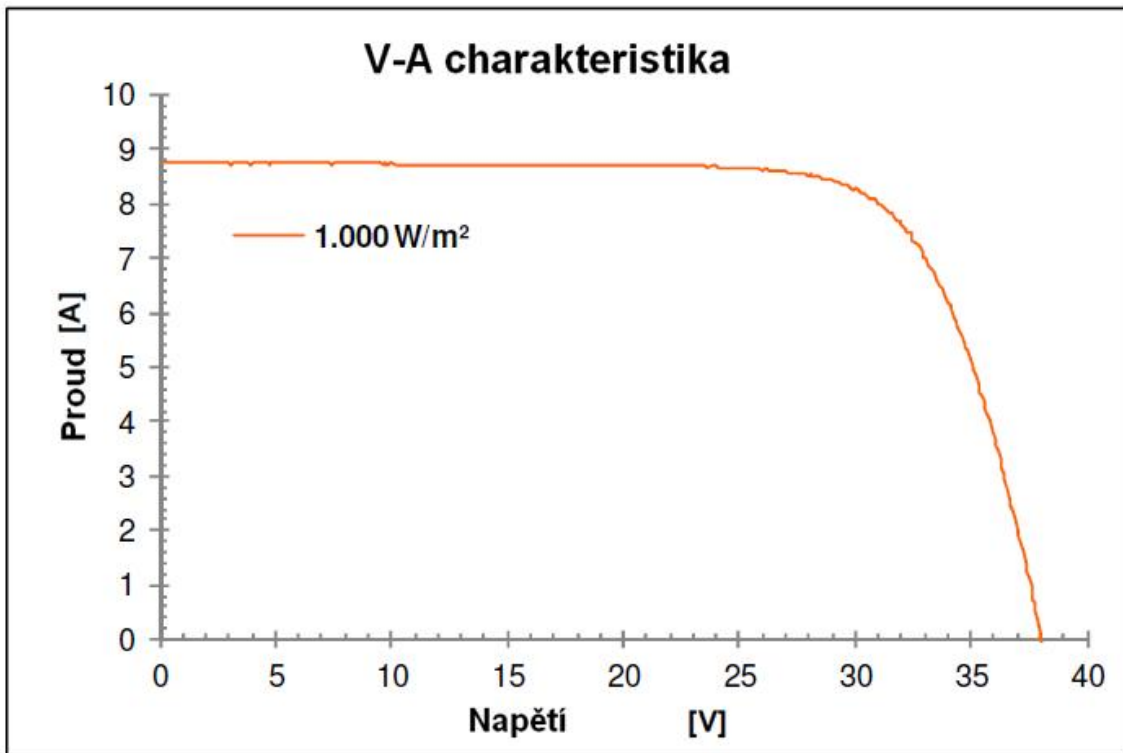


Obr.19.: Elektroluminiscenční analýza před a po PID (Doba měření 48h)  
SN: 1211262939

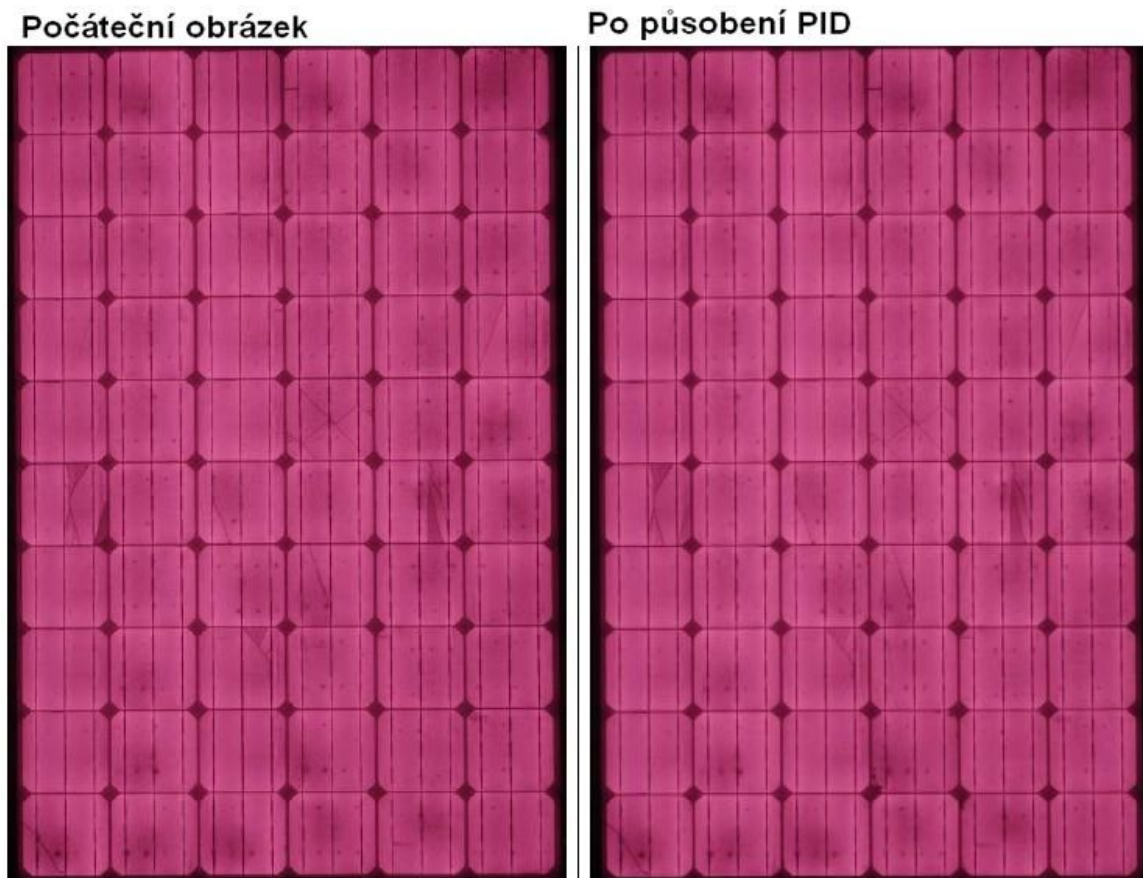
Pro Monokrystalický modul bylo měření provedeno s osvitem  $1000\text{W}/\text{m}^2$  a dobou záblesku 8ms (1-flash) , výsledky jsou korigovány na  $25\text{ }^\circ\text{C}$ .

**Tab.4.: Výsledky V-A analýzy po před a po měření PID Monokrystal**

	Label data				
<b>Výrobce:</b>	<b>Luxor</b>				
<b>Sériové číslo:</b>	<b>140887</b>				
<b>Typ modulu:</b>	LX-250M/156-60	<b>Výsledky testu</b>		<b>Odchylka od labelu[%]</b>	
		<b>Před PID</b>	<b>Po PID</b>		
<b>Pmpp [W]</b>	250	252.1	249.9	0.8	-0.9
<b>Vmpp [V]</b>	30,74	30.60	30.78	-0.5	0.6
<b>Impp [A]</b>	8.15	8.239	8.118	1.1	-1.5
<b>Voc [V]</b>	37.41	38.01	38.04	1.6	0.1
<b>Isc [A]</b>	8.61	8.848	8.749	2.8	-1.1
<b>FF [%]</b>	77.78	74.95	75.08	-3.6	0.2



Obr.20.: A-V charakteristika po PID měření, modul číslo 140887



Obr.21.: Elektroluminiscenční analýza před a po PID (Doba měření 48h)  
SN: 140887

Elektroluminiscenční analýza odhalila nepatrné změny ve struktuře panelu, které ovšem nemají na výkonnost systému zásadní vliv. Tato analýza je pro odhalování skrytých vad a následků cyklických zkoušek pro odhalení vlivu svodového potenciálu jedna z nejvhodnějších.

#### 4.4 Reverzibilní experiment

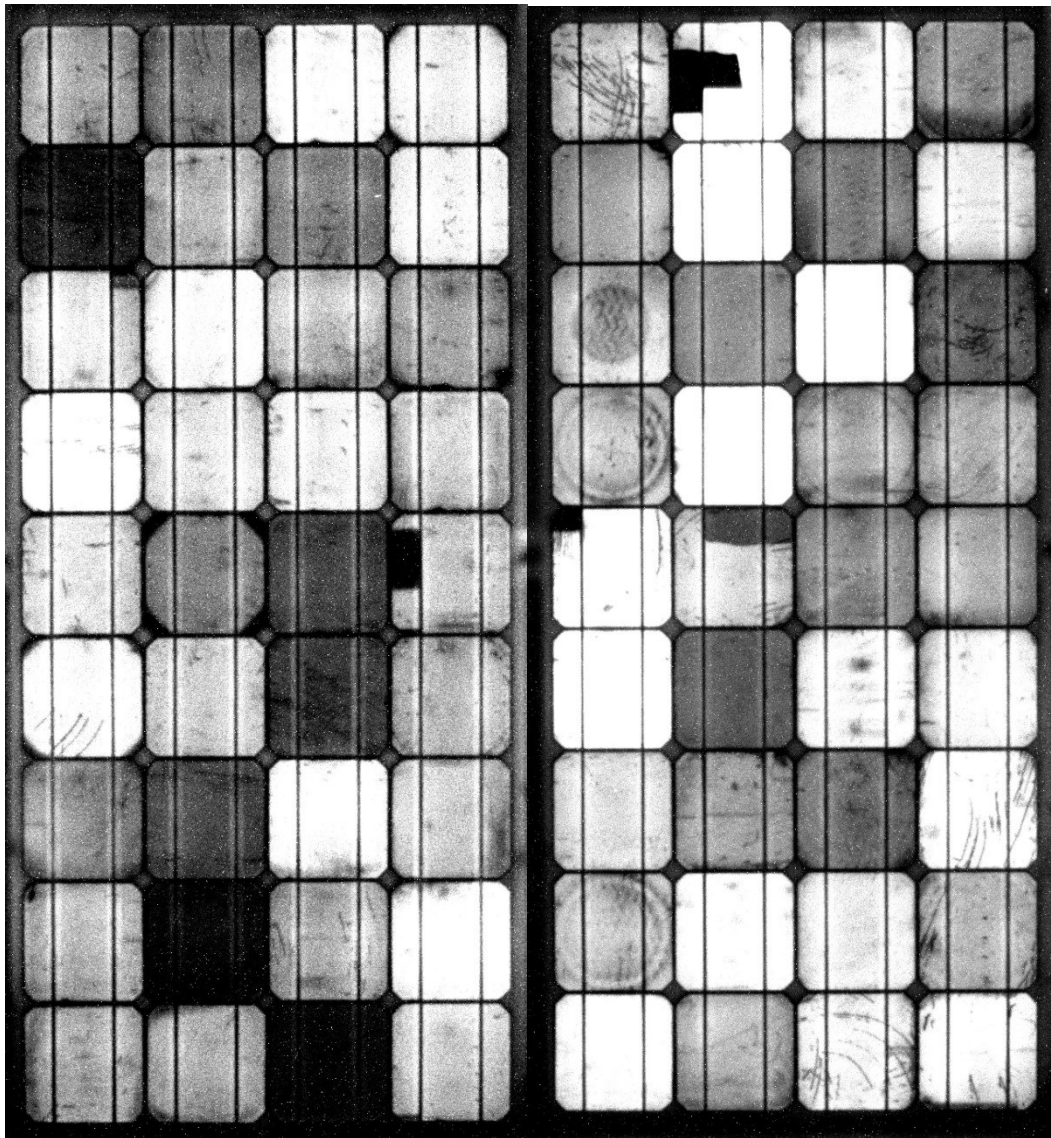
Potenciální indukovaná degradace je jev popisující snížení výkonu fotovoltaických modulů vlivem potenciálového napětí mezi aktivní částí a hliníkovým rámem. Tento jev se je velice nákladný na simulaci dokazování a měření. V principu lze vzít jakékoli nově vyrobené krystalické moduly a zatížit je nákladným trápením v kryogenní komoře kde se ve střídavých režimech simulují nejhorší teplotní a napěťové podmínky jaké lze na fotovoltaické elektrárně očekávat v průběhu let. Tyto simulace nabídnou fotovoltaickému panelu možnost průchodu proudu skrze rám vlivem elektrického pole, což přímo navazuje na výkonovou degradaci fotovoltaického panelu. Takto zatížený panel začne po simulování podmínek degradovat jednotlivé buňky v řádech desítek hodin.

Tímto simulováním podmínek lze v reálném čase nasimulovat degradaci u nových fotovoltaických panelů, které jsou následně nachystány na možnost prozkoušení reverzibility tohoto jevu. Proběhl experiment který měl zvrátit účinky první fáze PID efektu u panelů které byly pro tento test vyčleněny ze španělské pobočky Krannich solar s.r.o. kde legislativa dovoluje ponížít technologii stávající elektrárny bez jakýchkoli dopadů na stávající smlouvu. Pro měření by vyčleněn model panelů od výrobce Atersa A-130, které byly postihnuté tímto jevem a nainstalové v šestém měsíci roku 2000. Z datasheetu od výrobce je vidět, že fotovoltaické moduly měly 130 Wp.

**Tab.5.: Katalogové hodnoty Modelu Atersa A-130**

<b>STC Power Rating <math>P_{mp}</math> (W)</b>	130
<b>Open Circuit Voltage <math>V_{oc}</math> (V)</b>	21.3
<b>Short Circuit Current <math>I_{sc}</math> (A)</b>	8.10
<b>Voltage at Maximim Power <math>V_{mp}</math> (V)</b>	17.2
<b>Current at Maximim Power <math>I_{mp}</math> (A)</b>	7.54
<b>Panel Efficiency</b>	13.3%
<b>Fill Factor</b>	75.3%
<b>Power Tolerance</b>	
<b>Maximum System Voltage <math>V_{max}</math> (V)</b>	600
<b>Maximum Series Fuse Rating (A)</b>	(---)

Tyto moduly byly proměřeny před samotným zvrácením PID efektu pomocí elektroluminiscence a V-A charakteristiky. Za dobu 14ti let provozu fotovoltaický panel degradoval materiálově a byl zastižen degradací vlivem potenciálu jakožto i celá elektrárna k které tyto panely pocházejí. Pro naměření aktuální A-V charakteristiky byl použit třídy Passan umístěný ve zkušebně fotovoltaických panelů na VUT Brno pod vedením Ing. Martina Šturma. Výsledky elektroluminiscence a A-V charakteristiky před zahájením reversibility u testovaných panelů. Byly testovány 2ks panelů Atersa A 130, S/N: 000010344, 000010319.



**Obr.22.: Elektroluminiscenční analýza před zkouškou reverzibility panelů Atersa**

Na elektroluminiscenci lze jasně vidět, že tyto panely mají některé články zcela nefunkční. V průběhu let docházelo k mikroprasklínkám které postupně znefunkčily celé články. Ze spodní strany panely nevykazovaly žádné poškození. EVA folie byla i přesto, že byla umístěna v agresivním prostředí v přímořské oblasti bez poškození.

Nastavení analyzátoru pro elektroluminiscenci:

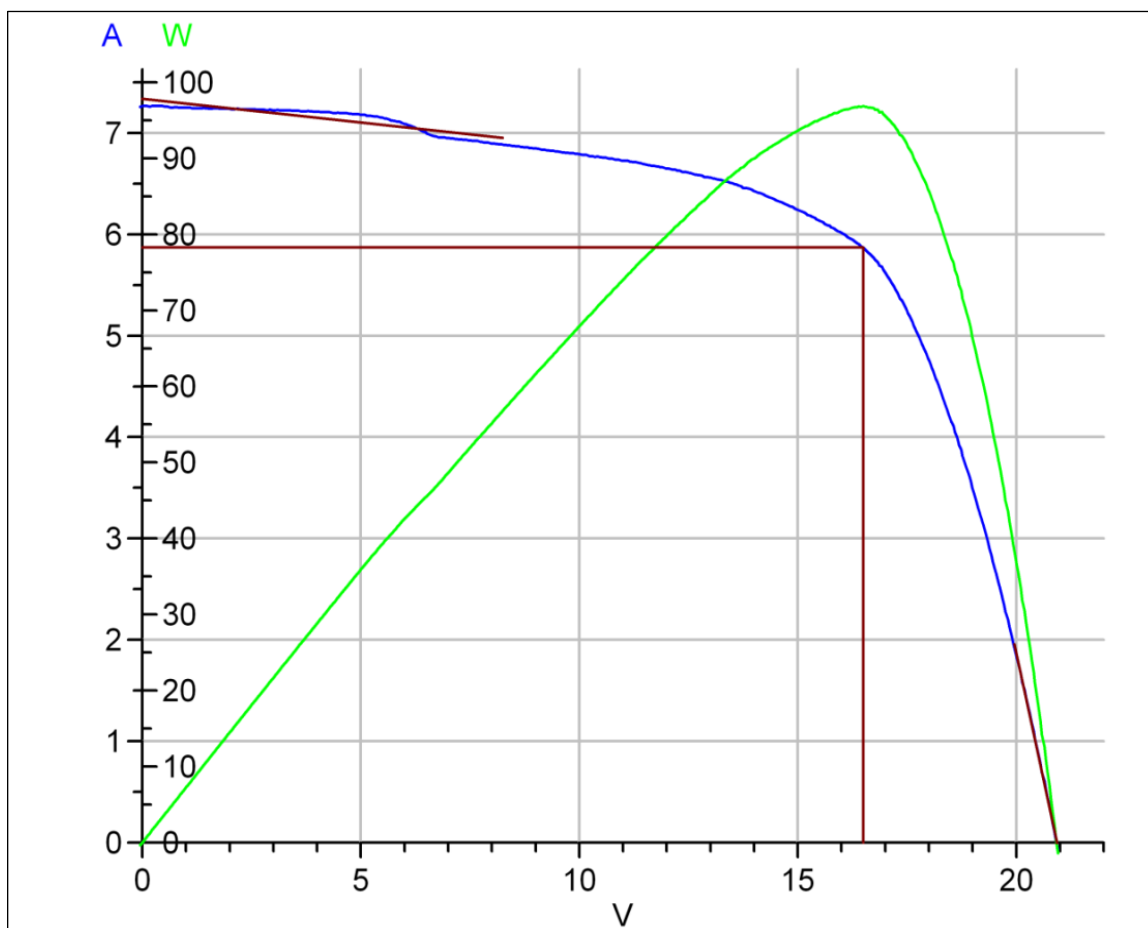
- (panel č. 000010344) U: 19,6V I: 1,51A Histogram - Low: 524 High: 898
- (panel č. 000010319) U: 20,3V I: 1,74A Histogram - Low: 529 High: 777

**Tab.6.: Podmínky pro měření A-V charakteristik**

<b>Teplota okolí <math>T_a</math>:</b>	24.4	°C
<b>Ozářenost G</b>	1.0	kW/m <sup>2</sup>
<b>Přepočtový koeficient <math>Tk_U</math></b>	-1.893	mV/K (mV/°C)
<b>Přepočtový koeficient <math>Tk_I</math></b>	13.486	$\mu\text{A}/\text{cm}^2/\text{K}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2/^\circ\text{C}$ )
<b>Přepočtový koeficient K</b>	0.000	Ohm/K (Ohm/°C)

**Tab.7.: Výsledky měření A-V charakteristiky (panel č. 000010344)**

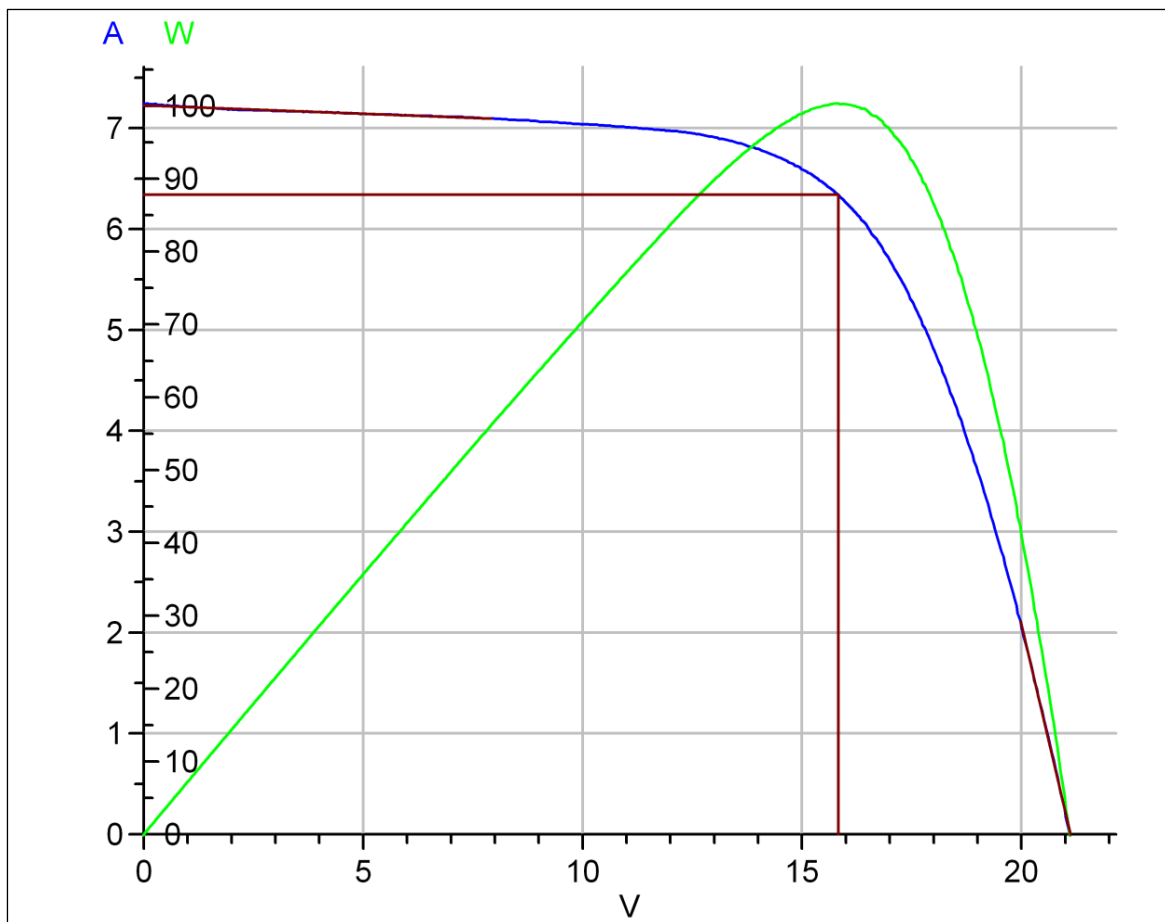
<b>Datum a čas měření:</b>	<b>25-03-14, 11-48</b>	
<b>Výrobce:</b>	<b>Atersa</b>	
<b>S/N</b>	<b>10344</b>	
<b>Typ modulu:</b>	<b>A-130</b>	
$T_p$	25.0	°C
$G_{(i)}$	1.0	kW/m <sup>2</sup>
$I_{sc}$	7.337	A
$U_{oc}$	20.935	V
Eff.	9.96	%
FF	63.06	%
$P_{mpp}$	96.861	W
$U_{mpp}$	16.498	V
$I_{mpp}$	5.871	A
$R_{ser}$	0.5	Ohm
$R_{sh}$	21.5	Ohm



Obr.23.:A-V charakteristika panelu před zkouškou reverzibility (panel č. 000010344)

Tab.8.:Výsledky měření volt-ampérové charakteristiky (panel č. 000010319)

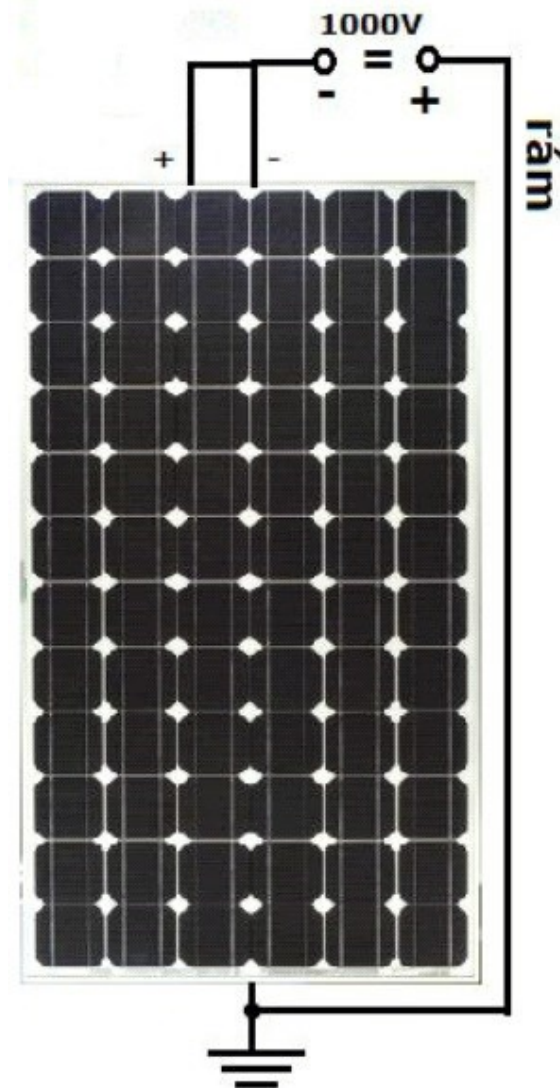
Datum a čas měření:	25-03-14, 12-03	
Výrobce:	Atersa	
S/N	10319	
Typ modulu:	A-130	
$T_p$	25.0	°C
$G_{(i)}$	1.0	kW/m <sup>2</sup>
$I_{sc}$	7.227	A
$U_{oc}$	21.118	V
Eff.	10.32	%
FF	65.75	%
$P_{mpp}$	100.341	W
$U_{mpp}$	15.828	V
$I_{mpp}$	6.340	A
$R_{ser}$	0.5	Ohm
$R_{sh}$	59.5	Ohm



**Obr.24.:A-V charakteristika panelu před zkouškou reverzibility (panel č. 000010319)**

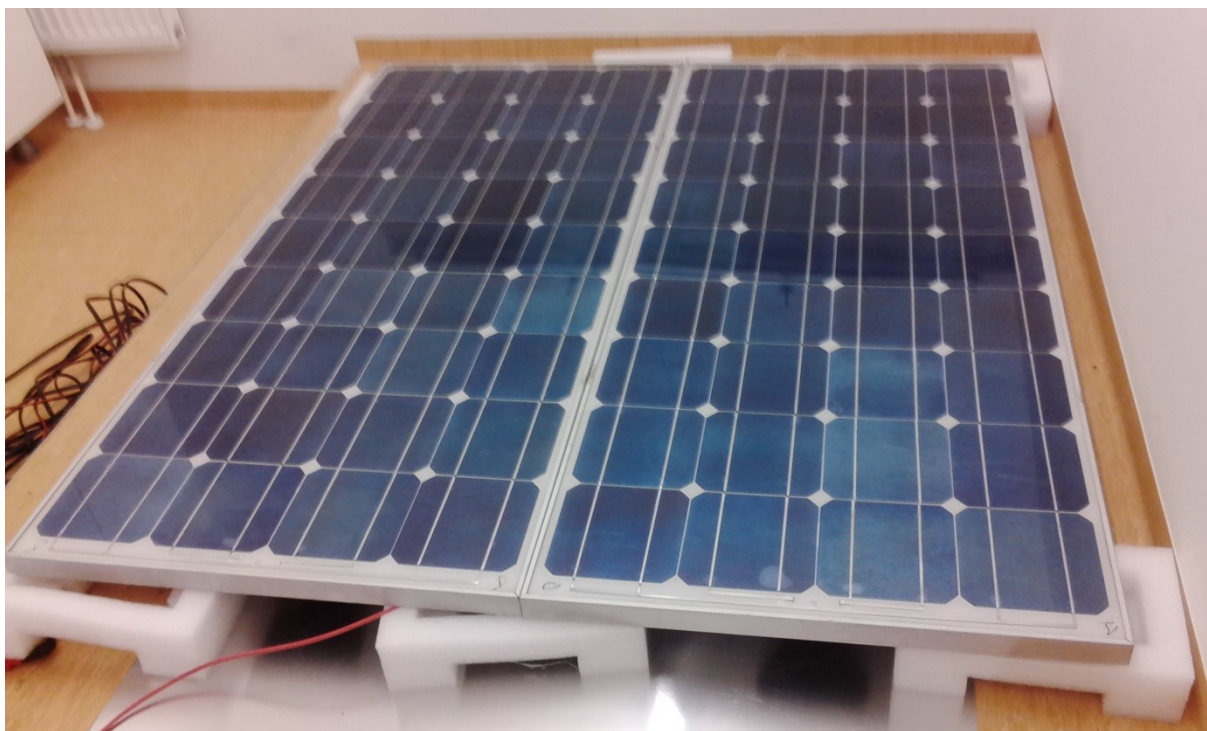
#### 4.4.1 Zapojení reverzibilního experimentu

Pokus o experiment zvrácení účinků degradace fotovoltaických modulů vychází z teoretických poznatek působení zemního potenciálu vůči panelu. Pro testování byl vyčleněn vysoko napěťový zdroj výrobce Radiometer typ IM5, který dokáže dodávat dovedu nulový proud při maximálním napětí 1000V. Jelikož fotovoltaické panely produkované v dnešní době mají běžné systémové napětí 1000V počítalo se s maximální využitím rozsahu tohoto zdroje. Z datasheetu bylo ovšem zjištěno, že max. systémové napětí FV panelů Atersa je 600. Z toho důvodů bylo v první fázi zvoleno napětí 500 V. Ve dvou testovacích sériích po 8h.



**Obr. 25.: Zapojení reverzibilního experimentu**

Na přípojovací terminál neboli Junction Box byl přiveden záporný pól zdroje. svorky fotovoltaického panelu byly propojeny mezi sebou. Na rám panelu byl přiveden kladný pól. Pod celým zapojením byl umístěn hliníkový plech pro simulaci vytvoření potenciálu. Celá instalace se umístila ve vzdálenosti 15cm od hliníkového plechu pro vytvoření dostatečného pole pro reverzibilní chování panelu.



**Obr.26.: Vytvoření svodového potenciálu , reverzibilnost degradace**

Pro vytvoření ideálního prostředí je zapotřebí kryogenní komora s 60ti stupňovou teplotou a 85ti % vlhkostí. Po první sérii regenerace neukázalo měření V-A charakteristiky řádnou změnu, tento výsledek podpořila i elektroluminiscence které byla obdobná jako před testováním. Výsledky měření jsou uvedeny v přílohách.

U druhé serie regenerace se využilo maximální napětí zdroje tedy 1000V i přesto že maximální možné napětí v systému měly tyto panely někde okolo 600V. Snížila se vzdálenost u testovaných modulů mezi Potenciálem a rámem modulu na 7 cm. Při tomto napětí se již kladl větší důraz na bezpečnost práce díky vysokému napětí mohlo dojít k přeskoku. Série regenerace se opakovala opět 2 x 8h. Po které následovalo měření elektroluminiscence a V-A charakteristiky výsledky opět v přílohách.

## 5 Závěr

V reálné praxi nelze v principu získat fotovoltaické moduly zatížené tímto jevem. Veškeré dnešní fotovoltaické parky kde se tento jev běžně vyskytuje jsou zatížené legislativou které striktně zakazuje ponižovat nebo naopak nahrazovat stávající technologií. V semestrálním projektu byly získány teoretické a praktické poznatky o projevech, způsobu testování a měření potenciální indukované degradace. Dále byla cílem pomocí dostupných technologií a nabitých znalostí, prozkoumána série fotovoltaických modulů které nepodléhají degradačnímu efektu skrze potenciál svodových proudů, tyto výsledky byly zhodnoceny. Jako stěžejní technologie byla použita měřicí technika technického institutu v Berlíně a to měřicí přístroj třídy PASSAN s možnostmi elektroluminiscence jako akreditované zkoušky, pod záštitou Krannich solar GmbH.

V experimentální části bakalářské práce byly stanoveny třídy pro možnosti rozdělení měření a výsledků do skupin. Měřené fotovoltaické panely od společnosti LUXOR GmbH dle parametrů vyhovovaly svou odolností působením degradačních vlivů a proto byly zařazeny do skupiny A, což bylo i ověřeno měřením po posouzení výsledků. Byly zjištěny základní rozdíly ve výrobních procesech jednotlivých výrobců s ohledem na použité materiály při výrobě.

Získané fotovoltaické panely od Krannich solar s.r.o. které byly použity zestávající elektrárny posloužily pro zkoušku revezibility pro zvrácení polarizačních mechanismů při degradování panelu. Uměle vytvořený svodový potenciál byl několika sériích vytvořen pro zkoušky panelů Atersa AT-.130. Bohužel tomuto potenciálu na teoretické úrovni chybělo umocnění vlivem vlhkosti okolního prostředí a teplota jakou lze navodit pouze v kryogenní komoře zátěžovými fázovými zkouškami. Tyto moduly nebyly nijak ošetřeny ochranou proti degradaci vlivem svodového potenciálu. Elektroluminiscenční analýza odhalila poruchy a nefunkční část panelu jakožto potvrdila i A-V charakteristika u obou testovaných panelů. Z teoretických poznatků získaných v úvodu bakalářské práce bylo zjištěno, že reverzibilní pochody jsou podmíněny teplotou a vlhkostí. Dále byl posuzován vliv uzemňovací topologie v závislosti na velikosti napětí která má přímý vliv na vytváření potenciální indukované degradace.

Výkonovou degradaci křemíkových destiček ve fotovoltaických modulech nelze zastavit, pouze spomalit. V globálním měřítku lze kladně proti tomuto efektu využít dobře zvolenou uzemňovací topologii celého fotovoltaického systému, kde budou svodové potenciály eliminovány a nebudou narušovat strukturu fotovoltaických modulů. V procesech testování kvality při výrobě fotovoltaických modulů je možné zavést zkoušku svodového potenciálu mezi fotovoltaickými články a rámem modulu který je po zavedení správné testovací aparatury měřitelný. Tuto zkoušku zatím nenařizuje žádná legislativa která by podmínila výrobce ke kroku ji zavést ve výrobních procesech testování kvality fotovoltaických modulů. Procesům jak zabránit indukované degradaci je celá řada, bohužel každý je cenově nákladný a tudíž neatraktivní pro dnešní trhy s fotovoltaickým materiálem kde se největší důraz klade na cenu a ne na kvalitu.

## 6 Seznam použitých zdrojů

- [1] *Princip fotovoltaického článku.* [online]. s. 9 [cit. 2013-11-18]. Dostupné z: <http://elektrika.cz/data/clanky/princip-fotovoltaickeho-clanku>
- [2] HRZINA, Ing.Pavel. *Sluneční energie a fotovoltaický jev.* [online]. 2012, s. 37 [cit. 2013-11-18]. Dostupné z: <http://pasan.feld.cvut.cz/ad1b13svs/>
- [3] *Characterization of Multicrystalline Silicon Modules: System Bias Voltage Applied in Damp Heat.* [online]. 2010, s. 7 [cit. 2013-11-20]. Dostupné z: [http://solarenergy.advanced-energy.com/upload/File/White\\_Papers/ENG-PID-270-01%20web.pdf](http://solarenergy.advanced-energy.com/upload/File/White_Papers/ENG-PID-270-01%20web.pdf)
- [4] LIBRA, M. – POULEK, V.: *Fotovoltaická transformace energie.* Elektroenergie, Advances in EE (in interview), 2/2010
- [5] *Understanding Potential Induced Degradation: The Causes of PID Interactions between Solar Panels and Inverters.* 2010, s. 7. Dostupné z: [http://solarenergy.advanced-energy.com/upload/File/White\\_Papers/ENG-PID-270-01%20web.pdf](http://solarenergy.advanced-energy.com/upload/File/White_Papers/ENG-PID-270-01%20web.pdf)
- [6] *Polarization Effects and Tests for Crystalline Silicon Cells.* [online]. 2011 [cit. 2014-05-17]. Dostupné z: [http://solarenergy.advanced-energy.com/upload/File/White\\_Papers/ENG-PID-270-01%20web.pdf](http://solarenergy.advanced-energy.com/upload/File/White_Papers/ENG-PID-270-01%20web.pdf)
- [7] *Termografie: Infračervená termografie.* [online]. [cit. 2014-05-13]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Termografie>
- [8] *Kontrola kvality fotovoltaických modulů: solární technika.* I, KUBÁČ, Stanislav.Solartechnika.sk [online]. 2012 [cit. 2014-05-13]. Dostupné z: <http://www.solartechnika.sk/solartechnika-12011/kontrola-kvality-fotovoltaickych-modulu-.html>
- [9] J.A. DELI CUETO AND S.R. RUMMEL “ *Degradation of Photovoltaic Modules Under High Voltage Stress in the Field*” 2010
- [10] *Potential Induced Degradation, Photovoltaic Modules: Influence of Temperature and Surface Conductivity.* [online]. 2012, roč. 2011, č. 2, s. 1-46 [cit. 2013-11-27]. Dostupné z: <http://solaredon.files.wordpress.com/2012/10/asu.pdf>
- [11] V. NAUMANN, ET. AL., in: *Proceedings 2nd SiliconPV 2012*, Leuven, Belgium, Energy Procedia, online]. [2011, roč. 2010, č. 6, s. 9-28
- [12] *Module Technology: SMA inverters provide the optimum solution for every module.* [online]. s. 7 [cit. 2013-11-28]. Dostupné z: <http://files.sma.de/dl/7418/Duennschicht-TI-UEN114630.pdf>
- [13] *Analýza metodou elektroluminiscence.* [online]. [cit. 2014-05-13]. Dostupné z: <http://www.pvtest.cz/cs/zkousky/analyza-metodou-elektroluminiscence>

## 7 Seznam zkratek

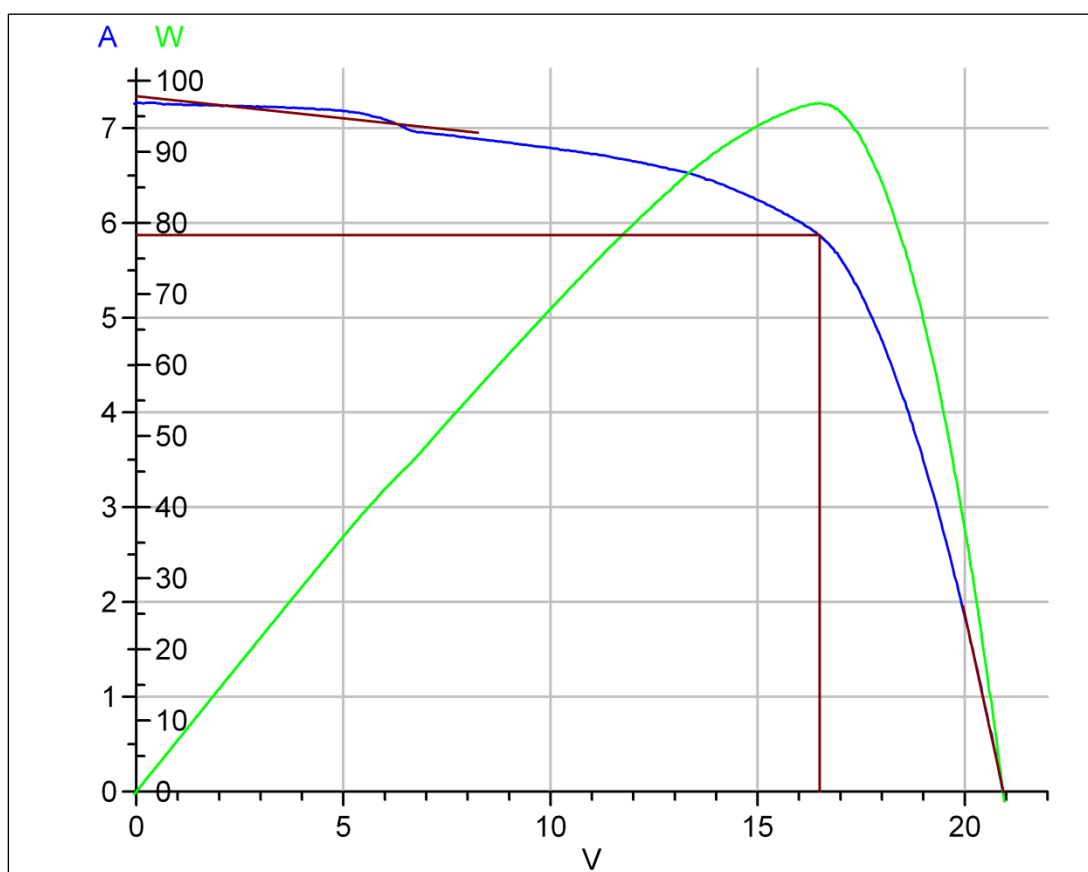
PID	Potential induced degradation
A-V	Amper - Voltová
WPVS	World Photovoltaic Standart
FSEC	Florida Solar Energy Center
TCO	Transparent Conductive Oxide
DAR	Deutscher Akreditierungs Rat
EVA	Ethylen-Vinyl-Acethat

## **8 Přílohy**

## Výsledky měření volt-ampérové charakteristiky (panel č. 7)

Datum a čas měření: 25-03-14, 11-48  
Výrobce: Atersa  
S/N: 000010344  
Typ modulu: A-130

$T_p$  25.0 °C  
 $G_{(i)}$  1.0kW/m<sup>2</sup>  
 $I_{sc}$  7.337 A  
 $U_{oc}$  20.935 V  
Eff. 9.96 %  
FF 63.06 %  
 $P_{mpp}$  96.861 W  
 $U_{mpp}$  16.498 V  
 $I_{mpp}$  5.871 A  
 $R_{ser}$  0.5 Ohm  
 $R_{sh}$  21.5 Ohm



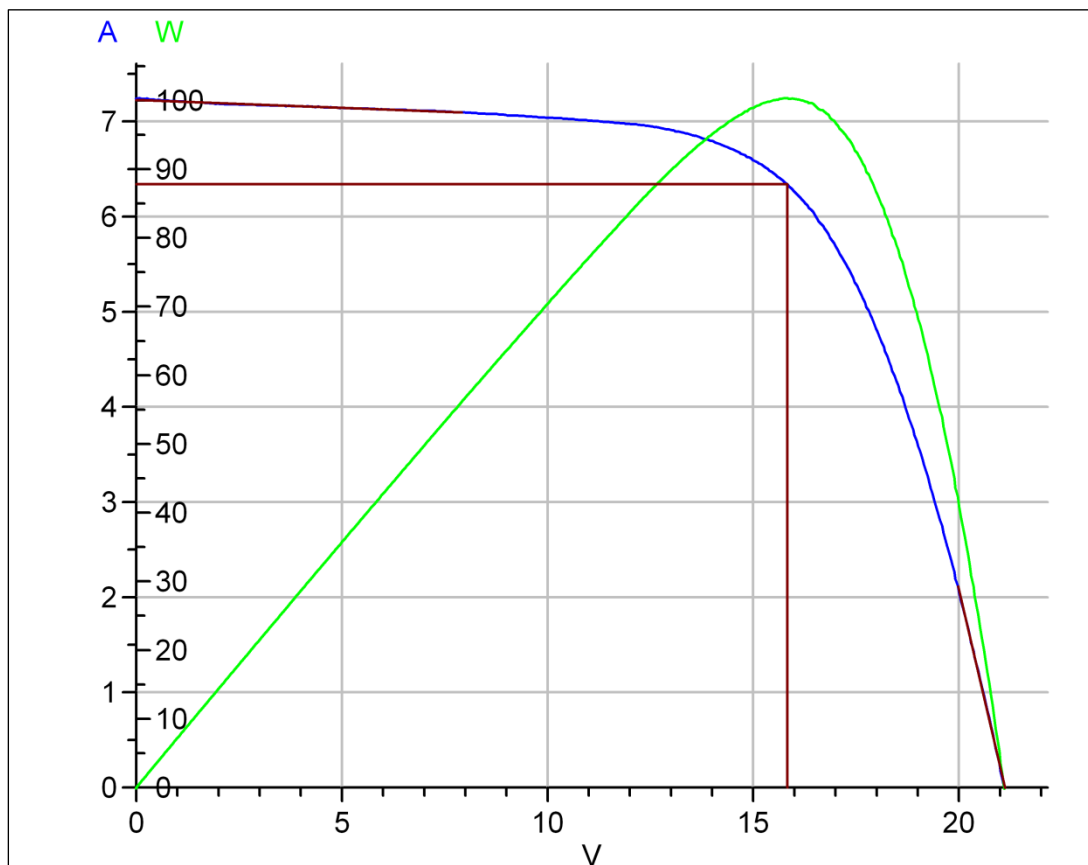
Podmínky měření:

Teplota okolí  $T_a$ : 24.4 °C  
Ozáření  $G$ : 1.0kW/m<sup>2</sup>  
Přepočtový koeficient  $Tk_U$ : -1.893 mV/K (mV/°C)  
Přepočtový koeficient  $Tk_I$ : 13.486  $\mu$ A/cm<sup>2</sup>/K ( $\mu$ A/cm<sup>2</sup>/°C)  
Přepočtový koeficient  $K$ : 0.000 Ohm/K (Ohm/°C)

## Výsledky měření volt-ampérové charakteristiky (panel č. 8)

Datum a čas měření: 25-03-14, 12-03  
Výrobce: Atersa  
S/N: 000010319  
Typ modulu: A-130

$T_p$  25.0 °C  
 $G_{(i)}$  1.0 kW/m<sup>2</sup>  
 $I_{sc}$  7.227 A  
 $U_{oc}$  21.118 V  
Eff. 10.32 %  
FF 65.75 %  
 $P_{mpp}$  100.341 W  
 $U_{mpp}$  15.828 V  
 $I_{mpp}$  6.340 A  
 $R_{ser}$  0.5 Ohm  
 $R_{sh}$  59.5 Ohm



Podmínky měření:

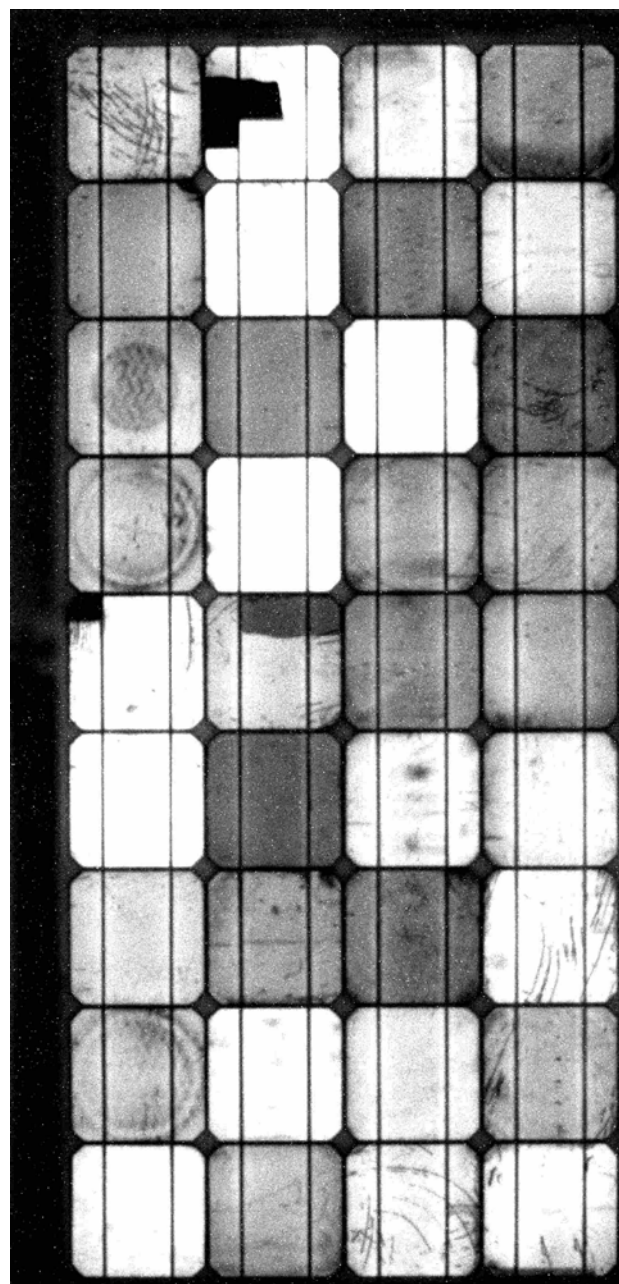
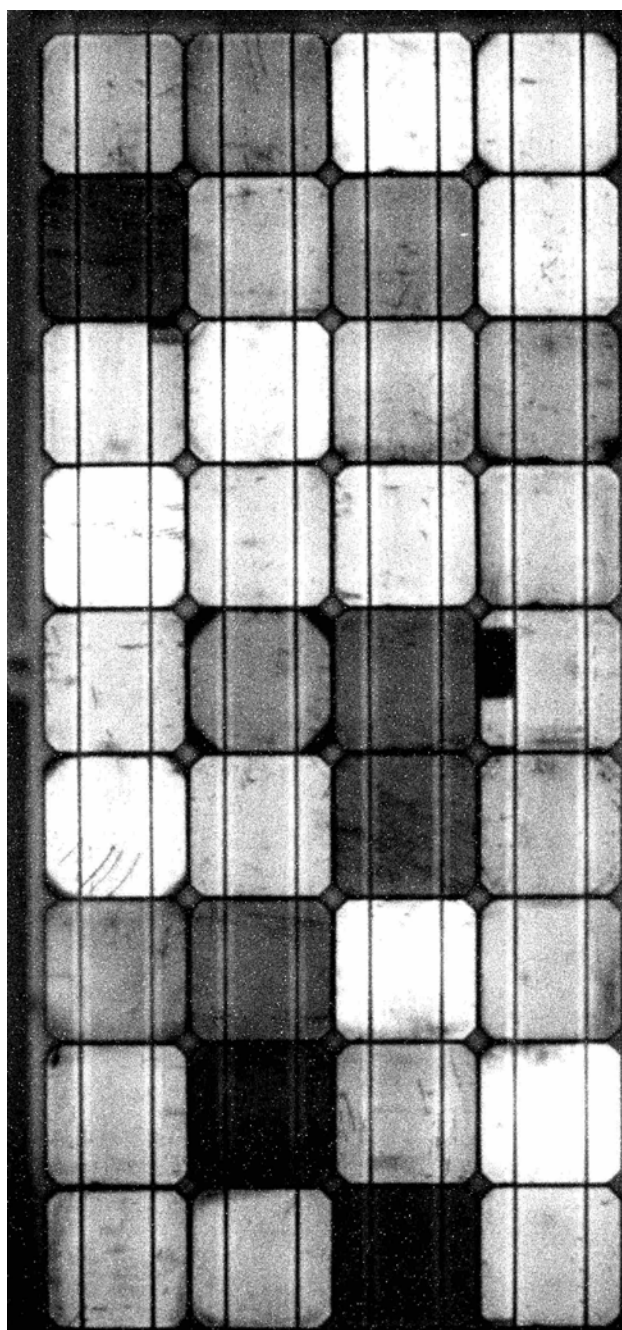
Teplota okolí  $T_a$ : 24.5 °C  
Ozáření  $G$  1.0 kW/m<sup>2</sup>  
Přepočtový koeficient  $TkU$  -1.893 mV/K (mV/°C)  
Přepočtový koeficient  $TkI$  13.486  $\mu$ A/cm<sup>2</sup>/K ( $\mu$ A/cm<sup>2</sup>/°C)  
Přepočtový koeficient  $K$  0.000 Ohm/K (Ohm/°C)

## Měření elektroluminiscencí.

### Nastavení:

(panel č.7) U: 19,6V I: 1,51A Histogram - Low: 524 High: 898

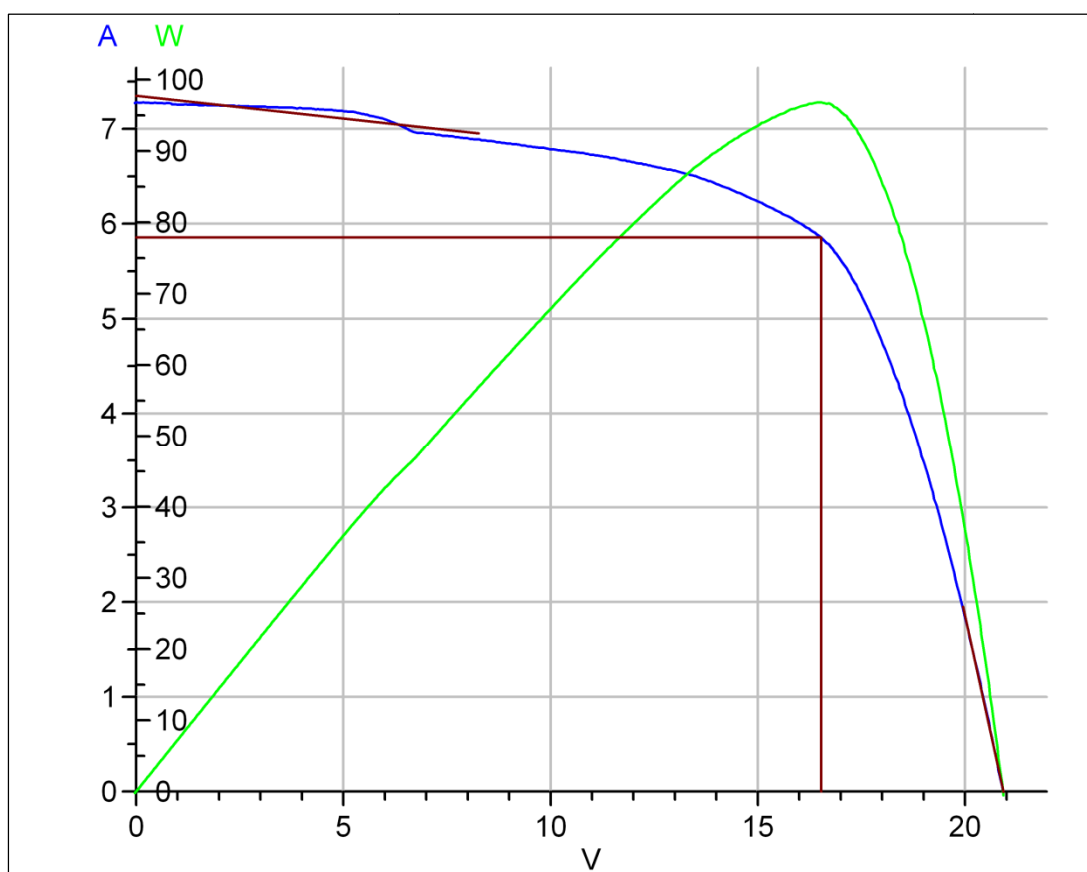
(panel č.8) U: 20,3V I: 1,74A Histogram - Low: 529 High: 777



## Výsledky měření volt-ampérové charakteristiky (panel č.7)

Datum a čas měření: 01-04-14, 08-51  
Výrobce: Atersa  
S/N: 000010344  
Typ modulu: A-130

$T_p$  25.0 °C  
 $G_{(i)}$  1.0kW/m<sup>2</sup>  
 $I_{sc}$  7.350 A  
 $U_{oc}$  20.930 V  
Eff. 9.95 %  
FF 62.93 %  
 $P_{mpp}$  96.808 W  
 $U_{mpp}$  16.529 V  
 $I_{mpp}$  5.857 A  
 $R_{ser}$  0.5 Ohm  
 $R_{sh}$  20.8 Ohm



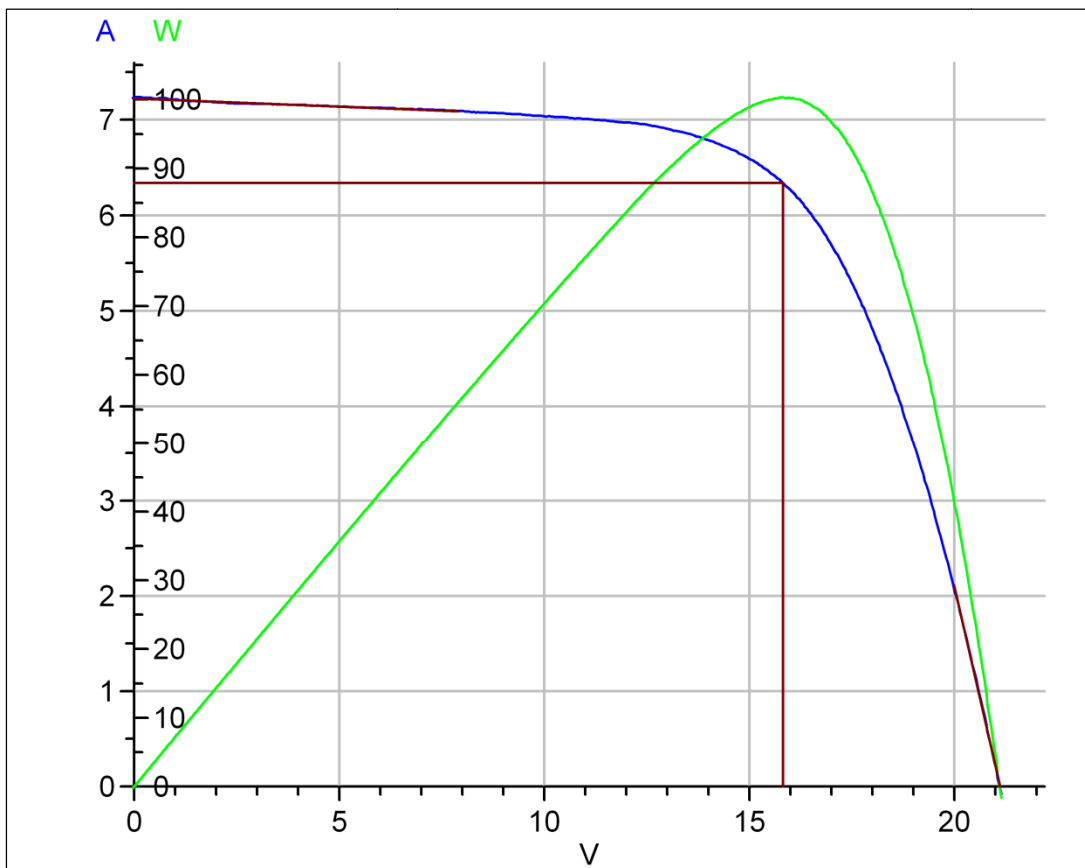
Podmínky měření:

Teplota okolí  $T_a$ : 24.2 °C  
Ozáření  $G$ : 1.0kW/m<sup>2</sup>  
Přepočtový koeficient  $TkU$ : -1.893 mV/K (mV/°C)  
Přepočtový koeficient  $TkI$ : 13.486  $\mu$ A/cm<sup>2</sup>/K ( $\mu$ A/cm<sup>2</sup>/°C)  
Přepočtový koeficient  $K$ : 0.000 Ohm/K (Ohm/°C)

## Výsledky měření volt-ampérové charakteristiky (panel č.8)

Datum a čas měření: 01-04-14, 09-47  
Výrobce: Atersa  
S/N: 000010319  
Typ modulu: A-130

$T_p$  25.0 °C  
 $G_{(i)}$  1.0kW/m<sup>2</sup>  
 $I_{sc}$  7.224 A  
 $U_{oc}$  21.116 V  
Eff. 10.31 %  
FF 65.76 %  
 $P_{mpp}$  100.322 W  
 $U_{mpp}$  15.824 V  
 $I_{mpp}$  6.340 A  
 $R_{ser}$  0.5 Ohm  
 $R_{sh}$  58.9 Ohm



Podmínky měření:

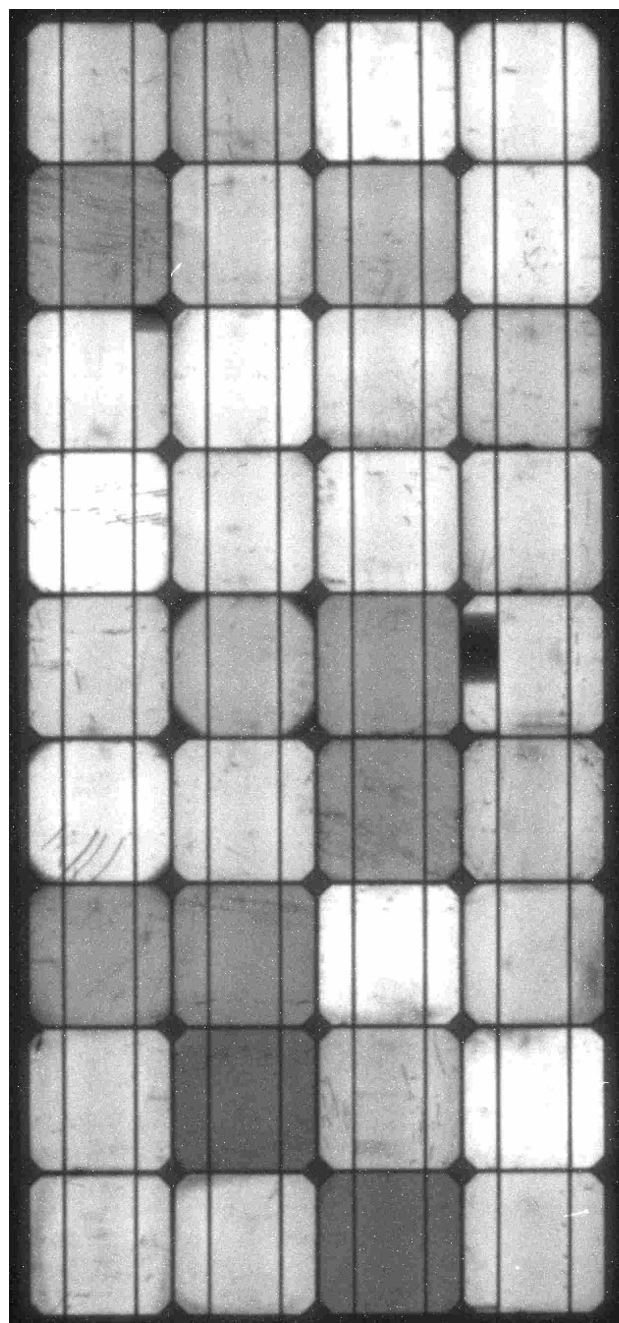
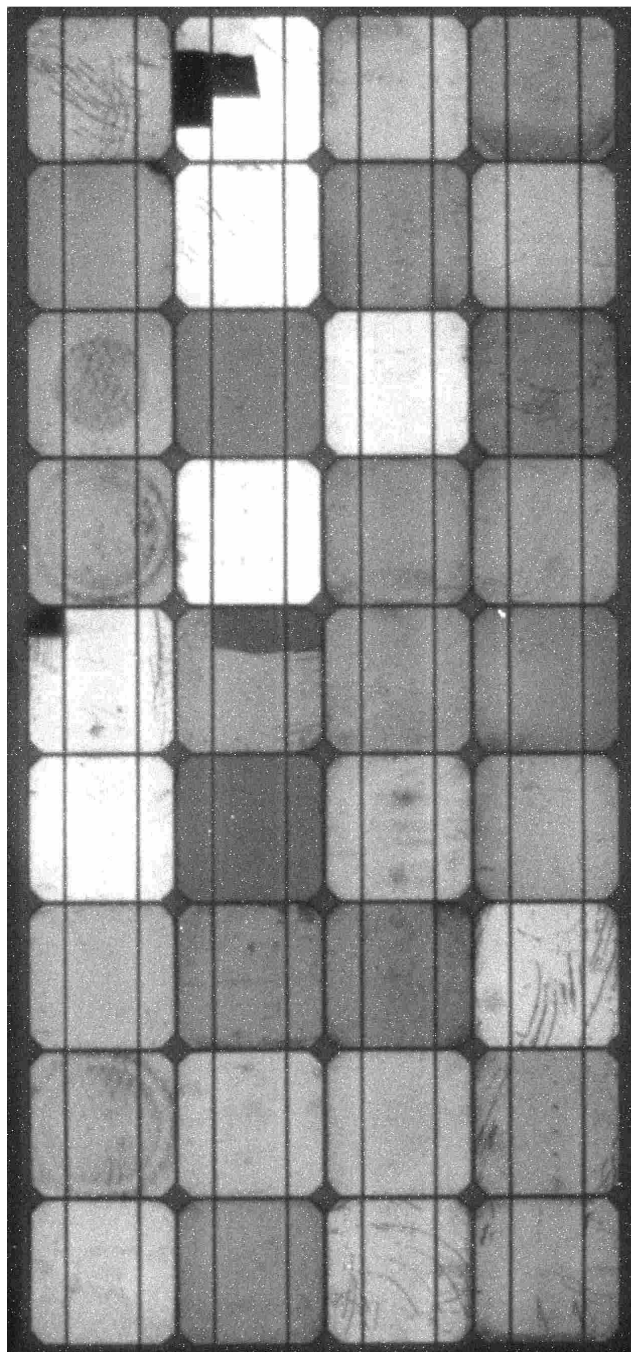
Teplota okolí  $T_a$ : 24.4 °C  
Ozáření  $G$  1.0kW/m<sup>2</sup>  
Přepočtový koeficient  $Tk_U$  -1.893 mV/K (mV/°C)  
Přepočtový koeficient  $Tk_I$  13.486  $\mu$ A/cm<sup>2</sup>/K ( $\mu$ A/cm<sup>2</sup>/°C)  
Přepočtový koeficient  $K$  0.000 Ohm/K (Ohm/°C)

## Měření elektroluminiscencí.

### Nastavení:

(panel č.7) U: 19,3V I: 1,23A Histogram - Low: 256 High: 642

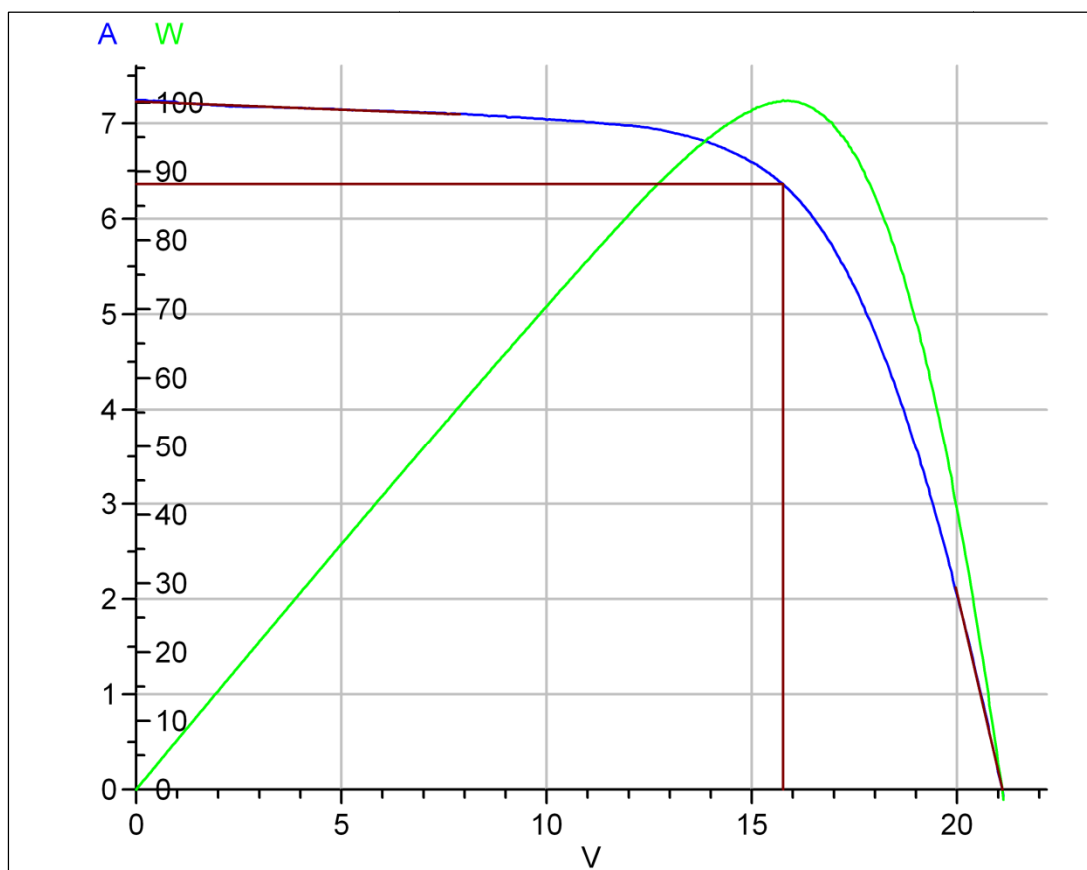
(panel č.8) U: 20,3V I: 1,78A Histogram - Low: 256 High: 1026



## Výsledky měření volt-ampérové charakteristiky (panel č.8)

Datum a čas měření: 10-04-14, 10-21  
Výrobce: Atersa  
S/N: 000010319  
Typ modulu: A-130

$T_p$  25.0 °C  
 $G_{(i)}$  1.0kW/m<sup>2</sup>  
 $I_{sc}$  7.230 A  
 $U_{oc}$  21.108 V  
Eff. 10.32 %  
FF 65.75 %  
 $P_{mpp}$  100.333 W  
 $U_{mpp}$  15.763 V  
 $I_{mpp}$  6.365 A  
 $R_{ser}$  0.5 Ohm  
 $R_{sh}$  58.8 Ohm



Podmínky měření:

Teplota okolí  $T_a$ : 24.2 °C  
Ozáření  $G$  1.0kW/m<sup>2</sup>  
Přepočtový koeficient  $TkU$  -1.893 mV/K (mV/°C)  
Přepočtový koeficient  $TkI$  13.486  $\mu$ A/cm<sup>2</sup>/K ( $\mu$ A/cm<sup>2</sup>/°C)  
Přepočtový koeficient  $K$  0.000 Ohm/K (Ohm/°C)