

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ  
KATEDRA ELEKTROTECHNOLOGIE

# PID efekt, diagnostika a důsledky

---

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



AUTOR: David Rokusek

VEDOUCÍ PRÁCE: Ing. Pavel Hrzina, PhD.

ROK: 2017

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Rokusek      Jméno: David      Osobní číslo: 434705  
Fakulta/ústav: Fakulta elektrotechnická  
Zadávající katedra/ústav: Katedra elektrotechnologie  
Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management  
Studijní obor: Aplikovaná elektrotechnika

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

PID efekt, diagnostika a důsledky

Název bakalářské práce anglicky:

PID effect, diagnostics and impact

Pokyny pro vypracování:

1. Zpracujte rešerší problematiku PID u PV modulů c-Si a tenkovrstvých
2. Vyhledejte dostupné metody diagnostiky, "léčení" a profilaxe u PID zasažených systémů.
3. Realizujte experiment (umělé vyvolání a léčba PID).
4. Vyhodnotte provedený experiment.

Seznam doporučené literatury:

- [1] HOFFMANN, Stephan a Michael KOHL. Effect of humidity and temperature on the potentialinduced degradation. Progress in photovoltaics. 2012, 2014(22), 173-179. DOI: 10.1002.  
[2] BAUER, J., V. NEUMANN, S. GROßER, C. HAGENDORF, M. SCHÜTZE a O. BREITENSTEIN. On the mechanism of potential-induced degradation in crystalline silicon solar cells. Physica Status Solidi RRL. 2012, 6(8), 331-333. DOI: 10.1002.  
[3] YAMAGUCHI, Seira, Sachiko JONAI, Kohjiro HARA, et al. Potential-induced degradation of Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> photovoltaic modules. Japanese Journal of Applied Physics. 2015, 54(08KC13). DOI: 10.7567.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Pavel Hrzina Ph.D., katedra elektrotechnologie FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: 13.02.2017      Termín odevzdání bakalářské práce: 26.05.2017

Platnost zadání bakalářské práce: \_\_\_\_\_

Podpis vedoucí(ho) práce

Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

Podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne..... podpis  
.....

## **PODĚKOVÁNÍ**

Mé poděkování patří v první řadě panu Ing. Pavlu Hrzinovi Ph.D. za vedení této práce, za rady, náměty a v neposlední řadě také za pomoc při všech měřeních.

Dále bych rád poděkoval paní Ing. Ladislavě Černé za její dobré rady a konzultace.

## ABSTRAKT

V rámci této bakalářské práce jsem se věnoval zejména experimentu, který spočíval ve vyvolání Potenciálem indukované degradace (PID) u fotovoltaického modulu z krystalického křemíku a v následném procesu léčení takto zdegradovaného modulu. Práce navazuje na můj individuální projekt, v němž jsem vypracoval rešerší právě na téma PID. Pro úplnost se v práci zabývám také principem fotovoltaického jevu a základními vlastnostmi fotovoltaických článků. Hlavním předmětem experimentu je potom pozorovat změny ve výsledcích různých metod diagnostiky během degradace nebo léčení a vyhodnotit, které z těchto metod jsou pro diagnostiku PID vhodné. Tato práce se věnuje zejména článkům z krystalického křemíku, neboť i experiment byl měřen na modulu z těchto článků.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Fotovoltaický článek, Fotovoltaický modul, Potenciálem indukovaná degradace (PID), Volt-ampérová charakteristika

## ABSTRACT

In this bachelor's thesis I deal with experiment, which is about causing Potential induced degradation (PID) on a crystalline silicon photovoltaic module and about curing such degraded module. This work is a continuation of my individual project in which I have made a research on the topic of PID. I also deal with principle of photovoltaic effect and some basic properties of photovoltaic cells in this work to make it complete. The main subject of the experiment is to observe changes in the results of several diagnostic methods during the degradation or curing and evaluate, which of these methods are fitting for PID diagnostics. This work mainly deals with crystalline silicon cells because the experiment was also measured on a module made of such cells.

## KEYWORDS

Photovoltaic cell, Photovoltaic module, Potential induced degradation (PID), Current-Voltage charakteristics

## OBSAH

1. Teoretická část .....	8
1.1. Fotovoltaický jev .....	8
1.2. Absorpce dopadajícího záření .....	8
1.3. Absorpční koeficient .....	9
1.4. PN přechod .....	10
1.4.1. Přímý přechod .....	11
1.4.2. Nepřímý přechod .....	12
1.5. Rekombinace .....	13
1.6. FV článek .....	14
1.6.1. Volt-ampérová charakteristika fv článku .....	16
1.6.2. Základní parametry FV článku .....	17
1.7. Úvod k PID .....	20
1.8. Faktory ovlivňující PID .....	21
1.8.1. Klimatické faktory .....	21
1.8.2. Vliv fotovoltaického systému .....	22
1.8.3. Vliv fotovoltaického článku a modulu .....	23
1.9. Metody měření fotovoltaického článku .....	24
1.9.1. Měření volt-ampérových charakteristik .....	24
1.9.2. Elektroluminiscenční snímky .....	25
1.9.3. Termografické snímky .....	25
1.9.4. Měření neosvětlených článků .....	26
1.9.5. Měření závěrných charakteristik .....	26
1.9.6. Impedanční spektroskopie .....	27
1.10. Diagnostika PID u fotovoltaického modulu .....	28
1.10.1. Diagnostika v laboratoři .....	28
1.10.2. Diagnostika mimo laboratoř .....	29
1.11. PID u tenkovrstvých modulů .....	29
1.12. Metody léčení .....	30

2. Praktická část .....	31
2.1. Úvod.....	31
2.2. Postup měření.....	31
2.3. Použitý modul .....	32
2.4. Získané výsledky .....	33
2.4.1. Měření volt-ampérových charakteristik .....	33
2.4.2. Měření závěrných charakteristik .....	44
2.4.3. Měření neosvětlených článků .....	44
2.4.4. Elektroluminiscenční snímky .....	49
2.4.5. Impedanční spektroskopie .....	51
3. Závěr.....	56
4. Citovaná literatura .....	57
5. Přílohy .....	58
5.1. Použitý modul .....	58
5.2. Funkční diagram PASAN Electronics .....	60

## 1. TEORETICKÁ ČÁST

### 1.1. FOTOVOLTAICKÝ JEV

Princip funkce fotovoltaického článku vychází z generace nosičů náboje. K tomu je nutné dodat energii, kterou článek přijme absorpcí dopadajícího světelného záření. Absorpce je způsobena interakcí světla s částicemi hmoty FV článku. Pokud původní energie částice byla  $E_1$ , energie po absorpci bude zvýšená o energii fotonu a platí:

$$E = E_1 + h\nu = E_1 + h\frac{c}{\lambda} [J] \quad (1)$$

kde  $h = 6,62606896 \cdot 10^{-34}$  [Js] je Planckova konstanta

$\nu$  [Hz] je frekvence fotonu

$c = 299792458$  [ms<sup>-1</sup>] je rychlosť svetla ve vakuu

$\lambda$  [m] je vlnová délka fotonu

Rozlišujeme tři typy této interakce. První dva způsobují zvyšování teploty látky, která světlo absorbuje, a jedná se o interakci s mřížkou a o interakci s volnými elektrony. Třetím typem je interakce s vázanými elektrony. U této interakce je rozhodující, zdá má foton dostatečnou energii na uvolnění elektronu z vazby. Tato energie se nazývá vazební energie nebo také šířka zakázaného pásu. Pokud je tedy energie dostatečná, uvolní se elektron z vazby a vznikne páru elektron - díra. Hovoříme o generaci volných nosičů náboje. V opačném případě dojde opět ke zvýšení teploty. Pokud tedy máme volné nosiče náboje a dokážeme separovat elektrony a díry, dojde ke vzniku rozdílu potenciálů (vznikne tedy elektrické pole), tedy k fotovoltaickému jevu.

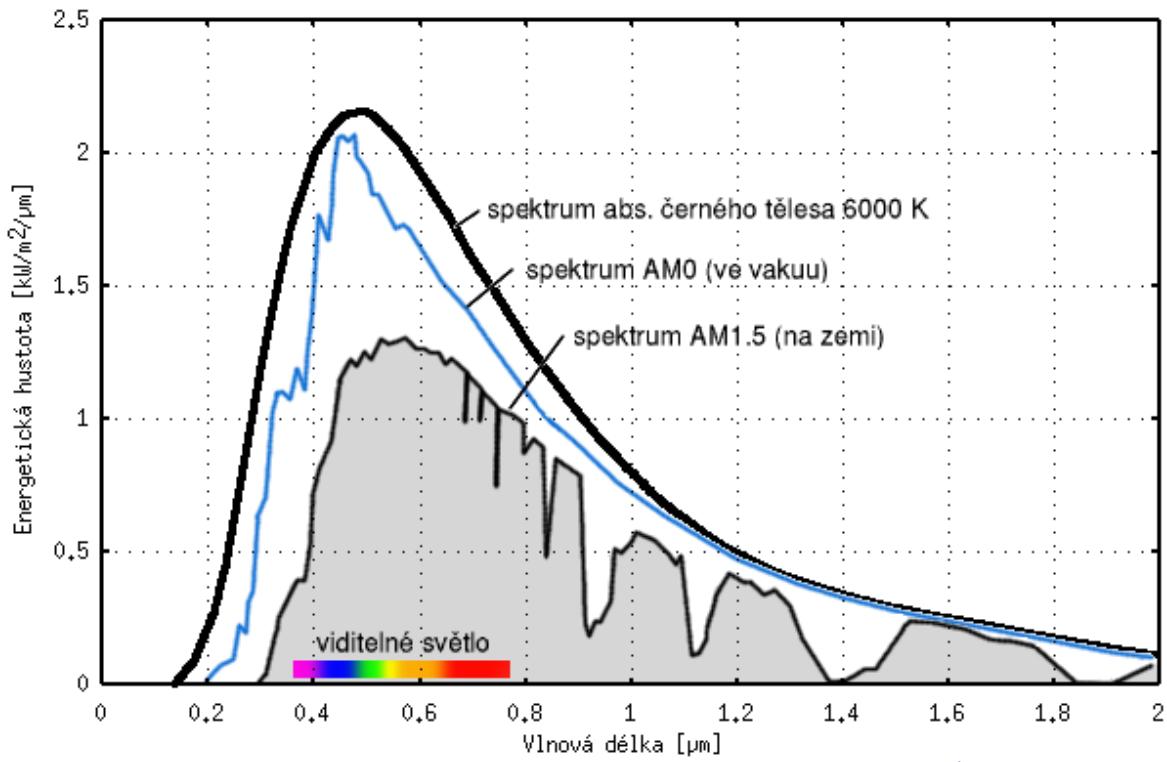
### 1.2. ABSORPCIE DOPADAJÍCÍHO ZÁŘENÍ

Pro generaci nosičů náboje je nutná absorpcie světelného záření (fotonů). Je zřejmé, že čím více fotonů materiál absorbuje, tím více volných nosičů náboje v něm vznikne, jinými slovy vzroste generace. Energie fotonu je dána jeho vlnovou délkou (1). Světlo dopadající na zemský povrch obsahuje různé vlnové délky různě zastoupené. Spektrum vyzařované ze Slunce lze approximovat spektrem absolutně černého tělesa o povrchové teplotě necelých 6000 Kelvinů. Toto spektrum se však výrazně mění při průchodu Zemskou atmosférou. Velký vliv má také poloha článku na Zemi, kde nejvhodnější je poloha kolmo ke Slunci (zenit). To je dáno tím, že s rostoucím úhlem mezi Sluncem a zenitem roste také vzdálenost, kterou světlo urazí při průchodu atmosférou. Hovoříme o koeficientu atmosférické masy, pro který platí:

$$AM = \frac{1}{\sin \varphi} \quad (2)$$

kde  $\varphi$  [°] je úhel mezi Sluncem a zenitem

Na povrch atmosféry dopadá spektrum AM0, standardním spektrem záření pro testovací podmínky je pak takzvané spektrum AM1,5.



Obrázek 1: Intenzita dopadajícího záření (AČT, AM0, AM1,5)<sup>1</sup>

### 1.3. ABSORPČNÍ KOEFICIENT

Absorpční koeficient  $\alpha$  je konstanta vztažená ke konkrétní látce a vyjadřuje schopnost této látky absorbovat elektromagnetické záření, tedy i světlo. Absorpční koeficient navíc závisí na vlnové délce zmíněného záření. Toho lze využít při výrobě fotovoltaických článků. Známe-li spektrum záření, které chceme pomocí článku využít pro výrobu elektrické energie, můžeme zvolit takový materiál, který absorbuje dominantní vlnovou délku tohoto spektra například už v několika  $\mu\text{m}$ . To vede k nižší spotřebě materiálu, tedy k nižší ceně článků.

Absorpční koeficient má také vliv na generaci volných nosičů náboje. Počet vygenerovaných nosičů klesá s rostoucí tloušťkou materiálu, protože do větší hloubky projde pouze malý počet fotonů. Pro celkovou generaci v hloubce  $x$  platí:

$$G(\lambda, x) = \left( \frac{d\Delta n}{dt} \right)_{gen} = \alpha(\lambda)f(\lambda)(1 - R(\lambda))e^{-\alpha(\lambda)x} \quad (3)$$

$$G(x) = \int_0^{\infty} \alpha(\lambda)f(\lambda)(1 - R(\lambda))e^{-\alpha(\lambda)x} d\lambda \quad (4)$$

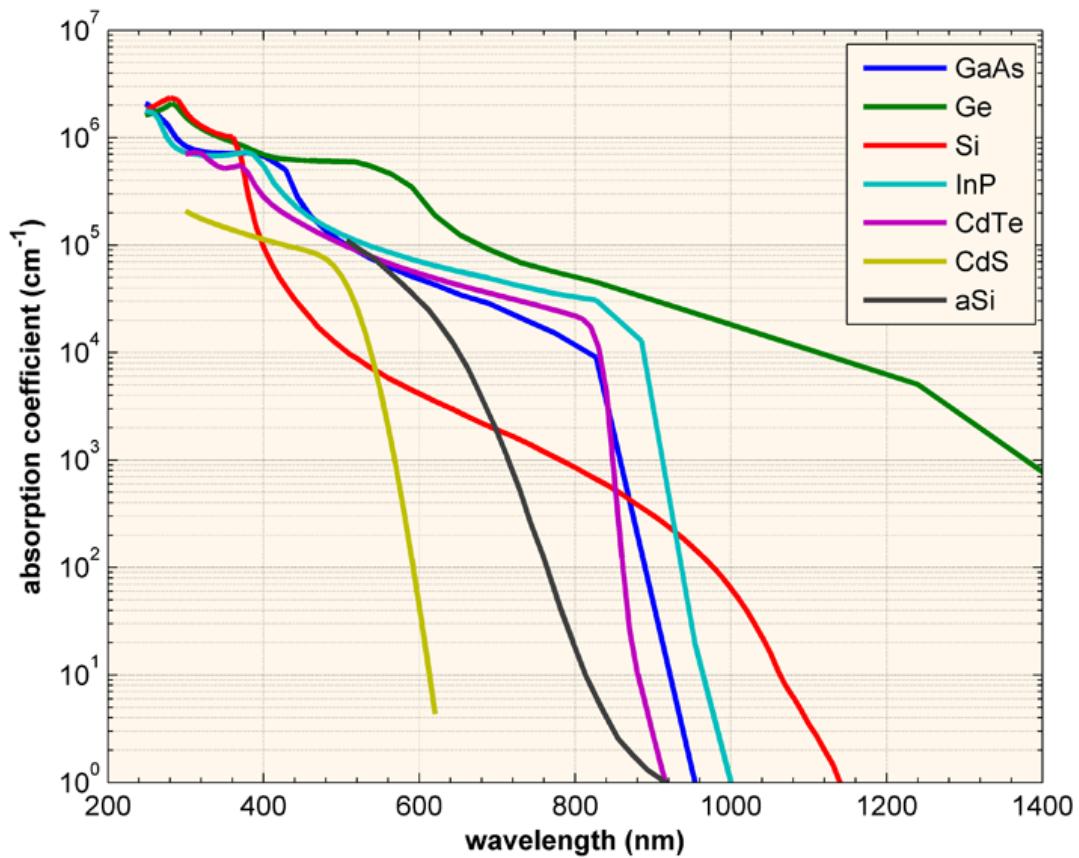
kde  $\alpha(\lambda)$  je absorpční koeficient

$f(\lambda)$  je fotonový tok (fotony dopadlé na jednotku plochy za sekundu)

$R(\lambda)$  je odrazivost záření

$x$  je hloubka v materiálu

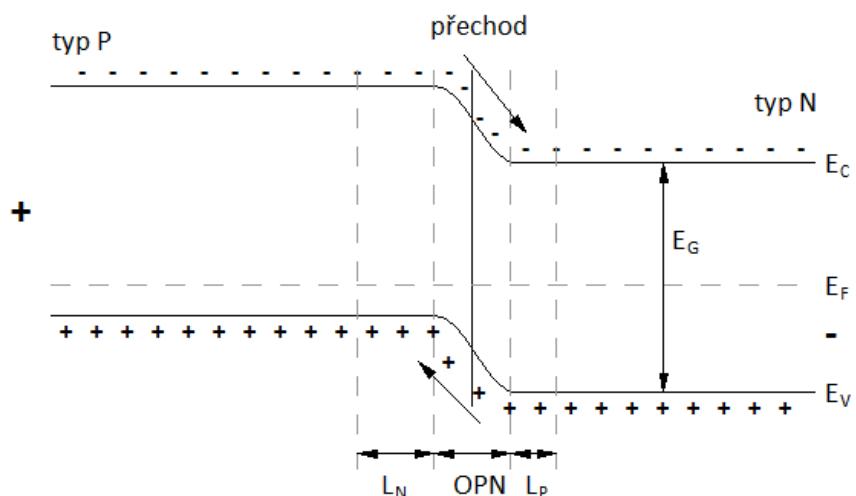
<sup>1</sup> <http://www.micronix.cz/solarix/zakladni-informace/solarni-panely>



Obrázek 2 - Závislost absorpčního koeficientu na vlnové délce pro různé materiály<sup>2</sup>

#### 1.4. PN PŘECHOD

Neosvětlený fotovoltaický článek se nachází v termodynamické rovnováze a jeho energie závisí zejména na teplotě. Při dodání energie ve formě světelného záření, jinými slovy při absorpci fotonů, dochází ke generaci páru elektron - díra. Pokud v materiálu navíc existuje PN přechod, tedy přechod mezi polovodičem typu P a polovodičem typu N, difundují elektrony z oblasti typu P do oblasti typu N a díry naopak z N do P. Vzniká tedy tok volných nosičů náboje, který nazýváme difúzní proud.

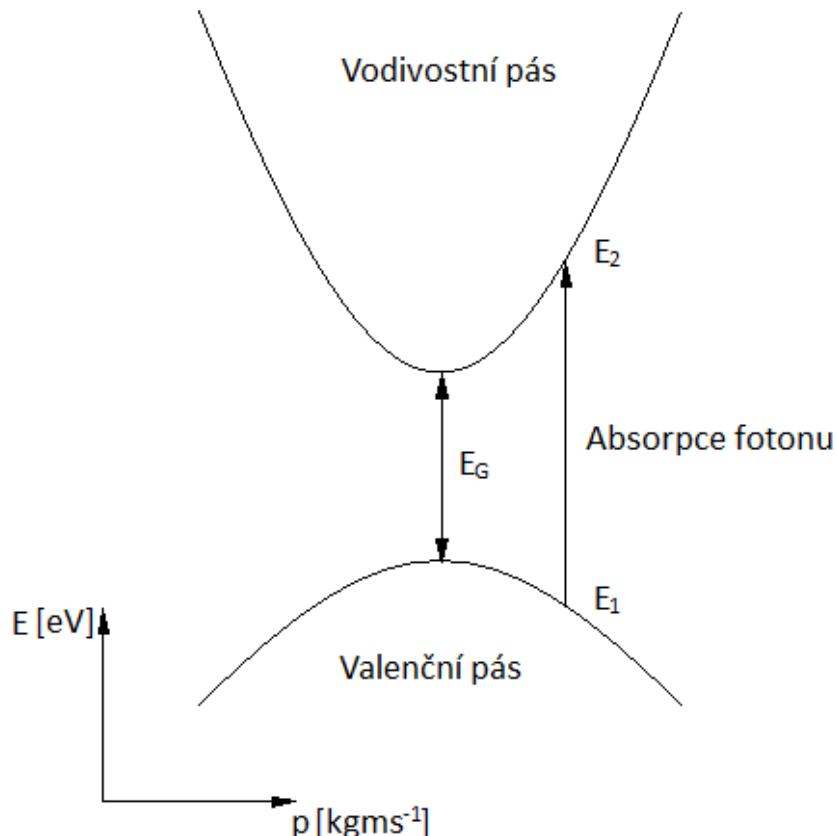


Obrázek 3 - PN přechod

<sup>2</sup> <http://www.pveducation.org/pvcdrum/absorption-coefficient>

Přechod PN může být přímý a nepřímý v závislosti na materiu. Přímé přechody potřebují k vygenerování elektronu pouze foton s energií stejnou nebo vyšší, než je energie zakázaného pásu. Nepřímé přechody potřebují k vygenerování elektronu navíc fonon.

#### 1.4.1. PŘÍMÝ PŘECHOD



Obrázek 4 - Znázornění absorpcie v přímém přechodu PN

Pro absorpci v obou typech přechodu platí zákon zachování hybnosti. Tedy suma energií a hybností po absorpci musí být stejná, jako před absorpcí. Energetické hladiny vodivostního a valenčního pásu lze graficky znázornit (obrázky 4 a 5). Z obrázku je zřejmé, že závislost mezi hybností a energií je parabolická a v přímém přechodu platí, že maximum valenčního pásu leží na stejné hybnosti krystalu jako minimum vodivostního pásu. Pro každý elektron v počátečním stavu s energií  $E_1$  a hybností krystalu  $p_1$  existuje konečný stav s energií  $E_2$  a hybností krystalu  $p_2$ . Hybnost elektronu je v přímém přechodu zachována, tedy i hybnost krystalu musí zůstat nezměněna a platí vztahy:

$$\begin{aligned}
 p_1 &= p_2 = p \\
 h\nu &= E_2 - E_1 \\
 E_V - E_1 &= \frac{1}{2} m_p^* v^2 = \frac{p^2}{2m_p^*} \\
 E_2 - E_C &= \frac{p^2}{2m_n^*} \\
 h\nu - E_G &= \frac{p^2}{2} \left( \frac{1}{m_n^*} + \frac{1}{m_p^*} \right) [\text{eV}]
 \end{aligned} \tag{5}$$

kde:  $m_n^*$  [kg] je efektivní hmotnost elektronů

$m_p^*$  [kg] je efektivní hmotnost děr

$v$  [ $\text{ms}^{-1}$ ] je rychlosť

$h = 6,62606896 \cdot 10^{-34}$  [Js] je Planckova konstanta

$\nu$  [Hz] je frekvence fotonu

$E_V$  [eV] je maximum energie valenčního pásu

$E_C$  [eV] je minimum energie vodivostního pásu

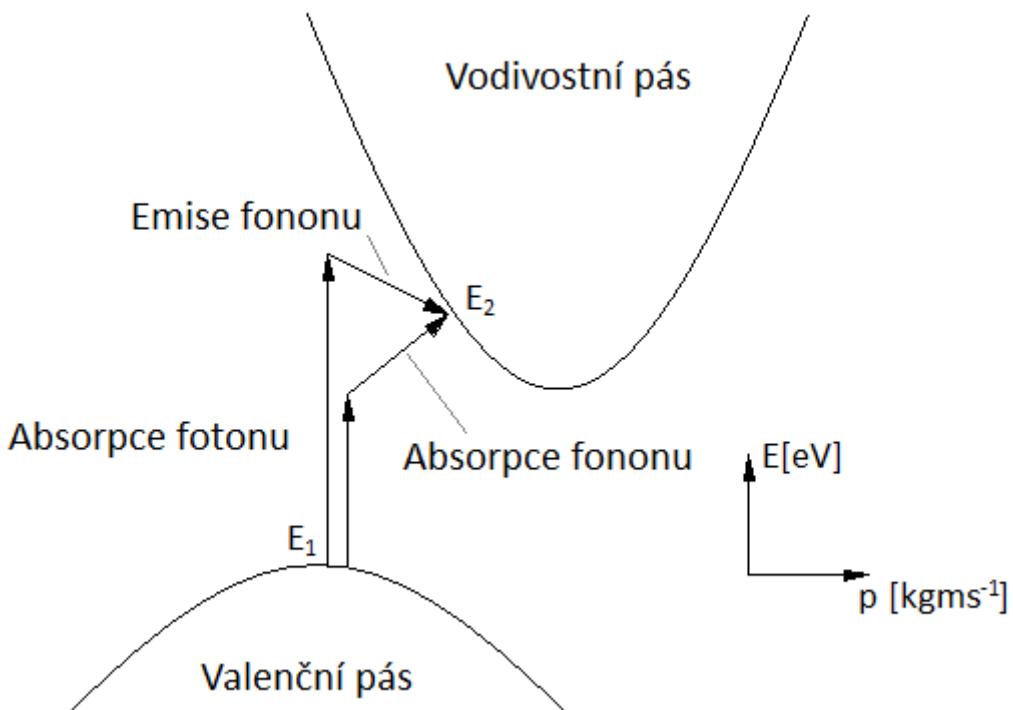
$E_G$  [eV] je energie zakázaného pásu

Ze vztahu (5) pak lze pro velikost absorpčního koeficientu přímého přechodu psát [5]:

$$\alpha(\lambda) \approx A^* \sqrt{h\nu - E_G} \quad (6)$$

kde:  $A^*$  je konstanta

#### 1.4.2. NEPŘÍMÝ PŘECHOD



Obrázek 5 - Znázornění absorpce v nepřímém přechodu PN

V nepřímém přechodu už neplatí, že maximum valenčního pásu leží na stejné hybnosti krystalu jako minimum pásu vodivostního. Pro zachování hybnosti elektronu je tedy nutné doplnit proces absorpce fotonu ještě o energii fononu, což je částice k tomuto procesu poměrně vhodná. Fonon má totiž nižší energii, ale poměrně vysokou hybnost (je to částice reprezentující kmitání mřížky). Fonon může být

absorbován, nebo emitován, v závislosti na energii fotonu. Je-li energie fotonu vyšší než energie  $E_2$ , bude fonon emitován. Naopak pro energii nižší než  $E_2$  bude fonon absorbován.

Absorpční koeficient s respektováním absorpce nebo emise fononu je pak dán vztahy [5]:

$$\begin{aligned}\alpha_a(\lambda) &\approx \frac{A(hv - E_G + E_f)^2}{\exp\left(\frac{E_f}{kT}\right) - 1} \\ \alpha_e(\lambda) &\approx \frac{A(hv - E_G - E_f)^2}{1 - \exp\left(-\frac{E_f}{kT}\right)} \\ \alpha(\lambda) &= \alpha_a(\lambda) + \alpha_e(\lambda)\end{aligned}\tag{7}$$

Ze vztahů (6) a (7) tedy plyne, že velikost a průběh závislosti absorpčního koeficientu na vlnové délce, respektive energii, fotonu je odlišná pro materiály s přímým a nepřímým přechodem (obrázek 2).

Mezi materiály s nepřímým přechodem patří například křemík nebo germanium. Naopak mezi materiály s přímým přechodem patří GaAs, GaInP, CdTe nebo Cu(InGa)Se<sub>2</sub>. U těchto materiálu se využívá nízkého absorpčního koeficientu a používají se k výrobě tenkovrstvých fotovoltaických článků.

## 1.5. REKOMBINACE

Generace párů elektron - díra znamená pro materiál porušení termodynamické rovnováhy, což vede ke snaze o obnovení této rovnováhy. To se děje mechanizmem opačným ke generaci, nazývaným rekombinace. Rozlišujeme tři typy:

1. Zářivá rekombinace
2. Augerova rekombinace
3. Rekombinace pomocí lokálních center

Při prvním typu rekombinace elektron vyzáří energii ve formě fotonu, proto se nazývá zářivá. Druhý typ rekombinace probíhá tak, že elektron předá energii elektronu poblíž a zrekombinuje. Elektron, který energii přijal, ji vyzáří ve formě tepla, tedy fononu. Stejným způsobem mohou rekombinovat také díry. Během třetího typu dochází k rekombinaci díky lokálním centrům uvnitř zakázaného pásu. Při zachycení je energie opět vyzářena ve formě fononu. Průběh tohoto typu rekombinace závisí na počtu lokálních center, čím více jich je, tím rychleji nosiče náboje rekombinují. Všechno tyto typy rekombinace probíhají zároveň a celková rekombinace je dána vztahem:

$$R = \left( \frac{d\Delta n}{dt} \right)_{rec} = -\frac{\Delta n}{\tau} = -\Delta n * \left( \frac{1}{\tau_r} + \frac{1}{\tau_A} + \frac{1}{\tau_t} \right)\tag{8}$$

kde:  $\Delta n$  je celkový počet částic vzniklých generací

$\tau_r$  je doba života částic při zářivé rekombinaci

$\tau_A$  je doba života částic při Augerově rekombinaci

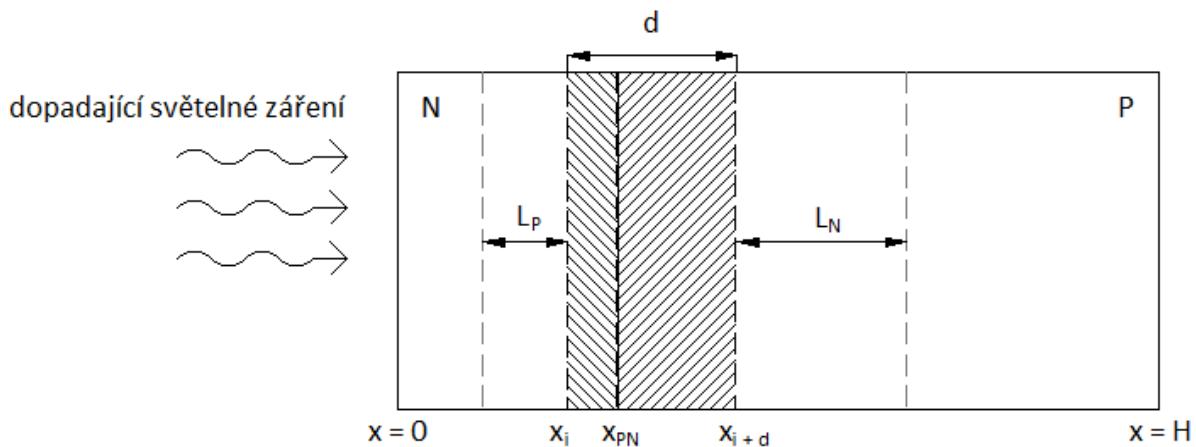
$\tau_t$  je doba života částic při rekombinaci pomocí lokálních center

Mimo zmíněnou rekombinaci  $R$  v objemu materiálu dochází také k povrchové rekombinaci  $S_R$  a ke generaci nosičů náboje přímo uvnitř oblasti prostorového náboje OPN. Pokud se elektrony dostanou do určité vzdálenosti od OPN, vytvoří proud o hustotě  $J_{FV}$ . Tuto vzdálenost nazýváme difúzní délka  $L$ .

$$J_{FVN} = \int_0^{x_i} G dx - \int_0^{x_i} R dx - S_R(0) \quad (9)$$

$$J_{FVP} = \int_{x_i+d}^H G dx - \int_{x_i+d}^H R dx - S_R(H) \quad (10)$$

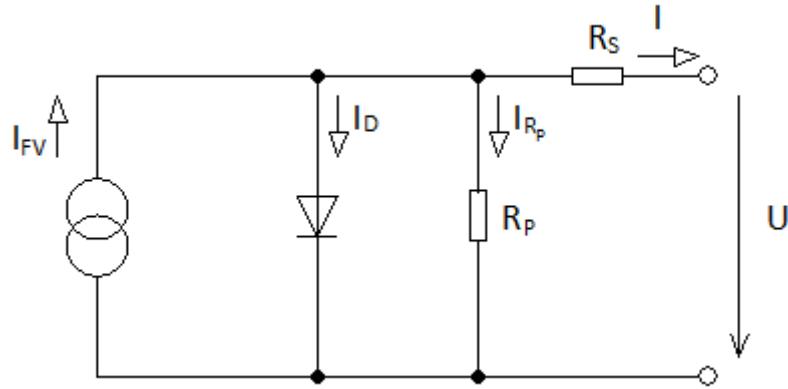
$$J_{FV} = J_{FVN} + J_{FVP} + J_{OPN} \quad [A * m^{-2}] \quad (11)$$



Obrázek 6 - doplnění ke vztahům (9), (10), (11)

## 1.6. FV ČLÁNEK

Základním materiálem FV článku je nejčastěji křemík, stejně jako u většiny diod. Článek je navíc tvořen jen jedním PN přechodem, a tedy lze jeho chování dobře approximovat chováním typické křemíkové diody. Článek absorbuje světelnou energii a vzniká v něm elektrický proud, lze ho tedy považovat za proudový zdroj. Náhradní schéma je dále doplněno o sériový odpor  $R_S$ , reprezentující zejména odpory ohmických kontaktů, a paralelní odpor  $R_P$ , který reprezentuje poruchy ve struktuře článku jako jsou například trhliny v PN přechodu.



Obrázek 7 - Náhradní schéma FV článku

Na základě náhradního schématu a rovnice diody lze napsat rovnice popisující FV článek, tedy jeho volt-ampérovou charakteristiku.

$$I = I_{FV} - I_D - I_{RP}$$

$$I = I_{FV} - \left[ I_{D1} \left( \exp \left( \frac{e(U + R_S I)}{\xi_1 kT} \right) - 1 \right) + I_{D2} \left( \exp \left( \frac{e(U + R_S I)}{\xi_2 kT} \right) - 1 \right) \right] - \frac{U + R_S I}{R_P} \quad (12)$$

kde:  $I$  [A] je proud získatelný z článku

$I_{FV}$  [A] je proud vybuzený fotony absorbovaného světla

$I_D$  [A] je proud uzavírající se přes PN přechod approximovaný diodou

$I_{RP}$  [A] je proud tekoucí paralelním odporem

$I_{D1}$  [A] je difúzní složka proudu

$I_{D2}$  [A] je generačně - rekombinační složka proudu

$\xi_1, \xi_2$  [-] jsou diodové faktory

$k = 1,3806504 \cdot 10^{-23}$  [JK<sup>-1</sup>] je Boltzmannova konstanta

$e = 1,602176487 \cdot 10^{-19}$  [C] je elementární náboj

$T$  [K] je termodynamická teplota

$U$  [V] je napětí na svorkách článku

$R_S, R_P$  [ $\Omega$ ] jsou sériový a paralelní odpor

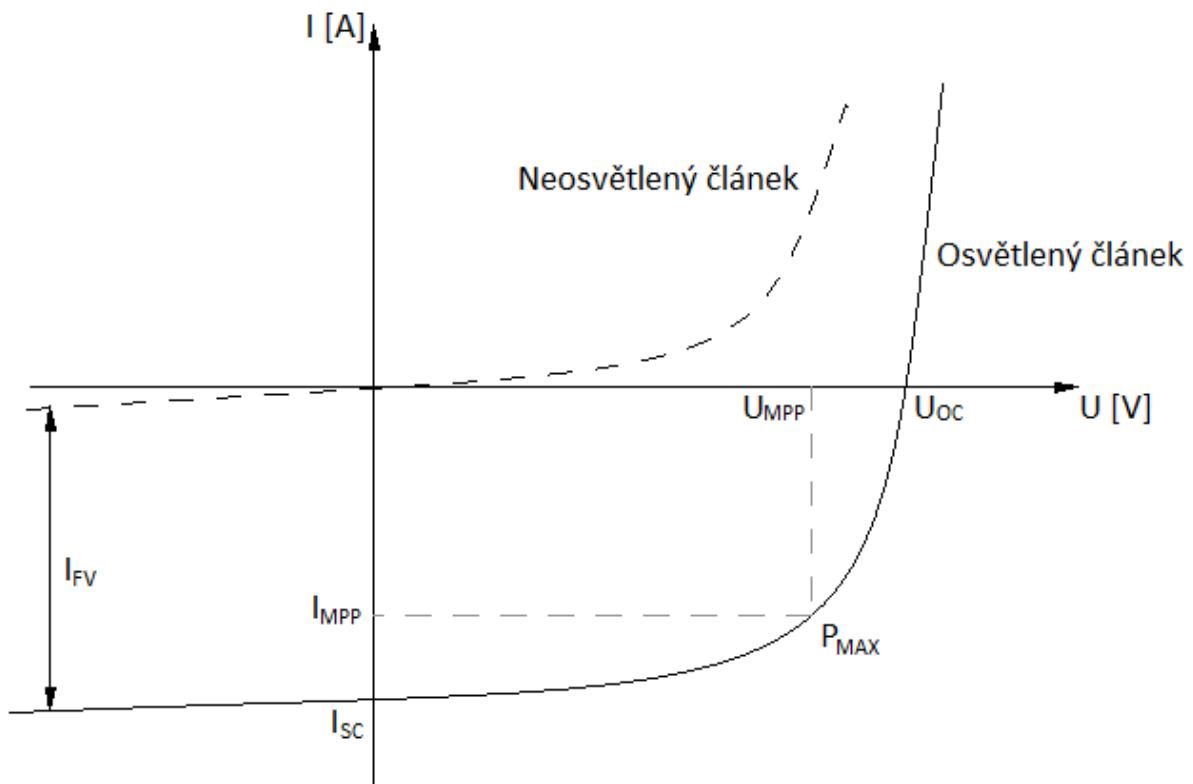
Oproti náhradnímu schématu se v rovnici (12) vyskytují dvě diody. Důvodem je přítomnost dvou mechanizmů vedení proudu v polovodiči, mluvíme o generačně - rekombinačním a difúzním proudu. Jak jsem již zmiňoval v kapitole 1.4., v PN přechodu difundují elektrony v blízkosti přechodu z oblasti typu N do oblasti typu P, kde rekombinují. Díry naopak difundují z oblasti typu P do oblasti typu N, kde také rekombinují. V okolí přechodu tak vzniká vysoká koncentrace nosičů náboje, která dále exponenciálně klesá se vzdáleností od přechodu. Vytvoří se difúzní bariéra, což je elektrické pole,

které brání nosičům náboje v dalším pronikání. Díky difúzi pak vznikají v oblasti prostorového náboje (uvnitř přechodu a v jeho blízkosti) nevykompenzované ionty, které jsou záporné v oblasti typu P a kladné v oblasti typu N. Tyto ionty pak způsobí přitahování minoritních nosičů náboje, které jsou navíc urychlovány elektrickým polem difúzní bariéry. Tok těchto minoritních nosičů nazýváme difúzním proudem. Podíl difúzního proudu ke generačně - rekombinačnímu závisí na napětí. Pro hodnoty napětí ve vztahu (13) převažuje proud generačně - rekombinační, pro vyšší napětí pak dominuje difúzní složka proudu.

$$\frac{3kT}{e} < U < \frac{10kT}{e} \quad (13)$$

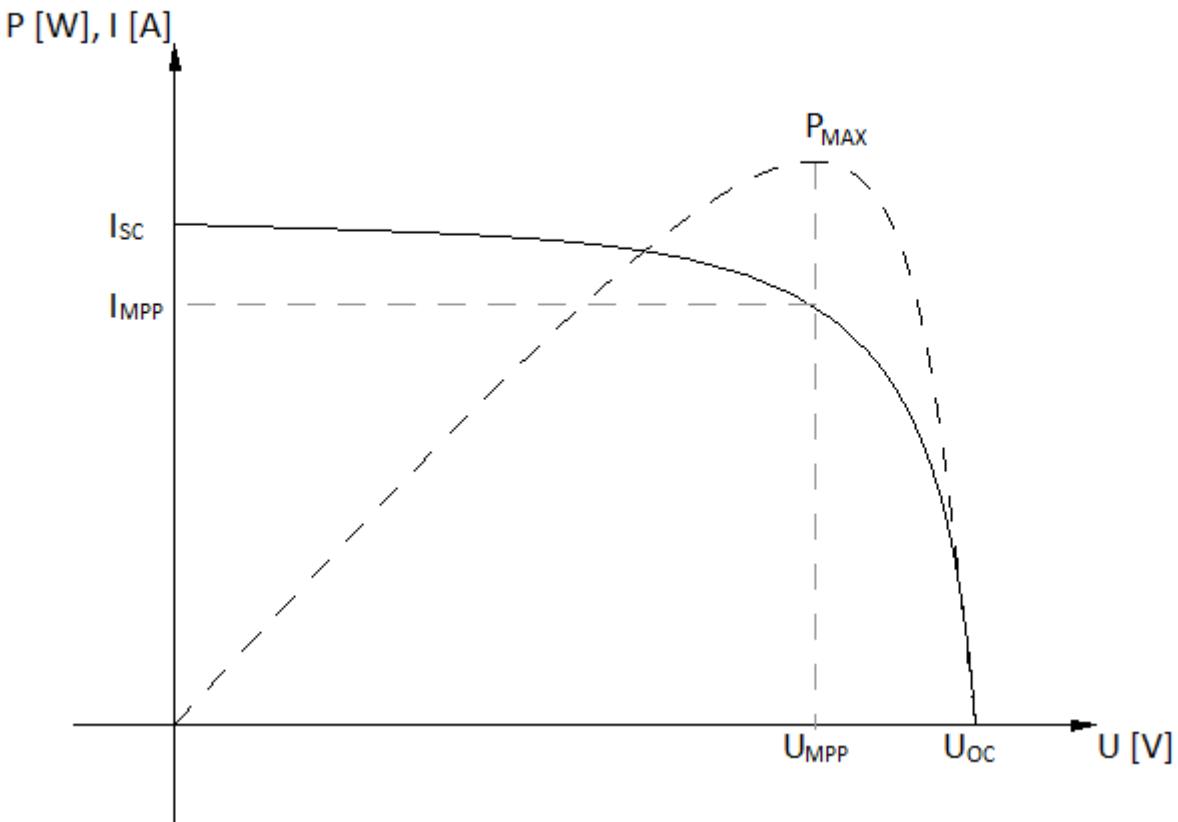
#### 1.6.1. VOLT-AMPÉROVÁ CHARAKTERISTIKA FV ČLÁNKU

Voltampérová charakteristika FV článku je popsána rovnicí (12). FV článek je modelován chováním křemíkové diody, tedy i volt-ampérová charakteristika má tvar charakteristiky diody. Rozdíl je v tom, že osvětlený článek je zdrojem proudu  $I_{FV}$  a celá charakteristika se tak posouvá do oblasti kladného proudu.



Obrázek 8 - Voltampérová charakteristika FV článku

Typicky se však charakteristika nezobrazuje tímto způsobem. Ve fotovoltaice se obvykle znázorňuje obráceně, často navíc také společně s průběhem výkonu.



Obrázek 9 - Volt-ampérová charakteristika FV článku

## 1.6.2. ZÁKLADNÍ PARAMETRY FV ČLÁNKU

Mezi základní parametry FV článku řadíme napětí naprázdno  $U_{OC}$ , proud nakrátko  $I_{SC}$ , bod maximálního výkonu  $P_{MAX}$ , který je popsán napětím  $U_{MPP}$  a proudem  $I_{MPP}$ , faktor plnění často i v české literatuře zvaný fill factor  $FF$ , účinnost  $\eta$  a konečně sériový a paralelní odpor  $R_S$  a  $R_P$ .

### 1.6.2.1. NAPĚTÍ NAPRÁZDNO

Napětí naprázdno je napětí, které naměříme na svorkách nezatíženého fotovoltaického článku a značí se  $U_{OC}$ . Typická hodnota u křemíkových článků je za běžných podmínek přibližně 0,6 V.

### 1.6.2.2. PROUD NAKRÁTKO

Proudem nakrátko nazýváme proud, který protéká obvodem fotovoltaického článku se zkratovanými výstupními svorkami. U křemíkových článků se za běžných podmínek typicky pohybuje kolem hodnoty 3,6 A a značíme ho  $I_{SC}$ . Článek musí být osvětlen a míra osvětlení ovlivňuje hodnotu  $I_{SC}$ .

#### 1.6.2.3. BOD MAXIMÁLNÍHO VÝKONU

Bodem maximálního výkonu rozumíme bod na volt-ampérové charakteristice, ve kterém článek dodává maximální možný výkon při daných podmínkách. Bod maximálního výkonu se značí  $P_{MAX}$  nebo  $MPP$  (Max power point) a určíme ho z naměřených hodnot jako maximální součin  $UI$ . Odpovídající napětí a proud se potom značí  $U_{MPP}$  a  $I_{MPP}$ . Bod maximálního výkonu je důležitý pro systémy se sledovačem, které MPP sledují a řídí měnič nebo natočení modulu za sluncem tak, aby byl fotovoltaický modul co nejvíce využíván vzhledem k okamžitým podmínkám.

#### 1.6.2.4. FILL FACTOR

Fill factor  $FF$ , neboli faktor plnění, je podíl mezi maximálním výkonem a ideálním výkonem daným proudem nakrátko a napětím naprázdno.

$$FF = \frac{P_{MAX}}{U_{OC}I_{SC}} = \frac{U_{MP}I_{MP}}{U_{OC}I_{SC}} [-] \quad (14)$$

U dobrých článků se hodnoty  $FF$  pohybují kolem 0,8.  $FF$  se často udává v procentech.

#### 1.6.2.5. ÚČINNOST

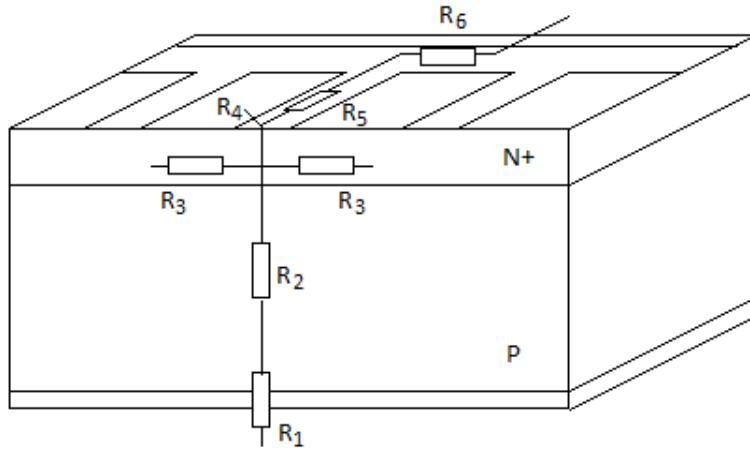
Účinnost je obecně podíl dodávaného výkonu k vstupujícímu výkonu. V případě fotovoltaického článku tomu není jinak. Vstupující výkon  $P_{IN}$  představuje osvětlení článku a jako výstupní výkon  $P_{OUT}$  uvažujeme bod maximálního výkonu.

$$\eta = \frac{P_{OUT}}{P_{IN}} = \frac{U_{MP}I_{MP}}{P_{IN}} = \frac{FFU_{OC}I_{SC}}{P_{IN}} [-] \quad (15)$$

#### 1.6.2.6 SÉRIOVÝ ODPOR

Sériový odpor  $R_s$  reprezentuje elektrické ztráty fotovoltaického článku dané odporem kontaktů a materiálu. Sériový odpor se skládá ze šesti základních částí [11]:

1.  $R_1$  - Kontakt kov - polovodič na zadním kontaktu
2.  $R_2$  - odpor materiálu báze
3.  $R_3$  - laterární odpor vrstvy typu N
4.  $R_4$  - kontakt kov - polovodič
5.  $R_5$  - odpor prstu sběrnice
6.  $R_6$  - odpor hlavní sběrnice



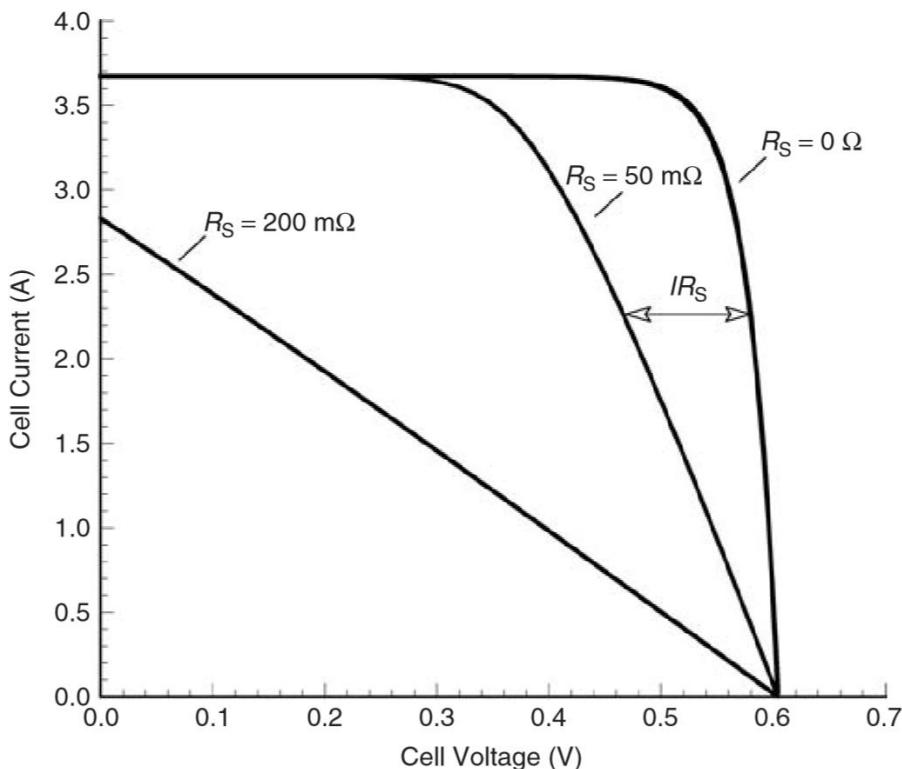
Obrázek 10 - Složky sériového odporu

Sériový odpor má značný vliv na elektrické parametry článku. Do vztahu (12) můžeme dosadit body proudu nakrátko a napětí naprázdno, získáme dva vztahy:

$$I_{SC} = I_{FV} - \left[ I_{D1} \left( \exp \left( \frac{eR_S I_{SC}}{\xi_1 kT} \right) - 1 \right) + I_{D2} \left( \exp \left( \frac{eR_S I_{SC}}{\xi_2 kT} \right) - 1 \right) \right] - \frac{R_S I_{SC}}{R_P} \quad (16)$$

$$0 = I_{FV} - \left[ I_{D1} \left( \exp \left( \frac{eU_{oc}}{\xi_1 kT} \right) - 1 \right) + I_{D2} \left( \exp \left( \frac{eU_{oc}}{\xi_2 kT} \right) - 1 \right) \right] - \frac{U_{oc}}{R_P} \quad (17)$$

Z těchto vztahů (16) a (17) je zřejmě, že sériový odpor nemá žádný vliv na napětí naprázdno a ovlivňuje tedy pouze proud nakrátko, který klesá s rostoucím  $R_S$ . Sériový odpor se tedy snažíme minimalizovat, ideální hodnotou je nula.

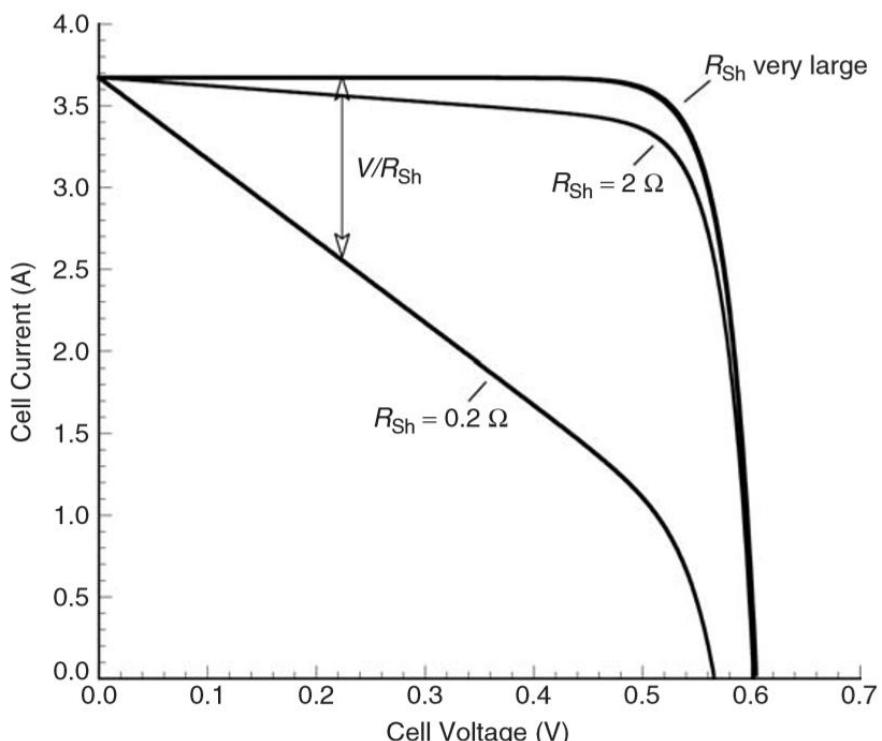


Obrázek 11 - Vliv sériového odporu na volt-ampérovou char. článku [5]

#### 1.6.2.7. PARALELNÍ ODPOR

Naroddí od sériového odporu chceme, aby paralelní odpor  $R_p$  byl co nejvyšší. Paralelní odpor je totiž způsobován vadami článku, konkrétně poruchami na okraji článku, na povrchu a v objemu.

Dominantní jsou poruchy v oblasti krajů článku. Pokud je článek v dokonalém stavu, je jeho paralelní odpor vysoký. Naopak při růstu četnosti poruch začnou ve struktuře vznikat zkraty, často nazývané můstky, a paralelní odpor klesá. Snížení paralelního odporu potom způsobí pokles napětí naprázdno, a tedy i dalších parametrů článku, jako je například fill factor nebo výkon.



Obrázek 12 -Vliv paralelního odporu na volt-ampérovou char. článku [5]

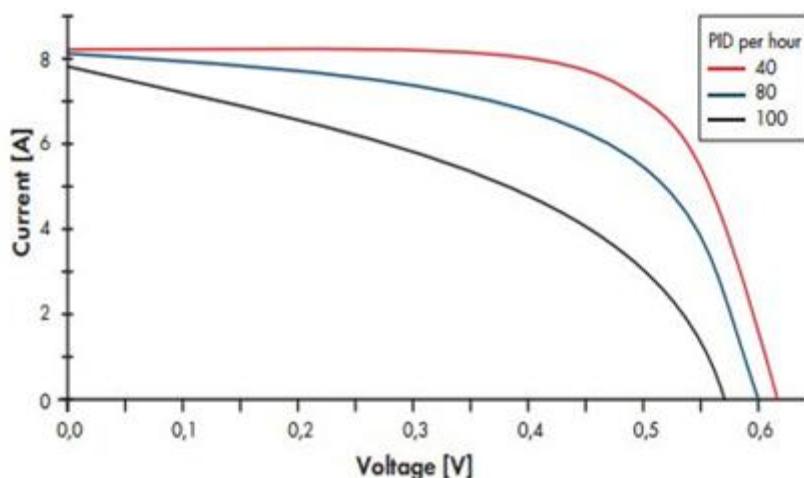
#### 1.7. ÚVOD K PID

Zkratka PID znamená "Potential Induced Degradation" neboli Potenciálem indukovaná degradace a tento jev byl poprvé popsán již v 70. letech minulého století. Dále se na PID zapomnělo a výrobci modulů společně s majiteli fotovoltaických elektráren se jím začali opět zabývat až v novém tisíciletí, kdy se začal silně projevovat u větších elektráren. Dopad PID na elektrárnu může být velmi významný, což je dáno tím, že moduly mohou díky PID ztratit v reálných podmínkách až 70% svého původního výkonu. U některých modulů navíc k této degradaci dochází rychleji a elektrárna se tak stane ztrátovou z hlediska financí.

PID je tedy degradace fotovoltaických článků. Základním předpokladem pro jeho vznik je záporný potenciál mezi modulem a zemí. PID závisí na mnoha různých faktorech, které budou jednotlivě dále probrány. Některé tyto faktory je možné ovlivnit a redukovat tak náchylnost modulu k PID, bohužel se však ukazuje, že při zvýšení odolnosti vůči PID modul nějakým způsobem vždy zhoršíme. Například jedním z hlavních faktorů PID je migrace iontů sodíku ze sodíkového skla, tyto ionty lze zachytávat v

antireflexivní vrstvě, která ale musí být patřičně upravena, a právě touto úpravou dojde ke zvýšení optických ztrát.

Na následujícím obrázku je vidět Volt-Ampérová charakteristika FV panelu při laboratorním testu na PID provedeného firmou PI-Berlin<sup>3</sup>. Jak je z grafu vidět, dochází zejména k poklesu paralelního odporu, což způsobí snížení napětí naprázdno a tedy i maximálního výkonu.



Obrázek 13: Změna volt-ampérové char. během degradace PID

## 1.8. FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ PID

PID závisí na několika různých faktorech, které se dají rozdělit do několika skupin. Konkrétně to jsou vlivy fotovoltaického systému, kde se jedná zejména o způsob uzemnění, dále vlivy fotovoltaického modulu a jeho článků a konečně prostředí, ve kterém se fotovoltaický modul nachází. Všechny tyto faktory se však uplatní pouze tehdy, pokud je na modulu záporné napětí vůči zemi. Z této skutečnosti pak vyplývá, že nejvýznamnějším faktorem pro vznik PID je systém elektrárny, konkrétně způsob uzemnění. Zmíněný záporný potenciál pak způsobuje tzv. vysokonapěťový stress vedoucí k PID.

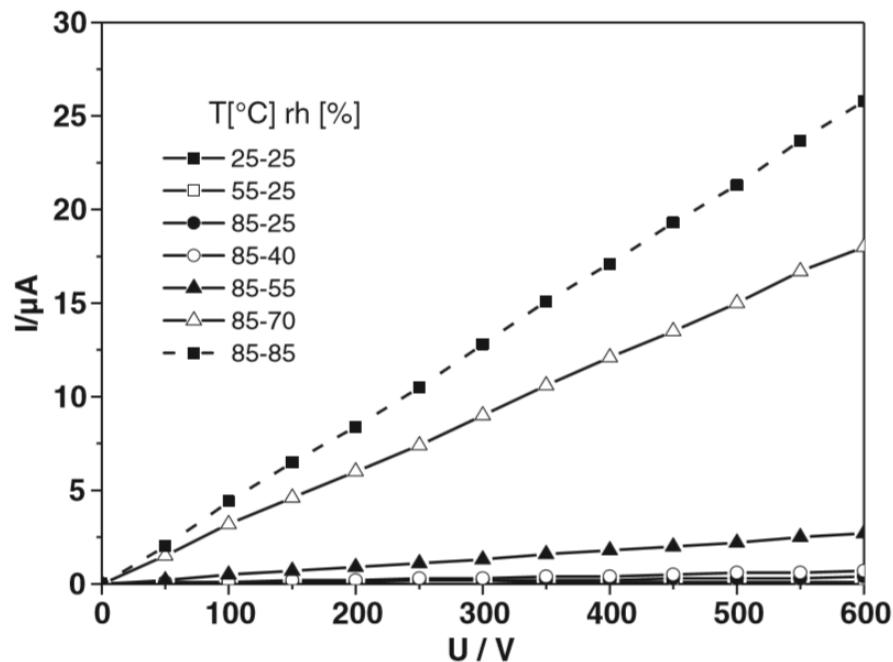
### 1.8.1. KLIMATICKÉ FAKTORY

PID je významně ovlivněn hlavně teplotou a vlhkostí, ale také například znečištěním povrchu FV modulu prachem. Všechny tyto faktory usnadňují tok svodového proudu zvyšováním vodivosti cest, kterými tento proud protéká. Svodový proud, v literatuře nazývaný "leakage current" je proud, který je způsobován právě záporným potenciálem vůči zemi, kde zem nahradí vnější povrch modulu, a to hlavně rám. Při testování PID v laboratoři lze vodivost povrchu panelu zvýšit simulací venkovních podmínek (vlhkost, teplota) nebo také pokrytím povrchu panelu vrstvou vodivého materiálu, například hliníkové fólie.

V reálných podmínkách naštěstí PID nepostupuje tak rychle jako v simulovaných podmínkách v laboratoři. I když je modul vystaven zápornému potenciálu, tak vodivost jeho povrchu je po většinu času nízká a stejně tak je nízký i svodový proud, který se ukazuje jako jeden z hlavních ukazatelů

<sup>3</sup> <https://www.pi-berlin.com/en/>

průběhu PID. Za slunného dne je svodový proud téměř nulový, naopak během deště začne narůstat a ustálí se na několikanásobně vyšší hodnotě [4]. Nejhorší jsou slunná rána po dešťové noci, kdy je povrch modulu vlhký a zároveň se začne ohřívat slunečním zářením. Obecně lze říci, že degradace probíhá většinou v kratších časových intervalech a mezi těmito intervaly může modul mírně regenerovat. Další zvýšení vodivosti povrchu panelu pak může způsobit znečištění povrchu, což se významně projeví například v přímořských oblastech, kde jsou moduly znečištěvány pískem.



Obrázek 14 - Svodový proud při různých kombinacích teplota - vlhkost [4]

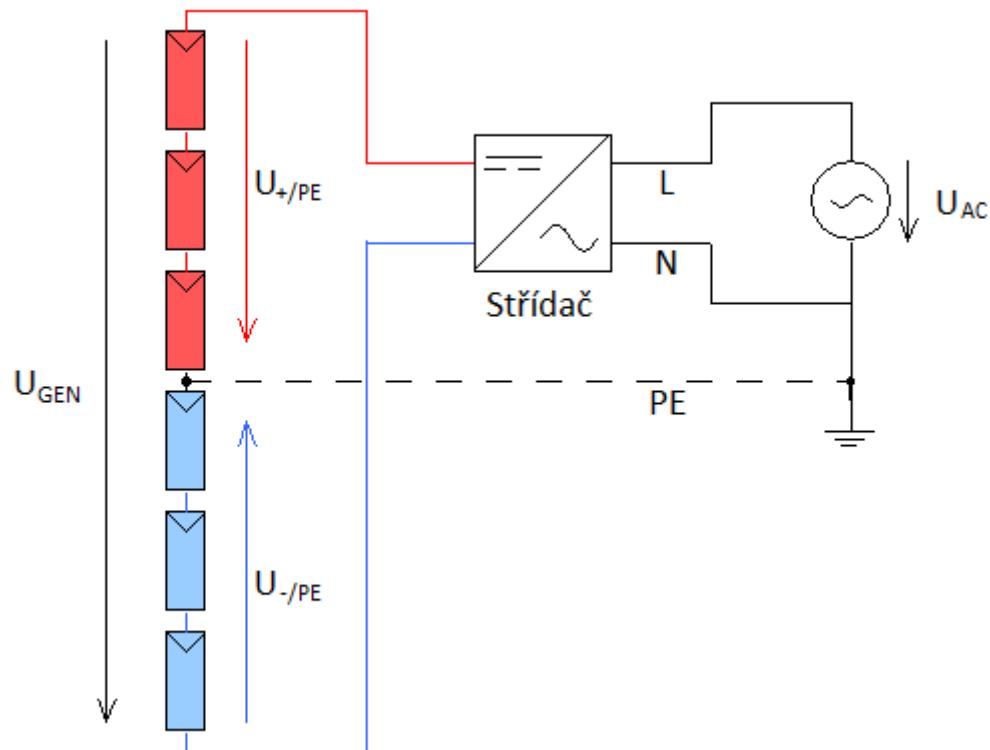
### 1.8.2. VLIV FOTOVOLTAICKÉHO SYSTÉMU

Fotovoltaickým systémem míníme hlavně počet modulů v řetězci a způsob uzemnění, který se vztahuje k typu střídače. Počet modulů v řetězci má vliv na maximální napětí, které se v řetězci objeví. Zmiňovaný střídač může být s transformátorem, což znamená, že můžeme přímo uzemnit buď kladný, nebo záporný pól. Uzemníme-li záporný pól, PID se neprojeví, protože v celém řetězci bude vůči zemi pouze kladné napětí. Naopak tomu bude při uzemnění kladného pólu, v takovém případě bude v celém řetězci napětí záporné a PID se projeví u většiny modulů, zejména u těch, na kterých bude nejvyšší hodnota napětí (záporného).

Uzemnění záporného pólu se tedy jeví jako jednoduchá obrana proti PID. Problémem však je, že drtivá většina fotovoltaických systémů využívá beztransformátorových střídačů, kde není možné přímé uzemnění. V takovém případě vzniká uprostřed řetězce bod, kde je napětí vůči zemi nulové. Na jednu stranu od tohoto bodu pak vzniká kladný potenciál, na druhou potenciál záporný [11]. Jednotlivé moduly mají navíc často z bezpečnostních důvodů přímo uzemněný rám, čímž na každém modulu vzniká cesta pro svodový proud.

Situace s beztransformátorovým střídačem je vidět na obrázku 15, kde  $U_{GEN}$  je celkové stejnosměrné napětí generované fotovoltaickými moduly v řetězci,  $U_{AC}$  je střídavé napětí na výstupu střídače.

Modrou barvou jsou pak označeny moduly se záporným potenciálem, červenou naopak moduly s kladným potenciálem.



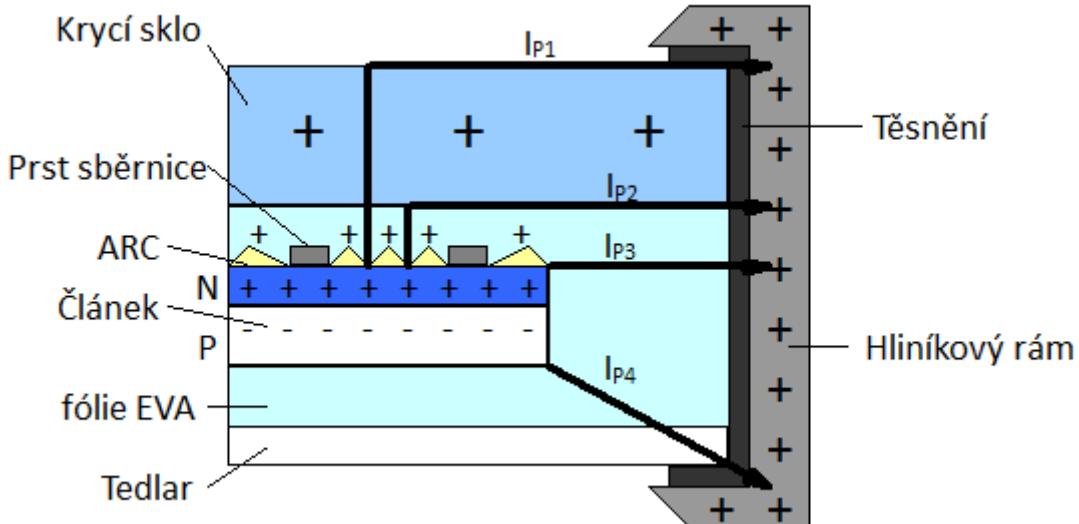
Obrázek 15 - Systém s beztransformátorovým střídačem [11]

### 1.8.3. VLIV FOTOVOLTAICKÉHO ČLÁNKU A MODULU

Vlivem článku a modulu je v tomto případě myšlen hlavně vliv použitých komponent. Typické komponenty jsou krycí fólie tedlar, ethylen vinyl acetátová fólie zvaná EVA, antireflexivní vrstva ARC a krycí sklo. Vše je potom většinou vloženo do hliníkového rámu.

Fólii tedlar uvádím zejména z důvodu, že se během používání modulu může poškodit a v takovém případě začne propouštět vlhkost dovnitř modulu, což výrazně urychlí mechanismy vedoucí k PID [11]. Nejdůležitějšími komponenty pro vznik PID jsou však krycí sklo, ARC a EVA. Tato kombinace materiálů bývá velmi rozšířená, a bez ní se modul navíc prakticky nemůže obejít. Ukázalo se totiž, že kladné ionty (typicky sodíku) obsažené ve skle vlivem záporného napětí migrují dále do struktury modulu [1]. Dostanou se tak až do vrstvy ARC a na hranici mezi ARC a fólií EVA. Naopak záporné ionty migrují ze struktury článku směrem k hliníkovému rámu. Vzniká tedy svodový proud. Celkovým důsledkem je potom pokles paralelního odporu a ztráta výkonu článku.

Situace je vidět na obrázku 16, kde je znázorněn fotovoltaický modul a čtyři různé cesty svodového proudu  $I_{P1} - I_{P4}$ , přičemž dominuje cesta  $I_{P2}$ , a to zejména pokud se dovnitř modulu dostane vlhkost [3]. Naopak v případě zvýšení vodivosti povrchu krycího skla, kde důvodem může být vlhkost nebo znečištění, může dominovat cesta  $I_{P1}$ .



Obrázek 16 - Znázornění cest svodového proudu [3]

## 1.9. METODY MĚŘENÍ FOTOVOLTAICKÉHO ČLÁNKU

V důsledku rozvoje fotovoltaiky bylo vyvinuto několik různých metod měření článků a modulů. Rozebírat všechny tyto metody však není předmětem této práce, a proto zde budou zmíněny jen ty metody, které byly následně použity v praktické části nebo jsou významné při detekci PID. Konkrétně to jsou:

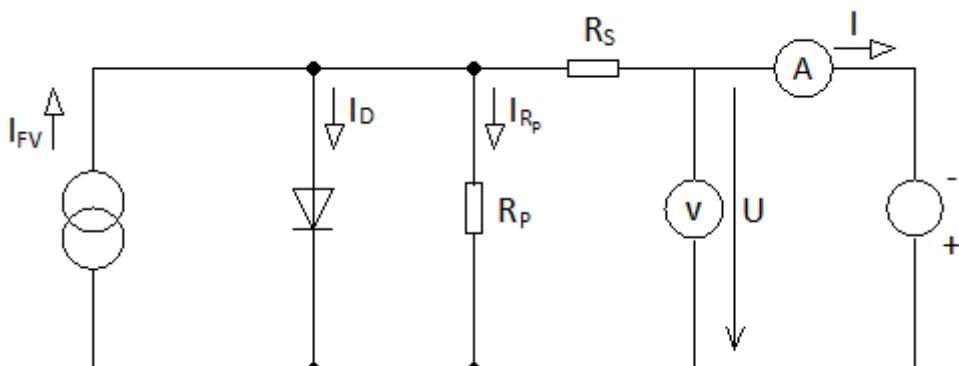
1. Měření volt-ampérových charakteristik
2. Elektroluminiscenční snímky
3. Termografické snímky
4. Měření neosvětlených článků
5. Měření závěrných charakteristik
6. Impedanční spektroskopie

### 1.9.1. MĚŘENÍ VOLT-AMPÉROVÝCH CHARAKTERISTIK

Tato metoda vychází z náhradního schématu fotovoltaického článku. V kapitole 1.6. uvádím, že chování článku lze approximovat chováním křemíkové diody, proto i volt-ampérovou charakteristiku lze měřit stejně jako charakteristiku diody s tím rozdílem, že článek měříme jako zdroj. Při měření je nutné článek zatěžovat, což je možné buď pomocí proměnného odporu, nebo s pomocí zdroje protinapětí.

Metoda se hodí pro rychlou diagnostiku článku nebo modulu a jejím výstupem jsou základní parametry, tedy napětí naprázdno  $U_{OC}$ , proud nakrátko  $I_{SC}$ , faktor plnění  $FF$ , maximální výkon  $P_{MAX}$ , účinnost  $\eta$  a paralelní a sériový odpor  $R_p$  a  $R_s$ . Nevhodou této metody je fakt, že není možné úplně přesně napodobit sluneční záření, z toho důvodu jsou dané tzv. standardní testovací podmínky  $STC$ , přičemž už při malé odchylce od této  $STC$  vznikají chyby při porovnávání jednotlivých výsledků. Zařízení pro měření této metody je instalováno na katedře elektrotechnologie na ČVUT FEL a je jednou z metod použitých v praktické části této práce.

Náhradní schéma pro měření volt-ampérové charakteristiky je vidět na obrázku 17.



Obrázek 17 - Schéma zapojení pro měření volt-ampérové charakteristiky

### 1.9.2. ELEKTROLUMINISCENČNÍ SNÍMKY

Tato metoda spočívá na jednoduchém principu. Absorbuje-li článek světelné záření, dochází díky PN přechodu k separaci nosičů náboje a článek dodává elektrickou energii. Vezmeme-li naopak článek jako spotřebič a budeme ho napájet elektrickým proudem, bude docházet k zářivé rekombinaci a článek se rozsvítí stejně jako LED dioda. Jediným problémem této metody je, že křemíkové články emitují světlo o vlnové délce přibližně 1100 nm [11], což je pro lidské oko mimo viditelné spektrum. Je tedy nutné použít kameru, která je schopna záření na této vlnové délce zaznamenat. Je možné použít kameru s podchlazeným CCD čipem, jejíž pracovní oblast ovšem končí kolem podobné vlnové délky jaká je emitována články. Dražší, ale přesnější variantou je pak *InGaAs* kamera, jejíž pracovní oblast může sahat až k vlnové délce 2,2  $\mu\text{m}$ .

Konkrétní měření potom probíhá v temné komoře. Modul napájíme proudem typicky o velikosti proudu nakrátko, přičemž běžná doba expozice je čtyřicet až padesát sekund (platí pro kamery s podchlazeným CCD čipem). U nového a plně fungujícího modulu by měly všechny články být jasné. Ztráta výkonu článků během degradace se na elektroluminiscenci projeví ztmavnutím až úplným zčernáním článků.

I zařízení pro využití této metody je instalováno na katedře elektrotechnologie na ČVUT FEL a je další metodou použitou v praktické části této práce.

### 1.9.3. TERMOGRAFICKÉ SNÍMKY

Tato metoda slouží zejména k rychlé zkoušce fotovoltaických modulů například přímo v elektrárně. Spočívá v pořizování termografických snímků pomocí termokamery, na kterých jsou v případě poruch v modulu vidět horká místa [11].

Metoda se využívá ve velké míře jako základní diagnostika fotovoltaických elektráren, a to hlavně díky své jednoduchosti a relativně nízké ceně termokamery (ve srovnání například s kamerou nutnou pro elektroluminiscenci).

Termokamera je k dispozici také na katedře elektrotechnologie na ČVUT FEL.

#### 1.9.4. MĚŘENÍ NEOSVĚTLENÝCH ČLÁNKŮ

Tato metoda má podobný průběh jako měření volt-ampérových charakteristik, článek nebo modul je napájen ze zdroje proudu a je měřen úbytek napětí. Měření je často prováděno pro různé teploty v rozmezí od pokojové teploty do sta stupňů. Výstupem je potom tzv. temná volt-ampérová charakteristika, která sice neposkytuje údaj o napětí naprázdno nebo proudu nakrátko, ale je přesnější v určování ostatních základních parametrů, což je dán faktem, že tato metoda není zatížena chybami danými nestejnými testovacími podmínkami.

Metoda je vhodná zejména pro výrobce, neboť ze získaných výsledků je možné určit budoucí chování článku a modulu v různých podmínkách, případně i odhalit chyby vznikající při výrobě [12].

Touto metodou, byť modifikovanou, lze měřit na katedře elektrotechnologie na ČVUT FEL a je jednou z metod využitých v praktické části této práce. Modifikace spočívá zejména ve způsobu napájení. Mezi články a zdroj proudu je připojena kondenzátorová baterie, přičemž na začátku měření se spustí zdroj s nastaveným proudem po dobu přibližně pěti sekund a dojde tak k nabití kondenzátorů, které se dále vybíjejí do článku nebo modulu. Měření probíhá až do doby, kdy napětí klesne pod měřitelnou hodnotu. Při měření modulu se nastavuje proud nakrátko daného modulu a napětí odpovídající maximálnímu napětí použitých kondenzátorů.

Proud protékající článkem je v tomto případě dán vztahem podobným vztahu (12), kde vypadne člen  $I_{FV}$ , jelikož článek není osvětlen, a změní se znaménka, protože je článek napájen ze zdroje jako spotřebič. Získáme vztah:

$$I = I_{D1} \left( \exp\left(\frac{e(U + R_S I)}{\xi_1 kT}\right) - 1 \right) + I_{D2} \left( \exp\left(\frac{e(U + R_S I)}{\xi_2 kT}\right) - 1 \right) + \frac{U + R_S I}{R_P} \quad (18)$$

Z této rovnice je pak možné získat zmiňované parametry. Například paralelní odpor získáme v oblasti charakteristiky s napětím 0 - 40 mV, kde převládá vliv paralelního odporu a pro malé proudy je možné zanedbat vliv sériového odporu, z rovnice (18) pak získáme zjednodušený vztah [12]:

$$I \approx \frac{U}{R_P} \quad (19)$$

Velikost paralelního odporu je tedy možné získat z naměřených hodnot pomocí approximace přímkou.

#### 1.9.5. MĚŘENÍ ZÁVĚRNÝCH CHARAKTERISTIK

Měření závěrných charakteristik je možné provádět na stejném zařízení, jako měření klasických volt-ampérových charakteristik. Pomocí závěrné charakteristiky je opět možné určit paralelní odpor  $R_P$ , podle vztahů [12]:

$$\begin{aligned} I_{DR} &= I_{D1} + I_{D2} + \frac{U}{R_P} \\ I_{DR} &\approx \frac{U}{R_P} \end{aligned} \quad (19)$$

Použití zjednodušeného vztahu (19) je možné za nižších teplot a při malých napětí, kdy převažuje vliv generačně-rekombinačního proudu nad difúzním (teplota) a dominuje vliv paralelního odporu

(napětí). Získaná hodnota paralelního odporu by měla korespondovat s hodnotami z jiných metod měření.

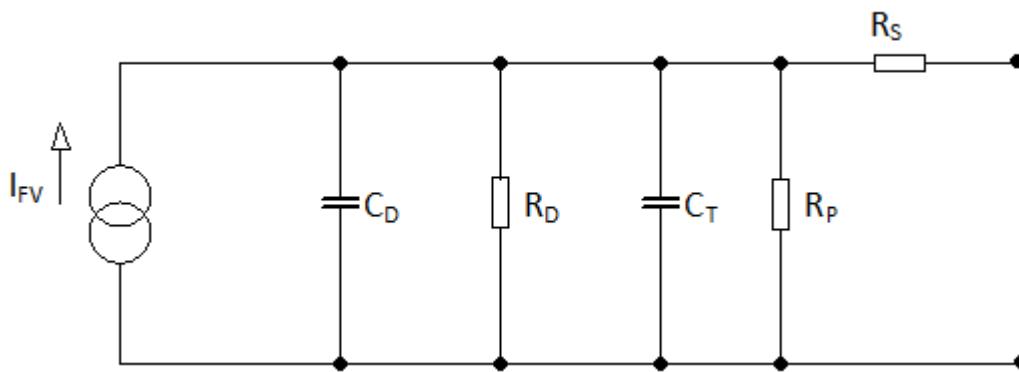
Další myšlenkou této metody je pozorování změn v kapacitě článku. Při měření závěrných charakteristik lze pozorovat špičky v blízkosti bodu maximálního výkonu. Kapacita se při klasickém měření volt-ampérové charakteristiky nabíjí, naopak při měření závěrné charakteristiky se vybíjí, což by mohlo způsobit zmíněnou špičku na charakteristice. Během degradace, kdy dochází k poruchám v PN přechodu, by pak měla tato kapacita narůstat a špičky na charakteristice by tak měly být výraznější. Tato myšlenka má základ v konzultacích a bude ověřena v praktické části této práce.

#### 1.9.6. IMPEDANČNÍ SPEKTROSKOPIE

Impedanční spektroskopie se obecně používá k charakterizování s impedancí spojených funkcí elektronického zařízení, kterým může být například i fotovoltaický článek. Pro změření je článek připojen k impedančnímu analyzátoru a je napájen sinusovým signálem napětí s maximální amplitudou několika desítek mV o různých frekvencích v rozsahu od desítek Hz až do jednotek MHz. Přístroj potom měří amplitudu a fázový posun napěťového a proudového signálu. Z naměřených hodnot jsou výsledně určeny požadované veličiny, jako jsou například kapacita  $C$ , ztrátový činitel  $D$  a reálná a imaginární složka komplexní impedance  $Z_{RE}$  a  $Z_{IM}$ .

Grafickým výstupem této metody je takzvaný "Cole - Cole diagram", což je závislost  $Z_{IM}$  na  $Z_{RE}$ . Z této závislosti je dále možné získat parametry článku jako sériový a paralelní odpor.

Problémem této metody je zejména úroveň osvětlení článku nebo modulu během měření. Při různých osvětleních budou různé i výsledky, což je dáno zejména vlastnostmi PN přechodu, jehož střídavé parametry měříme. Jde hlavně o kapacitu přechodu  $C_T$  a difúzní kapacitu  $C_D$ . Tyto kapacity totiž silně závisí na míře injekce, která závisí na generaci minoritních nosičů náboje, což v případě fotovoltaického článku znamená, že obě kapacity závisí na míře osvětlení. Pro opakovatelnost měření je tedy důležité zajistit konstantní míru osvětlení, čehož lze nejlépe dosáhnout v temné komoře.



Obrázek 18 - Dynamické náhradní schéma Fotovoltaického článku

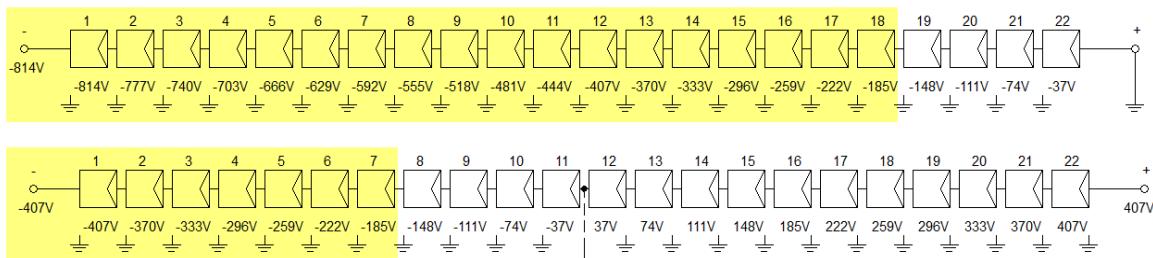
Impedanční spektroskopii lze provést na katedře elektrotechnologie ČVUT FEL a je jednou z metod použitých v praktické části této práce.

## 1.10. DIAGNOSTIKA PID U FOTOVOLTAICKÉHO MODULU

Hlavním předmětem této práce a její praktické části je vyvolání PID u fotovoltaického modulu z krystalického křemíku a měření jeho parametrů během průběhu degradace a dále pak pokus o léčbu. Experiment by měl vést k určení metod, které se typicky v diagnostice nepoužívají, ale mohly by být vhodné k odhalení PID. Typické metody diagnostiky fotovoltaických modulů totiž jsou zejména pořizování termografických snímků a měření volt-ampérových charakteristik při standardních testovacích podmínkách.

Obě tyto metody odhalí pokles výkonu modulu nebo jeho jednotlivých článků. PID se ale může projevit už dřív, konkrétně by mohl způsobovat změny v kapacitě článků, což ukazuje na vznikající poruchy v PN přechodu vedoucí dále k poklesu paralelního odporu a následnému poklesu výkonu.

Typickým postupem určení probíhající degradace PID je tedy odhalení poklesu výkonu nebo přehřívajících se článků u jednotlivých modulů. Jak již bylo řečeno v části 1.8.2., PID se nejvýrazněji projeví na modulech vystavených vysoké hodnotě záporného potenciálu, tedy vždy na kraji řetězce. Na základě polohy modulu v řetězci a míře degradace se tedy často určuje, zda se jedná o PID nebo jiný druh degradace.



Obrázek 19 - Znázornění možných PID degradujících modulů [11]

Na obrázku je znázorněna situace řetězce s přímo uzemněným kladným pólem (nahoře) a řetězce s beztransformátorovým střídačem (dole). Žlutě jsou pak označeny moduly, na kterých je dostatečné napětí, aby se u nich projevil PID. Hodnota napětí navíc stoupá směrem od nulového potenciálu ke kraji řetězce, což znamená, že moduly blíže kraji budou degradovat rychleji [11]. Uzemněný kladný pól je zde jen pro znázornění a v reálných situacích se nepoužívá. Situace s beztransformátorovým střídačem je naopak typická a jak je vidět, je také náchylná k PID.

### 1.10.1. DIAGNOSTIKA V LABORATOŘI

V dnešní době majitelé fotovoltaických elektráren často posílají moduly do laboratoří na diagnostiku, kde se potom nejčastěji provádí měření volt-ampérové charakteristiky při standardních testovacích podmínkách *STC*, což může vést k odhalení poklesu výkonu. Na základě metod z částí 1.8.2. a 1.10. pak lze odhadnout, zda je přičinou poklesu výkonu PID. Přesnější je však sledovat vybrané moduly dlouhodobě, pak lze PID potvrdit nebo vyvrátit na základě chování paralelního odporu  $R_p$ . Další typicky používanou metodou diagnostiky je elektroluminiscence. Málo používanými metodami jsou pak metoda měření temných charakteristik a impedanční spektroskopie, jejichž možnost využití bude zkoumána v praktické části této práce.

Nevýhodou diagnostiky v laboratoři je nutnost převozu fotovoltaických modulů. Z hlediska velkých elektráren je technicky nemožné měřit tímto způsobem všechny moduly. Navíc v případě tenkovrstvých modulů je převoz poněkud riskantní, neboť takovéto moduly často nemají vnější rám a snadno se poškodí. Je tedy třeba diagnostikovat a měřit mimo laboratoř.

#### 1.10.2. DIAGNOSTIKA MIMO LABORATOŘ

Nejpoužívanějším způsobem diagnostiky fotovoltaických polí je již zmínované pořizování termografických snímků, které v případě degradujících panelů odhalí přehřívající se místa vlivem vzrostlého ztrátového výkonu a ohřevu od slunečního záření, které v důsledku degradace není přeměněno v elektrickou energii. Tento způsob diagnostiky je rychlý a levný, zda se jedná o PID se opět určí na základě míry degradace v řetězci.

Další možnosti diagnostiky jsou mobilní laboratoře, které využívají metod zmíněných v předchozí části 1.10.1. Nevýhodou zůstává nutnost manipulace s moduly, zejména pak potřeba demontáže.

### 1.11. PID U TENKOVRSTVÝCH MODULŮ

PID je většinou zkoumán a popisován u modulů z krystalického křemíku. Důvodem je zejména fakt, že u tenkovrstvých modulů používaných v reálných podmírkách se zatím PID neprojevuje. Neznamená to však, že jsou tenkovrstvé moduly proti PID úplně imunní, v laboratoři lze degradaci vyvolat stejně jako u krystalických modulů.

U modulů z krystalického křemíku je hlavním ukazatelem PID pokles paralelního odporu  $R_p$  a urychlení rekombinačních procesů v oblasti PN přechodu. Hlavní příčinou PID je potom migrace iontů alkalických kovů, například sodíku. Průběh a rychlosť degradace jsou dány použitými komponenty, jako jsou krycí sklo, typ zapouzdření, antireflexivní vrstva a další. Yamaguchi a kolektiv [8] provedli experiment na tenkovrstvých modulech typu  $Cu(In, Ga)Se_2$ , zvaných CIGS. Ukázali, že u CIGS modulů lze PID vyvolat v laboratoři a popsali vliv komponent na průběh degradace. Na rozdíl od c-Si modulů po degradaci jen mírně klesá paralelní odpor  $R_p$ , dále mírně roste sériový odpor  $R_s$ . Hlavním ukazatelem PID u CIGS modulů je pak urychlení rekombinačních procesů, pokles napětí naprázdno  $U_{oc}$  a pokles faktoru plnění  $FF$ . Ukazatel urychlení rekombinace je pak zejména diodový faktor  $\xi$ , který po degradaci vzrostl z 1,4 na 9, což vysvětluje Steingrubeho model. Diodový faktor větší než 2 je dán rekombinací v místech s vysokou koncentrací poruch a objevuje se také u c-Si modulů [8].

I u CIGS modulů jsou tedy hlavní příčinou PID ionty alkalických kovů migrující z krycího skla a stejně jako u c-Si modulů lze PID zrychleně vyvolat v laboratoři aplikací vysokého napětí a zvýšené teploty. Obranou proti PID může být použití skla neobsahujícího ionty alkalických kovů nebo použití zapouzdření s vysokým elektrickým odporem. Rozdílem je vliv vlhkosti, ta u tenkovrstvých modulů způsobuje elektrickou korozi vrstvy transparentního vodivého oxidu  $TCO$ , což je také důvod, proč není PID u tenkovrstvých modulů pozorován v reálných podmírkách. PID je totiž téměř vždy spojen s vlhkostí a v případě tenkých vrstev pak nelze rozlišit PID od elektrické koroze.

## 1.12. METODY LÉČENÍ

PID může být zvratný i nezvratný. Nezvratná degradace typicky vzniká elektrochemickými reakcemi, které způsobují korozi a jedná se zejména o fotovoltaické moduly s tenkovrstvou technologií, kde koroduje vrstva TCO vlivem vlhkosti. Zvratná degradace je naopak typická pro c-Si moduly a je způsobena hlavně polarizací povrchu modulu. Takové moduly lze takzvaně "léčit" tak, že způsobíme opačnou polarizaci a vyvoláme tak opačný průběh PID, čímž dosáhneme návratu nebo přiblížení k původním hodnotám parametrů modulu. Proces léčby modulu lze urychlit stejným způsobem jako proces degradace, tedy pomocí vlhkosti nebo teploty.

Je zjevné, že léčení modulu po jednom je vhodné v laboratorních podmínkách, v podmínkách provozu FV elektrárny však neekonomické. Hodí se však znít, že PID lze zvrátit působením opačného potenciálu k tomu, který PID vyvolal. Tím je záporný potenciál, což znamená, že potřebujeme na modul působit potenciálem kladným. Toho lze dosáhnout i v celém fotovoltaickém systému najednou, konkrétně dvěma způsoby [3]. Způsoby se nazývají "Solid ground" a "Potential shift" ("Přímé uzemnění" a "posun potenciálu") a oba spočívají v posunu potenciálu na všech modulech v řetězci do kladných hodnot. V případě "Solid ground" je na prvním modulu v řetězci nulový potenciál a dále roste. U "Potential shift" je pak na prvním modulu kladný nenulový potenciál a opět dále v řetězci roste. Takovéto systémy jsou pak schopny regenerovat nebo alespoň minimalizovat vliv PID. Je nutné poznamenat, že čas potřebný k regeneraci (stejně jako čas potřebný k degradaci) závisí nejen na potenciálu, ale také na klimatických podmínkách jako jsou vlhkost a teplota. Dále je důležité si uvědomit, že takovéto systémy během dne degradují, tedy dochází k migraci kladných iontů směrem z krycího skla do struktury článků. Naopak během noci regenerují, tedy opět dochází k migraci iontů, tentokrát opačným směrem. Z dlouhodobého hlediska zatím není jasné, zda tento proces migrujících iontů nebude mít na moduly nějaký další vliv.

## 2. PRAKTIČKÁ ČÁST

### 2.1. ÚVOD

Předmětem této části práce je popsat provedený experiment, tedy umělé vyvolání a léčbu PID u fotovoltaického modulu z krystalického křemíku. Cílem experimentu je pak zejména určení metod měření vhodných k diagnostice PID. K měření bylo použito celkem pět metod, konkrétně měření volt-ampérových charakteristik, elektroluminiscence, měření závěrných charakteristik, měření neosvětlených článků a impedanční spektroskopie. Z těchto metod se v běžné praxi k diagnostice typicky používají pouze první dvě.

### 2.2. POSTUP MĚŘENÍ

Průběh degradace a později léčby byl měřen pro celý modul, ale také pro dva samostatné články, které byly nakontaktovány ze zadní strany modulu. Pomocí brusného kotouče byla vždy odstraněna část zadní strany modulu a následně byl ke sběrnicím každého článku připájen měděný pásek. Od každého pásku pak vedou dva vodiče ke svorkovnici uchycené na hliníkovém rámu modulu umožňující čtyřbodové měření. Situace je vidět na obrázcích v příloze této práce.

Během měření byl kladen důraz na dodržení stejných podmínek, zejména pak stejné teploty modulu. Důvodem je fakt, že mezi jednotlivými měřeními byly několikadenní intervaly degradování, respektive léčení modulu. Před každým měřením byl tedy modul umístěn v laboratoři vytopené na 25 stupňů Celsia, kde byl vždy nejméně dvě hodiny, aby se jeho teplota ustálila na teplotě okolí. Všechna měření probíhala na katedře elektrotechnologie ČVUT FEL.

Samotná degradace byla uskutečněna pomocí zdroje vysokého napětí realizovaného ze tří sekcí sériově spojených kondenzátorů, přičemž každá sekce je napájena z vlastního transformátoru. Zdroj je schopen dodávat napětí až 2 kV. V případě degradace bylo napětí přivedeno na modul tak, že kladný pól by připojen na rám a záporný pól na kontakty modulu. V případě léčby se pouze obrátila polarita. Napětí bylo nejprve nastaveno zhruba na 550 V, následně po změření prvních výsledků byla tato hodnota změněna na 715 V. Pro urychlení degradace nebo léčby byl modul překryt hliníkovou fólií, která na modulu držela díky elektrostatické síle. Jednotlivé intervaly degradace nebo léčby jsou vidět v tabulce:

Zdroj zap.	Zdroj vyp.	Napětí [V]	Polarita	Čas [hod]	Čas celk. [hod]
22.3. 8:30	24.3. 8:00	537	+ na rám	47,5	47,5
24.3. 13:00	27.3. 13:00	715	+ na rám	72	119,5
28.3. 11:00	30.3. 11:00	715	+ na rám	48	167,5
31.3. 10:30	3.4. 13:00	715	+ na rám	74,5	242
6.4. 9:00	10.4. 15:00	715	+ na rám	102	344
18.4. 8:00	21.4. 8:00	715	- na rám	72	72
21.4. 15:00	27.4. 15:00	715	- na rám	144	216
28.4. 16:30	4.5. 16:30	715	- na rám	144	360

Mezi každými dvěma intervaly z tabulky byla provedena série měření vždy ve stejném pořadí pro eliminování chyby způsobené možným ohřevem modulu například při měření elektroluminiscence, kdy modulem protéká proud nakrátko po dobu padesáti vteřin. Před prvním intervalom degradace

byl také změřen výchozí stav modulu, a to zejména proto, že modul byl již dříve použit k jiným experimentům. Nebyl tedy v takovém stavu, aby jeho parametry odpovídaly původním parametrům uvedeným od výrobce. Získané výsledky a použité přístroje budou dále rozebrány zvlášť pro každou použitou metodu.

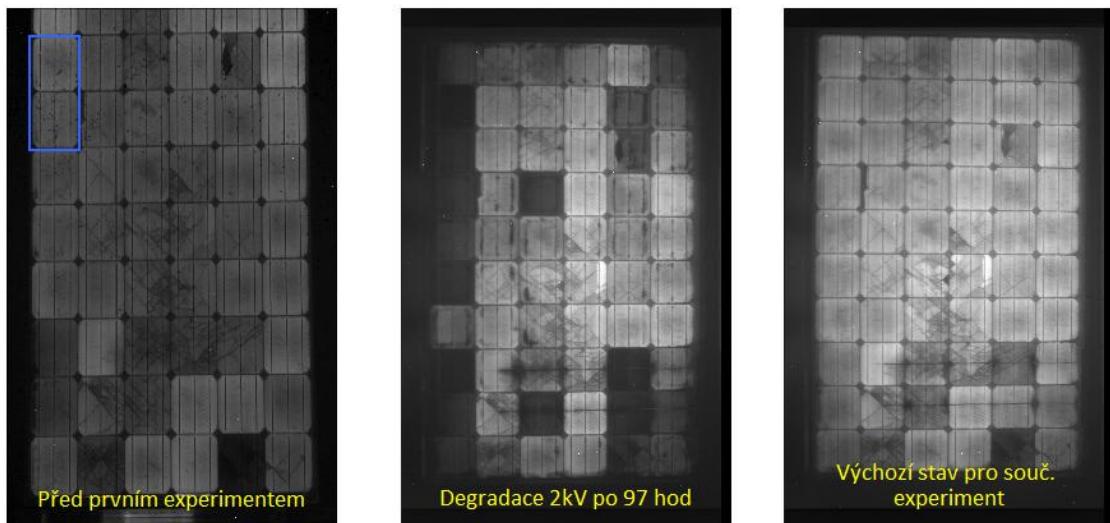
### 2.3. POUŽITÝ MODUL

Experiment byl změřen na modulu firmy CEEG (Shanghai) Solar Science & Technology Co., Ltd

Typ Modulu:	SST250-60M
Maximální výkon $P_{MAX}$	250 W
Napětí v bodě maximálního výkonu $U_{PM}$	30,1 V
Proud v bodě maximálního výkonu $I_{PM}$	8,31 A
Napětí naprázdno $U_{OC}$	37,3 V
Proud nakrátko $I_{SC}$	8,78 A
Tolerance $P_{MAX}$	±3 %
Váha	20 Kg
Rozměry	1640x990x50
Sériové číslo	SST2101016666

V příloze jsou uvedeny fotky modulu včetně detailu nakontaktování jednotlivých článků.

Vzhledem k faktu, že modul byl dříve již použit k experimentům týkajícím se PID, uvádíme zde tři elektroluminiscenční snímky. Vlevo je stav modulu před prvním experimentem, který proběhl dříve a jeho pozůstatkem jsou dva měděné pásky v dolní části modulu, což je také důvod, proč jsme pro měření vybrali články právě v opačné, tedy vrchní, části modulu. Snímek uprostřed je stav po degradaci napětím o výši 2 kV a poslední snímek vpravo je výchozí stav pro experiment v rámci této práce, který byl dosažen vyléčením zdegradovaného modulu pomocí PID eliminátoru firmy Dukom.



Obrázek 20 - Stavy použitého modulu před experimentem

Na snímku vlevo jsou navíc vyznačeny články měřené v tomto experimentu, označované jako článek 01 (nahoře ve dvojici) a článek 02 (dole ve dvojici).

## 2.4. ZÍSKANÉ VÝSLEDKY

Vzhledem k velkému množství naměřených dat není možné je zde uvádět, proto u každé z použitých metod uvádím pouze měřené závislosti zpracované pomocí softwaru MATLAB<sup>4</sup>. Metody budou uvedeny ve stejném pořadí, ve kterém byly měřeny a grafy jsou vždy v pořadí pro Modul, článek 01 a článek 02. V rámci každé metody nejprve konstatuji výsledky po degradaci, tedy od výchozího stavu k nejhoršímu stavu a následně výsledky po léčení, kde je vždy výchozí stav, stav po degradaci a výsledky získané během léčení.

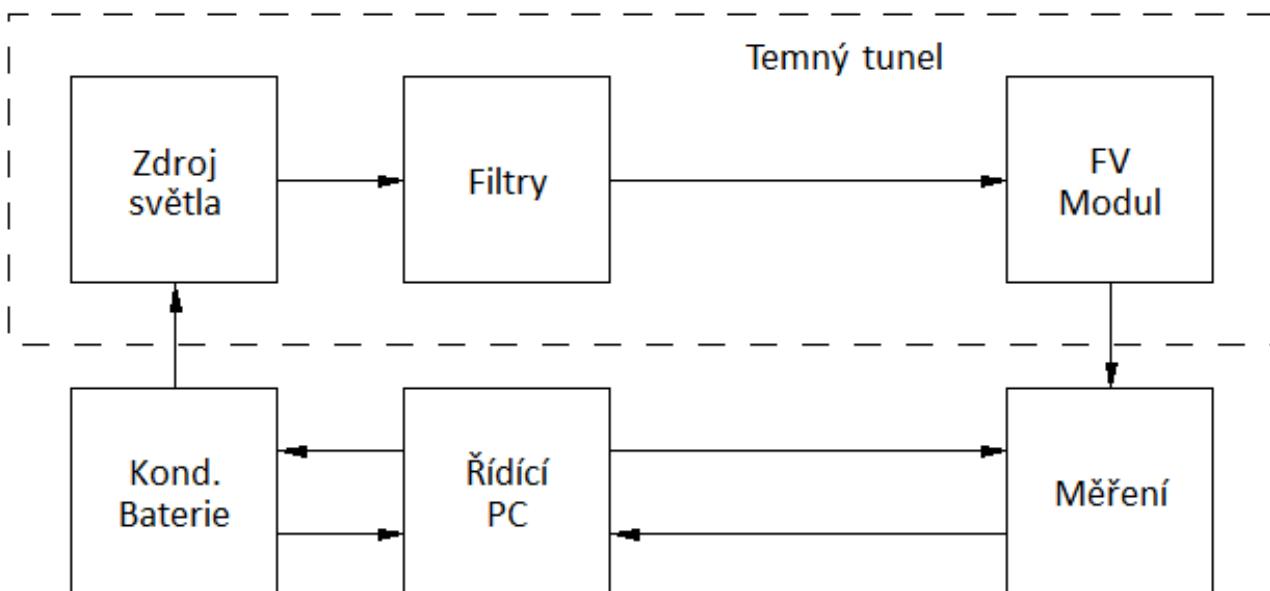
### 2.4.1. MĚŘENÍ VOLT-AMPÉROVÝCH CHARAKTERISTIK

Tato metoda je měřena automaticky pomocí systému *PASAN measurement systems* a jejím výstupem jsou kromě volt-ampérových charakteristik také základní parametry fotovoltaických článků získané právě z těchto charakteristik. V rámci zpracování výsledků této metody jsem tedy také sledoval jednotlivé parametry, a to zejména jejich změnu vůči výchozímu stavu. Tyto výsledky jsou postupně uváděny v tabulkách v této kapitole a jednotlivé parametry jsou také vyneseny do grafu v závislosti na čase.

#### 2.4.1.1. ELEKTRICKÉ SCHÉMA

V případě této metody je elektrické schéma shodné se schématem uvedeným v teoretické části na obrázku 17.

#### 2.4.1.2. BLOKOVÉ SCHÉMA



Obrázek 21 - Blokové schéma měření volt-ampérových charakteristik

<sup>4</sup> <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>

Na řídícím PC je instalován software *PASAN SLAB tester*, s jehož pomocí probíhá měření. Software řídí kondenzátorovou baterii a indikuje její nabití. Baterie je následně vybita do zdroje světla (xenonová výbojka), které pak vyzáří krátký světelný pulz. Během tohoto pulzu je změřena charakteristika modulu. Vzhledem ke krátkému světelnému pulzu se tato metoda často nazývá "Flash test".

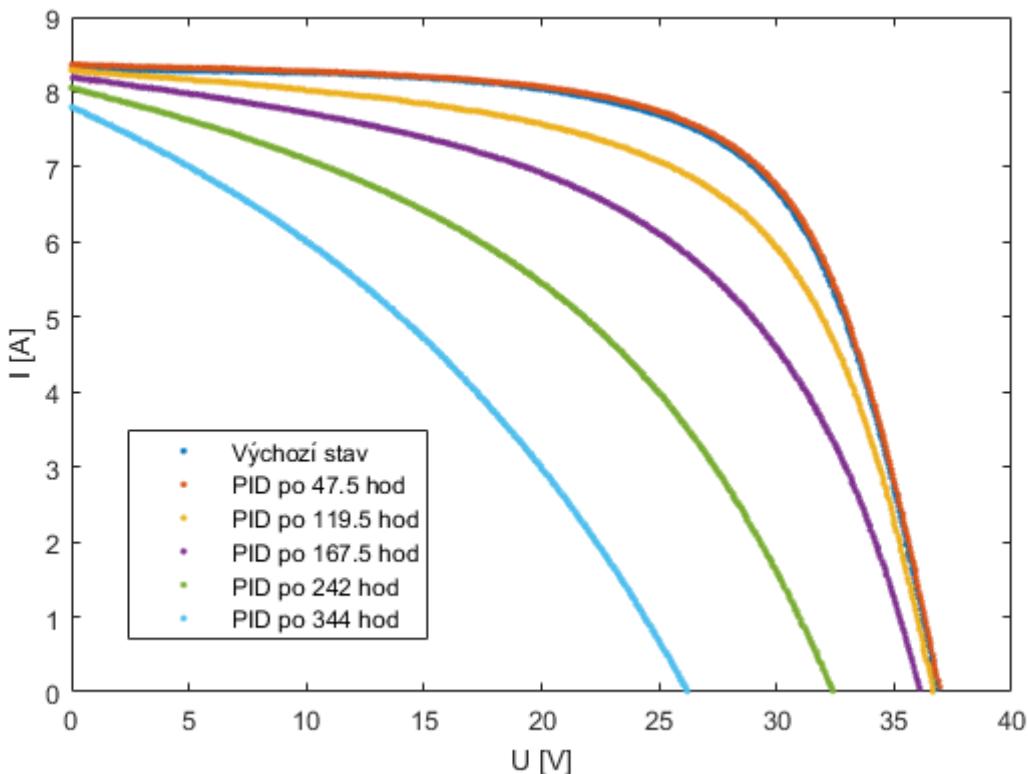
#### 2.4.1.3. POUŽITÉ PŘÍSTROJE

V tomto případě je celý systém sestaven a dodán firmou *Meyer Burger*<sup>5</sup> a podrobné schéma systému je uvedeno v příloze. Rozšířené nejistoty měření ( $k_r = 2$ ) tohoto systému se pohybují v rozmezí dvou až šesti procent podle veličiny a měřeného modulu.

#### 2.4.1.4. VÝSLEDKY

Výsledky získané v této části odpovídají předpokladům uvedeným v teoretické části, konkrétně potvrzují zejména pokles napětí naprázdno  $U_{OC}$  a paralelního odporu  $R_p$ , což vede k výraznému poklesu maximálního výkonu  $P_{MAX}$  a faktoru plnění  $FF$ .

Na grafu 1, 2 a 3 je postupná změna volt-ampérových křivek, přičemž křivky z prvních dvou měření, tedy křivka výchozího stavu a křivka po prvním degradačním intervalu, téměř splývají.

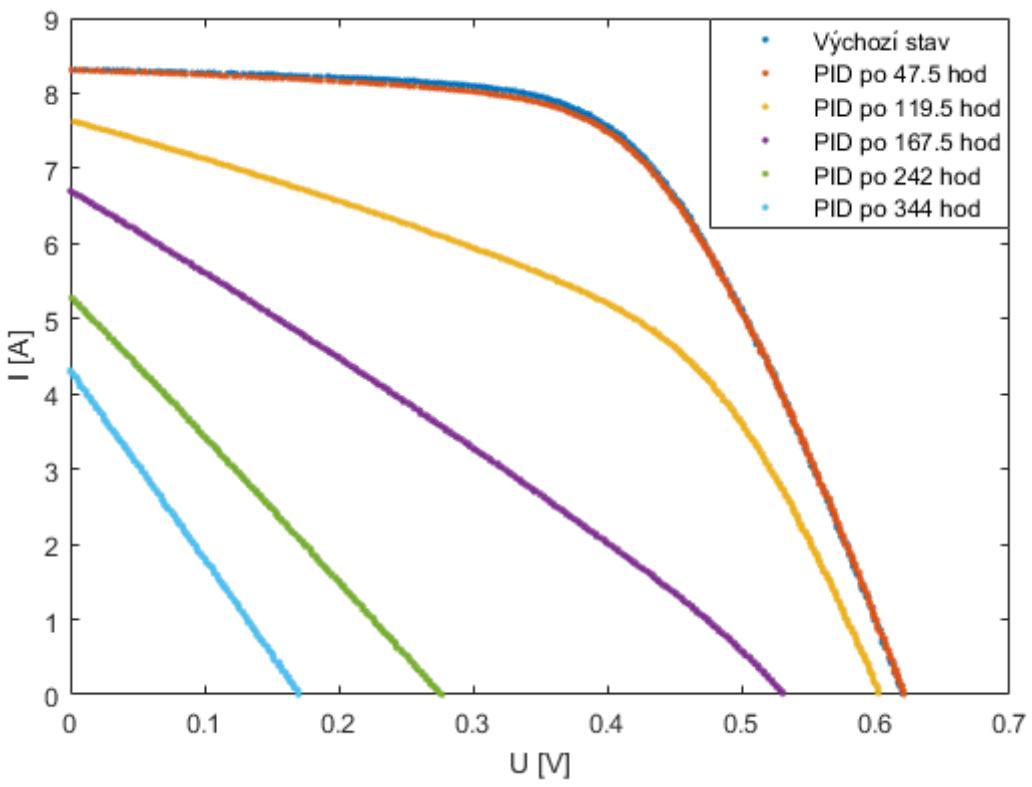


Graf 1 - volt-ampérové charakteristiky celého modulu během degradace

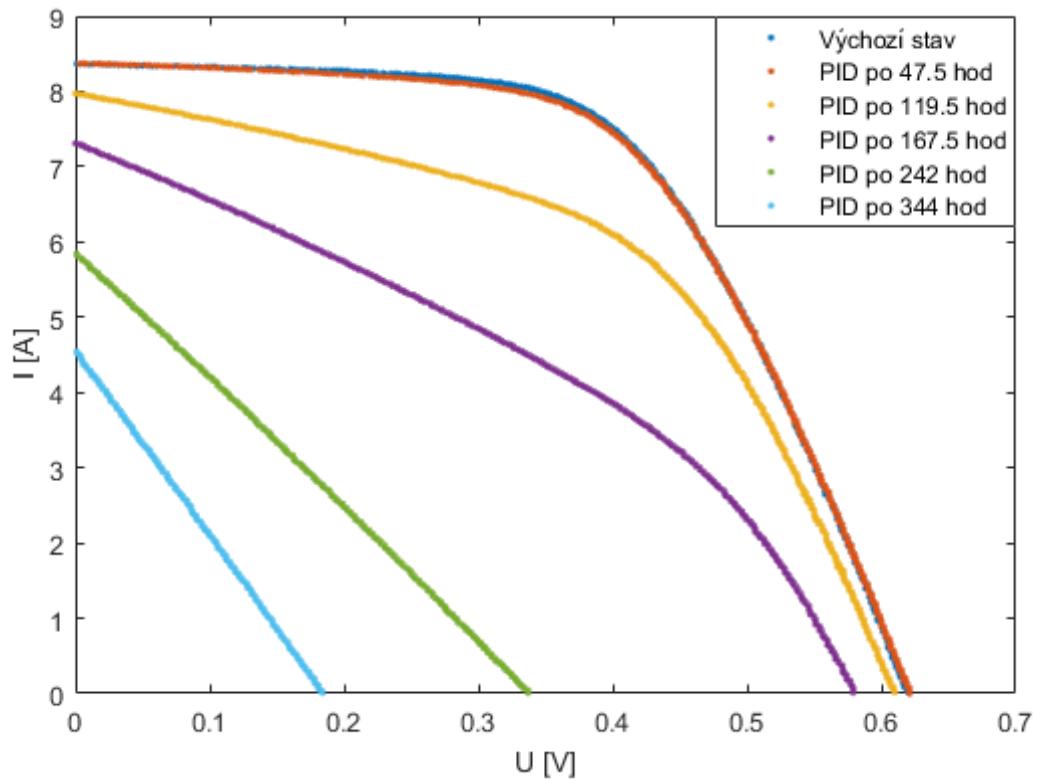
V případě článků je posuv charakteristiky mnohem výraznější, což je dáno tím, že oba měřené články během degradace naprostě ztratily některé ze svých parametrů. Je vidět, že důsledkem degradace klesl kromě napětí naprázdno  $U_{OC}$  také proud nakrátko  $I_{SC}$ , a to zhruba na polovinu původní hodnoty. Charakteristika obou článků přešla během degradace v přímku. Dále je také patrné, že článek 01

<sup>5</sup> <https://www.meyerburger.com/ch/en/>

degradoval o něco rychleji než článek 02, tento fakt je viditelný zejména na třetím a čtvrtém měření (v grafu žlutá a fialová barva), kde se charakteristika prvního článku mnohem rychleji přibližuje přímce.

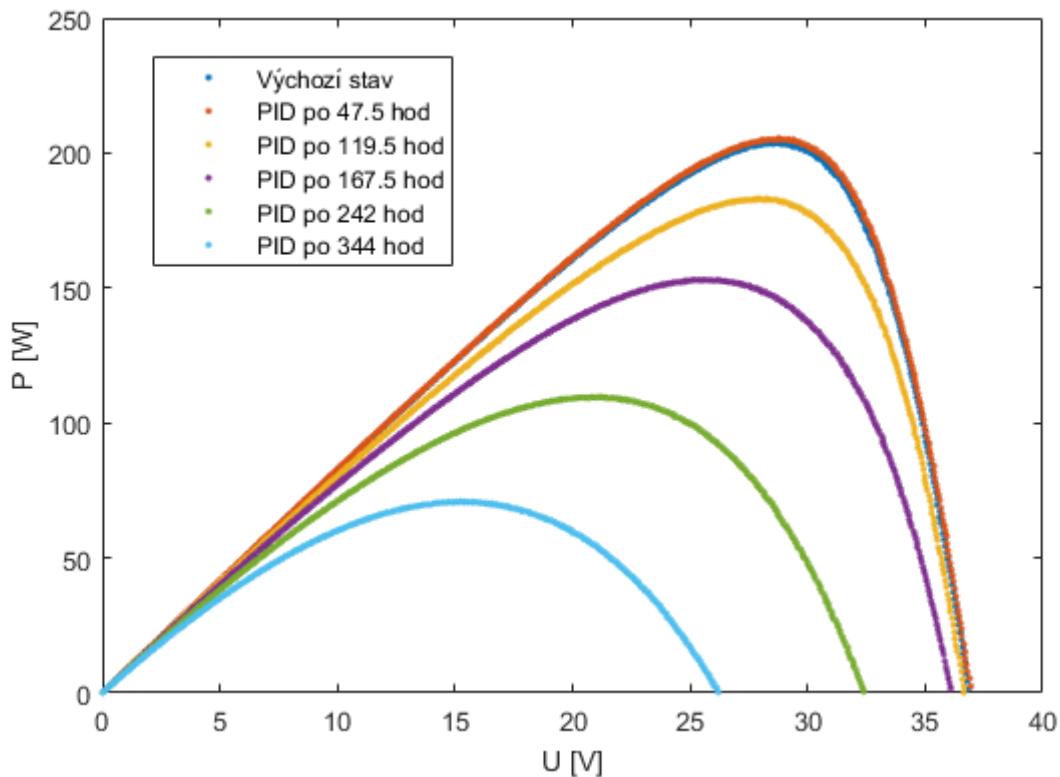


Graf 2 - volt-ampérové charakteristiky článku 01 během degradace

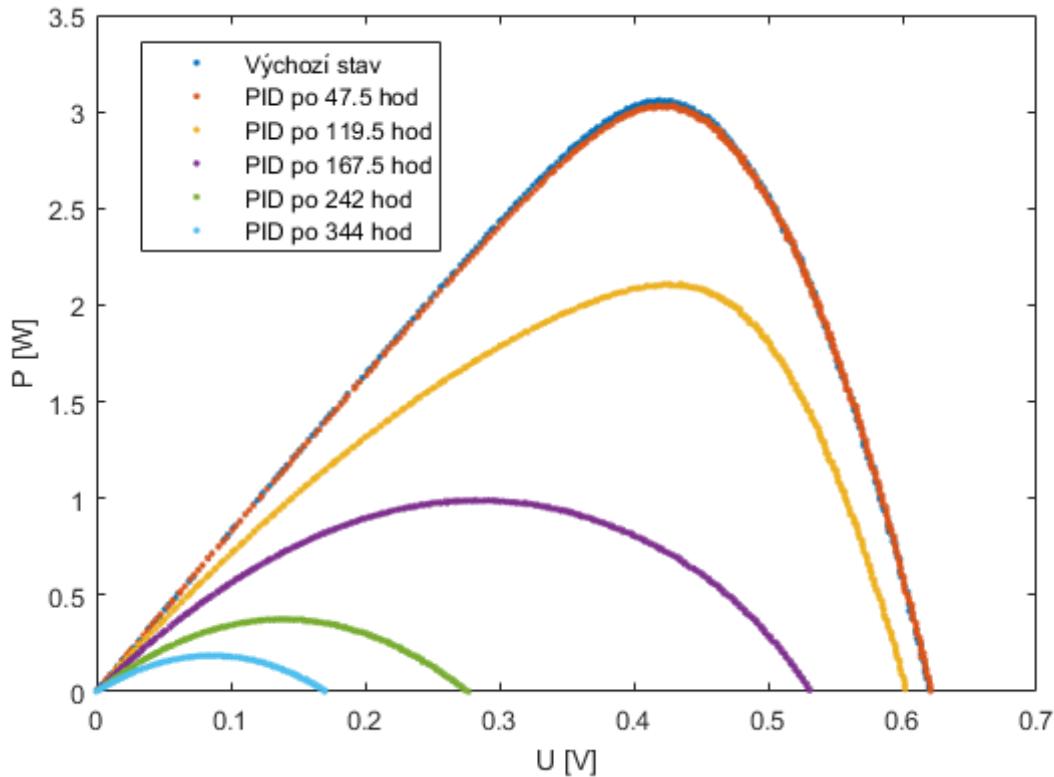


Graf 3 - volt-ampérové charakteristiky článku 02 během degradace

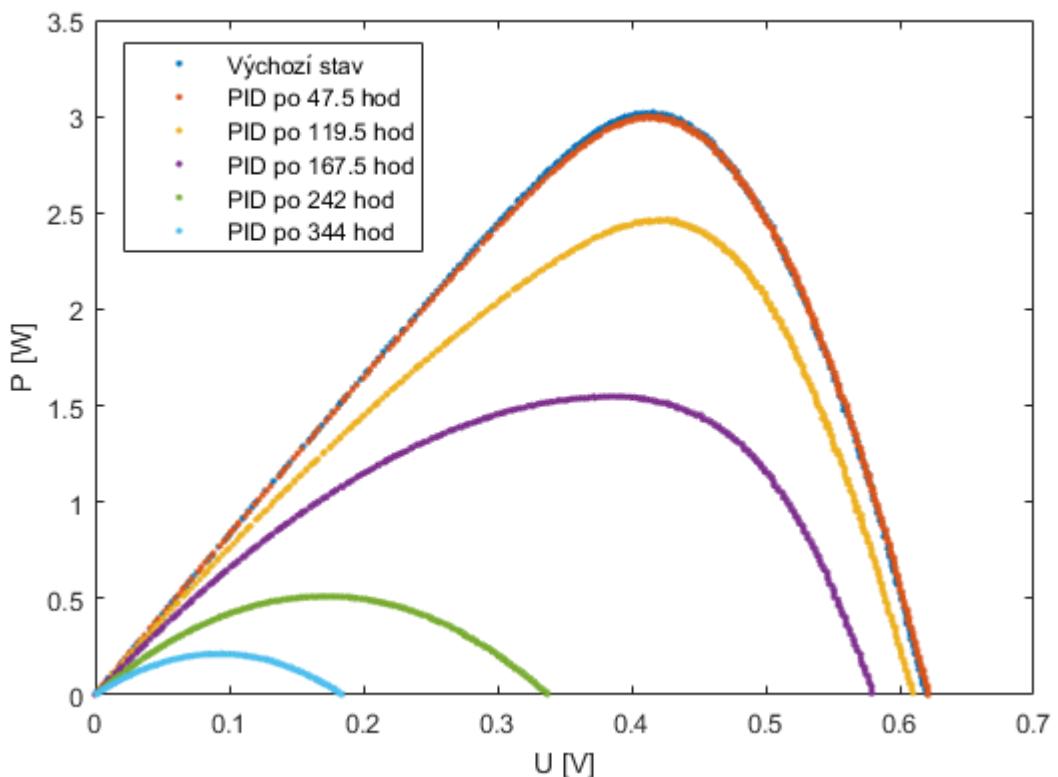
Dále na grafech 4, 5 a 6 jsou zobrazeny výkonové křivky modulu a jednotlivých článků, které korespondují s naměřenými charakteristikami.



Graf 4 - Závislosti výkonu na napětí celého modulu během degradace



Graf 5 - Závislosti výkonu na napětí článku 01 během degradace



Graf 6 - Závislosti výkonu na napětí článku 02 během degradace

Ze získaných grafů je možné říct, že celý modul a oba články během degradace ztrácejí výkon, všude se také projevil pokles napětí naprázdno  $U_{OC}$  a u článků se navíc ukázalo, že degradace se později začne projevovat i poklesem proudu nakrátko  $I_{SC}$ . Parametry, které lze touto metodou získat, jsou dále uvedeny v tabulkách společně s jejich celkovou změnou během degradace, kde znaménko plus znamená nárůst a znaménko mínus znamená pokles parametru.

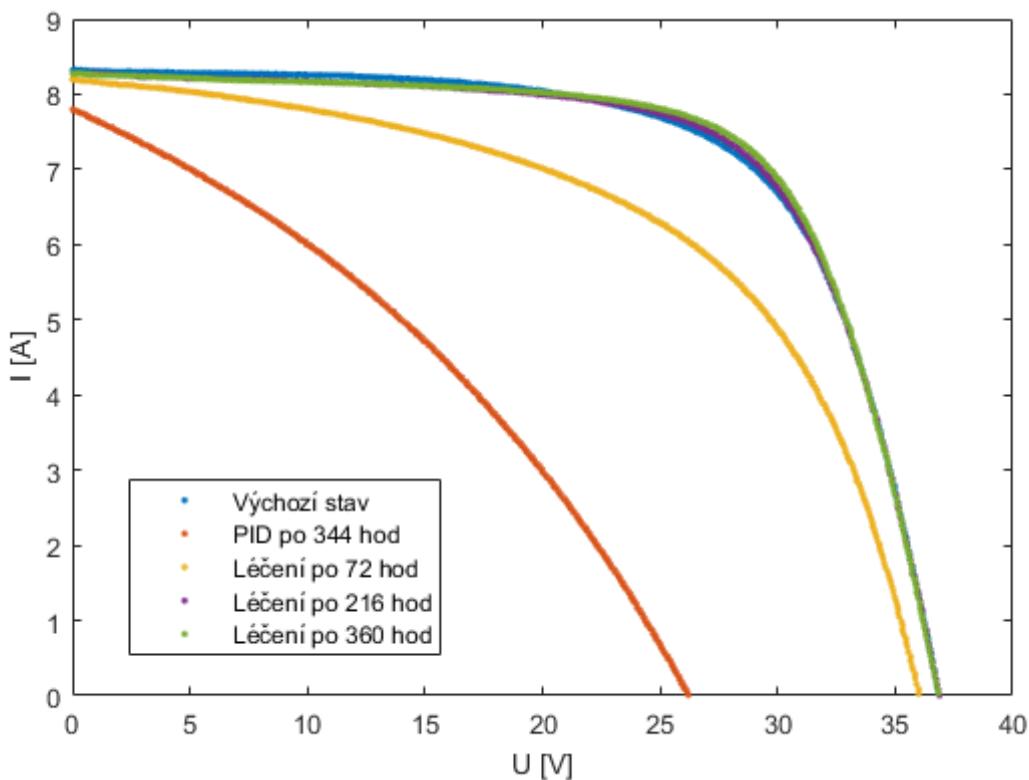
Modul						
$P_{MAX}$ [W]	$R_P$ [ $\Omega$ ]	$R_S$ [ $\Omega$ ]	$\eta$ [%]	FF [%]	$U_{OC}$ [V]	$I_{SC}$ [A]
203,663	146,5	0,684	12,56	66,35	36,895	8,319
205,346	106,3	0,683	12,66	66,40	36,990	8,361
182,969	36,1	0,735	11,28	60,09	36,694	8,298
152,962	20,0	0,958	9,43	51,47	36,165	8,218
109,454	10,5	1,518	6,75	41,74	32,454	8,081
70,749	5,9	1,887	4,63	34,39	26,259	7,834
celková změna parametru [%]						
-65,26	-95,97	175,88	-63,14	-48,17	-28,83	-5,83

V případě modulu je vidět dominující pokles paralelního odporu  $R_P$ , ale také téměř dvojnásobný nárůst sériového odporu  $R_S$ . V případě článků je pak navíc velmi výrazný pokles napětí naprázdno  $U_{OC}$  a proudu nakrátko  $I_{SC}$  vedoucí téměř k úplné ztrátě výkonu.

Článek 01						
P <sub>MAX</sub> [W]	R <sub>P</sub> [ $\Omega$ ]	R <sub>S</sub> [ $\Omega$ ]	$\eta$ [%]	FF [%]	U <sub>OC</sub> [V]	I <sub>SC</sub> [A]
3,051	1,9	0,022	12,54	59,01	0,621	8,320
3,028	1,3	0,022	12,44	58,52	0,622	8,317
2,105	0,2	0,025	8,65	45,51	0,604	7,658
0,988	0,1	0,059	4,10	27,58	0,534	6,711
0,373	0,1	0,051	1,53	25,49	0,276	5,299
0,186	0,0	0,039	0,76	25,15	0,171	4,310
celková změna parametru [%]						
-93,90	-100,00	77,27	-93,94	-57,38	-72,46	-48,20

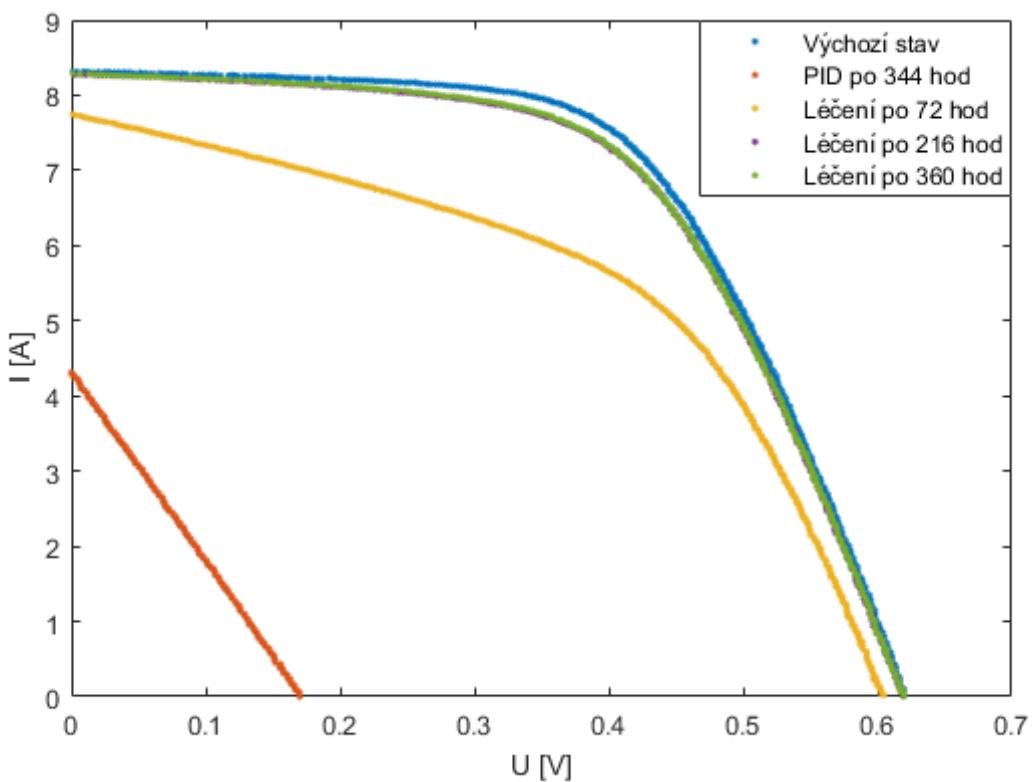
Článek 02						
P <sub>MAX</sub> [W]	R <sub>P</sub> [ $\Omega$ ]	R <sub>S</sub> [ $\Omega$ ]	$\eta$ [%]	FF [%]	U <sub>OC</sub> [V]	I <sub>SC</sub> [A]
3,014	2,1	0,022	12,39	58,10	0,620	8,368
2,994	1,3	0,023	12,30	57,40	0,622	8,384
2,460	0,3	0,024	10,11	50,49	0,610	7,988
1,546	0,1	0,031	6,35	36,28	0,581	7,334
0,510	0,1	0,055	2,10	25,80	0,338	5,848
0,214	0,0	0,040	0,88	25,44	0,185	4,549
celková změna parametru [%]						
-92,90	-100,00	81,82	-92,90	-56,21	-70,16	-45,64

Následující grafy a tabulky se vztahují k fázi léčení.

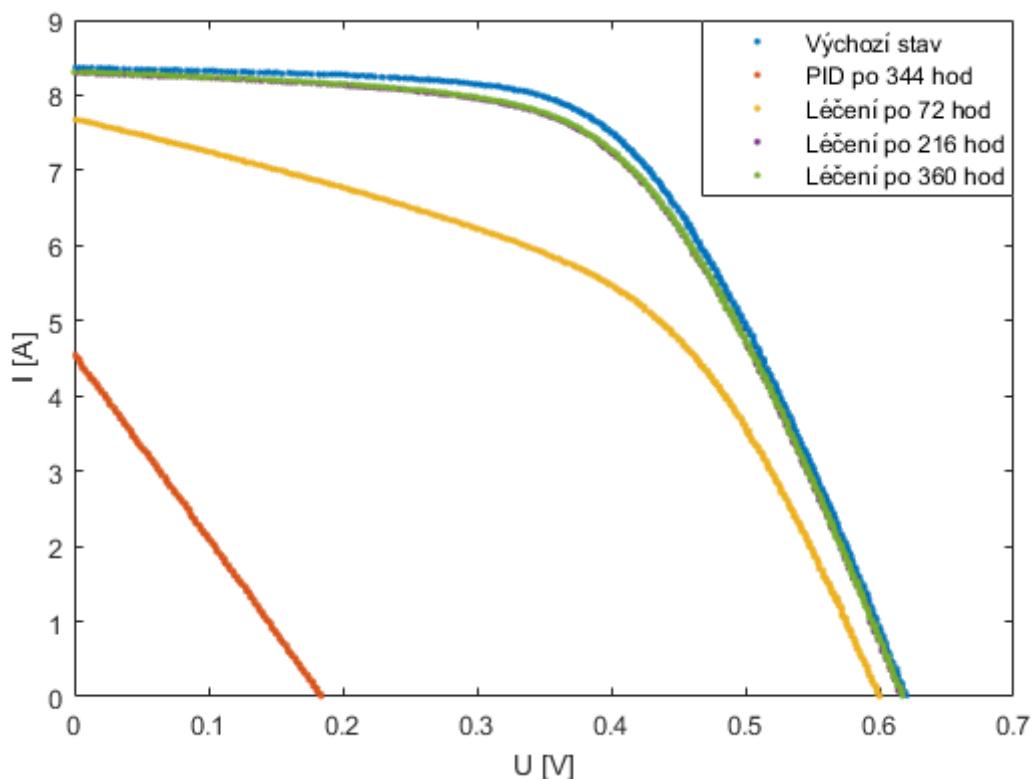


Graf 7 - volt-ampérové charakteristiky celého modulu během léčení

Je patrné, že léčení PID proběhlo velmi rychle a poslední dvě změřené charakteristiky se již překrývají s charakteristikou výchozího stavu. Podobné výsledky jsme naměřili také pro jednotlivé články, i když se nepodařilo dosáhnout sta procent původního výkonu.

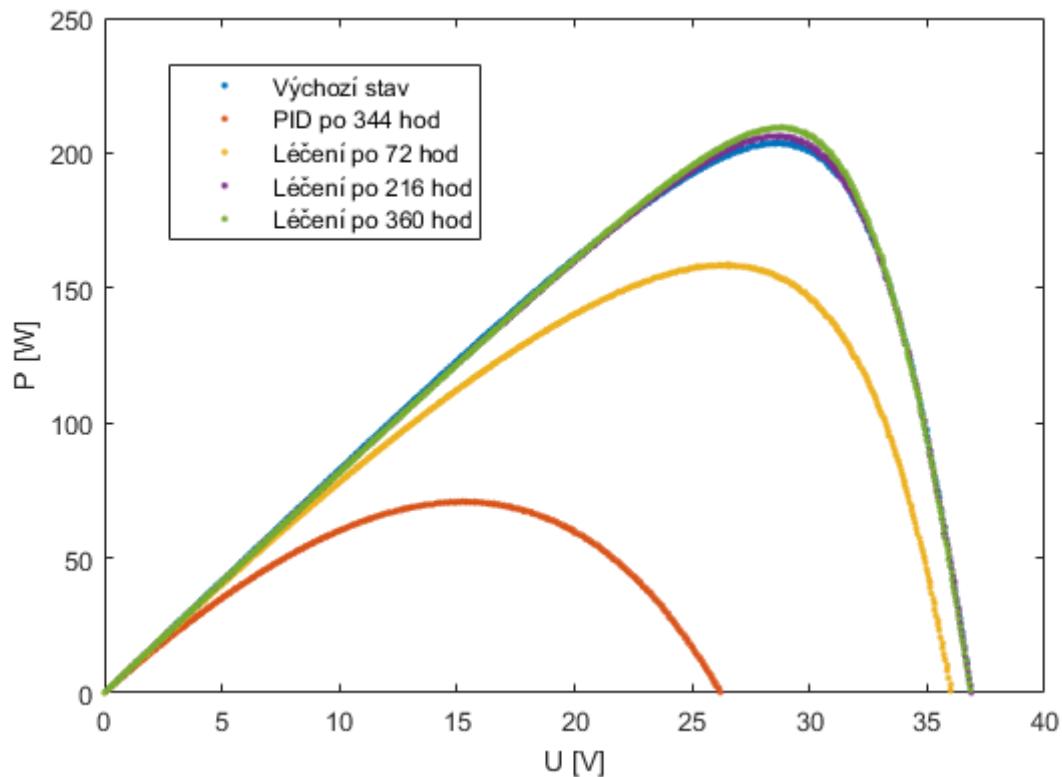


Graf 8 - volt-ampérové charakteristiky článku 01 během léčení

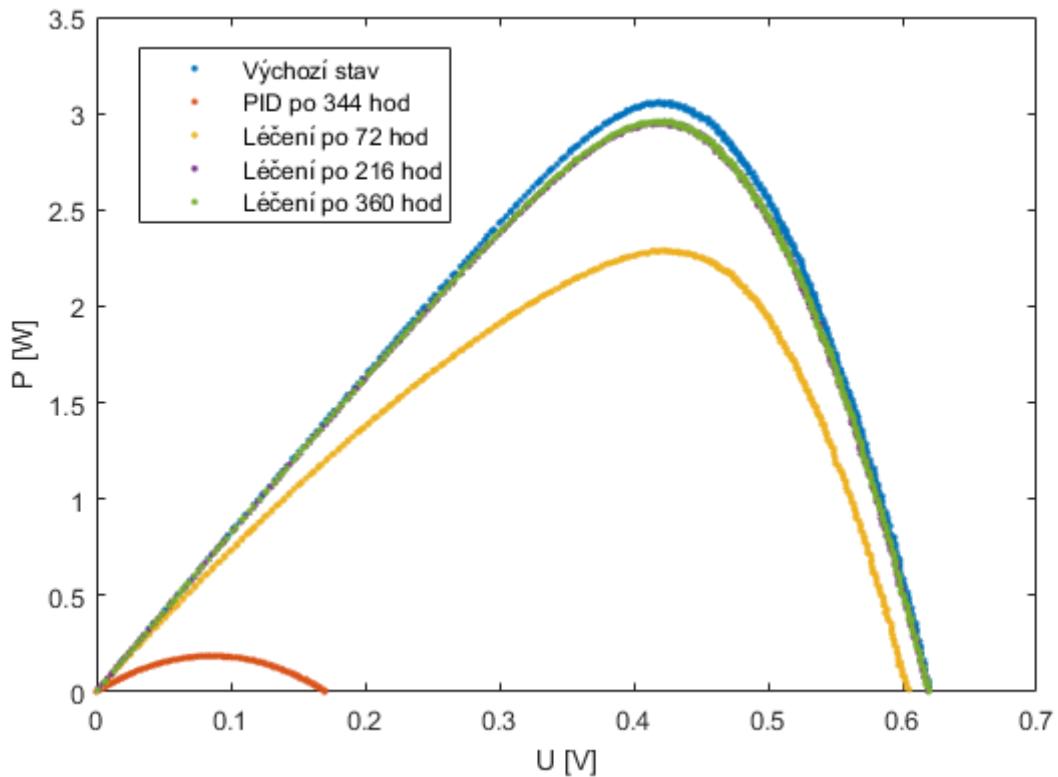


Graf 9 - volt-ampérové charakteristiky článku 02 během léčení

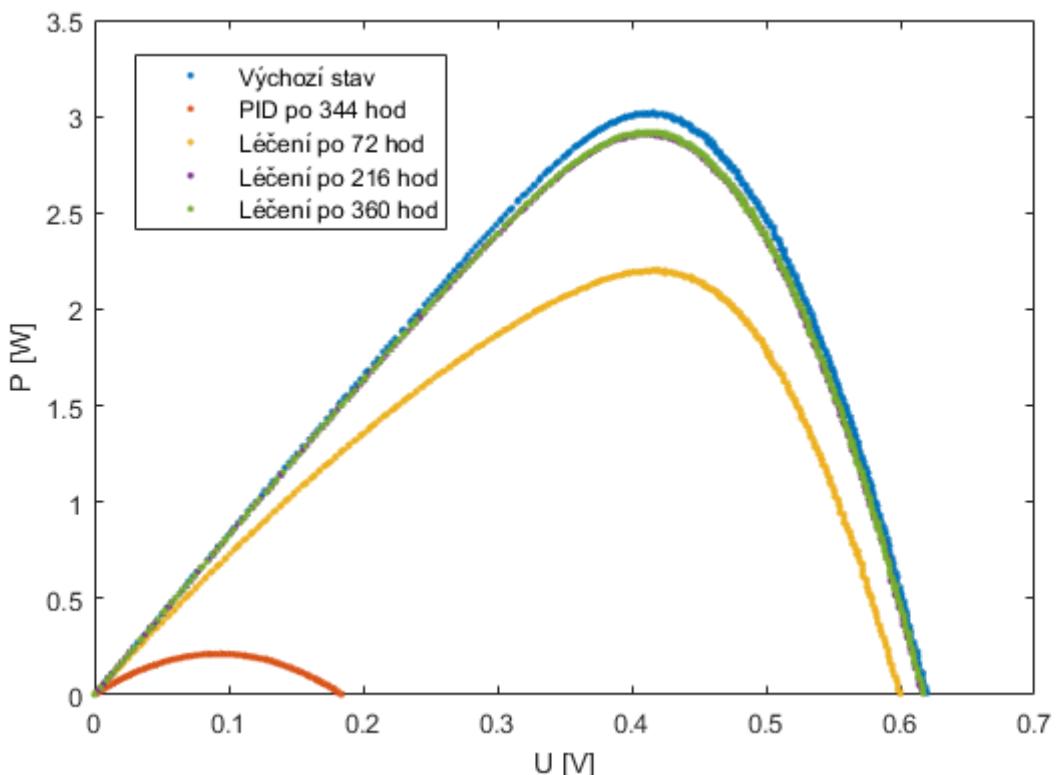
Následují opět průběhy výkonu modulu a jednotlivých článků.



Graf 10 - závislost výkonu na napětí celého modulu během léčení



Graf 11 - závislost výkonu na napětí článku 01 během léčení



Graf 12 - závislost výkonu na napětí článku 02 během léčení

Následují tabulky ve stejném smyslu jako u výsledků degradace. Opět je uveden původní stav před degradací. Oproti grafům v tabulkách není stav po ukončení degradace.

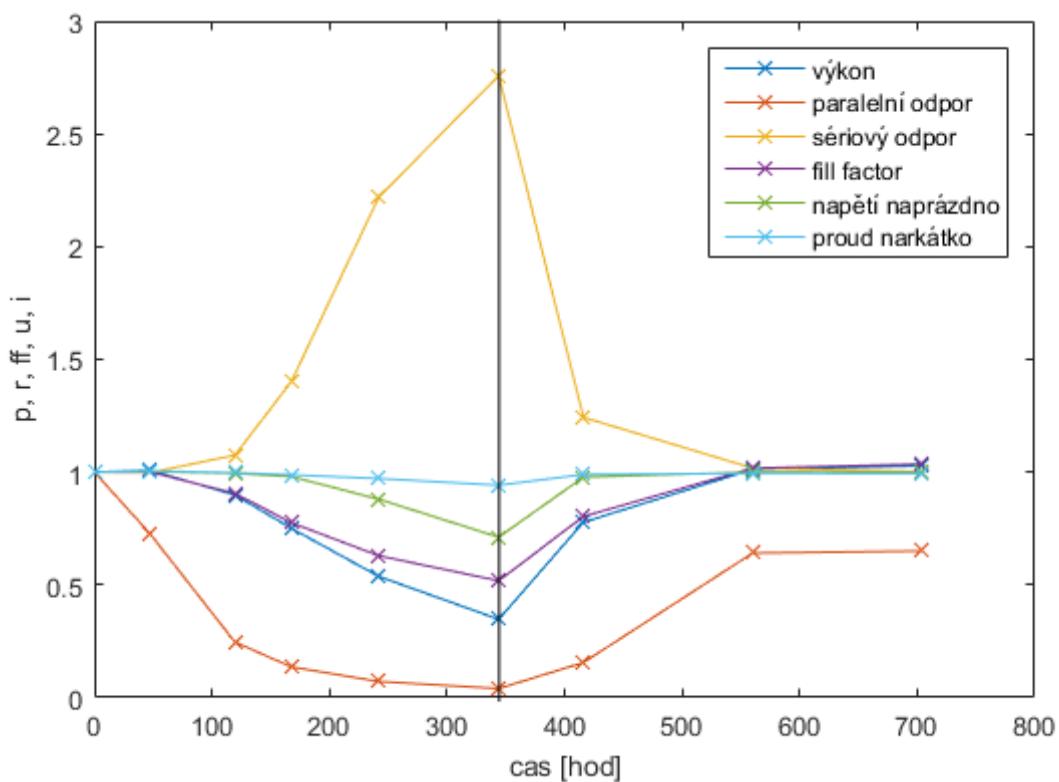
Modul						
P <sub>MAX</sub> [W]	R <sub>P</sub> [\Omega]	R <sub>S</sub> [\Omega]	η [%]	FF [%]	U <sub>OC</sub> [V]	I <sub>SC</sub> [A]
203,663	146,5	0,684	12,56	66,35	36,895	8,319
158,381	22,8	0,85	9,8	53,3	36,069	8,232
206,164	93,91	0,696	12,7	67,5	36,901	8,273
209,381	95,25	0,685	12,9	68,7	36,864	8,269
celková změna parametru [%]						
2,81	-34,98	0,15	2,71	3,54	-0,08	-0,60

V tabulce je vidět, že se v rámci celého modulu podařilo dosáhnout dokonce vyššího výkonu, než jaký modul měl v původním stavu před degradací. Je ovšem také důležité si povšimnout, že některé parametry se na svou původní hodnotu nedostaly a to zejména paralelní odpor R<sub>P</sub>. V případě článků jsou odchylky od původních hodnot mírně vyšší.

Článek 01						
P <sub>MAX</sub> [W]	R <sub>P</sub> [\Omega]	R <sub>S</sub> [\Omega]	η [%]	FF [%]	U <sub>OC</sub> [V]	I <sub>SC</sub> [A]
3,051	1,9	0,022	12,54	59,01	0,621	8,32
2,285	0,23	0,024	9,4	48,7	0,605	7,76
2,951	1,15	0,023	12,1	57,4	0,62	8,291
2,954	1,21	0,022	12,1	57,5	0,62	8,293
celková změna parametru [%]						
-3,18	-36,32	0,00	-3,51	-2,56	-0,16	-0,32

Článek 02						
P <sub>MAX</sub> [W]	R <sub>P</sub> [ $\Omega$ ]	R <sub>S</sub> [ $\Omega$ ]	$\eta$ [%]	FF [%]	U <sub>OC</sub> [V]	I <sub>SC</sub> [A]
3,014	2,1	0,022	12,39	58,1	0,62	8,368
2,199	0,22	0,025	9	47,6	0,6	7,699
2,909	1,22	0,023	12	56,8	0,617	8,306
2,916	1,27	0,023	12	56,8	0,618	8,315
celková změna parametru [%]						
-3,25	-39,52	4,55	-3,15	-2,24	-0,32	-0,63

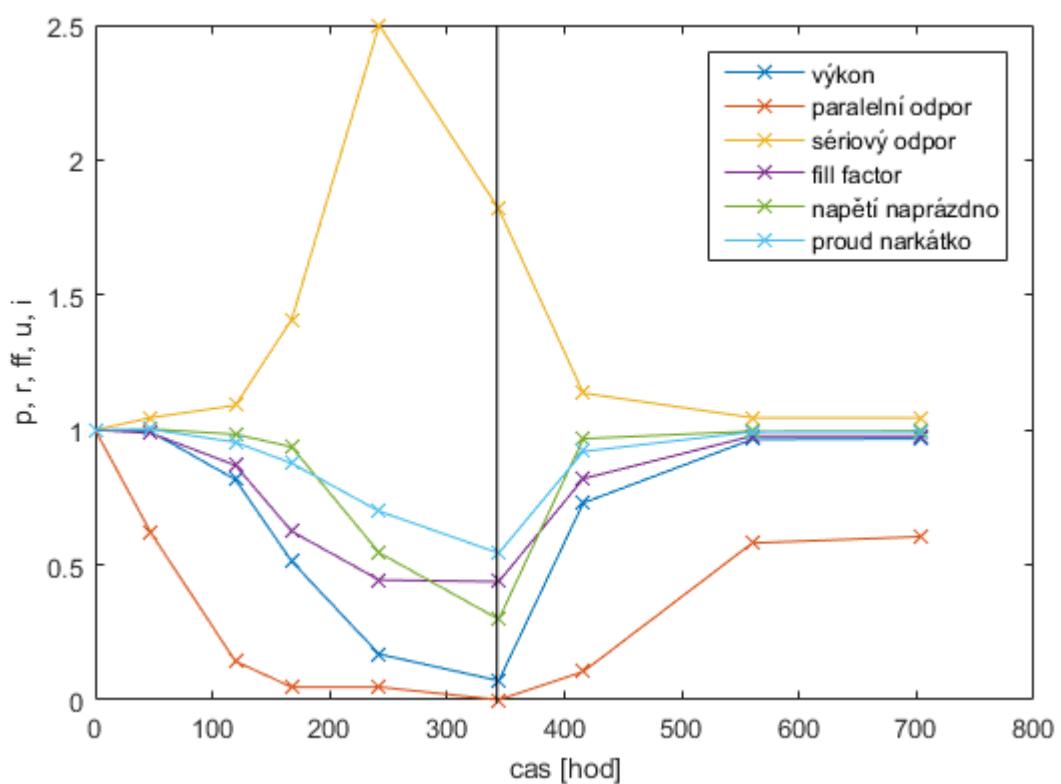
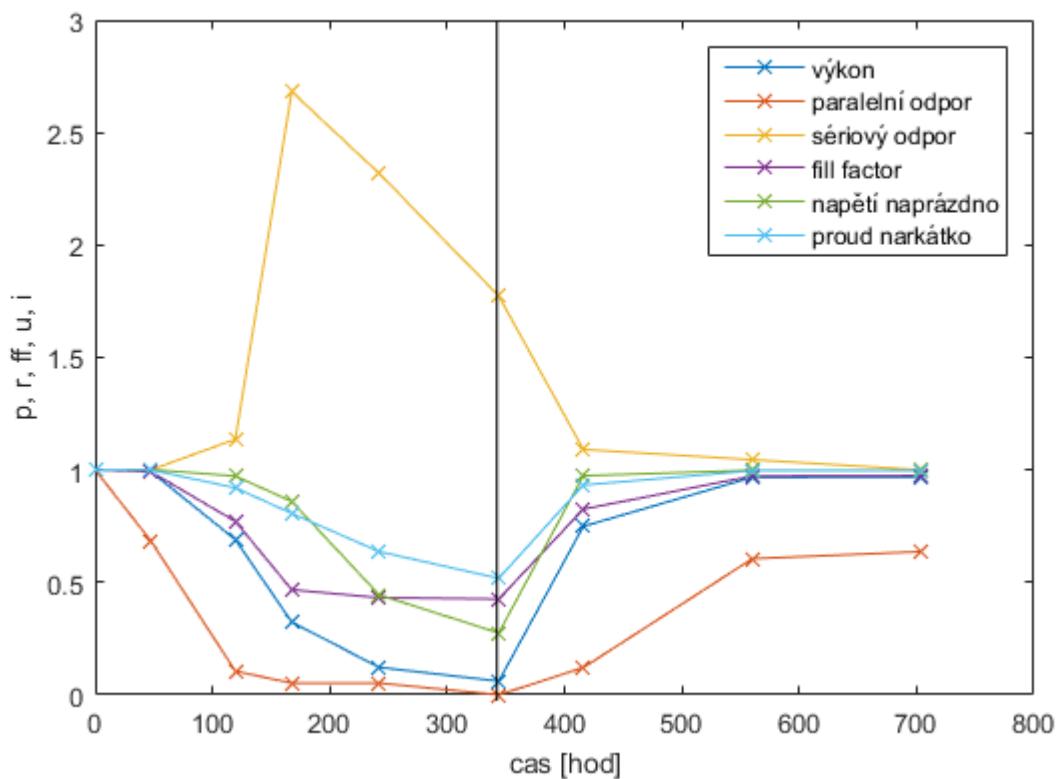
Z dat uvedených v tabulkách jsem vynesl závislost parametrů v čase během celého experimentu, tedy během degradace i léčení. V grafech je vždy svislá čára označující právě přechod mezi degradací a léčbou modulu. Hodnoty parametrů jsou normovány a jako vztažná hodnota je brána hodnota parametru ve výchozím stavu, tedy před zahájením degradace.



Graf 13 - Změna parametrů celého modulu v čase

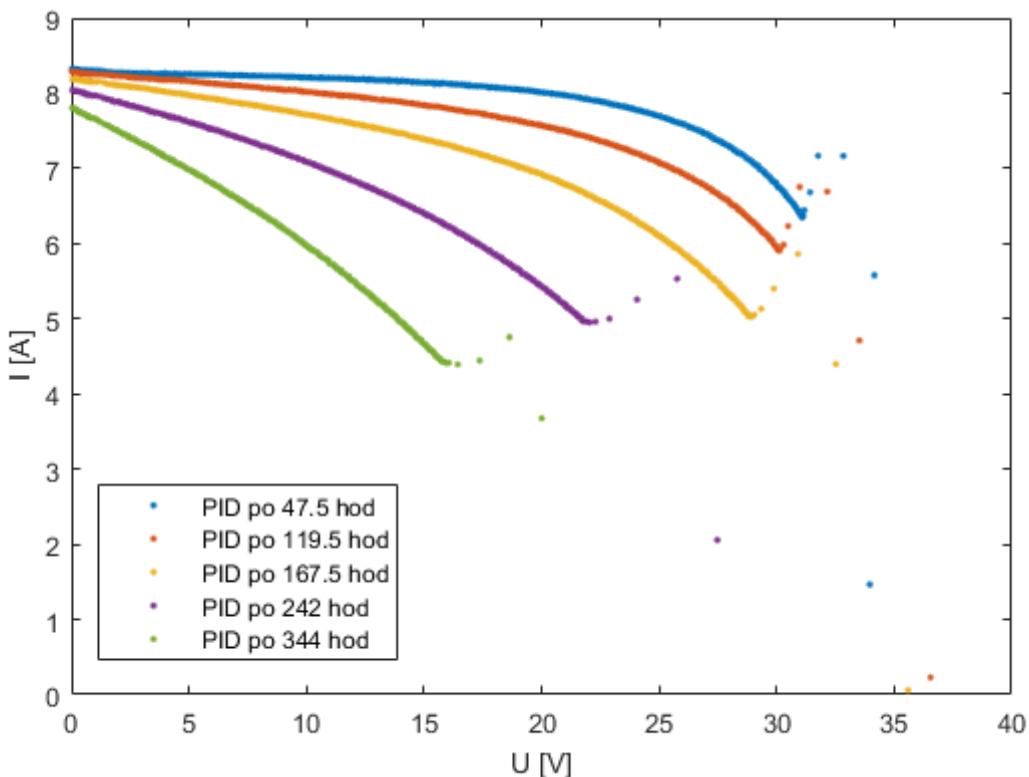
V rámci celého modulu je vidět postupný návrat k původním hodnotám začínající hned po zahájení procesu léčení. Jediným parametrem, který se nevrátil na svou hodnotu je paralelní odpor  $R_P$ , což bylo důvodem dalšího měření, které však ukázalo, že parametry se dále nemění. Průběh účinnosti není uveden, neboť se vzhledem k neměnnosti povrchu modulu nebo článků nijak neliší od průběhu výkonu.

V případě článků jsou změny některých parametrů výraznější a sériový odpor se vrací k původní hodnotě ještě před započetím léčení. To bych ovšem přisoudil spíše chybě měření, neboť sériový odpor je v případě článků velmi malý. Také u obou článků se nepodařilo vrátit paralelní odpor na původní hodnotu.



## 2.4.2. MĚŘENÍ ZÁVĚRNÝCH CHARAKTERISTIK

Elektrické a blokové schéma této metody jsou shodné se schématy v metodě měření volt-ampérových charakteristik a měření také probíhalo na systému *PASAN* od firmy *Meyer Burger*. Tato metoda spočívá v měření charakteristiky ve směru od bodu napětí naprázdno k bodu proudu nakrátko. Získané charakteristiky potom obsahují špičky v blízkosti bodu maximálního výkonu. Cílem bylo ověřit, zda tyto špičky souvisejí s kapacitou článků a zda tedy budou například narůstat během degradace. Tato myšlenka se však nepotvrdila, špičky zůstávaly přibližně stejné a navíc při vynesení bodového grafu se ukáže, že charakteristika v místě špičky obsahuje jen velmi málo bodů. Dalším faktorem bylo, že v případě měření samotných článků se špičky neprojevily vůbec. Tato metoda se tedy pro diagnostiku PID neosvědčila a z uvedených důvodů zde nebudu uvádět všechny výsledky.

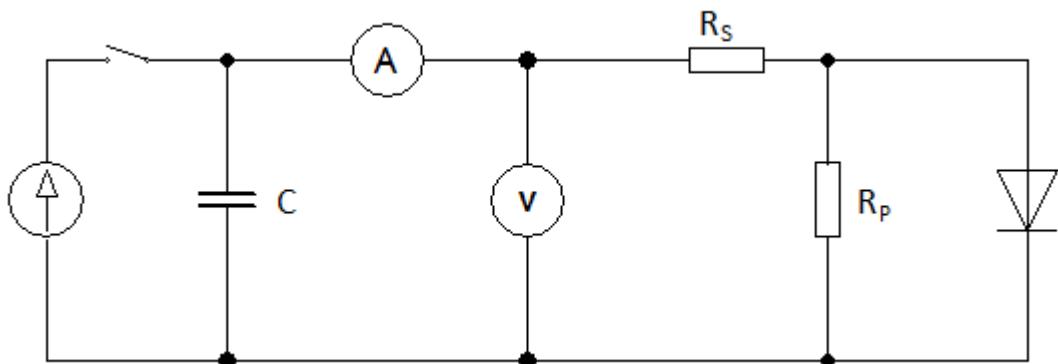


Graf 16 - volt-ampérové charakteristiky v závěrném směru celého modulu

## 2.4.3. MĚŘENÍ NEOSVĚTLENÝCH ČLÁNKŮ

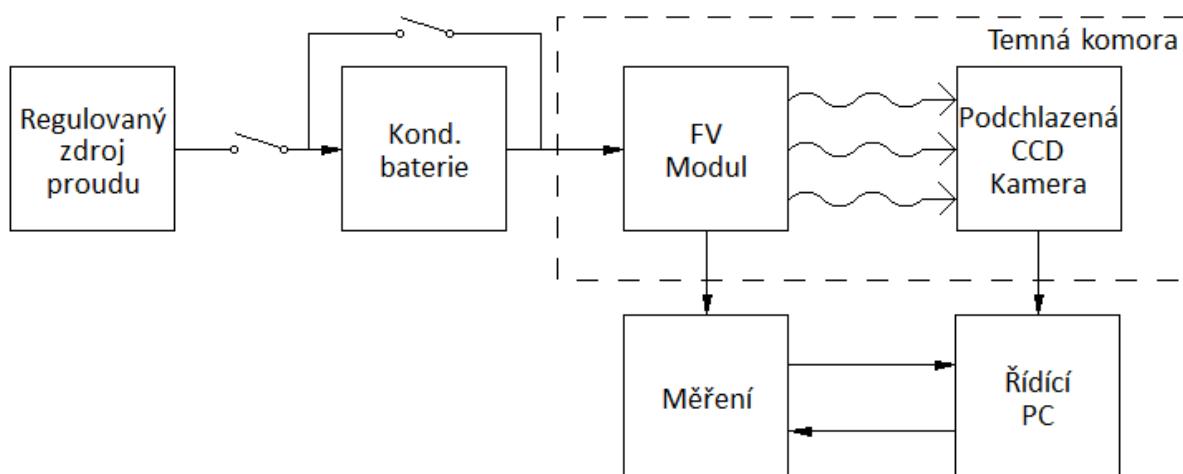
U této metody byl kladen důraz zejména na pořadí měření. Nejprve byly vždy změřeny samostatné články, poté celý modul. Metoda byla také vždy měřena před elektroluminiscenčním testem. Důvodem je eliminace vlivu rozdílné teploty, neboť by zejména během elektroluminiscence mohlo dojít k ohřevu modulu, kterým v tu dobu protéká proud nakrátko (v případě měřeného modulu  $I_{SC} = 8,3 \text{ A}$ ) po dobu padesáti vteřin. Vzhledem k řádům měřených hodnot ( $10^{-4}$  až  $10^{-7}$ ) byl také kladen důraz na použití stejné kabeláže.

#### 2.4.3.1. ELEKTRICKÉ SCHÉMA



Obrázek 22 - Schéma měření neosvětlených článků

#### 2.4.3.2. BLOKOVÉ SCHÉMA



Obrázek 23 - Blokové schéma pracoviště pro měření neosvětlených článků

Na obrázku je uvedena navíc podchlazená CCD kamera a přemostění kondenzátorové baterie. Důvodem je fakt, že na stejném pracovišti probíhá také měření elektroluminiscence. Elektrické schéma je pak také stejné s výjimkou přemostěných kondenzátorů. Výsledky elektroluminiscence budou uvedeny v následující sekci.

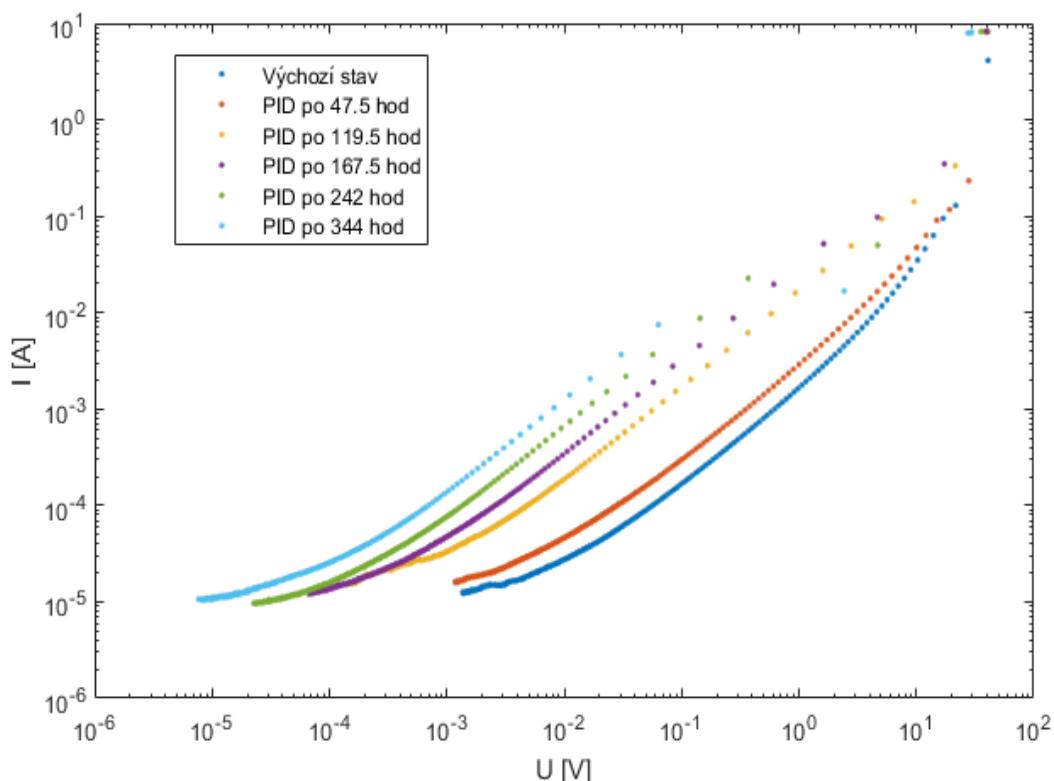
#### 2.4.3.3. POUŽITÉ PŘÍSTROJE

1. Regulovaný zdroj stejnosměrného proudu QJ6010S; 0-60 V, 10 A
2. Multimetr Keithley 2000
3. Nanovoltmetr Keithley 2000
4. Řídící PC s operačním systémem Microsoft Windows
5. Software LabVIEW

#### 2.4.3.4. VÝSLEDKY

Na následujících grafech jsou uvedeny temné charakteristiky modulu a následně obou článků. Z grafů je patrný zejména posun křivky směrem k nižším napětím a změna vzdálenosti mezi několika prvními body. Vzhledem ke konstantnímu času odměru je zřejmé, že dochází ke změně časové konstanty modulu, což je dáno jednak změnami paralelního a sériového odporu článku, ale také změnou jeho kapacity důsledkem poruch v jeho struktuře.

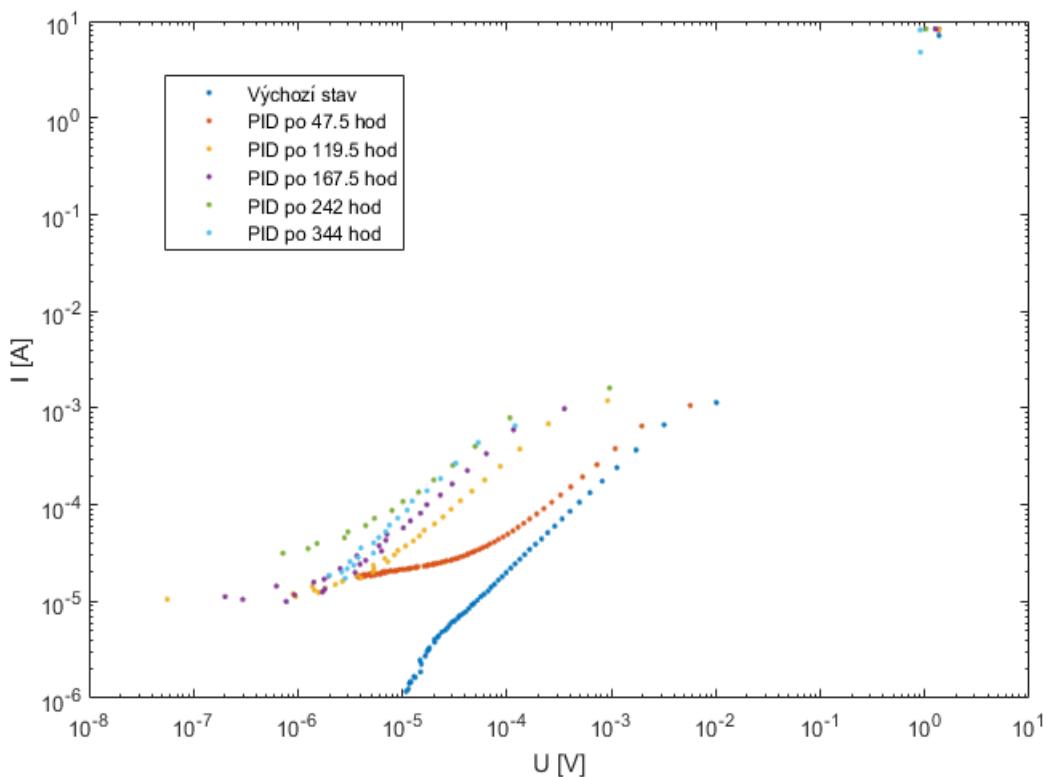
Z naměřených hodnot vyplývá, že na temných charakteristikách je mezi výchozím stavem a stavem po prvních dvou dnech degradace viditelný rozdíl. Naopak u předchozí metody (měření volt-ampérových charakteristik) tyto dvě charakteristiky splývají.



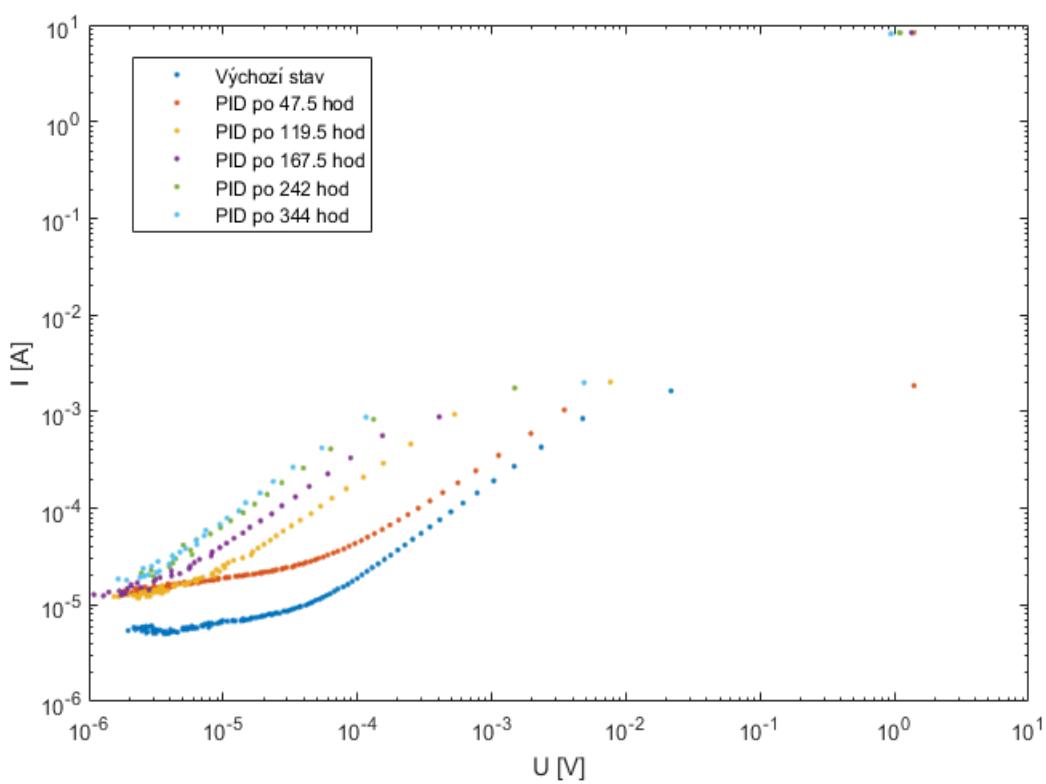
Graf 17 - Temné charakteristiky celého modulu během degradace

V případě výsledků z měření článků zobrazených na grafech 18 a 19 došlo během degradace k velikému zkrácení doby poklesu napětí k hodnotám řádově  $10^{-6}$  V. Tato hodnota je v případě použití měřícího systému na katedře elektrotechnologie charakteristická tím, že dále měřící přístroje nedokážou měřit přesně. Proto na charakteristikách výrazně klesá hustota změřených bodů.

Na grafu 18 se navíc odchýlila charakteristika článku ve výchozím stavu, což přisuzuji pravděpodobně zvýšené teplotě článku nebo nějaké jiné chybě měření.

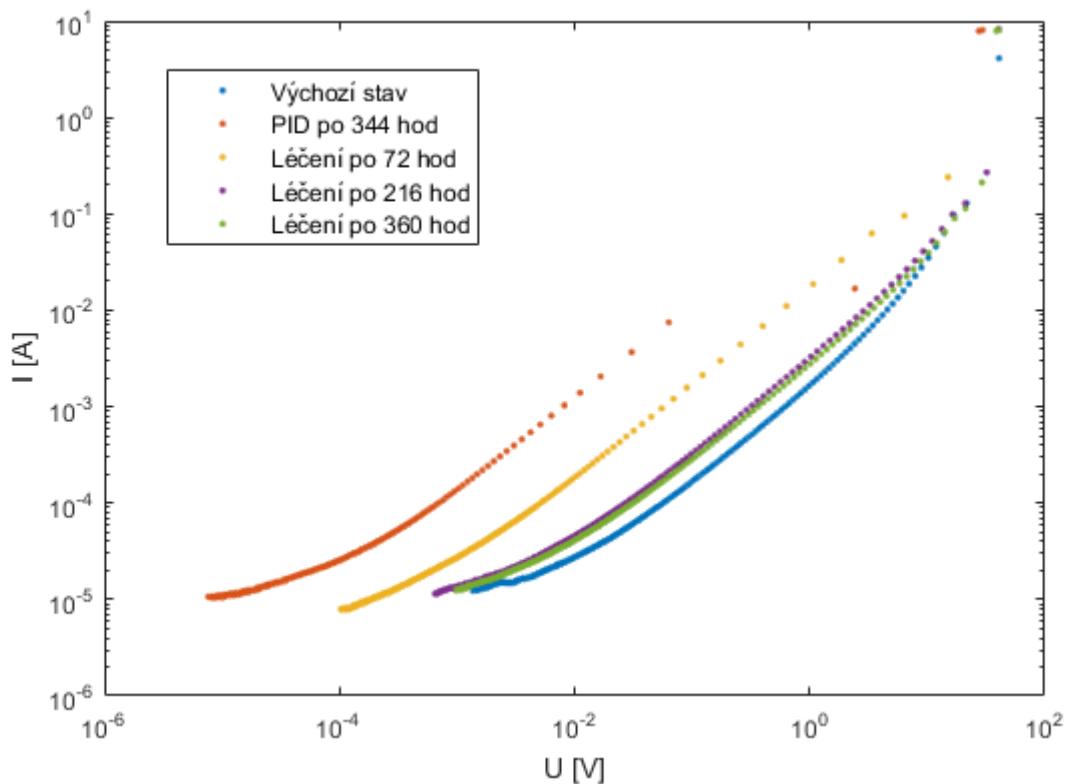


Graf 18 - Temné charakteristiky článku 01 během degradace

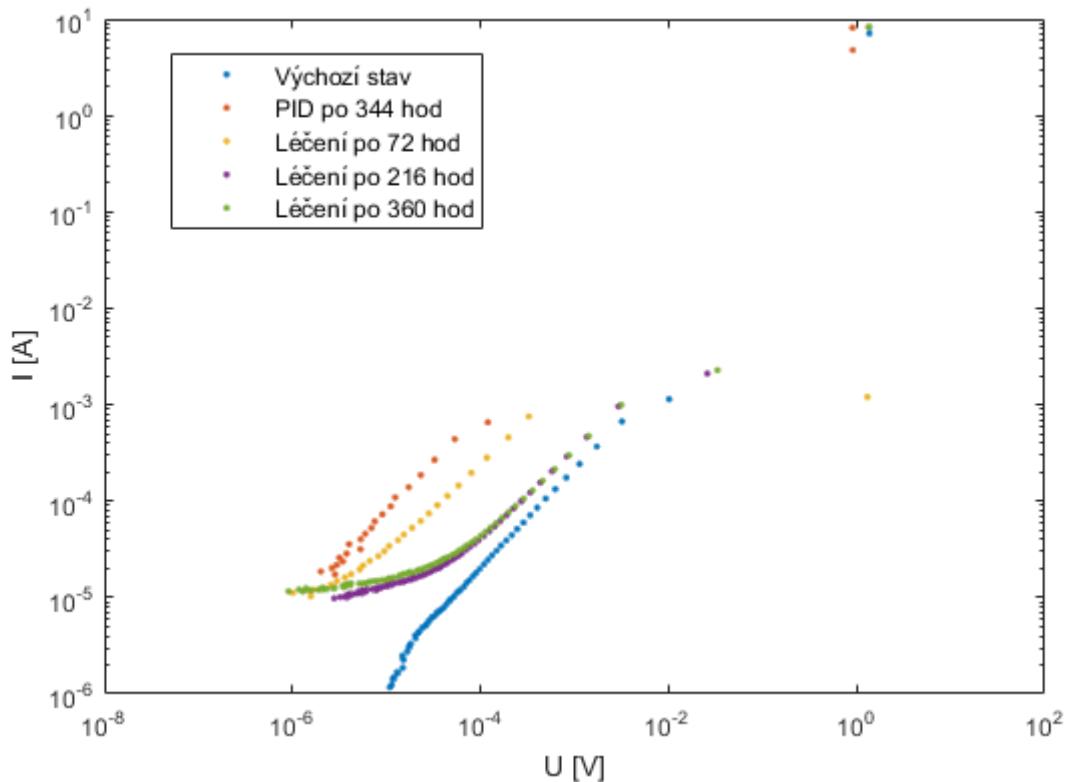


Graf 19 - Temné charakteristiky článku 02 během degradace

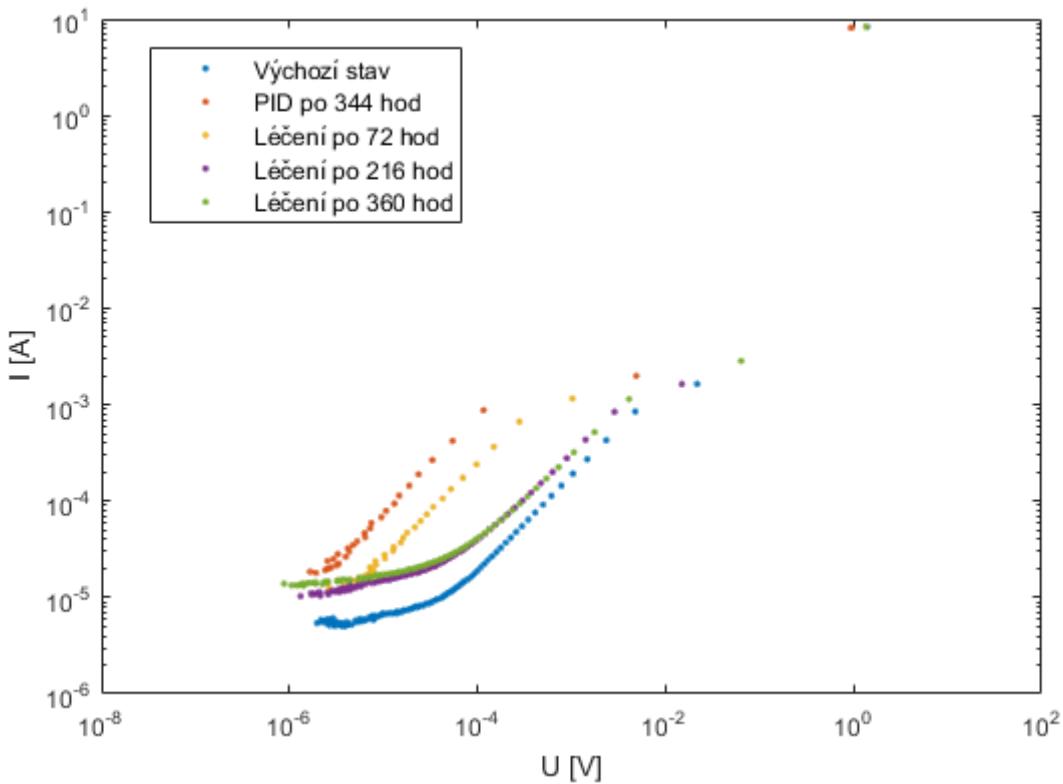
Na dalších grafech 20, 21 a 22 jsou průběhy temných charakteristik během léčení modulu. Opět jsou uvedeny stejné průběhy jako v části 2.4.1.4.



Graf 20 - Temné charakteristiky celého modulu během léčení



Graf 21 - Temné charakteristiky článku 01 během léčení



Graf 22 - Temné charakteristiky článku 02 během léčení

Na těchto průbězích je patrný rozdíl oproti charakteristikám měřeným při osvětleném modulu. Konkrétně se průběhy na konci léčení nepřekrývají s charakteristikou změřenou před degradací. To je dáno tím, že se všechny parametry modulu nevrátily do původního stavu. Tento rozdíl ukazuje na fakt, že vyhodnocování samotné volt-ampérové charakteristiky fotovoltaického modulu nemusí být dostatečně efektivní metodou pro diagnostiku PID.

#### 2.4.4. ELEKTROLUMINISCENČNÍ SNÍMKY

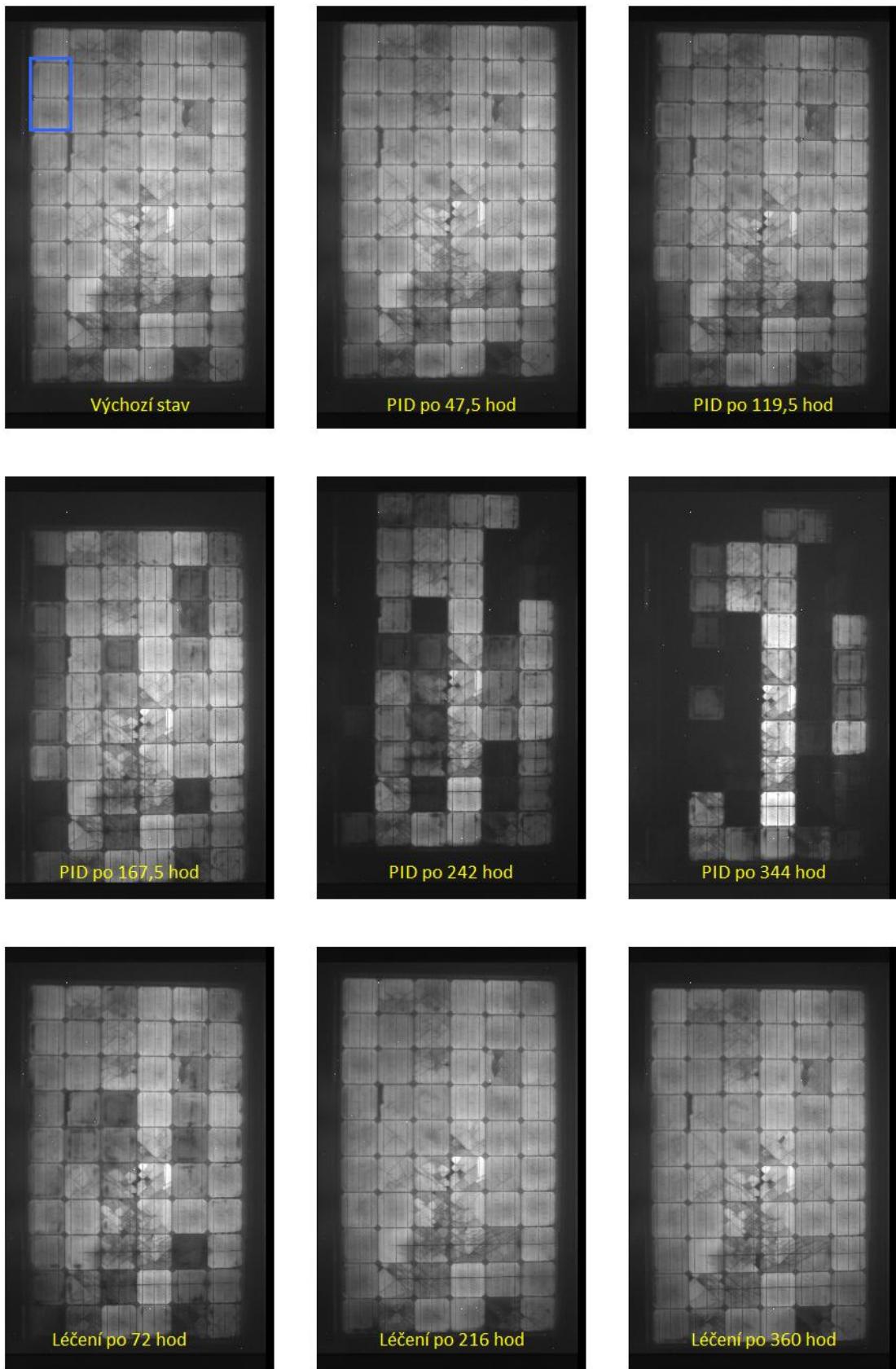
Tato metoda sloužila zejména orientačně pro sledování průběhu degradace a následně léčby. Je však vhodná právě pro první orientační diagnostiku, a to hlavně díky své jednoduchosti a rychlosti.

Blokové a elektrické schéma zde neuvádím, neboť jsou shodná se schématy uvedenými na obrázcích 22 a 23. Rozdílem je pouze absence kondenzátorové baterie, která je v případě elektroluminiscence přemostěna.

##### 2.4.4.1. POUŽITÉ PŘÍSTROJE

1. Regulovaný zdroj stejnosměrného proudu QJ6010S; 0-60 V, 10 A
2. EL DETECTOR GEL M4 jehož součástí je chlazená CCD kamera a software v řídícím PC

#### 2.4.4.2. VÝSLEDKY



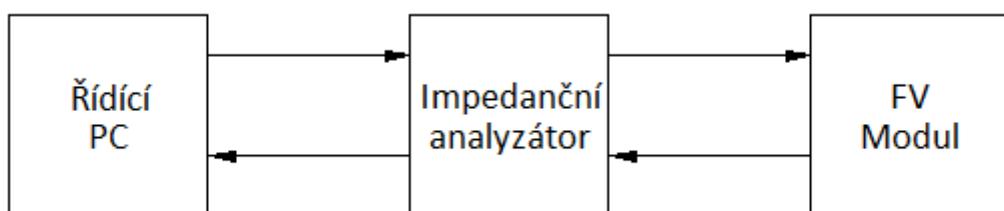
Obrázek 24 - Elektroluminiscenční snímky během experimentu

Na výsledcích je také vidět důvod mírného zvýšení výkonu celého modulu, důvodem jsou zřejmě články v dolní části modulu, které jsou mírně jasnější než ve stavu před degradací.

#### 2.4.5. IMPEDANČNÍ SPEKTROSKOPIE

V části 1.9.6. jsem uváděl, že tuto metodu je možné provést na katedře elektrotechnologie ČVUT FEL. To je spíše z důvodu, že na katedře je dostupný impedanční analyzátor. V rámci testování fotovoltaických článků tuto metodu zatím totiž katedra pravidelně nevyužívá. V rámci této práce tedy bylo nutné zajistit alespoň do určité míry konstantní osvětlení modulu, a protože nebylo zatím možné umístit modul do temné komory, měření probíhalo vždy s modulem ležícím na zemi čelní stranou dolů. Tímto způsobem jsme zajistili opakovatelné podmínky.

##### 2.4.5.1. BLOKOVÉ SCHÉMA



Obrázek 25 - Blokové schéma impedanční spektrografie

Měření probíhalo automaticky pomocí softwaru v řídícím PC. Elektrické schéma není uvedeno z důvodu jednoduchosti celé metody. Celé měření obstarává impedanční analyzátor, který je pomocí GPIB konektoru spojen s PC, kde jsou dále zpracovávána data.

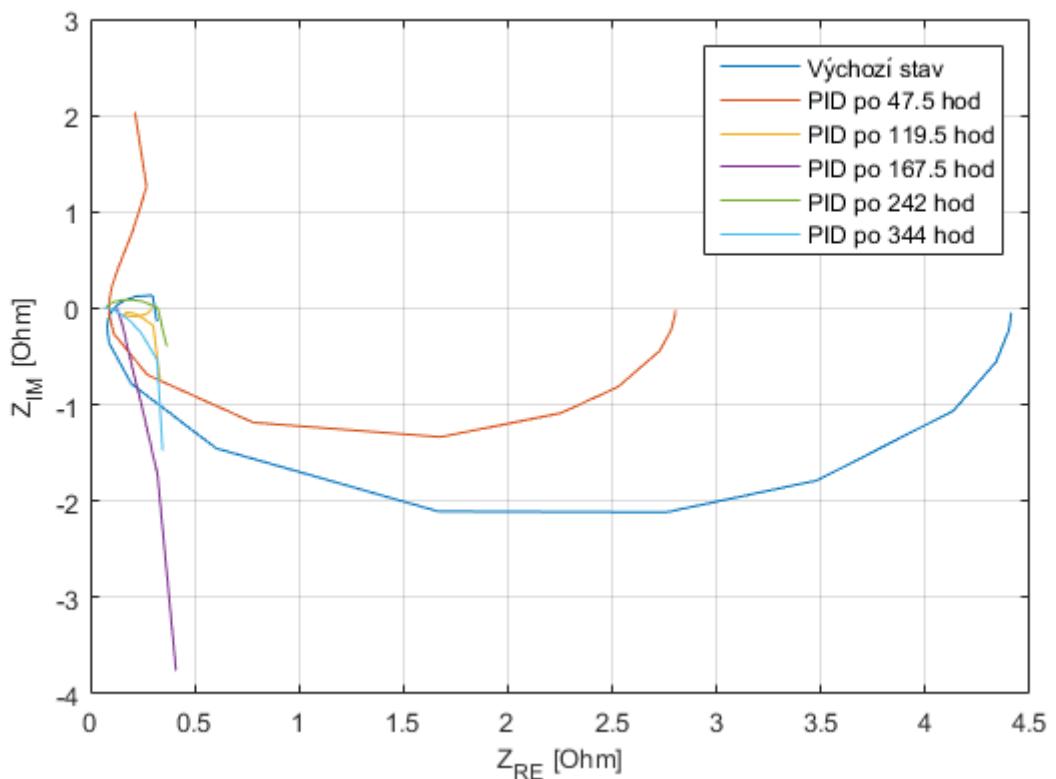
##### 2.4.5.2. POUŽITÉ PŘÍSTROJE

1. Řídící PC s operačním systémem Microsoft Windows
2. Impedanční analyzátor - HP 4284A Precision LCR Meter

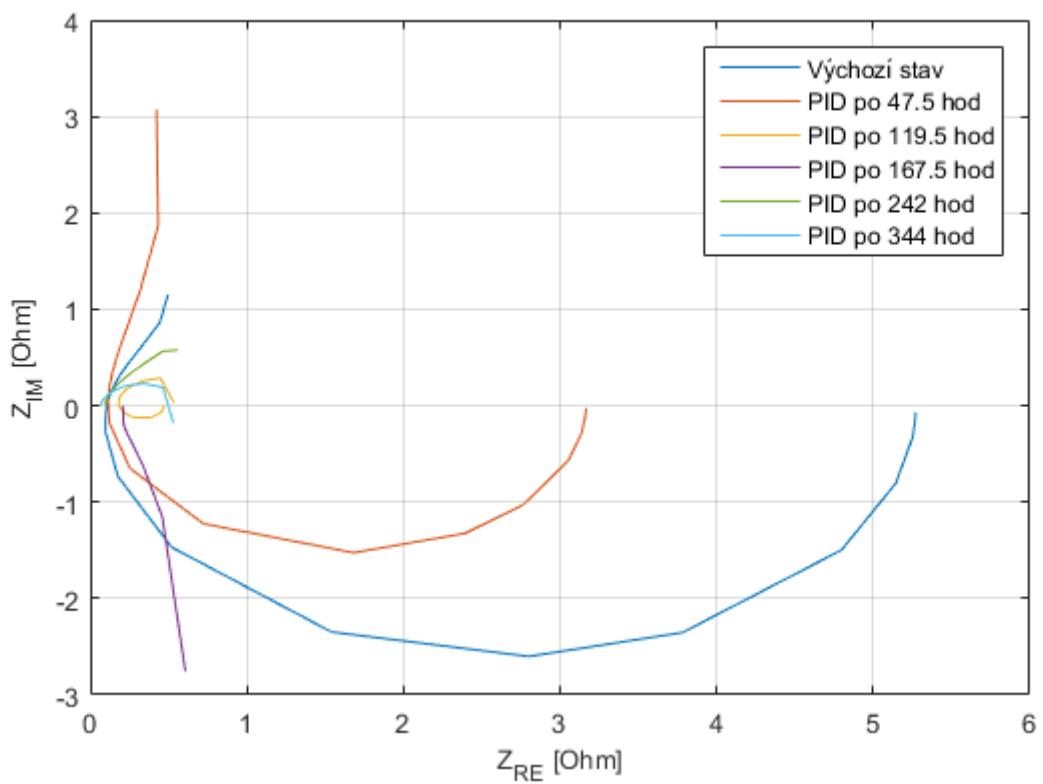
##### 2.4.5.3. VÝSLEDKY

Na následujících grafech 23 až 26 jsou nejprve takzvané "cole cole diagramy" obou článků a dále závislosti kapacity na frekvenci obou článků. Na cole cole diagramech je opět patrná změna mezi výchozím stavem a stavem po prvních dvou dnech degradace.

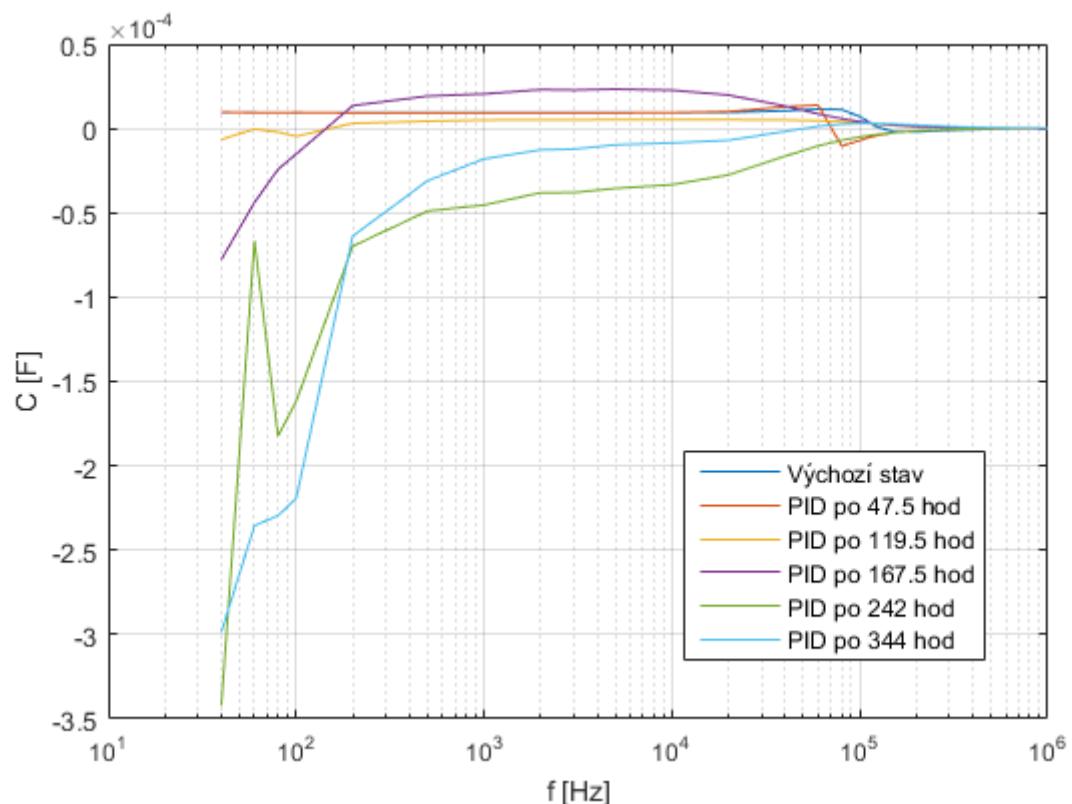
Na grafech 27 až 30 jsou uvedeny průběhy získané během léčení. Pro porovnání je uveden vždy také průběh změrený před degradací a průběh změrený po ukončení degradace, stejně jako tomu bylo v předchozích metodách. Na těchto cole cole diagramech je pak velmi výrazný rozdíl mezi výchozím stavem a stavem po léčení.



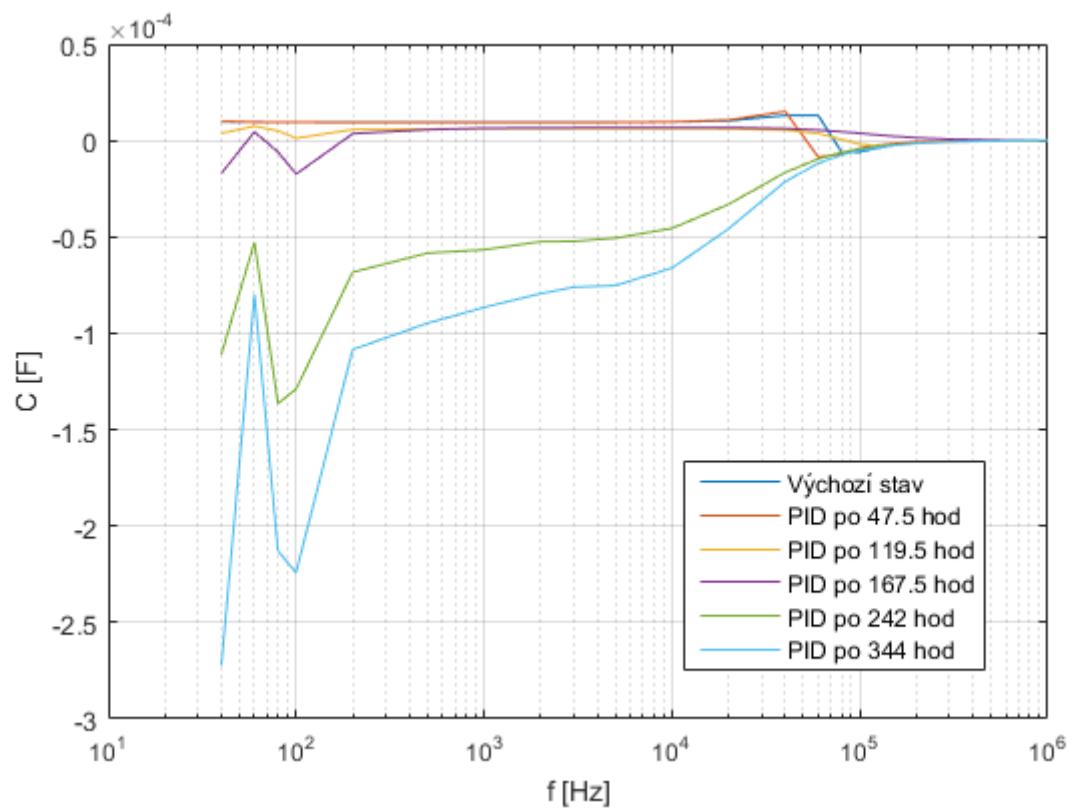
Graf 23 - Cole cole diagramy článku 01 během degradace



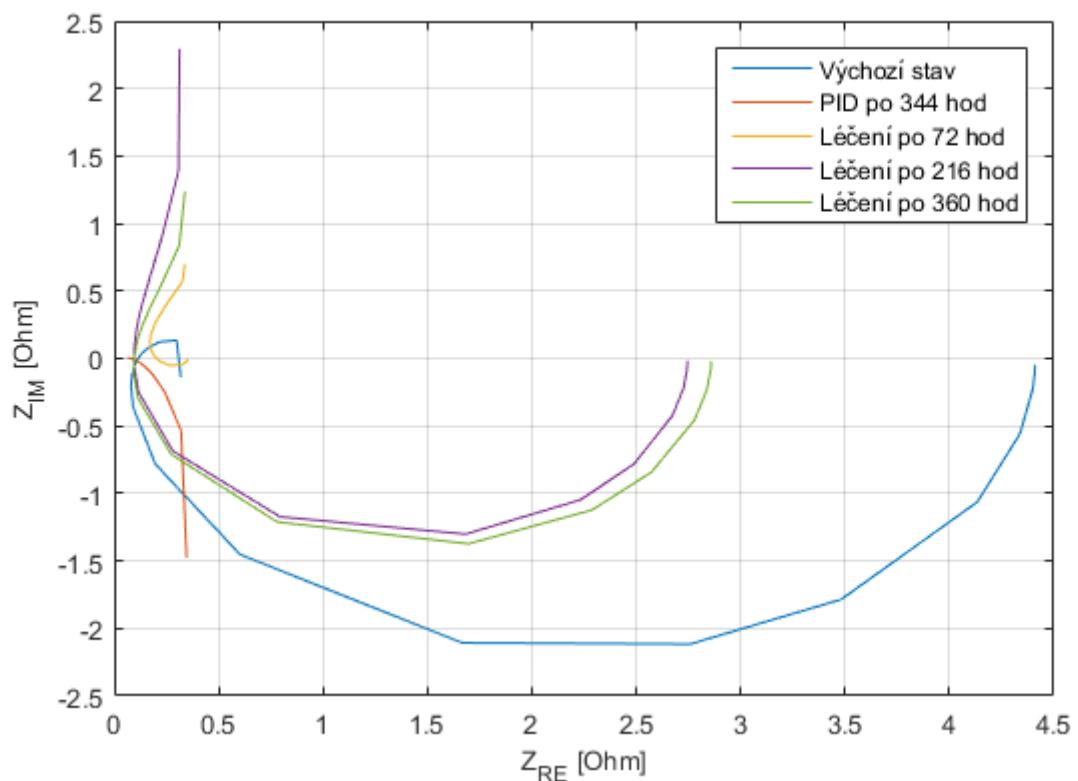
Graf 24 - Cole cole diagramy článku 02 během degradace



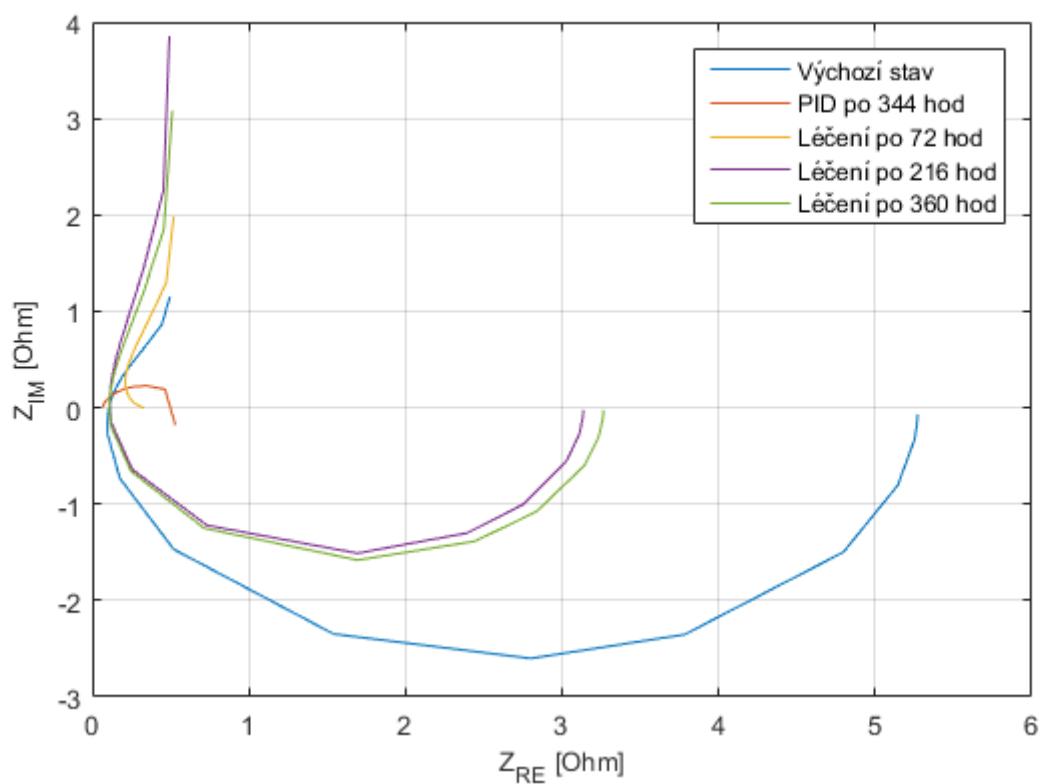
Graf 25 - Závislosti kapacity na frekvenci článku 01 během degradace



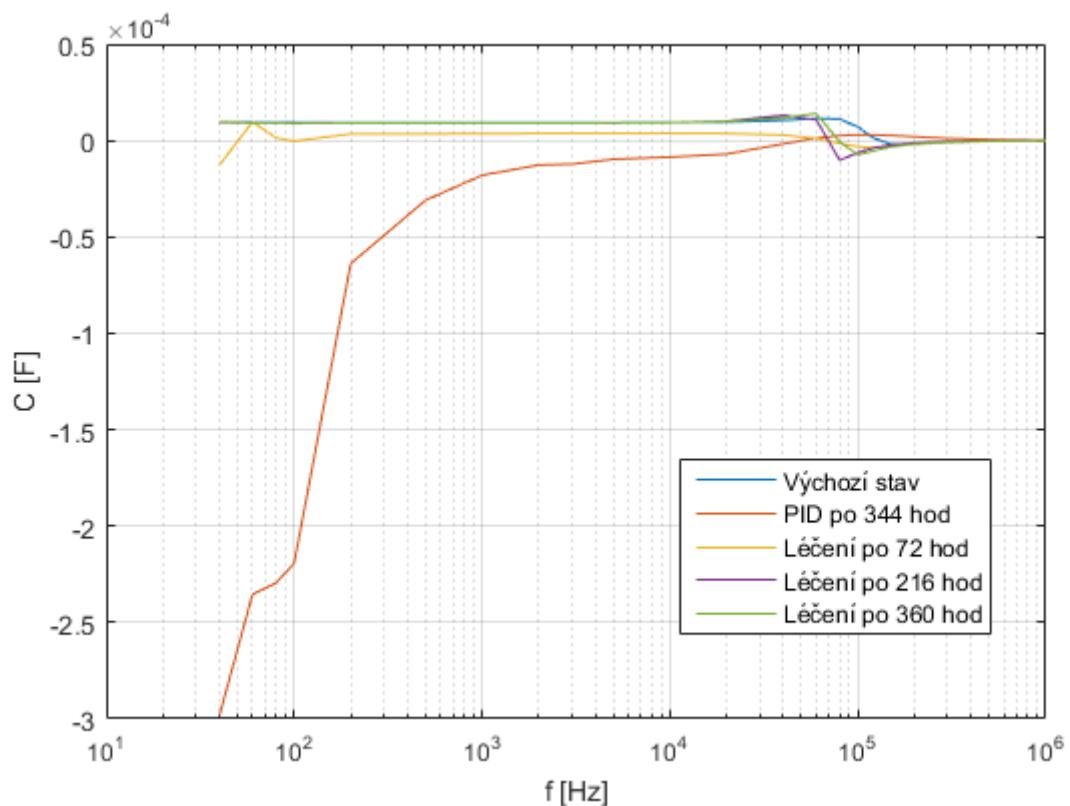
Graf 26 - Závislosti kapacity na frekvenci článku 02 během degradace



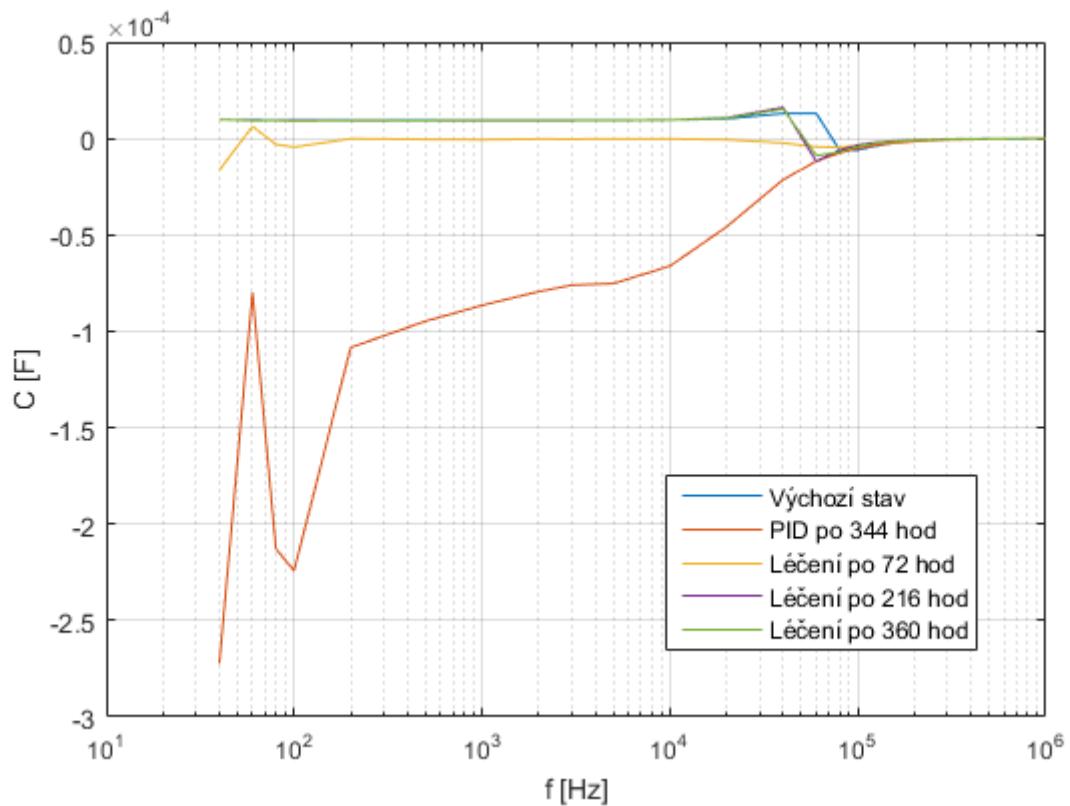
Graf 27 - Cole cole diagramy článku 01 během léčení



Graf 28 - Cole cole diagramy článku 02 během léčení



Graf 29 - Závislosti kapacity na frekvenci článku 01 během léčení



Graf 30 - Závislosti kapacity na frekvenci článku 02 během léčení

### 3. ZÁVĚR

Hlavním účelem této práce bylo provést experiment spočívající ve vyvolání potenciálem indukované degradace, zvané zkráceně PID, a v následné "léčbě" takto zdegradovaného modulu. K vyhodnocení tohoto experimentu bylo použito několik metod měření. Experiment proběhl bez zvláštních potíží a podařilo se dosáhnout použitelných výsledků v případě celého modulu i v případě samostatných článků.

Naměřené výsledky a jejich vyhodnocení ukazují na výrazný potenciál metody impedanční spektroskopie, která je sice v oblasti fotovoltaiky známá, ale rozhodně se nepoužívá pro vyhodnocování PID. Tato metoda v případě obou článků vykazuje stejné změny během degradace, které jsou patrné hlavně na tzv. cole cole diagramech, přičemž důležitý je zejména bod nejvíce vpravo na ose reálné složky impedance, který odpovídá paralelnímu odporu. Posuv tohoto bodu vlevo pak znamená pokles paralelního odporu, což je jeden z hlavních indikátorů PID. Díky své jednoduchosti se tato metoda ukázala jako výborný nástroj pro diagnostiku PID a bude pravděpodobně instalována do laboratoře fotovoltaiky katedry elektrotechnologie na ČVUT FEL v Praze, kde se již měří neosvětlené články a elektroluminiscence, a to hlavně díky možnosti měření v temné komoře.

Další zajímavou metodou pro diagnostiku PID zasažených modulů se ukázala metoda měření neosvětlených článků, která stejně jako impedanční spektroskopie ukázala změnu již po prvním intervalu působení napětí na modul. Tato změna v charakteristice nebo cole cole diagramu byla dána změnou paralelního odporu, která zatím nebyla tak významná, aby ovlivnila volt-ampérovou charakteristiku nebo maximální výkon modulu a nebyla tedy na první pohled patrná v měření volt-ampérové charakteristiky. Jednou z nevýhod této metody je však rychlý pokles napětí v počátku měření. Tato nevýhoda by mohla být odstraněna změnou řídícího softwaru měření tak, aby přístroje v počátku odečítaly hodnoty v kratším časovém intervalu. Dalším zpřesněním této metody by mohlo být průměrování hodnot naopak v konečné fázi měření, kdy napětí klesne na velmi nízkou hodnotu, což je problém zejména při měření samostatných článků.

Metoda měření závěrných charakteristik se naopak příliš neosvědčila. Původní myšlenka, že změna kapacity článků v důsledku degradace ovlivní špičku na charakteristice v závěrném směru se nijak nepotvrdila. I když se kapacita měnila, jak vyplynulo také z impedanční spektroskopie, tak tyto špičky na jednotlivých charakteristikách nevykazovaly žádný trend a zůstávaly stále přibližně stejné.

Zbylé dvě použité metody jsou běžně pro diagnostiku používány. V případě měření volt-ampérových charakteristik se ukázalo jako důležité sledování paralelního odporu, jehož pokles může znamenat počátek degradace modulu. Elektroluminiscenční snímky pak ukázaly svou praktičnost ve sledování průběhu degradace.

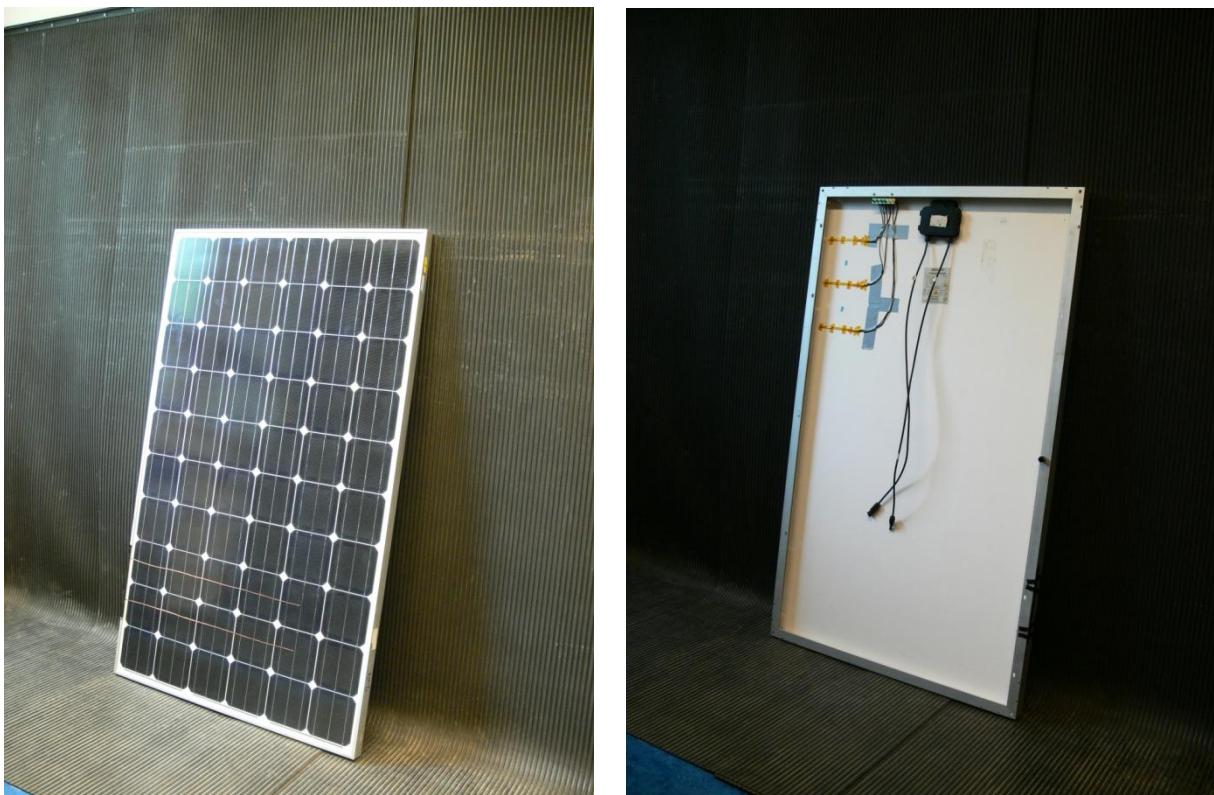
Další částí práce byl pokus o "vyléčení" zdegradovaného modulu. Všechny parametry s výjimkou paralelního odporu se podařilo vrátit na původní hodnotu a některé parametry dokonce dosáhly hodnoty mírně vyšší. Modul použitý pro tento experiment vykázal pokles paralelního odporu zhruba o 35% po procesu léčení. Pro zjištění, zda se tato hodnota dále přiblížuje té původní s prodlužující se dobou léčení, bylo provedeno poslední měření po dalších 144 hodinách působení napětí ve smyslu léčby. Toto měření ukázalo, že parametry modulu se dále nemění. Lze tedy vyslovit domněnku, že nevratnost paralelního odporu může ukazovat na fakt, že nelze neomezeně léčit zdegradované moduly.

#### 4. CITOVANÁ LITERATURA

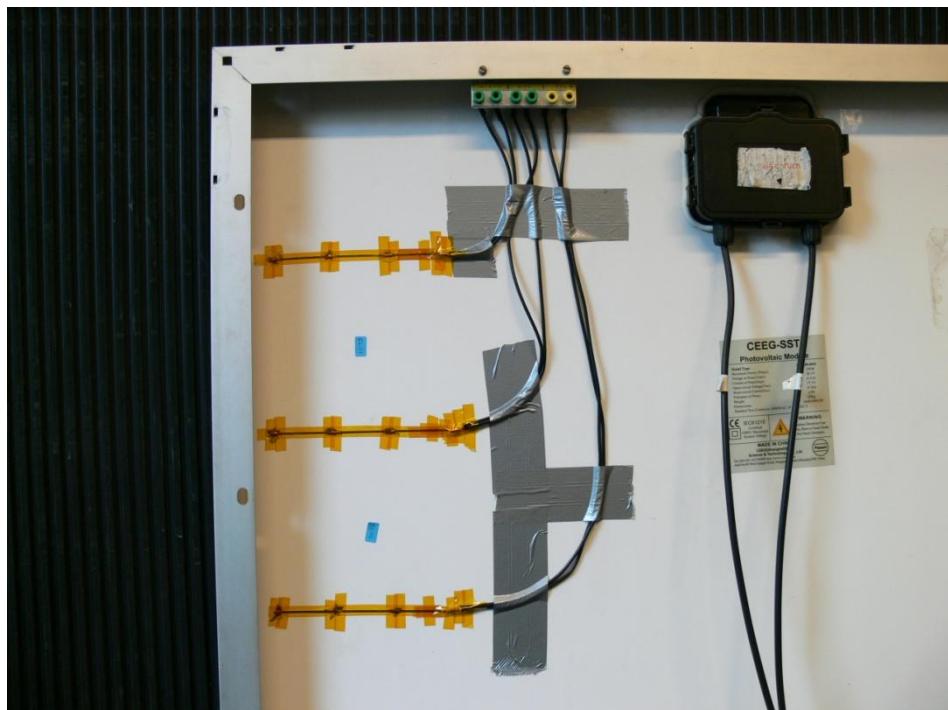
1. BAUER, J., V. NEUMANN, S. GROßER, C. HAGENDORF, M. SCHÜTZE a O. BREITENSTEIN. On the mechanism of potential-induced degradation in crystalline silicon solar cells. *Physica Status Solidi RRL*. 2012, **6**(8), 331-333. DOI: 10.1002.
2. LAUSCH, Dominik, Volker NAUMANN, Otwin BREITENSTEIN, Jan BAUER, Andreas GRAFF, Jöerg BAGDAHN a Christian HAGENDORF. Potential-Induced Degradation (PID): Introduction of a Novel Test Approach and Explanation of Increased Depletion Region Recombination. *IEEE Journal Of Photovoltaics*. 2014, **4**(3), 834-840.
3. BERGHOOLD, J., O. FRANK, H. HOEHNE, S. PINGEL, B. RICHARDSON a M. WINKLER. *Potential Induced Degradation of solar cells and panels*.
4. HOFFMANN, Stephan a Michael KOHL. Effect of humidity and temperature on the potential-induced degradation. *Progress in photovoltaics*. 2012, **2014**(22), 173-179. DOI: 10.1002.
5. GRAY, Jeffrey. The Physics of the Solar Cell. *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, Second Edition*. **2011**, 82-129.
6. ČERNÁ, Ladislava, Vítězslav BENDA a Zdeněk MACHÁČEK. Determination of Recombination Centers in c-Si Solar Cells from Dark I-V Characteristics. *IEEE*. 2011, , 172-175.
7. KOHL, Michael a Stephan HOFFMANN. Impact of rain and soiling on potential induced degradation. *Progress in photovoltaics*. 2016, **2016**(24), 1304-1309. DOI: 10.1002.
8. YAMAGUCHI, Seira, Sachiko JONAI, Kohjiro HARA, et al. Potential-induced degradation of Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> photovoltaic modules. *Japanese Journal of Applied Physics*. 2015, **54**(08KC13). DOI: 10.7567.
9. YAMAGUCHI, Seira, Atsushi MASUDA a Keisuke OHDAIRA. Behavior of the potential-induced degradation of photovoltaic modules fabricated using flat mono-crystalline silicon cells with different surface orientations. *Japanese Journal of Applied Physics*. 2016, **55**(04ES14). DOI: 10.7567.
10. SPATARU, Sergiu Viorel, Dezso SERA, Peter HACKE, Tamas KEREKES a Remus TEODORESCU. Fault identification in crystalline silicon PV modules by complementary analysis of the light and dark current-voltage characteristics. *Progress in photovoltaics*. 2015, **2016**(24), 517-532. DOI: 10.1002.
11. Benda, Vítězslav. Přednášky z předmětu B13SVS - Systémy využití solární energie. 2017.
12. ČERNÁ, Ladislava. *Diagnostika fotovoltaických článků z krystalického křemíku*. Praha, 2010. Vedoucí práce Prof. Ing. Vítězslav Benda, CSc.

## 5. PŘÍLOHY

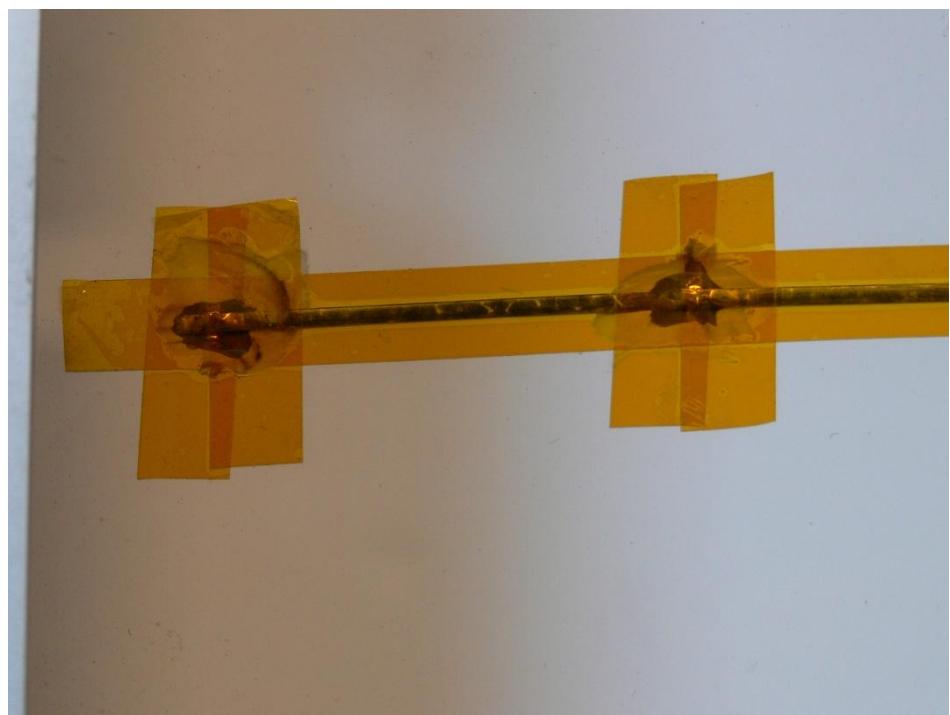
### 5.1. POUŽITÝ MODUL



Příloha 1 - Přední a zadní strana použitého modulu

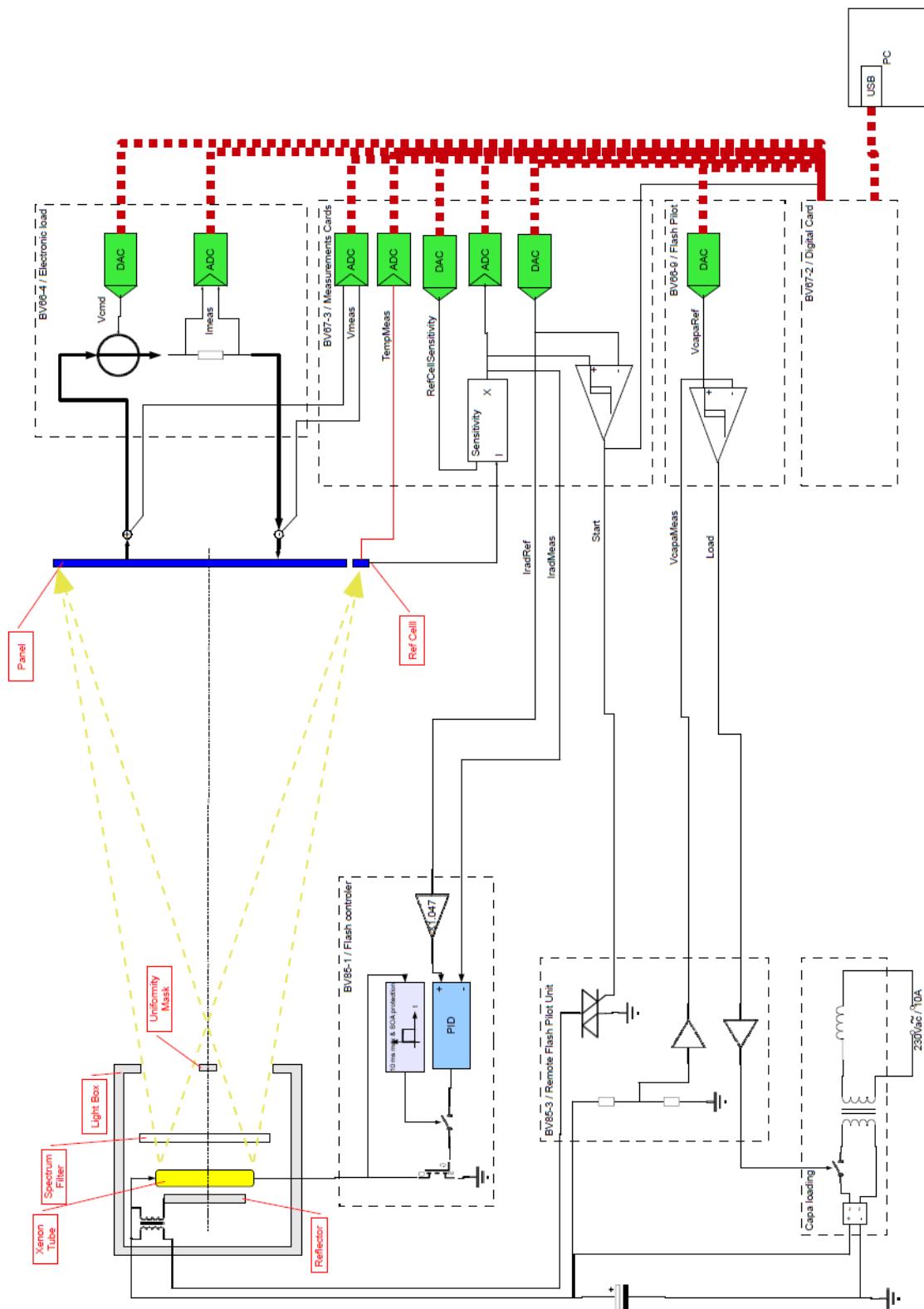


Příloha 2 - Nakontaktované články



Příloha 3 - Detail nakontaktování článku

## 5.2. FUNKČNÍ DIAGRAM PASAN ELECTRONICS



Příloha 4 - Přesné schéma pracoviště pro měření volt-ampérových charakteristik