

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ



**DIPLOMOVÁ
PRÁCE**

**Suchánek
Jakub**

2022

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Suchánek** Jméno: **Jakub** Osobní číslo: **466643**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra měření**
Studijní program: **Inteligentní budovy**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Vliv teploty na paralelní odpor fotovoltaických modulů

Název diplomové práce anglicky:

Influence of temperature on parallel resistance of PV modules

Pokyny pro vypracování:

- 1) Zpracujte rešerši na téma měření voltampérových charakteristik neosvětlených modulů (dark current) a impedanční spektroskopie.
- 2) Realizujte řadu měření voltampérových charakteristik neosvětlených modulů (dark current) a impedanční spektroskopii na různých typech fotovoltaických modulů v teplotním rozsahu $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ s cílem určit vliv teploty na paralelní odpor modulu.
- 3) Pokuste se určit vazbu mezi různými typy konstrukce fotovoltaických modulů a jejich kapacitou.

Seznam doporučené literatury:

- [1] B. Werner, W. Kolodenny and A. Dziedzic, "Temperature dependence of dark current features of CdTe thin-film solar cells," 2009 32nd International Spring Seminar on Electronics Technology, 2009, pp. 1-3, doi: 10.1109/ISSE.2009.5207011.
- [2] Radziemska, E. (2006), Effect of temperature on dark current characteristics of silicon solar cells and diodes. Int. J. Energy Res., 30: 127-134. <https://doi.org/10.1002/er.1113>
- [3] Erees Q.B. Macabebe, E. Ernest van Dyk, Parameter extraction from dark current-voltage characteristics of solar cells, South African Journal of Science 104, September/October 2008

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Tomáš Finsterle, Ph.D. katedra elektrotechnologie FEL

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

Datum zadání diplomové práce: **08.02.2022** Termín odevzdání diplomové práce: **20.05.2022**

Platnost zadání diplomové práce:
do konce letního semestru 2022/2023

Ing. Tomáš Finsterle, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu literatury a zdrojů.

Dále prohlašuji, že nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu §60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze den

.....

podpis autora

Poděkování

Děkuji svému vedoucímu diplomové práce panu Ing. Tomáši Finsterlemu, Ph.D. za vedení a odbornou pomoc jak s vypracováním diplomové práce, tak při měřeních experimentu.

Anotace

Jméno autora: Bc. Jakub Suchánek
Název diplomové práce: Vliv teploty na paralelní odpor fotovoltaických modulů
Akademický rok: 2021/2022
Studijní program: Inteligentní budovy
Katedra: Katedra elektrotechnologie
Vedoucí DP: Ing. Tomáš Finsterle, Ph.D.

Abstrakt

Cílem této práce je prozkoumat vliv teploty na paralelní odpor fotovoltaických modulů. V teoretické části jsou podrobněji popsány pouzdřící materiály pro monokrystalické křemíkové moduly. Pozornost je věnována především jejich vlastnostem, jejich degradaci a možnostem jejich použití. Dále se v teoretické části popisují měřicí metody použité v rámci experimentu. Konkrétně jde o metody impedanční spektroskopie, elektroluminiscence, měření V-A charakteristik pomocí flash testu a měření charakteristik při zastínění (dark current).

V experimentální části jsou popsány výsledky měření a zhodnocen vliv teploty na paralelní odpor modulů. Dále byla zkoumána vazba mezi kapacitou a typy konstrukce fotovoltaických modulů.

Klíčová slova: Paralelní odpor, etyl vinyl acetát (EVA), polyolefin, impedanční spektroskopie, dark current, vliv teploty

Abstract

The aim of this work is to investigate the effect of temperature on the shunt resistance of photovoltaic modules. The theoretical part describes in detail the encapsulating materials for monocrystalline silicon modules. Attention is paid mainly to their properties, their degradation and the possibilities of their use. Furthermore, the theoretical part describes the measurement methods used in the experiment. Specifically, these methods are impedance spectroscopy, electroluminescence, measurement of V-A characteristics using a flash test and measurement of shading characteristics (dark current).

The measurement results are described in the experimental part and the effect of temperature on the shunt resistance of the modules is evaluated. Finally, the relationship between the capacity and the construction types of photovoltaic modules was investigated.

Keywords: Shunt resistance, ethyl vinyl acetate (EVA), polyolefin, impedance spectroscopy, dark current, temperature effect

Obsah

1.	Úvod	9
2.	Etylen vinyl acetát	10
2.1.	Fyzické a mechanické vlastnosti	13
2.2.	Degradace	14
2.2.1.	Delaminace	15
2.2.2.	Bubliny	16
2.2.3.	Žloutnutí/hnědnutí	16
3.	Polyolefin	16
4.	Impedanční spektroskopie	18
4.1.	Měření a zobrazení naměřených dat	19
5.	Dark current	23
5.1.	Flash test	26
6.	Elektroluminiscence	27
7.	Experiment	28
7.1.	Počáteční stav	29
7.1.1.	Elektroluminiscence	29
7.1.2.	Flash test	32
7.1.3.	Dark current	38
7.2.	Impedanční spektroskopie	40
7.3.	Flash test	46
7.4.	Dark current	48
8.	Závěr	49
	Seznam použité literatury	51
	Seznam obrázků	55
	Seznam tabulek	56

Seznam grafů.....	57
-------------------	----

1. Úvod

V současné době, kdy se řeší výroba „zelené“ elektrické energie víc než kdykoliv před tím, roste obliba fotovoltaických modulů. Dokonce se jedná o jeden z nejvíce rozvíjených oborů v současnosti. Do značné míry k tomu přispívá stále se zvyšující účinnost fotovoltaických modulů a příznivá cena na jejich pořízení. Dnes již moduly běžně dosahují účinnosti kolem 20 % a některé nové dokonce dosahují účinnosti až 25 %. Nejpoužívanější a nejrozšířenější jsou moduly s články z krystalického křemíku.

Princip fotovoltaického jevu, na kterém krystalické křemíkové články fungují, byl objeven již v 19. století. První smysluplné využívání (nelaboratorní) bylo u vesmírných zařízení, ale používání modulů (článků) ve větší míře přinesl až rozvoj polovodičové technologie a ropná krize v 70. letech 20. století. [1]

A přestože se fotovoltaické moduly ve větší míře komerčně používají již od 70. let 20. století, stále se u nich objevují nejen staré, ale i nové degradační procesy, které negativně ovlivňují jejich vlastnosti, v krajních případech nenávratně poškozují modul či článek. Je to dáno všeobecně známým faktem, že veškeré materiály podléhají vnějším vlivům, ať už jde o chemické vlivy, mechanické namáhání nebo klimatické podmínky. [2]

Úkolem této diplomové práce bylo pozorovat hodnoty paralelního odporu, jejich změnu a chování v závislosti na teplotách, kterým byly zkoumané moduly vystaveny. Paralelní odpor je jedním z nejdůležitějších parametrů, které ovlivňují celkové vlastnosti fotovoltaických modulů.

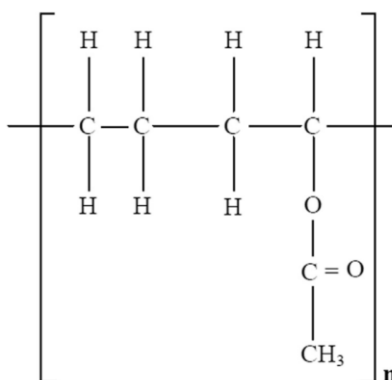
2. Etylen vinyl acetát

Etylen vinyl acetát (dále už jen jako EVA) je semikrystalický kopolymer, který má za úkol nejen zapouzdřit fotovoltaické články a další součásti modulu. Jedná se o směs etylenu a vinyl acetátu, kdy se obvykle pro pouzdrící materiál používá EVA s obsahem vinyl acetátu 28 až 33 %. U zapouzdřovacích materiálů jsou požadovány určité vlastnosti (viz níže a tabulka 1). U soudobých modulů se EVA fólie nachází z obou stran fotovoltaických článků a z přední části modulu bývá zakryta sklem. Od EVA se v dlouhodobém měřítku (20 až 25 let) požadují tyto vlastnosti:

- Poskytování konstrukční podpory a zachování správné pozice solárních článků v modulu, ať už během výroby, skladování, přepravy, instalace nebo během provozu.
- Dobrá propustnost slunečního záření (uvádí se 380 nm až 1200 nm v solárním spektru) a nízká odrazivost slunečních paprsků. Počítá se s propustností 90 % a ztrátou menší než 5 % po 20 letech v provozu.
- Elektrická izolace, která zabraňuje vzniku nebezpečných situací jak z bezpečnostního, tak z provozního hlediska během celé životnosti fotovoltaického modulu.
- Fyzická izolace (před vnějším prostředím), díky čemuž se předejde degradaci jednotlivých komponent (článků a součástí obvodů) v modulu.
- Dobrý odvod (vedení) tepla pro fotovoltaické články a pro nejrůznější komponenty obvodů, aby nedocházelo k přehřívání a vzniku nebezpečných situací. [3], [4]

Tabulka 1 - Základní požadavek na vlastnosti zapouzdřovacích materiálů; [5]

požadované vlastnosti			
chemické	mechanické	optické	elektrické
odolné vůči fotoreakcím	dobrá pevnost v tahu	dobrá čírost	vhodné izolační schopnosti
odolné vůči absorpci vody, vlhkosti a plynům	schopnost prodloužení	dobrá propustnost (transmitance $\geq 90\%$)	nízké svodové proudy
odolné vůči oxidaci			dielektrické vlastnosti
odolné vůči reakcím vyvolaným degradací produktu	dobrá přilnavost (adheze)		
odolné vůči reakcím rozhraní			



Obrázek 1 - Chemické složení EVA; [5]

První ethylen kopolymer (zahrnující EVA) byly vytvořeny v 30. letech 20. století ve Velké Británii. Od konce 50. let do dneška jsou EVA kopolymer hojně používány, je to dáno širokou všestranností materiálu. V dnešní době EVA zahrnuje širokou skupinu materiálů a jedná se o nejpoužívanější typ pouzdrícího materiálu, který se nachází přibližně v 90 % nainstalovaných modulů. Vlastnosti EVA polymeru jsou nejvýrazněji ovlivněny obsahem vinyl acetátu, ale ve složení EVA se nacházejí i různé další složky. Pro použití kopolymeru jakožto zapouzdřovacího materiálu se jedná především o činidla a stabilizátory, ty mají totiž za úkol vhodně upravit výsledné vlastnosti zapouzdřovací vrstvy. [6]

V dnešní době se EVA vyrábí ve formě extrudované fólie (nejběžnější tloušťka 0,5mm). Nejpoužívanější výrobní proces je tzv. radikálová polymerace. Během procesu je aplikován tlak 140 MPa a teploty od 180 do 250 °C. Výsledkem je průhledný

či průsvitný kopolymer s vysokou pevností. Materiál také dosahuje nízké krystaličnosti (vinyl acetát zasahuje do krystalizace kopolymeru). [7]



Obrázek 2 - EVA fólie; [8]

Aby EVA jako pouzdřící materiál dobře sloužil během provozu fotovoltaického modulu, je nutné provést laminaci a následné vytvrzení. Toto probíhá ve speciálním zařízení (stole) s krytem a dvěma komorami oddělenými membránou. Modul se vkládá do spodní komory a během procesu laminace pomalu stoupá teplota na požadovanou hodnotu okolo 120 °C. Celý proces probíhá bez přítomnosti vzduchu v komorách (vakuum zabraňuje vzniku dutin). Roztavená EVA (teploty přesahují teplotu tání kopolymeru) vyplní veškeré prostory mezi články, sklem a zadní částí modulu, poté je horní komora naplněna vzduchem a membrána mezi komorami stlačí laminát. Následuje další proces, kterým je vytvrzování. EVA se vytvrzuje pomocí peroxidů, tím kopolymer získá tepelnou a termo-chemickou stabilitu. Existují tři základní typy vytvrzovacích činidel: standardní vytvrzení, rychlé vytvrzení a ultra rychlé vytvrzení. V dnešní době se nejčastěji používají rychlá a ultra rychlá vytvrzovací činidla, je to proto, že jsou ekonomicky výhodnější. Proces vytvrzování EVA spočívá ve změně jejich fyzikálních vlastností (podobné pryži), to je docíleno pomocí kombinace chemické reakce, katalyzátoru a tepla (150 °C) během polymerizace. Proces probíhá 10 až 60 minut, závisí to na typu použitého vytvrzovacího prostředku. [5]

EVA obsahuje také tzv. retardéry hoření, které, jak název napovídá, mají zabránit potencionálním požárům. Posledními významnějšími přísadami jsou UV absorbéry, UV stabilizátory a anti-oxidanty, které mají za úkol bránit degradačním procesům. Všechny příměsi v EVA kopolymeru se pohybují v řádech desetin procenta (kromě vytvrzovacího činidla, tam je to okolo 1,5 %) viz tabulka 2. [7]

Tabulka 2 - Běžné složení EVA; [5]

komponent (složka)	% (w/w)
EVA kopolymer	97,943
UV absorbér	0,294
UV stabilizátor	0,098
anti-oxidant	0,196
vytvrzovací činidlo	1,469

2.1. Fyzické a mechanické vlastnosti

Podle obsahu vinyl acetátu se liší vzhled a vlastnosti EVA. Při 5 % hmotnostního procenta (weight %, wt%) je EVA ve formě neprůhledného materiálu připomínajícího plast, ale při vyšším obsahu vinyl acetátu je ve formě křišťálově čirého lehce lepivého a gumovitého materiálu. Hustota EVA je velmi úzce spjata s obsahem vinyl acetátu. Hmotnostní procento vinyl acetátu bývá obvykle okolo 10 až 40 % (zbytek převážně ethylen). [6]

Povrchová tvrdost EVA je závislá na molekulové hmotnosti a zároveň na stupni krystalizace. Čím vyšší obsah vinyl acetátu (nižší stupeň krystalizace), tím nižší tvrdost materiálu.

Jedná se o houževnatý materiál s poměrně malým modulem pružnosti v ohybu. Největší vliv má stupeň krystalizace. Méně je modul pružnosti v ohybu ovlivňován rozvětvením řetězce. V tabulce 3 Modul pružnosti v ohybu (pro 1% deformaci) jsou uvedeny typické hodnoty EVA v závislosti na obsahu vinyl acetátu [6]

Tabulka 3 - Modul pružnosti v ohybu pro EVA kopolymery; [6]

% vinyl acetátu	modul pružnosti [MPa]
2%	170
7%	160
9%	110
12%	105
17%	60
28%	20

Obsah % vinyl acetátu ovlivňuje také další mechanické vlastnosti, ať už jde o napětí, či míru deformace. Při vyšší koncentraci vinyl acetátu vzniká vysoká pevnost při prodloužení. Lze v zásadě říci, že materiál připomíná gumu, ale EVA se plně neobnoví (změní tvar), když natažení překročí 100 %. Díky výše popsáným vlastnostem

EVA (přes 5 wt% vinyl acetátu) je možnost, že selže v provozu kvůli nárazovým silám, velmi malá. To ovšem platí jen do -40 °C. [6]

2.2. Degradace

U téměř každého materiálu dochází k degradaci, tedy k procesům, kdy materiál ztrácí své vlastnosti. To platí i pro EVA fólii používanou jako zapouzdřovací materiál do fotovoltaických modulů. EVA degraduje a s tím je spojené i stárnutí, kdy se jedná o nevratné změny vlastností působením jednoho nebo více ovlivňujících faktorů. Stárnutí lze dělit na vnitřní a vnější.

Vnitřní stárnutí je proces, který je nevratný. To znamená nevratné změny ve vlastnostech EVA fólie. Stárnutí se projevuje často takto:

- zhoršení elektrických vlastností,
- snížení mechanické pevnosti,
- usazování prachu, soli, písku, sazí a dalších nečistot na povrch materiálu (následuje zdrsňení povrchu),
- vlhnutí (souvislost se vznikem spár),
- změna struktury materiálu (následek je praskání a křehnutí).

Ovšem existují i procesy, které lze zvrátit (úplně, či jen částečně), tyto procesy lze také nazvat jako přechodné. V naprosté většině se jedná o změny fyzikálního charakteru, může se jednat třeba o vlhnutí. Jedná se o vratné procesy, protože, když vlivy ovlivňující vlastnosti přestanou působit, vlastnosti se vrátí na původní hodnoty. Nevratné procesy mají většinou chemicko-fyzikální ráz, kdy vznikají ve strukturách nevratné změny (převážně negativní vůči požadovaným vlastnostem). [5]

Vnější činitelé způsobující změny vlastností bývají obvykle tyto:

- klimatické vlivy (počasí),
- teplota,
- záření,
- vzdušný kyslík,
- mechanické namáhání (otřesy, rázy a vibrace),
- chemické vlivy,
- elektrické pole.

Degradace EVA probíhá hlavně pomocí tří činitelů, a to jsou teplota, vlhkost a UV záření. Teplota je zodpovědná za většinu chemických reakcí degradace modulů.

Vlhkost (může mít různou podobu: mlha, rosa, déšť atd.) působí na „výkonnost“ kopolymeru. Hydrolyza totiž zahrnuje chemický rozklad materiálů v důsledku interakce s molekulami vody. Negativní projevy vlastností zapříčiněné vlhkostí jsou závislé na rychlosti jejího pronikání do modulu. Nejčastěji se vlhkost dostává dovnitř pomocí difuze.

Sluneční záření, které často v kombinaci s vlhkostí způsobí chemické reakce uvnitř zapouzdřovacího materiálu, může ovlivňovat výkonnost modulu tím, že materiál mění svou barvu, a tak se sníží propustnost záření. Uvnitř poté může docházet k oxidaci, která vede ke změně struktur v polymeru. Výsledkem může být křehnutí a praskání, či jiná ztráta mechanických a fyzikálních vlastností.

Veškeré tyto problémy vedou nejčastěji k těmto typům degradace:

- delaminace,
- bubliny,
- žloutnutí/hnědnutí. [5]

2.2.1. Delaminace

Jedná se o jev, kdy kvůli nedostatku přilnavosti mezi vrstvou EVA fólie a článkem nebo sklem ve fotovoltaickém modulu a kvůli následnému oddělení těchto vrstev může dojít až ke zničení celého modulu. Následkem je vznik různých dutin uvnitř struktury modulu.

Výskyt delaminace často vede ke dvěma nežádoucím efektům: zvýšení odrazu paprsků a pronikání vody (vlhkosti) do struktury modulu. Výskyt delaminace u okrajů konstrukce modulu přináší kromě ztráty výkonu ještě také zvýšené elektrické riziko (electrical risk) při manipulaci s modulem a při jeho instalaci.

Delaminace způsobuje ztrátu propustnosti slunečního záření, protože materiály nejsou dobře opticky spojeny. Při proniknutí vlhkosti do dutiny vznikají chemické reakce (působením vody s chloridy) a kyselina octová, které mají za následek korozi kovových částí modulu. To vede k zvýšení odporu nebo k elektrickému selhání (electric failure). Nutno dodat, že zde popsany defekt se vyskytuje převážně v horkém a vlhkém prostředí/klimatu. [9], [10]

2.2.2. Bubliny

Jedná se o defekt, který vede k degradaci fotovoltaického článku a k zhoršení vlastností modulu. Bubliny se podobají delaminaci s tím rozdílem, že nedostatek přilnavosti EVA fólie postihuje jen malou oblast modulu. Bubliny na zadní vrstvě vznikají díky chemické reakci, při které uvnitř konstrukce modulu vznikají plyny (ty vytvoří bublinu). Tyto dutiny/vypoukliny (bubliny) znesnadňují odvod tepla z článků. Články se přehřívají a zkracuje se jejich životnost. Je to způsobeno tím, že bubliny tvoří vzduchové komory, a přestože se teplota vzduchu v komoře zdá nižší než v sousedních člancích, teplota článku je v nich ve skutečnosti vyšší, protože teplo z článku je méně rozptylováno. Tyto negativní jevy se mohou projevit hned při vniku defektu. [10]

2.2.3. Žloutnutí/hnědnutí

Jedná se o častou vadu EVA fólie, která se objevuje hlavně na modulech z krystalického křemíku. Projevuje se vizuálně tak, že původní bílý povrch žlutne (může až zhnědnout). Způsobuje změnu propustnosti světla dopadajícího na solární články, a tím i pokles generovaného výkonu. Hlavní příčinou této vady u EVA je UV záření a působení vody v kombinaci s teplotami nad 50 °C, které způsobují změnu v chemické struktuře (vzniká kyselina octová). Tato degradace neovlivňuje tolik výkonnost modulu jako třeba delaminace. [5], [10]

3. Polyolefin

Jedná se o nově vyvinuté nezesíťující (non-crosslinking) materiály, které se mohou využít pro laminaci fotovoltaických modulů jako alternativa k EVA fólii. V dnešní době má EVA dominantní postavení jako materiál používaný k zapouzdření modulů (převážně s krystalickým křemíkem), avšak bylo prokázáno několika studiemi, že právě EVA fólie se podílí na snížení výkonu nemalou měrou. Dochází k tomu během stárnutí a během degradačních procesů EVA, ať už jde o hnědnutí/žloutnutí (viz příslušná kapitola), absorpci vlhkosti a tvorbu kyseliny octové (vede ke korozi kovových částí modulu) nebo delaminaci a vznik bublin.

Polyolefiny, látky, které lze použít jako pouzdřicí materiál, lze rozdělit na dvě skupiny. Jde o polyolefinové elastomery (POE) a o termoplastické polyolefiny (TPO).

Nutno upozornit, že název pouzdřících materiálů označovaných ve fotovoltaickém průmyslu jako polyolefiny je nepřesný, protože většina těchto materiálů je založena na kopolymerech polyetylenů. Konkrétně oba zmíněné materiály (POE a TPO) se skládají z polyethylenové páteře s nespočtem bočních skupin. Ty se liší v závislosti na požadovaných vlastnostech pouzdřícího materiálu. Konkrétně se nahrazují boční skupiny vinyl acetátu (EVA) skupinami složenými z akrylů, akrylových kyselin nebo n-alkanů. Díky tomu TPO a POE mají oproti EVA kopolymerům mnoho výhod, mezi nejvýraznější patří, že se uvnitř modulu netvoří kyselina octová (způsobuje degradaci a korozi modulů). [11], [12]

Přestože jak POE, tak TPO materiály se na trhu již několik let pohybují, doposud vyšlo jen málo odborných publikací popisujících základní materiálové vlastnosti zapouzdření relevantního pro laminaci a také dlouhodobé chování fotovoltaického modulu s těmito materiály při provozu. Stejně tak vyšlo málo publikací, které se zabývají podrobněji porovnáním vlastností a rozdíly mezi EVA, TPO a POE. [13]

Polyolefinové elastomery (POE) mohou, jak již bylo zmíněno, sloužit jako náhrada za EVA fólii, protože mají vynikající účinnost. Jedná se o kopolymer skládající se z ethylenů a oktylenu. Krystalizační vlastnosti POE jsou dány právě obsahem a prostorovou distribucí oktylenu v něm. Vrstva POE ve fotovoltaickém modulu (stejně jako EVA) má zasítovanou složku, která je vytvořena pomocí síťovacích činidel. Tím pádem se laminační proces velmi podobá procesu u EVA fólie. POE vykazuje vysokou propustnost slunečního záření, vynikající přilnavost a dobrou odolnost proti tečení s malou deformací. Také bylo zjištěno, že moduly s POE méně trpí na PID degradaci. Díky svým vlastnostem se uvažuje o jeho využití i v náročných prostředích, protože velice dobře odolává střídání vysoké a nízké teploty. Zatím však panují obavy o jejich stabilitu v dlouhodobém měřítku (při použití jako zapouzdřovacího materiálu fotovoltaického modulu). Další nevýhodou je, že k dosažení potřebných vlastností látky je nutné namíchat „koktejl chemikálií“ (jako třeba různé stabilizátory, přísady, peroxidová tužidla, UV absorbéry). [13]

U zapouzdřovací látky na bázi termoplastického polyolefinu (TPO) není nutné provést zasítování, protože zapouzdřovací látka má obvykle vyšší teplotu tání (okolo 100 °C), která je dostatečná pro zajištění nezbytné stability fotovoltaického modulu během provozu. To přináší dvě výhody: eliminaci chemikálií potřebných k síťování a výrazné zkrácení času laminačního cyklu (není potřeba vytvrzování látky během

procesu síťování). Díky absenci síťovacího procesu, který je obzvláště časově náročný, lze celý proces laminace provést za méně než 10 minut.

V současné době není příliš mnoho poznatků o TPO použitých k zapouzdření modulů, avšak nezasítující TPO může být v budoucnu vhodnou náhradou za EVA. Jeho výhody spočívají v tom, že se vyhýbá negativním účinkům spojených s procesem síťování za pomoci peroxidového činidla. Také díky absenci síťovacího procesu se fyzikální vlastnosti TPO během procesu laminace téměř nemění. Použitím TPO lze díky jeho vysokému objemovému odporu (high volume resistivity) zabránit vzniku PID degradace nebo do značné míry omezit její šíření v krystalických modulech a zabránit nižší rychlosti prostupu vodní páry do konstrukce. Bylo zjištěno, že u TPO nedochází oproti EVA fólii k výrazné změně propustnosti, hodnoty žlutosti (yellowness value) a indexu oxidace během provozu (obecně je EVA méně stabilní než TPO v závislosti na počasí). [11], [12]

4. Impedanční spektroskopie

Jedná se o experimentální měřicí metodu, která se používá k získávání informací o chemických a fyzikálních vlastnostech materiálů, o rozhraní a o více přechodových (multijunction) zařízeních. Mezi to lze zahrnout i fotovoltaický článek. Měření se provádí v rozsahu frekvence obvykle od 1 MHz do 0,1 mHz a zkoumají se odporové a kapacitní vlastnosti zařízení a elektrochemických článků. Během měření je monitorována odezva vzorku na časově proměnlivé elektrické pole. Podíl vstupní elektrické energie a elektrické energie rozptýlené měřeným vzorkem, nebo časového měřítka relaxace (čas, který je potřebný pro vzorek k vrácení se do rovnováhy po excitaci vstupem) je měřen jako funkce frekvence. Vstupní amplituda signálu musí být malá, aby byla odezva vzorku lineární. Jako vstupní signál je používáno střídavé napětí U_{ac} (zpravidla od 5 do 10 mV). Relaxační procesy (deformace mřížky, elektrická a iontová vodivost, polarizace elektrod) jsou zkoumány změnou frekvence střídavého proudu U_{ac} a zároveň se měří odezva střídavého proudu I_{ac} . [14], [15]

Impedanční spektroskopie se považuje za výkonný diagnostický nástroj pro monitoring transportních a rekombinačních procesů v různých bodech volt-ampérové (V-A) křivky solárního článku. Díky této měřicí metodě lze sledovat stárnutí zařízení a ztrátu výkonu (výsledek vnějších stresových faktorů) a z naměřených hodnot

lze i určit hodnoty kapacity, ztrátového činitele D a reálné a imaginární části impedance. Výsledkem měření je impedanční spektrum. Obecně platí, že aby měření mělo relevantní výsledky, je nutné provést impedanční spektroskopii jako funkci sledovaného experimentálního (měřeného) parametru (např. napětí, podmínky osvětlení, teplota, tloušťka aktivní vrstvy solárního článku nebo tloušťka transportních vrstev). Impedanční spektroskopii lze použít také jako nástroj pro diagnostiku ztráty výkonu během testu stárnutí. Ale je nutné brát v potaz, že pouze jedno samotné impedanční spektrum nezaznamená užitečnou informaci.

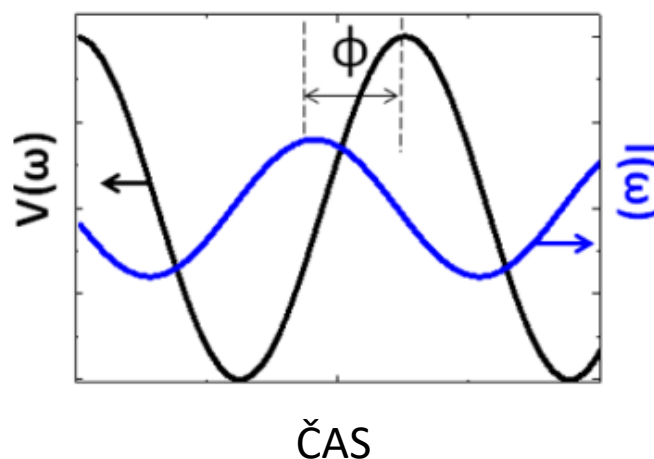
Jak již bylo řečeno, měření pomocí impedanční spektroskopie se provádí aplikací střídavého napětí U_{ac} na vzorek a měřením odezvy proudu I_{ac} (viz obrázek 3) v závislosti na čase. U_{ac} a I_{ac} jsou sinusové funkce, které lze vyjádřit těmito dvěma rovnicemi:

$$U_{ac}(t) = U_0 * \sin(\omega t) = U_0 e^{i\omega t}$$

$$I_{ac}(t) = I_0 * \sin(\omega t + \phi) = I_0 e^{i(\omega t + \phi)}$$

(1)

U_0 je amplituda signálu napětí a I_0 je amplituda signálu proudu, ω je úhlová frekvence ($\omega = 2\pi f$) a ϕ označuje časový posun mezi $U_{ac}(t)$ a $I_{ac}(t)$. [14]



Obrázek 3 - zobrazení amplitudy $U(t)$ a $I(t)$ v čase: [14]

4.1. Měření a zobrazení naměřených dat

U měřeného vzorku se zkoumá proudová odezva vůči vstupnímu napětí. Podle Ohmova zákona jde o odpor systému, ale musí se vzít v úvahu, že vstupní napětí je


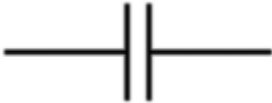

střídavé, proto je odpor systému závislý na frekvenci, a tudíž se označuje jako impedance Z . Ta obsahuje dvě složky, reálnou a imaginární.

Měřený vzorek se skládá z elementů (mohou být sériově a paralelně zapojeny), které mohou být vyjádřeny reálnými prvky (odpor/impedance, kapacitance, indukance apod.).

Pro měření je vhodné zkoumaný celek „zjednodušit“ na obvod (skládající se z ideálních prvků), kdy právě tyto obvody popisují chování systému, a také jsou důvodem ovlivnění průběhu měřicího proudu.

Impedance rezistoru je čistě reálná ($\phi = 0^\circ$) a také není ovlivňována frekvencí. Naopak ideální kondenzátor, který akumuluje elektrickou energii, má impedanci čistě imaginární ($\phi = 90^\circ$), a také se impedance nepřímo úměrně mění s frekvencí. Induktor (ideální), který ukládá energii v magnetickém poli ($\phi = -90^\circ$) a jeho impedance se přímo úměrně mění s frekvencí. Tyto vztahy jsou popsány v tabulce 4. [14], [15]

Tabulka 4 - Impedance ideálních prvků v obvodech: [8]

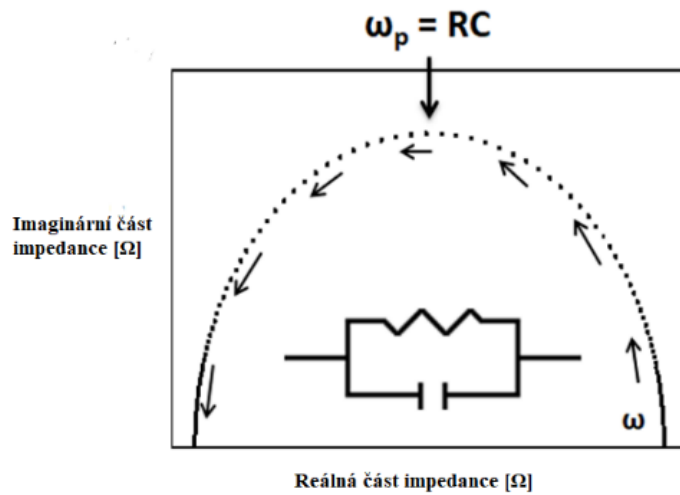
ideální prvek	Jednotka	symbol v obvodě	impedance (vzorec)
rezistor	Ω (Ohm)		$Z_R = R$
kondenzátor	F (Farad)		$Z_C = \frac{1}{i\omega C}$
induktor (cívka)	H (henry)		$Z_L = i\omega L$

Ideální relaxační proces může být modelován použitím jednoduchého obvodu, který se skládá z rezistoru a kondenzátoru v paralelním zapojení, takzvaný RC obvod. Impedance takového obvodu má vzorec:

$$Z_{RC} = \frac{R}{1 + i\omega RC} \quad (2)$$

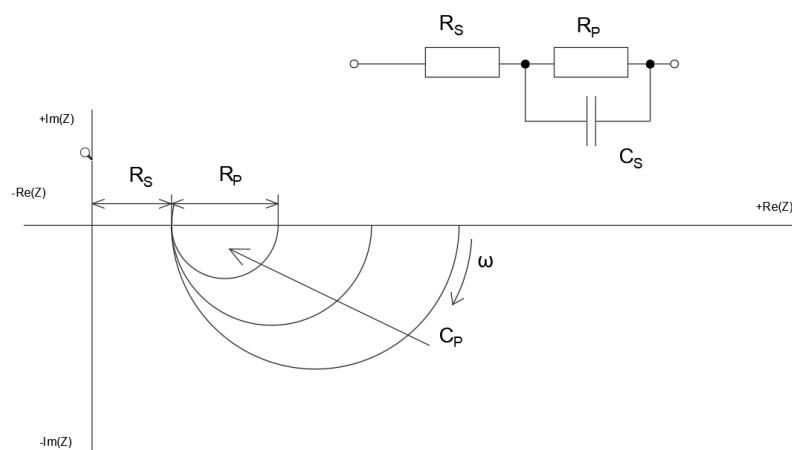
Pro takový obvod je výsledkem měření impedanční spektrum. Zobrazené spektrum je vyznačeno na Nyquistově grafu (obrázek 4), který patří spolu s Bodeovým grafem (více odstavce níže) k nejpoužívanějším zobrazením. U Nyquistova diagramu má výsledné spektrum RC obvodu tvar půlkruhu. Osy grafu tvoří imaginární složka a reálné složka impedance. Z grafu je patrné, že nezávislá proměnná (v tomto případě

frekvence) není explicitně obsažena v grafu. Nevýhodou tohoto grafu je, že frekvence příslušná ke každé hodnotě impedance Z nemůže být extrahována z grafu. Frekvence se zvyšuje směrem podle šipek na obrázku. [14]



Obrázek 4 – Nyquistův graf RC obvodu; [14]

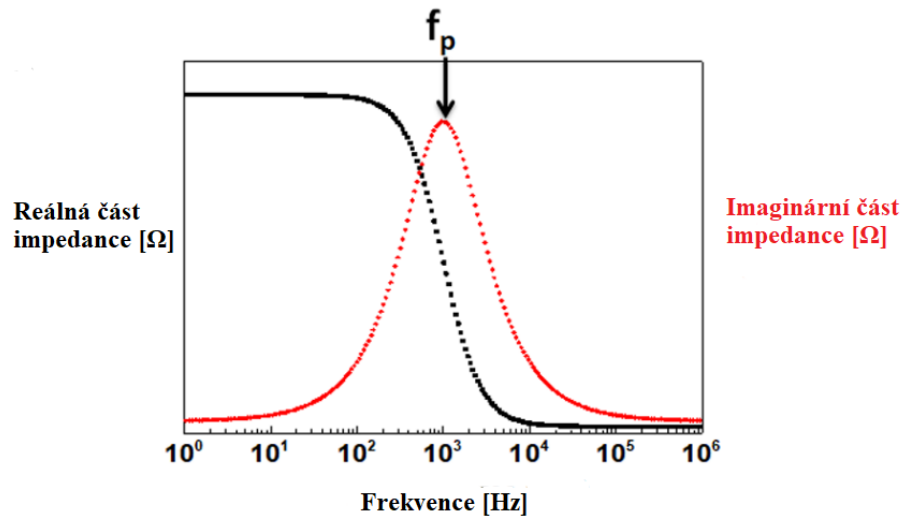
Pro měření parametrů fotovoltaických modulů se nejčastěji používá Cole-Cole diagram, což je v podstatě upravený Nyquistův diagram. Z diagramu je možné určit několik parametrů modulu, mimo jiné i kapacitu, která je nejproblematictější z těchto parametrů. Problém je hlavně v tom, že závisí na ozáření, konkrétně jde o tvorbu minoritních nosičů. To vede k rozdílným výsledkům, proto se doporučuje při měření střídavého proudu (AC) umístit měřený modul do tmy. [16]



Obrázek 5 – Cole-Cole diagram fotovoltaického článku (modulu); [16]

Pro Bodeův graf platí, že je zde vykreslována absolutní hodnota impedance nebo fázový posun proti frekvenci. Hodnoty frekvence na ose grafu jsou vynášeny

na logaritmické měřítko (viz obrázek 6). Výsledné údaje se mohou zobrazovat do jednoho grafu se dvěma osami y, anebo do dvou různých grafů.



Obrázek 6 - Bodeův graf se dvěma osami y; [14]

Avšak impedanční odezva polonekonečné difuze částic na nízkých frekvencích (např. iontů) nemůže být popsána jednoduchým RC elementem. Pro tyto případy se používá tzv. Warburgova impedance Z_W , která má vzorec:

$$Z_W = \frac{A_W}{\sqrt{i\omega}} = \frac{A_W}{\sqrt{2}\omega} - i \frac{A_W}{\sqrt{2}\omega} \quad (3)$$

A_W je Warburgův koeficient a je dán součinitelem difuze částic, a tudíž popisuje difuzí řízené procesy. Warburgův prvek způsobuje v Nyquistově grafu charakteristický trend. Jde o lineární nárůst hodnot Z při nízkých frekvencích s $\phi = 45^\circ$. Při zobecnění Warburgova prvku pomocí konstanty fázového přesunu (CPE = Constant Phase Element) dostáváme vzorec impedance:

$$Z_{CPE} = \frac{1}{Q(i\omega)^n} \quad (4)$$

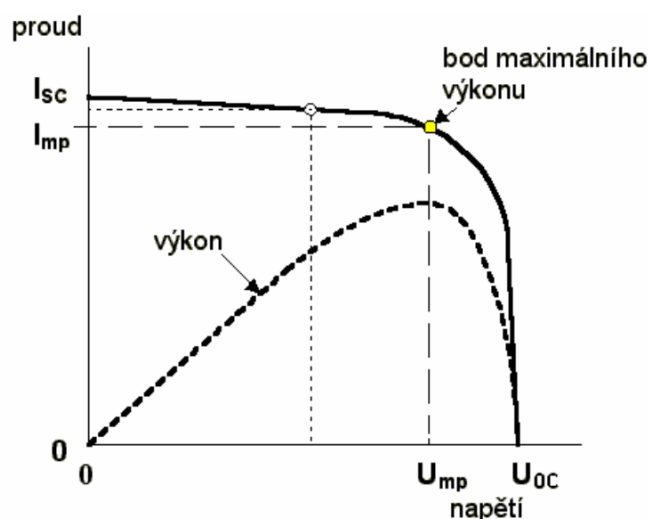
n je parametr rozptylu, který určuje fyzikální význam Q . Pokud $n = 1$, pak CPE se redukuje na ideální kondenzátor a $Q = C$. Když $n = 0$, redukuje se na skutečný rezistor a $Q = 1/R$. V poslední řadě, když $n = 0,5$, redukuje se na Warburgův prvek a $Q = 1/A_W$. CPE se často používá k popisu relaxačních dějů s rozdělením časových měřítek (to znamená časově závislých nebo disperzních procesů). Jde například o přenos náboje

v homogenním povrchu elektrody nebo transport nosiče v amorfních polovodičích. V tomto případě ideální kondenzátor je nahrazen v obvodu CPE elementem s $Q = C$ a $n > 0,5$. Distribuce v relaxačních časech ($0,5 < n < 1$) má za následek „stlačený“ nebo zkreslený půlkruh v Nyquistově grafu. [14], [15]

5. Dark current

Fotovoltaické články mohou být považovány za P-N přechodové diody, které jsou náchylné na parazitní odpory. Vysoké sériové odpory i nízké paralelní odpory snižují celkový výkon, proto je nutné vhodně analyzovat data, aby se zjistily příčiny, které k tomu vedly. A právě V-A charakteristiky, jak osvětlených, tak neosvětlených (dark) článků, reprezentují velice cenný nástroj pro určení vlastností fotovoltaických článků a modulů.

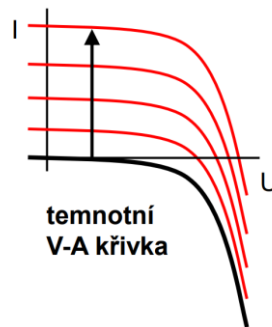
V této kapitole bude rozebíráno měření a extrakce dat z fotovoltaických článků z dark current V-A charakteristik. Zjednodušeně lze říci, že dark (tmavá) V-A charakteristika je superpozicí dvou procesů: difúze a rekombinace. Jedná se o měření charakteristik fotovoltaického článku „ve tmě“. [17], [18]



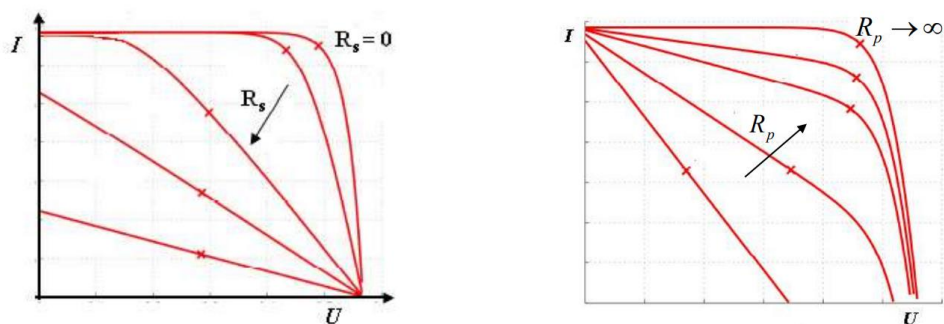
Obrázek 7 - V-A charakteristika solárního článku; [19]

Z dark (tmavých/neosvětlených) V-A charakteristik lze zjistit mnoho parametrů, ať již zmíněný paralelní a sériový odpor, nebo saturační proud a faktor ideálnosti (ideality factor), avšak dark charakteristika neposkytuje informace o proudu nakrátko nebo o napětí naprázdno. Dokonce lze z dark (temných) V-A charakteristik předpovědět

i výkon fotovoltaického článku před jeho nasazením. Ohmické ztráty na povrchu článku přispívají k sériovým ztrátám, avšak sériový odpor článku bývá způsoben objemovým odporem polovodičového materiálu, kovových kontaktů a nejrůznějších propojení. Tento odpor má negativní vliv (omezení zkratového proudu) na maximální dostupný výkon modulu. Saturační proud ovlivňuje napětí na prázdko, které určuje fill faktor (faktor plnění). Paralelní odpor je ovlivněn nejrůznějšími vadami a nečistotami na článcích (objem, povrch, okraje článků). Zhoršení V-A charakteristiky (pro sériový a paralelní odpor) nežádoucími vlivy lze spatřit na obrázku 9. Výsledné parametry odvozené z dark V-A charakteristik fotovoltaického článku poskytují velmi důležité informace o kvalitách spojů, antireflexních vrstvách, předních a zadních kontaktních odporech.



Obrázek 8 - Změna V-A křivky při různém osvětlení, černá křivka je dark (temnotní); [20]



Obrázek 9 – Změna V-A charakteristiky sériového odporu (vlevo) a paralelního (vpravo); [19]

Tmavá křivka (V-A charakteristiky) se vloží do modelu a určí se parametry modelu, aby se extrahovaly elektrické vlastnosti fotovoltaických článků. Nejčastěji se používají dva modely, a to jedno nebo dvoudiodový model fotovoltaického článku.

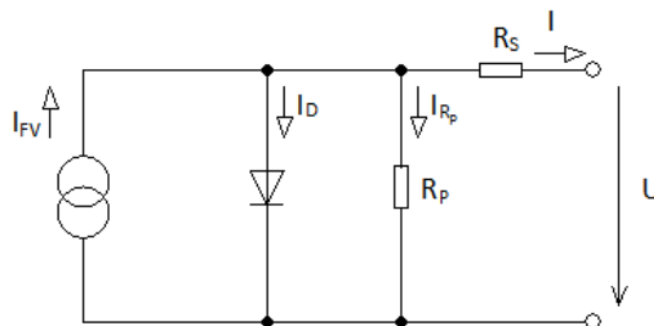
Jednodiodový model uvažuje fotovoltaický článek jako jedinou P-N přechodovou diodu s parazitickým odporem. Model se skládá z diody, paralelního odporu, sériového odporu a ze zátěže. Model je vyjádřen náhradním schématem fotovoltaického článku

na obrázku 10. Následující rovnice vyjadřuje vztah mezi proudem I a napětím U pro tento model za tmavých podmínek:

$$I = I_0 \left[\exp\left(e \frac{U + R_S I}{nkT}\right) - 1 \right] + \frac{U - R_S I}{R_P} \quad (5)$$

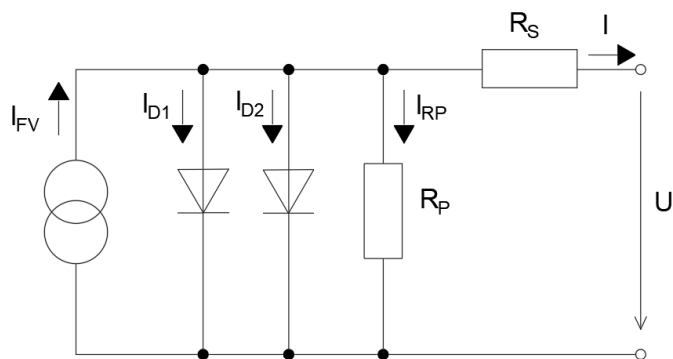
Platí, že I [A] je proud získatelný z článku, I_0 [A] proud uzavírající přes P-N přechod diodou (saturační proud), U [V] napětí na svorkách článku, R_S [Ω] sériový odpor, n [-] diodová idealita (diodový faktor), k [$J \cdot K^{-1}$] Boltzmannova konstanta, T [K] = termodynamická teplota a R_P [Ω] = paralelní odpor.

Pro R_S platí, že odpovídá za ohmické ztráty způsobené objemovým odporem polovodičového materiálu a kovových kontaktů. Ztráty (úniky) proudu přes P-N přechod jsou reprezentovány paralelním odporem R_P . Diodový faktor n poskytuje informace o kvalitě přechodu a saturační proud I_0 souvisí s vlastnostmi polovodičového materiálu. [17]



Obrázek 10 – Jednodiódové náhradní schéma fotovoltaického článku

Jednodiódový model počítá s tím, že rekombinace v oblasti prostorového náboje (space-charge region, SCR) je zanedbatelná. V reálu to ovšem není pravda, proto byl vytvořen dvoudiódový model, který bere v úvahu rekombinační centra ve fotovoltaickém článku. V této práci bude pracováno jen s jednodiódovým modelem, což bude pro použítá měření dostačující.



Obrázek 11 - Dvoudiodové náhradní schéma fotovoltaického článku

Měření V-A charakteristik patří mezi základní diagnostická měření, díky kterým lze určit mnoho parametrů modulu (jako třeba paralelní odpor, napětí na prázdko a mnoho dalších). Tyto modely se využívají ve třech základních „měřeních“:

- stanovení parametrů pomocí směrnice z V-A charakteristiky v okolí I_{sc} ,

$$\frac{1}{R_p} = \frac{dI}{dU}$$

(6)

- metoda aproximace,
- termografie. [18]

5.1. Flash test

Jedná se o měřicí metodu primárně určenou ke zkoumání a měření V-A charakteristik. Tato měřicí metoda patří mezi nejčastěji používané a provádí se to na zařízení označovaném jako tzv. flash tester, který lze také označit jako měření pomocí zábleskového solárního simulátoru. Toto měření je standardizované podle normy ČSN EN 60904-2 (to znamená rovnoměrné ozáření $G = 1000 \text{ W/m}^2$ spektra AM 1.5). Během měření se připojuje řízená zátěž na fotovoltaický modul. Velkou výhodou flash testru je, že se v něm dá měřit modul při různých intenzitách záření. Také v něm lze poměrně dobře zajistit opakovatelnost měření.

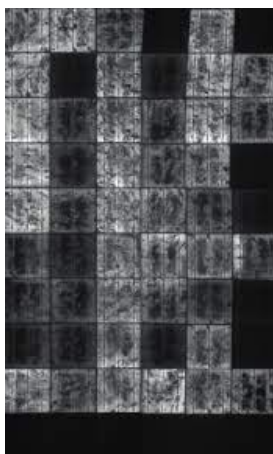
Flash tester ozařuje modul krátký čas (v řádech milisekund) umělým zářičem. Jako zdroj záření obvykle slouží xenonové výbojky. Zářič musí splňovat nejrůznější podmínky. Mezi hlavní podmínky patří záření ve vhodném spektru, časová stabilita záření nebo rovnoměrně ozařovaná plocha. Záření, které xenonové výbojky produkují,

se nejvíce podobá slunečnímu záření. Krátká doba ozáření eliminuje vliv oteplení modulu. [21]

6. Elektroluminiscence

Jedná se o měřicí metodu, která zaznamenává záření vycházející ze zkoumaného modulu nebo článku. Měření funguje na základě zářivé rekombinace párů elektron-díra. Elektroluminiscence se nejčastěji využívá ke zkoumání defektů nacházejících se na fotovoltaických modulech nebo článcích. Podle intenzity rekombinačního záření lze určit oblasti s malou koncentrací nerovnovážných nosičů. To znamená, že danou oblastí neteče proud anebo se jedná o oblasti s vysokým výskytem rekombinačních center. Díky elektroluminiscenci lze objevit nejrůznější poškození modulů či článků, jako třeba praskliny, které nejsou viditelné lidským okem. Poškození se projeví na výsledném snímku tím, že defektní oblasti budou méně zářit. Menší intenzita záření je způsobená různou koncentrací nerovnovážných nosičů ve struktuře. Avšak články z krystalického křemíku vyzařují záření lidským okem neviditelné (vlnová délka světla se pohybuje od 1000 nm po 1200 nm). Proto se používají zařízení, která dokáží vytvořit „zářící“ snímek. Tato měřicí metoda velmi dobře funguje u fotovoltaických modulů (článků) z krystalického křemíku (c-Si), ať už se jedná o multikrystalický nebo monokrystalický, avšak nelze využívat této metody u článků na bázi amorfního křemíku (a-Si).

Během měření musí být modul připojen ke zdroji proudu (standardně velikost proudu na krátko) a je měřen v prostředí se sníženou intenzitou okolního záření. K zaznamenání snímků elektroluminiscence slouží InGaAs kamera nebo kamera s podchlazeným křemíkovým čipem (CCD). Celé měření je poměrně rychlé, avšak během měření je nutné měřit vždy jen jeden modul (každý modul zvlášť). Výsledkem měření je snímek ve dvoubarevném spektru, kdy intenzita záření oblastí na snímku je dána protékáním proudem. [22]



Obrázek 12 - Ukázka elektroluminiscenčního snímku modulu; [23]

7. Experiment

Pro dokázání závislosti paralelního odporu na teplotě byl přichystán experiment skládající se z několika měření devíti fotovoltaických modulů. Pro měření bylo připraveno devět fotovoltaických modulů od firmy Phono Solar. Konkrétně byly použity moduly Nova module Mono-perc/320-335W. Jednalo se o nové, nikdy nepoužívané a dobře uskladněné moduly bez vnějších viditelných vad. Skladovací podmínky byly pro všechny moduly stejné. Veškeré moduly měly stejnou strukturu PERC fotovoltaického článku (monokrystalický křemík; c-Si) a lišily se v druhu zapouzdřovacího materiálu a v konstrukci (hlavně zadní strany). V experimentu byly použity tři fotovoltaické moduly s EVA fólií, jejichž přední i zadní strana byla tvořena tvrzeným sklem (tzv. sklo-sklo). Dále se testovaly tři moduly sklo-sklo se zapouzdřovací látkou tvořenou polyolefinem. Bohužel nebylo možné zjistit, o jaký polyolefin se jednalo (TPO nebo POE). Dalšími třemi testovanými vzorky byly bifaciální moduly se zapouzdřovacím materiálem EVA. Ani u nich nebylo výrobcem uvedené přesné složení. Články v bifaciálních modulech byly tzv. half cut.

Nejprve bylo nutné pomocí elektroluminiscence zjistit, zda testované moduly nemají žádnou vadu. Pak proběhla měření všech fotovoltaických modulů při teplotě 20 °C. Byly použity tyto diagnostické metody: flash test, měření dark current charakteristik, impedanční spektroskopie. Veškerá měření probíhala v laboratořích LDFS FEL ČVUT a jednalo se o nedestruktivní měření. Poté bylo všech devět modulů vystaveno teplotám od -60 °C až do +50 °C. Následně byla opět provedena měření

(stejná jako při počátečním stavu) za teploty 20 °C. Nakonec byly porovnány výsledky měření a provedeno vyhodnocení experimentu.

Pro větší přehlednost bylo ke každému sériovému číslu modulu přiřazeno číslo 1 až 9 a u bifaciálních modulů byla přední strana označena písmenem *a*, zadní strana písmenem *b* (viz tabulka 5). Moduly označené čísly 1 až 3 obsahovaly jako pouzďící materiál EVA fólii, u modulů 4 až 6 byl pouzďícím materiálem polyolefin, moduly 7 až 9 byly bifaciální s pouzďícím materiálem EVA.

Tabulka 5 - Přehled sériových čísel modulů

sériové číslo	přiřazené číslo
PSUMG00019130919	1
PSUMG00029130919	2
PSUMG00049130919	3
PSUMG00059130919	4
PSUMG00069130919	5
PSUMG00089130919	6
PSUHMG00019070819 (přední strana)	7a
PSUHMG00019070819 (zadní strana)	7b
PSUHMG00029070819 (přední strana)	8a
PSUHMG00029070819 (zadní strana)	8b
PSUHMG00039071819 (přední strana)	9a
PSUHMG00039071819 (zadní strana)	9b

7.1. Počáteční stav

V této kapitole jsou popsány počáteční vlastnosti testovaných fotovoltaických modulů pomocí grafů nebo obrázků z měření. Výsledky byly použity k porovnávání s měřením po ukončení experimentu. Veškerá počáteční měření proběhla za teploty 20 °C.

7.1.1. Elektroluminiscence

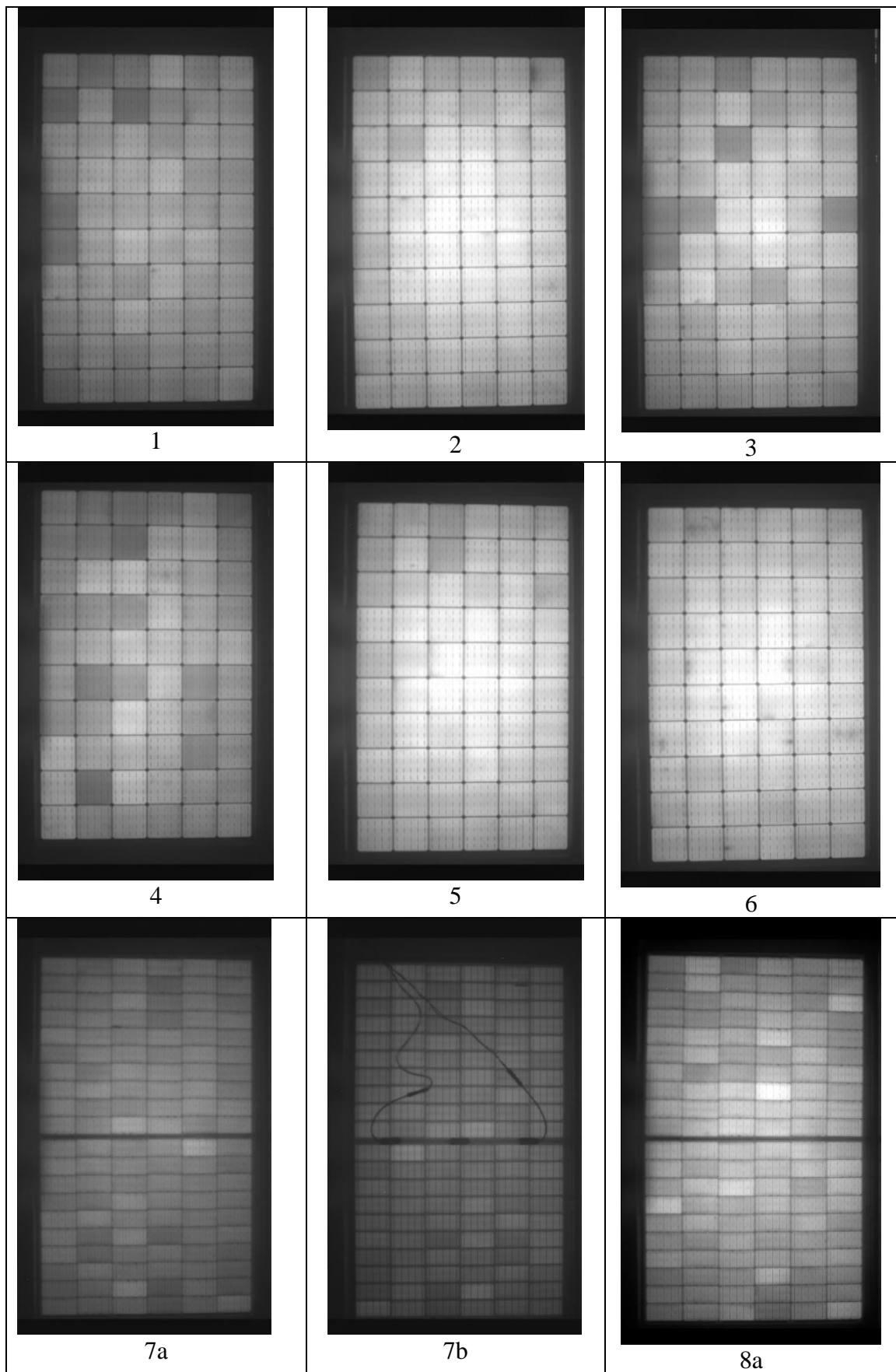
Veškeré vzorky byly testovány v laboratoři FEL ČVUT (viz tabulka 6). U bifaciálních fotovoltaických modulů proběhlo měření na obou jejich stranách. Toto měření prokázalo, že žádný modul netrpí závažnou vadou článku. Ze snímků lze vyzorovat, že elektrické vlastnosti článků se budou mírně lišit. Některé obrázky nejsou úplně nejostřejší. Bylo to způsobeno měřícím zařízením, které provádělo snímkování. Na snímcích se některé řady článků jakoby vlní (jedná se o snímky bifaciálních modulů 7,8 a 9). Je to způsobeno optickým klamem, který vznikl během

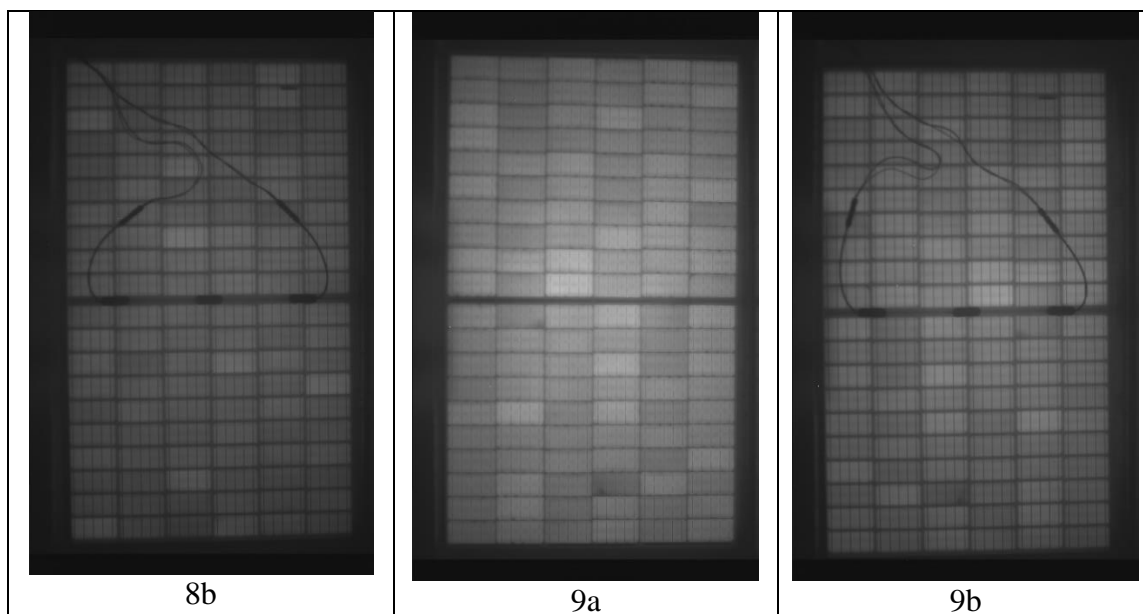
snímkování. Jev se vyskytl pouze u článků typu half cut. Ve skutečnosti takovéto uspořádání článků moduly neměly. Metoda elektroluminiscence byla použita pouze před zahájením experimentu, aby se ověřilo že moduly jsou nezávadné.



Obrázek 13 - Zařízení na měření elektroluminiscence

Tabulka 6 – Snímky elektroluminiscence



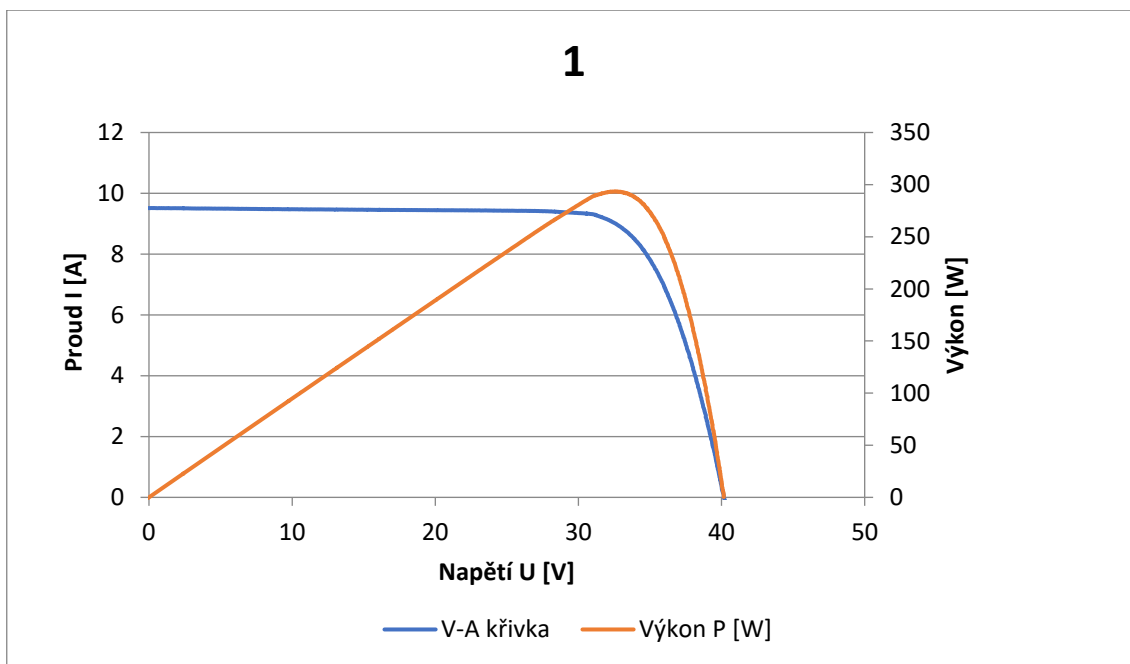


7.1.2. Flash test

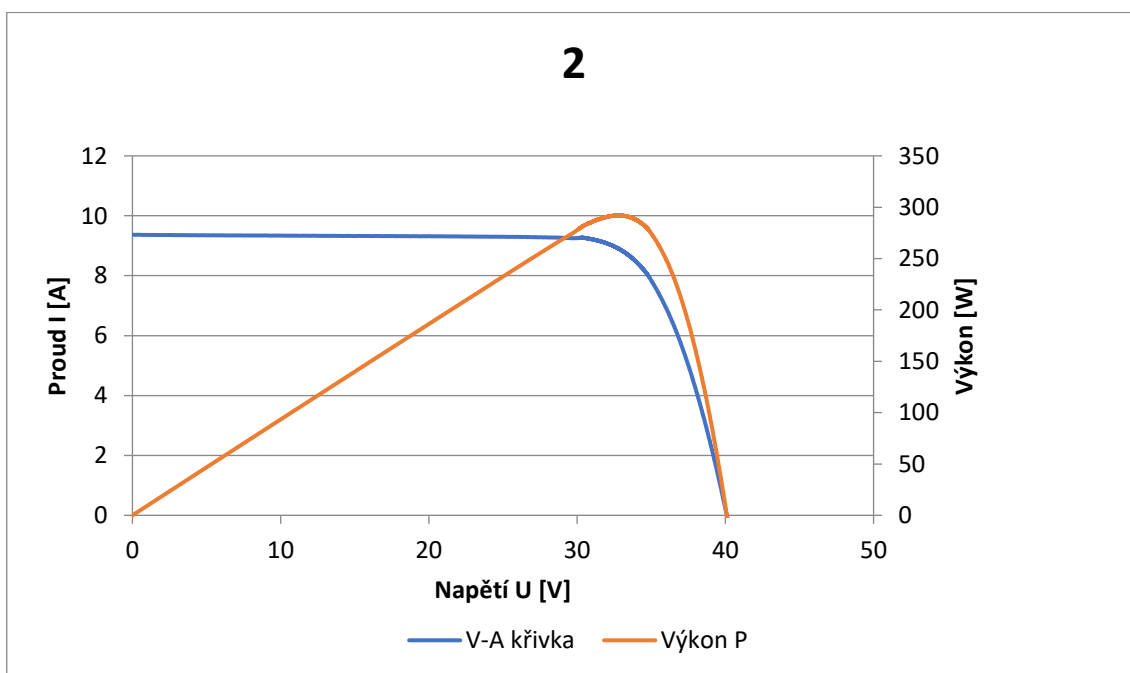
Měření na přístroji flash tester Pasan SunSim IIIc (viz obrázek 14) probíhalo v laboratoři diagnostiky fotovoltaických systémů v budově ČVUT FEL, která splňovala veškeré normy pro měření a diagnostiku fotovoltaických modulů – měření V-A charakteristik BSOP_01_A (ČSN EN 60904-1; ČSN EN 61215 ČL. 10.2, 10.6, 10.7; ČSN EN 61646 ČL. 10.2, 10.6, 10.7). V laboratoři byla udržována teplota 20 °C. Nejprve proběhlo měření modulů v počátečním stavu. Ze získaných hodnot byly použity pouze údaje potřebné k vytvoření V-A charakteristiky a výkonové křivky a také byla zjištěna hodnota paralelního odporu R_p . Tyto hodnoty byly vyneseny do grafů V-A charakteristik (viz grafy v této kapitole). U bifaciálních modulů byly měřeny obě strany článků. Pro každou stranu byl vytvořen samostatný graf, přední strany jsou označeny Xa a zadní Xb.



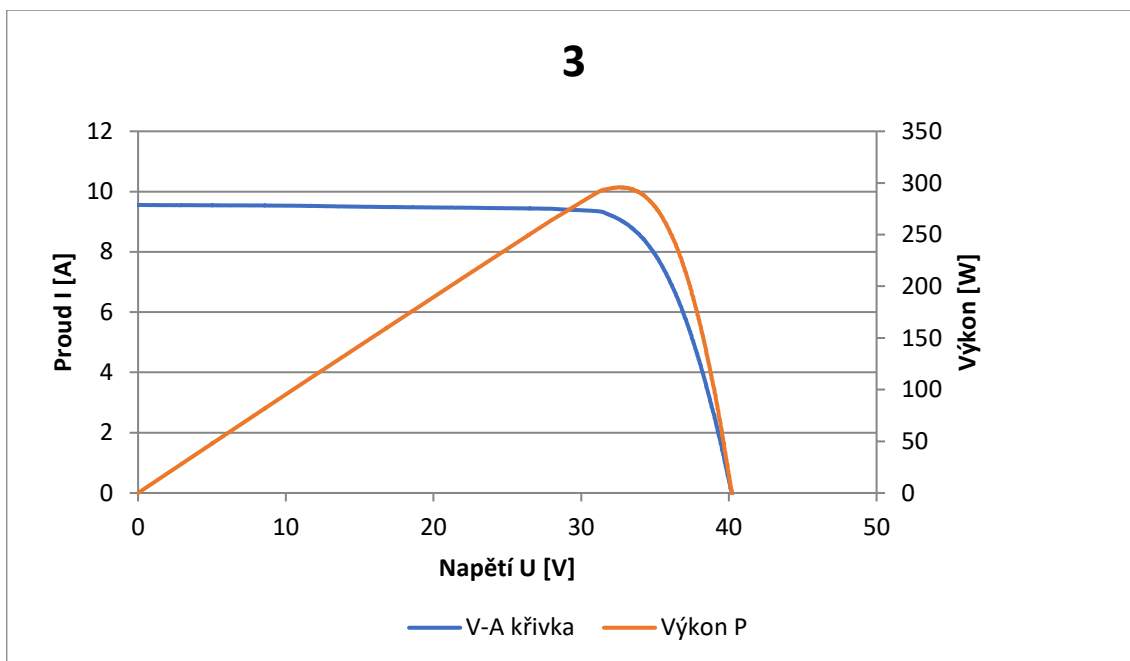
Obrázek 14 - Flash tester v laboratoři FEL ČVUT



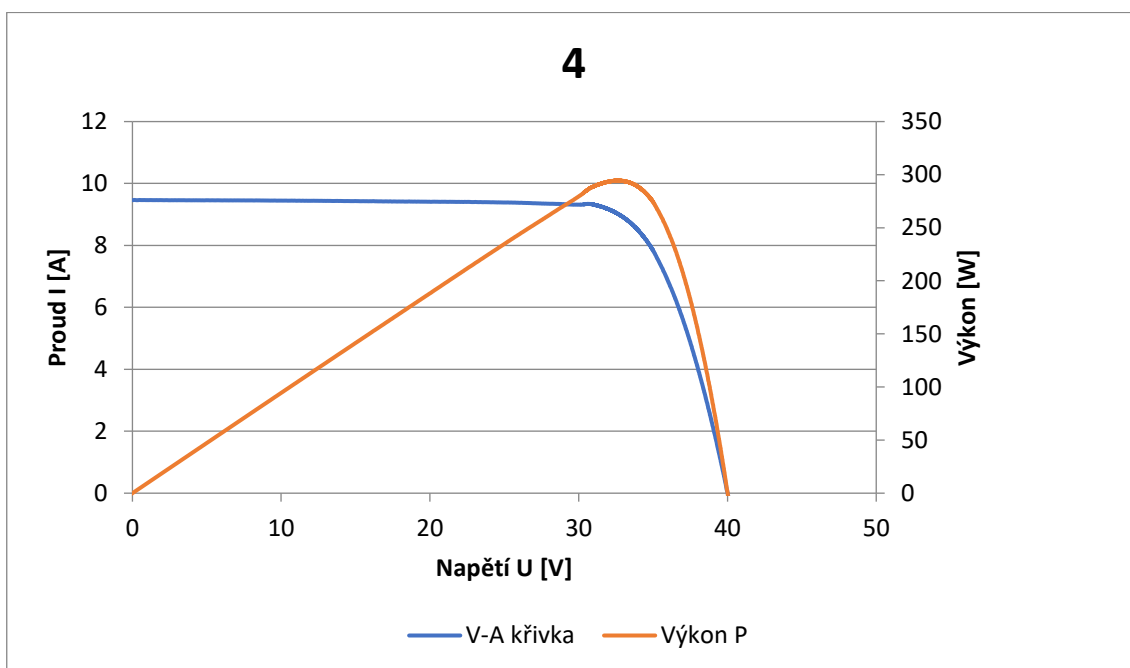
Graf 1 - V-A charakteristika, počáteční stav



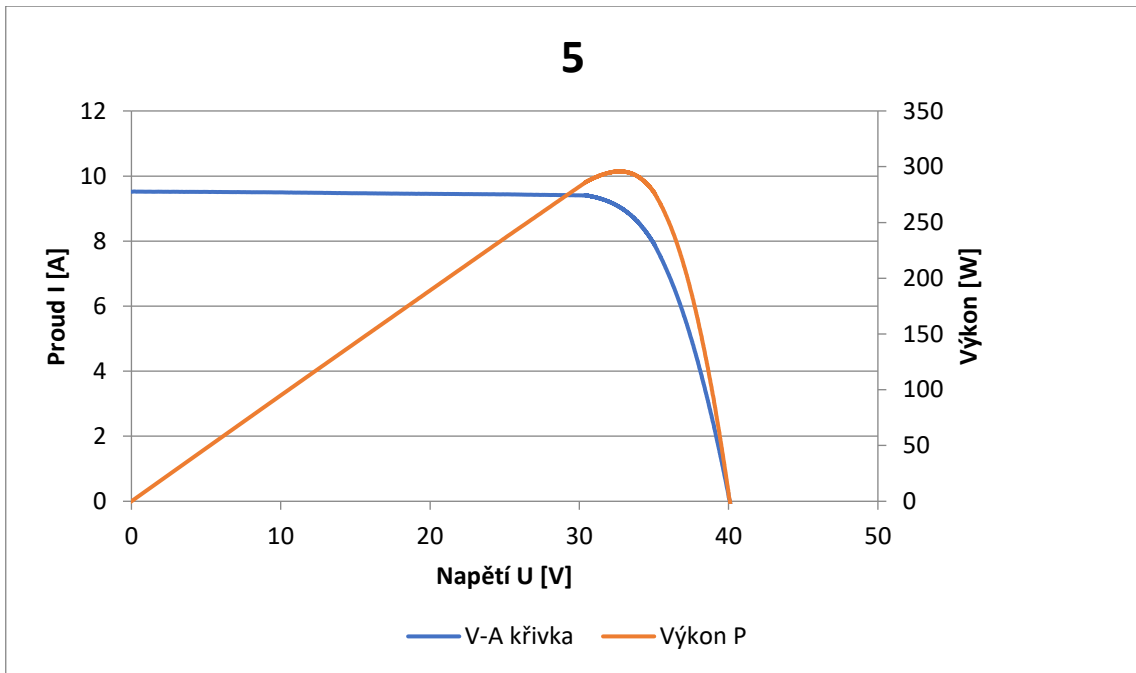
Graf 2 - - V-A charakteristika, počáteční stav



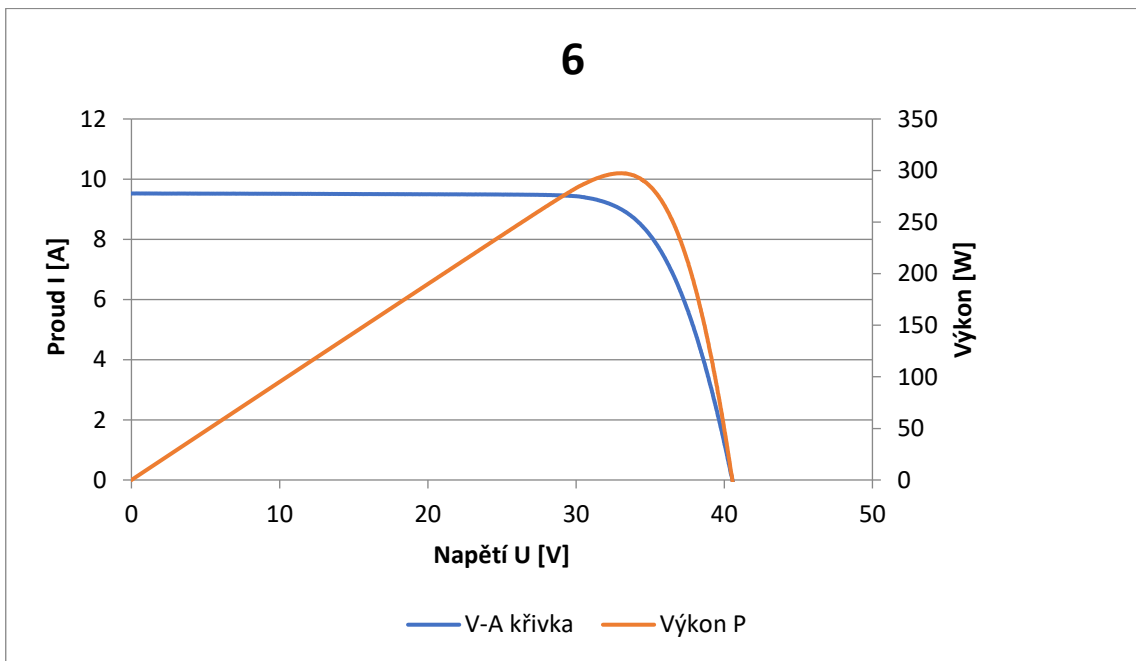
Graf 3 - V-A charakteristika, počáteční stav



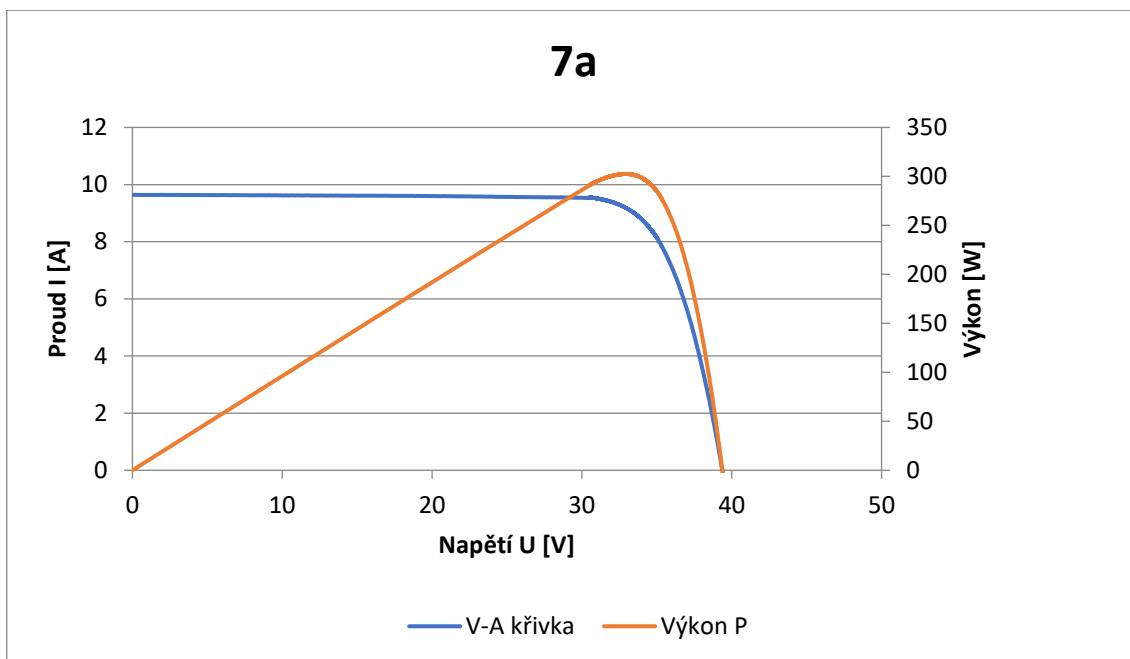
Graf 4 - V-A charakteristika, počáteční stav



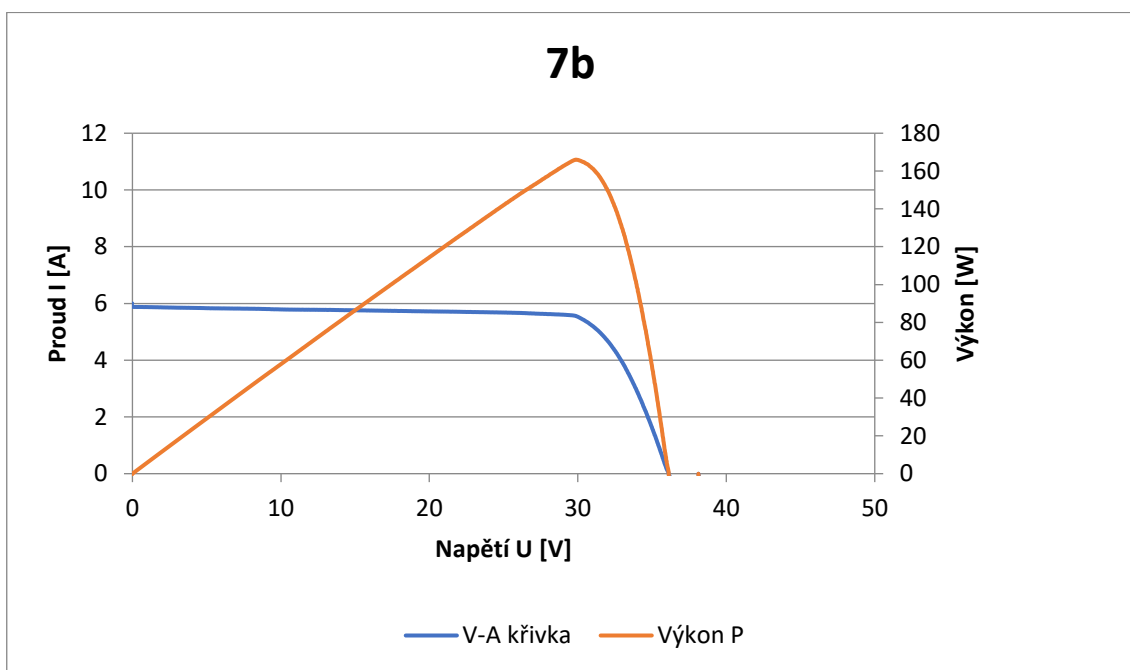
Graf 5 - V-A charakteristika, počáteční stav



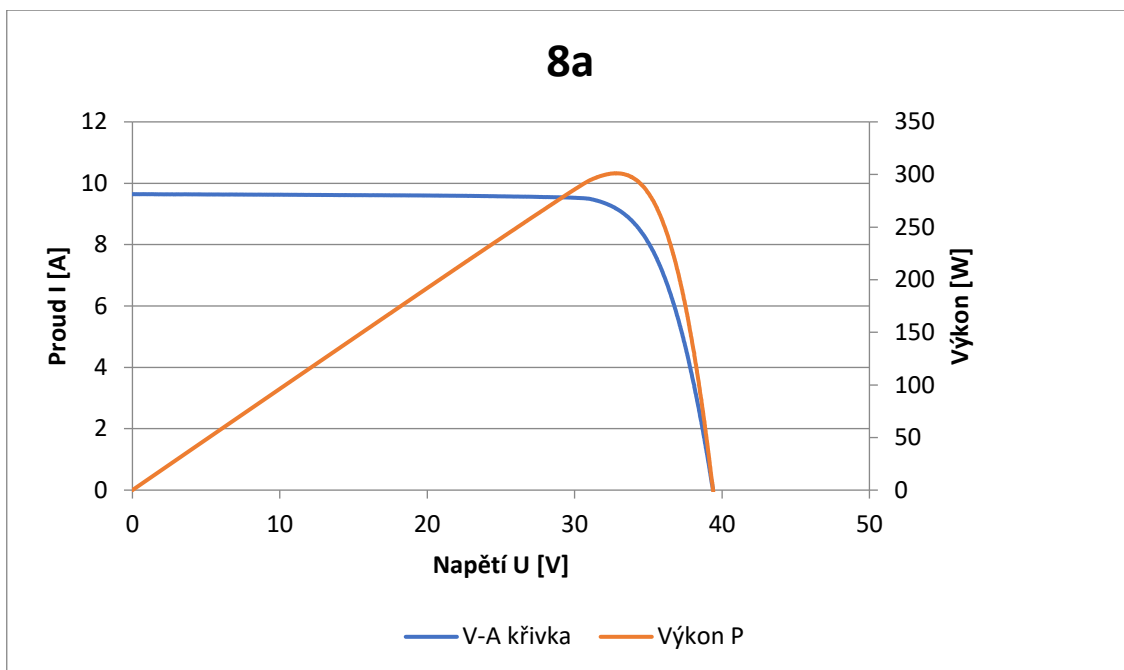
Graf 6 - V-A charakteristika, počáteční stav



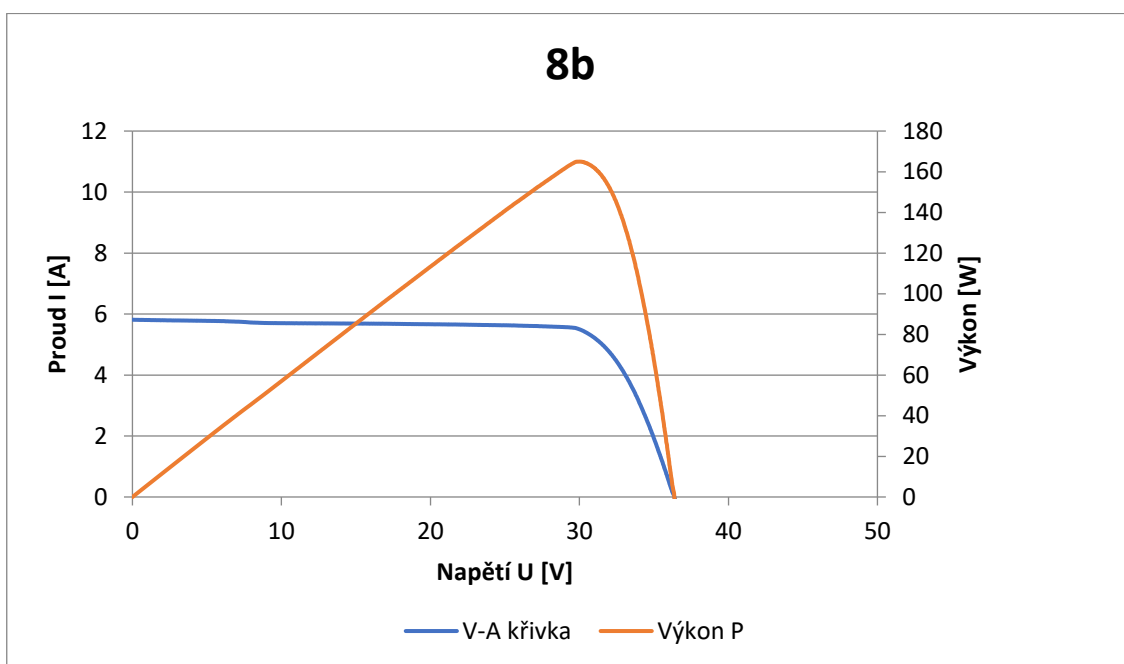
Graf 7 - V-A charakteristika, počáteční stav



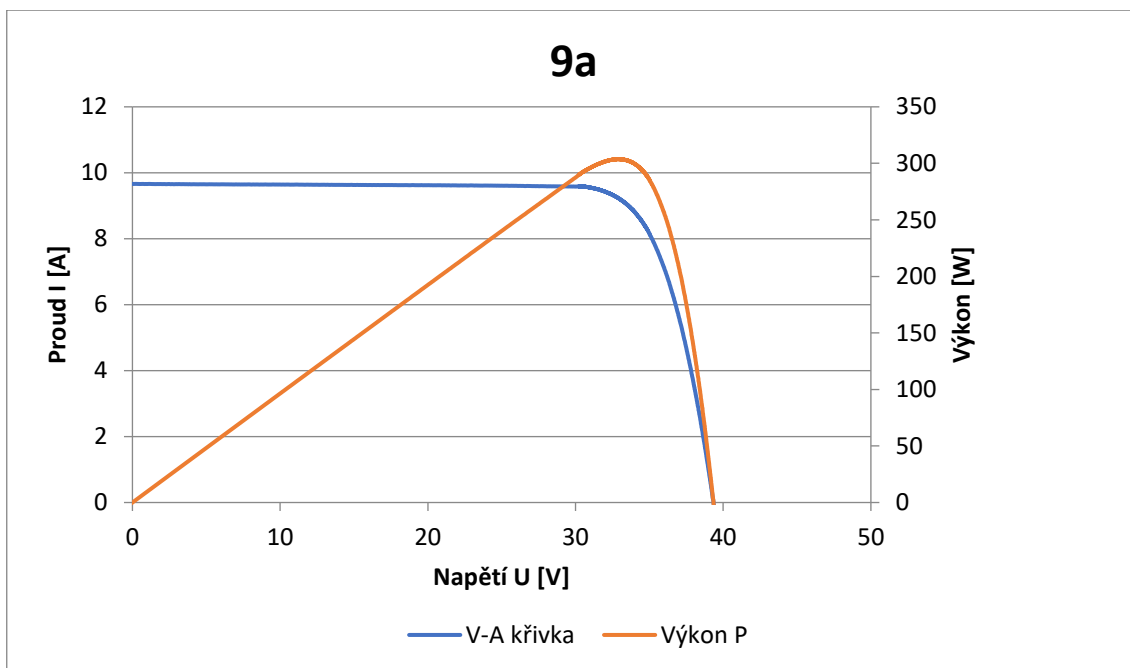
Graf 8 - V-A charakteristika, počáteční stav



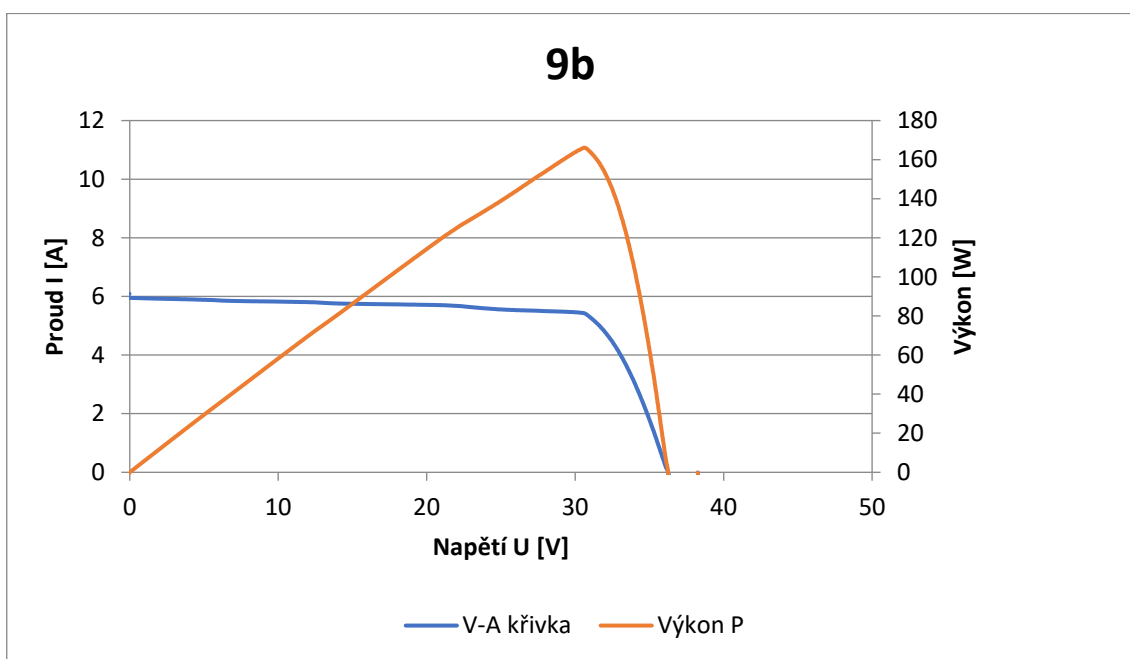
Graf 9 - V-A charakteristika, počáteční stav



Graf 10 - V-A charakteristika, počáteční stav



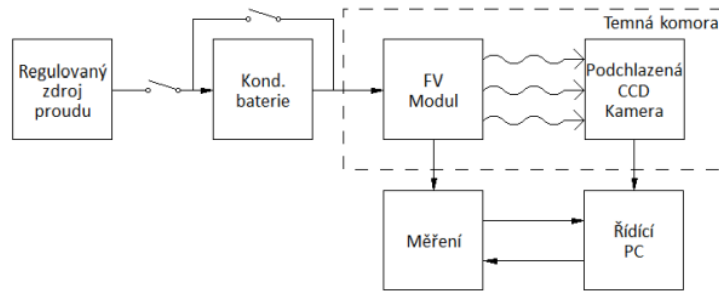
Graf 11 - V-A charakteristika, počáteční stav



Graf 12 - V-A charakteristika, počáteční stav

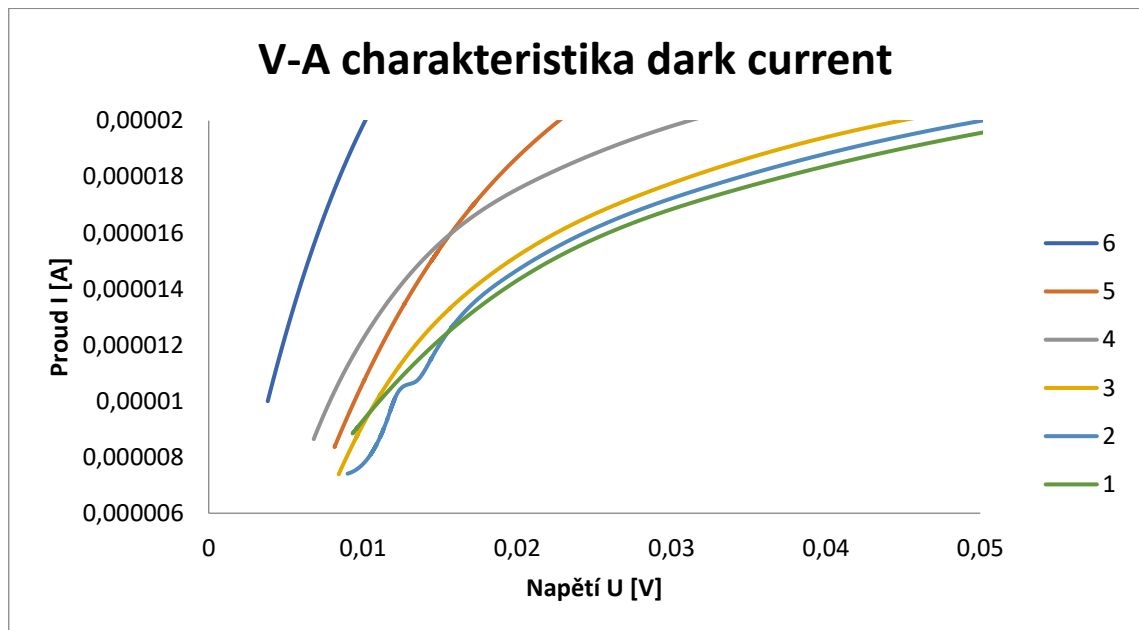
7.1.3. Dark current

Fotovoltaické moduly v počátečním stavu byly vloženy do zastíněné komory (bez přístupu světla) a poté proběhlo měření. Každý modul byl měřen zvlášť. Měření zobrazuje blokové schéma na obrázku 15.

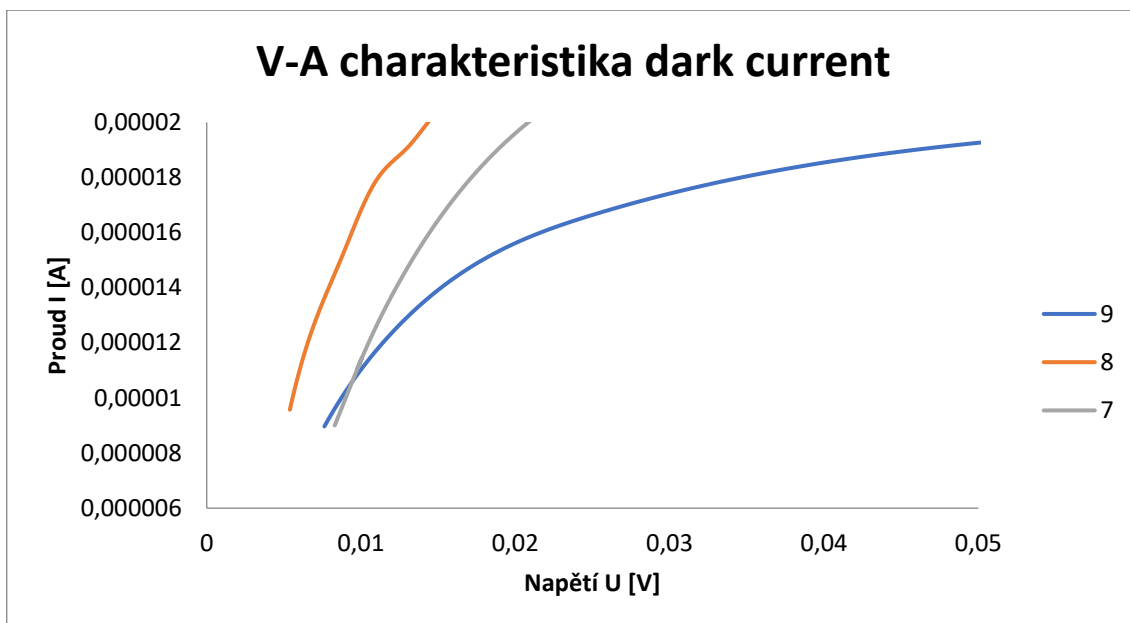


Obrázek 15 - Blokové schéma měření dark currentu

Výsledky měření lze vidět v následujících grafech. Pro lepší přehlednost bylo měření rozděleno mezi dva grafy, graf 13 znázorňuje průběh dark V-A charakteristiky šesti „klasických“ modulů s pouzdřicím materiálem EVA nebo polyolefin a do grafu 14 jsou zaneseny hodnoty tří bifaciálních modulů s half cut články.



Graf 13 – Dark V-A charakteristika, počáteční stav



Graf 14 – Dark V-A charakteristika, počáteční stav

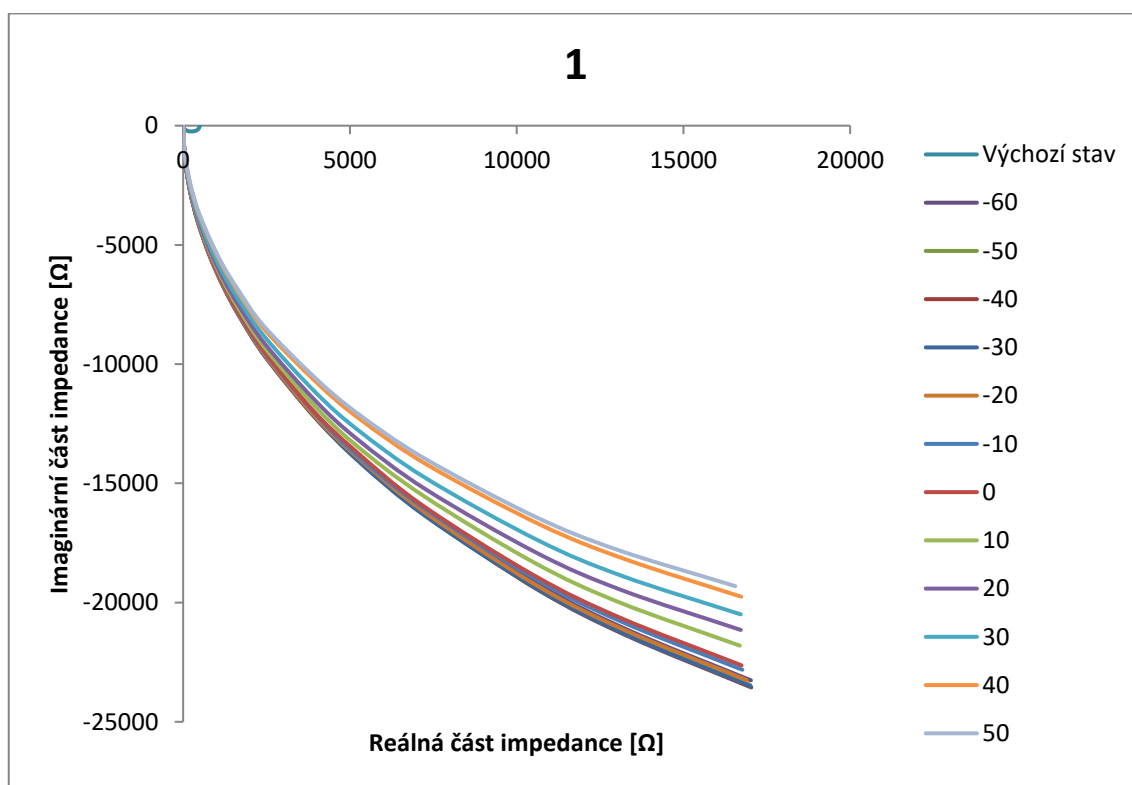
7.2. Impedanční spektroskopie

Cílem tohoto testu bylo zjistit, jak se mění vlastnosti různých typů modulů s měnící se teplotou. Nejprve byly změřeny hodnoty při teplotě 20 °C. Poté se postupně měnila teplota od -60 °C do +50 °C. Před každým měřením bylo zajištěno, že moduly byly uvnitř komory při nastavené teplotě dostatečně dlouho. Tím bylo docíleno správnosti měření (konstrukce modulu „měla čas“ dosáhnout požadované teploty pro měření). Po každé změně teploty proběhlo měření. Jako nejnižší teplota bylo zvoleno -60 °C, protože použitá nízkoteplotní testovací komora (obrázek 16) byla schopna chladit maximálně do teploty -70 °C. Komora neměla zabudovaný zdroj tepla, proto teploty od +30 °C do +50 °C bylo dosaženo pomocí externího zdroje tepla přidaného do komory. Intervaly změny teplot byly zvoleny po 10 °C na základě toho, že testovací komora chladí na požadovanou hodnotu s přesností v řádech stupňů. Při začátku měření byla nastavena vstupní frekvence 20 Hz a během měření postupně dosáhla až 40 000 Hz. Bylo měřeno všech devět modulů, ale do této práce byly zařazeny grafy čtyř klasických (1, 2 – EVA; 4, 5 – polyolefin) a dvou bifaciálních (7, 9 – EVA). Důvodem bylo, že moduly stejného typu se během měření chovaly téměř stejně. Pro porovnání jsou veškeré hodnoty získané měřením pro jeden konkrétní modul vždy uvedeny v jednom grafu.

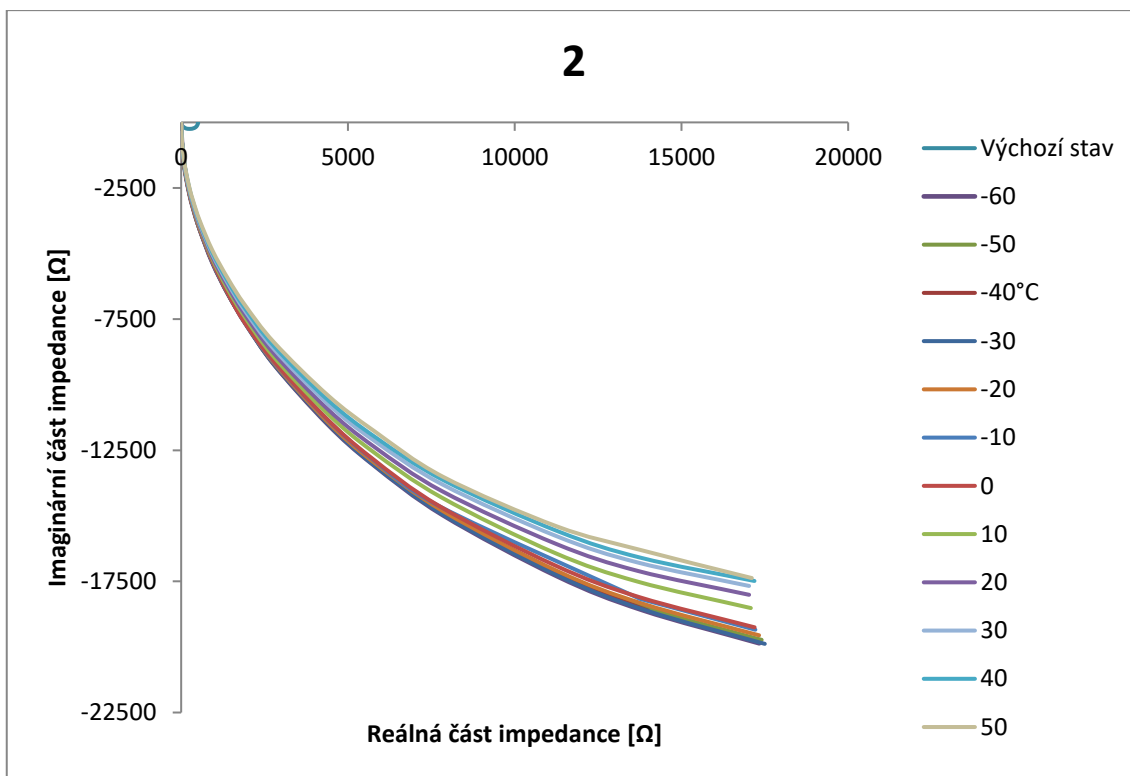


Obrázek 16 - Nízkoteplotní testovací komora

Z grafů je patrné, že se jinak chovají klasické a jinak bifaciální moduly. U klasických modulů (viz grafy 16 až 18) snížením teploty na $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ prudce vzrostl paralelní odpor R_P (o několik řádů – ze stovek na desetitisíce). Takto zvětšený odpor zůstával vysoký i přes to, že se zvyšovala teplota (až na $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$).

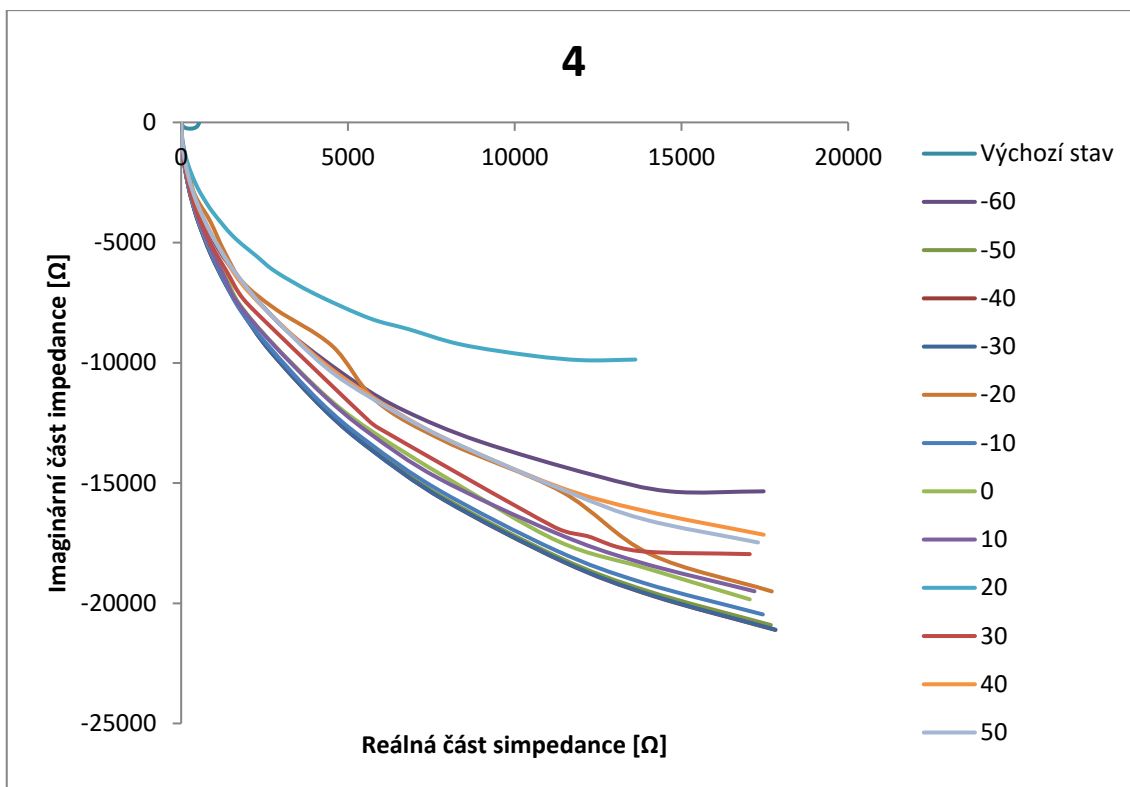


Graf 15 - impedanční spektroskopie, naměřené hodnoty

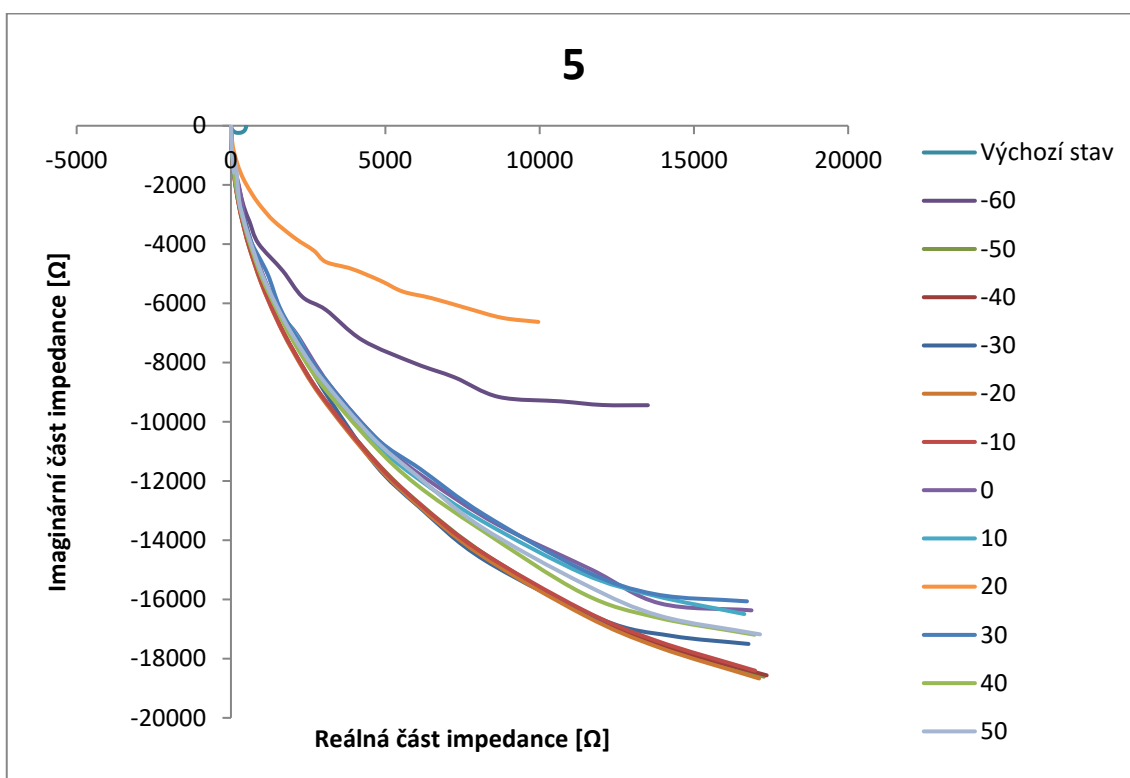


Graf 16 - Impedanční spektroskopie, naměřené hodnoty

Zatímco u flash testu a dark currentu nebyl zaznamenán zásadní rozdíl v naměřených parametrech mezi moduly s EVA a s polyolefinem, během měření impedanční spektroskopií se nějaké rozdíly objevily v Cole-Cole diagramu. U křivek grafů 15 a 16 (pro moduly s EVA) lze pozorovat podobné chování. EVA fólie je využívána jako pouzdrící materiál už dlouhou dobu, a proto prošla značným vývojem a zdokonalením. Je tedy možné, že se „chová“ lépe než poměrně krátce používaný polyolefin. Z Cole-Cole diagramu odhadovaná kapacita modulů s pouzdrícím materiálem EVA oproti počátečnímu stavu výrazně klesla a s postupným návratem k teplotě 20 °C postupně opět roste. Avšak nevrátila se na počáteční hodnoty. Grafy 17 a 18 zobrazující měření modulů s polyolefinem ukazují podobné chování stejných typů modulů.



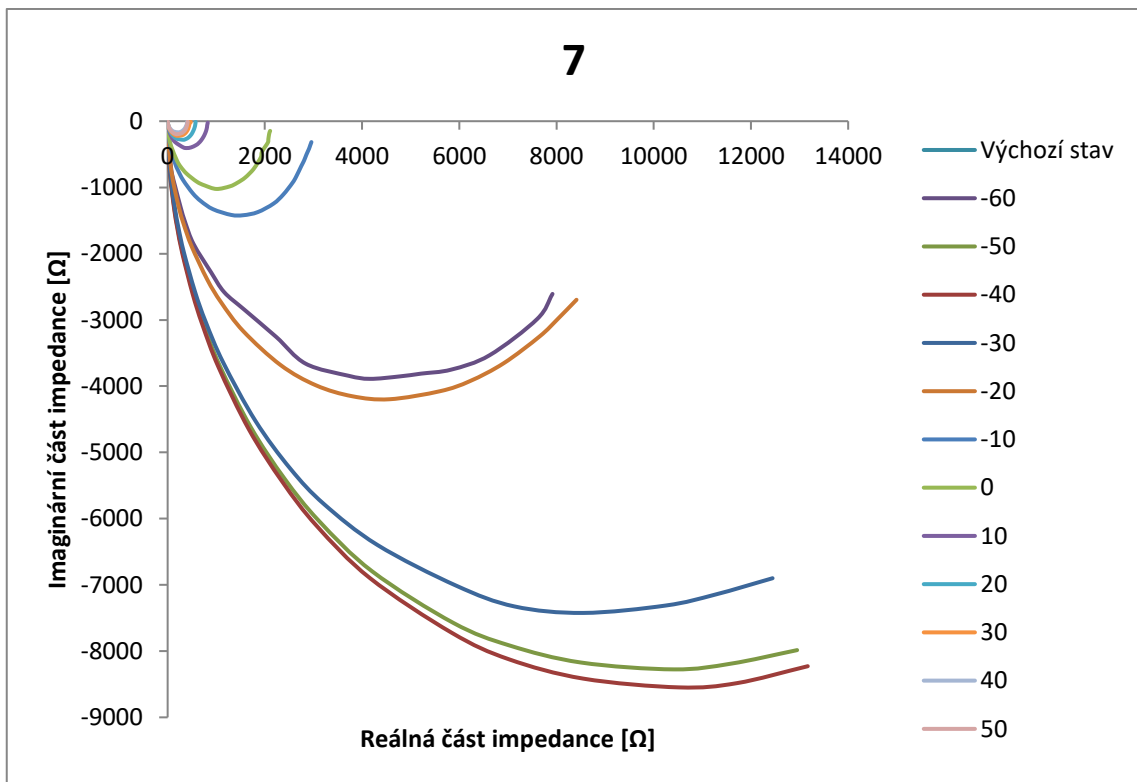
Graf 17 - Impedanční spektroskopie, naměřené hodnoty



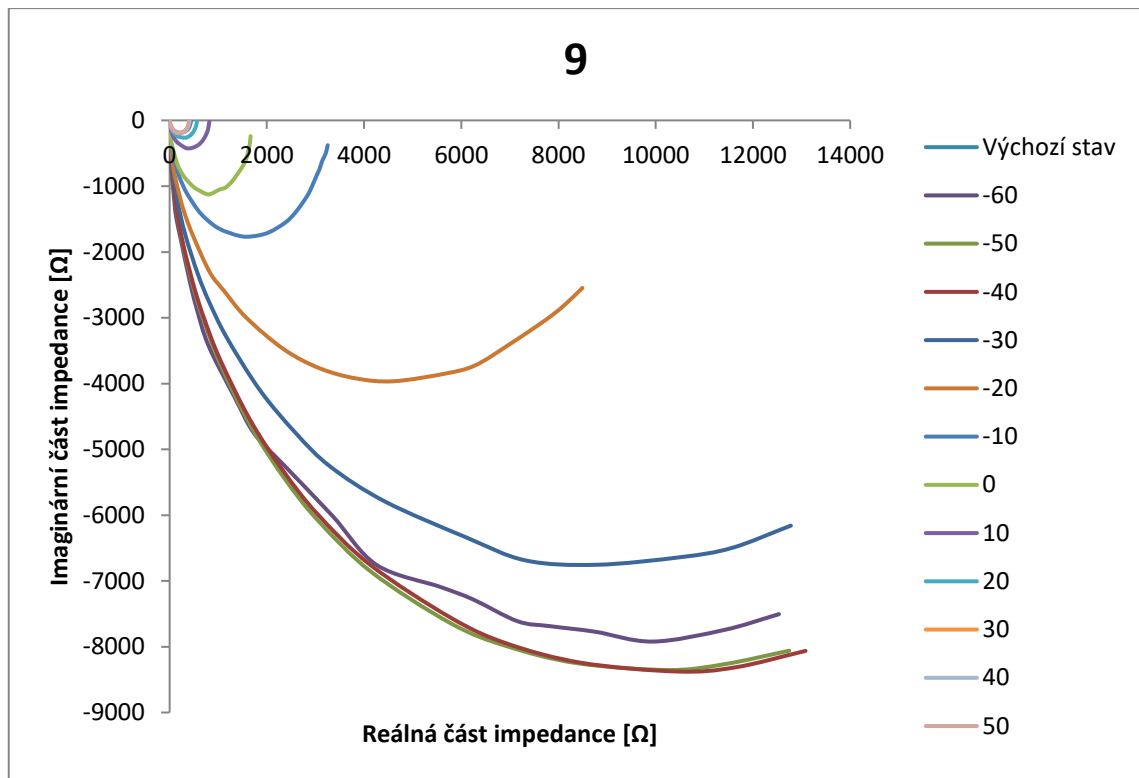
Graf 18 - Impedanční spektroskopie, naměřené hodnoty

Na grafech 15 až 18 lze pozorovat určité rozdíly. Grafy 15 a 16 mají jednotlivé křivky blízko u sebe a křivky jsou „uhlazené“. Z grafů je patrné, že paralelní odpor R_P prudce vzrostl po dosažení teploty $-60\text{ }^\circ\text{C}$. Při postupném zvyšování teplot o $10\text{ }^\circ\text{C}$ paralelní odpor lehce klesal. Křivky na těchto grafech jsou hladké a příliš se „nevlíní“. Naproti tomu křivky grafů 17 a 18 se více vlní a mezery mezi jednotlivými křivkami jsou větší. U křivek lze také sledovat, že se více protínají. Stejně jako u modulů s EVA i u modulů s polyolefinem paralelní odpor R_P velmi vzrostl oproti počátečnímu stavu. U tohoto typu modulů měl paralelní odpor na rozdíl od modulů s EVA větší tendenci se vracet k počátečním hodnotám.

U skupiny modulů s polyolefinem můžeme pozorovat, že odhadovaná kapacita po snížení teploty také klesla a také se její hodnoty nevrátily na hodnoty počátečního stavu ani při zvýšení teploty.



Graf 19 - Impedanční spektroskopie, hodnoty



Graf 20 - Impedanční spektroskopie, hodnoty

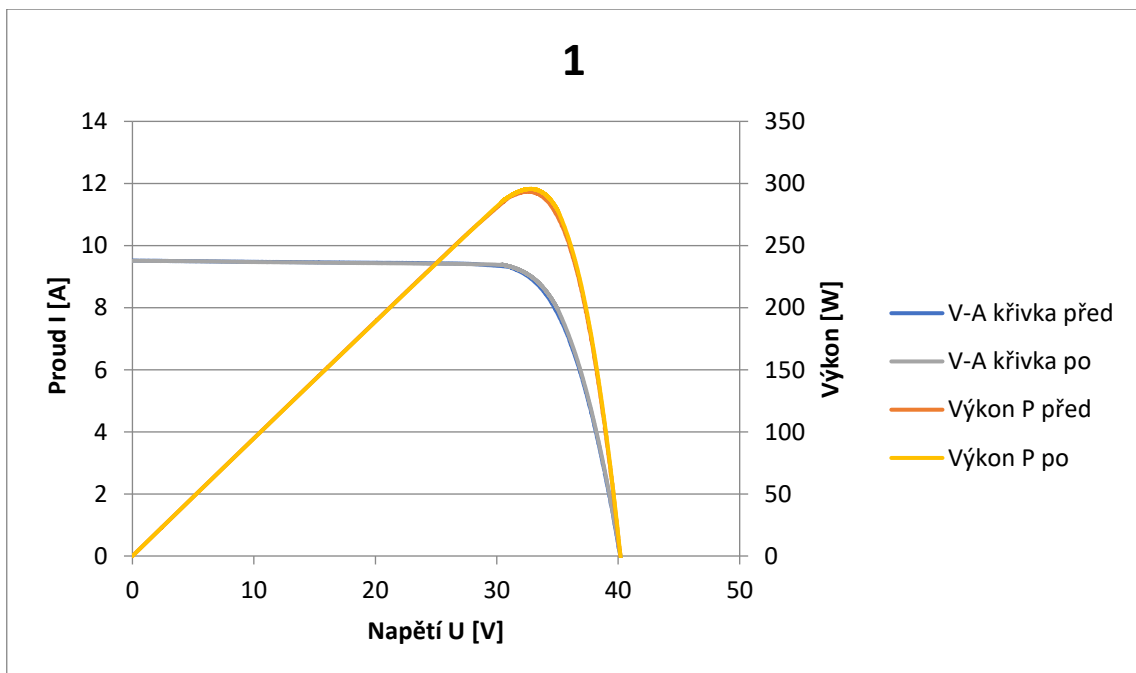
U grafů, které patří bifaciálním modulům (grafy 19 a 20), lze pozorovat, že s klesající teplotou paralelní odpor prudce vzrostl, ale když se teplota postupně zvyšovala, tak se paralelní odpor vracel na hodnoty počátečního stavu. Z těchto grafů také lze vyzorovat, že kapacita s rostoucí teplotou klesá a vrací se na hodnoty podobné, které měla při měření počátečního stavu.

Z výše popsaných měření se zdá, že na snížení teploty reagovaly všechny typy modulů stejně. Prudce se zvýšil paralelní odpor R_P a klesla kapacita. Paralelní odpor u klasických modulů zůstal vysoký i poté, co se teploty zvyšovaly. Na rozdíl od toho u bifaciálních modulů se paralelní odpor se zvyšováním teploty začal snižovat, až se vrátil k počátečním hodnotám. Projev vlivu teploty u bifaciálních modulů může být dán jejich konstrukcí (bifaciální – dvojstranné provedení, half cut články), která se liší od klasických modulů (1 – 6). To, že se u všech měřených modulů paralelní odpor mnohonásobně zvýšil (z řádů stovek na řády tisíců), neodpovídá očekávaným výsledkům. Ukázalo se, že použitá impedanční spektroskopie není příliš vhodná jako metoda pro zjišťování vlivu teploty na paralelní odpor. Kapacita je ovlivněna mimo jiné kvalitou P-N přechodu článku a při uzavřeném přechodu dosahuje nízkých hodnot. Rozdílné hodnoty kapacity mohly být způsobeny strukturou článku. U článku typu

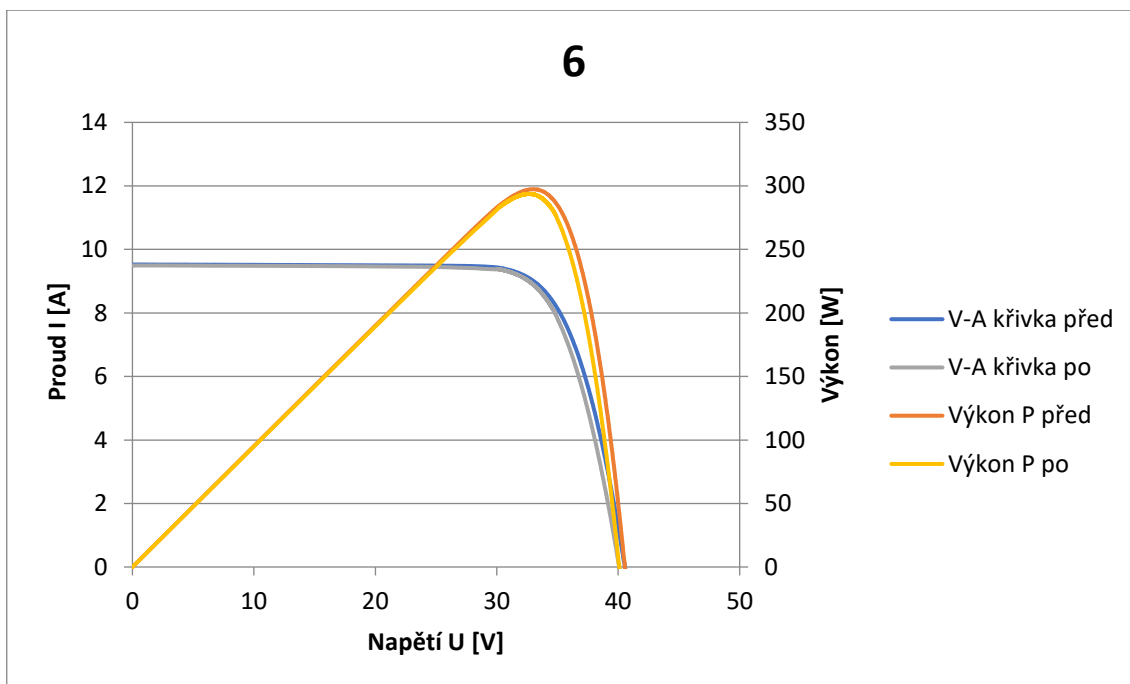
PERC je navíc oxidová vrstva, která působí v dielektriku, kam vnáší významnější rozdíl.

7.3. Flash test

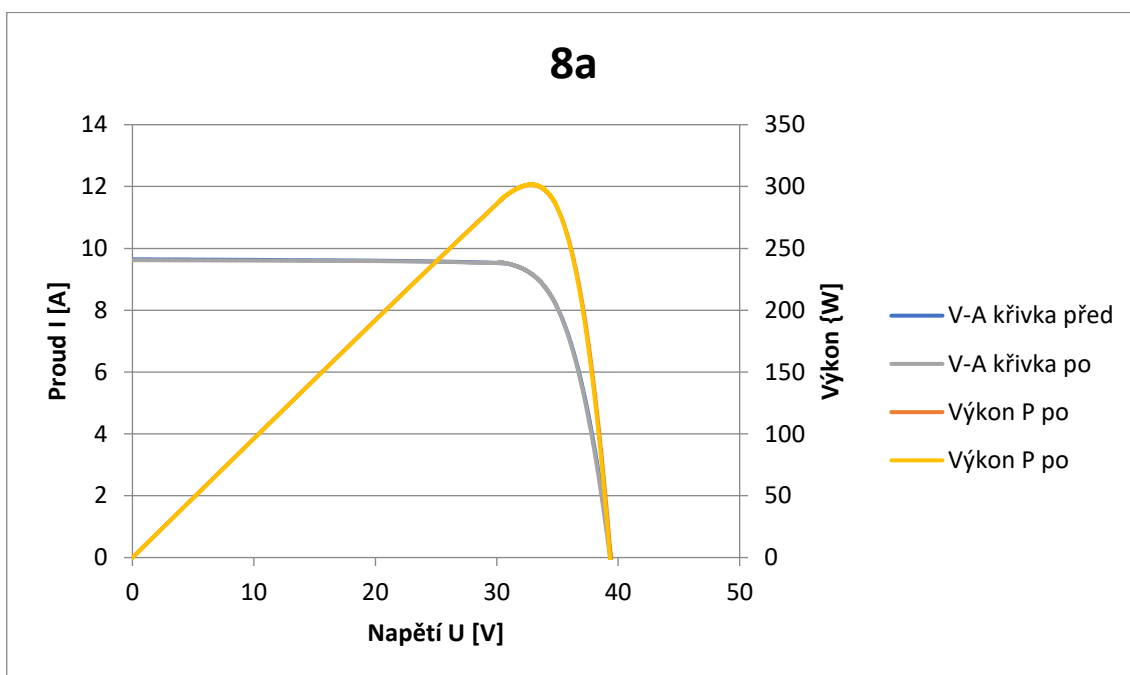
Po získání hodnot z flash testu byly vytvořené nové grafy V-A charakteristik. Nově naměřené křivky byly vyneseny do grafů s počátečním stavem. Z naměřených hodnot vynesených v grafech vyplývá, že V-A charakteristiky se téměř nezměnily. U všech měření se došlo skoro ke stejnému výsledku. Potvrdil se předpoklad, že V-A charakteristiky modulů před a po vystavení modulů různým teplotám jsou téměř stejné. Z tohoto důvodu budou v této práci uvedeny pouze tři srovnávací grafy, jeden pro každý typ modulu (EVA, polyolefin, bifaciální). U bifaciálních modulů nebyla měřena zadní strana, protože nás zajímaly hodnoty paralelních odporů a tyto hodnoty není vhodné měřit ze zadních stran. Z naměřených hodnot odporů lze vypočítat, že se po vystavení různým teplotám nijak výrazně nezměnily.



Graf 21 - Porovnání V-A charakteristik před a po, modul s EVA fólií



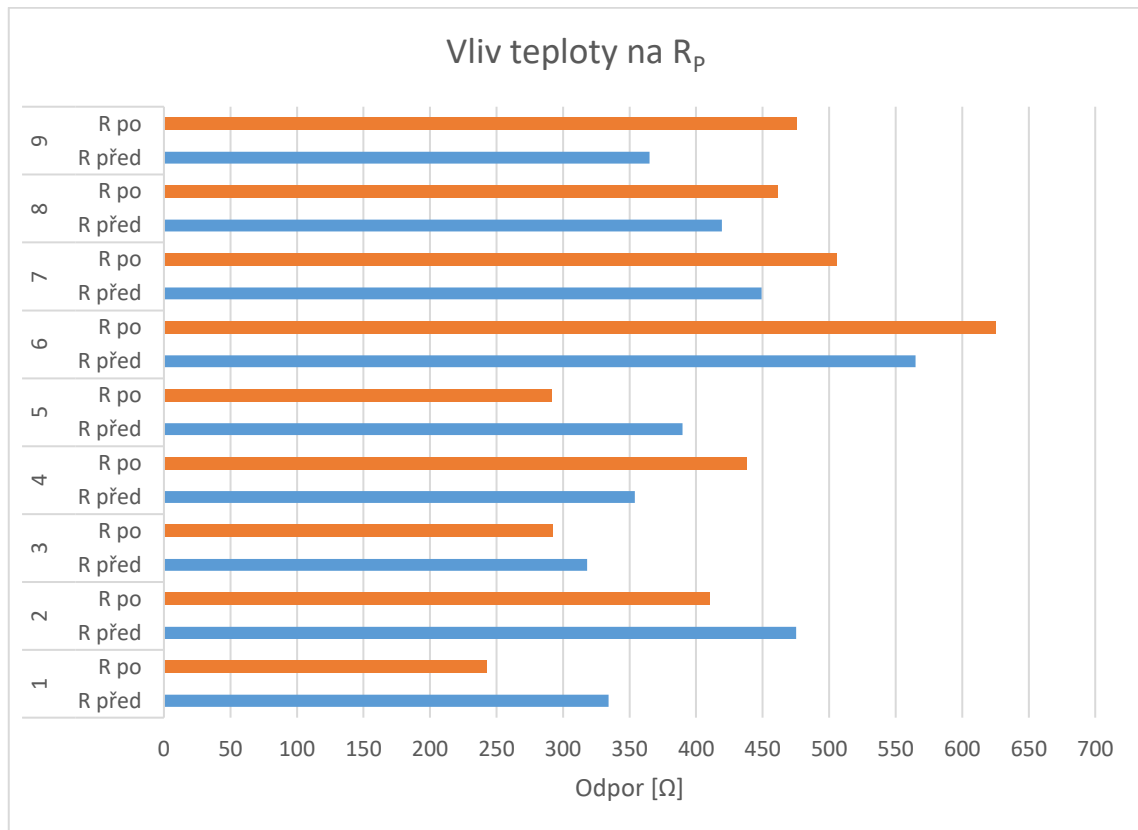
Graf 22 - Porovnání V-A charakteristik před a po, modul s polyolefinem



Graf 23 – porovnání V-A charakteristik před a po, bifaciální modul

Následně byly porovnány hodnoty paralelního odporu R_P , které byly měřeny během flash testu (jak počáteční hodnoty paralelních odporů R_P modulů před vložením do nízkoteplotní testovací komory, tak hodnoty paralelních odporů R_P modulů po vyjmutí z komory). Naměřené hodnoty jsou vyneseny do grafu 24. Z grafu vyplývá, že teplota zásadním způsobem neovlivňuje paralelní odpor R_P . Hodnoty paralelního

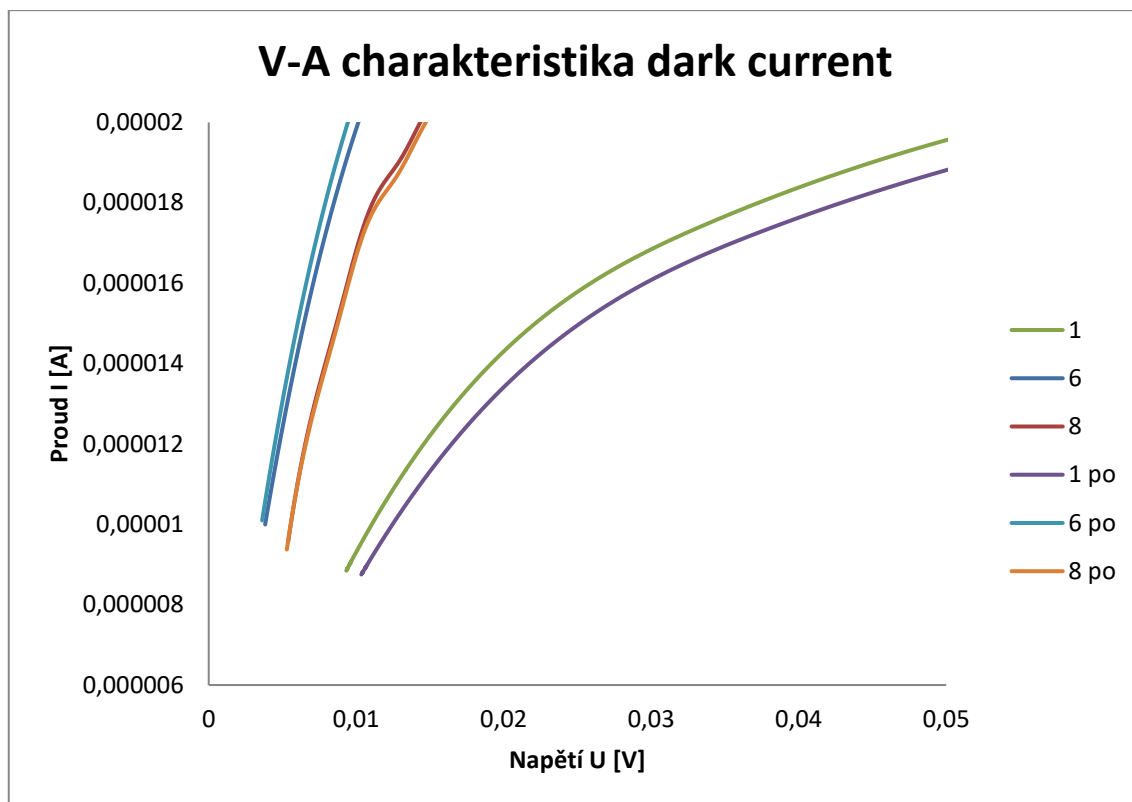
odporu R_p po vyjmutí z komory se pohybují ve stejných řádech v porovnání s paralelním odporem modulu v počátečním stavu.



Graf 24 - Porovnání hodnot paralelního odporu před a po

7.4. Dark current

Změřeno bylo všech devět modulů a stejně jako u flash testu byly vybrány jako reprezentativní vzorek tři moduly (1 EVA, 1 polyolefin, 1 bifaciální). Hodnoty vynesené do grafu 25 ukazují křivky dark V-A charakteristik modulů, které se téměř nezměnily. Z toho lze vyčíst, že hodnoty paralelního odporu se výrazně nezměnily a zůstaly podobné i po vystavení modulů různým teplotám.



Graf 25 - Porovnání dark V-A charakteristik

8. Závěr

Cílem této diplomové práce bylo pomocí měření zjistit, zda teplota ovlivňuje paralelní odpor fotovoltaických modulů. K tomu bylo využito několik metod, kterými bylo možné zjistit kromě paralelního odporu i jiné parametry, např. V-A charakteristiky. V experimentu byly použity metody elektroluminiscence, flah test, měření dark V-A charakteristik a impedanční spektroskopie. Různé teploty byly simulovány pomocí nízkoteplotní testovací komory. Veškerá měření probíhala v laboratořích LDFS FEL ČVUT.

Pro experiment bylo použito devět fotovoltaických modulů sklo-sklo od společnosti Phono Solar typu Nova module Mono-perc/320-335W. Jednalo se o nové nikdy nepoužívané moduly, na kterých nebylo patrné žádné viditelné poškození. Moduly byly pro snadnější orientaci označeny čísly 1 – 9. Pro experiment byly moduly rozděleny do tří skupin - s EVA fólií (1, 2, 3), s polyolefinem (4, 5, 6) a bifaciální s pouzdřicím materiálem EVA (7, 8, 9). Všechny moduly měly články s monokrystalickým křemíkem (c-Si) typu PERC. Bifaciální moduly měly provedení článků tzv. half cut.

Prvním měřením byla elektroluminiscence, díky které se ověřilo, že žádný z devíti modulů netrpí vážnějšími vadami, jako třeba prasklinami článků. Na základě různé svítivosti na pořízených snímcích se ukázalo, že elektrické vlastnosti článků se mohou mírně lišit. Toto měření bylo provedeno pouze před vystavením modulů různým teplotám.

Porovnáním dat z flash testu se ukázalo, že průběh V-A charakteristik nebyl ovlivněn teplotou. Ze získaných hodnot paralelních odporů se také potvrdilo, že ani paralelní odpor nebyl teplotou ovlivněn. Hodnoty paralelních odporů jednotlivých modulů se lišily jen málo, v řádech jednotek nebo desítek ohmů. A také porovnání dark V-A křivek ukázalo, že paralelní odpor jednotlivých fotovoltaických modulů se téměř nezměnil, a tudíž ani při této metodě nebyl pozorován významný vliv teploty.

Z měření paralelního odporu pomocí metody impedanční spektroskopie vyšlo, že pouze u bifaciálních modulů vykazoval paralelní odpor jistou závislost na teplotě. S rostoucí teplotou klesal až na hodnoty počátečního stavu. Tento vliv může být dán jejich jinou konstrukcí, ať už tím, že se jedná o bifaciální moduly, nebo tím, že jsou vybaveny half cut články. U „klasických“ modulů nebyla pozorována závislost na teplotě, ale paralelní odpor se velmi zvýšil (z řádů stovek na tisíce), a i při zvýšení teploty takto vysoké hodnoty odporu zůstávaly. Naměřené hodnoty u modulů s EVA fólií ukázaly jiný průběh než moduly s polyolefinem. Z Cole-Cole diagramu modulů s EVA fólií lze pozorovat stabilnější a „uhlazenější“ křivky, které jsou blízko u sebe, na rozdíl od polyolefinu. Avšak jak u modulů s EVA fólií, tak u modulů s polyolefinem lze sledovat mírnou snahu relaxovat s rostoucí teplotou, i když u modulů s polyolefinem je relaxace větší. Takovéto průběhy odporů ne zcela odpovídají teorii, proto spektroskopie jako alternativní měření paralelního odporu selhává.

Metoda impedanční spektroskopie se sice ukázala jako ne příliš vhodná pro sledování závislosti paralelního odporu na teplotě. Nicméně z průběhů získaných pomocí impedanční spektroskopie lze odvodit druh pouzdrícího materiálu použitého při výrobě modulů. Při měření modulů s EVA fólií jsou jednotlivá impedanční spektra prakticky totožná, zatímco u modulů s polyolefinem se projevují impedanční abnormality.

Seznam použité literatury

- [1] BECHNÍK, Bronislav. Stručná historie fotovoltaiky. *Tzb-info* [online]. 1.9.2014 [cit. 2022-01-19]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/11652-strucna-historie-fotovoltaiky>
- [2] BENDA, Vítězslav. Solární články z krystalického křemíku - základní technologie současné fotovoltaiky. *Tzb-info* [online]. 25.9.2006 [cit. 2022-01-19]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/3553-solarni-clanky-z-krystalickeho-kremiku-zakladni-technologie-soucasne-fotovoltaiky>
- [3] PERN, F. J. Ethylene-vinyl acetate (EVA) encapsulants for photovoltaic modules: Degradation and discoloration mechanisms and formulation modifications for improved photostability. *Die Angewandte Makromolekulare Chemie* [online]. 2003, 1997, **252**(1), 195-2016 [cit. 2022-03-03]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1002/apmc.1997.052520114>
- [4] CZANDERNA, A. W. a F. J. PERN. Encapsulation of PV modules using ethylene vinyl acetate copolymer as a pottant: A critical review. *Solar Energy Materials and Solar Cells* [online]. 1. 9. 1996, (2), 101-181 [cit. 2022-03-03]. Dostupné z: doi:[https://doi.org/10.1016/0927-0248\(95\)00150-6](https://doi.org/10.1016/0927-0248(95)00150-6)
- [5] OLIVEIRA, Michele Cândida Carvalho de, Antônia Sonia Alves DINIZ CARDOSO, Diniz CARDOSO, Marcelo Machado VIANA a Vanessa de Freitas Cunha LINS. The causes and effects of degradation of encapsulant ethylene vinyl acetate copolymer (EVA) in crystalline silicon photovoltaic modules: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2018, **81**(2), 2299-2317 [cit. 2022-04-10]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.039>
- [6] HENDERSON, A.M. a AT PLASTICS, Inc. Ethylene-vinyl acetate (EVA) copolymers: a general review. *IEEE Electrical Insulation Magazine* [online]. IEEE, 1993, 1. 1993, **9**(1), 30-38 [cit. 2022-03-03]. ISSN 1558-4402. Dostupné z: doi:[10.1109/57.249923](https://doi.org/10.1109/57.249923)

- [7] BENDA, Vítězslav. Krystalline Silicon Solar Cell and Module Technology. *A Comprehensive Guide to Solar Energy Systems* [online]. 2018, 2018, 181-213 [cit. 2022-05-11]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811479-7.00009-9>
- [8] HRZINA, Pavel. Konstrukce fotovoltaických modulů. In: *LDFS* [online]. ČVUT Praha, 2012 [cit. 2022-05-11]. Dostupné z: http://pasan.feld.cvut.cz/ad1b13svs/velke/prednes_03_SVS_DS.pdf
- [9] Ing. HYLSKÝ, Josef, Dávid Ing. STRACHALA a Jiří Doc. Ing. VANĚK. Nejstarší fotovoltaická elektrárna v České republice: Analýza modulů fotovoltaické elektrárny Dukovany. *Tzb-info* [online]. 15.11.2015 [cit. 2021-12-29]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/13447-nejstarsi-fotovoltaicka-elektrarna-v-ceske-republice>
- [10] MUNOZ, M.A., M.C. ALONSO-GARCÍA, Nieves VELA a F. CHENLO. Early degradation of silicon PV modules and guaranty conditions. *Tzb-info* [online]. 5.7.2011 [cit. 2021-12-17]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.06.011>
- [11] ADOTHU, Balaji, Parth BHATT, Shashwata CHATTOPADHYAY, Sarita ZELE, Jeroen ODERKERK, H. P. SAGAR, Francis Reny COSTA a Sudhanshu MALLICK. Newly developed thermoplastic polyolefin encapsulant—A potential candidate for crystalline silicon photovoltaic modules encapsulation. *Solar Energy* [online]. 12. 11. 2019, **194**, 581-588 [cit. 2022-03-03]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.11.018>
- [12] ORESKI, Gernot, Antonia OMAZIC, Gabriele Christine EDER, et al. Properties and degradation behaviour of polyolefin encapsulants for photovoltaic modules. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* [online]. 2020, 21.8. 2020, **28**(12), 1277-1288 [cit. 2022-05-11]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1002/pip.3323>
- [13] LIN, Bo, Chen ZHENG, Qingying ZHU a Fang XIE. A polyolefin encapsulant material designed for photovoltaic modules: from perspectives of peel strength and transmittance. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* [online]. 11.12. 2019, **140**, 2259-1165 [cit. 2022-03-03]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1007/s10973-019-09006-w>

- [14] Elizabeth von HAUFF. Impedance Spectroscopy for Emerging Photovoltaics. *The Journal of Physical Chemistry* [online]. 2019, 28.3.2019, **123**(18), 11329-11346 [cit. 2022-03-23]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.9b00892>
- [15] TATARKOVIČ, Michal, Gabriela BRONCOVÁ a Martin KRONĎÁK. ELEKTROIMPEDANČNÍ SPEKTROSKOPIE A JEJÍ VYUŽITÍ V CHEMICKÉ ANALÝZE. *Chemické Listy* [online]. 2012, 17.1.2012, **106**, 1067-1074 [cit. 2022-03-23]. Dostupné z: http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/2012_11_1067-1074.pdf
- [16] ČERNÁ, Ladislava, Pavel HRZINA, Tomáš FINSTERLE a Vítězslav BENDA. IMPEDANCE SPECTROSCOPY AND ITS POSSIBLE USE FOR DEFECTS DETECTION. *32nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*. 1842-1845. [17] MACABEBE, Erees Q. B. a E. Ernest van DYK. Extraction of device parameters from dark current-voltage characteristics of PV devices. *Physica Status Solodi* [online]. 2007, 13.12. 2007, **5**(2), 616-619 [cit. 2022-03-30]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1002/pssc.200776834>
- [18] MACABEBE, Q. B. a E. Ernest van DYK. Parameter extraction from dark current-voltage characteristics of solar cells. *South African Journal of Science* [online]. 2008, **104**(9-10), 401-404 [cit. 2022-03-28]. Dostupné z: <https://journals.co.za/doi/pdf/10.10520/EJC96831>
- [19] Fotovoltaický článek. In: *Passan* [online]. ČVUT Praha [cit. 2022-05-11]. Dostupné z: http://pasan.feld.cvut.cz/a1b13svs/2015_svs3ab.pdf
- [20] HOLOVSKÝ, Jakub. Rychlý úvod do problematiky, základní principy. *Moodle FEL* [online]. ČVUT Praha, 22.9.2020 [cit. 2022-03-30]. Dostupné z: https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/321953/mod_resource/content/1/A5M1_3FVS-01-uvod%20do%20problematiky-2021-09-21.pdf
- [21] JAN, Štuka. *Ekonomické vyhodnocení provozu fotovoltaické elektrárny při poruše* [online]. Praha, 2016 [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/65228/F3-BP-2016-Sutka-Jan-bakalarska_prace.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Bakalářská práce. ČVUT Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Ing. Ladislava Černá.

- [22] RAKOUSEK, David. *PID EFEKT, DIAGNOSTIKA A DŮSLEDKY* [online]. Praha, 2017 [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/68395/F3-BP-2017-Rokusek-David-PID%20efekt%2C%20diagnostika%20a%20dusledky.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Bakalářská práce. ČVUT Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Ing. Pavel Hrzina, Ph.D.
- [23] BENDA, Vítězslav. Solární články z krystalického křemíku - základní technologie současné fotovoltaiky. *Tzb-info* [online]. 25.9.2006 [cit. 2022-01-19]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/3553-solarni-clanky-z-krystalickeho-kremiku-zakladni-technologie-soucasne-fotovoltaiky>

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Chemické složení EVA; [5].....	11
Obrázek 2 - EVA fólie; [8].....	12
Obrázek 3 - zobrazení amplitudy $U(t)$ a $I(t)$ v čase; [14]	19
Obrázek 4 – Nyquistův graf RC obvodu; [14]	21
Obrázek 5 – Cole-Cole diagram fotovoltaického článku (modulu); [16]	21
Obrázek 6 - Bodeův graf se dvěma osami y ; [14].....	22
Obrázek 7 - V-A charakteristika solárního článku; [19].....	23
Obrázek 8 - Změna V-A křivky při různém osvětlení, černá křivka je dark (temnotní); [20]	24
Obrázek 9 – Změna V-A charakteristiky sériového odporu (vlevo) a paralelního (vpravo); [19]	24
Obrázek 10 – Jednodiódové náhradní schéma fotovoltaického článku	25
Obrázek 11 - Dvoudiódové náhradní schéma fotovoltaického článku.....	26
Obrázek 12 - Ukázka elektroluminiscenčního snímku modulu; [23].....	28
Obrázek 13 - Zařízení na měření elektroluminiscence.....	30
Obrázek 14 - Flash tester v laboratoři FEL ČVUT	32
Obrázek 15 - Blokové schéma měření dark currentu	39
Obrázek 16 - Nízkoteplotní testovací komora.....	41

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Základní požadavek na vlastnosti zapouzdřovacích materiálů; [5] ...	11
Tabulka 2 - Běžné složení EVA; [5]	13
Tabulka 3 - Modul pružnosti v ohybu pro EVA kopolymery; [6]	13
Tabulka 4 - Impedance ideálních prvků v obvodě; [8]	20
Tabulka 5 - Přehled sériových čísel modulů	29
Tabulka 6 – Snímky elektroluminiscence	31

Seznam grafů

Graf 1 - V-A charakteristika, počáteční stav	33
Graf 2 - - V-A charakteristika, počáteční stav	33
Graf 3 - V-A charakteristika, počáteční stav	34
Graf 4 - V-A charakteristika, počáteční stav	34
Graf 5 - V-A charakteristika, počáteční stav	35
Graf 6 - V-A charakteristika, počáteční stav	35
Graf 7 - V-A charakteristika, počáteční stav	36
Graf 8 - V-A charakteristika, počáteční stav	36
Graf 9 - V-A charakteristika, počáteční stav	37
Graf 10 - V-A charakteristika, počáteční stav	37
Graf 11 - V-A charakteristika, počáteční stav	38
Graf 12 - V-A charakteristika, počáteční stav	38
Graf 13 – Dark V-A charakteristika, počáteční stav	39
Graf 14 – Dark V-A charakteristika, počáteční stav	40
Graf 15 - impedanční spektroskopie, naměřené hodnoty	41
Graf 16 - Impedanční spektroskopie, naměřené hodnoty.....	42
Graf 17 - Impedanční spektroskopie, naměřené hodnoty.....	43
Graf 18 - Impedanční spektroskopie, naměřené hodnoty.....	43
Graf 19 - Impedanční spektroskopie, hodnoty	44
Graf 20 - Impedanční spektroskopie, hodnoty	45
Graf 21 - Porovnání V-A charakteristik před a po, modul s EVA fólií	46
Graf 22 - Porovnání V-A charakteristik před a po, modul s polyolefinem	47
Graf 23 – porovnání V-A charakteristik před a po, bifaciální modul	47
Graf 24 - Porovnání hodnot paralelního odporu před a po.....	48
Graf 25 - Porovnání dark V-A charakteristik	49