

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ



**Bakalářská
PRÁCE**

**Kalousová
Tereza**

2023

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kalousová** Jméno: **Tereza** Osobní číslo: **492204**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektrotechnologie**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Specializace: **Aplikovaná elektrotechnika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Poruchy zadní strany PV modulu

Název bakalářské práce anglicky:

Defects in the bottom layer of the PV module

Pokyny pro vypracování:

- 1) Proveďte rešerši vad PV modulů, zaměřte se na poruchy zadní strany PV modulu
- 2) Popište mechanismy a důsledky vady zadní krycí vrstvy
- 3) Proveďte rešerši, případně navrhněte metody opravy vad, včetně analýzy životnosti a nákladů na opravu.
- 4) Otestujte vybranou metodu opravy

Seznam doporučené literatury:

- [1] VORONKO, Yuliya, Gabriele C. EDER, Christian BREITWIESER, Wolfgang MÜHLEISEN, Lukas NEUMAIER, Sonja FELDBACHER, Gernot ORESKI a Norbert LENCK. Repair options for PV modules with cracked backsheets. 2021, 9(9), 1583-1595. ISSN 2050-0505. Dostupné z: doi:10.1002/ese3.936
- [2] KÖNTGES, Marc. Review of Failures of Photovoltaic Modules. 2014. IEA International Energy Agency. ISBN 978-3-906042-16-9.

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: **31.01.2023**

Termín odevzdání bakalářské práce: _____

Platnost zadání bakalářské práce: **22.09.2024**

Ing. Pavel Hrzina, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Studentka bere na vědomí, že je povinna 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 studentky

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracovala samostatně a použila 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

Mé poděkování patří mému vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Pavlovi Hrzinovi, Ph.D. za vedení a odbornou pomoc jak s vypracováním bakalářské práce, tak při měření experimentu. Dále pak děkuji panu Ing. Tomášovi Finsterle, Ph.D. za cenné rady a v neposlední řadě mým rodičům.

Anotace

Jméno autora: Tereza Kalousová
Název diplomové práce: Poruchy zadní strany PV modulu
Akademický rok: 2022/2023
Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management
Katedra: Katedra elektrotechnologie
Vedoucí DP: Ing. Pavel Hrzina, Ph.D.

Abstrakt

V této bakalářské práci se věnuji vadám zadní strany fotovoltaického modulu a jejich opravám. V první řadě byla provedena rešerše obecných vad PV modulů, na kterou navazovaly vady zadní vrstvy PV modulu. Dále jsem se zabývala možnými způsoby oprav popraskaného zadního krytu PV modulu. V experimentálním měření zkoumám průběh izolačního odporu PV modulu v závislosti na změně vlhkosti prostředí.

Klíčová slova:

Fotovoltaický modul, zadní kryt, trhliny v zadním krytu, vady modulu, oprava modulu, izolační odpor, PET

Abstract

In this bachelor's thesis, I focus on the defects of the back side of a photovoltaic module and their repairs. Firstly, a research was conducted on general PV module defects, followed by the specific defects of the back layer of the PV module. Furthermore, I explored possible methods for repairing a cracked backsheet of a PV module. In the experimental measurement, I investigate the variation of the insulation resistance of the PV module with changing environmental humidity.

Keywords:

PV module, backsheet, cracks in the backsheet, module defects, module repair, insulation resistance, PET

Title translation:

Defect in the bottom layer of the PV module

Obsah

1	Úvod	11
2	Struktura PV modulu	12
2.1	Přední vrstva.....	12
2.2	Pouzdrící vrstva.....	13
2.3	Fotovoltaické články	15
2.4	Zadní krycí vrstva	15
2.5	Rám	16
2.6	Připojovací box	17
3	Vady PV modulů	18
3.1	Porucha zapouzdření	18
3.2	Vytváření horkých míst.....	18
3.3	Trhliny v solárních článcích.....	19
3.4	Šnečí stopy	20
3.5	PID	21
3.6	Rozbití skla a rámu.....	21
3.7	Koroze	21
3.8	Poruchy (Degradace) zadní desky.....	22
3.8.1	Delaminace	22
3.8.2	Zabarvení	23
3.8.3	Křídování	23
3.8.4	Praskání.....	24
4	Zadní krycí deska, její mechanismy a důsledky vad	27
4.1	Struktura zadní desky	27
4.2	Štěpení materiálu PET.....	28
4.2.1	Praskliny v polyamidové (PA) zadní desky.....	29

4.2.2	Praskliny v PET zadní desky	29
4.2.3	Praskliny v PVDF/PVF zadní desky.....	29
5	Způsob opravy zadní desky	30
5.1	Čištění	30
5.2	Oprava polysiloxanovým gelem	30
5.2.1	Způsoby aplikace siliconu/tmelu/gelu	31
5.2.2	Nanesení siliconu špachtlí	31
5.2.3	Nanesení siliconu tryskou.....	31
5.2.4	Aplikace s pomocí demontáže modulu.....	32
5.2.5	Aplikace bez demontáže modulu.....	32
5.3	Laminátová folie	32
5.3.1	Způsob aplikace folie.....	33
6	Experimentální měření	34
6.1	Protokol měření VA charakteristik	37
6.2	Naměřená data.....	39
6.2.1	Duben.....	39
6.2.2	Květen.....	43
6.3	Měření v klimatické komoře	47
7	Finanční zhodnocení opravy vs nový panel	50
7.1	Firma Solarmon.....	50
8	Závěr.....	51
	Seznam zkratk.....	52
	Seznam použité literatury	53
	Seznam grafů	55
	Seznam obrázků	56

1 Úvod

Fotovoltaické (PV) moduly jsou během svého provozu vystaveny různým vnějším faktorům, které mohou ovlivnit jejich účinnost a životnost, jako jsou UV záření, cykly teploty a vlhkosti, nárazy deště, sněhu a větru, krupobití a okolní nečistoty. Dále máme vnitřní faktory, které mohou být způsobeny výběrem materiálů a konstrukcí, a s tím spojené kompatibility materiálů. Tyto negativní vlivy mohou vést k rychlejší degradaci PV modulů.

V posledních letech se v terénu zvýšil výskyt popraskaný zadních desek (již po 4 až 7 letech provozu). Nejvyšší poruchovost byla pozorována u podkladů založených na polyamidu (PA), ale také u zadních desek s vnějšími vrstvami z polyvinylidenfluoridu (PVDF) a polyethylentereftalátu (PET).

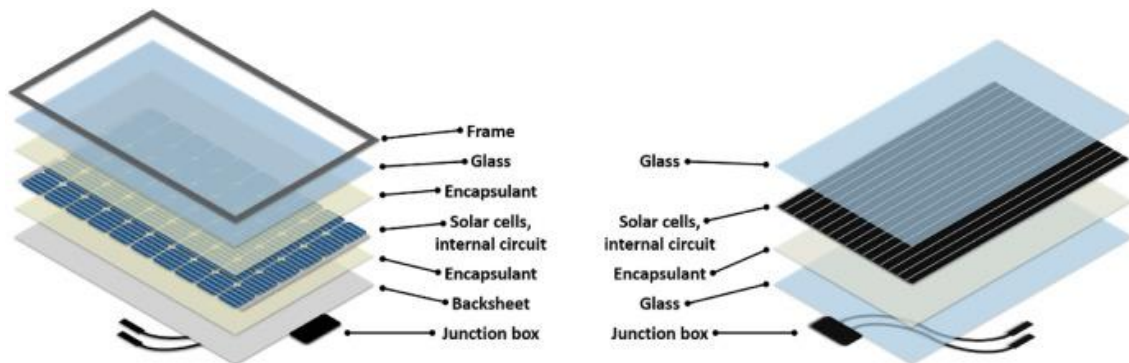
V závislosti na typu a závažnosti vzniku trhlin představují vadné zadní desky nebezpečí vniknutí vlhkosti do PV modulu z důvodu porušené izolace. Navíc mohou tyto trhliny urychlit různé typy degradace PV modulů, jako je například delaminace, koroze, PID nebo hydrolyza polymerů. To by mohlo vést k výkonovým ztrátám v průběhu času, a proto musí být moduly vyměněny nebo opraveny, aby bylo dosaženo očekávané provozní doby 25 let, což je preferováno z důvodu udržitelnosti.

Opětovné využití a spolehlivá oprava vadných zadních desek PV modulů může být pro majitele ekonomicky výhodná a je také důležitá z hlediska udržitelnosti. Kromě toho je také často obtížné najít identické náhradní moduly pro daná zařízení.

Hlavní cílem této bakalářské práce je poskytnout komplexní přehled o možných degradačních poruchách zadních stran PV modulů a způsobu oprav prasklých zadních desek na bázi polyamidu.

2 Struktura PV modulu

Nejběžnější struktura krystalických křemíkových a tenkovrstvých PV modulů je znázorněna na Obrázek 1. Spolehlivost modulu může být ovlivněna nebo omezena různými částmi PV modulu. Běžný krystalický křemíkový modul se skládá z ochranných částí (skleněné přední desky, zapouzdření a zadní krycí desky), z vnitřního obvodu (elektrod, propojek, fotovoltaických článků a bypass diod), připojovacího boxu, kabelů a konektorů. [1]



Obrázek 1 : Struktura krystalického křemíkového modulu, [1]

2.1 Přední vrstva

Obvykle se přední vrstvy fotovoltaických modulů používají pro čtyři hlavní funkce, a to k průhlednosti pro přicházející světlo, strukturální ochraně a podpoře solárních článků, elektrické izolaci a ochranu proti vlhkosti a vstupu kyslíku. Nejčastějším materiálem pro přední vrstvy fotovoltaických modulů je sklo s nízkým obsahem železa (<120 ppm Fe) a s tloušťkou obvykle 3 až 4 mm. Pro zvýšení absorpce světla anebo snížení nečistot na modulu se aplikují funkční nátěry na povrch skla. Antireflexní nátěry (např. TiO_2 , MgF_2 nebo SiO_2) fungují na základě vyrovnání indexů lomu sousedních materiálů. Pro krycí skleněnou vrstvu je ideální jednovrstvý antireflexní povlak s indexem lomu kolem 1,2 až 1,3 (geometrický průměr indexů lomu skla (~1,5) a vzduchu (~1)) a tloušťkou asi 100 nm (~1/4 vlnové délky světla, což podporuje destruktivní interferenci odraženého světla). I když existují i jiné složitější antireflexní povrchy, jako jsou vícevrstvé nebo gradientní nátěry, jsou obecně příliš drahé pro aplikace v PV modulech. [2]

2.2 Pouzdřící vrstva

Pouzďřící vrstva musí splňovat několik důležitých úloh, včetně: ochrany PV článků před vodou a jinými chemikáliemi v okolí, zajištění elektrické izolace, poskytování přilnavosti mezi vrstvami laminátu a zajistit vysokou propustnost pro sluneční záření v oblasti relevantní pro PV (např. 300 až 1200 nm pro křemíkové články). Kromě toho je výhodné, aby byla pouzdřící vrstva k dispozici ve formě plátna nebo role před laminací, aby bylo snadné jej integrovat do výrobního procesu modulu.

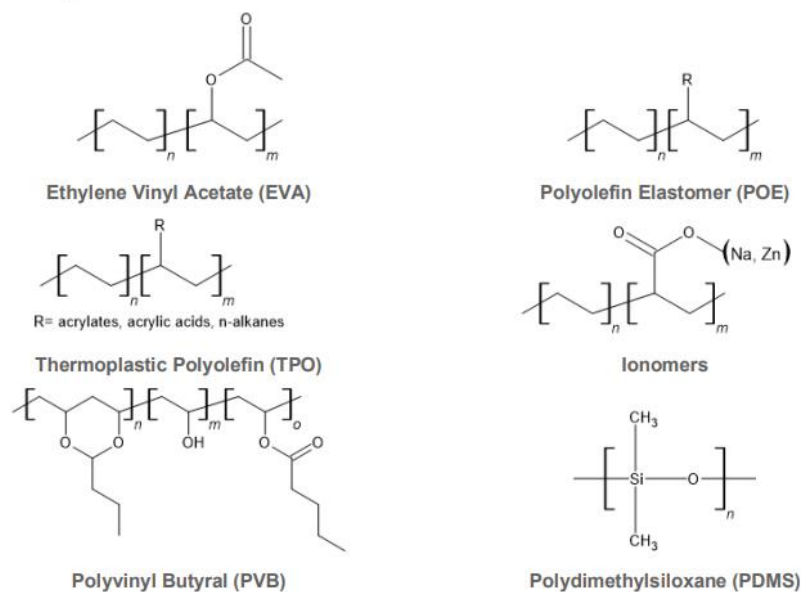
Nejpoužívanějším materiálem pro pouzdřící vrstvy je kopolymer EVA (ethylen-vinyl-acetát) a to díky svým dobrým vlastnostem a nízké ceně. Má však svou negativní stránku, a to vznik kyseliny octové v důsledku vysokých teplot, fotooxidativním procesům a je hydrofilní.

Polyvinylbutyral (PVB) se často používá v bifaciálních PV modulech sklo/sklo kvůli svému pevnému spojení, odolnosti a pružnosti. Nevýhodou PVB je vysoká náchylnost k hydrolyze v důsledku vysokého obsahu vody.

Ionomery mají velmi nízkou přenosovou rychlost vodních par a jsou často používány pro ochranu vlhkostí citlivých tenkých vrstev materiálů. Ionomery vykazují nižší náchylnost k PID a vyšší odolnosti proti zbarvení než EVA, ale mají nižší adhezi na sklo a povrch PV článku.

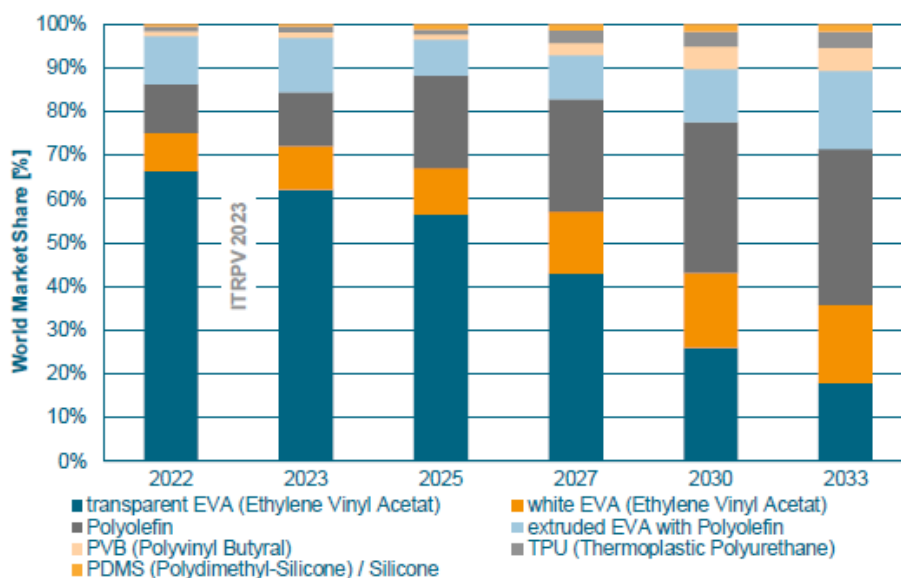
Silikony jsou chemicky inertní, a proto vykazují velmi dobrou spolehlivost. Mohou být tvrdé nebo měkké a jsou také vhodné pro pouzdřící vrstvu.

Nově vyvinuté Elastomery z polyolefinů (PO) a termoplastické elastomery (POE a TPO) vykazují vyšší propustnost a vyšší chemickou inertnost než EVA (žádná hydrolyza a žádné vytváření kyseliny octové). Vykazují menší náchylnost ke vzniku PID. Ačkoliv nejsou zatím tolik používané, tak v budoucnu by mohly nahradit kopolymer EVA. [2]



Obrázek 2 : Chemické struktury pouzdrících vrstev, [2]

Předpokládá se, že EVA, která je nyní dominantní na trhu pro pouzdrící vrstvy, bude v příštích letech ztrácet svůj podíl na trhu. U bílé EVA se očekává, že si udrží relativně stálý podíl na trhu a to kolem 10 % v následujících letech. Polyolefiny budou alternativou pro bifaciální produkty v kombinaci sklo-sklo s procentuálním využitím, okolo 50 % a více, v příštích 10 letech. U ostatních materiálů se očekává nízký podíl na trhu díky využití pouze pro speciální aplikace. [3]



Obrázek 3 : Predikce využití pouzdrících vrstev, [3]

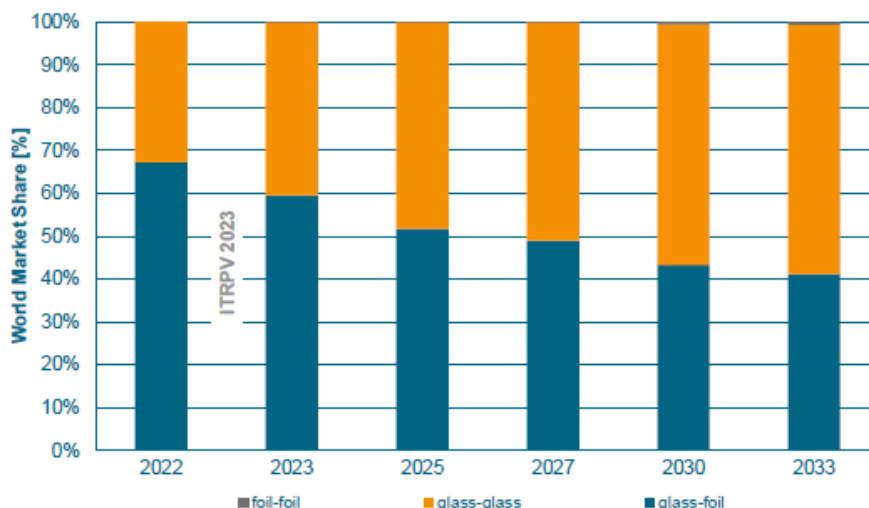
2.3 Fotovoltaické články

Fotovoltaický článek přeměňuje sluneční energii na elektrickou energii. Aby se minimalizovala reflexe a snížila se rekombinace na povrchu článku, nanáší se na něj antireflexní vrstva, která může být vyrobena z materiálů jako SiO_2 , Al_2O_3 nebo $SiNX$. PV články jsou nejčastěji z krystalického křemíku, z něhož jsou vyrobeny monokrystalické a polykrystalické články. Také se můžeme setkat s amorfním křemíkovým článkem. Samotný článek z krystalického křemíku generuje pouze okolo 0,5 V, což je nedostatečné pro reálné aplikace. Proto se články propojují sérioparalelně v PV modulech, aby se dosáhlo vyššího výstupního napětí, které může dosahovat desítek až stovek voltů. Propojení článků se realizuje pájením měděných pásků s použitím olovnaté pájecí pasty. V současné době se přechází k novým způsobům kontaktování, s ohledem na vyloučení pájecích procesů a zvýšení odolnosti proti mikrotrhlinám článků. [2]

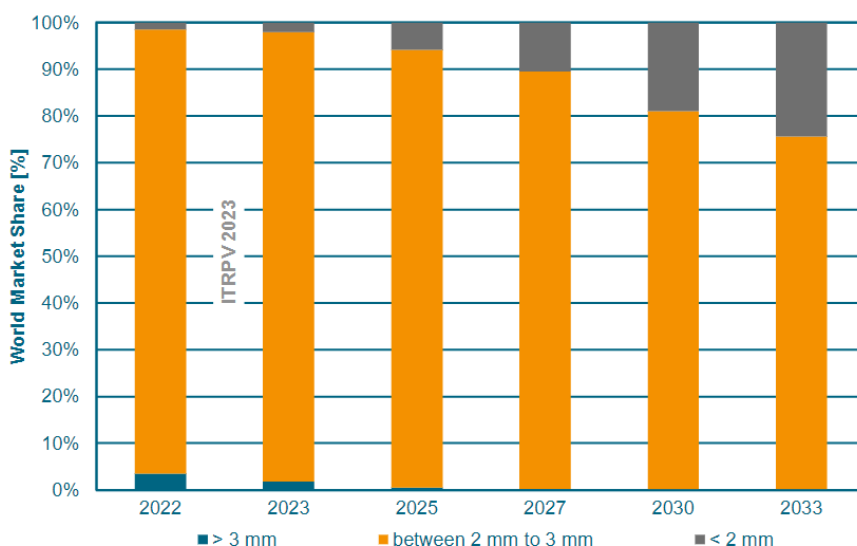
2.4 Zadní krycí vrstva

Zadní strana standardních PV modulů musí být chráněna vícevrstevnými kryty z polymerů nebo skla, které poskytují ochranu proti vnějším vlivům, jako jsou UV záření, vlhkost, prach, písek a chemikálie. Tyto kryty také zajišťují elektrickou izolaci a mechanickou podporu panelu. Barva krytu může ovlivnit vnitřní odrazy a mít vliv na účinnost a teplotu provozu modulu. Více bude vysvětleno v kapitole 4. [1],[2]

Sklo by se v příštích 10 letech mělo stát dominantním materiálem pro zadní krycí desky. Jeho tloušťka se bude pohybovat okolo 2–3 mm, jak je znázorněno na Obrázek 5. Polymerové folie budou ztrácet svůj podíl na trhu přibližně na 40 % využitelnosti. [3]



Obrázek 4 : Predikce využití zadních krycích desek, [3]



Obrázek 5 : Predikce tloušťky zadního skla u bifaciálních modulů, [3]

2.5 Rám

Většina PV modulů je vybavena hliníkovým rámem, který je upevněn na panelu pomocí lepidla nebo lepící pásky. Tento rám slouží k ochraně okrajových částí skla před poškozením a zajišťuje snadnější montáž a upevnění modulu na podpůrnou konstrukci v terénu. Lepidlová vrstva a rám také poskytují další ochranu proti vniknutí vlhkosti do modulu. V některých případech je rám také používán jako uzemňovací spojení, což závisí na místních předpisech. [2]

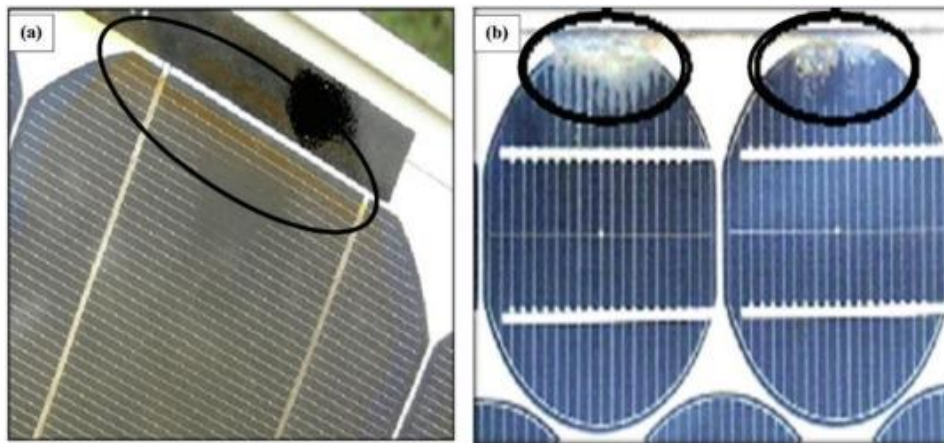
2.6 Připojovací box

Pro bezpečný přenos vyrobené elektřiny z PV modulů, které jsou složeny z polymerových a skleněných desek, jsou vybaveny příslušnými komponenty. Tyto komponenty zahrnují vodiče (články, konektory a kabeláž), které jsou vyvedeny z modulu a upevněny v polymerickém připojovacím boxu, který je připevněn k zadní části modulu. Připojovací box obsahuje elektrické připojení kabeláže a překlenovací diody, je buď vyplněn ochranným polymerem nebo vzduchem. Současné PV moduly mají tři části připojovacího boxu, z nichž každá je vybavena překlenovací diodou a obě vnější části obsahují plusový a minusový vodič modulu. Konektory MC4 jsou nejčastěji používanými kvazi-standardními konektory pro tyto moduly, a to díky svému designu, který je kopírován mnoha výrobci. Lepidlo je nejčastěji typu polysiloxan, který slouží k upevnění připojovacího boxu na zadní stranu modulu. Tato opatření pomáhají zajistit bezpečný přenos elektřiny a ochranu před vnějšími vlivy. [2]

3 Vady PV modulů

3.1 Porucha zapouzdření

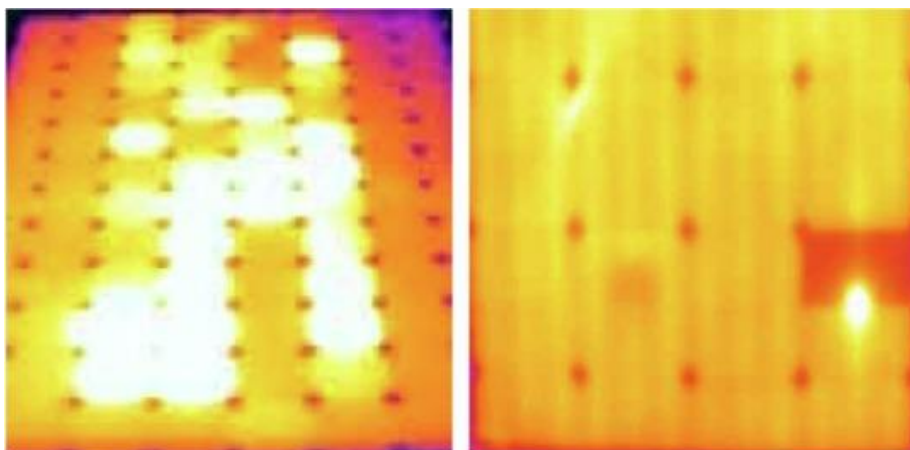
Zapouzdření PV modulů může selhat díky různým faktorům, jako jsou extrémní podmínky podnebí, kontaminace, akumulace nečistot a pronikání vlhkosti. Faktory jako ultrafialové záření, molekuly kyslíku a zvýšená teplota způsobují degradaci zapouzdření EVA, což vede k následné tvorbě bublin, kyseliny octové a delaminace. Kyselina octová také může způsobit korozi, když se dostane do kontaktu s kovem. Ultrafialové paprsky mohou dále zhoršovat zapouzdření a způsobovat zbarvení, což zvyšuje ztráty optického přenosu a snižuje výkon modulu. Poruchy zapouzdření jsou znázorněny na Obrázek 6. [4]



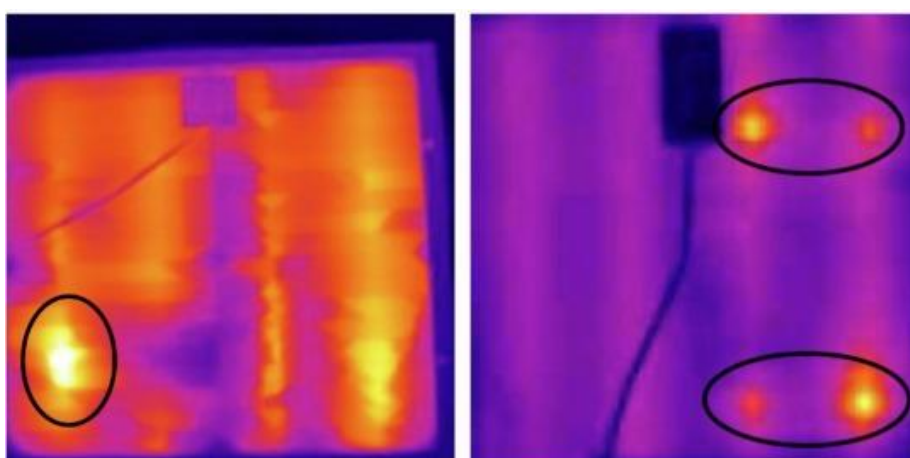
Obrázek 6: Zhnědnutí zapouzdření EVA (vlevo), modul s delaminací (vpravo), [4]

3.2 Vytváření horkých míst

Horká místa v PV modulu vyznačují oblast s vysokou teplotou, která může způsobit poškození článků a dalších součástí. Nejčastěji vznikají, když solární články fungují jako zátěž namísto zdroje energie, a když proud procházející modulem překročí zkratový proud stíněného nebo vadného článku. Taková horká místa mohou vést k nevratnému poškození buněk a mohou být způsobeny stíněním modulu, vadnými diodami, prasklinami v buňkách, vadnými pájecími spoji nebo poškozenými ochrannými kryty. Horká místa znázorněna na Obrázek 6. [4]



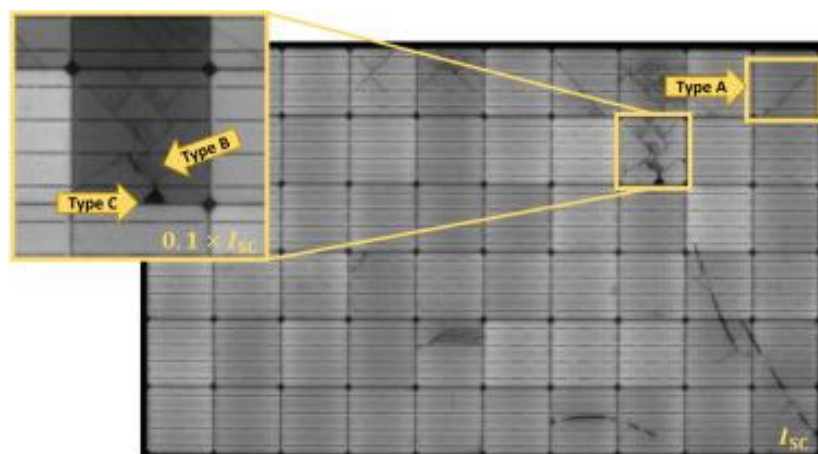
Obrázek 7: Horká místa zobrazena na IR snímcích, [4]



Obrázek 8: Horká místa způsobena špatným pájecím spojem, zobrazena na IR snímcích, [4]

3.3 Trhliny v solárních článcích

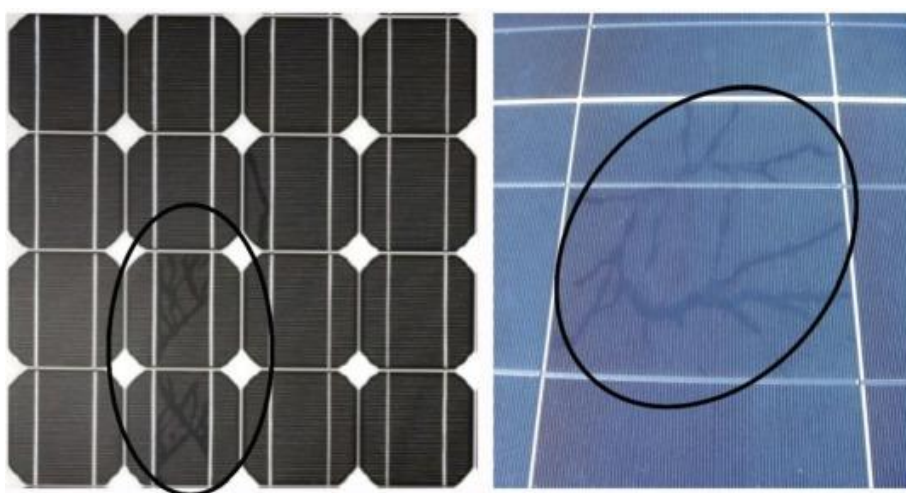
Solární články mohou obsahovat trhliny a mikrotrhliny, které se vyskytují v různých délkách, směrech a polohách. Tyto trhliny obvykle rostou/vznikají v místě již existujících trhlin vzniklých ve fázi výroby, avšak mohou vzniknout i mechanickým namáháním (převážou, instalací, větrem, sněhem) nebo tepelným namáháním (změna teploty). Mikrotrhliny nemusí na začátku mít vliv na výkon solárního modulu, ale s časem existuje větší riziko, že se tyto trhliny budou v průběhu venkovního provozu zvětšovat a ovlivní výkon modulu. Pokud se tyto trhliny rozšíří do buněk, mohou vést ke ztrátě výkonu modulu a mohou způsobit vznik horkých míst. Trhliny nejsou lidským okem viditelné, proto jsou vizualizovány pomocí elektroluminiscenčních snímků, kde jsou vidět jako tmavé čáry viz. Obrázek 9. [4] [5]



Obrázek 9: Elektroluminizační snímek trhlin v PV modulu, [5]

3.4 Šnečí stopy

Viditelné stopy na povrchu solárních článků, které vypadají jako šnečí stopy (znázorněno na Obrázek 10), mohou být způsobeny oxidací stříbrné pasty předních kontaktů v místech trhlin v ethylen-vinylacetátovém (EVA) lepidle. Tyto stopy se obvykle objevují po několika měsících provozu (3–12 měsících) a mohou být doprovázeny sníženou vodivostí na místě stopy. Nicméně, tato změna vodivosti a barvy obvykle nemá významný vliv na celkový výkon modulu, zatímco trhliny pod šnečími stopami mohou mít zásadní dopad. Šnečí stopy jsou způsobeny kombinací EVA a zadního listu. Bylo identifikováno několik degradačních změn stříbrné pasty a složení EVA, což bylo definováno jako hlavní příčina vzniku těchto stop. [5]



Obrázek 10: Šnečí stopa, [4]

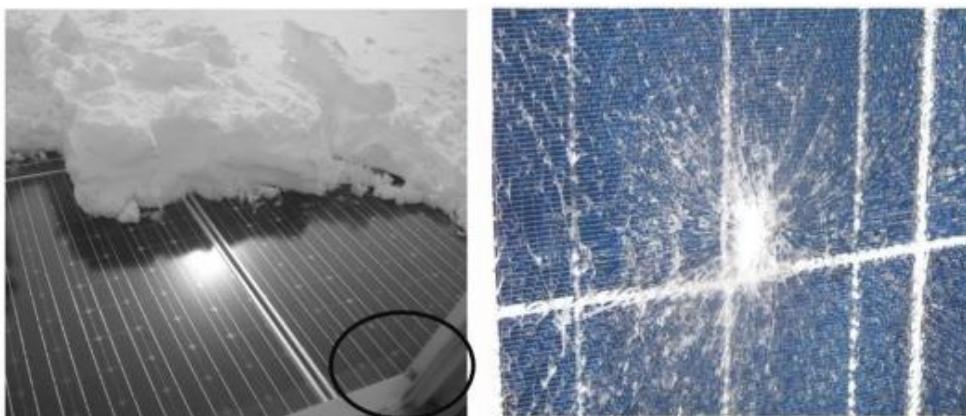
3.5 PID

Zkratka PID neboli Potenciálem indukovaná degradace se vykytuje u PV modulů vyrobených z krystalického křemíku (C-Si). Tento proces nastává až po několika letech, (2–4 roky) a dochází k postupnému snížení výkonu PV modulu. Základním předpokladem pro jeho vznik je záporný potenciál mezi modulem a zemí a zemí.¹ Záporný potenciál způsobuje tzv. vysokonapěťový stress vedoucí k PID. Proces degradace je urychlován vysokými teplotami, vysokým napětím v systému a vysokou vlhkostí.

Moduly zasažené PID degradací lze zregenerovat a vrátit nebo alespoň přiblížit k původním hodnotám parametru modulu. Toto se dělá opačnou polarizací, tedy přivedeme kladný potenciál mezi modul a zem a vytvoříme opačným průběhem PID, tento proces se nejčastěji provádí v noci. Lze ho také urychlit stejným způsobem jako proces degradace, tedy pomocí vlhkosti a teploty. [6]

3.6 Rozbití skla a rámu

Další vadou PV modulu způsobenou vnějším okolím (silný vítr, sníh, ptactvo, stromy atd.) v důsledku mechanického zatížení může být rozbití skla nebo prasknutí rámu. K prasknutí rámu nejčastěji dochází v zimním období, kdy napadne velká vrstva sněhu, která následně zledovatí a vzniklý led tlačí proti špičce rámu, který následně nevydrží mechanickou tíhu a praskne. [4]



Obrázek 11: Prasklý rám (vlevo), rozbité sklo (vpravo), [4]

3.7 Koroze

Koroze je elektrochemická reakce mezi kovovými částmi nebo spoji s vodou, která narušuje proudové spoje a tím snižuje výkon modulu. Ke korozi kovových komponentů

¹ Nejčastěji (platí pro články základního typu P), u N typových článků je polarita obrácena.

v PV modulu nedochází samovolně, ale nejčastěji v důsledku proniknutí vlhkosti a kyslíku do PV modulu z důvodu rozbití skla nebo vysoké a dlouhodobé vlhkosti. Kyselina octová také přispívá ke korozi kovů. [5]



Obrázek 12: Koroze kovového plišku, [4]

3.8 Poruchy (Degradace) zadní desky

Hlavní degradační režimy podkladů zahrnují delaminaci, tvorbu trhlin, křídování, popáleniny, tvorbu bublin a změnu barvy. Více vysvětleno v kapitolách níže.



Obrázek 13: Příklady degradace: změna barvy (vlevo), praskání (uprostřed) a delaminace (vpravo), [1]

3.8.1 Delaminace

Delaminace se může vyskytovat mezi zadní deskou a zapouzdřením, nebo mezi vrstvami samotné zadní desky v důsledku špatné adheze lepidel, procesů laminace nebo degradace způsobené povětrnostními podmínkami. Pokud se delaminace vyskytuje na okraji modulu nebo poblíž přípojovacího boxu, může ohrozit výkon a bezpečnost modulu tím, že způsobí přeskok proudu nebo oddělení přípojovacího boxu. Pokud se delaminace objeví ve střední části PV modulu, může se zvýšit tepelný odpor a provozní teplota článků v této oblasti a přispět ke kondenzaci vody. [1]

Delaminace způsobená adhezní ztrátou u lepidel (například polyuretan na bázi polyesteru), následně se oddělí vrstvy zadní desky od sebe. Příčinou ztráty adheze může být hydrolytická degradace adhezivní vrstvy nebo tepelná degradace při zvýšené teplotě, která vede ke snížení izolační schopnosti zadní desky a zvyšuje riziko selhání modulu. To může vést ke snížení rozměrové stability podkladu a k praskání vnější vrstvy zadní desky. [7]

3.8.2 Zabarvení

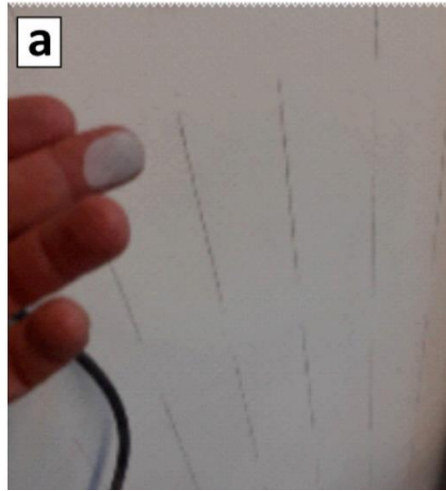
Obvykle vyskytující se žluté zbarvení zadní desky PV modulů vzniká během provozu díky fotooxidačním reakcím, které vytvářejí vedlejší produkty chemické degradace zvané chromofory. Tyto chromofory způsobují žluté zbarvení. Pro zlepšení UV stability zadní desky, jsou do polymerních vazeb často přidávány bílé pigmenty, jako je TiO_2 a BaSO_4 . Tyto pigmenty však mohou být náchylné ke křídování, což vede ke ztrátě lesku a na dotek křídovému povrchu polymeru na vzdušné straně. Ačkoli tyto změny neovlivňují výkon modulu přímo, naznačují změny v polymerních strukturách a mohou být indikátorem závažnějších forem degradace, jako je křehnutí, praskání a delaminace. [1]

Zbarvení zadního listu není tak běžné jako u zapouzdření, ale může se objevit na vnitřní nebo vnější vrstvě zadní desky v závislosti na typu povrchu. Zadní desky PVDF/PET/PVDF obvykle žloutnou z vnitřní strany do pěti let provozu. Vnější strana je zažloutlá pouze na bázi PET. Je to dáno tím, že PET silně absorbuje UV záření v rozsahu 300–350 nm, což vede k chemickým změnám způsobující žloutnutí a ztrátu mechanického výkonu, tedy následnému praskání. [7]

3.8.3 Křídování

Zadní desky často trpí křídováním, což je jedním z nejčastějších poruchových režimů. Tento problém vzniká v důsledku silné povrchové degradace polymerních složek vnější vrstvy, to způsobuje odkrytí pigmentů a plniv na povrchu, což vede k snadnému otěru. Tento problém se nejčastěji vyskytuje u vnější vrstvy na bázi PA zadní desky. Aby se snížila míra otěru na vnějších vrstvách a ztráta mechanické stability v důsledku venkovní expozice, bývají materiály zadních desek obvykle stabilizovány pomocí UV absorbérů nebo oxidu titaničitého (TiO_2) nebo jejich kombinací. PET a PVF jsou známé materiály, které lze stabilizovat tímto způsobem. TiO_2 chrání polymerní složku před

přímou fotochemickou degradací, ale zároveň může být fotokatalyticky aktivní při vlnových délkách pod 380 nm, což může vést k nadměrnému zrychlení fotokatalytické degradace polymerní složky. Rychlost fotokatalýzy je závislá na teplotě a UV záření, což znamená, že degradace mechanických vlastností je pravděpodobnější v teplejším klimatu. [7]



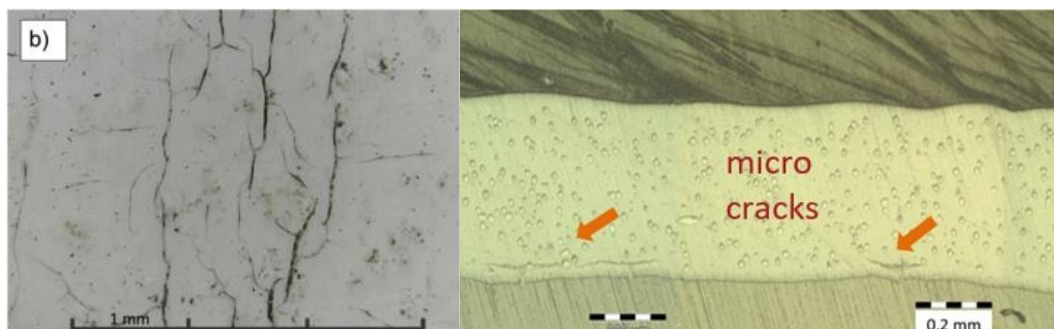
Obrázek 14: Fotografie znázorňující křídování, [8]

3.8.4 Praskání

S nárůstem četnosti se hlavním problémem stávají praskající zadní desky. To má za následek snížení elektrické izolace a vytváření bezpečnostních problémů, jako jsou úniky proudu, zemní spojení a snížení izolačního odporu při vlhkém počasí. Navíc umožňuje pronikání vlhkosti a chemikálií do PV modulu a usnadňuje tak degradaci ostatních komponentů PV modulu. Poškození polymerů zvyšuje jejich krystalinitu a snižuje molekulovou hmotnost, což vede ke křehnutí. Trhliny se obvykle objevují v těchto oslabených polymerových řetězcích a šíří se za přítomnosti mechanického napětí. Proto jsou kritické zejména trhliny v zadním listu, které se nacházejí mezi články a spoji. Tyto trhliny mohou být pozorovány jak na vnitřní straně (u článku), tak na vnější (vzdušné) straně, a jejich vzory se mohou lišit v závislosti na způsobu zpracování materiálu a podmínkách expozice. [1]

3.8.4.1 Mikrotrhliny

Mikrotrhliny nejsou na první pohled okem viditelné. Detekují se fotoaparátem se zoomovým objektivem nebo pod mikroskopem. Objevují se ve strukturách vrstvy zadní desky převážně v důsledku rozpadu krystality polymerů. Znázorněny mikrotrhliny na Obrázek 15. [8]



Obrázek 15: Fotografie povrchu prasklé zadní desky (vlevo), snímek z mikroskopu (vpravo), [8][11]

3.8.4.2 Podélné a čtvercové trhliny

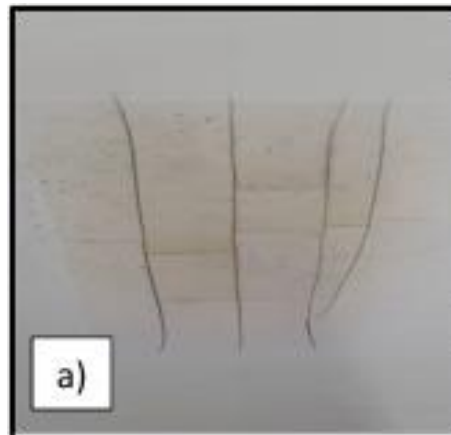
Tyto typy trhlin polyamidových zadních desek vznikají po celé délce desky a ovlivňují tím celý modul. Trhliny se objevují po určité provozní době a závisí na podnebních podmínkách, termomechanických vlastnostech materiálu a mechanického namáhání uvnitř podkladu v místech přípojníc. [8]



Obrázek 16: Typy trhlin v zadní desce: čtvercové trhliny pod meziprostory článků (vlevo), podélné trhliny umístěné pod tyčemi sběrníc (vpravo), [8]

3.8.4.3 Lokální trhliny

Lokální typ praskání vzniká v důsledku vysokých teplot (horké místo) a často se vyskytuje se zhnědnutím polymeru zadního listu. Tato vada může ovlivnit téměř všechny typy polymerů, protože horké místo způsobuje vysoké tepelné namáhání. Tento typ praskání je obvykle lokální a ovlivňuje pouze jeden článek (odpovídající ploše backsheetu 15 cm x 15 cm) v každém modulu. [8]



Obrázek 17: Prasklá zadní deska pod horkou komorou, lokální trhliny, [8]

4 Zadní krycí deska, její mechanismy a důsledky vad

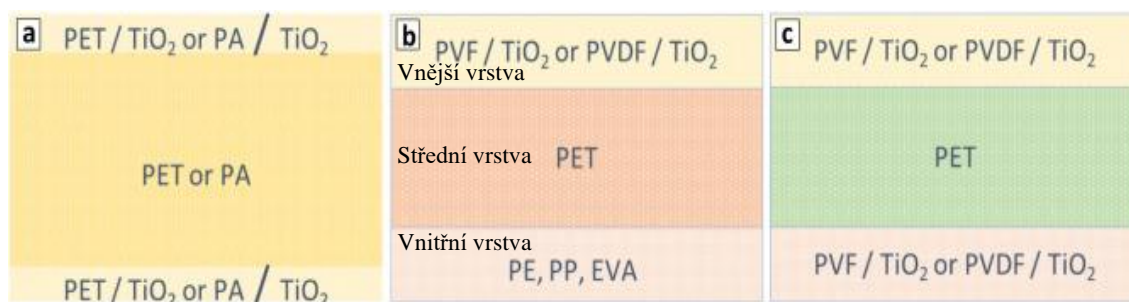
Mezi hlavní degradační režimy zadních krycích desek patří delaminace, tvorba trhlin, křídování, změna barvy a popálená místa.

Faktory těchto degradací mohou být různé, nejčastěji:

- Vliv extrémního namáhání vnějších vlivů (např. UV záření, vlhkost, rozdíl teplot, vítr, mechanické zatížení...)
- Nedostatečná odolnost jednotlivých složek materiálu (např. chybějící stabilizace UV, citlivost na hydrolyzu)
- Nekompatibilita chemických materiálů s více materiálovým laminátovým PV modulem (např. vznik kyseliny octové v EVA zapouzdření)
- Nevyvážené termomechanické vlastnosti materiálů (např. neshody v tepelné roztažnosti) [8]

4.1 Struktura zadní desky

Zadní krycí deska je složená buď z jedné polymerní složky, nejčastěji polyamidu (PA) nebo vícevrstvé struktury polymeru, zpravidla tří vrstev, z nichž každá má specifickou funkci. Vnitřní vrstva v kontaktu se zapouzdřením musí mít vysokou přilnavost a být chemicky kompatibilní se zapouzdřením a odolná vůči přímému slunečnímu záření, které prochází z vrchu skleněnými a zapouzdřenými vrstvami. Materiály, jako jsou fluoropolymery, polyamid (PA), polyethylen (PE) nebo EVA, se obvykle používají k výrobě této vrstvy. Střední (hlavní) vrstva, také nazývaná jádrová vrstva, je typicky silnější a poskytuje požadované mechanické a elektrické vlastnosti celému kompozitu. Tato vrstva je obvykle vyrobena z polyethylentereftalátu (PET), některé typy zadních desek mohou mít jako střední vrstvu polyamid nebo polyolefin. Vnější vrstva (na straně vzduchu) musí být velmi spolehlivá a stabilní, protože poskytuje ochranu pro ostatní vrstvy a je přímo vystavena vnějšímu prostředí, včetně nepřímého krátkého UV záření (odraženého od země v závislosti na albedu země). Proto se obvykle vyrábí z PET, polyvinylidenfluoridu (PVDF) nebo polyvinylfluoridu (PVF). Tyto vrstvy jsou obvykle laminovány spolu s přidáním lepidel. Pouze několik kombinací materiálů může být koextrudováno na vícevrstvé podkladové desky. Každá vrstva podkladové desky je při venkovní expozici vystavena jinému souboru napětí, což ovlivňuje výkon celého podkladu, a nakonec celého fotovoltaického modulu. [7]



Obrázek 18: Schématické znázornění možných kombinací vícevrstvé struktury zadní desky. nefluoropolymer (NF)(vlevo), jednofluoropolymer (SF)(uprostřed) a dvojitý fluoropolymer (DF)(vpravo), [9]

4.2 Štěpení materiálu PET

Nemodifikované polyestery a polyamidy spadají do kategorie polykondenzátů a jsou obecně náchylné k vodě. Tento fakt může vést k procesům štěpení řetězce způsobeným hydrolyzou, což je hlavním faktorem stárnutí těchto materiálů.

Hydrolyza zadních desek na bázi PET způsobuje rozpad molekulového řetězce, který způsobuje křehkost a chemickou krystalizaci (postkrystalizaci), což vede k oslabení mechanických vlastností materiálu. Vysoký počet nukleačních koncových bodů vytvořených štěpením molekul polyesteru způsobuje postkrystalizaci, což ještě více zhoršuje stabilitu materiálu. Z tohoto důvodu musí být všechny stopy vody, kyselin a zásad během výroby pečlivě odstraněny, protože i pouhých 0,01 % hmotnosti aktivní vody může vést ke ztrátě viskozity a hmotnosti molekul.

Pro zvýšení odolnosti hydrolyzy PET filmů se často používají antihydrolytické přísady. Tyto přísady reagují s vlhkostí během zpracování a provozu, působí jako vychytávače vody a mění je na inertní močovinné struktury. K hydrolyze dochází v amorfních oblastech, proto je potřeba snížit obsah amorfů, neboli zvýšit obsah krystalů v polymeru. Toto provede biaxiální roztahování během výroby, což zvýší krystalitu a sníží absorpci vody a hydrolyzu.

Souhrn metod zlepšující hydrolytickou stabilitu PET filmů pro fotovoltaické účely:

1. polykondenzační proces, který umožňuje dosažení vysokých molekulových hmotností,
2. sofistikovaná technika vytlačování, která minimalizuje poškození pryskyřice způsobené třením,
3. zdokonalený proces mechanického protahování, který zahrnuje použití programů pro regulaci teploty. [7]

4.2.1 Praskliny v polyamidové (PA) zadní desky

Ze studie vyplývá, že u PV modulů se zadní stranou na bázi PA je četnost prasklých desek přibližně 50–60 % zkoumaných modulů a je doprovázeno silným křídováním. Obvykle byly praskliny podél kovových spojů. Šířka prasklin se pohybuje v rozmezí stovek mikrometrů, prochází celou zadní deskou a sahá až k vrstvě zapouzdření EVA. Tento typ praskání PA byl zaznamenán v celé solární elektrárně, což naznačuje stejný mechanismus degradace PA. Praskliny v PA mají také značný vliv pro rozsáhlou tvorbu PID, až u 25 % testovaných modulů, zatímco u jiných typů zadních stran se dosahuje četnosti PID u 6 % PV modulů. [9]

4.2.2 Praskliny v PET zadní desky

U zadních stran na bázi jednofluoropolymeru (SF) se objevují vnitřní trhliny umístěné v hlavní vrstvě PET a ve vnitřní vrstvě na bázi polyolefinu (PO), naopak vnější vrstva se vykazuje bez makroskopických trhlin.

Zadní desky na bázi dvojitého fluoropolymeru (DF) vykazují drastické poškození vnitřní PO vrstvy doprovázeno do rozpadajícího stavu, to vede k delaminaci PET složky. Vnější vrstva vykazuje povrchovou síť mikrotrhlin široké několik mikrometrů, což činí potenciálně přístupné k vlhkosti a atmosférickým plynům. [9]

4.2.3 Praskliny v PVDF/PVF zadní desky

Zadní desky s PVDF vykazují vysoké procento praskání a delaminace v suchém podnebí, jelikož mají menší tloušťku a rozměrovou stabilitu, také jsou náchylné k postkrystalizačním (chemokrystalizačním) procesům, které vedou ke křehnutí a následnému praskání. [7]

5 Způsob opravy zadní desky

Jelikož problematika prasklých zadních desek je téměř nová, metody oprav a materiálu (jako např. epoxidové, polyuretanové, akrylové, nitrilkaučukové a silikonové materiály), jsou stále ve vývoji a zkoumání. Nyní se zatím na trhu objevují dva typy oprav a to:

- a) potažení polysiloxanovým gelem, obvykle bývá prováděno přímo na místě elektrárny;
- b) potažení laminátové folie, bývá provedeno po sundání příslušného modulu a opraveno v opravárenské dílně.

5.1 Čištění

Před každou opravou poškozeného PV modulu je zapotřebí správného očištění od nečistot (např. prach, špína způsobena deštěm/sněhem, kusy zeleně atd.) způsobené dobou provozu v terénu. Správné a důkladné očištění přispívá k lepší přilnavosti a funkčnosti opravárenského materiálu. Očista se provádí následujícími způsoby: a) otírání namočeným hadrem ve vodě; b) otírání izopropylalkoholem; c) mechanické čištění suchou houbou. [10][11]



Obrázek 19: Mechanické čištění suchou houbou, [14]

5.2 Oprava polysiloxanovým gelem

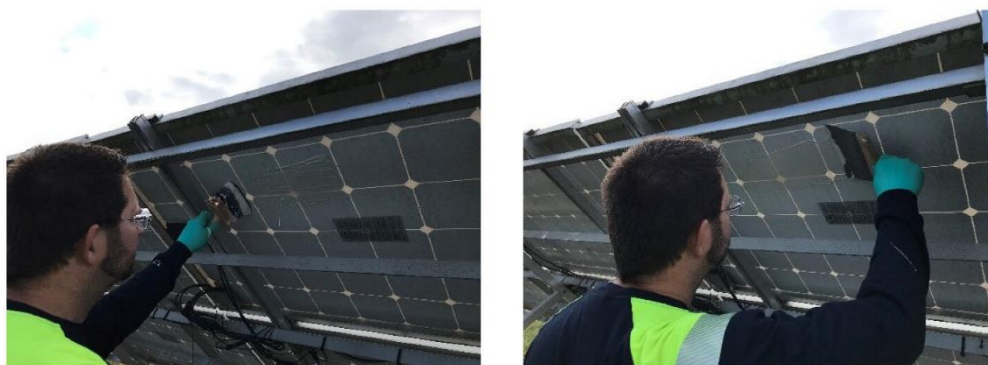
Silikonové materiály jsou běžně používány ve výrobě PV modulu např. pro utěsnění rámu, lepení a zalévání připojovacího boxu. Má dobré izolační vlastnosti, odolnost proti UV záření a pronikání vlhkosti, proto jsou dobrou volbou pro opravu. Aplikují se jeden až dva nátěry stejného materiálu s rozdílnou viskozitou. Při prvním nátěru materiálu s nižší viskozitou se zaplní trhliny. Druhý nátěr má větší viskozitu a dojde k utěsnění materiálu v trhlinách. [11][12]

5.2.1 Způsoby aplikace siliconu/tmelu/gelu

Způsoby nanesení gelu jsou dva, a to špachtlí nebo tryškou při demontáži/ne demontáži modulu, více je popsáno v kapitolách níže.

5.2.2 Nanesení siliconu špachtlí

Na poškozenou zadní stranu se nanese štětcem nebo špachtlí vrstva gelu, která se následně rovnoměrně vyhladí špachtlí. Na povrchu zůstane tenký povlak, který neteče dolů. Toto má za výhodu lepšího zatlačení gelu do všech trhlin v zadní desce a také levnějšího a snadnějšího nářadí pro aplikaci. [12]



Obrázek 20: Nanesení siliconu pomocí štětce (vlevo) a špachtle (vpravo), [12]

5.2.3 Nanesení siliconu tryškou

Pro rychlejší aplikaci se využívá tryšky, kde tekutý gel je nastříkán pneumatickou kartušovou pistolí s rozprašovací tryškou poháněnou stlačeným vzduchem nebo speciálním systémem, který čerpá tekutý silikon ze zásobníku a pohání jej přes rozprašovací tryšku. Vrstva siliconu není na dotek hladká a má tvar stékajících kapiček, pro zamezení hrubosti se může vrstva vyhladit špachtlí, výhody špachtle jsou řečeny v kapitole 5.2.2. [12]



Obrázek 21: Nanesení siliconu tryskou v dílně (vlevo) a v terénu (vpravo), [12][15]

5.2.4 Aplikace s pomocí demontáže modulu

V případech, kdy je nutná demontáž modulu z konstrukce nastává u konstrukce východ – západ nebo u sedlové střechy, kde je malý prostor mezi PV modulem a střechou a není možné aplikovat nátěr siliconu. Poškozené moduly se sundají ze střechy a následně se na rovném povrchu (např. v dílně, venku na kovových podpěrách) aplikuje gel. Po zaschnutí gelu se opravené moduly mohou vrátit zpět do provozu. Ze studie vyplývá, že aplikace gelu ve vodorovné poloze usnadňuje opravu a zkracuje její dobu na několik minut a nedochází ke stékání materiálu během jeho zaschnutí. [12]

5.2.5 Aplikace bez demontáže modulu

K aplikaci gelu bez demontáže PV modulu nejčastěji přistupováno v solárních parcích, kdy se člověk dostane k zadní desce PV modulu a může špachtlí nebo tryskou nanést vrstvu siliconu, která následně přirozenou cestou zaschne. Toto má výhodu, že není potřeba kvalifikované pracovní síly k demontáži a následné montáži PV modulů. [12]

5.3 Laminátová folie

V Evropě se vyskytuje firma s názvem DuPont, která laminátové folie vyrábí. Ve spolupráci s firmou Sc-refit GmbH vyrobili opravný stroj pro aplikaci laminátové folie.

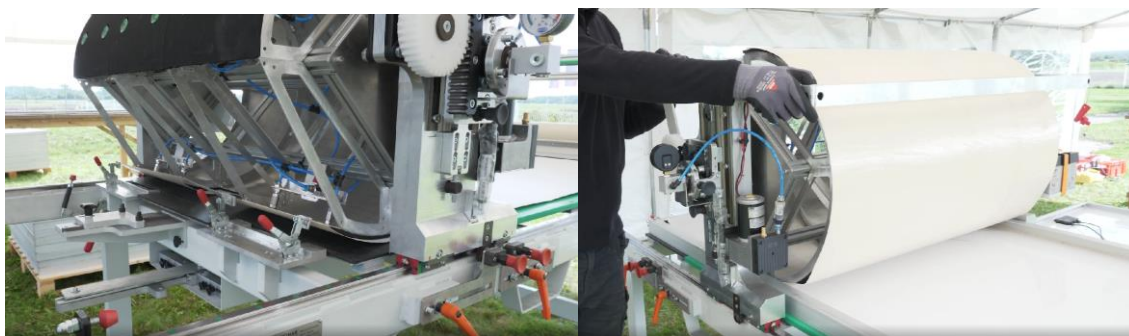
Její folie „Tedlar PV Rescue Tape“ se skládá z kompozitní třívrstvé struktury složené z vnější vrstvy polyvinylfluoridového (PVF) filmu, polyesterového jádra a vnitřní vrstvy butylkaučuku pro silnou přilnavost k degradovanému zadnímu listu. Jelikož výroba folie a její bližší složení je firmou neodhaleno, nemám k tomu podrobnější informace. Předpokládá se, že folie bude stabilnější než siliconový gel. [13] [14]



Obrázek 22: Struktura folie Tedlar PV Rescue Tape, [14]

5.3.1 Způsob aplikace folie

Oprava pomocí laminátové folie se provádí na místě fotovoltaické elektrárny. Pro opravu poškozených modulů ochranou folií je potřeba moduly odmontovat od konstrukce a očistit. Následně je modul položen na speciální stůl s navíjecím bubnem a navinutou folií. Speciální navíjecí buben nevyvíjí žádný tlak na modul, aby nepoškodil fotovoltaické články. Okraje rámu a oblast okolo připojovacího boxu jsou utěsněny a je provedena konečná kontrola kvality. Celý opravný proces trvá méně než 5 minut. [13][14]



Obrázek 23: Speciální stůl s navíjecím bubnem a opravnou folií, [14]



Obrázek 24: Utěsnění folie, [14]

6 Experimentální měření

V experimentálním měření budu zkoumat izolační odpor vadných PV modulů značky Canadian solar, kde došlo k degradaci zadní krycí vrstvy. Některé moduly byly opraveny polysiloxanovým gelem, který byl pomocí trysky nastříkán na popraskané části. Ze čtyř vzorků je jeden neopravený, dva opravené pouze v prasklých spárách a jeden opravený po celé své ploše.

Každému modulu před jeho instalací na střechu budovy ČVUT FEL byla změřena jeho voltampérová charakteristika a vypočítán bod maximálního výkonu při standardních testovacích podmínkách. K měření voltampérových charakteristik byl použit zábleskový solární simulátor s označením Pasan IIIIC. Kromě výrazné degradace zadní krycí vrstvy, nebyly moduly nijak významně poškozeny a změřený výkon při STC 7 odpovídá očekávanému poklesu úměrnému stáří modulů. Příklad měření VA charakteristik je v protokolu z měření, viz kapitola 6.1.

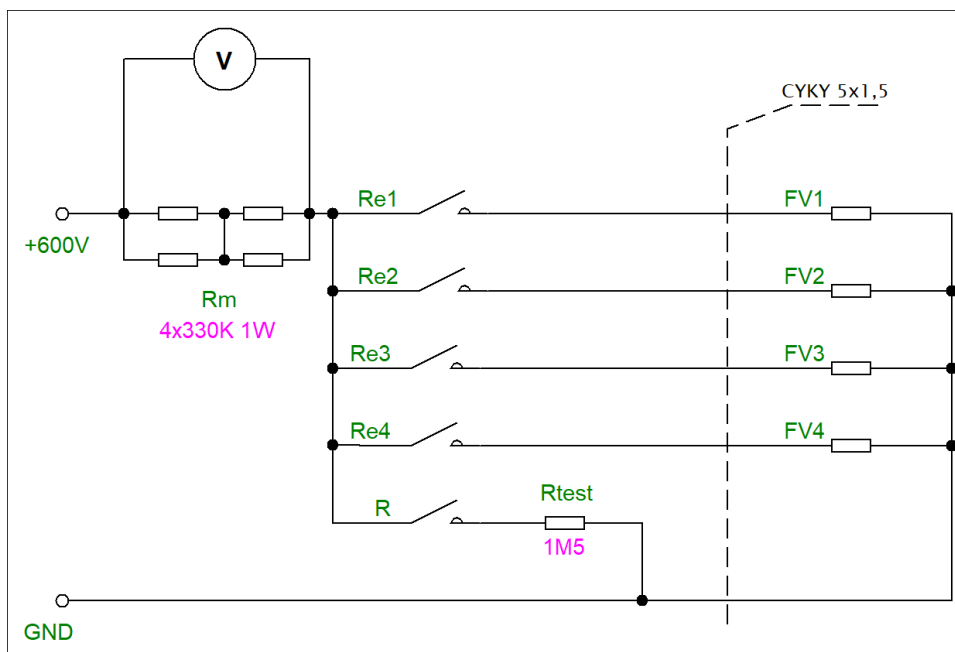
Moduly jsou umístěny na konstrukcích V–Z, kde mají malý uhel mezi střechou a samotným modulem, díky tomu nedochází k přímému kontaktu zadní desky s deštěm a následnému zatečení vody. Experiment nezkoumal vliv orientace modulů, ale lze předpokládat, že zde budou drobné rozdíly spojené s dobou potřebnou pro odtečení/odpaření vody z povrchu modulu. Případné další vlivy polohy modulů, orientace a typu konstrukcí by bylo nutné zkoumat v jiném experimentu.

Izolační odpor modulů byl vypočítáván na základě unikajících proudů, které bylo možné získat díky automatizovanému měření úbytku napětí na přídavném odporu (R_m) 330 k Ω . Výpočet izolačního odporu (R_1) byl prováděn podle rovnice (3). Každý PV modul byl namáhán stejnosměrným napětím cca. 600 V. Celý experiment byl zapojen podle schématu viz. Obrázek 25.

$$I_1 = \frac{U_1}{R_m} \tag{1}$$

$$U_x = U_1 + I_1 R_{test} = U_1 + \frac{U_1}{R_m} R_{test} \tag{2}$$

$$R_1 = \frac{U_x}{I_1} - R_m \tag{3}$$



Obrázek 25: Schéma zapojení

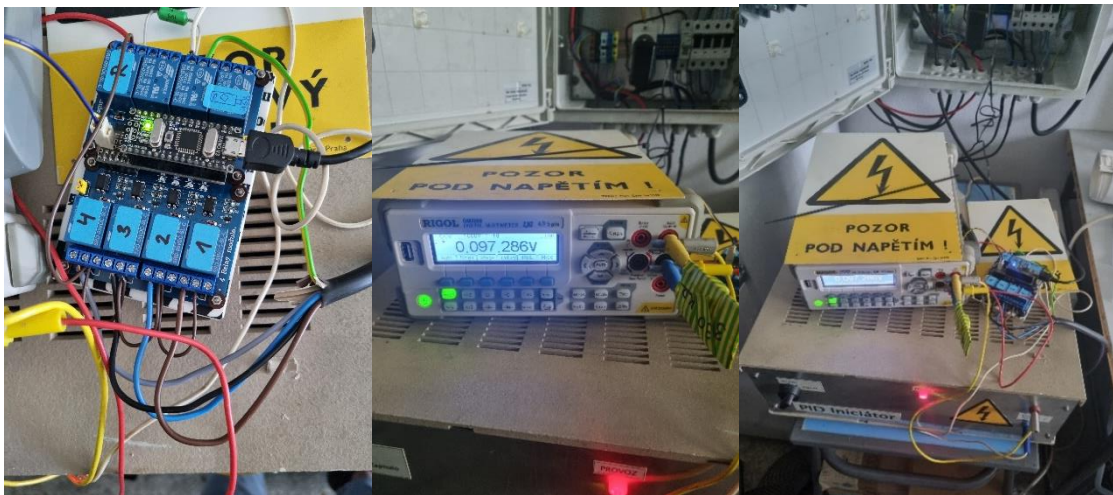
Přepínání měření jednotlivých modulů nebo referenčního odporu (R_{test}) $1,5\text{ M}\Omega$ bylo realizováno pomocí řídicí desky osazené 5 relé. Měření celého zapojení probíhalo cyklicky po 15 minutách. Tímto periodickým měřením jsme dosáhli poměrně kontinuálního sledování izolačního odporu a mohli jsme dále vyhodnocovat vliv okolního prostředí, jako je vlhkost a venkovní teplota na izolační odpor jednotlivých modulů a případný vliv provedené opravy nástřikem izolačního gelu. Měření probíhalo na střeše halových laboratoří ČVUT FEL, veškeré napojení modulů bylo svedeno pomocí kabelu CYKY 5x1,5 do laboratoře, kde bylo možné provozovat zdroj stejnosměrného napětí i přepínací jednotku.



Obrázek 26: Zapojené moduly na střeše



Obrázek 27: Zapojení modulů do svorkovnice (vlevo), rozvodná skříň (vpravo)



Obrázek 28: Přepínací jednotka se stejnosměrným zdrojem napětí



Obrázek 29: Neopravený modul (vlevo), opravený pomocí gelu (uprostřed štítek modulu (vpravo)

6.1 Protokol měření VA charakteristik

Pro ukázkou byl vybrán protokol modulu číslo 1. Všechny čtyři moduly vykazují přibližně stejné parametry.



Performance measurement
PASAN Tester

Operator Tereza Kalousová Measurement 2023/05/17 12:14:55
PASAN Tester version R2.4.5 / 2018/03/21 17:32:34 2.4.5 (20882)



CS5A-185M			
Manufacturer	CanadianSolar	Type	cSi
Serial number	0610190450330	Configuration DUT	Module
Single cell area	155.44 cm ²	DUT area	12775.95 cm ²
Cells in series	72	Cells in parallel	1

Monitor cell		Irradiance Channel 1	
Serial number	497		
Sensitivity	134.667 mV/(kW/m ²)	Temperature coefficient	0.00 %/°C

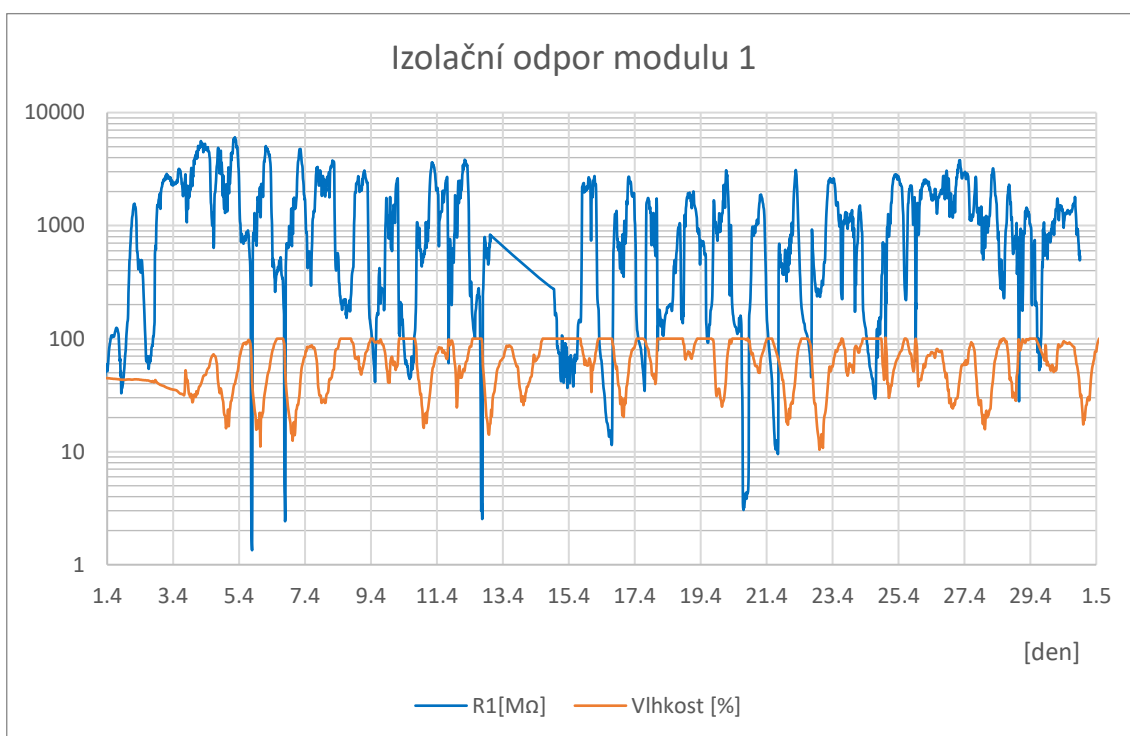
Direct		Irradiance Channel 1	
Monitor cell temperature	24.72 °C	Fill factor	74.41 %
DUT temperature	22.56 °C	Cell efficiency	15.63 %
Compensated	25.00 °C	DUT efficiency	13.69 %
Gavg	997.04 W/m ²		
GstdDev	0.26 W/m ²		
Compensated Irradiance	1000.00 W/m ²		
Voc (linear regr.)	43.925 V		
Isc (linear regr.)	5.353 A		
Regression linear for	0.897 Ω		
Rsh (linear regr.)	274.206 Ω		
Maximum power	174.948 W		
Voltage at Maximum	35.224 V		
Current at Maximum	4.967 A		

Reverse		Irradiance Channel 1	
Monitor cell temperature	24.72 °C	Fill factor	74.59%
DUT temperature	22.72 °C	Cell efficiency	15.70%
Compensated	25.00 °C	DUT efficiency	13.75%
Gavg	997.62 W/m ²		
GstdDev	0.37 W/m ²		
Compensated Irradiance	1000.00 W/m ²		
Voc (linear regr.)	43.936 V		
Isc (linear regr.)	5.360 A		
Regression linear for	0.889 Ω		
Rsh (linear regr.)	463.130 Ω		
Maximum power	175.660 W		
Voltage at Maximum	35.333 V		
Current at Maximum	4.972 A		

6.2 Naměřená data

Sériové číslo	Označení modulu	Označení ve schéma	Izolační odpor	Stav opravy
610190450330	1	FV1	R1	neopravený
610190451868	2	FV2	R2	po spárách
610190450398	3	FV3	R3	po celé ploše
610190451860	4	FV4	R4	po spárách

6.2.1 Duben

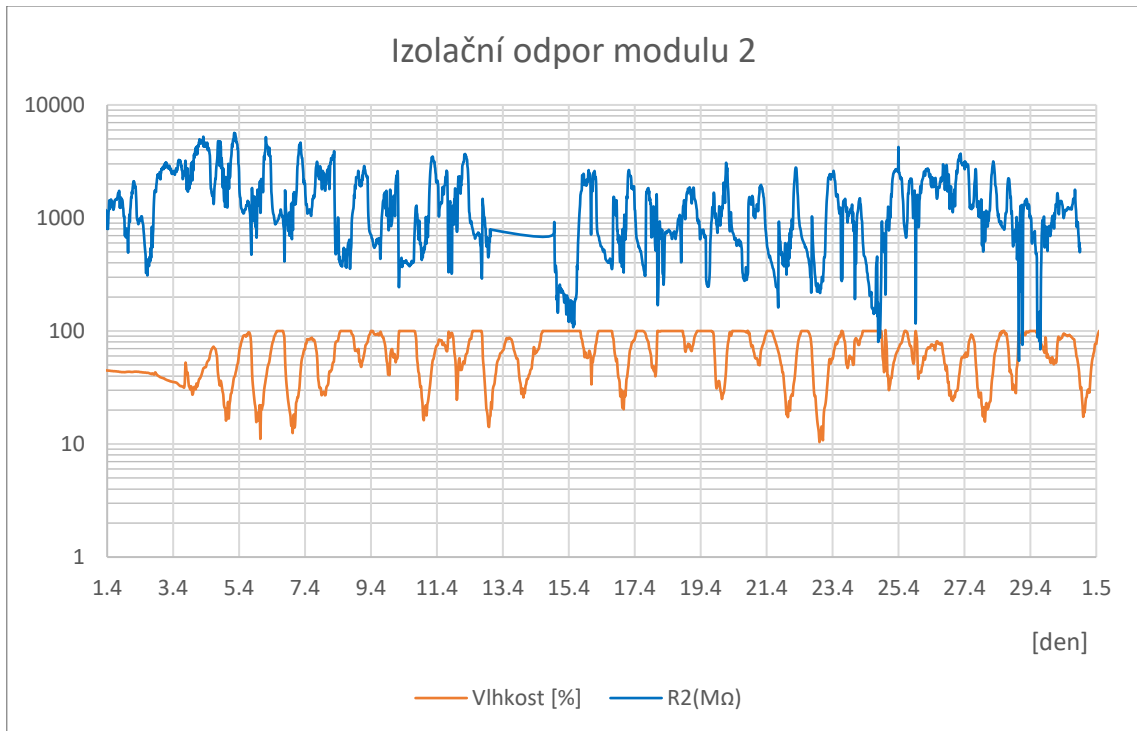


Graf 1: Průběh izolačního odporu v modulu 1 za měsíc duben

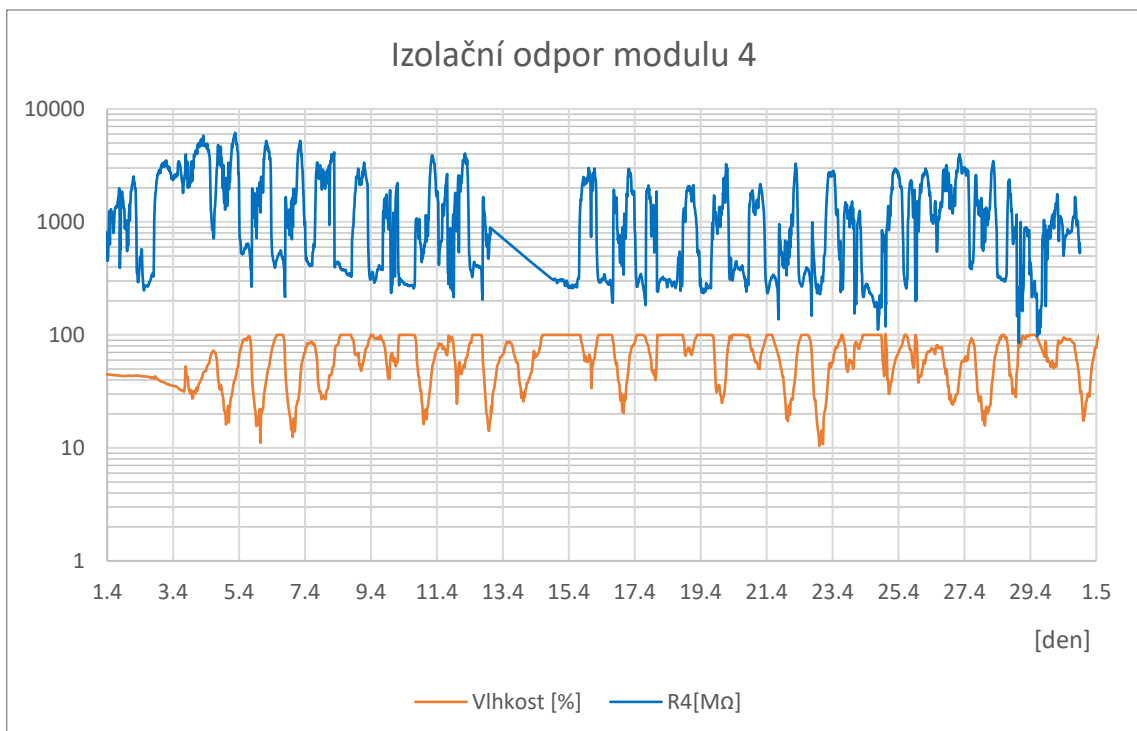
V grafu je znázorněn průběh izolačního odporu v $M\Omega$ neopraveného modulu a průběh vlhkosti venkovního prostředí v procentech za celý měsíc duben. Ve dnech 13. a 14. je chyba měření z důvodu výpadku elektrické energie. Z grafu vidíme kolísání izolačního odporu v závislosti narůstající vlhkosti. Při standardní vlhkosti (40–60 %) se izolační odpor pohybuje v řádu jednotek tisíc $M\Omega$. Při 100 % vlhkosti začne izolační odpor klesat ke stovkám až jednotkám $M\Omega$, což znamená, že se modul orosil nebo se do něho dostala voda v důsledku deště.

K poklesu izolačního odporu dochází zejména kvůli nasákavosti ethylvinylacetátu (EVA). Obvykle používaný pouzdrící materiál EVA má dostatečné mechanické, optické i chemické vlastnosti, aby byl vhodným pro použití při výrobě PV modulů, ale je hydrofilní. Ochranu pouzdrícího materiálu EVA, a i celého PV modulu před pronikáním

vlhkosti zajišťuje zadní krycí deska obvykle tvořená tedlarem. Degradace této krycí vrstvy a její následné praskání způsobí odkrytí nasákové EVA folie a může pak docházet k vytvoření vodivé cesty mezi fotovoltaickými články a rámem a unikajícím proudem.

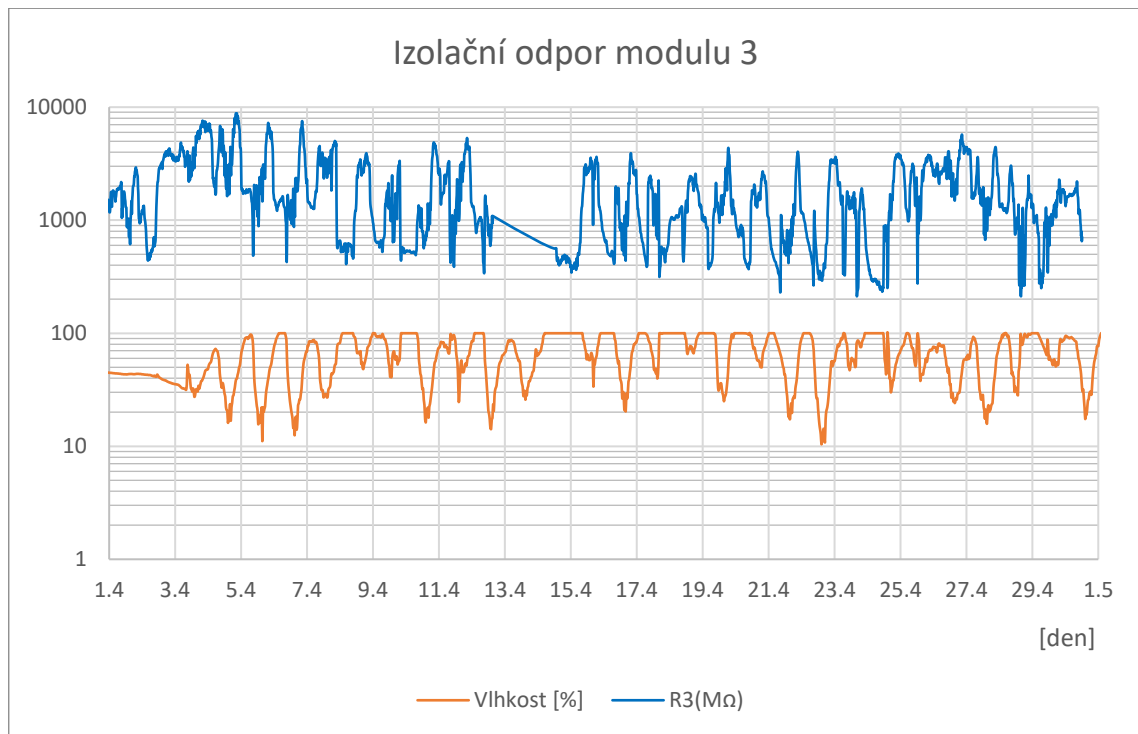


Graf 2: Průběh izolačního odporu v modulu 2 za měsíc duben



Graf 3: Průběh izolačního odporu v modulu 4 za měsíc duben

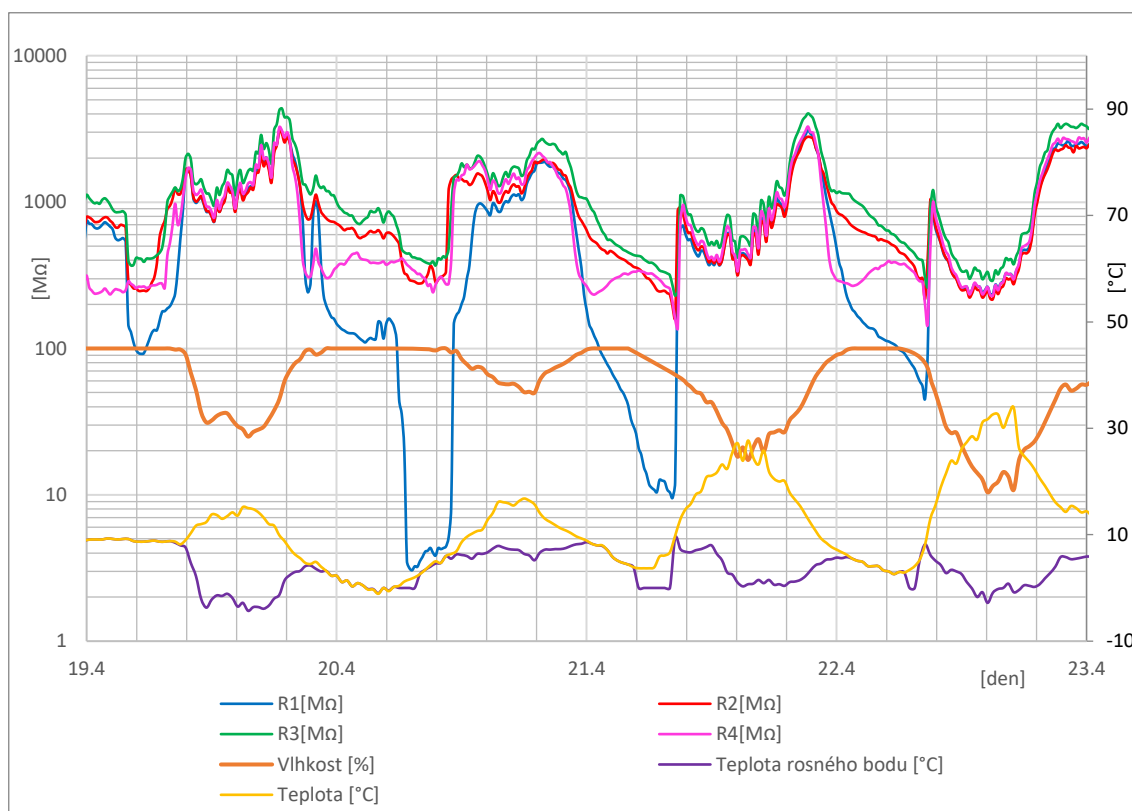
Modul 2 a 4 byl zalit v prasklých spárách izolačním gelem. V suchých dnech mají moduly hodnotu izolačního odporu velmi podobnou neopravenému modulu. V 100 % vlhku zafungoval izolační gel a hodnoty odporu neklesly pod 100 M Ω . Pouze ve dnech 24. a 28.4. byla hodnota pod 100 M Ω .



Graf 4: Průběh izolačního odporu v modulu 3 za měsíc duben

Modul 3 opravený po celé své ploše, vykazuje o něco lepší hodnoty izolačního odporu. Způsobuje to zalití mikrotrhlin, které v modulech 2 a 4 nejsou opraveny.

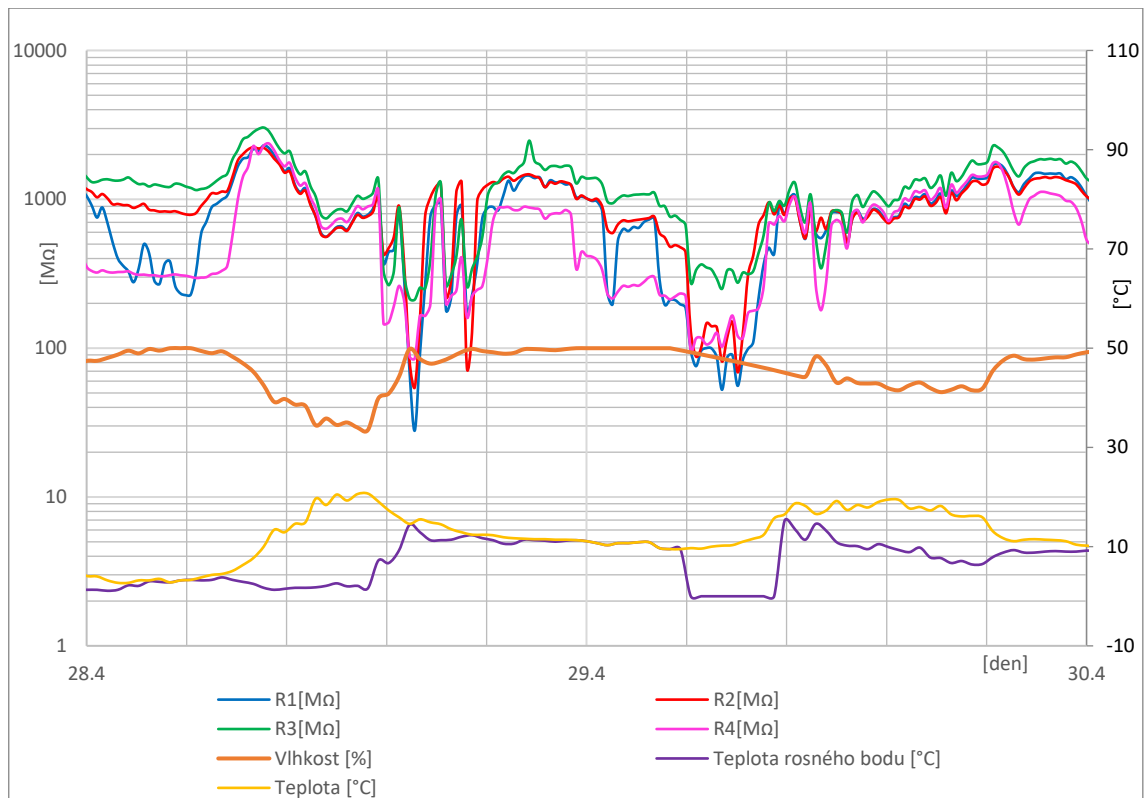
6.2.1.1 Výřez několika dnů s extrémny izolačních odporů



Graf 5: Porovnání izolačních odporů ze čtyř modulů v závislosti na venkovních podmínkách v daných dnech

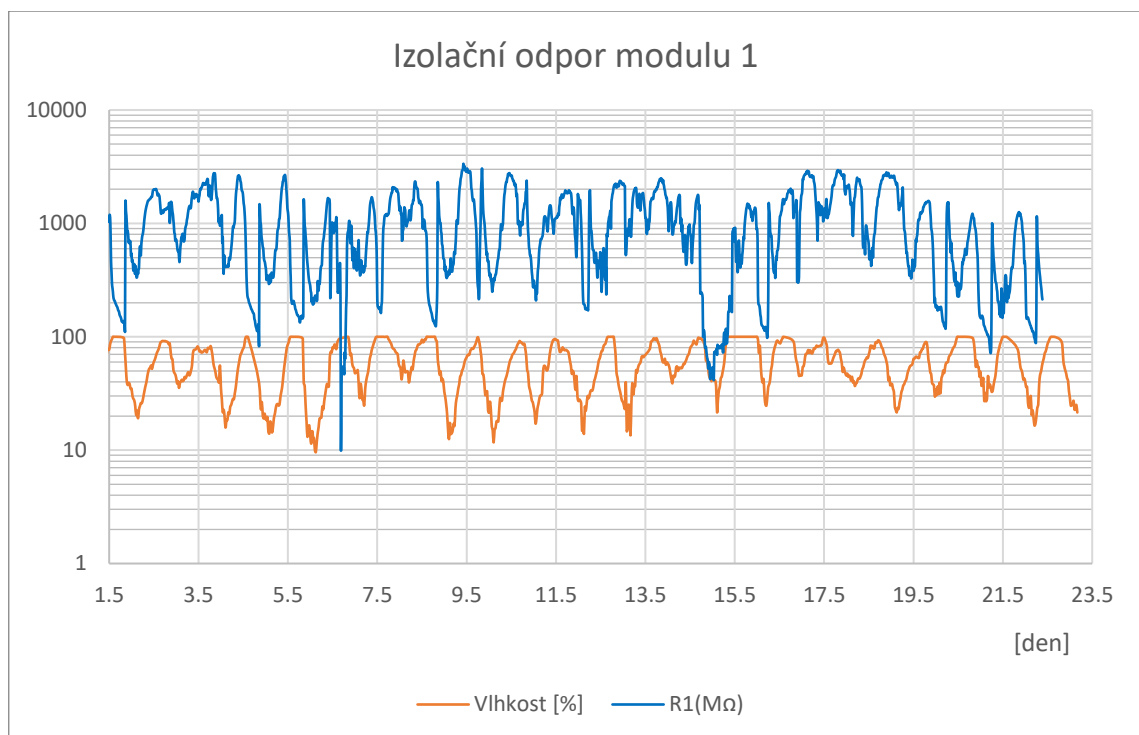
Na hlavní ose grafu jsou vyneseny všechny průběhy izolačních odporů modulů a průběhu vlhkosti. Na vedlejší ose je průběh teploty prostředí a teploty rosného bodu ve stupních Celsia.

V grafu vidíme čtyři větší poklesy odporů. Při protnutí křivky teploty a teploty rosného bodu dojde k orosení modulu a následnému snížení izolačního odporu. Je vidět i následné vysychání, kdy vlhkost klesá, teplota roste a s ní roste i izolační odpor. Při druhém a třetím větším poklesu odporu R1 (neopravený modul) dosahují hodnoty desítek až jednotek MΩ. K extrémnímu poklesu došlo z důvodu dešťových srážek a orosení modulu, kdy se dostala voda do modulu a mohlo dojít i k nasáknutí zapouzdřící vrstvy EVA. To stejné vidíme i v Graf 6, kdy hodnoty odporu nejsou tak razantní.

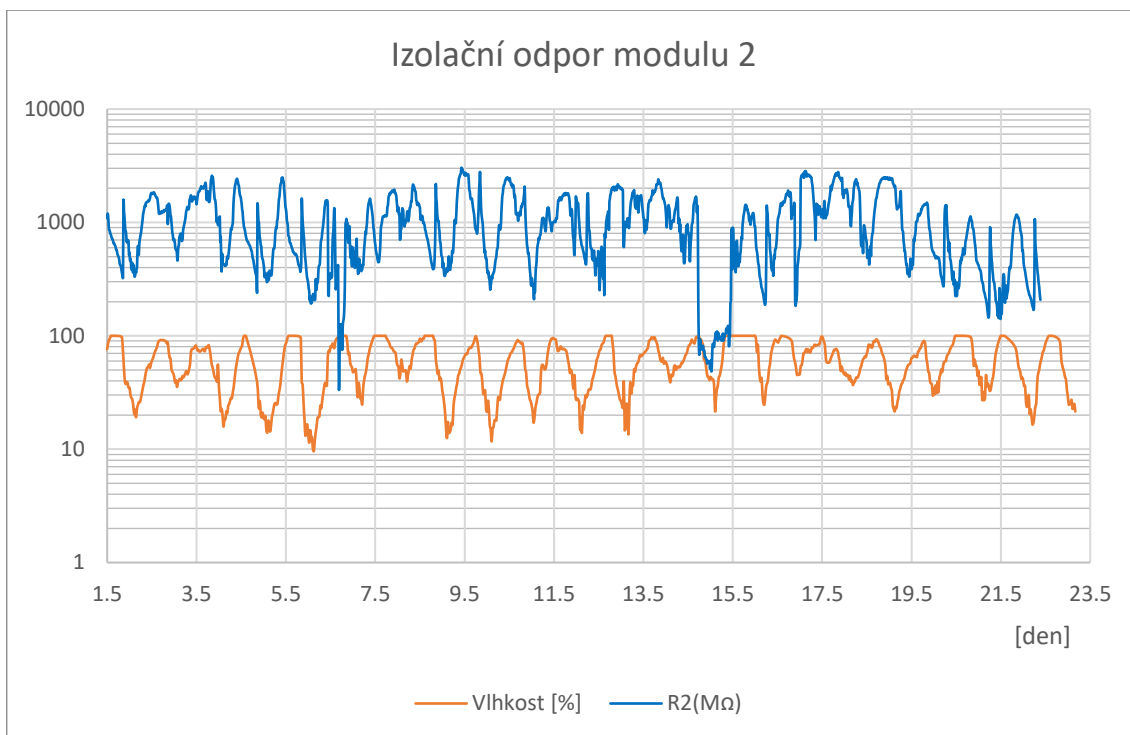


Graf 6: Porovnání izolačních odporů ze čtyř modulů v závislosti na venkovních podmínkách v daných dnech

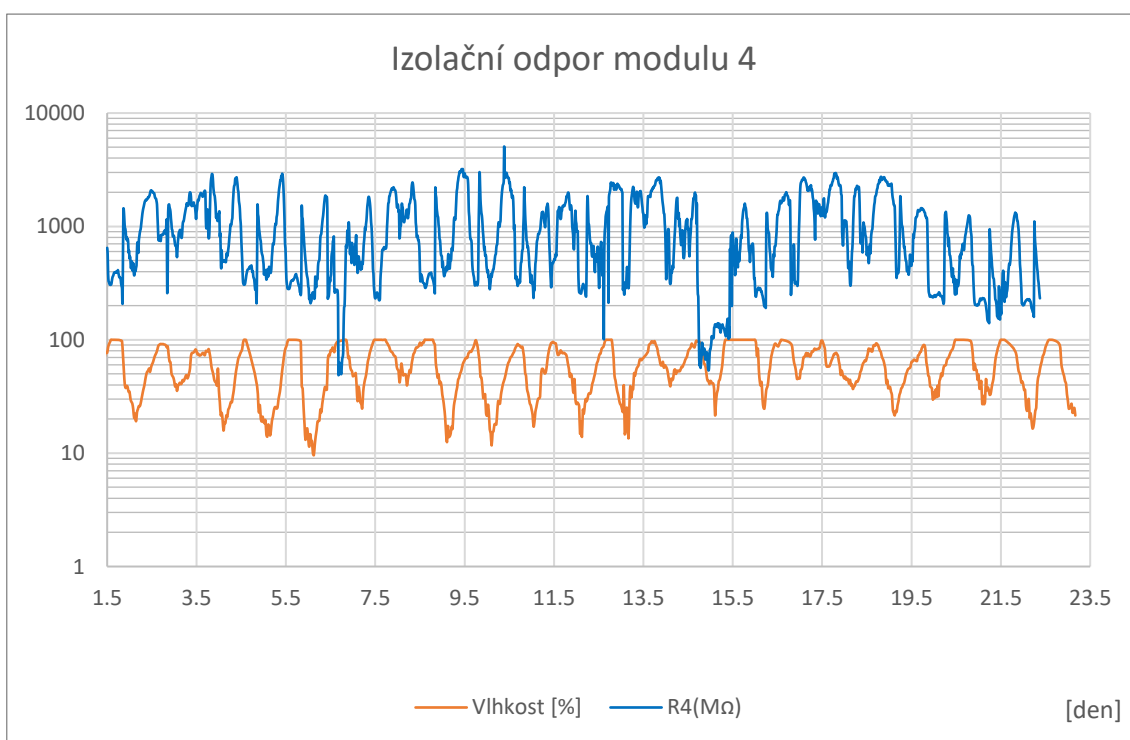
6.2.2 Květen



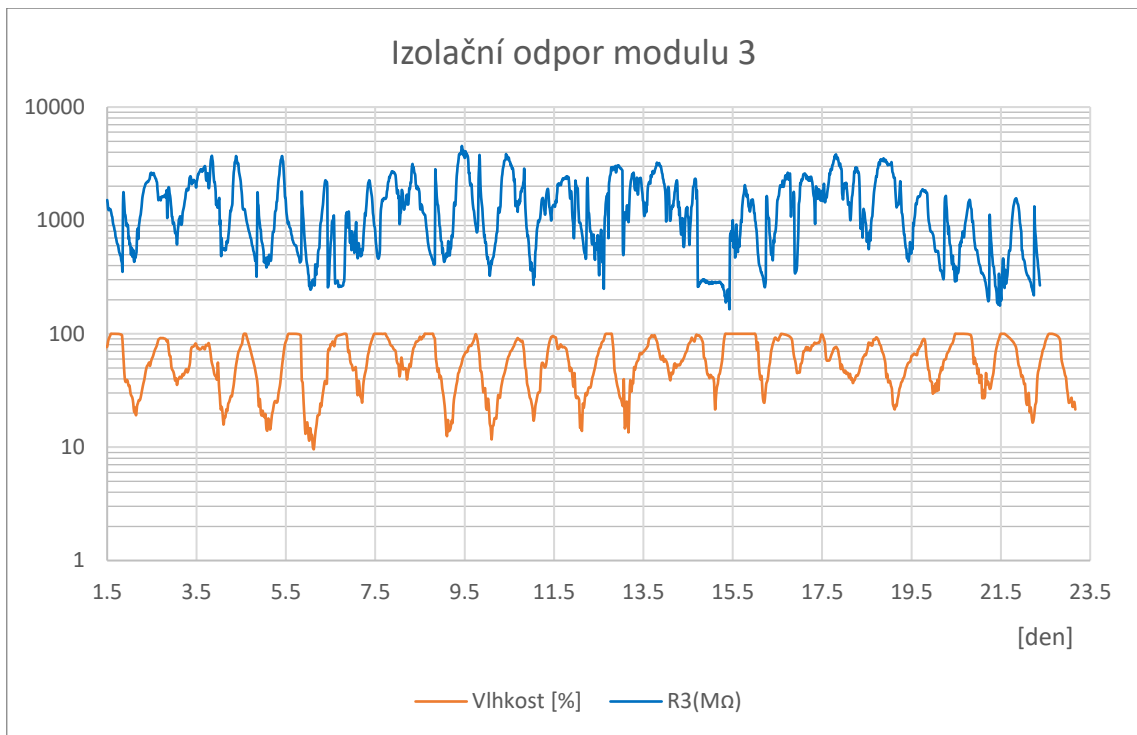
Graf 7: Průběh izolačního odporu v modulu 1 za měsíc květen



Graf 8: Průběh izolačního odporu v modulu 2 za měsíc květen



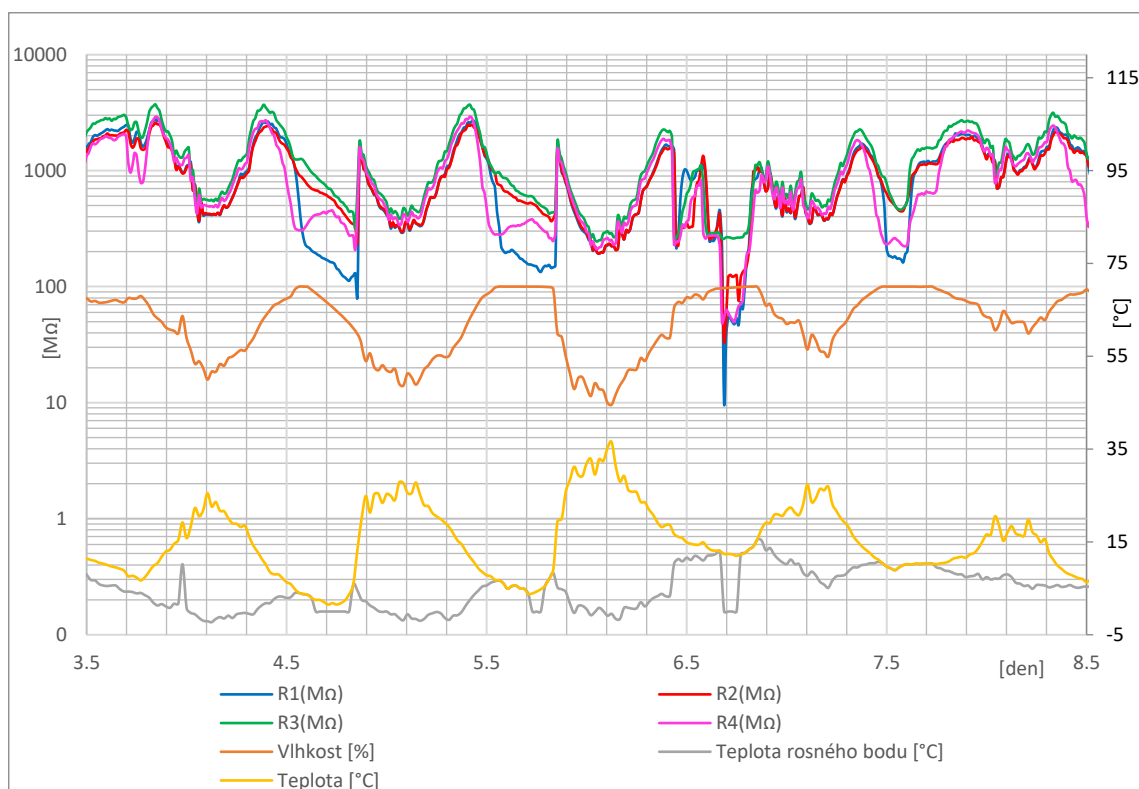
Graf 9: Průběh izolačního odporu v modulu 4 za měsíc květen



Graf 10: Průběh izolačního odporu v modulu 3 za měsíc květen

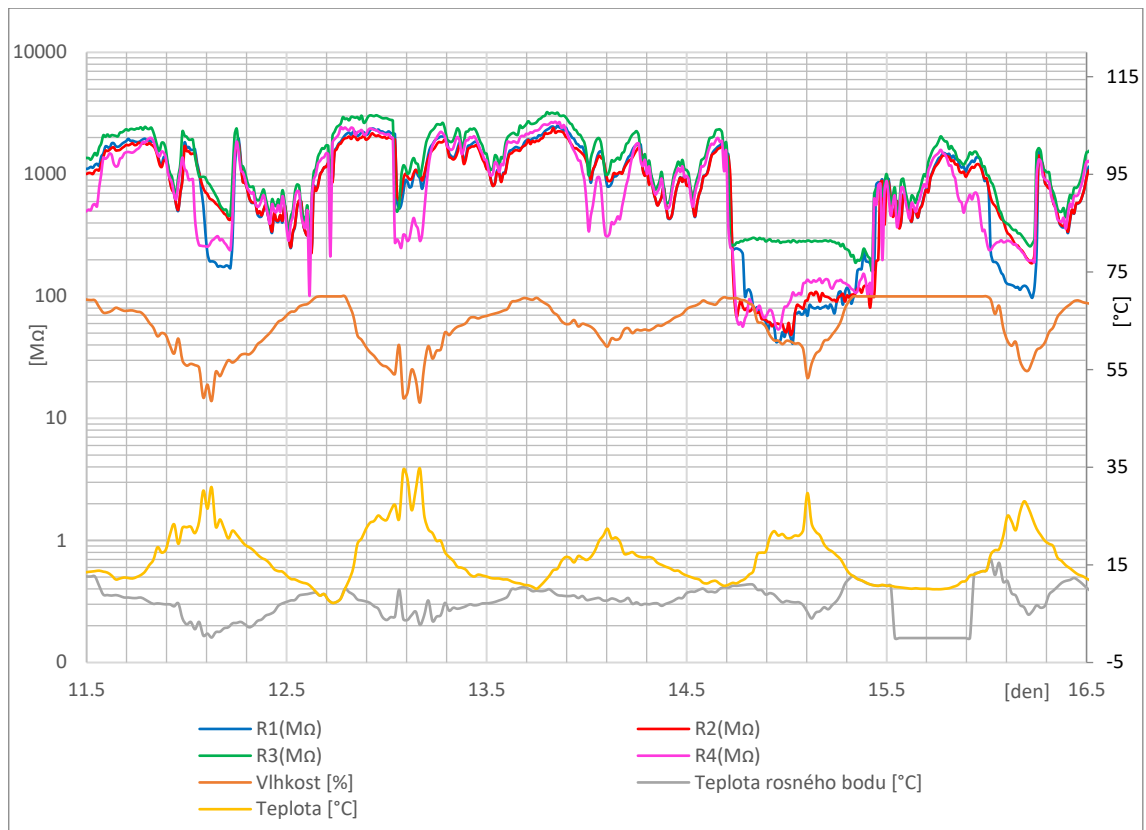
Průběhy izolačního odporu všech čtyř modulů za měsíc květen vykazují předpokládaný průběh a jsou podobné průběhům za měsíc duben. V květnu bylo teplejší a méně deštivé počasí než v dubnu, to může mít za následek menší výkyvy izolačního odporu v modulu 1 oproti v měsíci duben. U opravených modulů nejsou výkyvy tak odlišné v porovnání s předchozím měsícem.

6.2.2.1 Výřez několika dnů s extrémní izolací odporů



Graf 11: Porovnání izolací odporů ze čtyř modulů v závislosti na venkovních podmínkách v daných dnech

Opět v porovnání všech čtyř vzorků vidíme růst izolačního odporu modulů, tedy to znamená vysychání modulů v závislosti na poklesu vlhkosti a růstu teploty. A opačný stav, pokles izolačního odporu v návaznosti při protnutí teploty rosného bodu a venkovní teploty. Ve 4. a 5. dnu je vidět, že odpor R4 má specifický průběh při 100 % vlhkosti, kdy nejprve prudce klesá poté trochu vzroste a následně opět klesá, oproti ostatním odporům, které pouze klesají. Může to být způsobeno orosením modulu, následným oschnutím a opětovným orosením za krátkou dobu, kdy modul je částečně zagelován a obsahuje větší množství mikrotrhlin.



Graf 12: Porovnání izolačních odporů ze čtyř modulů v závislosti na venkovních podmínkách v daných dnech

Ve 14. dnu došlo k delšímu poklesu izolačního odporu všech modulů. V ranních hodnotách došlo k orosení modulů, poté docházelo k postupnému oteplování venkovního prostředí a k poklesu vlhkosti, víme také, že tento den bylo polojasno. Z těchto faktů není zřejmé, proč došlo k celodennímu poklesu odporu, jelikož by měl na základě počasí vykazovat vyšší hodnoty, než jsou naměřené. V místech, kde došlo k orosení dle křivek teploty a teploty rosného bodu a neklesl izolační odpor je pravděpodobné, že k orosení modulu bylo tak slabé, že to nemělo žádný vliv na jeho izolační odpor.

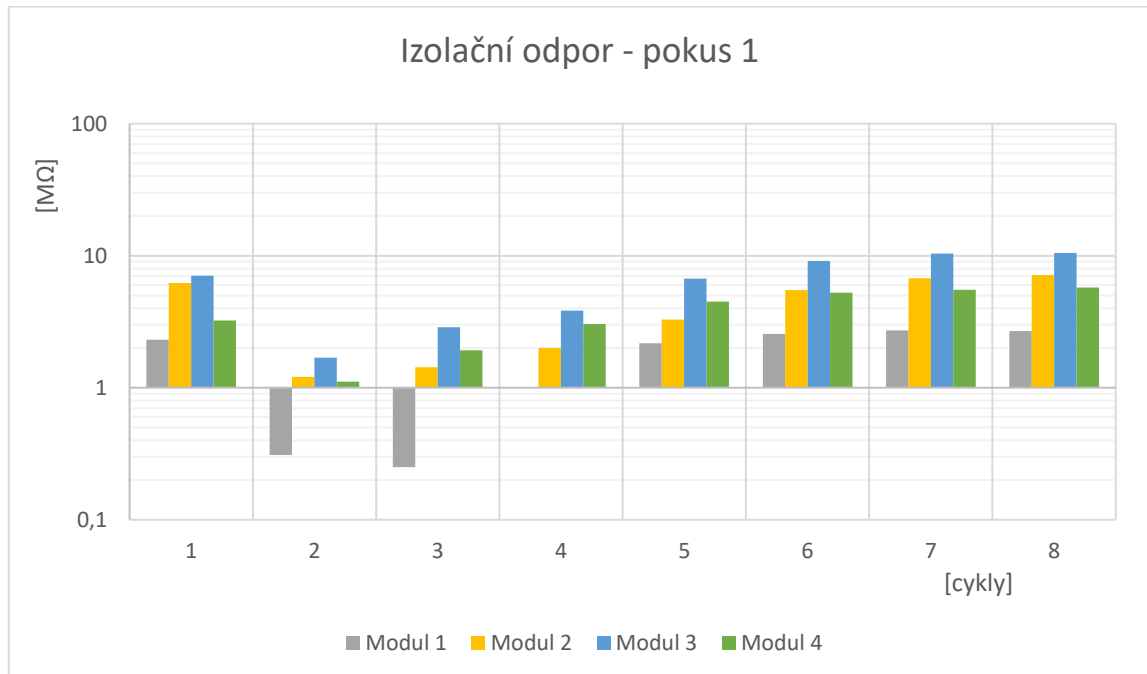
6.3 Měření v klimatické komoře

Stejné moduly, které prošly venkovním testováním, prošly také testem v klimatické komoře, kde jsme se poměrně rychlou změnou pokoušeli docílit orosení modulu uvnitř klimatické komory. K vysrážení vlhkosti docházelo prakticky při každém cyklu. U každého měření je vidět, že nezagelovaný modul, má horší parametry, jedná se o modul označený číslem 1. Problém je v tom, že při změně teploty od 3 °C do 45 °C bylo orosení menší a během měření docházelo k postupnému vysychání, takže v případě druhého měření, kdy se nejdříve měřilo u zagelovaných modulů a pak až u toho nezagelovaného

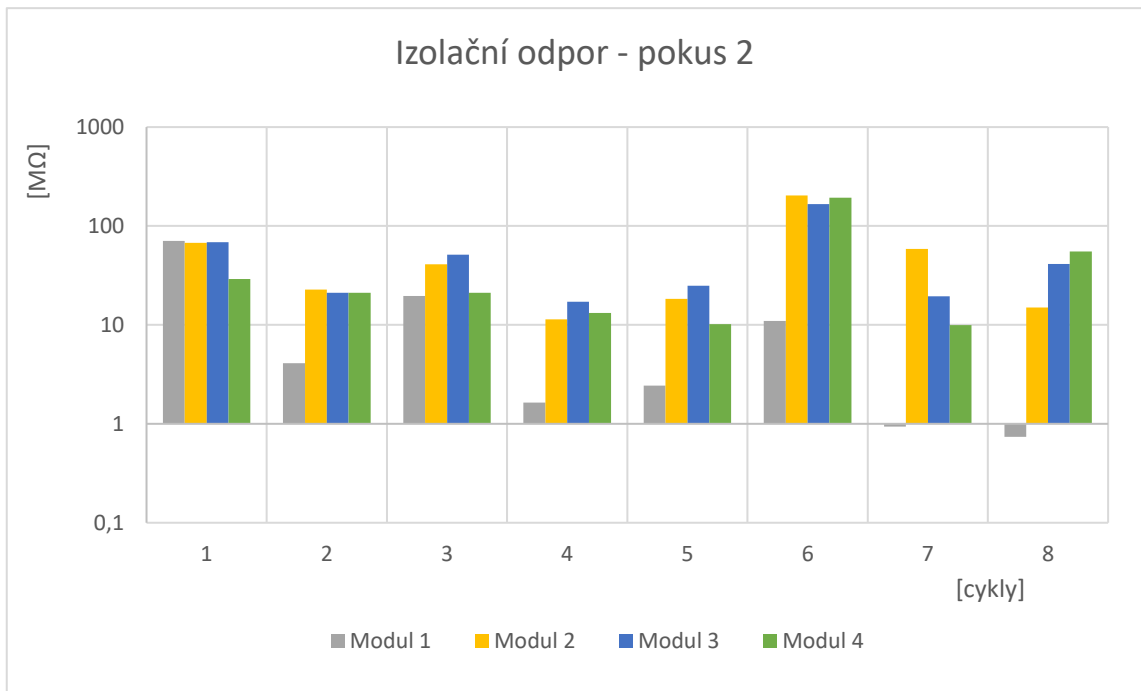
není rozdíl tak markantní. Stejně tak první měření, kdy naběhl cyklus a poslední modul (zagelovaný, označený číslem 4) byl více vlhký než ty předchozí.

Poslední 3 měření, jsme provedli po úpravě parametrů komory, kdy jsme je podchladili na $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ (takže moduly, mohli mít cca $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$) a pak zvedli teplotu na $45\text{ }^{\circ}\text{C}$. Došlo k masivnějšímu orosení, které i déle vydrželo. Rozdíl ve výsledcích je mnohem razantnější. Kdy při šestém měření se opět projevilo to, že orosení nebylo zcela naběhlé, tak v tomto případě byly zagelované moduly měřeny víc za sucha, zatímco nezagelované, byly ovlivněny ještě vlhkostí z předešlého cyklu.

Hodnoty a data z měření v klimatické komoře mi byly dány z jiného experimentálního měření. Izolační odpor je zhruba o dva řády menší než ve venkovním prostředí na střeše budovy, jelikož není tolik namáhán vlhkostí než v klimatické komoře.



Graf 13: Průběh odporů v klimatické komoře



Graf 14: Průběh odporů v klimatické komoře

7 Finanční zhodnocení opravy vs nový panel

Když dojde k destrukci PV modulu, postihne to několik aktérů v hodnotovém řetězci: nejprve provozovatele solárního parku, poté inženýrské, nákupní a stavební společnosti, která solární park původně postavila a čelí reklamacím záruky, a nakonec dodavatele fotovoltaických modulů, kteří musí přinést řešení. Výrobci modulů nabízejí obvykle výměnu vadných modulů, ale to často není nejlepší řešení jelikož:

- i) instalace nových modulů je nákladná (náklady na nové moduly plus související logistické náklady);
- ii) model modulu může být již nedostupný, což může způsobit problémy s přímou výměnou (různé rozměry, jiné jmenovité napětí a proud);
- iii) neexistuje žádná záruka, že moduly stejného typu, které ještě nejsou ovlivněny, se v budoucnu nezačnou také degradovat.

Je zřejmé, že existuje potřeba efektivního a snadno implementovatelného řešení, nejen pro vadné moduly, ale i pro ty moduly, u kterých je pravděpodobné, že budou mít stejné problémy. Kromě finančních nákladů má předčasné odstranění PV modulů významný dopad na životní prostředí dříve, než by se měly vyřadit, a proto by se mu mělo zabránit.

Alternativním způsobem se tu nabízejí různé způsoby opravy, zmíněno v kapitole 5, které zabrání předčasnému vyřazení modulů z provozu. Ačkoliv tyto metody znějí víc než přívětivě, jsou stále v procesu testování a doposud nevíme, jak efektivní budou. Některé firmy odhadují životnost opraveného modulu na 5-10 let, přesto průměrná záruka na produkt činí 2 roky. Pokud by testovací výsledky vyšly pozitivně, vyřešilo by to problém s více než 6 GWp (číslo je aktuální pro rok 2023, čísla poškozených zadních desek stále rostou) instalovaným výkonem poškozených zadních desek. [15][16]

7.1 Firma Solarmon

V české republice je firma, která opravuje zadní desky PV modulu. Jejich opravené PV moduly byly použity s experimentálním měřením. Jejich cena za opravu činí 600 Kč/ks. Garantují prodloužení životnosti modulu o 5–10 let, pomocí unikátního gelu za pomoci nanesení vrstvy tryskou bez nutné demontáže. [15]

8 Závěr

Cílem této bakalářské práce je seznámení se s vyskytujícími se vadami na zadní straně PV modulu a jejich následných oprav.

V první části bakalářské práce se zabývám stručnou strukturou křemíkového PV modulu a všeobecných vad, které se na modulech vyskytují. Poté blíže nahlédnu k hlavním vadám na zadní straně PV modulu, které jsou praskání zadních desek, delaminace a křídování. Těmto vadám na PV modulu dochází v důsledku klimatu, ve kterém jsou moduly vystaveny, dále mechanickému namáhání a špatně vybranému materiálu pro dané prostředí. Při výskytu prasklin do PV modulu proniká vlhkost a tím ztrácí svůj izolační odpor a může dojít ke zkratu elektrického proudu a následného odpojení PV modulu od elektrické sítě. Proto je nutné PV modul opravit nebo vyměnit. Nabízejí se dvě možnosti oprav, a to polysilaxanovým gelem nebo laminátovou folii z PVF materiálů. Jelikož problematika prasklých zadních desek je nová, nelze doposud vyhodnotit, jaká oprava je výhodnější. Každá možnost opravy má své plusy a mínusy. Oprava silikonovým gelem bude rychlejší a levnější, ale méně účinná. Naopak oprava pomocí folie bude o něco dražší, ale její životnost by mohla být delší.

V experimentálním měření byly vybrány čtyři vzorky poškozených PV modulů na zadních stranách, které prošly opravou za pomoci nastříkaného polysilaxanového gelu. U těchto modulů byl následně měřen izolační odpor ve venkovních podmínkách po dobu dvou měsíců. Z naměřených dat je zřejmé, že oprava silikonovým gelem zamezila prudkému snížení izolačního odporu při kontaktu s vodou. Prahová hodnota izolačního odporu činí $40 \text{ M}\Omega$ ku ploše modulu, cokoliv pod tuto hodnotu je selhání modulu. Moduly, které prošly našim měřením mají prahovou hodnotu $31,3 \text{ M}\Omega$. Této minimální hodnoty několikrát dosáhl neopravený modul viz. Graf 1, kdežto opravené moduly ani jednou nedosáhly hodnoty $31,3 \text{ M}\Omega$. Nejlepších hodnot izolačního odporu bylo naměřeno u modulu číslo 3, který měl opravu po celé své ploše. Moduly číslo 2 a 4, které měly opravu pouze v prasklých spárách, dosáhly o 35 % horších hodnot v porovnání s modulem číslo 3, přesto naměřené hodnoty nepřekročily požadovanou normu $31,3 \text{ M}\Omega$. Moduly byly instalovány na konstrukci východ – západ se sklonem 10° . V této poloze nedochází k přímému kontaktu s deštěm. Kdybychom moduly instalovaly na konstrukci Jih se sklonem v rozmezí $25\text{--}38^\circ$ bude kontakt s deštěm větší a pravděpodobně izolační odpor nižší. Toto je však otázkou dalšího zkoumání této problematiky.

Seznam zkratek

BaSo ₄	Síran barnatý
DF	Dvojitý fluoropolymer
EVA	Ethylen-vinyl-acetát
Fe	Železa
I	Elektrický proud
mm	Milimetr
MΩ	Mega ohm
nm	Manometr
PA	Polyamid
PE	Polyethylen
PET	Polyethylentereftalát
PF	Fluoropolymer
PID	Potenciálem indukovaná degradace
PO	Polyolefin
POE	Elastomer
ppm	Částic na jeden milion (parts per milion)
PV	Fotovoltaické
PVB	Polyvinylbutyral
PVDF	Polyvinylidenfluorid
PVF	Polyvinylfluoridu
R	Elektrický odpor
SF	Jednofluoropolymeru
TiO ₂	Oxid titaničitý
TPO	Termoplastické elastomery
U	Elektrické napětí
UV	Ultrafialové

Seznam použité literatury

- [1] M. Aghaei, A. Fairbrother, A. Gok, S. Ahmad, S. Kazim, K. Lobato, G. Oreski, A. Reinders, J. Schmitz, M. Theelen, P. Yilmaz, J. Kettle, Review of degradation and failure phenomena in photovoltaic modules, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 159, 2022, 112160, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112160>.
- [2] Gernot Oreski, Joshua Stein, Gabriele Eder, Karl Berger, Laura S. Bruckman, Jan Vedde, Karl-Anders Weiss, Tadanori Tanahashi, Roger H. Samuli Ranta, *Designing New Materials for Photovoltaics: Opportunities for Lowering Cost and Increasing Performance through Advanced Material Innovations*, 2021
- [3] Markus Fischer, Michael Woodhouse, Puzant Baliozian, Jutta Trube, *International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV)*, 2023
- [4] M. Waqar Akram, Guiqiang Li, Yi Jin, Xiao Chen, Failures of Photovoltaic modules and their Detection: A Review, *Applied Energy*, Volume 313, 2022, 118822, ISSN 0306-2619, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.118822>.
- [5] L. Koester, S. Lindig, A. Louwen, A. Astigarraga, G. Manzoloni, D. Moser, Review of photovoltaic module degradation, field inspection techniques and techno-economic assessment, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 165, 2022, 112616, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112616>.
- [6] Volker Naumann, Torsten Geppert, Stephan Großer, Daniel Wichmann, Hans-Joachim Krokoszinski, Martina Werner, Christian Hagendorf, Potential-induced Degradation at Interdigitated Back Contact Solar Cells, *Energy Procedia*, Volume 55, 2014, Pages 498-503, ISSN 1876-6102, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.08.015>.
- [7] A. Omazic, G. Oreski, M. Halwachs, G.C. Eder, C. Hirschl, L. Neumaier, G. Pinter, M. Erceg, Relation between degradation of polymeric components in crystalline silicon PV module and climatic conditions: A literature review, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Volume 192, 2019, Pages 123-133, ISSN 0927-0248, <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2018.12.027>.

- [8] Gabriele C. Eder, Yuliya Voronko, Gernot Oreski, Wolfgang Mühleisen, Marlene Knausz, Antonia Omazic, Alois Rainer, Christina Hirschl, Horst Sonnleitner, Error analysis of aged modules with cracked polyamide backsheets, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Volume 203, 2019, 110194, ISSN 0927-0248, <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2019.110194>.
- [9] Claudia Buerhop-Lutz, Oleksandr Stroyuk, Tobias Pickel, Thilo Winkler, Jens Hauch, Ian Marius Peters, PV modules and their backsheets - A case study of a Multi-MW PV power station, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Volume 231, 2021, 111295, ISSN 0927-0248, <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2021.111295>.
- [10] Y. Voronko et al., "Repair of cracked polyamide backsheets", 2021 IEEE 48th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), Fort Lauderdale, FL, USA, 2021, s. 0507-0509, doi: 10.1109/PVSC43889.2021.9518808.
- [11] Voronko, Y, Eder, GC, Breitwieser, C, et al. Repair options for PV modules with cracked backsheets. *Energy Sci Eng.* 2021; 9: 1583–1595. <https://doi.org/10.1002/ese3.936>
- [12] Beaucarne, G, Eder, G, Jadot, E, Voronko, Y, Mühleisen, W. Repair and preventive maintenance of photovoltaic modules with degrading backsheets using flowable silicone sealant. *Prog Photovolt Res Appl.* 2022; 30(8): 1045-1053. doi:10.1002/pip.3492
- [13] Michael Bloch, „Rescue Tape“ For Solar Panel Backsheets, 2021, <https://www.solarquotes.com.au/blog/solar-backsheet-tape-mb2028/>
- [14] SC-refit, video, „DuPont Tedlar PV Rescue Tape“, 2023, <https://www.sc-refit.com/>
- [15] SolarMonitoring, Renovace, oprava poškozených fotovoltaických panelů, 2023, <https://www.solarmon.eu/cz/produkty-a-sluzby/renovace-oprava-poskozenych-panelu/>
- [16] van der Heide, A, Tous, L, Wambach, K, Poortmans, J, Clyncke, J, Voroshazi, E. Towards a successful re-use of decommissioned photovoltaic modules. *Prog Photovolt Res Appl.* 2022; 30(8): 910-920. doi:10.1002/pip.3490

Seznam grafů

Graf 1: Průběh izolačního odporu v modulu 1 za měsíc duben	39
Graf 2: Průběh izolačního odporu v modulu 2 za měsíc duben	40
Graf 3: Průběh izolačního odporu v modulu 4 za měsíc duben	40
Graf 4: Průběh izolačního odporu v modulu 3 za měsíc duben	41
Graf 5: Porovnání izolačních odporů ze čtyř modulů v závislosti na venkovních podmínkách v daných dnech.....	42
Graf 6: Porovnání izolačních odporů ze čtyř modulů v závislosti na venkovních podmínkách v daných dnech.....	43
Graf 7: Průběh izolačního odporu v modulu 1 za měsíc květen	43
Graf 8: Průběh izolačního odporu v modulu 2 za měsíc květen	44
Graf 9: Průběh izolačního odporu v modulu 4 za měsíc květen	44
Graf 10: Průběh izolačního odporu v modulu 3 za měsíc květen	45
Graf 11: Porovnání izolačních odporů ze čtyř modulů v závislosti na venkovních podmínkách v daných dnech.....	46
Graf 12: Porovnání izolačních odporů ze čtyř modulů v závislosti na venkovních podmínkách v daných dnech.....	47
Graf 13: Průběh odporů v klimatické komoře.....	48
Graf 14: Průběh odporů v klimatické komoře.....	49

Seznam obrázků

Obrázek 1 : Struktura krystalického křemíkového modulu, [1]	12
Obrázek 2 : Chemické struktury pouzdrících vrstev, [2]	14
Obrázek 3 : Predikce využití pouzdrících vrstev, [3]	14
Obrázek 4 : Predikce využití zadních krycích desek, [3]	16
Obrázek 5 : Predikce tloušťky zadního skla u bifaciálních modulů, [3]	16
Obrázek 6: Zhnědnutí zapouzdrění EVA (vlevo), modul s delaminací (vpravo), [4]	18
Obrázek 7: Horká místa zobrazena na IR snímcích, [4]	19
Obrázek 8: Horká místa způsobena špatným pájecím spojem, zobrazena na IR snímcích, [4]	19
Obrázek 9: Elektroluminizační snímek trhlin v PV modulu, [5]	20
Obrázek 10: Šnečí stopa, [4]	20
Obrázek 11: Prasklý rám (vlevo), rozbité sklo (vpravo), [4]	21
Obrázek 12: Koroze kovového plíšku, [4]	22
Obrázek 13: Příklady degradace: změna barvy (vlevo), praskání (uprostřed) a delaminace (vpravo), [1]	22
Obrázek 14: Fotografie znázorňující křídování, [8]	24
Obrázek 15: Fotografie povrchu prasklé zadní desky (vlevo), snímek z mikroskopu (vpravo), [8][11]	25
Obrázek 16: Typy trhlin v zadní desce: čtvercové trhliny pod meziprostory článků (vlevo), podélné trhliny umístěné pod tyčemi sběrnic (vpravo), [8]	25
Obrázek 17: Prasklá zadní deska pod horkou komorou, lokální trhliny, [8]	26
Obrázek 18: Schématické znázornění možných kombinací vícevrstvé struktury zadní desky. nefluoropolymer (NF)(vlevo), jednofluoropolymer (SF)(uprostřed) a dvojité fluoropolymer (DF)(vpravo), [9]	28
Obrázek 19: Mechanické čištění suchou houbou, [14]	30
Obrázek 20: Nanesení siliconu pomocí štětce (vlevo) a špachtle (vpravo), [12] ..	31
Obrázek 21: Nanesení siliconu tryskou v dílně (vlevo) a v terénu (vpravo), [12][15]	32
Obrázek 22: Struktura folie Tedlar PV Rescue Tape, [14]	33
Obrázek 23: Speciální stůl s navíjecím bubem a opravnou folií, [14]	33
Obrázek 24: Utěsnění folie, [14]	33

Obrázek 25: Schéma zapojení	35
Obrázek 26: Zapojené moduly na střeše	35
Obrázek 27: Zapojení modulů do svorkovnice (vlevo), rozvodná skříň (vpravo)	36
Obrázek 28: Přepínací jednotka se stejnosměrným zdrojem napětí.....	36
Obrázek 29: Neopravený modul (vlevo), opravený pomocí gelu (uprostřed štítek modulu (vpravo)	36