

Fakulta elektrotechnická
Katedra materiálů a technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vliv simulovaného slunečního záření a změn teploty na elektrické
parametry flexibilních solárních článků

Autor práce: **Bc. Jakub Škarda**
Vedoucí práce: **Ing. Martin Hirman, Ph.D.**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2023/2024

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Jakub ŠKARDA**
Osobní číslo: **E21N0028P**
Studijní program: **N0713A060011 Materiály a technologie pro elektrotechniku**
Téma práce: **Vliv simulovaného slunečního záření a změn teploty na elektrické parametry flexibilních solárních článků**
Zadávající katedra: **Katedra materiálů a technologií**

Zásady pro vypracování

- Zpracujte rešerši komerčně dostupných flexibilních solárních článků vhodných pro integraci do textilií
- Popište vybrané metody testování elektrických parametrů flexibilních solárních článků.
- Navrhněte a sestavte vhodné zařízení pro laboratorní stárnutí vzorků simulovaným slunečním zářením.
- Navrhněte experiment, ve kterém ověříte vliv simulovaného slunečního záření a změn teploty na elektrické parametry vybraných komerčně dostupných flexibilních solárních článků.
- Proveďte a vyhodnoťte navržený experiment včetně doporučení vhodných článků pro využití v chytřích textiliích a navrhněte způsoby jejich integrace do textilií včetně kontaktování.

Rozsah diplomové práce: **40-60**
Rozsah grafických prací: **dle potřeby**
Forma zpracování diplomové práce: **elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. Vědecké publikace (z konferencí, impaktovaných časopisů, ...).
2. Technické normy (ČSN, ISO, IEC, ...).
3. Internetové zdroje.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Martin Hirman, Ph.D.**
Katedra materiálů a technologií

Datum zadání diplomové práce: **7. října 2022**
Termín odevzdání diplomové práce: **24. května 2024**


Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan



Prof. Ing. Aleš Hamáček, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 6. října 2023

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá vlivem simulovaného slunečního záření a změn teploty na elektrické parametry flexibilních solárních článků, respektive modulů, s potenciálním využitím v chytrých textiliích. Pro uvedení do problematiky jsou v úvodu práce představeny základní druhy flexibilních solárních článků. Dále byla provedena rešerše komerčně dostupných flexibilních solárních modulů, spolu s představením jejich hlavních předností. Byly vybrány nejvhodnější komerční flexibilní moduly pro využití v chytrých textiliích a navrženy metody jejich efektivní integrace a kontaktování. V další části práce jsou popsány základní metody pro testování elektrických parametrů solárních článků či modulů. Následně se práce zaměřuje na návrh a konstrukci laboratorního zařízení pro stárnutí vybraných vzorků, pomocí simulovaného slunečního záření – solárního simulátoru. Součástí této kapitoly je také rešerše vhodných světelných zdrojů a přehled technických norem zabývající se danou problematikou. V rámci návrhu byla nejdříve provedena optická simulace, dle které se následně koncipoval a sestavil výsledný solární simulátor. Nakonec byl navržen a proveden experiment za pomoci solárního simulátoru, za účelem otestování vlivu simulovaného slunečního záření a změn teploty na vybrané flexibilní solární moduly. Výsledky experimentu ukázaly, jak se teplotní fluktuace a intenzita záření promítají do elektrických parametrů a stability testovaných vzorků.

Klíčová slova

Solární energie, simulované sluneční záření, flexibilní solární články, flexibilní solární moduly, chytré textilie, solární simulátor, a-Si:H, CIGS, perovskit, CdTe, organické solární články, laboratorní stárnutí, integrace solárních modulů do textilií

Abstract

This thesis deals with the effect of simulated solar radiation and temperature changes on the electrical parameters of flexible solar cells, or modules, with potential applications in smart textiles. To introduce the topic, the basic types of flexible solar cells are introduced in the introduction of the thesis. Further, a research of commercially available flexible solar modules has been carried out along with an introduction of their main advantages. The most suitable commercial flexible modules for use in smart textiles have been selected and methods for their efficient integration and contacting have been proposed. In the next part of the paper, basic methods for testing the electrical parameters of solar cells or modules are described. Subsequently, the thesis focuses on the design and construction of a laboratory device for aging selected samples, using simulated solar radiation – the solar simulator. This chapter also includes a search for suitable light sources and a review of technical standards dealing with the subject. As part of the design, an optical simulation was first performed, according to which the resulting solar simulator was subsequently conceived and assembled. Finally, an experiment was designed and carried out using the solar simulator to test the effect of simulated solar radiation and temperature changes on the selected flexible solar modules. The results of the experiment showed how temperature fluctuations and radiation intensity affect the electrical parameters and stability of the tested samples.

Key Words

Solar energy, simulated solar radiation, flexible solar cells, flexible solar modules, smart textiles, solar simulator, a-Si:H, CIGS, perovskite, CdTe, organic solar cells, laboratory aging, integration of solar modules into textiles

Poděkování

Tato práce byla podpořena grantem Studentské grantové soutěže ZČU č. SGS-2024-008 „Materiály a technologie pro elektrotechniku“. Zároveň bych tímto rád poděkoval mému vedoucímu diplomové práce Ing. Martinu Hirmanovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, věcné připomínky, metodické vedení a čas strávený nad danou problematikou. Dále bych rád vyjádřil poděkování Ing. Jiřímu Čengerymu Ph.D. za návrh a zhotovení elektronické části solárního simulátoru a Ing. Tomáši Kučerovi za pomoc s realizací mechanické části solárního simulátoru.

Obsah

Úvod	- 1 -
1 Teoretický úvod.....	- 2 -
1.1 Princip solárního článku a jeho struktura	- 2 -
1.2 Konvenční solární články	- 3 -
2 Flexibilní solární články	- 4 -
2.1 Anorganické flexibilní solární články	- 5 -
2.2 Organické flexibilní solární články	- 7 -
2.3 Rešerše komerčně dostupných flexibilních solárních modulů	- 10 -
2.4 Integrace flexibilních solárních modulů do chytrých textilií.....	- 17 -
3 Metody testování elektrických parametrů flexibilních solárních článků.....	- 19 -
3.1 Základní elektrické vlastnosti solárních článků.....	- 19 -
3.2 Testovací podmínky	- 25 -
3.3 Měření voltampérových charakteristik.....	- 25 -
4 Návrh zařízení pro laboratorní stárnutí simulovaným slunečním zářením.....	- 29 -
4.1 Rešerše solárních simulátorů	- 29 -
4.2 Související technické normy.....	- 32 -
4.3 Požadované parametry navrhovaného solárního simulátoru	- 36 -
4.4 Návrh a simulace optické části solárního simulátoru	- 38 -
4.5 Konstrukce a elektrické schéma solárního simulátoru	- 44 -
5 Vliv simulovaného slunečního záření a ΔT na vybrané flexibilní solární moduly. -	46 -
5.1 Návrh experimentu	- 46 -
5.2 Vyhodnocení výsledků experimentu	- 49 -
Zhodnocení a závěr.....	- 55 -
Literatura	- 57 -
Seznam příloh.....	I
Přílohy	II

Seznam symbolů a zkratek

Obecné

AM1.5G	standardní globální spektrum pro testování
CAD	počítačem podporované projektování
CVD	chemická depozice z plynné fáze
FSC	flexibilní solární články
IR	infračervené záření
LED	elektroluminiscenční dioda
LID	světlem indukovaná degradace
MPP	bod maximálního výkonu
OFSC	organické flexibilní solární články
PVD	fyzikální depozice z plynné fáze
R2R	roll-to-roll (zpracování převíjením substrátu)
STC	standardní testovací podmínky
UV	ultrafialové záření
UVA	ultrafialové záření dlouhovlnné
UVB	ultrafialové záření středněvlnné
VA	voltampérová

Chemické látky

a-Si:H	hydrogenovaný amorfní křemík
c-Si	krystalický křemík
CIGS	selenid mědi, india a galia
CIS	selenid mědi a india
ETFE	ethylen-tetrafluorethylen
P3HT-PC ₆₁ BM	organický polovodičový materiál tvořený donorem z P3HT a akceptorem z PC ₆₁ BM
PBDB-T:ITIC	organický polovodičový materiál tvořený donorem z PBDB-T a akceptorem z ITIC
PEDOT:PSS	organický polovodičový materiál tvořený donorem z PEDOT a akceptorem z PSS
PEN	polyethylenafalát
PET	polyethylentereftalát
PI	polyimid
PVC	polyvinylchlorid

Elektrické pole

c_0	m^2/V	koeficient fotoelektrického proudu
I_0	A	saturační elektrický proud
I_D	A	elektrický diodový proud
I_P	A	elektrický proud paralelním odporem
I_{MPP}	A	jmenovitý elektrický proud
I_{Ph}	A	fotoelektrický proud
I_{SC}	A	elektrický proud nakrátko
m	–	diodový faktor
P_{MPP}	W_p	jmenovitý elektrický výkon
R_P	Ω	paralelní elektrický odpor
R_S	Ω	sériový elektrický odpor
U_D	V	elektrické napětí na diodě
U_{MPP}	V	jmenovité elektrické napětí
U_{OC}	V	elektrické napětí naprázdno
U_T	V	teplotní elektrické napětí na diodě

Jiné veličiny

A	m^2	obsah
c	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	měrná tepelná kapacita
E	W/m^2	Intenzita záření
FF	%	faktor plnění
T, ϑ	$^{\circ}\text{C}$	teplota
η	%	účinnost
Θ_c	K	teplota chromatičnosti
λ	m	vlnová délka
λ_T	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	součinitel tepelné vodivosti
ν_x	–	variační koeficient
σ	–	směrodatná odchylka
Φ	lm	světelný tok
Φ_e	W	zářivý tok

Úvod

Fotovoltaické technologie se v posledních desetiletích staly jedním z klíčových nástrojů pro dosažení udržitelného energetického rozvoje. Tradiční křemíkové solární články, které dominují trhu, jsou známé svou vysokou účinností a dlouhou životností [1], [2]. Nicméně s rostoucí poptávkou po flexibilních a lehkých energetických řešeních se stále více pozornosti věnuje vývoji flexibilních solárních článků (FSC). Ty představují novou generaci fotovoltaických zařízení, která nabízejí jedinečné vlastnosti, jako je nízká hmotnost, ohebnost a možnost integrace do různých typů povrchů a materiálů [3], [4], [5], [6]. Tyto vlastnosti otevírají dveře novým aplikacím, včetně integrace do textilií, staveb a přenosných elektronických zařízení [3], [7], [8]. Nicméně jedním z hlavních problémů je prozatím jejich dlouhodobá stabilita [4] a s tím související odolnost vůči vlivům prostředí, jako jsou změny teploty a dlouhodobé vystavení slunečnímu záření.

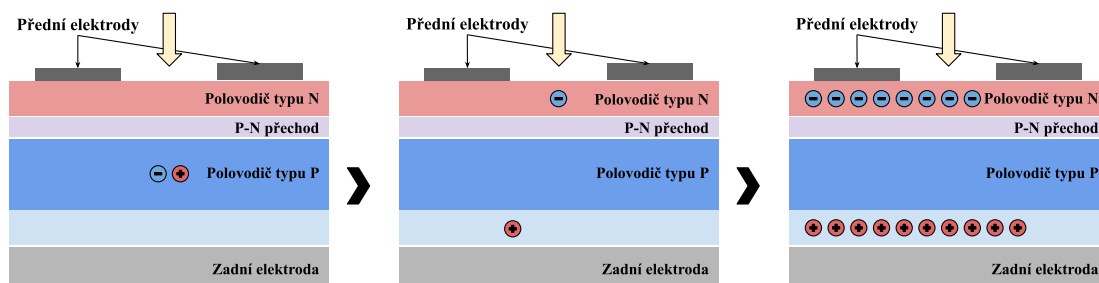
Hlavním cílem této diplomové práce je analyzovat vliv simulovaného slunečního záření a teplotních změn na elektrické parametry vybraných flexibilních solárních modulů. V první části práce jsou představeny různé technologie flexibilních solárních článků (FSC). Dále je poskytnut přehled komerčně dostupných flexibilních solárních modulů, včetně identifikace nejvhodnějších zařízení pro integraci do chytrých textilií. Součástí práce je i popis základních metodik pro měření elektrických parametrů FSC. Následně je uvedena rešerše světelných zdrojů pro simulaci slunečního záření a vhodných technických norem, která byla podkladem pro návrh a realizaci solárního simulátoru. Závěrečná část práce se věnuje návrhu, realizaci a vyhodnocení experimentu s využitím sestaveného solárního simulátoru, ve kterém byly exponovány vybrané vzorky flexibilních solárních modulů.

Výsledky této práce mohou přispět k lepšímu porozumění vlastností a chování vybraných flexibilních solárních modulů v reálných podmínkách, i v identifikaci optimálních podmínek pro jejich použití. Tímto způsobem může tato práce přispět k dalšímu rozvoji fotovoltaických technologií a jejich integraci do nových a inovativních aplikací.

1 Teoretický úvod

1.1 Princip solárního článku a jeho struktura

Princip solárního (fotovoltaického) článku je založen na fotovoltaickém jevu, což je proces, při kterém dochází k přeměně světelné energie na elektrickou energii. Tento jev byl poprvé demonstrován v roce 1839 Edmondem Becquerelem [9], [10], [11]. Dále až v roce 1954 byl představen Bellovými laboratořemi první křemíkový solární článek s převratnou účinností okolo 6 % [11], [12], který dal vzniknout fotovoltaickým modulům, tak jak je známe dnes. Fundamentálním prvkem fotovoltaického jevu jsou polovodičové materiály, které mají schopnost absorbovat fotonovou energii a uvolnit tak volné elektrony, čímž dochází ke generaci stejnosměrného elektrického proudu, respektive napětí. Základní typ křemíkového solárního článku sestává z jednoduchého P-N přechodu (viz Obr. 1), kde dochází nejdříve k absorpci fotonů s energií odpovídající šířce zakázaného pásu daného materiálu, čímž dojde ke generaci nosičů náboje (párů elektron-díra). Pokud je energie fotonu menší než šířka zakázaného pásu aktivního materiálu, nedochází k absorpci a foton projde krystalem. Je-li naopak energie fotonu větší než šířka zakázaného pásu, dochází také k jeho absorpci, ale přebytečné energie fotonu se přemění na teplo. Dále následuje selektivní transport nábojů za pomoci potenciálu P-N přechodu, v důsledku čehož se potlačí rekombinace a minimalizuje se ztráta energie. Nakonec jsou nosiče náboje zachytávány pomocí elektrod na zadní a přední straně článku. Některé elektrony ovšem nedoputují až k elektrodám, a tak vždy dochází k určité rekombinaci, respektive ztrátě energie. [9], [13], [14]



Obr. 1 Schématické znázornění fotovoltaického jevu, překresleno z [9]

Vzniklé napětí volnými nosiči nábojů zachycených na elektrodách (naprázdno) může u krystalických křemíkových (c-Si) článků dosahovat hodnot mezi cca 0,5 V a 0,7 V za standardních testovacích podmínek (STC, viz kapitola 3.2) [13], [15], [16]. Následným připojením zátěže k článku, dochází ke generaci stejnosměrného elektrického proudu.

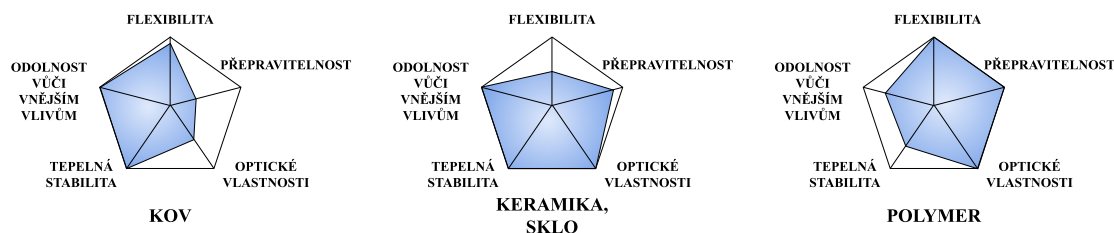
Obecná struktura křemíkového článku je zobrazena na Obr. 1. Již zmíněný P-N přechod, který je tvořen dvěma různě dotovanými křemíkovými vrstvami (např. fosforem a borem), bývá obvykle ze přední strany strukturovaný a opatřený antireflexní vrstvou (např. z nitridu křemičitého nebo oxidu titaničitého), za účelem snížení odrazivosti neboli zvýšení absorpce světla [14], [15]. Elektrické propojení článku je zepředu zajištěno zpravidla kontakty ve tvaru mřížky (pro zachování optimálního poměru propustnosti záření a sběru nosičů náboje) a zezadu pomocí celoplošného kontaktu [17]. Výsledný křemíkový fotovoltaický modul (určitý počet solárních článků v sério-paralelním zapojení) disponuje typicky navíc pouzdrící folií např. z ethylenvinylacetátu, krycím sklem, neprůhlednou zadní folií a hliníkovým rámem [18]. V praxi se ovšem struktura často liší dle výrobce a specifické technologie [14], [17].

1.2 Konvenční solární články

Jako konvenční solární články lze dnes kvůli svému rozšíření a dostupnosti považovat krystalické křemíkové články, respektive moduly. Ty zaujímaly v roce 2021 přibližně 95 % celkové výroby solárních článků a z toho 85 % činily konkrétně monokrystalické články (mono-Si) [9]. C-Si lze tak označit za nejvíce využívaný materiál pro výrobu solárních článků, a to především díky rozvinuté technologii zpracování a relativně vysoké účinnosti přesahující 20 % [1], [9], [19]. S čímž zároveň souvisí i dobrá ekonomičnost c-Si modulů oproti ostatním technologiím, které se docílilo zejména díky dlouhodobému výzkumu a hojnému využití c-Si v jiných odvětvích [9], [20]. Úspěch těchto produktů na trhu je dále podpořen jejich dlouhou životností, která často přesahuje 20 let, a to díky jejich relativně dobré odolnosti a stabilitě [2].

2 Flexibilní solární články

Flexibilní solární články (FSC) mají předpoklad pro to, abychom fotovoltaiického jevu, tedy přeměny světelné energie na elektrickou energii, využili novými způsoby, jež doposud nebyly možné pomocí krystalických křemíkových technologií. U FSC lze díky možnosti ohybu, krutu, nízké hmotnosti a někdy i průhlednosti [3], [4], [5], [6] předpokládat využití v architektuře, zemědělství, spotřební elektronice nebo textilním průmyslu. V oblasti architektury a stavebnictví by se FSC daly využít například k integraci přímo do budov jako skleněné prvky, součásti střešních krytin a fasád [7], [21], [22], s čímž souvisí i aplikace v zemědělství např. v rámci skleníků [6], [23]. V odvětví spotřební elektroniky a textilního průmyslu se nabízí využití zejména pro nositelnou elektroniku, anglicky „wearables“, což by mohlo pomoci s výdrží těchto zařízení [3], [6], [24]. V určitých řešeních, by se tak dalo přistoupit ke zmenšení kapacity baterie nebo jejímu nahrazení superkapacitoy [25], které by vedlo k redukci hmotnosti či rozměrů celého zařízení. Pro uplatnění FSC na trhu je ovšem nutné zajistit jejich dostatečnou účinnost, dlouhodobou stabilitu, značnou mechanickou odolnost (především flexibilitu) a dobré optické vlastnosti [4]. Zmíněná účinnost FSC je již v některých případech porovnatelná s účinností konvenčních solárních článků, jak dokládají odborné publikace [4], [26], [27]. Na druhou stranu ne vždy je účinnost hlavní prioritou, a tak jsou právě stabilita (odolnost vůči vlhkosti, UV záření, teplotním změnám, chemickým látkám) a mechanická odolnost, jedněmi z největších výzev pro FSC. Stabilita i výsledná účinnost je dána nejen samotným aktivním materiálem, ale také závisí na typu použitých elektrod a zapouzdření článku, respektive na typu substrátu, který v takových případech plní funkci pouzdra [28]. Kvalitativní shrnutí klíčových vlastností různých substrátů pro FSC je zobrazeno na Obr. 2. Nalezením optimální struktury FSC, by se zlepšila konkurenceschopnost vůči jiným současně využívaným technologiím a zároveň by došlo k podnícení rozvoje nově vznikajících oborů.



Obr. 2 Klíčové vlastnosti substrátů pro FSC a jejich kvalitativní srovnání, překresleno z [4]

2.1 Anorganické flexibilní solární články

V tomto případě je polovodičový materiál tvořen anorganickou látkou, tzn. materiálem, který není až na výjimky tvořen uhlíkovou vazbou. Řadíme sem FSC na bázi tenkých vrstev amorfního hydrogenovaného Si (a-Si:H), perovskitu, arsenidu gallia (GaAs), teluridu kadmia (CdTe) nebo složitějších sloučenin označovaných jako CIGS ($\text{Cu}(\text{In},\text{Ga})\text{Se}_2$) a CIS (CuInSe_2). Dále budou popsány některé z těchto technologií.

Solární články z a-Si:H

Flexibilní solární články tvořené amorfními tenkými vrstvami hydrogenovaného Si (a-Si:H) patří k jednomu z nejpoužívanějších typů flexibilních solárních článků [29]. V porovnání s konvenčními krystalickými Si články, potřebují amorfní články větší energii fotonu, aby došlo k excitaci, což souvisí také s jejich nižší účinností, která se pohybuje okolo 10 % [4], [14]. Jinak řečeno, světlo o větší vlnové délce není amorfními články zužitkováno [30]. Z tohoto důvodu se často amorfní články vrství a vznikají tzv. vícevrstvé články, kde každá vrstva pohlcuje jinou část spektra a výsledný článek má tak větší účinnost [31]. Tyto vícevrstvé články mohou být složeny např. z horní vrstvy amorfního Si a dvou vrstev amorfního SiGe (germanid křemíku) a mohou dosahovat přibližně 23% účinnosti [4].

Jako flexibilní substráty jsou pro tento typ článků používány různé druhy materiálů, od kovů (nerezová ocel, hliník), přes vysokoteplotní plasty (polyimid, případně Kapton), až po nízkoteplotní plasty (polykarbonát, polyethylnaftalát, polyethylentereftalát) a různé druhy papíru či flexibilního skla [28]. Výhodou této technologie, je v případě zvolení vhodného substrátu, možnost využití „roll-to-roll“ (R2R) výrobního procesu, který umožňuje výrazné zefektivnění a zrychlení výroby. Nanášení polovodičové tenké vrstvy může být realizováno pomocí vakuového napařování [31], chemické depozice z plynné fáze (CVD) nebo případně pomocí CVD podporované plazmatem [4], [28]. Mezi výhody flexibilních solárních článků založených na amorfním Si patří relativně nízká cena, poměrně velké výstupní napětí a

stabilní účinnost i při nízkém osvětlení, čehož lze využít např. u vnitřních aplikací [32]. Naopak mezi nevýhody patří především světlem indukovaná degradace (LID), ke které dochází po prvotním osvětlení článku. Při LID se v absorpční vrstvě přerušují slabě vázané atomy Si a H, čímž se zvyšuje hustota defektů vrstvy. Důsledkem je pak snížení účinnosti během prvních dnů či týdnů. [29]

CIGS solární články

Solární články založené na tenkých vrstvách polovodičového materiálu Cu(In,Ga)Se_2 , se dle anglického názvu zkráceně označují jako CIGS. Tento typ solárních článků disponuje obvykle šířkou zakázaného pásu 1–1,7 eV [31], [33]. Struktura CIGS sestává obecně ze substrátu, případně elektrody, polovodičové tenké vrstvy a vrchní elektrody, která je nejčastěji transparentní díky tenkovrstvému kovovému oxidu [31] (např. cínem dopovaný oxid inditý [4]). Stejně jako u křemíkových solárních článků, probíhá výroba CIGS při relativně vysoké teplotě, konkrétně v intervalu 450–550 °C, což zvyšuje nároky na použitý substrát, který je tak nejčastěji z nerezové oceli či polyimidové fólie [28]. Substrát nejenže dodává článku jeho flexibilní vlastnosti, ale je jím zároveň ovlivněna i výsledná účinnost. Ta při použití polyimidu přesahuje 20 %, kdežto u nerezové oceli se pohybuje okolo 19 % [28].

Perovskitové solární články

Označení perovskit se používá pro materiály s charakteristickou krystalovou strukturou přírodního stejnojmenného minerálu (CaTiO_3) [34]. Jako aktivní materiál, lze perovskit připravit pomocí nízkoteplotního procesu, čímž se vytvoří zmíněná krystalická struktura, která tomuto materiálu dodává výborné optoelektronické vlastnosti. Mezi výhody perovskitu patří poměrně velký interval zakázaného pásu (1,24–3,55 eV), díky čemuž jej lze použít ve vícevrstvých článcích. Další výhodou je také vyšší pohyblivost nosičů náboje, která je větší než u organických polovodičů a v porovnání s amorfním křemíkem je až desetkrát větší. [4] Teoretická účinnost tandemového (dvou přechodového) perovskitového článku může dle [35] dosáhnout 34,83 %. Dosavadní publikovaná účinnost v laboratorním prostředí aktuálně převyšuje 20 % a je tak srovnatelná s účinností krystalického křemíku či CIGS [4], [27], [34]. Zároveň, jako je tomu u většiny FSC, má perovskit dobrý potenciál být ekonomičtější než konvenční krystalické články, díky jednodušší a efektivnější výrobě [27]. Hlavními nevýhodami perovskitových článků jsou: nestálost při vystavení vnějším vlivům (především teplotě a vlhkosti) [26] a přítomnost toxického olova (Pb), která se v současnosti řeší odolným

pouzdrěním, tzn. zamezením vzniku degradačních produktů, anebo nahrazením Pb jinými prvky [34]. Co se týče substrátů, spolu s perovskitem se nejčastěji využívají polymerové či kovové folie [4], [33]. Polovodičový materiál lze na folie nanášet relativně levnými metodami (spin-coating, spray-coating, napařování), přičemž díky stabilitě při ohybu se dá využít i výrobního procesu R2R [26], [28], [33].

CdTe solární články

Dalším anorganickým materiálem ve formě tenkých vrstev, který se používá pro výrobu FSC je telurid kadmia (CdTe). Tento materiál se vyznačuje šířkou zakázaného pásu v rozmezí od 1,45–1,5 eV [27], [28], [31], což umožňuje aktuálně dosáhnout (v případě FSC) účinnosti až 16,4 % [36]. Typická struktura CdTe flexibilního článku zahrnuje zadní kontakt, polovodičové vrstvy CdTe a CdS, vodivý transparentní oxid a průhledný substrát, který může být vyroben z polymeru (nejčastěji polyimidu), kovu nebo skla. V případě, že je substrát kovový, je umístěn na straně zadního kontaktu. [28] Pro výrobu tenké polovodičové vrstvy se obvykle využívá fyzikální depozice z plynné fáze (PVD), kam patří např. napařování, naprašování [37] či blízká sublimace [28]. Mezi hlavní výhody CdTe článků řadíme lepší absorpci slabého a difuzního slunečního záření a menší negativní teplotní závislost (v porovnání s krystalickými křemíkovými články) [31]. Dalším kladným aspektem, s ohledem na původ aktivního materiálu, je fakt, že Cd a Te jsou vedlejšími produkty těžebních procesů (Cd je odpadem z tavení zinku a Te odpadem z rafinování mědi). Na druhou stranu jsou tyto materiály pro lidský organismus toxické, a tak je nutné předcházet možným rizikům kontaminace prostředí či ohrožení lidského zdraví. [27], [31] Za zmínku ovšem stojí, že aktivní materiál je obvykle u FSC kvůli stabilitě zapouzdrěn, čímž se zabrání absorpci vodních par a zároveň se zamezí i úniku toxických látek do vnějšího prostředí [36], [37].

2.2 Organické flexibilní solární články

Organické flexibilní solární články (OFSC) využívají k přeměně slunečního záření na elektřinu organickou aktivní vrstvu. Tyto polovodičové materiály mají nižší relativní permitivitu, a nosiče náboje (elektron, díra) jsou tak silněji vázané elektrostatickými silami, než je tomu u anorganických článků. Pro to, aby se páry elektron-děr oddělily, je nezbytné, aby se dostaly na rozhraní donor-akceptor, kde rozdíl energetických hladin usnadní jejich disociaci na volné nosiče náboje. Návrh a konstrukce organických článků tak oproti anorganickým článkům vyžaduje odlišný přístup. [31], [38]

Zjednodušený proces generace elektrického napětí a proudu probíhá v OFSC následovně:

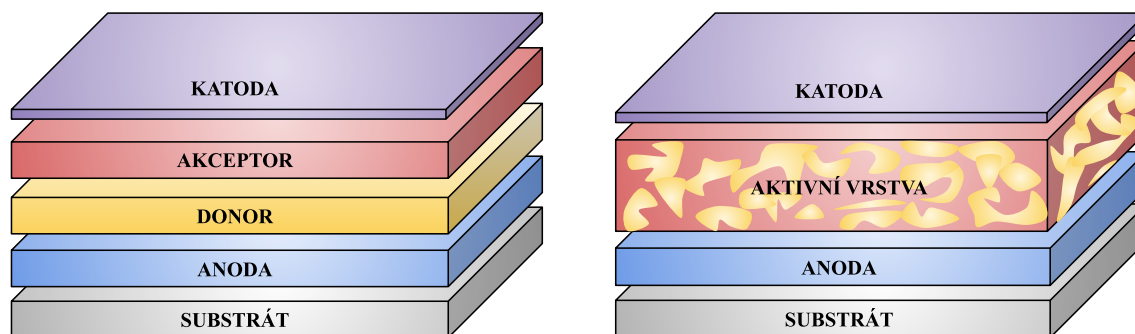
- Fotoaktivní vrstva absorbuje fotony a vytváří vázané páry elektron-díra označované jako excitony.
- Excitony difundují směrem k rozhraní donor-akceptor. Než dosáhnou rozhraní, část excitonů se ztratí, respektive rekombinuje.
- Excitony na rozhraní disociují na volné díry a elektrony v závislosti na energetickém rozdílu.
- Nakonec elektrody sbírají díry a elektrony. [39]

Struktura OFSC se typicky skládá ze substrátu, elektrodových a mezifázových vrstev, fotoaktivního organického materiálu a eventuelně pouzdřicí vrstvy [4] (viz Obr. 3). Jako substráty se opět používají polymerní (PET, PEN, PI) a kovové folie nebo např. ultratenké sklo [34]. Mezi elektrody, které lze zakomponovat do OFSC, spadají různé oxidy kovů, vodivé polymery (např. PEDOT:PSS¹), Ag mřížky či nanodrátky nebo elektrody na bázi uhlíku (grafen, uhlíkové nanotrubic) [40]. Protože jsou organické polovodiče obvykle amorfni [31], je součástí struktury také tzv. mezifázová vrstva, která pomáhá k lepšímu transportu nosičů náboje. Tyto vrstvy navíc také zlepšují stabilitu, mechanickou odolnost a adhezi mezi elektrodami a aktivní vrstvou [6]. Pro transport elektronů se používá např. oxid zinečnatý (ZnO) [41] nebo fullerénové deriváty [42], [43]. Pro transport děr např. PEDOT:PSS či oxidy niklu a wolframu [6], [44]. Hlavní částí OFSC je polovodičová vrstva, kterou tvoří polovodič typu P a polovodič typu N. Polovodičem typu N v tomto případě bývá konjugovaný polymer nebo malé molekuly [4]. Polovodičem typu P většinou bývají fullerénové deriváty nebo nefullerénové molekuly [45]. Pro zajištění větší přechodové plochy mívají OFSC tzv. objemový heteropřechod (viz Obr. 3), který ulehčuje disociaci excitonu [39]. Konkrétními příklady aktivních vrstev mohou být například materiály jako P3HT-PC₆₁BM² nebo PBDB-T:ITIC³ [6], [40].

¹ Polovodičový materiál poly(3,4-ethylenedioxythiofen) dopovaný ionty polystyren sulfonátu.

² P3HT:PC₆₁BM je polovodičový materiál tvořený donorem z poly(3-hexylthiofen-2,5-diylu) a akceptorem z methylesteru kyseliny [6,6]-fenyl-C₆₁-butanové.

³ PBDB-T:ITIC je polovodičový materiál tvořený donorem z poly[[4,8-bis[5-(2-ethylhexyl)-2-thienyl]benzo[1,2-b:4,5-b']dithiofen-2,6-diyl]-2,5-thiofenylen[5,7-bis(2-ethylhexyl)-4,8-dioxo-4H,8H-benzo[1,2-c:4,5-c']dithiofen-1,3-diylu]] a akceptorem z 3,9-bis(2-methylen-(3-(1,1-dicyanomethylen)-indanon))-5,5,11,11-tetrakis(4-hexylfenyl)-dithieno[2,3-d:2',3'-d']-s-indaceno[1,2-b:5,6-b']dithiofenu.



Obr. 3 Obecná struktura OFSC – planární heteropřechod (vlevo) a objemový heteropřechod (vpravo), překreslen z [4]

Výrobní techniky pro OFSC jsou rozmanité, tudíž závisí na rozsahu a účelu výroby. Obecně lze však konstatovat, že výroba OFSC není příliš náročná. Pro čistě laboratorní výrobu je zpravidla volen spin-coating [40]. Pro objemnější výroby pak např. sítotisk, spin-coating, brush-coating, spray-coating, inkjet printing nebo komplexní výroba pomocí R2R [6], [26], [31].

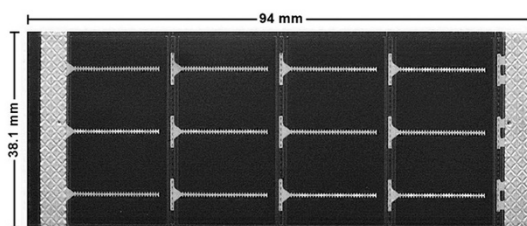
V rámci výzkumu OFSC bylo dosaženo účinnost přesahující 15 % [6], [40], [46], což lze považovat za význam pokrok, i když stále lehce zaostávají za jinými technologiemi. Na druhou stranu OFSC si lépe (v porovnání s Si články) udržují svoji účinnost při nízkých intenzitách záření, a navíc v některých případech mohou mít i kladnou teplotní závislost [14]. Jejich úskalím je ovšem stabilita. OFSC jsou totiž citlivé na kyslík a vlhkost, které způsobují významný pokles jejich životnosti, a ta je tak výrazně nižší v porovnání s předními organickými články. [2], [9] Pozitivem však je, že v poslední době je toto téma cílem řady výzkumů a stále se tak stabilita OFSC zlepšuje [40], [46]. Naopak mezi silné stránky OFSC lze řadit především jejich dobrou flexibilitu, nízkou hmotnost a zejména potenciálně nízkou cenu [38], [40].

2.3 Rešerše komerčně dostupných flexibilních solárních modulů

V této části jsou popsány aktuálně komerčně dostupné FSC, respektive moduly⁴ od různých výrobců, které se díky morfologii a vlastnostem jeví jako vhodné pro integraci do textilií. Ke konci podkapitoly se zároveň nachází Tabulka 1, ve které jsou uvedeny některé nalezené flexibilní solární moduly, včetně jejich nejdůležitějších parametrů a vlastností. Podrobnější parametry všech nalezených modulů jsou následně uvedeny v příloze (viz Příloha 1 až Příloha 3).

Solární moduly z a-Si:H

Společnost PowerFilm má v sortimentu několik typů solárních flexibilních modulů, které jsou kategorizovány dle specifického způsobu použití či konkrétních aplikací, přičemž všechny jsou založeny na amorfním Si. Řada určená pro napájení malých elektronických zařízení se dále dělí na: FSC určené pro použití pouze v interiérech (Indoor Light Series, viz Obr. 4), FSC vhodné pro občasné venkovní použití (Classic Application Series), FSC pro přerušované venkovní použití (WeatherLite Series) a FSC pro aplikace s trvalým venkovním vystavením (WeatherPro Series). Produkty WeatherLite Series disponují ochranou proti povětrnostním vlivům, kdežto produkty WeatherPro mají navíc také UV stabilizovaný povrch a stupeň krytí IP68 (úplná ochrana proti vniknutí prachu a trvalému ponoření ve vodě). [47], [48]



Obr. 4 FSC LL200-4.8-37 - Indoor Series od společnosti PowerFilm, převzato z [48]

⁴ Solární články jsou ve většině případů komerčně dostupné pouze v rámci modulů.

Dalším druhem produktu, který FilmSolar inzeruje, je řada Rollable Solar Panels neboli srolovatelné solární moduly nabízené ve verzích od 7 W_p až do 60 W_p . Tyto moduly jsou určeny do venkovního prostředí. Charakterizují se tak relativně dobrou robustností, voděodolností a teplotním provozním rozsahem od $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Poslední vhodnou řadou k integraci do textilií je PowerDrive Golf Car Solar Panels. Moduly této řady jsou sice primárně určeny k připevnění na střechu golfových vozíků, ale díky přítomnosti kovových druků by mohly najít využití i v kombinaci s textilem. Jednotlivé varianty se liší pouze tvarem, přičemž jejich plocha se pohybuje mezi cca $1,1\text{ m}^2$ až $1,3\text{ m}^2$. Hmotností lehce překračují hranici 4 kg a jejich nominální výkon činí 165 W_p . Životnost a provozní teplotní rozsah u těchto výrobků bohužel uveden není, ale SolarFilm je klasifikuje jako moduly původně určené pro vojenské účely, takže by měly být relativně robustní a odolné vůči povětrnostním vlivům. [47]

Japonská společnost TDK Corporation je výrobcem různých variant flexibilních solárních modulů z amorfního Si na nspecifikovaném foliovém substrátu. Řada těchto produktů nese označení BSC a je vhodná především pro malá elektronická zařízení. Většina dostupných variant je spíše menších rozměrů (viz Příloha 2) s tloušťkou 0,18 mm (včetně elektrod) a mezi sebou se liší zejména tvarem, způsobem vyvedení elektrod a počtem článků v sérii. Malé moduly dosahují desítek, maximálně stovek μW_p (při intenzitě osvětlení 200 lx), váhově nepřekračují 0,35 g a jejich provozní teplotní rozsah je od $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Výrobce neuvádí jejich životnost, ale specifikuje, že se spíše hodí do vnitřních prostor. [49]

Dalším produktem na bázi amorfního Si, který bohužel již není oficiálně dostupný, ale lze jej sehnat na stránkách přeprodejců je Flexcell Sunslick od společnosti Mitsubishi Electric. Tyto moduly o nominálních výkonech 7 W_p , 14 W_p nebo 27 W_p mají tloušťku 1,2 mm a hmotnost od 480 g do 1500 g. Dle katalogových listů se jejich provozní teplotní rozsah pohybuje od $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ až do $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Za zmínku také stojí, že moduly Flexcell Sunslick byly primárně koncipovány pro použití na plavidlech včetně nasazení v maritimních podmínkách, z čehož lze usuzovat, že by měly být velmi odolné vůči povětrnostním vlivům i UV záření. Navíc jsou moduly vybaveny kovovými průchodkami, které umožňují snadnou a variabilní instalaci, což nabízí potenciál pro jejich integraci do textilních struktur. [50], [51], [52]

Americká firma United Solar inzeruje na svých webových stránkách flexibilní modul PowerBond ePVL ve třech výkonových variantách (68 W_p , 136 W_p , 144 W_p). Modul (68 W_p) o rozměrech 2771 mm x 373 mm váží 3,9 kg a jeho celková tloušťka činí 21 mm. Samotné solární články jsou vyrobeny z vícevrstvého amorfního křemíku. Společnost

garantuje 92% výkon po dobu 10 let a na samotný produkt je záruka 5 let. Z dostupných informací bohužel není zcela jasné, zda je modul stále na trhu. [53]

Nakonec společnost Pvilion ze Spojených států nabízí jako jedna z mála řešení, jehož součástí je již vysoce pevná tkanina potažená PVC (viz Obr. 5). Toto řešení je nabízeno v rámci tří kategorií produktů o různých nominálních výkonech: zahradní/skladovací stany (210–2 400 W_p), vojenské stany a samotné plachty (400–960 W_p). Dále je také možné přizpůsobit článek či modul konkrétní aplikaci. Všechny produkty společnosti Pvilion by dle dostupných informací měly být vodotěsné, UV stabilní a nehořlavé. [54] Pvilion přímo neuvádí použitý polovodičový materiál, ale dle [55] by se zřejmě mělo jednat o amorfni křemík.



Obr. 5 Flexibilní moduly integrované do krycí tkaniny skladovacího stanu od společnosti Pvilion, převzato z [54]

Solární moduly CIGS

Flexibilní solární moduly FLEX-03W Series s technologií CIGS od společnosti Group Solar Hong Kong jsou dostupné ve čtyřech výkonových variantách (viz Příloha 2). Moduly jsou primárně určeny pro střešní instalace, avšak díky adhezivní vrstvě, která je součástí modulů, by bylo možné je jednoduše připevnit i k různým typům textilií. V potaz je ovšem třeba brát minimální poloměr ohybu, jež činí 508 mm, což může značně limitovat výslednou aplikaci. Udávaná účinnost modulů FLEX-03W Series dosahuje až 17 %. [56]

Dále např. společnost MiaSolé nabízí na svých webových stránkách flexibilní solární článek typu CIGS na substrátu z nerezové oceli. Článek je 0,33 mm tlustý a je 57,2 mm široký, přičemž jeho délku je možné si nakonfigurovat. Stejně jako v předchozím případě i FSC od MiaSolé dosahují účinnosti až 17 % a při STC podmínkách může článek generovat 2,33 W_p. Článek není zapouzdřen a nedokáže tak odolávat vlhkosti či jiným nežli stanoveným teplotám výrobce (viz Příloha 3). Samotný článek je možné objednat po více kusech nebo v rámci modulu, který je nabízen v různých variantách od 110 W_p do 380 W_p. Z hlediska integrace do textilu, dává větší význam kompletní modul, který je již zapouzdřen a opatřen adhezivní vrstvou. [57]

Také společnost NanoSolar prezentuje na svých stránkách flexibilní CIGS modul o rozměru 165 mm x 135 mm, tloušťce 0,4 mm a jmenovitém výkonu 2,6 W_p. Článek sestává z Al folie, která zde plní funkci zadní elektrody a zároveň substrátu, aktivního materiálu CIGS, horní průhledné elektrody a izolantu. Provozní teplota modulu je v rozmezí od -40 °C do +85 °C. Účinnost zařízení není na stránkách dohledatelná, a navíc není zcela zřejmé, zda firma dále v této výrobě pokračuje. [58]

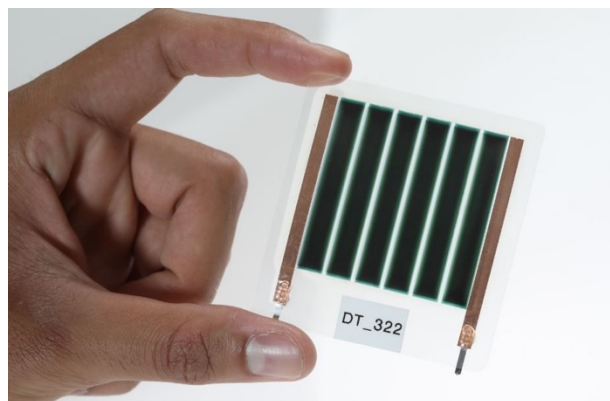
Nově se angažující společností v tomto odvětví je francouzská firma Solar Cloth. Ta na svých stránkách prezentuje různé aplikace svého produktu od zemědělství, přes transport, stavitelství až po venkovní aktivity. Jejich FSC (viz Tabulka 1), sestávající z CIGS polovodičového materiálu, dosahuje nominálního výkonu 2,44 W_p s účinností přesahující 17 %. Nízká tloušťka 0,8 mm a hmotnost 8,7 g přispívají k jeho vysoké flexibilitě s minimálním poloměrem ohybu až 20 mm, což jej umožňuje využít v kombinaci s různými povrchy. Na produkt je dvouletá záruka s garantovaným udržením 90% výkonu po dobu 10 let a 80% výkonu po dobu 20 let. Solar Cloth navíc nabízí možnost konfigurace a to i z hlediska metody fixace (viz Obr. 6), kde poskytuje na výběr uchycení např. pomocí zipu, velcra (suchého zipu), svařením, lepením či přišitím. [59]



Obr. 6 Integrované FSC od společnosti Solar Cloth, převzato z [59]

Organické solární moduly

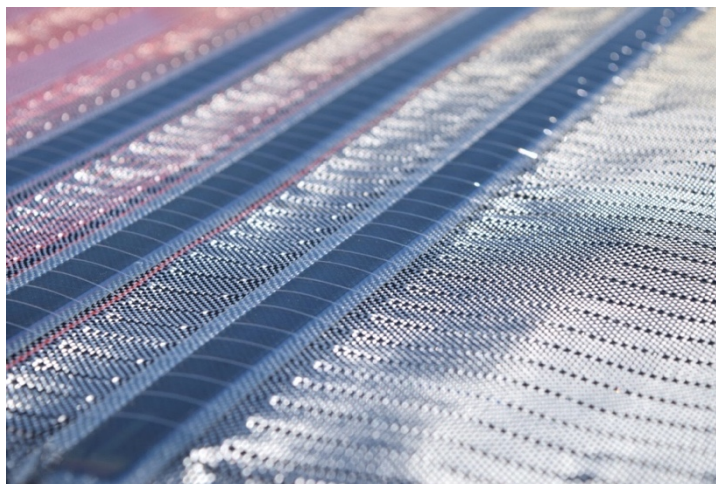
Jedna z mála společností, která na svých webových stránkách nabízí OFSC přímo k prodeji je firma Dracula Technologies. Organické články od Dracula Technologies jsou určeny především pro spotřební elektroniku do vnitřního, ale i vnějšího prostředí. Výsledný modul (viz Obr. 7) vyrobený technologií inkjet printingu je zapouzdřen s cílem zamezit jeho degradaci způsobené kyslíkem či vodou. Udávaná životnost organického modulu dosahuje přibližně 10 let v rozmezí teplot od $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Mezi hlavní přednosti tohoto produktu spadá jeho bifaciální konstrukce a mimořádně nízká tloušťka ($0,3\text{ mm}$), což vede k výrazné redukci hmotnosti, dosahující hodnoty pouhých $0,04\text{ g/cm}^2$. Za zmínku také stojí, že aktivní vrstva tohoto článku má formu objemového heteropřechodu. Samotný modul o ploše $63\text{ mm} \times 67\text{ mm}$ dokáže dodat výkon o $160\text{ }\mu\text{W}_p$ ($U_m = 2,85\text{ V}$, $I_m = 263\text{ }\mu\text{A}$) při intenzitě osvětlení 200 lx . Maximální poloměr ohybu by měl dosahovat 2 cm , což v tomto hledisku řadí solární modul od Dracula Technologies k nejlepším na trhu. [60], [61]



Obr. 7 OFSC LAYER od společnosti Dracula Technologies, převzato z [61]

Významným aktérem v tomto odvětví se zdá být i firma Heliatek, která na svých webových stránkách inzeruje dva produkty založené na OFSC, jenž jsou zaměřené především na integraci do staveb. Prvním z nich, je produkt nazvaný HeliaSol 436-2000, který je již vybaven konektory a z jedné strany je opatřen adhezivní vrstvou, díky které by bylo možné jej připevnit k určitým textilním strukturám, avšak i v tomto případě je nutné zohlednit minimální poloměr pohybu 500 mm. Samotný OFSC, z něhož se modul skládá je tvořen trojitým přechodem, nosnou folií a pouzdřicí vrstvou z obou stran, která zajišťuje ochranu proti UV záření a povětrnostním vlivům. Modul je nabízen ve variantě s nominálním výkonem 50 W_p nebo 55 W_p o účinnostech 7,2 % a 8.0 %. Druhý produkt HeliaFilm, nabízí možnost integrace do různých vlastních řešení. Jedná se tedy o samotnou plně přizpůsobitelnou solární folii bez konektorů a adhezivní vrstvy. [62]

Také německá společnost ASCA se zabývá vývojem a výrobou OFSC v průmyslovém měřítku. Jejich ASCA film je možné nakonfigurovat z hlediska rozměrů, integrace a barvy dle aplikace (viz Obr. 8). Např. modul o ploše 1 m^2 disponuje nominálním výkonem až 45 W_p (dle vnitřního zapojení článků a barvy). Dalšími přednostmi ASCA filmu by měla být odolnost vůči vysokému zkrutu, deformaci a vibracím, aniž by došlo k negativnímu ovlivnění výstupního výkonu. Klíčovými přednostmi produktu společnosti ASCA jsou jeho kladný teplotní koeficient výkonu, minimálně 20% průhlednost a jeho relativně nízká hmotnost (500 g/m^2). [63]



Obr. 8 Integrované OFSC v polymerní textilii od společnosti ASCA, převzato z [63]

Nakonec je také vhodné zmínit, že mnoho typů FSC (amorfní Si, CIGS, OFSC atd.) je dostupných na různých internetových aukčních sítích či tržištích (např. eBay nebo AliExpress). Vzhledem k tomu, že není vždy zcela jasné od jakého výrobce produkty pochází, jak byly testovány, případně skladovány nebo k nim zcela chybí katalogový list, bylo rozhodnuto je do této rešerše nezařadit.

Tabulka 1 Přehled vybraných komerčně dostupných flexibilních solárních modulů, včetně jejich základních parametrů

Výrobce	Produkt	Typ	Jmenovitý výkon	Odolnost	Výhody	Nevýhody	Zdroj
Power Film	*LL200-4.8-37 - Indoor Series	Amorfní Si	133 μW_p	Absence ochrany před UV a vnějšími vlivy	–	Vnitřní aplikace	[47]
Power Film	MPT3.6-75 - Classic Series	Amorfní Si	180 mW_p	Absence ochrany před UV a navlháním	–	Sporadické venkovní využití	[47]
Power Film	PT15-75 - Weather Pro Series	Amorfní Si	770 mW_p	Odolnost vůči vnějším vlivům a UV	Vhodný do venkovních podmínek	–	[47]
TDK Corporation	*BCSC491B6	Amorfní Si	85,8 μW_p	–	Vyvedené elektrody na jedné straně	Spíše vnitřní aplikace	[49]
Nanosolar	NanoCell	CIGS	2,6 W_p	–	–	–	[58]
Solar Cloth	Cell	CIGS	2,44 W_p	–	Fixace – lepení, velcro, svařování, přišití, pásky a jiné	–	[59]
Dracula Technologies	*LAYER	Organický	160 μW_p	Odolnost vůči O_2 a H_2O	Bifaciální	Primárně vnitřní, ale možnost i venkovní aplikace	[60]
ASCA	ASCA Inlay	Organický	20 W_p - 45 W_p (dle barvy)	–	Průhlednost 20 % - 50 %	–	[63]
Elektrické parametry solárních článků byly měřeny za standardních podmínek (STC), parametry zařízení označených * byly měřeny při intenzitě osvětlení 200 lx.							

2.4 Integrace flexibilních solárních modulů do chytrých textilií

Chytré textilie jsou dle technické normalizační informace TNI CEN ISO/TR 23383 definovány jako funkční textilie, které reverzibilně interagují se svým prostředím nebo se adaptují či reagují na podmínky nebo změny ve svém prostředí [64]. Jedná se tedy o velmi široký pojem, kam spadají textilie interagující např. mechanicky, opticky, tepelně, chemicky, elektricky anebo kombinovaně [65]. Z toho jasně vyplývá, že vhodný výběr typu a parametrů flexibilních solárních modulů pro integraci do chytrých textilií závisí na konkrétní aplikaci či chytré textilii. Dle zmíněné definice se tak jakákoli textilie může stát chytrou textilií, pokud je do ní integrováno fotovoltaické zařízení, které představuje zdroj energie pro další zařízení v rámci této textilie. A tak všechny komerčně dostupné flexibilní solární moduly uvedené v předchozí podkapitole, mohou být díky své flexibilitě vhodné pro využití v chytrých textiliích, avšak pro různé aplikace. Hlavními aspekty, na které je třeba se zaměřit při využití flexibilních solárních článků nebo modulů v chytrých textiliích jsou zejména stabilita, dostatečná energetická účinnost a mechanická odolnost. Bohužel tyto parametry nejsou obvykle výrobci zcela dokládány, což činí výběr vhodného fotovoltaického zařízení obtížnější. Vezmeme-li dále v potaz nositelné chytré textilie, stačil by nám pro jejich napájení ve většině případů elektrický výkon v řádech mW [8]. Z tohoto hlediska se pro využití v chytrých textiliích jeví jako lepší volba rozměrově menší zařízení s menším minimálním poloměrem ohybu.

Mezi velmi slibná zařízení pro využití v chytrých textiliích lze, dle mého názoru, zařadit např. solární moduly řady WeatherPro od společnosti PowerFilm, které disponují stupněm krytí IP68 a minimální životností 10 let ve venkovním prostředí [47]. PowerFilm je možné navíc klasifikovat jako již etablovanou společnost, která jako jedna z mála deklaruje životnost a stupeň krytí. Což vzhledem k velmi náročným podmínkám, jakým jsou obvykle textilie vystaveny (nejen během pracích cyklů), lze při výběru zahrnout mezi klíčová rozhodovací kritéria. Dalšími potenciálně vhodnými flexibilními moduly pro integraci do chytrých textilií jsou zařízení od společností SolarCloth, Dracula Technologies a TDK Corporation (viz Příloha 1 až Příloha 3). Tato zařízení sice nedisponují takovou životností (případně není deklarována) jako některé produkty od výrobce PowerFilm, ale na druhou stranu mají jako jediné produkty nejmenší specifikovaný minimální poloměr ohybu o 20 mm [49], [59], [60], což lze pokládat také za jedno z klíčových rozhodovacích kritérií.

Z hlediska integrace FSC lze např. použít textilii přímo jako substrát modulu tak, jak to realizují společnosti ASCA nebo Pvilion [54], [63]. Jiní výrobci zase opatřují fotovoltaická

flexibilní zařízení adhezivní vrstvou, díky které je lze upevnit na různé povrchy včetně určitých textilií [47], [53], [56], [57], [59], [62]. Toto řešení však nemusí být zcela optimální pro časté ohybové namáhání a prací cykly. Další možností, kterou nabízí kupříkladu společnost SolarCloth, je zapracování technologických prvků do designu produktu. SolarCloth tak poskytuje kromě adhezivní vrstvy také integraci svařením či přišitím anebo pomocí velcra, kovových průchodek či zipu [59]. Zmíněné rozebíratelné varianty integrace jsou ze své podstaty výhodné pro jejich možnou demontáž za účelem praní či výměny zařízení. Nicméně v některých případech může toto řešení narušovat celistvost celého systému a komplikovat tak jeho používání. Integrace přišitím by se teoreticky dala využít i u komerčních flexibilních modulů, jež disponují dostatečně rozměrným okrajem pouzdrící folie (příkladem může být např. flexibilní modul LAYER od společnosti Dracula Technologies, viz Obr. 7). V takovém případě je třeba dbát na to, aby nedošlo k porušení pouzdrící folie a znehodnocení její funkce. Takovýto postup by tak bylo vhodné konzultovat přímo s daným výrobcem.

Způsob kontaktování samotných flexibilních solárních modulů je obvykle určen výrobcem, popřípadě je zařízení již z výroby nakontaktováno, potažmo opatřeno konektory (viz Příloha 1 až Příloha 3). Zařízení, která nejsou nakontaktována z výroby, mají zpravidla v katalogovém listu uvedený vhodný způsob kontaktování. Např. u modulů od výrobce PowerFilm se jako vhodná metoda kontaktování uvádí pájení, kdežto výrobce TDK doporučuje pro kontaktování např. použití vhodných konektorů nebo vodivého lepidla. [47], [49] Kontaktování ve vztahu k textilii může být řešeno různými způsoby dle použitých elektrických vodičů a zvolené koncepce celého systému. Jako elektrické vodiče lze využít klasické izolované vodiče, což však není zcela optimální řešení pro nositelné chytré textilie. Z tohoto důvodu se pro elektricky vodivé propojení nabízí například vodivé textilní nitě a příze či vodivé textilie, které zajistí lepší integraci do textilu [66], [67]. Velmi praktické může být dle mého názoru nakontaktovat solární modul spolu s textilií např. vodivým velcrem nebo kovovými nýtovacími druky [68], díky tomu by bylo možné solární modul používat pouze v případě potřeby, a snížit tak nároky na jeho mechanickou odolnost potažmo celkovou životnost. Dalšími použitelnými metodami kontaktování je svařování nebo pájení, avšak ty mají tu nevýhodu, že výsledný kontakt je poměrně náchylný na mechanické namáhání [67], [68]. Alternativou by se mohlo zdát vodivé lepidlo, které ve srovnání s pájením vyžaduje nižší procesní teploty, ovšem výsledný vodivý spoj bývá v tomto případě mechanicky křehčí a jeho elektrický odpor vyšší [68].

3 Metody testování elektrických parametrů flexibilních solárních článků

Vzhledem k faktu, že na trhu je zatím jen omezené množství flexibilních solárních článků či modulů, neexistuje, dle aktuálně dostupných informací, žádná specifická standardizace testovacích metod určených přímo pro tato zařízení. Za účelem testování elektrických parametrů FSC tak můžeme vycházet z postupů a norem pro konvenční, případně tenkovrstvé solární články či moduly [69], [70], [71].

3.1 Základní elektrické vlastnosti solárních článků

Abychom se mohli zabývat metodami testování solárních článků, je nejdříve nutné si stanovit základní elektrické vlastnosti solárních článků, popřípadě modulů.

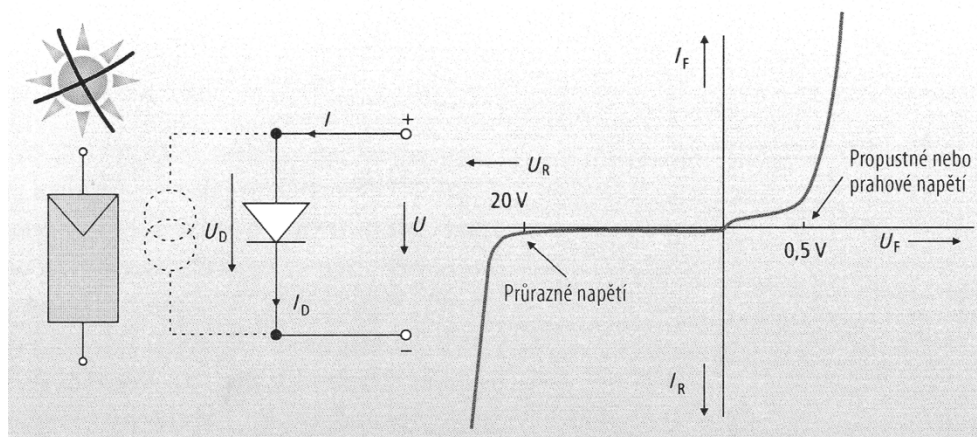
Prvním krokem je tedy popsání solárního článku náhradním obvodem. Jak již bylo uvedeno v úvodní kapitole, solární článek sestává z P-N přechodu, tudíž lze pro jeho zjednodušené vyjádření použít polovodičovou diodu, na jejíž přechod dopadá světelné záření. Pokud článek není osvětlen, chová se téměř identicky jako polovodičová dioda, jak je znázorněno na Obr. 9 níže. Za těchto podmínek platí následující vztahy:

$$U = U_D, \quad (3.1)$$

kde U je napětí na svorkách solárního článku a U_D je napětí na diodě.

$$I = -I_D = I_0 \cdot \left(e^{\frac{U_D}{m \cdot U_T}} \right) - 1, \quad (3.2)$$

kde I je proud tekoucí do zátěže připojené k solárnímu článku, I_D je diodový proud, I_0 saturační proud v závěrném směru diody, U_D napětí na diodě, m diodový faktor a U_T teplotní napětí. [14], [72], [73], [74]



Obr. 9 Náhradní obvod a voltampérová charakteristika solárního článku za tmy, převzato z [14]

Naopak jestliže na článek dopadá světelné záření (viz Obr. 10), dochází ke generaci tzv. fotoelektrického proudu I_{Ph} , jehož velikost je závislá na intenzitě záření E . V tomto případě lze článek nahradit paralelním zapojením diody a proudového zdroje, který generuje I_{Ph} o jehož velikost se zároveň posune (do závěrného směru) výsledná voltampérová (VA) charakteristika. V tomto případě platí následující vztahy:

$$U = U_D, \quad (3.3)$$

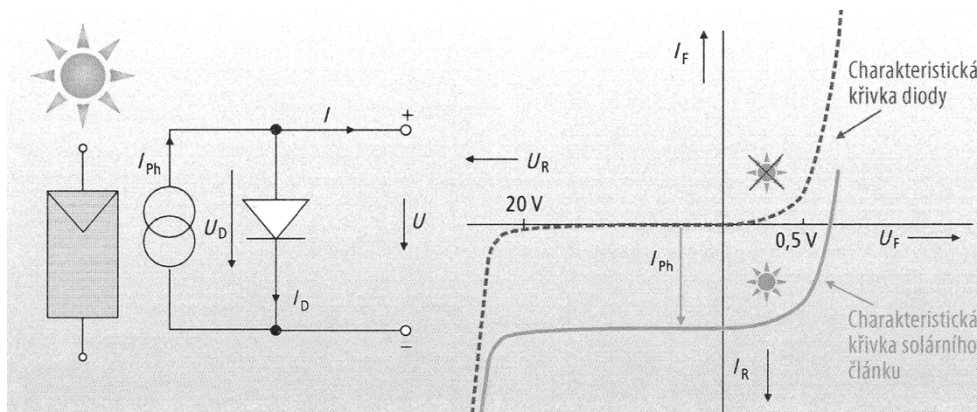
kde U je napětí na svorkách solárního článku a U_D je napětí na diodě.

$$I_{Ph} = c_0 \cdot I, \quad (3.4)$$

kde I_{Ph} představuje již zmíněný fotoelektrický proud, c_0 koeficient fotoelektrického proudu a I proud tekoucí do zátěže připojené k solárnímu článku.

$$I = I_{Ph} - I_D, \quad (3.5)$$

kde I je proud tekoucí do zátěže připojené k solárnímu článku, I_{Ph} fotoelektrický proud a I_D diodový proud. [9], [14], [72], [73]



Obr. 10 Náhradní obvod a voltampérová charakteristika osvětleného solárního článku, převzato z [14]

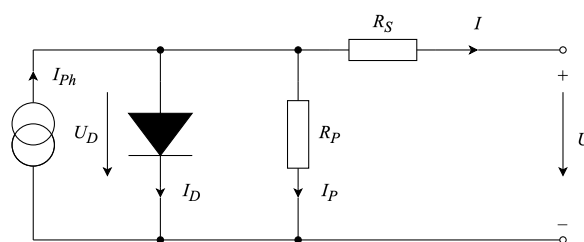
Vzhledem k tomu, že při fotovoltaickém jevu dochází v solárním článku k určitým ztrátám, doplňuje se náhradní obvod ještě o sériový a paralelní elektrický odpor, viz Obr. 11. Sériový odpor R_S vyjadřuje úbytek napětí, ke kterému dochází při transportu nosičů náboje směrem ke kontaktům. Paralelní odpor R_P zase vyjadřuje svodové proudy, které jsou dány technologickými nedokonalostmi P-N přechodu. Působením těchto odporů dochází ke zploštění výsledné voltampérové charakteristiky solárního článku, a tedy i ke snížení jeho výsledné účinnosti. Při uvažování zmíněných elektrických odporů platí následující vztahy:

$$I = I_{ph} - I_D - I_P, \quad (3.6)$$

kde I je proud tekoucí do zátěže připojené k solárnímu článku, I_{ph} fotoelektrický proud, I_D diodový proud a I_P proud tekoucí paralelním odporem.

$$I_P = \frac{U_D}{R_P} = \frac{U + R_S I}{R_P}, \quad (3.7)$$

kde I_P je proud tekoucí paralelním odporem, U_D napětí na diodě, R_P paralelní odpor, U napětí na svorkách solárního článku, R_S sériový odpor a I proud jím protékající. Závěrem je také důležité poznamenat, že existují i další složitější a zároveň přesnější náhradní obvody solárního článku. [9], [14], [72], [73], [75]



Obr. 11 Rozšířené náhradní schéma solárního článku o sériový a paralelní odpor

Charakteristické parametry solárního článku

Mezi charakteristické parametry solárního článku, popřípadě modulu, které jsou nejčastěji určovány při STC podmínkách řadíme:

- Napětí naprázdno U_{OC}
- Proud nakrátko I_{SC}
- Jmenovitý výkon P_{MPP}
- Jmenovité napětí U_{MPP}
- Jmenovitý proud I_{MPP}
- Účinnost η
- Faktor plnění FF . [76]

U_{OC} představuje maximální možné napětí, které je článek schopen generovat při dané intenzitě záření a teplotě, v případě, že ke svorkám článku není připojena zátěž nebo se elektrický odpor připojené zátěže blíží nekonečnu, tzn. proud zátěží se blíží nule. [10]

I_{SC} je naopak maximální možný proud dodávaný solárním článkem za určité teploty a intenzity záření, v případě, že jsou výstupní svorky článku vyzkratované, tzn. elektrický odpor a výstupní napětí na zátěži se blíží nule [14].

P_{MPP} je definován jako pracovní bod maximálního výkonu za daných teplotních a světelných podmínek. Jedná se tedy o součin U_{MPP} a I_{MPP} , viz níže [77].

$$P_{MPP} = U_{MPP} \cdot I_{MPP} \quad (3.8)$$

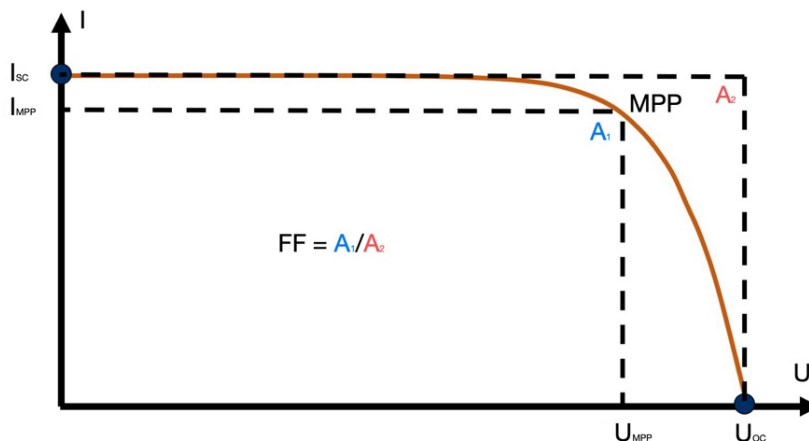
FF lze definovat jako ukazatel kvality solárních článků. Vzhledem k voltampérové charakteristice se jedná o poměr obsahů dvou pravoúhlých čtyřúhelníků, kdy jeden má vrchol v P_{MPP} a druhý v U_{OC} a I_{SC} (viz Obr. 12). Matematicky se tedy jedná o poměr mezi P_{MPP} a součinem U_{OC} a I_{SC} :

$$FF = \frac{P_{MPP}}{U_{OC} \cdot I_{SC}} \quad (3.9)$$

η solárních článků (či modulů) je definována dle následujícího vztahu:

$$\eta = \frac{P_{MPP}}{A \cdot E} = \frac{FF \cdot U_{OC} \cdot I_{SC}}{A \cdot E}, \quad (3.10)$$

kde P_{MPP} je již zmíněný maximální výkon dodávaný článkem za specifikovaných podmínek, A plocha článku, E intenzita záření, FF faktor plnění, U_{OC} napětí naprázdno a I_{SC} proud nakrátko. [14], [15], [77]



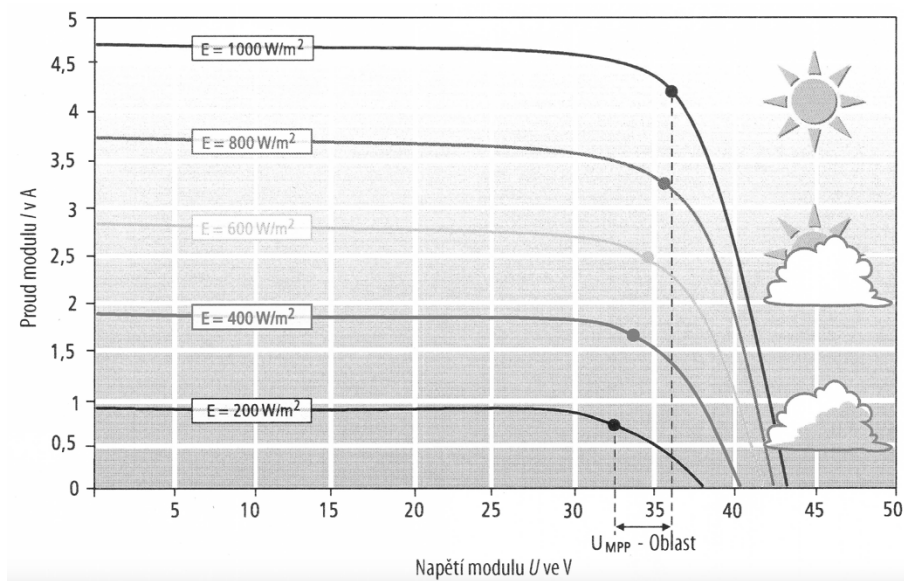
Obr. 12 Voltampérová charakteristika solárního článku včetně faktoru plnění, převzato z [78]

Vliv intenzity záření a teploty na voltampérovou charakteristiku

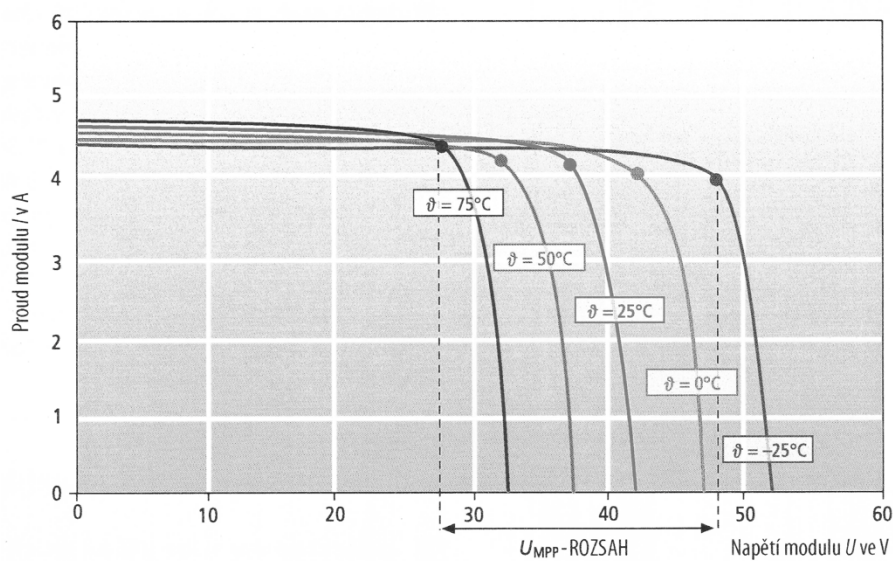
VA charakteristika solárního článku je silně ovlivněna teplotou článku a intenzitou záření dopadajícího na jeho povrch, viz Obr. 13 a Obr. 14. Hovoříme-li o křemíkových solárních článcích či modulech, platí následující zákonitosti:

- Zvýšení intenzity záření E vede ke zvýšení fotoelektrického proudu I_{ph} , který je intenzitě dopadajícího záření E přímo úměrný a zároveň dochází k mírnému nárůstu napětí naprázdno U_{OC} [14], [77], [79].
- Zvýšení teploty solárního článku ϑ či modulu má za následek především pokles napětí naprázdno U_{OC} a pouze mírný nárůst fotoelektrického proudu I_{ph} [14], [77], [79].

3 METODY TESTOVÁNÍ ELEKTRICKÝCH PARAMETRŮ FLEXIBILNÍCH SOLÁRNÍCH ČLÁNKŮ



Obr. 13 Voltampérová charakteristika křemíkového modulu při různých intenzitách záření E a konstantní teplotě, převzato [14]



Obr. 14 Voltampérová charakteristika křemíkového modulu při různých teplotách θ a konstantním ozáření 1000 W/m², převzato z [14]

3.2 Testovací podmínky

Jak již bylo uvedeno výše, VA charakteristika solárních článků je závislá na teplotě přechodu článku a intenzitě záření. Proto, aby bylo možné porovnat jednotlivé články či moduly mezi sebou, byly zavedeny tzv. standardní testovací podmínky (STC) dle normy ČSN IEC 60904. Za těchto podmínek jsou obvykle stanovovány jmenovité hodnoty fotovoltaických zařízení. Jako STC norma definuje:

- Intenzita záření E o hodnotě 1000 W/m^2 působící kolmo na testované zařízení.
- Teplota přechodu článku T o hodnotě $25 \text{ }^\circ\text{C}$ s tolerancí $\pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Spektrum světla s koeficientem atmosférické masy (AM) o hodnotě 1.5, dle normy ČSN EN IEC 60904-3. [14], [80], [81]

Alternativou k STC jsou například tzv. podmínky nominální provozní teploty článku či modulu (NOCT a NMOT)⁵, které jsou realizovány ve venkovním prostředí. Tyto podmínky více odrážejí reálné provozní podmínky, a tak poskytují lepší informaci o skutečných vlastnostech a výkonosti fotovoltaických zařízení. [70], [82]

3.3 Měření voltampérových charakteristik

VA charakteristika a základní parametry solárního článku, potažmo modulu, byly popsány v předchozí části. Pro získání těchto údajů existují různé metody, které se odlišují především použitým zkušebním vybavením. Všechna měření by měla probíhat za předem stanovených podmínek, které budou v souladu s účelem měření či budou vyhovovat požadavkům zadavatele. Nejobvyklejšími podmínkami měření jsou výše uvedené STC. V následující části jsou popsány nejvíce používané metody pro měření VA charakteristik.

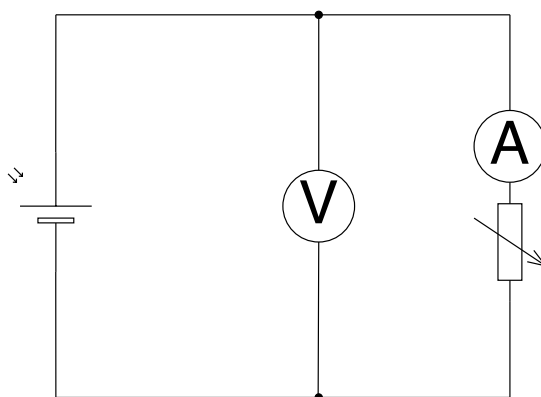
Měření pomocí voltmetru a ampérmetru

Metodu měření pomocí voltmetru a ampérmetru lze zařadit k těm nejméně náročným, jelikož nevyžaduje specializované vybavení. Metoda spočívá v zapojení měřících přístrojů a regulovatelné odporové zátěže k solárnímu článku či modulu dle Obr. 15. Po zapojení měřícího obvodu a dosažení stanovených podmínek měření (intenzity záření, teploty přechodu článku, aj.) je zvolen směr měření (začátek v I_{sc} nebo U_{oc}). Následně se plynule

⁵ Zkušební podmínky NOCT byly zrušeny normou IEC 61215-2:2016 a nahrazeny zkušebními podmínkami NMOT, které byly následně zrušeny normou IEC 61215-1:2021, zejména kvůli jejich náročnosti provedení a nízkému využívání. [70], [82]

mění odpor regulovatelné zátěže a odečítají se hodnoty napětí a proudu z voltmetru a ampérmetru. Krok měření (odpor zátěže) je zapotřebí vhodně upravovat, dle dané oblasti VA charakteristiky tak, aby bylo dosaženo co možná nejpřesnějších výsledků. Zejména v oblasti ohybu VA charakteristiky je vhodné zvolit menší krok měření. Naopak v lineárních oblastech je možné krok měření prodloužit. Hlavní nevýhody této metody měření zahrnují zejména její dlouhou dobu trvání, což přináší určité omezení či komplikaci při měření ve venkovním prostředí za přirozeného slunečního záření, kde se klimatické podmínky (intenzita záření, teplota aj.) relativně rychle mění. Z tohoto důvodu je tato metoda vhodnější pro použití v laboratorních podmínkách za přítomnosti simulovaného slunečního záření.

[15], [83], [84]



Obr. 15 Schéma zapojení měřícího obvodu pro měření VA charakteristiky

Měření dle technické normy ČSN EN 60904-1

Výchozí normou pro měření VA charakteristik solárních článků, potažmo modulů je norma ČSN EN 60904-1. Ta stanovuje postupy pro měření VA charakteristik (pro monofaciální a jednopřechodové zařízení), jak při přirozeném slunečním světle, tak i při světle simulovaném. Norma má za cíl především minimalizovat nejistoty měření a standardizovat měřicí proces, který je díky tomu vhodný např. pro stanovení nominálních hodnot fotovoltaických zařízení. [71]

Normou požadované vybavení je následovné:

- Kalibrovaný referenční solární článek nebo pyranometr (v případě přirozeného světla), za účelem měření intenzity záření.
- Senzory teploty pro referenční a měřený článek s maximální nejistotou měření 1 °C.
- Přístroje pro měření napětí a proudu s maximální relativní nejistotou měření 0,2 % z U_{oc} a I_{sc} .
- Solární simulátor minimálně třídy CCC (viz kapitola 4.2).
- Spektroradiometr pro korekci spektrální neshody.

Měření dle výše uvedené normy má být obecně realizováno za STC (pokud není stanoveno jinak), přičemž průměrná intenzita záření E musí ležet mezi 800 W/m² a 1200 W/m². Po celou dobu měření je zapotřebí udržovat teplotu na konstantní hodnotě (při STC $T = 25$ °C). Teplotní senzor má být umístěn co nejbližší přechodu článku, a teplota může být změřena pouze jednou (ideálně blízko hodnoty U_{oc}). Před nebo současně s testovaným zařízením, je nutné použít ve shodné rovině ($\pm 2^\circ$) stabilní referenční solární článek stejné technologie, který slouží ke kalibraci nebo následné korekci dat. Dále norma také vyžaduje použití nezávislých vodičů (o co nejkratší délce) pro měření napětí a proudu, včetně čtyřvodičového zapojení od výstupních svorek testovaného zařízení. [71]

Měření pomocí solárního analyzátoru

Tato metoda měření využívá solárního analyzátoru, multifunkčního zařízení, které umožňuje provádět různé typy měření a analýz souvisejících s výkonem a bezpečností fotovoltaických zařízení. Proto se tento přístroj používá mimo jiné při měření ve venkovním prostředí, za účelem kontroly či uvedení do provozu dle normy ČSN EN 62446-1+A1 [85]. Solární analyzátor dokáže automatizovaně proměřit celou VA charakteristiku daného solárního modulu či celého řetězce modulů (tzv. stringu). Součástí solárního analyzátoru bývá také referenční solární článek a teplotní senzor. Referenční článek se při měření umístí shodně s měřeným objektem (stejný sklon a orientace) a teplotní senzor, tak aby měřil co nejlépe teplotu článku. Po provedení měření je přístroj obvykle schopen extrapolovat naměřené hodnoty do STC a porovnat výsledky měření s nominálními hodnotami z katalogového listu. [86], [87] Solární analyzátory se mohou, kromě specifických funkcí, lišit také typem použité zátěže. Ta může být řešena např. elektronickou zátěží v podobě tranzistoru, stejnosměrným měničem nebo jak tomu bývá nejčastěji, kapacitní zátěží (s rostoucím nábojem kondenzátoru dochází k poklesu proudu a vzestupu napětí) [88], [89].

4 Návrh zařízení pro laboratorní stárnutí simulovaným slunečním zářením

4.1 Rešerše solárních simulátorů

Solární simulátor je konstruován tak, aby co nejlépe simuloval světelné spektrum o požadovaných parametrech, přičemž nejčastěji je cílem nasimulovat sluneční záření dopadající na zemský povrch (AM1.5G). Takového přístroje lze využít v několika různých aplikacích, kam spadá například testování a charakterizace fotovoltaických článků. Dále také vnitřní pěstování rostlin nebo testování míry odolnosti určitých materiálů, součástek či zařízení vůči slunečnímu záření. Výhodou solárních simulátorů je, že napodobují sluneční záření za zcela kontrolovaných podmínek a za zkrácenou dobu, se kterou však úměrně klesá korelace se skutečným chováním vzorku při aplikaci v reálném prostředí [90]. Naopak jejich hlavní nevýhodou je absence součinnosti různých vlivů nebo absence těžko simulovatelných vnějších vlivů, kupříkladu biologických, které v přirozeném prostředí na testovaný vzorek působí.

Solární simulátory se ve většině případů skládají z pěti hlavních částí: světelného zdroje, napájecího zdroje, řídicích prvků či počítače, podpůrné konstrukce a optických komponentů [91], [92], [93]. Jak lze předpokládat nejdůležitější částí je samozřejmě světelný zdroj. Ten svými vlastnostmi stanovuje především konečnou výkonost, kvalitu a vhodnou aplikaci solárního simulátoru. Od jeho výběru se následně zároveň odvíjí návrh či výběr ostatních částí. Velice důležitou součástí jsou i optické komponenty jako např. čočky či filtry, jež pomáhají co nejlépe napodobit referenční spektrum úpravou kolimace (pomocí optických filtrů) [94] a filtrováním některých vlnových délek [95].

Klasifikace dle světelných zdrojů

Solární spektrum na povrchu Země je velice komplexní, a tudíž velice složitě simulovatelné. V důsledku toho, že se pozemské spektrum neustále mění v čase se složkami atmosféry a povětrnostními podmínkami, je pomocí stávajících technologií zatím téměř nemožné solární spektrum přesně nasimulovat. Stávající solární simulátory tak více či méně odpovídají solárnímu spektru, ale nikdy se nejedená o 100% soulad s reálným slunečním zářením.

Jak už bylo uvedeno dříve, srdcem solárních simulátorů jsou zdroje světla, a proto tyto jednotlivá zařízení třídíme dle nich. Nejpopulárnějšími zdroji světla při návrhu zařízení, které má imitovat standardní solární spektrum jsou argonové, xenonové a halogenidové

výbojky, wolfram-halogenové žárovky či elektroluminiscenční diody (LED) [96]. V následující části budou představeny zmíněné světelné zdroje spolu s jejich výhodami, případně nevýhodami.

Argonové výbojky jsou elektrickým světelným zdrojem, který využívá stlačený argon o tlaku 7–10 bar [92]. Výhodou je dle [91] podobná šířka pásma (275–1 525 nm) se slunečním zářením anebo prostorová rovnoměrnost ozáření či stabilita intenzity záření [97]. Mezi nevýhody naopak patří vysoká cena, velká energetická náročnost a také to, že výkonově dosahuje tento zdroj vyšších hladin intenzity záření a je potřeba implementovat do zařízení optický filtr [91].

Xenonové výbojky disponují spektrem od 185 nm do 2 600 nm, tudíž i u nich je vhodné použití filtru jak v UV, tak v IR oblasti [98], [99]. Díky jednodušší regulaci prostřednictvím úrovně napětí, vyšší stabilitě a dobré vyváženosti spektra jsou tyto výbojky jedním z nejvyužívanějších zdrojů světla v solárních simulátorech [91][95]. Na druhou stranu xenonové výbojky mají vysokou spotřebu energie, kratší životnost [100] a jejich vysoký pracovní tlak 10–40 bar může představovat zvýšené riziko nebezpečí výbuchu [92][97].

Dalším typem jsou halogenidové výbojky, jenž se charakterizují oproti předchozím typům vyšší životností [97], nižší cenou [93] a menší energetickou náročností [100][92]. Jejich spektrum se úzce shoduje se slunečním zářením (200–2 600 nm [97]) [99]. V porovnání s xenonovými obloukovými lampami sice používají podobně vysoké pracovní tlaky (10–35 bar [92]), ale jejich konstrukce je dvouplášťová, což značně snižuje riziko jejich exploze [99].

O něco méně oblíbeným zdrojem světla pro solární simulátory jsou wolframo-halogenové žárovky (označovány spíše jen jako halogenové), které představují alternativu výbojek. Jejich záření je ve srovnání se slunečním o něco slabší v UV oblasti, a naopak silnější v IR oblasti [92], ale i přesto lze celkové spektrum halogenových žárovek považovat za dostatečně vhodné pro tento účel [91]. I když tento typ zdroje není dle [91] úplnou alternativou standardních solárních simulátorů, nachází své uplatnění zejména pro svoji vysokou intenzitu záření a nízkou cenu, která je ovšem vykoupena kratší životností [92].

V posledních letech se významným světelným zdrojem solárních simulátorů stávají i LED diody. Dřívějším problémem LED diod byla absence části UV a IR spektra [101], což se díky velkému vývoji již změnilo. Kombinací nových typů LED diod je možné dosáhnout např. spektra v rozmezí cca 260–1 100 nm [102], [103]. Dalšími výhodami LED diod jako světelného zdroje je nízká spotřeba energie, vysoká spolehlivost, rychlé ovládání [94],

4 NÁVRH ZAŘÍZENÍ PRO LABORATORNÍ STÁRNUTÍ SIMULOVANÝM SLUNEČNÍM ZÁŘENÍ

kompaktnost [97], dlouhá životnost (až 100 000 hodin) a vyšší účinnost [102]. Důležitá je i jejich nízká cena a dobrý potenciál být srovnatelnými zdroji s xenonovými výbojkami [91]. To dokazuje např. publikace [104], ve které byla naměřena téměř totožná voltampérová charakteristika fotovoltaického článku pomocí xenonového a LED solárního simulátoru od stejného výrobce. V důsledku zmíněných poznatků lze tedy očekávat, že v následujících letech bude vývoj solárních simulátorů směřován tímto směrem.

Tabulka 2 Světelné zdroje a jejich přibližný spektrální rozsah [97], [102], [103]

Typ zdroje světla	Spektrální rozsah (nm)
Argonové výbojky	275–1 525
Xenonové výbojky	185–2 600
Halogenidové výbojky	200–2 600
Wolframo-halogenové žárovky	250–2 500
LED	260–1 100

Tabulka 3 Porovnání světelných zdrojů dle různých parametrů

Typ zdroje světla	Spektrální vlastnosti	Energetická náročnost	Nutnost použití filtru	Životnost (h)	Cena	Ostatní	Zdroje
Argonové výbojky	Slabší v IR oblasti	Vysoká	Ano	Až 3 000	\$\$\$	Drahý zdroj napájení, malá plocha ozáření	[97], [105]
Xenonové výbojky	Dostatečné	Vysoká	Ano	Až 3 500	\$\$\$	Drahý zdroj napájení, malá plocha ozáření	[92], [106], [107], [108]
Halogenidové výbojky	Dostatečné	Vysoká	Ne	Až 20 000	\$	Nízká uniformita a kolimace	[92], [93], [97], [100], [109]
Wolframo-halogenové žárovky	Dostatečné	Střední	Ne	Až 3 000	\$	Možné přehřívání	[91], [92], [110]
LED	Slabší v IR oblasti	Nízká	Ne	Až 100 000	*\$	Více zdrojů, úzké spektrum, nízká uniformita	[91], [101], [102], [111]
*Nemusi platit v případě větších ploch							

4.2 Související technické normy

ČSN EN IEC 60068-2-5 ed. 2

Simulování slunečního záření na úrovni zemského povrchu a zkoušky s tím spojené zaštiťuje např. norma ČSN EN IEC 60068-2-5 ed. 2 [112], která vychází z evropské normy. Norma zahrnuje metody simulace slunečního záření za účelem zjištění, jaký vliv má na zařízení potažmo součástky sluneční záření. Tato norma zohledňuje nejen tepelné, ale i klimatické vlivy.

Pro simulaci slunečního záření, respektive testování a zkoušení dle normy ČSN EN IEC 60068-2-5 ed. 2 je zavedeno standardní globální spektrum AM1,5G o celkové intenzitě záření rovné 1 090 W/m² a spektrální ozáření dle Tabulka 4, kde jsou zanedbány vlnové délky kratší než 300 nm, jelikož ty jsou téměř zcela pohlceny ozónovou vrstvou [112]. V Tabulka 4 jsou dále také uvedeny maximální a minimální úrovně podílu zastoupení jednotlivých pásem v celém spektrálním ozáření.

Tabulka 4 Spektrální ozáření dle ČSN EN IEC 60068-2-5 ed. 2, převzato z [112]

Spektrální oblast	UVB	UVA	Viditelná	IR	Celkové záření
Šířka pásma (nm)	300–320	320–400	400–800	800–2 450	300–2 450
E (W/m ²)	4,06	70,5	604,2	411,2	1 090
Přibližný podíl z celkové E (%)	0,4	6,4	55,4	37,8	100
Min. úroveň E (%)	0,3	4,2	43,8	33,7	–
Max. úroveň E (%)	0,7	7,4	57,0	50,5	–

Zkušební metody dle ČSN EN IEC 60068-2-5 ed. 2

Během zkoušky je zapotřebí udržovat hodnoty ozařování (intenzitu záření a spektrum), teploty a vlhkosti na určité úrovni, dle konkrétního postupu zkoušky. Testovaný vzorek musí být zkoušen na vyvýšené podpěře a na specifikované podložce, u které je známý součinitel tepelné vodivosti λ_T a tepelná kapacita c . Pro řízení a určení teploty je pro expoziční komoru (v našem případě simulátor) stanoven normou tzv. senzor černého panelu. Ten sestává z korozi-vzdorné oceli daného rozměru, opatřené černým nátěrem, na které je připevněn teplotní senzor, tak aby byl vystaven totožným podmínkám jako testovaný vzorek. Dle postupu zkoušky by teplota v komoře měla mít maximální odchylku ± 2 K a ozáření musí dosahovat $1090 (1 \pm 10 \%) \text{ W/m}^2$. [112]

Pro zkoušení vlivů tepla zavádí norma ČSN EN IEC 60068-2-5 ed. 2 tři postupy s označením Sa 1, Sa 2 a Sa 3. V rámci těchto měřících postupů je nutné provádět teplotní měření výše uvedeným senzorem černého panelu, který je umístěn v polovině vzdálenosti mezi testovaným objektem a stěnou měřicí komory. Postup Sa 1 je složen z 8 hodin ozařování a 16 hodin zatmění (opakování dle požadavků), během něhož dopadá na vzorek $8,72 \text{ kWh/m}^2$. Postup je tak vhodný pro zjištění tepelných vlivů a simuluje tak celkové denní ozáření. U dalšího postupu Sa 2 je ozařování prodlouženo na 20 hodin a zatmění zkráceno na 4 hodiny (také možné opakování dle požadavků). Během tohoto postupu dopadne na zkoumaný vzorek $21,8 \text{ kWh/m}^2$, tím pádem se Sa 2 hodí ke zjištění degra-dačních vlivů. Poslední postup Sa 3 je definován jako nepřetržité ozařování po požadované dobu a slouží především k určení fotochemických vlivů, avšak je třeba brát v potaz, že tato zkouška může zastínit degradace způsobené cyklickým tepelným namáháním. [112]

Pro zkoušení klimatických vlivů s ovlhčením i bez ovlhčení zavádí norma ČSN EN IEC 60068-2-5 ed. 2 dva postupy s označením Sb 1 (expoziční cyklus s použitím filtrů pro denní světlo s ovlhčením) a Sb 2 (expoziční cyklus s použitím filtrů pro okenní sklo bez ovlhčení) [112]. U této zkušební metody je často používaným zdrojem záření jedna nebo více xenonových obloukových lamp, které disponují spektrem od 270 nm až po IR oblast. Aby takový zdroj simuloval sluneční záření je třeba použít filtry k odstranění krátkovlnného UV záření, viz Tabulka 5. Důležitá je také rovnoměrnost ozáření, kdy v každém místě testovací plochy musí být vzorek ozářen minimálně 70 % maximální ozáření. Navíc pokud je tato hodnota mezi 70 % až 90 % je třeba vzorek periodicky přemísťovat. [112]

4 NÁVRH ZAŘÍZENÍ PRO LABORATORNÍ STÁRNUTÍ SIMULOVANÝM SLUNEČNÍM ZÁŘENÍ

Tabulka 5 Mezní úrovně relativní ozáření v UV oblasti xenonovou obloukovou lampou vybavenou filtry pro denní světlo, dle ČSN EN IEC 60068-2-5 ed. 2, převzato z [112]

Spektrální propustné pásmo (nm)	Minimum (%)	CIE 85:1989 (%)	Maximum (%)
$\lambda < 290$	–	–	0,15
$290 \leq \lambda \leq 320$	2,6	5,4	7,9
$320 \leq \lambda \leq 360$	28,2	38,2	39,8
$360 \leq \lambda \leq 400$	54,2	56,4	67,5

Světelné zdroje dle ČSN EN IEC 60068-2-5 ed. 2

Pro zkušební metody Sa jsou jako vhodné zdroje simulovaného slunečního záření uvedeny xenonové obloukové lampy, halogenidové výbojky, fluorescenční lampy nebo elektroluminiscenční diody LED. Oproti tomu pro zkušební metody Sb jsou jako vhodné zdroje záření uvedeny jen xenonové obloukové lampy nebo UV fluorescenční lampy. [112] Norma ČSN EN IEC 60068-2-5 ed. 2 uvádí, že v případě, že spektrum zdroje záření neodpovídá spektru v Tabulka 4, je zapotřebí změřit spektrální absorpci materiálu a spektrální ozáření zdroje záření (od 300 nm do 3 000 nm), pro prostorový úhel 2π sr nad povrchem vzorku a patřičně tak zdroj specifikovat. [112]

Pro získání optimální shody simulovaného záření se spektrem slunečního záření je někdy zapotřebí využití filtrů, a to zejména skleněných. Jejich výběr se často řídí metodou pokusu a omylu, přičemž je také důležité si uvědomit, že některé filtry po vystavení UV záření mohou degradovat (zejména IR filtry) a je s tím tedy zapotřebí při návrhu počítat. Se shodou spektra také souvisí rovnoměrnost ozáření, jež by měla být co největší na dané testovací ploše. Norma doporučuje pro zvýšení rovnoměrnosti ozáření použití parabolických reflektorů či využití většího počtu světelných zdrojů. [112]

ČSN EN IEC 60904-9 ed.2

Dalším užitečným materiálem k tomuto tématu může posloužit norma ČSN EN IEC 60904-9 ed. 2 [113], jež se zabývá klasifikací charakteristik solárních simulátorů pro fotovoltaické součástky. Uvedená norma hodnotí spektrální shodu, prostorovou nerovnoměrnost a časovou nestabilitu záření solárního simulátoru. Na základě výsledků hodnocení jsou simulátory rozřazeny do čtyř tříd: A+, A, B, C (A+ nejlepší výsledky), v rámci každého kritéria (viz Tabulka 6).

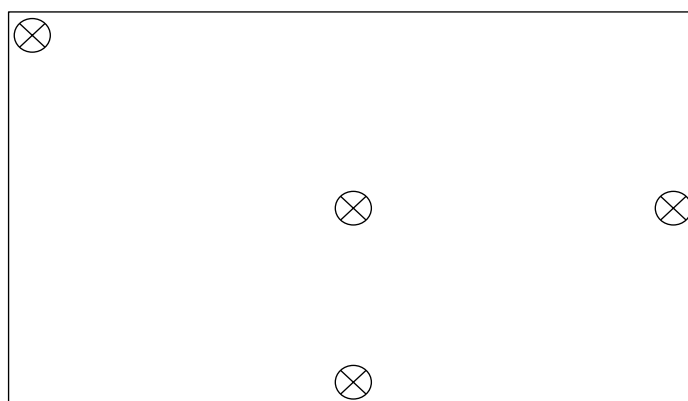
4 NÁVRH ZAŘÍZENÍ PRO LABORATORNÍ STÁRNUTÍ SIMULOVANÝM SLUNEČNÍM ZÁŘENÍ

Tabulka 6 Definice tříd solárních simulátorů dle ČSN EN IEC 60904-9 ed. 2, převzato z [113]

Třída	Spektrální shoda se všemi spektrálními intervaly uvedenými v normě	Prostorová nerovnoměrnost E (%)	Časová nestabilita E	
			Krátkodobá nestabilita záření (%)	Dlouhodobá nestabilita záření (%)
A+	0,875–1,125	1	0,25	1,00
A	0,750–1,250	2	0,50	2,00
B	0,600–1,400	5	2,00	5,00
C	0,400–2,000	10	10,00	10,00

Klasifikace a hodnocení solárních simulátorů dle ČSN EN IEC 60904-9 ed. 2

Spektrální intenzita záření by se dle normy ČSN EN IEC 60068-2-5 ed. 2 měla měřit nejméně ve čtyřech různých bodech testovací plochy (viz Obr. 16), čímž je následně možné vyhodnotit prostorovou nerovnoměrnost záření. Spektrální intenzitu záření je zapotřebí změřit s minimálním intervalem 10 nm v pásmu 300 nm až 1200 nm. Aby bylo možné ověřit správné procentuální rozložení spektrální intenzity záření, tak se změřená data dále integrují a dopočítá se procentuální zastoupení částí spektra, viz Tabulka 7. Výsledná spektrální shoda jednotlivých pásem je poměrem mezi vypočítaným a referenčním (AM1.5) procentuálním zastoupením pásem vlnových délek. Nakonec se dle Tabulka 5 určí třída zařízení z hlediska spektrální shody. [113]



Obr. 16 Měřící body spektrální intenzity záření na pravouhlé podložce, překresleno z [113]

Tabulka 7 Globální referenční rozložení sluneční spektrální intenzity záření AM1.5G dle IEC 60904, převzato z [113]

Šířka pásma (nm)	Podíl z celkové E (%)	Kumulativní podíl z celkové E (%)
300–470	16,61	16,61
470–561	16,74	33,35
561–657	16,67	50,02
657–772	16,63	66,65
772–919	16,66	83,31
919–1200	16,69	100,00

Vzorec pro výpočet prostorové nerovnoměrnosti E dopadající na testovací plochu:

$$\text{Nerovnoměrnost} = \left(\frac{E_{max} - E_{min}}{E_{max} + E_{min}} \right) \cdot 100 (\%), \quad (4.1)$$

kde maximální a minimální intenzity záření jsou hodnoty naměřené na určené testovací ploše, v předem stanovených bodech.

Vzorec pro výpočet časové nestability intenzity záření působící na testovací plochu:

$$\text{Časová nestabilita} = \left(\frac{E_{max} - E_{min}}{E_{max} + E_{min}} \right) \cdot 100 (\%), \quad (4.2)$$

kde maximální a minimální intenzita záření je měřena v příslušném časovém intervalu. [113]

4.3 Požadované parametry navrhovaného solárního simulátoru

Výchozí technickou normou pro návrh zařízení určeného k simulaci slunečního záření za účelem stárnutí vzorků (v tomto případě solárních článků) byla uvažována norma ČSN EN IEC 60068-2-5 ed. 2. Cílové hodnoty spektrální ozářenosti, kterých byla během návrhu snaha dosáhnout, byly tedy stanoveny dle Tabulka 4, s tím že celková intenzita záření E by optimálně měla dosahovat 1090 ($1 \pm 10 \%$) W/m².

Na základě provedené rešerše byly jako optimální zdroj k simulaci slunečního záření vybrány LED diody. U LED diod je výhodou především jejich nízká spotřeba energie, možnost úpravy a kalibrace výsledného spektra, rychlé spínání, dlouhá životnost a malé rozměry. Na druhou stranu nevýhodou je jejich úzké spektrum, s čímž souvisí i nutnost použití několika LED zdrojů, což může v některých případech znamenat vyšší desítky LED diod, čímž se značně prodražuje celá konstrukce a zároveň i složitost návrhu. Dále je také důležité zohlednit, že finální charakter záření bude významně ovlivněn rozmístěním LED

diod, což může vést k výrazné nehomogenitě. Proto je nezbytné již ve fázi návrhu minimalizovat potenciální nehomogenitu dopadajícího záření a případně ji dále redukovat použitím optických difuzorů.

Co se týče konstrukce solárního simulátoru, jako nejvhodnější řešení byla vybrána podoba ve tvaru kvádrů se čtyřmi hliníkovými profily, kde v dolní části je umístěna testovací plocha a v horní části světelné zdroje s řízením a napájením. Takováto konstrukce byla zvolena v několika nalezených publikacích [114], [115], [116], ale i komerčních produktech [117], [118] a její výhodou je především její modulárnost. Ta umožňuje např. nastavení výšky zdrojů světla od podložky, respektive od testovaného vzorku⁶ nebo možnost budoucí integrace různých optických filtrů a čoček. Při určování velikosti plochy pro testování vzorků se vycházelo především z rozměrů solárních modulů a zároveň se přihlíželo i k celkové ekonomičnosti navrhovaného zařízení. Plocha o rozměrech 200 mm x 200 mm byla tak vyhodnocena jako optimální, a to i z hlediska kompaktnosti, kdy tyto rozměry umožňují i případné umístění zařízení do klimatických komor pro přesnou regulaci teploty a relativní vlhkosti okolního prostředí.

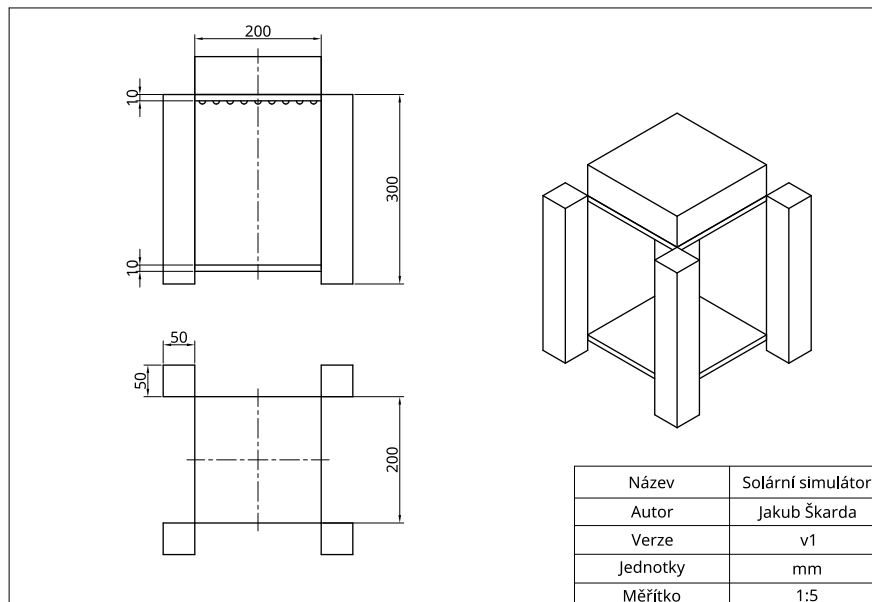
Shrnutí požadovaných parametrů:

- Spektrální ozáření dle ČSN EN IEC 60068-2-5 ed. 2, viz Tabulka 4.
- Průměrná intenzita záření E rovna 1090 ($1 \pm 10\%$) W/m².
- Testovací plocha 200 mm x 200 mm.
- Vzdálenost LED diod od testovací plochy v intervalu od 100 mm do 250 mm.
- Minimalizace nehomogenity intenzity záření rozmístěním LED diod.

⁶ Dle ČSN EN IEC 60068-2-5 ed. 2 musí být testovaný vzorek umístěn na vyvýšené podpěře [112].

4.4 Návrh a simulace optické části solárního simulátoru

Ze všeho nejdříve byla pro zvolení vhodné koncepce optické simulace navržena základní mechanická konstrukce solárního simulátoru, viz Obr. 17 níže.



Obr. 17 Základní mechanická konstrukce solárního simulátoru

Dále pro dosažení požadovaných parametrů navrhovaného solárního simulátoru, včetně výběru a rozmístění LED diod, byl pro optickou simulaci vybrán počítačový program SPEOS od společnosti Ansys. Tento přístup umožnil integrovat teoretický design s praktickým vývojem a zefektivnil celý proces návrhu.

V rámci optické simulace bylo nejprve navrženo uspořádání LED diod ve formátu čtvercového rastru 9 x 9, pokrývající plochu 200 mm x 200 mm. Detailní rozměrové uspořádání tohoto výchozího rastru je zobrazeno v Příloha 4. Pro zjednodušení a snazší realizaci změn v rámci návrhového procesu byly všechny LED diody reprezentovány polokoulemi o stejném poloměru 1,8 mm, což odpovídá poloměru čočky největší použité LED diody. Následně byl všem geometrickým objektům přiřazen v programu neprůhledný a opticky leštěný materiál⁷.

⁷ Optické leštění je výrobní technika využívaná u vysoce přesných mechanických a optických součástí, u nichž je požadován velice hladký povrch a minimální množství defektů [129].

V sekci optická simulace programu SPEOS byly nejprve jednotlivé světelné zdroje přiřazeny příslušné geometrii. Většina světelných zdrojů byla definována souborem paprsků vyzařovaného spektra (prostřednictvím tzv. rayfile souboru od výrobce⁸), který specifikuje jejich zářivý tok Φ_e a spektrum. Pouze LED diody s nejméně vlnovou délkou (310 nm), u kterých výrobce tento soubor neuvádí, byly definovány pomocí tzv. povrchové zdroje, kde se definuje zářivý tok, úhel vyzařování a hlavní vlnová délka dle katalogového listu. Následně byly přidány dva páry senzorů intenzity záření (anglicky irradiance sensor), každý pár pro jinou vzdálenost od světelných zdrojů. Jeden senzor v páru byl nastaven pro radiometrické měření a druhý byl nastaven pro měření spektra. Níže je uvedeno nastavení senzorů.

Radiometrický senzor:

- Vzdálenost od světelných zdrojů 200 mm a 100 mm.
- Měřicí plocha 10 000 mm² a 40 000 mm².
- Rozlišení v ose x a y 10 mm (variační koeficient standardní odchylky do 10 %).

Spektrální senzor:

- Vzdálenost od světelných zdrojů 200 mm a 100 mm.
- Měřicí plocha 10 000 mm² a 40 000 mm².
- Rozlišení v ose x a y 10 mm.
- Spektrální rozsah měření 250–2 450 nm s rozlišením 1 nm.

⁸ Jedním z mála výrobců, který rayfile soubory poskytuje je OSRAM, a to prostřednictvím webové aplikace zvané „LED Information Base“ [130].

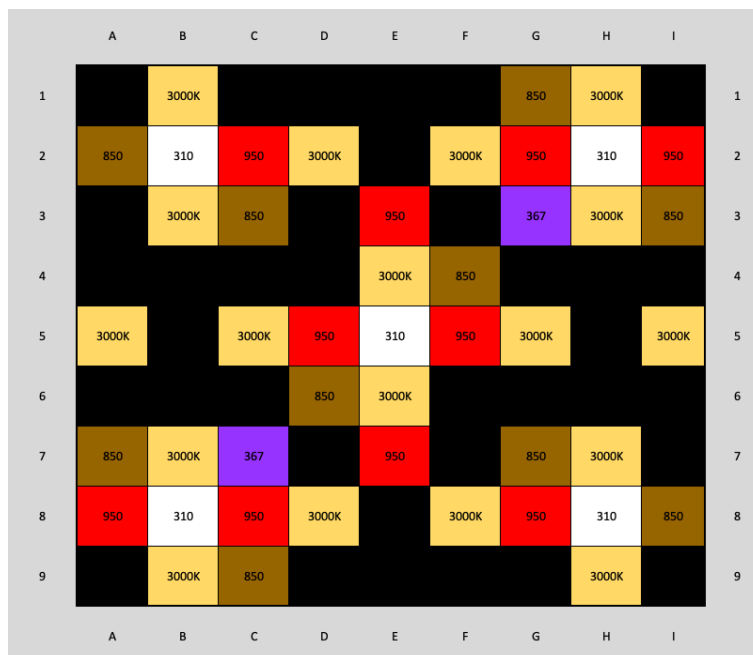
4 NÁVRH ZAŘÍZENÍ PRO LABORATORNÍ STÁRNUTÍ SIMULOVANÝM SLUNEČNÍM ZÁŘENÍ

V dalším kroku byla realizována samotná optická simulace, v rámci které se nejdříve porovnávali jednotlivé kombinace LED diod a jejich rozmístění z hlediska požadovaných parametrů (spektrální ozáření, intenzity záření a nehomogenity). Jelikož rayfile soubory poskytují přesnější parametry pro optickou simulaci, byly voleny takové produkty, které mají tyto soubory dostupné. Prvotní návrhy byly inspirovány z hlediska počtu a typu LED diod publikacemi [115], [116] (10–14 různých typů LED diod o celkovém počtu až 71 ks). Avšak vzhledem ke složitosti a přílišným možnostem kombinací rozmístění bylo od použití takového množství LED diod nakonec ustoupeno. Počet LED diod byl tak omezen na nezbytné minimum, aby bylo možné splnit nebo se alespoň co nejvíce přiblížit stanoveným požadavkům. Schématické rozmístění LED diod první prototypové verze a finální verze je zobrazeno na Obr. 18 a Obr. 19 níže.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	
1	4000K	730	470		4000K		470	505	4000K	1
2	505	3000K	367				367	3000K	850	2
3	470	950	4000K	657	470	730	4000K	950	470	3
4	657		850	3000K	367	505	657		730	4
5	4000K	367	470	950		950	470	367	4000K	5
6	730		657	505	367	3000K	850		657	6
7	470	950	4000K	730	470	657	4000K	950	470	7
8	850	3000K	367				367	3000K	505	8
9	4000K	505	470		4000K		470	730	4000K	9
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	

Obr. 18 Schématické rozmístění LED diod první prototypové verze
(Značení LED diod definuje jejich vlnovou délku v nm, potažmo teplotu chromatičnosti)

4 NÁVRH ZAŘÍZENÍ PRO LABORATORNÍ STÁRNUTÍ SIMULOVANÝM SLUNEČNÍM ZÁŘENÍ



Obr. 19 Schématické rozmístění LED diod finální verze simulace
(Značení LED diod definuje jejich vlnovou délku v nm, potažmo teplotu chromatičnosti)

Optimální vzdálenost mezi optickými senzory a světelnými zdroji byla nakonec stanovena na 100 mm. Toto uspořádání umožnilo co nejvíce se přiblížit průměrné intenzitě záření 1090 W/m², viz Tabulka 8, kde jsou porovnány intenzity záření finální verze se senzorem ve vzdálenosti 100 mm a 200 mm a s požadavky normy ČSN EN IEC 60068-2-5 ed. 2.

Tabulka 8 Porovnání intenzit záření finální verze optické simulace s normou

Vzdálenost senzoru			E_{\varnothing} (W/m ²)	E_{MIN} (W/m ²)	E_{MAX} (W/m ²)
	ČSN EN IEC 60068-2-5 ed. 2		1090	981	1199
100 mm (finální verze)	Měřicí plocha	40 000 mm ²	930,25	432,61	1 373,16
		10 000 mm ²	1 237,57	1 003,29	1 373,16
200 mm		40 000 mm ²	482,15	316,30	617,03
		10 000 mm ²	574,07	507,63	617,03

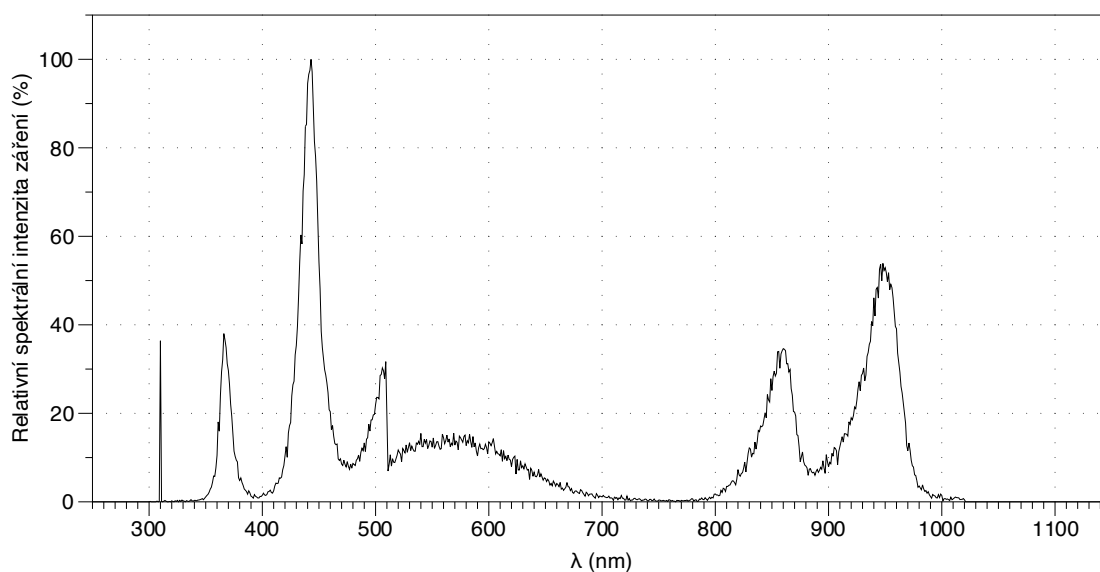
Postupným zkoušením variant s různými LED diodami byly vybrány LED diody pro finální návrh, jejichž specifikace jsou uvedeny v Příloha 7. Následně bylo simulováno několik variant rozmístění, ze kterých vzešla finální verze simulace (viz Obr. 19), jejíž výsledné spektrální ozáření je porovnáno s normou ČSN EN IEC 60068-2-5 ed. 2 níže v Tabulka 9.

4 NÁVRH ZAŘÍZENÍ PRO LABORATORNÍ STÁRNUTÍ SIMULOVANÝM SLUNEČNÍM ZÁŘENÍ

Tabulka 9 Porovnání výstupů finální verze optické simulace s požadavky spektrální ozáření

	Spektrální oblast	UVB	UVA	Viditelná	IR
ČSN EN IEC 60068-2-5 ed. 2	Šířka pásma (nm)	300–320	320–400	400–800	800–2 450
	Přibližný podíl z celkové E (%)	0,40	6,40	55,40	37,80
	Min. úroveň E (%)	0,30	4,20	43,80	33,70
	Max. úroveň E (%)	0,70	7,40	57,00	50,50
	E (W/m ²)	4,06	70,50	604,20	411,20
Optická simulace	Podíl z celkové E (%)	0,43	5,98	52,94	40,65
	Odchylka podílu z celkové E od normy (%)	0,03	-0,42	-2,46	2,85
	E_{\varnothing} (W/m ²)	4,04	55,59	492,49	378,12
	Odchylka E od normy (W/m ²)	-0,02	-14,91	-111,71	-33,08

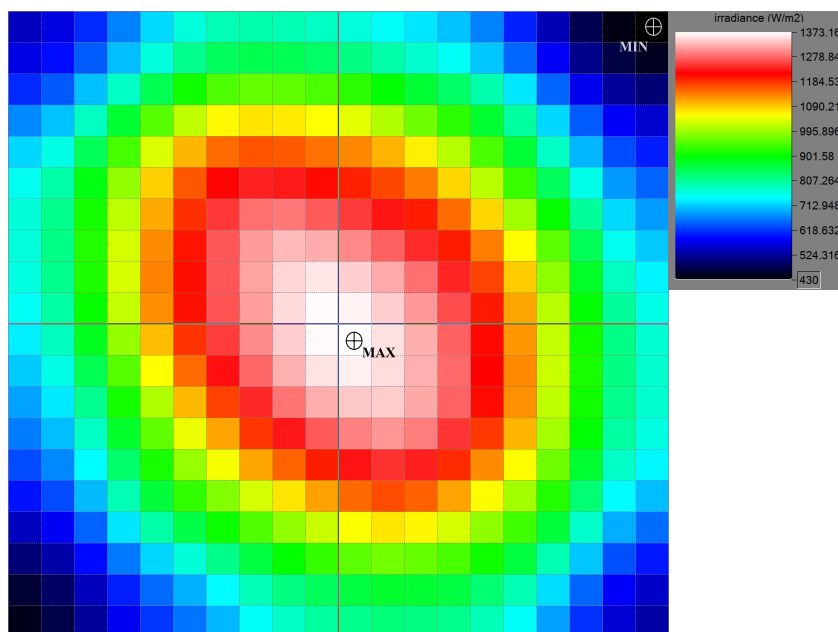
Z údajů prezentovaných v Tabulka 9 vyplývá, že hodnoty spektrální ozáření (podíl z celkové E) finální konfigurace optické simulace jsou v souladu s limitními hodnotami stanovenými příslušnou technickou normou. Největší relativní odchylky byly zaznamenány v infračervené a viditelné části spektra. Pokud jde o intenzitu záření E , ve všech případech byly zjištěné hodnoty nižší než hodnoty specifikované v normě. Z tohoto hlediska solární simulátor uvedenou technickou normu nesplňuje, viz Tabulka 8. Pro lepší ilustraci je dále přiložen Graf 1, který vizualizuje výsledné spektrum solárního simulátoru získané pomocí optické simulace.



Graf 1 Výsledné spektrum finální verze optické simulace

4 NÁVRH ZAŘÍZENÍ PRO LABORATORNÍ STÁRNUTÍ SIMULOVANÝM SLUNEČNÍM ZÁŘENÍ

Z hlediska homogenity intenzity záření se nepodařilo dosáhnout jejího optimálního rozložení na testovací ploše, viz Graf 2 a Tabulka 8. Pro budoucí zlepšení by tak bylo vhodné zvážit implementaci odpovídajícího optického filtru, například světelného difuzoru.



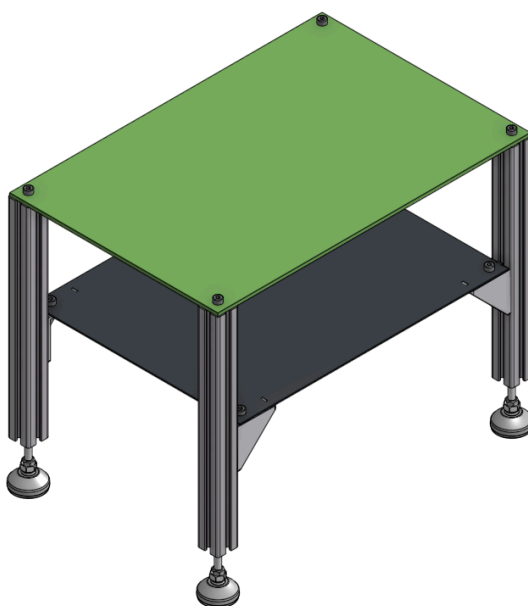
Graf 2 Rozložení intenzity záření E na ploše 40 000 mm² (100 mm od světelných zdrojů)

Rekapitulace finální verze optické simulace:

- Vzdálenost LED diod od testovací plochy 100 mm.
- Testovací plocha 200 mm x 200 mm.
- Rozmístění LED diod viz Obr. 19.
- Použité LED diody dle Příloha 7.

4.5 Konstrukce a elektrické schéma solárního simulátoru

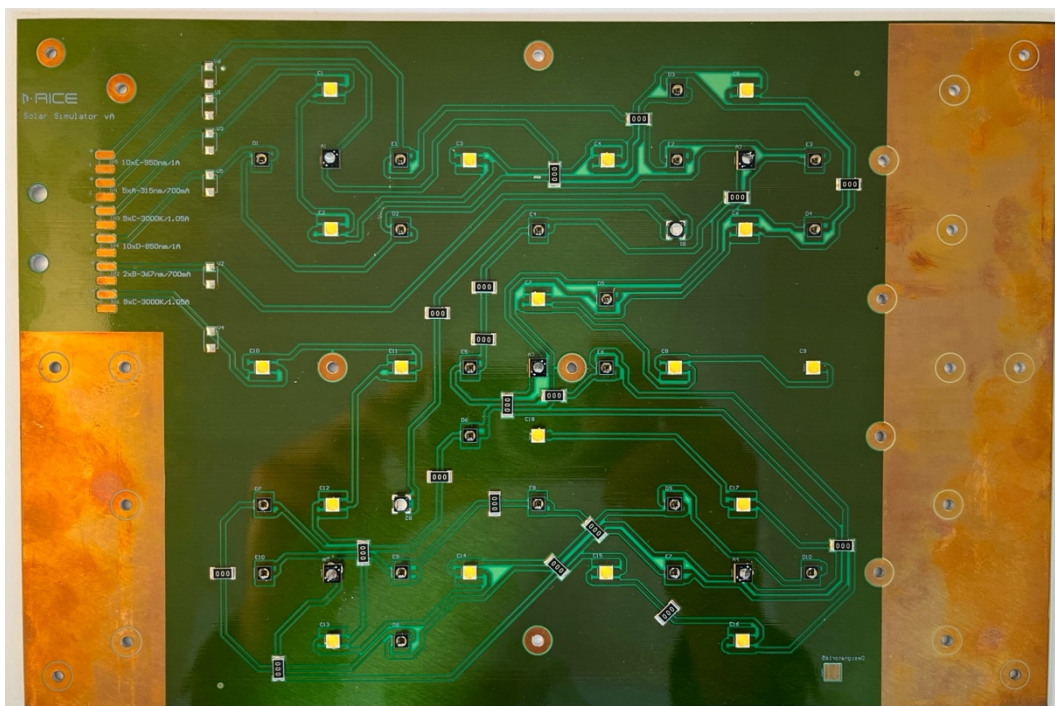
Mechanická konstrukce vycházející z prvotního návrhu (viz Obr. 17) byla navržena pomocí CAD softwaru OnShape. Základem celé konstrukce byl zvolen hliníkový konstrukční systém od společnosti ALUTEK KK s.r.o.. Testovací plocha byla vyrobena z 3 mm tlusté nerezové oceli (λ_T cca $26,1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ a c cca $460 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}$ [119]), na níž byla nanesena černá matná barva, tak aby co nejméně odrazela dopadající záření a zároveň co nejvíce odpovídala specifikacím pro senzor černého panelu (viz str. 33). Pro zajištění vodorovného umístění se konstrukce nakonec opatřila stavěcími patkami. Výsledný model konstrukce je uveden na Obr. 20 níže. Fotografie sestaveného solárního simulátoru je uvedena v Příloha 9.



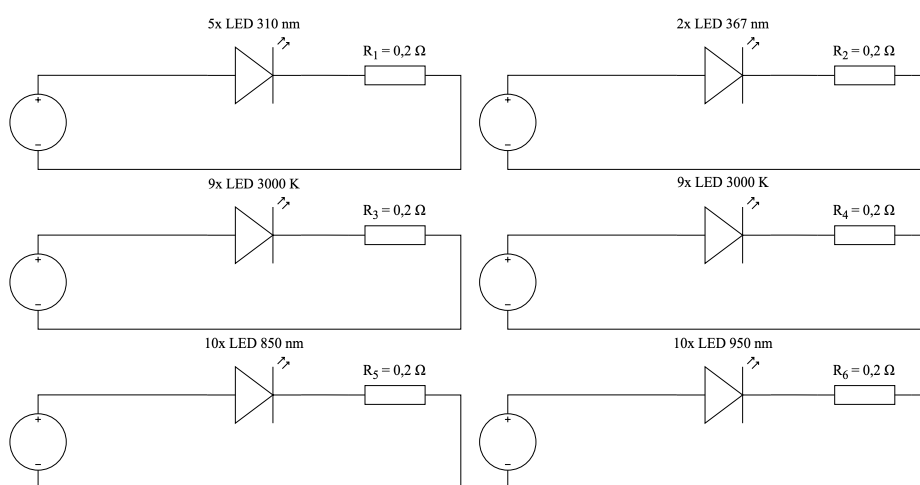
Obr. 20 Finální mechanická konstrukce solárního simulátoru

Návrh DPS (viz Obr. 21), elektronického obvodu a napájení nebyl součástí této diplomové práce. Všechny LED diody stejného typu byly zapojeny v sérii spolu se snímacím odporem o $0,2 \Omega$, aby bylo případně možné ověřit nastavení protékajícího elektrického proudu ve větvi. Pouze LED diody s teplotou chromatičnosti 3000 K byly kvůli svému velkému počtu a příkonu rozděleny do dvou samostatných větví, viz Obr. 22. Za účelem následného testování fotovoltaických modulů byly jednotlivé sériové větve s LED diodami napájeny 6 samostatnými laboratorními DC zdroji. V budoucnu však bude každá větev doplněna o DC/DC měniče RCDE-48-1.05 a jeden společný AC/DC napájecí zdroj. Pro zajištění efektivního odvodu tepla byla DPS ještě osazena hliníkovým chladičem (za pomoci teplovodivé pasty) a axiálním ventilátorem (viz Příloha 9).

4 NÁVRH ZAŘÍZENÍ PRO LABORATORNÍ STÁRNUTÍ SIMULOVANÝM SLUNEČNÍM ZÁŘENÍ



Obr. 21 Zhotovená DPS solárního simulátoru



Obr. 22 Schéma elektrického obvodu zapojení LED diod solárního simulátoru

5 Vliv simulovaného slunečního záření a ΔT na vybrané flexibilní solární moduly

Tato část diplomové práce se věnuje vlivu simulovaného slunečního záření a změn teploty na elektrické parametry vybraných komerčně dostupných flexibilních solárních modulů. Simulované sluneční záření je zajištěno pomocí navrženého solárního simulátoru a změny teploty jsou způsobeny změnou okolního prostředí.

5.1 Návrh experimentu

Výběr vhodných flexibilních solárních modulů

Na základě dříve provedené rešerše komerčně dostupných flexibilních solárních modulů, byly pro účel experimentu vybrána následující flexibilní fotovoltaická zařízení:

- MPT3.6-75 – Classic Series od společnosti Power Film,
- LL200-4.8-37 – Indoor Series od společnosti Power Film,
- BCSC491B6 od společnosti TDK corporation,
- LAYER od společnosti Dracula Technologies.

Parametry vybraných zařízení jsou uvedeny v Příloha 1 až Příloha 3.

Tato zařízení byla vybrána zejména na základě jejich geometrických rozměrů tak, aby je bylo možné umístit na testovací plochu (200 mm x 200 mm) navrženého solárního simulátoru. Dále bylo v rámci výběru přihlíženo také na technologii solárních článků, jejich dostupnost a potenciální uplatnění v chytrých textiliích. Výše uvedené první tři zařízení jsou založená na a-Si:H a poslední článek je organického typu. Vhodní zástupci ostatních technologií nebyly bohužel nalezeni.

Cílem experimentu je kvantifikovat vliv simulovaného slunečního záření a teplotních změn na elektrické parametry vybraných typů komerčně dostupných flexibilních solárních modulů. Tento experiment by měl pomoci odhalit degradace a ověřit stabilitu testovaných modulů. Dále by jeho výstupy mohly sloužit k identifikaci optimálních podmínek pro využití těchto zařízení a přispět k lepšímu porozumění jejich chování v reálných provozních scénářích. Pro dané experimentální účely byly tak vybrané flexibilní solární moduly (zatížené jmenovitou zátěží) exponovány v solárním simulátoru po dobu 14 dnů. Během této doby byly pravidelně monitorovány elektrické výstupní parametry a přibližná teplota modulů. Zmíněná doba expozice byla považována za adekvátní k pozorování změn vlastností modulů, zejména vzhledem k jejich designu pro nižší intenzity záření.

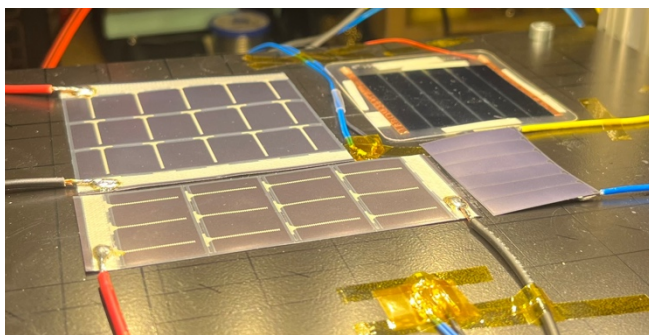
Před zahájením měření byl solární simulátor osazen sadou odporových teplotních senzorů Pt1000. Hlavní senzor teploty byl umístěn do středu testovací plochy, pod testovaný modul, tak aby se hodnota co nejvíce blížila teplotě přechodu. Druhý senzor byl pro ověření umístěn na kraj testovací plochy a zbylé dva byly umístěny na DPS pro kontrolu teploty LED diod. Následně byla pomocí sady reostatů a solárního simulátoru pro každý flexibilní modul proměřena VA charakteristika⁹. Nakonec byly dle zjištěných MPP (bodů maximálního výkonu) určeny zátěže pro pracovní body dlouhodobého měření.

Všechny vybrané flexibilní moduly byly v rámci dlouhodobého měření exponovány v solárním simulátoru najednou (viz Obr. 23), což umožnilo efektivnější využití času. Spektrální nerovnoměrnost záření a nerovnoměrnost intenzity záření solárního simulátoru byly pro účel experimentu zanedbány. Hlavní sledované parametry testovaných modulů – teplota pod jedním z modulů, elektrické napětí a elektrický proud byly zaznamenávány v 5minutových intervalech pomocí dvou měřících karet Keithley 7702 a digitálního multimetru Keithley DAQ6510 pro sběr dat. Zjednodušený měřicí obvod pro dlouhodobé testování je znázorněn na Obr. 24 a hodnoty použitých odporových zátěží testovaných modulů jsou uvedeny v Tabulka 10. Teplota prostředí během experimentu nebyla cíleně řízena a odvíjela se pouze od dopadajícího záření a teploty v laboratoři. Během experimentu byla teplota pod modulem převážně v intervalu 60–70 °C. Tyto teploty mírně překračují provozní teplotní rozsah některých testovaných vzorků, čímž bylo podpořeno jejich případné stárnutí. Před zahájením dlouhodobého měření bylo nezbytné zajistit stabilizaci teploty flexibilních modulů, díky které došlo k normalizaci jejich výstupních parametrů. Nakonec po ukončení dlouhodobého měření, byly pro porovnání znovu změřeny VA charakteristiky jednotlivých testovaných vzorků.

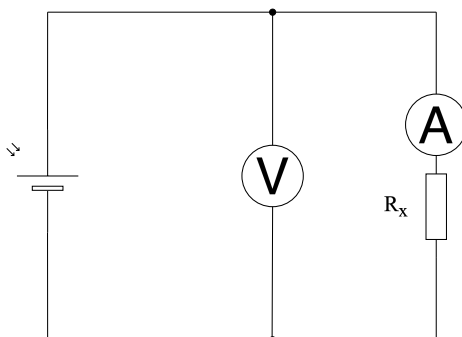
⁹ Pro minimalizaci vlivu teploty na VA charakteristiky byl solární simulátor v oblasti testovací plochy dodatečně opatřen ventilátorem. Před samotným měřením VA charakteristiky se zároveň nechala ustálit teplota modulu po dobu 15 min.

Shrnutí parametrů experimentu

- Doba expozice – 14 dní,
- Měření U a I jednotlivých flexibilních modulů,
- Měření T ve výše specifikovaných bodech,
- Měřicí interval 5 min,
- Bez teplotní regulace – T dle vnějšího prostředí,
- Změření VA charakteristik před a po experimentu.



Obr. 23 Rozmístění vybraných flexibilních solárních modulů v solárním simulátoru pro dlouhodobé měření



Obr. 24 Zjednodušené schéma měřicího obvodu pro dlouhodobé měření

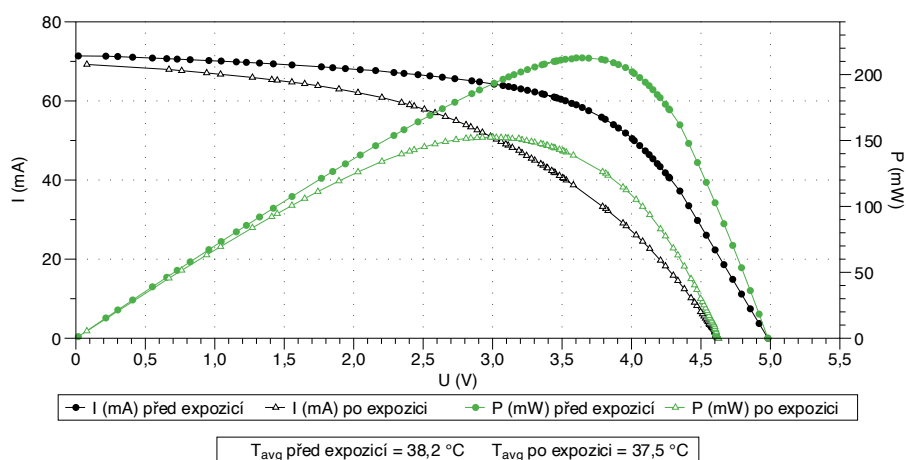
Tabulka 10 Hodnoty odporových zátěží pro dlouhodobé měření vybraných flexibilních solárních modulů

Flexibilní solární modul	MPT3.6-75	LL200-4.8-37	BCSC491B6	LAYER
R pro pracovní bod	$66 \Omega \pm 5 \%$	$200 \Omega \pm 5 \%$	$1,8 \text{ k}\Omega \pm 5 \%$	$150 \Omega \pm 5 \%$

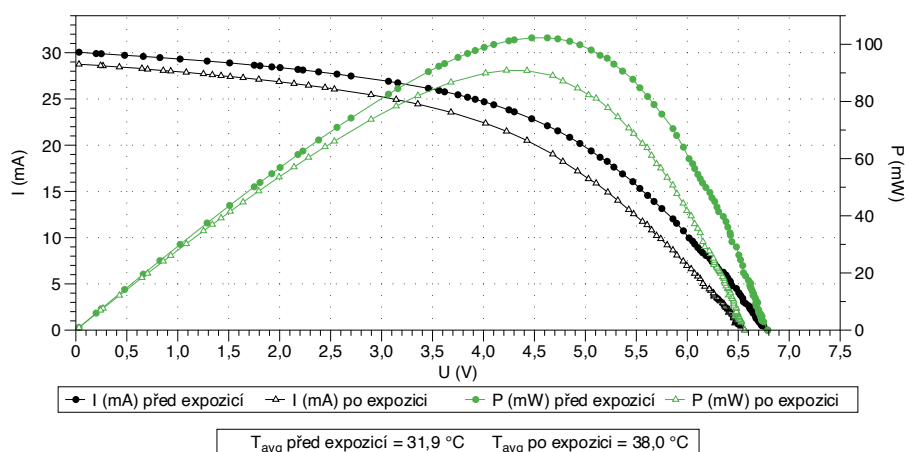
5.2 Vyhodnocení výsledků experimentu

VA a výkonové charakteristiky

Na níže přiložených grafech (Graf 3 až Graf 6) jsou prezentovány VA, respektive výkonové charakteristiky testovaných vzorků před a po expozici v solárním simulátoru. Je důležité si uvědomit, že měření bylo prováděno za různých teplotních podmínek, což vedlo k významnému posunu těchto charakteristik. Dále nelze vyloučit možný pokles intenzity záření solárního simulátoru v průběhu dlouhodobého měření. Tyto faktory mohly více či méně ovlivnit zaznamenané průběhy, proto jsou charakteristiky testovaných vzorků prezentovány primárně k poskytnutí základní orientace v jejich elektrických vlastnostech.

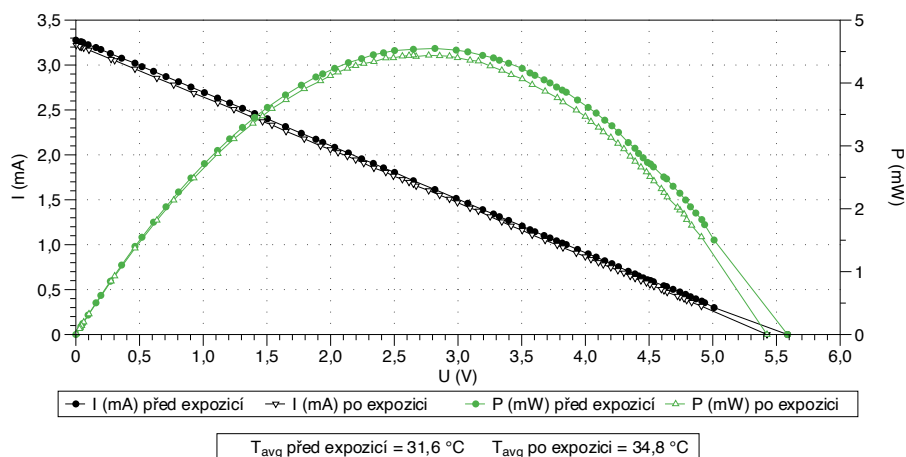


Graf 3 VA a výkonová charakteristika testovaného vzorku MPT3.6-75 před a po expozici

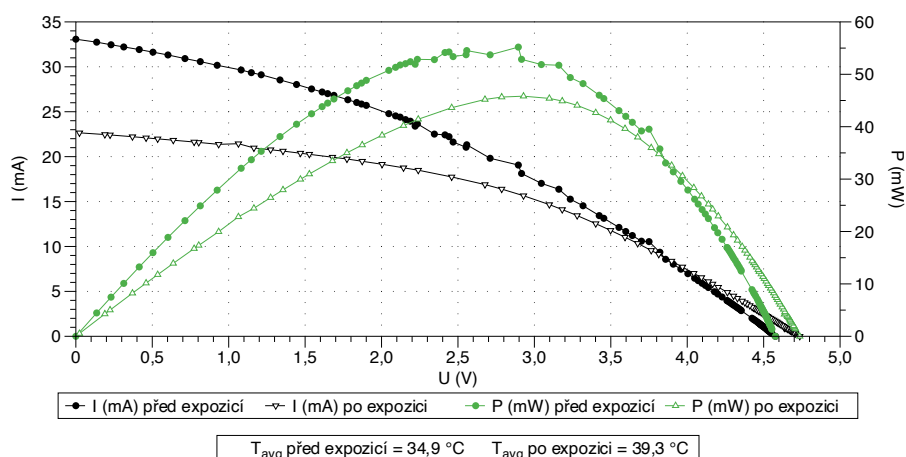


Graf 4 VA a výkonová charakteristika testovaného vzorku LL200-4.8-37 před a po expozici

5 VLIV SIMULOVANÉHO SLUNEČNÍHO ZÁŘENÍ A T NA VYBRANÉ FLEXIBILNÍ SOLÁRNÍ MODULY



Graf 5 VA a výkonová charakteristika testovaného vzorku BCSC491B6 před a po expozici



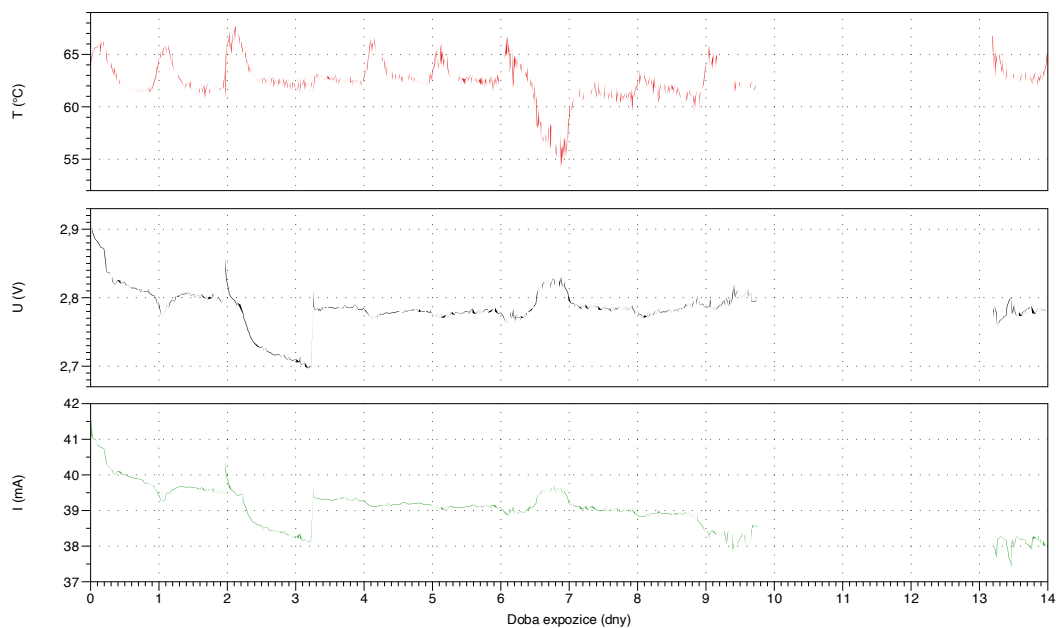
Graf 6 VA a výkonová charakteristika testovaného vzorku LAYER před a po expozici

Vzhledem k faktu, že testované vzorky nemají v katalogových listech uvedeny teplotní koeficienty elektrických parametrů, nelze z výše uvedených charakteristiky jednoznačně usoudit, jaký měla odlišná teplota během měření vliv na jejich průběh. Dle zdroje [14] jsou obecně tenkovrstvé solární články nebo moduly méně ovlivněny teplotou než konvenční monokrystalická zařízení. Přičemž platí, že zejména výstupní elektrické napětí je parametrem, který je teplotou nejvíce ovlivňován. Vzhledem k tomu, že testované vzorky MPT3.6-75 a LL200-4.8-37 jsou od stejného výrobce a pravděpodobně se liší pouze způsobem zapouzdření, respektive odolností a geometrickými rozměry, lze dle tvaru charakteristik (viz Graf 3 a Graf 4) konstatovat, že po dlouhodobé expozici pravděpodobně došlo k relativně větší degradaci vzorku MPT3.6-75. Tuto hypotézu podporuje i téměř stejná teplota pod modulem MPT3.6-75 během obou měření. Z Graf 5, pro testovaný vzorek

BCSC491B6, je zase patrné, že VA charakteristika má čistě lineární závislost a její průběh se po expozici téměř nezměnil. Teplotní chování organických fotovoltaických zařízení, jako je testovaný vzorek LAYER, je často odlišné od chování technologií zmíněných dříve [9], [14]. V důsledku toho je interpretace dat z Graf 6 nejednoznačná. Výsledné hlavní elektrické parametry všech testovaných vzorků před a po expozici jsou uvedeny v Příloha 11.

Dlouhodobé měření

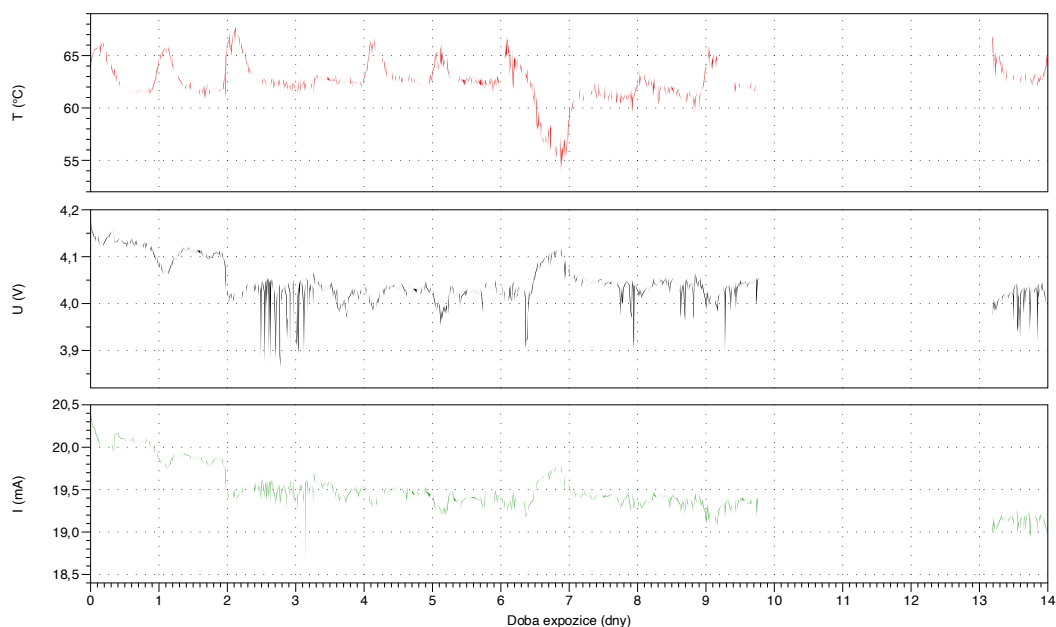
Níže uvedené grafy prezentují naměřené výstupní hodnoty elektrického napětí U , elektrického proudu I a teploty T^{10} testovaných vzorků v závislosti na době expozice. Během experimentu bohužel došlo 9. den v laboratoři k výpadku elektrického proudu, což mělo za následek zastavení záznamu měřených dat. Experiment byl poté obnoven 13. den.



Graf 7 Výstupní naměřené hodnoty U , I a T pro MPT3.6-75 závislé na době expozice

¹⁰ Teplota T představuje vždy teplotu měřenou pod vzorkem LL200-4.8-37, jelikož lze předpokládat, že pod všemi flexibilními moduly bude teplota srovnatelná. Navíc pro následnou interpretaci dat, je pro nás klíčový především její průběh.

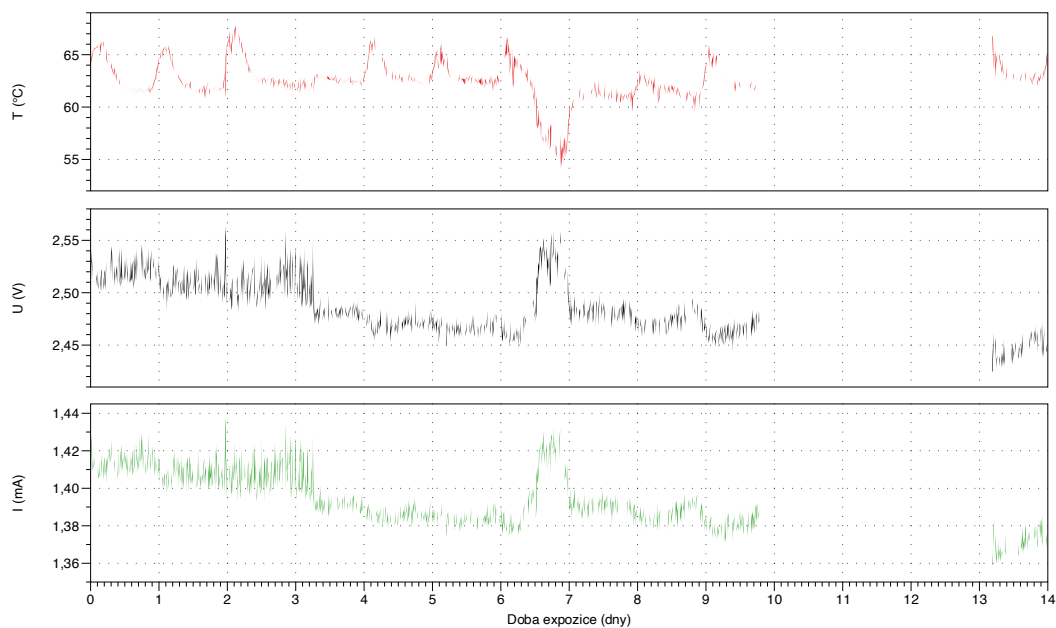
Z Graf 7 je u vzorku MPT3.6-75 patrný relativně velký pokles hodnot U a I v prvních 2 dnech, ve kterých pravděpodobně došlo k degradaci způsobené světlem (LID). LID deklaruje sám výrobce a během prvních 4 dní expozice se výstupní elektrický výkon zařízení může snížit až o 10 % [47]. Z grafu je dále 2. den pozorovatelný strmý pokles U a I a skokový nárůst těchto veličin během 3. dne. Tento jev byl způsoben odlepením vzorku od testovací plochy. Pohlédneme-li na celý průběh doby expozice, je možné pozorovat pozvolný pokles I . Po dlouhodobé expozici byla provedena také vizuální inspekce, na základě které byla odhalena delaminace pouzdrící vrstvy a vnitřní pnutí vzorku (viz Příloha 12). Za tyto defekty pravděpodobně mohlo tepelné namáhání vzorku.



Graf 8 Výstupní naměřené hodnoty U , I a T pro LL200-4.8-37 závislé na době expozice

U vzorku LL200-4.8-37 je na Graf 8 znovu patrný pokles U a I v prvních 2 dnech. Flexibilní solární modul LL200-4.8-37 je od stejného výrobce jako předchozí vzorek MPT3.6-75, a tak se s největší pravděpodobností jedná také o LID. V průběhu 2. dne a začátku 3. dne je na Graf 8 pozorovatelné značné kolísání hodnot U a I , které bylo nejspíše způsobeno zastíněním od odlepeného vzorku MPT3.6-75. Stejně jako u předešlého vzorku je zde možné pozorovat během celkové doby expozice mírně klesající průběh I . V rámci vizuální inspekce nebyly identifikovány žádné viditelné defekty na zkoumaném vzorku.

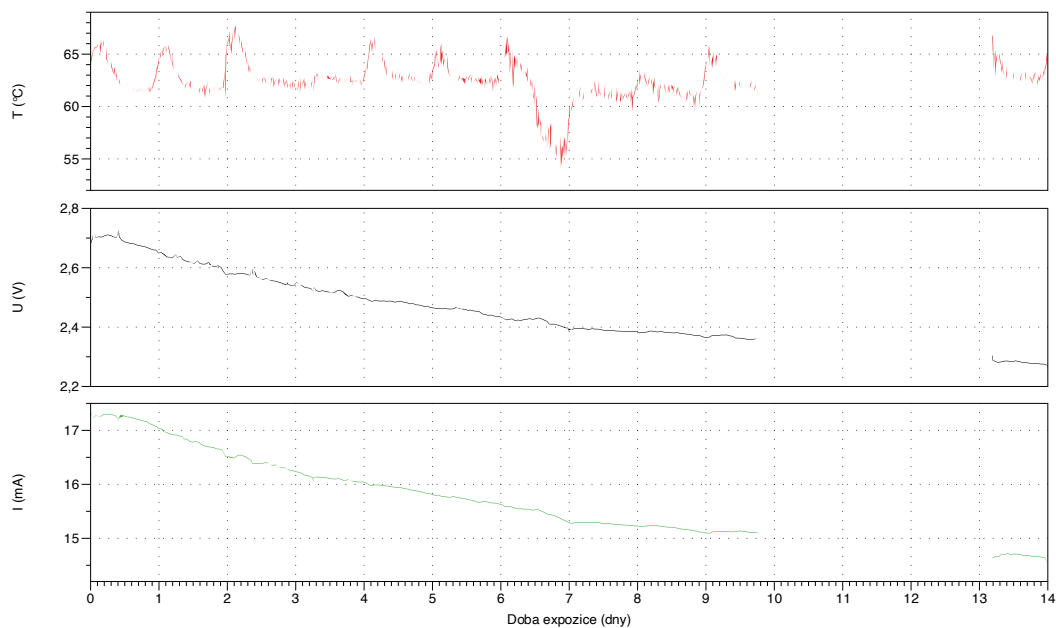
5 VLIV SIMULOVANÉHO SLUNEČNÍHO ZÁŘENÍ A T NA VYBRANÉ FLEXIBILNÍ SOLÁRNÍ MODULY



Graf 9 Výstupní naměřené hodnoty U , I a T pro BCSC491B6 závislé na době expozice

Z Graf 9 pro vzorek BCSC491B6 je patrné značné kolísání U a I během prvních 3 dnů, které bylo pravděpodobně způsobeno nedostatečnou fixací vzorku. Dále byla fixace vylepšena a křivky U a I lépe reflektují změnu T . I v tomto případě je pozorovatelný velice mírně klesající trend U a I . Vizualní inspekci byly rozpoznány mírné změny v odstínu daného flexibilního solárního modulu (viz Příloha 14).

5 VLIV SIMULOVANÉHO SLUNEČNÍHO ZÁŘENÍ A T NA VYBRANÉ FLEXIBILNÍ SOLÁRNÍ MODULY



Graf 10 Výstupní naměřené hodnoty U , I a T pro LAYER závislé na době expozice

Z výše uvedeného Graf 10, kde jsou uvedeny výstupní naměřené hodnoty vzorku LAYER, je patrné, že křivky U a I vykazují jasný klesající trend. Oproti předchozím vzorkům, křivky U a I v tomto případě výrazně nereflktují změnu T . Z toho lze usoudit, že flexibilní solární modul LAYER má výrazně nižší teplotní koeficient výstupních elektrických parametrů. Pomocí vizuální inspekce nebyly nalezeny výrazné změny vzorku, které by mohly mít vliv na jeho funkci.

Zhodnocení a závěr

Tato diplomová práce se zabývala vlivem simulovaného slunečního záření a změn teploty na elektrické parametry vybraných flexibilních solárních modulů. Pro uvedení do tématu byl nejdříve popsán základní princip solárního článku. Následně byly představeny různé technologie FSC, lišící se použitým polovodičovým materiálem. Na tuto část navazovala rešerše komerčně dostupných flexibilních modulů, na základě které byly doporučeny nejvhodnější zařízení pro integraci do chytrých textilií, včetně způsobu integrace a kontaktování. Dále byly popsány také základní metody testování elektrických parametrů FSC.

V praktické části diplomové práce byl na základě rešerše světelných zdrojů a optických simulací navržen, a úspěšně sestaven solární simulátor s testovací plochou 200 mm x 200 mm. Konstrukční specifikace vyzařovaného simulovaného slunečního záření vycházely z technické normy ČSN EN IEC 60068-2-5 ed. 2. Výsledky optické simulace ukázaly, že simulátor splňuje požadavky normy v kontextu procentuální spektrální ozářenosti. Nicméně průměrná intenzita záření a její homogenita na testovací ploše nebyly dle simulace dosaženy. V budoucnu by proto bylo vhodné provést měření parametrů solárního simulátoru, včetně spektrální ozářenosti, intenzity záření a její časové nestability spolu s prostorovou nerovnoměrností. Tím by se ověřila přesnost simulace a zjistily se tak skutečné parametry solárního simulátoru. Vylepšení prostorové nerovnoměrnosti je možné v budoucnu řešit kupříkladu implementací určitého optického filtru, např. světelného difuzoru.

Na závěr byl navržen a realizován experiment dlouhodobého testování vybraných flexibilních solárních modulů. V rámci experimentu byly vzorky (připojené ke jmenovité odporové zátěži) exponovány v solárním simulátoru po dobu 14 dnů. Během experimentu byly zaznamenávány výstupní hodnoty elektrického napětí a elektrického proudu testovaných vzorků, spolu s teplotou pod jedním z nich. V průběhu měření bohužel došlo k přerušení záznamu dat, kvůli výpadku elektrického proudu v laboratoři, a tak nebylo možné vyhodnotit chování vzorků během cca 10. až 12. dne. Před a po expozici vybraných vzorků byly také změřeny jejich VA charakteristiky. Provedený experiment ukázal, že vybrané flexibilní solární moduly vykazují rozdílnou míru degradace a změn elektrických parametrů. Testované vzorky MPT3.6-75 a LL200-4.8-37 od výrobce Power Film vykazovali relativně výrazný pokles napětí a proudu během prvních dvou dnů expozice, což je přičítáno světlem indukované degradaci (LID), jak bylo deklarováno výrobcem. U modulu MPT3.6-75 byla

navíc po vizuální inspekci identifikována delaminace pouzdríci vrstvy a vnitřní pnutí, respektive ohyb vzorku. Vizuální inspekci vzorku BCSC491B6 byly rozpoznány mírné změny v jeho odstínu. Tato degradace však neměla znatelný vliv na jeho lineární VA charakteristiku. Nakonec modul LAYER, na rozdíl od ostatních vzorků, nevykazoval během expozice výraznou změnu elektrických parametrů v závislosti na teplotě, což naznačuje, že pravděpodobně disponuje nižším teplotním koeficientem.

Na základě provedeného testování se z hlediska stability jeví jako nejvhodnější řešení pro využití v chytrých textiliích flexibilní solární modul LL200-4.8-37. Po 14denní expozici tento modul nevykazoval žádné znatelné změny ve tvaru VA charakteristiky a nebyly u něj pozorovány ani žádné vizuálně detekovatelné známky degradace. Na závěr lze konstatovat, že naměřené elektrické veličiny testovaných vzorků, zejména elektrický proud, vykazovaly v závislosti na době expozice klesající trend. Vzhledem k nastavení experimentu a specifikacím solárního simulátoru, však není možné definitivně určit, zda tento trend odpovídá degradaci modulů nebo poklesu světelného výkonu solárního simulátoru. Pro podrobnější analýzu a ověření příčin by bylo vhodné během expozice kontinuálně měřit intenzitu záření, například s využitím referenčního křemíkového článku. Dále by mohlo být užitečné provést experiment vybraných flexibilních modulů po delší dobu a za přesné teplotní regulace. Dlouhodobější a kontrolovaná expozice by umožnila detailněji identifikovat a analyzovat potenciální degradační procesy, které mohou významně ovlivnit elektrické parametry modulů.

Literatura

- [1] „Interactive Best Research-Cell Efficiency Chart | Photovoltaic Research | NREL". Viděno: 16. duben 2024. [Online]. Dostupné z: <https://www.nrel.gov/pv/interactive-cell-efficiency.html>
- [2] M. Aghaei *et al.*, „Review of degradation and failure phenomena in photovoltaic modules", 2022, doi: 10.1016/j.rser.2022.112160.
- [3] S. A. Hashemi, S. Ramakrishna, a A. G. Aberle, „Recent progress in flexible–wearable solar cells for self-powered electronic devices", *Energy Environ Sci*, roč. 13, č. 3, s. 685–743, bře. 2020, doi: 10.1039/C9EE03046H.
- [4] X. Li, P. Li, Z. Wu, D. Luo, H. Y. Yu, a Z. H. Lu, „Review and perspective of materials for flexible solar cells", *Materials Reports: Energy*, roč. 1, č. 1, s. 100001, úno. 2021, doi: 10.1016/J.MATRE.2020.09.001.
- [5] K. Yu, S. Rich, S. Lee, K. Fukuda, T. Yokota, a T. Someya, „Organic Photovoltaics: Toward Self-Powered Wearable Electronics", *Proceedings of the IEEE*, roč. 107, č. 10, s. 2137–2154, říj. 2019, doi: 10.1109/JPROC.2019.2929797.
- [6] C. Liu, C. Xiao, C. Xie, a W. Li, „Flexible organic solar cells: Materials, large-area fabrication techniques and potential applications", *Nano Energy*, roč. 89, s. 106399, lis. 2021, doi: 10.1016/J.NANOEN.2021.106399.
- [7] P. Holzhey, M. Prettl, S. Collavini, N. L. Chang, a M. Saliba, „Toward commercialization with lightweight, flexible perovskite solar cells for residential photovoltaics", *Joule*, roč. 7, č. 2, s. 257–271, úno. 2023, doi: 10.1016/J.JOULE.2022.12.012.
- [8] H. Jinno *et al.*, „Stretchable and waterproof elastomer-coated organic photovoltaics for washable electronic textile applications", *Nat Energy*, roč. 2, č. 10, s. 780–785, říj. 2017, doi: 10.1038/s41560-017-0001-3.
- [9] A. M. Oni, A. S. M. Mohsin, M. M. Rahman, a M. B. Hossain Bhuiyan, „A comprehensive evaluation of solar cell technologies, associated loss mechanisms, and efficiency enhancement strategies for photovoltaic cells", *Energy Reports*, roč. 11, s. 3345–3366, čer. 2024, doi: 10.1016/J.EGYR.2024.03.007.
- [10] S. Qazi, „Standalone Photovoltaic (PV) Systems for Disaster Relief and Remote Areas", *Standalone Photovoltaic (PV) Systems for Disaster Relief and Remote Areas*, s. 1–289, led. 2017, doi: 10.1016/C2014-0-03107-3.

- [11] D. Lincot, „The new paradigm of photovoltaics: From powering satellites to powering humanity“, *C R Phys*, roč. 18, č. 7–8, s. 381–390, zář. 2017, doi: 10.1016/J.CRHY.2017.09.003.
- [12] „This Month in Physics History“. Viděno: 3. duben 2024. [Online]. Dostupné z: <https://www.aps.org/publications/apsnews/200904/physicshistory.cfm>
- [13] S. Gorjian a A. Shukla, *Photovoltaic Solar Energy Conversion: Technologies, Applications and Environmental Impacts*. Elsevier, 2020. doi: 10.1016/C2018-0-05265-2.
- [14] R. Haselhuhn a P. Maule, „Fotovoltaické systémy energetická příručka: pro elektrikáře, techniky, instalatéry, projektanty, architekty, inženýry, energetiky, manažery, stavitele, studenty, učitele, ostatní odborné a profesní soukromé nebo veřejné instituce a zájemce o fotovoltaický obor a energetickou nezávislost“, 1. české vydání., přeložili Anna Roháčová, Pavel Roháč, Anna Ženíšková, Eva Hořejší, Jana Klamo, Jitka Hicková, Veronika Martinovská, a Tomáš Baroch, Ed., Plzeň: Česká fotovoltaická asociace, 2017, s. 2.28-3.51.
- [15] C. B. Honsberg a S. G. Bowden, „Photovoltaics Education Website“. Viděno: 12. duben 2024. [Online]. Dostupné z: <https://www.pveducation.org/>
- [16] A. Augusto, S. Y. Herasimenka, R. R. King, S. G. Bowden, a C. Honsberg, „Analysis of the recombination mechanisms of a silicon solar cell with low bandgap-voltage offset“, *J Appl Phys*, roč. 121, č. 20, s. 205704, kvě. 2017, doi: 10.1063/1.4984071/15193187/205704_1_ACCEPTED_MANUSCRIPT.PDF.
- [17] V. Poulek a M. Libra, „Konstrukce a výroba fotovoltaických článků a panelů“, *Časopis Elektro – Odborné časopisy*, 2010. Viděno: 12. duben 2024. [Online]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/konstrukce-a-vyroba-fotovoltaickych-clanku-a-panelu--10310>
- [18] M. Tao, T. Chen, N. Click, a R. Adcock, „Recent progress and future prospects of silicon solar module recycling“, *Curr Opin Green Sustain Chem*, roč. 44, s. 100863, pro. 2023, doi: 10.1016/J.COGSC.2023.100863.
- [19] B. V. Stefani *et al.*, „Historical market projections and the future of silicon solar cells“, doi: 10.1016/j.joule.2023.11.006.
- [20] V. Benda a L. Černá, „PV cells and modules – State of the art, limits and trends“, *Heliyon*, roč. 6, č. 12, s. e05666, pro. 2020, doi: 10.1016/J.HELIYON.2020.E05666.
- [21] M. Pagliaro, R. Ciriminna, a G. Palmisano, „Flexible solar cells.“, *ChemSusChem*, roč. 1, č. 11, s. 880–891, 2008, doi: 10.1002/CSSC.200800127.

- [22] Y. Li, G. Xu, C. Cui, a Y. Li, „Flexible and Semitransparent Organic Solar Cells", *Adv Energy Mater*, roč. 8, č. 7, s. 1701791, bře. 2018, doi: 10.1002/AENM.201701791.
- [23] R. Aroca-Delgado, J. Pérez-Alonso, Á. J. Callejón-Ferre, a M. Díaz-Pérez, „Morphology, yield and quality of greenhouse tomato cultivation with flexible photovoltaic rooftop panels (Almería-Spain)", *Sci Hortic*, roč. 257, s. 108768, lis. 2019, doi: 10.1016/J.SCIENTA.2019.108768.
- [24] M. Hatamvand *et al.*, „Recent advances in fiber-shaped and planar-shaped textile solar cells", *Nano Energy*, roč. 71, s. 104609, kvě. 2020, doi: 10.1016/J.NANOEN.2020.104609.
- [25] Y. Lu, Z. Lou, K. Jiang, D. Chen, a G. Shen, „Recent progress of self-powered wearable monitoring systems integrated with microsupercapacitors", *Mater Today Nano*, roč. 8, s. 100050, pro. 2019, doi: 10.1016/J.MTNANO.2019.100050.
- [26] A. Maalouf, T. Okoroafor, Z. Jehl, V. Babu, a S. Resalati, „A comprehensive review on life cycle assessment of commercial and emerging thin-film solar cell systems", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, roč. 186, s. 113652, říj. 2023, doi: 10.1016/J.RSER.2023.113652.
- [27] T. Ibn-Mohammed *et al.*, „Perovskite solar cells: An integrated hybrid lifecycle assessment and review in comparison with other photovoltaic technologies", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, roč. 80, s. 1321–1344, pro. 2017, doi: 10.1016/J.RSER.2017.05.095.
- [28] J. Ramanujam *et al.*, „Flexible CIGS, CdTe and a-Si:H based thin film solar cells: A review", *Prog Mater Sci*, roč. 110, s. 100619, kvě. 2020, doi: 10.1016/J.PMATSCI.2019.100619.
- [29] F. U. Hamelmann, J. A. Weicht, a G. Behrens, „Light-Induced Degradation of Thin Film Silicon Solar Cells", in *Journal of Physics: Conference Series*, Institute of Physics Publishing, úno. 2016. doi: 10.1088/1742-6596/682/1/012002.
- [30] A. M. G. Amillo, T. Huld, P. Vourlioti, R. Müller, a M. Norton, „Application of satellite-based spectrally-resolved solar radiation data to PV performance studies", *Energies (Basel)*, roč. 8, č. 5, s. 3455–3488, 2015, doi: 10.3390/EN8053455.
- [31] M. Pagliaro, G. Palmisano, a R. Criminna, „Flexible solar cells", *Int J Energy Res*, roč. 33, č. 13, s. 1250–1250, říj. 2009, doi: 10.1002/er.1610.

- [32] M. Stuckelberger, R. Biron, N. Wyrsh, F. J. Haug, a C. Ballif, „Review: Progress in solar cells from hydrogenated amorphous silicon", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, roč. 76, s. 1497–1523, zář. 2017, doi: 10.1016/J.RSER.2016.11.190.
- [33] S. Kim, H. Van Quy, a C. W. Bark, „Photovoltaic technologies for flexible solar cells: beyond silicon", *Mater Today Energy*, roč. 19, s. 100583, bře. 2021, doi: 10.1016/J.MTENER.2020.100583.
- [34] S. Aftab, S. Hussain, F. Kabir, M. Aslam, A. H. Rajpar, a A. G. Al-Sehemi, „Advances in flexible perovskite solar cells: A comprehensive review", *Nano Energy*, roč. 120, s. 109112, úno. 2024, doi: 10.1016/J.NANOEN.2023.109112.
- [35] W. Wang, G. Yu, a S. Attique, „Dragon Mimic Shape Facilitate Ultrahigh-Performance Flexible All-Perovskite Tandem Solar Cells", *Solar RRL*, roč. 7, č. 7, s. 2201064, dub. 2023, doi: 10.1002/solr.202201064.
- [36] N. I. Ahmad *et al.*, „A comprehensive review of flexible cadmium telluride solar cells with back surface field layer", *Heliyon*, roč. 9, č. 11, s. e21622, lis. 2023, doi: 10.1016/J.HELIYON.2023.E21622.
- [37] M. A. Scarpulla *et al.*, „CdTe-based thin film photovoltaics: Recent advances, current challenges and future prospects", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, roč. 255, s. 112289, čer. 2023, doi: 10.1016/J.SOLMAT.2023.112289.
- [38] S. Najam a B. Kumar, „Organic Solar Cell: Operating Principle, Performance Parameters, Structures and Its Advantages", *2018 5th IEEE Uttar Pradesh Section International Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering, UPCON 2018*, pro. 2018, doi: 10.1109/UPCON.2018.8597120.
- [39] P. Li, Z. Lu, a Z. Lu, „Heterojunction Energetics and Open-Circuit Voltages of Organic Photovoltaic Cells", in *Emerging Photovoltaic Materials*, Wiley, 2018, s. 487–510. doi: 10.1002/9781119407690.ch13.
- [40] S. Li, Z. Li, X. Wan, a Y. Chen, „Recent progress in flexible organic solar cells", *eScience*, roč. 3, č. 1, s. 100085, úno. 2023, doi: 10.1016/J.ESCI.2022.10.010.
- [41] Y. Luo, S. Fang, N. Zheng, L. Liu, F. Würthner, a Z. Xie, „Increased Electron Transport and Hole Blocking in an Aqueous Solution Processed Dye-Doped ZnO Cathode Interlayer for High Performance Organic Solar Cells", *ACS Appl Energy Mater*, roč. 3, č. 2, s. 1694–1701, úno. 2020, doi: 10.1021/ACSAEM.9B02176.
- [42] A. Shukla, „Low-temperature solution-processed flexible organic solar cells with PFN/AgNWs cathode". Viděno: 5. únor 2024. [Online]. Dostupné z:

- https://www.academia.edu/14920221/Low_temperature_solution_processed_flexible_organic_solar_cells_with_PFN_AgNWs_cathode
- [43] L. Reséndiz, V. S. Balderrama, G. Lastra, M. Ramírez, V. Cabrera, a M. Estrada, „Optimization of PFN thickness in inverted high-performance PTB7:PC70BM solar cells", *Solid State Electron*, roč. 153, s. 33–36, bř. 2019, doi: 10.1016/J.SSE.2018.12.013.
- [44] Z. Wang *et al.*, „A simple doping strategy to improve PEDOT:PSS charge extraction capability in polymer solar cells", *Solar Energy*, roč. 247, s. 109–114, lis. 2022, doi: 10.1016/J.SOLENER.2022.10.028.
- [45] R. Zhou *et al.*, „All-small-molecule organic solar cells with over 14% efficiency by optimizing hierarchical morphologies", *Nature Communications 2019 10:1*, roč. 10, č. 1, s. 1–9, lis. 2019, doi: 10.1038/s41467-019-13292-1.
- [46] K. Fukuda a T. Someya, „Advanced Technologies for Ultra-flexible and Highly Stable Organic Solar Cells", *Proceedings of AM-FPD 2022 - 29th International Workshop on Active-Matrix Flatpanel Displays and Devices: TFT Technologies and FPD Materials*, s. 66–69, 2022, doi: 10.23919/AM-FPD54920.2022.9851338.
- [47] „PowerFilm Solar". Viděno: 3. březen 2024. [Online]. Dostupné z: <https://www.powerfilmsolar.com/>
- [48] „PowerFilm Electronic Component Solar Cells | Solar Made". Viděno: 26. březen 2024. [Online]. Dostupné z: <https://solarmade.com/collections/powerfilm-electronic-component-series>
- [49] „Solar cells | Products | TDK Product Center". Viděno: 29. únor 2024. [Online]. Dostupné z: <https://product.tdk.com/en/products/solar-cell/index.html>
- [50] „Mitsubishi Electric New Zealand // Mitsubishi Electric". Viděno: 4. březen 2024. [Online]. Dostupné z: <https://www.mitsubishi-electric.co.nz/>
- [51] „NIB Flexcell Sunslick 14W Flexible Solar Panel Marine Yachting Camping Hiking | eBay". Viděno: 4. březen 2024. [Online]. Dostupné z: <https://www.ebay.com/itm/253645444351>
- [52] „Flexcell Sunslick". Viděno: 4. březen 2024. [Online]. Dostupné z: <https://elektronikamarine.gr/shop/index.php?route=product/category&path=196>
- [53] „Uni-Solar". Viděno: 3. březen 2024. [Online]. Dostupné z: <http://www.uni-solar.com/index.html>
- [54] „Home - pvilion". Viděno: 4. březen 2024. [Online]. Dostupné z: <https://www.pvilion.com/>

- [55] „Progress on solar-powered fabrics - Specialty Fabrics Review". Viděno: 21. únor 2024. [Online]. Dostupné z: <https://specialtyfabricsreview.com/2023/04/01/progress-on-solar-powered-fabrics/>
- [56] „GSHK | Solar". Viděno: 3. březen 2024. [Online]. Dostupné z: <https://www.groupgshk.com/>
- [57] „MiaSolé – Makers of lightweight, flexible, powerful solar cells and modules". Viděno: 3. březen 2024. [Online]. Dostupné z: <https://miasole.com/>
- [58] „Nanosolar": Viděno: 4. březen 2024. [Online]. Dostupné z: <http://www.nanosolar.com/index.html>
- [59] „Technology - Solar Cloth System". Viděno: 4. březen 2024. [Online]. Dostupné z: <https://www.solar-cloth.com/technology/>
- [60] „Dracula Technologies | Sustainable energy for your devices". Viděno: 4. březen 2024. [Online]. Dostupné z: <https://dracula-technologies.com/>
- [61] „A Valence, Dracula technologies rend vos objets connectés autonomes en énergie grâce à la lumière ambiante". Viděno: 26. březen 2024. [Online]. Dostupné z: <https://france3-regions.francetvinfo.fr/auvergne-rhone-alpes/drome/valence/a-valence-dracula-technologies-rend-vos-objets-connectes-autonomes-en-energie-grace-a-la-lumiere-ambiante-1935274.html>
- [62] „Heliatek GmbH". Viděno: 4. březen 2024. [Online]. Dostupné z: <https://www.heliatek.com/en/>
- [63] „Flexible solar cell & transparent photovoltaic film | ASCA". Viděno: 4. březen 2024. [Online]. Dostupné z: <https://www.asca.com/asca-technology/>
- [64] TNI CEN ISO/TR 23383, *Textilie a textilní výrobky – Chytré (inteligentní) textilie – Definice, kategorizace, aplikace a potřeby normalizace*. 2021.
- [65] D. Ferreira, A. C. Baptista, I. Sajovic, M. Kert, a B. B. Podgornik, „Smart Textiles: A Review and Bibliometric Mapping", *Applied Sciences* 2023, Vol. 13, Page 10489, roč. 13, č. 18, s. 10489, zář. 2023, doi: 10.3390/APP131810489.
- [66] Y. H. Sim, M. J. Yun, D. Y. Lee, a S. I. Cha, „Origami-foldable tessellated Crystalline-Si solar cell module with metal textile-based stretchable connections", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, roč. 231, s. 111318, říj. 2021, doi: 10.1016/J.SOLMAT.2021.111318.
- [67] M. Čechura, „Kontaktování chytrých textilií", Bakalářská práce, Západočeská univerzita v Plzni, Plzeň, 2019. Viděno: 5. květen 2024. [Online]. Dostupné z: https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/37520/1/BP_Martin_Cechura.pdf

- [68] A. Mehmman, M. Varga, a G. Tröster, „Reversible Contacting for Smart Textiles", s. 185–198, 2017, doi: 10.1007/978-3-319-50124-6_9.
- [69] ČSN EN IEC 61215-1-3 ed.2, *Zemské fotovoltaické (PV) moduly – Posouzení způsobilosti konstrukce a schválení typu – Část 1-3: Zvláštní požadavky na zkoušení fotovoltaických (PV) modulů založených na tenké vrstvě amorfního křemíku*. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2021.
- [70] ČSN EN IEC61215-1 ed.2, *Zemské fotovoltaické (PV) moduly – Posouzení způsobilosti konstrukce a schválení typu – Část 1: Požadavky na zkoušení*. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2021.
- [71] ČSN EN IEC 60904-1 ed. 3, *Fotovoltaické součástky – Část 1: Měření fotovoltaických voltampérových charakteristik*. Česká agentura pro standardizaci, 2021.
- [72] J. I. Morales-Aragonés *et al.*, „Online Distributed Measurement of Dark I-V Curves in Photovoltaic Plants", 2021, doi: 10.3390/app11041924.
- [73] J. Yao a R. Zhang, „Analysis of structural characteristics and development trend of solar cells", *Proceedings - 2022 International Conference on Applied Physics and Computing, ICAPC 2022*, s. 47–51, 2022, doi: 10.1109/ICAPC57304.2022.00015.
- [74] Z. Li a Z. Li, „Research Status of Solar Cell Characteristics", in *Proceedings - 2022 International Conference on Manufacturing, Industrial Automation and Electronics, ICMIAE 2022*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022, s. 154–158. doi: 10.1109/ICMIAE57032.2022.00036.
- [75] M. T. Boyd, S. A. Klein, D. T. Reindl, a B. P. Dougherty, „Evaluation and validation of equivalent circuit photovoltaic solar cell performance models", *Journal of Solar Energy Engineering, Transactions of the ASME*, roč. 133, č. 2, 2011, doi: 10.1115/1.4003584.
- [76] ČSN EN 50461, *Solární články – Katalogové údaje a údaje o produktu pro solární články z krystalického křemíku*. Český normalizační institut, 2007.
- [77] P. Mastný *et al.*, „Obnovitelné zdroje elektrické energie", *České vysoké učení technické v Praze*, 2011, Viděno: 15. duben 2024. [Online]. Dostupné z: <https://www.mpo-efekt.cz/upload/7799f3fd595eeee1fa66875530f33e8a/cvut-2-oze.pdf>
- [78] „What is a PV Module IV Curve? - Atonometrics". Viděno: 15. duben 2024. [Online]. Dostupné z: <https://www.atonometrics.com/applications/what-is-a-pv-module-iv-curve/>

- [79] A. K. Abdulrazzaq, G. Bognár, a B. Plesz, „Evaluation of different methods for solar cells/modules parameters extraction", *Solar Energy*, roč. 196, s. 183–195, led. 2020, doi: 10.1016/J.SOLENER.2019.12.010.
- [80] ČSN EN IEC 60904-3 ed. 4, *Fotovoltaické součástky – Část 3: Zásady měření pro zemské fotovoltaické (PV) solární součástky s referenčními údaji spektrálního rozložení ozařování*. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2019.
- [81] ČSN CLC/TS 61836, *Solární fotovoltaické energetické systémy - Termíny, definice a značky*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [82] J. H. Bae, D. Y. Kim, J. W. Shin, S. E. Lee, a K. C. Kim, „Analysis on the Features of NOCT and NMOT Tests with Photovoltaic Module", *IEEE Access*, roč. 8, s. 151546–151554, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3017372.
- [83] C. R. Osterwald, „Standards, calibration and testing of PV modules and solar cells", *Solar Cells: Materials Manufacture and Operation*, s. 451–474, led. 2005, doi: 10.1016/B978-185617457-2/50018-4.
- [84] O. Nikl, „Analýza VA charakteristik FVE", Diplomová práce, Fakulta elektrotechnická Západočeské univerzity v Plzni, Plzeň, 2016. Viděno: 21. duben 2024. [Online]. Dostupné z: https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/23000/1/Diplomova-prace_Nikl.pdf
- [85] ČSN EN 62446-1+A1, *Fotovoltaické (PV) systémy – požadavky na zkoušení, dokumentaci a údržbu – Část 1: Systémy spojené s rozvodnou sítí – Dokumentace, zkoušky při uvádění do provozu a kontrola*. Česká agentura pro standardizaci, 2023.
- [86] „Fluke SMFT-1000 Solar Kit: Multifunction PV Tester + I-V Curve Tracer with TruTest™ Software | Fluke". Viděno: 21. duben 2024. [Online]. Dostupné z: <https://www.fluke.com/en-us/product/electrical-testing/best-solar-energy-industry-tools/smft-1000-kit>
- [87] „PVA-1000S PV Analyzer Kit - Solmetric". Viděno: 21. duben 2024. [Online]. Dostupné z: <https://www.solmetric.com/product/pva-1000s-pv-analyzer-kit/>
- [88] E. Duran a M. Piliouguine, „Different methods to obtain the I-V curve of PV modules: A review", doi: 10.1109/PVSC.2008.4922578.
- [89] Y. Zhu a W. Xiao, „A comprehensive review of topologies for photovoltaic I–V curve tracer", *Solar Energy*, roč. 196, s. 346–357, led. 2020, doi: 10.1016/J.SOLENER.2019.12.020.

- [90] B. Singh a N. Sharma, „Mechanistic implications of plastic degradation", *Polym Degrad Stab*, roč. 93, č. 3, s. 561–584, 2008, doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2007.11.008.
- [91] V. Esen, Ş. Sağlam, a B. Oral, „Light sources of solar simulators for photovoltaic devices: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, roč. 77, č. March, s. 1240–1250, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.03.062.
- [92] M. Tawfik, X. Tonnellier, a C. Sansom, „Light source selection for a solar simulator for thermal applications: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, roč. 90, č. November 2016, s. 802–813, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.03.059.
- [93] A. Buchroithner, B. Gerl, R. Felsberger, a H. Wegleiter, „Design and operation of a versatile, low-cost, high-flux solar simulator for automated CPV cell and module testing", *Solar Energy*, roč. 228, č. August, s. 387–404, 2021, doi: 10.1016/j.solener.2021.08.068.
- [94] C. Sun *et al.*, „LED-based solar simulator for terrestrial solar spectra and orientations", *Solar Energy*, roč. 233, č. January, s. 96–110, 2022, doi: 10.1016/j.solener.2022.01.001.
- [95] L. Martínez-Manuel, W. Wang, a M. I. Peña-Cruz, „Optimization of the radiative flux uniformity of a modular solar simulator to improve solar technology qualification testing", *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, roč. 47, č. June, 2021, doi: 10.1016/j.seta.2021.101372.
- [96] R. A. Salam, M. M. Munir, T. Warsahemas, C. Saputra, H. Latief, a K. Khairurrijal, „A simple solar simulator with highly stable controlled irradiance for solar panel characterization", *Measurement and Control (United Kingdom)*, roč. 52, č. 3–4, s. 159–168, 2019, doi: 10.1177/0020294019827327.
- [97] Deepak, S. Srivastava, a C. S. Malvi, „Light sources selection for solar simulators : A review Light sources selection for solar simulators : A review", č. October, 2020, doi: 10.32438/WPE.060257.
- [98] LOT Quantum Design, „Light sources for solar simulation", s. 100–101, 2000, [Online]. Dostupné z: https://lot-qd.de/fileadmin/Mediapool/products/solar/en/LQ_Light_sources_for_solar_simulation_basics_en.pdf
- [99] A. Gallo, A. Marzo, E. Fuentealba, a E. Alonso, „High flux solar simulators for concentrated solar thermal research: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, roč. 77, č. January, s. 1385–1402, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.01.056.

- [100] R. V. Parupudi, H. Singh, a M. Kolokotroni, „Sun simulator for indoor performance assessment of solar photovoltaic cells", *Energy Procedia*, roč. 161, č. 0, s. 376–384, 2019, doi: 10.1016/j.egypro.2019.02.102.
- [101] M. Stuckelberger *et al.*, „Class AAA LED-based solar simulator for steady-state measurements and light soaking", *IEEE J Photovolt*, roč. 4, č. 5, s. 1282–1287, 2014, doi: 10.1109/JPHOTOV.2014.2335738.
- [102] M. Tavakoli, F. Jahantigh, a H. Zarookian, „Adjustable high-power-LED solar simulator with extended spectrum in UV region", *Solar Energy*, roč. 220, č. February 2020, s. 1130–1136, 2021, doi: 10.1016/j.solener.2020.05.081.
- [103] „UV-C LEDs product type | ams OSRAM". Viděno: 11. březen 2024. [Online]. Dostupné z: <https://ams-osram.com/products/leds/uv-c-leds>
- [104] G. Leary, G. Switzer, G. Kuntz, a T. Kaiser, „Comparison of xenon lamp-based and led-based solar simulators", in *2016 IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, IEEE, čer. 2016, s. 3062–3067. doi: 10.1109/PVSC.2016.7750227.
- [105] „Arc Lamp". Viděno: 14. duben 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.newport.com/p/6285>
- [106] „Xenon short-arc lamps | OSRAM PIA". Viděno: 14. duben 2023. [Online]. Dostupné z: [https://www.osram.com/ecat/Xenon short-arc lamps-Discharge lamps-Entertainment-Specialty Lighting/com/en/GPS01_3172969/](https://www.osram.com/ecat/Xenon%20short-arc%20lamps-Discharge%20lamps-Entertainment-Specialty%20Lighting/com/en/GPS01_3172969/)
- [107] „Xenon Arc Lamp | Xenon Short Arc Lamp | Techinstro". Viděno: 14. duben 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.techinstro.com/xenon-arc-lamp/>
- [108] „UXL Xenon Short Arc | Ushio America, Inc." Viděno: 17. duben 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.ushio.com/product/uxl-xenon-short-arc/>
- [109] „Metal halide lamps with quartz technology | OSRAM DS". Viděno: 14. duben 2023. [Online]. Dostupné z: [https://www.osram.com/ecat/Metal halide lamps with quartz technology-High intensity discharge lamps-Lamps-OSRAM Products/com/en/GPS01_3122367/](https://www.osram.com/ecat/Metal%20halide%20lamps%20with%20quartz%20technology-High%20intensity%20discharge%20lamps-Lamps-OSRAM%20Products/com/en/GPS01_3122367/)
- [110] „Halogen lamps | OSRAM PIA". Viděno: 14. duben 2023. [Online]. Dostupné z: [https://www.osram.com/ecat/Halogen lamps-Entertainment-Specialty Lighting/com/en/GPS01_3169907/](https://www.osram.com/ecat/Halogen%20lamps-Entertainment-Specialty%20Lighting/com/en/GPS01_3169907/)
- [111] „LEDs - Cree, Luxeon, Nichia and 5mm LEDs". Viděno: 15. duben 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.ledsupply.com/leds>
- [112] ČSN EN IEC 60068-2-5 ed. 2, *Zkoušení vlivů prostředí – Část 2-5: Zkoušky – Zkouška S: Simulované sluneční záření na úrovni zemského povrchu a návod pro*

- zkoušky slunečním zářením a působením klimatických vlivů. Česká agentura pro standardizaci, 2018.
- [113] ČSN EN IEC 60904-9 ed. 2, *Fotovoltaické součástky – Část 9: Klasifikace charakteristik solárního simulátoru*. Česká agentura pro standardizaci, 2020.
- [114] J. Holdsworth, „An Economic LED Solar Simulator Design“, č. February, 2022, doi: 10.1109/JPHOTOV.2022.3143460.
- [115] A. Y. Al-ahmad, J. Holdsworth, B. Vaughan, a W. J. Belcher, „Optimizing the Spatial Nonuniformity of Irradiance in a Large-Area LED Solar Simulator“, č. November, 2022, doi: 10.3390/en15228393.
- [116] E. López-fraguas, J. M. Sánchez-pena, S. Member, a R. Vergaz, „A Low-Cost LED-Based Solar Simulator“, roč. 68, č. 12, s. 4913–4923, 2019, doi: 10.1109/TIM.2019.2899513.
- [117] „Large Area Solar Simulator (Class AAA LED) | sunbrick“. Viděno: 22. květen 2023. [Online]. Dostupné z: <https://g2voptics.com/sunbrick-versionb>
- [118] „Solar Simulator | Low Price, Class AAA, Small Area | Ossila“. Viděno: 14. březen 2024. [Online]. Dostupné z: <https://www.ossila.com/products/solar-simulator>
- [119] Gnee Garden, „Nerezová ocel AISI Grade 430“. Viděno: 12. květen 2024. [Online]. Dostupné z: <https://cz.china-stainless-steels.com/stainless-steel-plate/aisi-grade-430-stainless-steel.html>
- [120] „LL200-4.8-37 PowerFilm | Mouser Česká Republika“. Viděno: 2. duben 2024. [Online]. Dostupné z: https://cz.mouser.com/ProductDetail/PowerFilm/LL200-4.8-37?qs=BJlw7L4Cy7%2Fjahe%2FTBXePA%3D%3D&_gl=1*1hdvtuz*_ga*MjAzODIyODQzOC4xNzEyMDgyNzI5*_ga_15W4STQT4T*MTcxMjA4MjcyOC4xLjAuMTcxMjA4MjcyOC42MC4wLjA.
- [121] „MPT3.6-75 PowerFilm | Mouser Česká Republika“. Viděno: 2. duben 2024. [Online]. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/ProductDetail/PowerFilm/MPT3.6-75?qs=BJlw7L4Cy79PADpX3LN7rA%3D%3D>
- [122] „RC7.2-75F PowerFilm | Mouser Česká Republika“. Viděno: 2. duben 2024. [Online]. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/ProductDetail/PowerFilm/RC7.2-75F?qs=BJlw7L4Cy78VUvPuqELK6w%3D%3D>
- [123] „RC7.2-75PSAF PowerFilm | Mouser Česká Republika“. Viděno: 2. duben 2024. [Online]. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/ProductDetail/PowerFilm/RC7.2-75PSAF?qs=Cb2nCFKsA8qx3NY1Cpc4Lw%3D%3D>

- [124] „PT15-75 PowerFilm | Mouser Česká Republika". Viděno: 2. duben 2024. [Online]. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/ProductDetail/PowerFilm/PT15-75?qs=BJlw7L4Cy7%252Bbmipum8fY8w%3D%3D>
- [125] „PowerFilm Solar Rollable Solar Panels". Viděno: 2. duben 2024. [Online]. Dostupné z: <https://www.californiapc.com/Portable-Solar-Chargers/PowerFilm-Rollable-Solar-Panels/>
- [126] „BCS4430B6 TDK | Mouser Česká Republika". Viděno: 2. duben 2024. [Online]. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/ProductDetail/TDK/BCS4430B6?qs=Jslch3jnSjkPo6loiHubTg%3D%3D>
- [127] „BCSC491B6 TDK | Mouser Česká Republika". Viděno: 2. duben 2024. [Online]. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/ProductDetail/TDK/BCSC491B6?qs=vvQtp7zwQdN5XF7HgOA3yQ%3D%3D>
- [128] „BCSC421B1 TDK | Mouser Česká Republika". Viděno: 2. duben 2024. [Online]. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/ProductDetail/TDK/BCSC421B1?qs=mELouGlnn3ekXMrNQDuRKw%3D%3D>
- [129] „Optical polishing - Quality control of polishing process and polished components - Polytec". Viděno: 9. květen 2024. [Online]. Dostupné z: <https://www.polytec.com/eu/surface-metrology/areas-of-application/glass-and-transparent-materials/optical-polishing>
- [130] „LED Information Base". Viděno: 7. květen 2024. [Online]. Dostupné z: <https://apps.osram-os.com/Characteristic>

Seznam příloh

Příloha 1 Přehled komerčně dostupných flexibilních solárních modulů včetně jejich dostupných parametrů a vlastností, část první.....	II
Příloha 2 Přehled komerčně dostupných flexibilních solárních modulů včetně jejich dostupných parametrů a vlastností, část druhá	III
Příloha 3 Přehled komerčně dostupných flexibilních solárních modulů včetně jejich dostupných parametrů a vlastností, část třetí.....	IV
Příloha 4 Rastrové uspořádání LED diod pro optickou simulaci	V
Příloha 5 Optická simulace v programu SPEOS od společnosti ANSYS.....	V
Příloha 6 Porovnání intenzit záření finální verze optické simulace s normou včetně směrodatné odchylky a variačního koeficientu	VI
Příloha 7 Seznam LED diod použitých v navrhovaném solárním simulátoru	VI
Příloha 8 Mechanická konstrukce simulátoru slunečního záření	VII
Příloha 9 Sestavený solární simulátor	VIII
Příloha 10 Zařízení použitá pro elektrická měření	VIII
Příloha 11 Charakteristické elektrické parametry VA charakteristik testovaných vzorků.....	VIII
Příloha 12 Vizuelní porovnání flexibilního solárního modulu MPT3.6-75 před expozicí (vlevo) a po expozici (vpravo).....	IX
Příloha 13 Vizuelní porovnání flexibilního solárního modulu LL200-4.8-37 před expozicí (vlevo) a po expozici (vpravo).....	IX
Příloha 14 Vizuelní porovnání flexibilního solárního modulu BCSC491B6 před expozicí (vlevo) a po expozici (vpravo).....	X
Příloha 15 Vizuelní porovnání flexibilního solárního modulu LAYER před expozicí (vlevo) a po expozici (vpravo)	X

Přílohy

Příloha 1 Přehled komerčně dostupných flexibilních solárních modulů včetně jejich dostupných parametrů a vlastností, část první

Výrobci	Power Film	Power Film	Power Film	Power Film	Power Film	Power Film	Mitsubishi Electric
Produkt	*LL200-4.8-37 – Indoor Series	MPT3.6-75 – Classic Series	RC7.2-75(PSA)F – Weather Lite Series	PT15-75 – Weather Pro Series	Rollable Solar Panel	PowerDrive Golf Car Solar Panel	Flexcell Sunslick 7 W
Typ	Amorfní Si	Amorfní Si	Amorfní Si	Amorfní Si	Amorfní Si	Amorfní Si	Amorfní Si
Jmenovitý výkon	133 μ W _p	180 mW _p	864 mW _p	770 mW _p	7–60 W _p	165 W _p	7–27 W _p
Účinnost	–	–	–	–	–	–	–
Substrát	Polymerní	Polymerní	Polymerní	Polymerní	–	–	–
Rozměry článku/modulu	94 mm x 36,5 mm	74 mm x 73 mm	271 mm x 92 mm	283 mm x 99 mm	579,1–2 176,8 mm x 370,8–673,1 mm	1 219,2–1 409,7 mm x 914,4–952,5 mm	695–1 310 mm x 350–642 mm
Minimální poloměr ohybu	–	–	–	–	76,2–127 mm	–	–
Tloušťka	0,22 mm	0,22 mm	0,22 mm	0,57 mm	–	–	1,2 mm
Hmotnost	0,88 g	2,14 g	5,67–8,5 g	31,18 g	300–1 500 g	4 100 g	480–1 500 g
V_{MPP}	3,2 V	3,6 V	7,2 V	15,4 V	15,4 V	28,3 V	15 V
I_{MPP}	41 μ A	50 mA	120 mA	50 mA	45 mA – 3,9 A	5,7 A	0,45–1,8 A
V_{OC}	4,8 V	5,5 V	11,1 V	22,2 V	21,9 V	34,2 V	23 V
I_{SC}	100 μ A	64 mA	154 mA	64 mA	50 mA – 4,9 A	6,1 A	0,6–2,4 A
Teplotní koef. P_{MAX}	–	–	–	–	-0,20 %/°C	-0,20 %/°C	–
Teplotní koef. V_{MPP}	–	–	–	–	-0,24 %/°C	-0,24 %/°C	–
Teplotní koef. I_{MPP}	–	–	–	–	–	–	–
Teplotní koef. V_{OC}	–	–	–	–	-0,30 %/°C	-0,30 %/°C	–
Teplotní koef. I_{SC}	–	–	–	–	0,11 %/°C	0,11 %/°C	–
Provozní teplotní rozsah	–	–	–	–	-30 °C až 60 °C	–	-20 °C až +60 °C
Odolnost	Absence ochrany před UV a vnějšími vlivy	Absence ochrany před UV a navlháním	Odolnost vůči vnějším vlivům, absence ochrany před UV	Odolnost vůči vnějším vlivům a UV, IP68	Voděodolnost, UV odolnost neuvedena	Voděodolnost, UV odolnost neuvedena	Vodotěsnost
Přibližná cena	166 Kč	206 Kč	705–1 029 Kč	1 281 Kč	4 667–19 208 Kč	28 098 Kč	1 267 Kč–5 016 Kč
Výhody	–	–	Dostupný i s adhezivní vrstvou, odolnost vůči vnějším vlivům	Vhodný do venkovních podmínek	Vhodný do venkovních podmínek, integrované kovové průchodky a konektory	Původně určený pro vojenské účely	Kovové průchodky, původně určený pro plavidla, integrované konektory
Nevýhody	Vnitřní aplikace	Sporadické venkovní využití	Občasné venkovní využití	–	–	–	Dostupný jen od přeprodejců
Zdroje	[47], [120]	[47], [121]	[47], [122], [123]	[47], [124]	[47], [125]	[47]	[50], [51], [52]

Elektrické parametry solárních článků byly měřeny za standardních podmínek (STC), parametry zařízení označených * byly měřeny při intenzitě osvětlení 200 lx.

Příloha 2 Přehled komerčně dostupných flexibilních solárních modulů včetně jejich dostupných parametrů a vlastností, část druhá

Výrobci	TDK Corp.	TDK Corp.	TDK Corp.	United Solar	Pvilion	Pvilion	Group Solar Hong Kong
Produkt	*BCS4430B6	*BCSC491B6	*BCSC421B1	PowerBond ePVL	Lightweight Solar Canopy	Single Pole Solar Sail	FLEX-03W Series
Typ	Amorfní Si	Amorfní Si	Amorfní Si	Amorfní Si	Nejspíše amorfní Si	Nejspíše amorfní Si	CIGS
Jmenovitý výkon	78 μW_p	85,8 μW_p	77,94 μW_p	68–144 W_p	210–2 400 W_p	400–960 W_p	470–510 W_p
Účinnost	–	–	–	–	–	–	až 17 %
Substrát	–	–	–	Nerezová ocel	–	–	–
Rozměry článku/modulu	44 mm x 30 mm	46 mm x 30 mm	47 mm x 30 mm	2 771–5 412 mm x 373 mm	–	–	2 585 mm x 1 293 mm
Minimální poloměr ohybu	20 mm	20 mm	20 mm	–	–	–	508 mm
Tloušťka	0,18 mm	0,18 mm	0,18 mm	3 mm (21 mm komplet)	–	–	2,5 mm
Hmotnost	0,2 g	0,2 g	0,2 g	3 900–7 400 g	–	–	0,2 g/cm ²
V_{MPP}	2,6 V	2,6 V	0,433 V	16,5–33,0 V	–	–	–
I_{MPP}	30 μA	33 μA	180 μA	4,1–4,4 A	–	–	–
V_{oc}	4,2 V	4,2 V	0,7 V	23,1–46,2 V	–	–	–
I_{sc}	–	–	–	5,1–5,3 A	–	–	–
Teplotní koef. P_{MAX}	–	–	–	-0,21 %/°C	–	–	–
Teplotní koef. V_{MPP}	–	–	–	-0,31 %/°C	–	–	–
Teplotní koef. I_{MPP}	–	–	–	+0,10 %/°C	–	–	–
Teplotní koef. V_{oc}	–	–	–	-0,38 %/°C	–	–	–
Teplotní koef. I_{sc}	–	–	–	0,10 %/°C	–	–	–
Provozní teplotní rozsah	-20 °C až +60 °C	-20 °C až +60 °C	-20 °C až +60 °C	–	–	–	–
Odolnost	–	–	–	–	UV, vodotěsné, nehřlavé	UV, vodotěsné, nehřlavé	–
Přibližná cena	192 Kč	192 Kč	192 Kč	–	–	–	–
Výhody	–	Vyvedené elektrody na jedné straně	Vyvedené elektrody na jedné straně	Pouzdřeno v ETFE, včetně adhezivní vrstvy, integrované konektory	–	–	Včetně adhezivní vrstvy, integrované konektory
Nevýhody	Spíše vnitřní aplikace	Spíše vnitřní aplikace	Spíše vnitřní aplikace	–	–	–	–
Zdroje	[49], [126]	[49], [127]	[49], [128]	[53]	[54]	[54]	[56]

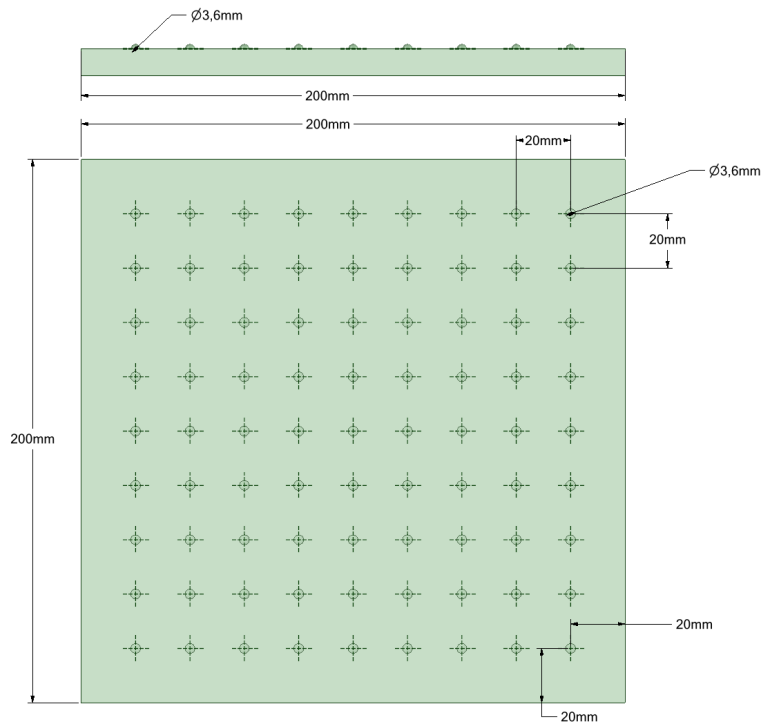
Elektrické parametry solárních článků byly měřeny za standardních podmínek (STC), parametry zařízení označených * byly měřeny při intenzitě osvětlení 200 lx.

Příloha 3 Přehled komerčně dostupných flexibilních solárních modulů včetně jejich dostupných parametrů a vlastností, část třetí

Výrobci	MiaSolé	MiaSolé	Nanosolar	Solar Cloth	Dracula Technologies	Heliatek	ASCA
Produkt	FLEX-02 Series	10X CIGS SOLAR CELL	NanoCell	Cell	*LAYER	HeliaSol® 436-2000	ASCA Inlay
Typ	CIGS	CIGS	CIGS	CIGS	Organický	Organický	Organický
Jmenovitý výkon	110–380 W _p	2,09–2,33 W _p	2,6 W _p	2,44 W _p	160 μW _p	50 W _p ; 55 W _p	20–45 W _p (dle barvy)
Účinnost	až 17 %	15–17 %	–	16–17,6 %	–	7,2 %; 8,0 %	–
Substrát	Nerezová ocel	Nerezová ocel	Al	–	Polymerní	–	PET
Rozměry článku/modulu	2 598 mm x 1 000 mm nebo 2 598 mm x 370 mm	308–315,5 mm x 57,2 mm	165 mm x 135 mm	315 mm x 44 mm	67 mm x 63 mm	2 000 mm x 436 mm	1 000 mm ²
Minimální poloměr ohybu	–	–	–	20–60 mm	20 mm	500 mm	–
Tloušťka	2,5 mm	0,33 mm ± 0,1 mm (nezapouzdřený)	0,4 mm	0,8 mm	0,3 mm	2 mm 18,5 mm komplet	0,3 mm ± 0,1 mm
Hmotnost	<0,24 g/cm ² nebo 0,29 g/cm ²	8,7 g ± 0,2 g	18,5 g	8,7 g	0,04 g/cm ²	<0,2 g/cm ²	<0,05 g/cm ²
V _{MPP}	–	0,58–0,60 V	0,45 V	0,60 V	2,7 V	43,1 V; 43,4 V	4–56 V
I _{MPP}	–	3,63–3,83 A	5,80 A	3,87 A	59 μA	1,26 A; 1,32 A	0,5–7,8 A
V _{OC}	–	0,71–0,73 V	0,61 V	0,73 V	3,4 V	56,1 V	0,55–0,76 V / článek
I _{SC}	–	4,02–4,21 A	6,70 A	4,21 A	72 μA	1,60 A; 1,63 A	0,7–10,5 A
Teplotní koef, P _{MAX}	–	–	-0,40 %/°C	-0,38 %/°C	–	–	+0,02 %/°C až 0,05 %/°C
Teplotní koef, V _{MPP}	–	–	–	–	–	–	-0,23 %/°C až -0,11 %/°C
Teplotní koef, I _{MPP}	–	–	–	–	–	–	–
Teplotní koef, V _{OC}	–	–	-0,30 %/°C	-0,28 %/°C	–	–	-0,19 %/°C až -0,11 %/°C
Teplotní koef, I _{SC}	–	–	+0,01 %/°C	+0,01 %/°C	–	–	–
Provozní teplotní rozsah	–	–	-40 °C až +85 °C	-40 °C až +65 °C	-30 °C až +60 °C (-40 °C až +40 °C povrch)	-40 °C až +85 °C	-20 °C až +65 °C
Odolnost	–	Bez pouzdření, citlivost na teplotu a vlhkost, skladování při teplotě od 10 °C do 35 °C	–	–	Odolnost vůči O ₂ a H ₂ O	Odolnost vůči vnějším vlivům a UV	–
Přibližná cena	–	–	–	–	1 475 Kč	–	–
Výhody	Včetně adhezivní vrstvy, integrované konektory	–	–	Různé způsoby fixace – lepidlo, velcro, svařování, přišití, pásky a jiné	Bifaciální, aktivní vrstva je tvořena objemovým heteropřechodem	Včetně adhezivní vrstvy, integrované konektory	Průhlednost 20–50 %
Nevýhody	–	Bez pouzdření	Hodnoty P _{mpp} , V _{MPP} , I _{MPP} , I _{SC} , V _{OC} se můžou lišit o ±10 %,	–	Primárně vnitřní využití i když firma uvádí možnost venkovní aplikace	Panel by neměl být podléhně zastíněn, může vést k trvalému poklesu výkonu	–
Zdroje	[57]	[57]	[58]	[59]	[60]	[62]	[63]

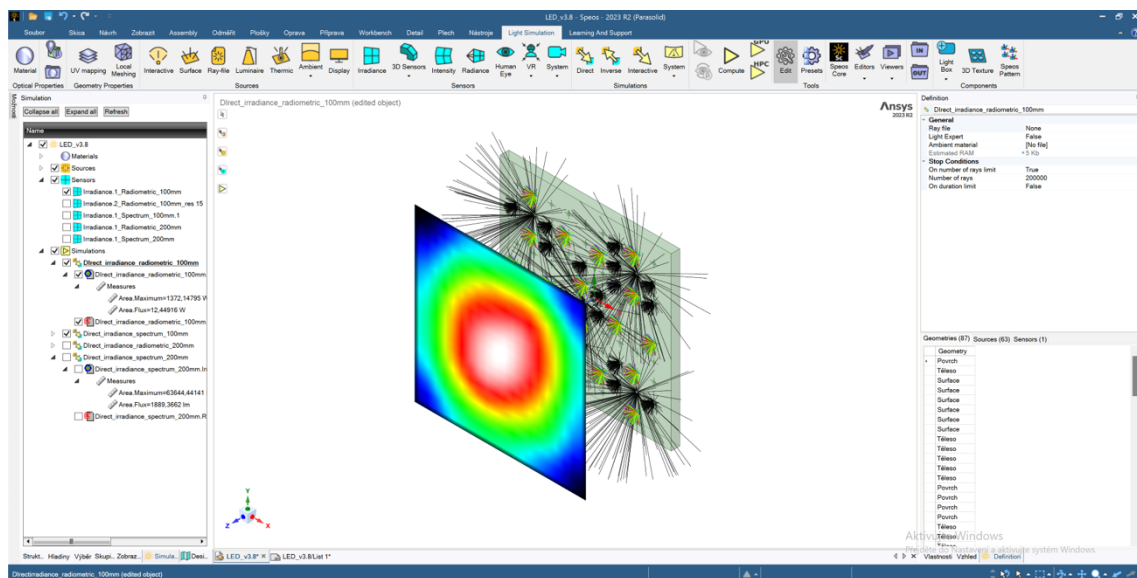
Elektrické parametry solárních článků byly měřeny za standardních podmínek (STC), parametry zařízení označených * byly měřeny při intenzitě osvětlení 200 lx.

Příloha 4 Rastrové uspořádání LED diod pro optickou simulaci



Název	LED_rastr
Autor	Jakub Škarda
Verze	v2
Jednotky	mm
Měřítko	-

Příloha 5 Optická simulace v programu SPEOS od společnosti ANSYS



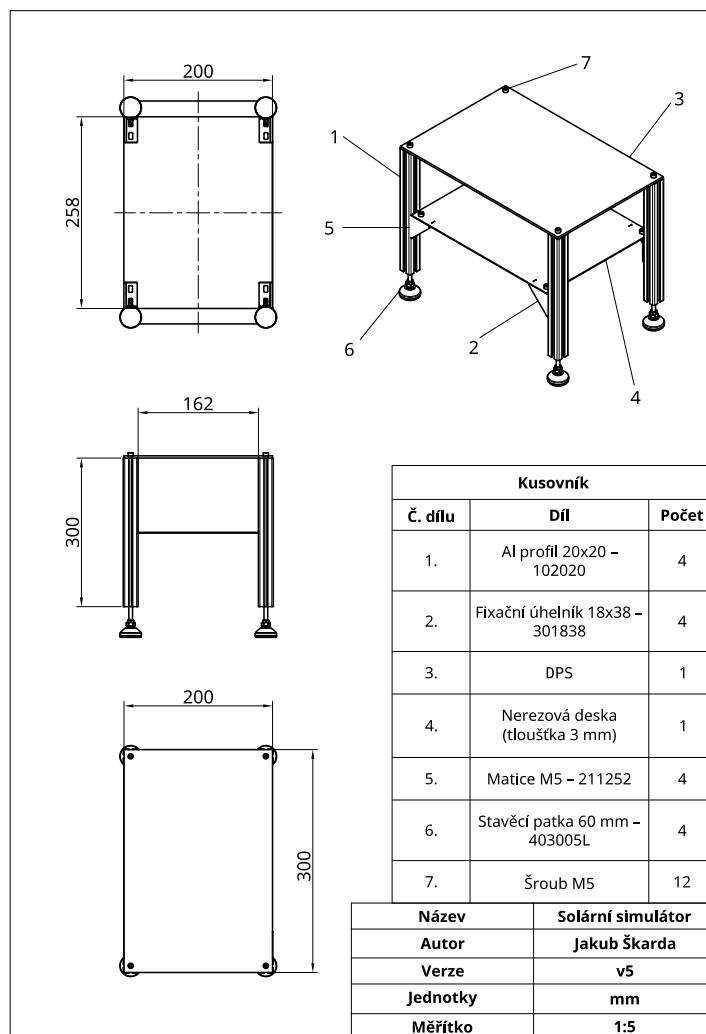
Příloha 6 Porovnání intenzit záření finální verze optické simulace s normou včetně směrodatné odchylky a variačního koeficientu

Vzdálenost senzoru		E_{θ} (W/m ²)	σ (W/m ²)	v_x (%)	E_{MIN} (W/m ²)	σ (W/m ²)	v_x (%)	E_{MAX} (W/m ²)	σ (W/m ²)	v_x (%)	
		ČSN EN IEC 60068-2-5 ed. 2	1090	–	–	981	–	–	1199	–	–
100 mm	Měřicí plocha	S = 40 000 mm ²	930,25	56,09	6,03	432,61	35,36	8,17	1373,16	67,33	4,90
		S = 10 000 mm ²	1237,57	65,41	5,29	1003,29	57,93	5,77	1373,16	67,33	4,90
200 mm	Měřicí plocha	S = 40 000 mm ²	482,15	40,45	8,39	316,30	32,64	10,32	617,03	48,84	7,92
		S = 10 000 mm ²	574,07	44,39	7,73	507,63	32,64	6,43	617,03	48,84	7,92

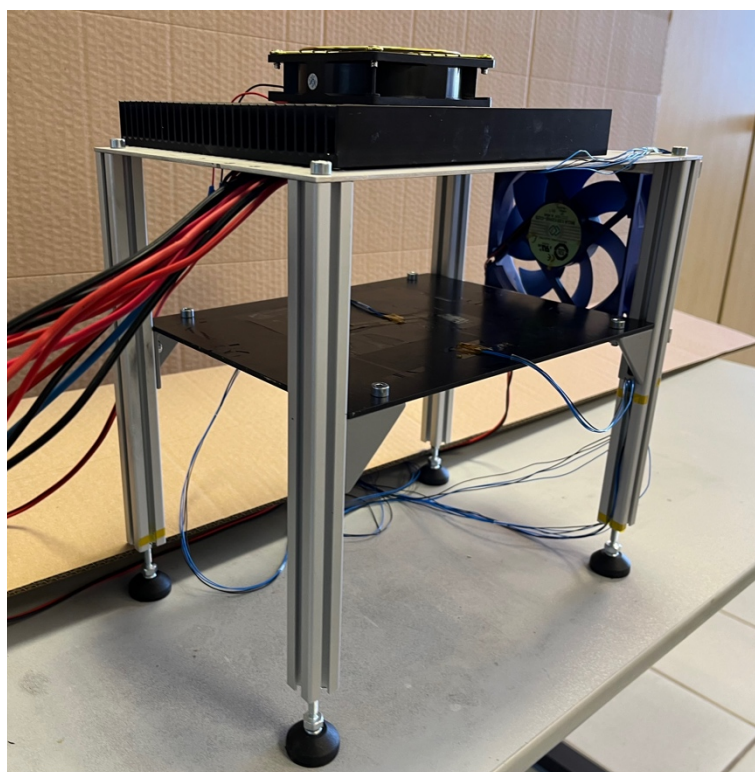
Příloha 7 Seznam LED diod použitých v navrhovaném solárním simulátoru

Označení LED diody	λ nebo θ_c	Φ_e nebo Φ	P	Přibližná cena	Počet ks
VS5252C48L3-310-V1	310 nm	115 mW	6,5 W	980 Kč/ks	5
LZ1-00UVH0-0000	367 nm	1390 mW	2,7 W	403 Kč/ks	2
GW PUSTA1.PM-NDPA-XX57-1	3000 K	489 lm	2,9 W	58 Kč/ks	18
SFH 4715A-DADB	850 nm	860 mW	5 W	58 Kč/ks	10
SFH 4725AS	950 nm	1580 mW	5,4 W	73 Kč/ks	10

Příloha 8 Mechanická konstrukce simulátoru slunečního záření



Příloha 9 Sestavený solární simulátor



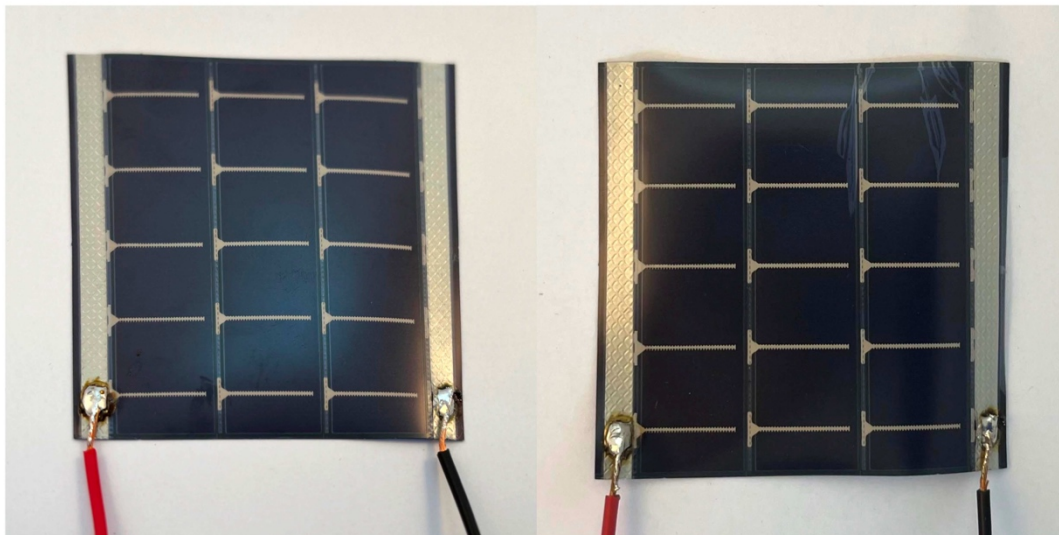
Příloha 10 Zařízení použitá pro elektrická měření

Zařízení	Výrobce	Typ	Sériové/výrobní/inventární číslo
Teplovní senzory	TE Connectivity	Pt1000	NB-PTCO-168
Multimetr	Keithley	DAQ6510	04514653
Měřicí karty	Keithley	7702	253035
Reostat	METRA Blansko	100 Ω	2368819
Reostat	METRA Blansko	1,9 k Ω	2368815
Reostat	METRA Blansko	6,5 k Ω	2304171
Reostat	METRA Blansko	11 k Ω	1266
Reostat	METRA Blansko	15 k Ω	2368812

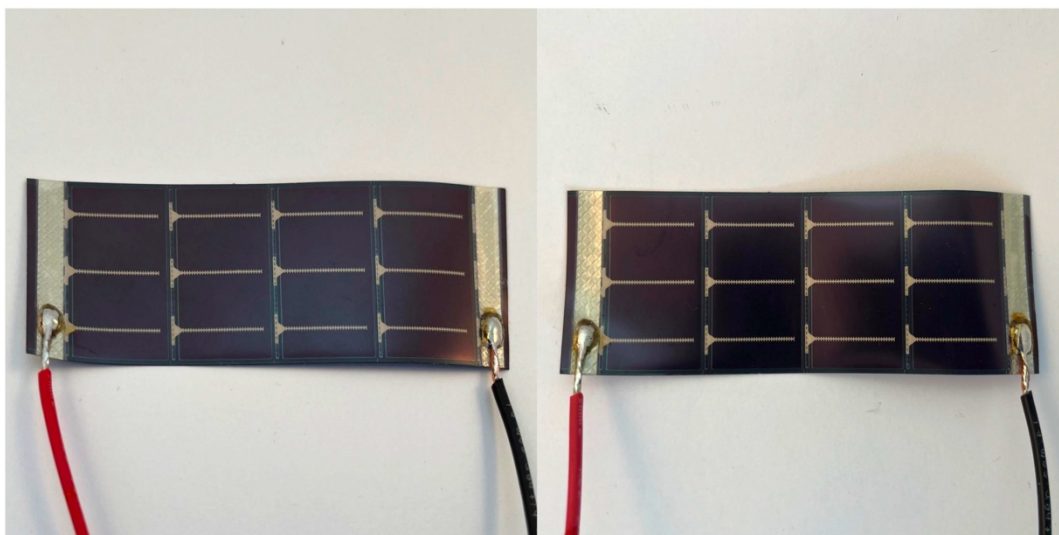
Příloha 11 Charakteristické elektrické parametry VA charakteristik testovaných vzorků

	MPT3.6-75		LL200-4.8-37		BCSC491B6		LAYER	
	Před expozicí	Po expozici	Před expozicí	Po expozici	Před expozicí	Po expozici	Před expozicí	Po expozici
$T_{\text{pod modulem}} (^{\circ}\text{C})$	38,2	37,5	31,9	38,0	31,6	34,8	34,9	39,3
$V_{oc} (\text{V})$	4,98	4,63	6,79	6,56	5,59	5,43	4,58	4,74
$I_{sc} (\text{mA})$	71,38	69,23	30,05	28,75	3,26	3,25	33,07	22,65
$U_{MPP} (\text{V})$	3,65	2,99	4,47	4,23	2,82	2,65	2,90	2,93
$I_{MPP} (\text{mA})$	58,34	51,04	22,86	21,50	1,61	1,68	19,06	15,65
$P_{MPP} (\text{mW})$	212,68	152,35	102,26	90,88	4,55	4,44	55,19	45,83

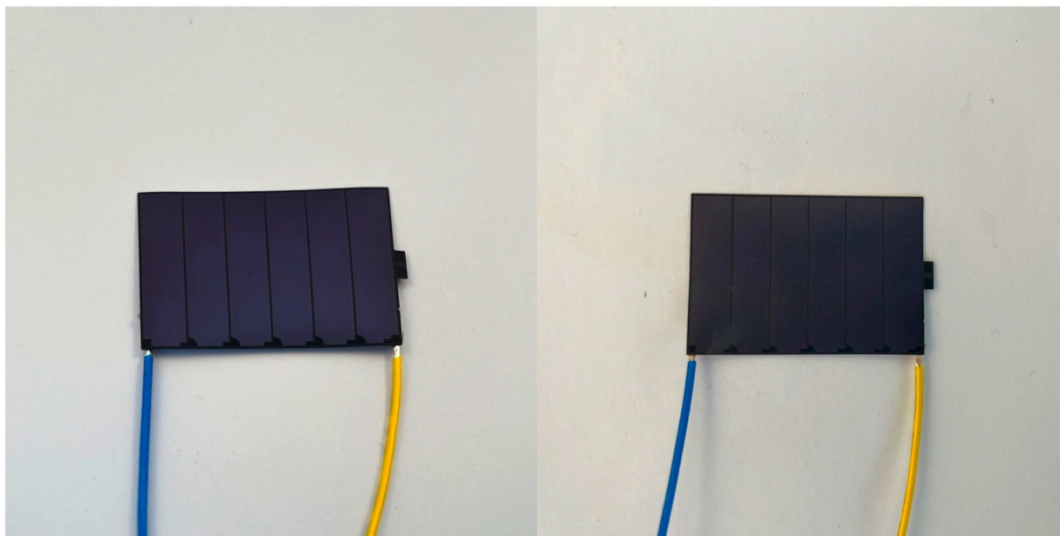
Příloha 12 Vizuální porovnání flexibilního solárního modulu MPT3.6-75 před expozicí (vlevo) a po expozici (vpravo)



Příloha 13 Vizuální porovnání flexibilního solárního modulu LL200-4.8-37 před expozicí (vlevo) a po expozici (vpravo)



Příloha 14 Vizuální porovnání flexibilního solárního modulu BCSC491B6 před expozicí (vlevo) a po expozici (vpravo)



Příloha 15 Vizuální porovnání flexibilního solárního modulu LAYER před expozicí (vlevo) a po expozici (vpravo)

