

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2025

Bc. Dominika Záhumenská



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

TVORBA MAP OZÁŘENÍ V KOMBINACI S FV PANELEM PRO PŘEDMĚT ALTERNATIVNÍ ZDROJE ENERGIE

CREATION OF RADIATION MAPS IN COMBINATION WITH A PV PANEL WITHIN THE AZE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Dominika Záhumenská

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Křivík, Ph.D.

BRNO 2025

Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Elektrotechnická výroba a management**

Ústav elektrotechnologie

Studentka: Bc. Dominika Záhumenská

ID: 262147

Ročník: 2

Akademický rok: 2024/25

NÁZEV TÉMATU:

Tvorba map ozáření v kombinaci s FV panelem pro předmět Alternativní zdroje energie

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Nastudujte teorii o různých typech zdrojů světelného záření a jejich vlivu na ozářené plochy FV panelu. Seznamte se se způsobem měření intenzity dopadajícího záření na plochu ozářenou světelným zdrojem. Provedte měření map intenzit záření dopadajícího na plochu FV panelu a AV charakteristik takto ozářeného FV panelu. Na základě teoretických poznatků vytvořte laboratorní úlohu zkoumající vliv umělého zdroje osvětlení na nerovnoměrnost ozáření FV panelu a na jeho VA a výkonové charakteristiky.

Sestavte měřicí pracoviště a zprovozněte novou laboratorní úlohu v předmětu AZE včetně zadání, teoretického úvodu, schéma zapojení a pracovního postupu.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 10.2.2025

Termín odevzdání: 27.5.2025

Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Křivík, Ph.D.

doc. Ing. Petr Bača, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt

Táto diplomová práca sa zaoberá skúmaním vplyvu svetelných zdrojov na výkon fotovoltických panelov a tvorbou máp ožiarenia. V teoretickej časti sú popísané princípy premeny slnečného žiarenia na elektrickú energiu a charakteristiky rôznych typov svetelných zdrojov. Praktická časť je orientovaná na experimentálne merania s využitím LED lampy a halogénového reflektora. Merané boli voltampérové a výkonové charakteristiky fotovoltického panelu pri rôznych vzdialenostiach zdrojov svetla a vytvorené boli mapy ožiarenia, ktoré vizualizujú rozloženie intenzity svetla dopadajúceho na povrch panelu. Výsledky meraní boli spracované štatisticky a slúžia ako základ pre návrh laboratórnej úlohy vhodnej pre výučbu predmetu Alternatívni zdroje energie.

Kľúčové slová

energia slnka, slnečné žiarenie, fotovoltické systémy, fotovoltika, umelé zdroje svetla, voltampérová charakteristika, mapa ožiarenia

Abstract

This thesis focuses on analyzing the impact of light sources on the performance of photovoltaic panels and on the creation of exposure maps. The theoretical section explains the principles of solar energy conversion and describes various types of light sources. The practical part involves experimental measurements using a 100 W LED lamp and a 500 W halogen reflector. Volt-ampere and power characteristics of the photovoltaic panel were measured at various distances of light sources, and exposure maps were created to visualize the spatial distribution of light intensity on the panel surface. The experimental results were statistically evaluated and form the basis for designing a laboratory task for the course Alternative energy sources.

Keywords

solar energy, solar radiation, photovoltaic systems, photovoltaics, artificial light sources, volt-ampere characteristic, exposure maps

Bibliografická citace

ZÁHUMENSKÁ, Dominika. *Tvorba map ozáření v kombinaci s FV panelem pro předmět Alternativní zdroje energie*. Online, diplomová práce. Petr KŘIVÍK (vedoucí práce). Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2025. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/167606>. [cit. 2025-05-22].

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta:	<i>Dominika Záhumenská</i>
VUT ID studenta:	<i>262147</i>
Typ práce:	<i>Diplomová práce</i>
Akademický rok:	<i>2024/25</i>
Téma závěrečné práce:	<i>Tvorba map ozáření v kombinaci s FV panelem pro předmět Alternativní zdroje energie</i>

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 22. května 2025

podpis autora

Pod'akovanie

Ďakujem vedúcemu diplomovej práce doc. Ing. Petrovi Křivíkovi, Ph.D. za odborné vedenie, metodickú pomoc a cenné rady počas celého vypracovania mojej diplomovej práce. Pod'akovanie patrí aj mojej rodine a priateľom za ich podporu, trpezlivosť a povzbudenie počas celého štúdia.

Obsah

ZOZNAM OBRÁZKOV	9
ZOZNAM TABULIEK	12
ÚVOD	13
1. ENERGIA SLNKA	14
1.1 VYUŽITIE SLNEČNEJ ENERGIE	14
1.1.1 <i>Solárne kolektory</i>	15
1.1.2 <i>Slnečná tepelná elektrárňa</i>	16
1.2 FOTOVOLTICKÉ VYUŽITIE SLNEČNEJ ENERGIE	16
1.2.1 <i>Fotovoltické články</i>	17
1.2.2 <i>Fotovoltické systémy</i>	18
2. UMELE ZDROJE SVETLA	22
2.1 ROZDELENIE UMELÝCH ZDROJOV SVETLA	22
2.1.1 <i>Tepelné svetelné zdroje</i>	23
2.1.2 <i>Výbojové svetelné zdroje</i>	23
2.1.3 <i>Elektroluminiscenčné zdroje</i>	26
2.2 VPLYV RÔZNYCH TYPOV SVETELNÉHO ŽIARENIA NA FOTOVOLTICKÉ PANELY	27
3. VPLYV NEROVNOMERNÉHO OŽIARENIA A ZATIENENIA NA FOTOVOLTICKÝ ČLÁNOK.....	29
3.1 ZATIENENIE FV ČLÁNKU	29
3.2 MATEMATICKÝ MODEL FV ČLÁNKU PRI NEROVNOMERNOM OŽIARENÍ A ZATIENENÍ	29
4. VELIČINY PRE ŠTATISTICKÉ SPRACOVANIE DÁT	32
4.1 ARITMETICKÝ PRIEMER A PRIEMERNÁ ODCHÝLKA	32
4.2 ROZPTYL A SMERODAJNÁ ODCHÝLKA	32
4.3 VARIÁČNÝ KOEFICIENT	33
4.4 NEROVNOMERNOSŤ OŽIARENIA.....	33
5. PRAKTICKÁ ČASŤ.....	34
5.1 POUŽITÉ MERACIE ZARIADENIA	34
5.2 MERANIE OPTIMÁLNEJ VZDIALENOSTI SVETELNÉHO ZDROJA OD FOTOVOLTICKÉHO PANELU PRE DOSIAHNUTIE MAXIMÁLNEHO VÝKONU.....	37
5.2.1 <i>Analýza merania pre LED lampu</i>	39
5.2.2 <i>Analýza merania pre halogénový reflektor</i>	41

5.3	MERANIE INTENZITY ŽIARENIA DOPADAJÚCEHO NA FOTOVOLTICKÝ PANEL ZVOLENÝM ZDROJOM ŽIARENIA	43
5.3.1	<i>Mapy ožiarenia pre LED svetlo</i>	44
5.3.2	<i>Mapy ožiarenia pre halogénový reflektor</i>	51
5.4	MERANIE ROZLOŽENIA TEPLoty NA POVRCHU FV PANELU PRI OŽIARENÍ HALOGÉNOVÝM REFLEKTOROM	58
5.5	ŠTATISTICKÁ ANALÝZA ROZLOŽENIA INTENZITY ŽIARENIA	62
6.	ZÁVER.....	65
	LITERATÚRA.....	66
	ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK	68
	ZOZNAM PRÍLOH.....	69

ZOZNAM OBRÁZKOV

Obr. 1.1 Schéma slnečnej elektrárne [4]	16
Obr. 1.2 Schéma autonómneho fotovoltaického systému [5]	19
Obr. 1.3 Hybridný fotovoltaický systém [5]	20
Obr. 1.4 Zapojenie systému pre vlastnú spotrebu [5]	21
Obr. 1.5 Zapojenie systému pre dodávku do siete [5]	21
Obr. 2.1 Prehľad zdrojov umelého svetla [11]	22
Obr. 2.2 Klasická žiarovka [12]	23
Obr. 2.3 Halogénová žiarovka [12]	23
Obr. 2.4 Kompaktná žiarivka [13]	24
Obr. 2.5 Ortuťová výbojka [13]	24
Obr. 2.6 Sodíková výbojka [13]	25
Obr. 2.7 Halogenidová výbojka [13]	25
Obr. 2.8 Xenónová výbojka [13]	26
Obr. 2.9 Biela LED dióda [15]	26
Obr. 2.10 LED reflektor [12]	27
Obr. 3.1a Ekvivalentný obvod fotovoltaického článku (rozšírený dvojdiódový model s rozvinutým členom) s druhým prúdovým zdrojom charakterizujúcim pokles negatívneho napätia fotovoltaického článku [23]	30
Obr. 3.1b I-U charakteristika fotovoltaického modulu zloženého z 36 fotovoltaických článkov zapojených v sérii bez zatienenia a s 75% zatienením jedného článku [24]	31
Obr. 5.1 LED lampa ADVIVE PLUS LED/100W/230V IP65	34
Obr. 5.2 Halogénový reflektor R650	35
Obr. 5.3 Fotovoltický expozimeter Luton SPM-1116SD	35
Obr. 5.4 Agilent 34972A - LXI Data Acquisition / Switch Unit	36
Obr. 5.6 Vyhodnocovacie pracovisko s počítačom a odporovou dekádou	37
Obr. 5.7 Schéma zapojenia	38
Obr. 5.8 Používateľské rozhranie softvéru Agilent VEE Pro 9.2 pre meranie VA charakteristiky	39
Obr. 5.9 Graf voltampérovej charakteristiky pre LED lampu	40
Obr. 5.10 Graf výkonovej charakteristiky pre LED lampu	40
Obr. 5.11 Závislosť maximálneho výkonu od vzdialenosti pre LED lampu	41
Obr. 5.12 Graf voltampérovej charakteristiky pre halogénový reflektor	42
Obr. 5.13 Graf výkonovej charakteristiky pre halogénový reflektor	42
Obr. 5.14 Závislosť maximálneho výkonu od vzdialenosti pre halogénový reflektor	43
Obr. 5.15 Namerané hodnoty intenzít žiarenia vo výške 37 cm vynesené do 3D grafu pre LED svetlo	44

Obr. 5.16 Namerané hodnoty intenzít žiarenia vo výške 37 cm vynesené do 2D grafu pre LED svetlo	45
Obr. 5.17 Namerané hodnoty intenzít žiarenia vo výške 24,5 cm v rohoch článkov vynesené do 3D grafu pre LED svetlo	46
Obr. 5.17 Namerané hodnoty intenzít žiarenia vo výške 24,5 cm v rohoch článkov vynesené do 2D grafu pre LED svetlo	46
Obr. 5.18 Namerané hodnoty intenzít žiarenia vo výške 24,5 cm v stredoch článkov vynesené do 3D grafu pre LED svetlo	47
Obr. 5.19 Namerané hodnoty intenzít žiarenia vo výške 24,5 cm v stredoch článkov vynesené do 2D grafu pre LED svetlo	47
Obr. 5.20 Namerané hodnoty intenzít žiarenia vo výške 50 cm v rohoch článkov vynesené do 3D grafu pre LED svetlo	48
Obr. 5.21 Namerané hodnoty intenzít žiarenia vo výške 50 cm v rohoch článkov vynesené do 2D grafu pre LED svetlo	48
Obr. 5.22 Namerané hodnoty intenzít žiarenia vo výške 50 cm v stredoch článkov vynesené do 3D grafu pre LED svetlo	49
Obr. 5.23 Namerané hodnoty intenzít žiarenia vo výške 50 cm v stredoch článkov vynesené do 2D grafu pre LED svetlo	50
Obr. 5.24 Závislosť intenzity žiarenia v stredovej osi FV panelu pri osvetlení LED lampou pre rôzne výšky svetelného zdroja.....	50
Obr. 5.25 Namerané hodnoty intenzít žiarenia vo výške 60,5 cm vynesené do 3D grafu pre halogénový reflektor	52
Obr. 5.26 Namerané hodnoty intenzít žiarenia vo výške 60,5 cm vynesené do 2D grafu pre halogénový reflektor	52
Obr. 5.27 Namerané hodnoty intenzít žiarenia vo výške 48 cm v rohoch článkov vynesené do 3D grafu pre halogénový reflektor	53
Obr. 5.28 Namerané hodnoty intenzít žiarenia vo výške 48 cm v rohoch článkov vynesené do 2D grafu pre halogénový reflektor	53
Obr. 5.29 Namerané hodnoty intenzít žiarenia vo výške 48 cm v stredoch článkov vynesené do 3D grafu pre halogénový reflektor	54
Obr. 5.30 Namerané hodnoty intenzít žiarenia vo výške 48 cm v stredoch článkov vynesené do 2D grafu pre halogénový reflektor	55
Obr. 5.31 Namerané hodnoty intenzít žiarenia vo výške 67 cm v rohoch článkov vynesené do 3D grafu pre halogénový reflektor	55
Obr. 5.32 Namerané hodnoty intenzít žiarenia vo výške 67 cm v rohoch článkov vynesené do 3D grafu pre halogénový reflektor	56
Obr. 5.33 Namerané hodnoty intenzít žiarenia vo výške 67 cm v stredoch článkov vynesené do 3D grafu pre halogénový reflektor	57
Obr. 5.34 Namerané hodnoty intenzít žiarenia vo výške 67 cm v stredoch článkov vynesené do 3D grafu pre halogénový reflektor	57

Obr. 5.35 Závislosť intenzity žiarenia v stredovej osi FV panelu pri osvetlení halogénovým reflektorom pre rôzne výšky svetelného zdroja	58
Obr. 5.36 Skúmaný panel s pripojenými snímačmi teploty	59
Obr. 5.37 Používateľské rozhranie softvéru Agilent VEE Pro 9.2 pre meranie rozloženia teploty.....	60
Obr. 5.38 Závislosť teploty FV panelu od času pri osvetlení z výšky 35 cm.....	60
Obr. 5.39 Závislosť teploty FV panelu od času pri osvetlení z výšky 48 cm.....	61
Obr. 5.40 Závislosť teploty FV panelu od času pri osvetlení z výšky 50 cm.....	61

ZOZNAM TABULIEK

Tab. 1 Štatistické údaje vypočítané z nameraných hodnôt pre LED lampu.....	62
Tab. 2 Štatistické údaje vypočítané z nameraných hodnôt pre LED lampu v rozšírenom meraní vo výške 37 cm.....	63
Tab. 3 Štatistické údaje vypočítané z nameraných hodnôt pre halogénový reflektor	63
Tab. 4 Štatistické údaje vypočítané z nameraných hodnôt pre halogénový reflektor v rozšírenom meraní vo výške 60,5 cm.....	64

ÚVOD

Obnoviteľné zdroje energie predstavujú jeden z hlavných pilierov modernej energetiky, ktorá sa čoraz viac zameriava na znižovanie závislosti od fosílnych palív a minimalizáciu negatívnych dopadov na životné prostredie. Medzi najvýznamnejšie obnoviteľné zdroje patrí energia slnka, ktorá je dostupná vo forme svetelného a tepelného žiarenia. Slnko je kľúčovým zdrojom energie, pričom jeho využitie zohráva dôležitú úlohu nielen v energetickom sektore, ale aj vo výskume a vývoji technológií, ako sú fotovoltické systémy.

Fotovoltika ako technológia premeny slnečného žiarenia na elektrickú energiu zažíva v posledných rokoch prudký rozmach. Zároveň s rozvojom fotovoltiky sa rozširujú aj aplikácie umelých svetelných zdrojov, ktoré slúžia na testovanie, simuláciu a optimalizáciu prevádzky fotovoltických panelov. Táto diplomová práca sa zaoberá analýzou vplyvu rôznych svetelných zdrojov, konkrétne LED lampy a halogénového reflektora, pričom cieľom je pochopiť ich vplyv na efektivitu fotovoltických panelov.

Praktická časť tejto práce je venovaná analýze vplyvu dvoch vybraných svetelných zdrojov na výkon fotovoltického panela:

- LED lampa s výkonom 100 W,
- halogénový reflektor s výkonom 500 W.

Experiment zahŕňal meranie elektrických parametrov fotovoltického panela, konkrétne volt-ampérových a výkonových charakteristík, pri rôznych vzdialenostiach svetelných zdrojov od panela. Okrem toho boli vytvorené mapy ožiarenia, ktoré vizualizovali rozloženie intenzity svetla na osvetlenej ploche. V prípade halogénového reflektora bolo skúmané aj rozloženie teploty na povrchu fotovoltického panelu. Tieto merania boli vykonané v kontrolovaných podmienkach, kde jediným zdrojom svetla bol vybraný svetelný zdroj, čo zabezpečilo maximálnu presnosť a elimináciu vonkajších vplyvov.

Práca má dva hlavné ciele:

- analyzovať vplyv LED a halogénových svetelných zdrojov na výkon fotovoltického panela,
- vytvoriť návrh laboratórnej úlohy, ktorá umožní hlbšie pochopiť interakciu medzi svetelnými zdrojmi a fotovoltickými systémami.

V ďalších kapitolách tejto práce sú experimentálne výsledky podrobne spracované a vizualizované. Výsledky prinášajú cenné poznatky, ktoré slúžia ako podklad pre návrh laboratórnej úlohy.

1. ENERGIA SLNKA

Slnko je veľká plazmová guľa, ktorá je zložená najmä z vodíka (74,9%), hélia (23,8%) a malých množstiev iných atómov alebo prvkov. Plazma je stav, kde sú elektróny oddelené od jadier kvôli veľmi vysokým teplotám. Procesom jadrovej fúzie sa protóny menia na jadrá hélia a tým sa uvoľňuje energia.

Slnko vysiela elektromagnetické žiarenie, ktoré dopadá na atmosféru Zeme a je ovplyvnené mnohými faktormi, ako je vzdialenosť Zeme od Slnka, ktorá žiarenie oslabuje, alebo atmosférické javy, ktoré menia množstvo žiarenia dopadajúceho na zemský povrch. Slnčné žiarenie má obrovský potenciál, napriek tomu, že iba približne 50% pôvodného žiarenia dosiahne povrch Zeme. Slnčná energia výrazne prevyšuje súčasné energetické potreby ľudstva, no jej využitie závisí na prírodných podmienkach a dostupných technológiách.

Celkové slnečné žiarenie sa mení na rôzne typy žiarenia pri prechode atmosférou. Žiarenie, ktoré dopadá na zemský povrch, pričom nedochádza k zmene smeru nazývame priame žiarenie. Žiarenie, ktoré neprechádza priamou cestou, teda nepriame žiarenie, je ovplyvnené odrazom od zemského povrchu alebo iných objektov a má iné spektrálne zloženie ako priame svetlo. Tento jav je spôsobený rozptýlením a odrazom žiarenia na molekulách vzduchu, vodnej party a iných častíc [1].

1.1 Využitie slnečnej energie

V bežnej praxi sa využívajú dva hlavné spôsoby využitia slnečnej energie. Pasívne využitie sa zakladá na zachytávaní slnečného žiarenia pomocou konštrukcii budov a jeho premenou na teplo pomocou takzvanej solárnej architektúry. Na druhej strane aktívne využitie slnečnej energie, ktoré sa ďalej delí podľa využitia na výrobu tepla a teplej vody alebo elektriny [1].

Pasívne využitie slnečného žiarenia spočíva v architektonických riešeniach budov, ktoré umožňujú nielen efektívne využívanie slnečného žiarenia, ale tiež aj skladovanie a distribúciu získanej energie v interiéri. Koncept pasívnej solárnej architektúry integruje rôzne technológie a materiály s cieľom regulovať teplotu a osvetlenie vnútorných priestorov budov. Tento prístup zahŕňa optimalizáciu stavebných prvkov, ako je izolácia a kvalitné okná, správna orientácia budovy a rozmiestnenie interiérových prvkov pre dosiahnutie maximálneho energetického výkonu [2].

Klasickým spôsobom využívania slnečnej energie je zohrievanie vody slnkom. Malé systémy na ohrev vody používajú ploché kolektory na zachytávanie tepla zo slnka, zatiaľ čo solárne tepelné elektrárne využívajú rôzne koncentračné zariadenia na sústredenie slnečného svetla a dosahovanie vysokých teplôt potrebných na výrobu elektrickej energie. Solárne teplo bez sústredenia slnečného svetla môže byť použité na:

- solárny ohrev vody,

- solárne vykurovanie priestorov v budovách,
- solárne chladenie priestoru [3].

1.1.1 Solárne kolektory

Rozlišujeme 3 základné typy solárnych kolektorov:

- ploché kolektory,
- vákuové trubicové kolektory,
- integrálne kolektorovo-akumulačné systémy [3].

Ploché kolektory

Ploché kolektory sú najbežnejším typom solárnych kolektorov pre systémy ohrevu vody a vykurovania priestorov. Používajú sa najmä na ohrev vody v domácnostiach a na inštaláciu podlahového kúrenia. Ploché kolektory prenášajú teplo slnka do vody buď priamo alebo prostredníctvom iného média a výmenníka tepla.

Základný návrh plochého kolektora má izolovaný spodný povrch v kovovej skrini s tmavou absorpčnou doskou na vrchu, ktorá absorbuje väčšinu slnečnej energie. Izolácia bráni úniku tepla cez zadnú časť kolektora. Nad absorpčnou doskou je umiestnené sklené alebo plastové krytie nazývané povrchová vrstva. Tá zachytáva teplo vo vnútri kolektora. Absorpčná doska prenáša energiu zo slnečného žiarenia do tekutiny, ktorá cirkuluje vnútri. Absorpčné dosky sú často potiahnuté špeciálnou vrstvou na maximalizáciu zberu slnečného žiarenia.

Vákuové trubicové kolektory

Vákuové trubicové kolektory sú navrhnuté tak, aby dosiahli teplotu v rozsahu 77 - 177°C. Takáto teplota je najvhodnejšia na vykurovanie a pre ďalšie priemyselné aplikácie. Vákuové trubicové kolektory sú drahšie než ploché kolektory a náklady na jednotkovú plochu sú približne dvojnásobne vyššie.

Sklené trubice sú umiestnené vo vnútri kolektora pod povrchom glazúry v paralelných radoch. Každá trubica obsahuje vonkajšiu sklenú trubicu a kovovú absorpčnú trubicu, ktorá je privedená ku chladiču. Chladiče sú potiahnuté vrstvou na maximalizáciu absorpcie slnečnej energie a minimalizáciu radiačných tepelných strát. Vákuový systém sa používa na odstránenie vzduchu z priestoru medzi dvoma sklenými trubicami. Týmto spôsobom sa minimalizujú vodivé a konvektívne tepelné straty [3].

Integrálne kolektorovo-akumulačné systémy

Základom takýchto systémov je potrubie, do ktorého vstupuje studená voda a môže byť odvedená buď do ohrievača vody alebo do zberača. Zberač je vyrobený z jedného alebo viacerých čiernych nádrží alebo trubic v izolovanej sklenej schránke. Studená voda je predhriata v solárnom kolektore a potom pokračuje do konvenčného záložného ohrievača vody. Zberač je veľká schránka s nádržou, ktorá je pokrytá glazúrou obrátenou

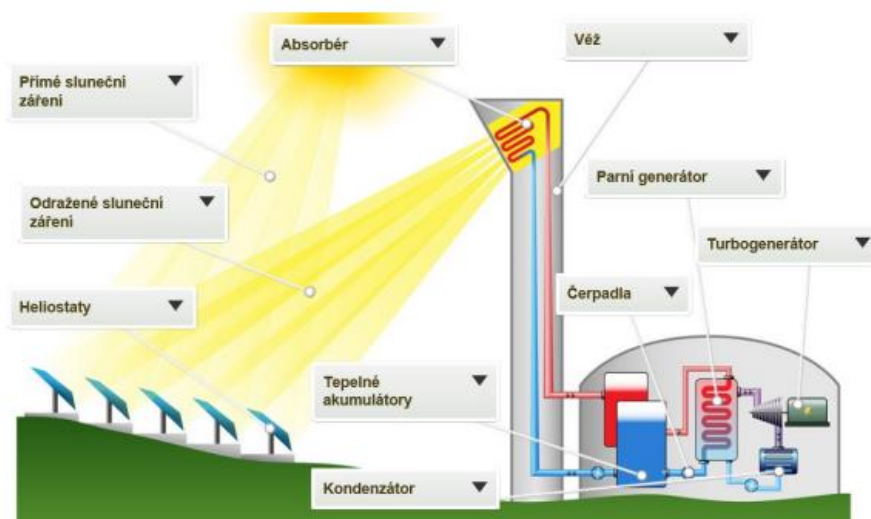
k Slnku. Voda zo zásobníka solárneho ohrievača/záložného ohrievača vody je potom distribuovaná do domácej vodovodnej siete [3].

1.1.2 Slnčná tepelná elektráreň

Slnčná energia môže byť využitá aj v slnečnej tepelnej elektrárni, ktorá získava teplo priamo zo slnečného žiarenia. Kotel (absorbér) slnečnej elektrárne je umiestnený na veži elektrárne priamo v ohnisku fokusačného zberača, kam mieri slnečné žiarenie odrazené pomocou otáčavých rovinných zrkadiel. V tepelnom výmenníku, ktorý je v absorbéri, sa teplo zo slnečného žiarenia prenáša do teplotnosného média, ktoré obieha v primárnom okruhu.

Teplo je následne prenášané do parného generátora, kde sa voda v sekundárnom okruhu mení na horúcu paru, tým poháňa turbínu, ktorá poháňa turbogenerátor a generuje elektrický prúd. Para je po prechode turbínou ochladzovaná v kondenzátore a vo forme kvapaliny sa vracia späť do parného generátora.

Tepelné akumulátory slúžia ako zásobníky teplotnosného média a zásobníky tepla pre prípad, že Slnko nesvieti. Schéma slnečnej elektrárne je znázornená na Obr. 1.1 [4].



Obr. 1.1 Schéma slnečnej elektrárne [4]

1.2 Fotovoltické využitie slnečnej energie

Fotovoltické systémy zabezpečujú priamu premenu slnečného žiarenia na elektrinu v tzv. fotovoltických článkoch. Systémy založené na fotovoltických článkoch sú bežne známe ako solárne články a sú používané v rade zariadení ako sú kalkulačky, hodinky či rádiá. Veľké solárne články môžu byť využité k poskytovaniu energie pre čerpanie vody, komunikačné vybavenie, satelity či osvetlenie domov. Solárne články sú vyrobené z polovodičových materiálov na báze kremíku. Fotovoltické prvky môžu byť spojené do rôznych modulov, z ktorých je možné zostaviť i veľké solárne elektrárne [2],[4].

1.2.1 Fotovoltické články

Základným princípom fotovoltického článku je fotoelektrický jav, kedy sú elektróny uvoľňované z látky v dôsledku absorpcie elektromagnetického žiarenia látkou. Absorpcia je spôsobená interakciou svetla (fotónmi) s časticami hmoty – elektrónmi a jadrami a môžu nastať tieto deje:

- Interakcia častice s mriežkou – využívané sú nízkoenergetické fotóny.
- Interakcia s voľnými elektrónmi – dochádza iba k zvýšeniu teploty.
- Interakcia s viazanými elektrónmi – vznikajú voľné nosiče nábojov a môže dôjsť k uvoľneniu elektrónu z väzby.

Pre funkciu FV článku je zásadné, aby fotón zo slnečného žiarenia uvoľnil v látke elektrón a vznikol pár elektrón – diera. V kovoch dochádza k ich okamžitej rekombinácii, ktorej je treba zabrániť a vzniknutý náboj odviezť z článku. Pre tento účel sa využívajú polovodiče, v ktorých sú elektróny a diery separované vnútorným elektrickým poľom PN prechodu.

Najjednoduchší popis fotovoltického článku je možné uviesť ako diódu s jedným PN prechodom. Pre úspešnú fotovoltickú premenu je dôležité splniť podmienky:

- Fotón musí byť absorbovaný.
- Fotón musí excitovať elektrón do vyššieho energetického pásma.
- Vytvorený pár elektrón-diera musí byť oddelený, aby sa nespojil späť.
- Oddelené náboje sú následne privedené k spotrebiču [5].

Kremíkové solárne články

Kremíkové solárne články sa vyrábajú z monokryštalického alebo polykryštalického kremíka. Monokryštalické články, najstarší typ fotovoltických článkov, sa vyrábajú ťahaním kryštalického zárodku z taveniny čistého kremíka. Ingoty sa následne rozrežú na plátky hrúbky 0,25–0,35 mm, upravia a dopujú fosforom, čím sa vytvorí PN prechod. Tento typ sa využíva v aplikáciách s obmedzeným priestorom, napríklad v kozmonautike. Účinnosť monokryštalických článkov a dnes za v priemyselnej výrobe pohybuje v intervale 17 - 22% [6], [7].

Polykryštalické články sú lacnejšie na výrobu, pretože sa vyrábajú odlievaním kremíka do foriem a rezaním na plátky. Táto metóda je menej náročná a efektívnejšie využíva materiál. Polykryštalické články majú o niečo nižšiu účinnosť ako monokryštalické, ale sú cenovo výhodnejšie. Ich účinnosť sa pohybuje medzi 13 – 17 % [6], [8].

Tenkvrstvé moduly

Tenkvrstvé solárne moduly sa vyvíjajú s cieľom znížiť náklady, zlepšiť účinnosť a stabilitu. Na sklenú podložku sa nanáša vrstva TCO (transparentný vodivý oxid), laserom sa vytvárajú prúžky článkov a plazmovou depozíciou sa nanáša tenkvrstvý článok. Po odstránení štruktúr laserom sa pridáva kovový kontakt a tretím rezom sa

vytvára modul so sériovo spojenými článkami. Nakoniec sa pripevňuje krycia vrstva a vývody sa spoja do svorkovnice. Účinnosť týchto modulov je 7–13 %. [6].

Solárne články z amorfného kremíku (a-Si:H)

Perspektívny materiál pre výrobu solárnych článkov je amorfný kremík, hlavne kvôli jeho optoelektrickým vlastnostiam. Má šírku zakázaného pásma 1,7 eV a vysoký súčiniteľ absorpcie viditeľného svetla, čo mu umožňuje vstrebávať väčšinu slnečnej energie vo vrstve menšej ako 1 μm . Tenké a flexibilné fotovoltické články sa využívajú ako aplikácie na odevy alebo krycie fólie na strechy. Nevýhodou tohto materiálu je jeho nepravidelná štruktúra, ktorá má mnoho nedostatkov a vedie k zníženej účinnosti, často v rozsahu 6 - 8%. [6].

Solárne články z teluridu kadmennatého (CdTe)

Podobne ako amorfný kremík, aj tento materiál vykazuje vysoký absorpčný koeficient a šírku zakázaného pásma (1,5 eV), čo ho zaradzuje medzi vhodné materiály pre fotovoltiku. Avšak kvôli jeho nedostatku v zemskej kôre nie je možné ho využiť na hromadnú výrobu solárnych článkov. Namiesto toho sa často využíva v menších aplikáciách, ako sú solárne články pre kalkulačky alebo na napájanie navigačných a telekomunikačných zariadení. [6].

CIS solárne články – med' indium selén (CuInSe₂)

Články CIS majú vytvorený PN prechod prvkami meď, indium a selén. Aj keď sú veľmi tenké, excelujú vo vysokom absorbovaní slnečného žiarenia; v prvom mikrometri ich hrúbky dokážu absorbovať až 99 % slnečného žiarenia. Ďalšou výhodou je ich teplotný koeficient, ktorý v lete neovplyvňuje účinnosť tak dramaticky ako u kryštalických kremíkových článkov. Ich vysoká účinnosť využíva aj difúzne svetlo, čo je výhodné v oblačných alebo hmlistých podmienkach. V laboratóriách dosahujú účinnosť až 18 %. [6].

1.2.2 Fotovoltické systémy

Fotovoltické panely vystavené slnečnému žiareniu generujú jednosmerný prúd. Avšak pre jeho distribúciu a efektívne využitie sú potrebné ďalšie technické komponenty ako akumulátorová batéria, menič, regulátor, meracie zariadenia a podobne. Táto kombinácia technických prvkov sa označuje ako fotovoltický systém [9].

Fotovoltické systémy môžeme z hľadiska aplikácie rozdeliť na 2 základné typy:

- autonómne systémy (Off-grid),
- hybridné systémy s akumuláciou,
- systém pripojený do siete bez akumulácie (On-grid).

Autonómny systém (Off – grid)

Tento typ systému je tiež známy ako ostrovný alebo Off - grid. Používa sa najmä v podmienkach, kde nie je prístup k elektrickej energii, alebo kde by inštalácia elektrickej bola finančne náročná. Ide o odľahlé lokality, rekreačné strediská, chaty a iné.

Tieto systémy pozostávajú z fotovoltických modulov, akumulátorovej batérie a ochranného obvodu, ktorý zabraňuje prebitiu alebo vybitiu batérie.

Autonómne systémy využívajú špeciálne akumulátorové batérie navrhnuté tak, aby podporovali postupné nabíjanie a vybíjanie. Proces nabíjania a vybíjania je riadený regulátorom, ktorý zabezpečuje optimálnu efektivitu. Ostrovný systém umožňuje pripojenie spotrebičov napájaných jednosmerným prúdom (zvyčajne 12 alebo 24 V) a bežných spotrebičov s napätím 230 V/50 Hz prostredníctvom meniča napätia. Tieto systémy nachádzajú uplatnenie napríklad pri napájaní elektrickej energie pre chaty, dopravné signalizačné zariadenia, telekomunikačné systémy či monitorovacie prístroje v teréne. Okrem toho sa využívajú aj na osvetlenie záhrad alebo svetelné reklamy. Blokovaná schéma autonómneho fotovoltického systému je na Obr. 1.2 [5].



Obr. 1.2 Schéma autonómneho fotovoltického systému [5]

Hybridné systémy bez akumulácie

Hybridný fotovoltický systém predstavuje kombináciu tradičnej sieťovej elektrárne (On-grid) a ostrovného systému (Off-Grid). V porovnaní so systémami On-grid ponúkajú hybridné fotovoltické systémy výhodu v maximálnom využití vyrobenej energie priamo na mieste výroby. Táto energia môže byť využitá na napájanie elektrických zariadení, prikurovanie, ohrev teplej úžitkovej vody, klimatizáciu, zavlažovanie, prevádzku bazéna alebo iné vopred určené spotrebiče, bez zbytočného presunu prebytočnej energie do distribučnej siete.

Ďalšou významnou výhodou hybridného fotovoltického systému je integrovaná funkcia na efektívne využitie prebytkovej energie počas výkonových špičiek. Inteligentný hybridný menič dokáže v reálnom čase alebo s riadeným oneskorením presmerovať

prebytočnú energiu do energeticky náročných spotrebičov. Príklad hybridného fotovoltického systému je na Obr. 1.3 [5].



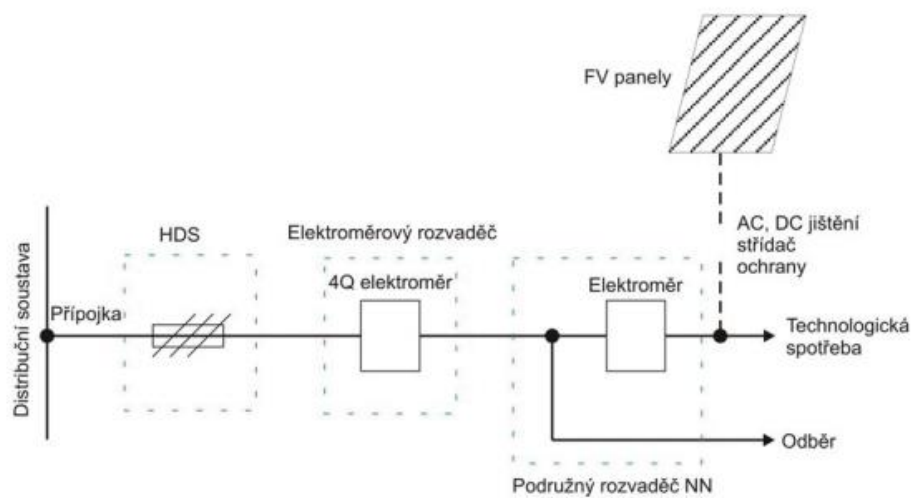
Obr. 1.3 Hybridný fotovoltický systém [5]

Systém pripojený do siete (On – grid)

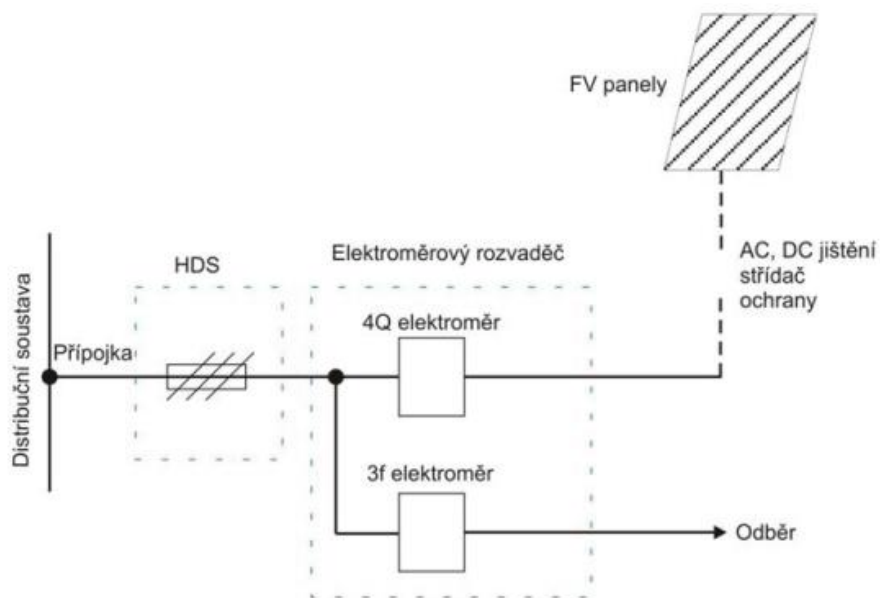
Výhodou systémov On-grid je, že všetka vyrobená elektrická energia sa efektívne spracuje, na rozdiel od systémov Off-grid. Tieto systémy sa zvyčajne skladajú z väčšieho počtu fotovoltických modulov, meniča napätia (invertora), zariadení na meranie a reguláciu a sieťových ochranných prvkov. Pripojenie fotovoltických systémov do elektrizačnej sústavy je možné realizovať dvoma základnými spôsobmi, ako je znázornené na Obr. 1.4 a 1.5 [5].

Na Obr. 1.4 je znázornené zapojenie, ktoré sa využíva v prípade, keď sa prevažná časť vyrobenej elektrickej energie spotrebuje priamo v objekte s inštalovaným fotovoltickým systémom. Za hlavnou domovou skriňou (HDS) je umiestnený štvorkvadrantový elektromer (4Q), za ktorým nasleduje domová elektroinštalácia a fotovoltická elektrárň pripojená prostredníctvom ďalšieho elektromera [5].

Na Obr. 1.5 je zobrazený systém zapojenia, ktorý sa využíva v prípadoch, keď výrobca dodáva všetku vyrobenú elektrickú energiu priamo do elektrizačnej sústavy. Fotovoltická elektrárň je v tomto prípade pripojená medzi existujúci elektromer a hlavnú domovú skriňu (HDS) prostredníctvom štvorkvadrantového elektromera [5].



Obr. 1.4 Zapojenie systému pre vlastnú spotrebu [5]



Obr. 1.5 Zapojenie systému pre dodávku do siete [5]

2. UMELÉ ZDROJE SVETLA

V minulosti bolo bežné využívať ako zdroj svetla prirodzené denné svetlo a po zotmení sa osvetlenie dosahovalo iba pomocou ohňa. V priebehu 19. storočia došlo k prelomu, kedy bola vynájdená žiarovka a začala sa používať ako alternatíva k dennému svetlu. V súčasnej dobe sa umelé zdroje svetla využívajú takmer vo všetkých pracovných odvetviach či v domácnostiach.

Umelé zdroje svetla sú technologické zariadenia navrhnuté na vytvorenie svetla. Patria sem napríklad žiarovky, LED svetlá, výbojky či OLED panely. Tieto zdroje svetla majú rôzne využitie od osvetlenia domácností a verejných priestorov, až po použitie v elektronike a obrazových technológiách. Ich efektívnosť a trvácnosť sa stále zlepšuje vďaka pokroku v technológiách.

2.1 Rozdelenie umelých zdrojov svetla

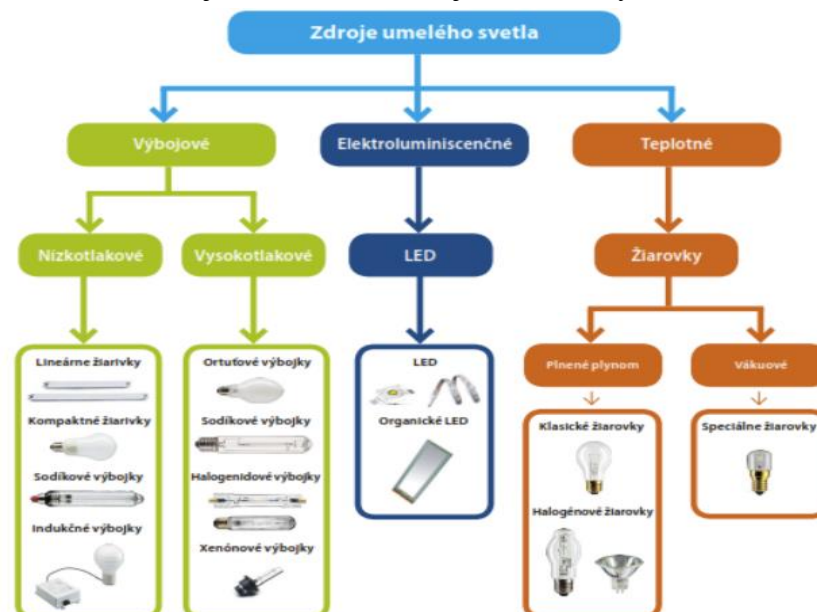
Základné delenie umelých zdrojov svetla je na:

- spaľovacie (sviečka, fakľa, kahan,...),
- elektrické (žiarovka, výbojka,...).

Umelé svetelné zdroje sa ďalej rozdeľujú podľa rôznych hľadísk, jedným z nich je podstata vzniku svetla. Rozoznávame elektrické svetelné zdroje fungujúce na princípe:

- teplotného žiarenia,
- žiarenia elektrického výboja v plynach alebo výparoch kovov,
- luminiscenčného žiarenia,
- laserového žiarenia [10].

Prehľad a rozdelenie zdrojov umelého svetla je znázornený na Obr. 2.1 nižšie.



Obr. 2.1 Prehľad zdrojov umelého svetla [11]

2.1.1 Teplotné svetelné zdroje

Klasické žiarovky sú najznámejšie a najrozšírenejšie, avšak sú energeticky najmenej účinné. Iba 3 – 8 % vstupujúcej energie premenia na svetlo a zvyšok sa stráca ako teplo. Z tohto dôvodu bola výroba klasických žiaroviek postupne ukončená Európskou úniou. Žiarovky boli bežne využívané predovšetkým v kancelárskych priestoroch a v domácnostiach [11].



Obr. 2.2 Klasická žiarovka [12]

Halogénové žiarovky majú až o 15 % vyšší svetelný tok ako klasické žiarovky, ich životnosť je taktiež dlhšia a nezávisí od počtu spínacích cyklov. Podanie farieb je porovnateľné s klasickými žiarovkami, no sú oveľa drahšie. Halogénové žiarovky by nemali byť umiestňované v blízkosti horľavých látok, z dôvodu ich vysokej teploty. Sú využívané v domácnostiach, v automobiloch či ako osvetlenie letiskových dráh [11].



Obr. 2.3 Halogénová žiarovka [12]

Vákuové žiarovky sú špeciálnym typom žiaroviek a slúžia na špecifické účely. Sklenená banka týchto žiaroviek musí byť odolná, nakoľko sa využívajú napríklad na osvetlenie priemyselných pecí či rúr na pečenie [11].

2.1.2 Výbojové svetelné zdroje

Patria medzi rozšírené svetelné zdroje, najmä pre ich pomer ceny a výkonu. Sú ekonomickejšie ako žiarovky a premieňajú viac ako 25 % dodanej energie na svetlo.

Vyžarujú menej tepla ako žiarovky a preto sa nazývajú aj studené zdroje svetla. Podľa tlaku plniacej látky rozlišujeme nízkotlakové a vysokotlakové výbojky.

Nízkotlakové ortuťové výbojky (žiarivky) patria v súčasnosti k najčastejšie používaným. Pri zapálení predradníkom vzniká výboj v parách ortuti, ktorý je zdrojom ultrafialového žiarenia. To sa následne premieňa na viditeľné svetlo vo vrstve luminoforu, ktorým je pokrytá trubica žiarovky. Luminofory môžu byť širokopásmové alebo úzkopásmové, čo ovplyvňuje spektrálne zloženie emitovaného svetla a účinnosť.

Nie je vhodné používať tento typ zdroja na vonkajšie osvetlenie, pretože pri nízkych teplotách ich svetelný tok výrazne klesá. Počas prevádzky postupne klesá aj merný výkon žiaroviek. Životnosť žiariviek je výrazne ovplyvnená aj jej počtom spínaní.

Ich hlavnou výhodou je vysoká svetelná účinnosť, nízka spotreba energie a dlhá životnosť. Vyžarujú svetlo podobné ako klasické žiarovky, čo umožňuje kvalitné podanie farieb. Vyrábajú sa ako lineárne žiarivky s dvojbodovým uchytením do špeciálnych objímok a ako kompaktné žiarivky [10], [11].



Obr. 2.4 Kompaktná žiarivka [13]

Vysokotlakové ortuťové výbojky sú typ svetelného zdroja, v ktorých svetlo vzniká ako výsledok ortuťového výboja pri parciálnom tlaku, ktorý prevyšuje hodnotu 100 kPa. To sa týka výbojok s priehľadnou vonkajšou bankou a s bankou pokrytou luminoforom, v ktorom je časť svetla vytváraná pri výboji a časť vo vrstve luminoforu vybudenom UV žiarením. V minulosti sa tento typ výbojok používal k osvetlení vnútorných a vonkajších priestorov. Dnes je už považovaný za nevhodný a zastaralý zdroj svetla. Účinnosťou a podaním farieb nedokážu konkurovať halogénovým výbojkám [11].



Obr. 2.5 Ortuťová výbojka [13]

Vysokotlakové sodíkové výbojky vyžarujú svetlo charakteristické žltoranžovým odtieňom. Vďaka ich vysokej účinnosti sa často používajú na osvetlenie ulíc, verejných priestorov či oblastí s častou hmlou. Hoci ich veľkou výhodou je dlhá životnosť a ekonomická dostupnosť, ich nevýhodou je nízky index podania farieb, čo znamená horšie rozlíšenie farieb v osvetlenom priestore [11].



Obr. 2.6 Sodíková výbojka [13]

Vysokotlakové halogenidové výbojky sú moderným variantom ortuťových výbojok a obsahujú pary ortuti a halogenidových kovov. Produkujú biele svetlo podobné dennému, čím zaisťujú dobré podanie farieb. Sú dostupné v rôznych farebných teplotách a využívajú sa tam, kde je dôležitá intenzita osvetlenia a vernosť farieb, napríklad v športových halách, nákupných centrách alebo priemyselných budovách. Ich nevýhodou je vyššia prevádzková teplota a obsah ortuti [11].



Obr. 2.7 Halogenidová výbojka [13]

Xenónové výbojky fungujú na princípe výboja medzi volfrámovými elektródami v prostredí naplnenom ionizovaným xenónovým plynom. Vytvárajú intenzívne svetlo s výborným podaním farieb a často sa využívajú v automobilových reflektoroch, najmä v stretávacích svetlách [11].



Obr. 2.8 Xenónová výbojka [13]

2.1.3 Elektroluminiscenčné zdroje

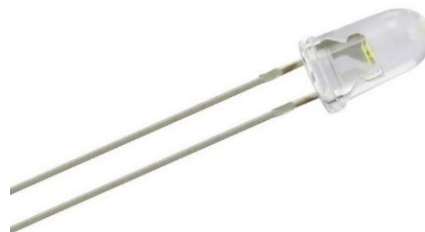
Ďalšou možnosťou sú svetelné zdroje využívajúce LED technológiu, ktoré postupne nahradzujú úsporné žiarivky a žiarovky. Zdrojom svetla je dióda emitujúca svetlo.

LED dióda je polovodičová súčiastka, ktorá pri prechode prúdu vyžaruje elektromagnetické žiarenie. Vyznačuje sa rýchlym zapínaním a vypínaním, nízkym napájacím napätím, vysokou účinnosťou a dlhodobou spoľahlivosťou. Tieto diódy majú malé rozmery a vysoký pomer svetelného toku k jednotke výkonu (lm/W). Zariadenia dokážu pokryť rôzne vlnové pásma, od infračerveného, cez viditeľné až po ultrafialové spektrum, v závislosti od konkrétneho typu diódy.

Hlavnou súčasťou LED diódy je PN prechod, umiestnený v substráte spolu s prívodovými konektormi. Elektromagnetické vlny sú emitované vďaka viacvrstvovým polovodičovým štruktúram. Pri aplikácii kladného napätia na anódu dochádza k zmenšovaniu potenciálovej bariéry na PN prechode, čím sa elektróny a diery začínajú rekombinovať, čo vedie k vzniku elektrického prúdu. Počas tohto procesu dióda emituje fotóny s rôznou vlnovou dĺžkou, ktorá závisí od materiálu použitých polovodičov. Šírka potenciálovej bariéry ovplyvňuje výslednú farbu vyžarovaného svetla – čím širšia je bariéra, tým menšia je vlnová dĺžka emitovaného svetla [14].

Biele LED diódy

Biele svetlo z LED diód možno dosiahnuť dvoma spôsobmi. Prvý zahŕňa RGB technológiu, ktorá kombinuje červenú, zelenú a modrú diódu v jednom puzdre, pričom výsledná farba je riadená softvérom. Druhý, jednoduchší spôsob, spočíva v pridávaní fosforových prímiesí k modrej dióde. Fosfor určuje výslednú farebnú teplotu svetla, pričom väčšia hustota prímiesí zvyšuje teplotu svetla [14].



Obr. 2.9 Biela LED dióda [15]

Výkonové LED diódy

Výkonové LED diódy dosahujú výkon od jednotiek až po desiatky wattov a vyznačujú sa vysokým merným výkonom (lm/W). Využívajú technológiu SMD, vďaka ktorej nachádzajú široké uplatnenie, no ich prevádzka generuje viac tepla, čo si vyžaduje chladiace prvky. Na zvýšenie účinnosti využívajú heteroštruktúry, kde vrstvy P a N prechodu pozostávajú z rôznych polovodičových materiálov [14].



Obr. 2.10 LED reflektor [12]

2.2 Vplyv rôznych typov svetelného žiarenia na fotovoltaické panely

Výkon fotovoltaických panelov je zásadne ovplyvnený vlastnosťami dopadajúceho svetelného žiarenia. Pre fotovoltaické články sú dôležité špecifické parametre žiarenia a to, spektrálne zloženie svetla, rovnomernosť dopadu na povrch, intenzita vo využiteľnom rozsahu vlnových dĺžok a taktiež teplota žiarica, ktorá ovplyvňuje zahriatie článku.

Fotovoltaické články, obzvlášť tie na báze monokryštalického či polykryštalického kremíka, sú citlivé na fotóny s vlnovou dĺžkou približne od 400 do 1100 nm. Fotóny s vlnovou dĺžkou kratšou ako 300 nm sú často blokované krycím sklom alebo sa neabsorbujú účinne, zatiaľ čo fotóny dlhšie ako 1100 nm nemajú dostatočnú energiu na generovanie páru elektrón-diera. Tieto obmedzenia sú dané šírkou zakázaného pásma kremíka, ktorá je približne 1,12 eV [16].

Najprirodzenejším a najefektívnejším zdrojom žiarenia je Slnko. Slnčné svetlo poskytuje širokospektrálne a plynulé elektromagnetické žiarenie, ktoré pokrýva takmer celé pásmo citlivosti kremíkových článkov. Štandardné testovacie podmienky definujú dopadajúce žiarenie pomocou spektrálneho štandardu AM1.5 G, čo zodpovedá slnečnému žiareniu dopadajúcemu pod uhlom 48° k zenitu. Toto spektrum slúži ako základ pre navrhovanie a kalibráciu FV systémov v laboratórnych aj reálnych podmienkach [17].

Prirodzené slnečné svetlo je však premenné, mení sa v závislosti od dennej doby, meteorologických podmienok, znečistenia ovzdušia a iných faktorov. V laboratórnych

podmienkach sa preto používajú umelé svetelné zdroje, ktoré umožňujú presne regulovať intenzitu, teplotu a spektrum žiarenia.

Halogénové žiarovky patria medzi najjednoduchšie a najdostupnejšie zdroje svetla používané pri základných testovacích aplikáciách. Pokrývajú viditeľné pásmo a výrazne aj infračervené (vlny nad 1100 nm). Veľká časť ich výkonu je vyžarovaná ako teplo mimo citlivosti kremíka, čo neprodukuje prúd, ale ohrieva panel. Halogénové lampy tiež prakticky nevyžarujú UV (vlny pod 400 nm), pretože ho pohlcuje sklenená banka, takže nedokážu simulovať celú slnečnú UV zložku [18].

LED zdroje svetla sa čoraz viac uplatňujú v moderných solárnych simulátoroch vďaka svojej nízkej energetickej náročnosti, vysokej stabilite a možnosti presne nastaviť spektrálne rozloženie. Samotná biela LED pokrýva predovšetkým pásmo viditeľného svetla a nie je schopná naplno osvetliť celý rozsah 400 – 1100 nm. Pokročilé LED simulátory preto využívajú kombináciu viacerých farebných LED, vďaka čomu je možné dosiahnuť spektrum porovnateľné s AM1.5 G. LED zdroje navyše prakticky negenerujú infračervené žiarenie smerom k panelu, čo minimalizuje teplotný vplyv na meranie a zvyšuje sa opakovateľnosť výsledkov [16].

Výbojkové zdroje, ako sú xenónové a metal-halogenidové lampy, poskytujú širokospektrálne žiarenie, ktoré sa po filtrácii blíži spektru prirodzeného slnečného svetla. V kombinácii s optickými prvkami umožňujú dosiahnuť vysokú rovnomernosť osvetlenia a stabilitu intenzity, čím sú ideálne pre presné a normované testovanie FV panelov. Ich nevýhodou sú vyššie obstarávacie a prevádzkové náklady, ako aj potreba aktívneho chladenia alebo filtrov na potlačenie nadbytočného infračerveného žiarenia [19].

Každý zo spomínaných svetelných zdrojov ovplyvňuje výkon FV článku inak – najmä v závislosti od toho, ako dobre jeho spektrum zodpovedá citlivosti článku a ako rovnomerne dopadá na plochu panela. Kým slnečné svetlo predstavuje prirodzený a ideálny zdroj, v laboratórnych podmienkach sa čoraz častejšie využívajú LED a výbojkové simulátory, ktoré umožňujú presné a stabilné testovanie. Halogénové žiarovky sú dostupné a lacné, avšak ich spektrum a tepelný výstup môžu výsledky experimentov skresľovať. Pre spoľahlivé laboratórne merania je preto dôležité vybrať taký zdroj, ktorý čo najviac zodpovedá požiadavkám konkrétneho FV článku a zámeru experimentu.

3. VPLYV NEROVNOMERNÉHO OŽIARENIA A ZATIENENIA NA FOTOVOLTICKÝ ČLÁNOK

Fotovoltické (FV) články pracujú najefektívnejšie, keď sú rovnomerne ožiarené. V praxi sa však stretávame s prípadmi, kedy svetlo dopadajúce na FV články nie je rovnomerne rozložené po celom povrchu článku. K tomu dochádza v dôsledku zmeny uhla dopadu svetla počas dňa, zatienenia panelu stromami, budovami či inými prekážkami a použitím umelých zdrojov svetla, ktoré nemusia panel osvetliť rovnomerne.

Tieto javy vedú k významnému poklesu výkonu panelu, zmene VA charakteristiky a vzniku tzv. hot spots – výskyt koncentrovaného prehriatia na povrchu jednotlivého solárneho článku, čo môže viesť až k poškodeniu panelu [20].

3.1 Zatienenie FV článku

Zatienenie je špecifický prípad nerovnomerného ožiarenia, pri ktorom určitá časť článku prijíma minimálne množstvo svetla, prípadne žiadne. Ide o nežiaduci jav, ktorý má negatívny vplyv na správanie a výkon fotovoltického panelu.

Články vo fotovoltickom paneli sú najčastejšie zapojené sériovo, a teda zatienenie jedného z nich ovplyvňuje celý prúdový tok, nakoľko článok má obmedzenú schopnosť generovať elektrický prúd. Takýto zatienený článok s najnižším výkonom sa v obvode správa ako odporová záťaž – teda neprodukuje energiu, ale naopak ju spotrebúva. Prúd z plne ožiarených článkov núti zatienený článok pracovať v režime záporného napätia, čím sa z neho stáva spotrebný prvok. Tento jav vedie k tvorbe hot spots.

Ak napätie zatieneného článku klesne pod určitú hranicu, môže dôjsť k javom známym ako lavínový prieraz, pri ktorých sa výrazne zvyšuje prúd a vzniká riziko deštrukcie štruktúry článku. Z tohto dôvodu bývajú fotovoltické panely vybavené ochrannými prvkami, predovšetkým bypass diódami, ktoré umožňujú automaticky obísť zatienený alebo poškodený článok. Tým sa zabráňuje výraznému poklesu výkonu, znižujú sa straty a zvyšuje sa životnosť celého panelu [21], [22].

3.2 Matematický model FV článku pri nerovnomernom ožiarení a zatičení

Pre presný opis správania FV článku pri nerovnomernom ožiarení a zatičení sa používa rozšírený dvojdiódový model:

$$I = I_{ph} - I_{S1} \left(\exp \left(\frac{U + IR_s}{m_1 U_T} \right) - 1 \right) - I_{S2} \left(\exp \left(\frac{U + IR_s}{m_2 U_T} \right) - 1 \right) - \frac{U + IR_s}{R_p} - b(U + IR_s) \cdot \left(1 - \frac{U + IR_s}{U_{Br}} \right)^{-n}$$

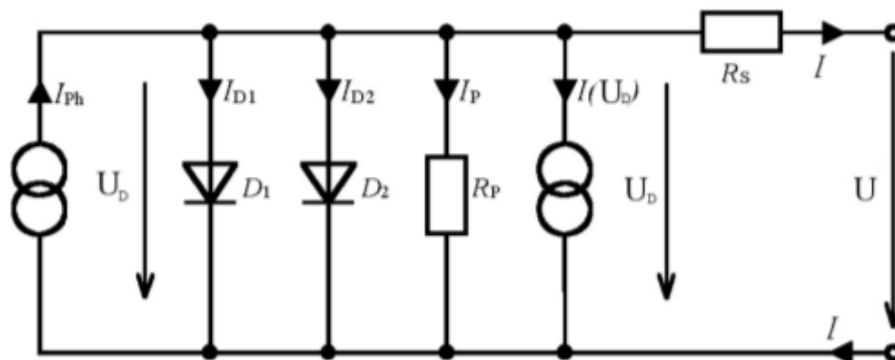
kde:

I_{ph} – generovaný fotoprúd,
 I_{S1}, I_{S2} – nasýtené prúdy diód,
 m_1, m_2 – faktory ideality diód,
 U_T – termálne napätie,
 R_S – sériový odpor,
 R_P – paralelný odpor,
 U_{Br} – napätie prierazu,
 b – korekčná vodivosť,
 n – exponent lavínového prierazu [24].

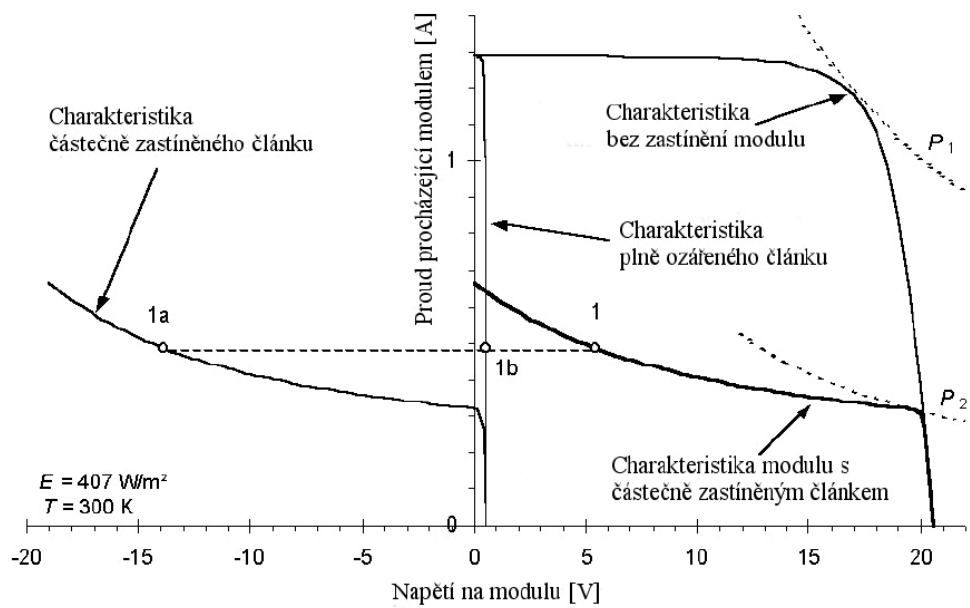
Typickým prejavom zatienenia na výstupných charakteristikách fotovoltického panelu je pokles výkonu a zmena tvaru prúdovo-napät'ovej krivky. Na I-U charakteristike modulu je pri čiastočnom zatienení článku možné pozorovať prudkú zmenu sklonu krivky, ktorá vzniká v dôsledku prechodu zatieneného článku do režimu záťaže.

Na Obr. 3.1 je znázornená prúdovo-napät'ová charakteristika FV modulu zloženého z 36 článkov zapojených do série v rôznych svetelných podmienkach. Na obrázku môžeme pozorovať tri rôzne charakteristiky:

- Krivka bez zatienenia – zobrazuje ideálne podmienky pri ktorých je všetkých 36 článkov rovnomerne ožiarených. Modul dosahuje najvyšší možný výkon P_1 .
- Krivka modulu s čiastočne zatieneným článkom – znázorňuje prípad, keď je 1 článok zatienený na 75%. Výsledkom je pokles napätia, deformácia krivky a zníženie výkonu na hodnotu P_2 . Tento efekt je spôsobený tým, že zatienený článok obmedzuje prúd celého reťazca.
- Krivka samotného zatieneného článku – zobrazuje jeho správanie pri zápornom napätí, čo je dôsledkom prúdenia elektrónov z ostatných článkov. V tomto režime sa článok správa ako spotrebič, čo môže viesť k prehrievaniu a poškodeniu bez prítomnosti ochranných obvodov [24].



Obr. 3.1a Ekvivalentný obvod fotovoltického článku (rozšírený dvojdiodový model s rozvinutým členom) s druhým prúdovým zdrojom charakterizujúcim pokles negatívneho napätia fotovoltického článku [23]



Obr. 3.1b I-U charakteristika fotovoltaického modulu složeného z 36 fotovoltaických článků zapojených v sérii bez zatižení a s 75% zatižením jednoho článku [24]

4. VELIČINY PRE ŠTATISTICKÉ SPRACOVANIE DÁT

4.1 Aritmetický priemer a priemerná odchýlka

Aritmetický priemer je definovaný ako súčet všetkých nameraných údajov vydelený ich počtom. Označujeme ho pomocou symbolu \bar{x} alebo M. Pre výpočet aritmetického priemeru sa používa vzťah

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i ,$$

kde

\bar{x} je aritmetický priemer,

n je počet nameraných hodnôt,

x_i sú namerané hodnoty [25].

Priemerná odchýlka \bar{d} je definovaná ako priemer absolútnych odchýlok nameraných hodnôt od aritmetického priemeru. Pre výpočet sa používa vzťah

$$\bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}|}{n}$$

kde

\bar{x} je aritmetický priemer,

n je počet nameraných hodnôt,

x_i sú namerané hodnoty [25].

4.2 Rozptyl a smerodajná odchýlka

Rozptyl a smerodajná odchýlka spolu úzko súvisia. Obe sa vzťahujú k aritmetickému priemeru – merajú rozptýlenosť hodnôt okolo aritmetického priemeru.

Rozptyl vyjadruje mieru rozloženia alebo variabilnosti dát v určitom súbore alebo vzorke. Určuje strednú kvadratickú odchýlku jednotlivých nameraných hodnôt od aritmetického priemeru. Je daný matematickým vzťahom

$$s_x^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n} ,$$

kde

s_x^2 je rozptyl hodnôt,

x sú namerané hodnoty,

n je počet nameraných hodnôt,

\bar{x} je aritmetický priemer [25].

Smerodajná odchýlka je miera variability, ktorá vychádza z rozptylu. Je uvedená ako druhá odmocnina z hodnoty rozptylu a udáva sa v rovnakých jednotkách ako meraná veličina. Vypočíta sa zo vzťahu

$$s_x = \sqrt{s_x^2}$$

kde

s_x je smerodajná odchýlka,

s_x^2 je rozptyl hodnôt [25].

4.3 Variačný koeficient

Variačný koeficient slúži k porovnaniu variability viacerých štatistických znakov, predstavuje relatívnu mieru variability. Definuje sa vzťahom

$$v_x = \frac{s_x}{\bar{x}}$$

kde

v_x je variačný koeficient (-),

s_x je smerodajná odchýlka,

\bar{x} je aritmetický priemer [25].

4.4 Nerovnomernosť ožiarenia

Nerovnomernosť ožiarenia sa vypočíta podľa rovnice

$$N = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} * 100$$

kde

N je nerovnomernosť ožiarenia (%),

I_{max} je maximálna hodnota intenzity žiarenia,

I_{min} je minimálna hodnota intenzity žiarenia.

5. PRAKTICKÁ ČASŤ

Cieľom praktickej časti bolo preskúmať elektrické a osvetľovacie vlastnosti dvoch rôznych typov svetelných zdrojov – LED lampy s výkonom 100 W a halogénového reflektora s výkonom 500 W – a ich vplyv na výkon fotovoltického panela. Experiment sa zameria na dva hlavné ciele:

1. Identifikovať optimálnu vzdialenosť svetelného zdroja od fotovoltického panela pre dosiahnutie maximálneho výkonu.
2. Vytvoriť mapy ožiarenia, ktoré vizualizujú rozloženie svetelnej intenzity v osvetľovanej oblasti pre rôzne typy svetelných zdrojov a vzdialenosti.
3. Zaznamenať rozloženie povrchovej teploty FV panelu pri osvetlení halogénovým reflektorom, na posúdenie vplyvu tepelného žiarenia na nerovnomernosť ohrevu a jeho potenciálne dôsledky pre výkon a spoľahlivosť panelu.

5.1 Použité meracie zariadenia

- Fotovoltický panel - Solartec STR 36-50, monokryštál (Obr. 5.5, Obr. 5.36), $P_{max} = 50 \text{ W}_p$, $U_{mpp} = 17,4 \text{ V}$, $I_{mpp} = 2,98 \text{ A}$, $U_{OC} = 21,5 \text{ V}$, $I_{SC} = 3,27 \text{ A}$.
- Svetelné zdroje:
 - LED lampa ADVIVE PLUS LED/100W/230V IP 65 s výkonom 100 W.



Obr. 5.1 LED lampa ADVIVE PLUS LED/100W/230V IP65

- Halogénový reflektor R650 s výkonom 500 W.



Obr. 5.2 Halogénový reflektor R650

- Meracie prístroje:
 - Digitálny multimeter - Agilent 34410A 6.5 Digit Multimeter
 - Fotovoltický expozimeter – Luton SPM-1116SD – pracuje so senzorom na báze kremíkovej fotodiódy. Merací rozsah je 0 – 2000 W/m², spektrálny rozsah 400 – 1100 nm, rýchlosť prúdovej odozvy je menšia ako 1 s, chyba merania 5 % z meranej hodnoty, uhlová presnosť merania < 5 % pre uhly < 60° [26].



Obr. 5.3 Fotovoltický expozimeter Luton SPM-1116SD

- Agilent 34972A - LXI Data Acquisition / Switch Unit

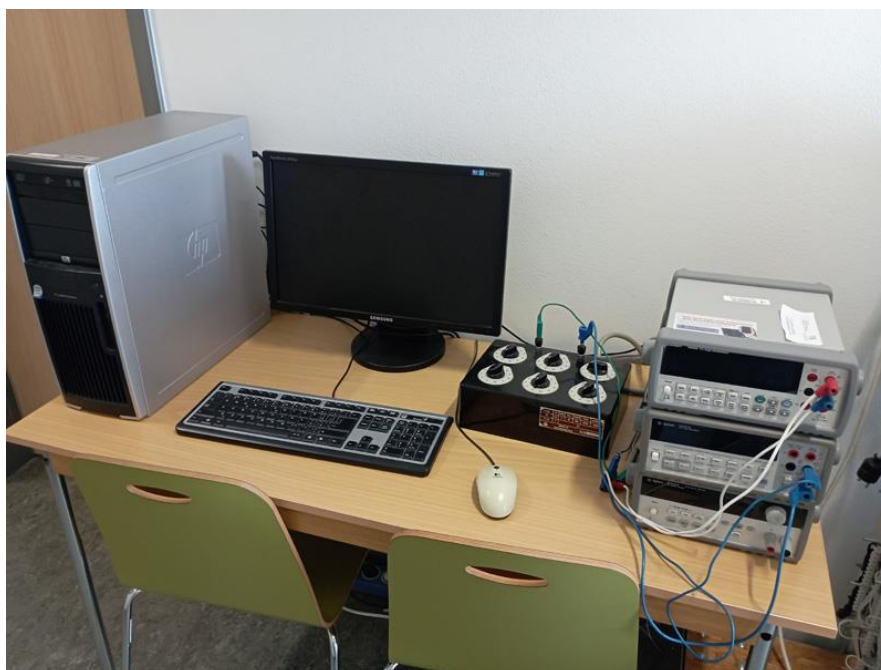


Obr. 5.4 Agilent 34972A - LXI Data Acquisition / Switch Unit

- Softvér na spracovanie nameraných údajov a generovanie charakteristík - Agilent VEE Pro 9.2.,
- Odporová dekáda - Metra XL6,
- Odporové snímače teploty PT100.



Obr. 5.5 Zostavené meracie pracovisko s fotovoltickým panelom, zdrojom svetla a meracím expozimetrom



Obr. 5.6 Vyhodnocovacie pracovisko s počítačom a odporovou dekádou

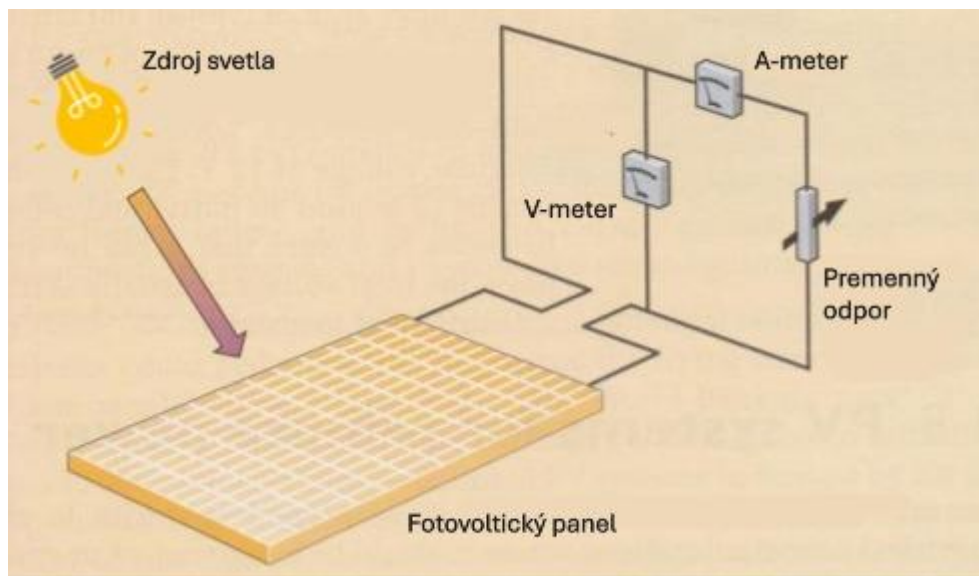
5.2 Meranie optimálnej vzdialenosti svetelného zdroja od fotovoltického panelu pre dosiahnutie maximálneho výkonu

Táto časť experimentu sa zamerala na skúmanie účinnosti fotovoltického panelu pri rôznych výškach svetelného zdroja a rôznych typov osvetlenia. Použitý fotovoltický panel bol umiestnený horizontálne na zem, pričom nad ním bola konštrukcia umožňujúca variabilné umiestnenie svetelného zdroja. Experiment bol realizovaný pre dva typy svetelných zdrojov, a to LED svetlo a halogénový reflektor.

V rámci experimentu bol zdroj žiarenia nainštalovaný presne do stredu zvolenej plochy, ktorá bola ožarovaná. Táto precízna poloha zabezpečila rovnomerné ožiarenie testovanej oblasti a eliminovala akékoľvek systematické chyby spôsobené nesymetrickým rozložením svetla.

Meranie prebiehalo v uzavretej miestnosti, kde jediným zdrojom svetla bol vybraný svetelný zdroj. Táto kontrolovaná podmienka umožnila eliminovať akékoľvek vonkajšie rušivé faktory, ako sú okolité osvetlenie alebo denné svetlo, čím bola dosiahnutá maximálna presnosť merania.

Svietidlo bolo napojené na obvod pozostávajúci z voltmetra a ampérmetra, ktorý je znázornený na Obr. 5.7. Výstupy z obvodu boli monitorované a analyzované pomocou počítačového softvéru.

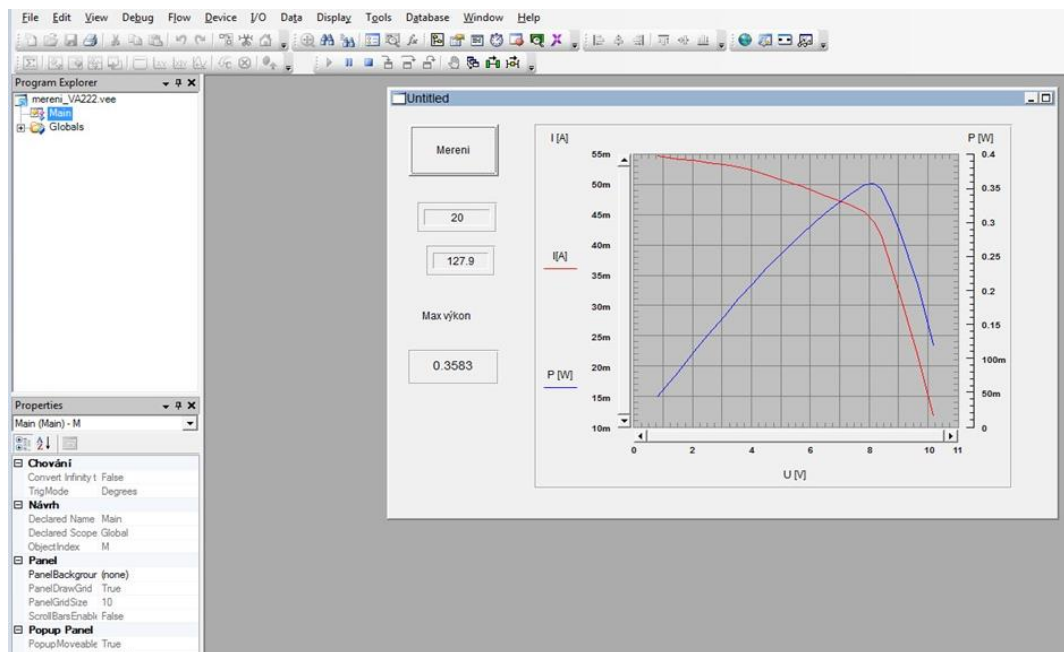


Obr. 5.7 Schéma zapojenia

Experimentálny postup prebiehal nasledovne:

1. Meranie voltampérovej charakteristiky: Na meranie voltampérových charakteristík fotovoltického panelu bol použitý program vytvorení v prostredí Agilent VEE Pro 9.2. Merací systém pozostával z dvoch digitálnych multimetrov, jeden (Agilent) slúžil na meranie prúdu a druhý (Keysight) na meranie napätia. V prípade meraní s halogénovým reflektorom bolo zaťaženie panelu riadené prostredníctvom odporovej dekády v rozsahu 0 – 1000 Ω , pričom bolo aplikovaných 20 rôznych hodnôt odporu. Po stlačení tlačidla „Merení“ program automaticky spustil zber dát, pričom pre každú hodnotu zaťaženia zaznamenal príslušné napätie a prúd. Pre merania s LED osvetlením bola použitá rovnaká metodika.

Namerané údaje boli následne exportované do Microsoft Excel, kde boli spracované a využité na zostavenie VA a výkonových charakteristík FV panelu. Používateľské rozhranie softvéru, ako je ukázané nižšie na Obr. 5.8, zobrazovalo informácie o poradí merania, čase od jeho začiatku, maximálnom výkone, ako aj grafy priebehov prúdu, napätia a výkonu v reálnom čase.



Obr. 5.8 Používateľské rozhranie softvéru Agilent VEE Pro 9.2 pre meranie VA charakteristiky

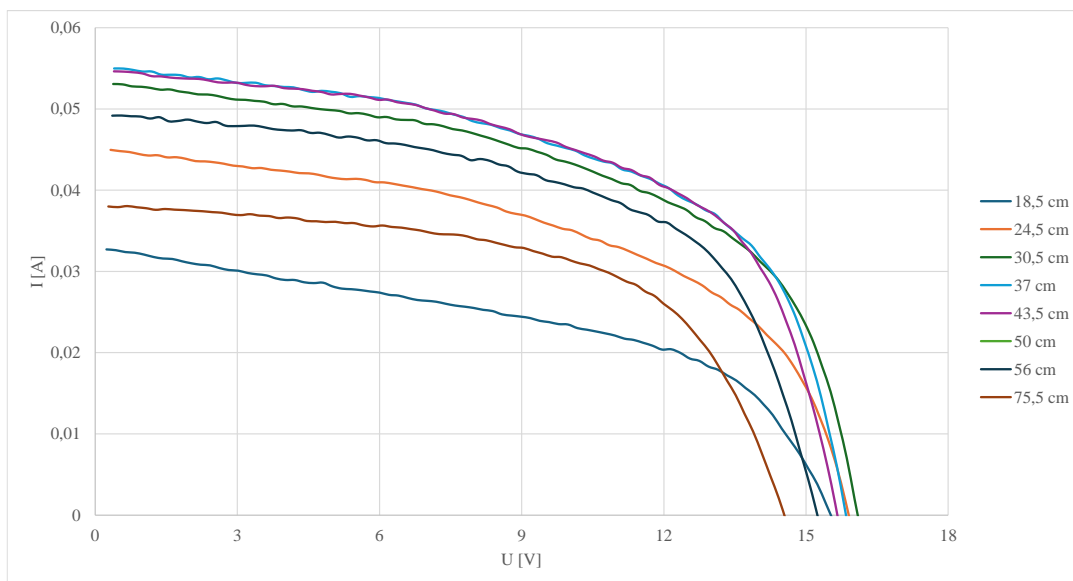
2. Stanovenie maximálneho výkonu: Na základne nameraných údajov bola identifikovaná hodnota maximálneho výkonu pre každú výšku.

Výšky svetelného zdroja sa systematicky menili, aby bola identifikovaná tá, pri ktorej fotovoltický panel dosahoval najvyššiu účinnosť (t.j. najvyšší výkon). Tento postup bol vykonaný samostatne pre oba typy svetelných zdrojov.

5.2.1 Analýza merania pre LED lampu

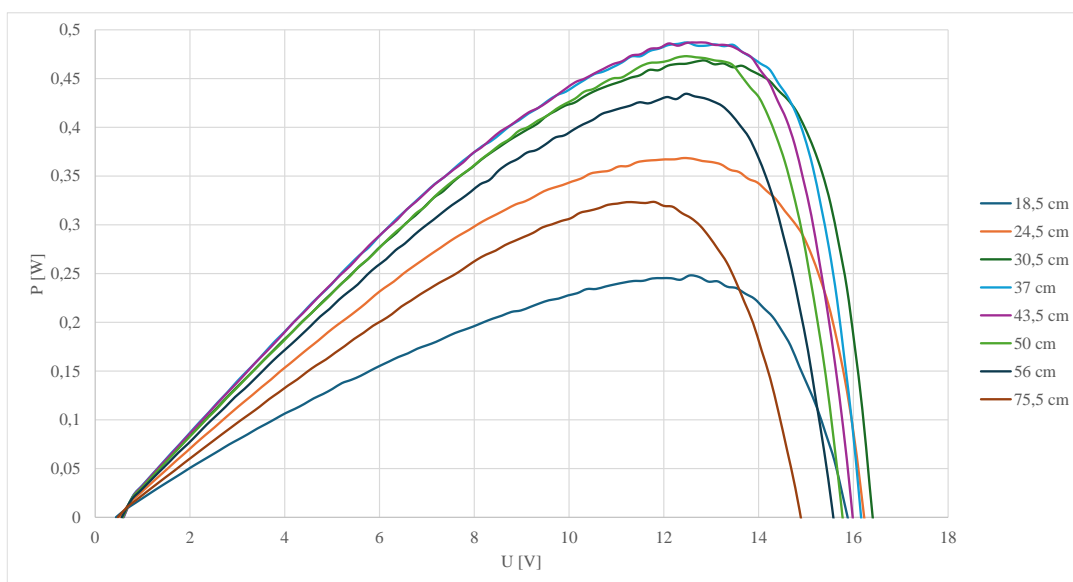
Graf volt-ampérovej charakteristiky zobrazuje vzťah medzi napätím (U) a prúdom (I) pre rôzne vzdialenosti svetelného zdroja od fotovoltického panela. Z grafu na Obr. 5.9 je zrejmé, že prúd dosahuje najnižšie hodnoty pri najmenšej výške svetelného zdroja (18,5 cm). Tento pokles prúdu je spôsobený nerovnomernosťou ožiarenia, ktorá vzniká pri nízkej výške, tienením jednotlivých článkov fotovoltického panela a čiastočne aj teplotou. Neožiarené články panelu pôsobia ako záťaž, čo vedie k zníženiu celkového prúdu.

Pri postupnom zväčšovaní výšky svetelného zdroja sa rovnomernosť ožiarenia zlepšuje, čo vedie k zvýšeniu prúdu. Napríklad pri výške 37 cm dosahuje LED lampa najvyšší prúd, čo naznačuje optimálnu vzdialenosť pre dosiahnutie maximálneho výkonu fotovoltického panela. Naopak, pri výškach nad 50 cm dochádza k postupnému poklesu prúdu, pretože svetelná intenzita klesá s rastúcou vzdialenosťou.



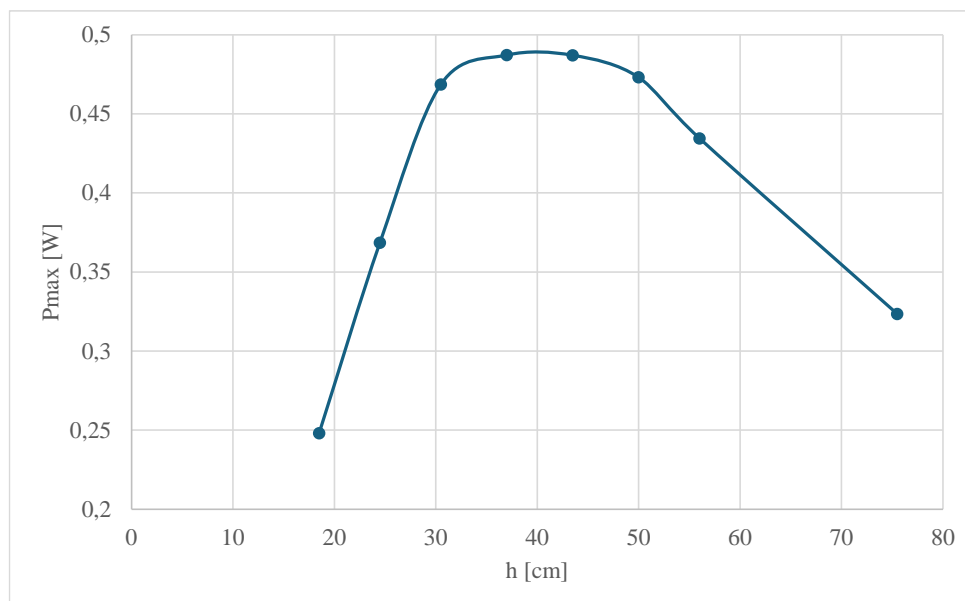
Obr. 5.9 Graf voltampérovej charakteristiky pre LED lampu

Graf výkonovej charakteristiky zobrazuje vzťah medzi napätím (U) a výkonom (P) pre rôzne vzdialenosti lampy od panelu. Z grafu na Obr. 5.10 je možné vidieť, že maximálny výkon dosahuje LED približne pri výške 37 cm, čo naznačuje optimálnu vzdialenosť zdroja od fotovoltaického panelu. Pri nižších aj vyšších vzdialenostiach je výkon nižší, čo značí zníženie efektivity.



Obr. 5.10 Graf výkonovej charakteristiky pre LED lampu

Do grafu na Obr. 5.11 bola tiež vynesená závislosť maximálneho výkonu (P_{\max}) od vzdialenosti (h). Tá ukazuje, že maximálny výkon (0,487 W) bol nameraný približne pri vzdialenosti 37 cm.



Obr. 5.11 Závislosť maximálneho výkonu od vzdialenosti pre LED lampu

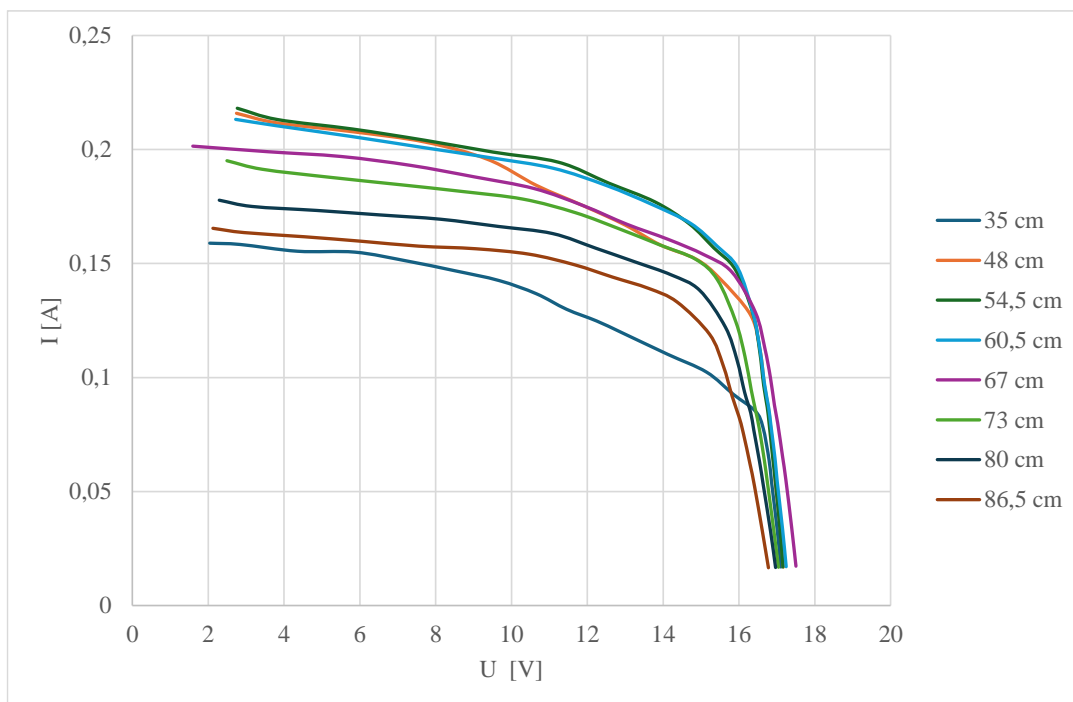
5.2.2 Analýza merania pre halogénový reflektor

Voltampérová charakteristika pre halogénový reflektor zobrazuje vzťah medzi napätím a prúdom pri rôznych vzdialenostiach od fotovoltického panelu (35 cm až 86,5 cm). Na dosiahnutie rôznych odporov bola využitá odporová dekáda, ktorá postupne umožnila meniť hodnoty odporu v krokoch: 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 120, 140, 160, 180, 200, 250, 300, 500 a 1000 Ω . Odporová dekáda umožnila detailné nastavenie elektrického zaťaženia a simuláciu reálnych pracovných podmienok.

Na Obr. 5.12 je vidieť, že pri vzdialenosti 35 cm, sa prejavuje nerovnomernosť ožiarenia, čo vedie k výraznému poklesu prúdu. Tento jav je spôsobený tienením niektorých článkov panelu, ktoré tak pôsobia ako záťaž a znižujú celkový výkon systému.

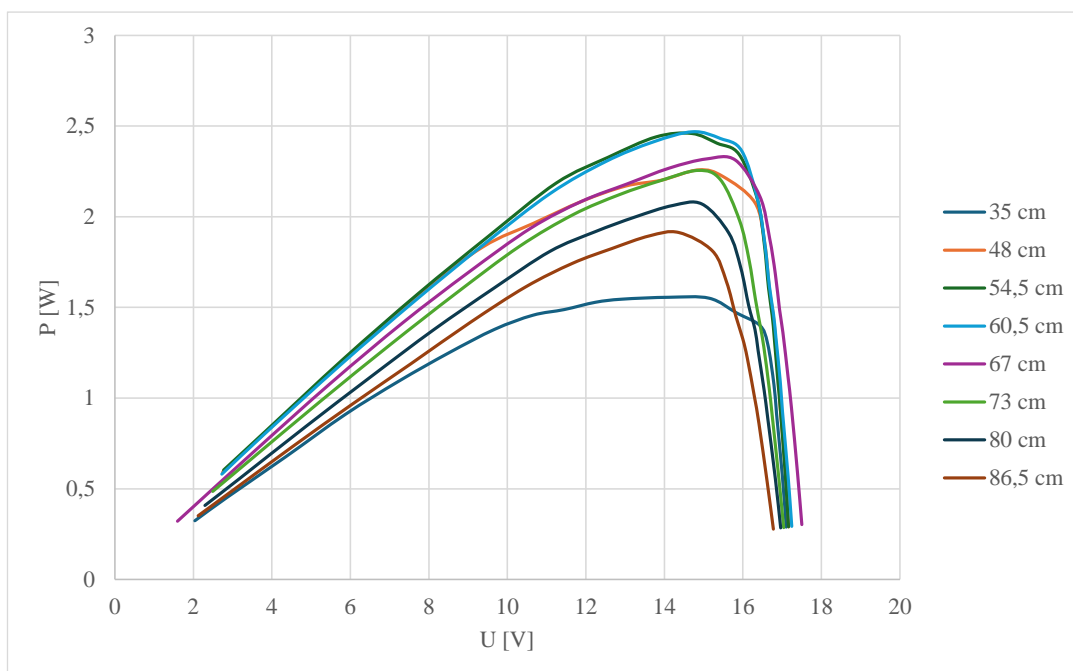
S rastúcou vzdialenosťou sa rovnomernosť ožiarenia zlepšuje, čo vedie k nárastu prúdu až po optimálnu vzdialenosť 60,5 cm, pri ktorej sa dosiahla maximálna účinnosť panela. Pri vyšších vzdialenostiach, napríklad 86,5 cm, dochádza k poklesu intenzity svetla dopadajúceho na panel, čo vedie k opätovnému poklesu prúdu.

Ďalším faktorom, ktorý môže ovplyvniť charakteristiku pri halogénovom reflektore, je produkcia tepla. Halogénové svetlá generujú veľké množstvo tepelného žiarenia, čo môže viesť k lokálnemu ohrevu panelu a dočasnému zníženiu jeho účinnosti.



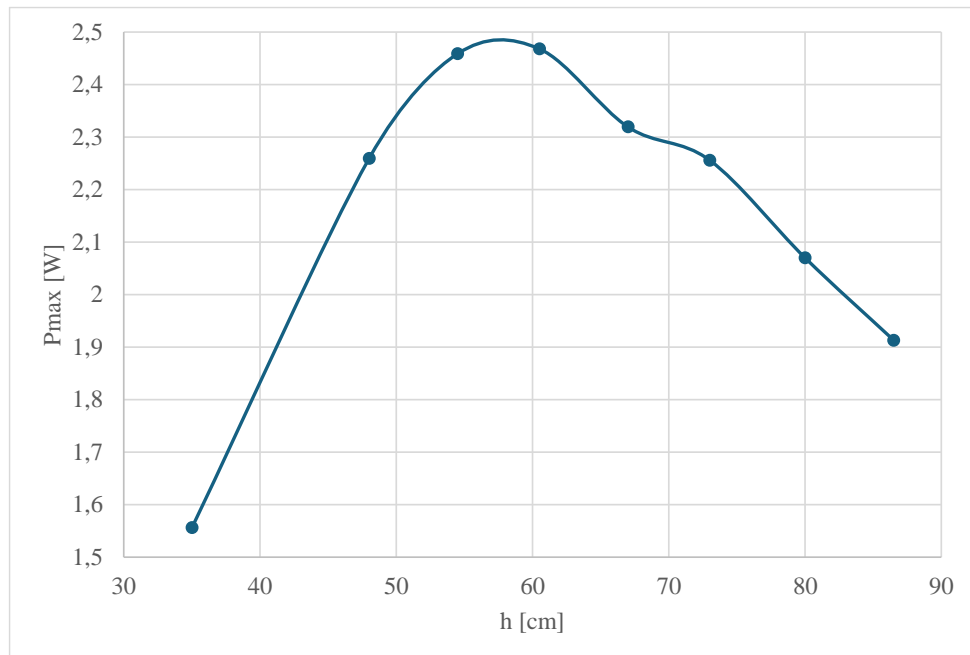
Obr. 5.12 Graf voltampérovej charakteristiky pre halogénový reflektor

Použitie odporovej dekády umožnilo presné sledovanie výkonových zmien pri rôznych hodnotách záťaže. Z grafu na Obr. 5.13 sa dá konštatovať, že najvyššie hodnoty výkonu boli dosiahnuté pri vzdialenosti okolo 60,5 cm, čo naznačuje optimálnu polohu halogénového svetelného zdroja vzhľadom na účinnosť. Pri nižších aj vyšších vzdialenostiach (napr. 35 cm a 86,5 cm) výkon klesá, čo naznačuje nižšiu efektívnosť osvetlenia.



Obr. 5.13 Graf výkonovej charakteristiky pre halogénový reflektor

Do grafu na Obr. 5.14 bola vynesená závislosť maximálneho výkonu od vzdialenosti. Z toho je možné konštatovať, že najvyšší výkon bol nameraný pri 60,5 cm (2,467 W). Po tejto vzdialenosti výkon postupne klesá.



Obr. 5.14 Závislosť maximálneho výkonu od vzdialenosti pre halogénový reflektor

5.3 Meranie intenzity žiarenia dopadajúceho na fotovoltaický panel zvoleným zdrojom žiarenia

Druhou časťou experimentu bolo meranie intenzity žiarenia dopadajúceho na fotovoltaický panel zvoleným zdrojom žiarenia. Pre analýzu rozloženia intenzity žiarenia svetelného zdroja boli vytvorené mapy ožiarenia na základe nasledujúcich predpokladov.

Merania sa vykonávali na fotovoltaickom paneli, ktorý obsahuje 4 x 9 článkov, pričom rozmer článku bol 10x10 cm. Na každom článku sa merala intenzita svetla v piatich bodoch, a to štyri rohy a stred. Pre optimálnu výšku, v ktorej bol nameraný najvyšší výkon sa pridalo podrobnejšie meranie v deviatich bodoch na jednom článku, čo viedlo k celkovému počtu 171 bodov.

Rovnako ako v prvej časti experimentu, svetelný zdroj bol nainštalovaný presne v strede meracej oblasti a experiment sa realizoval v uzavretej miestnosti, kde jediným zdrojom osvetlenia bol testovaný svetelný zdroj. Vďaka tomu bola dosiahnutá vysoká úroveň presnosti a spoľahlivosti pri meraní intenzity svetla na jednotlivých bodoch mriežky.

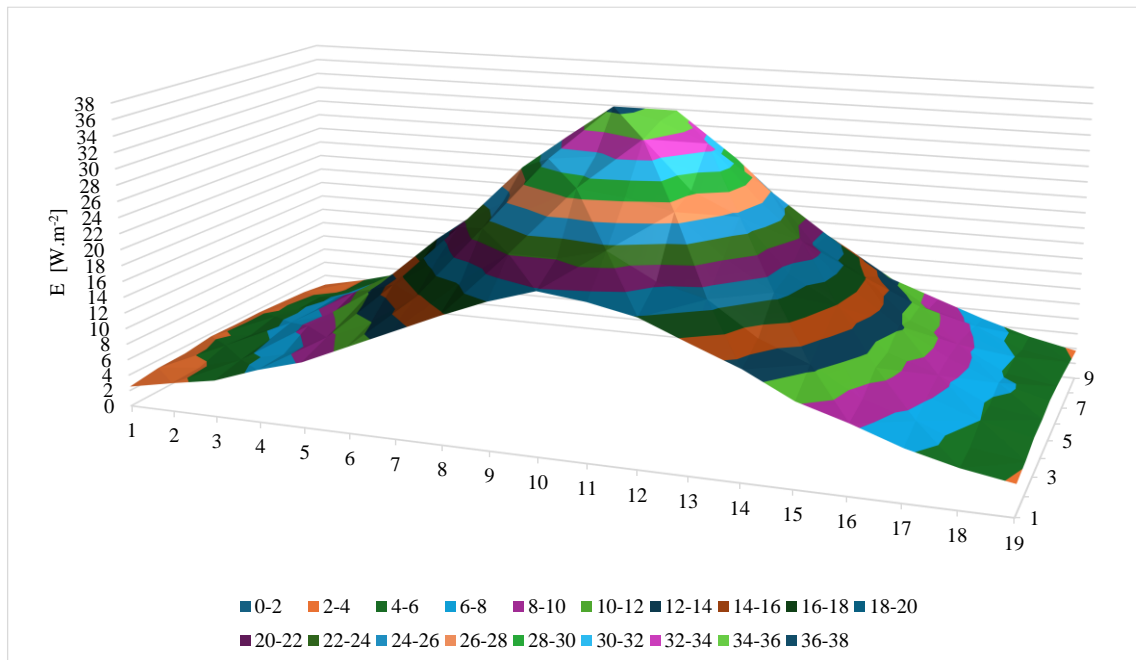
Použitý bol fotovoltaický expozimeter – Luton SPM-1116SD na meranie intenzity svetla (E) v jednotkách [W/m²]. Pre každé meranie sa zaznamenali hodnoty intenzity svetla pre každý z bodov. Tieto údaje boli následne použité na vytvorenie 3D a 2D povrchových grafov, ktoré znázorňujú rozloženie intenzity svetla v rôznych výškach.

5.3.1 Mapy ožiarenia pre LED svetlo

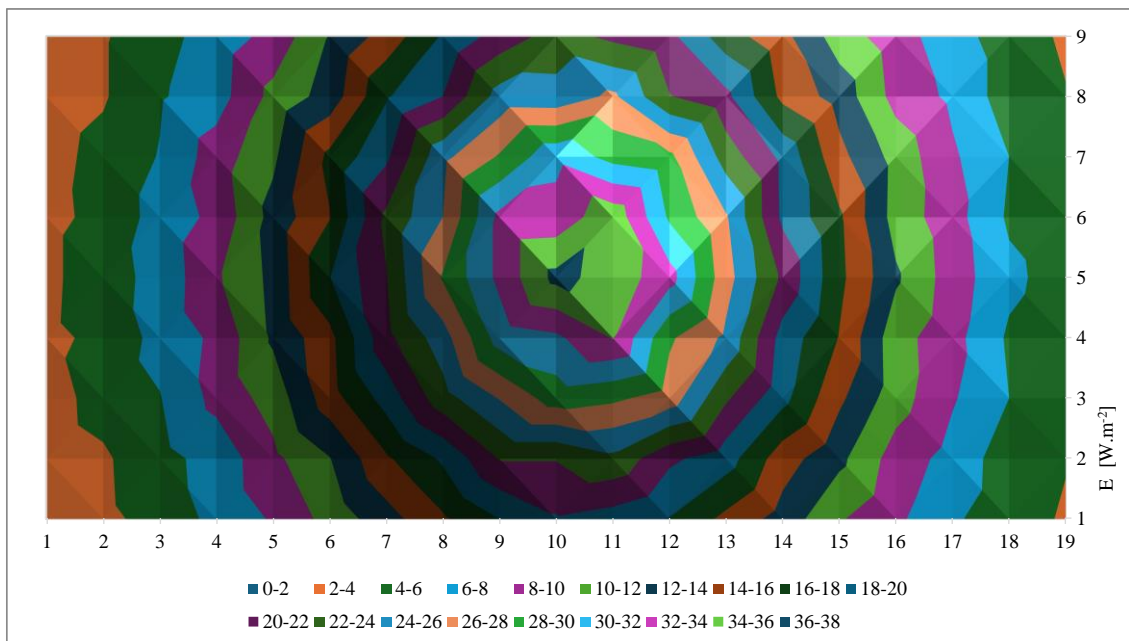
Pre analýzu rozloženia intenzity svetla LED svetelného zdroja boli vybrané tri výšky:

- 37 cm – optimálna výška, v ktorej bol nameraný najvyšší výkon. Preto bolo vykonané podrobnejšie meranie v deviatich bodoch na jednom článku, a to v rohoch článku, v stredoch strán a v strede článku, čo viedlo k celkovému počtu 171 bodov.
- 24,5 cm – výška nižšia ako optimálna. Boli vykonané 2 merania, prvé v strede každého článku a ďalšie v štyroch rohoch článku.
- 50 cm – výška vyššia ako optimálna. Boli vykonané 2 merania, prvé v strede každého článku a ďalšie v štyroch rohoch článku.

Na grafe na Obr. 5.15 vidieť rozloženie intenzity pomocou 3D grafu, v optimálnej výške 37 cm. Rozloženie intenzity je najmä v centrálnej časti panelu, kde intenzita dosahuje maximum $36,6 \text{ W/m}^2$. Svetlo je v strede silne koncentrované, ale prechody od centrálnej časti ku krajom sú plynulé. Na Obr. 5.16 je 2D graf, kde koncentrické kruhy znázorňujú rovnomerné zníženie intenzity od stredu ku krajom. Svetelná intenzita klesá symetrický smerom ku krajom. Prechody medzi jednotlivými pásmami intenzity sú rovnomerné a vykazujú dobré rozloženie svetelného toku po celej ploche. Centrálna oblasť s vysokou intenzitou pokrýva väčšiu časť plochy ako pri iných výškach. Pri výške 37 cm je svetlo rozložené optimálne, čo zodpovedá maximálnemu výkonu LED svetla na fotovoltickom paneli.

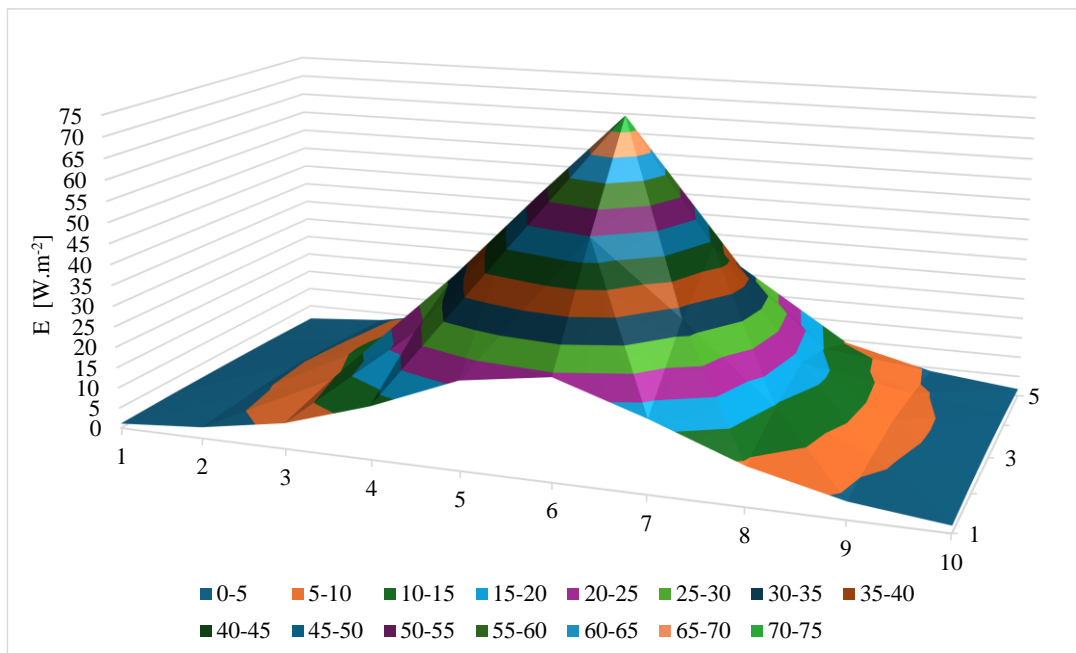


Obr. 5.15 Namerané hodnoty intenzít žiarenia vo výške 37 cm vynesené do 3D grafu pre LED svetlo

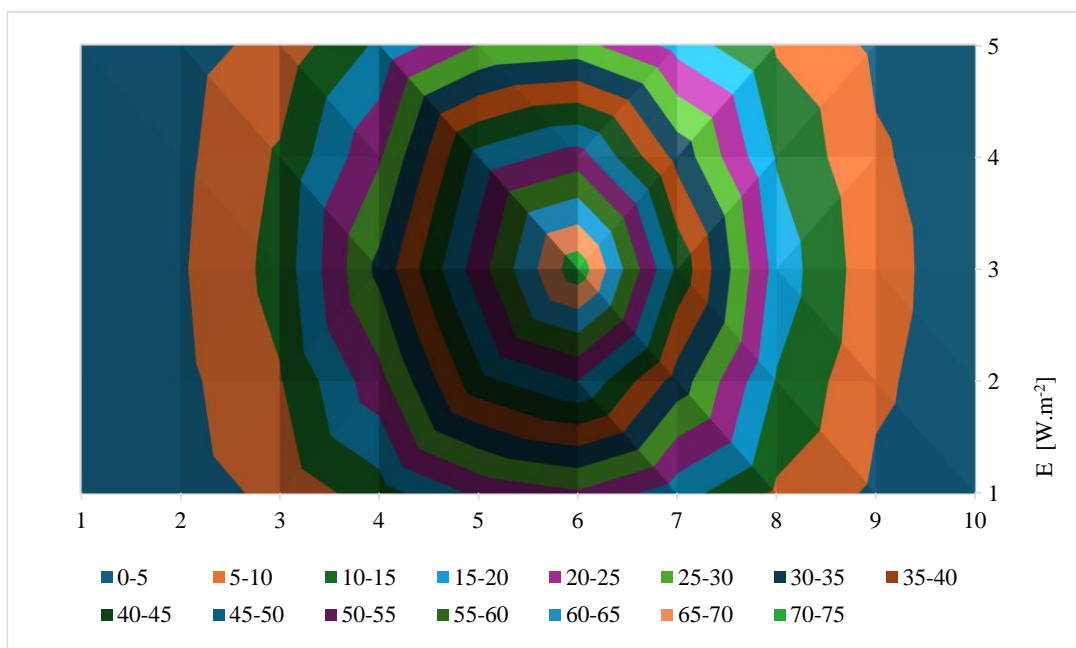


Obr. 5.16 Namerané hodnoty intenzít žiarenia vo výške 37 cm vynesené do 2D grafu pre LED svetlo

Na Obr. 5.17 a 5.18 sú zobrazené 3D a 2D grafy nameraných hodnôt intenzít žiarenia vo výške 24,5 cm v štyroch rohoch každého článku. 3D graf ukazuje vysokú koncentráciu intenzity svetla v centrálnej časti mriežky. Intenzita svetla prudko klesá smerom ku krajom, čo vedie k ostrým prechodom medzi osvetlenými a menej osvetlenými oblasťami. Maximálna dosiahnutá intenzita v tomto prípade bola $73,4 \text{ W/m}^2$. Koncentrické kruhy v 2D grafe so strmými prechodmi medzi jednotlivými hodnotami intenzity naznačujú vysokú nerovnomernosť ožiarenia. Centrálna oblasť s najvyššou intenzitou je veľmi malá, čo potvrdzuje koncentráciu svetla na malú plochu. Pri výške 24,5 cm sa ožiarenie v krajných bodoch výrazne znižuje, čo spôsobuje výrazné nerovnomerné rozloženie svetelnej intenzity na celej ploche.



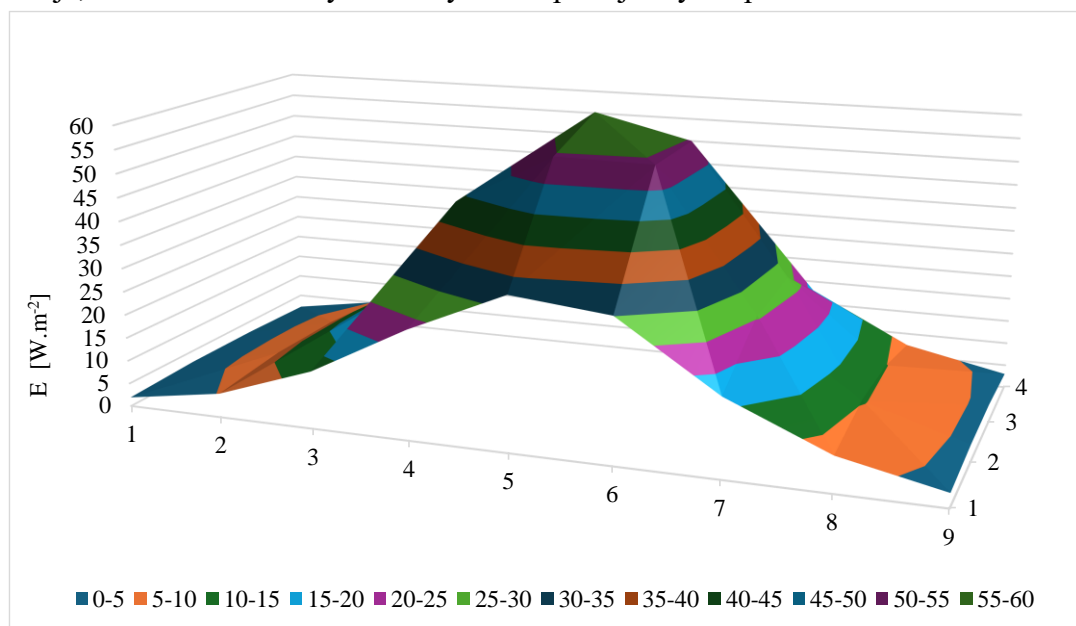
Obr. 5.17 Namerané hodnoty intenzít žiarenia vo výške 24,5 cm v rohoch článkov vynesené do 3D grafu pre LED svetlo



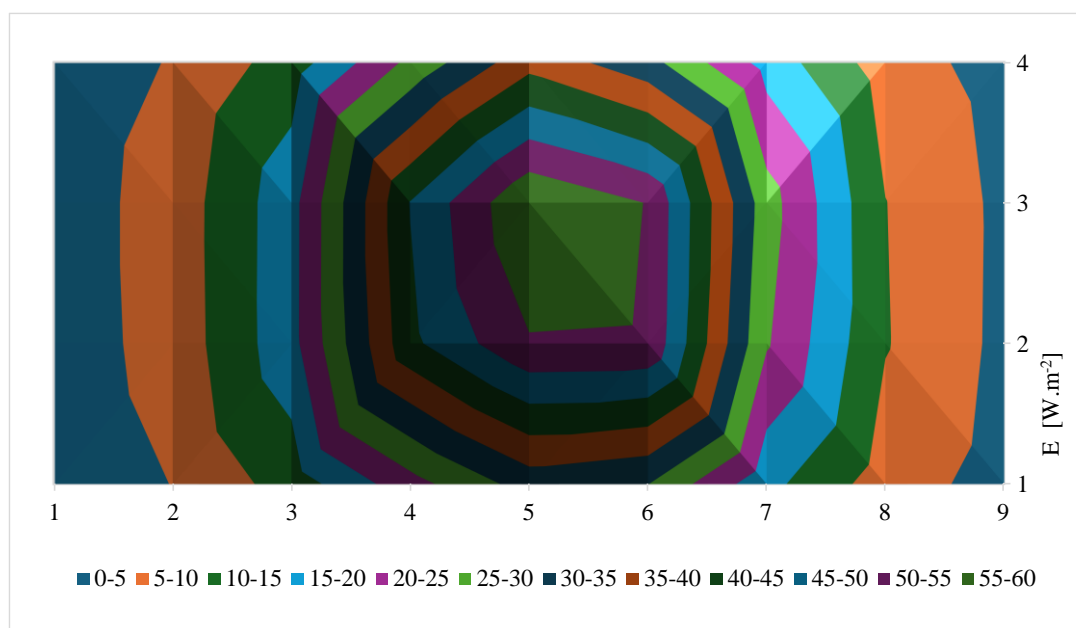
Obr. 5.17 Namerané hodnoty intenzít žiarenia vo výške 24,5 cm v rohoch článkov vynesené do 2D grafu pre LED svetlo

Na Obr. 5.18 a 5.19 sú zobrazené 3D a 2D graf nameraných hodnôt intenzít žiarenia vo výške 24,5 cm v strede každého článku . 3D graf ukazuje vyššiu intenzitu svetla v strede článku ako v krajných oblastiach, pričom svetlo sa šíri rovnomernejšie v porovnaní s krajnými bodmi. Maximálna dosiahnutá intenzita v tomto prípade bola 59,7 W/m². Intenzita svetla je lepšie rozložená, no stále sú viditeľné strmšie prechody

medzi centrárou a okrajmi. Centrálna oblasť so zvýšenou intenzitou pokrýva väčšiu časť plochy v porovnaní s krajnými bodmi. Stredové merania ukazujú lepšiu rovnomernosť ako kraje, no stále sú hodnoty intenzity svetla pri tejto výške príliš sústredené do stredu.



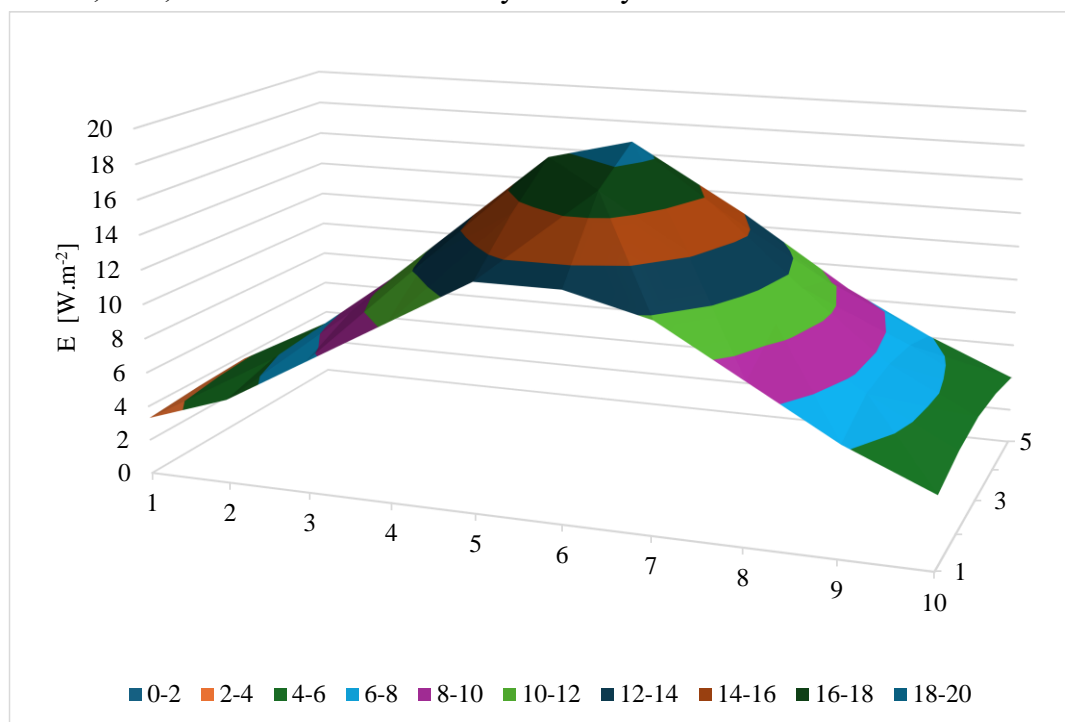
Obr. 5.18 Namerané hodnoty intenzít žiarenia vo výške 24,5 cm v stredoch článkov vynesené do 3D grafu pre LED svetlo



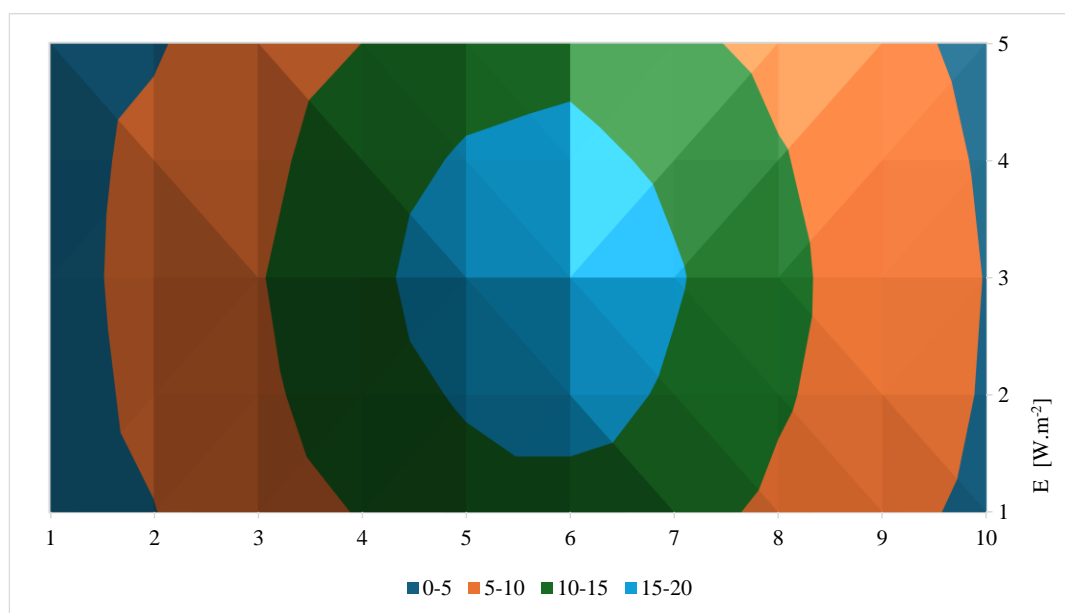
Obr. 5.19 Namerané hodnoty intenzít žiarenia vo výške 24,5 cm v stredoch článkov vynesené do 2D grafu pre LED svetlo

Na Obr. 5.20 a 5.21 sú zobrazené 3D a 2D grafy nameraných hodnôt intenzít žiarenia vo výške 50 cm v štyroch rohoch každého článku. 3D graf ukazuje, že pri vyššej výške je intenzita svetla rovnomernejšie rozložená, pričom hodnoty intenzity sú nižšie.

Maximálna dosiahnutá hodnota intenzity bola $18,9 \text{ W/m}^2$. Kruhy intenzity svetla sú rozšírenejšie a plynulejšie, čo naznačuje lepšie rozloženie svetla po celej ploche, avšak s nízkou intenzitou žiarenia. Zreteľné zníženie intenzity svetla na okrajoch je však stále prítomné. Rohy článkov pri výške 50 cm vykazujú lepšiu rovnomernosť v porovnaní s výškou 24,5 cm, avšak maximálne hodnoty intenzity svetla sú nižšie.

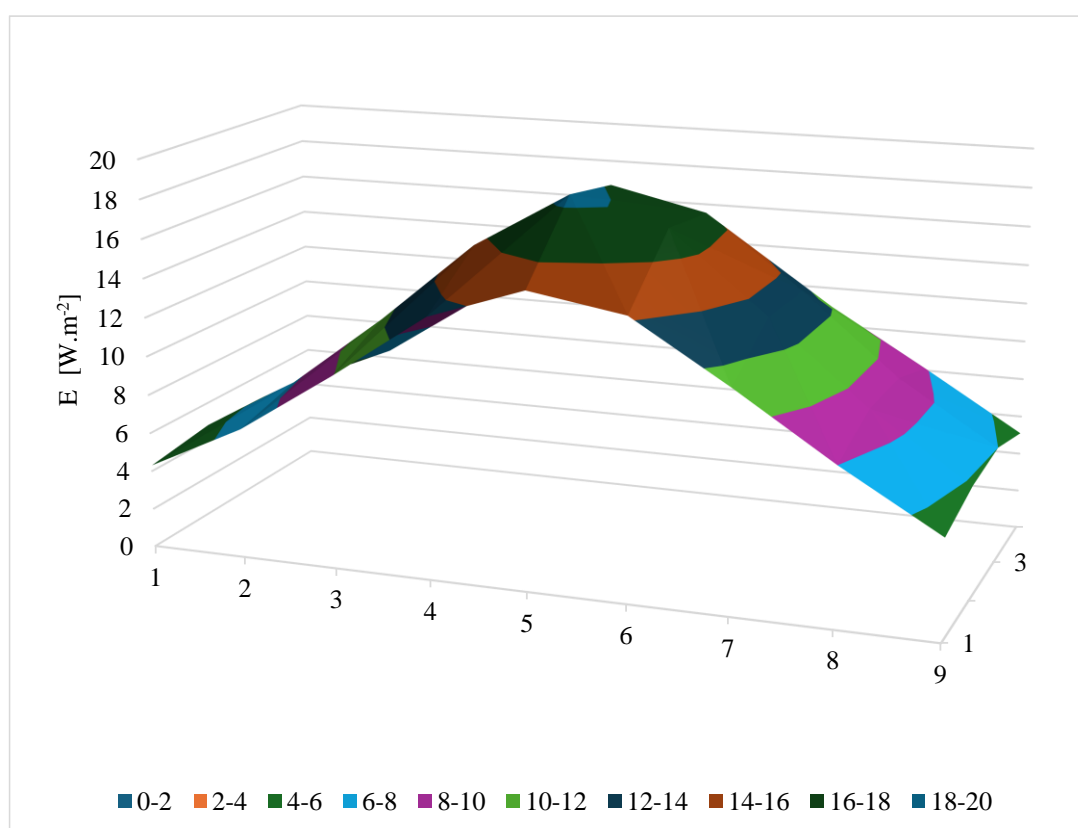


Obr. 5.20 Namerané hodnoty intenzít žiarenia vo výške 50 cm v rohoch článkov vynesené do 3D grafu pre LED svetlo

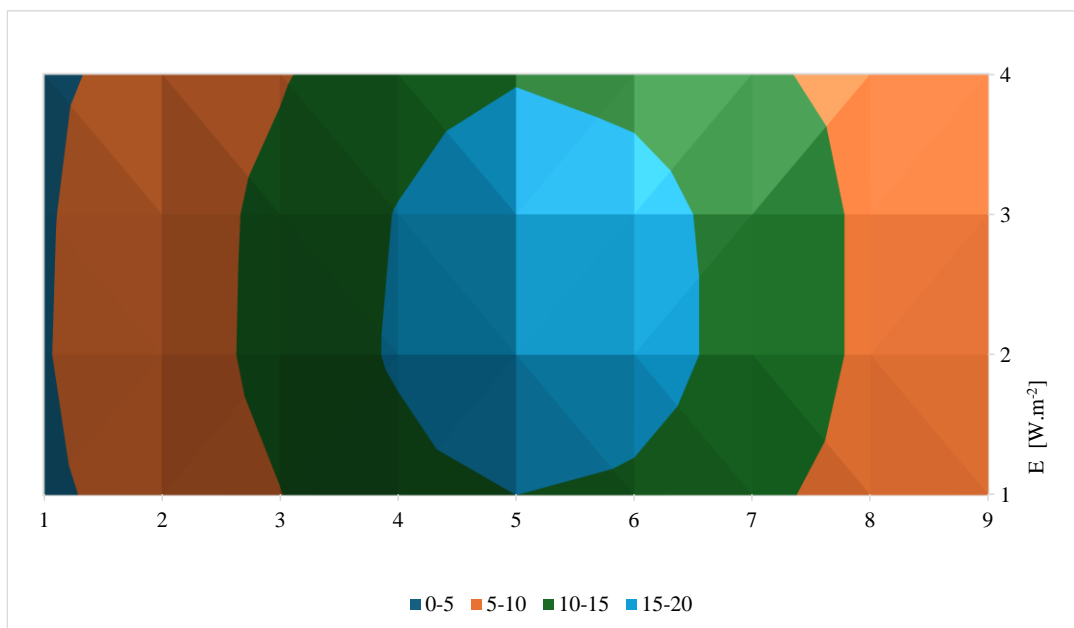


Obr. 5.21 Namerané hodnoty intenzít žiarenia vo výške 50 cm v rohoch článkov vynesené do 2D grafu pre LED svetlo

Na Obr. 5.22 a 5.23 sú zobrazené 3D a 2D grafy nameraných hodnôt intenzít žiarenia vo výške 50 cm v strede každého článku. 3D graf ukazuje, že intenzita svetla vykazuje plynulejší a rovnomernejší rozklad ako pri nižšej výške. Maximálna intenzita svetla v centrálnej časti dosahuje $18,5 \text{ W/m}^2$. Hodnoty postupne klesajú smerom k okrajom mriežky, pričom prechod medzi jednotlivými oblasťami je menej strmý a výrazne plynulejší. Povrchové zobrazenie intenzity svetla znázorňuje kruhové pásy so zníženou intenzitou, ktoré sa rozprestierajú rovnomerne od centra smerom k okrajom. Prechody medzi jednotlivými hodnotami intenzity sú rovnomerné a nevykazujú náhle poklesy ani prudké zmeny, ako to bolo pri nižšej výške. Hoci je maximálna intenzita nižšia, oproti výške 24,5 cm je svetlo rozložené rovnomernejšie.

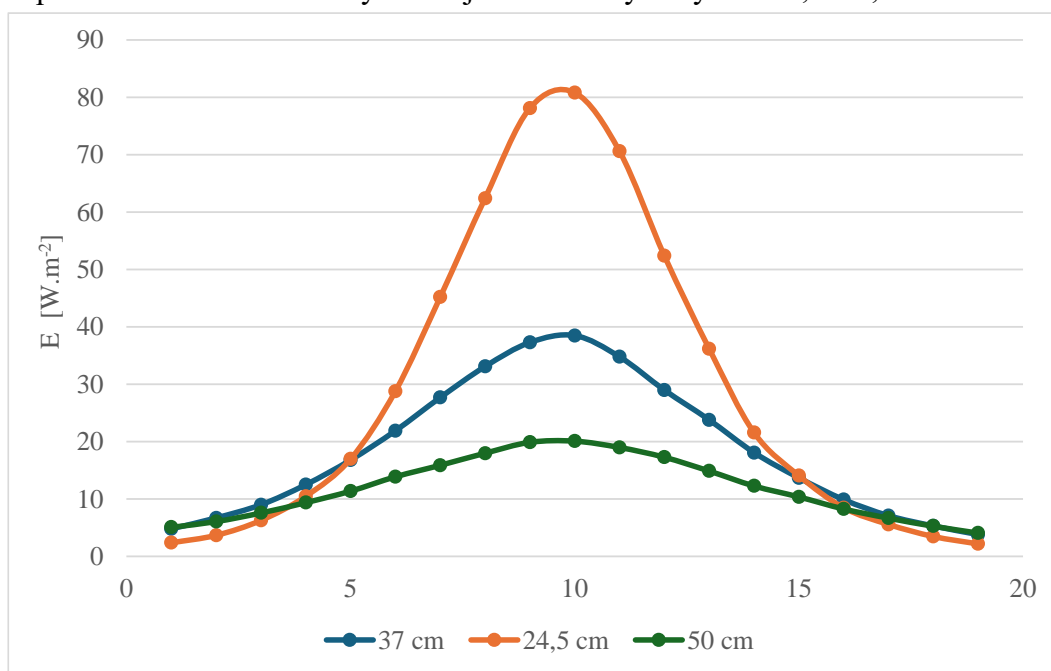


Obr. 5.22 Namerané hodnoty intenzít žiarenia vo výške 50 cm v stredoch článkov vynesené do 3D grafu pre LED svetlo



Obr. 5.23 Namerané hodnoty intenzít žiarenia vo výške 50 cm v stredoch článkov vynesené do 2D grafu pre LED svetlo

Na Obr. 5.24 je znázornená závislosť intenzity žiarenia v stredovej osi fotovoltaického panelu pri osvetlení LED svetelným zdrojom z 3 rôznych výšok: 24,5 cm, 37 cm a 50 cm.



Obr. 5.24 Závislosť intenzity žiarenia v stredovej osi FV panelu pri osvetlení LED lampou pre rôzne výšky svetelného zdroja

Z grafu možno pozorovať, že pri výške 24,5 cm dochádza k vysokému sústredeniu žiarenia v strede panelu. V strede je intenzita žiarenia vysoká, ale rýchlo klesá smerom

ku krajom. Táto nerovnomernosť spôsobuje zníženie výkonu v dôsledku nízkeho ožiarenia krajných článkov.

Vo výške 37 cm je rozloženie žiarenia výrazne vyrovnanejšie, pričom stredná hodnota intenzity zostáva stále dostatočne vysoká. Táto výška sa ukazuje ako kompromisné riešenie medzi vysokou intenzitou a rovnomernosťou ožiarenia.

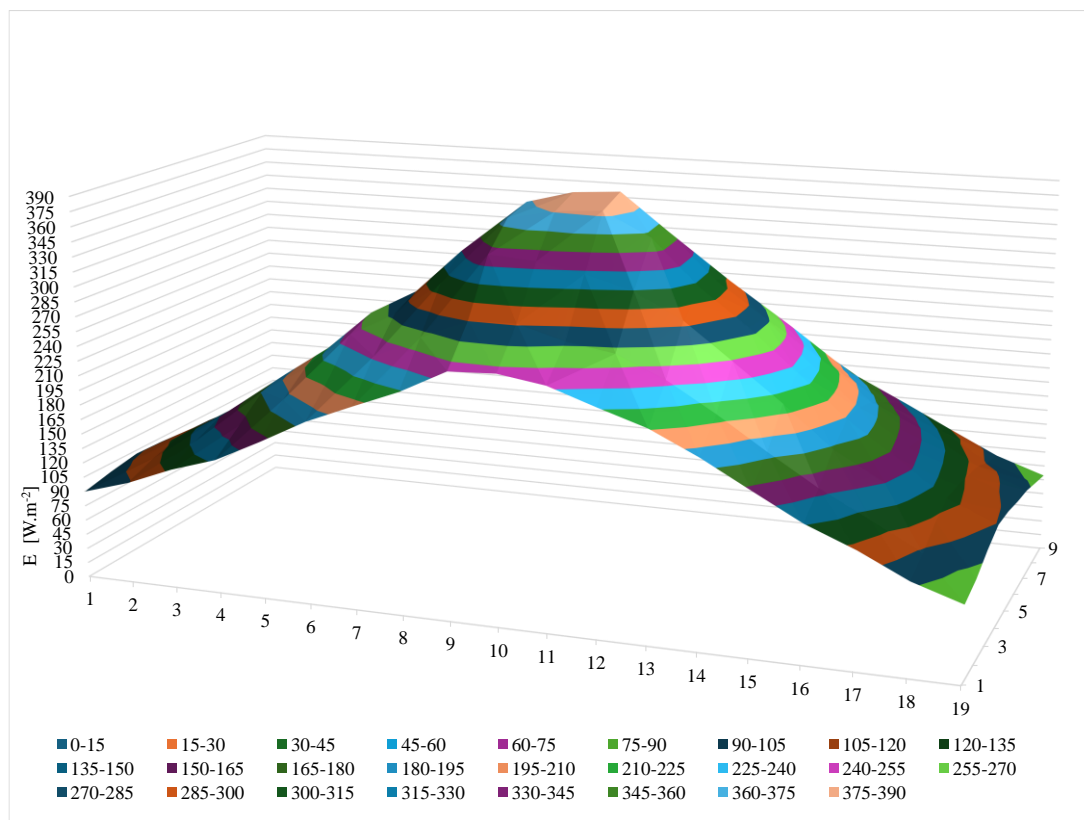
Pri výške 50 cm bola dosiahnutá najnižšia intenzita žiarenia, no s najrovnomernejším rozložením ožiarenia. Kvôli nízkej absolútnej hodnote ožiarenia však pri tejto výške panel dosahoval najnižší výkon.

5.3.2 Mapy ožiarenia pre halogénový reflektor

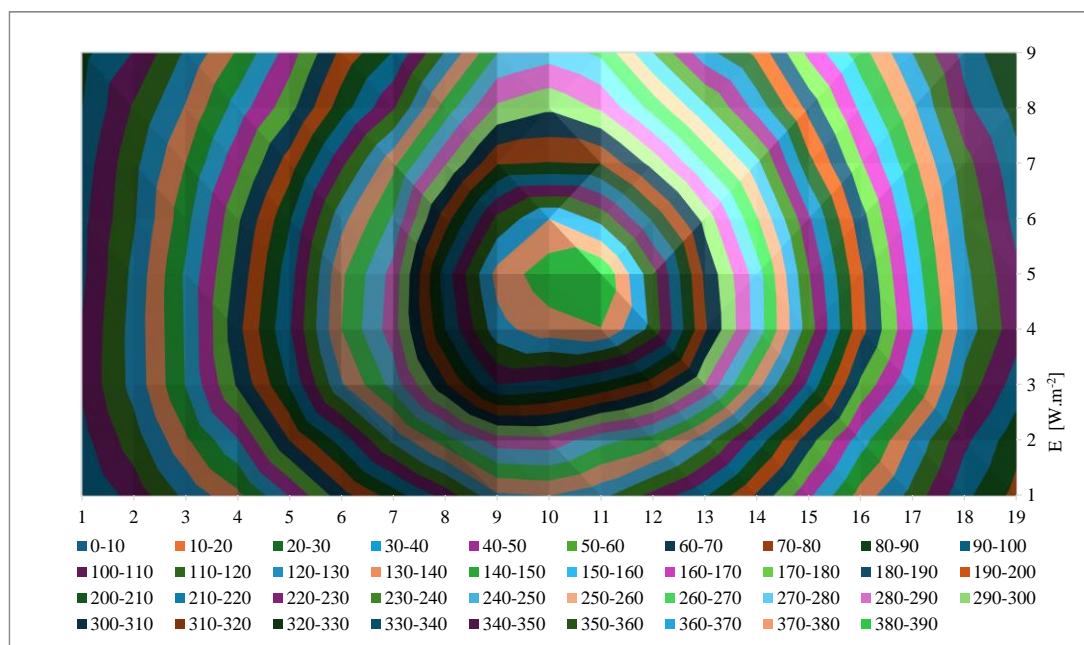
Pre analýzu rozloženia intenzity svetla halogénového svetelného zdroja boli vybrané tri výšky:

- 60,5 cm – optimálna výška, v ktorej bol nameraný najvyšší výkon. Preto bolo vykonané podrobnejšie meranie v deviatich bodoch na jednom článku, a to v rohoch článku, v stredoch strán a v strede článku, čo viedlo k celkovému počtu 171 bodov.
- 48 cm – výška nižšia ako optimálna. Boli vykonané 2 merania, prvé v strede každého článku a ďalšie v štyroch rohoch článku.
- 67 cm – výška vyššia ako optimálna. Boli vykonané 2 merania, prvé v strede každého článku a ďalšie v štyroch rohoch článku.

Z Obr. 5.25 konštatujeme, že svetlo je vo výške 60,5 cm najintenzívnejšie v strede plochy, kde dosahuje maximum $389,6 \text{ W/m}^2$. Pri výške 60,5 cm dosahuje halogénový reflektor najlepšiu rovnováhu medzi vysokou intenzitou svetla a relatívne rovnomerným rozložením po celej meranej ploche. Táto výška bola identifikovaná ako optimálna v rámci experimentu. Intenzita svetla postupne klesá smerom k okrajom mriežky, kde dosahuje hodnoty medzi $70\text{-}90 \text{ W/m}^2$. Tvar grafu pripomína pravidelný kužeľ so širokou základňou, čo naznačuje rovnomerné rozloženie svetelného toku okolo centrálného maxima. Na Obr. 5.26 je znázornený 2D povrchový graf, kde koncentrické kruhy jasne znázorňujú pokles intenzity od stredu k okrajom. Kruhy sú pravidelné a symetrické, čo naznačuje vysokú kvalitu ožiarenia a minimálne deformácie rozloženia svetla.

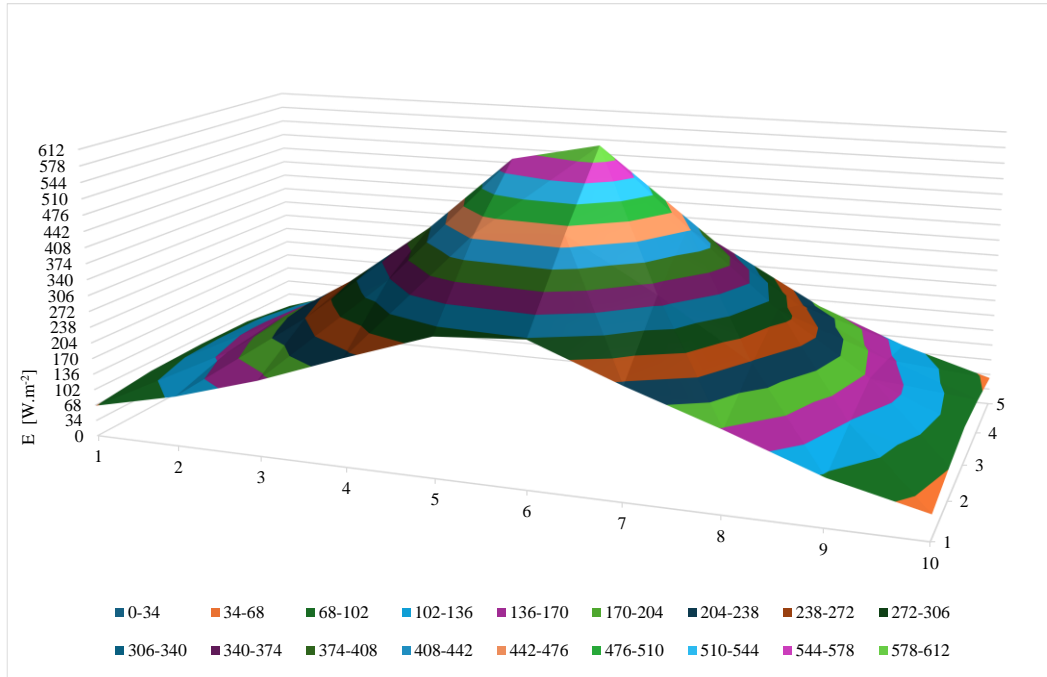


Obr. 5.25 Namerané hodnoty intenzít žiarenia vo výške 60,5 cm vynesené do 3D grafu pre halogénový reflektor

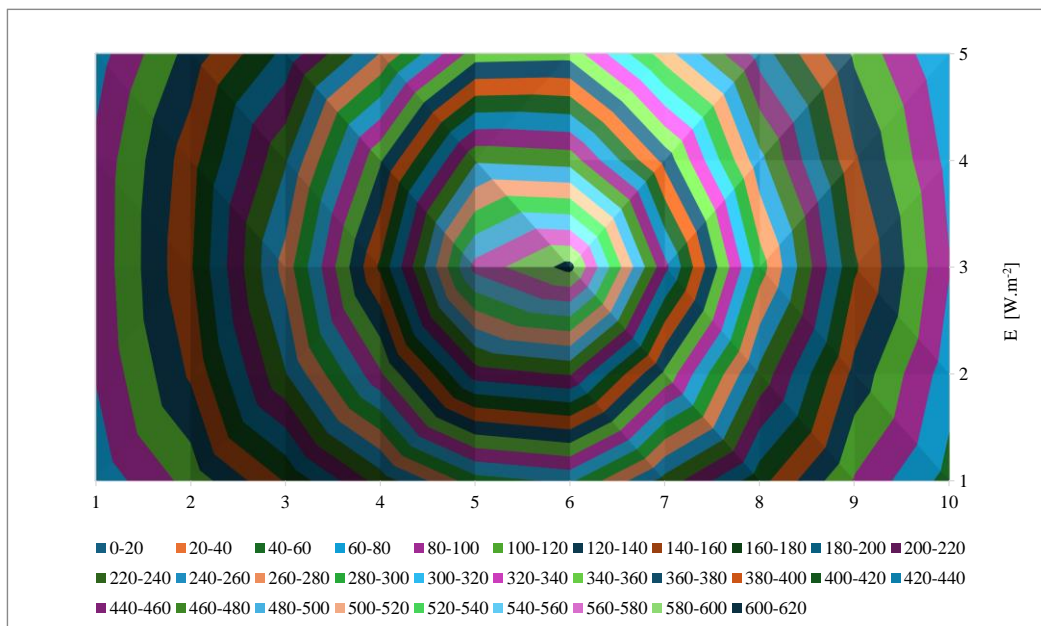


Obr. 5.26 Namerané hodnoty intenzít žiarenia vo výške 60,5 cm vynesené do 2D grafu pre halogénový reflektor

Na Obr. 5.27 a 5.28 sú zobrazené 3D a 2D grafy nameraných hodnôt intenzít žiarenia vo výške 48 cm v štyroch rohoch každého článku. 3D graf znázorňuje, že svetlo je pri tejto výške ešte viac koncentrované, pričom maximálna intenzita dosahuje hodnotu 606,9 W/m². Na okrajoch dochádza k prudkému poklesu intenzity, pričom hodnoty na okrajoch mriežky sú minimálne. Na 2D grafe vidíme, že koncentrické kruhy sú ostrejšie a menšie, čo naznačuje vyššiu koncentráciu svetla na menšej ploche.

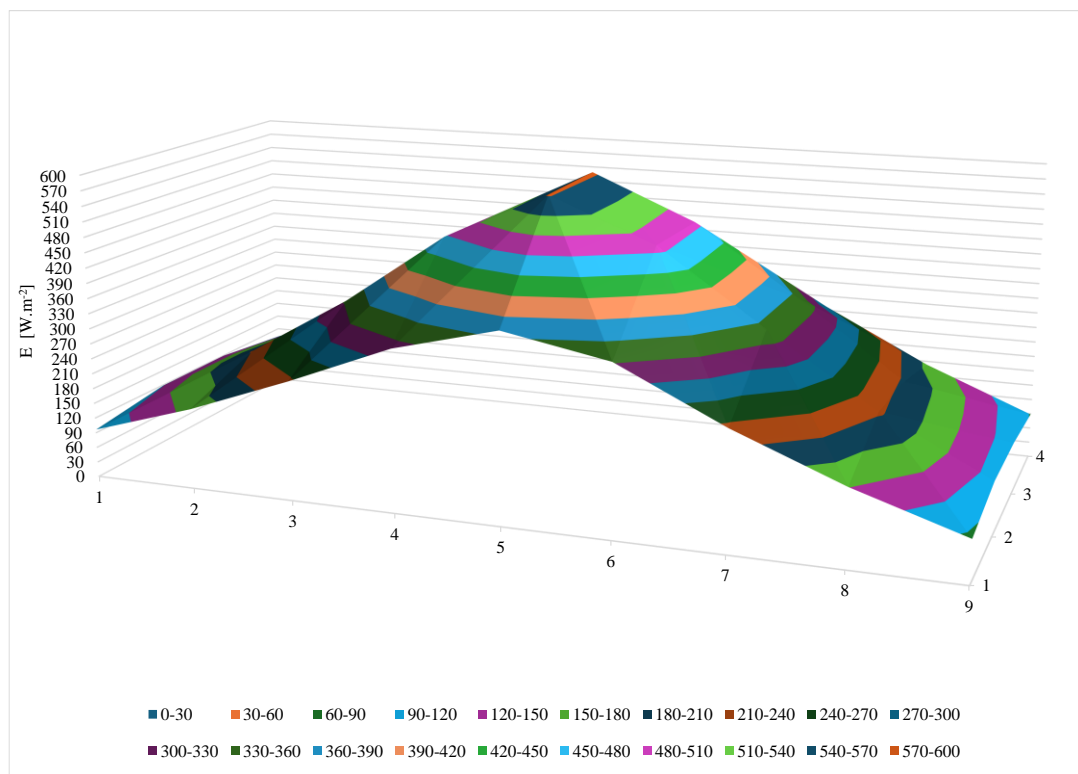


Obr. 5.27 Namerané hodnoty intenzít žiarenia vo výške 48 cm v rohoch článkov vynesené do 3D grafu pre halogénový reflektor

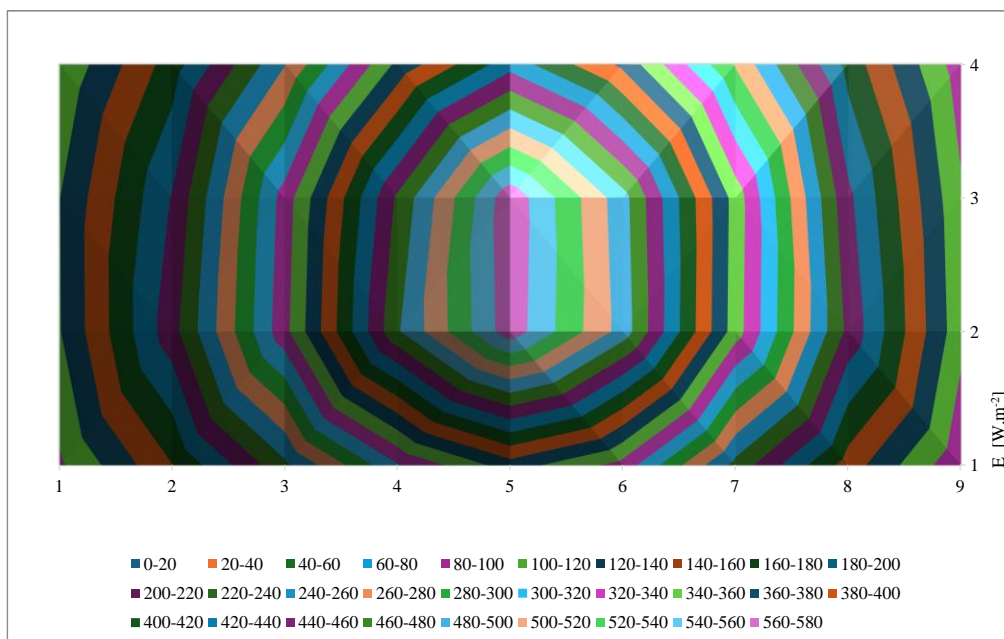


Obr. 5.28 Namerané hodnoty intenzít žiarenia vo výške 48 cm v rohoch článkov vynesené do 2D grafu pre halogénový reflektor

Na Obr. 5.29 a 5.30 sú zobrazené 3D a 2D grafy nameraných hodnôt intenzít žiarenia vo výške 48 cm v strede každého článku. 3D graf znázorňuje, že intenzita svetla je opäť výrazne vyššia v strede, dosahujúc maximum 574,3 W/m². Klesanie intenzity je menej výrazné ako pri krajných bodoch. Svetlo je o niečo rovnomernejšie rozložené, ale stále vykazujú vysokú koncentráciu v centrálnej oblasti a znížené ožiarenie okrajov.

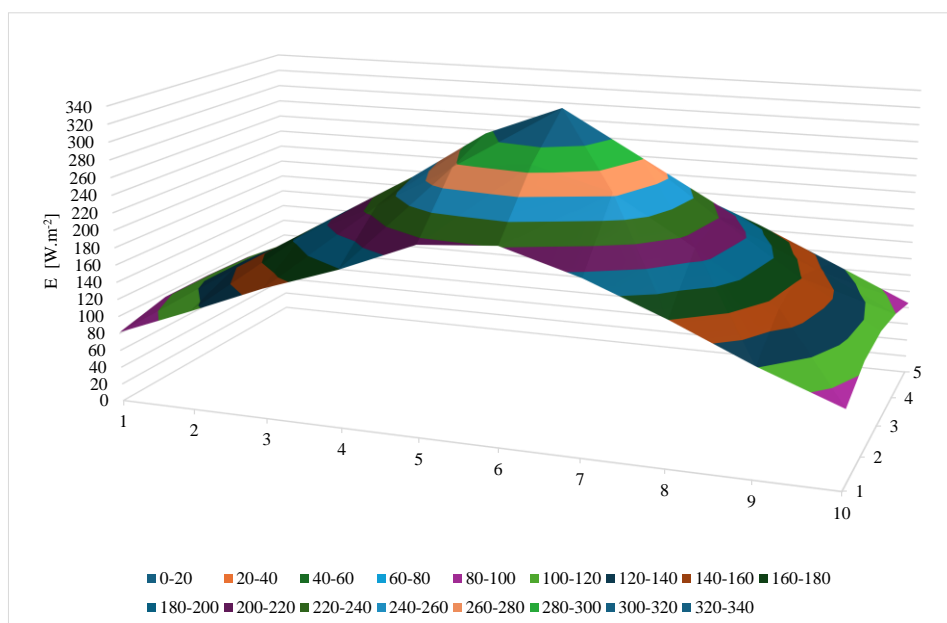


Obr. 5.29 Namerané hodnoty intenzít žiarenia vo výške 48 cm v stredoch článkov vynesené do 3D grafu pre halogénový reflektor

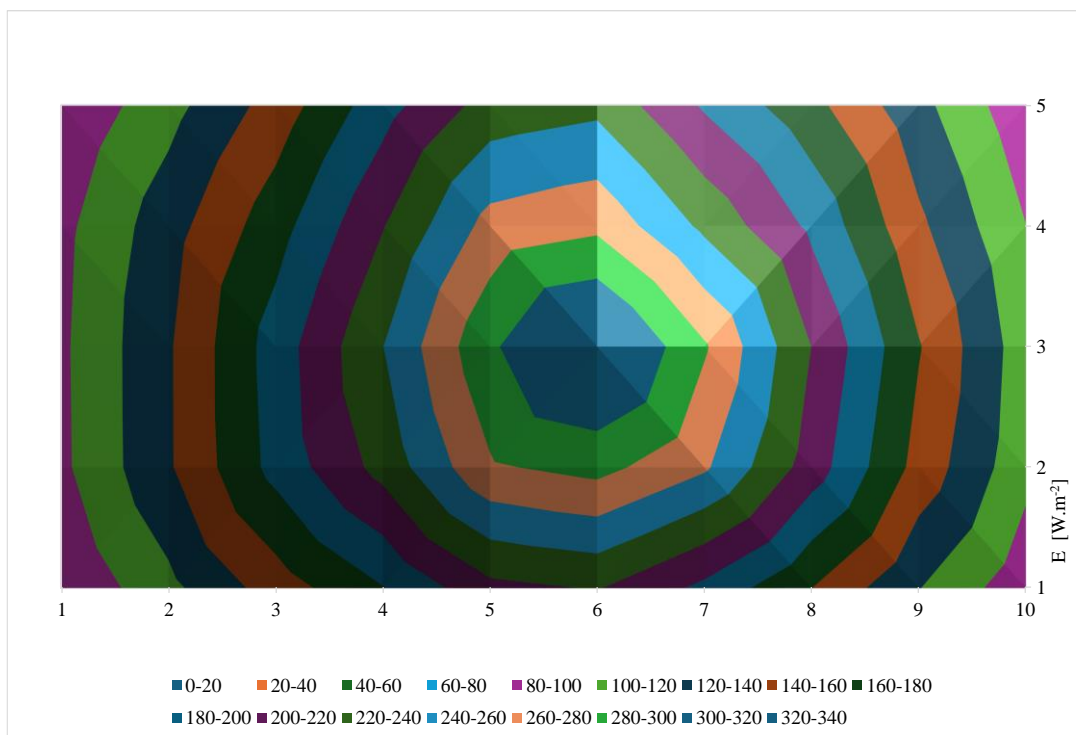


Obr. 5.30 Namerané hodnoty intenzít žiarenia vo výške 48 cm v stredoch článkov vynesené do 2D grafu pre halogénový reflektor

Na Obr. 5.31 a 5.32 sú zobrazené 3D a 2D grafy nameraných hodnôt intenzít žiarenia vo výške 67 cm v rohoch každého článku. 3D graf znázorňuje, že svetlo je rovnomernejšie rozptýlené po celej ploche, ale hodnoty na okrajoch sú stále nízke. Maximálna intenzita dosahuje 331,4 W/m². Kruhy intenzity sú rozšírené a menej ostré, čo značí lepšie rozloženie svetla po ploche, no stále pretrvávajú koncentrácia intenzity v strede.

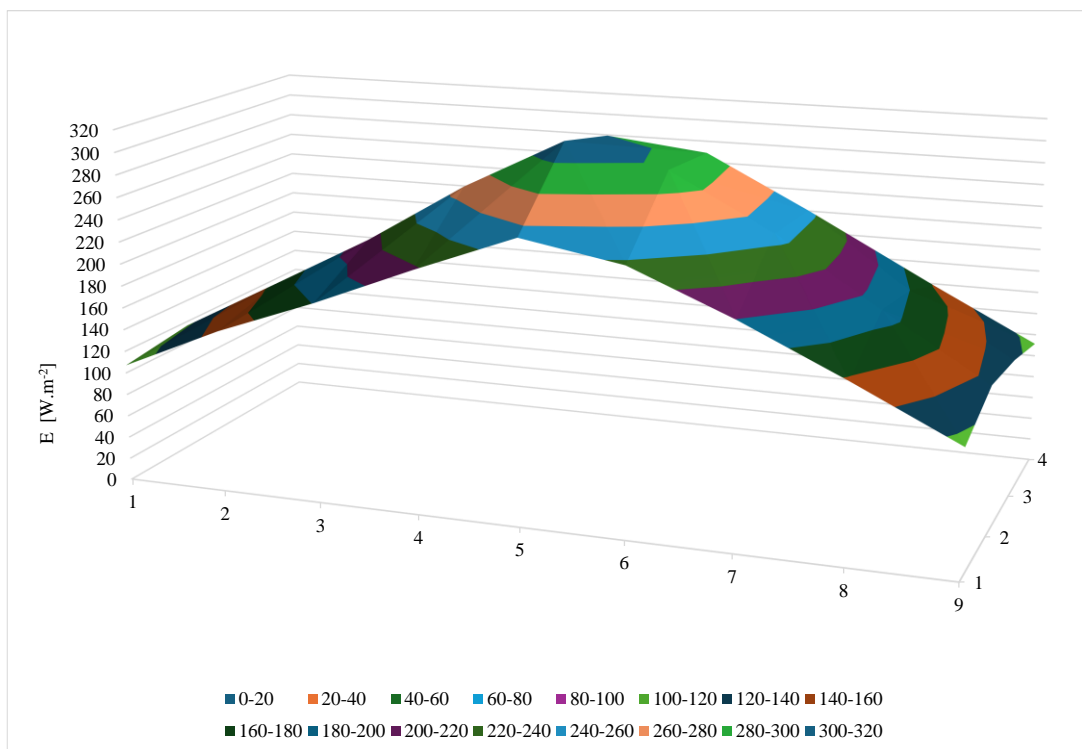


Obr. 5.31 Namerané hodnoty intenzít žiarenia vo výške 67 cm v rohoch článkov vynesené do 3D grafu pre halogénový reflektor

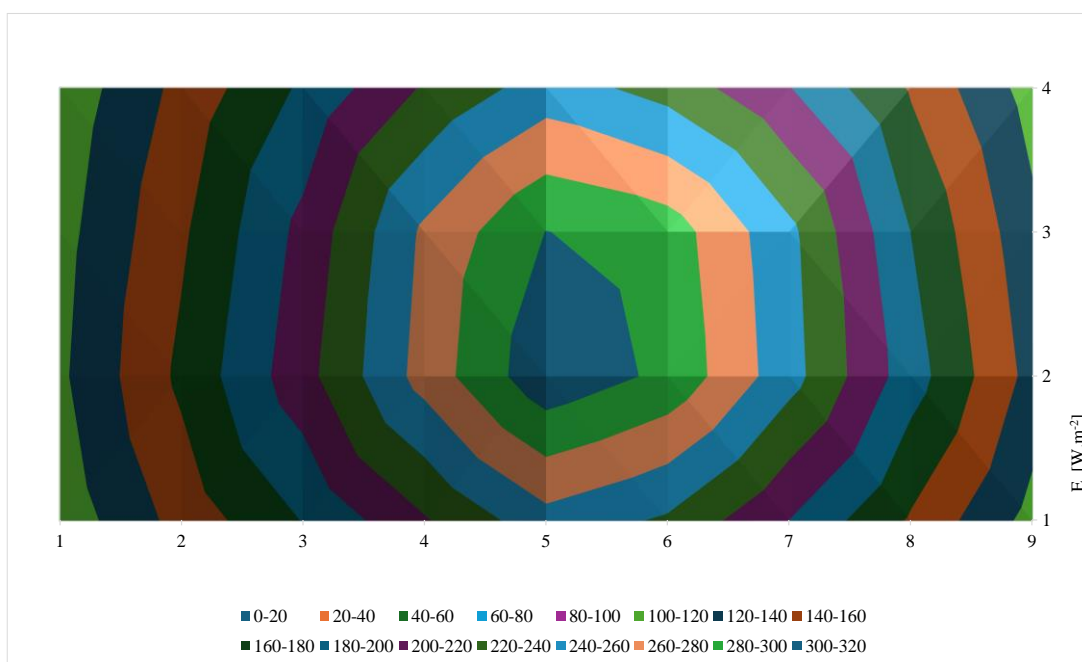


Obr. 5.32 Namerané hodnoty intenzít žiarenia vo výške 67 cm v rohoch článkov vynesené do 3D grafu pre halogénový reflektor

Na Obr. 5.33 a 5.34 sú zobrazené 3D a 2D grafy nameraných hodnôt intenzít žiarenia vo výške 67 cm v strede každého článku. Na 3D grafe vidíme, že svetlo je rovnomernejšie rozložené s postupným klesaním od centrálnej časti. Maximálna intenzita je 314 W/m^2 a hodnoty na okrajoch dosahujú okolo 110 W/m^2 . Vyššia výška zlepšuje rovnomernosť ožiarenia, ale celková intenzita svetla klesá.

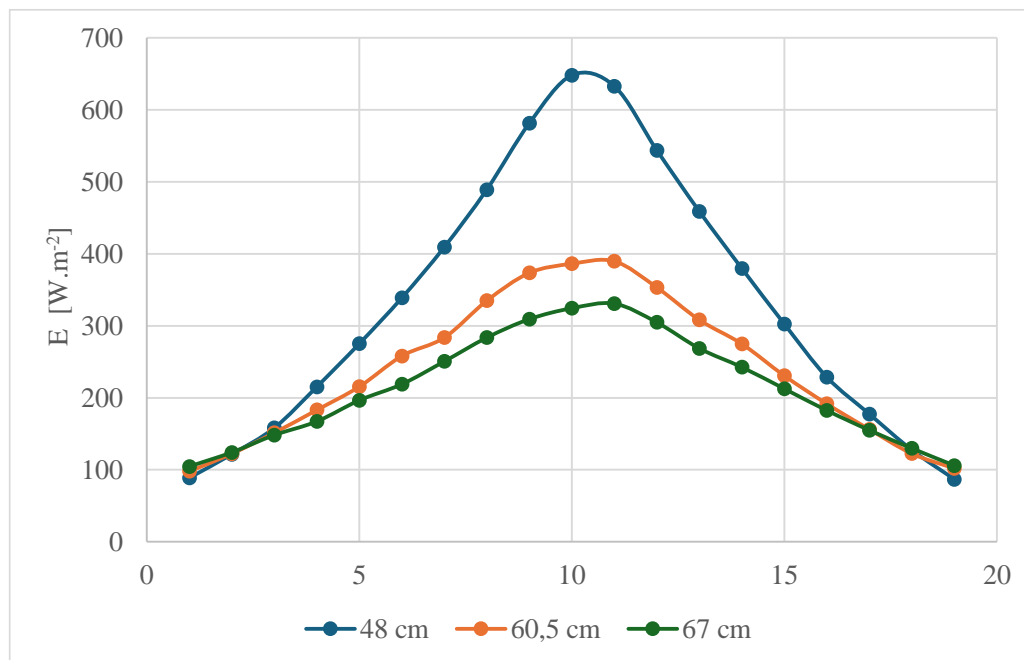


Obr. 5.33 Namerané hodnoty intenzít žiarenia vo výške 67 cm v stredoch článkov vynesené do 3D grafu pre halogénový reflektor



Obr. 5.34 Namerané hodnoty intenzít žiarenia vo výške 67 cm v stredoch článkov vynesené do 3D grafu pre halogénový reflektor

Na Obr. 5.35 je znázornený priebeh intenzity dopadajúceho žiarenia pozdĺž stredovej osi fotovoltaického panelu pri osvetlení halogénovým reflektorom z 3 rôznych výšok: 48 cm, 60,5 cm, 67 cm.



Obr. 5.35 Závislosť intenzity žiarenia v stredovej osi FV panelu pri osvetlení halogénovým reflektorom pre rôzne výšky svetelného zdroja

Z pozorovaného grafu vyplýva, že vo výške 48 cm dosahuje halogénový reflektor najvyššiu intenzitu ožiarenia v centrálnej časti panelu. Žiarenie je výrazne sústredené v strede panelu a rýchlo klesá smerom k okrajom. Výsledkom je vysoká nerovnomernosť ožiarenia a možné lokálne prehrievanie v strede.

Vo výške 60,5 cm je intenzita žiarenia nižšia, no rozloženie svetla je rovnomernejšie. Táto výška predstavuje vyvážené ožiarovanie s najvyšším výkonom panelu.

Vo výške 67 cm je najnižšia zaznamenaná intenzita, ale s najrovnomernejším rozložením. Reflektor vo väčšej výške síce osvetľuje panel rovnomerne, no celková účinnosť žiarenia je znížená kvôli väčšiemu rozptylu.

5.4 Meranie rozloženia teploty na povrchu FV panelu pri ožiarení halogénovým reflektorom

Pri osvetľovaní fotovoltaického panela halogénovým reflektorom dochádza okrem ožiarenia aj k výraznému zahrievaniu povrchu panelu. Aby bolo možné presnejšie analyzovať vplyv tepelného žiarenia na prevádzkové vlastnosti panelu, bolo realizované dodatočné meranie rozloženia teploty na povrchu FV panelu v rôznych výškach osvetlenia.

Meranie bolo vykonané iba pri osvetľovaní halogénovým reflektorom, nakoľko má okrem viditeľného svetla aj výrazný teplotný účinok. Vďaka tomu dochádza k ohrevu panelu, čo umožňuje pozorovať a analyzovať rozdiely v teplote. LED lampa produkuje najmä viditeľné svetlo s minimálnym podielom tepelného žiarenia. V dôsledku toho by meranie teplotného rozloženia pri osvetlení LED lampou neposkytovalo relevantné ani porovnateľné výsledky.

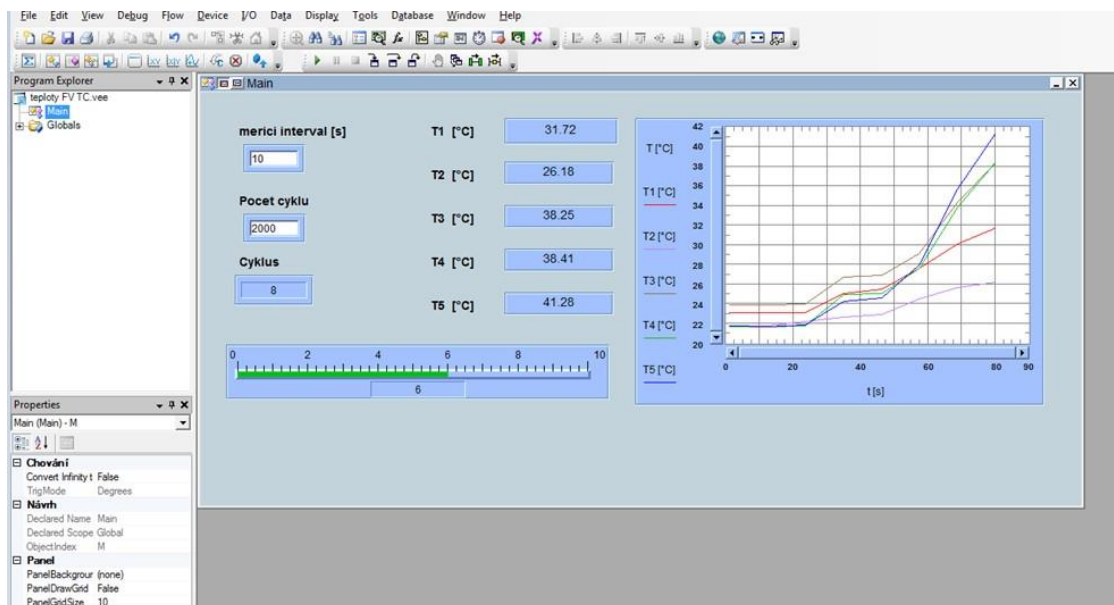
Meranie bolo realizované s využitím meracej stanice Agilent 34972A, ktorá je na Obr. 5.4., v kombinácii so softvérom Agilent VEE Pro 9.2. Na panel bolo pripojených 5 teplotných snímačov, ktoré boli rozmiestnené rovnomerne pozdĺž šírky panelu. Prvý snímač Φ_1 bol umiestnený priamo v strede panelu pod halogénovým reflektorom, ďalšie štyri boli od neho vzdialené po 10 cm, čo zodpovedá šírke jedného článku. Toto rozloženie je zobrazené na Obr. 5.36.

Meranie prebiehalo automaticky v intervale 10 sekúnd a bolo nastavené na 2000 cyklov. Vždy v danom intervale prebehlo odčítanie hodnôt všetkých piatich snímačov súčasne, čo zabezpečilo rovnomerný zber údajov počas celého merania. Zaznamenané hodnoty teplôt boli automaticky ukladané do tabuľky v Microsoft Excel, odkiaľ boli ďalej spracované na grafické znázornenie vývoja teplôt v čase pre jednotlivé výšky zdroja osvetlenia (30 cm, 48 cm a 67 cm). Tieto závislosti sú uvedené v grafoch na Obr. 5.38 až 5.40.

Používateľské rozhranie softvéru (viď Obr. 5.37) zobrazovalo v reálnom čase aktuálne teploty zo všetkých snímačov, počet vykonaných cyklov a grafický priebeh ich zmien v čase.

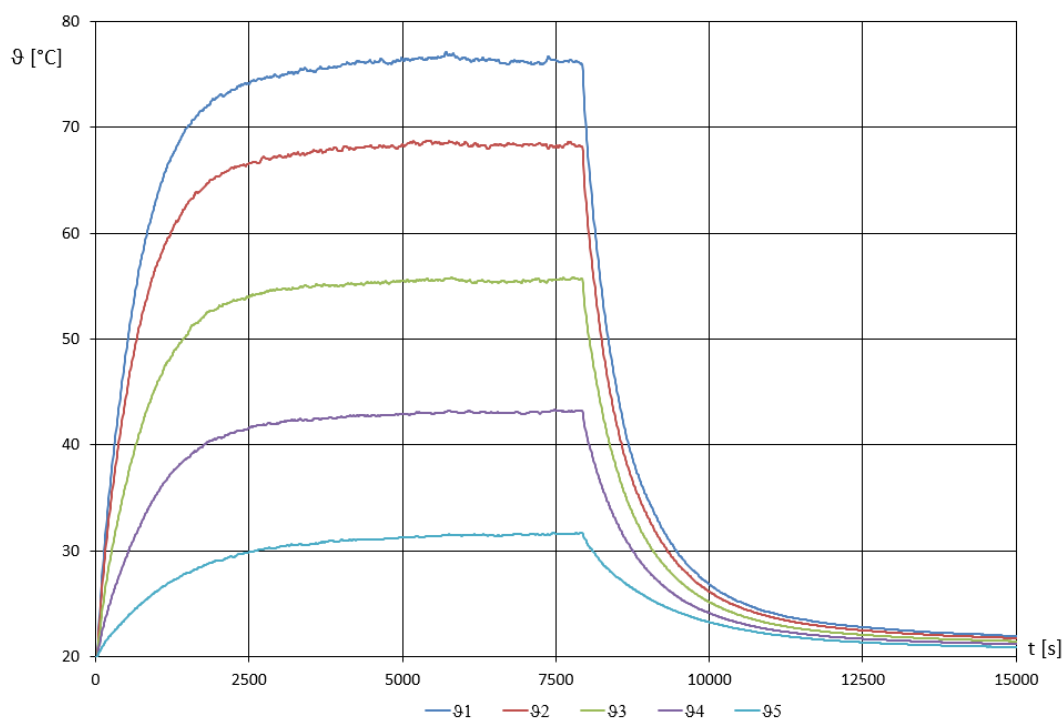


Obr. 5.36 Skúmaný panel s pripojenými snímačmi teploty

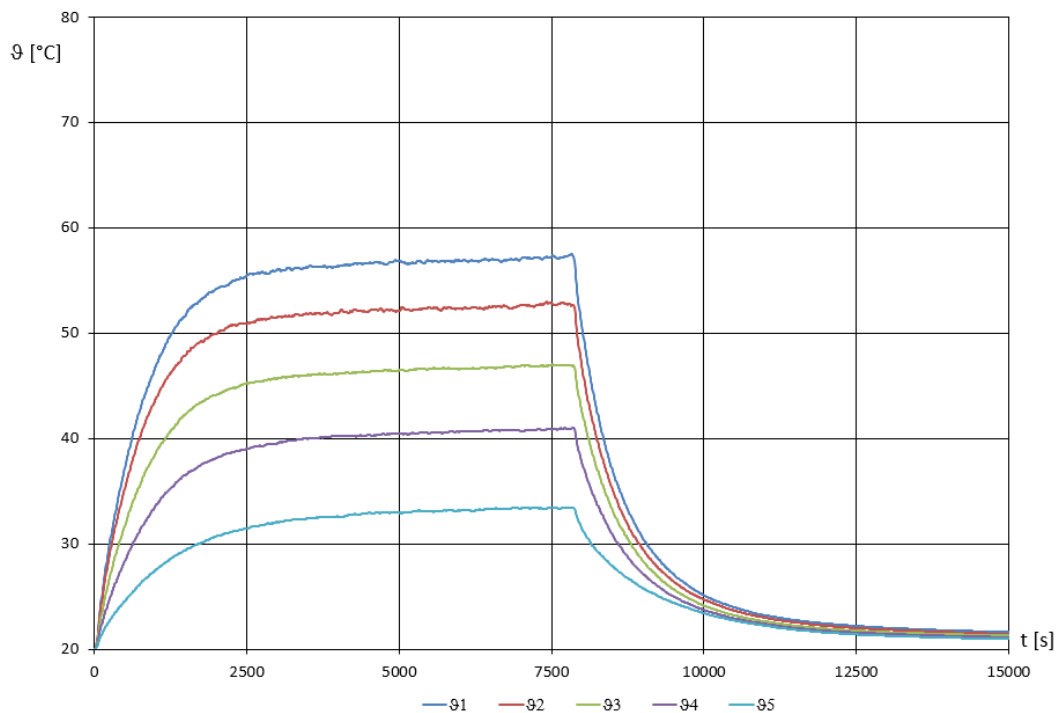


Obr. 5.37 Používateľské rozhranie softvéru Agilent VEE Pro 9.2 pre meranie rozloženia teploty

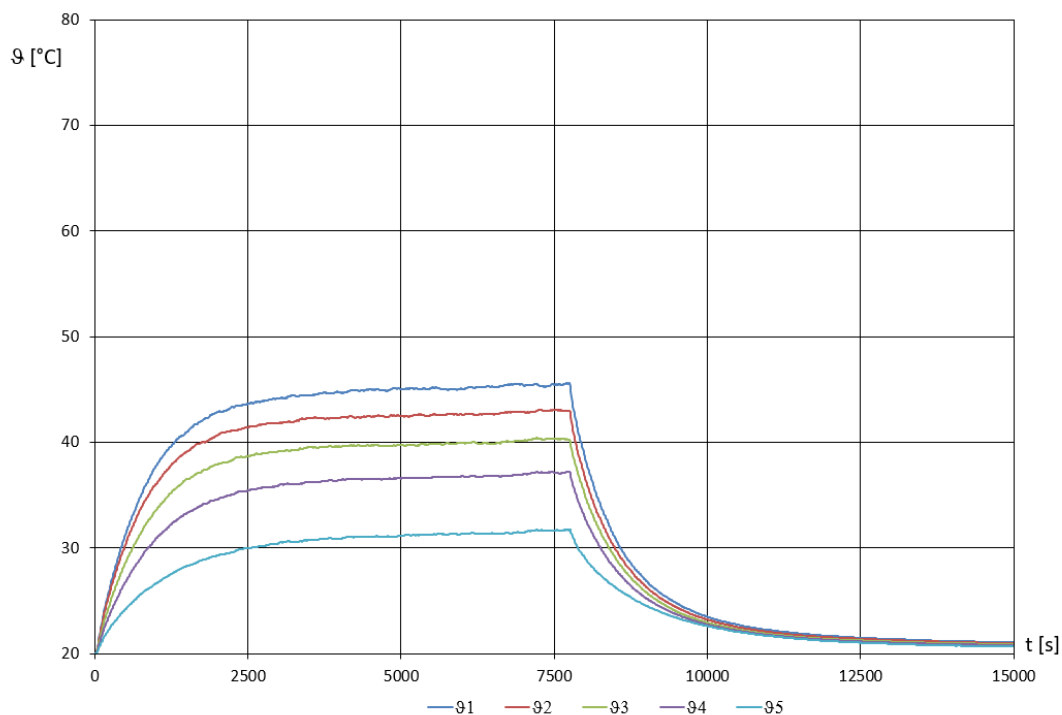
Cieľom merania bolo zistiť ako vzdialenosť halogénového reflektora ovplyvňuje rýchlosť a rozsah ohrevu článkov počas osvetlenia. Meranie malo za úlohu identifikovať rozdiely v teplotnom zaťažení pri rôznych výškach halogénového reflektora a tým posúdiť, do akej miery môže dôjsť k lokálnemu prehrievaniu, ktoré by mohlo negatívne ovplyvniť elektrické vlastnosti alebo životnosť fotovoltaického článku.



Obr. 5.38 Závislosť teploty FV panelu od času pri osvetlení z výšky 35 cm



Obr. 5.39 Závislosť teploty FV panelu od času pri osvetlení z výšky 48 cm



Obr. 5.40 Závislosť teploty FV panelu od času pri osvetlení z výšky 50 cm

Z nameraných údajov a z grafov vyplýva, že najvyššia teplota a najväčší teplotný gradient bol zaznamenaný pri najnižšej výške osvetlenia - 35 cm, kde bol svetelný lúč najviac sústredený. V dôsledku toho vznikla výrazná nerovnomernosť ohrevu

fotovoltaického panelu. Najviac ohriaty článok sa nachádzal priamo pod stredom halogénového reflektora, teda v oblasti najväčšej hustoty dopadajúceho žiarenia. Naopak, najnižšia teplota bola nameraná v oblasti snímača Φ_5 , ktorý sa nachádzal najďalej od zdroja svetla, čomu zodpovedá aj očakávaný minimálny ohrev.

Pri výške 48 cm sa rozloženie teploty čiastočne vyrovnáva, hoci rozdiel medzi stredom a okrajmi panelu je stále zreteľný. S rastúcou vzdialenosťou panela od zdroja svetla sa znižuje teplotný rast článkov.

Pri výške 60 cm je teplotné pole najrovnomernejšie. Zároveň dochádza k poklesu maximálnej teploty, čo súvisí s väčším rozptylom svetelného lúča na paneli.

Tieto výsledky ukazujú, že vzdialenosť svetelného zdroja má významný vplyv na veľkosť nárastu teploty článkov a rovnomernosť ohrevu, a tým aj na prevádzkové podmienky FV článkov. Pri laboratórnych meraniach je preto dôležité zvoliť vhodnú výšku zdroja, ktorá zabezpečí čo najrovnomernejšie ožiarenie. To pomáha predchádzať lokálnemu prehrievaniu článkov, ktoré by mohlo ovplyvniť VA charakteristiku panelu alebo dokonca viesť k trvalému poškodeniu.

5.5 Štatistická analýza rozloženia intenzity žiarenia

V nasledujúcich tabuľkách sú uvedené vybrané štatistické údaje získané z merania intenzity žiarenia pre LED lampu a halogénový reflektor pri rôznych výškach svetelného zdroja. Hodnoty boli vyhodnotené osobitne pre stredy a okraje panelu a zameriavali sa najmä na parameter nerovnomernosti ožiarenia, ktorý je rozhodujúci pre hodnotenie kvality osvetlenia.

Tab. 1 Štatistické údaje vypočítané z nameraných hodnôt pre LED lampu

	LED 100 W 24,5 cm okraje	LED 100 W 24,5 cm stredy	LED 100 W 37 cm okraje	LED 100 W 37cm stredy	LED 100 W 50 cm okraje	LED 100 50 cm stredy
minimálna hodnota [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]	1,1	1,9	2,5	3,7	3,1	4,3
maximálna hodnota [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]	73,4	59,7	35,2	32,7	18,9	18,5
aritmetický priemer [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]	16,81	20,12	13,48	14,86	9,464	10,51
smerodajná odchýlka [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]	17,09	17,48	8,82	8,64	4,39	4,26
rozptyl hodnôt [$\text{W}^2\cdot\text{m}^{-4}$]	291,97	305,61	77,81	74,61	19,23	18,17
priemerná odchýlka [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]	13,55	14,72	7,51	7,44	3,79	3,73
variačný koeficient [-]	101,64	86,89	65,42	58,12	46,34	40,55
nerovnomernosť ožiarenia [%]	97,05	93,83	86,74	79,67	71,82	62,28

Tab. 2 Štatistické údaje vypočítané z nameraných hodnôt pre LED lampu v rozšírenom meraní vo výške 37 cm

	LED 100 W, 37 cm
minimálna hodnota [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]	2,5
maximálna hodnota [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]	36,6
aritmetický priemer [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]	14,49
smerodajná odchýlka [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]	9
rozptyl hodnôt [$\text{W}^2\cdot\text{m}^{-4}$]	80,96
priemerná odchýlka [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]	7,69
variačný koeficient [-]	62,08
nerovnomernosť ožiarenia [%]	87,21

Tab. 3 Štatistické údaje vypočítané z nameraných hodnôt pre halogénový reflektor

	Halogén 500 W 48 cm okraje	Halogén 500 W 48 cm stredy	Halogén 500 W 60,5 cm okraje	Halogén 500 W 60,5 cm stredy	Halogén 500 W 67 cm okraje	Halogén 500 W 67 cm stredy
minimálna hodnota [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]	52,5	83,7	76,7	102,3	81,4	106
maximálna hodnota [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]	606,9	574,3	389,6	375,8	331,4	314,5
aritmetický priemer [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]	237,57	275,81	196,66	219,51	178,82	195,6
smerodajná odchýlka [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]	142,76	142,66	83,72	80,71	65,53	60,71
rozptyl hodnôt [$\text{W}^2\cdot\text{m}^{-4}$]	20380,1	20353,1	7009,78	6513,8	4294,71	3685,81
priemerná odchýlka [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]	117,97	122,78	71,17	69,57	55,84	51,9
variačný koeficient [-]	60,01	51,73	42,57	36,77	36,65	31,04
nerovnomernosť ožiarenia [%]	84,08	74,56	67,1	57,21	60,56	49,58

Tab. 4 Štatistické údaje vypočítané z nameraných hodnôt pre halogénový reflektor v rozšírenom meraní vo výške 60,5 cm

	Halogén 500 W, 60,5 cm
minimálna hodnota [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]	76,7
maximálna hodnota [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]	389,6
aritmetický priemer [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]	206,82
smerodajná odchýlka [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]	82,67
rozptyl hodnôt [$\text{W}^2\cdot\text{m}^{-4}$]	6833,86
priemerná odchýlka [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]	70,54
variačný koeficient [-]	39,97
nerovnomernosť ožiarenia [%]	67,1

Z výsledkov vyplýva, že halogénový reflektor dosahoval vyššie hodnoty minimálnej a maximálnej intenzity žiarenia než LED lampa. Jeho ožiarenie je zároveň energeticky intenzívnejšie, čo sa odráža na vyšších aritmetických priemeroch.

Nerovnomernosť ožiarenia, ktorá je hlavným kvalitatívnym ukazovateľom homogénnosti ožiarenia, bola vo všeobecnosti vyššia pri LED zdroji, najmä pri menších vzdialenostiach svetelného zdroja (napr. 24,5 cm: 93,83 %). S rastúcou výškou svetelného zdroja však dochádzalo k poklesu tohto parametra – pri výške 50 cm už bola hodnota nerovnomernosti 62,28 %. Pri halogénovom reflektore bol vývoj podobný – znížením vzdialenosti sa zvyšovala nerovnomernosť ožiarenia.

Z porovnania oboch svetelných zdrojov vyplýva, že halogénový reflektor dosahoval nižšiu nerovnomernosť ožiarenia vo všetkých prípadoch než LED lampa. Najlepšie hodnoty boli zaznamenané pri halogénovom reflektore vo výške 67 cm a pri LED lampe po výške 50 cm, čo tieto konfigurácie predurčuje ako najvhodnejšie z hľadiska rovnomernosti ožiarenia.

Avšak za najvhodnejšie pracovné výšky zdroja osvetlenia, ktoré poskytujú najlepšie podmienky z hľadiska výkonu FV panelu, sa na základe výsledkov z predchádzajúcich meraní ukázali – 60,5 cm pre halogénový reflektor a 37 cm pre LED lampu.

6. ZÁVER

Táto práca priniesla cenné poznatky o využití umelých svetelných zdrojov v súvislosti s výkonom fotovoltických panelov. V rámci experimentálnych meraní boli analyzované LED svetelný zdroj (100 W) a halogénový reflektor (500 W), pričom sa skúmal ich vplyv na elektrické vlastnosti a intenzitu ožiarenia fotovoltického panela. Na základe získaných výsledkov boli vytvorené mapy ožiarenia, ktoré umožnili vizualizovať rozloženie svetelného toku a identifikovať optimálne vzdialenosti pre dosiahnutie maximálneho výkonu.

Výsledky experimentov potvrdili, že LED a halogénové svetelné zdroje majú výrazne odlišné charakteristiky, ktoré ovplyvňujú efektivitu osvetlenia fotovoltického systému. LED zdroj preukázal vyššiu nerovnomernosť ožiarenia, zatiaľ čo halogén dosahoval vyššiu maximálnu intenzitu s nižšou nerovnomernosťou.

Dôležitým doplnujúcim meraním bolo aj meranie teploty na povrchu fotovoltického panela pri osvetlení halogénovým reflektorom. Táto časť merania ukázala, že zvýšené tepelné žiarenie vedie k lokálnemu prehrievaniu povrchu panela, čo môže ovplyvniť nielen jeho účinnosť ale aj životnosť.

Výsledky meraní boli podrobené štatistickému spracovaniu, ktoré zahŕňalo výpočet aritmetického priemeru, rozptylu, smerodajnej odchýlky, variačného koeficientu a nerovnomernosti ožiarenia. Tieto veličiny poskytli kvantitatívny pohľad na mieru homogénnosti žiarenia a jeho vplyv na správanie sa fotovoltického panela.

Na základe vykonaných meraní bol vypracovaný návrh laboratórnej úlohy, ktorá kombinuje meranie výkonu fotovoltického panelu s vizualizáciou a vyhodnotením rozloženia intenzity žiarenia. Laboratórna úloha, ktorá vychádza z tejto diplomovej práce sa nachádza v Prílohe A tejto práce. Úloha je navrhnutá tak, aby študentom umožnila komplexnejšie pochopiť vplyv rôznych podmienok na správanie sa fotovoltických panelov.

Diplomová práca tak prispieva nielen k hlbšiemu pochopeniu interakcie svetla a fotovoltického článku, ale aj k tvorbe edukačných materiálov, ktoré podporujú efektívne vyučovanie obnoviteľných zdrojov energie.

LITERATÚRA

- [1] LENCIOVÁ, Jaroslava, 2017. *Slnečná energia ako obnoviteľný zdroj energie*. Bakalárska práca. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene.
- [2] *Energia zo slnka*, 2022. Online. Energoportál. Dostupné z: <https://energoportal.org/obnovitelne-zdroje/energia-zo-slnka>. [cit. 2024-04-20].
- [3] GHOSH, Tushar K. a PRELAS, Mark A., 2011. *Energy Resources and Systems*. Online. Springer Science+Business Media. ISBN 978-94-007-1401-4. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/978-94-007-1402-1>. [cit. 2024-04-18].
- [4] VANĚK, Jiří a KŘIVÍK, Petr, 2014. *Alternativní zdroje energie*. FEKT VUT v Brně.
- [5] MASTNÝ, Petr, 2011. *Obnovitelné zdroje elektrické energie*. Online. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze. ISBN 978-80-01-04937-2. [cit. 2024-04-09].
- [6] JUTKA, Štefan, 2015. *Materiály pre solárne články*. Bakalárska práca. Žilina: Žilinská univerzita v Žiline.
- [7] Advantages and disadvantages of monocrystalline solar panels. Online. In: . Dostupné z: <https://doi.org/https://elat.com/blog/advantages-and-disadvantages-of-monocrystalline-solar-panels/>. [cit. 2024-12-28].
- [8] BIELE, Greg. Polycrystalline Solar Panels: Science, Efficiency & Benefits. Online. *GrowingSolarMist*. Dostupné z: <https://growingsolarmist.com/polycrystalline-solar-panels-science-efficiency-benefits/>. [cit. 2024-12-28].
- [9] SCHMALOVÁ, Michaela, 2015. *Fotovoltaické systémy ako súčasť stavebných konštrukcií*. Diplomová práca. Košice: Technická univerzita v Košiciach.
- [10] KOSTKOVÁ, Martina, 2018. *Moderné umelé zdroje svetla a ich vplyv na ergonómiu videnia*. Bakalárska práca. Brno: Masarykova univerzita.
- [11] *Osvetlenie v priemysle*, 2013. Online. Slovenská inovačná a energetická agentúra. Dostupné z: <https://www.siea.sk/bezplatne-poradenstvo/publikacie-a-prezentacie/osvetlenie-v-priemysle>. [cit. 2024-05-05].
- [12] SVET-SVIETIDIEL.SK. *Priemyselná žiarovka CLEAR A55 E27/25W/230V*. Online. Dostupné z: <https://www.svet-svietidiel.sk/agl-a55-clear-ziarovka-e27-25w-240v-html/>. [cit. 2025-05-15].
- [13] PLANÉTA ŽIAROVIEK.SK. *NARVA BEL Žiarivka kompaktná 13W/840 G24Q1 studená biela 4pin*. Online. Dostupné z: <https://www.planetaziaroviek.sk/g24q/ziarivka-kompaktna-13w-840-g24q-1-studena-biela-4-pin-2/>. [cit. 2025-05-15].
- [14] JEŽÍK, Bohuslav, 2024. *LED osvetlenie pre mikroskop s fázovým kontrastom*. Diplomová práca. Žilina: Žilinská univerzita v Žiline.
- [15] DROTIK-ELEKTRO.SK. *LED dióda - Biela, 5 mm*. Online. Dostupné z: <https://www.drotik-elektro.sk/arduino-platforma/1034-led-dioda-biela-5-mm.html>. [cit. 2025-05-15].

- [16] NEWPORT CORPORATION, 2015. *Application Note 56: Comparisons of IV Curves between Xenon Lamp-Based and LED-Based Solar Simulators*. Online. Dostupné z: https://www.newport.com/medias/sys_master/images/images/hc9/h79/8797051289630/App-Note-56-Comparisons-of-IV-Curves-between-Xenon-Lamp-Based-and-LED-Based-Solar-Simulators.pdf. [cit. 2025-05-15].
- [17] IEC, 2019. IEC 60904-3, *Photovoltaic devices - Part 3: Measurement principles for terrestrial photovoltaic (PV) solar devices with reference spectral irradiance data*. 4.0.
- [18] GUILLÉN, Cecilia. *Evaluating Photovoltaic Conversion Performance under Artificial Indoor Lighting*. Online. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/electronics13173378>. [cit. 2025-05-15].
- [19] ESEN, Vedat; SAĞLAM, Şafak a ORAL, Bülent. *Light sources of solar simulators for photovoltaic devices: A review*. Online. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.062>. [cit. 2025-05-15].
- [20] Maysun Solar, 2023. *Hot Spot efekty: Příčiny a řešení*. Online. In: . 10.12.2023. Dostupné z: <https://doi.org/https://www.solarpanelscz.com/blog/hot-spot-efekty-priciny-a-reseni>. [cit. 2025-05-15].
- [21] MESSENGER, Roger A. a ABTAHI, Homayoon "Amir." *Photovoltaic Systems Engineering*. Online. 3rd Edition. CRC PRESS. ISBN 9781315218397. Dostupné z: https://www.academia.edu/34914680/Messeger_2003_photovoltaic_systems_engineering. [cit. 2025-05-15].
- [22] DS New Energy. *Obtoková dióda PV Junction Box pre ochranu solárnych panelov*. Online. In: . Dostupné z: <https://sk.dsisolar.com/info/pv-junction-box-s-bypass-diode-for-solar-panel-54222015.html>. [cit. 2025-05-15].
- [23] QUASCHNING, Volker, 2016. *Understanding renewable energy systems*. Earthscan from Routledge. London. ISBN 978-1-138-78194-8.
- [24] BOYLE, Godfrey (ed.), 2004. *Renewable energy: [power for a sustainable future]*. 2nd ed. Oxford: Oxford University Press. ISBN 01-992-6178-4.
- [25] HENDL, Jan, 2009. Grafický a číselný popis rozložení dát. Online. In: *Přehled statistických metod: analýza a metaanalýza dat*. 3., přeprac. vyd. Praha: Portál. ISBN 978-80-7367-482-3. Dostupné z: https://is.muni.cz/el/fss/podzim2019/MVZn4003/93766552/Hendel_91-119.pdf?lang=en. [cit. 2025-05-15].
- [26] MICRONIXSPOL, S R.O. *Fotovoltaický expozimetr LUTRON SPM-1116SD*. micronix.cz [online]. [cit. 2025-05-15]. Dostupné z: <https://www.micronix.cz/fotovoltaicky-expozimetr-lutron-spm-1116sd/>

ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK

OZE	obnoviteľné zdroje energie
CdTe	telurid kademnatý
CIS	meď indium selén (CuInSe ₂)
LED	svetlo vyžarujúca dióda (light-emitting diode)
OLED	organická svetlo vyžarujúca dióda (organic light-emitting diode)
FV	fotovoltický
J	joule
μm	mikrometer
eV	elektrónvolt
W	watt
kW	kilowatt
U	napätie
I	prúd
P	výkon
P _{max}	maximálny výkon
U _{mpp}	napätie v bode P _{max}
I _{mpp}	prúd v bode P _{max}
U _{oc}	napätie naprázdno
I _{sc}	skratový prúd
Wp	watt-peak
W/m ²	watt na meter štvorcový

ZOZNAM PRÍLOH

PRÍLOHA A – TVORBA MÁP OŽIARENIA FOTOVOLTICKÉHO PANELU.....	70
--	-----------

Príloha A – Tvorba máp ožiarania fotovoltaického panelu

A.1 Cieľ úlohy

Cieľom úlohy je zmerať a graficky spracovať mapu intenzít žiarenia dopadajúceho na povrch fotovoltaického panel vrátane štatistického spracovania nameraných výsledkov. Zároveň zmerať a graficky spracovať volt-ampérovú a výkonovú charakteristiku fotovoltaického panelu pri dvoch rôznych výškach osvetlenia.

A.2 Zadanie

U zvoleného zdroja žiarenia zmerajte mapu rozloženia intenzít žiarenia dopadajúceho na povrch fotovoltaického panelu. Výsledky merania zobrazte pomocou povrchového grafu v 2D aj 3D verzii. Stanovte priemernú, maximálnu a minimálnu hodnotu zmeraných intenzít, priemernú odchýlku, rozptyl, smerodajnú odchýlku, variačný koeficient a nerovnomernosť ožiarenia.

Zmerajte priebeh I-U charakteristiky pomocou odporovej dekády. I-U charakteristiky vyneste do grafu spolu s charakteristikou výkonu pri dvoch rôznych výškach osvetlenia.

A.3 Teoretický rozbor

Na meranie máp intenzít je možné použiť fotovoltaický expozimeter SPM-1116SD, ktorý pracuje so senzorom na báze kremíkovej fotodiódy. Merací rozsah 0 – 2000 W/m², spektrálny rozsah 400 až 1100 nm, vysoká rýchlosť prúdovej odozvy < 1s, chyba merania 5 % z meranej hodnoty (typicky 10 W/m²), uhlová presnosť merania (kosínová odozva) < 5 % pre uhly < 60°, veľkosť senzoru – priemer 38 mm x výška 25 mm.



Obr. 1 Fotovoltaický expozimeter SPM-1116SD

Na meranie výstupných parametrov bude použitý fotovoltaický panel Solartec STR 36-50, ktorý patrí medzi monokryštalické panely. Jeho maximálny výkon P_{max} je 50 Wp. Menovité napätie v bode maximálneho výkonu U_{mpp} je 17,4 V a menovitý prúd I_{mpp} 2,98 A. Napätie naprázdno U_{OC} dosahuje hodnotu 21,5 V a skratový prúd I_{SC} je 3,27 A.



Obr. 2 Fotovoltický panel Solartec STR 36-50

Ako svetelný zdroj bude v meraní použitý jeden svetelný zdroj, a to halogénový reflektor R650 s výkonom 500 W, prípadne LED lampa ADVIVE PLUS LED/100W/230V IP65 s výkonom 100 W.



Obr. 3 Halogénový reflektor R650



Obr. 4 LED lampa ADVIVE PLUS LED/100W/230v IP65

Intenzita žiarenia určuje množstvo energie prenášanej žiarením na jednotkovú plochu. Intenzita žiarenia sa vyjadruje v jednotkách $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ a vypočíta sa vzťahom:

$$I = \frac{P}{A}$$

kde

I je intenzita žiarenia ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$),

P je výkon dopadajúceho žiarenia (W),

A je plocha (m^2).

Aritmetický priemer nameraných hodnôt sa vypočíta podľa vzorca:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i,$$

kde

\bar{x} je aritmetický priemer,

n je počet nameraných hodnôt,

x_i sú namerané hodnoty.

Priemerná odchýlka \bar{d} je definovaná ako priemer absolútnych odchýlok nameraných hodnôt od aritmetického priemeru. Pre výpočet sa používa vzťah

$$\bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}|}{n}$$

kde

\bar{x} je aritmetický priemer,

n je počet nameraných hodnôt,

x_i sú namerané hodnoty.

Rozptyl vyjadruje mieru rozloženia alebo variabilnosti dát v určitom súbore alebo vzorke. Je daný matematickým vzťahom:

$$S_x^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n},$$

kde

s_x^2 je rozptyl hodnôt,
x sú namerané hodnoty,
n je počet nameraných hodnôt,
 \bar{x} je aritmetický priemer.

Na základe rozptylu je možné jednoducho vypočítať aj smerodajnú odchýlku s_x pomocou vzťahu:

$$s_x = \sqrt{s_x^2}$$

kde

s_x je smerodajná odchýlka,
 s_x^2 je rozptyl hodnôt.

Variačný koeficient slúži k porovnaniu variability viacerých štatistických znakov, predstavuje relatívnu mieru variability. Definuje sa vzťahom:

$$v_x = \frac{s_x}{\bar{x}}$$

kde

v_x je variačný koeficient (-),
 s_x je smerodajná odchýlka,
 \bar{x} je aritmetický priemer.

Nerovnomernosť ožiarenia sa vypočíta podľa rovnice:

$$N = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} * 100$$

kde

N je nerovnomernosť ožiarenia (%),
 I_{max} je maximálna hodnota intenzity žiarenia,
 I_{min} je minimálna hodnota intenzity žiarenia.

Celková účinnosť fotovoltického panelu je daná vlastnosťami použitého materiálu a výrobnou technológiou. Je daná vzťahom:

$$\eta = \frac{P_m}{P_{rad}} = \frac{P_m}{EA_c}$$

kde

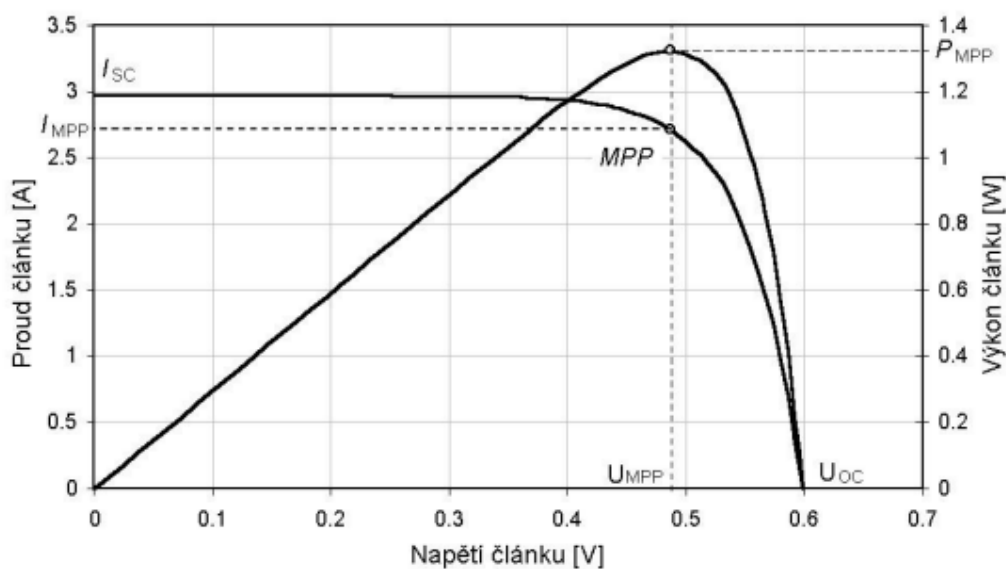
P_m je maximálny výkon panelu,
 P_{rad} je výkon dopadajúceho žiarenia,
E je intenzita osvetlenia pri štandardizovaných skúšobných podmienkach ($W \cdot m^{-2}$),
 A_c je plocha FV panelu (m^2).

Obr. 5 ukazuje závislosť výkonu na napätí a prúdu na napätí. Poukazuje na to, že výkonová krivka má svoj charakteristický bod, pri ktorom je výkon najvyšší. Tento bod sa nazýva maximálny výkon P_{MPP} , na I–U charakteristike je označený ako MPP. Napätie v bode maximálneho výkonu U_{MPP} má menšiu hodnotu než napätie naprázdno U_{OC} a hodnota prúdu I v bode maximálneho výkonu I_{MPP} je menšia ako hodnota prúdu nakrátko I_{SC} .

Ďalším parametrom je faktor plnenia FF (Fill factor), ktorý je daný vzťahom:

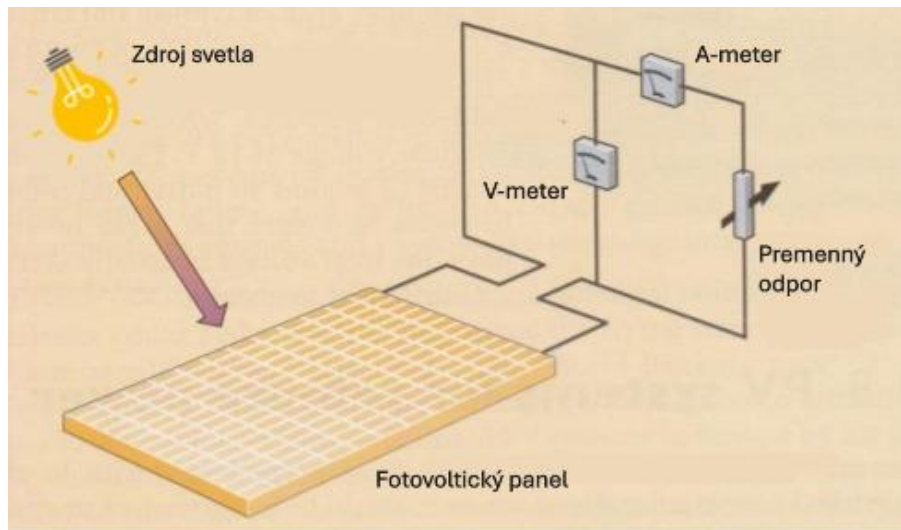
$$FF = \frac{P_{MPP}}{U_{OC}I_{SC}} = \frac{U_{MPP}I_{MPP}}{U_{OC}I_{SC}}$$

Faktor plnenia je kritérium kvality fotovoltických článkov, ktoré popisuje do akej miery je I-U charakteristika fotovoltických článkov pravouhlá. Jeho hodnota je vždy menšia ako 1, obvykle je medzi 0,75 až 0,85.



Obr. 5 I-U a P-U charakteristika fotovoltického článku s bodom maximálneho výkonu

A.4 Schéma zapojenia

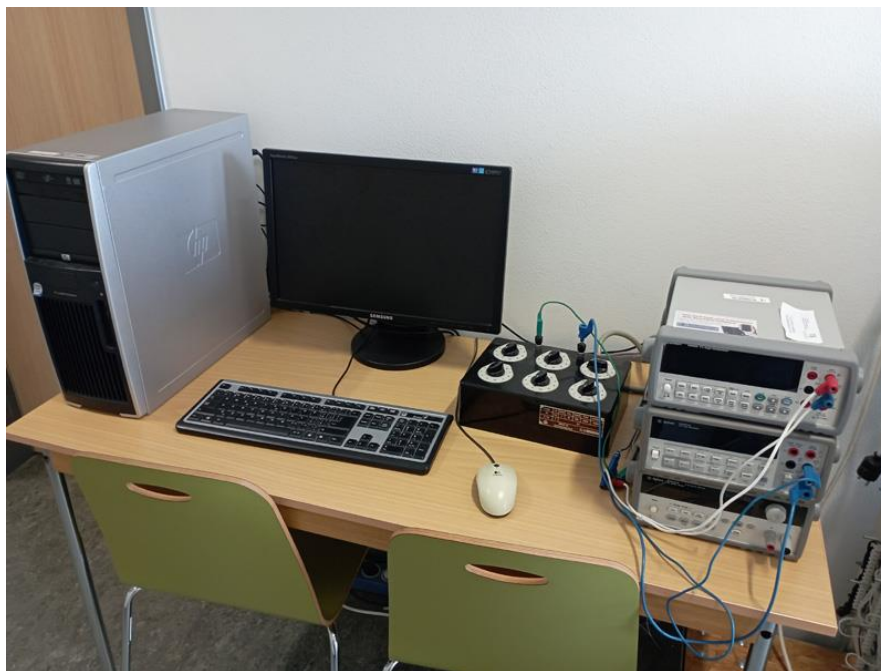


Obr. 6 Schéma zapojenia

A.5 Meracie a vyhodnocovacie pracovisko



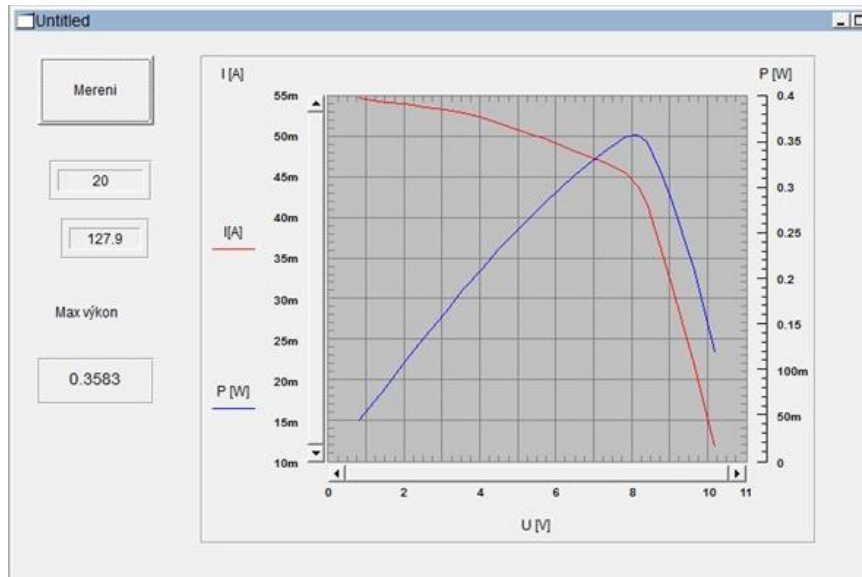
Obr.7 Meracie pracovisko



Obr. 8 Vyhodnocovacie pracovisko

A.6 Pracovný postup

1. U zvoleného zdroja svetla zmerajte mapu intenzít žiarenia dopadajúceho na ožiarenú plochu panelu pomocou fotovoltického expozimetra SPM-1116SD. Ako zdroj žiarenia použite halogénový reflektor (prípadne LED), ktorý umiestnite do výšky 60,5 cm a 67 cm (pre LED 37 cm a 50 cm) kolmo nad stred fotovoltického panela.
2. Pomocou expozimetra zmerajte intenzitu žiarenia v strede každého článku fotovoltického panela – t.j. 36 článkov = 36 bodov.
3. Vytvorte 2D a 3D povrchový graf zmeraných intenzít žiarenia.
4. Vypočítajte priemernú, maximálnu a minimálnu hodnotu zmeraných intenzít, priemernú odchýlku, rozptyl, smerodajnú odchýlku, variačný koeficient a nerovnomernosť ožiarenia.
5. Podľa schémy zapojenia zostavte obvod pre meranie I-U charakteristiky fotovoltického panelu pomocou odporovej dekády.
6. Na odporovej dekáde nastavujte postupne hodnoty odporu – 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 120, 140, 160, 180, 200, 250, 300, 500, 1000 Ω .
7. Spust'íte merací program „Meranie VA“ umiestnené na ploche počítača.
8. Stlačením tlačidla „Merani“ zmerajte hodnoty napätia a prúdu.



Obr. 9 Merací program vytvorený v softvéri Agilent VEE Pro 9.2.

9. Vytvorte grafy voltampérovej a výkonovej charakteristiky pri danom ožiarení.
10. Určte účinnosť FV panelu – zmerajte plochu panelu a ako intenzitu použite priemernú hodnotu intenzity žiarenia. Z grafov určte hodnoty U_{OC} , I_{SC} , U_m , I_m , P_m a FF.