

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2024

Bc. Anna Šindelářová



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

MĚŘENÍ A TVORBA MAP OSVITU OZÁŘENÝCH PLOCH

MEASUREMENT AND CREATION OF IRRADIANCE MAPS OF IRRADIATED SURFACES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Anna Šindelářová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Křivík, Ph.D.

BRNO 2024



Diplomová práce

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

Ústav elektrotechnologie

Studentka: Bc. Anna Šindelářová

ID: 173599

Ročník: 2

Akademický rok: 2023/24

NÁZEV TÉMATU:

Měření a tvorba map osvitů ozářených ploch

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Nastudujte teorii o různých typech zdrojů světelného záření a jejich vlivu na ozářené plochy. Seznamte se se způsobem měření intenzity dopadajícího záření na plochu ozářenou světelným zdrojem. Provedte měření map intenzit záření dopadajícího na zvolenou plochu ozářenou zvoleným zdrojem světla. Výsledné mapy osvitů ozářené plochy okomentujte. Seznamte se s programovacím softwarem VEE Pro. V něm sestavte program na vytváření map ozářených ploch při různých intenzitách, vzdálenostech a velikostech zdrojů záření. Mapy naměřené a vytvořené pomocí programu vzájemně porovnejte.

Termín zadání: 5.2.2024

Termín odevzdání: 22.5.2024

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

Tato diplomová práce se zabývá měřením a tvorbou map osvitů ozářených ploch. V první části práce je definováno světlo a světelné záření, jeho druhy a jsou vysvětleny základní pojmy, které jsou se světelným zářením úzce spjaté. Dále jsou v této práci popsány různé typy zdrojů záření a jejich vliv na ozářené plochy. Teoretickou část uzavírá kapitola o senzorech záření, konkrétně pyranometrech. V praktické části práce bylo provedeno měření intenzity záření dopadajícího na zvolenou plochu zvoleným zdrojem záření a následně proběhla simulace rozložení záření pomocí programového prostředí Agilent VEE Pro 9.2. Měření i jeho simulace byly na závěr práce zpracovány a vyhodnoceny.

Klíčová slova

Světlo, zdroje světelného záření, intenzita záření, ozářená plocha, mapy osvitů

Abstract

This diploma thesis deals with the measurement and creation of irradiance maps of irradiated surfaces. In the first part of the thesis, there are defined light and light radiation and its types and there are explained the basic concepts closely related to light radiation. Furthermore, this thesis also describes different types of radiation sources and their effect on irradiated surfaces. The theoretical part concludes with a chapter on radiation sensors, specifically pyranometers. In the second part of the thesis, the intensity of the radiation incident on the selected surface was measured by the selected radiation source, and then the radiation distribution was simulated using the Agilent VEE Pro 9.2 software environment. Subsequently, the measurement and its simulation were processed and evaluated.

Keywords

Light, sources of light radiation, radiation intensity, irradiated surface, exposure maps

Bibliografická citace

ŠINDELÁŘOVÁ, Anna. *Měření a tvorba map osvitu ozářených ploch* [online]. Brno, 2024. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/159363>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie. Vedoucí práce doc. Ing. Petr Křivík, Ph.D.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta: *Anna Šindelářová*

VUT ID studenta: *173599*

Typ práce: *Diplomová práce*

Akademický rok: *2023/24*

Téma závěrečné práce: *Měření a tvorba map osvitu ozářených ploch*

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího 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 neporušila autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhla nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědoma 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 2024

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Petrovi Křivíkovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ	9
SEZNAM TABULEK	11
ÚVOD.....	12
1 SVĚTLO A SVĚTELNÉ ZÁŘENÍ.....	13
1.1 DRUHY SVĚTELNÉHO ZÁŘENÍ.....	13
1.1.1 Přímé záření.....	13
1.1.2 Difuzní záření.....	14
1.1.3 Odražené záření	14
1.2 BAREVNÉ VLASTNOSTI SVĚTLA	14
1.3 ZÁKLADNÍ POJMY A VELIČINY	15
1.3.1 Světelný tok Φ	15
1.3.2 Prostorový úhel Ω	15
1.3.3 Svítivost I	16
1.3.4 Osvětlenost E	16
1.3.5 Jas L	16
1.3.6 Intenzita záření I	17
1.3.7 Zákon převrácených čtverců I_0	17
1.3.8 Měrný výkon světelných zdrojů η	18
1.3.9 Veličiny pro statistické zpracování dat.....	18
2 ZDROJE SVĚTELNÉHO ZÁŘENÍ.....	21
2.1 UMĚLÉ SVĚTELNÉ ZDROJE.....	21
2.1.1 Teplotní světelné zdroje.....	22
2.1.2 Výbojové světelné zdroje	23
2.1.3 Polovodičové světelné zdroje	28
3 SENZORY ZÁŘENÍ – PYRANOMETRY	29
3.1 TYPY SENZORŮ ZÁŘENÍ.....	30
3.1.1 Termočlánekový pyranometr.....	30
3.1.2 Fotoelektrický pyranometr	31
3.1.3 Pyranometr na bázi fotovoltaického článku.....	32
4 PRAKTICKÁ ČÁST.....	33
4.1 POROVNÁNÍ DVOU SENZORŮ ZÁŘENÍ.....	36
4.2 MĚŘENÍ INTENZITY ZÁŘENÍ DOPADAJÍCÍHO NA ZVOLENOU PLOCHU ZVOLENÝM ZDROJEM ZÁŘENÍ	38
4.2.1 Vyhodnocení měření pro halogenový reflektor 500 W.....	39
4.2.2 Vyhodnocení měření pro halogenový reflektor 150 W.....	40
4.2.3 Vyhodnocení měření pro LED lampu.....	41

4.2.4	<i>Celkové vyhodnocení měření intenzit záření</i>	45
4.3	NAMĚŘENÁ SPEKTRA JEDNOTLIVÝCH ZDROJŮ ZÁŘENÍ.....	47
4.4	SIMULACE ROZLOŽENÍ INTENZIT ZÁŘENÍ V PROGRAMOVÉM PROSTŘEDÍ AGILENT VEE PRO 9.2.....	50
4.4.1	<i>Algoritmus programu</i>	50
4.4.2	<i>Uživatelské rozhraní</i>	53
4.4.3	<i>Výsledky simulace rozložení intenzit záření</i>	54
4.4.4	<i>Porovnání naměřených a simulovaných intenzit záření</i>	59
5	ZÁVĚR	63
	LITERATURA	65

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Spektrum elektromagnetického záření včetně rozložení spektrálních barev v rámci viditelného spektra [2].....	13
Obr. 2: Základní druhy záření podle prostupu okolním prostředím [4]	14
Obr. 3: Vyznačený prostorový úhel Ω určující plochu A v kouli o poloměru r [1]	15
Obr. 4: Graficky znázorněný zákon převrácených čtverců [6]	17
Obr. 5: Schéma rozdělení umělých světelných zdrojů [1]	21
Obr. 6: Klasická wolframová žárovka [8].....	22
Obr. 7: Halogenová žárovka [8].....	23
Obr. 8: Zářivková trubice [9]	24
Obr. 9: Indukční výbojka [10].....	25
Obr. 10: Sodíková výbojka [11].....	26
Obr. 11: Rtuťová výbojka [12].....	26
Obr. 12: Xenonová výbojka [13]	27
Obr. 13: Plazmové světelné zdroje [14]	27
Obr. 14: LED světlo [15]	28
Obr. 15: Spektrum slunečního záření a spektrální odezvy třech základních typů pyranometrů [16]	29
Obr. 16: Termočlánekový pyranometr SG420 [17]	30
Obr. 17: Pyranometr na bázi křemíkové fotodiody [17]	31
Obr. 18: Pyranometr na bázi fotovoltaického článku, model Seven Sensor [16]	32
Obr. 19: Halogenový reflektor R6501 s maximálním možným příkonem 500 W	33
Obr. 20: Halogenový reflektor #93052 s maximálním možným příkonem 150 W	34
Obr. 21: LED lampa ADVIVE PLUS LED/100W/230V IP65.....	34
Obr. 22: Termočlánekový pyranometr CMP21 [20].....	35
Obr. 23: Fotovoltaický expozimetr Luton SMP-1116SD s pyranometrem na bázi křemíkové fotodiody [21].....	35
Obr. 24: Sestavené měřicí pracoviště s halogenovým reflektorem 500 W jako zdrojem záření..	38
Obr. 25: Naměřené hodnoty intenzit záření vynesené do 3D grafu pro halogenový reflektor 500 W	39
Obr. 26: Naměřené hodnoty intenzit záření vynesené do 3D grafu pro halogenový reflektor 150 W	40
Obr. 27: Naměřené hodnoty intenzit záření vynesené do 3D grafu pro LED lampu umístěnou ve výšce 63 cm	41
Obr. 28: Naměřené hodnoty intenzit záření vynesené do 3D grafu pro LED lampu umístěnou ve výšce 43 cm	42
Obr. 29: Naměřené hodnoty intenzit záření vynesené do 3D grafu pro LED lampu umístěnou ve výšce 31 cm	43
Obr. 30: Naměřené hodnoty intenzit záření vynesené do 3D grafu pro LED lampu umístěnou ve výšce 21 cm	44
Obr. 31: Měření spektra záření pomocí spektrometru VS140 [22].....	47
Obr. 32: Výsledek měření spektra záření halogenového reflektoru 500 W	48

Obr. 33: Výsledek měření spektra záření LED lampy	48
Obr. 34: Výsledek měření spektra záření denního světla	49
Obr. 35: Schéma příspěvků všech bodů na zdroji záření pro jeden bod ozářené plochy	50
Obr. 36: Schéma příspěvků intenzit záření z bodu A na bod B	51
Obr. 37: Uživatelské rozhraní v programovém prostředí Agilent VEE Pro 9.2	53
Obr. 38: 3D graf rozložení intenzit záření pro parametry halogenového reflektoru 500 W	55
Obr. 39: 3D graf rozložení intenzit záření pro parametry halogenového reflektoru 150 W	55
Obr. 40: 3D graf rozložení intenzit záření pro parametry LED lampy ve výšce 63 cm	56
Obr. 41: 3D graf rozložení intenzit záření pro parametry LED lampy ve výšce 43 cm	56
Obr. 42: 3D graf rozložení intenzit záření pro parametry LED lampy ve výšce 31 cm	57
Obr. 43: 3D graf rozložení intenzit záření pro parametry LED lampy ve výšce 21 cm	57
Obr. 44: Porovnání 2D grafů naměřených (vlevo) a nasimulovaných (vpravo) hodnot pro halogenový reflektor 500 W	59
Obr. 45: Porovnání 2D grafů naměřených (vlevo) a nasimulovaných (vpravo) hodnot pro halogenový reflektor 150 W	60
Obr. 46: Porovnání 2D grafů naměřených (vlevo) a nasimulovaných (vpravo) hodnot pro LED lampu umístěnou ve výšce 63 cm	60
Obr. 47: Porovnání 2D grafů naměřených (vlevo) a nasimulovaných (vpravo) hodnot pro LED lampu umístěnou ve výšce 43 cm	61
Obr. 48: Porovnání 2D grafů naměřených (vlevo) a nasimulovaných (vpravo) hodnot pro LED lampu umístěnou ve výšce 31 cm	61
Obr. 49: Porovnání 2D grafů naměřených (vlevo) a nasimulovaných (vpravo) hodnot pro LED lampu umístěnou ve výšce 21 cm	62

SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Naměřené hodnoty intenzit záření pro zvolené zdroje záření expozimetrem a pyranometrem	36
Tab. 2: Vypočtené statistické údaje pro halogenové zdroje záření	45
Tab. 3: Vypočtené statistické údaje pro LED lampu ve všech výškách.....	45
Tab. 4: Statistické údaje vypočtené z nasimulovaných hodnot pro halogenové zdroje záření	58
Tab. 5: Statistické údaje vypočtené z nasimulovaných hodnot pro LED lampu ve všech výškách	58

ÚVOD

Pravěká historie světla začíná objevem ohně. Ten nejen že poskytoval teplo, ale také sloužil jako základní způsob osvětlení pro rané lidské společnosti.

Později, v dávných civilizacích, jako byly starověký Egypt, Řecko a Řím, byly používány olejové lampy. Tyto lampy využívaly olej jako palivo, což umožňovalo déletrvající světlo ve srovnání s jednoduchým ohněm. Ve starověkém Římě byly také vyvinuty svíčky, respektive voskové tyčinky s knotem, které byly v pozdějších dobách vylepšeny a staly se běžným zdrojem světla pro domácnosti.

Ve středověké Evropě byla vyvinuta lucerna, což byla zdokonalená olejová lampa s ochranným sklem, které umožnilo světlu se lépe šířit ven z lampy. V 19. století byly vyvinuty plynové lampy, které využívaly uhelný plyn jako palivo.

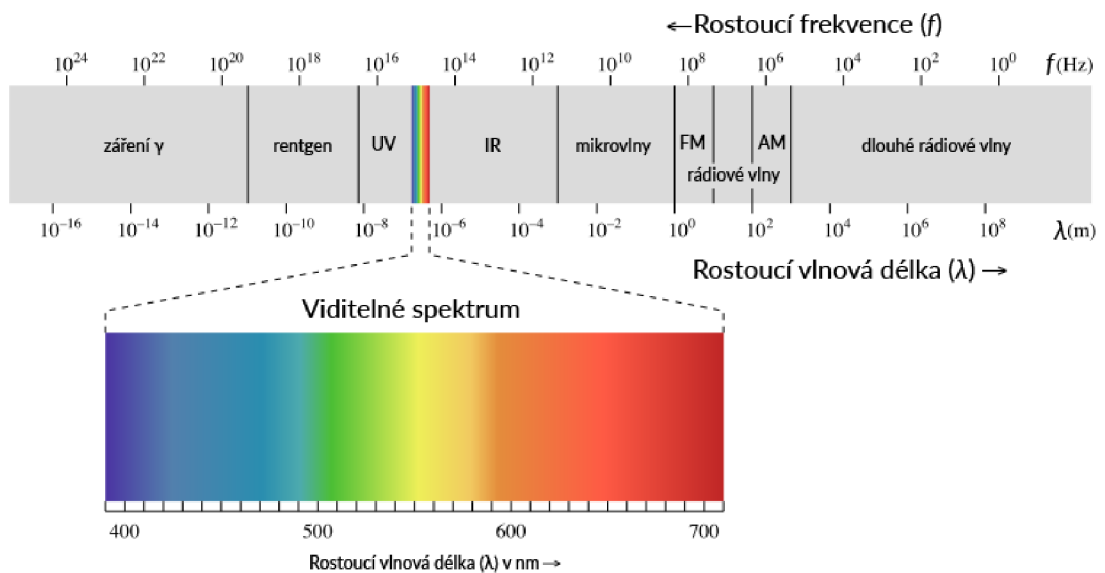
Vynález žárovky Thomasem Edisonem v roce 1879 představoval zásadní posun v historii osvětlení. Tato žárovka využívala žhavicí nit a výboj plynu, což umožnilo dlouhotrvající a stabilní světelný zdroj. V průběhu 20. století, zejména v posledních desetiletích, došlo v oblasti světelných zdrojů k dalším inovacím. Vývoj kompaktních zářivek a následně LED diodových světelných zdrojů přinesl efektivnější a energeticky úsporná řešení.

Dnes se světelné zdroje neustále vyvíjí díky moderním technologiím, automatizaci a snahám o udržitelnost. Historie světla a světelných zdrojů nám tak ukazuje, jak světlo, mimo jiné, symbolizuje lidský pokrok a inovace

Tato diplomová práce se zabývá měřením a tvorbou map osvitů ozářených ploch. V první části práce je definováno světlo, světelné záření a jeho druhy. Jsou vysvětleny základní pojmy, které jsou se světelným zářením úzce spjaté. Dále jsou v této práci popsány různé typy zdrojů záření a jejich vliv na ozářené plochy. Teoretickou část uzavírá kapitola o senzorech záření, konkrétně o pyranometrech. V praktické části práce bylo provedeno měření rozsahu vybraného pyranometru a expozimetru a také byla změřena spektra záření pro jednotlivé zdroje záření. Hlavní částí praktické části je měření intenzity záření dopadajícího na zvolenou plochu zvoleným zdrojem záření a následná simulace rozložení záření pomocí programového prostředí Agilent VEE Pro 9.2. Toto měření i jeho simulace v programovém prostředí byly na závěr práce zpracovány a vyhodnoceny.

1 SVĚTLO A SVĚTELNÉ ZÁŘENÍ

Světlo je elektromagnetické záření, které je schopné vyvolat vizuální vnímání v lidském oku nebo ve fotosenzitivních zařízeních. Toto záření se nazývá optické a má specifické vlnové délky v rozsahu přibližně 380 až 780 nanometrů, což odpovídá viditelnému spektru elektromagnetického záření. Toto elektromagnetické záření navazuje v kratších vlnových délkách na ultrafialové záření (UV) a v delších vlnových délkách přechází do infračerveného záření (IR). [1] Na Obr. 1 je zobrazena celá škála elektromagnetického záření od záření gama až po dlouhé rádiové vlny, včetně barevného spektra pro optické záření.



Obr. 1: Spektrum elektromagnetického záření včetně rozložení spektrálních barev v rámci viditelného spektra [2]

1.1 Druhy světelného záření

Podle prostupu záření okolním prostředím se rozlišují tři druhy světelného záření – přímé, difuzní a odražené. Tyto záření jsou znázorněny na Obr. 2, kde zdrojem záření je Slunce.

1.1.1 Přímé záření

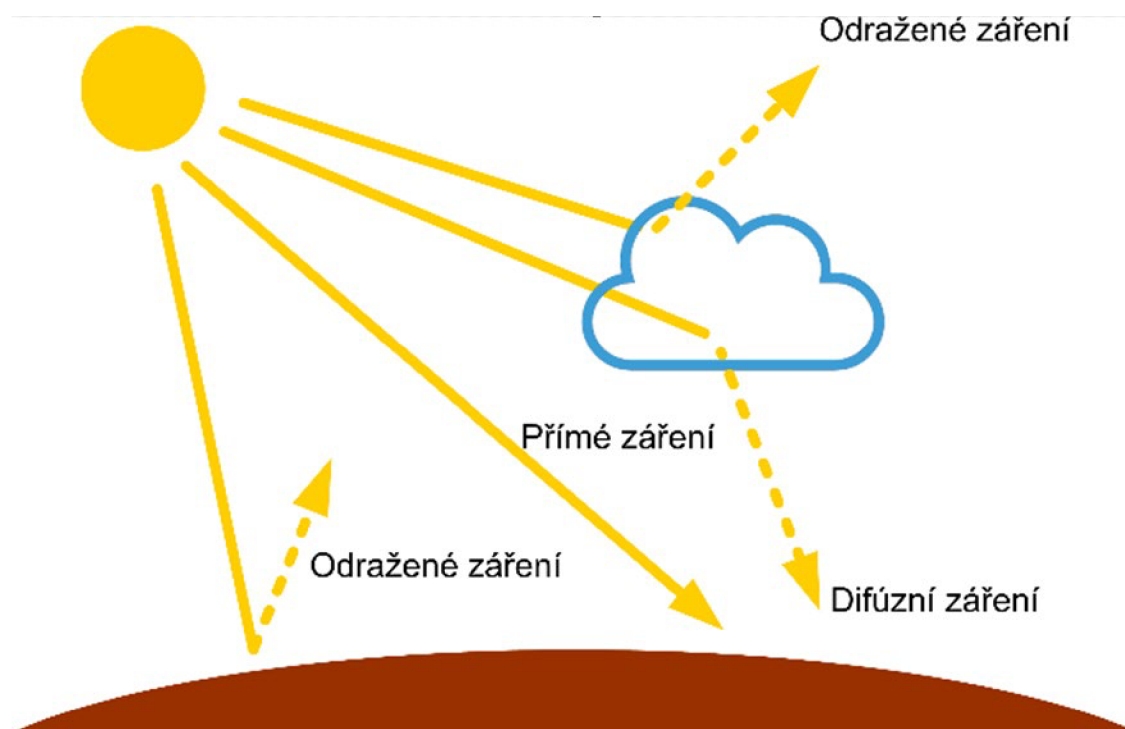
Přímé záření je část elektromagnetického záření, které dopadá přímo na sledovaný povrch, nezávisle na odrazech nebo rozptylech v okolí. Přímé záření zůstává ve své původní formě a nemění svoji trajektorii během interakce s povrchem.

1.1.2 Difuzní záření

Difuzní záření je rozptýlené, což znamená, že se od povrchu nebo od okolního prostředí odrazí v mnoha směrech. Toto záření se neodráží od povrchu pod pevným úhlem, ale rozptyluje se v různých směrech, což vytváří rovnoměrné osvětlení bez výrazných stínů.

1.1.3 Odražené záření

Odražené záření je část elektromagnetického záření, které se odrazí od povrchu pod podobným úhlem, jakým na něj dopadlo. Odražené záření zůstává ve stejné vlnové délce a spektrálním složení jako původní záření. Charakteristické pro odražené záření je, že může ovlivnit vnímanou barvu povrchu v závislosti na jeho vlastnostech a povrchové struktuře. [3]



Obr. 2: Základní druhy záření podle prostupu okolním prostředím [4]

1.2 Barevné vlastnosti světla

Barevné vlastnosti světla jsou určeny frekvencí nebo vlnovou délkou světla. Základními barevnými vlastnostmi světla jsou barva, kolorita a chromatičnost.

Barevné vlastnosti světla jsou spojeny s konkrétními vlnovými délkami světla. V rámci viditelného spektra světla můžeme rozlišovat různé barvy jako jsou červená, oranžová, žlutá, zelená, modrá a fialová. Vnímání barvy světla lidským okem je zcela

subjektivní a závisí na vnímání každého jednotlivce, stejně jako na podmínkách, za jakých k tomuto barevnému vjemu dochází. [1]

Kolorita závisí na odraznosti nebo propustnosti ozařovaného materiálu. Různé ozařované povrchy tak mohou vzbudit jiné vnímání barevného spektra v závislosti na své míře odraznosti nebo propustnosti.

Chromaticita je dána spektrálním složením vyzářujícího zdroje, popisuje tak barevné vlastnosti světla konkrétního typu světelného zdroje. [5]

1.3 Základní pojmy a veličiny

1.3.1 Světelný tok Φ

Světelný tok je technický parametr, který udává, kolik světla vyzáří do okolí světelný zdroj za jednotku času. Jednotkou světelného toku je lumen (lm).

1.3.2 Prostorový úhel Ω

Prostorový úhel vyznačuje kruhovou plochu A na kouli o poloměru r , která je definována kuželem, jehož vrchol je umístěn ve středu koule. Základní jednotkou prostorového úhlu je steradián (sr). Velikost tohoto úhlu lze vypočítat pomocí vztahu

$$\Omega = \frac{A}{r^2}$$

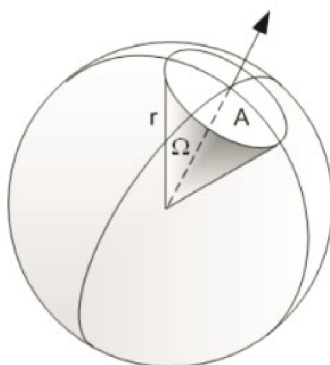
kde

Ω je prostorový úhel (sr)

A je plocha vytvořená na kouli představující prostorový úhel (m^2)

r je poloměr koule (m)

Z tohoto vztahu vyplývá, že pokud by plochou A byl zvolen celý povrch koule ($A = 4\pi r^2$), prostorový úhel může dosáhnout maximální hodnoty 4π sr.



Obr. 3: Vyznačený prostorový úhel Ω určující plochu A v kouli o poloměru r [1]

1.3.3 Svítivost I

Svítivost je fyzikální veličina, která popisuje množství světelného toku vyzářeného do určitého směru v prostorovém úhlu. Jednotkou svítivosti je kandela (cd). Matematicky lze svítivost I vyjádřit jako podíl světelného toku Φ vycházejícího ze světelného zdroje a prostorového úhlu Ω , do kterého je světelný tok vyzařován:

$$I = \frac{\Phi}{\Omega}$$

kde

I je svítivost (cd)

Φ je světelný tok (lm)

Ω je prostorový úhel (sr).

1.3.4 Osvětlenost E

Osvětlenost (neboli intenzita osvětlení) je fyzikální veličina, která popisuje množství světla dopadajícího na definovanou plochu. Jednotkou osvětlenosti je lux (lx), což pro hodnotu $E = 1 \text{ lx}$ znamená 1 lm na 1 m². Osvětlenost se měří na ploše, na níž světlo dopadá, a poskytuje informaci o intenzitě světla v daném prostoru. Pro osvětlenost platí vztah

$$E = \frac{\Phi}{A}$$

kde

E je osvětlenost (lx)

Φ je světelný tok dopadající na plochu (lm)

A je plocha (m²).

1.3.5 Jas L

Jas je fotometrická veličina zvaná měrná svítivost. Měrná svítivost udává množství světelného toku, které vychází nebo se odráží od daného předmětu. Jednotkou jasu je kandela na metr čtvereční (cd.m⁻²).

1.3.6 Intenzita záření I

Intenzita záření (též známá jako zářivý tok nebo zářivý výkon) určuje množství energie přenášené zářením na jednotkovou plochu. Intenzita záření se se vyjadřuje v jednotkách watt na metr čtvereční ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) a lze ji vypočítat pomocí následujícího vztahu:

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

kde

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

P je celkový příkon (W)

A je plocha (m^2).

1.3.7 Zákon převrácených čtverců I_0

S intenzitou záření souvisí i tzv. zákon převrácených čtverců, což je fyzikální zákon, který říká, že intenzita záření je nepřímo úměrná druhé mocnině vzdálenosti. Toto pravidlo platí nejen pro intenzity záření, ale také pro intenzity magnetického pole. Matematicky lze zákon převrácených čtverců vyjádřit jako

$$I = \frac{I_0}{d^2}$$

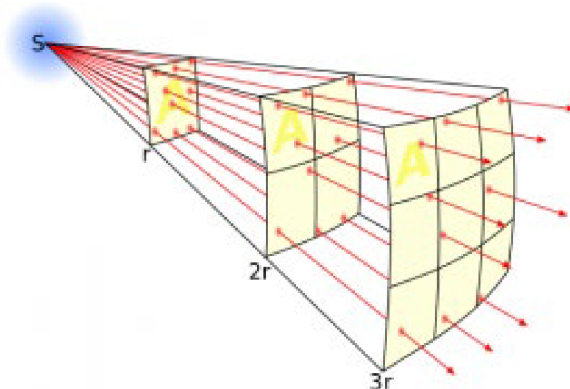
kde

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

I_0 je intenzita záření ve vzdálenosti 1 m ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)

d je vzdálenost (m).

Na Obr. 4 je tento zákon převrácených čtverců znázorněn graficky, kde lze pozorovat, že při dvojnásobné vzdálenosti od počátku je plocha čtyřnásobná a intenzita záření se tak rozprostře na celou plochu a její výsledná hodnota se úměrně sníží. [6]



Obr. 4: Graficky znázorněný zákon převrácených čtverců [6]

1.3.8 Měrný výkon světelných zdrojů η

Měrný výkon světelných zdrojů představuje efektivitu světelného zdroje v přeměně elektrické energie na světlo. Jednotkou měrného výkonu světelných zdrojů je lumen na watt ($\text{lm}\cdot\text{W}^{-1}$). Měrný výkon světelného zdroje lze matematicky vyjádřit jako

$$\eta = \frac{\Phi}{P}$$

kde

η je měrný výkon světelného zdroje ($\text{lm}\cdot\text{W}^{-1}$)

Φ je světelný tok (lm)

P je celkový příkon (W).

1.3.9 Veličiny pro statistické zpracování dat

Aritmetický průměr

Aritmetický průměr je součet všech hodnot vydělený jejich počtem. Pro výpočet aritmetického průměru se používá vztah

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

kde

\bar{x} je aritmetický průměr

n je počet naměřených hodnot

x_i jsou naměřené hodnoty.

Rozptyl hodnot

Rozptyl hodnot udává, o kolik se daná naměřená hodnota liší od aritmetického průměru všech naměřených hodnot. Je dán matematickým vztahem

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

kde

s_x^2 je rozptyl hodnot

x jsou naměřené hodnoty

n je počet naměřených hodnot

\bar{x} je aritmetický průměr.

Směrodatná odchylka

Na základě rozptylu lze jednoduše vypočítat i směrodatnou odchylku pomocí následujícího vztahu

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

kde

s_x je směrodatná odchylka

s_x^2 je rozptyl hodnot.

Variační koeficient

Variační koeficient, který slouží k porovnání několika souborů dat s odlišnou úrovní naměřených hodnot, se vypočítá

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

kde

v_x je variační koeficient (-)

s_x je směrodatná odchylka

\bar{x} je aritmetický průměr.

Nerovnoměrnost ozáření

Nerovnoměrnost ozáření se vypočítá podle rovnice

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

kde

N je nerovnoměrnost ozáření (%)

I_{max} je maximální hodnota intenzity záření

I_{min} je minimální hodnota intenzity záření.

Koeficient determinace

Koeficient determinace je statistický ukazatel používaný při analýze regrese. Jeho hodnota se pohybuje mezi 0 a 1, kdy 0 znamená, že regresní model nedokáže vysvětlit žádnou variabilitu dat, kdežto hodnota 1 znamená, že lze vysvětlit veškerou variabilitu dat. Přesnou hodnotu koeficientu lze spočítat pomocí vzorce

$$R^2 = \frac{S_{reg}}{S_{yy}} = 1 - \frac{S_{rez}}{S_{yy}}$$

kde

R^2 je koeficient determinace (-)

S_{reg} je regresní součet čtverců odchylek predikcí od průměru

S_{rez} je residuální součet čtverců

S_{yy} je celkový součet, resp. součet čtverců odchylek od dat průměru, nazýván také jako regresní identita.

Regresní součet čtverců odchylek predikcí od průměru S_{reg} je dán vztahem

$$S_{reg} = \sum_{i=1}^n (y'_i - \bar{y})^2$$

kde

n je počet naměřených hodnot

y'_i je velikost simulované hodnoty

\bar{y} je průměrná hodnota naměřených hodnot.

Residuální součet čtverců se počítá pomocí vztahu

$$S_{rez} = \sum_{i=1}^n (y_i - y'_i)^2$$

kde

n je počet naměřených hodnot

y_i je velikost naměřené hodnoty

y'_i je velikost simulované hodnoty.

Regresní identita se poté může vyjádřit pomocí vzorce

$$S_{yy} = S_{reg} + S_{rez}$$

kde se jednotlivé proměnné dopočítají pomocí vzorců uvedených výše. Je však možné ji dopočítat i podle vzorce

$$S_{yy} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$$

kde

n je počet naměřených hodnot

y_i je velikost naměřené hodnoty

\bar{y} je průměrná hodnota naměřených hodnot.

2 ZDROJE SVĚTELNÉHO ZÁŘENÍ

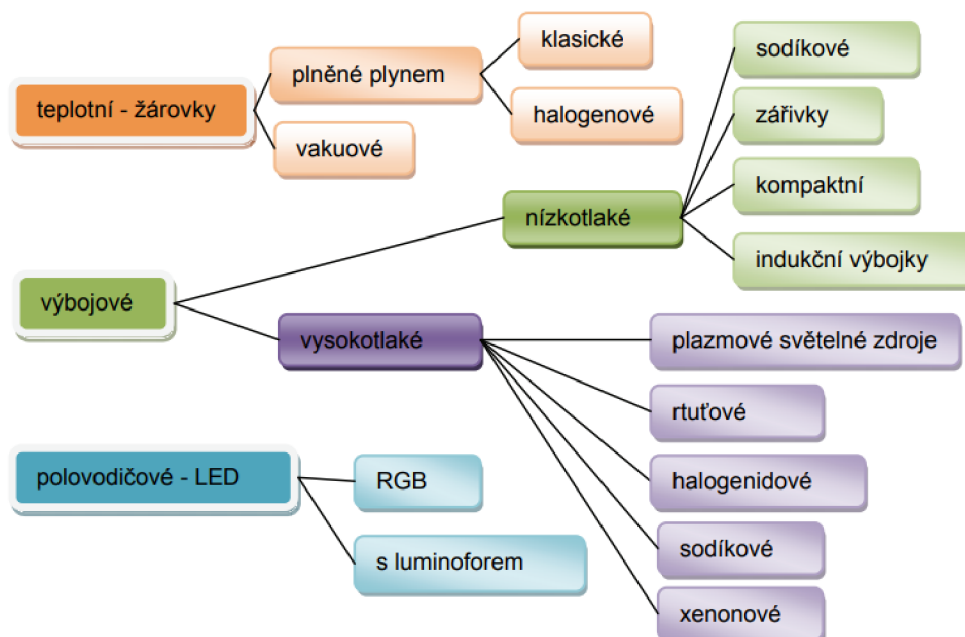
Světelným zdrojem se označuje zařízení nebo objekt, který mění jeden nebo více druhů energií na elektromagnetické záření ve viditelném spektru nebo v jiných částech elektromagnetického spektra. Toto záření může být vnímáno lidským okem nebo zachyceno pomocí technických zařízení, např. senzory.

Světelné zdroje se dělí na přírodní a umělé. Nejdůležitějším přírodním zdrojem je Slunce, dále to může být polární záře, blesk nebo Měsíc, přestože ten sám o sobě žádné záření nevyzařuje. Umělé světelné zdroje se dále dělí na teplotní, výbojové a polovodičové a jsou podrobněji popsány v kapitole 2.1.

2.1 Umělé světelné zdroje

Umělé světelné zdroje jsou technologická zařízení navržená člověkem tak, aby produkovala světlo nebo elektromagnetické záření ve viditelném spektru. Tyto zdroje jsou navrženy s cílem poskytovat osvětlení v různých prostředích a podle potřeb lidí. Často jsou využívány k osvětlování prostoru, výrobě světelných efektů, signalizaci a pro mnoho dalších užití.

Umělé světelné zdroje využívají různé technologie k vytvoření světla, na základě čehož se dělí na teplotní, výbojové a polovodičové zdroje. Tyto zdroje světla mají různé vlastnosti, včetně intenzity světla, teploty barvy a energetické účinnosti, což umožňuje jejich využití v široké škále možností. Schéma rozdělení umělých světelných zdrojů je znázorněno na Obr. 5.



Obr. 5: Schéma rozdělení umělých světelných zdrojů [1]

2.1.1 Teplotní světelné zdroje

Teplotní světelné zdroje vytvářejí světlo na základě vysoké teploty ohřátého materiálu. Tato teplota je často vyjádřena v jednotkách kelvin (K). Nažhavením materiálu na tak vysokou teplotu, že začne zářit světlem, vzniká jev zvaný inkandescence.

Princip inkandescence spočívá ve zvýšení teploty materiálu na takovou úroveň, že jeho atomy nebo molekuly absorbují energii a přecházejí do excitovaného stavu. Při návratu do nižšího energetického stavu uvolňují tyto excitované částice energii ve formě elektromagnetického záření, což zahrnuje i viditelné světlo. Inkandescence je zpravidla charakterizována teplým odstínem světla.

Klasická žárovka

Nejznámějším zástupcem teplotních světelných zdrojů je klasická žárovka, která je zároveň nejstarším elektrickým zdrojem světla. Žárovka funguje na principu ohřevu tenkého vlákna na vysokou teplotu, čímž dochází k jeho záření a vytváření světla. Většina klasických žárovek má tvar skleněné ampulky, uvnitř které se nachází vlákno a malé množství inertního plynu (například argonu nebo dusíku) nebo vakua, což minimalizuje oxidaci vlákna.

Když je žárovka připojena k elektrickému obvodu a zapnuta, elektrický proud prochází vláknem žárovky. Elektrický proud ohřívá vlákno z wolframu, což je materiál s vysokou teplotní odolností. Teplota vlákna dosahuje až několika tisíc stupňů Celsius. Při této vysoké teplotě začíná vlákno zářit a tím vytváří světlo. Toto světlo je výsledek termického záření, kde vysoká teplota vyzařuje elektromagnetické vlny ve viditelném spektru.

Klasické žárovky mají teplé, příjemné světlo podobné přirozenému slunečnímu záření, ale jsou energeticky neefektivní, protože většina energie je přeměněna na teplo namísto světla. Životnost klasických žárovek je obvykle kratší, protože postupem času dochází k opotřebení wolframového vlákna, což vede k postupnému snižování jasnosti a tím i životnosti žárovky. Z toho důvodu jsou nahrazovány modernějšími a energeticky účinnějšími technologiemi. [7]



Obr. 6: Klasická wolframová žárovka [8]

Halogenová žárovka

Druhým typem tepelných světelných zdrojů je halogenová žárovka. Halogenová žárovka funguje na obdobném principu jako klasická žárovka, hlavním rozdílem je přidání halových prvků (jod nebo brom) do skleněného těla žárovky.

Důvod je ten, že wolframové vlákno má vyšší teplotu, což by u klasické žárovky vedlo k dřívějšímu přerušení vlákna. U halogenové žárovky tomu ale zabráňuje tzv. halogenový cyklus, kdy je v těle žárovky kromě netečného plynu i příměs halového prvku. Ten se slučuje s odpařenými molekulami wolframu z vlákna a následně se zase opětovně usazuje na vláknu. Tím vzniká tzv. halogenový cyklus, který zvyšuje životnost zářivky.

Halogenové žárovky poskytují světlo s vyšší teplotou barvy a jsou energeticky účinnější než klasické žárovky. Nicméně oproti modernějším technologiím jsou stále málo efektivní, proto bývají nahrazovány, stejně jako klasické žárovky, modernějšími alternativami. [1]



Obr. 7: Halogenová žárovka [8]

2.1.2 Výbojové světelné zdroje

Výbojové světelné zdroje jsou založeny na principu elektrických výbojů v plynech a parách kovů. Tyto zdroje produkují světlo prostřednictvím ionizace plynu v uzavřeném prostoru, což vytváří plazma. Plazma emituje světlo v různých částech elektromagnetického spektra včetně viditelného světla. Barva a charakteristika světla závisí na druhu plynu nebo páře kovu.

Existují různé typy výbojových světelných zdrojů, například nízkotlakové zářivky, vysokotlakové sodíkové výbojky, xenonové výbojky a další.

Zářivky

Zářivka je typ světelného zdroje, který využívá fluorescenčního procesu k vytváření světla. Zářivka obsahuje dlouhou tenkou trubicí naplněnou inertním plynem, obvykle argonem, a malým množstvím rtuti.

Když je zářivka zapojena do obvodu, vytvoří se elektrický výboj přes rtuťovou páru uvnitř trubice. Elektrický výboj v rtuťové páře vyvolává emisi ultrafialového záření. UV záření pak naráží na fosforový povlak na vnitřní stěně trubice, což způsobuje, že fosforový povlak začne zářit. V důsledku luminiscence fosforového povlaku vzniká viditelné světlo, jehož barva závisí na použitém fosforu.

Zářivky byly dlouho populární pro svou energetickou účinnost ve srovnání s klasickými žárovkami, ale v současné chvíli bývají nahrazovány zpravidla LED diodami.



Obr. 8: Zářivková trubice [9]

Indukční výbojky

Indukční výbojky kombinují principy indukčního výboje a fluorescenčního světelného procesu. Indukční výbojka obsahuje dlouhou tenkou trubicí naplněnou inertním plynem, obvykle argonem nebo kryptonem. V trubicí jsou umístěny elektrody a cívka. Elektrody jsou vyrobeny z materiálu s nízkým ionizačním potenciálem. Když je výbojka zapnuta, elektrody jsou spojeny s elektrickým obvodem, což způsobí, že elektrický proud prochází elektrodami a ionizuje inertní plyn, což vytvoří plazma. Elektrický proud, který prochází cívkou, vytváří magnetické pole. Toto magnetické pole následně indukuje elektrický proud v plazmatu, což udržuje ionizaci a udržuje plazma v provozu. Plazma emituje

ultrafialové záření, které se po nárazu na fosforový povlak na vnitřní stěně trubice přeměňuje na viditelné světlo.

Tyto výbojky byly vyvinuty jako efektivnější a energeticky úspornější alternativa klasickým žárovkám a jsou považovány za předchůdce modernějších kompaktních zářivek a LED žárovek.



Obr. 9: Indukční výbojka [10]

Sodíkové výbojky

Sodíkové výbojky vytvářejí světlo pomocí výboje v sodíkové páře při vysokém tlaku. Tento typ výbojky je známý pro svou výraznou svítivost a vysokou efektivitu, zejména ve spektrální oblasti žlutého a oranžového světla. Vysokotlaká sodíková výbojka obsahuje výbojovou trubici, která je naplněna inertním plynem (nejčastěji argonem) a sodíkovou párou při vysokém tlaku. Když je výbojka zapnuta, elektrický proud prochází inertním plynem a vytváří plazma. Toto plazma ohřívá sodíkovou páru a způsobuje, že se sodík ionizuje. Ionizovaný sodík přechází z excitovaného stavu na nižší energetický stav, přičemž emituje světlo převážně ve žlutém a oranžovém spektru. Barva je způsobena specifickými emisními čarami sodíkového spektra.

Vysokotlaké sodíkové výbojky jsou známé pro svou vysokou efektivitu, což znamená, že produkují velké množství světla na spotřebovaný elektrický výkon. Také mají relativně dlouhou životnost, z toho důvodu jsou často používány pro venkovní osvětlení. [7]



Obr. 10: Sodíková výbojka [11]

Rtuťové výbojky

Rtuťové výbojky vytvářejí světlo pomocí výboje v rtuťové páře při vysokém tlaku. Vysokotlaká rtuťová výbojka obsahuje trubici vyrobenou z borosilikátového skla, která je naplněna inertním plynem (nejčastěji argonem) a rtuťovou parou při vysokém tlaku. Při zapojení do obvodu se vytváří elektrický proud ionizací rtuťové páry, což vede ke vzniku plazmatu. Plazma rtuťové páry emituje převážně ultrafialové záření, které není viditelné pro lidské oko. Po interakci UV záření s fosforem na vnitřní straně trubice vytváří světla s různými barevnými složkami, které v konečné fázi tvoří bílé světlo.

Rtuťové výbojky jsou známé pro svou vysokou svítivost, ale kvůli jejich nevýhodám jako je obsah rtuti a pomalé zahřívání na plný svit bývají nahrazovány efektivnějšími technologiemi. [1]



Obr. 11: Rtuťová výbojka [12]

Xenonové výbojky

Xenonové výbojky využívají xenonový plyn k vytváření světla. Xenonová výbojka obsahuje trubici vyrobenou z křemenného skla, která je naplněna xenonovým plynem pod vysokým tlakem. V trubici jsou umístěny elektrody. Při zapnutí výbojky vzniká elektrický výboj, který ionizuje xenonový plyn a vytváří plazma. Plazma xenonu emituje intenzivní bílé světlo. Barva světla je podobná dennímu světlu a obsahuje široké spektrum viditelného světla.

Xenonové výbojky mají velmi vysokou svítivost, dlouhou životnost a jsou efektivní ve využití energie. Oproti některým jiným typům výbojek mohou xenonové výbojky nabídnout rychlejší start, což znamená, že dosáhnou plné svítivosti během krátké doby po zapnutí. Xenonové výbojky jsou často používány v automobilech pro xenonová světla, kde poskytují jasnější a lepší osvětlení ve srovnání s tradičními halogenovými žárovkami.



Obr. 12: Xenonová výbojka [13]

Plazmový světelný zdroj

Plazmové světelné zdroje vytvářejí světlo pomocí ionizace plynu na základě vytvoření plazmatu. Mohou poskytovat intenzivní a jasné světlo, proto se využívají pro osvětlení sportoviště nebo v lékařství. [1]



Obr. 13: Plazmové světelné zdroje [14]

2.1.3 Polovodičové světelné zdroje

Třetím typem jsou polovodičové světelné zdroje, které pracují na principu vyzařování energie v podobě fotonů. Polovodičové světelné zdroje mají několik výhod, včetně energetické účinnosti, dlouhé životnosti a schopnosti generovat světlo ve specifických barvách. Mezi polovodičové zdroje světla patří světelné LED diody.

Světelné LED diody

LED dioda je polovodičové zařízení, které pracuje na základě elektroluminiscence. Při přivedení elektrického proudu do polovodičového materiálu dochází k rekombinaci elektronů a děr, což vyvolává emisi světla.

LED diody mohou generovat světlo v různých barevných spektrech v závislosti na použitém polovodičovém materiálu. Moderní LED diody jsou dostupné v širokém spektru barev včetně bílé, červené, zelené, modré a dalších. LED diody jsou také známé pro svou vysokou energetickou účinnost. Mají schopnost přeměnit většinu dodané elektrické energie na světlo. LED diody mají dlouhou životnost a jsou schopny fungovat po desítky tisíc hodin. [1]



Obr. 14: LED světlo [15]

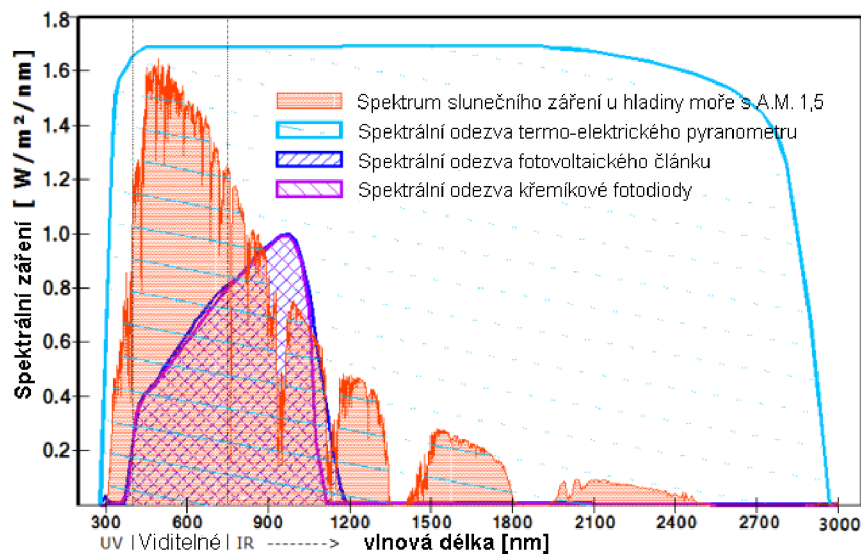
3 SENZORY ZÁŘENÍ – PYRANOMETRY

Pyranometry se používají pro měření slunečního záření na rovinném povrchu a jsou určeny k měření hustoty toku slunečního záření (W/m^2) v rozsahu vlnových délek 0,3 μm až 3 μm .

Spektrum slunečního záření, které dopadá na zemský povrch, rozšiřuje svou vlnovou délku přibližně od 300 nm do 2800 nm. [9] V závislosti na typu použitého pyranometru jsou pak získána data z měření ozáření s různými stupni spektrální citlivosti.

Podle definic uvedených v ISO 9060 lze rozeznat tři typy pyranometrů a seskupit je podle dvou různých technologií: technologie termočlánků a technologie křemíkových polovodičů.

Na typu pyranometru závisí i světelná citlivost známá jako „spektrální odezva“. Obr. 15 ukazuje spektrální odezvy tří typů pyranometrů ve vztahu ke spektru slunečního záření. Spektrum slunečního záření představuje spektrum slunečního světla, které dopadá na zemský povrch na úrovni moře, v poledne s A.M. (air mass) = 1,5. Toto spektrum ovlivňuje zeměpisná šířka a nadmořská výška. Spektrum je ovlivněno také aerosolem a znečištěním.



Obr. 15: Spektrum slunečního záření a spektrální odezvy tří základních typů pyranometrů [16]

Aby bylo možné provést měření ozáření, je požadováno, aby se odezva na přímé záření měnila s kosinusem úhlu dopadu. To zajišťuje plnou odezvu, pokud sluneční záření dopadá na senzor kolmo (kolmo k povrchu, slunce v zenitu, úhel dopadu 0°), nebo nulovou odezvu, pokud je slunce na obzoru (úhel dopadu 90° , úhel zenitu 90°). Odezva

o velikosti 0,5 pak nastává při úhlu dopadu 60° . Z toho vyplývá, že pyranometr by měl mít tzv. "směrovou odezvu" nebo "kosinovou odezvu", která se co nejvíce blíží ideální kosinové charakteristice. [16]

3.1 Typy senzorů záření

3.1.1 Termočláňkový pyranometr

Termočláňkový pyranometr, také nazývaný termoelektrický pyranometr, je senzor založený na termočláňcích navržený k měření širokého pásma hustoty toku slunečního záření pro zorné pole 180° . Termočláňkový pyranometr proto obvykle měří od 300 nm do 2800 nm s převážně plochou spektrální citlivostí. První generace termočláňkových pyranometrů měla aktivní část senzoru rovnoměrně rozdělenou na černé a bílé sektory. Ozáření bylo vypočítáno z rozdílu mezi teplotou černých sektorů vystavených slunci a teplotou bílých sektorů nebo sektorů neexponovaných slunečnímu záření.

Termočláňkové pyranometry jsou většinou spektrálně ploché. Za spektrálně ploché lze považovat senzory se spektrální selektivitou menší než 3 % ve spektrálním rozsahu 0,35 až 1,5 μm . Jejich nevýhodou je ale velká doba odezvy. Většina termočláňkových pyranometrů má dobu odezvy 5 sekund nebo více.

Termočláňkové pyranometry se často používají v meteorologii, klimatologii, výzkumu klimatických změn, stavební fyzice, fotovoltaických systémech a monitorování fotovoltaických elektráren. Obvykle jsou instalovány horizontálně v meteorologických stanicích.



Obr. 16: Termočláňkový pyranometr SG420 [17]

3.1.2 Fotoelektrický pyranometr

Pyranometry na bázi křemíkové fotodiody jsou také známé jako fotoelektrické pyranometry. Pyranometr na bázi fotodiody dokáže detekovat část slunečního spektra mezi 400 nm a 1100 nm. Fotodioda převádí výše zmíněné frekvence slunečního spektra na proud vysokou rychlostí díky fotoelektrickému jevu. Přepočet je ovlivněn teplotou se zvýšením proudu produkovaného zvýšením teploty (asi 0,1 % na 1 °C).

Pyranometr na bázi fotodiody se skládá z kupole pouzdra, fotodiody a difuzoru nebo optických filtrů. Fotodioda má malý povrch a funguje jako senzor. Proud generovaný fotodiódou je úměrný ozáření; výstupní obvod generuje napětí přímo úměrné fotoproudu. Výstup je obvykle v řádu milivoltů, což je stejný řád jako u pyranometrů termočláňkového typu.

Ačkoli tyto pyranometry odebírají pouze část krátkovlnného záření, jsou kalibrovány tak, aby poskytovaly výstup podobný termočláňkovým pyranometrům za jasného slunečního nebe. Rovnoměrnost spektra denního světla za většiny podmínek na obloze omezuje chyby typicky na méně než ± 3 %, s maximálními chybami ± 10 %. Chyba je obvykle kladná při zatažené obloze. [18]

Tyto pyranometry jsou obvykle několikanásobně levnější než termočláňkové pyranometry. Nevýhodou křemíkových fotočláňkových pyranometrů je, že jejich spektrální odezva je omezena na menší část slunečního spektra od 0,4 do 1,1 μm . Tyto pyranometry fungují nejlépe, když se používají k měření globálního slunečního záření za stejných podmínek jasné oblohy, jaké se používají k jejich kalibraci. V případě použití jiných zdrojů záření než je slunce, tyto pyranometry dosahují největší přesnosti při použití bílého světla se spektrem co nejvíce podobnému slunečnímu záření, což nejlépe splňují např. xenonové výbojky. Dostatečné přesnosti ale také dosahují např. i halogenové žárovky. Barevná teplota denního světla je 5 200 K, xenonových výbojek 4 100 K a u halogenových žárovek přibližně 3 200 K.

Pyranometry na bázi fotodiód jsou jádrem luxmetrů používaných ve fotografii, kině a osvětlovací technice. Někdy jsou také instalovány v blízkosti modulů fotovoltaických systémů.



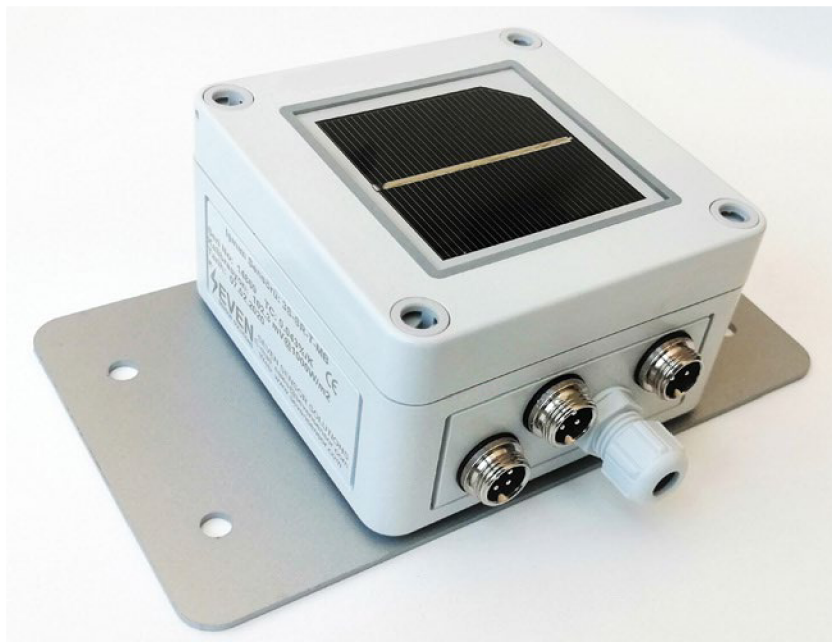
Obr. 17: Pyranometr na bázi křemíkové fotodiody [17]

3.1.3 Pyranometr na bázi fotovoltaického článku

Pyranometr na bázi fotovoltaického článku, postavený kolem roku 2000 souběžně s rozšířením fotovoltaických systémů, je evolucí fotodiodového pyranometru. Odpověděl na potřebu jediného referenčního fotovoltaického článku při měření výkonu článků a fotovoltaických modulů. Konkrétně je každý článek a modul testován prostřednictvím flash testů jejich příslušnými výrobci. Termočláňkové pyranometry nemají adekvátní rychlost odezvy ani stejnou spektrální odezvu článku. To by vytvořilo zjevný nesoulad při měření výkonu, který by bylo nutné kvantifikovat.

Aktivní část snímače je tvořena fotovoltaickým článkem pracujícím v téměř zkratovém stavu. Generovaný proud je přímo úměrný slunečnímu záření dopadajícímu na článek v rozsahu mezi 350 nm a 1150 nm. Při osvětlení světelným zářením v uvedeném rozsahu se vytváří proud jako důsledek fotovoltaického jevu. Jeho citlivost není plochá, ale je stejná jako u křemíkového fotovoltaického článku.

Pyranometry na bázi fotovoltaického článku se používají pro výpočet efektivního výkonu a účinnosti fotovoltaických panelů ve flash testerech. Příkladem je např. akreditovaná zkušební laboratoř CVVOZE – oddělení PVLab Brno. Tato laboratoř disponuje slunečním simulátorem PASAN Sun Sim 3C, který pro měření intenzity záření zábleskového generátoru využívá fotovoltaický článek. [16]



Obr. 18: Pyranometr na bázi fotovoltaického článku, model Seven Sensor [16]

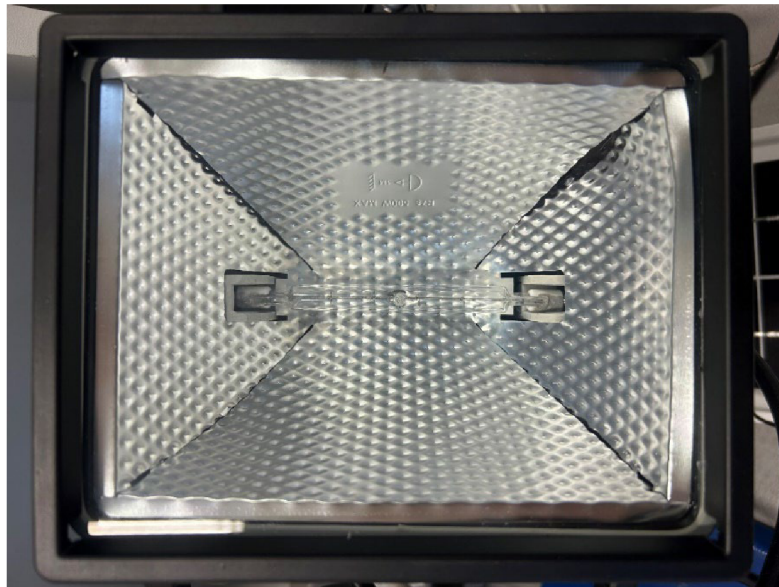
4 PRAKTICKÁ ČÁST

V praktické části této diplomové práce byla provedena čtyři různá měření a následná simulace měření v počítačovém programu VEE Pro 9.2.

Měřicí pracoviště pro všechna měření bylo sestaveno v prostorách Ústavu elektrotechnologie na FEKT VUT v Brně. Každé měření probíhalo v místnosti bez oken, čímž se eliminovaly zdroje externího nežádoucího záření, které by mohlo ovlivnit výsledky měření.

Pro všechny typy měření byly používány následující zdroje záření:

- Halogenový reflektor, konkrétně model R6501 s maximálním možným příkonem 500 W, velikost reflektoru 12,5 x 16,4 cm (dále v práci označovaný jako „halogenový reflektor 500 W“).



Obr. 19: Halogenový reflektor R6501 s maximálním možným příkonem 500 W

- Halogenový reflektor, konkrétně model #93052 s maximálním možným příkonem 150 W, velikost reflektoru 7,3 x 11,2 cm (dále v práci označovaný jako „halogenový reflektor 150 W“).



Obr. 20: Halogenový reflektor #93052 s maximálním možným příkonem 150 W

- LED lampa, konkrétně model ADVIVE PLUS LED/100W/230V IP65, velikost lampy 18,5 x 25 cm (dále v práci označovaná jako „LED lampa“)



Obr. 21: LED lampa ADVIVE PLUS LED/100W/230V IP65

K měření map ozářených ploch byly k dispozici 2 typy pyranometrů: termočlánekový pyranometr CMP21 a fotovoltaický expozimetr SPM-1116SD pracující se senzorem na bázi křemíkové fotodiody.

Pyranometr CMP21 měří v rozsahu 0 – 4000 W/m², spektrální rozsah činí 285 - 2800 nm, rychlost proudové odezvy je menší než 5 s pro 95 % přesnost, chyba měření v rozsahu -20 to +50°C ± 1 %. Rozsah pracovních teplot se nachází v rozmezí od -40 až do +80°C. Průměr tohoto pyranometru je 150 mm a jeho výška činí 92,5 mm. Tento pyranometr také nevyžaduje zdroj napájení. Generuje nízkonapěťový výstup v odhadovaném rozsahu 0 až 21 mV vzhledem k rozsahu měření ozáření 0 až 1500 W/m². [19]



Obr. 22: Termočlánekový pyranometr CMP21 [20]

Fotovoltaický expozimetr SPM-1116SD pracuje se senzorem na bázi křemíkové fotodiody. Měřicí rozsah je 0 - 2000 W/m², spektrální rozsah činí 400 až 1100 nm, vysoká rychlost proudové odezvy je menší než 1 s, chyba měření 5 % z měřené hodnoty (typicky 10 W/m²), úhlová přesnost měření (kosinová odezva) < 5 % pro úhly < 60°, průměr senzoru je 38 mm a jeho výška je 25 mm. [21]



Obr. 23: Fotovoltaický expozimetr Luton SMP-1116SD s pyranometrem na bázi křemíkové fotodiody [21]

4.1 Porovnání dvou senzorů záření

Toto měření proběhlo se všemi 3 zdroji záření. Plochou ozáření byla zvolena bílá plocha z následujících měření s rozměry 80 x 110 cm. Tato bílá plocha byla rozdělena na 8 řádků a 11 sloupců, v jejichž průsečících vzniklo celkem 88 bodů k měření se vzájemnými rozestupy po 10 cm. Každý bod byl označen dvojčíslem, kde první číslo vyjadřuje řádek a druhé číslo určuje sloupec, ve kterém se daný bod nachází. V tomto měření byl využit středový bod této plochy, který se nacházel ve středu spojnice bodů 4-6 a 5-6, a bod 6-4.

Každý zdroj byl umístěn nad střed ozařované plochy a intenzita záření byla měřena ve dvou bodech – v bodě umístěném kolmo pod středem zdroje záření, tj. v přesném středu ozařované plochy, a v bodě 6-4 na ozařované ploše, kdy záření na měřící senzor dopadalo pod určitým úhlem.

Naměřené hodnoty intenzit záření pro všechny zdroje záření jsou uvedené v Tab. 1. Pro srovnání jsou uvedené i hodnoty naměřené pro denní světlo při zatažené obloze a při mírném oparu.

Tab. 1: Naměřené hodnoty intenzit záření pro zvolené zdroje záření expozimetrem a pyranometrem

Zdroj záření	Měřený bod	Pyranometr I [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]	Expozimetr I [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]
Halogenový reflektor 500 W	středový	451,2	400,6
	6-4	156,8	129,5
Halogenový reflektor 150 W	středový	128,3	115,8
	6-4	60,9	50,1
LED lampa	středový	56,7	27,2
	6-4	32,2	14,2
Denní světlo (zatažená obloha)	-	20,3	17,3
Denní světlo (mírný opar)	-	231,2	226,2

Z tabulky lze pozorovat, že kvůli spektrální citlivosti měřících senzorů jsou ve stejném bodě u stejného zdroje záření naměřeny rozdílné hodnoty intenzit záření.

U halogenových reflektorů je poměr naměřených hodnot intenzit záření pyranometrem i expoziometrem velmi podobný u středového bodu i u bodu 6-4. Hodnoty naměřené pyranometrem ve středovém bodě jsou cca o 12 % vyšší než hodnoty naměřené expoziometrem. V bodě 6-4, kam záření z halogenových reflektorů dopadalo pod určitým úhlem, jsou hodnoty naměřené pyranometrem dokonce o 20 % vyšší než hodnoty naměřené ve stejném bodě expoziometrem.

Nejvyšších rozdílů bylo ovšem dosaženo při měření LED lampy. Ve středovém bodě se jedná o rozdíl 105 %, kdy hodnota naměřená pyranometrem je vyšší než hodnota naměřená expoziometrem. U měření v bodě 6-4 jde dokonce o cca 130 % vyšší hodnotu naměřenou pyranometrem.

Pro srovnání bylo změřeno i záření denního světla při dvou podmínkách – při zcela zatažené obloze a při mírném oparu. Při zatažené obloze byl rozdíl naměřený pyranometrem a expoziometrem procentuálně větší než při mírném oparu, kde se naměřené hodnoty lišily pouze o $5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, což odpovídá přibližně 2 %.

Pro další měření byl vybrán fotovoltaický expoziometr SPM-1116SD, protože má větší měřicí rozsah, mnohem vyšší rychlost proudové odezvy a dokáže měřit s dobrou přesností i malé intenzity záření. Jeho křemíkový senzor intenzity záření má také malé rozměry a poskytuje informace o intenzitě záření na ploše cca $0,78 \text{ cm}^2$ (průměr křemíkové fotodiody 1 cm). Senzor expoziometru SPM-1116SD má sice menší spektrální rozsah než pyranometr CMP21, ale je kalibrován pro měření slunečního záření a dosahuje dobré přesnosti i při měření intenzit umělých zdrojů záření se spektrem podobným slunečnímu záření. Pokud je měřeno záření odpovídající jiné barvě, je třeba pro dosažení potřebné přesnosti měřené intenzity záření přepočítat podle změny aktuální světelné citlivosti.

Výsledné mapy záření zvolených lamp naměřené pomocí fotovoltaického expoziometru SPM-1116SD budou následně poskytovat dobrý základ pro vytvoření simulačního programu, který může být využit pro rychlé a přesné vytvoření map ozáření zkoumaného povrchu bez zdlouhavého měření pomocí pyranometrů, které v sobě zahrnuje chyby senzorů záření, chyby měření a chyby způsobené nerovnoměrností záření zvolených lamp.

4.2 Měření intenzity záření dopadajícího na zvolenou plochu zvoleným zdrojem záření

Pro měření intenzity záření zvoleným zdrojem záření byla opět zvolena bílá plocha z předchozího měření. Velikost plochy byla zvolena podle poměru stran u halogenových reflektorů, které byly 3 ku 4.

Každý zdroj záření byl nainstalován přesně do středu zvolené plochy, která byla ozařována. Protože bylo na zvolené ploše vytvořeno sudé číslo řad, neexistuje jeden středový bod. Přesný střed plochy se tedy nachází mezi body 4-6 a 5-6. Všechny zdroje záření byly připevněny nad plochu tak, aby jejich zářící plocha byla rovnoběžně se zvolenou měřenou plochou. Na Obr. 24 je vyfoceno sestavené pracoviště s halogenovým reflektorem 500 W.



Obr. 24: Sestavené měřicí pracoviště s halogenovým reflektorem 500 W jako zdrojem záření

Měření probíhalo v uzavřené místnosti se zapnutým zdrojem záření, který byl jediným zdrojem světla v místnosti. Tím se dosáhlo nejvyšší možné přesnosti měření.

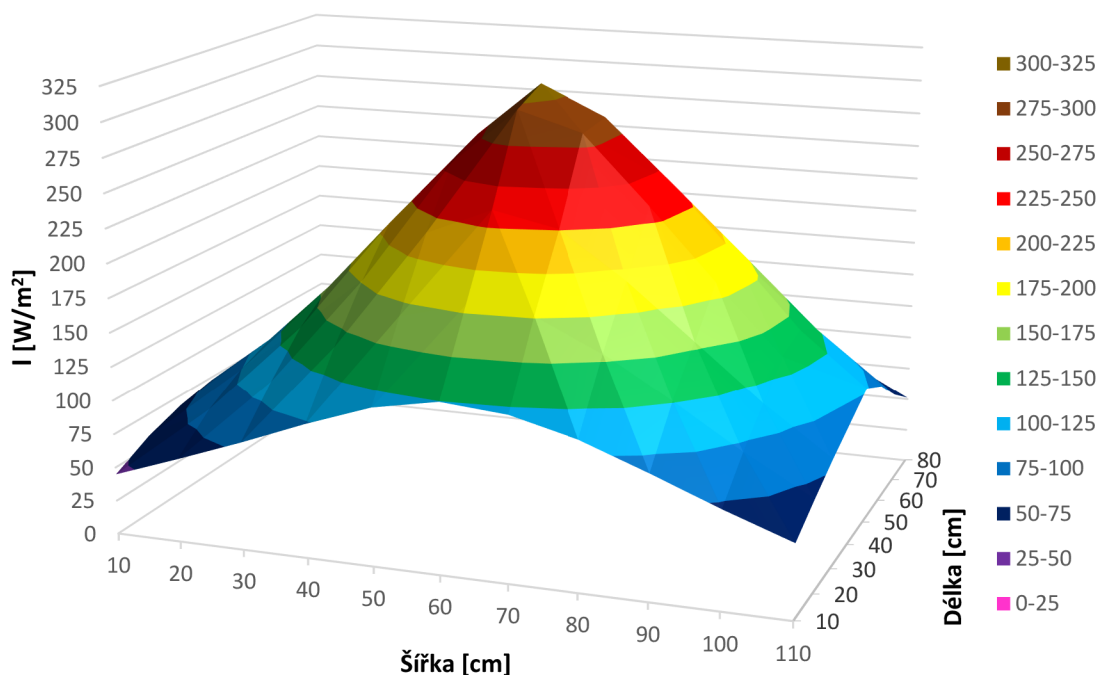
V průběhu měření se postupně měřila intenzita záření ve všech 88 vydefinovaných bodech. Po umístění čidla na konkrétní měřený bod byla hodnota intenzity záření z expozimetru odečtena až po ustálení hodnoty, tj. přibližně po 30 vteřinách od umístění čidla.

4.2.1 Vyhodnocení měření pro halogenový reflektor 500 W

Halogenový reflektor byl během měření umístěn ve výšce 69 cm nad středem ozařované plochy. Na základě naměřených hodnot byla vypočítána průměrná hodnota intenzity záření, která je rovna 140 W.m^{-2} . Dále byl vypočítán i rozptyl hodnot s hodnotu $4400,5 \text{ W}^2.\text{m}^{-4}$. Směrodatná odchylka je $66,33 \text{ W.m}^{-2}$ a variační koeficient je 0,47.

Minimální hodnota intenzity záření $44,3 \text{ W.m}^{-2}$ byla naměřena v bodě 1-1, což je krajní bod na ozařované ploše. Naopak maximální intenzita záření s hodnotou $308,3 \text{ W.m}^{-2}$ byla změřena v bodě 5-6. Tento bod je jedním ze dvou středových bodů. V ideálním případě by naměřené hodnoty v bodech 4-6 a 5-6 měly být totožné.

Na základě těchto skutečností lze určit, že zvolený halogenový reflektor 500 W ozařoval sledovanou plochu nerovnoměrně. Přestože jeho střed byl umístěn kolmo nad středem ozařované plochy, hodnoty ve sloupcích 1 a 11 se značně liší. Nejmenší rozdíl s hodnotou $6,9 \text{ W.m}^{-2}$ byl naměřen v řádku 8. Největší rozdíl intenzit záření mezi krajními body se nachází v řádku 5 s rozdílem $26,9 \text{ W.m}^{-2}$.

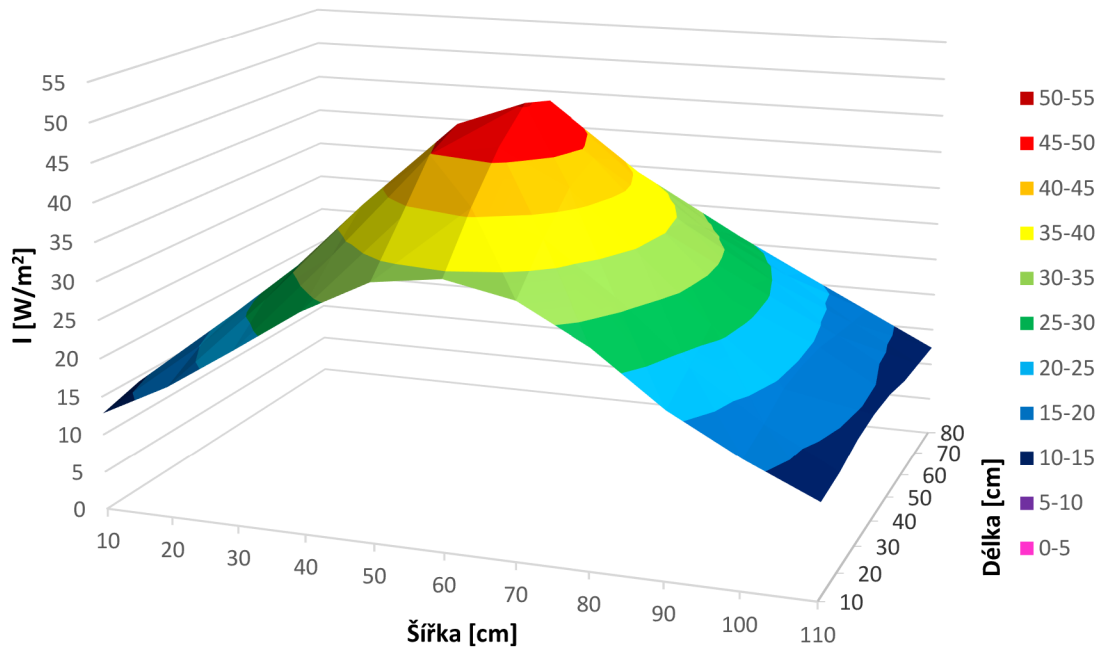


Obr. 25: Naměřené hodnoty intenzit záření vynesené do 3D grafu pro halogenový reflektor 500 W

4.2.2 Vyhodnocení měření pro halogenový reflektor 150 W

Halogenový reflektor ozařoval zvolenou plochu z výšky 69 cm a jeho střed byl umístěn kolmo nad středem ozařované plochy. Průměrná hodnota intenzity záření u halogenového reflektoru 150 W je $22,62 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. Rozptyl naměřených hodnot je roven $99,42 \text{ W}^2\cdot\text{m}^{-4}$. Směrodatná odchylka má hodnotu $9,97 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ a variační koeficient 0,36.

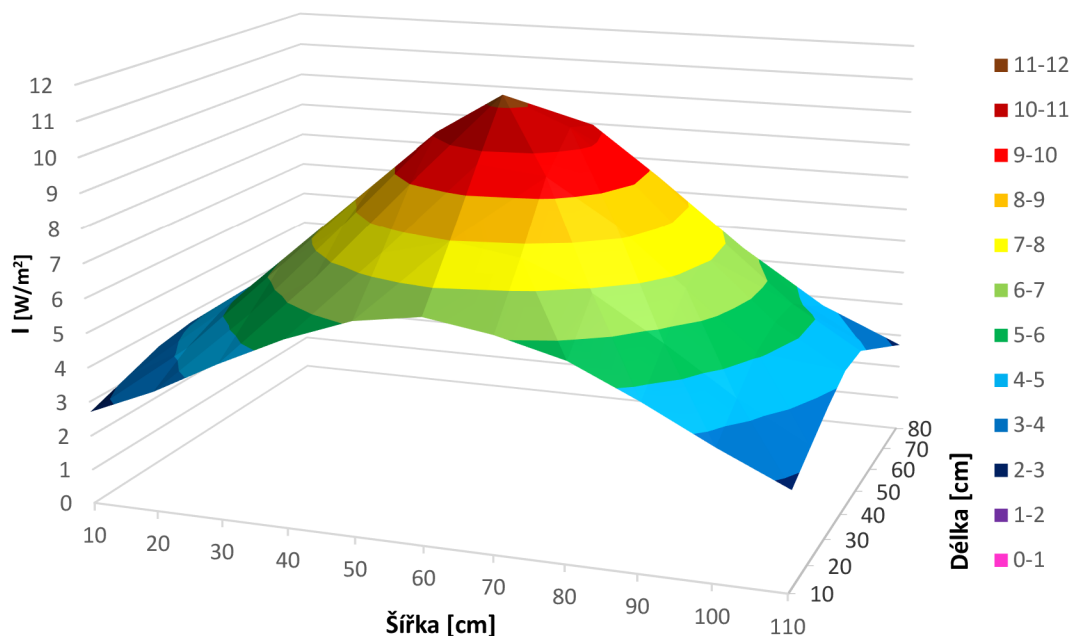
Minimální hodnota intenzity záření u tohoto reflektoru byla naměřena v bodě 8-1 s hodnotou $12,4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. Maximální intenzita záření je rovna hodnotě $49,8 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ a byla změřena v bodě 4-6. Stejně jako u předchozího měření halogenového reflektoru 500 W, i v tomto případě se jedná o jeden ze dvou středových bodů, jejichž hodnoty by v ideálním případě měli být stejné, ale ve skutečnosti se liší o $1,7 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.



Obr. 26: Naměřené hodnoty intenzit záření vynesené do 3D grafu pro halogenový reflektor 150 W

4.2.3 Vyhodnocení měření pro LED lampu

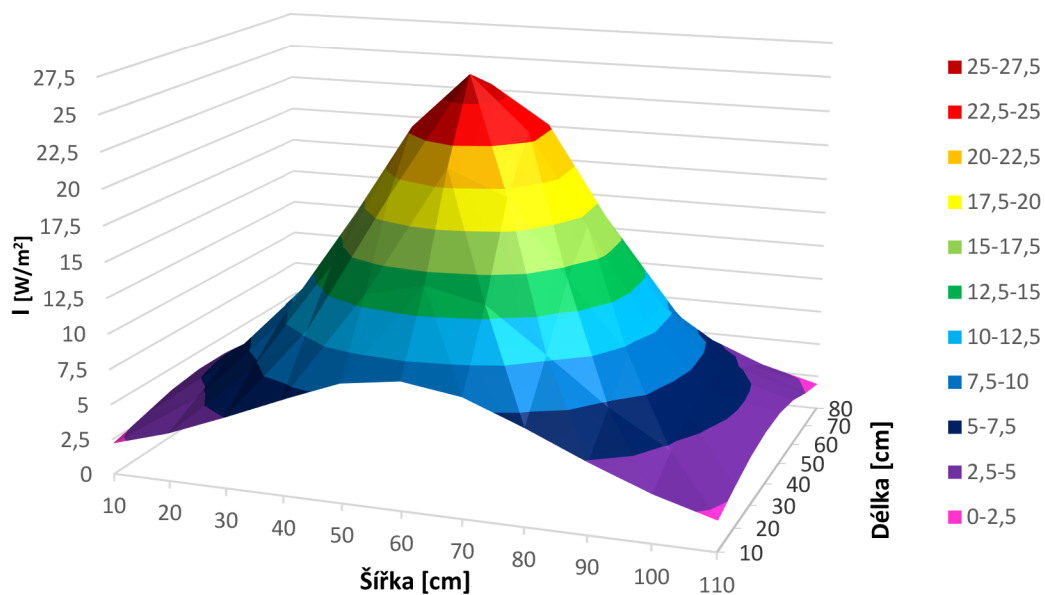
LED lampa se, na rozdíl od halogenových reflektorů, měřila ve 4 různých výškách. Její střed byl během měření umístěn do výšky 63 cm, 43 cm, 31 cm a 21 cm m nad střed zvolené ozařované plochy.



Obr. 27: Naměřené hodnoty intenzit záření vynesené do 3D grafu pro LED lampu umístěnou ve výšce 63 cm

Průměrná hodnota intenzity záření LED lampy u měření ve výšce 63 cm činí $5,95 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. Rozptyl hodnot u tohoto měření je $4,79 \text{ W}^2\cdot\text{m}^{-4}$ a velikost směrodatné odchylky je rovna $2,19 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. Ze směrodatné odchylky a průměrné hodnoty byl dopočítán i variační koeficient, jež má hodnotu 0,36.

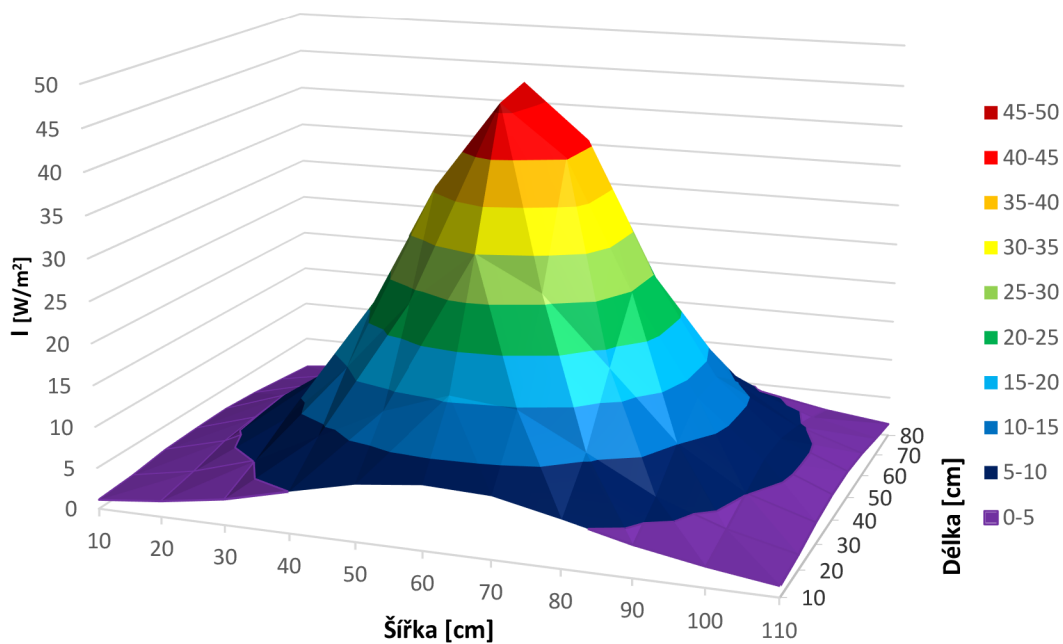
Nejmenší hodnota intenzity záření byla naměřena v bodě 8-1, a to $2,4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. Největší intenzita byla změřena v bodě 4-6 s hodnotou $11,3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.



Obr. 28: Naměřené hodnoty intenzit záření vynesené do 3D grafu pro LED lampu umístěnou ve výšce 43 cm

Při měření, kdy byl zdroj záření umístěn ve výšce 43 cm, byla průměrná intenzita záření $9,18 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. Rozptyl hodnot v tomto měření dosahoval $38,40 \text{ W}^2\cdot\text{m}^{-4}$. Směrodatná odchylka je rovna $6,20 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. Dupočítaný variační koeficient má hodnotu 0,68.

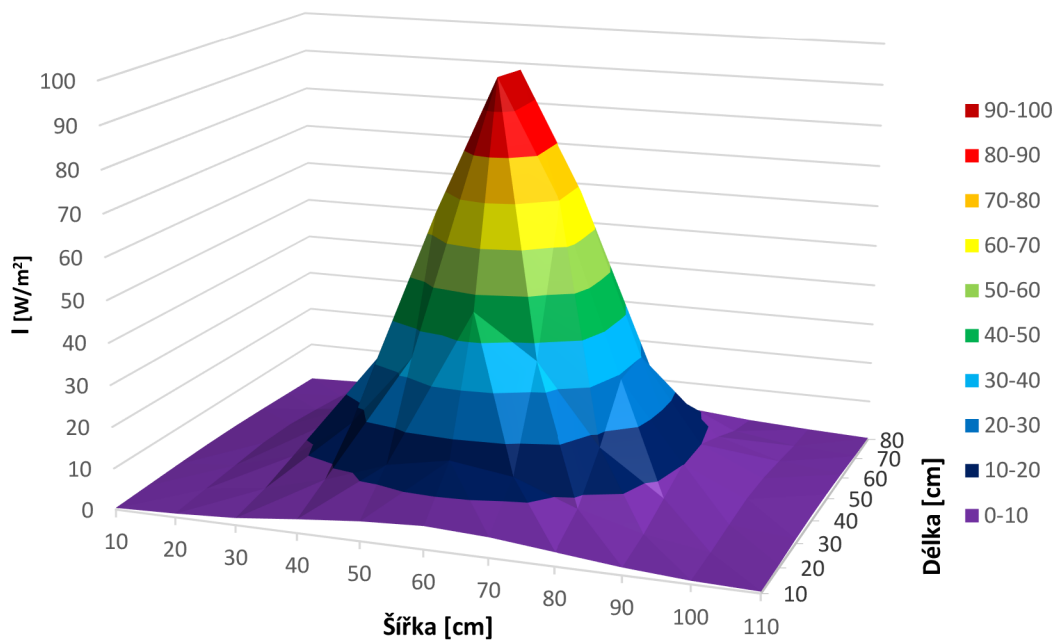
Oproti měření ve výšce 63 cm bylo dosaženo větší maximální naměřené hodnoty, konkrétně $26,8 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, v bodě 4-6, a zároveň i nižší minimální naměřené hodnoty, jejíž hodnota $1,9 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ byla změřena v krajních bodech 8-1 a 8-11.



Obr. 29: Naměřené hodnoty intenzit záření vynesené do 3D grafu pro LED lampu umístěnou ve výšce 31 cm

U měření LED lampy ve vzdálenosti 31 cm od ozařované plochy byla průměrná intenzita záření $11,10 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ a rozptyl hodnot $121,06 \text{ W}^2\cdot\text{m}^{-4}$. Hodnota směrodatné odchylky je $11,00 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ a variační koeficient má hodnotu 0,99.

Maximální hodnota intenzity záření byla změřena v jednom ze středových bodů ozařované plochy, konkrétně v bodě 5-6, a měla hodnotu $47,2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. Minimální naměřená hodnota o velikosti $1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ byla změřena v bodě 8-1. Rozdíl mezi maximální a minimální naměřenou hodnotou se oproti předchozím měřením ve vyšších výškách opět zvětšil.



Obr. 30: Naměřené hodnoty intenzit záření vynesené do 3D grafu pro LED lampu umístěnou ve výšce 21 cm

Průměrná intenzita záření LED lampy naměřená při měření ve vzdálenosti 21 cm činí $13,18 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. Rozptyl hodnot v tomto měření je vyjádřen hodnotou $419,79 \text{ W}^2\cdot\text{m}^{-4}$ a směrodatná odchylka je rovna $20,49 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. Variační koeficient, dopočítaný z průměrné hodnoty a směrodatné odchylky, je 1,55.

Toto měření probíhalo při nejmenší výšce v porovnání s předchozími měřeními LED lampy. Protože byl zdroj umístěn nejbližší ozařované ploše, byla naměřena maximální hodnota záření o velikosti $97,6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ v bodě 4-6. Nejmenší intenzita záření s hodnotou $0,4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ byla shodně změřena ve všech krajních bodech ozařované plochy, tj. v bodech 1-1, 1-8, 8-1 a 8-8.

4.2.4 Celkové vyhodnocení měření intenzit záření

Na základě naměřených hodnot byly dopočítány statistické údaje pro všechny zdroje záření. Tyto dopočítané hodnoty jsou uvedené v Tab. 2 a Tab. 3.

Tab. 2: Vypočtené statistické údaje pro halogenové zdroje záření

	Halogenový reflektor 500 W	Halogenový reflektor 150 W
Minimální naměřená hodnota [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]	44,30	11,90
Maximální naměřená hodnota [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]	308,30	50,40
Aritmetický průměr [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]	140,00	27,62
Rozptyl hodnot [$\text{W}^2\cdot\text{m}^{-4}$]	4400,54	99,42
Směrodatná odchylka [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]	66,33	9,97
Variační koeficient [-]	0,47	0,36
Nerovnoměrnost ozáření [%]	74,87	61,79

Tab. 3: Vypočtené statistické údaje pro LED lampu ve všech výškách

	LED lampa ve výšce 63 cm	LED lampa ve výšce 43 cm	LED lampa ve výšce 31 cm	LED lampa ve výšce 21 cm
Minimální naměřená hodnota [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]	2,40	1,90	1,00	0,40
Maximální naměřená hodnota [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]	11,30	26,80	47,20	97,60
Aritmetický průměr [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]	5,95	9,18	11,10	13,18
Rozptyl hodnot [$\text{W}^2\cdot\text{m}^{-4}$]	4,79	38,40	121,06	419,79
Směrodatná odchylka [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]	2,19	6,20	11,00	20,49
Variační koeficient [-]	0,37	0,68	0,99	1,55
Nerovnoměrnost ozáření [%]	64,96	86,76	95,85	99,18

U halogenových reflektorů si lze všimnout, že vyšších hodnot intenzit záření dosahoval halogenový reflektor 500 W. Jeho minimální naměřená hodnota je téměř 4x větší než u halogenového reflektoru 150 W. Maximální naměřená hodnota je pak přibližně 6x větší než u halogenového reflektoru 150 W. Přestože oba reflektory byly umístěny ve stejné výšce, nerovnoměrnost ozáření je u halogenového reflektoru 500 W větší o 13,08 %.

Hodnoty vypočítané u LED lampy jsou ovlivněny výškou lampy. V tabulce lze vidět, že s klesající výškou roste maximální naměřená hodnota, průměrná hodnota, rozptyl hodnot, směrodatná odchylka, variační koeficient i nerovnoměrnost ozáření. Jediným parametrem, který s klesající výškou klesá, je minimální hodnota, což může být způsobeno tím, že světelné záření s klesající výškou hůře ozařovalo krajní body ozařované plochy.

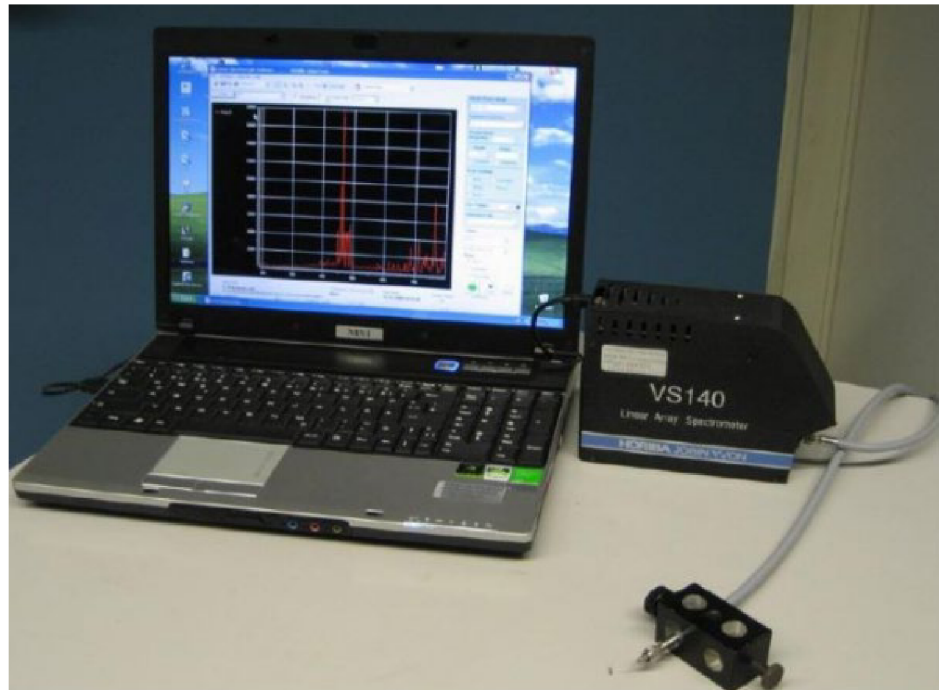
4.3 Naměřená spektra jednotlivých zdrojů záření

V rámci tohoto měření byla měřena spektra jednotlivých zdrojů ozáření, tzn. halogenového reflektoru 500 W, halogenového reflektoru 150 W a LED lampy.

Pro měření spektra se obecně používají zobrazovací spektrometry. Pracují na principu odklonu vstupního měřeného signálu do různých úhlů, kdy každý úhel poté odpovídá určité vlnové délce. Zobrazovací spektrometry pracují na principu disperze nebo spektrálně závislé difrakce.

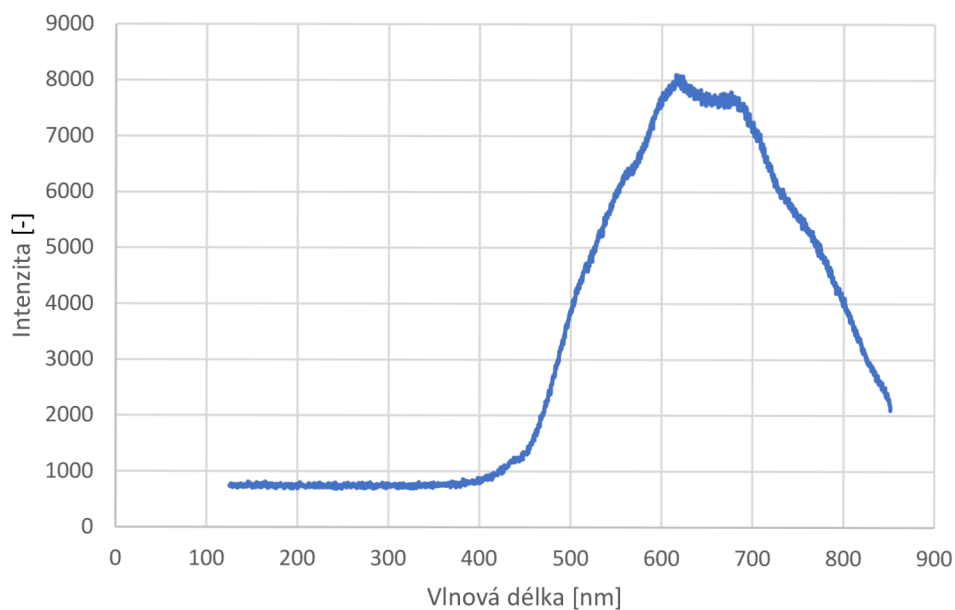
Druhá metoda využívá difrakční mřížku, což je optický prvek, u kterého se periodicky mění index lomu nebo jeho tloušťka. Záření může mřížkou procházet nebo se od ní odrazet. Úhel odrazu je dán geometrií uspořádání. Difrakční maxima poté odpovídají příslušné vlnové délce. Výhodou difrakční mřížky je lineární závislost úhlu odklonu na vlnové délce. Vstupní světelný signál spektrometru využívající odraznou difrakční mřížku prochází štěrbinou, která je v ohnisku kolimačního zrcadla. Na mřížku dopadá rovnoběžný svazek světla. Mřížka signál rozmítá a pomocí fokusačního zrcadla je spektrum zobrazeno na stínítku nebo na lineárním CCD čipu.

Spektra v této úloze byla změřena pomocí spektrometru VS140 s difrakční mřížkou. Jeho detektor je tvořen CCD čipem (3864 pixelů) a k počítači je připojen přes USB rozhraní. Rozsah měření je omezen z horní strany hodnotou vlnové délky přibližně 854 nm. Naměřená data se následně zobrazují v softwaru LynearApp, který je stejně jako samotný spektrometr od společnosti Horiba.

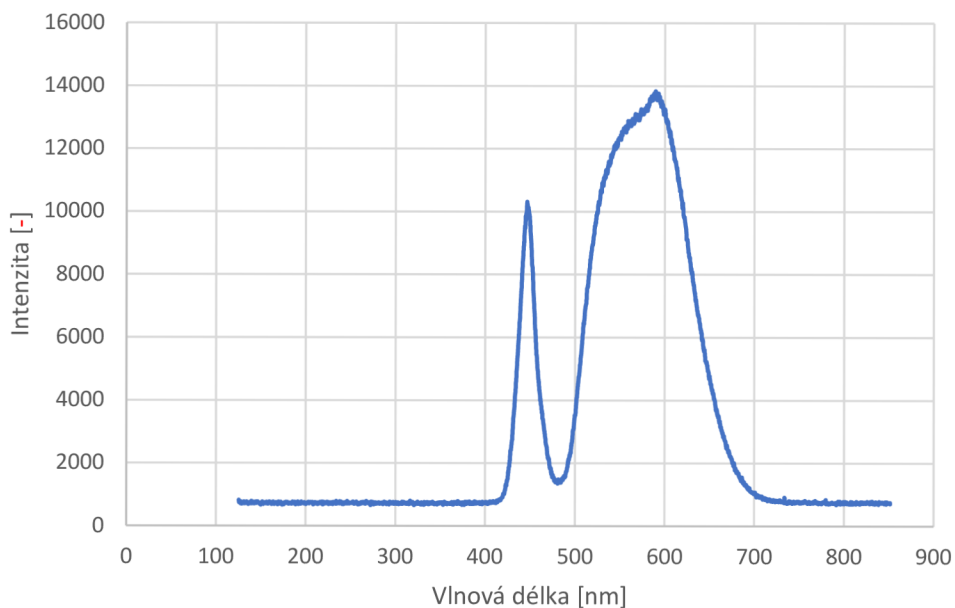


Obr. 31: Měření spektra záření pomocí spektrometru VS140 [22]

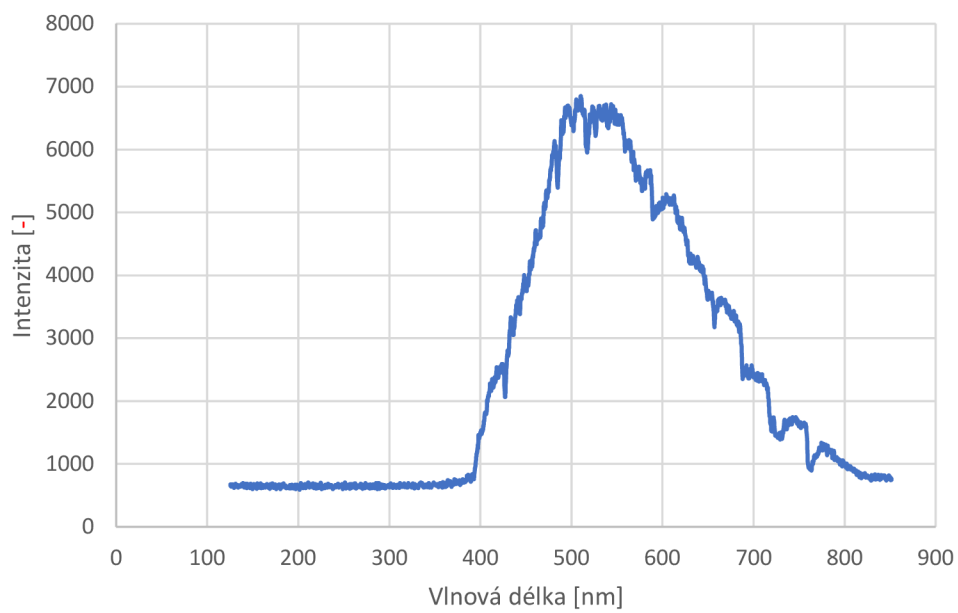
V grafech na Obr. 32 až Obr. 34 jsou vynesena naměřená spektra pro halogenový reflektor 500 W, LED lampu a denní světlo. Spektrum pro halogenový reflektor 150 W změřeno nebylo, jelikož jeho spektrum záření je stejné jako u halogenového reflektoru 500 W.



Obr. 32: Výsledek měření spektra záření halogenového reflektoru 500 W



Obr. 33: Výsledek měření spektra záření LED lampy



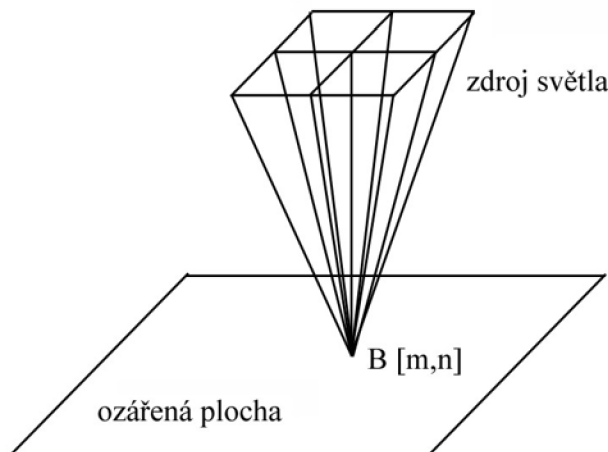
Obr. 34: Výsledek měření spektra záření denního světla

4.4 Simulace rozložení intenzit záření v programovém prostředí Agilent VEE Pro 9.2

Agilent VEE Pro 9.2 je objektové programovací prostředí, kde program vzniká vkládáním jednotlivých modulů a jejich vzájemným pospojováním. Tyto moduly pak reprezentují různé funkce, které si pokročilý uživatel může nastavit. Výsledná data se následně ukládají v textových souborech nebo rovnou v MS Excel, kde se dále zpracovávají, protože program neumí vytvořit 3D grafy intenzit ozáření zvolených ploch.

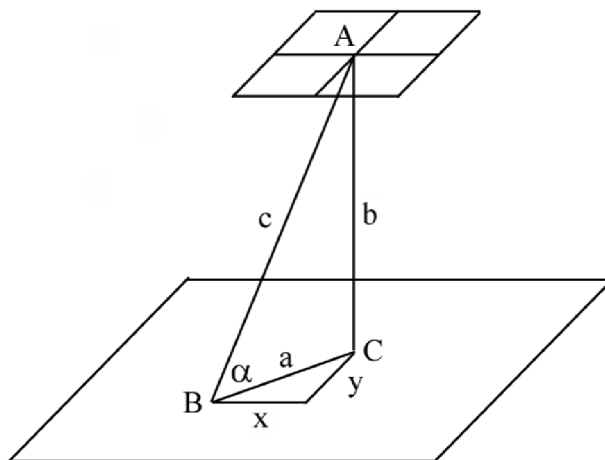
4.4.1 Algoritmus programu

Program pracuje s dvěma plochami, které reprezentují dvě dvoudimenzionální pole. Jedno pole odpovídá ozářené ploše, která má řádky a sloupce s určitým rozestupem. V našem případě se jedná o dílky po 10 cm, protože plocha ozáření je větší než zdroj záření. Druhé pole znázorňuje velikost zdroje světla, jehož parametry se do programu také zadávají. Protože je velikost zdroje světla mnohem menší než ozařovaná plocha, počítají se v tomto případě jednotkové úseky po 1 cm. Každý bod ozářené plochy je tedy spočítán jako příspěvek všech bodů jednotkového úseku zdroje záření.



Obr. 35: Schéma přispěvků všech bodů na zdroji záření pro jeden bod ozářené plochy

Algoritmus programu popisuje to, jakým způsobem daný příspěvek zadáváme do programu. Pro lepší názornost byl vytvořen Obr. 36.



Obr. 36: Schéma příspěvků intenzit záření z bodu A na bod B

Na obrázku je vidět studovaný bod A a na ploše vybraný bod B. Bod B dostane z bodu A určitou intenzitu záření na vzdálenost c , takže je třeba spočítat vzdálenost bodu A od bodu B. Tato vzdálenost se dá spočítat jako přepona pravoúhlého trojúhelníku, kde strana b je vzdálenost mezi lampou a plochou, a strana a je vzdálenost mezi studovaným bodem B a kolmým průmětem bodu A na plochu. Tím nám vzniká pravoúhlý trojúhelník, jehož přepona c se spočítá pomocí Pythagorovy věty jako

$$c = \sqrt{a^2 + b^2}.$$

Kromě vzdálenosti c je potřeba znát úhel α , protože intenzita záření je závislá nejen na vzdálenosti, ale také na úhlu dopadu záření. Sinus úhlu α se počítá jako protilehlá ku přeponě, takže výsledná rovnice bude vypadat následovně:

$$\sin \alpha = \frac{b}{c}.$$

Ke zjištění intenzit záření příspěvků jednoho bodu lampy k celkové intenzitě dopadající na bod B se využívá rovnice

$$I = D \cdot h^E \cdot \sin \alpha$$

kde

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

D je jednotková intenzita záření, které dopadá kolmo na ozařovanou plochu ze vzdálenosti 1 metru ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)

h je výška lampy (cm)

E je koeficient, který popisuje snižování intenzity záření s výškou lampy h viz. zákon převrácených čtverců ($E = -2$)

α je úhel, pod kterým dopadá záření na daný bod ($^\circ$).

Při reálném měření a výpočtech je nerovnoměrnost větší než odpovídá vypočtenému sinu α . V ideálním případě by ideálním zdrojem záření byl takový zdroj, u kterého by ze všech bodů dopadalo na měřenou plochu světlo se stejnou intenzitou a záření by bylo rovnoměrné a ve všech bodech stejné. Nerovnoměrnost je v reálu větší než spočítaný úhel α - čím větší úhel α , tím menší podíl dopadajícího záření do bodu B.

Zvolené zdroje záření proto nejsou ideální zdroje, což může být způsobeno geometrií daného zdroje. U halogenových reflektorů je uprostřed zářící drát, který se odráží napřímo přes sklo, které reflektor překrývá, i od různě velkých stěn reflektoru, které jsou také pod určitým úhlem, což způsobuje větší nerovnoměrnost než která odpovídá ideálnímu modelu. LED lampa je zase sestavena z jednotlivých LED diod, kdy září pouze LED diody a prostor mezi nimi je bez záření.

Z toho důvodu je nutné u měření i simulování intenzit záření určit koeficient nerovnoměrnosti N , který je různý pro různé zdroje záření. Tím se vyrovnají reálné nerovnoměrnosti a výsledné hodnoty se přiblíží modelu s ideálním zdrojem světla. Rovnice v programu byla tedy upravena na tvar

$$I = (D \cdot h^E \cdot \sin \alpha)^N.$$

4.4.2 Uživatelské rozhraní

The screenshot shows a software window titled "Main" with a light blue background. It contains various input and output fields for a calculation. On the left side, there are input fields for: "sirka plochy (cm)" (110), "sirka lampy (cm)" (25), "poloha lampy zleva (cm)" (38), "delka plochy (cm)" (80), "delka lampy (cm)" (18), "poloha lampy zepredu (cm)" (26.5), "vyska lampy h (cm)" (69), "Pcelk (W)" (132.28), "rozptyl (W2/m4)" (4891), "sm odch (W/m2)" (69.94), "nerovnom ozareni (%)" (71.75), and "prum. odch. (W/m2)" (58.74). On the right side, there are input fields for "radek" (8) and "sloupec" (11), and a section for "zavislost intenzity ozareni I na vysce lampy h" with the formula $I = (D \cdot h^4 \cdot E \cdot \sin \alpha)^N$. Below the formula are input fields for "D" (444.00E12) and "N" (3.3), and another input field for "E" (-2). On the far right, there are output fields for "I max (W/m2)" (302.50234), "I min (W/m2)" (49.76), "I prum (W/m2)" (150.9), "I max / I min" (6.079), and "var koef (%)" (46.35).

Parameter	Value
sirka plochy (cm)	110
sirka lampy (cm)	25
poloha lampy zleva (cm)	38
delka plochy (cm)	80
delka lampy (cm)	18
poloha lampy zepredu (cm)	26.5
vyska lampy h (cm)	69
Pcelk (W)	132.28
rozptyl (W2/m4)	4891
sm odch (W/m2)	69.94
nerovnom ozareni (%)	71.75
prum. odch. (W/m2)	58.74
radek	8
sloupec	11
D	444.00E12
N	3.3
E	-2
I max (W/m2)	302.50234
I min (W/m2)	49.76
I prum (W/m2)	150.9
I max / I min	6.079
var koef (%)	46.35

Obr. 37: Uživatelské rozhraní v programovém prostředí Agilent VEE Pro 9.2

Na Obr. 37 je vidět uživatelské rozhraní v programovém prostředí Agilent VEE Pro 9.2, ve kterém uživatel nastaví požadované parametry, aby program mohl vypočítat intenzity záření a další statistické hodnoty.

Pro potřeby správného nastavení je třeba znát šířku i délku ozařované plochy a šířku i délku zdroje záření. Dále je třeba vyplnit i výšku zdroje záření, tj. jak daleko je tento zdroj záření umístěn nad zvolenou plochou. Pro přesnější výsledky je nutné vyplnit i parametry polohy zdroje záření nad zvolenou plochou. To znamená, jak daleko je lampa umístěna od levého kraje plochy a jak daleko je umístěna od předního okraje zvolené plochy.

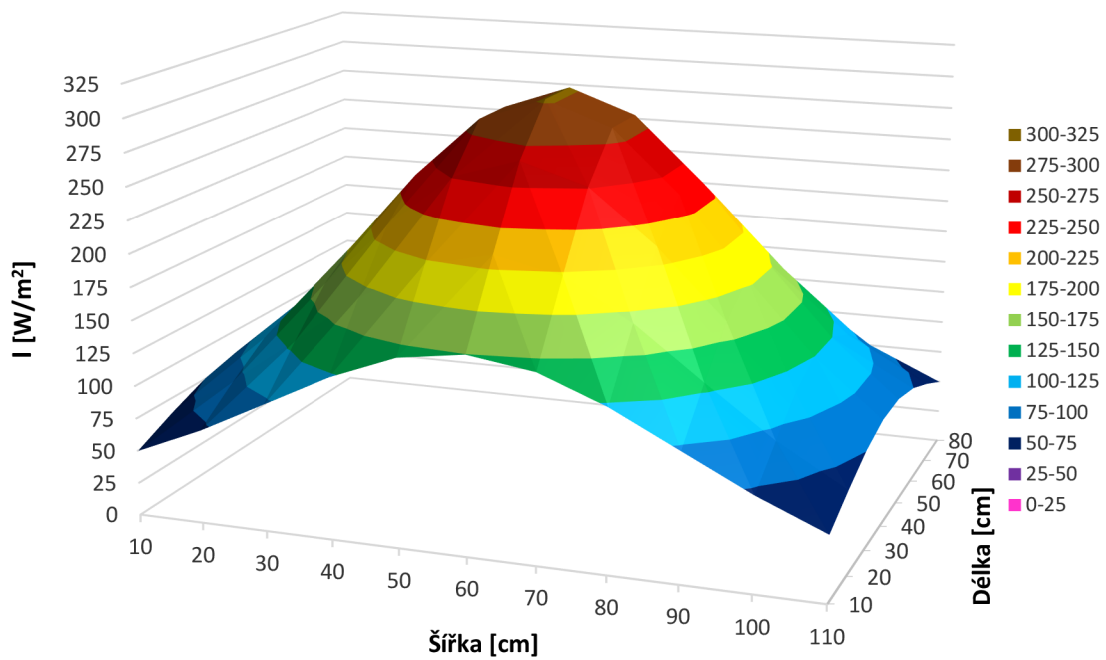
Koeficienty D, E a N se vyplňovaly pouze u halogenových lamp. Protože byla LED lampa změřena v několika výškách, bylo možné zjistit závislost těchto koeficientů na výšce lampy. Obě grafické závislosti koeficientů D a N na výšce lampy byly proloženy mocninnou funkcí. Tyto funkce byly vloženy do programu, což umožnilo zjednodušené zadání vstupních parametrů, kdy místo koeficientů D a N stačilo zadat pouze výšku lampy. Koeficient E měl vždy hodnotu -2 a nebylo nutné jej zadávat uživatelem.

Po spuštění programu se v pravém horním rohu zobrazoval řádek a sloupec, pro které byla v danou chvíli intenzita počítána. Po dokončení výpočtu se doplnily hodnoty předem daných parametrů v dolní části uživatelského rozhraní a zároveň byl otevřen MS Excel se všemi vypočítanými hodnotami, se kterými se dále mohlo pracovat.

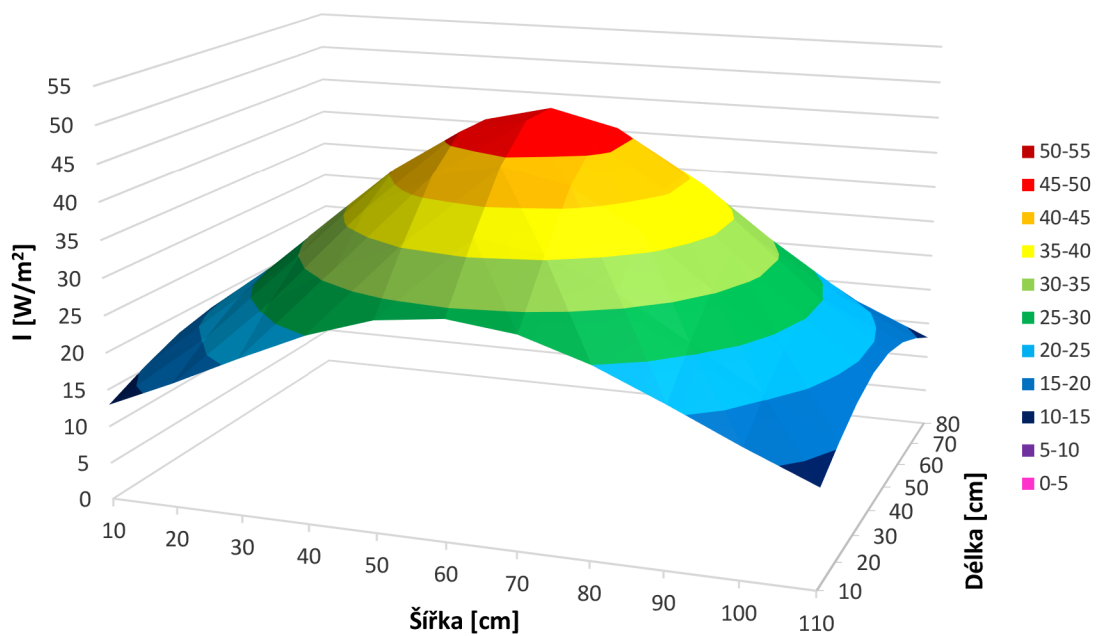
Kromě intenzit záření v jednotlivých bodech definované plochy program spočítal i celkový výkon zadané soustavy, rozptyl hodnot, směrodatnou odchylku, nerovnoměrnost záření a průměrnou odchylku. Dále bylo možné z programu vyčíst i hodnoty pro maximální a minimální intenzity záření, průměrnou intenzitu a variační koeficient.

4.4.3 Výsledky simulace rozložení intenzit záření

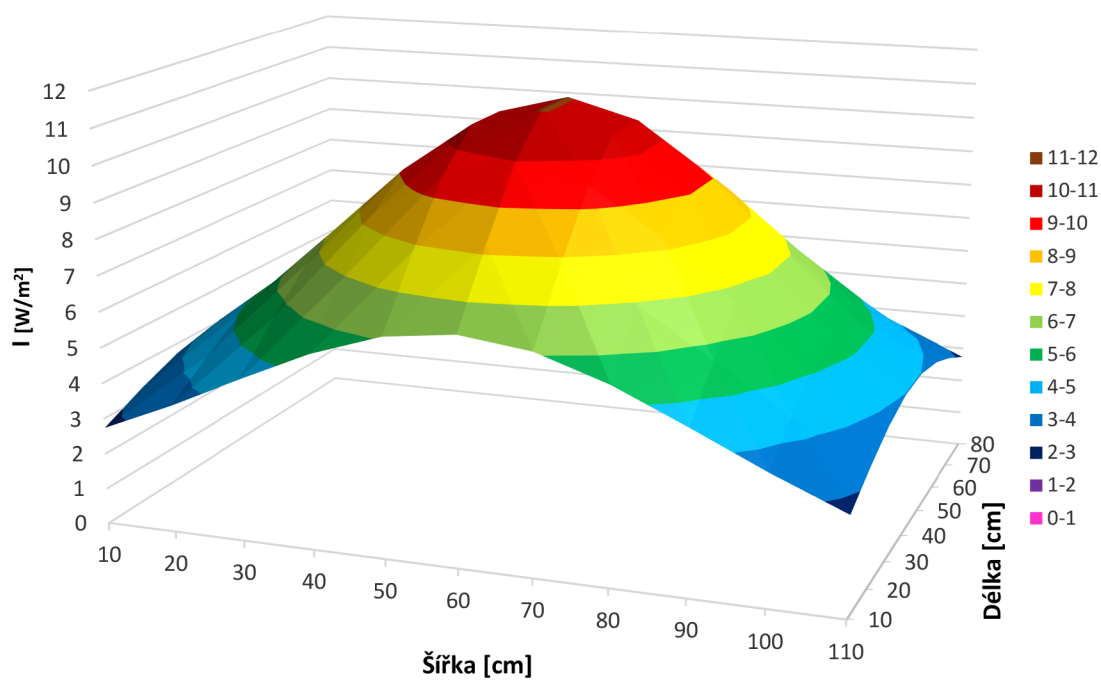
Na Obr. 38 až Obr.43 jsou vyneseny 3D grafy hodnot spočítané pomocí programového prostředí Agilent VEE Pro 9.2. Na rozdíl od 3D grafů vytvořených na základě naměřených hodnot jsou tyto 3D grafy velmi symetrické, v každém grafu mají oba středové body stejnou intenzitu záření, stejně jako všechny rohové body dané plochy, jejichž hodnota intenzity záření je totožná v každém jednotlivém grafu.



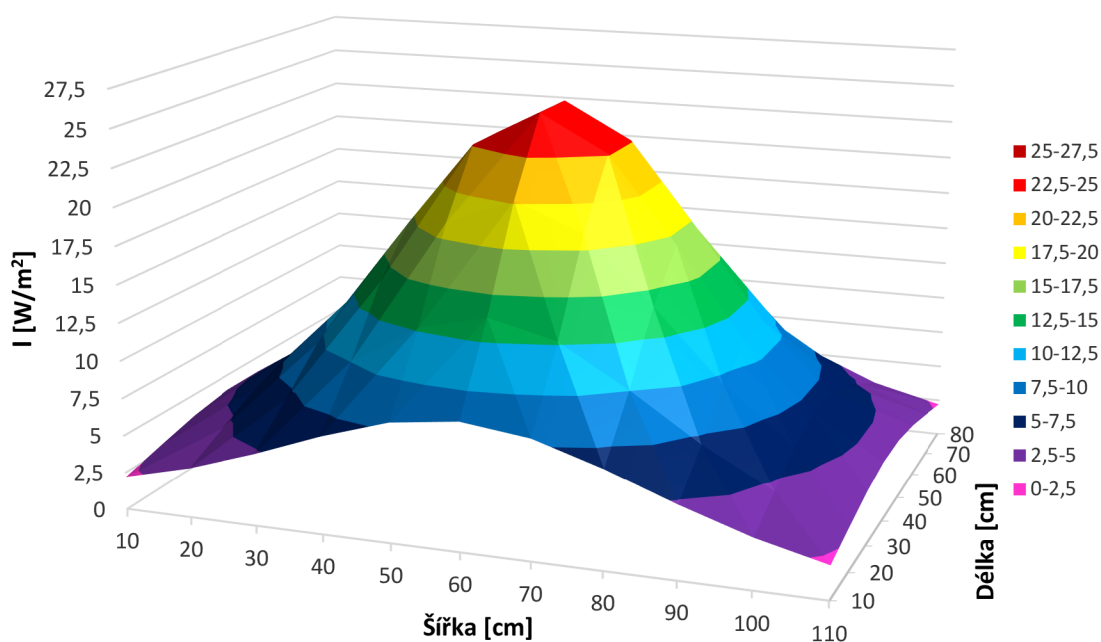
Obr. 38: 3D graf rozložení intenzit záření pro parametry halogenového reflektoru 500 W



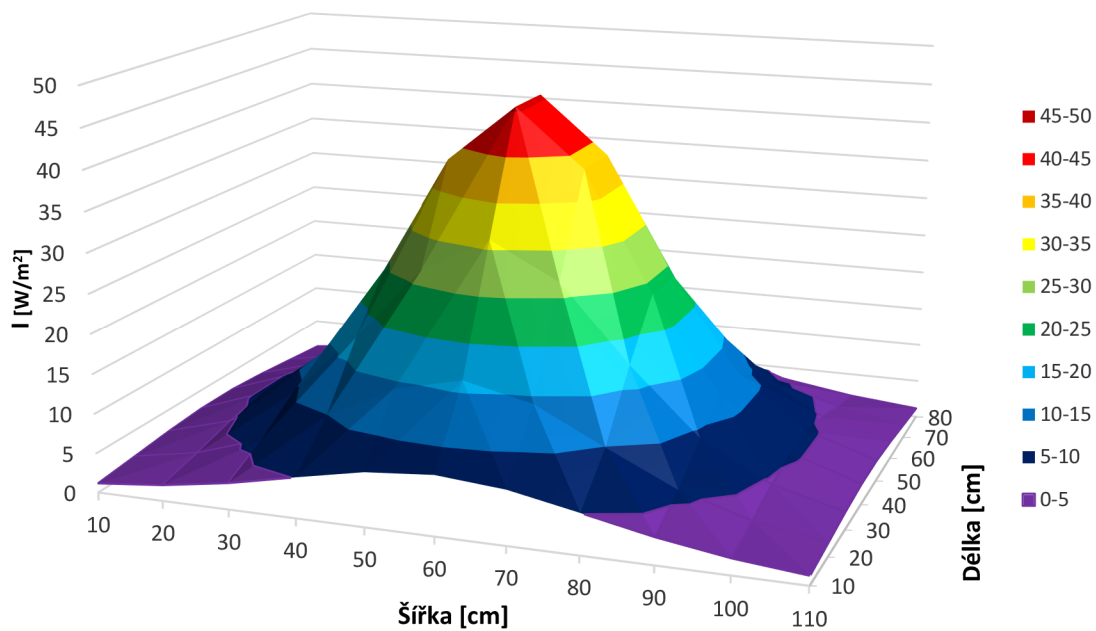
Obr. 39: 3D graf rozložení intenzit záření pro parametry halogenového reflektoru 150 W



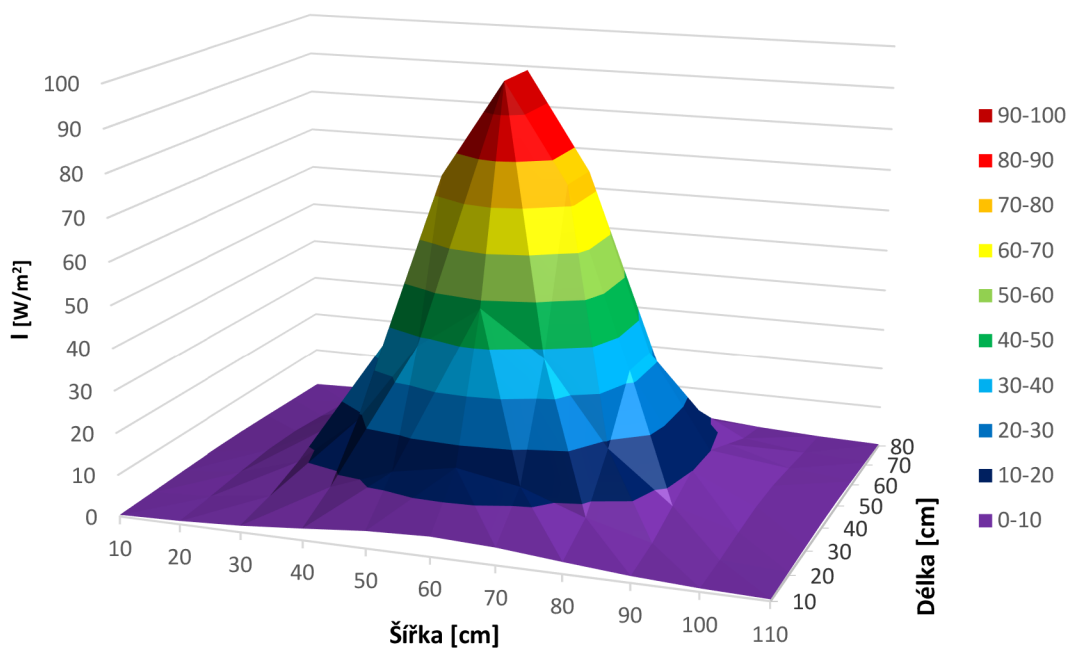
Obr. 40: 3D graf rozložení intenzit záření pro parametry LED lampy ve výšce 63 cm



Obr. 41: 3D graf rozložení intenzit záření pro parametry LED lampy ve výšce 43 cm



Obr. 42: 3D graf rozložení intenzit záření pro parametry LED lampy ve výšce 31 cm



Obr. 43: 3D graf rozložení intenzit záření pro parametry LED lampy ve výšce 21 cm

V následující Tab.4 a Tab. 5 jsou dopočítány statistické údaje z nasimulovaných hodnot pro všechny zvolené zdroje záření. Tyto statistické údaje lze porovnat s hodnotami v Tab. 2 a Tab. 3, kde jsou vypočtené stejné statistické údaje pro naměřené hodnoty.

Tab. 4: Statistické údaje vypočtené z nasimulovaných hodnot pro halogenové zdroje záření

	Halogenový reflektor 500 W	Halogenový reflektor 150 W
Minimální hodnota [W.m⁻²]	49,76	12,92
Maximální hodnota [W.m⁻²]	302,50	48,47
Aritmetický průměr [W.m⁻²]	150,89	28,47
Rozptyl hodnot [W².m⁻⁴]	4846,46	96,00
Směrodatná odchylka [W.m⁻²]	69,62	9,80
Variační koeficient [-]	0,46	0,34
Nerovnoměrnost ozáření [%]	71,75	57,90
Koeficient determinace [-]	0,93	0,93

Tab. 5: Statistické údaje vypočtené z nasimulovaných hodnot pro LED lampu ve všech výškách

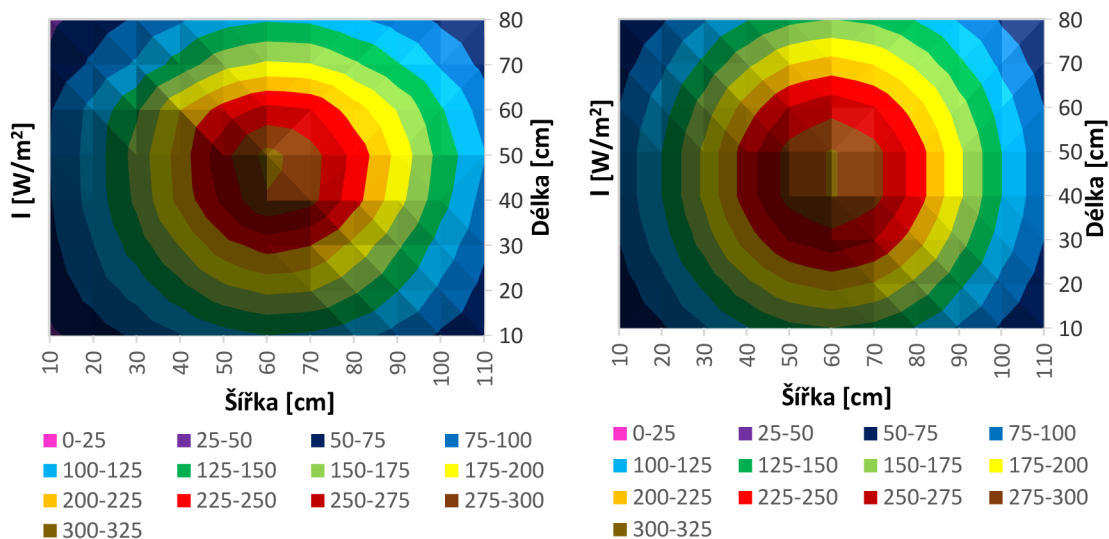
	LED lampa ve výšce 63 cm	LED lampa ve výšce 43 cm	LED lampa ve výšce 31 cm	LED lampa ve výšce 21 cm
Minimální hodnota [W.m⁻²]	2,73	2,20	1,17	0,40
Maximální hodnota [W.m⁻²]	11,05	24,99	45,57	97,41
Aritmetický průměr [W.m⁻²]	6,27	9,48	11,15	13,91
Rozptyl hodnot [W².m⁻⁴]	5,24	37,01	123,81	482,50
Směrodatná odchylka [W.m⁻²]	2,29	6,08	11,13	21,97
Variační koeficient [-]	0,37	0,64	1,00	1,58
Nerovnoměrnost ozáření [%]	60,34	83,83	95,00	99,18
Koeficient determinace [-]	0,96	0,99	0,99	0,99

Stejně jako u naměřených hodnot, i u simulovaných měření byla minimální hodnota halogenového reflektoru 500 W téměř 4x větší než u halogenového reflektoru 150 W. Také jeho maximální hodnota je opět přibližně 6x větší než u druhého halogenového reflektoru. Nerovnoměrnost ozáření je opět vyšší u halogenového reflektoru 500 W. Při simulovaných měřeních byl dopočítán i koeficient determinace, který popisuje míru shody naměřených a vypočtených hodnot intenzit záření.

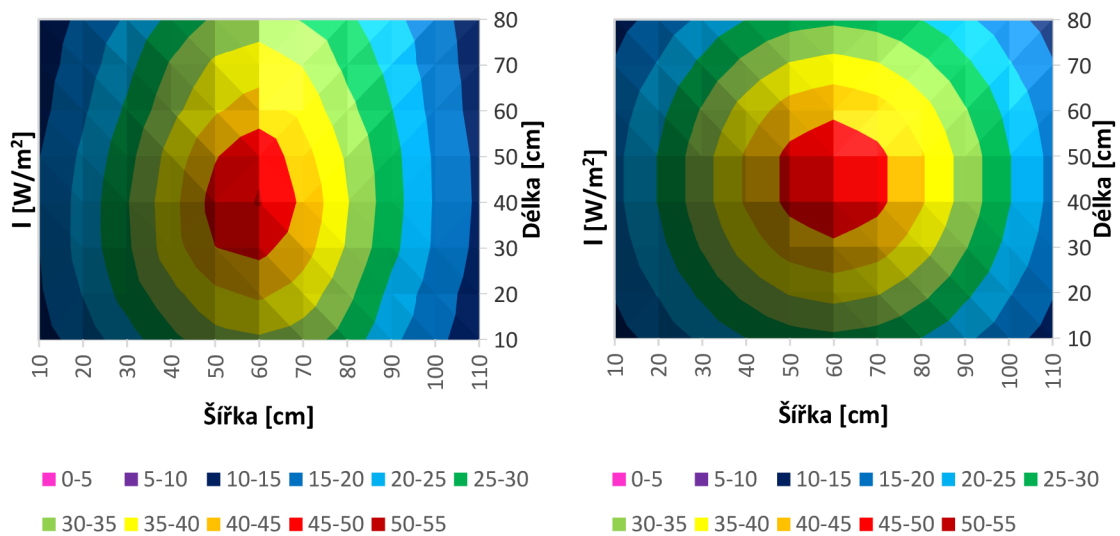
U LED lampy opět platí, že s rostoucí nastavenou výškou klesá minimální vypočítaná hodnota intenzity záření a zároveň roste maximální vypočítaná hodnota intenzit záření. Z toho vyplývá, že i nerovnoměrnost ozáření s klesající výškou roste. Při umístění LED lampy do výšky 21 cm je nerovnoměrnost ozáření vypočítaná přes programové prostředí stejná jako nerovnoměrnost vypočítaná z naměřených hodnot. Dopřítaný koeficient determinace má pro výšky LED lampy 43 cm, 31 cm a 21 cm hodnotu 0,99, pro LED lampu umístěnou ve výšce 63 cm má hodnotu 0,96.

4.4.4 Porovnání naměřených a simulovaných intenzit záření

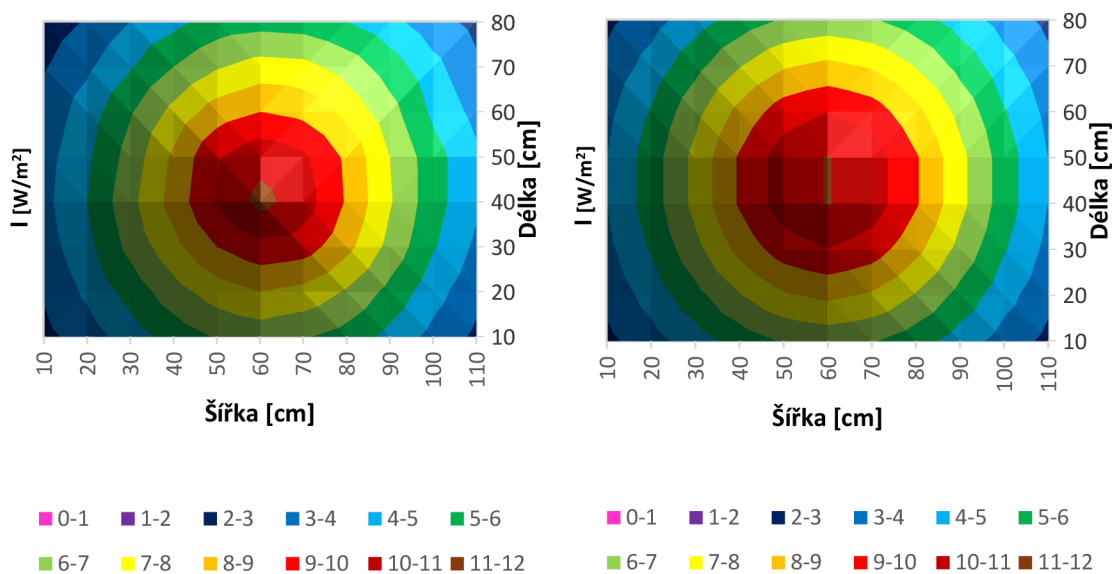
Pro porovnání naměřených hodnot a hodnot nasimulovaných programovým prostředím Agilent VEE Pro 9.2 bylo využito 2D grafů, které jsou vyneseny na Obr.44 až Obr.49. Na levé straně je vždy 2D graf vytvořený z naměřených hodnot, vpravo je 2D graf z nasimulovaných hodnot.



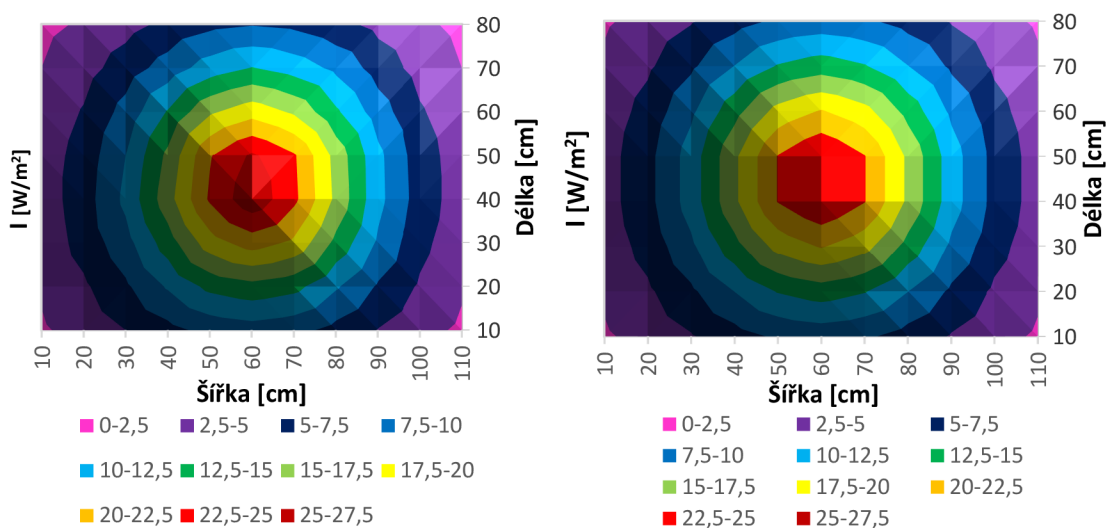
Obr. 44: Porovnání 2D grafů naměřených (vlevo) a nasimulovaných (vpravo) hodnot pro halogenový reflektor 500 W



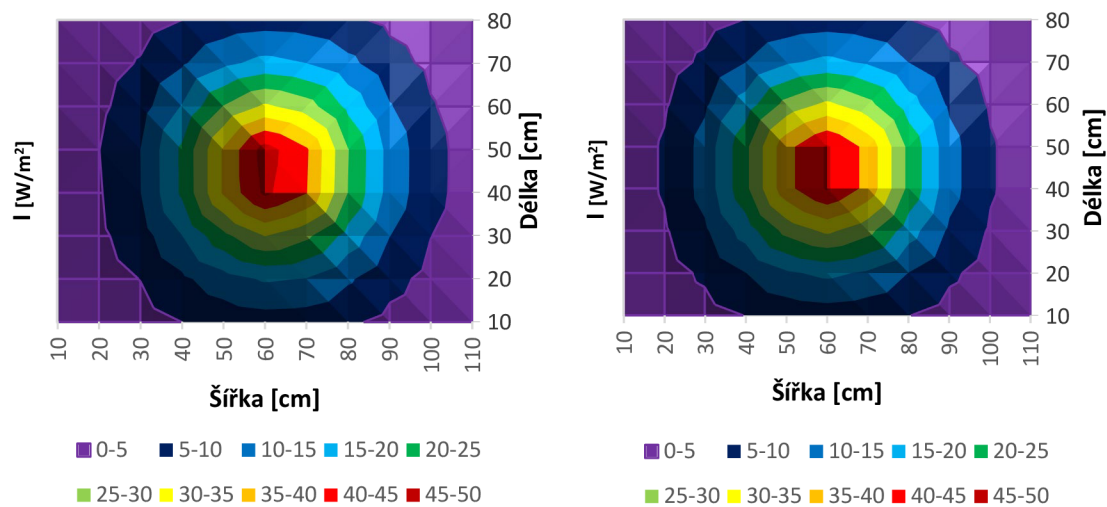
Obr. 45: Porovnání 2D grafů naměřených (vlevo) a nasimulovaných (vpravo) hodnot pro halogenový reflektor 150 W



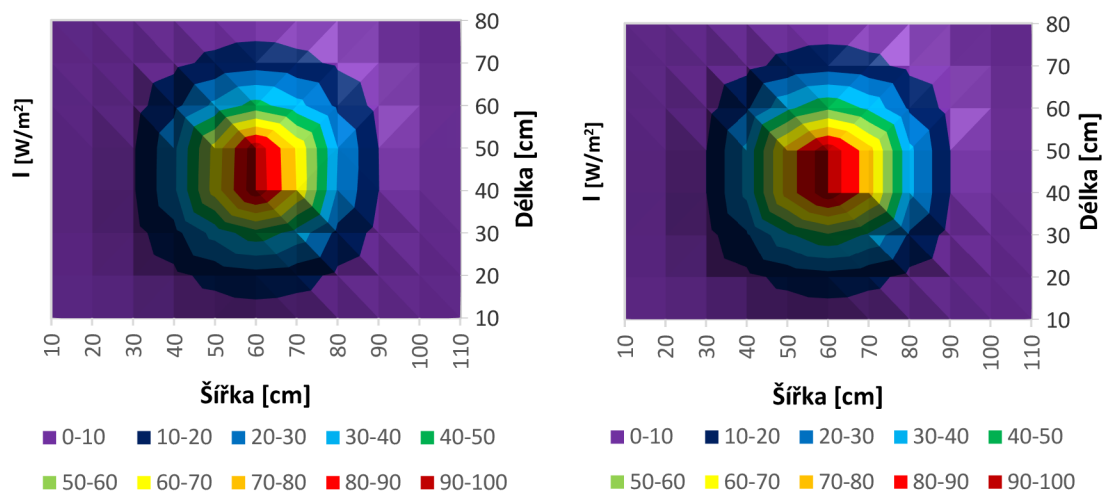
Obr. 46: Porovnání 2D grafů naměřených (vlevo) a nasimulovaných (vpravo) hodnot pro LED lampu umístěnou ve výšce 63 cm



Obr. 47: Porovnání 2D grafů naměřených (vlevo) a nasimulovaných (vpravo) hodnot pro LED lampu umístěnou ve výšce 43 cm



Obr. 48: Porovnání 2D grafů naměřených (vlevo) a nasimulovaných (vpravo) hodnot pro LED lampu umístěnou ve výšce 31 cm



Obr. 49: Porovnání 2D grafů naměřených (vlevo) a nasimulovaných (vpravo) hodnot pro LED lampu umístěnou ve výšce 21 cm

Jak již bylo patrné z 3D grafů, u simulovaných hodnot jsou 2D grafy velmi souměrné. Oproti tomu 2D grafy z naměřených hodnot vykazují známky nepřesností a nerovnoměrností, což může být způsobeno vnějšími podmínkami, nepřesností měření, geometrií zdrojů záření atp.

Největší rozdíly mezi grafy naměřených a simulovaných hodnot lze pozorovat u halogenového reflektoru 150 W. Naměřené hodnoty jsou z velké části ovlivněny hlavně geometrií tohoto reflektoru, kdy intenzita záření je zvětšována odrazy od bočních stěn lampy, s čímž programové prostředí nepočítá.

Nejideálněji se jeví hodnoty pro LED lampu umístěnou ve výšce 21 cm. Oba 2D grafy pro toto měření jsou si velice podobné, z čehož plyne, že výsledky vypočítané programovým prostředím téměř odpovídají reálně naměřeným hodnotám.

5 ZÁVĚR

Tato diplomová práce se zabývala světleným zářením a jeho zdroji. Následně bylo provedeno měření map osvitů zvolené ozářené plochy. Toto měření bylo doplněno simulací v programovém prostředí Agilent VEE Pro 9.2, jež bylo na závěr práce vyhodnoceno.

V první části práce bylo definováno světlo, světelné záření a jeho druhy a byly vysvětleny základní pojmy, které jsou se světelným zářením úzce spjaté. Dále jsou v této práci popsány různé typy zdrojů záření a jejich vliv na ozářené plochy. Teoretickou část uzavírá kapitola o senzorech záření, konkrétně pyranometrech.

V praktické části práce bylo provedeno srovnání dvou senzorů záření, na základě kterého byl vybrán jeden typ, konkrétně fotovoltaiický expozimetr Luton SMP-1116SD, se kterým byla provedena další měření.

Následně byla změřena spektra záření pro halogenový reflektor 500 W, LED lampu a denní světlo. Halogenový reflektor 150 W měřen nebyl, protože jeho spektrum záření je stejné jako u halogenového reflektoru 500 W.

Měření intenzity záření dopadajícího na zvolenou plochu proběhlo pro všechny 3 vybrané zdroje záření – halogenový reflektor 500 W, halogenový reflektor 150 W a LED lampu 100 W. U LED lampy bylo provedeno ve 4 různých výškách. Z provedeného měření vyplývá, že největších intenzit záření bylo dosaženo při ozařování plochy halogenovým reflektorem s výkonem 500 W. Mnohem menší intenzity byly naměřeny během ozařování plochy LED lampou ve výšce 61 cm. Při umístění LED lampy do výšky 21 cm nad ozařovanou plochu bylo dosaženo v některých bodech větších intenzit záření než při měření s halogenovým reflektorem 150 W ve výšce 69 cm. Z 3D grafů u všech měření lze pozorovat, že největší intenzity záření byly naměřeny v bodech přímo pod zdrojem záření a směrem ke krajním bodům měřené plochy intenzita postupně klesala. U všech měření se tak potvrdily základní principy intenzity záření, kdy intenzita záření závisí nejen na vzdálenosti ozařované plochy od zdroje světla, ale také na velikosti úhlu, pod kterým záření na danou plochu dopadá.

Navazující kapitola se věnovala programovému prostředí Agilent VEE Pro 9.2, ve kterém proběhla simulace rozložení intenzit záření podle předem zadaných parametrů. Byl vysvětlen princip algoritmu tohoto programu a popsán uživatelský panel, se kterým se při simulaci pracovalo. Simulace rozložení intenzit záření proběhla opět pro všechny zdroje záření a u LED lampy ve 4 výškách, stejně jako při měření intenzit záření expozimetrem. Výsledky byly vyneseny do 3D grafů.

Pro porovnání výsledků naměřených i nasimulovaných byly zvoleny pro lepší znázornění 2D grafy, z nichž bylo na první pohled patrné, že nejvíce se liší

u halogenového reflektoru 150 W. To bylo způsobeno převážně geometrií tohoto reflektoru, kdy intenzita záření je zvětšována odrazy od bočních stěn lampy, což v programovém prostředí nebylo zohledněno. Naopak nejpřesnější simulace bylo možné pozorovat u všech měření LED lampy, konkrétně u LED lampy umístěné ve výšce 21 cm nad ozařovanou plochou. Výsledné naměřené i nasimulované hodnoty u tohoto měření byly téměř totožné, což potvrdilo přesnost simulačního programového prostředí.

Dalším výsledkem této diplomové práce je vytvoření programu pro LED lampu, který zjednodušuje zadávání parametrů pro uživatele, kdy stačí zadat pouze velikost zvolené plochy a lampy, určit polohu lampy nad danou plochou a zadat výšku, ve které se lampa bude nacházet. Ostatní údaje, včetně koeficientů, se již automaticky spočítají podle výšky. Měření map osvitů ozáření se již využívá v laboratorní úloze v předmětu Alternativní zdroje energie. Vytvořené programy, které simulují mapy osvitů ozáření, budou v tomto předmětu využívány v následujících semestrech.

LITERATURA

- [1] **SOKANSKÝ, Karel.** *Světelná technika*. Praha : České vysoké učení technické v Praze, 2011. 978-80-01-04941-9.
- [2] **KHAN ACADEMY.** *Atomy a jejich vlastnosti - Fotoelektronová spektroskopie* [online]. [cit. 28.10.2023] Dostupné z: <https://cs.khanacademy.org/science/obecna-chemie/xefd2aace53b0e2de:atomy-a-jejich-vlastnosti/xefd2aace53b0e2de:fotoelektronova-spektroskopie/a/light-and-the-electromagnetic-spectrum>.
- [3] **CHMEL Ladislav, Ing., HAMERNÍK Ivo, Ing.** *Fotovoltaika, fototermika* [online]. [cit. 28.10.2023] Dostupné z: <https://publi.cz/books/91/06.html#6-1-3>
- [4] **WOLF, Petr, Ing. PhD.** *Předpověď výroby fotovoltaických systémů. TZB-info* [online]. [cit. 29.10.2023] Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/15928-predpoved-vyroby-fotovoltaickych-systemu>
- [5] **BAXANT Petr, Ing. PhD.** *Světelná technika*. Brno. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně.
- [6] **BALLARD, J. S.** *Inverse square law. Pressbooks* [online]. [cit. 03.11.2023] Dostupné z: <https://openoregon.pressbooks.pub/radsafety130/chapter/inverse-square-law/>
- [7] **JANEČKOVÁ, Lenka.** *Elektrické zdroje světla* [online]. [cit. 03.11.2023]. Dostupné z: <https://adoc.pub/elektricke-zdroje-svtla2d703fcfa7025b95dad55c271d6c605b71159.html>
- [8] **T-LED blog.** *Porovnání: Led žárovky vs klasické* [online]. [cit. 11.04.2024]. Dostupné z: <https://blog.t-led.cz/srovnani-klasickych-a-led-zarovek/>
- [9] **Svět svítidel.cz.** *Zářivková trubice T8/36W/230V – Narva 108506000 120 cm* [online]. [cit. 11.04.2024]. Dostupné z: https://www.svet-svitidel.cz/zarivkova-trubice-t8-36w-230v-narva-108506000-html/?gad_source=1&gclid=CjwKCAjw3NyxBhBmEiwAyofDYVYn8KLAp3jjCniwkMtkuMkw4M_-q9zgOezFpDMfcsRvJ4AYHByIBoCoBEQAvD_BwE
- [10] **DOVIMEX.** *Indukční LVD výbojka INO – 200W* [online]. [cit. 11.04.2024]. Dostupné z: <https://led-a.cz/obchod/indukcni-lvd-vybojka-ino-200w/>
- [11] **Elfetex.** *OSRAM Sodíková výbojka 400W E40 trubice čirá NAV-T 4Y* [online]. [cit. 11.04.2024]. Dostupné z: <https://www.elfetex.cz/10-024-308-osram-sodikova-vybojka-400w-e40-trubice>
- [12] **E-SVIT.CZ.** *Philips HPL-N 125W/542 SG E27 BD75, 871150018012430 rtuťová výbojka* [online]. [cit. 11.04.2024]. Dostupné z: <https://www.esvit.cz/philips-hpl-n-125w-542-sg-e27-bd75-871150018012430-rtutova-vybojka>

- [13] **Auto-doplňky.com.** *Xenonová výbojka H1 6000K pro přestavbové HID sady* [online]. [cit. 11.04.2024]. Dostupné z: <https://www.auto-doplňky.com/xenonova-vybojka-h1-6000k-pro-prestavbove-sady-hid-p8044>
- [14] **Svitidla.com.** *Svitidla: Plazma – hustý, lampy, lampičky, světla a prodej osvětlení* [online]. [cit. 11.04.2024]. Dostupné z: <https://www.svitidla.com/svitidlo-45031/plazma>
- [15] **GOLED.** *Černý LED reflektor 100W* [online]. [cit. 11.04.2024]. Dostupné z: <https://www.goled.cz/cerny-led-reflektor-100w/>
- [16] **Wikipedia.** *Pyranometer* [online]. [cit. 03.05.2024]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Pyranometer>
- [17] **FIEDLER.** *SG002 snímač globální radiace - pyranometr* [online]. [cit. 03.05.2024]. Dostupné z: <https://www.fiedler.company/cs/produkty/snimace-meteorolog-velicin/globalni-radiace/pyranometr-sg002>
- [18] **Rika Sensors.** *All You Need to Know Pyranometers & Solar Radiation Sensors* [online]. [cit. 04.05.2024]. Dostupné z: <https://www.rikasensor.com/pyranometers-what-you-need-to-know.html>
- [19] **Kipp & Zonen.** *CMP21 spectrally flat Class A pyranometer* [online]. [cit. 16.05.2024]. Dostupné z: <https://www.kippzonen.com/Product/14/CMP21-Pyranometer#.UrI2rrSkeDs>
- [20] **Omni Instruments.** *The CMP3 is a spectrally flat class C pyranometer from Kipp & Zones* [online]. [cit. 04.05.2024]. Dostupné z: <https://www.omniinstruments.co.uk/cmp3-pyranometer.html>
- [21] **MICRONIXSPOL, S R.O.** *Fotovoltaický expozimetr LUTRON SPM-1116SD. micronix.cz* [online]. [cit. 28.10.2023]. Dostupné z: <https://www.micronix.cz/fotovoltaicky-expozimetr-lutron-spm-1116sd/>
- [22] **Karlsruhe Institute of Technology.** *PSI: Die Physik Schülerlabor Initiative* [online]. [cit. 16.05.2024]. Dostupné z: https://psi.physik.kit.edu/downloads/Spektrometer_Arbeitsblaetter_komplett.pdf