



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

NÁVRH OPTICKÉHO SYSTÉMU LED SVÍTIDLA

OPTICAL DESIGN FOR LED LUMINAIRE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Ján Oravčok

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Škoda, Ph.D.

BRNO 2021

Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

Student: Bc. Ján Oravčok

ID: 174369

Ročník: 2

Akademický rok: 2020/21

NÁZEV TÉMATU:

Návrh optického systému LED svítidla

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Literární rešerše z oblasti optiky
2. Návrh optiky a konstrukce svítidla
3. Simulace svítidla v dostupných simulačních programech
4. Konstrukce svítidla
5. Porovnání parametrů nového svítidla se stávajícími

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího diplomové práce

Termín zadání: 8.2.2021

Termín odevzdání: 24.5.2021

Vedoucí práce: Ing. Jan Škoda, Ph.D.

doc. Ing. Petr Toman, 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

Prvou časťou práce je rešerš, ktorá sa zaoberá elektrickými svietidlami a predovšetkým ich svetelno-činnými časťami. Následne je popísaná problematika konkrétneho svietidla, ktoré sa používa pri kontrole povrchovej štruktúry materiálov. Ďalšia časť práce sa zaoberá simuláciou aktuálneho svietidla a simuláciami navrhnutých riešení, ktoré nedostatky svietidla eliminujú. Záverom práce je zhodnotenie pôvodne používaného svietidla a prínosov navrhnutého riešenia, ktoré pri simulácii vykazovalo najlepšie výsledky.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

difúzor; optika; rovnomernosť osvetlenosti; simulácia; svietidlo

ABSTRACT

The first part of the thesis is research, which deals with electric luminaires and especially their light-active parts. Subsequently is described the problem of a specific luminaire, which is used during the control of the surface structure of materials. The next part of the thesis deals with the simulation of the current luminaire and the simulations of the proposed solutions that eliminate the shortcomings of the luminaire. The conclusion of this thesis is the evaluation of the originally used luminaire and the benefits of the proposed solution, which showed the best results in the simulation.

KEYWORDS

diffuser; optics; uniformity of lighting; simulation; luminaire

VYHLÁSENIE

Vyhlasujem, že svoju diplomovú prácu na tému „Návrh optického systému LED svítidla“ som vypracoval samostatne pod vedením vedúceho diplomovej práce, s využitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej diplomovej práce ďalej vyhlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto diplomovej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, najmä som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a/alebo majetkových a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovenia § 11 a nasledujúcich autorského zákona Českej republiky č. 121/2000 Sb., o práve autorskom, o právach súvisiacich s právom autorským a o zmene niektorých zákonov (autorský zákon), v znení neskorších predpisov, vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákonníka Českej republiky č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora

POĎAKOVANIE

Rád by som poďakoval vedúcemu diplomovej práce Ing. Janovi Škodovi, Ph.D. za vedenie a konzultácie počas jej písania. Moja vďaka patrí aj Ing. Lukášovi Radilovi, Ph.D. za vecné poznatky a odborné pripomienky k formálnej časti tejto diplomovej práce.

Obsah

Zoznam symbolov, veličín a skratiek	10
Úvod	11
1 Základné časti elektrických svietidiel	12
1.1 Konštrukčná časť	12
1.2 Elektrická časť	12
1.2.1 LED svetelné zdroje	13
1.3 Svetelno-činná časť	14
1.3.1 Reflektory	14
1.3.2 Difúzory	17
1.3.3 Refraktory a šošovky	17
1.3.4 Holografické optické prvky	18
1.3.5 Tienidlá a kryty	18
1.3.6 Filtre	18
2 Ciele práce	20
3 Aktuálne používané svietidlo	21
3.1 Účel a princíp	21
3.2 Časti svietidla	22
3.2.1 Konštrukčná časť	22
3.2.2 Elektrická časť	22
3.2.3 Svetelno-činná časť	23
3.2.4 Zdroj svetla	23
3.3 Simulácia aktuálneho stavu	24
3.3.1 Softvér TracePro™	24
3.3.2 Softvér Ansys SPEOS	25
3.3.3 Scéna a parametre simulácie	25
3.3.4 Výsledky simulácie v programe TracePro™	26
3.3.5 Vplyv difúzora na osvetľovanú plochu – SPEOS	28
4 Návrh riešenia	32
4.1 Použitie optických prvkov dostupných na trhu	32
4.1.1 Kritériá výberu	32
4.1.2 Postup a nastavenie simulácie	36
4.1.3 Výstup simulácie	38
4.2 Návrh vlastných optických prvkov	43

4.2.1	Šošovka s úplným vnútorným odrazom – TIR	43
4.3	Použitie optického prvku pre rôzne pozície v svietidle	48
4.3.1	Umiestnenie optiky v svietidle	49
4.3.2	Scéna a postup simulácie so svietidlom osadeným viacerými optikami	50
4.3.3	Výstup simulácie a výpočtov	51
	Záver	55
	Bibliografia	57
	Zoznam príloh	59
	A Zdrojové dáta získané simuláciami	60
A.1	Optiky dostupné na trhu	60
A.2	Svietidlo osadené optikou LEDiL	62
	B Histogramy	63
B.1	1. pozícia LED v svietidle	63
B.2	2. pozícia LED v svietidle	64
B.3	3. pozícia LED v svietidle	64
B.4	4. pozícia LED v svietidle	65
B.5	5. pozícia LED v svietidle	65
B.6	6. pozícia LED v svietidle	66
B.7	7. pozícia LED v svietidle	66
B.8	8. pozícia LED v svietidle	67

Zoznam obrázkov

1.1	Zrkadlový reflektor REGINA, výrobca: LEDiL [5]	15
1.2	Matovaný reflektor 2-2264-M, výrobca: Nata [6]	16
3.1	Sekčné LED svietidlo, výrobca: SANEZOO [7]	21
3.2	LED XLamp XP-G3 Royal Blue, výrobca: CREE [8]	23
3.3	Vyžarovacia charakteristika LED XP-G3 [8]	24
3.4	Scéna simulovania svetelných podmienok v programe TracePro™	26
3.5	Rozloženie hustoty žiarivého toku pri simulácii v programe TracePro™	27
3.6	Porovnanie skutočných svetelných podmienok (vľavo) a simulácie (vpravo) pri použití difúzora	28
3.7	Výsledné optické parametre difúzora nastavené v nástroji SPEOS	29
3.8	Rozloženie osvetlenosti E (lx) na detektore bez difúzora	30
3.9	Rozloženie osvetlenosti E (lx) na detektore s použitím difúzora	30
4.1	Umiestnenie svetelného zdroja v súvislosti s nasvecovanou plochou	32
4.2	Príklad krivky svietivosti optického prvku VIOLETTA v polárnych súradniciach, výrobca: LEDiL [12]	33
4.3	Typy kriviek svietivosti (zlava úzka, široká, asymetrická) [14]	34
4.4	Scéna bez optiky a optimálne rozloženie osvetlenosti na detektore pri jej použití	37
4.5	Poloha oblasti D1 na detektore	39
4.6	Poloha oblasti D2 na detektore	40
4.7	Poloha oblasti D3 na detektore	42
4.8	Definícia rozmerov pri modelovaní TIR objektívu	44
4.9	Navrhnutá symetrická štruktúra rozhrania	45
4.10	Navrhnutá asymetrická štruktúra rozhrania	46
4.11	Ukážka simulácie navrhutej TIR šošovky s asymetrickou štruktúrou v programe SPEOS	46
4.12	Navrhnuté pozície optiky LEDiL v svietidle	49
4.13	Ukážka scény pri simulovaní celého svietidla osadeného optikami	50
4.14	Histogram pre 1. pozíciu LED v svietidle s uvedenými vypočítanými koeficientami $U_1(1)$	52
4.15	Zobrazenie osvetlenosti E (lx) na detektore bez použitia optiky pre každú pozíciu LED	53
4.16	Zobrazenie osvetlenosti E (lx) na detektore s použitím optiky pre každú pozíciu LED	54

Zoznam tabuliek

3.1	Parametre LED XP-G3	24
3.2	Výstupné hodnoty intenzity žiarenia I (W/m^2) získané simuláciou v programe TracePro™	27
4.1	Parametre optických prvkov vybratých pre simulácie	36
4.2	Vypočítané hodnoty rovnomernosti osvetlenia U_1 a zmeny priemernej osvetlenia ΔE_{avg} pre oblasť D1	39
4.3	Vypočítané hodnoty rovnomernosti osvetlenia U_1 a zmeny priemernej osvetlenia ΔE_{avg} pre oblasť D2	41
4.4	Vypočítané hodnoty rovnomernosti osvetlenia U_1 a zmeny priemernej osvetlenia ΔE_{avg} pre oblasť D3	42
4.5	Vyčíslenie zlepšenia homogenity osvetlenia – zvýraznený riadok platí pre simuláciu bez optiky	43
4.6	Rozmery navrhnutých TIR optík v simulačnom nástroji SPEOS	45
4.7	Hodnoty koeficientu U_1 (1) pri použití TIR 1 – polomer 4 mm	47
4.8	Hodnoty koeficientu U_1 (1) pri použití TIR 2 – polomer 7 mm	48
4.9	Hodnoty koeficientu U_1 (1) pri použití TIR 3 – polomer 10 mm	48
4.10	Vypočítaná rovnomernosť osvetlenia U_1 pre 8 pozíc LED a jej zmena ΔU_1 po pridaní optiky	51

Zoznam symbolov, veličín a skratiek

Skratka **Definícia**

DPS doska plošných spojov

FOV zorné pole (Field of View)

FWHM uhol polovičnej svietivosti (Full Width at Half Maximum)

HOE holografický optický prvok (Holographic Optical Element)

IR infračervené žiarenie (Infrared)

LED luminiscenčná dióda (Light-Emitting Diode)

PC polykarbonát (Polycarbonate)

PMMA polymetylmetakrylát (Polymethyl Methacrylate)

PS polystyrén (Polystyrene)

SMD súčiastka pre povrchovú montáž (Surface Mount Device)

TIR úplný vnútorný odraz (Total Internal Reflection)

UV ultrafialové žiarenie (Ultraviolet)

Veličina	Popis	Jednotka
E_{avg}	priemerná hodnota intenzity osvetlenia	(lx)
E_{min}	najnižšia hodnota intenzity osvetlenia	(lx)
I	intenzita žiarenia	(W/m ²)
n	index lomu	(1)
U_1	koeficient rovnomernosti (homogeneity) intenzity osvetlenia	(1)
ΔU_1	zmena rovnomernosti intenzity osvetlenia	(%)

Úvod

Pri každej sériovej výrobe je potrebné dodržiavať istý štandard, ktorý vplýva na kvalitu výrobku. Aj napriek tomu, že v súčasnosti je masová výroba rôznych dielov v priemysle enormne rozšírená, je stále nedostatok metód, ktoré by vedeli automaticky kategorizovať výrobky podľa toho, či sa na ich povrchu nachádza vada, alebo nie. Túto rolu aj v dnešnej dobe automatizácie veľakrát zohrávajú ľudia, čo spôsobuje, že rozhodovanie nie je konzistentné a ľudský faktor je častou príčinou chybovosti pri rozhodovaní.

Nároky na prísnosť a opakovateľnosť vyhodnotenia sa pritom každým rokom stupňujú a preto sa hľadajú riešenia, ktoré by vedeli spoľahlivo vyhodnotiť povrchové defekty a anomálie na vyrábaných dieloch. Práve pre tento účel bolo vyvinuté svietidlo, ktorého cieľom je čo najrovnomernejšie nasvietiť kontrolovanú oblasť snímanú priemyselnou kamerou.

Svietidlo má nedostatky, ktoré kamerovú kontrolu komplikujú. Z toho dôvodu je po odbornej rešerši v tejto práci upriamená pozornosť na ich analýzu v simulačných nástrojoch TracePro™ a SPEOS. Ich účelom je čo najviac pripodobniť podmienky v simulácii tým skutočným.

Po identifikovaní problémov je predmetom ďalšej časti práce návrh opatrení z oblasti optiky, ktoré vedú k odstráneniu nedokonalostí. Každý návrh je podrobený simulácii a riešenie, ktoré sa ukáže ako najviac prínosné, je následne aplikované do oblasti svietidla, v ktorej sa nachádzajú svetelné zdroje.

Záver tejto diplomovej práce hodnotí prínos použitia zvolenej optiky a tiež možnosti, ktoré sa pri hľadaní tohto riešenia ukázali ako neefektívne.

1 Základné časti elektrických svietidiel

Svetelné zdroje väčšinou samé o sebe nevyhovujú pre osvetľovacie účely, pretože majú veľakrát nevhodné rozdelenie svetelného toku, príliš vysoký jas a tiež nie sú odolné proti rôznym vplyvom okolitého prostredia. To sú hlavné dôvody, prečo sa svetelné zdroje umiestňujú do svietidiel.

Svietidlá sú svetelné prístroje (zariadenia), ktoré sa posudzujú podľa mnohých vlastností a požiadaviek na ich použitie v praxi. Medzi ne patrí napríklad kontrola a usmernenie svetelného toku svetelného zdroja, pripojenie elektrickej energie k napájaniu svetelného zdroja, bezpečnosť prevádzky, upevnenie svietidla, fyzická ochrana svetelného zdroja, odolnosť pri prevádzkových podmienkach, účinnosť prevádzky alebo vzhľad svietidla.

Okrem uvedených požiadaviek musia svietidlá umožňovať jednoduchú údržbu a musia byť dostatočne trvanlivé a funkčne spoľahlivé. Pri konštrukcii svietidiel je nevyhnutné rešpektovať aj požiadavky na maximálnu hospodárnosť.

Z dôvodu uvedených vlastností a požiadaviek rozdeľujeme časti svietidiel na:

- konštrukčné,
- elektrické,
- svetelno-činné.

V tejto práci je venovaná pozornosť predovšetkým úpravám svetelno-činnnej časti svietidiel [1, 2].

1.1 Konštrukčná časť

Svietidlo musí vydržať bežné zachádzanie pri skladovaní, transporte, manipulácii a inštalácii. Tomu musí byť prispôsobený návrh konštrukcie svietidla. Pevnosť a mechanickú odolnosť svietidla ovplyvňujú použité materiály a kvalita prevedenia konštrukcie. V prípade, ak je svietidlo používané v náročných prevádzkových podmienkach, sú požiadavky na mechanickú pevnosť svietidla vyššie. Konštrukcia svietidla je tvorená nosnými a ochrannými prvkami [2].

1.2 Elektrická časť

Elektrická časť sa v svietidle nachádza za účelom napájania svetelných zdrojov elektrickou energiou. Vnútorne elektrické zapojenie svietidla musí byť prevedené tak, aby bola zaistená jeho elektrická bezpečnosť. Základnými elektrickými časťami svietidiel sú svorkovnice, ochranné svorky, objímky, vodiče a konektory. Rovnako sú súčasťou predradené zariadenia, ktoré upravujú napájacie podmienky pre obvody svetelného zdroja (tlmivky, transformátory, rezistory, cievky, kondenzátory) [2].

1.2.1 LED svetelné zdroje

LED svetelné zdroje patria do skupiny elektroluminiscenčných svetelných zdrojov. Svetelná dióda je polovodičová súčiastka obsahujúca PN prechod, ktorý emituje optické žiarenie, ak je budený prechodom elektrického prúdu. Svetelné diódy zaznamenávajú v poslednom desaťročí nesmierne dynamický rozvoj. Od ich uvedenia na trh dochádza k neustálemu vývoju nových základných materiálov a k zdokonaleniu technologických procesov, ktoré vedú k rozšíreniu sortimentu o ďalšie farby vyžarovaného svetla, zvýšeniu účinnosti, predĺženiu životnosti a stability parametrov počas svietenia.

Z princípu funkcie svetelnej diódy historicky nebolo možné získať biele svetlo. Až neskôršie doplnenie sortimentu o modré LED na báze nitridu gália a india (InGaN), umožnilo nakoniec vyvinúť aj diódy so svetlom bielej farby. Okrem uvedených typov LED sa tiež vyrábajú diódy, ktoré vyžarujú v UV (ultrafialovej) alebo IR (infračervenej) oblasti spektra.

Biele svetlo LED je možné získať dvomi spôsobmi. Prvý spočíva v klasickom priamom miešaní svetla červenej, zelenej a modrej LED, druhý spôsob využíva fosforescenciu luminoforov. Vývoj nových vysoko čistých materiálov a zložitých technologických postupov zaznamenal predovšetkým významný nárast účinnosti základnej stavebnej jednotky všetkých LED – polovodičového čipu, ktorý v laboratórnych podmienkach firmy CREE dosiahol až 303 lm/W v bielej farbe pri veľmi dobrých kolorimetrických vlastnostiach.

Pre napájanie LED sa používajú meniče s výstupným napätím, ktoré sú prispôbené počtu a kombinácii zapojenia. Sú to zdroje konštantného prúdu, ktorý zaisťuje aj ich optimálnu pracovnú teplotu. Medzné teploty LED sa pohybujú medzi 85 °C a 100 °C, ich prekročenie má značný negatívny vplyv na životnosť diódy a tiež na rýchlosť poklesu jej svetelného toku.

Svetelné diódy majú množstvo výhod. Patria medzi ne napríklad:

- malé napájacie napätie nevyžadujúce ochranu pred nebezpečným dotykcom,
- minimálna doba nábehu a rýchla odozva (nanosekundy), môžu pracovať v impulznom režime bez negatívneho vplyvu na životnosť a spoľahlivosť,
- možnosť ľahko ich zapínať a vypínať,
- odolnosť voči otrasom a vibráciám,
- stmievateľnosť bez zmeny farby,
- schopnosť svietiť v ľubovolnej polohe,
- vysoký jas,
- vysoká spoľahlivosť,
- veľká účinnosť farebných LED, pre dosiahnutie požadovanej farby sa nepoužívajú filtre, ktoré pri iných svetelných zdrojoch spôsobujú straty,

- extrémne dlhá životnosť, údaje výrobcov sa pohybujú medzi 60 tis. až 100 tis. hodín pri úbytku svetelného toku 30 % až 40 %,
- široký interval teploty okolitého prostredia (uvádza sa medzi $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$),
- nízke povrchové teploty a absencia UV a IR žiarenia (okrem diód pre tieto oblasti spektra),
- recyklovateľnosť značnej časti používaných materiálov (nemajú negatívny vplyv na životné prostredie).

K nevýhodám svetelných diód patrí zatiaľ predovšetkým vysoká cena a významná závislosť ich hlavných parametrov na teplote okolia [3, 4].

1.3 Svetelno-činná časť

Z hľadiska zaistenia základnej funkcie svietidla, t.j. osvetľovanie určitého priestoru alebo predmetu, sú najpodstatnejšie jeho svetelno-činné časti. Sú to časti, ktoré upravujú rozloženie svetelného toku, prípadne spektrálne zloženie svetla vyžarovaného svetelnými zdrojmi a tým určujú fotometrické vlastnosti svietidla. Svetelno-činné časti môžu svetelný tok rovnomerne rozptýliť do priestoru, alebo usmerniť do presne určeného svetelného zväzku. Iné svetelno-činné časti môžu byť určené napríklad k cloneniu svetelných zdrojov, zabráneniu oslneniu alebo úprave spektrálneho zloženia optického žiarenia svetelných zdrojov. Pre dosiahnutie požadovaných svetelno-technických vlastností sa používajú nasledovné optické časti:

- reflektory,
- difúzory,
- refraktory a šošovky,
- holografické optické prvky,
- tienidlá a kryty,
- filtre.

Uvedené optické časti sú súčasťou každého svietidla. Pre správny návrh optickej sústavy svietidla, tak aby vyhovovalo našim požiadavkám, je nevyhnutné poznať ich účel a prípadne špecifikáciu materiálu, z ktorého sú vyrobené [1, 2].

1.3.1 Reflektory

Reflektory sú svetelno-činné časti svietidiel, ktoré menia priestorové rozloženie svetelného toku zdrojov odrazom. Podľa charakteru odrazových vlastností ich môžeme deliť na niekoľko typov – zrkadlové, matované a difúzne.

Zrkadlové reflektory

Používajú sa v svietidlách, pri ktorých je požadovaný presný tvar krivky svietivosti. Sú to napríklad úzkouhlé svetlomety alebo pouličné svietidlá. Svietidlá, ktoré majú zrkadlové reflektory, majú veľkú účinnosť, umožňujú vytvárať veľmi rozmanité rozloženie svietivosti a tiež obmedziť jas svietidiel v kritických smeroch. Tieto reflektory sú konštruované tak, aby na odrazovej ploche nastal len jeden odraz lúčov, ktoré vychádzajú zo svetelného zdroja. Geometrický tvar, veľkosť svetelného zdroja a tvar zrkadlového reflektora určujú, ako sa bude od povrchu odrážať svetlo a aký bude charakter vyžarovania svietidla.

V svietidlách pre všeobecné a smerové osvetľovanie sa používajú tvarované reflektory, ktorých priestorový tvar môže byť rotačne súmerný, korýtkový alebo asymetrický. Tvary základných rezov rotačne súmernými alebo korýtkovými reflektormi môžu byť kruhové, parabolické alebo eliptické a sú odvodené od rezu kuželom [2].

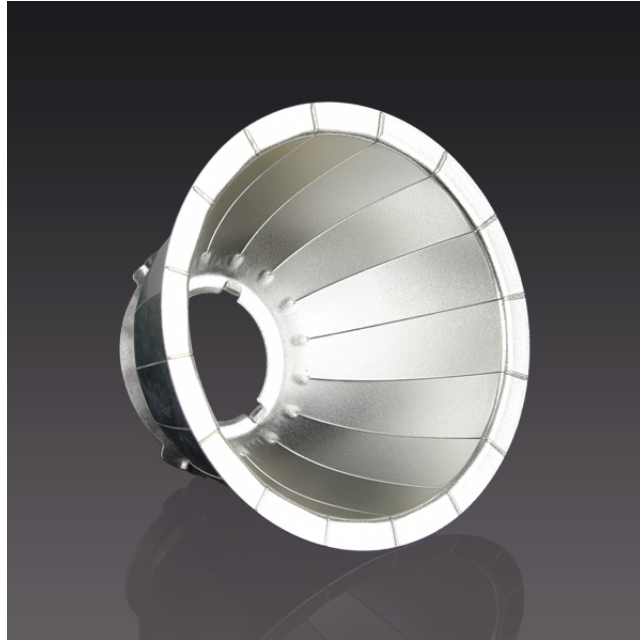


Obr. 1.1: Zrkadlový reflektor REGINA, výrobca: LEDiL [5]

Matované reflektory

V matovaných reflektoroch nevznikajú zrkadlové obrazy svetelného zdroja ako pri zrkadlových reflektoroch, ale uhol maximálnej svietivosti odrazeného svetelného zväzku odpovedá uhlu dopadu. Matované reflektory, rovnako ako zrkadlové, môžu byť kruhové, parabolické alebo eliptické a vyrábajú sa rotačne symetrické, korýtkové alebo asymetrické.

Používajú sa tam, kde je vyžadovaná štandardná presnosť usmernenia svetelného toku a kde je kladený dôraz na vytvorenie hladkej krivky svietivosti bez náhodných nepravidelností. Tieto reflektory vyrovnávajú a zjemňujú nepresnosti v rozložení svetla, ktoré môžu vzniknúť pri menej presnej výrobe zrkadlových reflektorov [2].



Obr. 1.2: Matovaný reflektor 2-2264-M, výrobca: Nata [6]

Difúzne reflektory

V difúznych reflektoroch je využívaný difúzny odraz, pri ktorom sa svetlo dopadajúce z ľubovoľného smeru rovnomerne rozptyľuje do všetkých smerov. Jas povrchu dokonalého difúzneho materiálu je preto vo všetkých smeroch rovnaký. Difúzne reflektory neumožňujú vytvorenie presne daného svetelného zväzku ako v prípade zrkadlových reflektorov a ich tvar má zanedbateľný vplyv na výslednú krivku svietivosti. Tvar krivky svietivosti sa blíži kosínusovému priebehu.

Difúzne reflektory sa používajú hlavne v svietidlách, ktoré sú určené na vytvorenie rovnomerne rozptýleného osvetlenia. Ich hlavnou úlohou býva usmernenie svetla zo svetelného zdroja do dolného polopriestoru na pracovnú rovinu.

Kvalita použitého materiálu na reflektor ovplyvňuje nielen výslednú účinnosť svietidla, ale tiež spektrálne zloženie odrazeného svetla. V prípade, ak je činiteľ odrazu výrazne spektrálne závislý, môže dôjsť k zmene farby vyžarovaného svetla [2].

1.3.2 Difúzory

Difúzory sú priesvitné materiály, ktoré menia priestorové rozloženie svetelného toku zdroja rozptylom prechádzajúceho svetla. Na výrobu difúzorov sa používa opálové sklo alebo priesvitné plasty, ako napríklad PS (polystyrén) alebo akrylát. Sklo aj plasty majú veľký stupeň rozptylu svetla a minimálne pohltenie. Difúzory a difúzne kryty okrem úpravy tvaru fotometrickej plochy svietivosti svietidla tiež znižujú jas svietidiel, čo je obzvlášť dôležité pri svietidlách, ktoré majú bodový svetelný zdroj s vysokým povrchovým jasom [2].

1.3.3 Refraktory a šošovky

Refraktory a šošovky sú optické časti svietidla, ktoré menia priestorové rozloženie svetelného toku lomom svetelných lúčov. Ich svetelnú účinnosť ovplyvňuje pohltenie svetla v celej hrúbke šošovky alebo refraktoru, odraz svetla na vonkajšej strane a odraz svetla na vnútornej strane.

V súčasnosti s nástupom svetelných diód výrazne stúpol dopyt po optických šošovkách. Svetelné diódy sú bodové svetelné zdroje s krivkou svietivosti, ktorá sa tvarom podobá difúznemu žiaríču. Vzhľadom na to, že v praxi sú požadované veľmi rozdielne krivky svietivosti, je potrebné upravovať rozloženie svetelného toku týchto bodových zdrojov. Najbežnejšie šošovky pre svetelné diódy vytvárajú rotačne-symetrickú plochu svietivosti, pri ktorej je svetelný tok koncentrovaný do užšieho svetelného zväzku. Tieto šošovky sa používajú napríklad v úzkouhlých svetlometoch. Pre iné oblasti použitia, napríklad v svietidlách pre osvetľovanie pozemných komunikácií, je požadované, aby optické šošovky rozšírili a výrazne zmenili charakter vyžarovania svetelnej diódy vo všetkých smeroch. Účinnosť šošoviek pre svetelné diódy sa pohybuje v rozsahu od 80 % do 90 %.

Refraktor je optický prvok, ktorý mení rozloženie svetelného toku lomom svetelných lúčov. Refraktory sa vyznačujú vysokou hodnotou činiteľa prestupu (až 85 %) a veľkým rozsahom možných úprav výslednej krivky svietivosti svietidla. Pri refraktoroch sa okrem lomu využíva aj tzv. úplný vnútorný odraz. Tento odraz vzniká tam, kde svetelný lúč dopadá na vnútornú stranu materiálu v uhloch väčších ako je tzv. medzný uhol. V tom prípade lúč neprejde von, ale odrazí sa naspäť do materiálu. Veľkosť medzného uhla závisí na materiáli, z ktorého je refraktor vyrobený. Pri skle a PMMA (polymetylmetakrylát) je medzný uhol 42° , pri PC (polykarbonáte) a PS je 39° .

Najpoužívanejším druhom refraktorov sú prizmatické kryty žiarivkových svietidiel. Dobre skonštruovaný prizmatický kryt vykazuje nízke hladiny jasu v smeroch, ktoré sa blížia horizontále aj napriek tomu, že svetelné zdroje osvetľujú vnútorné časti refraktorov dokonale rozptýleným svetlom. Z vnútornej strany sú tieto kryty hladké a

zvonku majú ihlanovú alebo kuželovú štruktúru. Výrobným materiálom prizmatických krytov je PS alebo akrylát [2].

1.3.4 Holografické optické prvky

Medzi najnovšie optické prvky, pri ktorých sa do budúca očakáva širšie uplatnenie v praxi, patria holografické optické prvky HOE (Holographic Optical Elements). Tieto prvky tvoria svetlo-priepustné materiály s reliéfnou mikroskopickou štruktúrou vytvorenou holografickým záznamom. Pri optických prvkoch ako sú šošovky alebo refraktory, je pre zmenu smeru svetelných lúčov využívaný ich lom na rozhraní materiálov. V prípade prvkov HOE sa smer lúčov mení ohybom pri prechode reliéfnou mikroskopickou štruktúrou. Na rozdiel od bežných optických členov sú holografické prvky ľahké a nevyžadujú presnú povrchovú úpravu.

Pri výrobe HOE sa na svetlocitlivý materiál s použitím laseru zaznamená na masky jemná holografická mikroštruktúra. Túto štruktúru je možné si predstaviť ako veľký súbor „mikroskopických šošoviek“. Získaný holografický záznam sa zo svetlocitlivého materiálu preniesie niekoľkostupňovým procesom na kovovú matricu (nikel, meď). Táto matrica sa následne v spojení napríklad s polygrafickou technikou používa pre sériovú výrobu holografických optických členov (fólie, dosky).

Významnou vlastnosťou holografických prvkov je to, že ich parametre pri vytváraní holografického záznamu je možné ovplyvňovať nastavením laseru. Tým môžeme získať svetelné zväzky s rôznymi tvarmi svetelných stôp – od rotačne-súmerných po eliptické s uhlami polovičnej svietivosti v rozsahu od $0,2^\circ$ do 80° .

Činiteľ prestupu holografických optických prvkov sa pohybuje v rozsahu od 85 % do 90 % a pre oblasť viditeľnej časti spektra je spektrálne nezávislý [2].

1.3.5 Tienidlá a kryty

Tienidlá a kryty sú svetelno-činné časti svietidiel z nepriesvitného alebo rozptylného materiálu. Ich účelom je zabránenie priamemu pohľadu na svetelný zdroj a obmedzenie priameho oslnenia. Clonenie môže pri svietidlách zaisťovať vlastná konštrukcia svietidla, alebo prídavné cloniace prvky [2].

1.3.6 Filtre

Filtre sú svetelno-činné časti svietidiel, ktoré môžu buď meniť spektrálne zloženie vyžarovaného svetla, alebo zmenšovať množstvo výstupného optického žiarenia. Pri výrobe filtrov sa používajú dva základné javy: absorpcia a interferencia. Absorpčné filtre prepúšťajú vybranú časť spektra a zvyšnú časť pohlcujú. Interferenčné filtre

vybranú časť svetla prepúšťajú a zvyšnú odrážajú. Z pohľadu funkcie a použitia sa filtre delia na:

farebné – prepúšťajú len určitú časť viditeľného spektra, zvyšná je odfiltrovaná,

konverzné – umožňujú meniť teplotu chromatičnosti svetla, ktoré vyžaruje zo svetelného zdroja na vyššiu alebo nižšiu hodnotu,

ochranné – používajú sa na odfiltrovanie zložiek UV a IR žiarenia, ktoré sú obsiahnuté v mnohých svetelných zdrojoch [2].

2 Ciele práce

Úvod práce je odborná rešerš, ktorá sa zaoberá všetkými časťami elektrických svietidiel, pričom dôraz je kladený najmä na elektrickú a svetelno-činnú časť. Jej cieľom je uviesť čitateľa do problematiky a ukázať mu možnosti, ktoré by mohli byť použité pri odstraňovaní nedokonalostí svietidla.

V ďalšej časti sa práca zaoberá aktuálne používaným svietidlom a analýzou nedostatkov, ktorými disponuje. Cieľom nasledujúcich simulácií je tieto nedostatky potvrdiť a určiť pravdepodobnú príčinu ich vzniku.

Pri pokračovaní bude kladený dôraz na splnenie ďalších cieľov, predovšetkým na:

- Návrh opatrení, ktoré predpokladajú odstránenie alebo eliminovanie nedostatkov aktuálne používaného svietidla.
- Určenie metódy, podľa ktorej bude prebiehať vyhodnocovanie výsledkov simulácií.
- Definovanie kritérií, na základe ktorých budú selektované vhodné optické prvky. Tieto optické časti budú súčasťou simulácií, pričom ich výstupom bude informácia, do akej miery môžu dostupné riešenia na trhu prispieť k zlepšeniu parametrov svietidla.
- Návrh vlastného optického prvku, jeho použitie v simulácii a zhodnotenie, či je v riešení problematiky prínosný viac ako optické prvky dostupné na trhu.
- Určenie vplyvu optiky, ktorá sa ukáže ako najviac prínosná pri použití v celom svietidle a overenie vybranej metódy. Porovnanie výsledného navrhnutého riešenia s aktuálne používaným svietidlom.

3 Aktuálne používané svietidlo

3.1 Účel a princíp

Svietidlo bolo skonštruované tak, aby bolo schopné osvetľovať pod rôznymi uhlami dopadajúceho svetla plochu, ktorá je snímaná priemyselnou kamerou. Optimálna vzdialenosť svietidla od snímanej plochy (pracovná vzdialenosť) závisí na tom, pod akým uhlom má svetlo na snímanú plochu dopadať, preto veľkosť svietidla priamo súvisí s jeho vzdialenosťou od snímanej plochy. Podľa aktuálnej veľkosti svietidla sa uvažuje pracovná vzdialenosť v rozsahu od 100 mm do 200 mm. Predpokladá sa, že v budúcnosti môže dôjsť k zväčšeniu rozmerov svietidla a teda aj zmene pracovnej vzdialenosti.



Obr. 3.1: Sekčné LED svietidlo, výrobca: SANEZOO [7]

Kamera, ktorá fotí danú oblasť je umiestnená v strede svietidla a je nasmerovaná kolmo na plochu, ktorú sníma. Svietidlo rozsvetľuje jednotlivé LED svetelné zdroje a tým osvetľuje plochu pod rôznymi uhlami. Kamera zaznamená vždy jeden snímok pri jednej rozsvietennej LED. Pre správnu funkčnosť celého systému je dôležité, aby pri rozsvietení každého jednotlivého svetelného zdroja bola snímaná plocha osvetlená čo najrovnomernejšie. Ak bude osvetlenie na ploche rovnomerné, tak je možné dosiahnuť vysokú kvalitu výstupných fotiek, ktoré sú ďalej spracované.

3.2 Časti svietidla

3.2.1 Konštrukčná časť

Keďže sa jedná o svietidlo určené do priemyselného prostredia, v prípade nosnej a ochrannej konštrukcie je použitým materiálom hliník. Hliníkové časti sú vyrobené frézovaním. Materiál konštrukcie pôsobí aj ako pasívny chladič a zabezpečuje dostatočný odvod tepla od svetelného zdroja a elektrickej časti svietidla. Ochranná konštrukcia je určená k mechanickej ochrane svietidla, k zaisteniu bezpečnosti prevádzky a slúži tiež ako zábrana proti vniknutiu vlhkosti, vody, prachu, nečistôt alebo hmyzu do optických častí.

Čelná strana svietidla (z ktorej svetlo vyžaruje) je osadená priesvitným difúzorom z plexiskla. Ten plní svetelno-technickú funkciu. Kryt je súčasťou ochrany svietidla proti mechanickej poškodeniu elektrických častí a svetelných zdrojov a rovnako plní funkciu difúzora – rozptyľuje dopadajúce svetlo z LED.

Z hľadiska nosnej konštrukcie sa svietidlo upevňuje na hliníkový profil, ktorý má tvar písmena „U“. Ten je ďalej možné upevniť prostredníctvom skrutiek M5 podľa požiadaviek danej aplikácie. Povrch všetkých hliníkových častí je eloxovaný načierno s cieľom eliminovania odrazu svetla od konštrukcie.

3.2.2 Elektrická časť

Elektrické komponenty svietidla obsahujú výkonovú a riadiacu časť. Všetky prvky elektrickej časti, vrátane pripojovacích konektorov, sú kvôli spoľahlivosti umiestnené na DPS (doska plošných spojov). Použité elektrotechnické súčiastky sú typu SMD (súčiastka pre povrchovú montáž). Rovnako je to aj so svetelnými zdrojmi typu SMD LED. Tým je odstránené riziko poškodenia vodičov v prípade nadmerných vibrácií, ktoré na svietidlo počas jeho prevádzky môžu pôsobiť. Výkonová časť zabezpečuje okrem napájania riadiacej časti tiež napájanie jednotlivých svetelných zdrojov. Vzhľadom na to, že sa jedná o prúdové impulzy až do hodnoty 2000 mA a doba osvetlenia svetelného zdroja je rádovo v desiatkach ms, sú na výkonovú časť kladené vysoké nároky. Riadiaca časť sa stará o nastavovanie prúdových impulzov a synchronizáciu svietidla s fotením kamery.

Prostredníctvom priemyselného konektora M12 sa svietidlo pripája na priemyselnú zbernicu RS-485, cez ktorú je ovládané. Zbernica disponuje zároveň napätím 24 V, ktoré zabezpečuje napájanie svietidla.

3.2.3 Svetelno-činná časť

Ako svetelný zdroj sú v svietidle použité LED diódy práve kvôli rýchlemu nábehu na nominálnu hodnotu svetelného toku a tiež kvôli okamžitému zhasnutiu v dobe, kedy svetelným zdrojom neprechádza elektrický prúd. Ich výhodou je aj možnosť regulácie svetelného toku LED nastavovaním prúdu, ktorý má tiecť konkrétnym svetelným zdrojom.

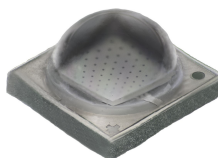
Na svetelnom zdroji typu SMD LED sa priamo nenachádza žiadna dodatočná optika. Svetelný tok vyžiarený svetelným zdrojom dopadá na priesvitný difúzor z plexiskla, kde dochádza k rozptylu svetla. Použitie difúzora má za úlohu:

- upraviť dopadajúce svetlo tak, aby sa nejavilo ako vyžiarené bodovým svetelným zdrojom,
- čo najviac rovnomerne rozptýliť osvetlenosť detekovanej plochy.

DPS, na ktorej sú umiestnené LED, má čiernu farbu kvôli pohlteniu odrazených lúčov z difúzora. Je tým zabezpečené to, že oblasť, ktorá je predmetom snímania kamery, nebude nasvietená z viacerých strán súčasne, čo by mohlo mať nepriaznivý vplyv na kvalitu výstupných fotiek z kamery.

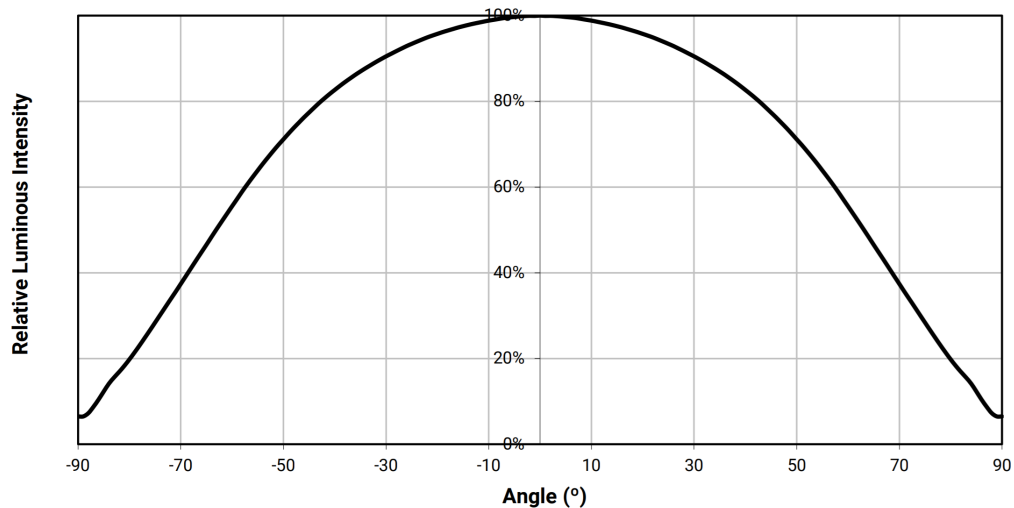
3.2.4 Zdroj svetla

V svietidle je použitých niekoľko desiatok vysokosvietivých LED svetelných zdrojov. Výrobcom tohto zdroja je americká spoločnosť CREE, ktorá dlhodobo patrí medzi popredných výrobcov polovodičových súčiastok a LED.



Obr. 3.2: LED XLamp XP-G3 Royal Blue, výrobca: CREE [8]

Použité vysokosvietivé SMD LED CREE XLamp XP-G3 v prevedení Royal Blue (ďalej len „XP-G3“) majú veľkosť (3,45 × 3,45) mm. Tento typ je špecifický práve úzkym vyžarovacím spektrom vlnových dĺžok, čo je uvedené spolu s ostatnými parametrami v tab. 3.1. Jej vyžarovacie spektrum sa nachádza na okraji viditeľného spektra, pri ultrafialovej oblasti a obsahuje vlnové dĺžky v rozsahu od 440 nm do 455 nm (modrá časť viditeľného spektra). Vyžarovacia charakteristika tejto LED je zobrazená na obr. 3.3.



Obr. 3.3: Vyžarovacia charakteristika LED XP-G3 [8]

Tab. 3.1: Parametre LED XP-G3

Veličina	Hodnota	Jednotka
Vlnová dĺžka	440–455	nm
Min. žiarivý tok (pri prúde 350 mA)	730	mW
Max. žiarivý tok (pri prúde 350 mA)	780	mW
Vyžarovací uhol	130	°
Max. prípustný DC prúd	2 000	mA
Max. prípustné napätie	3,2	V

3.3 Simulácia aktuálneho stavu

3.3.1 Softvér TracePro™

TracePro™ je softvér spoločnosti Lambda Research prvýkrát predstavený v roku 1996. Slúži na detekovanie rozptýleného svetla v optických systémoch prostredníctvom simulačnej metódy *ray tracing* (sledovanie lúčov). Metóda spočíva v manuálnom sledovaní lúčov svetla optickým systémom a počítaní uhla lomu a odrazu na každom povrchu. Lúče môžeme považovať za prúd fotónov vychádzajúcich zo zdroja svetla, ktoré sa ďalej šíria smerom k plochám v celom optickom systéme. Táto metóda je mimoriadne užitočná v systémoch s mnohými plochami, kde gaussovské a newtonovské zobrazovacie rovnice nie sú vhodné vzhľadom na stupeň ich zložitosti.

Softvér umožňuje užívateľovi vypočítať žiarivý tok, ktorý sa šíri modelom, ale tiež analyzovať rozptýlené svetlo a osvetlenie v rámci optických systémov. TracePro™ pri výpočtoch zohľadňuje absorpciu, zrkadlový odraz, lom svetla, rozptyl a difrakciu.

Výstupom softvéru môžu byť napríklad grafy hustoty žiarivého toku alebo vyžarovacia charakteristika. Výsledky je možné zobrazíť okrem dát v tabuľke aj prostredníctvom obrysových máp.

TracePro™ je profesionálny nástroj v oblasti modelovania kompletných osvetľovacích systémov, ale aj optických častí ako napríklad šošoviek, reflektorov, svetlovodov a mnohých ďalších [9, 10].

3.3.2 Softvér Ansys SPEOS

SPEOS je nástroj spoločnosti Ansys, ktorý slúži na simulovanie (predpovedanie) osvetlenia a optického výkonu svetelných systémov. Kombinuje možnosti analýzy svetla s vyhodnotením osvetlenia v celom elektromagnetickom spektre (od UV až po vlnové dĺžky blízke IR žiareniu). Umožňuje optimalizáciu pri modelovaní svetelného výkonu za pomoci rozsiahlych knižníc, ktoré obsahujú nielen špecifikácie materiálov, ich povrchov a textúr, ale aj rozsiahlu databázu svetelných zdrojov a šošoviek.

Prostredníctvom nástroja SPEOS je možné analyzovať interakciu fotónov vzhľadom na mechanické geometrické tvary a tým vytvoriť funkčný osvetľovací systém. Na základe modelovania, simulácie a optimalizácie svetelných systémov je možné získať obraz o tom, ako sa svetlo v danom optickom systéme šíri. Rovnako je možné predpovedať, v ktorých miestach dochádza k rozptýleniu, rovnomernému rozloženiu, alebo k zhlukovaniu intenzity osvetlenia v rozsahu viditeľného spektra.

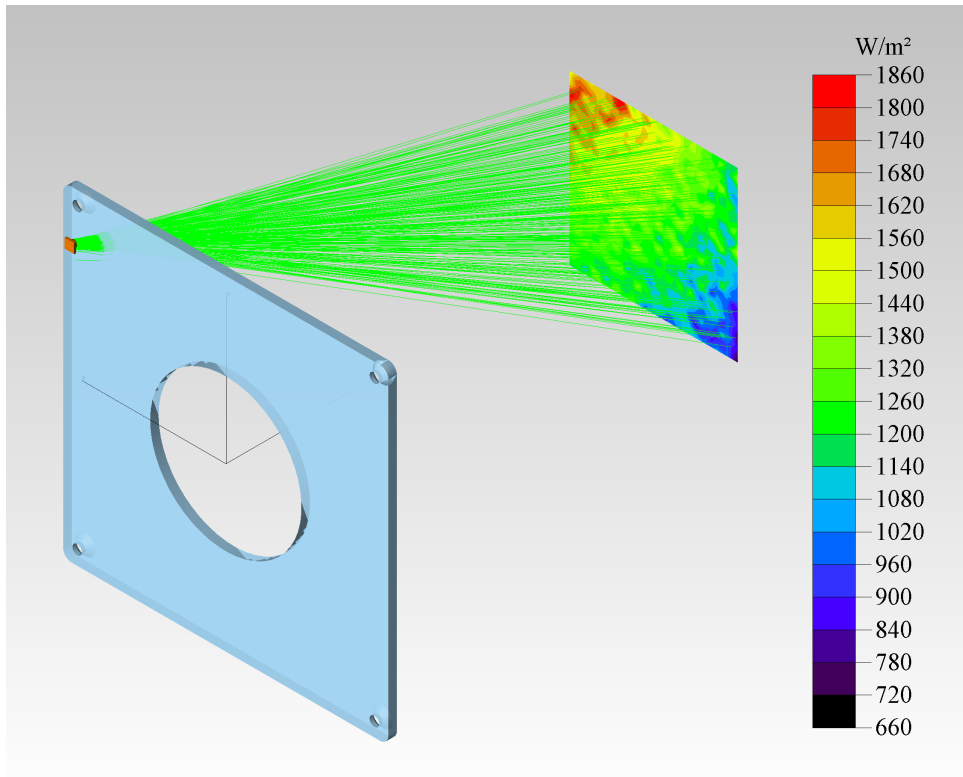
SPEOS na rozdiel od nástroja TracePro™ disponuje intuitívnym a komplexným užívateľským rozhraním, ktoré značne uľahčuje prácu s optickými objektami. Okrem toho obsahuje nástroje, pomocou ktorých je možné definovať optické vlastnosti povrchu alebo materiálu, ktorý bude pri simulácii použitý [11].

3.3.3 Scéna a parametre simulácie

Pre čo najvernejšie analyzovanie aktuálneho stavu dopadajúceho svetla na detekovanú plochu bola vykonaná simulácia scény v programe TracePro™. Cieľom bolo zistiť súčasné svetelné podmienky (rozloženie a priemerná hustota žiarivého toku) na ploche, ktorá bude snímaná kamerou.

Plocha má štvorcový tvar o veľkosti (60 × 60) mm. Od svietidla (difúzneho krytu) je vzdialená 150 mm a je kolmá na os Z, ktorá prechádza stredom svietidla. Za difúznym krytom je ako svetelný zdroj zvolená vysokosvietivá LED XP-G3. Pri simulácii aktuálneho stavu je uvažované najviac problematické umiestnenie svetelného zdroja (najďalej od osi Z, v rohu svietidla) vzhľadom na plochu, na ktorú má svetlo dopadať. Z tohto svetelného zdroja je náročné rovnomerne osvietiť detekovanú plochu. Pre kamerový systém je nasvietenie pod čo najväčším uhlom od kolmice veľmi kľúčovým kvôli dosiahnutiu relevantného výstupu z kamery.

Počet lúčov pri simulácii bol nastavený na 1 milión. Simulácia bola realizovaná s použitím optického modelu svetelného zdroja, ktorý je voľne dostupný na webových stránkach spoločnosti CREE.



Obr. 3.4: Scéna simulovania svetelných podmienok v programe TracePro™

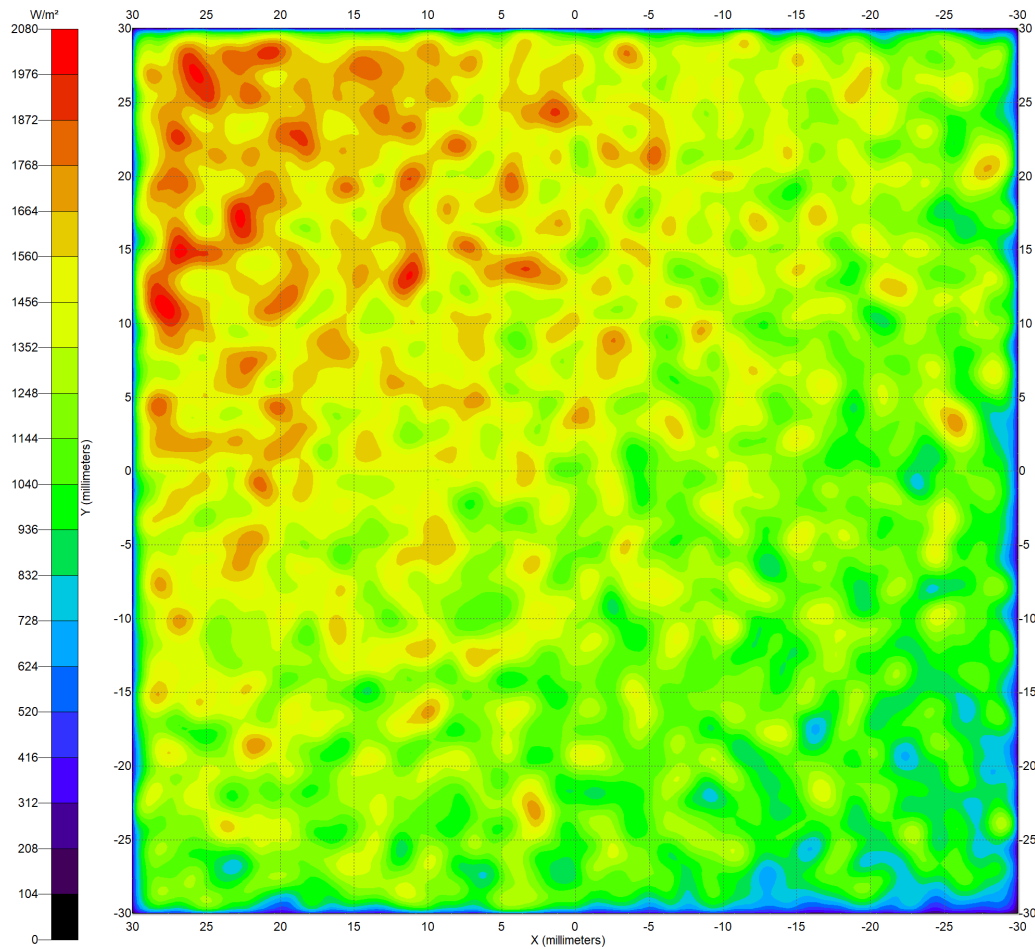
3.3.4 Výsledky simulácie v programe TracePro™

Aj napriek použitiu vysokosvietivej LED diódy s veľkou svetelnou účinnosťou boli na základe simulácie v programe TracePro™ potvrdené dva najväčšie nedostatky svietidla:

- nerovnomerné rozloženie hustoty žiarivého toku na tejto ploche,
- nedostatočná hustota žiarivého toku dopadajúca na okrajové časti analyzovanej plochy.

Príčinou vzniku týchto nedostatkov je absencia optiky (šošovka alebo reflektor) ihneď za LED svetelným zdrojom. Vyžiarený svetelný tok nie je usmernенý a následkom toho sa jeho časť od krycieho skla odrazí do iného ako požadovaného smeru, čo znižuje svetelnú účinnosť celého svietidla.

Výstupom simulačného nástroja TracePro™ sú okrem vizualizovania rozloženia hustoty žiarivého toku na detektore (obr. 3.5) aj informácie o hraničných hodnotách intenzity žiarenia. Tie sú uvedené v tab. 3.2.



Obr. 3.5: Rozloženie hustoty žiarivého toku pri simulácii v programe TracePro™

Jediným optickým prvkom medzi LED svetelným zdrojom a plochou, na ktorú dopadá svetelný tok, je plexisklo z PMMA. Jeho použitie so sebou prináša aj niekoľko nevýhod, ako napríklad to, že značnú časť svetelného toku pohltí a tým zabráni jeho dopadu na snímanú plochu, alebo že sa od neho svetelné lúče odrazia späť do svietidla. Vplyv difúzora na rozloženie osvetlenosti na detektore je popísaný v ďalšej časti tejto práce.

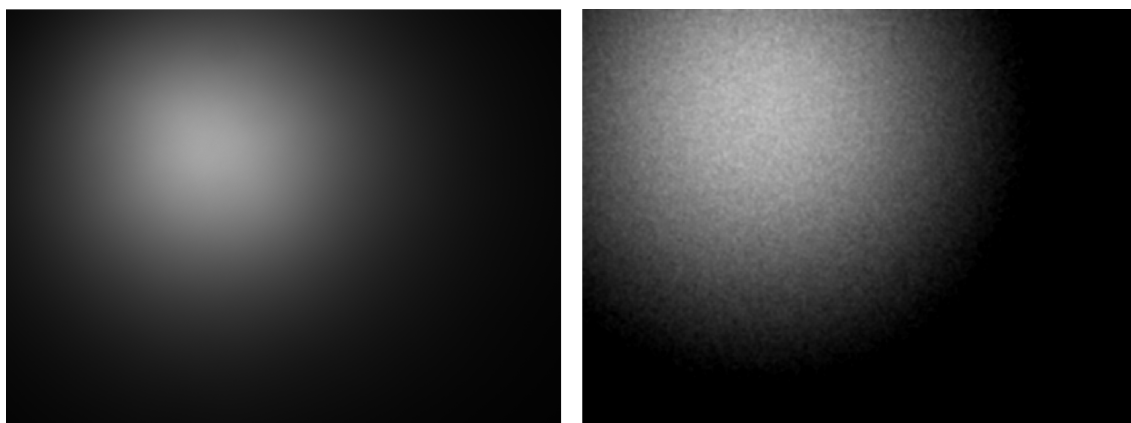
Tab. 3.2: Výstupné hodnoty intenzity žiarenia I (W/m^2) získané simuláciou v programe TracePro™

Intenzita žiarenia	Hodnota	Jednotka
Minimálna	290,6	W/m^2
Maximálna	2066,1	W/m^2
Priemerná	1291,2	W/m^2

3.3.5 Vplyv difúzora na osvetľovanú plochu – SPEOS

Difúzor svetidla je vyrobený z PMMA a má matný povrch. Optické vlastnosti tohto difúzora nie sú známe a preto neboli uvažované ani v predchádzajúcej simulácii v programe TracePro™. Výhodou programu SPEOS je, že obsahuje nástroj *Simple Scattering Surface Editor*, ktorý umožňuje definovať optické vlastnosti povrchu materiálu. Dôvodom použitia tohto nástroja je okrem priblíženia simulácie skutočným podmienkam aj analýza optických vlastností používaného difúzora.

To, ako difúzor svetelné lúče rozptyľuje je najlepšie viditeľné pri reálnom použití a snímaní konkrétnej plochy. Z tohto dôvodu vychádzame z reálne odfoteného snímku dopadajúceho svetla na sivú matnú podložku (obr. 3.6 vľavo).



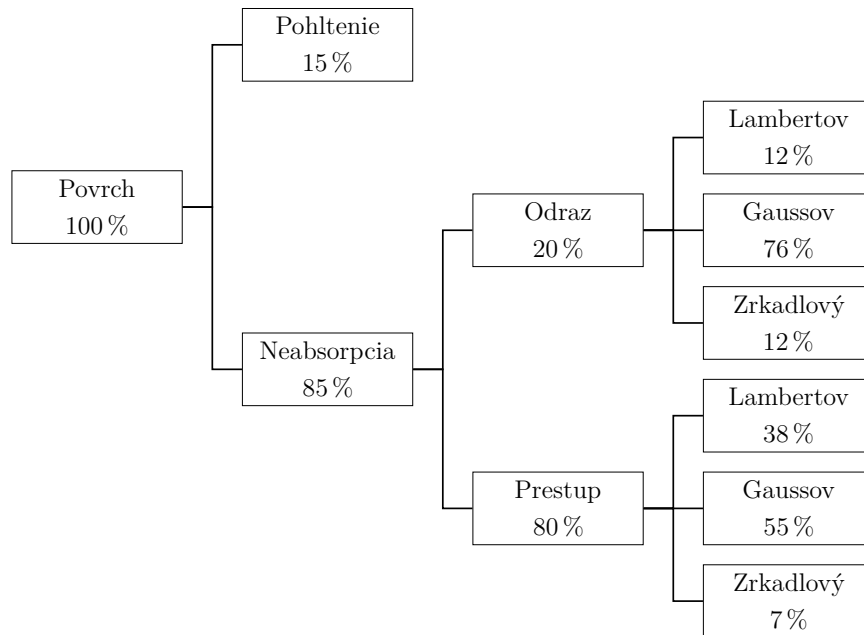
Obr. 3.6: Porovnanie skutočných svetelných podmienok (vľavo) a simulácie (vpravo) pri použití difúzora

Rovnako ako pri predchádzajúcej simulácii v programe TracePro™, aj pri tejto v SPEOS-e sa predpokladá, že osvetlenosť plochy je najmenej rovnomerná práve vtedy, keď je rozsvietená LED pozicovaná najďalej od stredu svetidla. V našom prípade je táto LED vzdialená od stredu svetidla 67 mm. Je dôležité, aby sa navrhnutá scéna v simulácii čo najviac podobala skutočnosti. Kľúčovým aspektom je zachovanie identickej vzdialenosti svetidla od detektora aj v simulácii, aj pri fotení kamerou v reálnych podmienkach. Rovnako je potrebné dodržať veľkosť detektora. Ten reprezentuje zorné pole kamery – FOV. Zväčšenie FOV kamery (a teda aj detektora) bolo vykonané za účelom získania viac relevantného výstupu, ktorý je pri väčšej ploche jednoduchšie porovnať s výstupom dosiahnutým simuláciou.

V tejto scéne je svetidlo od detektora vzdialené 150 mm. Detektor je obdĺžniková plocha s veľkosťou (240 × 180) mm. Analýza prebiehala tak, že vlastnosti povrchu sa v editore po každej simulácii upravili a takto získané výsledky boli porovnané s fotkou z kamery. Postup simulácie prebiehal s použitím optického modelu LED získaného z webovej stránky výrobcu CREE. V SPEOS-e bolo počas každej simulácie

nastavených 10 miliónov lúčov. Aby sa podarilo dosiahnuť čo najjemnejšie rozloženie osvetlenosti na detektore a plynulý prechod od viac nasvietenej oblasti, k menej nasvietenej, bolo nastavené rozlíšenie detektora na 0,5 mm. Výsledkom je gradient osvetlenosti v simulácii, ktorý je podobný ploche odfoťenej kamerou, čo je možné vidieť na obr. 3.6.

Tento výsledok simulácie sa podarilo dosiahnuť tým, že povrchu difúzoru z PMMA boli v editore definované nasledovné optické parametre:

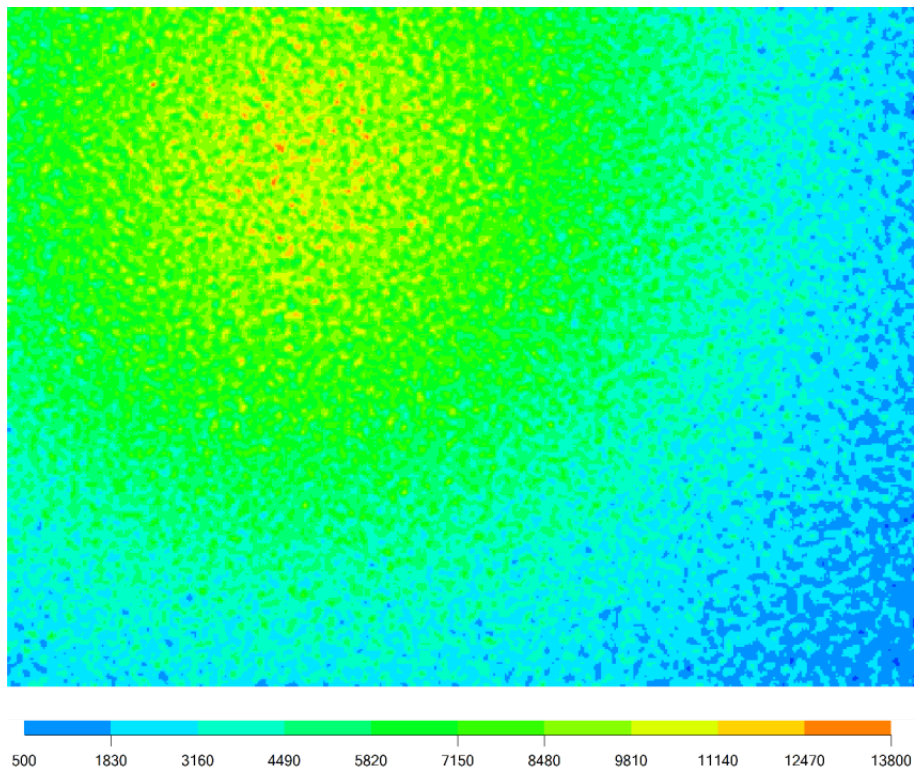


Obr. 3.7: Výsledné optické parametre difúzora nastavené v nástroji SPEOS

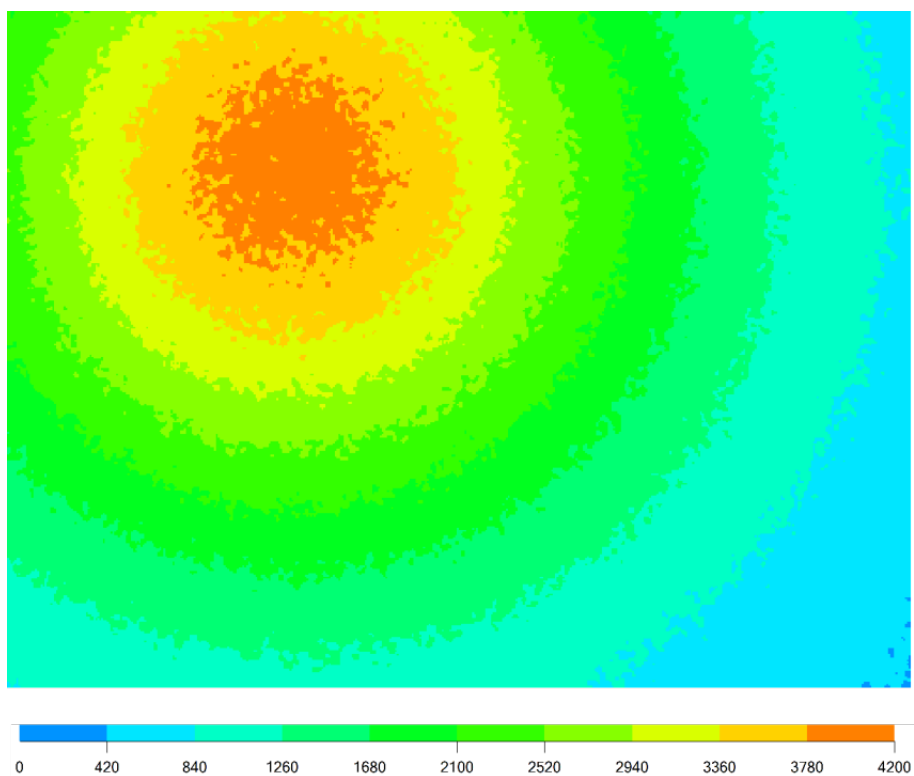
Výstup simulácie potvrdil, že difúzor nedokáže rozložiť osvetlenosť na ploche tak, aby bola v každom mieste detektora aspoň približne rovnaká. Z porovnania na obr. 3.6 je zrejmé, že svetelný zdroj osvieti s vysokou intenzitou len časť detektora. Zvyšné oblasti sú osvetlené nedostatočne.

Keďže difúzor má na rovnomernosť osvetlenosti malý vplyv, bola dodatočne vykonaná simulácia (s rovnakou scénou), ktorej cieľom bolo poukázať na rozdiely pri osvetľovaní plochy bez použitia difúzoru a s jeho použitím. Odozva detektora je v prípade jeho priameho nasvietenia bez použitia difúzoru zobrazená na obr. 3.8.

Ak nepoužijeme difúzor a plochu detektora osvetľujeme priamo svetelným zdrojom, podľa simulácie bude rozloženie osvetlenosti rovnaké ako na obr. 3.8. Na ňom môžeme pozorovať oblasti, v ktorých je premenlivá intenzita osvetlenia aj na veľmi malej ploche. Ak nad svetelný zdroj umiestnime difúzor, tak tieto malé plochy, na ktorých dochádza k výraznej zmene intenzity osvetlenosti, zmiznú. Prekrytie svetelného zdroja difúzorom vplýva okrem zmeny rovnomernosti čiastkových oblastí (ktoré sú



Obr. 3.8: Rozloženie osvetlenosti E (lx) na detektore bez difúzora



Obr. 3.9: Rozloženie osvetlenosti E (lx) na detektore s použitím difúzora

potom nasvecované viac rovnomerne) aj na výsledný pokles osvetlenosti celej plochy. Výsledok takejto simulácie ukazuje obr. 3.9.

Na základe týchto simulácií môžeme predpokladať, že použitie difúzora dokáže do istej miery eliminovať nedostatky svetelného zdroja a zabezpečiť rovnomernejšie osvetlenie oblasti. Ide ale o oblasť, ktorú by svetelný zdroj osvetľoval bez ohľadu na to, či by bol zakrytý difúzorom, alebo nie.

Pri použití difúzora je nevyhnutné brať ohľad aj na to, že časť svetla zo zdroja je odrazená znovu do svietidla a ďalšiu časť pohltí difúzor. Je potrebné dôkladne zvážiť, či tieto straty v pohltení difúzorom sú prijateľné, alebo je pre výsledok dôležitá každá časť vyžiarenej energie zo zdroja. Ak porovnáme stupnicu na obr. 3.8 a obr. 3.9, zistíme, že pri simulácii s použitím vytvoreného difúzora bola znížená intenzita osvetlenia detektora na celej jeho ploche približne trojnásobne.

4 Návrh riešenia

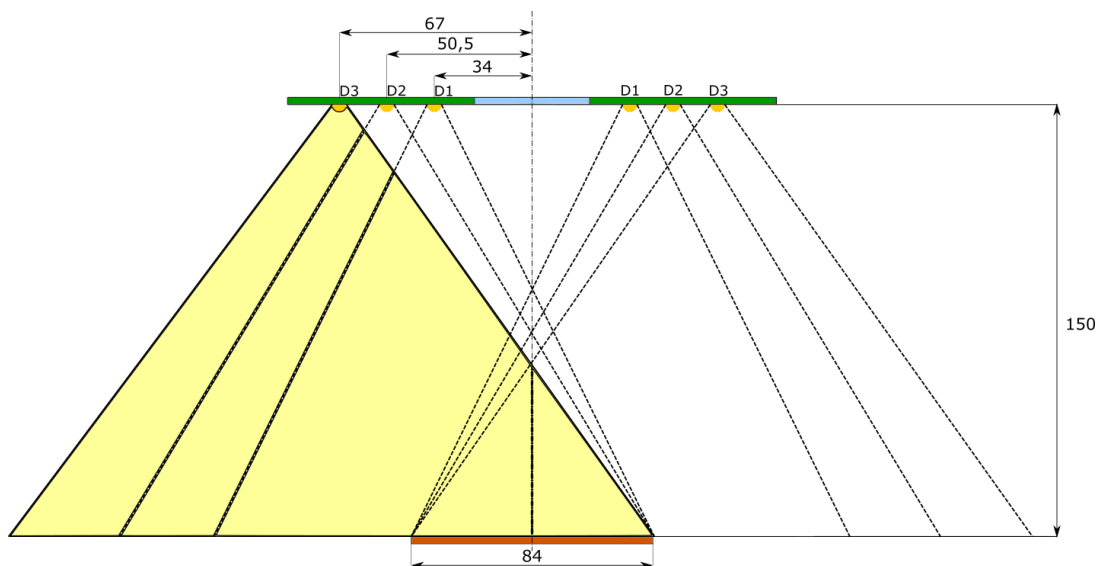
4.1 Použitie optických prvkov dostupných na trhu

Ak chceme potlačiť alebo odstrániť nedostatky, ktorými svietidlo disponuje, jedným z možných riešení je výber optických prvkov bežne dostupných na trhu. Vzhľadom na to, že v svietidle je použitá vysoko-svietivá LED dióda špičkovej technológie, je potrebné tomu prispôbiť aj výber optických častí. Trh s optickými prvkami pre svetelné zdroje typu LED je v súčasnosti rozsiahly a môže byť náročné orientovať sa v ňom. Medzi popredných výrobcov patrí napríklad spoločnosť LEDiL alebo Carclo Optics.

Okrem širokého portfólia produktov sa títo výrobcovia od konkurenčných líšia najmä v tom, že disponujú rozsiahlou databázou nameraných alebo simulovaných kriviek svetivosti ich produktov vzhľadom na konkrétny svetelný zdroj. Výber optickej časti s požadovanými vlastnosťami je preto efektívny práve kvôli tomu, že je pri ňom možné pracovať s relevantnými a veľmi presnými informáciami, ktoré môžu byť špecifické pre každý svetelný zdroj.

4.1.1 Kritériá výberu

Pri výbere optického prvku je potrebné, aby bol stanovený cieľ, ktorý sa jeho použitím snažíme dosiahnuť. V našom prípade ide o čo najviac uniformné osvetlenie plochy, pri ktorej je špecifické to, že sa nenachádza priamo pod svetelným zdrojom.



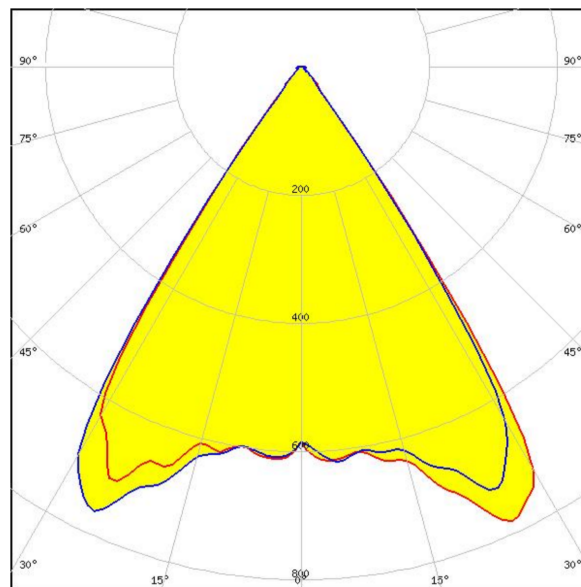
Obr. 4.1: Umiestnenie svetelného zdroja v súvislosti s nasvecovanou plochou

Vzhľadom na to, že svetelné zdroje (D1, D2, D3) umiestnené v svietidle v skutočnosti nie sú od stredu svietidla vzdialené rovnomerne, budeme uvažovať okrajové vzdialenosti a strednú vzdialenosť medzi nimi od osi Z svietidla, ktorá smeruje kolmo na osvetľovanú plochu, ako je znázornené na obr. 4.1.

Krivka svietivosti

V prípade nerovnomerne rozloženého svetelného toku do rôznych smerov priestoru je potrebné okrem hodnoty úhrnného svetelného toku poznať aj priestorovú hustotu svetelného toku v rôznych smeroch, t.j. svietivosť zdroja, svietidla alebo použitej optiky v týchto smeroch. Svietivosť je definovaná len pre bodový zdroj – ktorého vyžarovacia plocha má zanedbateľné rozmery v porovnaní so vzdialenosťou kontrolného bodu od vrcholu priestorového uhla.

Ak sa zistia hodnoty svietivosti vo všetkých smeroch priestoru a nanesú sa priestorovo od svetelného stredu zdroja ako rádiusvektory, spojením všetkých koncových bodov týchto rádiusvektorov dostaneme fotometrickú plochu svietivosti. Obvykle postačuje poznať len niektoré rezy touto plochou, konkrétne rovinami, ktoré prechádzajú bodovým zdrojom. V rovinách rezu potom získame čiary (krivky) svietivosti v polárnych súradniciach. Počiatok diagramu svietivosti sa umiestňuje do svetelného stredu zdroja. Základný smer krivky svietivosti, od ktorého sa merajú uhly, sa obvykle umiestňuje do smeru normály k hlavnej vyžarovacej ploche svetelného zdroja. Krivky svietivosti sa získavajú meraním na goniofotometroch.



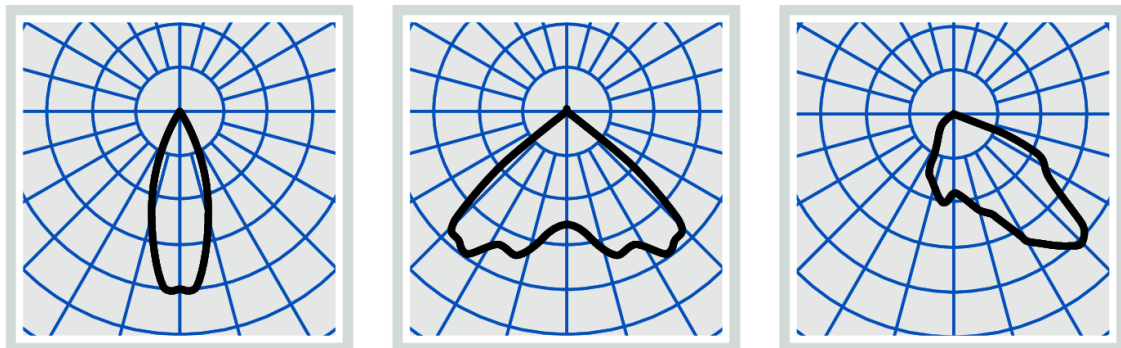
Obr. 4.2: Príklad krivky svietivosti optického prvku VIOLETTA v polárnych súradniciach, výrobca: LEDiL [12]

Hodnoty svietivosti uvádzané pri krivkách svietivosti sú buď v absolútnych jednotkách (cd) alebo v pomerných (cd/1000 lm). Väčšinou sú krivky svietivosti zobrazované v polárnych súradniciach, ktoré vytvárajú lepšiu predstavu o vyžarovaní. Zobrazenie krivky svietivosti v kartézskych súradniciach je menej časté, ale je vhodnejšie pre presnejšie odčítanie hodnôt svietivosti [2, 13].

Tvar krivky svietivosti

Pre orientačný popis vyžarovania svetelného zdroja alebo použitej optiky sú krivky svietivosti uvádzané len vo vybraných polrovinách. Pri rotačne súmernom vyžarovaní, pri ktorom je tvar krivky svietivosti vo všetkých polrovinách zhodný, je vyžarovanie popísané iba jednou krivkou svietivosti v polrovine C0. Pri súmernom vyžarovaní podľa dvoch rovín sú krivky svietivosti uvádzané v rovinách C0–C180 a C90–C270.

Reflektory a šošovky dostupné na trhu, ktoré sa viažu na konkrétny svetelný zdroj LED XP-G3, výrobcovia rozdeľujú aj na základe kriviek svietivosti do 3 kategórií podľa ich tvaru: úzke, široké a asymetrické. Vzďialenosť a vychýlenie svetelných zdrojov od plochy, ktorá má byť homogénne osvetľovaná (podľa obr. 4.1) vymedzuje možnosti použitia optických častí na tie so širokou alebo asymetrickou krivkou svietivosti. Tvar krivky svietivosti bol základným kritériom, podľa ktorého boli volené optické časti pre simulácie [2, 13].



Obr. 4.3: Typy kriviek svietivosti (zlava úzka, široká, asymetrická) [14]

Vyžarovací uhol – FWHM

Vyžarovací uhol (označovaný aj ako plná šírka v polovici maxima alebo uhol polovičnej svietivosti), popisuje šírku difrakčného maxima na krivke alebo funkcii. Je daný vzdialenosťou dvoch bodov na krivke, pri ktorej funkcia dosiahne polovicu svojej maximálnej hodnoty.

Pri tvare krivky svietivosti v kartézskych súradniciach tento údaj vymedzuje oblasť, v ktorej sa bude nachádzať maximálna svietivosť zdroja. V prípade, ak je

vyžarovací uhol definovaný dvomi odlišnými hodnotami uhlov (napr. FWHM 40×20), intenzita osvetlenia na ploche bude mať obdĺžnikový alebo oválny tvar [15].

Rozmery a spôsob montáže

Vo výbere optickej časti boli uprednostňované optické vlastnosti nad rozmerovými. Je to z toho dôvodu, že v budúcnosti môže na základe výsledkov svetelných simulácií dôjsť k dodatočným zmenám v konštrukčnej časti svietidla. Táto zmena sa môže týkať vzájomného rozmiestnenia a počtu LED svetelných zdrojov alebo úpravy veľkosti svietidla.

Spôsob montáže (napr. prilepenie na DPS alebo priskrutkovanie) rovnako ako rozmery optiky na jej výber nemali vplyv. Dôvodom je to, že výsledné riešenie môže mať podobu vlastného optického dielu, ktorý by v budúcnosti mohol byť mechanicky upevnený napríklad o konštrukčnú časť svietidla.

Rovnomernosť osvetlenia plochy

Pri rovnomernosti osvetlenia plochy sa vyžaduje použitie svetelného zdroja s takou optikou, ktorá bude mať nielen širokú krivku svietivosti v smere, ktorý je potrebné osvetliť, ale bude mať aj čo najviac rovnomerný rozptyl svetla, ktorý na danú plochu dopadne. Je potrebné zvoliť optiku, ktorá dostatočne osvieti aj najvzdialenejší bod plochy, ktorú pri simulácii analyzujeme.

Rovnomernosť osvetlenia je možné vyjadriť ako pomer medzi minimálnou a priemernou hodnotou intenzity osvetlenia (4.1), alebo pomer medzi minimálnou a maximálnou hodnotou intenzity osvetlenia (4.2) plochy v danom priestore. Čím je pomer medzi týmito intenzitami bližšie k 1, tým je plocha rovnomernejšie osvetlená.

$$U_1 = \frac{E_{min}}{E_{avg}} \quad (-; lx, lx) \quad (4.1)$$

$$U_2 = \frac{E_{min}}{E_{max}} \quad (-; lx, lx) \quad (4.2)$$

V našom prípade je pre porovnanie rovnomernosti vhodnejšie použitie vzťahu 4.1, pretože priemerná hodnota intenzity osvetlenia je pri simulácii presnejšia ako maximálna. Preto postačuje, ak poznáme minimálnu a priemernú intenzitu osvetlenia [16].

Optické prvky pre simulácie

Na základe kriviek svietivosti a vyžarovacích uhlov, ktoré sú udávané výrobcami, boli zvolené optické prvky uvedené v tab. 4.1. V tejto tabuľke sú uvedené aj ďalšie parametre, ktoré výrobcovia uvádzajú a môžu mať vplyv na výstup simulácie.

Tab. 4.1: Parametre optických prvkov vybratých pre simulácie

Výrobca	Označenie	FWHM (°)	Priemer (mm)	Materiál šošovky
Carclo Optics	10415	48 × 29	10	PC
Carclo Optics	12763	155 × 89	25	PMMA
Carclo Optics	10627	113	20	PC
Carclo Optics	12813	48	25	PMMA
Carclo Optics	12815	77	25	PMMA
LEDiL	FA15480	74	22	PC
LEDiL	C15246	73	14	PMMA
LEDiL	FA11904	76	16	PMMA
LEDiL	FP16562	61	10	PMMA
LEDiL	CA16308	–	32	PMMA
LEDiL	C13413	74	40	PMMA

4.1.2 Postup a nastavenie simulácie

Vstupné dáta

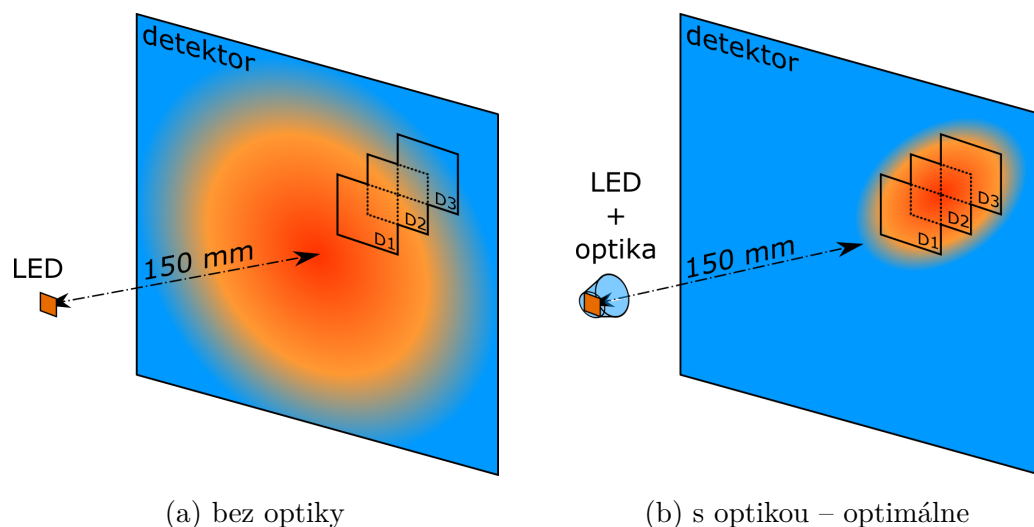
Aby výstup simulácie popisoval skutočnosť a bol čo najpresnejší, je potrebné pri simulácii zohľadniť všetky podnety, ktoré na výpočet môžu mať vplyv. Aj napriek tomu sa výsledky oproti skutočnosti môžu mierne líšiť. V tomto prípade je potrebné zabezpečiť predovšetkým:

- scénu, ktorá sa pri zmene optiky nemení (napr. poloha svetelného zdroja vzhľadom na detektor),
- presné modely optických prvkov,
- optický model svetelného zdroja,
- charakteristiky použitých materiálov (index lomu).

Popis scény

Základom je umiestnenie svetelného zdroja do vzdialenosti 150 mm od detektora. Svetelným zdrojom je LED XP-G3. Detektorom je štvorcová plocha s veľkosťou (300 × 300) mm. Veľkosť dopadajúcej intenzity osvetlenia sa bude merať v troch oblastiach. Na obr. 4.4 sú tieto oblasti označené ako D1, D2, D3.

Celková plocha detektora je oproti analyzovanej oblasti väčšia z toho dôvodu, aby bolo možné vidieť rozloženie intenzity osvetlenia aj mimo oblastí, ktoré sú predmetom merania. Tým získame lepšiu predstavu o vplyve tvaru krivky svietivosti na rozloženie intenzity osvetlenia na detektore.



Obr. 4.4: Scéna bez optiky a optimálne rozloženie osvetlenosti na detektore pri jej použití

Na takto navrhnutej scéne bola vykonaná simulácia vybraných optických prvkov uvedených v tab. 4.1. Zmena pri simulovaní každej optiky sa týkala len nahradenia 3D modelu a upravenia jeho pozície voči LED. Pri simulovaní optiky s asymetrickou krivkou svietivosti bola upravená aj jej rotácia, aby najväčšia časť svetelného toku dopadala na analyzované plochy.

Poloha optiky a svetelného zdroja

V prvej časti bolo potrebné pre každý vybraný optický prvok, rovnako ako pre LED, zabezpečiť 3D model. Spoločnosť Carclo Optics ponúka 3D modely ich portfólia voľne na stiahnutie z ich webovej stránky, pri optikách LEDiL je potrebné požiadať výrobcu o zaslanie 3D modelu.

Pre simulácie boli všetky použité 3D modely vo formáte .STEP. Spoločnosť Carclo Optics pri niektorých optikách ponúka 3D model vo formáte .IGS, ten sa pri simulovaní ukázal ako menej vhodný, pretože v niektorých prípadoch simulačný nástroj SPEOS importovaný diel a jeho materiál počas simulácie nebral do úvahy, alebo jeho časti nedokázal zlúčiť do jedného celku.

Súradnice umiestnenia optického modelu svetelného zdroja (*trace file*) v 3D modeli LED sú špecifikované v technickom liste použitej LED. Poloha použitej optiky vzhľadom na LED bola pri simulácii upravovaná pre každú optiku zvlášť. Toto umiestnenie vždy definuje výrobca optiky v technickom liste [4].

Nastavenie simulácie

Svetelným zdrojom bol v simulácii použitý model optického zdroja s 1 miliónom lúčov, ktorý poskytuje výrobca LED pre každý konkrétny produkt. Ten má reprezentovať vyžarovaciu charakteristiku diódy. Svetelný tok zdroja bol nastavený na hodnotu 777 lm, čo je maximálna hodnota uvedená výrobcom, ktorú môže LED XP-G3 dosiahnuť počas prevádzky. Pre simuláciu každej optiky bolo použitých 10 miliónov lúčov, aby bola dosiahnutá vysoká presnosť výstupných hodnôt na detektore.

Materiál simulovaných optických prvkov bol buď PC, alebo PMMA. Pre PC bol definovaný index lomu $n = 1,5848$ a pre PMMA $n = 1,4906$.

Pre detekovanie dopadajúcej intenzity žiarenia bol použitý detektor v tvare štvorca o veľkosti (300×300) mm s nastaveným vzorkovaním na hodnotu 200, čoho výsledkom je rozlíšenie 1,5 mm. Na ňom sa nachádzali 3 štvorcové oblasti s rozmerom (60×60) mm, na ktorých sa analyzovala rovnomernosť osvetlenia. Tieto oblasti a ich vzájomné diagonálne posunutie reprezentujú odlišné umiestnenie svetelného zdroja od osi Z v svietidle, ako je možné vidieť na obr. 4.4 [17].

4.1.3 Výstup simulácie

Počas simulácie bolo porovnávaných 11 optických prvkov. Výstupom zo simulačného nástroja SPEOS bola pre každú nasvecovanú oblasť minimálna a priemerná hodnota intenzity osvetlenia (tabuľka A.1 v prílohách tejto práce). Na základe týchto údajov bola podľa vzťahu 4.1 vypočítaná rovnomernosť osvetlenosti U_1 . Výstupom sú aj informácie o zmene priemernej intenzity osvetlenia, pričom tento údaj je len informačný a pre splnenie cieľov tejto diplomovej práce je menej relevantný ako rovnomernosť.

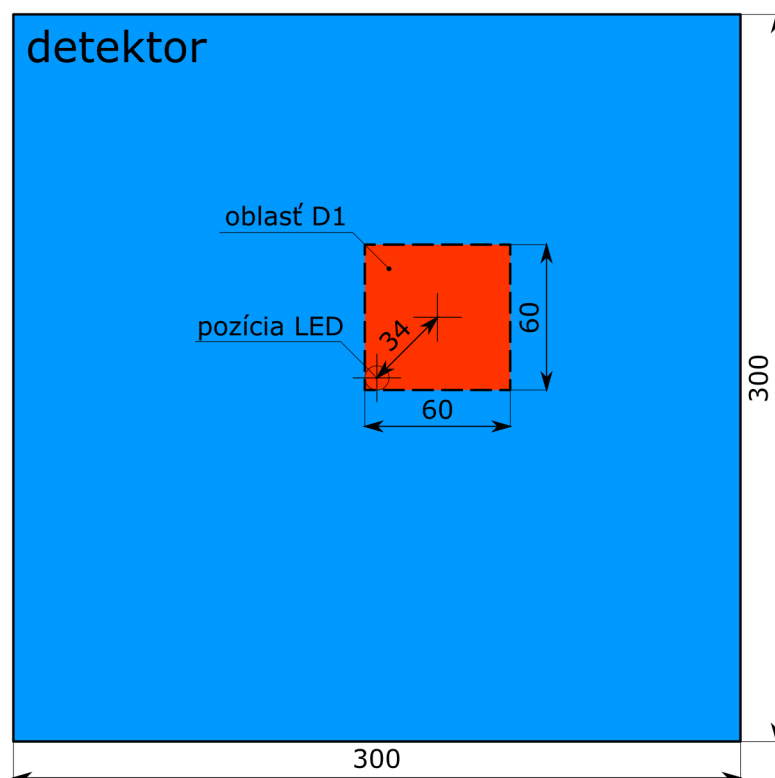
V ďalšej časti sú popísané detailnejšie výsledky pre jednotlivé oblasti detektora.

Oblasť D1 na detektore

Stred oblasti D1, ktorá je predmetom simulácie, je umiestnený vo vzdialenosti 34 mm od osi Z (na obr. 4.5 táto os prechádza pozíciou LED). Jej plocha má veľkosť (60×60) mm, pričom vzdialenosť stredu oblasti D1 od osi Z reprezentuje polohu svetelného zdroja umiestneného v svietidle.

Hodnoty rovnomernosti rozloženia intenzity osvetlenia U_1 v tab. 4.2 boli vypočítané na základe simulácií pre jednotlivé optické prvky. Vstupnými informáciami pre tieto výpočty sú hodnoty minimálnej a priemernej intenzity osvetlenia. Zdrojové dáta, na základe ktorých prebiehali výpočty, sú uvedené v prílohách tejto práce v časti A.1. Zvýraznený riadok v tab. 4.2 predstavuje vypočítané hodnoty bez použitia optiky.

Keďže oblasť D1 je najbližšie k osi Z, tak aj rovnomernosť osvetlenosti tu dosahuje najvyššie hodnoty oproti iným oblastiam. Z vypočítaných hodnôt uvedených v tab. 4.2



Obr. 4.5: Poloha oblasti D1 na detektore

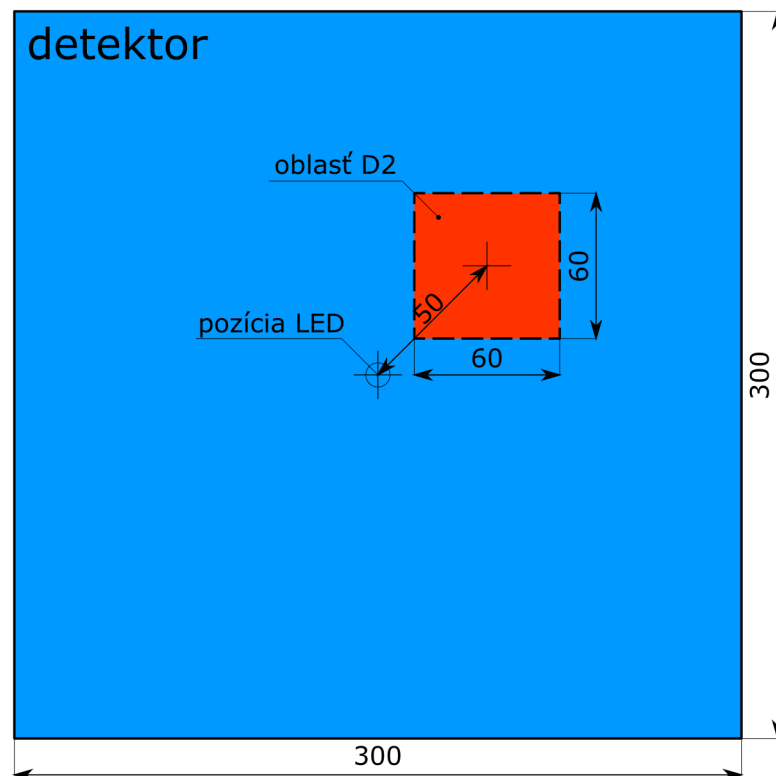
Tab. 4.2: Vypočítané hodnoty rovnomernosti osvetlenosti U_1 a zmeny priemernej osvetlenosti ΔE_{avg} pre oblast D1

Výrobca	Označenie	U_1 (1)	ΔU_1 (%)	E_{avg} (lx)	ΔE_{avg} (%)
Carclo Optics	12763	0,841	+10,79	6045,41	-28,12
LEDiL	CA16308	0,763	+0,54	11153,70	+32,63
(bez optiky)	(bez optiky)	0,759	0,00	8409,92	0,00
LEDiL	FA15480	0,692	-8,81	13475,60	+60,23
LEDiL	FA11904	0,668	-12,00	15526,80	+84,62
LEDiL	C15246	0,653	-13,97	23484,40	+179,25
Carclo Optics	12813	0,652	-14,07	15788,70	+87,74
Carclo Optics	12815	0,576	-24,11	19791,30	+135,33
LEDiL	C13413	0,435	-42,68	25507,00	+203,30
Carclo Optics	10510	0,400	-47,36	39643,40	+371,39
LEDiL	FP16562	0,291	-61,61	36228,50	+330,78
Carclo Optics	10627	0,117	-84,63	2153,54	-74,39

vyplýva, že najlepšie zlepšenie v tejto oblasti bolo dosiahnuté pri použití optiky Carlo Optics 12763 aj napriek tomu, že došlo k zvýšeniu rovnomernosti osvetlenia len o necelých 11 %. Pri použití tejto optiky bol zaznamenaný pokles priemernej osvetlenia plochy o 28 % oproti simulácii bez optiky.

Oblasť D2 na detektore

Druhá oblasť detektora je od osi Z vzdialená 50 mm, ako je znázornené na obr. 4.6. Tým, že vzdialenosť od pozície LED je väčšia ako v predchádzajúcej oblasti, môžeme predpokladať, že rovnomernosť osvetlenia tejto plochy bez použitia optiky bude nižšia.



Obr. 4.6: Poloha oblasti D2 na detektore

Použitie optiky tu zohráva väčšiu úlohu ako pri oblasti D1 a preto je tu väčší potenciál na zlepšenie rovnomernosti osvetlenia. Na základe vypočítaných hodnôt uvedených v tab. 4.3 sa ako najvhodnejšie ukázalo použitie optiky LEDiL CA16308, pri ktorej sa zvýšila hodnota rovnomernosti o viac ako 14 %. Pri použití tejto optiky došlo aj k zvýšeniu priemernej intenzity osvetlenia o viac ako 42 %, čo je tiež jej veľkou výhodou.

Tab. 4.3: Vypočítané hodnoty rovnomernosti osvetlenosti U_1 a zmeny priemernej osvetlenosti ΔE_{avg} pre oblasť D2

Výrobca	Označenie	U_1 (1)	ΔU_1 (%)	E_{avg} (lx)	ΔE_{avg} (%)
LEDiL	CA16308	0,789	+14,38	10908,60	+42,78
Carclo Optics	12763	0,775	+12,26	5818,18	-23,85
(bez optiky)	(bez optiky)	0,690	0,00	7639,94	0,00
LEDiL	FA11904	0,642	-6,93	13603,50	+78,06
LEDiL	FA15480	0,598	-13,34	15722,60	+105,79
Carclo Optics	12813	0,524	-24,03	13826,60	+80,98
Carclo Optics	12815	0,509	-26,20	16506,60	+116,06
LEDiL	C15246	0,376	-45,48	20745,10	+171,53
Carclo Optics	10510	0,308	-55,42	29691,40	+288,63
LEDiL	C13413	0,266	-61,39	19956,80	+161,22
LEDiL	FP16562	0,215	-68,81	24729,20	+223,68
Carclo Optics	10627	0,134	-80,60	1875,71	-75,45

Oblasť D3 na detektore

Polohu tejto oblasti je možné vidieť na obr. 4.7. Oblasť D3 je najviac vzdialená od osi Z, konkrétne 67 mm. To sa prejavilo aj najnižšou hodnotou rovnomernosti osvetlenosti spomedzi všetkých oblastí v prípade jej nasvietenia bez optiky.

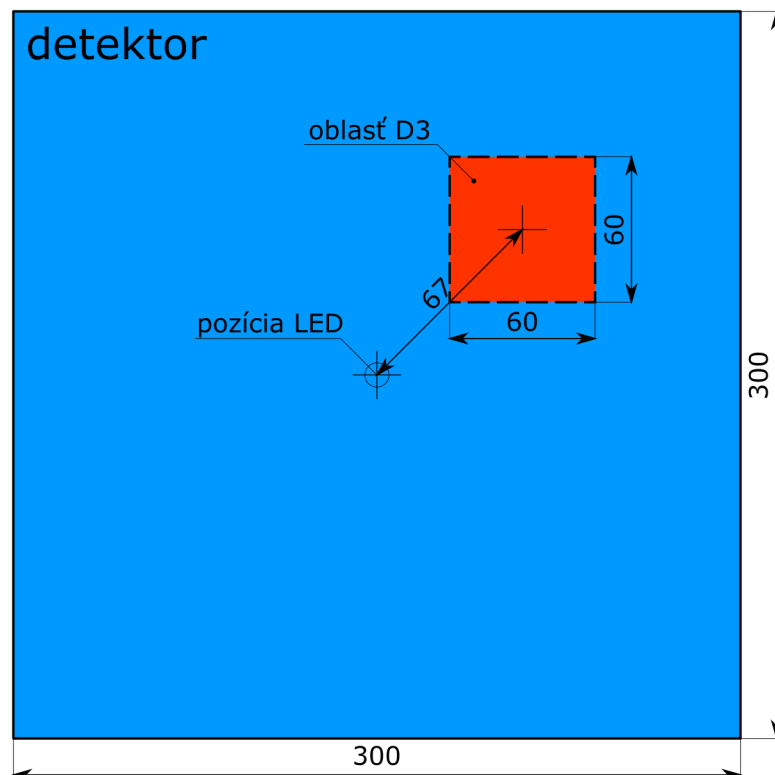
Pri tejto oblasti sa použitím optiky s označením 12763 od spoločnosti Carclo Optics podarilo zvýšiť rovnomernosť osvetlenosti o takmer 30 %, čomu nasvedčujú vypočítané hodnoty v tab. 4.4. Rovnako ako v prvej oblasti pri tejto optike, aj tu nastal pokles priemernej intenzity osvetlenia o viac ako 16 %.

Všeobecný výsledok simulácie

Len pri simulovaní dvoch optík mala rovnomernosť intenzity osvetlenia na predmetných plochách vyšší koeficient. Ide o Carclo Optics 12763 a LEDiL CA16308. Hodnoty rovnomernosti osvetlenosti (U_1) sa pre ostatné optické prvky ukázali ešte nižšie, ako v prípade použitia len LED bez optiky.

Vhodnosť použitia simulovaných optík z pohľadu rovnomernosti osvetlenosti je zhrnutý v tab. 4.5, z ktorej vyplýva, že pre oblasti D1 a D3 je vhodné použiť optiku Carclo Optics 12763 a pre oblasť D2 optiku LEDiL CA16308.

Na základe výsledkov z jednotlivých oblastí môžeme tvrdiť, že pri použití Carclo Optics 12763 sa vo všetkých troch oblastiach prejavil pokles priemernej osvetlenosti v rozsahu od 16 % do 23 %. Naopak pri simuláciách s optikou LEDiL CA16308



Obr. 4.7: Poloha oblasti D3 na detektore

Tab. 4.4: Vypočítané hodnoty rovnomernosti osvetlenia U_1 a zmeny priemernej osvetlenia ΔE_{avg} pre oblasť D3

Výrobca	Označenie	U_1 (1)	ΔU_1 (%)	E_{avg} (lx)	ΔE_{avg} (%)
Carclo Optics	12763	0,802	+29,88	5588,97	-16,36
LEDiL	CA16308	0,630	+2,04	10236,00	+53,19
(bez optiky)	(bez optiky)	0,618	0,00	6681,92	0,00
LEDiL	FA11904	0,595	-3,62	11627,30	+74,01
Carclo Optics	12813	0,443	-28,27	11269,10	+68,65
LEDiL	FA15480	0,429	-30,54	15879,80	+137,65
Carclo Optics	12815	0,392	-36,48	12966,00	+94,05
Carclo Optics	10510	0,240	-61,12	19711,60	+195,00
LEDiL	C13413	0,228	-63,03	13511,30	+102,21
LEDiL	C15246	0,167	-72,94	16280,90	+143,66
LEDiL	FP16562	0,151	-75,63	14903,50	+123,04
Carclo Optics	10627	0,116	-81,28	2223,06	-66,73

Tab. 4.5: Vyčíslenie zlepšenia homogenity osvetlenosti – zvýraznený riadok platí pre simuláciu bez optiky

Optika	Oblasť D1		Oblasť D2		Oblasť D3	
	U_1 (1)	ΔU_1 (%)	U_1 (1)	ΔU_1 (%)	U_1 (1)	ΔU_1 (%)
(bez optiky)	0,759	–	0,690	–	0,618	–
Carclo Optics 12763	0,841	+10,79	0,775	+12,26	0,802	+29,88
LEDiL CA16308	0,763	+0,54	0,789	+14,38	0,630	+2,04

došlo vždy k zvýšeniu priemernej osvetlenosti plochy o 32 % až 53 % v závislosti od vzdialenosti analyzovanej plochy od osi Z. Tento výsledok uprednostňuje v prípade použitia optiky dostupnej na trhu použitie optiky od spoločnosti LEDiL.

4.2 Návrh vlastných optických prvkov

Ďalšou možnosťou, ako zlepšiť parametre dopadajúceho svetla, je návrh vlastného optického prvku. Simulačný nástroj SPEOS od spoločnosti Ansys ponúka možnosti vytvorenia niekoľkých typov optických častí. Napríklad šošovku s úplným vnútorným odrazom (TIR), fresnelovu šošovku, alebo reflektor. Vzhľadom na výsledky z predchádzajúcich simulácií sa ako najvhodnejšia možnosť javí vytvorenie šošovky s úplným vnútorným odrazom, na ktorej bude v prípade potreby vytvorená štruktúra zabezpečujúca smerovanie svetelného toku podľa požiadaviek.

Pre všetky vytvorené optické prvky budú pri simuláciách relevantné predovšetkým hodnoty na najvzdialenejšej detekovanej ploche od osi Z (oblasť D3 na obr. 4.4), kde je zaistenie rovnomernosti osvetlenosti najviac problematické.

4.2.1 Šošovka s úplným vnútorným odrazom – TIR

Všeobecne

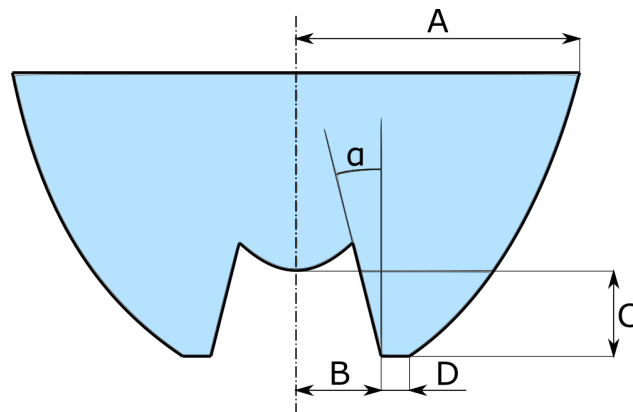
Keď svetelný lúč dosiahne rozhranie medzi dvoma materiálmi s rôznymi indexmi lomu a správnym uhlom dopadu, dôjde k lomu – ohybu svetelného lúča od pôvodnej dráhy. Ak svetlo postupuje z materiálu s vyšším indexom lomu do materiálu s nižším indexom lomu, podľa Snellovho zákona sa musí lúč lámať pod uhlom viac ako 90° . Pri uhloch dopadu, ktoré presahujú určitú hodnotu sa svetlo odráža späť do materiálu. Uhol, pri ktorom k tomu dôjde, sa nazýva kritický uhol a tento jav sa nazýva úplný vnútorný odraz.

Pri úplnom vnútornom odraze nedochádza k strate energie, je to najefektívnejší spôsob odrazu svetla. Keď je táto šošovka umiestnená nad LED čipom, tak je schopná

zachytiť a nasmerovať fotóny na požadované miesto. V porovnaní s ostatnými spôsobmi smerovania svetelných lúčov (napríklad reflektor), poskytuje šošovka s úplným vnútorným odrazom lepšie riadenie svetla, pretože zachytáva všetky fotóny, ktoré opúšťajú svetelný zdroj. Výhody, ktoré prináša úplný vnútorný odraz boli dôvodom, prečo ako ďalšia možnosť riešenia problému rovnomernosti osvetlenia bol zvolený návrh optiky s touto technológiou [2, 18].

Návrh

Na základe analyzovania konštrukcie optík dostupných na trhu, ktoré boli predmetom predchádzajúcich simulácií, je predpoklad, že pri zmene povrchovej štruktúry šošovky s úplným vnútorným odrazom môže dôjsť k zlepšeniu požadovaného smerovania svetelného toku. Výsledkom by tak malo byť dosiahnutie vyššej rovnomernosti oproti predchádzajúcim simuláciám v prípade, ak na rozhraní prostredia (medzi materiálom optiky a vzduchom) dôjde k správne lomu svetelných lúčov.



Obr. 4.8: Definícia rozmerov pri modelovaní TIR objektívu

Vstupnými parametrami pre modelovanie optiky boli hlavne rozmerové špecifikácie. Zo strany vnútorného priemeru a hrúbky podstavy, o ktorú môže byť optika upevnená, zohrala úlohu veľkosť LED. Na druhú stranu z pohľadu zástavbových možností bolo potrebné zohľadniť celkovú výslednú veľkosť svietidla a tiež vzájomnú vzdialenosť svetelných zdrojov. V SPEOS-e tak boli vytvorené tri veľkosti optík s úplným vnútorným odrazom, ktorých rozmery sú uvedené v tab. 4.6. Materiál optiky bol počas simulácie uvažovaný PMMA s indexom lomu 1,49.

V prípade navrhutej optiky, ktorá má nulovú kontaktnú plochu (v tab. 4.6 optika TIR 1) prichádzala do úvahy možnosť, že nebude upevnená na tej istej doske ako LED, ale bude uchytená o vrchnú časť svietidla. V takom prípade by sa optika nedotýkala DPS, ale jej spodná hrana by bola umiestnená 0,8 mm nad ňou.

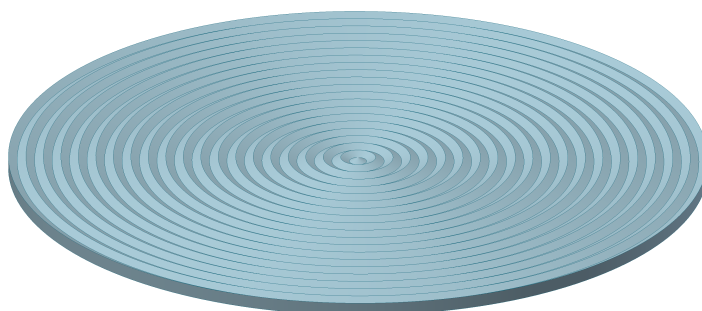
V časti kolimátora, z ktorej vychádzajú lúče svetelného zdroja, bol vytvorený povrch, ktorého úlohou bolo zabezpečiť smerovanie svetelného toku do požadovaných

Tab. 4.6: Rozmery navrhnutých TIR optík v simulačnom nástroji SPEOS

Parameter	TIR 1	TIR 2	TIR 3
Vonkajší polomer – A	4 mm	7 mm	10 mm
Vnútorňý polomer – B	2 mm	2,75 mm	3,5 mm
Výška – C	1,75 mm	2,5 mm	4 mm
Hrúbka kontaktnej plochy – D	0 mm	0,4 mm	1 mm
Uhol odklonu – α	30°	15°	8°
Index lomu – n	1,49	1,49	1,49

oblastí na detektore. Tento objekt v tvare plochého disku, ktorý reprezentuje optický povrch šošovky, mal pri simulácii vždy rovnaký priemer ako navrhnuté šošovky s úplným vnútorným odrazom a jeho hrúbka (výška) bola 0,25 mm. Na jeho povrchu boli vytvorené štruktúry, ktoré môžeme rozdeliť do dvoch skupín podľa požadovanej krivky svietivosti:

- **Symetrická** – štruktúra povrchu má tvar sústredných kružníc (obr. 4.9) s cieľom zväčšenia vyžarovacieho uhla optiky. To má za následok zväčšenie plochy, na ktorej je rozložená intenzita osvetlenia do kruhového tvaru pod optikou.

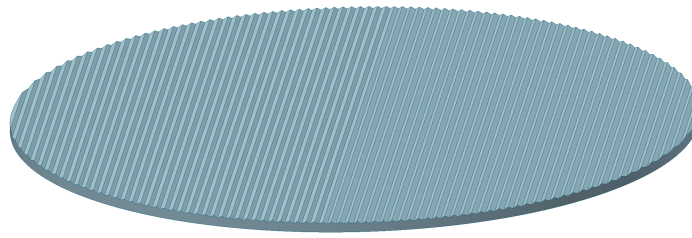


Obr. 4.9: Navrhnutá symetrická štruktúra rozhrania

- **Asymetrická** – v oblasti, z ktorej vychádzajú svetelné lúče, je vytvorená štruktúra pomocou rovnobežných trojhranov (obr. 4.10). Jej úlohou je rozložiť dopadajúcu osvetlenosť na detektore do oválneho tvaru.

Pri vytváraní oboch typov štruktúr bol počiatkový tvar inšpirovaný povrchom optických prvkov, ktoré sú dostupné na trhu. Pri modelovaní asymetrickej aj symetrickej štruktúry dochádzalo k postupným úpravám rozmerov tak, aby bolo dosiahnuté požadované smerovanie svetelného toku a rovnomernosť.

Po každej zmene v geometrii povrchu bola prevedená simulácia a bolo vyhodnotené, či má táto zmena pozitívny alebo negatívny vplyv na miesto dopadajúcich lúčov a rovnomernosť osvetlenosti. Postup, v ktorom sa najprv vykonali úpravy a následne

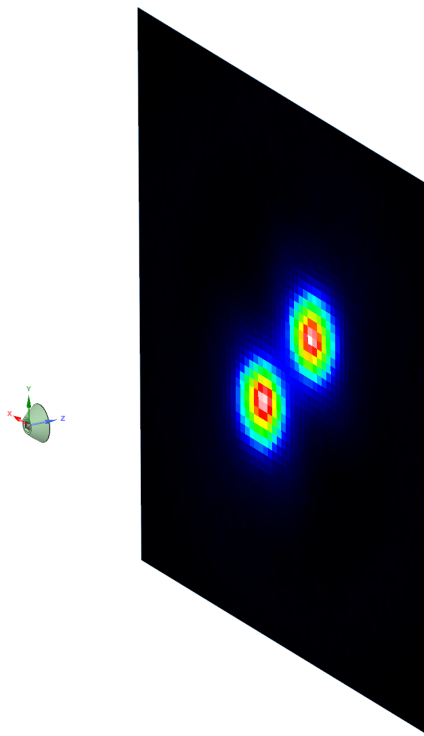


Obr. 4.10: Navrhnutá asymetrická štruktúra rozhrania

previedla simulácia bol opakovaný niekoľkokrát až pokiaľ úpravy nespôsobili, že sa rovnomernosť menila len zanedbateľne, prípadne pokiaľ sa vplyvom ďalších úprav nezačala zhoršovať. Výsledkom sú dva typy optických štruktúr, ktoré v rámci zostrojených šošoviek s úplným vnútorným odrazom dosiahli najlepšie výsledky (obr. 4.9 a obr. 4.10).

Simulácia

Umiestnenie svetelného zdroja a detektora v priestore bolo rovnaké ako pri simulovaní optických prvkov dostupných na trhu. Totožná bola aj veľkosť a citlivosť detektora. Oblasti D1, D2 a D3 na detektore mali zhodnú veľkosť a polohu ako pri scéne v časti 4.1.2 tejto práce. Pri simulácii bolo použitých 10 miliónov lúčov.



Obr. 4.11: Ukážka simulácie navrhutej TIR šošovky s asymetrickou štruktúrou v programe SPEOS

Na tejto scéne bola najprv vykonaná simulácia bez dopĺňujúcej povrchovej štruktúry. Následne boli odsimulované navrhnuté optické štruktúry. Každá bola kombinovaná vždy so všetkými navrhnutými šošovkami s úplným vnútorným odrazom, pričom rovnomernosť sa kontrolovala na troch uvedených oblastiach detektoru (D1, D2 a D3).

Výsledky

Rovnomernosť rozloženia osvetlenia (homogenita) bola počítaná podľa vzťahu 4.1, ktorý predstavuje pomer minimálnej a priemernej intenzity osvetlenia pre danú oblasť.

V tab. 4.7 sú uvedené vypočítané hodnoty homogenity (U_1) pre navrhnutú šošovku TIR 1 s úplným vnútorným odrazom.

Tab. 4.7: Hodnoty koeficientu U_1 (1) pri použití TIR 1 – polomer 4 mm

Štruktúra	Oblasť		
	D1	D2	D3
Bez štruktúry	0,139	0,143	0,170
Symetrická	0,416	0,230	0,179
Asymetrická	0,409	0,367	0,259

Optika s vonkajším polomerom 4 mm (v tab. 4.6 označená ako TIR 1) dosiahla v oblasti D1 najvyššiu rovnomernosť pri použití symetrickej štruktúry. Pre oblasti D2 a D3 je pre čo najvyššiu homogenitu vhodné použitie asymetrickej štruktúry. V porovnaní s ostatnými navrhnutými šošovkami TIR 2 (tab. 4.8) a TIR 3 (tab. 4.9) sa použitie tejto optiky javí ako najvhodnejšie.

Tabuľka 4.8 obsahuje vypočítané hodnoty pre šošovku TIR 2, ktorá má vonkajší polomer 7 mm. Oproti šošovke TIR 1 je koeficient U_1 vo všetkých prípadoch nižší. Použitie symetrickej povrchovej štruktúry vplyva na oblasti D2 a D3 negatívne a dochádza pri nich oproti predchádzajúcej menšej šošovke k zhoršeniu rovnomernosti osvetlenia.

Výsledky simulácie najväčšej šošovky s úplným vnútorným odrazom TIR 3 sú zhrnuté v tab. 4.9. Na základe vypočítaných hodnôt môžeme tvrdiť, že použitie asymetrickej štruktúry má vplyv na zlepšenie rovnomernosti vo všetkých troch oblastiach.

Z výsledkov simulácií, v ktorých boli použité navrhnuté šošovky s úplným vnútorným odrazom, je zrejmé, že ich použitie pre túto aplikáciu nie je vhodné. Pri vytvorení štruktúry na povrchu kolimátora, ktorého úlohou je rovnomerne rozložiť

Tab. 4.8: Hodnoty koeficientu $U_1(1)$ pri použití TIR 2 – polomer 7 mm

Štruktúra	Oblasť		
	D1	D2	D3
Bez štruktúry	0,086	0,127	0,182
Symetrická	0,155	0,091	0,089
Asymetrická	0,175	0,121	0,115

Tab. 4.9: Hodnoty koeficientu $U_1(1)$ pri použití TIR 3 – polomer 10 mm

Štruktúra	Oblasť		
	D1	D2	D3
Bez štruktúry	0,011	0,011	0,021
Symetrická	0,064	0,033	0,044
Asymetrická	0,102	0,077	0,061

svetelný tok a nasmerovať svetelné lúče do oblasti, v ktorej to je potrebné, došlo k zlepšeniu rovnomernosti, ale len o veľmi malú časť. V absolútnych hodnotách má pri použití TIR šošovky koeficient U_1 niekoľkokrát menšiu hodnotu ako v prípade použitia LED bez optickej časti.

Použitie šošoviek, ktoré sú založené na princípe úplného vnútorného odrazu tak má zmysel v aplikáciách, ktoré vyžadujú vysokú intenzitu osvetlenia jedného bodu. Z predchádzajúcich nameraných a vypočítaných údajov je zrejmé, že čím je šošovka väčšia, tým presnejšie dokáže nasmerovať lúče do jedného bodu.

Predpokladá sa, že najmenšia šošovka (TIR 1) dosiahla najlepšie výsledky z pohľadu rovnomernosti osvetlenosti práve kvôli tomu, že jej malé rozmery spôsobili nepresný odraz a smerovanie lúčov. Z tohto dôvodu sa mohlo svetlo oproti ostatným šošovkám javiť ako najviac rozptýlené. Koeficient U_1 preto pri šošovke TIR 1 dosahuje zo simulovaných šošoviek s úplným vnútorným odrazom najlepšie hodnoty.

4.3 Použitie optického prvku pre rôzne pozície v svietidle

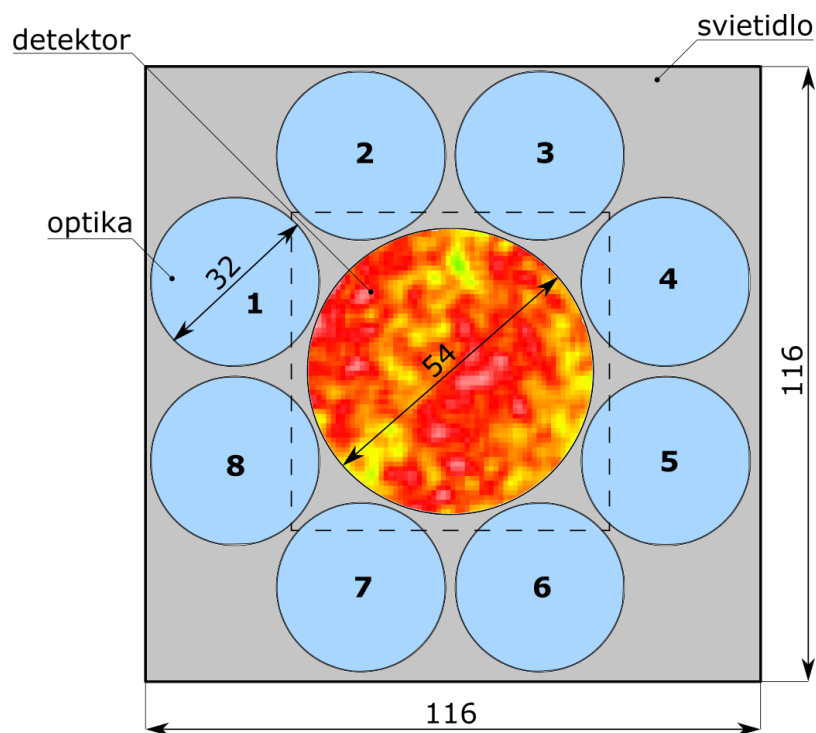
Na základe uskutočnených simulácií v programe SPEOS a vypočítaných hodnôt rovnomernosti osvetlenosti môžeme tvrdiť, že ako najlepšie riešenie sa ukázalo použitie optického prvku, ktorý je možné bežne zakúpiť. V našom prípade ide o šošovku

LEDiL s označením CA16308. Tomuto optickému prvku a jeho použitiu v svietidle preto bude venovaná ďalšia časť tejto práce.

Aby sme simuláciami dosiahli výsledok, ktorý bude čo najvernejšie reprezentovať skutočnosť, je potrebné rozmiestniť optiku so svetelným zdrojom do preferovaných miest v svietidle.

4.3.1 Umiestnenie optiky v svietidle

Pri rozmiestňovaní optiky v svietidle sa berie ohľad predovšetkým na priestorové možnosti, ktoré ponúka svietidlo a veľkosť optického prvku. Pri priestorových možnostiach vychádzame z už navrhnutej konštrukčnej časti svietidla a tieto rozmery môžeme uvažovať ako hraničné pri osadzovaní svietidla optikami.



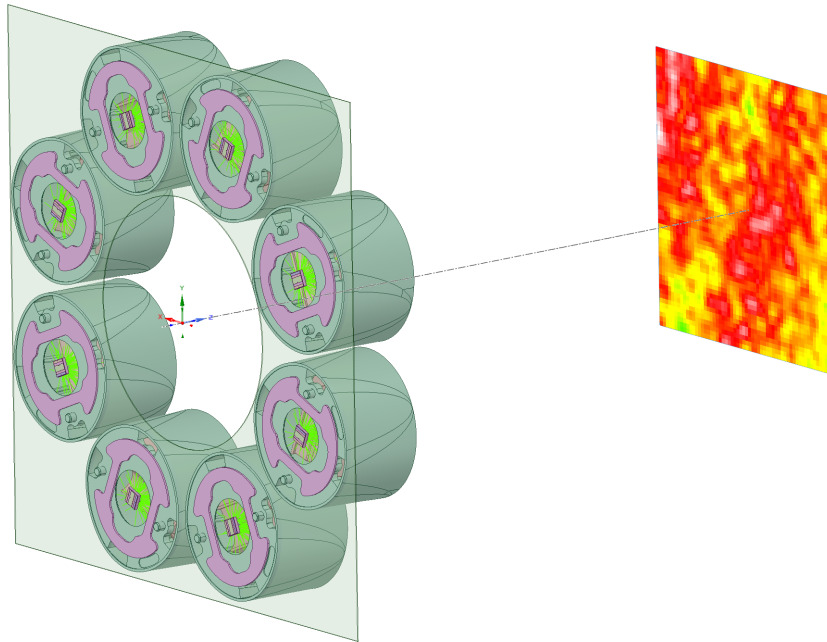
Obr. 4.12: Navrhnuté pozície optiky LEDiL v svietidle

Svietidlo má štvorcový tvar s dĺžkou jednej strany 120 mm. Ak budeme uvažovať hrúbku jednej steny 2 mm, tak vnútorný priestor reprezentuje štvorec so stranou dlhou 116 mm. V strede svietidla sa nachádza otvor v tvare kruhu pre umiestnenie objektívu. Ten vymedzuje vnútorný priestor priemerom 54 mm.

Optika LEDiL CA16308 má kruhový tvar s vonkajším priemerom 32 mm. Do súčasného svietidla sa tak zmestí 8 kusov. Jej navrhované rozmiestnenie je uvedené na obr. 4.12.

4.3.2 Scéna a postup simulácie so svetidlom osadeným viacerými optikami

Oproti predchádzajúcim simuláciám nastala zmena hlavne v umiestnení jednotlivých svetelných zdrojov od osi Z a v nastavení detektora. Vzďialenosť svetelných zdrojov, ktoré tvoria kruhové pole, bola vzhľadom na stredovú os upravená na hodnotu 44 mm podľa polohy optiky LEDiL v svetidle.



Obr. 4.13: Ukážka scény pri simulovaní celého svetidla osadeného optikami

Detektor bol zmenšený na štvorec s rozmermi (60×60) mm, čo predstavuje ideálnu veľkosť plochy, ktorú má byť svetidlo schopné rovnomerne nasvietiť. Vzhľadom na veľkosť detektora a konkrétne umiestnenie svetelných zdrojov, nie je potrebné detektor deliť na ďalšie časti ako pri predchádzajúcich návrhoch. Pri výpočte je uvažovaná celá jeho plocha. Vzorkovanie detektora bolo nastavené na hodnotu 60, čo pri jeho aktuálnej veľkosti predstavuje rozlíšenie 1 mm. Vzďialenosť detektora ostala nezmenená – 150 mm. Pre čo najvyššiu presnosť bolo pre výpočet použitých 100 miliónov lúčov.

Keďže svetelné zdroje budú v skutočnosti rozsviečované postupne, odpovedal tomu aj postup, ktorý bol zvolený pri simulácii. Najprv bola vykonaná simulácia pre každý svetelný zdroj samostatne bez použitia optiky. Následne bol postup zopakovaný, pričom bola nad každým zdrojom umiestnená vybraná optika LEDiL aj s odpovedajúcou rotáciou. Ako materiál optickej časti, ktorou má prechádzať svetlo bol podľa výrobcu PMMA s indexom lomu $n = 1,49$.

4.3.3 Výstup simulácie a výpočtov

Po tom, čo boli uskutočnené výpočty osvetlenosti na detektore v programe SPEOS, bol podľa vzťahu 4.1 vypočítaný koeficient rovnomernosti osvetlenosti U_1 . Ten bol spočítaný pre každú pozíciu svetelného zdroja v svietidle najprv bez optiky a následne s použitím optiky. Výsledky vypočítaných koeficientov a percentuálna zmena pre každú LED sú uvedené v tab. 4.10. Výstupné hodnoty simulácií, ktoré boli následne použité pre výpočty, sú uvedené v prílohe A.2 tejto práce.

Tab. 4.10: Vypočítaná rovnomernosť osvetlenosti U_1 pre 8 pozíc LED a jej zmena ΔU_1 po pridaní optiky

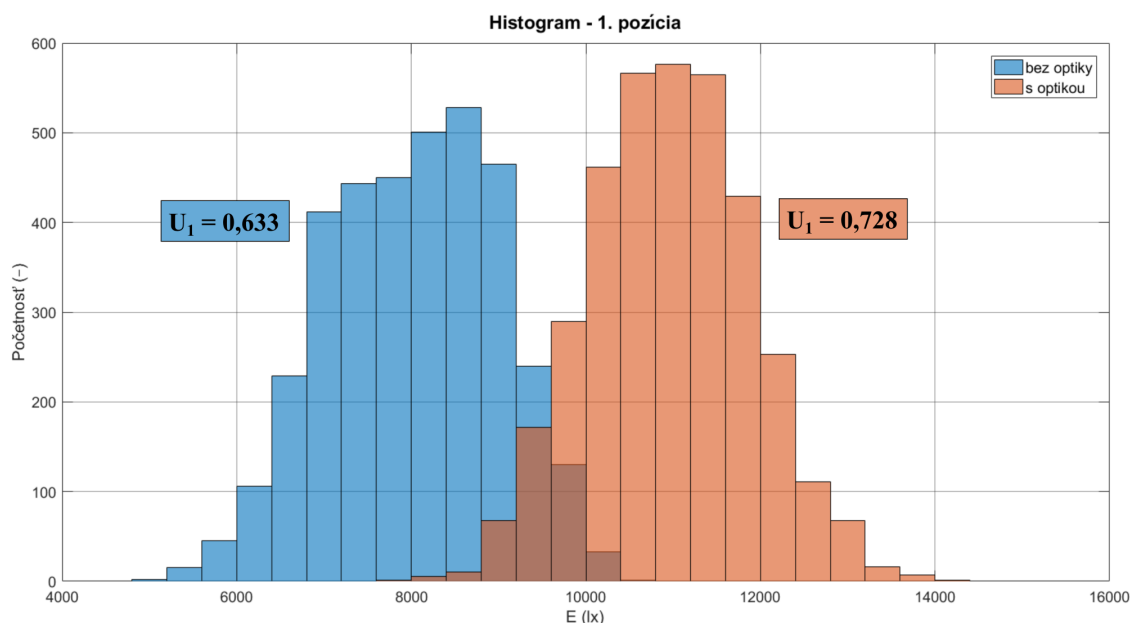
LED	U_1 bez optiky (1)	U_1 s optikou (1)	ΔU_1 (%)
1	0,633	0,728	+14,98
2	0,601	0,754	+25,44
3	0,653	0,723	+10,74
4	0,651	0,721	+10,80
5	0,573	0,740	+29,21
6	0,583	0,697	+19,49
7	0,563	0,724	+28,72
8	0,471	0,714	+51,51
Priemer:	0,591	0,725	+23,86

Pre vernejšie znázornenie vplyvu optiky na výslednú rovnomernosť by bolo vhodnejšie použitie histogramu. Nástroj SPEOS vytvorenie histogramu z hodnôt osvetlenosti neumožňuje, jeho výhodou naopak je, že odsimulované hodnoty na detektore je možné exportovať do textového dokumentu.

Exportované dáta v podobe textového dokumentu boli následne pomocou programu MATLAB spracované a pre každú pozíciu svetelného zdroja bola vytvorená dvojica histogramov. Jeden znázorňuje hodnoty intenzity osvetlenia a ich početnosť na detektore len s použitím LED – bez optiky. Druhý ukazuje vplyv optického prvku na zmenu intenzity a rovnomernosti osvetlenosti detektora.

Histogramy na obr. 4.14 znázorňujú zmenu osvetlenosti plochy, ktorá sa týka polohy svetelného zdroja č. 1 (podľa obr. 4.12). Trieda jedného stĺpca histogramu má $E = 400$ lx.

Histogram, zostrojený z hodnôt osvetlenosti bez použitia optického prvku je širší. Znamená to, že osvetlenosť na detektore sa pohybuje vo väčšom intervale ako v prípade použitia optiky. Pri použití optiky je histogram užší, čo je výsledkom toho,



Obr. 4.14: Histogram pre 1. pozíciu LED v svietidle s uvedenými vypočítanými koeficientami U_1 (1)

že sa na detektore nachádza viac bodov, ktoré dosahujú približne rovnakú hodnotu osvetlenia. Je teda zaručená jej vyššia rovnomernosť.

Na histograme s použitím šošovky je zrejmy posun na vodorovnej osi E (lx) k vyšším hodnotám. To dokazuje, že použitie optiky LEDiL vplyva okrem zväčšenia rovnomernosti aj na zvýšenie osvetlenia detektora v absolútnych hodnotách. Doplnené číselné vyjadrenia koeficientov U_1 boli vypočítané na základe minimálnej a priemernej osvetlenia, ktoré boli výstupom zo simulačného nástroja SPEOS.

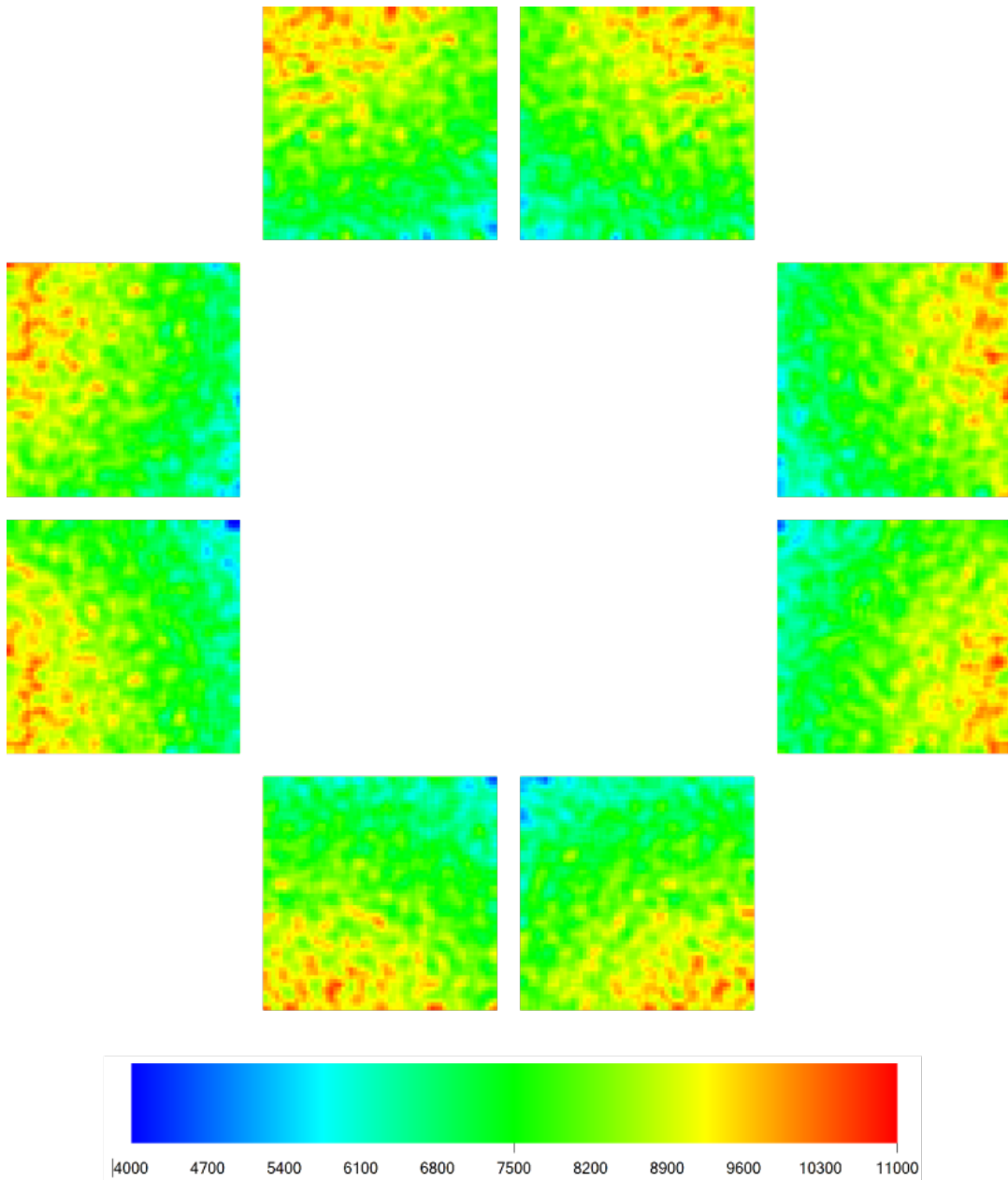
Aby bolo viditeľné, aký bol charakter gradientu osvetlenia na ploche pred použitím optiky a v ktorých miestach sa po použití šošoviek zmenila osvetlenosť, môžeme nahradiť každú pozíciu LED grafickým vyjadrením intenzity osvetlenia na detektore. Ak použijeme modročervenú farebnú škálu, červená farba znázorní oblasti s najvyššou intenzitou osvetlenia a modrá s najnižšou. Model, ktorý takto znázorňuje rozloženie osvetlenia na ploche bez použitia šošovky je znázornený na obr. 4.15.

Po použití optiky LEDiL a prevedení simulácie je na obr. 4.16 zrejmy rozdiel v rozložení osvetlenia na detektore pre každú pozíciu LED. Je vidieť, že gradient osvetlenia, ktorý v predchádzajúcom prípade smeroval smerom ku svetelnému zdroju je pri každej LED zredukovaný.

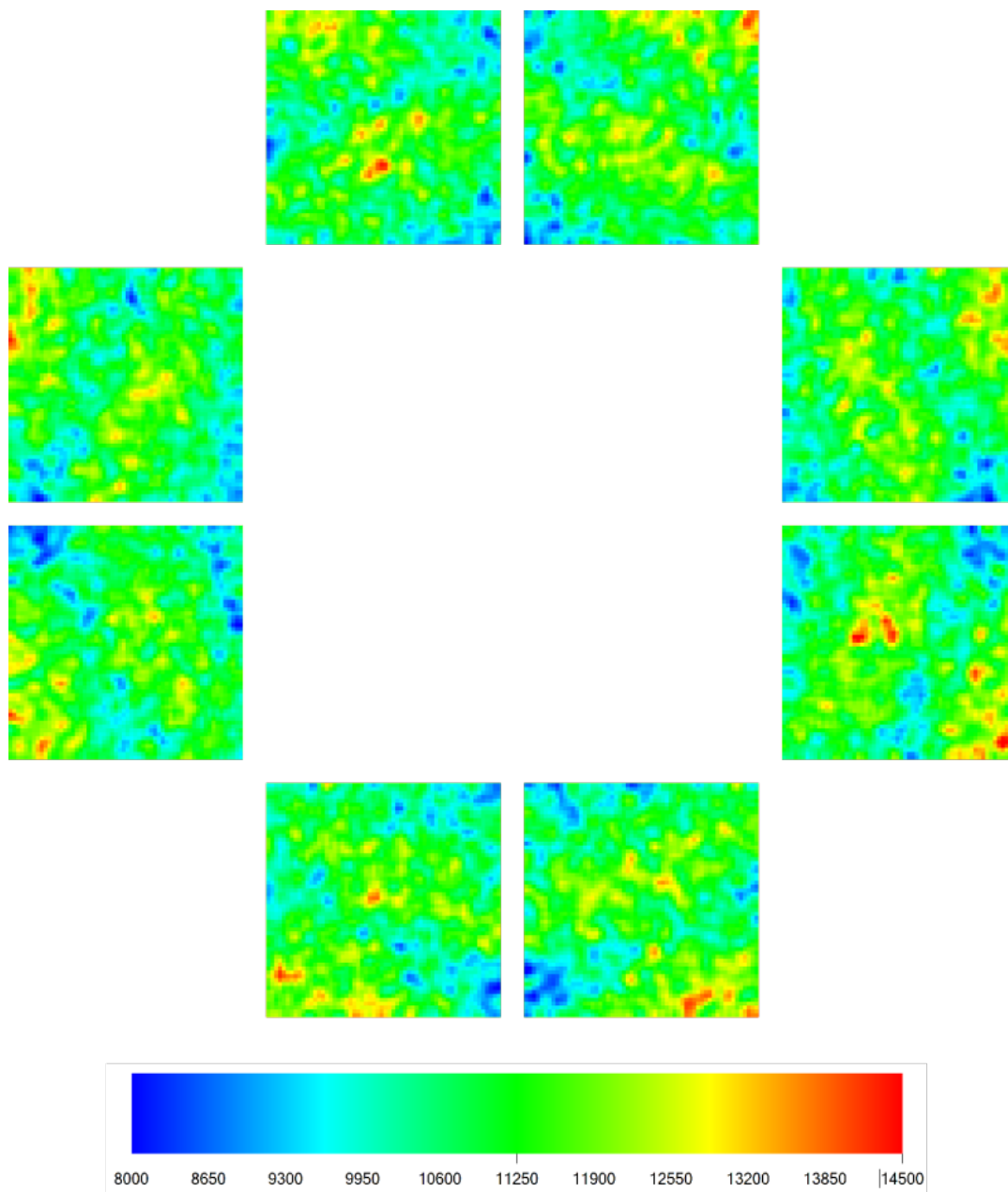
Štupnica, ktorá vyjadruje hodnotu osvetlenia E (lx) má v oboch vizualizáciách odlišný rozsah hodnôt. Ak by sa obe vizualizácie riadili jednou škálou, na výsledných obrázkoch by nebola jasne viditeľná zmena rovnomernosti osvetlenia.

Podľa výsledkov z vykonaných simulácií môžeme tvrdiť, že použitie optiky LEDiL

CA16308 v tomto svietidle je v prípade správneho pozicovania a natočenia prínosné a pozitívne vplýva na hodnotu osvetlenosti na celej ploche a tiež na jej rovnomernosť.



Obr. 4.15: Zobrazenie osvetlenosti E (lx) na detektore bez použitia optiky pre každú pozíciu LED



Obr. 4.16: Zobrazenie osvetlenosti E (lx) na detektore s použitím optiky pre každú pozíciu LED

Záver

Diplomová práca je zameraná na zlepšenie optických vlastností svietidla, ktoré sa používa na osvetľovanie povrchu materiálov fotených priemyselnou kamerou. V prvej časti je vykonaná analýza toho, čo spôsobuje, že svetelný tok je na kontrolovanej ploche rozložený nerovnomerne a aký vplyv má použitý difúzor na zlepšenie tohto stavu.

Výsledkom simulácií v programe TracePro™ a SPEOS je, že difúzor rovnomernosť osvetlenia celej plochy nezlepší. Jeho použitie má na všetky oblasti analyzovanej plochy len čiastočný vplyv. Oblasti na detektore by boli osvetlené aj v prípade, ak by difúzor nebol použitý, ale s vyššou intenzitou. Tento záver potvrdzujú výstupy na obr. 3.8 (bez difúzora) a obr. 3.9 (s difúzorom). Môžeme tvrdiť, že rozloženie osvetlenia s použitím difúzora je viac jednotné. Dôležitým výstupom je tiež to, že oproti simulácii bez difúzora klesla hodnota osvetlenia trojnásobne.

Dospelo sa k záveru, že uvedené nedostatky by mohlo odstrániť použitie optiky, ktorá je dostupná na trhu. Stanovili sa kritériá, na základe ktorých bolo vybratých 11 optických prvkov. Pri nich sa analyzovala primárne rovnomernosť osvetlenia a sekundárne priemerná osvetlenosť v 3 oblastiach na detektore. Výsledkom je, že len 2 optiky dokázali osvetlenie rozložiť rovnomernejšie ako len LED bez optiky. Ich vplyv na rovnomernosť je vyčíslený v tabuľke 4.5.

Ďalšia časť práce je zameraná na návrh optického prvku, ktorého cieľom je dosiahnuť lepší výsledok rovnomernosti ako v prípade optiky LEDiL. Kvôli vysokej svetelnej účinnosti boli v nástroji SPEOS vytvorené tri rôzne veľké optiky využívajúce úplný vnútorný odraz. Na nich bola vytvorená štruktúra, ktorej úlohou bolo vychýliť svetelné lúče do požadovaných oblastí a zabezpečiť väčšiu homogenitu osvetlenia. Voľba tohto typu optiky sa aj napriek trom odlišným rozmerovým špecifikám ukázala ako nevhodná a pri simulácii vykazovala výrazne horšie výsledky ako len použitie LED. Preto sa ďalšia časť práce zameriava na simuláciu s použitím optiky LEDiL CA16308.

Optika bola pozicovaná tak, aby sa jej do svietidla vošiel čo najväčší počet. Následne bola pre každú pozíciu vykonaná simulácia s optikou a bez nej. Jej výstupom sa potvrdilo zlepšenie rovnomernosti osvetlenia z priemernej hodnoty $U_1 = 0,59$ na hodnotu $U_1 = 0,73$. To predstavuje navýšenie o takmer 24 %.

Keďže z koeficientu U_1 nie je možné zistiť informácie o osvetlení v absolútnych hodnotách (iba o jej rovnomernosti), bol pre každú pozíciu LED zostrojený histogram. Výsledky v prílohe B tejto práce potvrdzujú, že pri použití optiky došlo nielen k zvýšeniu rovnomernosti osvetlenia, ale aj k zväčšeniu priemernej intenzity osvetlenia na detektore.

Aj napriek malým rozmerom svietidla a blízkej pracovnej vzdialenosti sa podarilo

vybrať optiku, ktorá zlepši rovnomernosť, zvýši osvetlenosť plochy a je možné ju umiestniť do svietidla. Jej nevýhodou je veľkosť, keďže do aktuálne používaného svietidla sa vojde len 8-krát. Pre zväčšenie počtu LED sekcií v svietidle by pri použití optiky LEDiL CA16308 bolo potrebné zväčšiť rozmery svietidla. Zväčšenie svietidla súvisí so zväčšením jeho pracovnej vzdialenosti. Do budúcnosti by táto zmena mohla priniesť ešte výraznejší pozitívny vplyv na rovnomernosť, ale aj samotnú osvetlenosť oproti aktuálne používanému svietidlu bez optiky.

Bibliografia

1. HABEL, Jiří; ŽÁK, Petr. *Elektrické světlo 1* [online]. 2. dopl. vyd. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, 2011 [cit. 2020-10-18]. Dostupné z: <https://www.yumpu.com/xx/document/read/29190549/elektricke-svetlo-1-magistersky-program-inteligentni-budovy>.
2. HABEL, Jiří; DVOŘÁČEK, Karel; DVOŘÁČEK, Vladimír; ŽÁK, Petr. *Světlo a osvětlování*. Praha: FCC Public, 2013. ISBN 978-80-86534-21-3.
3. *Metrologie, Tematická příloha č. 3/2015: vědecká legální praktická*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví (ÚNMZ) ve spolupráci s Českým metrologickým institutem, Českou metrologickou společností a Českým kalibračním sdružením, 2015. Č. 3. ISSN 1210-3543. Dostupné tiež z: <http://www.unmz.cz/files/metrologie/casopis/Metrologie-P%5C%C5%99%5C%C3%ADloha-2015%5C%20-%5C%20small%5C%20-%5C%20WWW.pdf>.
4. *Cree First to Break 300 Lumens-Per-Watt Barrier: Continues to Push the Boundaries of LED Performance* [online]. 2014-03-26 [cit. 2020-11-22]. Dostupné z: <https://www.cree.com/news-media/news/article/cree-first-to-break-300-lumens-per-watt-barrier>.
5. *REGINA* [online]. 2018 [cit. 2020-12-13]. Dostupné z: <https://www.ledil.com/product-landing/reflectors/regina/>.
6. *Aluminium Reflector 2-2264-M* [online]. Jiang Men City, 2020 [cit. 2020-12-13]. Dostupné z: https://www.nata.cn/miniCatalog.php?id=PR_0002031.
7. *SANEZOO: Superseding bin picking. Reinventing inspection*. [Online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-19]. Dostupné z: <https://www.sanezoo.com/>.
8. *Cree XLamp XP-G3 LED Data Sheet: PRODUCT FAMILY DATA SHEET*. Durham: Cree, Inc., 2020. Dostupné tiež z: https://www.cree.com/led-components/media/documents/dsXPG3_1.pdf.
9. *Stray Light Analysis* [online]. Washington, DC [cit. 2020-11-22]. Dostupné z: <https://spinoff.nasa.gov/spinoff1997/ct9.html>.
10. DERENIAK, Eustace L.; DERENIAK, Teresa D. Paraxial ray tracing. In: *Geometrical and Trigonometric Optics*. Cambridge University Press, 2008, s. 255–291. Dostupné z DOI: 10.1017/CB09780511755637.011.
11. *Optical Design Software: Ansys SPEOS Capabilities* [online]. Canonsburg [cit. 2020-12-12]. Dostupné z: <https://www.ansys.com/products/optical/ansys-speos/speos-capabilities>.

12. *Product family datasheet: VIOLETTA*. Sycamore, 2021. Dostupné tiež z: <https://www.ledil.com/data/prod/Violetta/Violetta-fds.pdf>.
13. CSANYI, Edvard. *Luminous Measurement Graphic Representation* [online]. Nova Pazova [cit. 2021-03-07]. Dostupné z: <https://electrical-engineering-portal.com/luminous-measurement-graphic-representation>.
14. *Luminous intensity distribution curve* [online]. Arnsberg, 2019 [cit. 2021-03-07]. Dostupné z: <https://www.trilux.com/en/lighting-practice/lighting-equipment/luminaires/photometric-classification/luminous-intensity-distribution-curve/>.
15. *Wolfram MathWorld: The Web's Most Extensive Mathematics Resource* [online]. 2021 [cit. 2021-03-10]. Dostupné z: <https://mathworld.wolfram.com/FullWidthatHalfMaximum.html>.
16. *LedsMaster: LED Lighting for All Outdoor & Indoor Applications* [online]. La Puente, 2021 [cit. 2021-03-14]. Dostupné z: <https://www.ledsmaster.com/what-is-light-uniformity-how-to-calculate-lux-level-lighting-uniformity.html>.
17. POLYANSKIY, Mikhail N. *Refractive index database* [online] [cit. 2021-05-22]. Dostupné z: <https://refractiveindex.info>.
18. *What is a TIR Lens?* [Online]. Arlington [cit. 2021-04-05]. Dostupné z: <https://www.opticsforhire.com/blog/what-is-a-tir-lens>.

Zoznam príloh

A	Zdrojové dáta získané simuláciami	60
A.1	Optiky dostupné na trhu	60
A.2	Svietidlo osadené optikou LEDiL	62
B	Histogramy	63
B.1	1. pozícia LED v svietidle	63
B.2	2. pozícia LED v svietidle	64
B.3	3. pozícia LED v svietidle	64
B.4	4. pozícia LED v svietidle	65
B.5	5. pozícia LED v svietidle	65
B.6	6. pozícia LED v svietidle	66
B.7	7. pozícia LED v svietidle	66
B.8	8. pozícia LED v svietidle	67

A Zdrojové dáta získané simuláciami

Hodnoty (E_{min} a E_{avg}) uvedené v tabulkách v tejto časti prílohy sú výstupom simulácií v nástroji SPEOS. Koeficient rovnomernosti osvetlenosti U_1 je vypočítaný podľa vzťahu 4.1.

A.1 Optiky dostupné na trhu

Počet lúčov v simulácii bol pri každej optike nastavený na 10 miliónov. D1, D2 a D3 sú štvorcové oblasti umiestnené na detektore. Tie majú veľkosť (60×60) mm a sú predmetom analýzy osvetlenosti. Ich poloha na detektore je popísaná v časti 4.1.3 tejto práce.

Označenie „(bez optiky)“ znamená, že medzi LED a detektorom sa nenachádza žiadny optický prvok, ktorý by upravoval vyžiarený svetelný tok zdroja.

Výrobca	Označenie	Oblasť								
		E_{min} (lx)	D1 E_{avg} (lx)	U_1 (1)	E_{min} (lx)	D2 E_{avg} (lx)	U_1 (1)	E_{min} (lx)	D3 E_{avg} (lx)	U_1 (1)
	(bez optiky)	6382,92	8409,92	0,759	5273,40	7639,94	0,690	4127,40	6681,92	0,618
Carclo	10510	15 839,80	39 643,40	0,400	9136,78	29 691,40	0,308	4734,21	19 711,60	0,240
Carclo	10627	251,19	2153,54	0,117	251,19	1875,71	0,134	257,05	2223,06	0,116
Carclo	12763	5083,35	6045,41	0,841	4508,15	5818,18	0,775	4483,83	5588,97	0,802
Carclo	12813	10 297,10	15 788,70	0,652	7250,68	13 826,60	0,524	4992,87	11 269,10	0,443
Carclo	12815	11 399,90	19 791,30	0,576	8408,91	16 506,60	0,509	5087,49	12 966,00	0,392
LEDiL	C13413	11 096,20	25 507,00	0,435	5318,20	19 956,80	0,267	3085,18	13 511,30	0,228
LEDiL	C15246	15 334,70	23 484,40	0,653	7807,30	20 745,10	0,376	2721,47	16 280,90	0,167
LEDiL	CA16308	8511,26	11 153,70	0,763	8612,08	10 908,60	0,790	6451,46	10 236,00	0,630
LEDiL	FA11904	10 370,40	15 526,80	0,668	8739,05	13 603,50	0,642	6922,20	11 627,30	0,595
LEDiL	FA15480	9326,21	13 475,60	0,692	9404,69	15 722,60	0,598	6813,12	15 879,80	0,429
LEDiL	FP16562	10 556,80	36 228,50	0,291	5323,15	24 729,20	0,215	2243,02	14 903,50	0,151

A.2 Svietidlo osadené optikou LEDiL

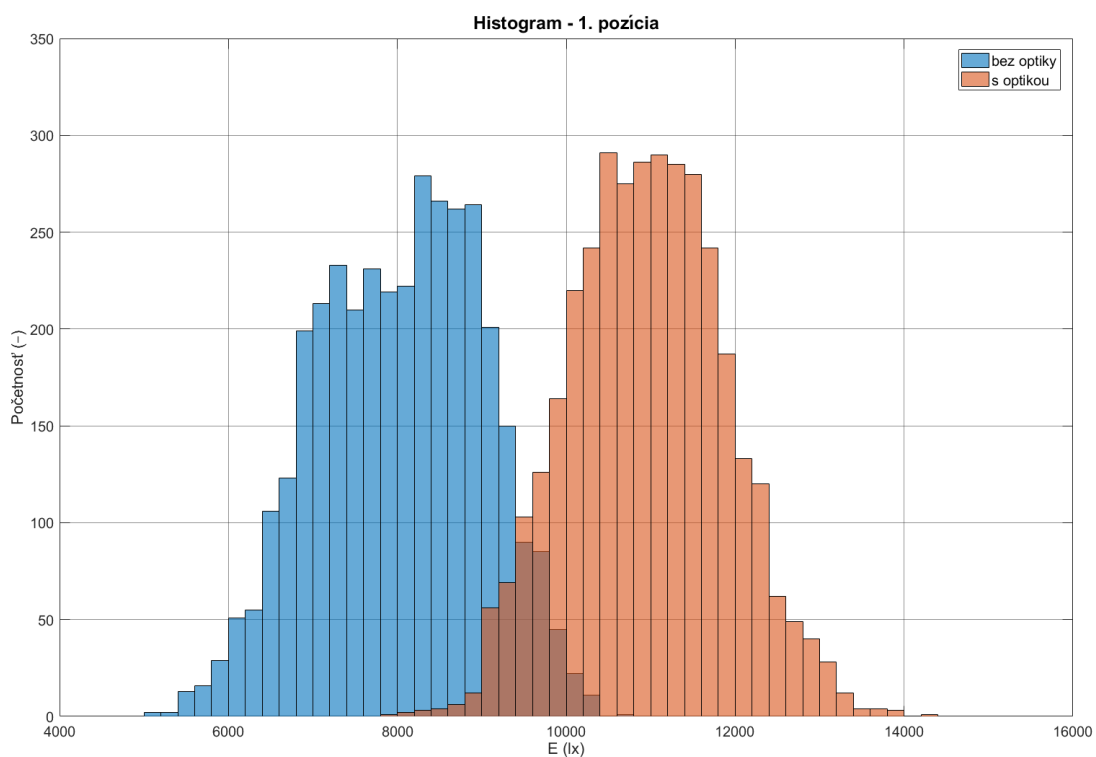
Detektorom je štvorec s rozmermi (60×60) mm, ktorý je umiestnený do vzdialenosti 150 mm od svietidla. Jeho vzorkovanie má hodnotu 60, čo predstavuje rozlíšenie 1 mm. Počet lúčov v simulácii bol nastavený na 100 miliónov. Počas každej simulácie bol rozsvietený jeden svetelný zdroj ako je uvedené v časti 4.3.2 tejto práce.

LED	Bez optiky			S optikou		
	E_{avg} (lx)	E_{min} (lx)	U_1 (1)	E_{avg} (lx)	E_{min} (lx)	U_1 (1)
1	8 026,24	5 080,15	0,633	10 959,80	7 976,13	0,728
2	8 059,92	4 844,21	0,601	10 921,60	8 233,90	0,754
3	8 052,55	5 258,68	0,653	11 008,40	7 960,90	0,723
4	8 004,46	5 207,01	0,651	11 017,30	7 940,68	0,721
5	7 963,31	4 562,05	0,573	11 048,80	8 178,57	0,740
6	7 931,27	4 625,21	0,583	11 010,60	7 672,68	0,697
7	7 974,93	4 488,17	0,563	10 958,40	7 938,39	0,724
8	7 989,21	3 766,15	0,471	10 924,60	7 802,49	0,714

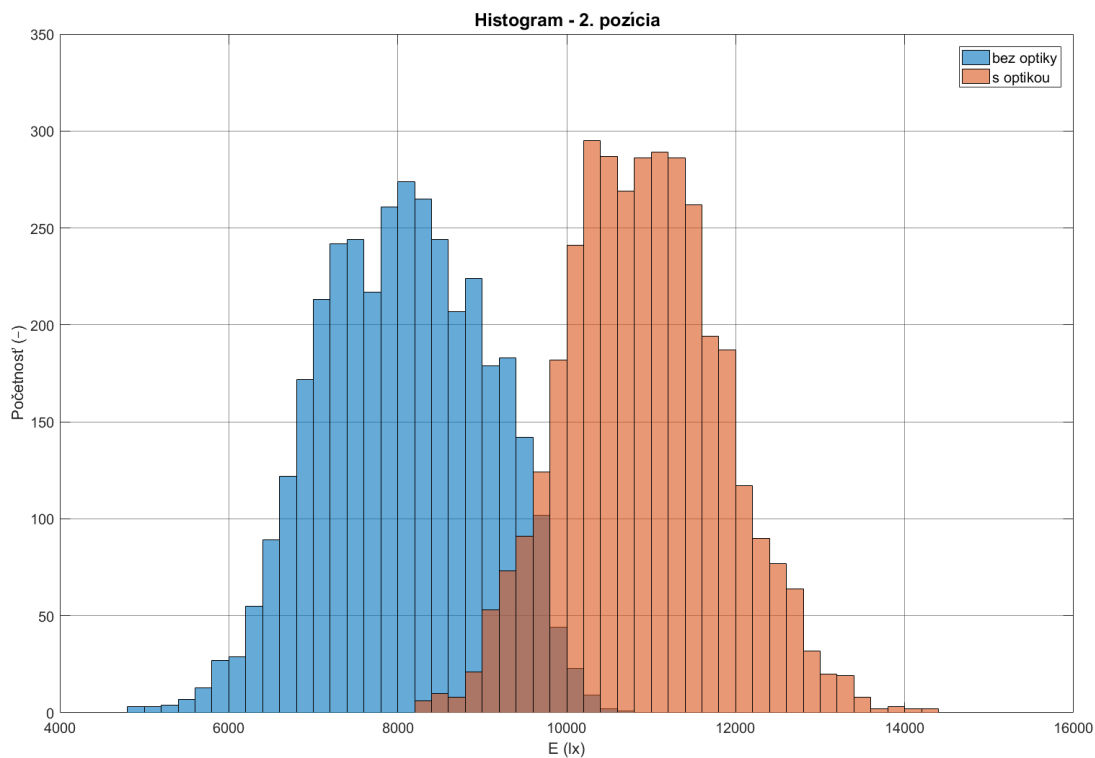
B Histogramy

Histogramy, ktoré sú uvedené v tejto prílohe sú vytvorené v programe MATLAB. Podkladom pre ich vytvorenie sú zdrojové dáta osvetleností detektora, ktorý má štvorcový tvar (60×60) mm a od svietidla je vzdialený 150 mm. Jeho rozlíšenie bolo nastavené na 1 mm a pri simulácii bolo použitých 100 miliónov lúčov. Číselné označenie histogramov korešponduje s pozíciami LED v svietidle, ktoré sú uvedené na obr. 4.12. Trieda histogramu predstavuje $E = 200$ lx.

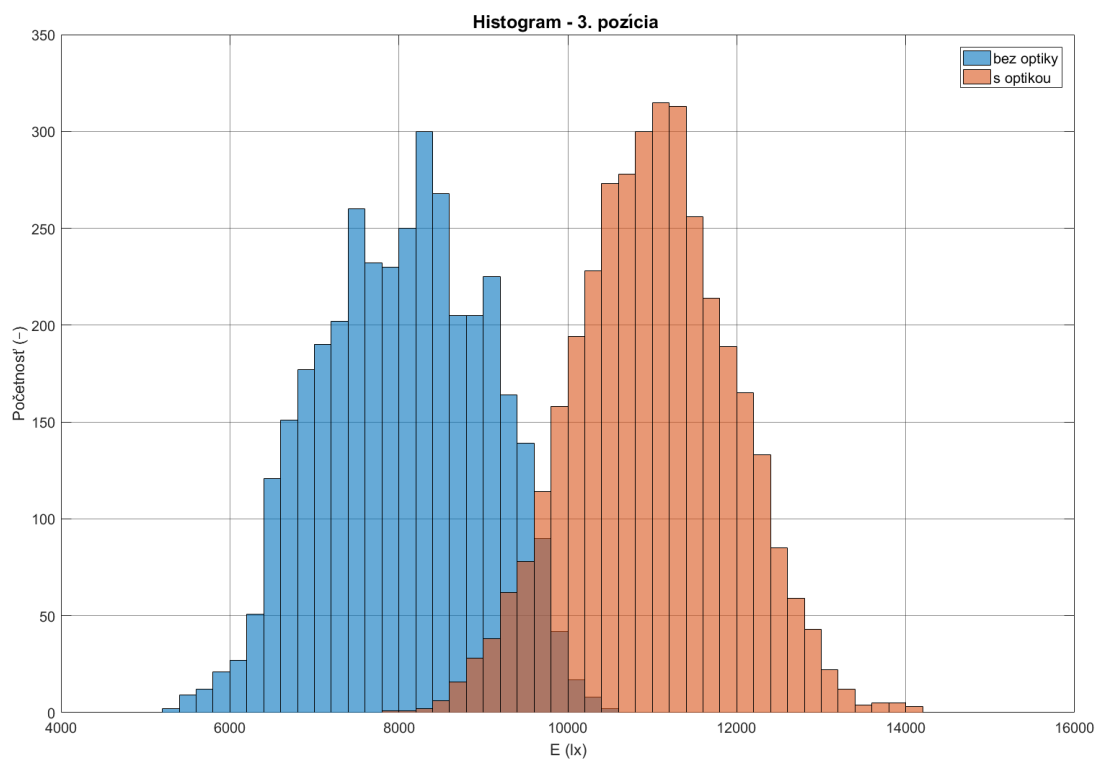
B.1 1. pozícia LED v svietidle



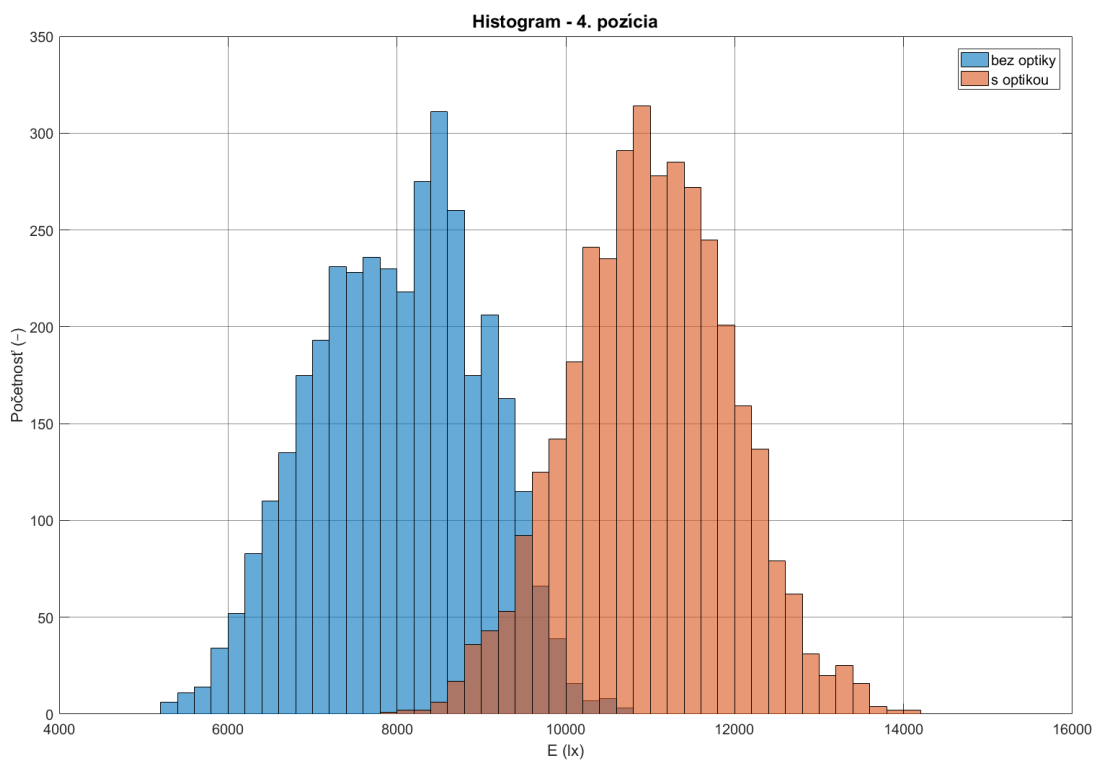
B.2 2. pozícia LED v svietidle



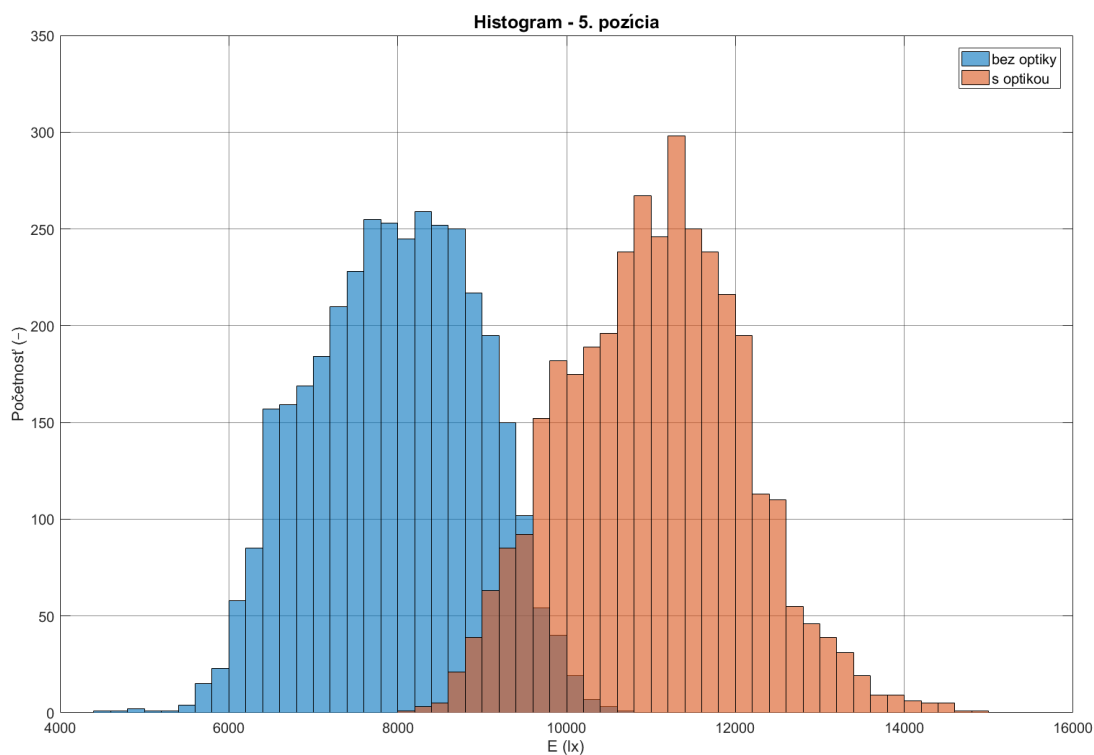
B.3 3. pozícia LED v svietidle



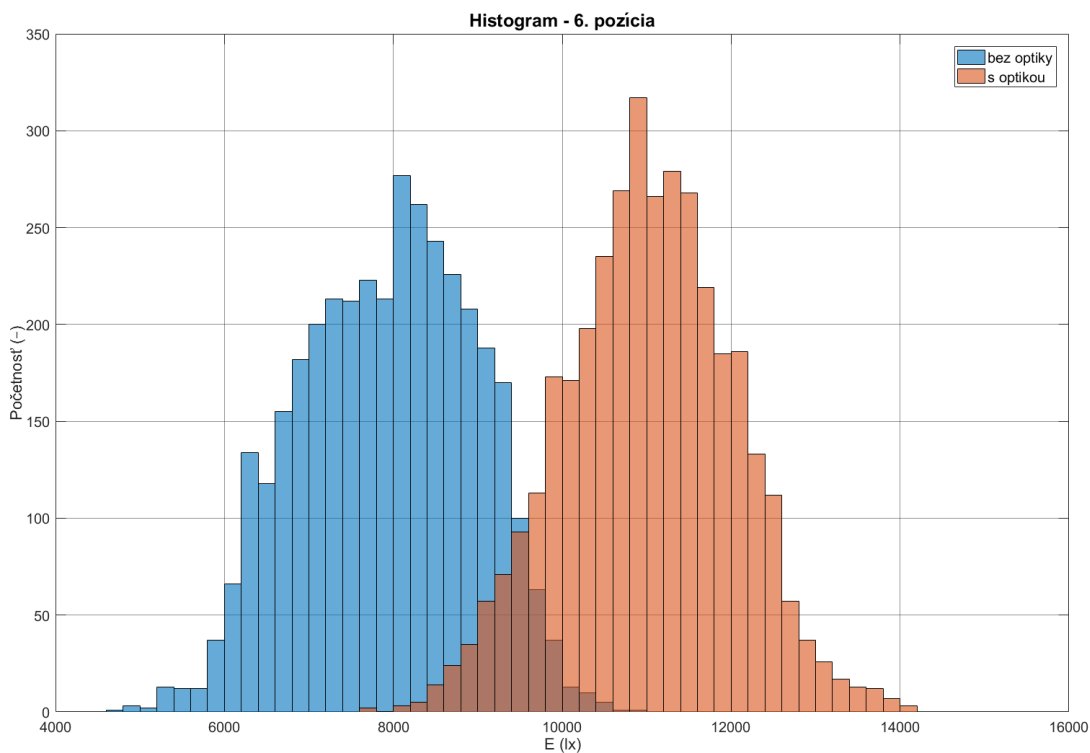
B.4 4. pozícia LED v svietidle



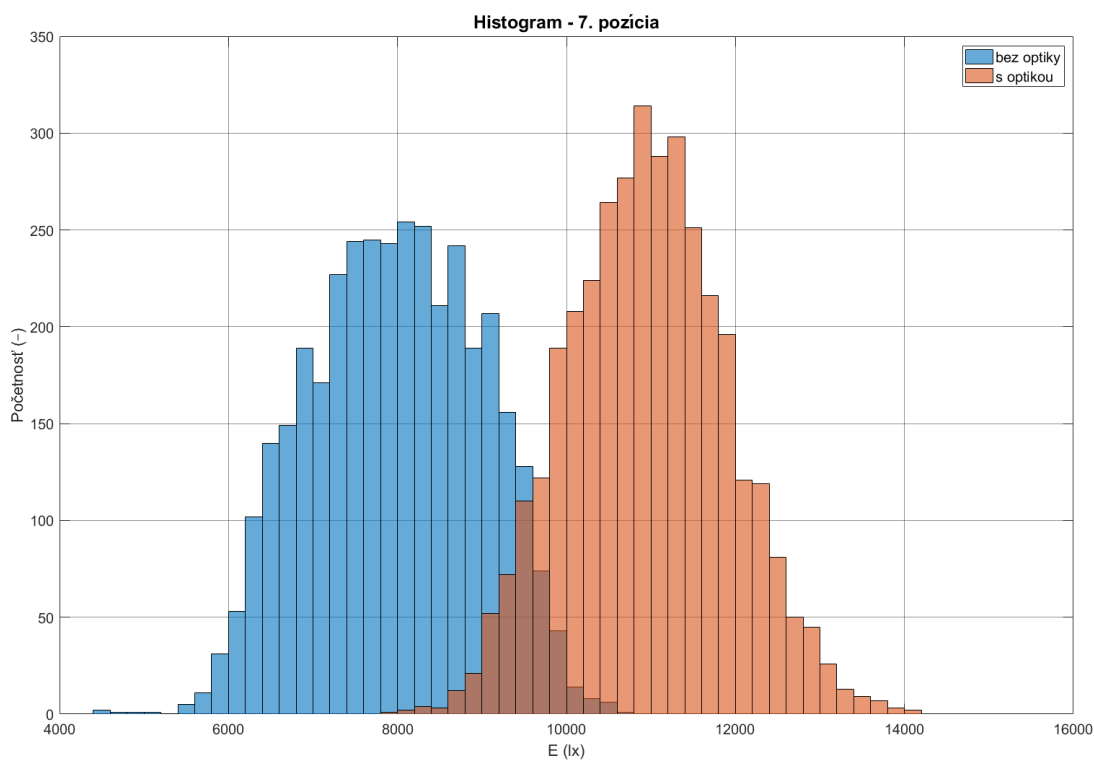
B.5 5. pozícia LED v svietidle



B.6 6. pozícia LED v svietidle



B.7 7. pozícia LED v svietidle



B.8 8. pozícia LED v sietidle

