International Scientific Conference 20 UNITECH 26

INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE
19-21 November 2026
GABROVO

ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ВАЛИДИРАНЕ НА МЕТОДА МОНТЕ КАРЛО RAYTRACING ЧРЕЗ ФОТОМЕТРИЧНИ ИЗМЕРВАНИЯ НА УЛИЧЕН LED ОСВЕТИТЕЛ С АСИМЕТРИЧНО СВЕТЛОРАЗПРЕДЕЛЕНИЕ

Зорница Димитрова[1], Милко Йовчев[1,2], Христо Ибришимов[1,2], Пламен Цанков[1,2], Ивайло Стоянов[1,2], Христо Бенев[1]

[1]Технически университет – Габрово, ул. „Хаджи Димитър“ № 4, Габрово, България
[2] Център за компетентност „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“
**кореспондиращ автор: myovchev@tugab.bg*

EXPERIMENTAL VALIDATION OF MONTE CARLO RAYTRACING METHOD THROUGH PHOTOMETRIC MEASUREMENTS OF ROAD LED LUMINAIRE WITH ASYMMETRIC LIGHT DISTRIBUTION

Zornitsa Dimitrova[1], Milko Yovchev[1,2], Hristo Ibrishimov[1,2], Plamen Tsankov[1,2], Ivaylo Stoyanov[1,2], Hristo Benev[1]

[1]Technical University of Gabrovo, 4 Hadzhi Dimitar str., Gabrovo, Bulgaria
[2]Center of competence "Smart mechatronic, eco-and energy-saving systems and technologies"
**Corresponding author: myovchev@tugab.bg*

Abstract
The paper sets out the validation results of a probabilistic-statistical Monte Carlo ray tracing method for road LED luminaire with asymmetric light distribution type. These results are based on photometric measurements obtained with a goniophotometer in an accredited testing laboratory in Technical University of Gabrovo. For the purposes of this study, measurements of light distribution curves, luminous intensity, position of maximum intensity, and useful luminous flux were performed on physical prototype. Based on the Monte Carlo ray tracing method, specialized software was used to carry out optical design and photometric analyses. A comparative analysis of the obtained photometric characteristics confirms the validity of the method for road LED luminaire with asymmetric light distribution.

Keywords—light distributions, LED luminaire, measurement, goniophotometer, photometric analysis, Raytracing method.

ВЪВЕДЕНИЕ

През последните десетилетия нарастването на изчислителната мощност на компютрите създаде възможност за развитие и усъвършенстване на осветлителното симулиране. Разработени са редица софтуери за проектиране и фотометричен анализ на оптични системи на осветители [1,2,3,4]. Повечето от тях работят с приложение на правата светлотехническа задача, в която всяка промяна и изменение в геометрията и оптичните свойства на елементите на осветителя водят до изменение на постигнатите фотометрични показатели. В основата на тези софтуерни решения стоят вероятностно-статистически методи. Най-широко използваният метод от тях за трасиране на лъчи от осветител е методът Монте Карло Raytracing [2,4,5,6]. Чрез

Print ISSN: 1313-230X, Online ISSN: 3033-1404

този метод се постига статистически коректно разпределение на светлинните лъчи, като се премахва необходимостта от предварителни допускания относно характера на оптичната повърхност или пътя на лъчите. Този подход гарантира висока степен на точност и реалистичност при възпроизвеждането на сложни осветителни условия [9,10,11,12].

На базата на вероятностната интерпретация на фотометричните величини се симулира процеса на разпространение на лъчите. Светлинният поток Φ_A, падащ от светлинен източник върху повърхност ΔA е право пропорционален на вероятността P_A лъчите, излъчени от светлинния източник, да попаднат върху тази повърхност:

$$\Phi_A = P_A \Phi_s , \qquad (1)$$

където Φ_s е светлинният поток на светлинния източник.

В последствие задачата се свежда до определяне на вероятността P_A. За целта светлинният поток на светлинния източник Φ_s се представя като крайно множество от N светлинни лъчи. На случен принцип се избира лъч от множеството, на който се присвоява начално тегло (енергия) $w = 1$. В последствие се проследява траекторията на разпространение на всеки един от N лъчите в разглежданото пространство. Когато i-тият лъч удари елементарна площ ΔA, остатъчното му тегло w_i, след преминавания или отражения, се натрупва. В резултат на построяването на траекториите на всички N лъчи, сумата от остатъчните тегла на всички лъчи, падащи върху ΔA се натрупва върху ΔA; отношението на тази сума към N представлява статистическа оценка $\overline{P_A}$ на търсената вероятност P_A:

$$P_A \approx \overline{P_A} = \left(\frac{1}{N}\right)\sum_{i=1}^{n} w_i . \qquad (2)$$

Статистическата оценка на средната стойност на интензитета на светлината $\overline{I(\gamma,\varphi)}$ за даден пространствен ъгъл, чиято ос е ориентирана съгласно ъглите γ и φ, е:

$$\overline{I(\gamma,\varphi)} = \frac{\Phi_s}{N.\Delta\Omega(\gamma,\varphi)}\sum_{i=1}^{n} w_i = \frac{M_A.\Delta A_s}{N.\Delta\Omega(\gamma,\varphi)}\sum_{i=1}^{n} w_i , \qquad (3)$$

където M_A е светимостта на елементарна площ ΔA_s, w_i са теглата на падащите N лъчи в елементарния пространствен ъгъл $\Delta\Omega(\gamma,\varphi)$.

Виртуалните модели, създадени на база физическите прототипи, се разработват в специализирани софтуерни инструменти. Пространственото разпределение на интензитета на светлината, т.е. на светлоразпределителната крива (СРК) на един осветител се измерва с гониофотометър. Интензитетът на светлината в отделните пространствени зони може да бъде измерван чрез измерване на осветеността и изчисление по фотометричния закон за разстоянието (закон за квадратичното отдалечение), или чрез интегриране на яркостта [14,15,16,17]. Общият светлинен поток Φ, измерен с гониофотометър, се изчислява чрез интегриране на интензитета на светлината $I(\gamma,\varphi)$ в определена посока на оста на конуса, обхващащ изследвания осветител.

Фотометричният анализ на оптичните системи на осветителите изисква прецизно задаване на три параметъра: *брой на трасираните светлинни лъчи N*, *брой на взаимодействията (реакции) на трасирания лъч m* и *минимално тегло на лъча* w_{min}. Благодарение на съвременните постижения в областта на изчислителната техника продължителността на симулацията при зададен голям брой трасирани лъчи е значително съкратена. Параметърът N определя до голяма степен гладкостта на светлоразпределителните криви – при по-голям брой трасирани лъчи резултатите са по-коректни, а СРК е съответно по-гладка.

Параметърът m от своя страна характеризира взаимодействието между трасирания лъч и средите, до които той до-

стига по пътя си, като отчита многократните отражения, пречупвания и преминавания, настъпващи по време на трасирането. По този начин се постига минимизиране на неотчетения светлинен поток в оптичната система на осветителя.

Минималното тегло на лъча w_{min} се определя чрез остатъчното тегло, с което лъчът приключва трасирането си, изразено като процент от първоначалната му стойност [6,9,10].

Настоящият доклад представя резултатите от валидирането на вероятностно-статистическия метод Монте Карло Raytracing, приложен за уличен светодиоден (LED) осветител с асиметрично светлоразпределение на база фотометрични измервания, получени с гониофотометър и виртуална симулация създадена чрез софтуер за моделиране Rhino и приложения метод за трасиране на лъчи в специализирания софтуер Photopia.

ИЗЛОЖЕНИЕ

Валидирането на метода Монте Карло Raytracing за уличен LED осветител с асиметрично светлоразпределение се извършва в следните етапи:

- Измерване на фотометрични показатели на физическия прототип с гониофотометър;
- Проектиране на изследвания осветител чрез триизмерно изграждане на елементите на оптичната система, задаване на оптичните свойства, настройка на параметри и извършване на фотометрични изчисления и анализ чрез специализиран софтуер, базиран на метода;
- Валидиране на метода чрез сравнителен анализ на получените фотометрични показатели.

Измерването на фотометричните показатели – светлоразпределение, ъгъл на светлинния сноп ($0{,}5I_c$), ъгъл на светлинното поле ($0{,}1I_c$) и общ светлинен поток Φ, на изследвания уличен LED осветител се провежда с гониофотометър, разположен в акредитирана изпитвателна лаборатория „Екологични, енергоспестяващи и електромагнитно съвместими осветителни, LED и ВЕИ компоненти и технологии“ към Технически университет – Габрово, съгласно изискванията на ISO/IEC 17025:2018 [11,12,13].

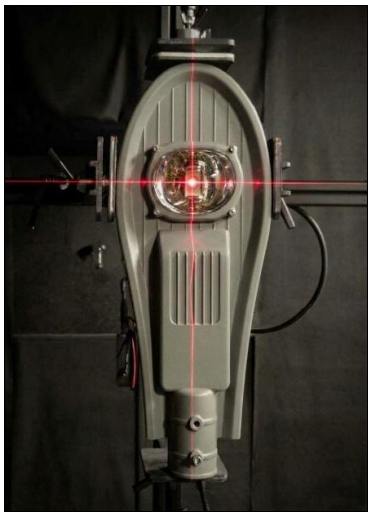
За измерване на СРК се използва гониофотометрична система LSG-1700B. Гониофотометърът извършва ротационно движение на уличния LED осветител около две взаимно перпендикулярни оси, чието пресичане е фотометричният център на осветителя. Този тип гониофотометър използва единичен фотометричен детектор, позициониран на разстояние 8 m от фотометричния център. Основните параметри на гониофотометричната система LSG-1700B са следните: фотометрична точност – клас А по CIE; точност на фотометричното изпитване – 2 % при стандартните източници на CIE; ъглова точност – 0,2°; разсейване на светлина ≤ 0,1 %; максимален размер на изпитвания осветител в системата C-γ – диаметър 1600 mm × дълбочина 550 mm; диапазон на фотометричните координати – от 0,0° до 360°. Измерванията се извършват при контролирани електрически (номинално напрежение и номинален ток) и околни условия (температура на околната среда 25 °C и относителна влажност 55 %) [13].

Физическият прототип на изследвания уличен LED, за които са измерени фотометричните показатели с гониофотометър, е показан на фиг. 1.



Фиг. 1. *Физически прототип на изследвания уличен LED осветител*

Изследваният LED осветител се монтира на въртяща се опора, като центрирането по оптичната ос на гониофотометъра се извършва с помощта на самонивелираща се лазерна система с два лазерни лъча, както е показано на фиг. 2.

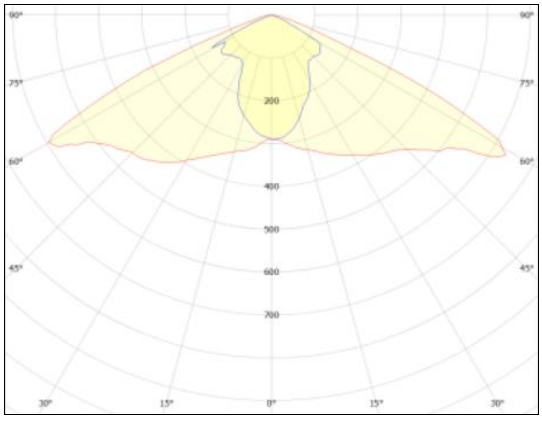


Фиг. 2. *Позициониране на изследвания LED осветител към гониофотометъра*

Управление на измерването с гониофотометъра се осъществява със специализиран софтуер, включващ движението на гониофотометъра, събирането и обработката на измервателните данни, визуализацията в реално време и експортиране на фотометрични файлови формати (LDT и IES) [13,14].

Светлоразпределителните криви се привеждат към условен светлинен поток Φ = 1000 lm и се представят в [cd/klm]. На фиг. 3 са показани измерените СРК за две фотометрични равнини – С0°-180° (червена крива) и С90°-270° (синя крива).

Вертикалният ъглов интервал е зададен на $\Delta\gamma$ = 1° в диапазона от 0° до 90°. Измерванията са извършени в 72 броя *С*-равнини през интервал ΔC = 5° [15,16,17].



Фиг. 3. *СРК на изследвания LED осветител, измерени с гониофотометъра*

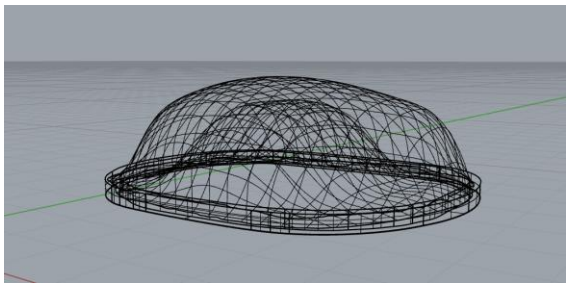
В табл. 1 са показани измерените с гониофотометъра фотометрични показатели: интензитет на светлината под фотометричната ос на осветителя I_c, максимален интензитет на светлината I_{max}, ъгъла на светлинния сноп ($0{,}5I_c$), ъгъл на полето ($0{,}1I_c$) и общия светлинен поток Φ_o на изследвания LED осветител.

Табл. 1. *Фотометрични параметри на изследвания LED осветител, измерени с гониофотометър*

I_c	I_{max}	I_{max} *при* *C-γ*	Ъгъл на лъча $0{,}5I_c$	Ъгъл на полето $0{,}1I_c$	Φ_o
$\left[\frac{cd}{klm}\right]$	$\left[\frac{cd}{klm}\right]$	[°]	*C0 °*	*C0 °*	[lm]
290,11	655,10	C5°; γ59°	131,60	154,19	1758,4

Следващият етап е създаване на виртуален модел на физическия уличен LED осветител. В софтуер за триизмерно (3D) моделиране Rhino 8 се изграждат отделните елементи на оптичната система на осветителя – оптична леща и разсейвател.

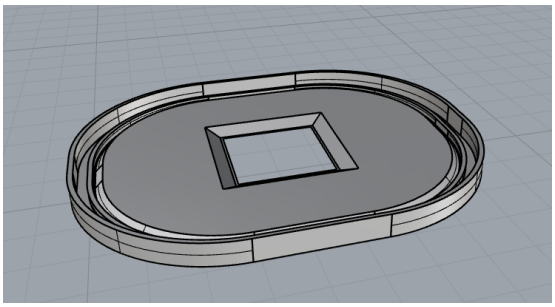
Триизмерният модел на лещата се изгражда с форма и размери, аналогични на действителния модел. Размерите са: широчина 102 mm, дължина 85 mm, височина 32.5 mm и дълбочина 26 mm. На фиг. 4 е показан изграденият модел на лещата, която има функция на рефрактор, т.е. преразпределя светлинния поток на LED осветителя.



Фиг. 4. *3D изглед на лещата*

Освен създаването на лещата за коректни изчисления е необходимо да се създаде и основа, върху която се позиционират лещата и LED матрицата. На фиг. 5 е показан външния вид на изгра-

дената основа, която изпълнява функцията на отражател в оптичната система на осветителя.

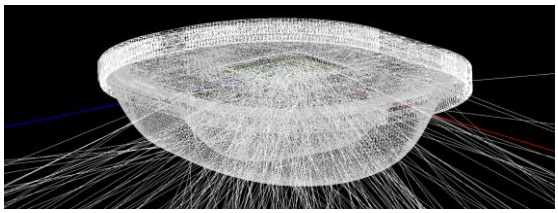


Фиг. 5. *3D изглед на основата*

Изградените елементи на оптичната система на LED осветителя се импортират в софтуер за фотометричен анализ Photopia. Задават се слоеве с материали и оптични свойства на елементите и се въвеждат светлинните източници на осветителя. Характеристиките на материалите, изграждащи оптичната система и светлинния източник на осветителя, са следните:

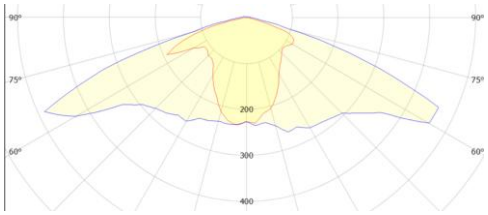
- за лещата се избира слой Refractive и материал стъкло с показател на пречупване $n = 1{,}48$;
- за основата на осветителя се избира слой Reflective и материал алуминий с коефициент на отражение $\rho = 98$ %;
- от библиотека на програмата се използва аналогичен на физическия модел светлинен източник – COB (Chip on Board) матрица, тип LED 50W5012 Series Cool White (1.6A).

При фотометричния анализ на изследвания осветител се задават същите ъглови интервали за вертикалния фотометричен ъгъл γ ($\Delta\gamma = 1°$) и за C-равнините, както при измерванията с гониофотометъра, с което се осигурява необходимата коректност при валидирането на метода на Монте Карло Raytracing. Това е много важно за точното трасиране на лъчите, тъй като лъчите взаимодействат с елементите на осветителя [6]. Триизмерен изглед на резултатите от фотометричния анализ с напусналите оптичната система светлинни лъчи на LED осветителя показан на фиг. 6.

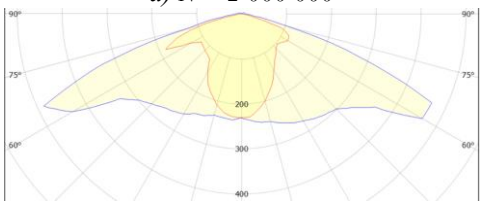


Фиг. 6. *3D изглед на оптичната система и извършен фотометричен анализ с напусналите светлинни лъчи*

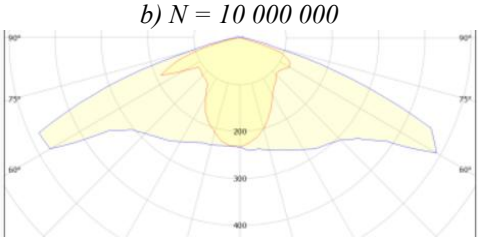
На фиг. 7 са показани СРК за същите равнини – C0°-180° (червена крива) и C90°-270° (синя крива) за различен брой трасирани лъчи N. Липсата на гладкост във формата на СРК е значителна, когато броят на трасираните лъчи е $N \leq 5\,000\,000$, поради по-големите абсолютни грешки в статистическата оценка на търсения интензитет на светлината, т.е. получава се недостатъчния брой лъчи, попадащи в даден пространствен ъгъл Ω. Анализът показва, че когато броят на трасираните лъчи е $N = 10\,000\,000$, се генерира достатъчно гладко светлоразпределение. При $N > 10\,000\,000$ гладкостта на СРК се подобрява незначително, но изисква значително по-дълго изчислително време при същата компютърна конфигурация.



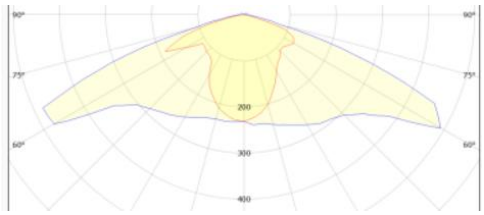
a) N = 2 000 000



b) N = 10 000 000



c) N = 20 000 000



d) N = 100 000 000

Фиг. 7. *Реализирани СРК по метода Монте Карло Raytracing при различен брой трасирани лъчи*

Броят на реакциите на лъча m се определя от материала и формата на елементите на оптичната система. Достатъчни са m = 26 реакции, при което лъча напуска елементите на оптичната система. За постигане на максимална статистическа точност по време на фотометричната симулация е зададен праг на минималното тегло на лъча w_{min}, като 1 % от светлинния поток остава неотчетен [6,10].

В табл. 2 са показани реализираните показатели след фотометричните изчисления по метода на Монте Карло Raytracing за виртуалния модел на уличния LED осветител: интензитет на светлината под фотометричната ос на осветителя I_c, максимален интензитет на светлината I_{max}, ъгъла на светлинния сноп ($0{,}5I_c$), ъгъл на полето ($0{,}1I_c$) и общия светлинен поток Φ_o на изследвания LED осветител.

Табл. 2. *Фотометрични характеристики на осветителя след компютърно базирания фотометричен анализ, извършен по метода Монте Карло Raytracing*

Зададен брой трасирани лъчи: N = 10 000 000; брой реакции на лъча m = 26; минимално тегло на лъча: w_{min} = 1 %					
I_c	I_{max}	I_{max} при C-γ	Ъгъл на лъча $0.5I_c$	Ъгъл на полето $0.1I_c$	Φ_o
$\left[\frac{cd}{klm}\right]$	$\left[\frac{cd}{klm}\right]$	[°]	$C0°$	$C0°$	[lm]
231,64	494	C0°/ γ60°	149,01	166,02	1742

Валидирането на метода на Монте Карло Raytracing за уличния LED осветител се извършва чрез определяне на процентното отклонение между основните фотометрични характеристики, измерени с гониофотометър, и тези, симулирани в софтуерната среда. Относителното отклонение Δx се определя с израза:

$$\Delta x = \frac{|x_0 - x|}{x}.100, [\%], \qquad (4)$$

където: x_0 – измерената с гониофотометъра (референтна) стойност на фотометричната величина; x – симулираната стойност на същата фотометрична величина.

В табл. 3 са представени получените относителни отклонения на основните фотометрични параметри, получени чрез симулацията по метода Монте Карло Raytracing и съпоставими с измерванията с гониофотометъра.

Табл. 3. *Относително отклонение на фотометричните показатели за изследвания уличен LED осветител*

ΔI_c, [%]	ΔI_{max}, [%]	$\Delta(0.5I_c)$, [%]	$\Delta(0.1I_c)$, [%]	$\Delta\Phi_o$, [%]
		$C0°$	$C0°$	
19 %	24 %	9 %	8 %	0,94 %

В таблицата са показани получените отклонения на интензитета на светлината под фотометричната ос на осветителя ΔI_c, на максималния интензитет на светлината ΔI_{max}, на ъгъла на светлинния сноп ($\Delta 0{,}5I_c$), на ъгъла на полето $\Delta\,(0{,}1I_c)$ и на общия светлинен поток $\Delta\Phi_o$ на осветителя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При реализирането на вероятностно-статистическия метод Монте Карло Raytracing за фотометричен анализ на оптичната система на изследвания уличен LED осветител с асиметрично светлоразпределение от съществено значение е коректното моделиране на отделните елементи. Въз основа на проведените симулационни изследвания и тяхното съпоставяне с данните от измерване с гониофотометър в акредитирана лаборатория, могат да се направят следните анализи и изводи:

- Физическото определяне на фотометричните характеристики на изследвания осветител се осъществява с гониофотометрична измервателна система в акредитирана лаборатория, при контролирани и метрологично проследими условия на измерване. По този начин се гарантира необходимата точност на получените коректни резултати (фиг. 3 и табл. 1);

- След това параметрите на метода се прецизират за постигане на коректен фотометричен анализ. Гладкостта на СРК в симулацията се влияе от броя на трасираните светлинни лъчи *N*, който зависи от зададения вертикален ъглов интервал *Δγ*, съответстващ на измерванията, и от геометричната форма на оптичната система;

- Получените относителни отклонения на основните фотометрични характеристики на изследвания уличен LED осветител зависи от точността на възпроизвеждане на оптичните свойства на елементите, тяхната геометрична форма и разпределението на яркостта на светлинните източници при симулацията в сравнение с физическия прототип;

- Съпоставката между симулираните СРК в специализирания софтуер (фиг. 7) и измерените СРК с гониофотометър (фиг. 3) показва съответствие в основните фотометрични характеристики на осветителя. СРК имат идентична по тип асиметрична форма с изразен максимум на вертикалния ъгъл в диапазона $\gamma = (59 \div 60)°$. Отклонението на общия светлинен поток е под 1% (табл. 3); отклоненията на ъгъла на светлинния сноп (9 %) и на светлинното поле (8 %) показват задоволителна точност, тъй като геометрията на лещата по тази ос е пресъздадена с висока прецизност. По-високите отклонения на I_{max} са локализирани и систематични за отделните С-равнини, а не случайни, което улеснява тяхната последваща целенасочена корекция чрез фина настройка на наклона на повърхността в тази конкретна равнина.

Настоящото изследване потвърждава необходимостта от изследване на оптичните свойства на елементите на уличния LED осветител и от прецизно настройване на параметрите за фотометричен анализ. Това е предпоставка за постигане на висока статистическа точност и коректност на метода за фотометричен анализ Монте Карло Raytracing.

БЛАГОДАРНОСТИ:

Това изследване е финансирано от Европейския фонд за регионално развитие в рамките на ОП „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г., Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“.

Статията е финансирана по проект: BG05SFPR001-3.004-0018-C01 „Подкрепа за развитие на проектна докторантура по професионално направление 5.2 „Електротехника, Електроника и Автоматика“ в Технически Университет - София.“

ЛИТЕРАТУРА

1. Y. Li, L. Yang, and H. Lin, “Ray Tracing Augmented with Monte Carlo Diffuse Scattering for Dense Multipath Components Simulation,” in IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 24 (12), pp. 4905-4909, 2025, IEEE, doi: 10.1109/LAWP.2025.3615633.
2. K. Ellepola, et al., “Monte Carlo Ray-Tracing Simulations for Diffractive Optics,” Opt. Express, Vol. 34 (3), 2026, pp. 4465-4480, https://doi.org/10.1364/OE.581470.
3. S. Lan, H. Wan, J. Zhao, and S. Zhou, “Light Extraction Analysis of AlGaInP Based Red and GaN Based Blue/Green Flip-Chip Micro-LEDs Using the Monte Carlo Ray Tracing Method,” Micromachines Vol. 10 (12), 860, MDPI, 2019, ISSN 2072-666X, https://doi.org/10.3390/mi10120860.

4. Z. Liu, Kai Wang, Xiaobing Luo, and Sheng Liu, “Precise Optical Modeling of Blue Light-Emitting Diodes by Monte Carlo Ray-Tracing,” Opt. Express, Vol. 18 (9), 2010, pp. 9398-9412, https://doi.org/10.1364/OE.18.009398.
5. J. Sarasook and C. Thongchaisuratkrul, “The Experimental Set of Light Distribution Analysis by LabView Application,” 5th International Conference on Advanced Informatics: Concept Theory and Applications (ICAICTA), Krabi, Thailand, 2018, pp. 188–191, ISBN: 978-1-5386-4804-9, doi: 10.1109/ICAICTA.2018.8541332.
6. M. Yovchev, and P. Tsankov, “Optimization of the Lens Shape of Industrial LED Luminaire with Rotational Symmetry of the Light Distribution,” International Scientific Conference “UNITECH 2016”, Gabrovo, Bulgaria, 2016. pp. I 63-68, ISSN 1313-230X. (in Bulgarian)
7. Z. Liu, X. Lin, Y. Zhao, and J. Feng, “Determination of Simulation Parameters in Monte Carlo Ray Tracing for Radiative Flux Density Distribution Simulation,” Energy, Vol. 276, 2023, 127586, Elsevier, ISSN 0360-5442, https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127586.
8. Y. Wang, et al., “Verification of Optical Modelling of Sunshape and Surface Slope Error for Concentrating Solar Power Systems,” Solar Energy, Vol. 195, 2020, pp. 461-474, Elsevier, ISSN 0038-092X, https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.11.035.
9. V. Vavilala, R. Vasanth, and D. Forsyth, “Denoising Monte Carlo Renders with Diffusion Models,” 2025 International Conference on 3D Vision (3DV), Singapore, Singapore, 2025, pp. 835-844, IEEE, doi: 10.1109/3DV66043.2025.00082.
10. Photopia (version 2024.2.0) - optical design, simulation, and photometric analysis software.
11. P. Tsankov, I. Soyanov, and M. Yovchev, “Development of a Goniophotometer Calibration Measurement Model for an Uncertainty Budget Applied to the ACcreditation of a New Lighting Laboratory According to ISO/IEC 17025:2017,” Balkan Light 2024 Conference, 28-29 November 2024, Istanbul, ISBN 978-975-561-729-9.
12. Y. Prihhapso, et al., “Monte Carlo Method for Determining the Uncertainty Related to LED Street Light Luminous Flux Measurement,” 10th International Conference on Sustainable Energy Engineering and Application 2022, ICSEEA 2022, Hybrid, Tangerang Selatan, Indonesia, AIP Conference Proceedings, Vol. 3069 (1), 2024, ISSN 0094243X, doi 10.1063/5.0206314.
13. Rotation luminaire goniophotometer – User’s manual, LISUN GROUP, 2018.
14. BDS EN 13032-1:2004+A1:2012: Light and lighting - Measurement and presentation of photometric data of lamps and luminaires - Part 1: Measurement and file format.
15. CIE 121-1996 - The Photometry and goniophotometry of luminaires.
16. CIE 70-1987 - Measurement of absolute luminous intensity distributions.
17. ANSI/IES TM-15-20 - Luminaire classification system for outdoor luminaires, Illuminating Engineering Society, 2020, ISBN-13: 978-0-87995-388-1.