

## ОПТИМИЗАЦИЯ НА СВЕТЕЩАТА ПЛОЩ НА LED ОСВЕТИТЕЛ ЗА ВЪТРЕШНО ОСВЕТЛЕНИЕ ПО ОТНОШЕНИЕ НА ЯРКОСТНИЯ ДИСКОМФОРТ

Милко Йовчев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Технически университет – Габрово

## INDOOR LED LUMINAIRE LUMINOUS AREA OPTIMIZATION TO MINIMIZE THE UNIFIED GLARE RATING

Milko Yovchev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Technical University of Gabrovo

### Abstract

The paper presents a methodology for optimizing an optical system, in terms of the  $R_{UG}$  glare index, by iterative change of the luminous area of an indoor LED luminaire with rotational symmetry of the light distribution intended for indoor workplaces. Building of 3D models of an optical system of indoor LED luminaire by iterative changing of the luminous area by using software for optical design and photometric analysis was made. Comparative photometric analysis using the Monte Carlo raytracing method of the modelled optical systems with an iterative change of the luminous area of the LED luminaire to calculate their photometric characteristics was done. Comparative lighting calculations with an optimum criterion – minimizing of the glare rating, meeting the requirements of lighting standard for an educational premise, through the analysis of which the optimal solution is found.

**Keywords:** LED luminaire, luminous area, light distribution, average luminance, glare rating limit, lighting calculation.

### ВЪВЕДЕНИЕ

Непрекъснато се усъвършенства светодиодната (LED) технология, която се използва в изкуственото осветление, в резултат на което се повишава ефективността и се подобрява качеството на осветлението. Съвременните LED осветители, в зависимост от производителя, могат да имат ефективност над 200 lm/W и общ индекс на цвето предаване  $R_a \geq 90$ . Същевременно вградените в осветителите LED източници имат малка светеща площ и голяма габаритна яркост, която при липса на подходящо екраниране чрез оптична система предизвиква значителен яркостен дискомфорт (заслепяване) и може да влоши видимостта на

обектите [1]. Ограничаването на габаритната яркост е предизвикателство, пред което са изправени производители на LED осветители за вътрешно осветление [2].

Степента на яркостен дискомфорт, предизвикан от осветителите на закрито, се определя чрез използване на обобщената степен на заслепяване  $R_{UG}$  (Unified Glare Rating), която се дефинира в CIE 117-1995 и CIE 190:2010 и ограничава за конкретни зрителни задачи от БДС EN 12464-1:2021, и се определя по следната формула:

$$R_{UG} = 8 \cdot \lg \left( \frac{0,25}{L_B} \cdot \sum \frac{L^2 \omega}{p^2} \right), \quad (1)$$

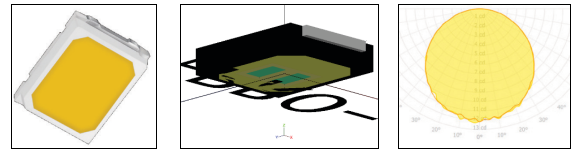
където:  $L_B$  е яркостта на фона [ $\text{cd}/\text{m}^2$ ];  $L$  е яркостта на светещите части на всеки осветител в посоката на окото на наблюдателя [ $\text{cd}/\text{m}^2$ ];  $\omega$  е пространственият ъгъл, под който светещите части на всеки осветител се виждат от окото на наблюдателя [ $\text{sr}$ ];  $p$  е позиционният индекс на Guth за всеки индивидуален осветител, което е свързано с неговото разположение по отношение на линията на погледа [3,4,5].

В доклада се предлага методика за оптимизиране на светещата площ на LED осветител за вътрешно осветление с осева симетрия на светлоразпределението по отношение на яркостния дискомфорт.

## ИЗЛОЖЕНИЕ

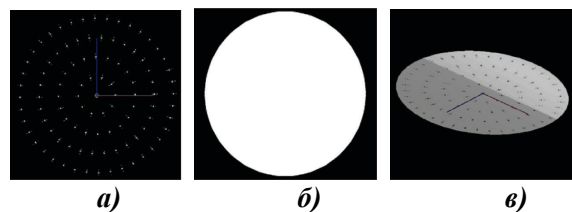
Първоначално се изграждат елементите на оптичната система на LED осветителя с осева симетрия на светлоразпределението: LED източници; платка, върху която се позиционират светлинните източници; дифузен матов разсейвател за осигуряване на равномерна яркостна повърхност; корпус на осветителя, към който се закрепват разсейвателя и платката с диодите. Елементите на оптичната система се създават в софтуер за проектиране и фотометричен анализ Photopia [6].

Използват се LED източници, модел LM281B+PRO-4000K (Samsung), показан на фиг. 1, за които действително са измерени и заложени яркостните характеристики от излъчващите повърхности с реално отчитане на светлоразпределението от всяка повърхност. Характеристиките на единичен светодиоден източник са следните: дължина  $x = 2,80 \text{ mm}$ ; широчина  $y = 3,50 \text{ mm}$ ; височина  $z = 0,65 \text{ mm}$ ; корелирана цветна температура  $T_c = 4000 \text{ K}$ ; общ индекс на цвето предаване  $R_a = 80$ ; номинален ток  $65 \text{ mA}$ ; активна мощност  $0,17875 \text{ W}$ ; светлинен поток  $\Phi_l = 36 \text{ lm}$  и ефективност (без загубите във вторичната оптична система)  $\eta = 201,4 \text{ lm/W}$ .



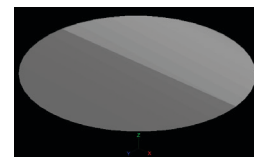
Фиг. 1. Модели на LED източника, който се използва в оптичната система

Създава се полярен масив, в който се разполагат 100 броя LED източници, разпределени в 4 кръга с общ фотометричен център – фиг. 2-а). Първият кръг, който е с най-малък диаметър, съдържа 10 източника, вторият кръг съдържа 20 източника, третият – 30, четвъртият 40. Изгражда се модел на платка, показан на фиг. 2-б), която има кръгла форма с диаметър  $d$ , съобразен с диаметъра на LED масива, и се позиционира върху този масив – фиг. 2-в). Платката и позиционираниите върху нея светодиоди формират кръгла светеща (излъчваща светлина) площ на осветителя.

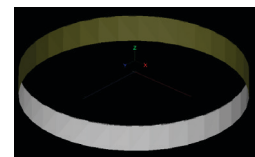


Фиг. 2. Изграждане на кръгла светеща площ на LED осветителя

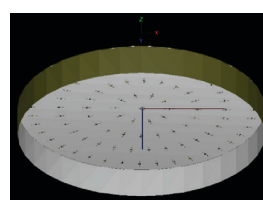
Изграждат се модели на разсейвател (фиг. 3) и профил (фиг. 4). Профилът се позиционира около платката с диодите – фиг. 5; разсейвателят се поставя под кръглата излъчваща повърхност – фиг. 6.



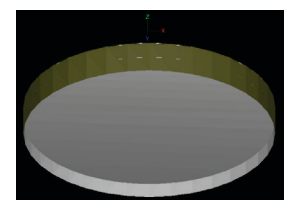
Фиг. 3. Изграждане на разсейвател



Фиг. 4. Изграждане на профил



Фиг. 5. Профил около платката с диоди



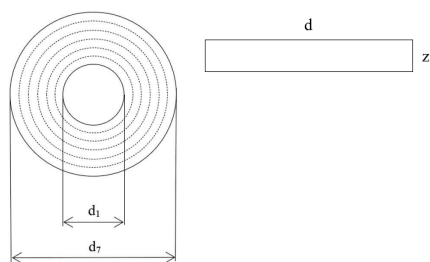
Фиг. 6. Разсейвател, профил, платка с LED

Профилът се изработва от алуминий (Al) с висок коефициент на дифузно отражение, който отвежда топлината, отделяна от светлинните източници. Платката се изработва от бял текстолит с висок коефициент на отражение. Разсейвателят, предназначен да предпазва платката с диодите от механични повреди и влага, се изработва от поликарбонат (PC). Оптичните свойства на материалите, изграждащи елементите на оптичната система на LED осветителя, са представени в табл. 1.

Табл. 1. Материали, изграждащи оптичната система на LED осветителя

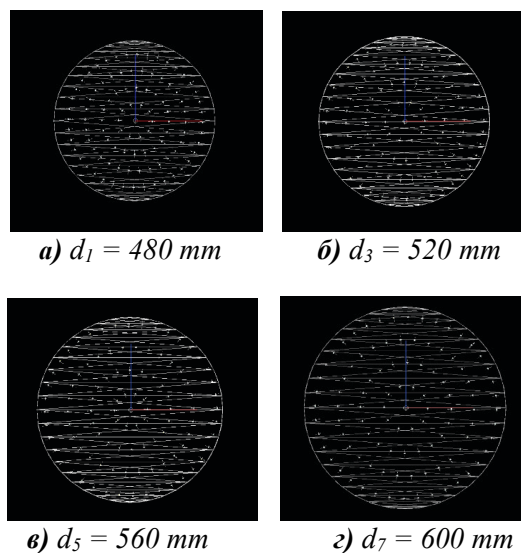
Елемент на оптичната система	Платка	Профил	Разсейвател
Материал	текстолит	Al	PC
Оптичен вид	отражател	отражател	дифузно пропускане
Отражение $\rho$ , [%]	90	96	-
Пропускане $\tau$ , [%]	-	-	73
Визуализация на разсейване на светлинен сноп			

Извършва се итеративно изменение на диаметъра на светещата площ на LED осветителя с осева симетрия чрез промяна на диаметъра на платката и диаметъра на масива с четирите кръга с LED източници. Геометричната постановка на итеративното изменение на диаметъра  $d$  на светещата площ на LED осветителя е показана на фиг. 7. Интервалът на изменение на диаметъра на платката с диодите е от 480 mm до 600 mm; стъпката на итеративното изменение е  $\Delta d = 20$  mm и се извършва при постоянно съотношение между височината  $z$  на профила и диаметъра  $d$  на платката:  $z = 0.125d$ .



а) Изглед отгоре б) Изглед отстрани  
Фиг. 7. Итеративно изменение на диаметъра на светещата площ на LED осветителя

На фиг. 8 са показани четири от реализираните общо седем триизмерни модели на оптичната система с итеративно изменение на диаметъра  $d$  на светещата площ на LED осветителя.

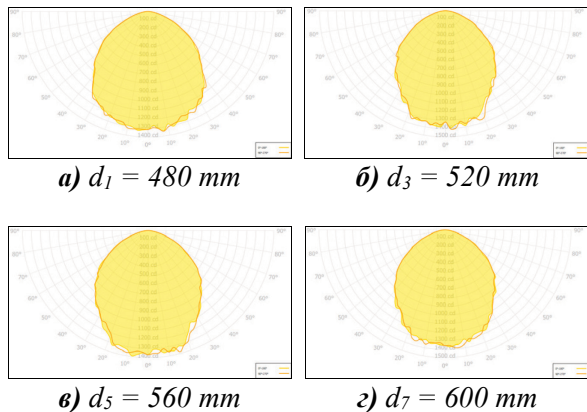


Фиг. 8. Триизмерни модели на оптичната система при итеративно изменение на диаметъра на светещата площ на LED осветителя

Извършва се настройка на основните параметри на метода Монте Карло raytracing за осигуряване на необходимата точност на изчисляваните количествени и качествени показатели на фотометричния анализ. Определят се: необходимият брой трасираните лъчи  $N$  за достигане на плавна форма на СРК; необходимият брой реакции  $m$  на лъча до напускане на оптичната система; минимално тегло на лъча  $w_{min}$  за пълно отчитане на ефективността на оптичната система. Плавната форма на изменение на СРК при итеративното изменение на диаметъра на светещата повърхност на LED осветителя с осева симетрия се постига при  $N = 1.10^7$ ; минималното тегло на лъча за коректно отчитане на ефективността на оптичната система е  $w_{min} = 1\%$  и брой реакции  $m = 16$ . Осветителят, изграден от 100 броя LED източници, е с активна мощност 19,7 W и светлинен поток  $\Phi = 3600$  lm.

Реализираните светлоразпределителни криви за две взаимно перпендикуляр-

ни фотометрични C-равнини (C0° и C90°) на LED осветителя за част от вариантите на оптичната система с итеративно изменение на диаметъра на светещата площ са представени на фиг. 9.



Фиг. 9. Реализирани светлоразпределения при итеративното изменение на диаметъра на светещата площ на LED осветителя

Резултатите от сравнителните фотометрични изчисления на средната яркост  $L_{av}$  на осветителя за различни вертикални фотометрични ъгли  $\gamma$  при различните варианти на оптичната система с итеративно изменение на диаметъра на светещата площ са представени в табл. 2. Приложено е условно форматиране на фона на клетките в колоните за средна яркост на осветителя, като ниските стойности на яркостта съответстват на белия фон на клетките, а всяко потъмняване на фона съответства на повишаване на средната яркост на LED осветителя.

Табл. 2. Сравнителни фотометрични изчисления на средната яркост на осветителя при различни варианти на оптичната система

Диаметър на светещата площ	Средна яркост на осветителя $L_{av}$ при фиксирани вертикални фотометрични ъгли $\gamma$ , [cd/m <sup>2</sup> ]				
	$\gamma = 45^\circ$	$\gamma = 55^\circ$	$\gamma = 65^\circ$	$\gamma = 75^\circ$	$\gamma = 85^\circ$
$d_1=480$ mm	4473,9	3910,5	2856,1	1644,4	748,7
$d_2=500$ mm	4082,8	3662,3	2581,9	1587,6	729,7
$d_3=520$ mm	3699,8	3371,3	2650,2	1591,7	732,7
$d_4=540$ mm	3511,4	3120,9	2339,2	1399,7	621,4
$d_5=560$ mm	3255,4	2942,5	2215,6	1386,7	539,6
$d_6=580$ mm	2984,2	2689,5	2101,8	1231,1	549,1
$d_7=600$ mm	2856,7	2532,3	1997,9	1159,9	518,1

Извършват се сравнителни светлотехнически изчисления при различните варианти на оптичната система с итеративно изменение на диаметъра на светещата площ на LED осветителя с осева симетрия. Избира се помещение от учебна сграда - учебна лаборатория. Нормените светлотехнически показатели за лабораторията - средна експлоатационна осветеност  $\bar{E}_m$ , обща равномерност  $U_o$ , цилиндрична осветеност  $E_z$ , гранична стойност на яркостния дискомфорт  $R_{UG}$  и общ индекс на цвето предаване  $R_a$ , са дадени в табл. 3 [5].

Табл. 3. Светлотехнически изисквания за учебна лаборатория

$\bar{E}_m$ , [lx]	$U_o$	$E_z$ , [lx]	$R_{UG}$	$R_a$
$\geq 500$	$\geq 0,60$	$\geq 150$	$\leq 19$	$\geq 80$

Моделираното помещение е с геометрична конфигурация: дължина 8 m; ширина 4 m; височина 3 m; височина на работната повърхност 0,75 m; височина на зрителната ос, за която се оценява яркостният дискомфорт - 1,2 m. Залагат се коефициенти на отражение на таван, стени и работна повърхност на помещението съответно  $\rho_m = 0,70$ ,  $\rho_{cm} = 0,50$ ,  $\rho_{pn} = 0,30$  и експлоатационен фактор на осветителната уредба  $f_m = 0,80$ .

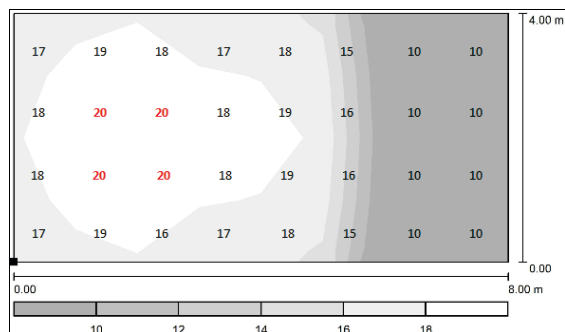
Извършват се оптимизационни светлотехнически изчисления с оптимизационен критерий за учебна лаборатория -  $R_{UG} \leq 19$ , при итеративно изменение на диаметъра на светещата площ на LED осветителя. В табл. 4 са показани реализираните средна осветеност  $E_{av}$ , обща равномерност  $U_o$ , цилиндрична осветеност  $E_z$  и яркостен дискомфорт  $R_{UG}$  за учебната лаборатория при различните варианти на оптичната система на LED осветителя.

Табл. 4. Светлотехнически изчисления за лаборатория при изменение на диаметъра на светещата площ на LED осветителя

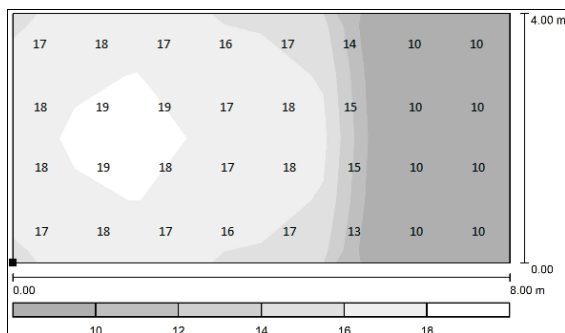
Диаметър на светещата площ	Реализирани светлотехнически показатели			
	$E_{av}$ , [lx]	$U_o$	$E_z$ , [lx]	$R_{UG}$
$d_1 = 480$ mm	572	0,63	231	<u>19,3</u>
$d_2 = 500$ mm	572	0,63	231	<u>19,1</u>
$d_3 = 520$ mm	565	0,62	228	18,8
$d_4 = 540$ mm	568	0,62	229	18,6
$d_5 = 560$ mm	564	0,62	228	18,4
$d_6 = 580$ mm	567	0,62	229	18,1
$d_7 = 600$ mm	567	0,62	228	17,8



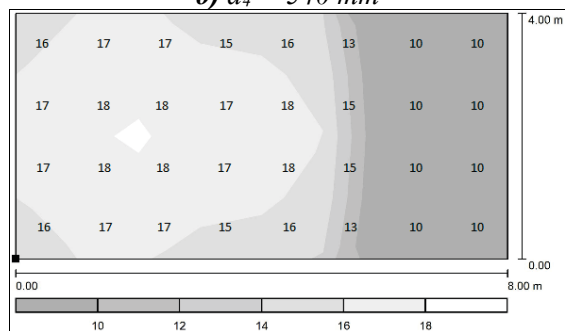
На фиг. 10 е показана изчислителна повърхност в учебната лаборатория със стойности на яркостния дискомфорт  $R_{UG}$  за три различни диаметри на светещата площ на LED осветителя с осева симетрия.



а)  $d_1 = 480 \text{ mm}$



б)  $d_4 = 540 \text{ mm}$



в)  $d_7 = 600 \text{ mm}$

**Фиг. 10.** Изчислителна повърхност на яркостен дискомфорт при различни варианти на оптичната система на LED осветителя

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложената в доклада методика за оптимизация на светещата площ на LED осветител с осева симетрия за вътрешно осветление по отношение на яркостния дискомфорт води до следните по-съществени изводи.

С увеличаване на диаметъра  $d$  на светещата площ на LED осветителя, средната яркост  $L_{av}$  намалява при вертикални

фотометрични ъгли  $\gamma \geq 45^\circ$  - табл. 2; същевременно не се наблюдават съществени изменения в светлоразпределителните криви (фиг. 9).

Анализът на резултатите от реализираните светлотехнически изчисления, извършени със седемте варианта на оптичната система с итеративна промяна на диаметъра на светещата площ на LED осветителя с осева симетрия за учебна лаборатория, показва ясно изразен оптимален вариант. Вариантът  $d_4 = 540 \text{ mm}$  е оптимален, тъй като с него оптимизационният критерий  $R_{UG} \leq 19$  се постига при най-висока реализирана средна осветеност -  $E_{av} = 568 \text{ lx}$ .

Получените оптимални резултати по отношение на яркостния дискомфорт потвърждават приложимостта на разработената софтуерно базирана методика за итеративна оптимизация на оптични системи за LED осветители за вътрешно осветление.

This work was supported by the European Regional Development Fund within the OP “Science and Education for Smart Growth 2014 – 2020”, Project CoC “Smart Mechatronic, Eco- and Energy Saving Systems and Technologies“, № BG05M2OP001-1.002-0023.

## REFERENCE

- [1] Abbasinejad, R., D. Kacprzak. Proposing a Method Reducing UGR Calculations for LED Luminaires with Diffusers in Indoor Applications. Applied Sciences, Switzerland, 2022, ISSN 2076-3417.
- [2] Scheir, G. H., P. Hanselaer, W. R. Ryckaert. Defining the Actual Luminous Surface in the Unified Glare Rating. Taylor & Francis Online, The Journal of the Illuminating Engineering Society LEUKOS, 2017, pp. 201-210. ISSN:1550-2716.
- [3] Tsankov, P., S. Platikanov. Handbook for Laboratory Exercises on Lighting and Installation Equipment. Gabrovo, 2013, pp. 92-93. ISBN 978-954-683-506-2.
- [4] CIE 117-1995 – Discomfort Glare in Interior Lighting.
- [5] BDS EN 12464-1:2021 – Light and Lighting - Lighting of Work Places - Part 1: Indoor Work Places.
- [6] Photopia (version 2023.0.1) - Optical Design and Photometric Analysis Software.