УДК 621.321 **doi: 10.26906/SUNZ.2021.1.062**

С. В. Шпак[1], Г. М. Кожушко[2], С. Г.Кислиця[2], С. Багіров[3]

[1] Державне підприємство «Полтавський регіональний науково-технічний центр стандартизації, метрології та сертифікації», Полтава, Україна
[2] Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Полтава, Україна
[3] Азербайджанський технічний університет, Баку, Азербайджан

ДИСКОМФОРТНА ТА ЗАСЛІПЛЮВАЛЬНА БЛИСКАВІСТЬ СВІТЛОДІОДНИХ ЛАМП ТА СВІТИЛЬНИКІВ

Анотація. В роботі аналізуються результати крайніх досліджень та рекомендації міжнародної комісії з освітлення (CIE) стосовно оцінювання дискомфортної блискавості. Наголошується, що використання узагальненого показника дискомфорту (*UGR*) є неефективним для оцінювання світлодіодних світильників з нерівномірним розподілом яскравості і потребує уточнення. Аналізуються тимчасові зміни введені CIE в методику визначення скоригованого узагальненого показника дискомфорту *UG*R'.Метою роботи було дослідження розподілу яскравості в типових світильниках для загального внутрішнього освітлення та оцінювання їх дискомфортної блискавості з використанням крайніх рекомендації CIE, а також оцінювання засліплюваної блискавості та якості освітлення на основі кривих граничних яскравостей. Показано, що збільшення узагальненого показника дискомфорту *UGR*' для світильників з неоднорідною яскравістю може досягати 10 і більше одиниць в порівнянні зі світильниками з рівномірним розподілом яскравості. Порівнюючи результати вимірювання яскравостей світильників різних конструкцій з граничними їх значеннями, встановленими міжнародними стандартами, оцінювали можливі ступені засліплювання та якості освітлення, що можуть утворюватися цими світлодіодними світильниками. На основі отриманих результатів зроблені висновки та рекомендації щодо вдосконалення оцінювання дискомфортної блискавості світлодіодних освітлювальних установок з нерівномірним розподілом яскравості та пропозиції по інформуванню споживачів про розподіл яскравості та коригувальний коефіцієнт, що враховує ефективну яскравість та ефективну площу випромінення світильників.

Ключові слова: якість освітлення, засліплювальна блискавість, дискомфортна блискавість, узагальнений показник дискомфорту, ефективна яскравість, ефективна площа випромінення, граничні криві яскравості..

Вступ

Постановка проблеми. Блискавість – це властивість світлодіодних приладів або відбиваючих поверхонь в їх здатності порушувати умови комфортного зору або погіршувати контрастну чутливість [1]. Вона виникає в випадках, коли яскравість світильників значно перевищує яскравість поверхонь інтер'єру (пряма блискавість) або коли такі джерела світла відбиваються від поверхонь. Блискавість може проявлятись однією із наступних 2-х форм, що діють окремо або сприймаються разом: дискомфортна блискавість, яка створює дискомфорт без обов'язкового погіршення видимості об'єктів засліплююча блискавість, що порушує видимість об'єктів, але не обов'язково викликає відчуття дискомфорту.

Засліплююча блискавість виникає в тому випадку, коли мале за розміром джерело високої яскравості знаходиться близько до лінії зору.

Дискомфортна блискавість створює відчуття незручності, яке з часом збільшується і викликає втомлюваність.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сьогодні для оцінювання дискомфортної блискавості джерел світла в основному застосовують запропонований в [2] узагальнений показник дискомфорту (Unified Glare Rating, *UGR*), але як показали чисельні дослідження він є неефективним для оцінювання світильників з нерівномірною яскравістю (якими є багато конструкцій з СД) і потребує уточнення [3, 4]. CIE в [5] ввів тимчасові зміни в методику визначення *UGR*, які будуть діяти до того часу, поки не будуть отримані практичні результати застосування фундаментального підходу, що базується на фізіологічному і психологічному механізмах.

Рівні яскравості сучасних світлодіодів можуть бути надзвичайно високими (перевищувати 10^7 кд/м^2). Навіть малопотужні світлодіоди створюють блискавість, яка може спричинити дискомфорт (дискомфортна блискавість) або тимчасове зменшення гостроти зору (засліплююча блискавість). Хоч блискавість є тимчасовим явищем і не призводить до ушкодження очей, вона є джерелом непрямої небезпеки – може спричинити нещасні випадки через засліплення.

На якість освітлення з використанням світлодіодних освітлювальних установок дуже суттєво впливає саме їх висока яскравість, тому актуальною задачею даної роботи є дослідження дискомфортної та засліплювальної блискавості цих установок з використанням сучасних рекомендацій міжнародної комісії з освітлення (CIE).

Вміння прогнозувати ступінь дискомфорту від блискавості джерел світла є корисним для кінцевих користувачів, оскільки можна буде його запобігати. Виробники зможуть розробляти вироби та класифікувати придатність своєї продукції для різних застосувань. Узагальнений показник дискомфорту *UGR* визначається відношенням яскравості джерел світла та яскравості фону [2]:

$$UGR = 8\lg\left(\frac{0.25}{L_B}\sum_{i=1}^{N}\frac{L_i^2\cdot\omega_i}{p_i^2}\right), \qquad (1)$$

де L_B – яскравість фону, що залежить від E – вертикальної освітленості, спрямована в око спостерігача, кд/м^2; L_i – яскравість i-го світильника, спрямована в

© Шпак С. В., Кожушко Г. М., Кислиця С. Г., Багіров С., 2021

око спостерігача, кд/м^2; ω_{ii} – тілесний кут випромінюючої частини *i*-го світильника в напрямку ока спостерігача, рад; N – кількість світильників в освітлювальній установці; p_i – індекс Гатта для кожного окремого світильника, який залежить від напрямку лінії зору.

Індекс позиції p_i визначається в залежності від відносних координат положення центра світильника $\frac{x_T}{y_R}, \frac{H}{y_R}$ в системі координат відносно спостерігача (рис. 1).

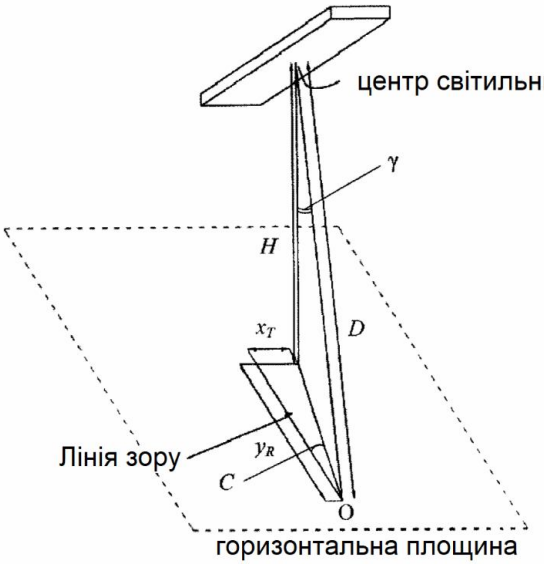


Рис. 1. Положення центру світильника відносно спостерігача

В [6] запропоновано методики розрахунків *UGR* за значеннями сили світла світильників з використанням виразу:

$$UGR = 8\lg\left(\sum_{i=1}^{N}\left(\frac{\pi}{4E}\cdot\frac{I_{cyi}^2}{A_i\cdot D_i^2\cdot p_i^2}\right)\right), \qquad (2)$$

де I_{cyi} – сила світла *i*-го світильника в напрямку спостерігача; $C = \text{arctg}(x_T/y_R)$ – азимутальний кут; $\gamma = \text{arctg}(H/y_R)$ – меридіальний кут, A – площа проекції випромінюваної поверхні світильника на площу перпендикулярну лінії зору.

Значення сил світла від кута спостереження вимірюються з використанням гоніофотометра.

Рекомендовані граничні значення *UGR* – утворюють ряд: 10, 13, 16, 19, 22, 25, 28. Кроки показують рівень зміни блискавості й характеризуються як: < 10 – непомітний; < 13 – малопомітний; < 16 – помітний; < 19 – прийнятний; > 22 – неприйнятний; > 25 – відчутний; > 28 – значний дискомфорт.

Цей метод базується на британській системі індексів дискомфортної блискавості. *UGR* можна визначити з використанням комплексних таблиць згідно з [6]. Проте такий метод не може застосовуватись для джерел світла з малими розмірами. Для світильників з багатьма точковими джерелами світла не можна застосовувати усереднене значення яскравості від цих джерел за всією площею світильника, так як такий підхід значно занижує показник і не відображає фізіологічного відчуття блискавості [4].

Відчуття дискомфорту підвищується при збільшенні яскравості джерела, зменшенні тілесних кутів, що ним створюється та числа джерел світла в полі зору і зменшується при підвищенні яскравості фону та збільшенні кута між лінією зору та напрямком від джерела світла до ока.

Оцінювання дискомфортної блискавості з використанням узагальненого показника *UGR* були розроблені для світильників з розрядними лампами в яких розподіл яскравості суттєво відрізняється від світильників зі світлодіодами. CIE в [5] для оцінювання світлодіодних світильників запропонував в формулу (1) ввести коригуючий коефіцієнт. Скоригований показник *UGR'* має визначатись як

$$UGR' = 8\lg\left(\frac{0.25}{L_B}\sum_{i=1}^{N}K^2\cdot\frac{L_s^2\cdot\omega}{p_i^2}\right), \qquad (3)$$

де $K^2 = \frac{L_{eff}^2}{L_s^2}\cdot\frac{\omega_{eff}}{\omega}$; L_{eff} – ефективна яскравість; ω_{eff} – ефективний тілесний кут сумарної світлової площі з L_{eff}; L_S – середня яскравість світильника; ω – тілесний кут в якому випромінюється світло всього світильника. Один із способів визначення ефективної яскравості L_{eff} є спосіб заснований на природі яскравостей. Для розрахунків L_{eff} береться яскравість в межах ефективної площі A_{eff}, що визначається кутом ω_{eff}. Відношення A_{eff}/A називається коефіцієнтом ефективної площі, який пропорційний ω_{eff}/ω.

У світильниках з неоднорідною яскравістю ефективна площа менша повної площі світильника A і ефективна яскравість буде значно вищою.

Метою даної роботи є дослідження розподілу яскравості в типових світлодіодних світильниках для загального освітлення та оцінювання їх потенційної дискомфортної блискавості при різних умовах застосування з використанням нових рекомендацій CIE [5], а також дослідження засліплювальної блискавості світлодіодних світильників на основі кривих граничних яскравостей та оцінення класів якості освітлення, що можуть забезпечити дані світильники.

Результати дослідження. Для оцінювання дискомфортної та засліплювальної блискавості досліджувались промислові зразки світлодіодних світильників для внутрішнього загального освітлення. Світильники мали розсіювачі як з дифузним світлопропусканням, так і з змішаним (частково дифузним та направленим). Окремі конструкції замість світлорозсіювачів мали захисний прозорий пластик. Світлодіоди в світильнику були змонтовані як рівномірно по площі, так і по периметру корпусу світильника.

У світильниках зі світлодіодами, що змонтовані по площі світильника неоднорідність яскравості в багатьох випадках спостерігається візуально. Світильники без світлорозсіювачів мають високу точкову яскравість на фоні низької яскравості інших частин світильника. Через світлорозсіювач, як правило, не проглядаються світлові плями підвищеної яскравості.

Визначення середньої яскравості світильника L_S (габаритної яскравості) проводили шляхом вимірювання сили світла в напрямку спостерігача та площі світильника A. Силу світла вимірювали з використанням гоніофотометра GO 2000. Одночасно вимірювали криві сили світла (КСС) та величину світлового потоку. Похибки вимірювання цих фотометричних величин не перевищували ±3%.

Яскравість розраховували за формулою:

$$L = I/A, \qquad (4)$$

де L – габаритна яскравість, кд/м^2; I – сила світла, кд; A – площа світильника, що випромінює світло.

Коефіцієнт площі визначали методом. що базується на граничній яскравості. Граничну яскравість і яскравість L_{eff} вимірювали за допомогою комплексу випробувального обладнання OST 300 спектрорадіометрична система якого містить монохроматор, фотометричний детектор, систему вимірювання розмірів джерел світла, яка імітує око людини в полі зору 100, 11 та 1,7 мрад, діафрагми для обмеження поля зору та еталонні джерела світла. Точність вимірювання освітленості та яскравості ± 5 %.

Ступінь впливу яскравості L_{eff} та коефіцієнту площі A_{eff}/A на величину UGR' досліджували за допомогою світильника. в якому змінювали світлорозсіювачі. Використовували в якості світлорозсіювачів пластик з дифузним та направлено-дифузним пропусканням, а також прозоре захисне скло.

Використання світлорозсіювачів змінює розподіл яскравості – з дифузним пропусканням забезпечується практично рівномірна яскравість по всій площі, а при направлено-дифузному розширюється площа світлової плями та знижується ефективна яскравість. Яскравість фону при цьому збільшується.

Для розрахунку UGR' розглядали випадок для одного світильника. При цьому вираз (3) можна записати як

$$UGR' = UGR + 8\lg\left(\frac{L_{eff}^2}{L_s^2}\cdot\frac{\omega_{eff}}{\omega}\right), \qquad (5)$$

Для освітлювальних установок з кількома світильниками UGR' буде відрізнятись від цього параметра для одного світильника так як для кожного світильника будуть різні значення індексу положення Гатта p, які залежать від напрямку поля зору. На UGR' впливає кількість світильників в полі зору спостерігача. Але для визначення залежності узагальненого показника дискомфорту від ефективної яскравості та коефіцієнта ефективної площі таке спрощення оправдане [7, 8].

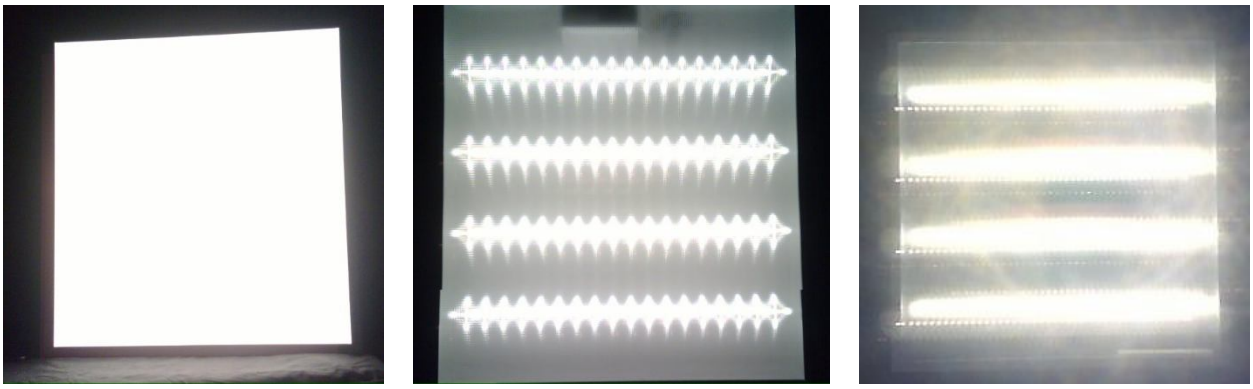
В табл. 1 наведені результати вимірювання та розрахунку UGR' для світильника без світлорозсіювача, з призматичним та дифузним світлорозсіювачами. При розрахунках яскравість фону в приміщенні L_B брали рівним 170 кд/м^2.

Таблиця 1 – **Параметри світильника для внутрішнього освітлення без світлорозсіювача, з призматичним та дифузним світлорозсіювачами**

Характеристика світильника	L_S, **кд/м^2**	L_{eff}, **кд/м^2**	A_{eff}/A, **відн.од.**	K^2, **відн.од.**	***UGR***	***UGR = UGR' + 8lgK^2***
- без світлорозсіювача	3430	$8{,}9\cdot10^5$	$4{,}5\cdot10^{-3}$	13	21	30
- з дифузним розсіювачем	1825	1825	1	0	17	17
- з призматичним розсіювачем	2070	$2{,}25\cdot10^4$	$2{,}1\cdot10^{-2}$	2,5	18	21

Як видно з отриманих результатів у світильника без світлорозсіювача значення UGR' перевищує UGR на 9 одиниць, а при застосуванні призматичного (направлено-дифузного) світлорозсіювача на 3 одиниці. Дослідження комерційних зразків світлодіодних світильників різної конструкції (з різним ступенем розсіювання світла) показали, що UGR' знаходиться в інтервалі значень від 14 до 30. Збільшення показника UGR' може досягати 10 і більше одиниць, що є дуже суттєвим при оцінюванні рівня дискомфортної блискавості.

Для прикладу на рис. 2 наведені загальний вигляд функціонуючого світильника з рівномірною і нерівномірною яскравістю.



а б в

Рис. 2. Загальний вигляд розподілу яскравості для світильника з дифузно-розсіюваним (а), дифузно-направленим (б) пропусканням світлорозсіювача та прозорим захисним склом

Так як коефіцієнт K не залежить від яскравості фону L_B, індексу положення Гатта і від ω, а залежить від відношення L_{eff}/L і ω_{eff}/ω, то його можна визначати не в польових умовах (приміщенні де змонтована освітлювальна установка), а в лабораторіях і надавати інформацію про значення коефіцієнта K для кожної конструкції світильника.

При визначенні *UGR'* в реальних умовах *UGR* необхідно буде збільшити на величину $8\lg K^2$. Це значно спростить оцінювання *UGR'*, так як можна буде для визначення L_{eff}/L, L_S і ω_{eff}/ω використовувати стаціонарні прилади.

Рівень засліплювальної блискавості світильників для освітлення приміщень визначали на основі кривих граничних яскравостей в інтервалі критичних кутів від 45° до 85° відносно вертикалі (рис. 3).

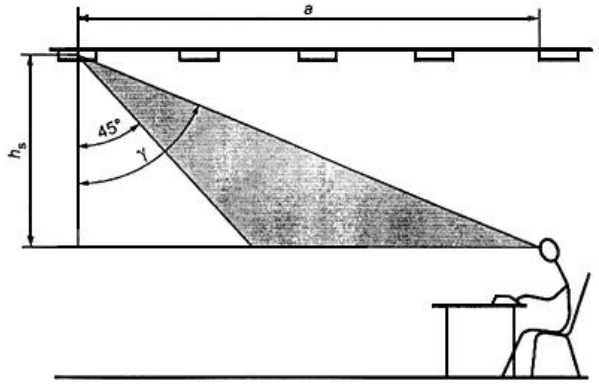


Рис. 3. Кут випромінення світильника, в межах якого необхідно забезпечити обмеження яскравості

Обмеження достатнє, якщо середня яскравість світильника не перевищує значень кривих яскравості для відповідних критичних кутів γ, як показано на рис. 3 та 4 [1].

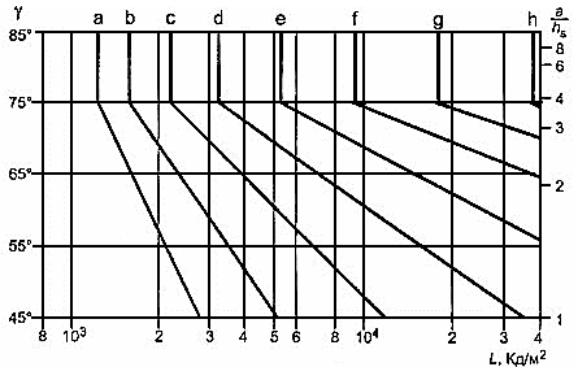


Рис. 4. Граничні криві яскравості (для світильників без випромінюючих бокових поверхонь)

Для різних зорових робіт в різних приміщеннях ступінь засліплюваності визначається вимогами до якості освітлення. Визначено 5 класів якості: клас А – дуже висока якість; В – висока якість; С – середня якість; D – низька якість і Е – дуже низька якість.

Ступені засліплюваності охоплюють головні характерні точки (0 – відсутність засліплення; 2 – незначне засліплення; 4 – значне засліплення; 6 – нестерпне засліплення). В табл. 2 наведена відповідність граничних кривих яскравості та ступені засліплювання для різних рівнів освітленості та класів їх якості [1]. Граничні криві яскравості можна застосувати при наступних умовах:

- розглядається тільки загальне освітлення;
- лінія зору направлена в основному горизонтально або вниз;
- коефіцієнт відбивання стелі не менше 0,5, а стін – не менше 0,2.

Так як світлодіодні світильники можуть мати значну неоднорідність яскравості (а ступінь засліплювальної блискавості визначається максимальною яскравістю в полі зору спостерігача) тому необхідно визначити габаритну яскравість.

Таблиця 2 – **Відповідність граничних кривих яскравості та ступені засліплювання для різних рівнів освітленості та класів їх якості**

Ступінь засліпленості	Клас якості	Значення освітленості, лк							
		a	b	c	d	e	f	g	h
1,15	A	2000	1000	500	<300				
1,5	B		2000	1000	500	<300			
1,85	C			2000	1000	500	<300		
2,2	D				2000	1000	500	<300	
2,55	E					2000	1000	500	<300

Для оцінювання можливості виникнення засліплювальної блискавості, що створюють світлодіодні освітлювальні установки, досліджувались комерційні зразки світлодіодних світильників для внутрішнього освітлення, які мають широке застосування. Ступінь засліплюваності та класи якості освітлення, які можуть бути з використанням цих світильників, оцінювали вимірюючи їх максимальну яскравість за допомогою комплексу випробувального обладнання OST 300.

Використовуючи граничні криві яскравості (рис. 4) та таблицю відповідності граничних кривих яскравості та ступенів засліплювання для різних рівнів освітленості і класів якості (табл. 2) визначали можливий ступінь засліплення та клас якості освітлення, що може забезпечувати даний світильник. Результати вимірювання і розрахунків наведено в табл. 3.

Як видно із отриманих результатів, для світлодіодних світильників загального освітлення, що постачаються на ринок України, можуть забезпечувати високий клас якості освітлення. Для інформування споживачів доцільно в документації на світильники (в тому числі в каталогах) вказувати максимальну яскравість. Це дасть змогу спростити вибір світильників для конкретних сфер застосування.

Таблиця 3 – **Результати** оцінювання світлодіодних світильників за ступенем засліплювальної блискавості та якості освітлення при їх використанні

Максимальна яскравість, кд/м^2	Ступінь засліплення	Клас якості освітлення згідно з ISO 8995
2314	Відсутній	A, B
4190	Відсутній	B, C
13230	Незначний	C, D
33380	Незначний	D, E
59250	Значний	E

Для оцінювання засліплюваної блискавості та якості освітлення з використанням методу граничних яскравостей доцільно застосовувати метод картографування з використанням цифрових камер.

Висновки

1 Скоригований узагальнений показник дискомфорту *UGR'* для світлодіодних світильників з нерівномірною яскравістю може суттєво відрізнятись від стандартного *UGR* розрахованого традиційним методом. Для високої ефективної яскравості та малої ефективної площі випромінення різниця між *UGR'* і *UGR* може становити 10 і більше одиниць.

2 Так як коригуючий коефіцієнт K^2 не залежить від яскравості фону та індексу положення Гатта, вимірювання габаритної і ефективної яскравості та коефіцієнта випромінюючої площі можна проводити в лабораторних умовах.

3 Для визначення *UGR'* світлодіодної освітлювальної установки в «польових» умовах достатньо буде виміряти яскравість фону та індекс положення Гатта і провести розрахунок *UGR* традиційним методом, збільшуючи цей показник на $8 \cdot \lg K^2$.

4 Для спрощення проектування світлодіодних освітлювальних установок та оцінювання їх дискомфортної блискавості доцільно в документації на світильник надавати інформацію стосовно коригуючого коефіцієнта K^2 (або величину $8 \cdot \lg K^2$).

5 Для спрощення проектування світлодіодних освітлювальних установок в документації на світильники та каталогах доцільно вказувати їх максимальну яскравість.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Справочная книга по светотехнике / Пол ред. Ю.Б. Айзенберга. 3-е изд. перраб. и доп. М.: Знак. — 972 с.
2. CIE 117-1995 Discomfort glare in interior lighting.
3. М. Кноон, Качество освещения светодиодами, Светотехника, 2014, № 5, с. 20-22.
4. Ван Боммель Знания, необходимые современным светотехникам, Светотехника, 2020, № 2, С. 16-32.
5. CIE 232:2019 Discomfort Caused by Glare from Luminaires with a Non-Uniform Source Luminance.
6. CIE 190:2010 Calculation and presentation of united glare rating tables for indoor lighting luminaires.
7. Peter Thorns BSC (Hons), Discomfort caused by Glare from Luminaires with a non-uniform source luminance.
8. Funke Carsten, Schierz Christoph What is the effective luminance or effective area of non-uniform LED luminaires for discomfort glare rating with UGR? Licht 2016: Karlsruhe, 25-28. September: Tagungsband – Proceedings. – Karlsruhe: KIT Scientific Publishing. – 2016, p.563-570.
9. ISO 8995-1:2002 Lighting of work places - Part 1: Indoor

Received (Надійшла) 24.12.2020
Accepted for publication (Прийнята до друку) 03.02.2021

Discomfortable and dazzling brilliance of led lamps and fixtures

S. Shpak, G. Kozhushko, S. Kyslytsia, S. Bagirov

Abstract. The paper it was regarding the assessment of uncomfortable gloss analyzed the results of recent researches and recommendations of the International Commission on Illumination (CIE). It was noted that the use of the generalized discomfort indicator (UGR) is ineffective for evaluating LED luminaires with uneven brightness distribution and requires clarification. It was analyzed the temporary changes introduced by CIE into the method for determining the adjusted generalized indicator of discomfort UGR '. The aim of the work was to study the distribution of brightness in typical luminaires for general indoor lighting and to assess their uncomfortable brilliance using the CIE extreme recommendation, as well as to assess the glare and lighting quality based on the limiting brightness curves. The effective brightness of the luminaire radiation and the efficiency of the radiation area were determined using the OST300 test equipment complex, which spectrometric system contains a monochromator, a photometric detector and a light source measurement system that simulates the human eye in the field of view of 100.11 and 1.7 mrad. The accuracy of brightness measurement ± 5%. The degree of influence of the magnitude of the effective brightness and the coefficient of the effective radiation area of the lamp on the value of the corrected generalized indicator of discomfort UGR was investigated using a lamp in which the diffusers were changed. It is shown that the increase in the generalized indicator of discomfort UGR for luminaires with non-uniform brightness can reach 10 or more units in comparison with luminaires with a uniform brightness distribution. By comparing the results of measuring the brightness of luminaires of various designs with their limiting values established by international standards, we evaluated the possible degrees of glare and the quality of illumination that can be generated by these LED luminaires. Based on the results obtained, conclusions and recommendations were made to improve the assessment of the uncomfortable brilliance of LED lighting installations with uneven brightness distribution and proposals for informing consumers about the brightness distribution and a correction factor that takes into account the effective brightness and the effective radiation area of the lamps.

Keywords: quality of illumination, dazzling brilliance, uncomfortable brilliance, generalized discomfort indicator, effective brightness, effective radiation area, limiting brightness curves.