

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА

**ШПАК СВІТЛАНА ВАСИЛІВНА**



УДК 628.94

**РОЗВИТОК МЕТОДІВ І НОРМАТИВНОЇ БАЗИ  
ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ТА КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ ЯКОСТІ  
СВІТЛОДІОДНИХ ОСВІТЛЮВАЛЬНИХ УСТАНОВОК**

05.09.07 – світлотехніка та джерела світла

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

**Харків – 2021**

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному науковому центрі «Інститут метрології» Міністерства розвитку економіки, торгівлі та сільського господарства України.

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор,  
**КОЖУШКО Григорій Мефодійович**  
Національний університет  
«Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»  
Голова ТК 137 «Лампи і відповідне обладнання»

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор,  
**ТАРАСЕНКО Микола Григорович,**  
Тернопільській національний технічний  
університет імені І. Пулюя,  
завідувач кафедри електричної інженерії;

кандидат технічних наук,  
старший науковий співробітник,  
**РИБАЛОЧКА Андрій Володимирович,**  
Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова,  
завідувач науково-дослідної лабораторії «Центр  
випробувань і діагностики напівпровідникових джерел  
світла та освітлювальних систем на їх основі».

Захист відбудеться « 20 » квітня 2021 року о «10-00» годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.089.02 у Харківському національному університеті міського господарства імені О. М. Бекетова Міністерства освіти і науки України за адресою: 61002, м. Харків, вул. Маршала Бажанова, 17.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова МОН України за адресою: 61002, м. Харків, вул. Маршала Бажанова, 17 та на сайті спеціалізованої вченої ради Д 64.089.02 (<https://radalight.kname.edu.ua/index.php/diyalnist>)

Автореферат розісланий « 19 \_\_ » \_березня\_ 2021 року

**Вчений секретар**  
спеціалізованої вченої ради



**В. М. Поліщук**

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Сучасні установки для внутрішнього освітлення повинні забезпечувати одночасно хороше зорове сприйняття (природну колірність, високу якість кольоропередавання, відсутність зорового дискомфорту), благотворний невізуальний вплив, при цьому запобігати несприятливих факторів таких як мерехтіння світла, фотобіологічної небезпеки синього світла та порушення біоритмів.

Швидкий розвиток світлодіодів (СД) і заміна ними традиційних джерел світла (ламп розжарювання (ЛР) та розрядних ламп (РЛ) низького та високого тиску) робить актуальною проблему оцінювання якості світлового середовища при світлодіодному освітленні. Так як СД мають характеристики, що відрізняються від характеристик ЛР та РЛ, – малі розміри, високу яскравість, інший спектральний склад випромінення, а також в зв'язку з останніми даними по впливу світла на самопочуття та здоров'я людей дослідження стосовно вдосконалення методів вимірювання якісних параметрів світла в Україні є досить актуальними.

Вимірювання параметрів якості світла можна поділити на ті, що стосуються параметрів ламп та світильників і ті, що стосуються параметрів освітлювальних установок. До якісних параметрів світла ламп та світильників відносяться колірність та її однорідність, якість кольоропередавання, мерехтіння світлового потоку, просторовий розподіл світла, фотобіологічна безпечність синього світла та біологічна активність, що впливає на циркадні ритми. До основних якісних параметрів освітлювальних установок відносять рівень освітленості та її рівномірність і засліплювальна та дискомфортна блискавості. Вимірювання параметрів якості світла ламп та світильників, зазвичай, проводять в лабораторних умовах, а світлотехнічних установок – в польових умовах.

Методи вимірювання фотометричних параметрів джерел світла, в тому числі світлодіодних, розроблялись в багатьох дисертаційних роботах виконаних під керівництвом професорів Назаренка Л. А., Неєжмакова П. І., Говорова П. П., Андрійчука В. А., Овчинникова С. С., але вимірювання таких якісних параметрів світла світлодіодних джерел, як кольоропередавання, мерехтіння світлового потоку, фотобіологічна безпечність синього світла, показники блискавості в даних роботах не досліджувались.

В даній роботі розглядаються питання вимірювання параметрів якості світла світлодіодних ламп та світильників, зокрема колірності, кольоропередавання, мерехтіння світлового потоку та фотобіологічної безпечності синього світла, а також показників дискомфоротної блискавості освітлювальних установок.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота є наслідком багаторічних досліджень, які проводились в науково-дослідному центрі випробувань електричних ламп та технологічного обладнання (НД ЦВЕЛ) ДП «Полтавський регіональний науково-технічний центр стандартизації, метрології та сертифікації» (ДП «Полтавастандартметрологія») та ТК 137 «Лампи та відповідне обладнання»; пов'язана з виконанням планів національної стандартизації України в 2007–2017 роках за темами «Розроблення проектів національних нормативних документів, гармонізованих з

міжнародними та європейськими» (державні реєстраційні номери 0116U007639, 0116U008673, 0116U008675, 0116U008676, 0116U008678, 0117U006779, 0117U003588) та Державної науково-технічної програми «Розробка та впровадження енергозберігаючих світлодіодних джерел світла та освітлювальних систем на їх основі» (затверджена Постановою КМУ № 632 від 09.07.2008 р.) за темами «Створення базової метрологічної лабораторії для сертифікації світлодіодних джерел світла та освітлювальних систем на їх основі» (державний реєстраційний номер 0110U004403) та «Розроблення національних стандартів на енергозберігаючі світлодіодні джерела світла та освітлювальні системи на їх основі, гармонізовані з міжнародними стандартами» (державні реєстраційні номери 0112U007431, 0113U003606). Участь здобувача полягає в формуванні планів національної стандартизації в галузі світлотехніки, розробленні 12 національних стандартів гармонізованих з міжнародними та європейськими (в тому числі розділів, що стосуються методів вимірювання світлотехнічних параметрів), атестації випробувального обладнання, перевірки засобів вимірювальної техніки та атестації у державній метрологічній системі «Центру діагностики та випробувань світлодіодної освітлювальної техніки» Інституту фізики напівпровідників імені В. Є. Лашкарьова Національної академії наук України та проведенні прикладних досліджень щодо методів вимірювання світлотехнічних параметрів світлодіодних ламп та світильників. Зокрема участь у розробленні 2 нормативних документів з метрології світловимірювальних ламп.

**Мета і завдання дослідження.** Метою дослідження було вдосконалення комплексу методів вимірювання параметрів якості світла світлодіодних освітлювальних установок та розвиток національної нормативної бази на світлодіодні лампи та світильники.

Для досягнення мети необхідно було вирішити ряд завдань:

- 1) провести аналіз вимог до якості світла, чинних нормативних документів;
- 2) провести аналіз чинних методів вимірювання якості світла та їх відповідності сучасним досягненням в галузі світлотехніки;
- 3) дослідити просторову однорідність кольірних параметрів світлодіодних світильників та вдосконалити методи вимірювання усереднених значень з врахуванням кутової нерівномірності;
- 4) провести порівняльні оцінювання якості кольоропередавання світлодіодних світильників з використанням відомих нових методів та розробити рекомендації щодо їх застосування;
- 5) обґрунтувати вибір методів оцінювання модуляції світла світлодіодних ламп та світильників з врахуванням останніх публікацій та власних досліджень;
- 6) дослідити рівень мерехтіння світла комерційних зразків світлодіодних ламп та світильників для загального освітлення та вдосконалити методи вимірювання з врахуванням просторової неоднорідності світла;
- 7) дослідити розподіл ефективної яскравості та ефективну площу випромінення типових світлодіодних світильників для загального освітлення та вдосконалити методи визначення узагальненого показника дискомфорту на основі рекомендацій СІЕ щодо коригування цього показника для точкових джерел та світильників з нерівномірним розподілом яскравості;

8) провести дослідження фотобіологічної безпечності синього світла типових конструкцій світлодіодних світильників (ламп) та розробити експрес метод визначення групи ризику небезпеки синього світла світлодіодних ламп та світильників для загального освітлення при їх масовому виробництві.

**Об'єкт дослідження** – вимірювання параметрів якості світла освітлювальних установок зі світлодіодами.

**Предмет дослідження** – методи та засоби вимірювання параметрів якості та безпечності світла світлодіодних ламп та світильників для внутрішнього освітлення.

**Методи дослідження.** При дослідженнях застосовували методи оптичної радіометрії, фотометрії, спектрорадіометрії, спектрофотометрії та колориметрії, а також рекомендації міжнародних стандартів в сфері метрології світлотехнічних параметрів та вимог до якості та фотобіологічної безпечності світла. Планування та оброблення результатів експерименту проводили з використанням методів математичного аналізу, математичної статистики, фізичного та математичного моделювання, теорії похибок.

#### **Наукова новизна отриманих результатів.**

1. Вперше систематизовано загальний стан нормативно-технічної бази, яка регламентує методи та засоби вимірювання параметрів світлодіодних освітлювальних установок, що дозволило запропонувати зміни в нормативні документи стосовно підвищення якості та безпечності освітлення.

2. Вдосконалено метод вимірювання просторово усереднених колориметричних параметрів світлодіодних ламп та світильників з використанням спектрорадіодметра та інтегруючої кулі шляхом введення в розрахунок координат кольору коригуючого спектрального коефіцієнта  $K(\lambda)$  для врахування селективності відбивання поверхні інтегруючої кулі.

3. Вперше встановлено, що світлорозсіювачі з дифузним пропусканням світла зменшують кутову нерівномірність колірності світлодіодних світильників, знижуючи при цьому корельовану колірну температуру для нульового кута спостереження на 300 К – 700 К (6 – 12 %).

4. Вперше встановлено, що кутова нерівномірність колірності ( $\Delta_{u'v'}$ ) з дифузним розсіюванням світла не перевищує 3-х ступеневих еліпсів Мак-Адама (3-х *SDCM*), а нерівномірність колірності світильників без світлорозсіювача та з призматичним розсіювачем досягає 7<sup>+</sup> ступенів (7<sup>+</sup> *SDCM*).

5. Набув подальшого розвитку метод оцінювання скоригованого узагальненого показника дискомфорту  $UGR'$  при освітленні світлодіодними світильниками з нерівномірним розподілом яскравості.

#### **Практичне значення отриманих результатів** полягає в такому:

1. Систематизовано нормативно-технічну базу, яка регламентує методи та засоби вимірювання параметрів світлодіодних освітлювальних установок, що дозволило запропонувати низку нормативних документів з підвищення якості та безпечності освітлення.

2. Вдосконалено метод вимірювання усереднених значень колориметричних параметрів світлодіодних ламп та світильників. Підготовлені пропозиції

щодо внесення змін в нормативну документацію на лампи та світильники.

3. Вдосконалено метод вимірювання модуляції світлового потоку світлодіодних ламп та світильників. Розроблені пропозиції для внесення в нормативну документацію на світлодіодні світильники (лампи) змін щодо глибини модуляції та частотного діапазону, а також методи вимірювання.

4. Розроблено спрощений метод оцінювання фотобіологічної безпечності синього світла світлодіодних світильників (ламп) для умов масового виробництва та у споживачів.

5. На основі результатів досліджень запропоновано для оцінювання якості кольоропередавання світлодіодних світильників з підвищеними вимогами до колірних параметрів додатково застосовувати нові методи CQS та TM 30-18.

6. Запропоновано вдосконалений метод оцінювання скоригованого узагальненого показника дискомфорту (*UGR*). Визначення *UGR* проводиться за рекомендаціями CIE з використанням коригуючого коефіцієнта, що розраховується на основі вимірювань (в лабораторних умовах) ефективної яскравості та ефективної площі випромінення.

Методи вимірювань впроваджені в НД ЦВЕЛ ДП «Полтавастандарт-метрологія» (акт упровадження від 01.12.2020 р.), державному випробувальному центрі «Електромаш» державного підприємства «Харківський регіональний науково-виробничий центр стандартизації, метрології та сертифікації» (акт упровадження від 21.12.2020 р.) і в науково-дослідній лабораторії "Центр випробувань і діагностики напівпровідникових джерел світла та освітлювальних систем на їх основі" Інституту фізики напівпровідників імені В. Є. Лашкарьова Національної академії наук України (акт упровадження від 03.11.2020 р.).

**Особистий внесок здобувача.** Основні положення дисертаційної роботи викладені в працях [1–25] відображають результати дослідження та є наслідком самостійної роботи й наукових пошуків здобувача. Дослідження, представлені в [23], є самостійними. В наукових працях, опублікованих у співавторстві автору належать: ідея, аналіз нормативних документів, висновки [1, 2]; програма досліджень, експериментальні дослідження модуляції світлового потоку та аналіз результатів [4, 7, 18]; методи дослідження, експериментальні дослідження та оцінювання невизначеності, висновки [5, 13, 16]; ідея, аналіз міжнародних та національних нормативних документів, висновки [3, 11]; ідея, аналіз відомих методів вимірювання параметрів якості світла в міжнародних, європейських та національних стандартах, висновки [6, 17, 19]; експериментальні дослідження рівномірності колориметричних параметрів, оцінювання невизначеності, висновки [9]; метод оцінювання фотобіологічної безпечності, експериментальні дослідження, висновки [8, 15, 20]; експериментальні дослідження споживчих властивостей джерел світла та аналіз результатів [10]; ідея, аналіз міжнародних, європейських та національних стандартів, висновки [12, 14]; експериментальні дослідження розподілу яскравості та аналіз результатів [21]; експериментальні дослідження [22]; розробка методики повірки світловимірювальних ламп для вимірювання світлового потоку [23]; розробка локальної повірочної схеми для засобів вимірювання світлового потоку [24]; конструкція установки для

вимірювання часу попереднього підігрівання катодів при запалюванні КЛЛ [25].

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення дисертаційної роботи доповідалися на міжнародних конференціях: III та IV Міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні проблеми світлотехніки» (Харківський національний академія міського господарства, м. Харків, 22–23 квітня 2009 р. та 13–14 квітня 2011 р.); VI та VII Міжнародна науково-технічна конференція «Актуальні проблеми світлотехніки» (Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, м. Харків, 4–6 жовтня 2017 р. та 14–16 травня 2019 р.), конференція LED Progress «Світлодіоди: Новинки. Практика. Перспективи» (м. Київ, 12–14 вересня 2018 р. та 10–12 вересня 2019 р.), XI та XII Міжнародна науково-технічна конференція «Метрологія та вимірювальна техніка» (Національний науковий центр «Інститут метрології», м. Харків, 9–11 жовтня 2018 р. та 6–8 жовтня 2020 р.), III Міжнародна азербайджано-українська конференція «Building Innovations – 2020» (Національний університет імені Юрія Кондратюка м. Баку, м. Полтава, 1–2 червня 2020 р.).

**Публікації.** Основні результати дисертаційної роботи викладено в 25 наукових працях, з яких 8 статей у наукових фахових виданнях України (в тому числі 2 – в міжнародній наукометричній базі Web of Science), у 9 міжнародних конференціях, у 2-х методичних документах з метрології, в 1-му патенті України на корисну модель та 1-й статті, що додатково відображають результати досліджень.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається з вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації становить 147 сторінок, з них: 115 сторінок основного тексту, 27 рисунків та 16 таблиць, 10 сторінок зі списками використаних джерел, що містять 102 найменувань, 6 додатків на 18 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** подано загальну характеристику роботи, обґрунтовано актуальність теми дисертації, визначено об'єкт, предмет, мету та завдання наукового дослідження, сформульовані наукова новизна та практична цінність отриманих результатів, приведено дані стосовно апробації, публікаціях та особистому внеску здобувача в наукових роботах, результати впровадження отриманих результатів.

**Перший розділ «Аналіз сучасних вимог та методів вимірювання параметрів якості світла»** носить оглядово-аналітичний характер і висвітлює основні тенденції по досліджуваній проблемі. В ньому показана важливість поставленого наукового завдання, проаналізовано стан розвитку методів вимірювання параметрів якості світла. На підставі аналізу літературних джерел та нормативних документів вибрані напрямки досліджень.

У **другому розділі «Результати дослідження колориметричних параметрів та вдосконалення методів їх вимірювання»** наведені результати дослідження просторової рівномірності колориметричних параметрів світлодіодних ламп та світильників та запропоновано метод вимірювання їх усереднених значень.

Для дослідження колориметричних параметрів від кута спостереження використовували гоніофотометр GO 2000 та спектрорадіометр МК350S. Вимірювання спектру випромінення проводили через  $10^\circ$  в інтервалі кутів від  $-90^\circ$  до  $+90^\circ$ . На основі вимірних спектрів, з використанням програмного забезпечення МК350S, розраховувались для кожного кута спостереження наступні фотометричні та колориметричні параметри: освітленість, координати колірності, корельовану колірну температуру (correlated color temperature,  $CCT$ ) та найменшу відстань від лінії чорного тіла  $D_{u,v}$ , стандартні відхилення кольору порівняння (Standard Deviation Color Matching,  $SDCM$ ) та індекси кольоропередавання, які визначали за методами CRI та TM 30-18. Кутову нерівномірність колірності ( $\Delta_{u',v'}$ ) та її усереднені значення визначали згідно з рекомендаціями ДСТУ EN 13032-4.

Комбінована стандартна невизначеність для координат колірності  $u'$ ,  $v'$  становила відповідно 0,0005 та 0,001, а для  $CCT$  – 30 К. Загальна розширена невизначеність ( $k=2$ ) відповідно становить – 0,001; 0,002 та 60 К.

Ступінь підвищення кутової однорідності колірних параметрів за рахунок розсіювання світла досліджували на світильниках в яких змінювали світлорозсіювачі.

Приклади кутової залежності  $CCT$  та  $SDCM$  (розкиду параметрів в межах  $n$ -ступеневих еліпсів Мак-Адама) для світлодіодних ламп та світильників наведено на рисунках 1, 2 та в таблиці 1.

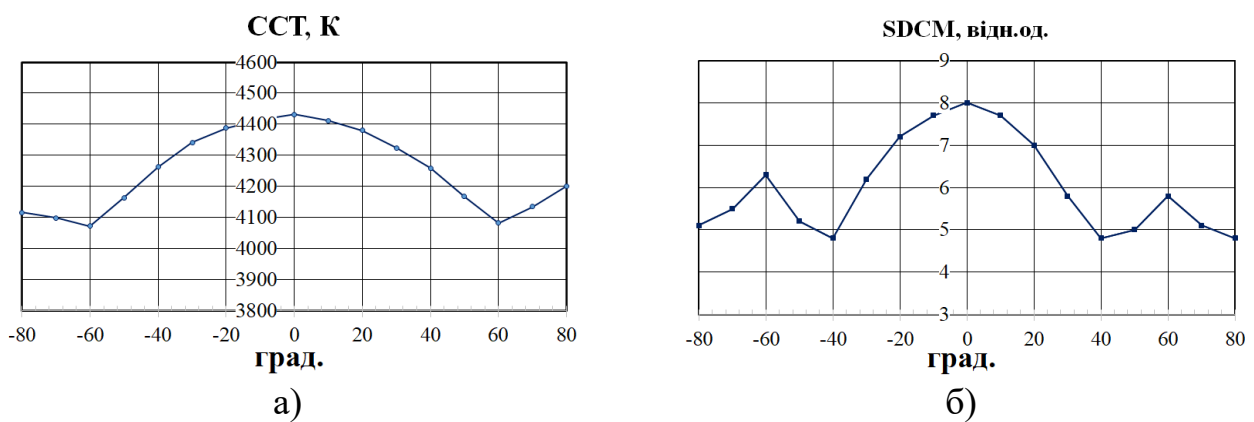


Рис. 1. Кутова залежність  $CCT$  (а) та  $SDCM$  (б) світлодіодного світильника з прозорим захисним склом

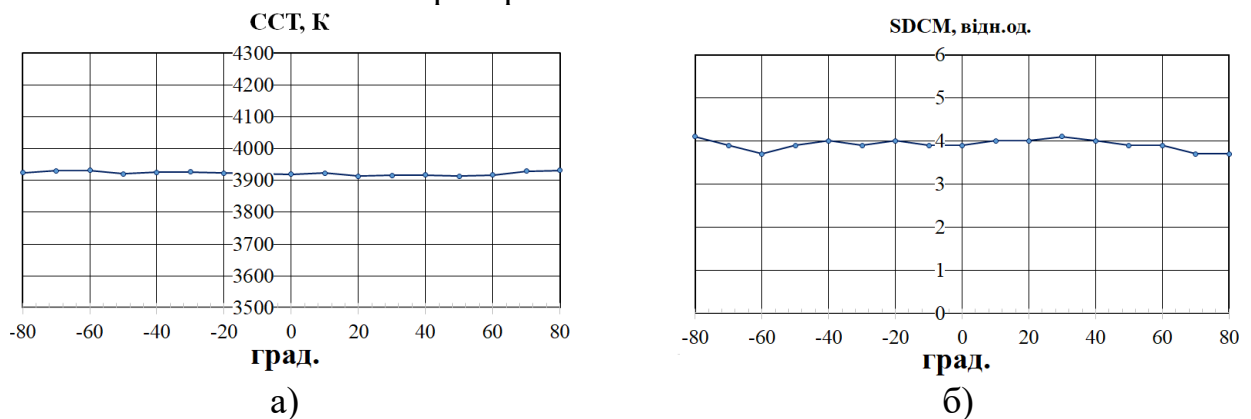


Рис. 2. Кутова залежність  $CCT$  (а) та  $SDCM$  (б) світлодіодного світильника з дифузним світлорозсіювачем



**Результати вимірювання кутової нерівномірності колориметричних параметрів комерційних зразків світлодіодних джерел світла**

Назва досліджуваного об'єкту	CCT, К		$\Delta_{uv}$ , відн. од.	$R_a$ , відн.од.	
	кут 0°	кут 80°		кут 0°	кут 80°
1 Лампа світлодіодна з дифузно-пропускаючою колбою	3083	3089	0,0014	83,5	83,5
2*) Лампа люмінесцентна компактна (КЛЛ)	2701	2706	0,0014	81,4	81,6
3 Світлодіодний світильник для внутрішнього освітлення з прозорим склом	6472	6257	0,0070	73,6	73,3
4 Світлодіодний світильник для внутрішнього освітлення з дифузнопропускаючим склом	5413	5453	0,0019	72,9	73,0
5 Світлодіодний світильник для внутрішнього освітлення з призматичним розсіювачем	6510	6976	0,0096	71,6	75,9
*) Дані по КЛЛ наведені для порівняння					

Різниця між максимальними та мінімальними значеннями залежить від величини CCT: чим вища CCT світлодіода, тим більша різниця. Для CCT теплобілої колірності (CCT ~ 3000 К) різниця становить 40 – 80 К. Для CCT 6000 – 7000 К різниця може становити 600 – 800 К й більше.

Зроблені висновки, що для світильників призначених для внутрішнього освітлення крім усереднених значень колірності потрібно також вимірювати та декларувати кутову нерівномірність і колірність в заданому напрямку.

Просторово усереднені параметри колірності мають декларуватись для всіх світлодіодних ламп та світильників, якщо виробником не встановлено інше.

Метод вимірювання просторово усереднених значень з використанням фотометричної кулі та спектрорадіометра більш привабливий з точки зору продуктивності та вартості виконання робіт в порівнянні з гоніофотометричним методом. Колірні параметри розраховуються із спектральної густини випромінення, що після багаторазових відбивань від внутрішньої поверхні кулі потрапляє на спектрорадіометр. З метою підвищення точності вимірювання колориметричних параметрів з використанням інтегруючої кулі для врахування селективності відбивання внутрішньої поверхні кулі застосовували коригуючий коефіцієнт, що визначається експериментально шляхом почергового вимірювання спектрального розподілу енергії еталонної лампи в кулі та поза нею (з використанням одного і того ж спектрорадіометра).

Коригуючий коефіцієнт  $K(\lambda)$  визначений як

$$K(\lambda) = \frac{\Phi(\lambda)}{\Phi(\lambda)_k}, \quad (1)$$

де  $\Phi(\lambda)$  – відносний спектральний розподіл енергії еталонної лампи без використання інтегруючої кулі;  $\Phi(\lambda)_k$  – відносний спектральний розподіл енергії еталонної лампи з використанням інтегруючої кулі.

На рис. 3 наведена залежність  $K(\lambda)$  від довжини хвилі.

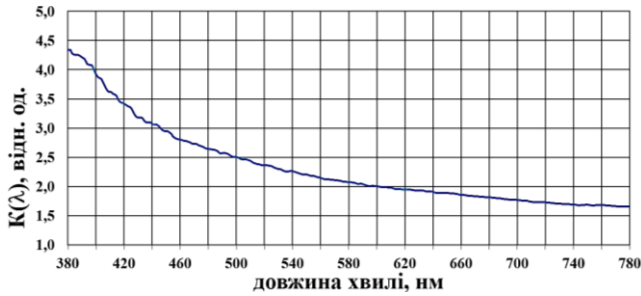


Рис. 3. Залежність  $K(\lambda)$  від довжини хвилі

Координати кольору з урахуванням  $K(\lambda)$  розраховували згідно з рекомендаціями CIE 013.3:

$$X = \sum_{\lambda=380}^{\lambda=760} \Phi(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda) \cdot K(\lambda) \cdot \Delta\lambda \quad (2)$$

$$Y = \sum_{\lambda=380}^{\lambda=760} \Phi(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) \cdot K(\lambda) \cdot \Delta\lambda \quad (3)$$

$$Z = \sum_{\lambda=380}^{\lambda=760} \Phi(\lambda) \cdot \bar{z}(\lambda) \cdot K(\lambda) \cdot \Delta\lambda \quad (4)$$

де  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$ ,  $\bar{z}(\lambda)$  – питомий коефіцієнт кольору монохроматичного випромінювання стандартного колориметричного спостерігача.

На основі проведених досліджень запропонований наступний порядок визначення усереднених значень  $(x, y)$ ,  $(u', v')$ ,  $D_{u,v}$ ,  $CCT$ ,  $R_a$ :

- 1) експериментально визначається  $K(\lambda)$ ;
- 2) проводиться вимірювання відносного спектрального розподілу енергії (з використанням інтегруючої кулі) досліджуваного зразка;
- 3) розраховуються координати кольору  $(X, Y, Z)$  за формулами (2 – 4);
- 4) на основі координат кольору розраховуються координати колірності  $(x, y)$ ,  $(u', v')$  за методикою CIE 015;
- 5)  $CCT_s$  та  $D_{uvs}$  на діаграмі CIE  $(u'2/3, v')$  розраховується з використанням усереднених значень координат колірності  $(u'_s, v'_s)$ ;
- 6) усереднене значення індексу кольоропередавання розраховується на основі усереднених координат колірності  $(u_s, v_s)$  діаграми CIE 1960;
- 7) кутову нерівномірність колірності вимірюють як найбільше відхилення координат колірності  $(u', v')$  від усереднених значень  $(u'_s, v'_s)$ . Максимальні та мінімальні значення координат колірності  $(u', v')$  вимірюють з використанням гоніоспектрорадіометра. Усереднені координати  $(u'_s, v'_s)$  можна визначати як за допомогою гоніоспектрорадіометра, так і вищезгаданим методом з використанням фотометричної кулі.

Кутова нерівномірність  $\Delta_{u'v'}$  відповідно до рекомендацій ДСТУ EN 13032-4 розраховується за формулою:

$$\Delta_{u'v'} \sqrt{(u' - u'_s)^2 + (v' - v'_s)^2} \quad (5)$$

Похибки при визначенні колориметричних параметрів з використанням даного методу не перевищували 5 %, що відповідає вимогам ДСТУ EN 13032-4.

В цьому розділі наведені також результати дослідження якості кольоропередавання світлодіодних світильників з використанням нових вдосконалених методів, зокрема згідно стандарту ТМ 30-18. Метод передбачає оцінювання з використанням 99 контрольних зразків за двома індексами:  $R_f$  (fidelity) – точність і  $R_g$  (gamut) – насиченість кольору.

Індекс  $R_f$  показує на скільки світло близьке до природного світла і змінюється від 100 до 0.

Індекс  $R_g$  вказує на ступінь насиченості кольору і змінюється від 60 до 140.

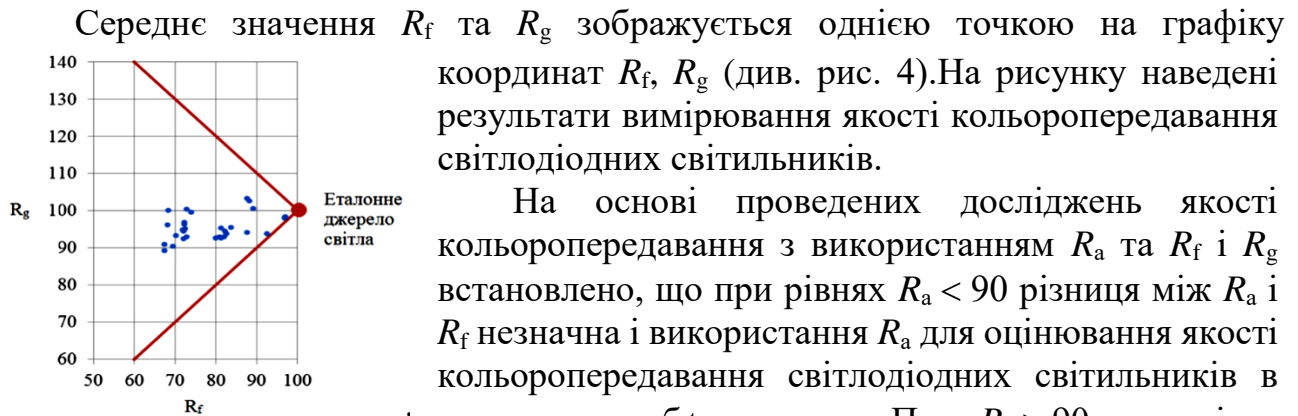


Рис. 4. Графічне представлення  $R_f$  та  $R_g$

На основі проведених досліджень якості кольоропередавання з використанням  $R_a$  та  $R_f$  і  $R_g$  встановлено, що при рівнях  $R_a < 90$  різниця між  $R_a$  і  $R_f$  незначна і використання  $R_a$  для оцінювання якості кольоропередавання світлодіодних світильників в цих межах обґрунтовано. При  $R_a > 90$  має місце завищення  $R_a$  в порівнянні з  $R_f$  на 3 – 5 одиниць і застосування  $R_a$  призводить до великих похибок. Про недостатність застосування для оцінювання якості кольоропередавання тільки  $R_a$  вказувалось СІЕ. Тому нами рекомендовано для вимірювання показників якості світла з підвищеними вимогами додатково використовувати  $R_f$  та  $R_g$ .

**В третьому розділі «Модуляція світлового потоку світлодіодних ламп та світильників»** наведені результати досліджень модуляції світла світлодіодних світильників (ламп).

Вплив мерехтіння на здоров'я людей може розділити на такі, що є результатом короткочасного впливу (епілептичні випадки) і такі, що є результатом тривалого впливу, наприклад, головний біль, порушення зору, втома при виконанні зорових робіт. Перші викликаються видимим мерехтінням, як правило в діапазоні частот  $\sim 3$  Гц – 70 Гц, а другі з невидимою модуляцією світла на частотах вище тих, на яких візуально сприймається мерехтіння. Біологічний вплив на людину – це функція глибини модуляції, частоти мерехтіння, яскравості та інших факторів.

Останнім часом були розроблені наукові моделі, що враховують особливості зорової системи людини. Такими моделями для оцінювання мерехтіння є показник сприймання короткострокової модуляції світла  $P_{st}^{LM}$ , а для стробоскопічного ефекту – показник видимості стробоскопічного ефекту  $SVM$ . Використання цих підходів підтримуються багатьма міжнародними організаціями (Lighting Europe, NEMA, ASSIST, Energy Star).

Для визначення цих показників розроблені міжнародні стандарти ІЕС 61547-1, EN 61000-4-15, ІЕС TR 63158. Сьогодні короткострокова доза модуляції стала загальноприйнятим стандартом і пропонується СІЕ TN 006 для оцінки сприйняття мерехтіння світла для частот до 90 Гц.

Вимога до відсутності видимого мерехтіння виражається як  $P_{st}^{LM} \leq 1,0$ .

Результати вимірювання  $SVM$  можна інтерпретувати наступним чином:

- при  $SVM = 1$  – стробоскопічний ефект, що створює модуляція світла є на порозі видимості. Це означає, що середній спостерігач може виявити стробоскопічний ефект з ймовірністю 50 %;
- якщо значення  $SVM < 1$ , то ймовірність виявлення менша 50 %, а якщо  $SVM > 1$  – то ймовірність буде вищою 50 %.

Що стосується оцінювання безпечного рівня мерехтіння в діапазоні частот

90 – 3000 Гц, то на період до розроблення міжнародних стандартів і рекомендацій СІЕ доцільно скористатись рекомендаціями ІЕЕЕ 1789.

В ІЕЕЕ 1789 узагальнені дані багатьох незалежних досліджень і сформульовані наступні критерії.

Для обмеження можливих несприятливих біологічних ефектів глибина модуляції не повинна перевищувати  $0,025 \cdot f$  для частот нижче 90 Гц. В інтервалі частот 90 – 1250 Гц глибина модуляції має бути чисельно менше  $0,08 \cdot f$ ; вище 1250 Гц по глибині модуляції обмежень немає.

Якщо потрібно забезпечити рівень NOEL (No observable effect level (відсутній будь-який біологічний вплив на організм людини)), то слід зменшити модуляції в 2,5 рази в порівнянні з рекомендованою практикою 1, тобто:

- нижче 90 Гц – глибина модуляції має бути менше  $0,01 \cdot f$  %;
- в межах від 90 Гц до 3000 Гц – глибина модуляції має бути меншою  $0,0333 \cdot f$  %;
- вище 3000 Гц обмеження щодо модуляції відсутні.

На рис. 5 наведені граничні рівні модуляції згідно з критеріями визначеними в ІЕЕЕ 1789. Тут же наведена лінія безпечного рівня мерехтіння, що оцінюється за допомогою  $P_{st}^{LM}$  та умови видимості стробоскопічного ефекту  $SVM$ .

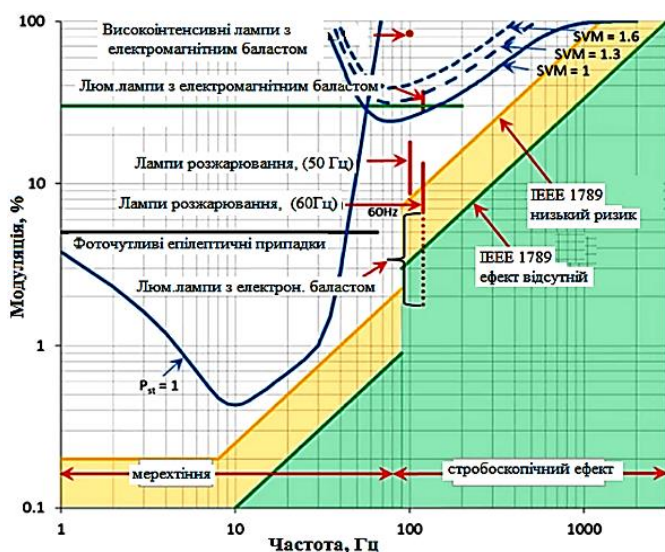


Рис. 5. Граничні рівні глибини модуляції

Вимірювання параметрів модуляції і показника видимості стробоскопічного ефекту необхідно проводити за допомогою спектрометрів, що визначають амплітуду модуляції індекса мерехтіння в інтервалі частот 0 – 3000 Гц і мають програмне забезпечення для розрахунку параметрів  $P_{st}^{LM}$ ,  $Mod\%$ ,  $FI$  і  $SVM$ . Таким приладом може бути МК350S або аналогічний за функціональними можливостями.

З використанням стандартних методів вимірювання короткострокової дози модуляції  $P_{st}^{LM}$ , показника видимості стробоскопічного ефекту  $SVM$ , глибини модуляції та індексу мерехтіння  $FI$  нами проведені дослідження промислових зразків світлодіодних світильників (ламп), що поступають на ринок України.

Встановлено, що світлодіодні світильники (лампи) для внутрішнього освітлення, які поступають на ринок України мають переважно безпечний рівень модуляції та показники видимості стробоскопічного ефекту. У всіх досліджених зразках значення показника  $P_{st}^{LM}$  в частотному діапазоні 0 – 90 Гц не перевищує одиниці. Це означає, що рівень мерехтіння, який виявляє спостерігач з вірогідністю 50 % нижчий ніж у ламп розжарювання потужністю 60 Вт.

В частотному діапазоні 90 – 3000 Гц глибина модуляції та показник

видимості стробоскопічного ефекту досліджених світильників (ламп) в основному відповідають рівню, що не створює несприятливі біологічні ефекти. В більшості випадків глибина модуляції при частоті 100 Гц нижче 8 %, а рівень видимості стробоскопічного ефекту  $SVM < 1$ , тобто ймовірність виявлення стробоскопічного ефекту менша 50 %.

Для підвищення точності вимірювання глибини модуляції, індексу мерехтіння та видимості стробоскопічного ефекту в інтервалі частот до 3000 Гц запропоновано використанням інтегруючої кулі.

Використання інтегруючої кулі дозволяє підвищити точність і відтворюваність вимірювань. При цьому за рахунок багаторазових відбивань світла підвищується рівень сигналу (освітленості на приймачі).

Для обмеження негативних впливів модуляції світла на самопочуття та здоров'я людей рекомендовано встановити наступні граничні значення:  $P_{st}^{LM} < 1$  і  $SVM < 1$ ; глибина модуляції в інтервалі частот 90 – 3000 Гц чисельно меншою  $0,08 \cdot f$ , де  $f$  – частота модуляції в герцах; індекс мерехтіння  $FI < 0,1$

У четвертому розділі «Фотобіологічна безпечність синього світла світлодіодних світильників для внутрішнього освітлення» розглядається спрощений метод оцінювання фотобіологічної безпечності світлодіодних світильників (ламп) для контролю продукції при масовому виробництві та наведені результати дослідження світлодіодної продукції для загального освітлення.

При масовому контролі у виробництві або при перевірці придбаних виробів випробування повинні проводитись з відносно високою швидкістю щоб охопити велику кількість виробів. Для цього можна спрощувати або змінювати стандартні умови вимірювань, що застосовуються в акредитованих випробувальних лабораторіях. Ці спрощення можуть застосовуватись настільки, наскільки результати вимірювань узгоджуються з результатами лабораторних вимірювань.

Для спрощеного методу масового контролю фотобіологічної безпечності світильників (ламп) нами використані граничні яскравості та граничні освітленості, що відповідають межі між RG1 та RG2 за ДСТУ ІЕС/TR 62778.

Ці залежності наведені в таблицях 2 та 3.

Таблиця 2

### Яскравості, що відповідають групам ризику не вище, ніж RG1

Діапазони номінальних значень CCT, К	Значення яскравості $L_v$ , Мкд·м <sup>-2</sup>
до 2350 включно	40,0
понад 2350 до 2850 включно	18,5
понад 2850 до 3250 включно	14,5
понад 3250 до 3750 включно	11,0
понад 3750 до 4500 включно	8,5
понад 4500 до 5750 включно	6,5
понад 5750 до 8000 включно	5,0

**Примітка.** Як основи оцінювань можна використовувати номінальні значення CCT та яскравостей, встановлені виробниками.

### Освітленості, що відповідають групам ризику не вище, ніж RG1

Діапазони номінальних значень $CCT$ , К	Значення освітленості $E_v$ , лк
до 2350 включно	4000
понад 2350 до 2850 включно	1850
понад 2850 до 3250 включно	1450
понад 3250 до 3750 включно	1100
понад 3750 до 4500 включно	850
понад 4500 до 5750 включно	650
понад 5750 до 8000 включно	500

Застосування цього методу передбачає визначення корельованої колірної температури та дійсної яскравості джерел світла. Для світильників (ламп) з точковими джерелами яскравість визначається за допомогою яскравоміра з роздільною здатністю, що забезпечує вимірювання в межах випромінюючої площі світлодіода, як це показано на рисунку 6.

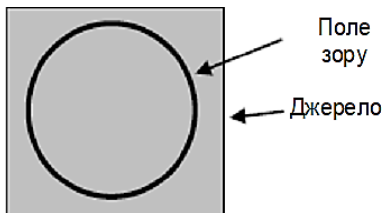


Рис. 6. Розміри джерела більші за кут поля зору

Для світильників з рівномірним розподілом яскравості її значення можна визначати через вимірювання сили світла та площі випромінювальної поверхні.

Якщо дійсна яскравість  $L_v$  не перевищує наведених в таблиці 2, то світильник (лампа) класифікується не вище RG1.

Якщо яскравість  $i$  перевищує межі RG1, але освітленість на встановленій відстані не перевищує межі RG1/RG2 (див. табл. 3), то такий світильник класифікується як такий, що відноситься до RG1. При перевищенні цих меж світильник (лампа) відноситься до групи ризику RG2 і потрібно проводити дослідження в лабораторних умовах, визначати час допустимої експозиції та граничну відстань на якій світильник буде відноситись до RG1.

При дійсній яскравості  $L_v$  меншій за  $10^4$  кд/м<sup>2</sup> незалежно від  $CCT$  світильник (лампа) класифікується за групою RG0.

Застосування цього методу дає 100 % результат правильності оцінки групи ризиків RG0 та RG1 світильників (ламп) загального освітлення. Оцінювання групи ризику за цим методом можна провести і на основі паспортних даних яскравості та  $CCT$  світлодіодів, що надаються їх виробниками.

В роботі також досліджували фотобіологічну безпечність комерційних зразків світильників (ламп), що поступають на ринок України.

Вимірювання параметрів джерел світла, за якими оцінювали фотобіологічну безпечність, проводили з використанням комплекту випробувального обладнання для визначення спектрального складу випромінювання OST 300. Спеціальне програмне забезпечення дозволяє розраховувати на основі спектральних вимірювань енергетичну яскравість  $L_B$  та енергетичну освітленість  $E_s$ , з врахуванням функції вагомості небезпеки синього світла  $B(\lambda)$ ,  $CCT$ ,



яскравість  $L_v$  та освітленість  $E_v$ .

Рівень небезпеки синього світла світлодіодних ламп та світильників оцінювали у відповідності з ДСТУ EN 62471 як на відстані при якій утворюється освітленість 500 лк, так і на відстані 200 мм (найбільш несприятливих умовах).

Якщо кутовий розмір джерела менший за 11 мрад – це малорозмірне джерело. Оцінювання небезпечності синього світла здійснюється з відстані 200 мм (при куті  $\alpha = 11$  мрад) за енергетичною освітленістю  $E_B$ . Для малорозмірного світлодіодного джерела світла група ризику буде не вищою за RG1 при  $E_B < 1$  Вт/м<sup>2</sup>. При перевищенні цієї межі – джерело відноситься до RG2.

Результати дослідження енергетичних та світлових величин за якими оцінюється фотобіологічна безпечність світлодіодних джерел світла для деяких конструкцій світильників наведені в таблицях 4 та 5.

Таблиця 4

**Приклади вимірювання світлодіодних світильників при освітленості 500 лк (кут поля зору 100 мрад)**

Номер світильника	$L_v$ , Вт/м <sup>2</sup> ·ср	ССТ, К	RG	Характеристика світлорозсіювача
1	3,4	3895	0	дифузний світлорозсіювач
2	37,1	4580	0	пластик з напрямленим світлорозсіюванням
3	2416	5480	1	прозорий захисний пластик
4	2,0	3720	0	дифузний світлорозсіювач
5	6,7	3920	0	дифузний світлорозсіювач

Таблиця 5

**Приклади вимірювання світлодіодних світильників на відстані 200 мм (кут поля зору  $\alpha = 11$  мрад)**

Номер світильника	Кутовий розмір джерела світла, мрад	$L_v$ , Вт/м <sup>2</sup> ·ср	$E_B$ , Вт/м <sup>2</sup>	$L_v$ , кд/м <sup>2</sup>	ССТ, К	RG
1	>11	2,7	–	5990	3895	0
2	<11	36,2	0,31	59250	4580	1
3	<11	2339	0,42	$2,79 \cdot 10^6$	5480	1
4	>11	2,1	–	5300	3720	0
5	>11	6,5	–	13230	3920	0

Аналізуючи отримані результати слід відзначити наступне. Всі досліджені лампи з дифузним світлорозсіювачем відносяться до загальної групи RG0 (відсутній ризик небезпеки синього світла) як на відстані де створюється освітленість 500 лк, так і на відстані 200 мм. При зміні умов вимірювання з відстані при яких утворюється освітленість 500 лк на відстань 200 мм світильники можуть підвищувати рівень ризику з RG0 до RG1 і з RG1 до RG2.

Переважає більшість світлодіодних світильників, що поступають на ринок України не перевищують параметрів групи незначного ризику RG1 і є безпечними для більшості сфер застосування.

У п'ятому розділі «Оцінювання дискомфортої та засліплювальної блискавості освітлювальних установок зі світлодіодними джерелами світла» розглядаються особливості оцінювання блискавості світлодіодних освітлювальних установок, що мають нерівномірний розподіл яскравості та надаються рекомендації щодо методу вимірювання ефективної яскравості та коефіцієнта ефективної площі випромінення цих світильників.

Для оцінювання дискомфортої та засліплювальної блискавості досліджувались промислові зразки світлодіодних світильників для внутрішнього загального освітлення.

Скоригований показник  $UGR'$  відповідно до рекомендацій CIE має визначатись як

$$UGR' = 8 \cdot \lg \left[ \frac{0,25}{L_B} \sum K^2 \cdot \frac{L_S^2 \cdot \omega}{p_i^2} \right] \quad (6)$$

де  $K^2 = \frac{L_{eff}^2}{L_S^2} \cdot \frac{\omega_{eff}}{\omega}$ ;  $L_{eff}$  – ефективна яскравість;  $\omega_{eff}$  – ефективний тілесний кут сумарної світлової площі з  $L_{eff}$ ;  $L_S$  – середня яскравість світильника;  $\omega$  – тілесний кут в якому випромінюється світло всього світильника;  $p_i$  – індекс положення Гатта для  $i$ -го світильника;  $\frac{\omega_{eff}}{\omega} \sim \frac{A_{eff}}{A}$ , де  $A_{eff}$  – площа, що має  $L_{eff}$ ;  $A$  – загальна площа світильника, що випромінює світло.

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. Похибки вимірювання цих фотометричних величин не більш ніж  $\pm 3\%$ .

Яскравість  $L_S$  розраховували за формулою:

$$L_S = \frac{I}{A} \quad (7)$$

де  $L_S$  – габаритна яскравість, кд/м<sup>2</sup>;  $I$  – середня сила світла, кд.

Коефіцієнт ефективної площі визначали методом, що базується на граничній яскравості. До ефективної площі відносять всю площу світильника з яскравістю вищою за 500 кд/м<sup>2</sup> (див. рис. 7). Ефективну 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. Точність вимірювання яскравості  $\pm 5\%$ .

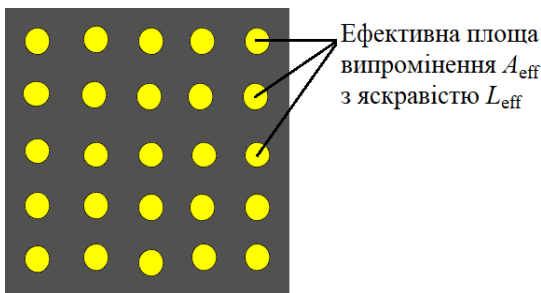


Рис. 7. Схема світильника з нерівномірною яскравістю випромінення

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

Для розрахунку  $UGR'$  розглядали найбільш несприятливий випадок при



меридіальному куті поля зору відносно світильника  $0^\circ$ .

При цьому вираз (6) можна записати як

$$UGR' = UGR + 8 \cdot \lg K^2 \quad (8)$$

В таблиці 6 наведені результати вимірювання та розрахунку  $UGR'$  для світильника без світлорозсіювача, з призма-тичним та дифузним світлорозсіювачами. При розрахунках яскравість фону в приміщенні  $L_V$  брали рівним  $170 \text{ кд/м}^2$ .

Таблиця 6

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

Характеристика світильника	$L_S$ кд/м <sup>2</sup>	$L_{\text{eff}}$ , кд/м <sup>2</sup>	$\frac{A_{\text{eff}}}{A}$ , відн.од.	$K^2$ , відн.од.	$UGR$	$UGR'$
Без світлорозсіювача	3430	$8,9 \cdot 10^5$	$4,5 \cdot 10^{-3}$	13	21	30
З дифузним розсіювачем	1825	1825	1	0	17	17
З призматичним розсіювачем	2070	$2,25 \cdot 10^4$	$2,1 \cdot 10^{-2}$	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. Збільшення показника  $UGR'$  в порівнянні з  $UGR$  за рахунок введення коригуючого коефіцієнта  $K$  може досягати 10 і більше одиниць, що є дуже суттєвим при оцінюванні рівня дискомфортової блискавості.

Так як коригуючий коефіцієнт  $K$  не залежить від яскравості фону та індексу положення Гатта, вимірювання габаритної та ефективної яскравостей, а також коефіцієнта випромінюючої площі можна проводити в лабораторних умовах.

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

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

## ВИСНОВКИ

1. Систематизовано вимоги до параметрів якості світла світлодіодних світильників (ламп) та методів їх вимірювання на основі міжнародних та європейських стандартів і останніх досягнень в галузі світлодіодної техніки, що дозволило запропонувати зміни в національні нормативні документи та впровадити нові стандарти гармонізовані з міжнародними.

2. Вперше застосовано комплекс методів по всебічному оцінюванню якості світла світлодіодних освітлювальних установок, що охоплює вимірювання рівномірності кольорних параметрів, якості кольоропередавання, модуляції світлового потоку та видимості стробоскопічного ефекту, фотобіологічної

безпе́чності синього світла, дискомфорто́ної та засліплюва́льної блискаво́сті.

3. Вперше встановлено, що світильники з прозорим захисним склом, призматичними розсіювачами та лінзовою оптикою мають кутову нерівномірність, що в багатьох випадках значно перевищує допуски семи-ступеневих еліпсів Мак-Адама. Світильники з дифузними розсіювачами мають кутову нерівномірність в межах 3-х ступеневих еліпсів Мак-Адама.

4. Вперше встановлено, що світлорозсіювачі з дифузним пропусканням світла можуть зменшувати кутову нерівномірність колірних параметрів до рівня, що не перевищує середні значення більш як на 4 % і знижувати при цьому  $CCT$  для нульового кута спостереження на 300 – 700 К.

5. Набув подальшого розвитку метод вимірювання просторово усереднених колориметричних параметрів світлодіодних світильників (ламп) з використанням спектрорадіометра та інтегруючої кулі та введенням при розрахунках координат колірності коригуючого коефіцієнта  $K(\lambda)$ , що визначається для кожної довжини хвилі, як відношення спектральної густини випромінення еталонної лампи до спектральної густини її випромінення після багаторазових відбивань випромінення в інтегруючій кулі.

6. Показано, що для оцінювання світильників з високими вимогами до якості кольоропередавання не достатньо застосовувати метод з використанням індексу  $R_a$ , так як він може давати завищені результати більш як на три одиниці. Доцільно додатково застосовувати індекси  $R_f$  та  $R_g$  згідно з стандартом ТМ 30 – 18.

7. На основі аналізу обґрунтовані вимоги до безпечного рівня модуляції світлового потоку світлодіодних світильників (ламп) в частотних діапазонах 0 – 90 Гц та 90 – 3000 Гц. Рекомендовані граничні значення, методи та засоби вимірювання параметрів модуляції світла – показника короткострокової дози модуляції світла  $P_{st}^{LM}$ , глибини модуляції  $Mod$ , індексу мерехтіння  $FI$  та рівня видимості стробоскопічного ефекту  $SVM$  для внесення змін в нормативну документацію на світлодіодні світильники (лампи). Для підвищення точності вимірювання параметрів мерехтіння світла світлодіодних світильників та ламп рекомендовано використовувати інтегруючу кулю.

8. Експериментально встановлено, що світлодіодні світильники (лампи) для внутрішнього освітлення, які поступають на ринок України мають переважно безпечний рівень модуляції та показники видимості стробоскопічного ефекту. У всіх досліджених світильниках (лампах) значення показника  $P_{st}^{LM}$  в частотному діапазоні 0 – 90 Гц не перевищує одиниці.

9. В частотному діапазоні 90 – 3000 Гц глибина модуляції та показник видимості стробоскопічного ефекту досліджених світильників (ламп) в основному відповідають рівню, що не створює несприятливі біологічні ефекти. В більшості випадків глибина модуляції при частоті 100 Гц нижче 8 %, а рівень видимості стробоскопічного ефекту  $SVM < 1$ , тобто ймовірність виявлення стробоскопічного ефекту менша 50 %.

10. Експериментально встановлено, що у світлодіодних світильників (ламп) для загального освітлення, що поступають на ринок України рівень

небезпеки синього світла не перевищує групи незначного ризику RG1 та є безпечними для більшості сфер застосування. Класифікація світильників (ламп) щодо віднесення їх до виробів для загального освітлення має великий вплив на результати оцінювання. Вироби для загального освітлення оцінені з відстані де утворюється освітленість 500 лк не можуть мати параметри фотобіологічної небезпеки, що перевищують межі групи RG1.

11. При зміні умов вимірювання ризику небезпеки синього світла з відстані де утворюється освітленість 500 лк на відстань 200 мм (найбільш несприятливі умови) може підвищуватись рівень ризику з RG0 до RG1 і з RG1 до RG2.

12. На основі залежностей граничних значень яскравостей для групи ризику RG1 від корельованої колірної температури розроблена спрощений метод оцінювання групи небезпечності синього світла для світильників (ламп) загального освітлення в умовах масового виробництва.

13. Показано, що запропонований CIE скоригований узагальнений показник дискомфорту  $UGR'$  для світлодіодних світильників (ламп) з нерівномірним розподілом яскравості може суттєво відрізнятись від стандартного показника  $UGR$ , що застосовується в даний час для оцінювання дискомфоротної блискавості. Для різного ступеню нерівномірності різниця між  $UGR'$  та  $UGR$  може становити 10 й більше одиниць.

14. Запропоновано вдосконалений метод оцінювання  $UGR'$  освітлювальної установки зі світлодіодами шляхом вимірювання габаритної та ефективної яскравості, а також коефіцієнта ефективної площі випромінення світильника в лабораторних умовах, а яскравості фону та індексу положення Гатта – в «польових» умовах при змонтованій освітлювальній установці. Розрахунок  $UGR'$  проводиться за рекомендаціями метода CIE з використанням коригуючого коефіцієнта  $K$ , що розраховується на основі вимірювань параметрів в лабораторних умовах.

15. Для спрощення оцінювання дискомфоротної блискавості при проектуванні та експлуатації освітлювальних установок розроблені рекомендації щодо внесення в документацію на світильники додаткові інформації від їх виробників про максимальну яскравість та коригуючий коефіцієнт, що враховує нерівномірність яскравості конкретних конструкцій світильників.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### Наукові праці, у яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Н. Смірнова, С. Шпак, «Про технічний регламент щодо маркування споживання електричної енергії побутовими електричними лампами», *Стандартизація, сертифікація, якість*, № 5, с. 11-13, 2007.

2. Г. Кожушко, С. Шпак, «Стан і завдання стандартизації світлотехнічної продукції», *Стандартизація, сертифікація, якість*, № 4, с. 3-13, 2010.

3. Г. Кожушко, В. Ткаченко, С. Шпак, «Проблеми стандартизації СВД», *Стандартизація, сертифікація, якість*, № 2, с. 3-7, 2011.

4. С. Шпак, В. Мартиросова, Т. Сахно, Г. Кожушко, «Дослідження пульсацій світлового потоку світлодіодних ламп та світлодіодних світильників»

*Промислова електроенергетика та електротехніка*, № 4-6, с. 22-27, 2019.

5. С. Шпак, Л. Губа, Ю. Басова, С. Багіров, Г. Кожушко, «Дослідження якості кольоропередавання світлодіодних ламп і світильників», *Науковий вісник Полтавського університету економіки і торгівлі. Серія: Технічні науки*. – Полтава: ПУЕТ, № 1 (91). – с. 105–116, 2019.

6. С. Шпак, В. Мартиросова, Т. Сахно, Г. Кожушко, «Напрямки вдосконалення стандартів на світлодіодну техніку та освітлення з її використанням», *Комунальне господарство міст*, Науково-технічний збірник. Серія: Технічні науки та архітектура. – ХНУМГ, Т. 1: № 1 (154), с. 57-66, 2020.

7. С. Шпак, С. Кислиця, Г. Кожушко, Т. Сахно, С. Багіров, «Мерехтіння освітленості та стробоскопічний ефект, що утворюють світлодіодні лампи та світильники», *Системи управління, навігації та зв'язку*. Збірник наукових праць. – Полтава: ПНТУ, Т. 2 (60). – с. 135-143, 2020.

8. С. Шпак, Г. Кожушко, С. Кислиця, Т. Сахно, О. Пітяков, «Дослідження фотобіологічної безпечності світлодіодних ламп та світильників для загального освітлення», *Український метрологічний журнал*. – Харків, № 4. – с. 29-35, 2020.

9. С. Шпак, С. Кислиця, Н. Єрмілова, Г. Кожушко, «Дослідження кутової рівномірності колориметричних параметрів світлодіодних ламп та світильників», *Український метрологічний журнал*. – Харків, № 2. – с. 56-63, 2020.

#### **Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:**

10. Г. Кожушко, Ю. Басова, В. Проценко, В. Іванов, С. Шпак, «Дослідження споживчих властивостей компактних люмінесцентних ламп різних торговельних марок, присутніх на ринку України» на III Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні проблеми світлотехніки», м. Харків, 2009, с. 34-36.

11. Г. Кожушко, В. Ткаченко, С. Шпак, «Стандартизація світлотехнічної продукції в Україні» на IV Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні проблеми світлотехніки та електроенергетики», м. Харків, 2011, с. 18-19.

12. Г. Кожушко, С. Шпак, «Стандартизація світлотехнічної продукції в Україні» на VI Міжнародній науково-технічній конференції «Актуальні проблеми світлотехніки», м. Харків, 2017, с. 101-104.

13. Г. Кожушко, С. Шпак, «Дослідження світлотехнічних параметрів та фотобіологічної безпеки світлодіодної продукції присутньої на ринку України», на Конференції LED Progress «Новинки. Практика. Перспективи», м. Київ, 2018, с. 47-48.

14. Г. Кожушко, С. Шпак, «Впровадження в Україні стандартів на методи випробувань світлотехнічної продукції» на XI Міжнародній науково-технічній конференції «Метрологія та вимірювальна техніка», м. Харків, 2018, с. 142-143.

15. А. Семенов, Г. Кожушко, Т. Сахно, С. Шпак, «Дослідження фотобіологічної безпечності ламп для засмаги на VII Міжнародній науково-технічній конференції «Актуальні проблеми світлотехніки», м. Харків, 2019.

16. С. Шпак, С. Багіров, Г. Кожушко, «Дослідження просторового розподілу сили світла та колірних параметрів світлодіодних ламп та світильників» на VII Міжнародній науково-технічній конференції «Актуальні проблеми світлотехніки», м. Харків, 2019.

17. С. Шпак, В. Мартиросова, Т. Сахно, Г. Кожушко, «Про необхідність подальшого вдосконалення нормативних документів на світлодіодне освітлення» на Конференції LED Progress «Світлодіодне освітлення – Новинки. Практика. Перспективи», м. Київ, 2019, с. 31-32.

18. С. Шпак, В. Мартиросова, Т. Сахно, Г. Кожушко, «Дослідження пульсацій світлового потоку світлодіодних ламп та світильників» на Конференції LED Progress «Світлодіодне освітлення – Новинки. Практика. Перспективи», м. Київ, 2019, с. 32-33.

19. С. Шпак, Г. Кожушко, С. Кислиця, Н. Єрмілова, С. Багіров, «Сучасний стан енергоефективності та якості світла світлодіодної продукції» на науково-практичній III Міжнародній азербайджано-українській конференції «Building Innovations», м. Баку, м. Полтава, 2020, с. 480-482.

20. С. Шпак, Г. Кожушко, С. Кислиця, Т. Сахно, «Дослідження фотобіологічної безпечності світлодіодних ламп та світильників для загального освітлення» на XII Міжнародній науково-технічній конференції «Метрологія та вимірювальна техніка», м. Харків, 2020, с. 94-96.

21. С. В. Шпак, Г. М. Кожушко, С. Г. Кислиця, «Особливості оцінювання дискомфорту та засліплювальної блискавості освітлювальних установок зі світлодіодами» на I Міжнародна науково-практична конференція “Scientific Practice: Modern and Classical Research Methods”, Бостон, USA, Вінниця, Україна, 2021, Vol. 2, с. 9-15.

#### **Наукові праці, які додатково відображають результати дисертації:**

22. А. Семенов, Г. Кожушко, Т. Сахно, С. Шпак, С. Кислиця, «Фотобіологічна безпечність ламп для засмаги», *Комунальне господарство міст. Серія: технічні науки та архітектура.* – Харків, Том 3. Вип. 149, с. 35–43, 2019.

23. С. Шпак, «Методичний документ з метрології. Лампи розжарювання світловимірювальні для вимірювання світлового потоку. Методика повірки», МПУ 223/11–2007, 14 с., 2007.

24. С. Шпак, Р. Домницький, В. Подорожний, «Локальна повірочна схема України. Метрологія. Локальна повірочна схема для засобів вимірювань світлового потоку», ЛПУ 11–01–2006, 7 с., 2006.

25. Кожушко Г.М., Басова Ю. О., Шпак С. В., «Спосіб неруйнівного контролю одноцокольних ламп на наявність попереднього підігріву катодів в пусковому режимі», МПК H05B 41/08, № 75135, Лист. 26, 2012.

#### **АНОТАЦІЯ**

Шпак С.В. Розвиток методів і нормативної бази для вимірювання і контролю параметрів якості світлодіодних освітлювальних установок. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.07 – світлотехніка та джерела світла. – Національний науковий центр «Інститут метрології», м. Харків, 2021.

В дисертації розглядаються питання вимірювання параметрів якості світла світлодіодних світильників (ламп), зокрема колірності, кольоропередавання, мерехтіння світлового потоку, фотобіологічної безпечності синього світла, а також показників дискомфорту та засліпленої блискавості світлодіодних освітлювальних установок.

Показано, що всі світлодіоди, в яких для зміни колірності використовують люмінофор, а також світильники (лампи) на їх основі мають кутову нерівномірність колірних параметрів. Зважаючи на це рекомендовано проводити вимірювання та встановлювати вимоги в нормативних документах на світильники з підвищеними вимогами до колірності як усереднені показники координат колірності та корельованої колірної температури  $CCT$ , так і їх значення в певному напрямку.

Експериментально встановлено, що для оцінювання якості кольоропередавання використання методу CRI дає завищені значення для  $R_a > 90$  більш як на три одиниці в порівнянні з методиками TM-30. Відзначається, що для оцінювання кольоропередавання світильників з підвищеними вимогами до якості світла не достатньо застосовувати метод показника  $R_a$ , а необхідно додатково використовувати сучасні методи, наприклад TM-30.

Для підвищення точності вимірювання глибини та індексу модуляції, а також показника стробоскопічного ефекту вдосконалено метод з використанням інтегруючої кулі. Сформульовано для світлодіодних світильників тимчасові вимоги до рівня модуляції та методів вимірювання параметрів мерехтіння світлового потоку на період до встановлення CIE єдиних вимог.

На основі залежності від корельованої колірної температури граничних значень яскравості для групи ризику RG1 розроблено спрощений метод оцінювання групи небезпечності синього світла світильників (ламп) для загального освітлення в умовах масового виробництва.

Запропоновано оцінювання скоригованого узагальненого показника дискомфорту ( $UGR$ ), що враховує нерівномірність яскравості світлодіодних світильників, проводити за методом, що передбачає вимірювання габаритної та ефективної яскравості, а також коефіцієнта ефективної площі в лабораторних умовах, а яскравість фону та індекс положення світильника в освітлювальній установці – в «польових» умовах на змонтованій установці. Для спрощування оцінювання дискомфортної та засліпленої блискавості пропонується в технічній документації на світильники та в каталогах виробникам вказувати максимальну яскравість та значення коригуючого коефіцієнта, що враховує нерівномірність яскравості даного світильника.

Зроблені висновки та рекомендації щодо внесення змін до методів вимірювання якісних параметрів світла світлодіодних освітлювальних установок.

**Ключові слова:** колірність, кольоропередавання, модуляція світла, фотобіологічна безпечність, дискомфортна блискавість, засліплювальна блискавість.

## ABSTRACT

Shpak S.V. Progress of methods and regulatory basis for measuring and controlling the quality parameters of LED lighting installations. – The qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

A thesis for Candidate of Technics grade in the Specialty 05.09.07 – Lighting and light sources – National Scientific Centre “Institute of Metrology”, Kharkov – 2021.

The dissertation considers questions the measurement of light quality parameters of LED luminaires (lamps), including chromaticity, color rendering, flicker of luminous flux, photobiological safety of blue light, as well as indicators of discomfort and disability glare of LED lighting installations.

It is shown that all LEDs in which a phosphor is used to change the color, as well as luminaires (lamps) based on them, have angular unevenness of color parameters. Taking this into account, it is recommended to measure and establish requirements in regulatory documents for luminaires with increased requirements for chromaticity, as the averaged indicators of chromaticity coordinates and correlated color temperature (*CCT*), and their values in a certain direction.

It has been experimentally established that for assessing the quality of color rendering, the use of the CRI method gives overestimated values for  $R_a > 90$  by more than three units in comparison with the TM-30 methods. It is noted that to assess the color rendering of luminaires with increased requirements for the quality of light, it is not enough to use the  $R_a$  indicator method, but it is necessary to additionally use modern methods, for example, TM-30.

To increase the accuracy of measuring the depth and index modulation, as well as the stroboscopic effect, the method using an integrating sphere was improved. Temporary requirements for the level of modulation and methods of measuring the parameters of flicker of the luminous flux for the period before the establishment of CIE uniform requirements are formulated for LED luminaires.

Based on the dependence on the correlated color temperature of the luminance limit values for the risk group RG1, a simplified method for assessing the blue light hazard group of luminaires (lamps) for general lighting in mass production conditions has been developed.

It is proposed to assessing the corrected unified glare rating (*UGR'*), which takes into account the non-uniform luminance of LED luminaires, to be carried out using methods that provide for measuring the overall and effective luminance, as well as the coefficient effective area in laboratory conditions, and the background glare and the index of the luminaire position in the lighting installation - in the "field" conditions on the mounted installation. To simplify the assessment of discomfort and disability glare, it is proposed in the technical documentation for the luminaires and in the catalogs of manufacturers to indicate the maximum luminance and the value of the correction factor, which takes into account the non-uniform luminance of this luminaire.

Conclusions and recommendations are made on making changes to the methods of measuring the quality parameters of light of LED lighting installations.

**Keywords:** chromaticity, color rendering, light modulation, photobiological safety, discomfort glare, disability glare.

**ШПАК СВІТЛАНА ВАСИЛІВНА**

**РОЗВИТОК МЕТОДІВ І НОРМАТИВНОЇ БАЗИ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ  
ТА КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ ЯКОСТІ СВІТЛОДІОДНИХ  
ОСВІТЛЮВАЛЬНИХ УСТАНОВОК**

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Підп. до друку . Формат 60 × 84 /16.  
Друк на ризографі. Ум. друк. арк. 0,9.  
Тираж 100 пр. Зам. №

Видавець і виготовлювач:

Електронна адреса:  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:  
ДК № від