



## Стан енергоефективності та якості світла світлодіодної продукції

П.І. Неєжмаков<sup>1</sup>, О.С. Пітяков<sup>2</sup>, С.В. Шпак<sup>3</sup>, С.Г. Кислиця<sup>4</sup>, Г.М. Кожушко<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Національний науковий центр "Інститут метрології", вул. Мironосицька, 42, 61002, Харків, Україна  
pavel.neyezhnikov@metrology.kharkov.ua

<sup>2</sup> Відокремлений структурний підрозділ "Полтавський політехнічний фаховий коледж Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут", вул. Пушкіна, 83а, 36039, Полтава, Україна  
oritiakov@polytechnic.poltava.ua

<sup>3</sup> Державне підприємство "Полтавський регіональний науково-технічний центр стандартизації, метрології та сертифікації", вул. Генерала Духова, 16, 36014, Полтава, Україна  
ndcvel.to@gmail.com

<sup>4</sup> Національний університет "Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка", просп. Першотравневий, 24, 36011, Полтава, Україна  
kozhuskogm@gmail.com

### Анотація

У статті наведено результати дослідження енергоефективності та якості світла світлодіодних світильників (ламп) для загального освітлення, зокрема, колориметричних параметрів, модуляції світлового потоку та фотобіологічної безпечності. Показано, що двоцокольні світлодіодні лампи з цоколем G13 і світильники для зовнішнього освітлення досягли енергоефективності класу A++. Світлодіодні лампи з цоколем E27 та світильники для внутрішнього освітлення зі світлорозсіювачами мають світлову віддачу на 25–35% нижчу і відповідають класам енергоефективності A+, A, B. Корельована колірна температура (CCT) світильників для внутрішнього освітлення перебуває переважно в інтервалі 3000–4500 K, а загальний індекс кольоропередавання  $R_a$  – в інтервалі 70–86 одиниць.

Показано, що світлодіодні світильники для внутрішнього освітлення мають переважно безпечний рівень мерехтіння, а небезпека синього світла не перевищує параметри груп незначного ризику. Лампи і світильники з використанням дифузних світлорозсіювачів відносяться до загальної групи RG0 (відсутній ризик).

Зроблені висновки щодо енергоефективності та якості світла світлодіодних світильників (ламп).

**Ключові слова:** енергоефективність; лампи; світильники; світлодіоди; якість світла.

Отримано: 09.09.2021

Відредаговано: 09.12.2021

Схвалено до друку: 20.01.2022

### Постановка проблеми

За даними Міжнародного енергетичного агентства (IEA), 19% світового виробництва електроенергії (ЕЕ) витрачається на освітлення, тому надзвичайно актуальною є проблема скорочення споживання ЕЕ освітлювальними установками. У європейському законодавстві в сфері енергоефективності прийнято цілий ряд нормативних документів, спрямованих на підвищення енергоефективності освітлення. Не менш важливою є проблема якості світла, хоча їй донедавна приділялося менше уваги. Головне завдання якісного освітлення полягає в забезпеченні комфортних зорових робіт та адекватного сприймання навколишнього середовища. Ряд медико-біологічних досліджень показав, що світло, крім основних зорових функцій, впливає на організм людини нездоровим біологічним та

психологічним ефектами. Хороше освітлення позитивно впливає на здоров'я, бадьорість, продуктивність праці й навіть на якість сну [1–2].

Світлодіодні лампи та світильники стали основою сучасних технологій освітлення практично у всіх сферах людського господарювання. Їхні переваги, порівняно з лампами розжарювання та розрядними лампами, очевидні. Такі лампи мають високу енергоефективність та надійність, тривалий термін служби, екологічність, стійкість до механічних впливів та ін.

Але, незважаючи на значні досягнення, сучасні освітлювальні системи з використанням світлодіодів ще не відповідають багатьом сучасним вимогам до якості світла. Це стосується колориметричних параметрів, зокрема, відхилення колірності від нормативних значень, якості кольоропередавання, кутової нерівномірності колірності та ін.

Актуальною проблемою якості світла є також мерехтіння освітленості. Як мінімум мерехтіння створює дискомфорт, але воно може стати й небезпекою для здоров'я – спричинити втому, знижувати продуктивність зорових робіт, провокувати головний біль, мігрень, створювати неврологічні проблеми, такі як епілептичні напади, підсилювати аутичну поведінку в дітей та ін. [3].

Оптичне випромінювання (ОВ) здатне спричинити у тканинах живих організмів біологічні реакції, які визначаються процесами перетворення енергії на молекулярному рівні. При фіксації погляду на яскраві джерела світла (якими є світлодіоди) є ризик пошкодити сітківку ока світлом із довжиною хвилі 435–440 нм [4], тому фотобіологічна безпека світлодіодних світильників (ламп) є також актуальною.

**Метою** роботи було дослідження рівня енергоефективності та якості світла комерційних зразків світлодіодних ламп та світильників для загального освітлення, що потрапляють на ринок України.

#### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Енергоефективність і якість світла світлодіодних світильників (ламп) досліджували в багатьох роботах. Найбільш широкі дослідження проводились у рамках програми LED Lighting Facts Департаменту енергетики США. У [5] є всі дані про випробувану продукцію. Частина цієї інформації з аналітичними висновками опубліковано в [6, 7].

Зважаючи, що рівень параметрів світлодіодних світильників (ламп) постійно підвищується, розширення досліджень споживчих параметрів нової продукції викликає інтерес як у споживачів, так і у виробників. Це стосується перш за все якості світла.

Головною вимогою щодо якості світла є відхилення координат колірності ( $x$ ,  $y$ ) від їх номінальних значень для даної ССТ в межах 3-ступеневих еліпсів Мак-Адама [8–9]. Це найбільш високі вимоги, що встановлені стандартами. Для інших категорій встановлені межі відхилення в 5, 7 та 7<sup>+</sup> ступенів.

З метою підвищення вимог до хроматичності світлодіодних джерел світла стандарт [10] рекомендує для визначення допусків колірності використовувати не еліпси Мак-Адама на діаграмі колірності CIE ( $x$ ,  $y$ ), а кола на рівноконтрастній діаграмі CIE ( $u'$ ,  $v'$ ). На діаграмі ( $u'$ ,  $v'$ )  $n$ -ступеневий еліпс Мак-Адама визначається колом із радіусом  $0,0011 \cdot n$ . Для центральної точки з координатами ( $u'_c$ ,  $v'_c$ )  $n$ -ступеневе коло виражається рівнянням:

$$(u' - u'_c)^2 + (v' - v'_c)^2 = (0,0011 \cdot n)^2. \quad (1)$$

Помітна візуальна різниця в колірності світла настає (з імовірністю 50%) при зміні координат ( $u'$ ,  $v'$ ) на величину 0,0013.

Однією з актуальних проблем якості світла є мерехтіння світлового потоку джерела світла. Впливи мерехтіння на здоров'я людей можна розділити на такі, що є результатами короточасного 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  $\sim 3\text{--}70$  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.

На сьогодні вже розроблені наукові моделі оцінювання параметрів мерехтіння, 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 (stroboscopic effect visibility, *SEV*). Для визначення цих показників розроблені міжнародні стандарти [11, 12].

У [13] рекомендовано для запобігання можливим несприятливим біологічним ефектам встановити такі вимоги: глибина модуляції чисельно не повинна перевищувати  $0,025 \times f$  для частоти нижче 90 Гц; в інтервалі частот 90–1250 Гц глибина модуляції має бути меншою за  $0,08 \times f$ ; 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 модуляцію в 2,5 рази, тобто:

- нижче 90 Гц – глибина модуляції має бути меншою за  $0,01 \times f\%$ ;
- в межах від 90 до 3000 Гц – має бути меншою за  $0,0333 \times f\%$ ;
- вище 3000 Гц обмеження на модуляцію світла відсутні.

Одним із питань, що розглядається в цій роботі, є дослідження фотобіологічної безпечності світлодіодних світильників для загального освітлення. Стандартизовані методи оцінювання і класифікація ризиків встановлені в стандартах [14, 15].

#### Виклад основного матеріалу досліджень

Досліджували світлодіодні лампи для прямої заміни ламп розжарювання (ЛР) із цоколями E27 та лінійні світлодіодні лампи для заміни люмінесцентних ламп (ЛЛ) із цоколями G13, а також світлодіодні світильники різного призначення. Вимірювали електричні, світлові та колірні параметри згідно з [10], модуляцію

Результати дослідження енергоефективності світлодіодних світильників та ламп

Назва виробу	Діапазон потужностей, Вт	Середня світлова віддача, лм/Вт	Мінімальні та максимальні значення світлової віддачі, лм/Вт	Класи енергоефективності
Світлодіодні лампи з цоколем E27	5–12	98	67–115	A+, A, B
Світлодіодні лампи з цоколем G13 (для заміни люмінесцентних ламп)	8–22	135	80–155	A++, A+, A
Світлодіодні світильники для внутрішнього освітлення	15–80	96	71–112	A+, A, B
Світлодіодні світильники для зовнішнього освітлення	20–1200	136	92–163	A++, A+, A

світла згідно з [13], видимість стробоскопічного ефекту  $SVM$  згідно з [12], короткостроковий показник мерехтіння  $P_{st}^{LM}$  згідно з [11]. Рівень фототобіологічної небезпеки синього світла оцінювали згідно з [13–16].

Для вимірювання фотометричних та спектральних параметрів застосовували фотометричну кулю діаметром 3 м, гоніофотометр GO 2000, спектрорадіометр МК 350S. Параметри мерехтіння та видимість стробоскопічного ефекту  $SVM$  вимірювали з використанням спектрорадіометра МК 350S Premium. На основі спектральних даних із використанням програмного забезпечення МК 350S розраховувались координати колірності, корельована колірна температура, індекси кольоропередавання.

Результати дослідження енергоефективності світлодіодних світильників та ламп, проведеного на масиві більш ніж 80 зразків, наведені в табл. 1.

Як видно із отриманих результатів, енергоефективність світлодіодної продукції відповідає в основному класам A++, A+ та A.

Результати дослідження колірності ( $u'$ ,  $v'$ ,  $CCT$ ) та якості кольоропередавання ( $R_a$ ,  $R_f$ ,  $R_g$ ) деяких світлодіодних світильників для внутрішнього освітлення наведені в табл. 2. Якість кольоропередавання оцінювали за двома методами: CRI [16] та TM-30-18 [17].

Метод TM-30-18 передбачає оцінювання з використанням 99 контрольних зразків за двома індексами:  $R_f$  (fidelity) – точність і  $R_g$  (gamut) – насиченість кольору.

Індекс  $R_f$  показує, наскільки 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 одиниць. Середнє значення  $R_f$  та  $R_g$  зображується однією точкою на графіку координат  $R_f$ ,  $R_g$ .

Таблиця 2

Результати вимірювання параметрів колірності та кольоропередавання світлодіодних світильників із використанням методик CRI та TM-30-18

Номер досліджуваного зразка	Координати колірності		$CCT$ , К	CRI ( $R_a$ )	TM-30-18	
	$u'$	$v'$			$R_f$	$R_g$
1	0,2207	0,5052	4 100	69,3	69,9	90,3
2	0,2264	0,5025	3 924	86,5	84,3	95,6
3	0,2381	0,5067	3 976	93,0	89,7	100,7
4	0,2262	0,5023	3 950	84,5	82,7	94,5
5	0,2483	0,5146	3 105	92,1	88,6	102,7
6	0,2242	0,5084	3 920	81,1	81,4	92,9
7	0,2362	0,4992	4 228	83,7	81,8	92,7
8	0,2256	0,5074	3 887	81,4	81,9	95,4
9	0,2478	0,5126	3 133	92,3	88,2	103,4
10	0,3805	0,5032	4 027	83,5	82,5	93,0

Результати вимірювання  $P_{st}^{LM}$ , глибини модуляції  $Mod$ , індексу мерехтіння  $FI$  та показника стробоскопічної видимості  $SVM$  світлодіодних ламп та світильників

Назва виробу	Номер зразка	$P_{st}^{LM}$ , відн. од.	Макс. глибина модуляції $Mod$ , %	Частота для макс. глибини модуляції, Гц	Індекс мерехтіння $FI$ , відн. од.	$SVM$ , відн. од.
Світильники для внутрішнього освітлення	1	0,0443	1,95	100	0,0021	0,0096
	2	0,0322	0,90	2020	0,0044	0,0013
	3	0,0785	2,05	100	0,0002	0,0103
	4	0,0621	1,00	100	0,0002	0,0107
	5	0,0941	4,00	100	0,0205	0,2152
Світлодіодні лампи	1	0,3627	12,9	100	0,0355	0,0219
	2	0,2726	10,8	100	0,0350	0,0212
	3	0,0532	2,0	100	0,0020	0,0107
	4	0,0568	3,3	100	0,0025	0,0121
	5	0,0798	41,1	100	0,1146	1,2722

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 (ламп) у цих межах є коректним. 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. Для вимірювання показників якості світла з підвищеними вимогами до кольоропередавання доцільно додатково використовувати  $R_f$  та  $R_g$ .

Результати вимірювання короткострокової дози модуляції  $P_{st}^{LM}$ , глибини модуляції  $Mod$ , індексу мерехтіння  $FI$  та видимості стробоскопічного ефекту  $SVM$  для деяких зразків світлодіодних ламп

та світильників з використанням методик [11–13] наведені в табл. 3.

Як видно із отриманих результатів,  $P_{st}^{LM}$  усіх досліджених зразків не перевищує одиниці. Це означає, що видиме мерехтіння в діапазоні частот до 80 Гц не становить небезпеки.

Світлодіодні світильники мають на частоті 100 Гц глибину модуляції, що не перевищує 4%, а індекс мерехтіння  $FI$  – не більше 0,044. Це відповідає вимогам [13], які обмежують можливі несприятливі біологічні ефекти, що створюються модуляцією світла в інтервалі частот 90–1250 Гц. Видимість стробоскопічного ефекту  $SVM < 1$  для всіх досліджених зразків, тобто ймовірність виявлення стробоскопічного ефекту менше 50%.

Таблиця 4

Результати вимірювання світлодіодних світильників з відстані, де утворюється освітленість 500 лк (кут поля зору 100 мрад)

Номер світильника	$CCT$ , К	Енергет. яскравість $L_B$ , Вт/м <sup>2</sup> ×ср	Яскравість $L_V$ , кд/м <sup>2</sup>	Групи ризику RG	Характеристика світлорозсіювача
1	3895	2,7	5990	0	Дифузне пропускання
2	4580	36,2	59250	0	Направлено-розсіювальне пропускання
3	5480	2339	2,79×10 <sup>6</sup>	1	Прозорий пластик
4	3720	2,1	5300	0	Дифузне пропускання
5	3920	6,5	13230	0	Дифузне пропускання
6	4505	23,2	4,72×10 <sup>4</sup>	0	Направлено-розсіювальне пропускання
7	3690	1,3	3180	0	Дифузне пропускання
8	3780	9,4	2,13×10 <sup>4</sup>	0	Дифузне пропускання
9	3940	379,8	8,02×10 <sup>5</sup>	1	Направлено-розсіювальне пропускання
10	3610	217,5	7,25×10 <sup>5</sup>	1	Направлено-розсіювальне пропускання



Що стосується світлодіодних ламп, то у всіх зразків  $P_{st}^{LM} < 1$  (вірогідність виявлення мерехтіння менше 50%).

Глибина модуляції двох ламп на частоті 100 Гц перевищує 8%, що не відповідає рекомендаціям [13]. Видимість стробоскопічного ефекту  $SVM > 1$  у однієї лампи (вірогідність виявлення стробоскопічного ефекту більше 50%).

Вимірювання параметрів джерел світла, за якими оцінювали фотобіологічну безпечність, проводили з використанням комплексу 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 урахуванням функції вагомості небезпеки синього світла  $B(\lambda)$ , CCT, яскравість  $L_V$  та освітленість  $E_v$ .

Рівень небезпеки синього світла світлодіодних ламп та світильників оцінювали відповідно до [14–15] як на відстані, при якій утворюється освітленість 500 лк, так і на відстані 200 мм (за найбільш несприятливих умов).

Результати дослідження енергетичної яскравості  $L_B$ , за якою оцінюється фотобіологічна безпечність світла світлодіодних світильників, наведені в табл. 4. Граничні значення  $L_B$  для групи ризику RG0 мають не перевищувати 100 Вт/м<sup>2</sup>ср, для RG1 – 10000 Вт/м<sup>2</sup>ср.

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 якій утворюється освітленість 500 лк, на відстань 200 мм світильники можуть підвищувати рівень ризику з RG0 до RG1.

Переважає більшість світлодіодних світильників для загального освітлення, що потрапляють на ринок України, не перевищують значень для групи незначного ризику RG1 і є безпечними для більшості сфер застосування.

## Висновки

1. Світлова віддача світлодіодних ламп із різьбовими цоколями потужністю 5–12 Вт з CCT 2700–5000 К перебуває в межах 67–115 лм/Вт, загальний індекс кольоропередавання  $R_a$  – в межах 71–86 одиниць. Середнє значення світлової віддачі становить приблизно 98 лм/Вт, а  $R_a$  – 77 одиниць. Енергоефективність ламп в основному відповідає класам А та А+. Світлова віддача лінійних світлодіодних ламп (для заміни люмінесцентних ламп) потужністю 8–22 Вт перебуває в інтервалі значень 80–155 лм/Вт, а  $R_a$  – в інтервалі 74–84. Енергоефективність цих ламп відповідає класам А, А+ та А++.

2. Світлова віддача світильників для внутрішнього освітлення (неспрямованого та спрямованого світла) потужністю 15–80 Вт з CCT 3000–5100 К перебуває в межах 71–112 лм/Вт, а  $R_a$  – 71–86 одиниць. Енергоефективність світильників неспрямованого світла відповідає переважно класам А та А+, а світильників спрямованого світла – класам А, А+ та А++.

3. Світлова віддача світильників для зовнішнього освітлення потужністю 20–1200 Вт з CCT 3800–6400 К перебуває в межах 92–163 лм/Вт, а  $R_a$  – в межах 71–82. Середнє значення світлової віддачі становить приблизно 136 лм/Вт, а  $R_a$  – 75.

4. Рівень розкиду кольірних параметрів комерційних зразків світлодіодних ламп та світильників на цьому етапі не відповідає сучасним вимогам щодо забезпечення значень координат колірності в межах трьох ступеневих еліпсів Мак-Адама (3-х SDCM) та якості кольоропередавання з  $R_a \geq 80$ .

5. Світлодіодна продукція, що потрапляє на ринок України, має в основному безпечний рівень модуляції світла та показника видимості стробоскопічного ефекту SVM. Глибина модуляції світла на частоті 100 Гц у більшості випадків не перевищує 8%, а SVM значно менше одиниці, що не спричиняє видимості стробоскопічного ефекту.

6. Параметри світлодіодних світильників (ламп) для загального освітлення не перевищують значень для групи незначного ризику RG1 і є безпечними для більшості сфер застосування.

# Состояние энергоэффективности и качества света светодиодной продукции

П.И. Неєжмаков<sup>1</sup>, А.С. Питяков<sup>2</sup>, С.В. Шпак<sup>3</sup>, С.Г. Кислиця<sup>4</sup>, Г.М. Кожушко<sup>4</sup>

<sup>1</sup> *Национальный научный центр "Институт метрологии", ул. Мироносицкая, 42, 61002, Харьков, Украина  
pavel.neyezhnikov@metrology.kharkov.ua*

<sup>2</sup> *Структурное подразделение "Полтавский политехнический профессиональный колледж Национального технического университета "Харьковский политехнический институт", ул. Пушкина, 83а, 36039, Полтава, Украина  
opitiakov@polytechnic.poltava.ua*

<sup>3</sup> *Государственное предприятие "Полтавский региональный научно-технический центр стандартизации, метрологии и сертификации", ул. Генерала Духова, 16, 36014, Полтава, Украина  
ndcvel.to@gmail.com*

<sup>4</sup> *Национальный университет "Полтавская политехника имени Юрия Кондратюка", просп. Первомайский, 24, 36011, Полтава, Украина  
kozhuskogm@gmail.com*

## Аннотация

В статье приведены результаты исследования энергоэффективности и качества света светодиодных светильников (ламп) для общего освещения, в частности колориметрических параметров, модуляции светового потока и фотобиологической безопасности. Показано, что двухцокольные светодиодные лампы с цоколем G13 и светильники для наружного освещения достигли энергоэффективности класса A++. Светодиодные лампы с цоколем E27 и светильники для внутреннего освещения со светорассеивателями имеют световую отдачу на 25–35% ниже и соответствуют классам энергоэффективности A+, A, B.

Светодиодные светильники для внутреннего освещения имеют преимущественно безопасный уровень мерцания и видимости стробоскопического эффекта.

Светодиодные лампы и светильники для общего освещения, поступающие на светотехнический рынок, не превышают параметров группы незначительного риска опасности синего света RG1. Лампы и светильники с использованием диффузных светорассеивателей относятся к общей группе RG0 (отсутствует риск).

**Ключевые слова:** энергоэффективность; лампы; светильники; светодиоды; качество света.

# The current state of energy efficiency and light quality of led products

P. Neyezhnikov<sup>1</sup>, O. Pitiakov<sup>2</sup>, S. Shpak<sup>3</sup>, S. Kyslytsia<sup>4</sup>, G. Kozhushko<sup>4</sup>

<sup>1</sup> *National Scientific Centre "Institute of Metrology", Myronosytska Str., 42, 61002, Kharkiv, Ukraine  
pavel.neyezhnikov@metrology.kharkov.ua*

<sup>2</sup> *Separate Structural Unit "Poltava Polytechnic Professional College" of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Pushkina Str., 83a, 36039, Poltava, Ukraine  
opitiakov@polytechnic.poltava.ua*

<sup>3</sup> *State Enterprise "Poltava Regional Scientific and Technical Center of Standardization, Metrology and Certification", Henerala Dukhova Str., 16, 36014, Poltava, Ukraine  
ndcvel.to@gmail.com*

<sup>4</sup> *National University "Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic", Pershotravnevyi Ave., 24, 36011, Poltava, Ukraine  
kozhuskogm@gmail.com*

## Abstract

The article presents the results of the energy efficiency study and light quality of LED illuminators (lamps) for general lighting, in particular colorimetric parameters, light flux modulation and photobiological safety. It is shown that two-base LED lamps with G13 base and luminaires for outdoor lighting have achieved energy efficiency class A++. LED lamps with E27 base and indoor lighting fixtures with light diffusers have a light output 25–35% lower and correspond to energy efficiency classes A+, A, B. Correlated color temperature (FTA) of indoor lighting fixtures is mainly in the range of 3000–4500 K, and the total color rendering index  $R_a$  – in the range of 71–86 units. The deviation of chromaticity from nominal values can reach 7+ degrees of McAdam ellipses (7+ standard deviations of SDCM comparison color). The angular

non-uniformity of color in luminaires with diffuse light diffusers does not exceed 3 SDCM, and for luminaires without light diffusers and with lens optics - can exceed 7+ SDCM.

It is shown that LED luminaires for indoor lighting have a mainly safe level of flicker and visibility of the stroboscopic effect. In the frequency range up to 80 Hz, the flicker level, which is observed with a probability of 50% lower than incandescent lamps with a power of 60 watts. In the frequency range up to 3000 Hz, the modulation depth corresponds to a level that does not create adverse biological effects.

LED lamps and illuminators for general lighting entering the lighting market do not exceed the parameters of the insignificant risk danger group of blue light RG1. Lamps and illuminators using diffuse light diffusers belong to the general group RG0 (no risk).

Conclusions are made on energy efficiency and light quality of LED lamps.

**Keywords:** LEDs; lamps; luminaire; energy efficiency; light quality.

### Список літератури

1. Ван Боммель В. Зрительные, биологические и эмоциональные аспекты освещения. Результаты последних исследований и их значение для светотехнической практики. *Светотехника*. 2005. № 4. С. 4–6.
2. Бойс П. Свет и здоровье. *Светотехника*. 2006. № 2. С. 43–47.
3. Wilkins A., Lehman B. Designing to Mitigate Effects of Flicker in LED Lighting: Reducing risks to health and safety. *IEEE Power Electronics Magazine*, 2014, vol. 1, no. 3, pp. 18–26. doi:10.1109/MPEL.2014.2330442
4. Ван Боммель В. Качество освещения и энергоэффективность: критический обзор. *Светотехника*. 2011. № 1. С. 6–11.
5. LED Lighting Facts Products. URL: [www.lightingfacts.com/products](http://www.lightingfacts.com/products)
6. Наружное освещение. Отчёт LED Lighting Facts 2014. *Современная светотехника*. 2015. № 1. С. 4–10.
7. Внутреннее общее освещение. Отчёт LED Lighting Facts 2014. *Современная светотехника*. 2014. № 6. С. 8–13.
8. NF EN 62612:2017 AMD 1 2017 Self-ballasted LED lamps for general lighting services with supply voltages > 50 V – Performance requirements.
9. EN 62722-2-1:2016. Luminaire performance – Part 2-1: Particular requirements for LED luminaires.
10. DIN EN 13032-4-2015. Light and lighting – Measurement and presentation of photometric data of lamps and luminaires – Part 4: LED lamps, modules and luminaires.
11. IEC TR 61547-1:2017. Equipment for general lighting purposes – EMC immunity requirements – Part 1: An objective light flickermeter and voltage fluctuation immunity test method.
12. IEC TR 63158:2018. Equipment for general lighting purposes – Objective test method for stroboscopic effects of lighting equipment.
13. IEEE 1789-2015. IEEE Recommended Practices for Modulating Current in High-Brightness LEDs for Mitigating Health Risks to Viewers.
14. IEC/TR 62471:2006/CIE S 009:2002. Photobiological safety of lamps and lamp systems (bilingual edition).
15. IEC/TR 62778:2014. Application of IEC 62471 for the assessment of blue light hazard to light sources and luminaires.
16. DSTU CIE 013.3:2017 (CIE 013.3–1995, IDT). Method of measuring and specifying colour rendering properties of light sources. Kyiv, 2019 (in Ukrainian).
17. Illuminating Engineering of North America. IES-TM-30-18. Method for Evaluating Light Source Color Rendition. New York, NY IESNA, 2018. 34 p.

### References

1. Van Bommel V. Zritelnye, biologicheskie i emocionalnye aspekty osveshcheniya. Rezultaty poslednih issledovanij i ih znachenie dlya svetotekhnicheskoy praktiki [Visual, biological and emotional aspects of lighting. Recent research findings and their implications for lighting practice]. *Light & Engineering*, 2005, no. 4, pp. 4–6 (in Russian).
2. Bois P. Svet i zdorov'e [Light and health]. *Light & Engineering*, 2006, no. 2, pp. 43–47 (in Russian).
3. Wilkins A., Lehman B. Designing to Mitigate Effects of Flicker in LED Lighting: Reducing risks to health and safety. *IEEE Power Electronics Magazine*, 2014, vol. 1, no. 3, pp. 18–26. doi:10.1109/MPEL.2014.2330442
4. Van Bommel V. Kachestvo osveshcheniya i energoeffektivnost: kriticheskij obzor [Lighting quality and energy efficiency: a critical review].

- Light & Engineering*, 2011, no. 1, pp. 6–11 (in Russian).
5. LED Lighting Facts Products. Available at: [www.lightingfacts.com/products](http://www.lightingfacts.com/products)
  6. Naruzhnoe osveshchenie. Otchyot LED Lighting Facts 2014 [Outdoor Lighting. Report LED Lighting Facts 2014]. *Sovremennaya svetotekhnika*, 2015, no. 1, pp. 4–10 (in Russian).
  7. Vnutrennee obshchee osveshchenie. Otchyot LED Lighting Facts 2014 [Internal lighting. Report LED Lighting Facts 2014]. *Sovremennaya svetotekhnika*, 2014, no. 6, pp. 8–13 (in Russian).
  8. NF EN 62612: 2017 AMD 1 2017 Self-ballasted LED lamps for general lighting services with supply voltages > 50 V – Performance requirements.
  9. EN 62722-2-1:2016. Luminaire performance – Part 2-1: Particular requirements for LED luminaires.
  10. DIN EN 13032-4-2015. Light and lighting – Measurement and presentation of photometric data of lamps and luminaires – Part 4: LED lamps, modules and luminaires.
  11. IEC TR 61547-1:2017. Equipment for general lighting purposes – EMC immunity requirements – Part 1: An objective light flickermeter and voltage fluctuation immunity test method.
  12. IEC TR 63158:2018. Equipment for general lighting purposes – Objective test method for stroboscopic effects of lighting equipment.
  13. IEEE 1789-2015 IEEE Recommended Practices for Modulating Current in High-Brightness LEDs for Mitigating Health Risks to Viewers.
  14. IEC/TR 62471:2006/CIE S 009:2002. Photobiological safety of lamps and lamp systems (bilingual edition).
  15. IEC/TR 62778:2014. Application of IEC 62471 for the assessment of blue light hazard to light sources and luminaires.
  16. DSTU CIE 013.3:2017 (CIE 013.3–1995, IDT). Method of measuring and specifying colour rendering properties of light sources. Kyiv, 2019 (in Ukrainian).
  17. Illuminating Engineering of North America. IES-TM-30-18. Method for Evaluating Light Source Color Rendition. New York, NY IESNA, 2018. 34 p.