

- Health Physics*, 1997, 73(3):539–554. Revision of the Guidelines on Limits of Exposure to Laser radiation of wavelengths between 400 nm and 1.4 μm . *Health Physics*, 2000, 79(4):431–440.
- Jordan V., Halbritter V., Horak V. Metrolohycheskye trebovaniya k opredeleniyu kharakterystyk fotobyolohycheskykh opasnostej lamp y svetodyodov [Metrological requirements for the determination of the characteristics of photobiological hazards of lamps and light emitting diodes]. *Svetotekhnika*, 2009, no. 5, pp. 50–57 (in Russian).
 - Fedorovich I.B., Zak P.P., Ostrovsky M.A. Povyshennoe propuskanie hrustalika glaza v rannem detstve i ego vozrastnoe pozheltenie [Elevated luminescence of the lens of the eye in early childhood and its age yellowing]. *Reports of the Academy of Sciences*, 1994, vol. 336, no. 6, pp. 12–17 (in Russian).
 - Demtröder W. *Experimentalphysik 2: Elektrizität und Optik*, Springer Verlag, Berlin, 2009, pp. 357–380.
 - Skums D.V., Eroshenko B.V. Installation for evaluation of photobiological safety of LED sources of illumination PhoBII-1. *Proceedings of the VI International Scientific and Technical Conference “Modern Problems of Light Engineering”* (Kharkiv, October 4–6, 2017). O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, 2017, pp. 114–115 (in Russian).

УДК 535.65.088.3:535.672.7

Порівняння сучасних методів оцінювання кольоропередавання джерел світла

О.В. Білик^{1,2}

¹ Харківський національний університет міського господарства ім. О.М. Бекетова, вул. Маршала Бажанова, 17, 61002, Харків, Україна

² Національний науковий центр “Інститут метрології”, вул. Мירוносицька, 42, 61002, Харків, Україна
helen219002@ukr.net

Анотація

Кольоропередавання джерел світла має важливе значення як у сертифікації, так і в практичному застосуванні джерел світла у різних сферах. Індекс кольоропередачі R_a є основним нормованим параметром, що відповідає за кольоропередавання світла та є обов’язковим для сертифікації ламп. Тому важливо, щоб метод вимірювання і розрахунку індексу R_a якомога точніше відповідав візуальній оцінці споживачів.

В Україні з 01.01.2019 р. введено ДСТУ СІЕ 013.3:2017 “Метод вимірювання та визначення кольоропередавання джерел світла” (СІЕ 013.3-1995, IDT) на заміну ГОСТ 23198–94 “Лампы электрические. Методы измерения спектральных и цветовых характеристик параметров”. Численні наукові публікації свідчать про недоліки стандарту СІЕ 13.3-1995, це пов’язано з новими дослідженнями в фізіології людського ока та в колориметрії в цілому. Результати цих та інших досліджень було враховано в методі IES TM-30-15, а згодом у методі СІЕ 224:2017 та в IES TM-30-18.

Проведено порівняльний аналіз методів розрахунку індексу кольоропередачі СІЕ 13.3–1995 та IES TM-30-15, а також публікацій звітів СІЕ 224:2017 та IES TM-30-18, в яких враховано неточності попередніх методів. Наведено характеристики, за якими проводився аналіз, основні відмінності методів розрахунку індексу кольоропередачі. Проаналізовано результати світових досліджень щодо нових методів.

В результаті аналізу виявлено, що новий метод IES TM-30-18 має ряд переваг у порівнянні з СІЕ 13.3-1995. Цей метод враховує всі зауваження попередніх методів та надає користувачам більш детальну інформацію про джерело світла щодо зміщення насиченості, кольору та відтінку.

Ключові слова: індекс кольоропередачі; індекс точності; індекс насиченості.

Отримано: 14.06.2019

Відредаговано: 24.06.2019

Схвалено до друку: 26.06.2019

Вступ

У зв’язку з широким використанням світлодіодних джерел світла в різних сферах діяльності виникла проблема щодо встановлення вимог до їхніх характеристик та методів випробувань у порівнянні з традиційними, що викликано різними

принципами випромінювання, конструкцією та ін. З 2019 року в Україні вступили в дію гармонізовані з європейськими та міжнародними національними стандарти, в яких значною мірою прописані вимоги до характеристик та методи випробувань світлодіодних джерел світла та світильників.

Одним із основних колірних параметрів для джерел світла є індекс кольоропередачі R_a , визначення якого є обов'язковим при проходженні оцінки відповідності згідно з “Технічним регламентом щодо вимог до екодизайну для ламп спрямованого випромінювання, світлодіодних ламп і пов'язаного з ними обладнання” (набрання чинності з 04.10.2019). Згідно з цим регламентом, “індекс кольоропередачі (R_a) — це вплив спектрального розподілу випромінювання на колірне сприймання об'єктів, яке свідомо чи підсвідомо порівнюється з колірним сприйманням цього під час освітлення стандартним випромінюванням”.

Крім того, згідно з онлайн-опитуванням [1] 243 спеціалістів з освітлення, індекс R_a є найбільш важливим критерієм кольору джерел світла. Також індекс R_a є нормованим показником у ДБН В.2.5–28:2018 “Природне і штучне освітлення” для освітлення майданчиків підприємств і місць виконання робіт поза будівлями, вітрин, деяких архітектурних об'єктів, приміщень загальнопромислових будівель та ін.

Щодо стандарту на метод випробування індексу кольоропередачі, ситуація така: в Україні на період до 2019 р. був чинний ГОСТ 23198-94 “Лампы электрические. Методы измерения спектральных и цветовых характеристик параметров”. З 01.01.2019 р. в Україні введено ДСТУ СІЕ 013.3:2017 “Метод вимірювання та визначення кольоропередавання джерел світла” методом перекладу стандарту СІЕ 013.3-1995.

З 2000 р. було запропоновано багато інших методів кількісної оцінки властивостей кольоропередавання джерел світла [1]: індекс повного спектра FSI, область колірної охоплення GA, індекси CQS, CRI2012, CRI–CAM02UCS та ін.

На сьогодні Об'єднане світлотехнічне інженерне товариство Північної Америки (IESNA) та Міжнародна комісія з освітлення (СІЕ) розробили нові методи оцінки кольоропередавання джерел світла: IES TM-30-15: IES Method for Evaluating Light Source Color Rendition (Метод для оцінювання кольоропередавання джерела світла), оновлений у 2018 році IES TM-30-18, та СІЕ 224:2017 Colour fidelity index for accurate scientific use (Індекс точності кольору для точного наукового використання).

Зокрема, IES TM-30-15 — це новий метод декількох взаємопов'язаних характеристик, індексу точності R_f та індексу насиченості R_g , а також колірних графіків, які можуть спільно використовуватися для ефективної оцінки кольоропередавання джерела світла, яку може бути використано для прийняття рішень, таких як пошук ліпшого джерела світла для конкретного застосування [2].

Оскільки нові методи повинні пройти валідацію, діючим стандартом все ж залишається СІЕ

13.3-1995 “Метод вимірювання та визначення властивостей кольоропередавання джерел світла” (“Method of measuring and specifying colour rendering properties of light sources”), а індекс R_a все так само широко застосовується в світлотехнічній промисловості, в нормативних документах, а також у міжнародних і регіональних стандартах та специфікаціях [3].

Мета статті

Враховуючи актуальність і важливість індексу кольоропередачі для споживачів, виробників світлотехнічної продукції, а також для проєктантів освітлення, важливо, щоб результати вимірювань і розрахунків були точними і корелювали з візуальною оцінкою та фізіологічними особливостями людського ока.

Після опублікування звіту IES TM-30 виробники світлодіодної продукції та розробники програм розрахунку колірних характеристик додатково включають інформацію нових індексів кольоропередачі. В першу чергу, це пов'язано з конкуренцією на ринку виробників, оскільки метод TM-30 дає детальнішу характеристику про джерело світла, то у споживачів є можливість вибору ламп і світильників із більш достовірним кольоропередаванням.

Метою статті є дослідження та аналіз основних відмінностей методів СІЕ 13.3-1995 і IES TM-30-15(18), математичної моделі, форм подання результатів, їх переваги і недоліки. А також визначення доцільності застосування нових методів у метрологічній системі України для більш детальних результатів вимірювань кольоропередавання джерел світла.

1. Вимірювання і розрахунок кольоропередавання джерел світла

Введення індексу R_a було обумовлено необхідністю розрізнити кольоропередавання джерела світла (ДС) з однаковою колірною температурою. В СІЕ 13.3-1995 індекс R_a розраховується із різниці координат колірності восьми стандартних зразків кольору СІЕ при освітленні досліджуваним ДС і стандартним джерелом тієї ж корельованої колірної температури (T_k); чим менша середня колірна різниця, тим вищий R_a . Максимальне значення R_a становить 100. Чим менші значення R_a , тим більше кольори об'єктів можуть бути спотвореними при освітленні такою лампою.

Для T_k менше 5000 К стандартними ДС, що використовуються в розрахунку R_a , є спектральний розподіл потужності (СРП) випромінювача чорного тіла; для T_k більше 5000 К використовується СРП джерела денного світла [1].

Після освітлення колірних зразків випромінюванням досліджуваного ДС визначаються координати X, Y, Z в колірному просторі СІЕ 1931. Потім координати перетворюються на координати в системі СІЕ UCS 1960 (u, v), підлягають хроматичній адаптації фон Кріса і перетворюються на координати більш однорідного колірного простору СІЕ UWV 1964. На основі цих координат розраховується колірна різниця кожного зразка за формулою:

$$\Delta E_i = \sqrt{(U_{r,i}^* - U_{k,i}^*)^2 + (V_{r,i}^* - V_{k,i}^*)^2 + (W_{r,i}^* - W_{k,i}^*)^2},$$

де ΔE_i — колірна різниця зразка, що освітлюється досліджуваним та стандартним джерелом, розрахована в колірному просторі СІЕ UWV; $U_{r,i}^*, V_{r,i}^*, W_{r,i}^*$ — координати зразка, що освітлюється стандартним джерелом, у колірному просторі СІЕ UWV; $U_{k,i}^*, V_{k,i}^*, W_{k,i}^*$ — координати зразка, що освітлюється досліджуваним джерелом, у колірному просторі СІЕ UWV [4].

Загальний індекс кольоропередачі R_a , рекомендований СІЕ, визначається як:

$$R_a = \sum_{i=1}^8 R_i,$$

де $R_i = 100 - 4,6\Delta E_i$ — індекс кольоропередачі, розрахований для одного стандартного зразка [5].

Значення R_i використовуються для більш глибокого розуміння того, як спектральний розподіл ДС відображає певні кольори. Як доповнення до восьми стандартних зразків кольору, СІЕ вказує шість додаткових зразків від R_9 до R_{14} . (Слід зазначити, що вони не використовуються при розрахунку середнього R_a .) Чотири з них — насичені кольори. Спеціальний індекс R_9 (насичений червоний колір) іноді вказується окремо як доповнення до загального індексу R_a . Індекси від R_1 до R_8 мають обмежену криву в червоній частині видимого спектру [1, 6].

Метод ТМ-30 (рис. 1) використовує 99 зразків кольору (СЕС), які забезпечують однорідність у всьому діапазоні довжин хвиль. 99 зразків були статистично вибрані з приблизно 105000 вимірювань спектрального коефіцієнта відбиття для реальних об'єктів, у тому числі фарб, текстилю, природних об'єктів, пластику, тонів шкіри і т. д. [2, 4, 7].

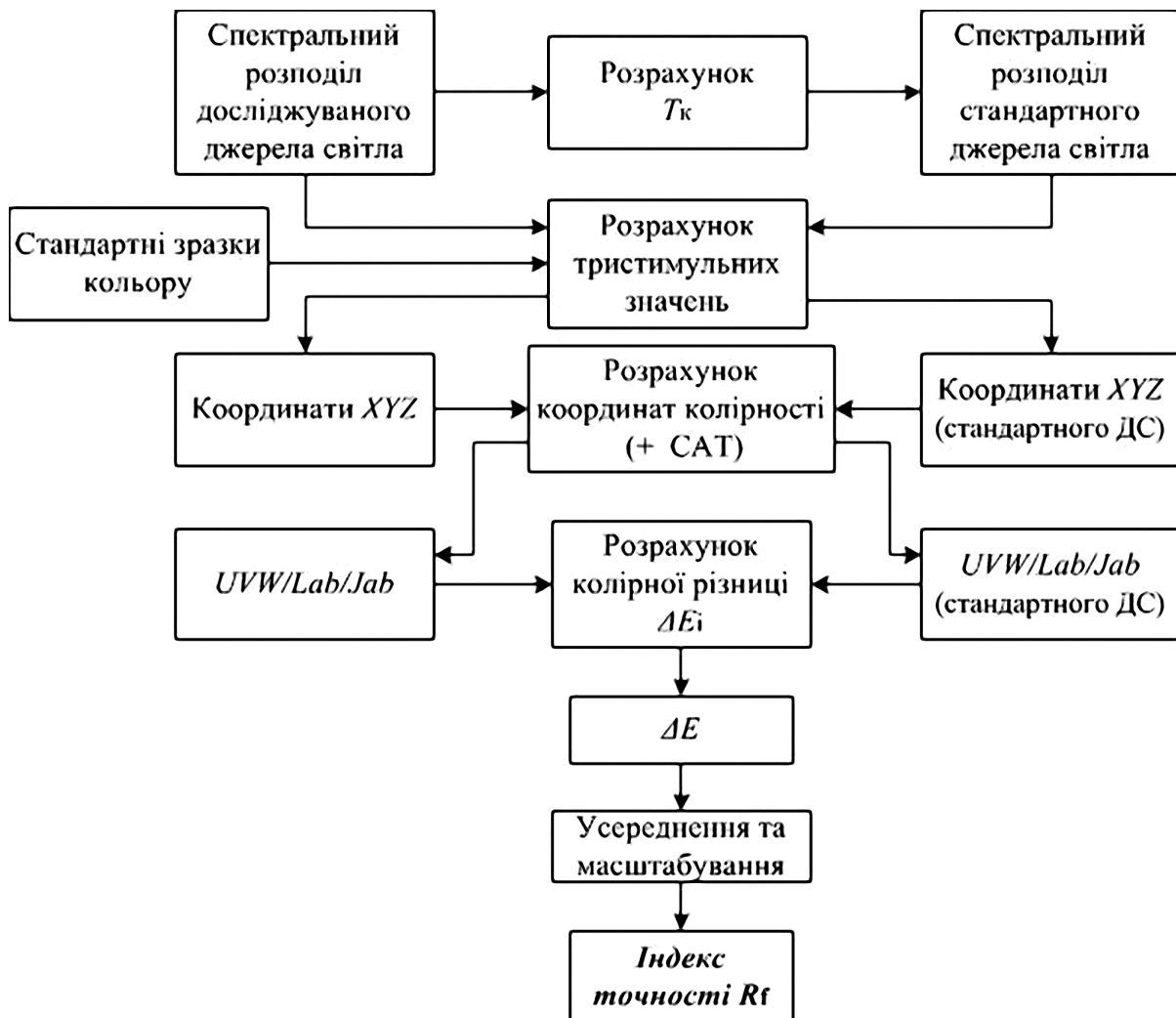


Рис. 1. Загальна схема розрахунку індексу точності R_a

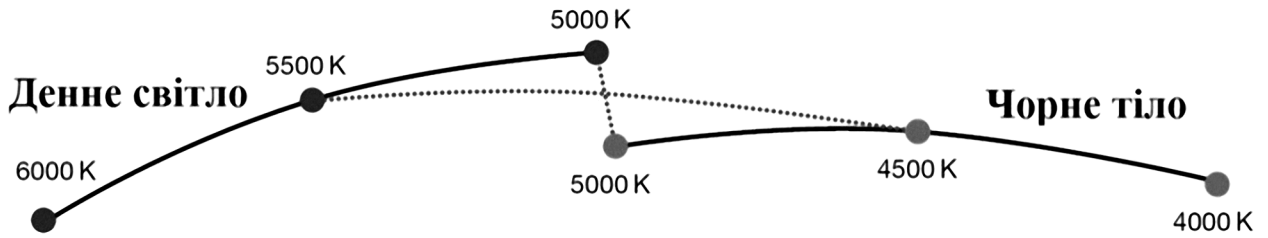


Рис. 2. Лінійна комбінація спектрального розподілу стандартних ДС для методу IES TM-30-2015

Стандартні джерела світла, що використовуються для методу TM-30, такі ж, як і в системі CIE R_a :

- менше 4500 K — випромінювач Планка;
- більше 5500 K — D55.

Щоб уникнути переривчастості в виборі стандартного джерела по T_k у діапазоні від 4500 до 5500 K, було проведено лінійну комбінацію спектрального розподілу планківського випромінювача і спектрального розподілу джерела денного світла (рис. 2). Ідея цієї зміни в тому, щоб два дуже схожих джерела оцінювалися однаково, враховуючи дуже невелику різницю колірної температури [2, 4, 8, 9].

Індекс точності R_f характеризує середню колірну різницю ΔE_i для 99 CES аналогічно CIE R_a , хоча математичний розрахунок і новий набір зразків роблять його більш складним. Колірна різниця ΔE_i визначається для координат колірності колориметричного простору CIE CAM02-UCS, і за ними обчислюється середнє арифметичне:

$$\Delta E_{1,99} = \sqrt{(J'_{2,i} - J'_{1,i})^2 + (a'_{2,i} - a'_{1,i})^2 + (b'_{2,i} - b'_{1,i})^2},$$

де J, a, b — координати колірності для 99 зразків кольору в просторі CAM02-UCS при освітленні досліджуваним та стандартним джерелами.

Індекс точності R_f визначається за формулою:

$$R'_f = 100 - 7,54\Delta E.$$

Для запобігання від'ємних значень вводиться масштабування значень до меж (0,100):

$$R_f = 10 \ln(\exp(R'_f / 10) + 1).$$

Індекс R_g обчислюється шляхом оцінки груп насиченості колірних зразків, що освітлюються стандартним джерелом, а потім досліджуваним (рис. 3). Цей процес зазвичай включав би до себе розрахунок груп 99-гранного багатокутника. Однак для спрощення колірні зразки згруповані в 16 груп однакової ширини відповідно до їх кута відтінку, а потім значення усереднюються, отже, обчислюється лише група 16-гранного багатокутника. Розраховуються координати кольору зразка J, a, b . Для кожної j -ї групи обчислюється середнє значення координат a, b , в результаті чого 16 точок утворюють групу для досліджуваного та стандартного джерел. Індекс насиченості кольору R_g розраховується за формулою:

$$R_g = 100 \frac{A_{\text{test}}}{A_{\text{ref}}},$$

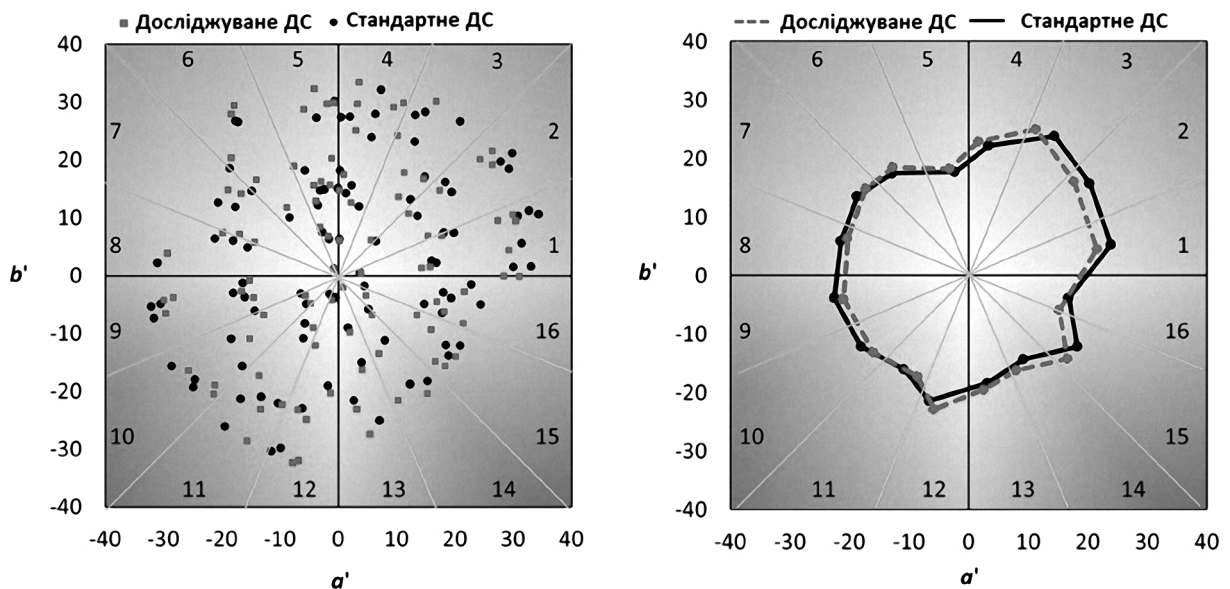
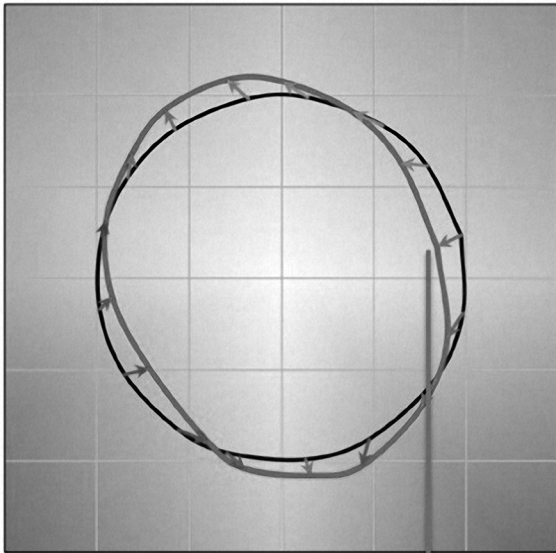


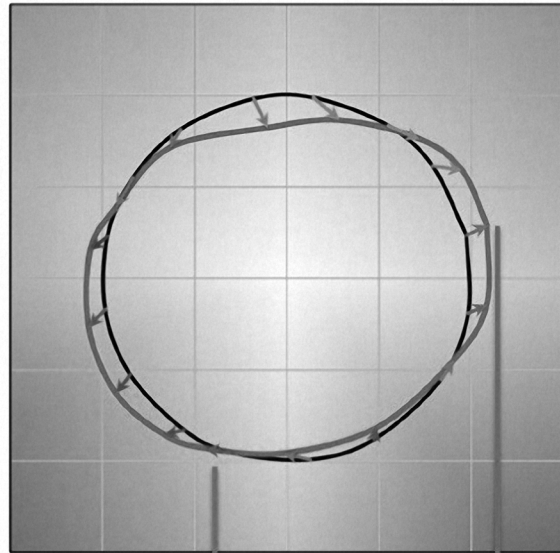
Рис. 3. Колірний векторний графік

$R_f = 75 \mid R_g = 100 \mid T_k = 3500 \text{ K} \mid D_{uv} = 0.000$



Зменшення насиченості

$R_f = 75 \mid R_g = 100 \mid T_k = 3500 \text{ K} \mid D_{uv} = 0.000$



Зміна відтінку

Збільшення насиченості

Рис. 4. Колірний графік насиченості кольору

де A_{test} , A_{ref} — це розрахункові поверхні для досліджуваного і стандартного джерел відповідно [2, 8, 10].

Колірні векторні графіки (рис. 4) ілюструють середні зміни відтінку і насиченості в кожній із 16 груп. Координати колірності стандартного джерела зображені чорним колом, тоді як координати досліджуваного джерела — червоним. Вектори, що вказують на середину чорного кола, вказують область ненасиченості, вектори, що вказують назовні чорного кола, — область підвищеної насиченості, а вектори, дотичні до чорного кола, вказують тільки на зміну відтінку.

Графік R_f/R_g показує візуально співвідношення між точністю і насиченістю, яке допомагає порівнювати різні джерела світла (рис. 5). Світло-сіра область позначає приблизні межі для ДС, які розташовані на локусі чорного тіла. Темно-сіра область позначає приблизні межі для ДС, що не класифікуються як біле світло. Коли значення індексу R_g вище значення 100 на осі, ДС більш насичене. Чим точка нижче 100, тим світло джерела менш насичене. Чим ближче значення індексу R_f до 50, тим більше зміщення відтінку для цього джерела в порівнянні зі стандартним [2, 11].

2. Порівняння методів за основними характеристиками

Основні характеристики, за якими порівнювалися методи (табл. 1):

- колірний простір;
- хроматична адаптація;
- кількість і тип колірних зразків;

- стандартні джерела світла;
- вихідні показники;
- діапазон значень.

Із табл. 1 видно основні відмінності між методами розрахунку кольоропередавання: в розрахунках методу TM-30-15 використовується хроматична адаптація CAT02 та колірний простір CAM02-UCS, що є більш однорідним; також він дає більш наглядні та розширені дані про джерело світла за допомогою векторних графіків та додаткових індексів.

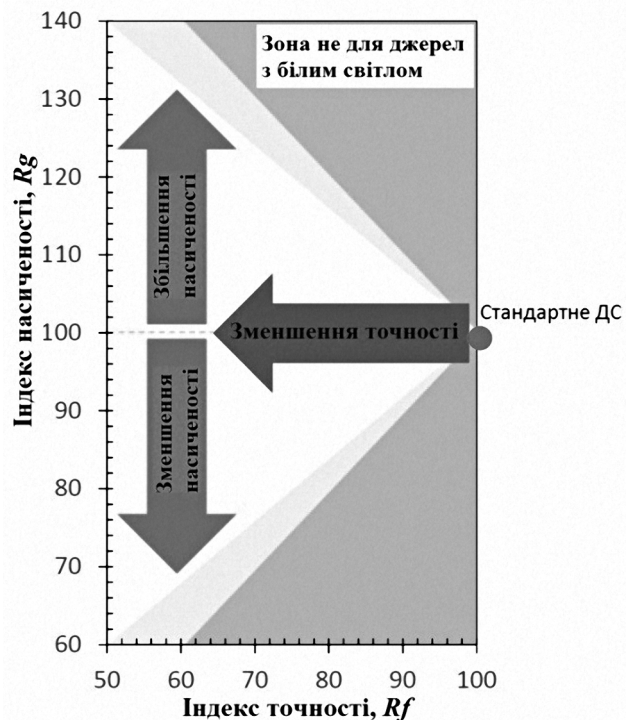


Рис. 5. Графік R_f / R_g

Таблиця 1

Порівняння методів кольоропередавання CIE 13.3-1995 та IES TM-30-15

Характеристики	CIE 13.3-1995 (R_a)	IES TM-30-15
Колірний простір	CIE 1964 $U^*V^*W^*$	CAM02-UCS (CIE CAM02)
Колірне охоплення	обмежене	повне та рівномірне
Стандартні джерела світла	випромінювання чорного тіла, CIE D	випромінювання чорного тіла, CIE D
Хроматична адаптація	адаптація фон Кріса	адаптація CAT02
Спектральна однорідність колірних зразків	неоднорідність	однорідність
Кількість колірних зразків	8 основних R_1-R_8 (пастельні) + 6 спеціальних зразків R_9-R_{14} (насичені)	99 колірних зразків R_1-R_{99}
Типи зразків	тільки зразки Мансела	різноманіття реальних об'єктів
Насиченість зразків кольору	не насичені	насичені
T_k стандартних джерел світла	різкий перехід при $T_k = 5000$ K	T_k зміщується між 4500 K та 5000 K
Вихідні показники	<ul style="list-style-type: none"> загальний індекс, R_a 6 спеціальних індексів, R_i 	<ul style="list-style-type: none"> індекс точності, R_f індекс насиченості, R_g колірний векторний графік колірний графік насиченості 16 індексів колірної точності j-ї групи, $R_{f,hy}$ 16 індексів колірного зміщення j-ї групи, $R_{cs,hy}$ 1 індекс точності кольору шкіри, $R_{f,skin}$ 99 спеціальних індексів точності, $R_{f,CESi}$
Діапазони балів	Максимум 100, без нижньої границі, перемінне масштабування	узгоджене масштабування R_f (0–100) R_g від 60 ÷ 140

Таблиця 2

Порівняння методів кольоропередавання з урахуванням оновлень

Характеристика	CIE 13.3-1995	IES TM-30-15	IES TM-30-18
T_k стандартних джерел світла	різкий перехід при $T_k = 5000$ K	T_k зміщується між 4500 K та 5000 K	
Колірні зразки	зразки Мансела 8 спектрально неоднорідних зразків	реальні зразки 99 спектрально однорідних зразків	реальні зразки 99 спектрально однорідних зразків; екстраполяція за межами <400 нм та >700 нм
Колірна різниця	$\Delta E_{1-8}(U^*V^*W^*)$	$\Delta E_{1-99}(CAM02-UCS)$	
Індекс точності	$R_a = 100 - c * \Delta E_{1-8}$	$R_f = 10 \log(\exp((100 - c * \Delta E_{1-99})/10) + 1)$	
Коефіцієнт масштабування	$c = 4,6$	$c = 7,54$	$c_{CIE/IES} = 6,73$ CIE $R_f =$ IES R_f
Вихідні показники	немає	<ul style="list-style-type: none"> 16 індексів колірного зміщення j-ї групи, $R_{cs,hy}$, де $j = 1 \div 16$; значення від 0–100 16 індексів колірної точності j-ї групи $R_{f,hy}$, де $j = 1 \div 16$; значення від 0–100 	<ul style="list-style-type: none"> середня відносна зміна колірності $R_{cs,hy}$, %; (індекс локального зміщення колірності групи) середня відносна зміна відтінку $R_{fs,hy}$ рад (індекс локального зміщення відтінку групи) середня величина зміни (3D) для діапазону кута нахилу $R_{f,hy}$, значення від 0–100 (індекс локальної колірної точності групи)

Додаткові оновлення:

- специфікація форматування колірних векторних графіків;
- роз'яснення розрахунків локальних значень.

Запропонований індекс $R_{r,hj}$ — числова характеристика точності кольоропередавання в кожній із 16 груп (j), яку можна використовувати для оцінки того, як аналогічно досліджуваному джерелу відображається червоний, жовтий, зелений, синій або проміжні відтінки в порівнянні зі стандартним джерелом. Ці оцінки аналогічні спеціальним показникам методу R_a (наприклад, R_9), але є більш надійними, оскільки вони об'єднують кілька вибірок із різними спектральними характеристиками. Індекс $R_{cs,hj}$ — значення для відносної зміни кольоровості в кожній із 16 груп (j), які можна використовувати для оцінки насиченості (позитивні значення) або ненасиченості (від'ємні значення) червоних, жовтих, зелених, синіх і проміжних відтінків у порівнянні зі стандартним джерелом. $R_{r,skin}$ характеризує схожість відтінків шкіри, це середнє значення зразків CES15 і CES18. Значення індексів $R_{r,hj}$, $R_{cs,hj}$, $R_{r,skin}$ варіюються від 0 до 100 [2].

IES TM-30-18 містить три модифікації, які узгоджені з публікацією CIE 224:2017. Ця публікація визначає загальний індекс точності R_f з незначними змінами (табл. 2). Ці зміни включають до себе метод екстраполяції, який використовується для зразків кольору (CES), перехідну зону T_k для стандартного ДС і коефіцієнт масштабування для розрахунків точності. У IES TM-30-18 індекс точності R_f ідентичний індексу R_f CIE 224:2017 [12].

В методі IES TM-30-18 набір зразків кольору рівномірно розподілений по кольірному простору і по всьому діапазону видимого спектра (рис. 6).

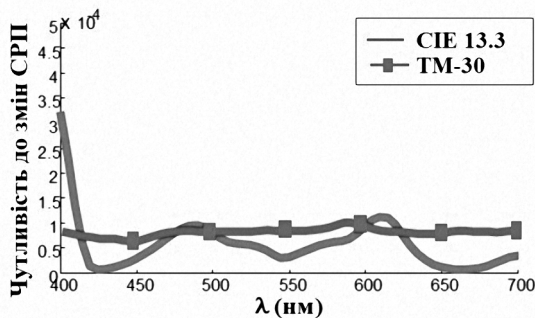


Рис. 6. Спектральний розподіл кольірних зразків методів CIE 13.3-1995 та TM-30-18

Деякі спектральні характеристики методів CIE та IES TM 30-18 дещо відрізняються від зразків методу TM-30-15 через відмінності в екстраполяції за межами довжин хвиль менше 400 нм та більше 700 нм. Спектральна однорідність усуває зміщення довжини хвилі [13, 14]. Колірна різниця у просторі SAM02-UCS для 99 зразків розраховується за формулою:

$$\Delta E_i = \sqrt{(J'_{ti} - J'_{ri})^2 + (a'_{ti} - a'_{ri})^2 + (b'_{ti} - b'_{ri})^2}.$$

Коефіцієнт масштабування 6,73 (змінено з 7,54).

$$R'_f = 100 - 6,73\Delta E.$$

Оскільки колірні характеристики залежать від безлічі умов, включаючи візуальні потреби, взаємодію з предметами інтер'єру та його оздобленням, вік людей і колірні уподобання, то розробники методу IES TM-30-18 не рекомендують використання однієї універсальної характеристики кольоропередавання джерел світла. Натомість кольоропередавання джерел світла має ґрунтуватися на декількох різних показниках, як це подано в методі TM-30 [12] для прикладного застосування споживачами та проектувальниками освітлення джерел світла залежно від їх колірного зміщення.

3. Результати світових досліджень.

Переваги та недоліки методів

Для досліджуваного джерела світла [5] було взято світлодіодний кластер на основі світлодіодів синього (460 нм), зеленого (540 нм) та помаранчевого (605 нм) випромінювання, корельована колірна температура — 3300 К, $R_a = 81$ і було побудовано математичну модель аналогічного джерела з піками 455, 534 і 616 нм та $R_a = 67$. Дослідження окремих індексів R_i показали, що цей кластер значно краще передає більшість кольорів, за винятком синьої області, що призвело до зниження загального R_a .

Оскільки індекс R_a — це середнє арифметичне значення 8 індексів R_i , виробники змогли виробляти джерела світла з високим індексом кольоропередачі, високою світловою ефективністю та спектральним розподілом, який знаходиться на певних довжинах хвиль, що відповідають довжинам хвиль досліджуваних зразків. Наприклад, спектральний розподіл потужності, що збільшує червону колірність у порівнянні зі стандартним джерелом світла, як правило, має більш низькі значення CIE R_a , ніж ті спектри, які зменшують червону колірність у порівнянні зі стандартним джерелом на ту ж величину (відповідно до точних моделей людського зору). Це створює для виробників стимули розробляти джерела, які збільшують червону колірність, якщо вони використовують метод CIE R_a для прийняття технічних рішень [4, 15].

Таким чином, джерело, що має низький індекс R_i в будь-якій частині спектра, буде мати високий індекс R_a за рахунок усереднення. Особливо ця проблема проявляється при розрахунку індексу кольоропередачі світлодіодів, спектральний розподіл яких значно відрізняється від стандартних джерел.

CIE більше не рекомендує застосовувати для колориметричних розрахунків колірний простір для розрахунку колірної різниці, оскільки він має велику неоднорідність у червоній області. Значним джерелом невизначеності є використання джерела світла з тією ж або максимально близькою корельованою колірною температурою (T_k), що і в до-

Порівняння результатів методів кольоропередавання джерел світла

Джерело світла	CIE 13.3-1995		TM-30-15	
	R_a	R_g	R_f	R_g
Люмінесцентна лінійна лампа	85	2	77,4	102,6
МГЛ	64	-120	70,9	83,3
Неодимова лампа	77	15	88,5	108,6
Світлодіодна лампа (RGB)	89	65	75,5	97,1

сліджуваного. Розрахунки показують, що джерело з $T_k=4999$ К, яке має індекс $R_a = 100$, буде мати індекс кольоропередачі значно нижчий, якщо його температура підніметься всього на 2 К [5].

Результати розрахунків індексів кольоропередачі для чотирьох видів джерел світла, розраховані методом CIE 13.3-1995 та IES TM-30-15 [4], показують значення R_f менші, ніж R_a , у люмінесцентної та світлодіодної ламп, натомість у металогалогенової та неодимової ламп значення R_f є більші, ніж R_a (див. табл. 3).

Значення індексу R_g для металогалогенової лампи (МГЛ) сильно відрізняється від інших. Це означає, що колір світла значно відрізняється в порівнянні зі стандартним, він темніший, але слід зазначити, що цей колір також може бути набагато насиченішим. Знак перед показником не визначає напрямок зміни кольору. Оскільки усереднений індекс R_f , як і R_a , не характеризує зміщення кольору, на рис. 7 наведено колірні графіки. Дійсно, графічна інформація про кольоропередавання дає поглиблену характеристику джерела світла. А напрямок векторів на графіку демонструє зміщення насиченості. Якщо потрібна детальна інформація, можна перевірити значення точності для будь-якого з 99 зразків кольору. Така інформація необхідна для розробників світлотехнічної продукції, яка використовується для освітлення торговельних залів, для медичних закладів (наприклад, операційних і стоматологічних кабінетів) та ін.

Висновки

Розглянуті методи оцінювання кольоропередавання враховують сучасні знання щодо фізіології

ока та чутливості колбочок, використовують у розрахунках хроматичну адаптацію САТ та колірний простір CAM02-UCS, що є більш однорідним.

Результати порівняльного аналізу показують, що основними перевагами нового методу IES TM-30 в редакції 2018 року є всі характеристики, за якими порівнювались методи. Основним недоліком обох методів є усереднення значень для розрахунку індексів R_a , R_f та R_g .

Метод IES TM-30-18 усуває недоліки та обмеження методу CIE 13.3-1995, надаючи додаткову і більш докладну інформацію про джерело світла. Новий індекс кольоропередачі TM-30, що включає до себе більшу кількість зразків кольору, рівномірно розподілених по всьому діапазону, усуває багато помилок розрахунку R_a .

Введення індексу насиченості R_g дозволяє краще уявити результат, визначаючи загальний напрям зміни кольору. Додаткова графічна візуалізація за допомогою векторних графіків у всьому спектральному діапазоні з вказівкою напрямку змін дозволяє краще оцінити якість кольоропередавання джерела світла.

Пропозиція змішування спектрів стандартних джерел світла в діапазоні між колірними температурами 4500 та 5500 К усуває проблему розриву колірних температур методу CIE 13.3-1995, що призводить до неточних значень R_a , також мінімізовано.

Метод IES TM-30-18 важливо використовувати як додаткову інформацію про ДС у протоколах випробувань разом з основним індексом R_a . Це буде сприяти розвитку технологій виробництва ДС з якісним кольоропередаванням та зі спектральним розподілом потужності, найбільш прийнятним для спостерігачів з нормальним колірним зором.

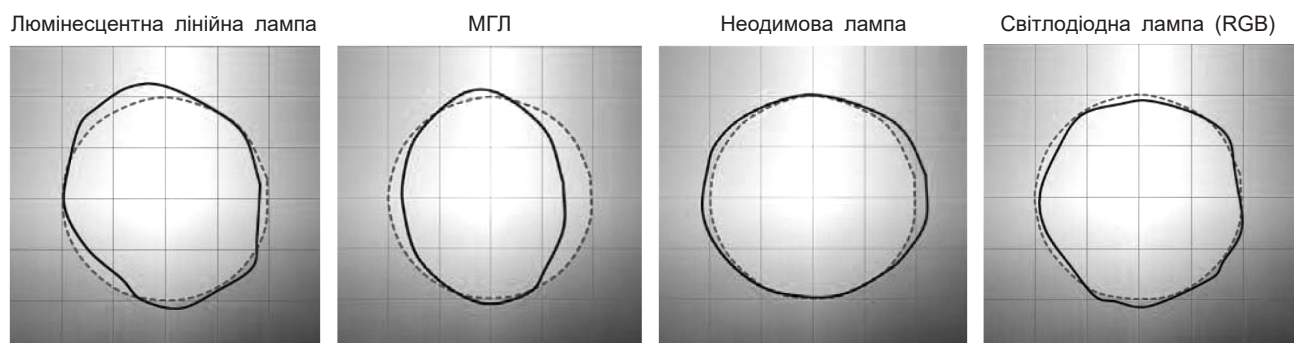


Рис. 7. Колірні векторні графіки джерел світла

Сравнение современных методов оценки цветопередачи источников света

Е.В. Билык^{1,2}

¹ Харьковський національний університет городского хозяйства им. А.Н. Бекетова, ул. Маршала Бажанова, 17, 61002, Харьков, Украина

² Національний научний центр "Інститут метрології", ул. Миросицька, 42, 61002, Харьков, Украина
helen219002@ukr.net

Аннотация

Цветопередача источников света имеет важное значение как в сертификации, так и в практическом применении источников света в различных сферах. Индекс цветопередачи R_a является основным нормируемым параметром, который отвечает за цветопередачу света и является обязательным для сертификации ламп. Поэтому важно, чтобы метод измерения и расчета индекса R_a как можно точнее соответствовал визуальной оценке потребителей.

В Украине с 01.01.2019 г. введен ДСТУ СІЕ 013.3:2017 "Метод вимірювання та визначення кольоропередавання джерел світла" (СІЕ 013.3-1995, IDT) взамен ГОСТ 23198-94 "Лампы электрические. Методы измерения спектральных и цветовых характеристик параметров". Многочисленные научные публикации свидетельствуют о недостатках стандарта СІЕ 13.3-1995, это связано с новыми исследованиями в физиологии человеческого глаза и в колориметрии в целом. Результаты этих и других исследований были учтены в методе IES TM-30-15, а затем в методе СІЕ 224:2017 и в IES TM-30-18.

Проведен сравнительный анализ методов расчета индекса цветопередачи СІЕ 13.3-1995 и IES TM-30-15, а также публикаций отчетов СІЕ 224:2017 и IES TM-30-18, в которых учтены неточности предыдущих методов. Приведены характеристики, по которым проводился анализ, основные различия методов расчета индекса цветопередачи.

В результате анализа выявлено, что новый метод IES TM-30-18 имеет ряд преимуществ по сравнению с СІЕ 13.3-1995. Этот метод учитывает все замечания предыдущих методов и предоставляет пользователям более подробную информацию об источнике света по смещению насыщенности, цвета и оттенка.

Ключевые слова: индекс цветопередачи; индекс точности; индекс насыщенности.

Comparison of modern methods for estimating color rendering of light sources

O. Bilyk^{1,2}

¹ O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Marshala Bazhanova Str., 17, 61002, Kharkiv, Ukraine

² National Scientific Centre "Institute of Metrology", Myronosytska Str., 42, 61002, Kharkiv, Ukraine
helen219002@ukr.net

Abstract

The color rendering of light sources is important both in certification and in the practical application of light sources in various fields. The color rendering index R_a is the main normalized parameter that is responsible for the color rendering of light and is required for the certification of lamps. Therefore, it is important for the method of measuring and calculating the R_a index to be in the best compliance with the visual assessment of consumers.

In Ukraine, from 01.01.2019, DSTU CIE 013.3:2017 "Method of Measurement and Determination of Color Rendering of Light Sources" (CIE 013.3-1995, IDT) was put into force to replace GOST 23198-94 "Electric Lamps. Methods of Measuring Spectral and Color Characteristics of Parameters". Numerous scientific publications indicate the drawbacks of CIE 13.3-1995 due to new studies in the physiology of the human eye and colorimetry in general. The results of these and other studies were taken into account in IES TM-30-15 method, and subsequently in CIE 224:2017 and IES TM-30-18 methods.

The article presents a comparative analysis of the methods of calculating the CIE 13.3-1995 and the IES TM-30-15 color rendering index, as well as the publications of CIE 224:2017 and IES TM-30-18 reports, which take into account the inaccuracies of the previous methods. The characteristics on which the analysis has been carried out, the main differences of the methods of calculating the color rendering index are given. The results of world researches on new methods are analyzed.

The analysis has revealed that the new IES TM-30-18 method has several advantages over CIE 13.3-1995. This method takes into account all the comments of the previous methods and provides users with more detailed information about the light source in terms of shift of saturation, color and hue.

Keywords: color rendering index; accuracy index; saturation index.

Список літератури

1. Rea M., Deng L., Wolsey R. Light Sources and Color, 2004. URL: <https://www.lrc.rpi.edu/programs/nlrip/publicationDetails.asp?id=901&type=2> (дата звернення 17.05.2016).
2. Evaluating Color Rendition Using IES TM-30-15. URL: https://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/12/f27/tm-30_fact-sheet.pdf (дата звернення 09.06.2017).
3. CIE 2017. Colour Fidelity Index For Accurate Scientific Use. URL: <http://www.cie.co.at/publications/cie-2017-colour-fidelity-index-accurate-scientific-use> (дата звернення 10.01.2018).
4. Kowalska J. Określanie jakości oddawania barw źródeł światła parametrami przedstawionymi w zaleceniach IES TM-30-15 i CIE 013.3-1995. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2017, vol. 93, no. 6, pp. 50–54. doi: 10.15199/48.2017.06.13
5. Скумс Д. В., Чайкова Л. Д. Оценка цветопередачи светодиодов как проблема современной колориметрии. *Метрологія та вимірювальна техніка (Метрологія-2012)*: наук. пр. VIII Міжнар. наук.-техн. конф. (9–11 жовтня 2012 р.). Харків: ННЦ “Інститут метрології”, 2012. С. 358–360. URL: http://www.metrology.kharkov.ua/fileadmin/user_upload/data_gc/conference/M2012/pages/358.pdf
6. Houser K.W., Mossman M., Smet K. & Whitehead L. Tutorial: Color Rendering and Its Applications in Lighting. *LEUKOS – Journal of Illuminating Engineering Society of North America*, 2016, vol. 12, issue 1–2, pp. 7–26. <https://doi.org/10.1080/15502724.2014.989802>
7. Jost S., Cauwerts C., Avouac P. CIE 2017 color fidelity index Rf: a better index to predict perceived color difference? *Journal of the Optical Society of America. A Optics, Image Science, and Vision*. Optical Society of America, 2018, vol. 35, issue 4. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.35.00B202> (hal-01725056)
8. True colours. Newsletter. The Society of Light and Lighting, Part of the Chartered Institution of Building Services Engineers. January/February, 2016, vol. 9, issue 1, pp. 11–12. URL: https://issuu.com/matrix-print/docs/sll_jan_feb_2016?e=2489332/44304221 (дата звернення 12.03.2017).
9. TM-30 or the Quest for New Metrics to Measure Light Color Quality. LpR Article. 2016. URL: <https://www.led-professional.com/resources-1/articles/tm-30-or-the-quest-for-new-metrics-to-measure-light-color-quality> (дата звернення 07.09.2017).
10. Bhusal P., Dangol R. Performance of different metrics proposed to CIE TC 1–91. *International Journal of Sustainable Lighting*, 2017, vol. 19, issue 2, pp. 91–103. doi:10.26607/ijsl.v19i2.36
11. Lexi Avanzato. TM-30: Shedding New Light on Color Rendering. April, 2016. URL: <http://www.lightingservicesinc.com/ABOUT-US/BLOG/5357/TM-30-SHEDDING-NEW-LIGHT-ON-COLOR-RENDERING> (дата звернення 07.09.2017).
12. PS-11-18: IES Position on TM-30-18, IES Method for Evaluating Light Source Color Rendition Issued. October, 2018. URL: <https://www.ies.org/outreach/position-statements/ps-11-18-ies-position-on-tm-30-18-ies-method-for-evaluating-light-source-color-rendition/> (дата звернення 01.12.2018).
13. Livingston J., Luedtke W., Royer M. How to Use TM-30. *Designers Light Forum*, March 13, 2018. URL: https://leducation.org/LED2018_Presentations/LED2018_Panel_TM30.pdf
14. Smet K. IES TM-30. Face Seminar Session. October 2–3, 2018. URL: https://uploads-ssl.webflow.com/57698e8d8a6044ef2ce2d17b/5bc842dfe3e80e99724e7b20_SMET_TM30.pdf (дата звернення 23.12.2018).
15. Royer M.P. Comparing Measures of Average Color Fidelity. *LEUKOS*, 2018, vol. 4, issue 2. Online Before Print. doi: 10.1080/15502724.2017.1389283

References

1. Rea M., Deng L., Wolsey R. Light Sources and Color, 2004. Available at: <https://www.lrc.rpi.edu/programs/nlrip/publicationDetails.asp?id=901&type=2> (accessed 17.05.2016).
2. Evaluating Color Rendition Using IES TM-30-15. Available at: https://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/12/f27/tm-30_fact-sheet.pdf (accessed 09.06.2017).
3. CIE 2017. Colour Fidelity Index For Accurate Scientific Use. Available at: <http://www.cie.co.at/publications/cie-2017-colour-fidelity-index-accurate-scientific-use> (accessed 10.01.2018).
4. Kowalska J. Określanie jakości oddawania barw źródeł światła parametrami przedstawionymi w zaleceniach IES TM-30-15 i CIE 013.3-1995. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2017, vol. 93, no. 6, pp. 50–54. doi: 10.15199/48.2017.06.13
5. Skums D.V., Chajkova L. D. Ocenka cvetopere-dachi svetodiodov kak problema sovremennoj kolorimetrii [Evaluation of LED color rendering as a problem of modern colorimetry]. *Metrology and Measurement Techniques (Metrology-2012)*: proceedings of VIII International and Technical Conference (9–11 October 2012). Kharkov, 2012, pp. 358–360 (in Russian). Available at: http://www.metrology.kharkov.ua/fileadmin/user_upload/data_gc/conference/M2012/pages/358.pdf
6. Houser K.W., Mossman M., Smet K. & Whitehead L. Tutorial: Color Rendering and Its Applications in Lighting. *LEUKOS – Journal of Illuminating Engineering Society of North America*, 2016,

- vol. 12, issue 1–2, pp. 7–26. <https://doi.org/10.1080/15502724.2014.989802>
7. Jost S., Cauwerts C., Avouac P. CIE 2017 color fidelity index Rf: a better index to predict perceived color difference? *Journal of the Optical Society of America. A Optics, Image Science, and Vision*. Optical Society of America, 2018, vol. 35, issue 4. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.35.00B202> (hal-01725056)
 8. True colours. Newsletter. The Society of Light and Lighting, Part of the Chartered Institution of Building Services Engineers. January/February, 2016, vol. 9, issue 1, pp. 11–12. Available at: https://issuu.com/matrixprint/docs/sll_jan_feb_2016?e=2489332/44304221 (accessed 12.03.2017).
 9. TM-30 or the Quest for New Metrics to Measure Light Color Quality. LpR Article. 2016. Available at: <https://www.led-professional.com/resources-1/articles/tm-30-or-the-quest-for-new-metrics-to-measure-light-color-quality> (accessed 07.09.2017).
 10. Bhusal P., Dangol R. Performance of different metrics proposed to CIE TC 1–91. *International Journal of Sustainable Lighting*, 2017, vol. 19, issue 2, pp. 91–103. doi:10.26607/ijsl.v19i2.36
 11. Lexi Avanzato. TM-30: Shedding New Light on Color Rendering. April, 2016. Available at: <http://www.lightingservicesinc.com/ABOUT-US/BLOG/5357/TM-30-SHEDDING-NEW-LIGHT-ON-COLOR-RENDERING> (accessed 07.09.2017).
 12. PS-11-18: IES Position on TM-30-18, IES Method for Evaluating Light Source Color Rendition Issued. October, 2018. Available at: <https://www.ies.org/outreach/position-statements/ps-11-18-ies-position-on-tm-30-18-ies-method-for-evaluating-light-source-color-rendition/> (accessed 01.12.2018).
 13. Livingston J., Luedtke W., Royer M. How to Use TM-30. *Designers Light Forum*, March 13, 2018. Available at: https://leducation.org/LED2018-Presentations/LED2018_Panel_TM30.pdf
 14. Smet K. IES TM-30. Face Seminar Session. October 2–3, 2018. Available at: https://uploads-ssl.webflow.com/57698e8d8a6044ef2ce2d17b/5bc842dfe3e80e99724e7b20_SMET_TM30.pdf (accessed 23.12.2018).
 15. Royer M.P. Comparing Measures of Average Color Fidelity. *LEUKOS*, 2018, vol. 4, issue 2. Online Before Print. doi: 10.1080/15502724.2017.1389283