

# Визначення колірних відмінностей при розрахунку індексу передачі кольору

К.В. Говорова<sup>1</sup>, Є.С. Григор'єва<sup>2</sup>, Б.К. Гармаш<sup>2</sup>, С.В. Гулевський<sup>3</sup>, І.А. Малькова<sup>4</sup>, Е.С. Дюмін<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Центральна служба мір та ваг, вул. Електоральна, 2, 00-139, Варшава, Республіка Польща  
kateryna.hovorova@gum.gov.pl

<sup>2</sup> Український державний університет залізничного транспорту, майдан Оборонний Вал, 7, 61050, Харків, Україна

<sup>3</sup> Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, майдан Свободи, 4, 61022, Харків, Україна

<sup>4</sup> Харківський національний університет радіоелектроніки, пр. Науки, 14, 61166, Харків, Україна

<sup>5</sup> Харківський національний університет міського господарства, вул. Чорноглазівська, 17, 61002, Харків, Україна

## Анотація

Важливість точної передачі відтінків освітлених предметів джерелами світла було усвідомлено ще в минулому столітті. Існують окремі сфери людської діяльності, де рівень якості передачі кольорів освітлених об'єктів – необхідна й обов'язкова умова успішної роботи. Крім того, важливим питанням під час здійснення менеджменту стосовно охорони здоров'я робітника та безпеки його праці є якість освітлення. Для розв'язання цього питання в 1965 році було запропоновано метод обчислення індексу передачі кольору – Color Rendering Index (CRI). Важливим аспектом розрахунку CRI є визначення еталонного джерела світла на основі розрахунку різниці кольорів. Цей підхід спрямований на мінімізацію невизначеності шляхом використання еталонного випромінювача з колірною температурою, максимально математично близькою до досліджуваного джерела світла. Однак цей критерій частково нехтує особливостями сприйняття кольору оком людини. Для розв'язання наведеної проблеми було розглянуто чинні стандарти, що належать до колориметрії, та на основі проведеного аналізу вперше запропоновано використання формули визначення колірної різниці при розрахунках індексу передачі кольору, що забезпечує більш комплексний підхід до розрахунку CRI.

**Ключові слова:** індекс передачі кольору; еталонне джерело світла; колірна різниця; колір.

Отримано: 29.08.2024

Відредаговано: 17.10.2024

Схвалено до друку: 24.10.2024

## Вступ

Питання, завдяки якому ми можемо точно сказати, що колір А та колір В однакові, розглядається вже понад 100 років. Ще в 1913 році Міжнародна комісія з освітленості (CIE) визначила хроматичні координати (значення XYZ) кількісного визначення кольорів, які сприймає людина. Значення XYZ для джерел світла (самосвітних об'єктів) отримується на основі множення двох складових: спектрального розподілу цього джерела світла та кривих складання кольорів колориметричної системи XYZ [1]. У результаті, якщо колір А та колір В мають однакові значення XYZ, ми можемо сказати, що ці кольори будуть виглядати однаково для середньостатистичного ока людини. Визначення координат кольору для матеріалів проводиться за формулами:

$$\begin{aligned} X &= \int_{380}^{780} S(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda) d\lambda, \\ Y &= \int_{380}^{780} S(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) d\lambda, \\ Z &= \int_{380}^{780} S(\lambda) \cdot \bar{z}(\lambda) d\lambda, \end{aligned} \quad (1)$$

де  $S(\lambda)$  – добуток коефіцієнта відбиття (пропускання) на відносну спектральну характеристику обраного стандартного джерела світла;

$\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$ ,  $\bar{z}(\lambda)$  – функції порівняння кольорів з еталонними кольорами стандартного спостерігача CIE.

Подібно до попередньо наведеного розрахунку розраховуються координати кольорів будь-яких матеріалів. Значення XYZ для досліджуваного матеріалу отримуємо на основі множення трьох складових: обраного стандартного спектрального розподілу джерела світла, спектрального розподілу коефіцієнта поглинання (відбиття) та кривих складання кольорів колориметричної системи XYZ. Визначення координат кольору для самосвітних об'єктів проводиться за формулами:

$$\begin{aligned} X &= \int_{380}^{780} S_{\varphi}(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda) d\lambda, \\ Y &= \int_{380}^{780} S_{\varphi}(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) d\lambda, \\ Z &= \int_{380}^{780} S_{\varphi}(\lambda) \cdot \bar{z}(\lambda) d\lambda, \end{aligned} \quad (2)$$

де  $S_{\varphi}(\lambda)$  – відносна спектральна характеристика досліджуваного джерела світла;

$\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$ ,  $\bar{z}(\lambda)$  – функції порівняння кольорів з еталонними кольорами стандартного спостерігача CIE.

Отже, різниця між розрахунками координат кольору самосвітних об'єктів та матеріалів полягає

в тому, що при розрахунках для джерел світла змінною є спектральне значення розподілу цього джерела світла, а при розрахунках для матеріалів змінною є спектральна характеристика матеріалу (джерело світла вибирається зі стандартних). Це наводить на висновок, що за основами колориметрії під час розрахунку координат кольору самосвітних об'єктів та матеріалів використовується один і той самий принцип, тобто множення отриманої (змінної) спектральної характеристики досліджуваного зразка на стандартизовані значення.

Оскільки основа для розрахунків кольору самосвітних об'єктів та матеріалів подібна, а всі наступні розрахунки переходу координат із однієї колориметричної системи в іншу взагалі однакові, то використання формул, що визначають колірну різницю матеріалів, обґрунтовано можна використовувати під час розрахунку різниць координат кольору та кольоровості джерел випромінювання.

Одним із найважливіших колориметричних розрахунків для самосвітних об'єктів є визначення різниць координат кольоровості між стандартним (еталонним) джерелом світла та випробовуваним. Існують окремі сфери людської діяльності, де рівень якості передачі кольорів освітлюваних об'єктів – необхідна й обов'язкова умова успішної роботи: контроль готової продукції на швацьких і текстильних фабриках, художні майстерні, музеї, поліграфія, салони краси, стоматологічні кабінети тощо. Для вирішення цього завдання в 1965 році було запропоновано метод обчислення індексу передачі кольору (Color Rendering Index – CRI) [2].

З розвитком нових джерел світла (таких як світлодіоди) питання оцінки властивостей передачі кольору цих джерел стало важливим на практиці. Переважна більшість таких джерел світла призначена для освітлення, близького до денного, торговельних центрів, на виробництві, в театрах, житлових будинках тощо. Суб'єктивне сприйняття кольору світла, що випромінюється такими джерелами, відповідає кольору фази природного денного світла в діапазоні від 4000 до 6500 К. Однак відносний спектральний розподіл енергії багатьох джерел штучного денного світла не відповідає розподілу енергії природного денного світла відповідного або наближеного кольору (колірної температури). Невідповідність спектральної складової є основним фактором, через який колір об'єкта при освітленні різними джерелами світла буде відрізнятися.

Практична значущість індексу передачі кольору ґрунтується на тому, що сприйняття світла лампи людським оком залежить не тільки від кількісних характеристик (освітленість, світловий потік тощо), а й від якісних, негативні показники яких впливають на всю систему освітлення, тобто створюється враження, що “лампа світить,

але не освітлює”. У результаті цей показник прямолінійно впливає й на енергоефективність освітлювальної установки, де для компенсації “нестачі світла” підвищують споживану потужність освітлювальної установки замість підвищення якості освітлення за рахунок заміни джерел світла на інші, з підвищеними якісними показниками, і на створення умов праці, що відповідають чинним міжнародним стандартам з безпеки праці.

Аналіз діючих міжнародних стандартів [3–7] показав, що всі виробники світлодіодної техніки зобов'язані проводити тестування своєї продукції та визначати індекс передачі кольору. Загальний індекс передачі кольору визначається як середнє арифметичне значення різниць координат кольору  $\Delta E_{a,i}$  для восьми (або більше) стандартних зразків [2]. Різниці координат кольору розраховуються на основі порівняння (у векторних одиницях) спектральних характеристик досліджуваного джерела світла та спектральної густини потоку випромінювання, вибраного як еталонного – відповідного за кольоровою температурою спектрального розподілу абсолютного чорного тіла.

Наведена в стандартах методика розрахунку різниць координат кольоровості між досліджуваним та еталонним джерелом світла не враховує всі аспекти особливостей сприйняття колірної відмінності оком людини, що може значно впливати на подальші розрахунки індексу передачі кольору і вносити додаткову складову до невизначеності.

Питання врахування неоднорідності сприйняття змін хроматичних координат досліджено в багатьох публікаціях, що відносяться до дослідження кольорів матеріалів, і вже визначено межі порогової чутливості ока стандартного спостерігача до змін кольору. Наприклад, межі порогової колірної чутливості описують за допомогою еліпсів МакАдама [8], де кожна обрана точка кольоровості обмежена еліпсом, що містить усі кольори, які неможливо відрізнити середньостатистичним людським оком від кольору в центрі еліпса. При колориметричних дослідженнях джерел світла вплив особливостей сприйняття колірної відмінності оком людини не розкрито. Наприклад, метод для обчислення індексу передачі кольору [2] тільки вказує на те, що джерело еталонного випромінювання обирається таким чином, щоб різниця була якомога меншою, але не досліджено ситуацію, в якій різниця між кольоровими температурами може бути більшою за значення порогової чутливості колірної різниці ока або особливості колірного простору локусу білих кольорів. Наприклад, у результаті досліджень підвищення якості та точності розрахунку індексу передачі кольору американською метрологічною установою було розроблено стандарт IES TM-30 [9]. Цей стандарт було представлено в 2015 році, відповідно до нього рівень якості передачі кольору

виражається за допомогою двох значень: точності (fidelity) –  $R_f$  та насиченості (gamut) –  $R_g$ . Індекс  $R_f$  розраховується, виходячи з даних, отриманих шляхом порівняння не тільки 99 тестових відтінків, але й об'єктів, що зустрічаються в побуті. Проте в наведеному стандарті встановлення еталонного джерела випромінювання залишилось без змін, на основі колишніх стандартів.

### Визначення колірних відмінностей для підвищення точності при розрахунку індексу передачі кольору

Для вирішення питання більш точного визначення еталонного джерела світла було проаналізовано низку міжнародних колориметричних стандартів [10–14]. Питання визначення різниці координат кольору широко досліджувалося в промисловості під час виробництва фарб, тобто для кольорів матеріалів. Хоча й у цьому напрямі дослідження вивчаються координати кольору матеріалів, проте, як уже зазначалося, ці результати можуть бути застосовані й для самосвітних об'єктів.

Отримуємо, що колірними просторами CIE 1976 р.  $L^*a^*b^*$  забезпечується обчислення різниці координат кольору у вигляді векторних відстаней у цих просторах. Промислова практика визначення малих значень різниці координат кольору показує неоднорідні результати в розрахункових значеннях у різних діапазонах і в різних напрямках у наведеному колірному просторі. У звіті “Параметричні ефекти при оцінці колірної різниці” [14] описується кілька факторів, які впливають на співвідношення між розрахованими параметрами колірної різниці та результатами вимірювань колірних параметрів. За результатами наведених досліджень було визначено базові умови зорових задач, на основі яких прийнято формулу визначення колірної різниці. Комітет вимірювання кольорів Співтовариства фарб і кольорів (Colour Measurement Committee of the Society of Dyers and Colourists) запропонував формулу колірної різниці – СМС (I:c) [10], яку було залучено до деяких стандартів ISO.

$$\Delta E^*_{ab} = \sqrt{(L_2^* - L_1^*)^2 + (a_2^* - a_1^*)^2 + (b_2^* - b_1^*)^2}. \quad (3)$$

Проте ця формула має ряд недоліків, які було усунуто в наступній публікації ТС 1–29 Міжнародної комісії з освітлення (CIE) – стандарті щодо формули колірної різниці CIE94 [13]. Для обчислення колірної різниці використовується простір  $L^*C^*h^*$ , формула має вигляд:

$$\Delta E^*_{94} = \sqrt{\left(\frac{L_2^* - L_1^*}{K_L}\right)^2 + \left(\frac{C_2^* - C_1^*}{1 + K_1 C_1^*}\right)^2 + \left(\frac{h_2^* - h_1^*}{1 + K_2 C_1^*}\right)^2}. \quad (4)$$

Рівняння CIE94 зменшило, але не вирішило проблему однорідності сприйняття через наяв-

ність вагових коефіцієнтів ( $K_1, K_2$ ), які залежать від сфери використання (промисловість або мистецтво), тому комітет ТС 1–43 CIE відкоригував формулу визначення колірної різниці й додав п'ять доповнень: поворот колірного кута тону  $R_T$ , щоб усунути проблеми в синій області; компенсацію для нейтральних кольорів; компенсацію для світлості  $S_L$ ; компенсацію для насиченості кольору  $S_C$ ; компенсацію для тону  $S_H$ . Загальний вигляд формули CIEDE2000 [14] є:

$$\Delta E_{00} = \sqrt{\left(\frac{\Delta L^*}{K_L S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C^*}{K_C S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H^*}{K_H S_H}\right)^2 + R_T \left(\frac{\Delta C^*}{K_C S_C}\right) \left(\frac{\Delta H^*}{K_H S_H}\right)}. \quad (5)$$

Наведена формула враховує особливості сприйняття кольору оком людини, що дає можливість більш точно обрати еталонне джерело випромінювання при розрахунках індексу передачі кольору, особливо у випадках дослідження LED джерел світла, що мають велику палітру та різноманіття кольоровості.

У результаті було уточнено метод розрахунку індексу передачі кольору на етапі визначення стандартного джерела світла, який є основою всього розрахунку і точність визначення якого прямо пропорційно впливає на подальші результати розрахунку. Уточнення розрахунку враховує деякі особливості сприйняття кольору оком людини, що не були взяті до уваги попередньо, й приводить до більшої точності результатів дослідження колірних характеристик. У свою чергу це сприяє підвищенню енергоефективності освітлювальних систем, що є актуальним і затребуваним завданням у наш час.

### Висновки

Інструментальна оцінка параметрів кольору дуже затребувана в різних галузях науки, техніки і виробництва. При цьому треба враховувати, що відчуття кольору є психофізіологічним феноменом і може бути отримано без впливу електромагнітного випромінювання на око спостерігача. Підвищення якісних характеристик освітлювальних установок є ризик-орієнтовним підходом до умов праці. Для розв'язання задачі більш точного визначення еталонного джерела світла, під час розрахунків індексу передачі кольору, було проведено аналіз колориметрії в галузі стандартів і методів розрахунку різниці координат кольору та кольоровості. У промисловості широкого розповсюдження набув метод визначення різниці координат кольору з урахуванням неоднорідного сприйняття людським оком, що ґрунтується на формулі колірної різниці CIEDE2000. Ця формула має складові, які враховують впливи таких чин-

ників, як проблеми в синій області, компенсація для нейтральних кольорів, компенсація для світлості, компенсація для насиченості кольору, компенсація для тону.

Визначення колірної температури еталонного джерела на основі формули колірної відмінності CIEDE2000 дає змогу враховувати колориметричні особливості людського ока, що впливають на розрахунки.

## The determination of colour differences when calculating the colour rendering index

K. Hovorova<sup>1</sup>, Ye. Hryhorieva<sup>2</sup>, B. Harmash<sup>2</sup>, S. Gulevsky<sup>3</sup>, I. Malkova<sup>4</sup>, E. Diumin<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Central Office of Measures, Elektoralna Str., 2, 00-139, Warsaw, Poland  
kateryna.hovorova@gum.gov.pl

<sup>2</sup> Ukrainian State University of Railway Transport, Oboronny Val Square, 7, 61050, Kharkiv, Ukraine

<sup>3</sup> V.N. Karazin Kharkov National University, Svobody Square, 4, 61022, Kharkiv, Ukraine

<sup>4</sup> Kharkiv National University of Radio Electronics, Nauky Ave., 14, 61166, Kharkiv, Ukraine

<sup>5</sup> O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Chornoglazivska Str., 17, 61002, Kharkiv, Ukraine

### Abstract

The paper addresses the issue of determining the reference light source when calculating the colour rendering index (CRI) and highlights a longstanding recognition of the importance of accurately conveying the shades of illuminated objects by light sources. Certain fields, such as garment and textile factories, art workshops, museums, printing houses, beauty salons, and dental offices, necessitate high-quality colour rendering to successfully perform their work. Improving the quality characteristics of lighting installations is essentially a risk-based approach to operating conditions, including the provision of the conditions that meet current international occupational safety standards. In 1965, the Colour Rendering Index (CRI) was introduced as a method to assess the colour accuracy in light sources, now mandated for testing by international standards for the LED equipment manufacturers.

The practical significance of the colour rendering index is based on the fact that the perception of lamp light by the human eye depends not only on quantitative characteristics (illumination, luminous flux), but also on qualitative characteristics, the negative indicators of which may affect the entire lighting system, that is, create the impression that “the lamp is shining, but does not illuminate”. As a result, this indicator has a direct effect on the energy efficiency of a lighting installation, where, to compensate for the “lack of light”, the power consumption of the installation is increased, instead of improving the quality of lighting, by replacing light sources with other sources with a high colour rendering index.

A crucial aspect of the CRI calculation involves determining the reference light source based on the colour difference determination. The approach aims to minimize the uncertainty by studying a reference emitter with a colour temperature similar to the tested light source. However, this criterion neglects the heterogeneity of colour perception, although it eliminates the need to consider changes in the eye adaptation states. To address this limitation, having analysed the standards on colorimetry, a formula for calculating the colour difference was proposed for the first time. The formula accounts for the heterogeneity in the perception of colour space, providing a more comprehensive approach in calculating the colour rendering index.

**Keywords:** colour rendering index; reference light source; colour difference; colour.

### Список літератури

1. Назаренко Л.А., Сорокін В.М. Основи радіометрії та фотометрії: монографія. Харків: ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2014. 352 с.
2. CIE 13.3:1995. Method of measuring and specifying colour rendering properties of light sources.
3. ISO 8995-1:2002 (E). Lighting of work places — Part 1: Indoor. Second edition, 2002. 11 p.
4. ISO/CIE 8995-3:2018 (E). Lighting of work places — Part 3: Lighting requirements for safety and security of outdoor work places. First edition, 2018. 9 p.
5. ISO 10916:2014 (E). Calculation of the impact of daylight utilization on the net and final energy demand for lighting. First edition, 2014. 15 p.
6. ISO/CIE 20086:2019 (E). Light and lighting — Energy performance of lighting in buildings. First edition, 2019. 15 p.
7. CIE S 025/E:2015. Test Method for LED Lamps, LED Luminaires and LED Modules.
8. Купко О.Д. Створення метрики колірних просторів на базі еліпсів МакАдама. *Український метрологічний журнал*, 2019. № 1. С. 38–46. doi: 10.24027/2306-7039.1.2019.164634
9. ANSI/IES TM-30-20. IES Method for Evaluating Light Source Color Rendition. New York, 2020. 34 p.
10. CIE 015:2018. Colorimetry, 4<sup>th</sup> edition, 2018. doi: 10.25039/TR.015.2018
11. ISO/CIE 11664-4:2019(E). Colorimetry — Part 4: CIE 1976 L\*a\*b\* colour space. First edition, 2019. 9 p.
12. CIE 101-1993. Parametric effects in colour-difference evaluation. 18 p.
13. CIE 116-1995. Industrial colour-difference evaluation. 20 p.
14. ISO/CIE 11664-6:2022(E). Colorimetry — Part 6: CIEDE2000 colour-difference formula. Second edition, 2022. 10 p.

### References

1. Nazarenko L.A., Sorokin V.M. Osnovy radiometrii ta fotometrii: monografia [Fundamentals of radiometry and photometry: a monograph]. Kharkiv, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv Publ., 2014. 352 p. (in Ukrainian).
2. CIE 13.3:1995. Method of measuring and specifying colour rendering properties of light sources.
3. ISO 8995-1:2002 (E). Lighting of work places — Part 1: Indoor. Second edition, 2002. 11 p.
4. ISO/CIE 8995-3:2018 (E). Lighting of work places — Part 3: Lighting requirements for safety and security of outdoor work places. First edition, 2018. 9 p.
5. ISO 10916:2014 (E). Calculation of the impact of daylight utilization on the net and final energy demand for lighting. First edition, 2014. 15 p.
6. ISO/CIE 20086:2019 (E). Light and lighting — Energy performance of lighting in buildings. First edition, 2019. 15 p.
7. CIE S 025/E:2015. Test Method for LED Lamps, LED Luminaires and LED Modules.
8. Kupko O. Stvorennia metryky kolirnych prostoriv na bazi elipsiv MakAdama [Creating color space metrics based on MacAdam ellipses]. *Ukrainian Metrological Journal*, 2019, no. 1, pp. 38–46 (in Ukrainian). doi: 10.24027/2306-7039.1.2019.164634
9. ANSI/IES TM-30-20. IES Method for Evaluating Light Source Color Rendition. New York, 2020. 34p.
10. CIE 015:2018. Colorimetry. 4<sup>th</sup> edition, 2018. doi: 10.25039/TR.015.2018
11. ISO/CIE 11664-4:2019(E). Colorimetry — Part 4: CIE 1976 L\*a\*b\* colour space. First edition, 2019. 9 p.
12. CIE 101-1993. Parametric effects in colour-difference evaluation. 18 p.
13. CIE 116-1995. Industrial colour-difference evaluation. 20 p.
14. ISO/CIE 11664-6:2022(E). Colorimetry — Part 6: CIEDE2000 colour-difference formula. Second edition, 2022. 10 p.