

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА

НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ,
ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТА ТРАНСПОРТНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

КАФЕДРА СВІТЛОТЕХНІКИ І ДЖЕРЕЛ СВІТЛА

**ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМ ОСВІТЛЕННЯ З УРАХУВАННЯМ
ВПЛИВУ КОЛІРНОГО ПЕРЕДАВАННЯ**

Бакалаврська кваліфікаційна робота

Здобувач:

Данило ЗОЗУЛЯ

гр. СДС 2023-1у

Керівник:

Леонід НАЗАРЕНКО

д.т.н, проф

Харків – 2026

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені
О. М. Бекетова

Навчально-науковий інститут енергетичної, інформаційної та транспортної інфраструктури

Кафедра світлотехніки і джерел світла

Освітній рівень Бакалавр

Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Освітня програма Світлотехніка та дизайн світлового середовища

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри СДС
Віталій ГЕРАСИМЕНКО
« » 2026 р.

ЗАВДАННЯ

до Бакалаврської кваліфікаційної роботи

Зозуля Данило Олександрович

1. Тема роботи: Проектування системи освітлення з урахуванням впливу колірного передавання

керівник Бакалаврської кваліфікаційної роботи:

Назаренко Л.А д т н, проф

затверджені наказом університету № 440-03 від «22» травня 2026 р.

2. Строк подання здобувачем бакалаврської кваліфікаційної роботи: 23.06.2026 р.

3. Вихідні дані до Бакалаврської кваліфікаційної роботи

Матеріали переддипломної практики.

4. Зміст Бакалаврської кваліфікаційної роботи (перелік питань, які потрібно розробити):

4.1 Аналітична частина (огляд, аналіз, оцінка) Огляд методів обчислення МКО, новітня система індексу колірної точності, особливості обчислення колірного передавання. _____

4.2 Світлотехнічна частина (вибір параметрів, метод розрахунку, алгоритм керування, програмне забезпечення) Алгоритм розрахунку колірного передавання. _____

4.3 Рекомендації щодо застосування (напрями удосконалення, результати проведеної роботи) Надання рекомендацій по обчисленню колірного передавання _____

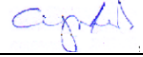
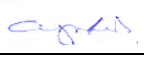
4.4 Охорона праці.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових слайдів):

Постановка завдання. Мета, основні положення Бакалаврської кваліфікаційної роботи

Напрями удосконалення. Результати роботи.

6. Консультанти розділів Бакалаврської кваліфікаційної роботи:

Розділ	Ім'я, прізвище та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Основна частина	Назаренко Л.А д т н, проф		
Охорона праці	Яків СЕРІКОВ, доцент		
Антиплагіат	Олена ДІДЕНКО, ст. викладач		
Нормоконтроль	Роман ВОРОНОВ, доцент		

7. Дата видачі завдання 11.05.2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналітична частина	11.05.26 – 20.05.26	виконано
2	Світлотехнічна частина	20.05.26 – 25.05.26	виконано
3	Рекомендації щодо застосування	25.05.26 – 30.05.26	виконано
4	Охорона праці	30.05.26 – 10.06.26	виконано
5	Оформлення пояснювальної записки та графічного матеріалу	11.06.26 – 15.06.26	виконано
6	Підготовка доповіді та презентації	16.06.26 – 18.06.26	виконано

Здобувач _____



_____ **Данило ЗОЗУЛЯ**

Керівник Бакалаврської кваліфікаційної роботи _____



_____ **Леонід НАЗАРЕНКО**

АНОТАЦІЯ

У бакалаврській кваліфікаційній роботі досліджено методи оцінювання кольорового передавання джерел світла та особливості визначення якості кольоровідтворення сучасних світлодіодних систем освітлення. Розглянуто класичні та сучасні підходи до оцінювання кольорового передавання, виконано колориметричні розрахунки та аналіз характеристик світлодіодних джерел світла.

У першому розділі роботи виконано аналіз теоретичних основ колориметрії, особливостей сприйняття кольору людиною та основних характеристик джерел світла, що впливають на якість кольорового передавання. Розглянуто поняття кольорового передавання, координат кольоровості, корельованої кольорової температури та факторів, які визначають якість кольоровідтворення.

У другому розділі роботи досліджено класичну методику оцінювання кольорового передавання МКО (CIE), розглянуто алгоритм визначення індексу кольорового передавання CRI, виконано аналіз новітньої системи оцінювання кольоровідтворення ANSI/IES TM-30 та проведено порівняння сучасних методів оцінювання кольорового передавання джерел світла.

У третьому розділі роботи досліджено спектральні характеристики світлодіодних джерел світла та їх вплив на якість кольоровідтворення. Розроблено методику розрахунку кольорового передавання світлодіодних джерел та виконано колориметричні розрахунки у програмних середовищах MATLAB і Python для світлодіодного джерела світла з корельованою кольоровою температурою близько 4000 К. За результатами розрахунків визначено координати кольоровості, корельовану кольорну температуру та індекс кольорового передавання.

У розділі «Охорона праці» виконано аналіз умов праці у світлотехнічній лабораторії, визначено небезпечні та шкідливі виробничі фактори, розроблено організаційні заходи забезпечення безпеки праці,

наведено типи засобів індивідуального захисту та виконано розрахунок захисного заземлення лабораторного обладнання.

Основними результатами бакалаврської кваліфікаційної роботи є аналіз сучасних методів оцінювання колірного передавання, дослідження особливостей кольоровідтворення світлодіодних джерел світла та розроблення методики колориметричних розрахунків для визначення характеристик колірного передавання світлодіодних систем освітлення.

Ключові слова: колірне передавання, колориметрія, індекс колірного передавання, CRI, TM-30, світлодіодні джерела світла, координати кольоровості, корельована колірна температура, колірні метрики, світлотехнічні дослідження.

Загальний обсяг бакалаврської кваліфікаційної роботи становить: 117 сторінок; рисунків – 54; таблиць – 12; формул – 40; літературних джерел – 34.

ЗМІСТ

ВСТУП	8
1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА	10
1.1 Поняття колірної передавання світла	10
1.2 Основи колориметрії та системи координат кольору	14
1.2.1 Стандартний спостерігач і функції колірної відповідності	15
1.2.2 Колірна система CIE XYZ	15
1.2.3 Хроматичні координати та діаграма кольоровості	16
1.2.4 Рівномірні колірні простори	17
1.2.5 Значення колориметрії для оцінювання колірної передавання	18
1.3 Спектральний склад випромінювання джерел світла	19
1.3.1 Теплові джерела світла (безперервний спектр)	19
1.3.2 Газорозрядні джерела світла (лінійчастий спектр)	20
1.3.3 Світлодіодні джерела світла (змішаний спектр)	21
1.3.4 Порівняльний аналіз спектральних характеристик	21
1.3.5 Вплив спектра на колірне передавання	22
1.4 Фактори, що впливають на якість колірної передавання	23
2 СВІТЛОТЕХНІЧНА ЧАСТИНА	27
2.1 Класична методика оцінювання колірної передавання МКО	27
2.2 Алгоритм розрахунку індексу колірної передавання CRI	38
2.3 Новітня система оцінювання колірної точності TM-30	48
2.4 Порівняння методів оцінювання колірної передавання	58
3 РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ЗАСТОСУВАННЯ	61
3.1 Спектральні характеристики світлодіодних джерел світла	61
3.2 Особливості оцінювання колірної передавання світлодіодів	70
3.3 Методика розрахунку колірної передавання світлодіодних джерел	77
3.4 Приклад розрахунку колірної передавання світлодіодного джерела світла	86

	7
4 ОХОРОНА ПРАЦІ	93
4.1 Загальні вимоги безпеки під час проведення світлотехнічних досліджень	93
4.2 Аналіз умов праці у світлотехнічній лабораторії	95
4.3 Небезпечні та шкідливі виробничі фактори при роботі з освітлювальним обладнанням	96
4.4 Організаційні заходи забезпечення безпеки праці	97
4.5 Засоби індивідуального та колективного захисту	98
4.6 Нормалізація параметрів мікроклімату лабораторного приміщення	100
4.7 Забезпечення електробезпеки при роботі з вимірювальним обладнанням	101
4.8 Забезпечення пожежної безпеки лабораторного приміщення	103
4.9 Надання долікарської допомоги при нещасних випадках	104
ВИСНОВКИ	106
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	109
ДОДАТОК А	112
ДОДАТОК Б	114
ДОДАТОК В	115

ВСТУП

У сучасних умовах розвитку світлотехніки та енергоефективних технологій особливого значення набуває проблема забезпечення високої якості світлового середовища. Одним із ключових показників цієї якості є колірне передавання джерел світла, яке визначає здатність освітлення забезпечувати достовірне та природне сприйняття кольорів об'єктів. На відміну від традиційних параметрів освітлення, таких як освітленість або світловий потік, колірне передавання безпосередньо пов'язане із психофізіологічними особливостями зорового сприйняття людини та має суттєвий вплив на комфорт, безпеку та ефективність діяльності.

Актуальність теми дослідження зумовлена широким впровадженням світлодіодних джерел світла, які характеризуються високою енергоефективністю, довговічністю та можливістю керування спектральними параметрами випромінювання. Водночас спектральний склад світлодіодного світла істотно відрізняється від традиційних джерел, що ускладнює оцінювання їхніх кольірних характеристик за класичними методами. Зокрема, традиційний індекс кольорного передавання CRI, розроблений Міжнародною комісією з освітлення (CIE), не завжди адекватно відображає якість кольорного передавання сучасних світлодіодів. Це обумовлює необхідність аналізу новітніх методів оцінювання, зокрема системи TM-30, яка забезпечує більш детальну характеристику кольоровідтворення.

Дослідження кольорного передавання має важливе практичне значення для багатьох галузей. У промисловості воно впливає на точність контролю якості продукції, у медицині – на достовірність візуальної діагностики, у торгівлі – на привабливість товарів, а в офісних та житлових приміщеннях – на комфорт і працездатність людини. Крім того, питання кольорного передавання регламентуються нормативними документами, зокрема стандартом ДСТУ EN 12464-1:2022, що підкреслює їхню значущість у проектуванні освітлення.

Метою даної роботи є проектування системи освітлення з урахуванням впливу кольорного передавання.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі *задачі*:

- розглянути теоретичні основи колірного передавання та колориметрії;
- проаналізувати методи обчислення індексу колірного передавання за рекомендаціями CIE;
- виконати розрахунок показників колірного передавання для конкретного джерела світла;
- проаналізувати отримані результати та сформулювати практичні рекомендації.

Об'єктом дослідження є джерела світла та їхні колірні характеристики.

Предметом дослідження є методи оцінювання колірного передавання та їх застосування до світлодіодних джерел світла.

У роботі використано такі *методи дослідження*: аналітичний – для узагальнення наукових підходів до оцінювання колірного передавання; математичний – для розрахунку колірних характеристик; порівняльний – для аналізу різних методик оцінювання; графічний – для візуалізації результатів.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості їх використання при проєктуванні систем освітлення з урахуванням вимог до якості кольоровідтворення, а також при виборі світлодіодних джерел світла для різних сфер застосування.

1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Поняття колірної передавання світла

Колірне передавання є однією з найважливіших якісних характеристик освітлення, оскільки воно визначає здатність джерела світла забезпечувати правильне, природне та візуально комфортне сприйняття кольорів об'єктів. На відміну від освітленості, яскравості або світлового потоку, які переважно характеризують кількісну сторону освітлення, колірне передавання відображає саме якість світлового середовища. Тому в сучасній світлотехніці цей показник розглядається не лише як технічний параметр джерела світла, а і як важлива умова зорового комфорту, безпеки праці, естетичного сприйняття простору та точності виконання виробничих, медичних, навчальних і побутових завдань.

У загальному розумінні колірне передавання – це властивість джерела світла впливати на зорове сприйняття кольорів освітлюваних предметів порівняно з їхнім виглядом за умов освітлення еталонним або природним джерелом світла. Такий підхід закладено у рекомендаціях Міжнародної комісії з освітлення – МКО, або СІЕ, де метод оцінювання колірної передавання базується на визначенні колірних зсувів спеціальних тестових зразків під дією досліджуваного та еталонного джерел світла [1].

У працях українських фахівців зі світлотехніки, зокрема Л. А. Назаренка, В. М. Сорокіна, С. С. Овчинникова, М. М. Таряник та О. В. Лутай, підкреслюється, що сприйняття кольору не може бути пояснене лише фізичними характеристиками випромінювання. Воно формується внаслідок взаємодії трьох складових: спектрального складу джерела світла, спектральних властивостей поверхні об'єкта та особливостей зорової системи людини [2; 3]. Тому колірне передавання є міждисциплінарним поняттям, яке поєднує фізику світла, фотометрію, колориметрію, фізіологічну оптику та психологію зорового сприйняття.

Основою формування кольору є спектральний розподіл потужності випромінювання джерела світла. Якщо джерело має безперервний і

рівномірний спектр у видимій області, то воно, як правило, забезпечує більш природне передавання кольорів. Саме тому природне денне світло або випромінювання абсолютно чорного тіла часто використовуються як еталонні орієнтири під час оцінювання колірних характеристик джерел світла. Натомість джерела зі значними провалами або вузькими максимумами у спектрі можуть спотворювати вигляд окремих кольорів, навіть якщо загальна освітленість приміщення є достатньою.

Як зазначає Л. А. Назаренко, розвиток світлодіодного освітлення суттєво змінив підходи до оцінювання колірної якості світла, оскільки світлодіодні джерела мають складний і нерівномірний спектральний розподіл випромінювання [4]. Це означає, що два джерела світла з однаковою корельованою колірною температурою можуть по-різному передавати кольори об'єктів. Наприклад, світлодіодна лампа з температурою 4000 К і люмінесцентна лампа з такою самою температурою можуть створювати різне візуальне враження від червоних, зелених або синіх поверхонь. Причина полягає не в самій колірній температурі, а в різному спектральному складі випромінювання.

Колірна температура характеризує загальний відтінок світла – теплий, нейтральний або холодний, але не дає повної інформації про здатність джерела правильно відтворювати кольори. Наприклад, джерело світла з корельованою колірною температурою 3000 К може мати як високий, так і низький рівень колірного передавання. Тому в світлотехнічних розрахунках колірну температуру необхідно розглядати разом з індексом колірного передавання, спектральним розподілом випромінювання та умовами зорової роботи.

З практичного погляду якісне колірне передавання особливо важливе в тих приміщеннях і сферах діяльності, де точність розпізнавання кольорів має безпосереднє значення. До таких об'єктів належать медичні заклади, лабораторії, поліграфічні підприємства, музеї, виставкові зали, торговельні приміщення, навчальні аудиторії, офіси, виробничі дільниці контролю якості, а також житлові приміщення. У ДСТУ EN 12464-1:2022, який регламентує освітлення робочих місць у приміщеннях, якість освітлення розглядається не

тільки через рівень освітленості, а й через такі параметри, як розподіл яскравості, обмеження блискавості, колірність світла та колірне передавання [5].

Недостатнє або неправильне колірне передавання може призводити до помилок у зоровій оцінці об'єктів. Наприклад, у медицині спотворення кольору шкіри може ускладнити візуальну діагностику; у харчовій промисловості – змінити сприйняття свіжості продуктів; у торгівлі – вплинути на візуальну привабливість товарів; у промисловості – ускладнити розпізнавання маркування, сигнальних кольорів або дефектів поверхні. Отже, колірне передавання має не лише естетичне, а й функціональне значення.

У класичній світлотехніці для кількісної оцінки цієї властивості використовується індекс колірного передавання CRI або Ra. Він показує, наскільки близьким є сприйняття кольорів об'єктів під досліджуваним джерелом світла до їхнього сприйняття під еталонним джерелом. Максимальне значення індексу дорівнює 100, що відповідає найкращому колірному передаванню. У методиці МКО CIE 13.3-1995 загальний індекс Ra визначається як середнє значення спеціальних індексів для восьми стандартних тестових кольорів [1].

Разом із тим у сучасній науковій літературі наголошується, що традиційний індекс Ra не завжди достатньо точно характеризує якість колірного передавання сучасних джерел світла, особливо світлодіодів. Український дослідник Д. О. Усіченко у своїй роботі, присвяченій фотометричним вимірюванням світлодіодних світильників, зазначає, що саме спектральний розподіл потужності світлодіодних джерел визначає їхні колірні характеристики, зокрема колірне передавання, корельовану колірну температуру та колірну рівномірність [6]. Це пояснює необхідність поглибленого аналізу не лише інтегрального індексу Ra, а й інших показників, які дають змогу оцінити точність, насиченість і стабільність передавання кольорів.

Проблема полягає в тому, що два джерела світла можуть мати однаковий загальний індекс Ra, але по-різному передавати окремі кольори. Особливо це

стосується насичених червоних, синіх або зелених відтінків. Наприклад, джерело з $R_a = 80$ формально може відповідати мінімальним вимогам для багатьох приміщень, однак при цьому погано відтворювати червоні тони. У таких випадках важливим є аналіз спеціальних індексів колірної передавання R_i , зокрема R_9 , який характеризує передавання насиченого червоного кольору. Цей показник має велике значення для медичних приміщень, харчової промисловості, дизайну інтер'єру та торговельного освітлення.

С. С. Овчинников, М. М. Таряник і О. В. Лутай у курсі з фізіологічної оптики та колориметрії підкреслюють, що сприйняття кольору є результатом роботи зорового аналізатора людини, який реагує на спектральний склад світла через три типи колбочок сітківки ока [3]. Це означає, що фізично різні спектральні розподіли можуть викликати подібне колірне відчуття. Таке явище називається метамеризмом. Воно має велике значення для розуміння колірної передавання, оскільки об'єкт може здаватися однаковим за кольором при одному джерелі світла, але виглядати інакше при іншому.

Метамеризм є однією з причин, через які оцінювання колірної передавання не може зводитися лише до визначення колірної температури або координат кольору джерела. Для повноцінного аналізу необхідно враховувати спектральну взаємодію між джерелом світла й освітлюваним об'єктом. Поверхня предмета відбиває не все світло однаково, а вибірково – залежно від довжини хвилі. Тому, якщо в спектрі джерела відсутня або недостатньо представлена певна ділянка, відповідний колір об'єкта буде переданий неточно.

У сучасних умовах значення колірної передавання зростає у зв'язку з масовим переходом на світлодіодні джерела світла. Світлодіоди мають високий світловий ККД, тривалий строк служби, компактність і можливість керування спектральними характеристиками. Однак саме спектральна специфіка LED-джерел зумовлює необхідність уважного підходу до оцінювання їхньої колірної якості. Л. А. Назаренко у статті про колірне освітлення джерел світла зазначає, що індекс CRI не завжди є надійним для прогнозування параметрів колірної передавання білих світлодіодів, оскільки ця метрика була сформована в період домінування ламп розжарювання та люмінесцентних ламп [4].

Саме тому поряд із класичною системою CRI у світовій практиці розвиваються нові методи оцінювання колірного передавання. Однією з таких систем є TM-30, розроблена Illuminating Engineering Society. Вона дає змогу оцінювати не тільки точність передавання кольорів за індексом R_f , а й зміну насиченості кольорів за індексом R_g [7]. На відміну від традиційного R_a , ця система використовує значно більшу кількість колірних зразків і дозволяє отримати більш детальну характеристику впливу джерела світла на колірне сприйняття.

Отже, колірне передавання слід розглядати як комплексну характеристику джерела світла, що відображає його здатність забезпечувати достовірне сприйняття кольорів об'єктів у конкретних умовах освітлення. Воно залежить від спектрального складу випромінювання, колірної температури, властивостей освітлюваних поверхонь, рівня освітленості, адаптації зору та методики оцінювання. Для традиційних джерел світла достатньо інформативним може бути індекс R_a , однак для світлодіодних систем доцільно застосовувати розширені методи оцінювання, зокрема аналіз спеціальних індексів R_i та сучасну систему TM-30.

Таким чином, поняття колірного передавання є базовим для подальшого аналізу методів його обчислення за рекомендаціями МКО, новітніх систем індексів колірної точності та особливостей оцінювання світлодіодних джерел світла. У межах цієї роботи колірне передавання розглядається як ключовий показник якості освітлення, що має важливе значення для проєктування енергоефективних, безпечних і комфортних світлових середовищ.

1.2 Основи колориметрії та системи координат кольору

Колориметрія є науковою основою кількісного опису кольору та ключовим інструментом для аналізу колірного передавання джерел світла. Вона базується на встановленні взаємозв'язку між фізичними характеристиками світлового випромінювання та зоровими відчуттями людини. Як зазначає С. С. Овчинников, колориметрія дозволяє перейти від суб'єктивного сприйняття

кольору до його об'єктивного числового опису, що є необхідною умовою для стандартизації та інженерних розрахунків у світлотехніці [3].

Сучасна колориметрія сформувалася на основі досліджень Міжнародної комісії з освітлення (МКО, CIE), яка у 1931 році запропонувала першу універсальну систему кольорових координат. Ця система ґрунтується на експериментально встановлених функціях колірної чутливості стандартного спостерігача, що відображають середню реакцію людського ока на світлове випромінювання різної довжини хвилі [8].

1.2.1 Стандартний спостерігач і функції колірної відповідності

Однією з фундаментальних концепцій колориметрії є поняття стандартного спостерігача. Воно було введене для усунення індивідуальних відмінностей у сприйнятті кольору різними людьми. Стандартний спостерігач – це узагальнена модель зорової системи людини, яка характеризується трьома функціями колірної відповідності: $\underline{x}(\lambda)$, $\underline{y}(\lambda)$, $\underline{z}(\lambda)$.

Ці функції визначають, якою мірою випромінювання певної довжини хвилі викликає відчуття трьох основних компонентів кольору. Як підкреслює Г. Вишневський, саме ці функції є основою для переходу від спектрального опису світла до тривимірного колірного простору [9].

Фізично це означає, що будь-який колір може бути представлений як комбінація трьох умовних первинних кольорів, що відповідає трикомпонентній природі людського зору. Такий підхід безпосередньо пов'язаний із фізіологією сітківки ока, де існують три типи колбочок, чутливих до різних діапазонів довжин хвиль.

1.2.2 Колірна система CIE XYZ

На основі функцій стандартного спостерігача була розроблена система координат CIE XYZ, яка є базовою в сучасній колориметрії. У цій системі колір описується трьома координатами X, Y, Z, що визначаються інтегруванням

спектрального розподілу випромінювання з відповідними функціями чутливості

$$X = \int S(\lambda) \underline{x}(\lambda) d\lambda, \quad (1.1)$$

$$Y = \int S(\lambda) \underline{y}(\lambda) d\lambda, \quad (1.2)$$

$$Z = \int S(\lambda) \underline{z}(\lambda) d\lambda \quad (1.3)$$

де $S(\lambda)$ – спектральний розподіл потужності випромінювання джерела світла.

Координата Y має особливе значення, оскільки вона пропорційна фотометричній величині – яскравості або освітленості, що визначає світлову ефективність випромінювання. Це робить систему XYZ універсальною, оскільки вона поєднує фотометричні та колориметричні характеристики.

Як зазначає R. W. G. Hunt, система XYZ була розроблена таким чином, щоб усі реальні кольори мали додатні координати, що суттєво спрощує математичну обробку кольорової інформації [10].

1.2.3 Хроматичні координати та діаграма кольоровості

Для зручності аналізу кольору часто використовують не абсолютні координати XYZ, а відносні хроматичні координати x, y , які визначаються як:

$$x = \frac{X}{X+Y+Z}, \quad (1.4)$$

$$y = \frac{Y}{X+Y+Z} \quad (1.5)$$

Ці координати дозволяють описати колір незалежно від його яскравості, що є важливим при оцінюванні колірних характеристик джерел світла.

На основі координат x, y будується хроматична діаграма CIE 1931, яка є графічним представленням усіх видимих кольорів. Вона широко використовується у світлотехніці для аналізу колірних параметрів джерел світла, зокрема для визначення їхньої колірної температури, відхилення від планківської кривої та оцінювання колірного передавання.

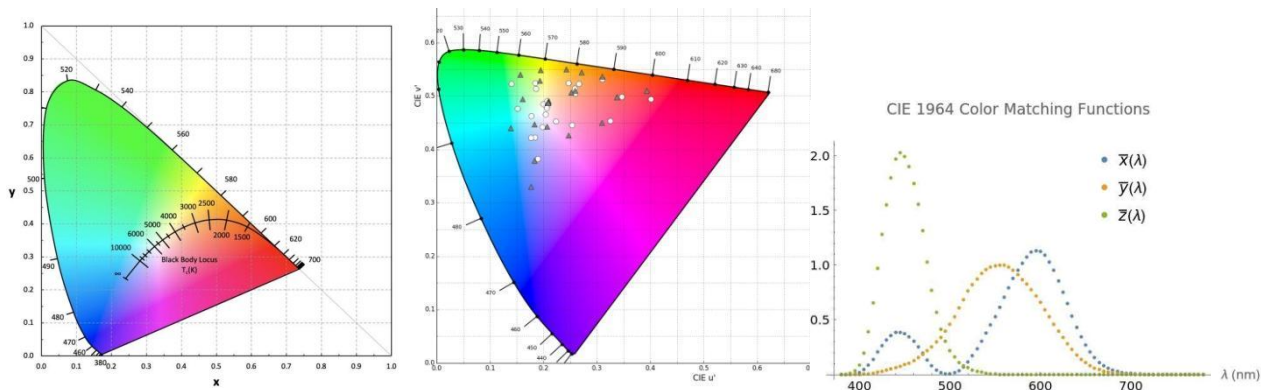


Рисунок 1.1 – Діаграма кольоровості CIE

На діаграмі кольоровості всі спектральні кольори розташовані вздовж так званої спектральної кривої, а внутрішня область містить змішані кольори. Важливим елементом є планківська крива, яка відображає зміну кольору абсолютно чорного тіла при різних температурах. Саме вздовж цієї кривої визначається корельована колірна температура джерел світла.

Як зазначає М. М. Таряник, використання хроматичної діаграми дозволяє не тільки визначити колір джерела світла, але й оцінити його відхилення від природного білого світла, що безпосередньо впливає на якість колірного передавання [3].

1.2.4 Рівномірні колірні простори

Одним із недоліків системи CIE XYZ є її нерівномірність з точки зору сприйняття кольору: однакові відстані в координатному просторі не відповідають однаковим зоровим відмінностям. Тому МКО розробила більш досконалі системи, зокрема CIE $L^*a^*b^*$ та CIE $L^*u^*v^*$.

У просторі CIE $L^*a^*b^*$ колір описується трьома параметрами:

- L^* – світлота,
- a^* – координата червоно-зеленої осі,
- b^* – координата жовто-синьої осі.

Ця система є майже рівномірною, тобто евклідова відстань між двома точками відповідає візуальній різниці кольорів. Саме тому вона широко використовується при розрахунках колірних відхилень, у тому числі при визначенні індексу колірного передавання CRI.

Як підкреслює М. D. Fairchild, простір CIE $L^*a^*b^*$ є основою для сучасних методів оцінювання кольору, оскільки він краще узгоджується з психофізичними особливостями зору людини [11].

1.2.5 Значення колориметрії для оцінювання колірного передавання

Колориметричні методи лежать в основі всіх сучасних систем оцінювання колірного передавання. Визначення індексу CRI, а також новітніх показників, таких як R_f та R_g , базується на порівнянні координат кольору тестових зразків у різних колірних просторах.

Зокрема, у методиці CIE 13.3-1995 використовується простір CIE 1964 $U^*V^*W^*$, у якому обчислюється колірна різниця між освітленням еталонним та досліджуваним джерелом [1]. У системі TM-30 застосовується більш сучасний простір CAM02-UCS, що забезпечує кращу відповідність між числовими значеннями та візуальним сприйняттям [7].

Таким чином, колориметрія забезпечує математичний апарат для аналізу колірного передавання та дозволяє перейти від якісного опису до точних кількісних оцінок. Без використання колориметричних методів неможливе сучасне проєктування освітлення, особливо з урахуванням широкого застосування світлодіодних джерел світла.

Отже, система координат кольору CIE XYZ, хроматичні діаграми та рівномірні колірні простори є фундаментальною основою для подальшого розгляду методів оцінювання колірного передавання, які будуть детально проаналізовані у наступному підрозділі.

1.3 Спектральний склад випромінювання джерел світла

Спектральний склад випромінювання є визначальним фізичним фактором, що безпосередньо впливає на колірні характеристики джерел світла та, зокрема, на їхню здатність забезпечувати якісне колірне передавання. Як підкреслює Л. А. Назаренко, саме спектральний розподіл потужності випромінювання визначає, якою мірою різні довжини хвиль представлені у світловому потоці, а отже – наскільки повно і точно будуть відтворені кольори освітлюваних об'єктів [2].

У колориметрії спектральний склад описується функцією спектрального розподілу потужності $S(\lambda)$, яка показує інтенсивність випромінювання джерела світла в залежності від довжини хвилі. Ця характеристика є базовою для обчислення колірних координат у системі CIE XYZ, а також для визначення індексів колірного передавання [8].

Класифікація джерел світла за спектральними характеристиками

Залежно від характеру спектрального розподілу всі джерела світла можна умовно поділити на три основні групи:

- 1) Джерела з безперервним спектром
- 2) Джерела з лінійчастим (дискретним) спектром
- 3) Джерела зі змішаним спектром

Такий поділ є важливим, оскільки кожен тип спектра по-різному впливає на якість колірного передавання.

1.3.1 Теплові джерела світла (безперервний спектр)

До джерел з безперервним спектром належать лампи розжарювання та випромінювання абсолютно чорного тіла. Їхній спектр є плавним і безперервним у всій видимій області, що забезпечує рівномірне представлення всіх довжин хвиль.

Як зазначає R. W. G. Hunt, такі джерела мають найкращі властивості колірного передавання, оскільки їхній спектр найбільш наближений до

природного денного світла [10]. Саме тому лампи розжарювання історично використовувалися як еталонні джерела при визначенні індексу CRI для низьких колірних температур.

Основною перевагою теплових джерел є:

- висока точність відтворення кольорів ($R_a \approx 100$),
- відсутність спектральних провалів,
- природне сприйняття кольорів.

Однак їхнім суттєвим недоліком є низька енергоефективність, що обмежує їх використання в сучасних умовах.

1.3.2 Газорозрядні джерела світла (лінійчастий спектр)

Газорозрядні джерела (люмінесцентні лампи, натрієві, ртутні лампи) характеризуються дискретним або лінійчастим спектром, який складається з окремих максимумів випромінювання на певних довжинах хвиль.

Як підкреслює Д. О. Усіченко, такі джерела мають нерівномірний спектральний розподіл, що призводить до спотворення кольорів, особливо тих, для яких у спектрі відсутні відповідні компоненти [6].

Наприклад:

- натрієві лампи мають виражений жовто-оранжевий спектр і практично не передають інші кольори;
- ртутні лампи мають окремі піки в синій та зеленій областях;
- люмінесцентні лампи використовують люмінофори для часткового вирівнювання спектра.

Основні недоліки:

- наявність спектральних провалів,
- знижений індекс колірного передавання ($R_a \approx 50-80$),
- спотворення насичених кольорів.

1.3.3 Світлодіодні джерела світла (змішаний спектр)

Світлодіоди (LED) є сучасними джерелами світла, які мають складний спектральний розподіл, що формується комбінацією випромінювання напівпровідникового кристала та люмінофора.

Як зазначає М. D. Fairchild, типовий спектр білого світлодіода складається з:

- вузького піку в синій області (~450 нм),
- широкого максимуму в жовто-зеленій області, сформованого люмінофором [11].

Такий спектр є нерівномірним і містить характерні піки та провали, що відрізняє світлодіоди від теплових джерел.

Як підкреслює Л. А. Назаренко, саме спектральна структура світлодіодів є причиною того, що традиційний індекс CRI не завжди адекватно оцінює їхню здатність передавати кольори [4].

Переваги LED:

- висока енергоефективність,
- можливість керування спектром,
- тривалий строк служби.

Недоліки:

- нерівномірний спектр,
- можливі провали у червоній області,
- залежність колірного передавання від технології виготовлення.

1.3.4 Порівняльний аналіз спектральних характеристик

Для узагальнення особливостей різних джерел світла доцільно представити їх у вигляді таблиці.

Таблиця 1.1 – Порівняння спектральних характеристик джерел світла

Тип джерела світла	Характер спектра	Колірне передавання	Особливості
Лампа розжарювання	Безперервний	Високе ($Ra \approx 100$)	Природне світло, низька ефективність
Люмінесцентна лампа	Лінійчастий/змішаний	Середнє ($Ra \approx 70-90$)	Використання люмінофорів
Натрієва лампа	Лінійчастий	Низьке ($Ra < 50$)	Жовте світло, сильне спотворення кольорів
Світлодіод (LED)	Змішаний	Від середнього до високого	Гнучке налаштування спектра

1.3.5 Вплив спектра на колірне передавання

Спектральний склад випромінювання безпосередньо визначає якість колірного передавання. Якщо в спектрі джерела відсутні або слабо представлені певні довжини хвиль, відповідні кольори будуть передані неточно.

Як зазначає С. С. Овчинников, поверхня об'єкта відбиває лише ті довжини хвиль, які присутні у спектрі освітлення, тому неповний спектр призводить до втрати колірної інформації [3].

Наприклад:

- відсутність червоної складової → погане відтворення шкіри людини;
- дефіцит синього → спотворення холодних відтінків;
- надлишок жовтого → зниження контрасту кольорів.

Це явище є ключовим при поясненні різниці між джерелами світла з однаковою колірною температурою, але різною якістю колірного передавання.

Таким чином, спектральний склад випромінювання є основною фізичною характеристикою джерел світла, яка визначає їхню здатність до якісного колірного передавання. Джерела з безперервним спектром забезпечують найкраще відтворення кольорів, тоді як дискретні та нерівномірні спектри можуть призводити до значних спотворень.

Світлодіодні джерела світла, незважаючи на їхні численні переваги, мають складний спектральний розподіл, що потребує застосування більш

досконалих методів оцінювання колірного передавання. Це обумовлює необхідність детального аналізу сучасних методик, який буде розглянуто у наступному розділі.

1.4 Фактори, що впливають на якість колірного передавання

Якість колірного передавання джерел світла формується під впливом сукупності фізичних, технічних і психофізіологічних чинників. Як підкреслює Л. А. Назаренко, коректне оцінювання цієї характеристики можливе лише за умови комплексного врахування спектральних параметрів випромінювання, умов освітлення та особливостей зорового сприйняття людини [2]. Це означає, що навіть джерела світла з високими номінальними показниками можуть забезпечувати різну якість колірного передавання залежно від конкретних умов застосування.

У світлотехнічній практиці до основних факторів, що впливають на якість колірного передавання, відносять: спектральний склад випромінювання, корельовану колірну температуру, рівень освітленості, властивості освітлюваних об'єктів, адаптацію зору та особливості методики оцінювання.

Найбільш визначальним фактором є спектральний склад джерела світла. Як було показано у попередньому підрозділі, саме спектральний розподіл потужності визначає, які довжини хвиль присутні у світловому потоці. Відповідно, він прямо впливає на здатність джерела відтворювати кольори об'єктів.

За даними МКО (CIE), точність колірного передавання залежить від ступеня відповідності спектра досліджуваного джерела спектру еталонного освітлення [8]. Чим більш рівномірним є спектр, тим вищою є ймовірність правильного відтворення кольорів.

Як зазначає С. С. Овчинников, навіть незначні провали у спектрі можуть призводити до помітних спотворень кольорів, особливо насичених [3]. Наприклад, дефіцит червоної складової призводить до неприродного вигляду шкіри людини, а відсутність синьої – до спотворення холодних відтінків.

Корельована колірна температура (CCT) характеризує загальний колірний відтінок світла та є важливим параметром, що впливає на сприйняття кольорів. Вона визначається як температура абсолютно чорного тіла, випромінювання якого найбільш близьке за кольором до досліджуваного джерела світла [8].

Як зазначає R. W. G. Hunt, джерела світла з різною колірною температурою можуть по-різному впливати на сприйняття кольорів навіть за однакового індексу CRI [10]. Наприклад:

- тепле світло (2700–3000 K) підсилює червоні та жовті відтінки;
- нейтральне світло (3500–4500 K) забезпечує більш збалансоване передавання кольорів;
- холодне світло (5000–6500 K) підсилює сині відтінки.

Важливо підкреслити, що сама по собі колірна температура не визначає якість колірного передавання, але суттєво впливає на його візуальне сприйняття.

Освітленість є одним із ключових факторів, що впливають на точність сприйняття кольорів. При низькому рівні освітлення активність колбочок сітківки зменшується, і зір переходить у так званий мезопічний або скотопічний режим, у якому кольори сприймаються значно гірше.

Як зазначено у стандарті ДСТУ EN 12464-1:2022, для забезпечення якісного колірного передавання необхідно підтримувати достатній рівень освітленості відповідно до виду зорової роботи [5]. Наприклад, для точних робіт, пов'язаних із розпізнаванням кольорів, освітленість має бути значно вищою, ніж для загального освітлення.

M. D. Fairchild також підкреслює, що при зменшенні освітленості кольори втрачають насиченість і стають менш виразними, що негативно впливає на якість їхнього сприйняття [11].

Колір об'єкта визначається не тільки характеристиками джерела світла, але й спектральними властивостями самого об'єкта, зокрема його коефіцієнтом відбиття.

Як зазначає Г. Вишневський, поверхні різних матеріалів вибірково відбивають світло, тому їхній вигляд може змінюватися залежно від

спектрального складу освітлення [9]. Наприклад, об'єкт, який відбиває переважно червоні хвилі, буде виглядати темнішим або навіть змінювати відтінок при освітленні джерелом з дефіцитом червоної складової.

Це явище є особливо важливим у таких сферах, як:

- поліграфія,
- текстильна промисловість,
- дизайн інтер'єру,
- торгівля.

Зорове сприйняття кольору значною мірою залежить від процесів адаптації ока до умов освітлення. Як підкреслює С. С. Овчинников, зоровий аналізатор здатний частково компенсувати зміни спектрального складу світла, що призводить до стабілізації сприйняття кольорів [3].

Це явище відоме як колірна адаптація. Наприклад, при переході з теплого освітлення в холодне або навпаки, спочатку виникає помітна зміна кольорів, але з часом око адаптується, і сприйняття стає більш стабільним.

Однак адаптація не є повною, і значні відмінності у спектрі джерел світла все одно призводять до спотворення кольорів.

Одним із важливих факторів, що впливають на оцінювання колірного передавання, є явище метамеризму. Воно полягає в тому, що два об'єкти можуть виглядати однаково за одного джерела світла, але по-різному – за іншого.

Як зазначає М. D. Fairchild, метамеризм є наслідком різного спектрального складу відбитого світла при однакових колірних координатах [11]. Це явище ускладнює оцінювання колірного передавання, оскільки стандартні методи можуть не враховувати всіх особливостей спектральної взаємодії.

Якість колірного передавання залежить також від обраної методики оцінювання. Традиційний індекс CRI (Ra), розроблений МКО, має певні обмеження, особливо при оцінюванні світлодіодних джерел світла.

Як зазначено в стандарті CIE 13.3-1995, цей індекс базується на аналізі лише восьми тестових кольорів, що не завжди дозволяє повністю охарактеризувати спектральні особливості сучасних джерел [1].

Сучасні методики, зокрема ANSI/IES TM-30-20, використовують більшу кількість тестових зразків і забезпечують більш точну оцінку колірного передавання [7].

Для систематизації розглянутих факторів доцільно представити їх у вигляді таблиці.

Таблиця 1.2 – Основні фактори впливу на якість колірного передавання

Фактор	Характер впливу	Наслідки
Спектральний склад	Визначає наявність довжин хвиль	Основний фактор якості
Колірна температура	Впливає на відтінок світла	Зміна сприйняття кольорів
Освітленість	Визначає активність зору	Зниження насиченості при низькому рівні
Властивості об'єкта	Вибіркове відбиття світла	Зміна кольору залежно від спектра
Адаптація зору	Компенсація змін освітлення	Часткова стабілізація кольорів
Метамеризм	Різне сприйняття при різних джерелах	Складність оцінювання
Методика оцінювання	Вибір моделі розрахунку	Різні результати для одного джерела

Таким чином, якість колірного передавання є результатом комплексної взаємодії фізичних характеристик джерела світла та психофізіологічних особливостей зорового сприйняття. Найбільш значущим фактором є спектральний склад випромінювання, однак суттєвий вплив мають також колірна температура, рівень освітленості, властивості освітлюваних об'єктів і адаптація зору.

Особливу роль відіграє методика оцінювання колірного передавання, оскільки традиційні підходи не завжди адекватно відображають характеристики сучасних світлодіодних джерел. Це обумовлює необхідність використання більш досконалих методів аналізу, які будуть розглянуті у наступному розділі.

2 СВІЛОТЕХНІЧНА ЧАСТИНА

2.1 Класична методика оцінювання колірної передавання МКО

Класична методика оцінювання колірної передавання джерел світла була розроблена Міжнародною комісією з освітлення – МКО, або CIE, і викладена у стандарті CIE 13.3-1995 Method of measuring and specifying colour rendering properties of light sources [1]. Ця методика протягом тривалого часу була основним міжнародним підходом до кількісної оцінки здатності джерела світла правильно відтворювати кольори об'єктів порівняно з еталонним освітлювачем.

У межах цієї методики основним показником є загальний індекс колірної передавання R_a , який у практичній світлотехніці часто позначають як CRI – Colour Rendering Index. Він характеризує середній ступінь відповідності кольорів стандартних тестових зразків при освітленні досліджуванним джерелом та еталонним джерелом світла. Максимальне значення індексу становить 100, що відповідає ідеальному колірному передаванню, тобто такому стану, коли колірні відмінності між досліджуванним та еталонним освітленням практично відсутні [1].

Методика МКО ґрунтується на порівняльному принципі. Це означає, що якість колірної передавання не визначається ізольовано для самого джерела світла, а оцінюється через порівняння з певним еталонним джерелом. Такий підхід є логічним, оскільки людське сприйняття кольору завжди залежить від умов освітлення. Один і той самий предмет може виглядати по-різному під лампою розжарювання, денним світлом, люмінесцентною лампою або світлодіодним джерелом. Тому завдання методики полягає у визначенні того, наскільки досліджуване джерело змінює вигляд кольорів порівняно з прийнятим еталоном.

На думку Л. А. Назаренка та В. М. Сорокіна, використання індексу колірної передавання є важливим етапом світлотехнічного аналізу, оскільки цей показник дозволяє оцінити не лише кількість світла, а й його якісну

придатність для конкретного зорового завдання [2]. Особливо це важливо в умовах, коли освітлення застосовується не лише для забезпечення видимості, а й для правильного сприйняття кольорової інформації. Класична методика МКО базується на використанні стандартних кольорових зразків. Для кожного зразка визначаються координати кольору за двох умов:

- при освітленні досліджуванім джерелом світла;
- при освітленні еталонним джерелом світла з такою самою або близькою корельованою колірною температурою.

Після цього для кожного зразка обчислюється колірна різниця. Чим меншою є ця різниця, тим краще досліджуване джерело передає відповідний колір. На основі отриманих колірних відмінностей визначаються спеціальні індекси R_i , а потім – загальний індекс R_a .

Схематично логіку класичної методики МКО можна подати так.

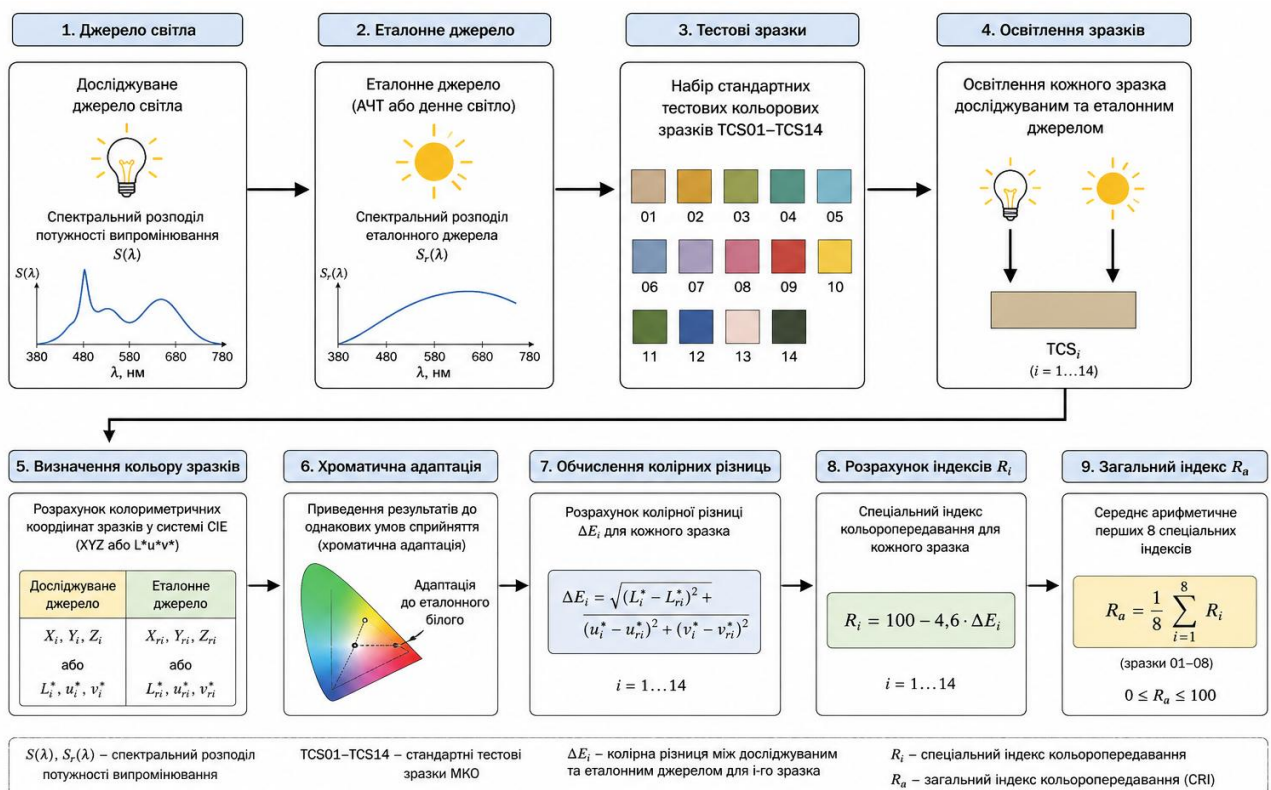


Рисунок 2.1 – Загальна схема оцінювання колірного передавання за методикою МКО

Таким чином, методика має чітку послідовність: від спектральних даних джерела світла до числової оцінки його здатності передавати кольори.

Одним із ключових елементів методики є вибір еталонного джерела світла. У стандарті CIE 13.3-1995 передбачено, що тип еталонного джерела залежить від корельованої колірної температури досліджуваного джерела [1].

Якщо корельована колірна температура досліджуваного джерела є меншою ніж 5000 К, як еталон використовується випромінювання абсолютно чорного тіла. Якщо ж температура становить 5000 К і більше, як еталон застосовується стандартне денне світло.

Це пояснюється тим, що джерела з низькою колірною температурою зазвичай мають теплий відтінок, подібний до лампи розжарювання або випромінювання нагрітого тіла. Натомість джерела з високою колірною температурою ближчі до денного освітлення, тому їх доцільно порівнювати саме з денним еталоном.

Таблиця 2.1 – Вибір еталонного джерела світла за методикою МКО

Корельована колірна температура досліджуваного джерела	Еталонне джерело світла	Характеристика еталона
Менше 5000 К	Випромінювання абсолютно чорного тіла	Тепле світло, близьке до лампи розжарювання
5000 К і більше	Стандартне денне світло CIE	Холодніше світло, наближене до природного денного освітлення

Такий підхід дає змогу порівнювати досліджуване джерело не з універсальним еталоном, а з таким освітлювачем, який найближчий до нього за загальним колірним тоном. Це важливо, оскільки порівняння джерела з температурою 3000 К безпосередньо з денним світлом 6500 К було б некоректним: значна частина колірних відмінностей виникала б не через низьку якість колірного передавання, а через різний колірний тон освітлення.

Для оцінювання колірного передавання в методиці МКО використовуються стандартні тестові кольорові зразки. Вони мають задані

спектральні характеристики відбиття і застосовуються як умовні об'єкти, колір яких порівнюється при різних джерелах світла.

У класичній системі CIE 13.3-1995 для визначення загального індексу R_a використовуються перші вісім тестових зразків. Вони мають помірну насиченість і представляють типові кольори, які часто трапляються у природному та штучному середовищі [1].

Крім перших восьми зразків, існують також додаткові тестові кольори, які застосовуються для визначення спеціальних індексів колірного передавання. Серед них особливе значення має зразок № 9 – насичений червоний колір, оскільки саме його передавання є критичним для медичних приміщень, харчової промисловості, косметології, музейного освітлення та торгівлі.

Таблиця 2.2 – Тестові кольорові зразки у класичній методиці МКО

Номер зразка	Умовна характеристика кольору	Використання в методиці
TCS01	Світлий сірувато-червоний	Входить до розрахунку R_a
TCS02	Темний сірувато-жовтий	Входить до розрахунку R_a
TCS03	Насичений жовто-зелений	Входить до розрахунку R_a
TCS04	Помірний жовто-зелений	Входить до розрахунку R_a
TCS05	Світлий блакитно-зелений	Входить до розрахунку R_a
TCS06	Світлий синій	Входить до розрахунку R_a
TCS07	Світлий фіолетовий	Входить до розрахунку R_a
TCS08	Світлий червонувато-фіолетовий	Входить до розрахунку R_a
TCS09	Насичений червоний	Спеціальний індекс R_9
TCS10	Насичений жовтий	Спеціальний індекс R_{10}
TCS11	Насичений зелений	Спеціальний індекс R_{11}
TCS12	Насичений синій	Спеціальний індекс R_{12}
TCS13	Колір шкіри світлого типу	Спеціальний індекс R_{13}
TCS14	Колір листя	Спеціальний індекс R_{14}

Важливо зазначити, що загальний індекс R_a не враховує насичений червоний колір R_9 . Це є одним із головних недоліків класичної методики, особливо при оцінюванні світлодіодних джерел світла, у спектрі яких часто спостерігається дефіцит червоної складової. У таких випадках джерело може мати прийнятне значення R_a , наприклад 80–85, але водночас погано передавати червоні відтінки.

Для кожного тестового зразка визначається спеціальний індекс колірного передавання R_i . Він показує, наскільки добре досліджуване джерело світла передає конкретний колір порівняно з еталонним джерелом.

У загальному вигляді спеціальний індекс визначається за формулою:

$$R_i = 100 - 4,6\Delta E_i \quad (2.1)$$

де

R_i – спеціальний індекс колірного передавання для i -го тестового зразка;

ΔE_i – колірна різниця між виглядом i -го зразка при досліджуваному та еталонному джерелах світла;

4,6 – масштабний коефіцієнт, прийнятий у методиці МКО.

Із формули видно, що чим більшою є колірна різниця ΔE_i , тим нижчим буде значення спеціального індексу R_i . Якщо колірна різниця дорівнює нулю, то $R_i = 100$, тобто досліджуване джерело передає відповідний колір так само, як еталонне.

Наприклад, якщо для певного зразка колірна різниця становить $\Delta E_i = 2$, то:

$$R_i = 100 - 4,6 \cdot 2 = 90,8$$

Це означає, що відповідний колір передається досить добре. Якщо ж $\Delta E_i = 8$, тоді:

$$R_i = 100 - 4,6 \cdot 8 = 63,2$$

У такому випадку колірне передавання для цього зразка вже є незадовільним або обмежено придатним залежно від сфери застосування.

Загальний індекс колірного передавання R_a визначається як середнє арифметичне перших восьми спеціальних індексів:

$$R_a = \frac{1}{8} (R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6 + R_7 + R_8) \quad (2.2)$$

де

R_a – загальний індекс колірного передавання;

$R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6, R_7, R_8$ – спеціальні індекси колірного передавання для перших восьми тестових зразків.

Цей показник є найбільш поширеним у технічних характеристиках ламп, світильників і світлодіодних модулів. У практиці його часто використовують для швидкої оцінки якості джерела світла. Наприклад, лампи з $R_a < 80$ зазвичай не рекомендуються для приміщень, де важлива точність розпізнавання кольорів. Для офісів, навчальних приміщень і житлових зон зазвичай доцільно застосовувати джерела з $R_a \geq 80$, а для медичних, музейних або поліграфічних об'єктів – з $R_a \geq 90$ [5].

Таблиця 2.3 – Орієнтовне трактування значень загального індексу R_a

Значення R_a	Якість колірного передавання	Орієнтовна сфера застосування
90–100	Дуже висока	Медичні приміщення, музеї, поліграфія, дизайн, контроль якості
80–89	Добра	Офіси, навчальні аудиторії, житлові приміщення, торговельні зали
70–79	Задовільна	Складські приміщення, технічні зони, допоміжні приміщення
60–69	Обмежена	Зони, де точність кольору не є важливою
Менше 60	Низька	Використання небажане для більшості внутрішніх приміщень

Слід підкреслити, що наведена інтерпретація є узагальненою. Вибір допустимого рівня R_a має залежати від функціонального призначення приміщення, характеру зорової роботи, вимог до безпеки та нормативних документів.

Розрахунок індексу R_a за методикою МКО є багатоступеневою процедурою, яка передбачає використання спектральних даних досліджуваного джерела та стандартних тестових зразків.

У спрощеному вигляді процес можна подати так:

- 1) Визначення спектрального розподілу випромінювання досліджуваного джерела.
- 2) Обчислення колірних координат джерела.
- 3) Визначення корельованої колірної температури.
- 4) Вибір відповідного еталонного джерела.
- 5) Розрахунок кольорів тестових зразків при досліджуваному джерелі.
- 6) Розрахунок кольорів тестових зразків при еталонному джерелі.
- 7) Обчислення колірних різниць.
- 8) Визначення спеціальних індексів R_i .
- 9) Обчислення загального індексу R_a .
- 10) Інтерпретація отриманих результатів.

Таблиця 2.4 – Основні етапи розрахунку R_a за методикою МКО

Етап	Зміст етапу	Результат
1	Вимірювання або отримання спектра джерела	Функція $S(\lambda)$
2	Розрахунок координат кольору	X, Y, Z, x, y
3	Визначення SST	Корельована колірна температура
4	Вибір еталонного джерела	Абсолютно чорне тіло або денне світло
5	Розрахунок кольорів тестових зразків	Координати зразків під досліджуваним світлом
6	Розрахунок кольорів зразків під еталоном	Координати зразків під еталонним світлом
7	Визначення ΔE_i	Колірні різниці
8	Розрахунок R_i	Спеціальні індекси
9	Обчислення R_a	Загальний індекс колірного передавання
10	Аналіз результату	Висновок про якість джерела

Для кращого розуміння принципу роботи методики можна розглянути умовний приклад. Припустимо, що для досліджуваного джерела світла були отримані такі спеціальні індекси для перших восьми тестових зразків.

Таблиця 2.5 – Умовний приклад визначення загального індексу R_a

Номер зразка	Спеціальний індекс R_i
R_1	84
R_2	86
R_3	81
R_4	83
R_5	85
R_6	82
R_7	80
R_8	79

Тоді загальний індекс колірного передавання буде:

$$R_a = 84 + 86 + 81 + 83 + 85 + 82 + 80 + 79 = 82,5$$

Отже, досліджуване джерело має $R_a = 82,5$, що відповідає доброму рівню колірного передавання для більшості загальних внутрішніх приміщень.

Однак такий результат не дає повної інформації про передавання насичених кольорів. Наприклад, якщо для цього самого джерела $R_9 = 10$, то воно буде погано передавати червоний колір, незважаючи на прийнятний загальний індекс R_a . Саме тому у професійній світлотехнічній практиці доцільно аналізувати не тільки загальний індекс, але й окремі спеціальні індекси.

Класична методика МКО має низку переваг, завдяки яким вона тривалий час залишалася основним інструментом оцінювання колірного передавання.

По-перше, вона є стандартизованою. Це означає, що результати, отримані за цією методикою, можуть порівнюватися між різними джерелами світла, виробниками та лабораторіями.

По-друге, індекс R_a є простим для інтерпретації. Чим ближче значення до 100, тим кращим вважається колірне передавання. Саме ця простота зробила CRI поширеним у технічних паспортах освітлювального обладнання.

По-третє, методика має чіткий фізико-колориметричний апарат, що базується на спектральних вимірюваннях, стандартних тестових зразках і колірних просторах CIE [1; 8].

Таблиця 2.6 – Переваги класичної методики МКО

Перевага	Пояснення
Стандартизованість	Методика закріплена в документах СІЕ
Простота результату	Один числовий показник R_a зручний для порівняння
Міжнародне поширення	CRI використовується у технічній документації виробників
Зв'язок із колориметрією	Розрахунок базується на координатах кольору та колірних різницях
Практична зручність	Дозволяє швидко оцінити придатність джерела світла

Незважаючи на значне поширення, класична методика МКО має низку суттєвих обмежень. Вони стали особливо помітними після широкого впровадження світлодіодних джерел світла.

Першим обмеженням є використання лише восьми основних тестових зразків для розрахунку загального індексу R_a . Ці зразки мають помірну насиченість і не повністю відображають реальну різноманітність кольорів. Через це джерело може мати високий індекс R_a , але погано передавати насичені кольори.

Другим обмеженням є неврахування насиченого червоного кольору в загальному індексі. Показник R_9 не входить до формули R_a , хоча саме червоний колір є критичним у багатьох практичних сферах. Це особливо важливо для світлодіодів, спектр яких часто має недостатню інтенсивність у довгохвильовій червоній області.

Третім обмеженням є те, що індекс CRI показує лише ступінь відхилення кольору від еталона, але не дає інформації про характер цього відхилення. Наприклад, він не пояснює, чи став колір більш насиченим, менш насиченим, теплішим або холоднішим. У цьому сенсі CRI є інтегральним, але недостатньо діагностичним показником.

Четвертим обмеженням є використання застарілих колірних просторів та моделей адаптації, які не повністю відповідають сучасним уявленням про зорове сприйняття. Саме тому в новітніх системах, таких як TM-30,

використовуються інші колірні моделі та значно більший набір колірних зразків [7].

Таблиця 2.7 – Основні недоліки методики CRI

Недолік	Наслідок
Використання лише 8 основних зразків	Неповна характеристика кольоровідтворення
Відсутність R_9 у загальному індексі	Можлива неправильна оцінка передавання червоних кольорів
Один усереднений показник	Втрата інформації про окремі кольори
Недостатня придатність для LED	Можливе завищення або неповне відображення якості світлодіодів
Не показує зміну насиченості	Неможливо оцінити, чи кольори виглядають блідішими або насиченішими

Світлодіодні джерела світла мають принципово іншу спектральну структуру порівняно з лампами розжарювання та більшістю традиційних джерел. Типовий білий світлодіод має вузький синій максимум і широку смугу люмінофорного випромінювання в зеленій, жовтій та червоній областях спектра. Через це в його спектрі можуть виникати локальні провали, які істотно впливають на передавання окремих кольорів.

Д. О. Усіченко зазначає, що фотометричне та колориметричне оцінювання світлодіодних світильників потребує врахування спектрального складу випромінювання, оскільки саме він визначає не лише світлову ефективність, а й якість кольоровідтворення [6]. Тому при аналізі світлодіодів недостатньо обмежуватися лише загальним індексом R_a .

Наприклад, два світлодіодні джерела можуть мати однакове значення $R_a = 85$, але при цьому одне з них може мати $R_9 = 70$, а інше – $R_9 = -5$. У першому випадку червоні кольори будуть передаватися досить добре, у другому – значно спотворюватися. Отже, практична якість освітлення буде різною, хоча загальний індекс CRI формально однаковий.

Саме ця проблема стала однією з причин розроблення новітніх систем оцінювання, зокрема CIE 224:2017 та ANSI/IES TM-30-20 [7; 8].

Незважаючи на наявні обмеження, класична методика МКО залишається важливою для світлотехнічної практики. Вона використовується у технічній

документації джерел світла, нормативних вимогах, каталогах виробників і проєктній документації.

Індекс R_a є зручним первинним критерієм вибору джерела світла. Він дозволяє швидко відокремити джерела з низькою якістю колірного передавання від джерел, які можуть застосовуватися у приміщеннях із підвищеними вимогами до візуального комфорту.

Водночас у сучасних умовах використання R_a доцільно поєднувати з іншими показниками, такими як:

- спеціальні індекси R_i , особливо R_9 ;
- корельована колірна температура CCT;
- відхилення від планківської кривої D_{uv} ;
- індекс точності кольору R_f ;
- індекс насиченості кольору R_g ;
- спектральний розподіл потужності джерела.

Такий комплексний підхід дозволяє отримати більш повне уявлення про якість світла.

Класична методика оцінювання колірного передавання МКО є базовим міжнародним підходом до кількісної характеристики здатності джерел світла відтворювати кольори об'єктів. Її основою є порівняння вигляду стандартних тестових зразків під досліджуванним та еталонним джерелами світла.

Головним результатом методики є загальний індекс колірного передавання R_a , який визначається як середнє значення перших восьми спеціальних індексів R_i . Цей показник є простим, зручним і широко застосовується в інженерній практиці.

Разом із тим методика має обмеження, пов'язані з малою кількістю тестових зразків, неврахуванням насиченого червоного кольору в загальному індексі та недостатньою придатністю для оцінювання сучасних світлодіодних джерел світла. Тому в подальшому доцільно розглянути як класичний алгоритм

розрахунку CRI, так і новітні системи оцінювання колірної точності, зокрема TM-30.

2.2 Алгоритм розрахунку індексу колірного передавання CRI

Алгоритм розрахунку індексу колірного передавання CRI є формалізованою процедурою, що базується на порівнянні колірного вигляду стандартних тестових зразків при освітленні досліджуваним і еталонним джерелами світла. У методиці МКО цей розрахунок виконується не за візуальною оцінкою, а на основі спектральних, фотометричних і колориметричних даних. Тому індекс CRI можна розглядати як результат математичної обробки спектрального розподілу випромінювання джерела світла з урахуванням властивостей стандартного спостерігача та тестових кольорових зразків [1; 8].

Основною метою розрахунку є визначення того, наскільки сильно змінюються кольори стандартних зразків під дією досліджуваного джерела порівняно з еталонним джерелом тієї самої або близької корельованої колірної температури. Якщо кольори зразків майже не змінюються, джерело має високий індекс колірного передавання. Якщо ж колірні відмінності значні, індекс CRI зменшується.

Першим етапом алгоритму є підготовка вхідних даних. Основною вихідною інформацією для розрахунку є спектральний розподіл потужності випромінювання досліджуваного джерела світла $S(\lambda)$. Ця функція показує, яку відносну або абсолютну потужність має випромінювання на кожній довжині хвилі у видимому діапазоні.

У загальному вигляді алгоритм розрахунку CRI включає такі основні етапи:

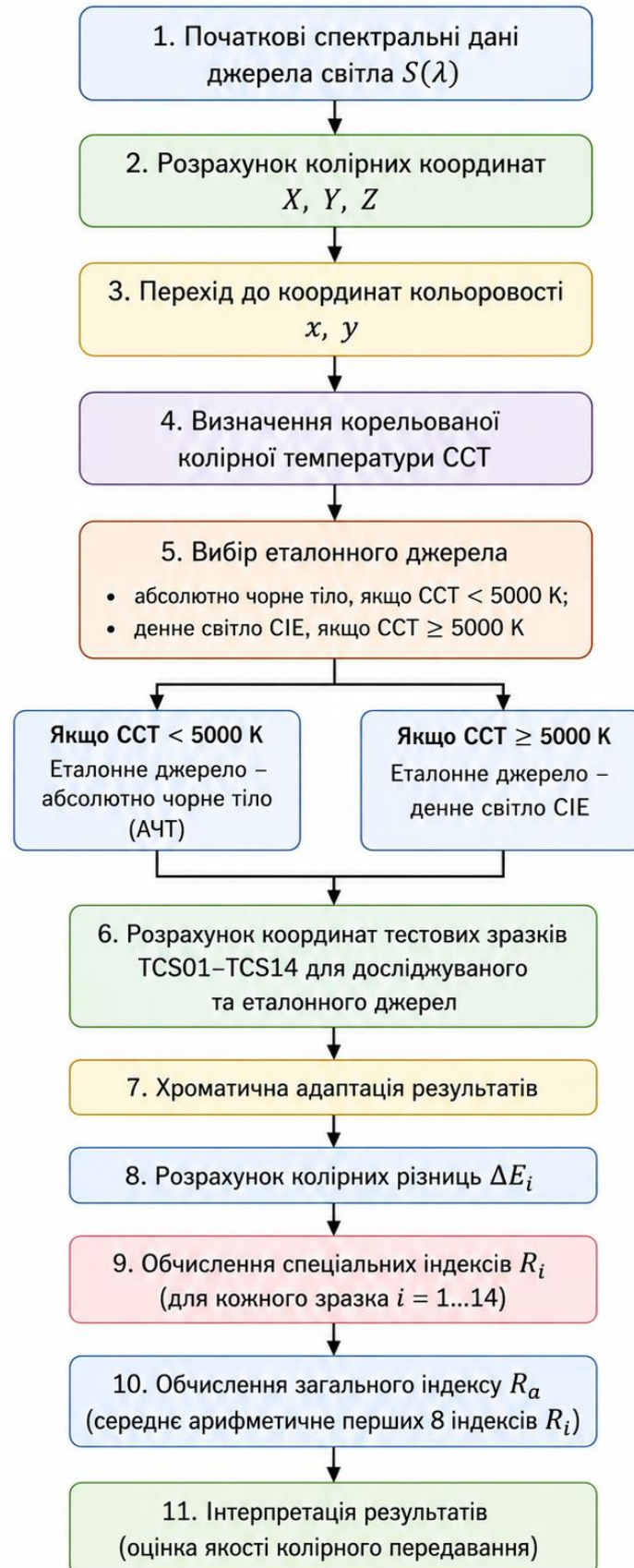


Рисунок 2.2 – Структурна схема алгоритму розрахунку CRI

У практичних розрахунках спектральний розподіл зазвичай задається у діапазоні від 380 до 780 нм з певним кроком, наприклад 1 нм, 5 нм або 10 нм.

Чим менший крок вимірювання, тим точніше можна виконати колориметричні розрахунки.

Таблиця 2.8 – Основні вхідні дані для розрахунку CRI

Вхідний параметр	Позначення	Зміст параметра
Спектральний розподіл випромінювання	$S(\lambda)$	Потужність випромінювання джерела на кожній довжині хвилі
Функції колірної відповідності	$\underline{x}(\lambda), \underline{y}(\lambda), \underline{z}(\lambda)$	Стандартні функції спостерігача CIE
Спектральні коефіцієнти відбиття тестових зразків	$\rho_i(\lambda)$	Відбиття і-го тестового кольорового зразка
Дані еталонного джерела	$S_r(\lambda)$	Спектр абсолютно чорного тіла або денного світла
Набір тестових кольорових зразків	TCS01–TCS14	Стандартизовані зразки для оцінювання колірного передавання

Функція $S(\lambda)$ може бути отримана експериментально за допомогою спектрорадіометра або взята з технічного паспорта джерела світла. Для точних розрахунків бажано використовувати саме виміряний спектр, оскільки паспортні дані часто подаються у спрощеному або згладженому вигляді.

Після отримання спектрального розподілу випромінювання необхідно визначити колірні координати джерела світла в системі CIE XYZ. Для цього спектр джерела множиться на функції колірної відповідності стандартного спостерігача та інтегрується за довжинами хвиль:

$$X = k \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda) \underline{x}(\lambda) d\lambda \quad (2.3)$$

$$Y = k \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda) \underline{y}(\lambda) d\lambda \quad (2.4)$$

$$Z = k \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda) \underline{z}(\lambda) d\lambda \quad (2.5)$$

де X, Y, Z – tristimulus координати кольору джерела світла;

$S(\lambda)$ – спектральний розподіл випромінювання;

$\underline{x}(\lambda), \underline{y}(\lambda), \underline{z}(\lambda)$ – функції колірної відповідності стандартного спостерігача CIE;

k – нормувальний коефіцієнт;

λ_1, λ_2 – межі видимого діапазону спектра.

Нормувальний коефіцієнт k застосовується для приведення результатів до зручного масштабу. Часто його обирають так, щоб координата Y дорівнювала 100.

Після цього визначаються координати кольоровості:

$$x = \frac{X}{X+Y+Z} \quad (2.6)$$

$$y = \frac{Y}{X+Y+Z} \quad (2.7)$$

Координати x і y описують колір джерела незалежно від його абсолютної яскравості. Саме вони використовуються для визначення корельованої колірної температури та положення джерела на хроматичній діаграмі CIE 1931 [8].

Наступним етапом є визначення корельованої колірної температури CCT. Вона показує, якій температурі абсолютно чорного тіла найбільш відповідає колір досліджуваного джерела світла.

Для джерел, що лежать поблизу планківської кривої, CCT є важливою характеристикою, оскільки саме за нею у методиці МКО обирається еталонне джерело світла. Якщо CCT менша за 5000 К, еталоном є випромінювання абсолютно чорного тіла. Якщо CCT дорівнює або перевищує 5000 К, еталоном є стандартне денне світло CIE [1].

Таблиця 2.9 – Зв'язок CCT з вибором еталонного джерела

ССТ досліджуваного джерела	Еталон у методиці CRI	Приклад джерел
2700–3000 К	Абсолютно чорне тіло	Лампи розжарювання, теплі LED
3500–4500 К	Абсолютно чорне тіло	Нейтрально-білі LED
5000–6500 К	Денне світло CIE	Холодно-білі LED, денні лампи
Понад 6500 К	Денне світло CIE	Спеціальні джерела холодного білого світла

Важливо зазначити, що CCT не є показником якості колірного передавання. Вона лише визначає загальний відтінок світла та використовується для вибору коректного еталона. Джерела з однаковою CCT можуть мати дуже різні значення CRI через відмінності у спектральному складі.

Еталонне джерело повинно мати таку саму або максимально близьку корельовану колірну температуру, як і досліджуване джерело. Це забезпечує коректність порівняння, оскільки оцінюється саме здатність передавати кольори, а не відмінність між теплим і холодним світлом.

У розрахунках еталонний спектр позначається як $S_r(\lambda)$, де індекс r походить від англійського слова reference – еталон. Для еталонного джерела також розраховуються координати кольору X_r, Y_r, Z_r , координати кольоровості x_r, y_r , а також координати тестових зразків. Надалі ці дані порівнюються з результатами, отриманими для досліджуваного джерела.

На цьому етапі враховується не лише спектр джерела світла, а й спектральні властивості тестових зразків. Кожен тестовий зразок має власний спектральний коефіцієнт відбиття $\rho_i(\lambda)$. Це означає, що він відбиває різні довжини хвиль з різною інтенсивністю.

Для i -го тестового зразка спектр відбитого світла під досліджуванням джерелом можна подати як:

$$S_i(\lambda) = S(\lambda)\rho_i(\lambda) \quad (2.8)$$

де $S_i(\lambda)$ – спектр світла, відбитого від i -го тестового зразка;

$S(\lambda)$ – спектральний розподіл досліджуваного джерела;

$\rho_i(\lambda)$ – спектральний коефіцієнт відбиття i -го тестового зразка.

Аналогічно для еталонного джерела:

$$S_{ri}(\lambda) = S_r(\lambda)\rho_i(\lambda) \quad (2.9)$$

Далі для кожного тестового зразка розраховуються тристимульні координати:

$$X_i = k \int S(\lambda) \rho_i(\lambda) \underline{x}(\lambda) d\lambda \quad (2.10)$$

$$Y_i = k \int S(\lambda) \rho_i(\lambda) \underline{y}(\lambda) d\lambda \quad (2.11)$$

$$Z_i = k \int S(\lambda) \rho_i(\lambda) \underline{z}(\lambda) d\lambda. \quad (2.12)$$

Аналогічні координати визначаються для еталонного джерела:

$$X_{ri} = k_r \int S_r(\lambda) \rho_i(\lambda) \underline{x}(\lambda) d\lambda \quad (2.13)$$

$$Y_{ri} = k_r \int S_r(\lambda) \rho_i(\lambda) \underline{y}(\lambda) d\lambda \quad (2.14)$$

$$Z_{ri} = k_r \int S_r(\lambda) \rho_i(\lambda) \underline{z}(\lambda) d\lambda \quad (2.15)$$

Таким чином, для кожного тестового зразка отримують дві групи координат: одну – для досліджуваного джерела, другу – для еталонного.

Оскільки досліджуване й еталонне джерела можуть мати незначні відмінності у кольоровості, у методиці CRI застосовується процедура хроматичної адаптації. Вона необхідна для приведення результатів до умов, за яких порівняння кольорів є більш коректним.

Хроматична адаптація моделює здатність зорової системи людини частково пристосовуватися до кольору освітлення. Наприклад, аркуш білого паперу сприймається білим як при теплому, так і при холодному освітленні, хоча фізичний спектр відбитого світла відрізняється. Саме тому пряме порівняння координат без урахування адаптації може давати завищені колірні відмінності.

У класичній методиці CRI для цього використовуються перетворення в колірному просторі, пов'язаному з координатами u, v , а надалі результати переводяться до простору, в якому визначається колірна різниця [1].

Після розрахунку координат тестових зразків необхідно перейти до такого колірнього простору, у якому можна визначати колірні відмінності. У класичній методиці МКО використовується простір, пов'язаний із системою СІЕ 1964 $U * V * W *$.

Колірна різниця для i -го зразка визначається як відстань між координатами цього зразка при досліджуваному та еталонному джерелах:

$$\Delta E_i = \sqrt{(U_i^* - U_{ri}^*)^2 + (V_i^* - V_{ri}^*)^2 + (W_i^* - W_{ri}^*)^2} \quad (2.16)$$

де

ΔE_i – колірна різниця для i -го тестового зразка;

U_i^*, V_i^*, W_i^* – координати i -го зразка при досліджуваному джерелі;

$U_{ri}^*, V_{ri}^*, W_{ri}^*$ – координати i -го зразка при еталонному джерелі.

Чим менше значення ΔE_i , тим ближчим є вигляд кольору до еталонного. Якщо $\Delta E_i = 0$, це означає повну відповідність кольору в межах прийнятої математичної моделі.

Після визначення колірних різниць для кожного тестового зразка обчислюються спеціальні індекси колірнього передавання:

$$R_i = 100 - 4,6\Delta E_i \quad (2.17)$$

де

R_i – спеціальний індекс колірнього передавання для i -го зразка;

ΔE_i – колірна різниця між досліджуваним та еталонним освітленням;

4,6 – масштабний коефіцієнт методики СІЕ.

Значення R_i може бути як додатним, так і від'ємним. Високі значення свідчать про добру передачу конкретного кольору, низькі або від'ємні – про суттєве спотворення.

Таблиця 2.10 – Приклад розрахунку спеціальних індексів R_i

Зразок	Колірна різниця ΔE_i	Розрахунок	R_i
TCS01	2,0	$100-4,6 \cdot 2,0$	90,8
TCS02	2,5	$100-4,6 \cdot 2,5$	88,5
TCS03	3,0	$100-4,6 \cdot 3,0$	86,2
TCS04	3,4	$100-4,6 \cdot 3,4$	84,4
TCS05	3,8	$100-4,6 \cdot 3,8$	82,5
TCS06	4,1	$100-4,6 \cdot 4,1$	81,1
TCS07	4,5	$100-4,6 \cdot 4,5$	79,3
TCS08	4,8	$100-4,6 \cdot 4,8$	77,9

Цей приклад показує, що навіть при помірних колірних відмінностях спеціальні індекси можуть помітно знижуватися. Саме тому спектральна нерівномірність джерела світла безпосередньо впливає на результат розрахунку CRI.

Після отримання перших восьми спеціальних індексів обчислюється загальний індекс колірного передавання:

$$R_a = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 R_i \quad (2.18)$$

або у розгорнутому вигляді:

$$R_a = \frac{R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6 + R_7 + R_8}{8} \quad (2.19)$$

Для наведеного вище прикладу:

$$R_a = \frac{90,8 + 88,5 + 86,2 + 84,4 + 82,5 + 81,1 + 79,3 + 77,9}{8}$$

Отже, досліджуване джерело світла має загальний індекс колірного передавання $R_a = 83,8$, що відповідає доброму рівню кольоровідтворення для більшості приміщень загального призначення.

Однак цей результат не дає повної інформації про всі кольори, оскільки до розрахунку R_a входять лише перші вісім тестових зразків. Тому для більш глибокого аналізу необхідно додатково оцінювати індекси $R_9, R_{10}, R_{11}, R_{12}, R_{13}, R_{14}$.

Особливу увагу при аналізі CRI слід приділяти індексу R_9 , який характеризує передавання насиченого червоного кольору. Він не входить до загального індексу R_a , але має велике практичне значення.

Низьке значення R_9 може бути критичним для:

- медичних приміщень;
- операційних і процедурних кабінетів;
- харчової промисловості;
- магазинів м'яса, фруктів, овочів;
- косметології;
- фотографії;
- музейного освітлення.

Таблиця 2.11 – Практичне значення індексу R_9

Значення R_9	Характеристика передавання червоного кольору	Практична оцінка
80–100	Дуже добре	Придатне для медичних, музейних і торговельних об'єктів
50–79	Добре	Прийнятне для більшості інтер'єрів
0–49	Низьке	Можливе спотворення червоних кольорів
Менше 0	Дуже низьке	Джерело небажане для задач точного розпізнавання кольорів

У світлодіодних джерелах низький R_9 часто виникає через недостатню інтенсивність випромінювання у довгохвильовій червоній області спектра. Через це шкіра людини може виглядати неприродно, а червоні об'єкти – тьмяними або коричнюватими.

Для систематизації всього алгоритму доцільно подати його у вигляді узагальненої таблиці.

Таблиця 2.12 – Узагальнений алгоритм розрахунку індексу CRI

№ етапу	Назва етапу	Вхідні дані	Вихідні дані
1	Отримання спектра джерела	$S(\lambda)$	Спектральний розподіл випромінювання
2	Розрахунок XYZ	$S(\lambda)$, функції CIE	X,Y,Z
3	Розрахунок координат x, y	X, Y, Z	Координати кольоровості
4	Визначення CCT	x, y	Корельована колірна температура
5	Вибір еталона	CCT	$S_r(\lambda)$
6	Розрахунок кольорів TCS	$S(\lambda), S_r(\lambda), \rho_i(\lambda)$	Координати зразків
7	Хроматична адаптація	Координати зразків	Скориговані координати
8	Розрахунок ΔE_i	Координати досліджуваного та еталонного зразків	Колірні різниці
9	Розрахунок R_i	ΔE_i	Спеціальні індекси
10	Розрахунок R_a	R1–R8	Загальний індекс CRI
11	Аналіз результатів	R_a, R_i	Висновок про якість джерела

Алгоритм розрахунку індексу колірного передавання CRI є послідовною колориметричною процедурою, що починається з аналізу спектрального розподілу джерела світла і завершується визначенням загального індексу R_a . Основою розрахунку є порівняння кольорів стандартних тестових зразків при освітленні досліджуванім і еталонним джерелами.

Ключовими етапами алгоритму є розрахунок координат кольору, визначення корельованої колірної температури, вибір еталонного джерела, обчислення колірних різниць та визначення спеціальних індексів R_i . Загальний індекс R_a розраховується як середнє арифметичне перших восьми спеціальних індексів.

Разом із тим для повної оцінки джерела світла необхідно аналізувати не лише R_a , а й окремі спеціальні індекси, особливо R_9 , який характеризує передавання насиченого червоного кольору. Це має особливе значення для світлодіодних джерел, спектральний склад яких може бути нерівномірним. Саме тому класичний CRI доцільно використовувати як базовий, але не єдиний показник якості колірного передавання.

2.3 Новітня система оцінювання колірної точності TM-30

У сучасній світлотехніці поряд із класичним індексом колірного передавання CRI дедалі ширше застосовується новітня система оцінювання колірної точності TM-30, розроблена Illuminating Engineering Society. Її поява була зумовлена тим, що традиційна методика МКО CIE 13.3-1995, незважаючи на зручність і багаторічне використання, не завжди достатньо повно характеризує колірне передавання сучасних джерел світла, особливо світлодіодних. Методика TM-30 була запропонована для того, щоб не лише визначати середню точність відтворення кольорів, а й показувати характер зміни кольору: зменшення або збільшення насиченості, зміщення відтінку, нерівномірність передавання окремих колірних груп.

На відміну від CRI, який переважно зводить оцінювання до одного усередненого показника R_a , система TM-30 використовує комплекс взаємопов'язаних числових і графічних характеристик. Основними з них є:

- індекс точності кольору R_f ;
- індекс насиченості або колірної гами R_g ;
- векторна графіка кольоровідтворення;
- локальні індекси за відтінковими секторами;
- оцінювання за 99 колірними зразками CES.

Сучасна версія методики представлена у стандарті ANSI/IES TM-30-20, а в 2024 році IES також опублікувала оновлену редакцію ANSI/IES TM-30-24. У дипломній роботі доцільно посилалися на TM-30-20 як на поширену й усталену редакцію, а TM-30-24 згадати як оновлену сучасну версію методики. Згідно з описом IES і DOE, методика TM-30 оцінює колірне передавання на основі 99 колірних оцінювальних зразків і забезпечує значно ширший обсяг інформації порівняно з попередніми індексами колірного передавання [8].

Необхідність створення нової системи оцінювання була пов'язана насамперед із розвитком світлодіодних технологій. Традиційні джерела світла –

лампи розжарювання, галогенні лампи, люмінесцентні та газорозрядні лампи – мали відносно передбачувані спектральні характеристики. Натомість світлодіодні джерела можуть мати дуже різні спектральні розподіли навіть за однакової корельованої колірної температури та однакового значення CRI.

Проблема полягає в тому, що джерело світла може мати $R_a = 80$ або навіть $R_a = 90$, але при цьому погано передавати певні групи кольорів, наприклад насичені червоні або синьо-зелені відтінки. Це відбувається тому, що класичний CRI розраховується лише за вісьмома основними тестовими зразками, які мають помірну насиченість. У результаті деякі спектральні недоліки джерела можуть бути «приховані» в усередненому значенні R_a .

У дослідженні A. David, K. A. G. Smet, L. Whitehead, M. Royer та інших авторів було показано, що для сучасних джерел світла доцільно використовувати двопараметричну систему оцінювання, яка одночасно враховує точність передавання кольорів і зміну їхньої насиченості [12]. Саме ця ідея стала основою методики TM-30.

Таблиця 2.13 – Передумови переходу від CRI до TM-30

Недолік класичного CRI	Як це враховано у TM-30
Використання лише 8 основних тестових зразків	Застосовується 99 колірних оцінювальних зразків
Один усереднений показник R_a	Використовуються R_f, R_g , локальні індекси та графіки
Слабка чутливість до насичених кольорів	Враховано ширший набір реальних кольорових поверхонь
Не показує напрям зміни кольору	Використовується векторна графіка
Недостатня інформативність для LED	Методика краще пристосована до джерел зі складним спектром

Таким чином, TM-30 не просто замінює один показник іншим, а вводить розширену систему аналізу, яка дозволяє глибше оцінити поведінку джерела світла щодо різних кольорів.

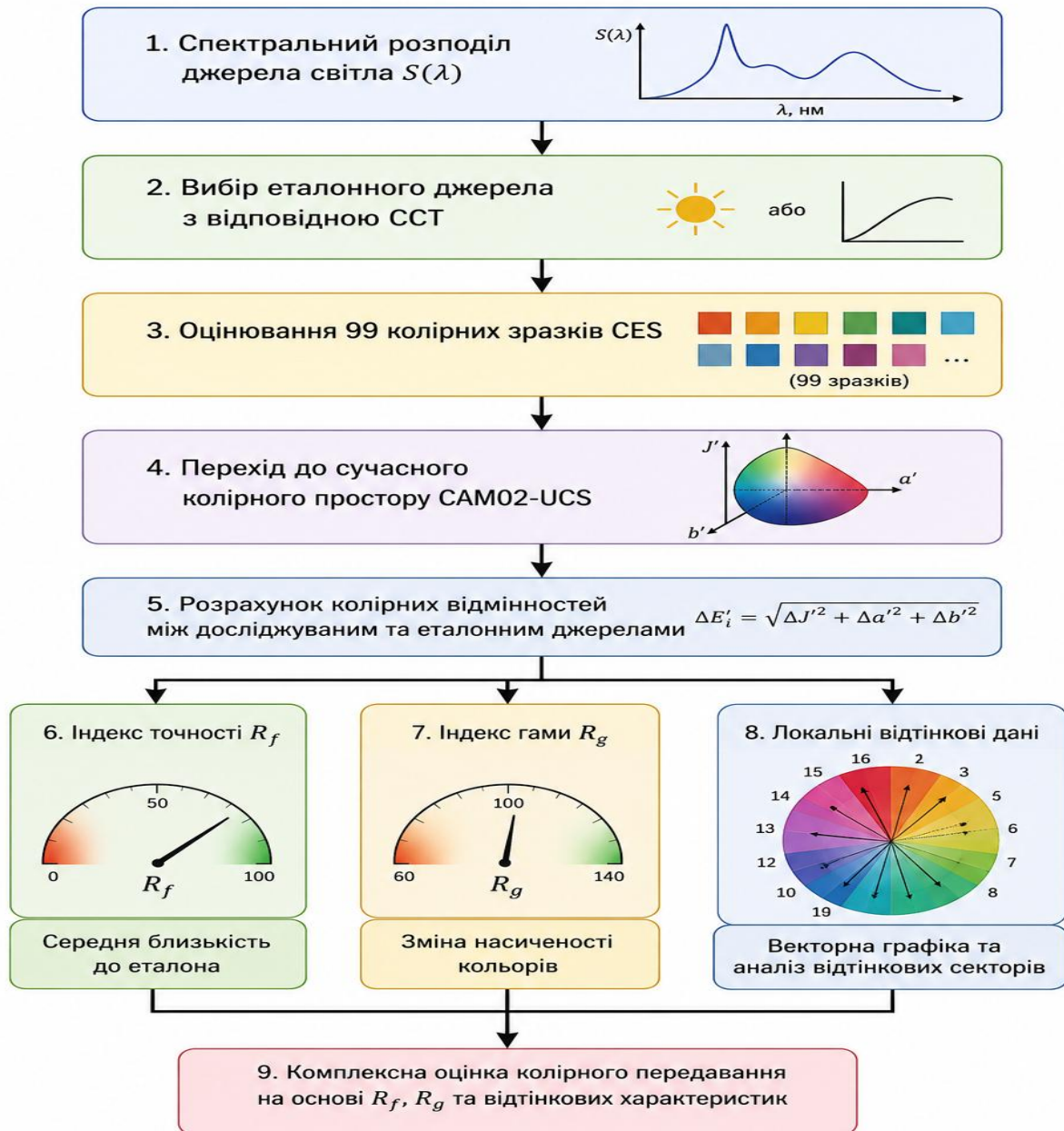


Рисунок 2.3 – Загальна структура системи ТМ-30

Система ТМ-30 складається з декількох рівнів оцінювання. Перший рівень – це інтегральні числові показники R_f та R_g . Другий рівень – це аналіз окремих груп кольорів за відтінковими секторами. Третій рівень – графічне подання результатів за допомогою векторної діаграми та діаграми спотворення кольорової гами.

У цій схемі видно, що ТМ-30 не обмежується одним числовим значенням. Вона дозволяє оцінити, наскільки точно джерело передає кольори, чи робить воно їх більш насиченими або менш насиченими, а також у яких саме ділянках колірного простору виникають найбільші відхилення.

Однією з головних відмінностей TM-30 від CRI є використання 99 кольорних оцінювальних зразків – CES (Color Evaluation Samples). Вони були підібрані таким чином, щоб краще відображати реальні кольори природних і штучних об'єктів. До набору входять кольори, характерні для шкіри, тканин, фарб, рослинності, харчових продуктів, поліграфічних матеріалів та інших типових поверхонь.

На відміну від восьми основних зразків CRI, 99 зразків TM-30 охоплюють значно ширший простір кольорів. Це підвищує точність оцінювання, оскільки зменшує ризик того, що окремі спектральні недоліки джерела залишаться непоміченими.

Таблиця 2.14 – Порівняння тестових зразків CRI та TM-30

Ознака	CRI / CIE 13.3-1995	TM-30
Кількість основних тестових зразків	8	99
Загальна кількість зразків	14	99
Тип тестових кольорів	Переважно помірно насичені	Реальні природні та штучні кольори
Представлення кольорового простору	Обмежене	Значно ширше
Урахування насичених кольорів	Часткове	Повне
Наявність оцінки червоного кольору	Лише через R_9	Враховується у загальному аналізі
Придатність для LED-джерел	Обмежена	Висока
Оцінка зміни насиченості	Відсутня	$\epsilon (R_g)$
Векторний аналіз кольорів	Відсутній	ϵ
Тип кінцевого результату	Один інтегральний індекс R_a	Комплексна система показників

Доцільно підкреслити, що саме збільшення кількості зразків є однією з причин більшої надійності TM-30 для оцінювання світлодіодних джерел. Методика не лише розширює набір кольорів, а й забезпечує їх більш рівномірний розподіл у кольоровому просторі.

Першим основним показником TM-30 є індекс точності кольору R_f (Fidelity Index). Він показує, наскільки близько кольори 99 оцінювальних зразків під досліджуваним джерелом відповідають їхньому вигляду під еталонним джерелом.

За змістом R_f подібний до класичного індексу R_a , оскільки обидва показники характеризують середню точність колірного передавання. Однак R_f вважається більш інформативним через використання більшої кількості зразків, сучаснішого колірного простору та вдосконалених моделей колірної адаптації.

У CIE 224:2017 індекс R_f визначається як загальний індекс колірної точності, який характеризує, наскільки близько в середньому відтворюються кольори всього набору зразків у порівнянні з еталонним освітлювачем [8].

Значення R_f змінюється в межах від 0 до 100:

$R_f = 100$ – кольори передаються практично ідентично еталонному освітленню;

$R_f = 80 - 90$ – добра точність кольоровідтворення;

$R_f < 80$ – помітні відхилення кольорів;

$R_f < 70$ – низька точність кольоровідтворення.

Таблиця 2.15 – Орієнтовне трактування значень R_f

Значення R_f	Характеристика точності кольору	Практичне трактування
95–100	Дуже висока точність	Джерело майже не спотворює кольори
90–94	Висока точність	Придатне для музейного, медичного, дизайнерського освітлення
80–89	Добра точність	Придатне для офісів, навчальних і житлових приміщень
70–79	Середня точність	Можливе застосування у технічних і допоміжних зонах
Менше 70	Низька точність	Небажане для задач, де важливе розпізнавання кольорів

Важливо зазначити, що R_f , як і R_a , характеризує лише ступінь близькості до еталона. Він не показує, чи кольори стали більш насиченими або менш насиченими. Для цього в ТМ-30 використовується другий основний показник – R_g .

Другим ключовим показником ТМ-30 є індекс колірної гами R_g (Gamut Index). Він характеризує зміну площі кольорової гами тестових зразків під досліджуванним джерелом порівняно з еталонним джерелом.

Якщо $R_g = 100$, це означає, що середня насиченість кольорів приблизно відповідає еталонному освітленню. Якщо $R_g > 100$, кольори в середньому виглядають більш насиченими. Якщо $R_g < 100$, кольори виглядають менш насиченими, тобто блідішими.

Таблиця 2.16 – Орієнтовне трактування значень R_g

Значення R_g	Характер зміни кольорів	Практичне значення
95–105	Близьке до еталонного передавання	Природне сприйняття кольорів
Понад 105	Підвищена насиченість	Кольори виглядають яскравішими, можливий декоративний ефект
90–95	Помірне зниження насиченості	Кольори можуть виглядати трохи приглушено
Менше 90	Помітне зниження насиченості	Кольори виглядають блідими або менш виразними

Індекс R_g є особливо важливим у торговельному, музейному, архітектурному та дизайнерському освітленні. Наприклад, у магазині фруктів і овочів джерело з $R_g > 100$ може зробити продукцію візуально привабливішою. Однак у музеях надмірна зміна насиченості може бути небажаною, оскільки головною вимогою є достовірне відтворення кольорів експонатів.

Окремо взяті показники R_f не дають повної картини. Їх потрібно аналізувати разом. Саме комбінація цих індексів дозволяє зрозуміти, чи джерело світла точно передає кольори та чи не змінює їхню насиченість.

Таблиця 2.17 – Приклади інтерпретації комбінацій R_f і R_g

Значення R_f	Значення R_g	Інтерпретація
95	100	Дуже точне й природне передавання кольорів
90	108	Висока точність, але кольори дещо насиченіші
85	95	Добра точність, але кольори трохи приглушені
75	110	Середня точність із помітним підсиленням насиченості
65	85	Низька точність і знижена насиченість кольорів

Наприклад, два джерела можуть мати однаковий $R_f = 85$, але різні R_g . Якщо перше має $R_g = 100$, воно передає кольори природно, хоча з певними відхиленнями. Якщо друге має $R_g = 115$, кольори будуть помітно

перенасиченими. У класичній системі CRI така різниця могла б залишитися непоміченою.

Ще однією перевагою TM-30 є можливість локального аналізу кольорів за відтінковими секторами. У методиці кольоровий простір поділяється на 16 секторів, кожен з яких відповідає певній групі відтінків. Це дозволяє визначити, які саме кольори передаються найкраще, а які – із помітними відхиленнями.

Таблиця 2.18 – Приклад відтінкових секторів у TM-30

Номер сектора	Орієнтовна група кольорів	Практичне значення
1–2	Червоні відтінки	Шкіра, м'ясо, текстиль, декоративні матеріали
3–4	Оранжеві та жовті	Деревина, теплі інтер'єрні поверхні, харчові продукти
5–6	Жовто-зелені	Рослинність, упаковка, інтер'єрні елементи
7–8	Зелені	Листя, овочі, природні матеріали
9–10	Блакитно-зелені	Вода, скло, декоративні поверхні
11–12	Сині	Текстиль, поліграфія, сигнальні кольори
13–14	Фіолетові	Декоративні матеріали, художні об'єкти
15–16	Пурпурові та рожеві	Косметика, шкіра, тканини

Такий підхід є дуже корисним для практичного вибору освітлення. Наприклад, для медичного кабінету важливо, щоб червоні та рожеві відтінки передавалися природно. Для магазину зелені або овочів важливішими можуть бути зелені сектори. Для художньої галереї важливе рівномірне передавання всіх секторів.

Одним із найцінніших елементів TM-30 є векторна графіка кольоровідтворення. Вона показує не лише величину, а й напрям зміщення кольорів під досліджуваним джерелом світла.

У такій графіці еталонне джерело зазвичай подається у вигляді базового контуру, а досліджуване джерело – у вигляді іншого контуру або векторів зміщення. Якщо контур досліджуваного джерела збігається з еталонним, кольори передаються без суттєвих спотворень. Якщо контур виходить за межі еталонного, це означає підвищення насиченості. Якщо контур розташований всередині – зниження насиченості.

У практичному сенсі векторна графіка дозволяє швидко побачити, наприклад, що джерело світла підсилює червоні та жовті відтінки, але приглушує сині. Така інформація є недоступною при використанні лише одного індексу CRI.

Алгоритм розрахунку TM-30 подібний до CRI тим, що починається зі спектрального розподілу джерела світла та порівняння з еталонним джерелом. Однак подальша обробка є більш складною й інформативною.

На відміну від класичного CRI, де результат переважно зводиться до R_a , у TM-30 кінцевим результатом є набір числових і графічних показників.

Світлодіодні джерела світла є найбільш показовим прикладом необхідності використання TM-30. Їхній спектральний склад може істотно змінюватися залежно від типу кристала, люмінофора, технології виготовлення, колірної температури та призначення світильника.

Наприклад, світлодіод із високою енергоефективністю може мати спектр із недостатньою червоною складовою. У цьому випадку його R_a може бути прийнятним, але червоні й рожеві кольори будуть виглядати неприродно. TM-30 дозволяє виявити це через локальні відтінкові сектори та індекс R_g .

Інший приклад – декоративні світлодіодні джерела, які спеціально підсилюють певні спектральні ділянки. Вони можуть робити кольори більш насиченими, що буде корисним у торговельному освітленні, але небажаним у музейному або медичному середовищі. У такому випадку R_f і R_g дозволяють оцінити баланс між точністю та візуальною виразністю.

Таблиця 2.19 – Приклади використання TM-30 для різних об'єктів

Об'єкт застосування	Бажані характеристики TM-30	Пояснення
Медичний кабінет	Високий R_f і R_g близько 100	Потрібне природне передавання шкіри та тканин
Музей	Дуже високий R_f , стабільний R_g	Важлива достовірність кольорів експонатів
Магазин продуктів	Високий R_f , можливе $R_g > 100$	Допускається помірне підсилення насиченості
Офіс	$R_f \geq 80$, R_g близько 100	Потрібен комфорт і природність

Продовження таблиці 2.19

Дизайнерська студія	Високий R_f , рівномірні сектори	Важлива точність роботи з кольорами
Архітектурне декоративне освітлення	Баланс R_f і бажаного R_g	Можливе художнє керування кольором

Система TM-30 має низку важливих переваг порівняно з класичною методикою CRI.

По-перше, вона використовує значно більшу кількість кольорових зразків. Це дозволяє точніше оцінити джерела зі складним або нерівномірним спектром.

По-друге, вона розділяє поняття точності та насиченості. Це важливо, оскільки джерело може точно передавати кольори, але робити їх трохи більш або менш насиченими.

По-третє, TM-30 надає графічну інформацію, яка зручна для проєктувальників, дизайнерів і світлотехніків.

По-четверте, методика краще адаптована до аналізу світлодіодних джерел світла, оскільки дозволяє виявляти спектральні особливості, які не завжди відображаються в CRI.

Таблиця 2.20 – Основні переваги TM-30

Перевага	Зміст
Більша кількість зразків	99 CES замість 8 основних зразків CRI
Оцінювання точності	Індекс R_f показує близькість до еталона
Оцінювання насиченості	Індекс R_g показує зміну колірної гами
Графічна інтерпретація	Векторна графіка показує напрям зміщення кольорів
Придатність для LED	Методика краще виявляє спектральні особливості світлодіодів
Практична гнучкість	Можна підбирати освітлення під конкретне завдання

Попри значні переваги, система TM-30 має і певні обмеження. Насамперед вона є складнішою для розуміння та застосування, ніж CRI. Якщо індекс R_a дає один простий показник, то TM-30 потребує аналізу кількох параметрів одночасно.

Другою особливістю є те, що R_f і R_g не завжди однозначно визначають «краще» або «гірше» світло. Наприклад, $R_g = 108$ може бути корисним у торговельному освітленні, але небажаним у музеї. Отже, інтерпретація результатів залежить від призначення освітлювальної системи.

Третім обмеженням є менша поширеність TM-30 у технічних паспортах побутових джерел світла. Багато виробників досі вказують лише CRI, тому для повного аналізу часто потрібні додаткові спектральні дані.

Таблиця 2.21 – Обмеження системи TM-30

Обмеження	Наслідок
Складніша структура показників	Потребує підготовки для правильної інтерпретації
Залежність оцінки від призначення освітлення	Одні й ті самі значення можуть бути бажаними або небажаними
Не завжди подається виробниками	Потрібні додаткові спектральні вимірювання
Більший обсяг розрахунків	Складніше виконувати вручну
Не є прямим показником зорового комфорту	Потрібно враховувати освітленість, блискавість, CCT та інші параметри

У сучасній світлотехнічній практиці TM-30 розглядається як більш інформативний інструмент, ніж CRI, але не обов'язково як його повна заміна. CRI залишається простим і звичним показником для швидкого порівняння джерел світла. TM-30, у свою чергу, застосовується тоді, коли потрібна глибша оцінка якості світла, особливо для професійних, комерційних, медичних, музейних і дизайнерських задач.

М. Р. Royer у навчально-методичній праці щодо використання ANSI/IES TM-30 підкреслює, що ця система є набором взаємопов'язаних метрик і графіків, які мають використовуватися разом для повної оцінки колірного передавання джерела світла [13]. Це означає, що недоцільно робити висновок лише за одним числом R_f або R_g . Правильна оцінка має враховувати комбінацію цих показників, призначення освітлення та форму векторної графіки.

Новітня система TM-30 є сучасним і більш інформативним підходом до оцінювання колірного передавання джерел світла. Її основна перевага полягає в

тому, що вона не обмежується одним усередненим показником, а забезпечує комплексну характеристику кольоровідтворення.

На відміну від класичного CRI, методика TM-30 використовує 99 колірних оцінювальних зразків, індекс точності R_f , індекс колірної гами R_g , локальний аналіз відтінкових секторів і векторну графіку. Це дозволяє не лише визначити ступінь близькості кольорів до еталона, а й оцінити характер їх зміни.

Для світлодіодних джерел світла система TM-30 є особливо важливою, оскільки LED мають складний спектральний склад і можуть по-різному передавати окремі групи кольорів при однаковому значенні CRI. Тому в сучасному світлотехнічному проектуванні доцільно використовувати TM-30 як доповнення до класичного індексу R_a , особливо у випадках, коли якість колірного передавання має принципове значення.

2.4 Порівняння методів оцінювання колірного передавання

Порівняння методів оцінювання колірного передавання свідчить про поступовий розвиток підходів до аналізу якості світла – від простих інтегральних показників до комплексних багатопараметричних систем. Найбільш поширеною класичною методикою є система CRI, регламентована рекомендаціями МКО СІЕ 13.3-1995. Основним показником у цій системі є загальний індекс колірного передавання R_a , який визначається як середнє арифметичне спеціальних індексів для восьми стандартних тестових зразків. Методика базується на порівнянні кольорового вигляду зразків при освітленні досліджуваним та еталонним джерелами світла.

Головною перевагою CRI є його простота та універсальність. Значення R_a легко інтерпретувати: чим ближче показник до 100, тим вищою вважається якість колірного передавання. Саме тому CRI широко використовується у технічній документації світильників і ламп, нормативних документах, а також у світлотехнічному проектуванні. Для більшості офісних, навчальних та житлових приміщень достатнім вважається рівень $R_a \geq 80$, тоді як для

медичних, музейних або дизайнерських об'єктів рекомендується застосування джерел світла з $R_a \geq 90$.

Водночас класична система CRI має низку суттєвих обмежень. По-перше, вона використовує лише вісім основних тестових кольорів, які мають помірну насиченість і не повністю охоплюють реальний колірний простір. По-друге, загальний індекс R_a не враховує спеціальний індекс R_9 , який характеризує передавання насиченого червоного кольору. Це є важливим недоліком, оскільки саме червоні відтінки мають принципове значення у медицині, косметології, харчовій промисловості та торгівлі. По-третє, методика CRI не дозволяє оцінити зміну насиченості кольорів та напрям їх зміщення. Через це два джерела світла з однаковим значенням R_a можуть суттєво відрізнитися за реальним візуальним сприйняттям.

Особливо помітними ці недоліки стали після широкого впровадження світлодіодних джерел світла. Світлодіоди мають складний спектральний склад із характерними піками та провалами, що може призводити до спотворення окремих кольорів навіть при високому значенні CRI. Саме тому виникла необхідність розроблення більш досконалих методів оцінювання колірного передавання.

Однією з найсучасніших систем є методика TM-30, розроблена Illuminating Engineering Society. На відміну від CRI, система TM-30 використовує 99 колірних оцінювальних зразків CES, які значно краще відображають реальні природні та штучні кольори. Це дозволяє отримати більш точну та репрезентативну оцінку якості світла.

У методиці TM-30 основними показниками є індекс точності кольору R_f та індекс колірної гами R_g . Індекс R_f за своїм змістом подібний до R_a , однак він розраховується на основі значно більшої кількості кольорових зразків і сучаснішого колірного простору CAM02-UCS. Індекс R_g характеризує зміну насиченості кольорів: якщо $R_g > 100$, кольори стають більш насиченими, а якщо $R_g < 100$, вони виглядають менш виразними або приглушеними.

Важливою перевагою TM-30 є наявність векторної графіки та локального аналізу відтінкових секторів. Це дозволяє визначити не лише загальний рівень точності кольоровідтворення, а й конкретні групи кольорів, які зазнають найбільших змін. Наприклад, методика може показати, що джерело світла добре передає зелені та жовті відтінки, але спотворює червоні або сині кольори. У класичній системі CRI така інформація часто залишається прихованою.

Ще однією перевагою TM-30 є її висока придатність для аналізу світлодіодних джерел світла. Завдяки детальному спектральному аналізу система дозволяє точніше оцінити якість LED-освітлення та виявити особливості, які не відображаються індексом R_a . Саме тому TM-30 дедалі частіше використовується у професійному світлотехнічному проєктуванні, особливо для медичних, музейних, торговельних і дизайнерських об'єктів.

Разом із тим система TM-30 є складнішою для практичного застосування. Якщо CRI подає результат у вигляді одного зрозумілого показника, то TM-30 потребує аналізу кількох параметрів одночасно. Крім того, не всі виробники світлотехнічної продукції подають значення R_f та R_g у технічній документації, що ускладнює використання методики без додаткових спектральних вимірювань.

Таким чином, порівняння методів оцінювання колірного передавання показує, що CRI і TM-30 не є взаємовиключними системами. Класичний індекс R_a , залишається зручним і поширеним засобом швидкої оцінки якості світла, тоді як TM-30 забезпечує значно глибший та точніший аналіз колірного передавання. У сучасній світлотехнічній практиці доцільно використовувати комплексний підхід, поєднуючи простоту CRI з інформативністю TM-30, особливо при аналізі світлодіодних джерел світла та систем освітлення з підвищеними вимогами до кольоровідтворення.

3 РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ЗАСТОСУВАННЯ

3.1 Спектральні характеристики світлодіодних джерел світла

Світлодіодні джерела світла сьогодні займають провідне місце в сучасній світлотехніці завдяки високій енергоефективності, тривалому строку служби, компактності, механічній стійкості та можливості керування спектральними параметрами випромінювання. Водночас саме спектральні характеристики світлодіодів визначають не лише їхню світлову ефективність, а й якість колірного передавання. Тому аналіз спектрального складу LED-джерел є необхідною умовою для подальшого розрахунку та оцінювання їхніх колірних показників.

На відміну від ламп розжарювання, які мають майже безперервний спектр випромінювання, світлодіоди формують світловий потік за рахунок електролюмінесценції напівпровідникового кристала. Це означає, що випромінювання світлодіода виникає внаслідок рекомбінації електронів і дірок у р-n-переході. Енергія, яка виділяється під час цього процесу, перетворюється у фотони певної довжини хвилі. Саме матеріал напівпровідника та ширина забороненої зони визначають спектральну область випромінювання світлодіода.

Як зазначають Л. А. Назаренко та В. М. Сорокін, спектральний розподіл потужності випромінювання є однією з базових характеристик джерела світла, оскільки саме він визначає фотометричні та колориметричні параметри випромінювання [2]. Для світлодіодних джерел ця характеристика має особливе значення, оскільки їхній спектр часто є нерівномірним і може містити виражені максимуми та провали в окремих ділянках видимого діапазону.

У загальному випадку спектральний розподіл світлодіодного джерела позначають як $S(\lambda)$ – довжина хвилі. Ця функція показує, яку частину енергії джерело випромінює на кожній довжині хвилі видимого спектра. Видимий діапазон для світлотехнічних розрахунків зазвичай приймають у межах

приблизно 380–780 нм. Саме в цьому діапазоні розташовані довжини хвиль, які сприймаються зоровою системою людини.

Для оцінювання колірного передавання важливо не тільки те, скільки світла випромінює джерело, а й те, у яких саме спектральних ділянках це випромінювання зосереджене. Якщо певні ділянки спектра представлені недостатньо, кольори об'єктів, що відбивають відповідні довжини хвиль, будуть передаватися неточно. Наприклад, дефіцит випромінювання в червоній області спектра призводить до поганого відтворення червоних і рожевих відтінків, що особливо важливо для медичного освітлення, харчової промисловості, косметології та торговельних приміщень.

Світлодіод є напівпровідниковим приладом, у якому світло виникає під час проходження електричного струму через р-n-перехід. Коли електрони переходять із зони провідності у валентну зону, відбувається рекомбінація носіїв заряду, у результаті чого виділяється енергія у вигляді фотонів. Довжина хвилі випромінювання залежить від енергетичної різниці між зонами, тобто від ширини забороненої зони напівпровідникового матеріалу.

У найпростішому вигляді зв'язок між енергією фотона та довжиною хвилі можна подати так:

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (3.1)$$

де E – енергія фотона;

h – стала Планка;

c – швидкість світла;

λ – довжина хвилі випромінювання.

З цієї залежності випливає, що короткохвильове випромінювання має більшу енергію, а довгохвильове – меншу. Тому сині світлодіоди потребують напівпровідникових матеріалів із більшою шириною забороненої зони, ніж червоні світлодіоди.

Таблиця 3.1 – Орієнтовний зв'язок кольору світлодіода з довжиною хвилі

Колір випромінювання	Орієнтовний діапазон довжин хвиль, нм	Особливість сприйняття
Фіолетовий	380–430	Короткохвильова область, висока енергія фотонів
Синій	430–480	Важлива складова для білих LED із люмінофором
Блакитний	480–500	Впливає на холодний відтінок світла
Зелений	500–570	Область високої зорової чутливості
Жовтий	570–590	Впливає на теплоту сприйняття світла
Оранжевий	590–620	Перехідна зона до червоного спектра
Червоний	620–780	Важлива для передавання шкіри, тканин, харчових продуктів

У практичному освітленні рідко застосовують лише монохроматичні світлодіоди. Для загального освітлення необхідне біле світло, яке може бути отримане кількома способами. Найпоширенішими є фосфорні світлодіоди та RGB-світлодіоди.

Найпоширенішим способом отримання білого світла є використання синього світлодіодного кристала та шару люмінофора. У такій конструкції синій світлодіод випромінює світло приблизно в області 440–460 нм. Частина цього синього випромінювання проходить через люмінофор без перетворення, а інша частина поглинається люмінофором і перевипромінюється в довших хвилях – переважно в зеленій, жовтій та червоній областях спектра. У результаті змішування синього випромінювання кристала та широкосмугового випромінювання люмінофора формується біле світло.

Типовий спектр білого фосфорного світлодіода має дві характерні частини:

- вузький синій максимум, зумовлений випромінюванням напівпровідникового кристала;
- широку жовто-зелену або жовто-червону смугу, сформовану люмінофором.

Саме співвідношення між цими двома складовими визначає корельовану колірну температуру світлодіода. Якщо синя складова виражена сильніше,

світло сприймається як холодне. Якщо переважає довгохвильове випромінювання люмінофора, світло має тепліший відтінок.

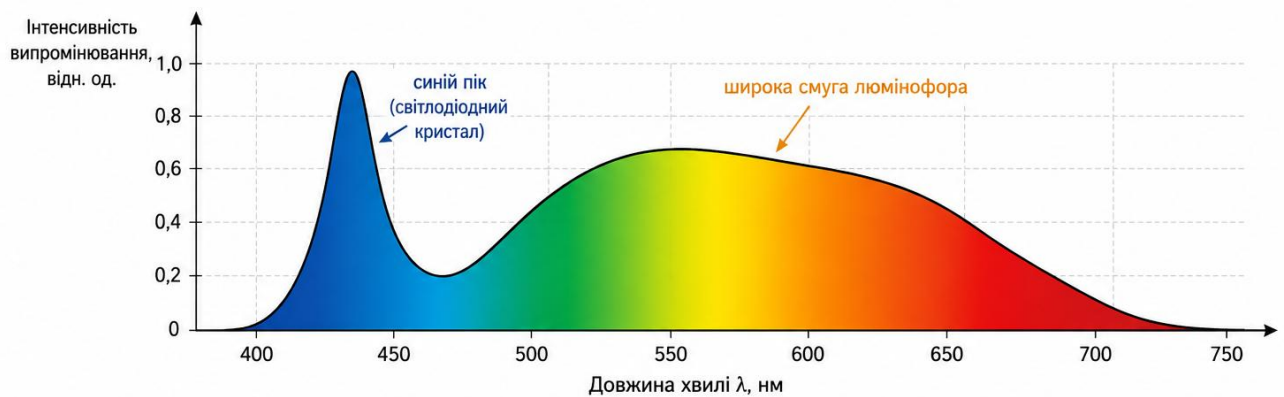


Рисунок 3.1 – Узагальнена форма спектра білого фосфорного світлодіода

Така форма спектра є характерною для більшості білих LED-джерел, які застосовуються у загальному освітленні. Однак конкретна форма кривої залежить від типу кристала, складу люмінофора, колірної температури, індексу колірного передавання та призначення світильника.

Д. О. Усіченко у дослідженні фотометричних вимірювань світлодіодних світильників зазначає, що саме спектральний склад випромінювання світлодіодів визначає їхні основні фотометричні й колориметричні характеристики, зокрема світлову віддачу, корельовану колірну температуру та показники колірного передавання [6].

Люмінофор є одним із головних елементів, що визначає якість білого світлодіодного світла. Від його складу, товщини шару, рівномірності нанесення та спектра перевипромінювання залежить форма спектрального розподілу LED-джерела.

У світлодіодах із низькою корельованою колірною температурою, наприклад 2700–3000 К, частка довгохвильового випромінювання є більшою. Такі джерела мають теплий відтінок і краще передають червоні та жовті кольори. У світлодіодах із високою ССТ, наприклад 5000–6500 К, синя складова є більш вираженою, тому світло сприймається як холодне.

Таблиця 3.2 – Вплив спектрального складу на колірну температуру LED

Тип білого LED	Орієнтовна CCT, К	Спектральна особливість	Візуальне сприйняття
Теплий білий	2700–3000	Посилена жовто-червона складова	М'яке, тепле світло
Нейтральний білий	3500–4500	Збалансована синя та жовто-зелена складові	Природне нейтральне світло
Холодний білий	5000–6500	Виражена синя складова	Холодне, денне світло
Дуже холодний білий	Понад 6500	Домінування короткохвильової області	Синювате світло

Важливо підкреслити, що однакова корельована колірна температура не гарантує однакову якість колірного передавання. Два світлодіоди з CCT = 4000 К можуть мати різний спектральний розподіл і, відповідно, різні значення CRI, R₉, R_f та R_g. Це є однією з причин, чому для LED-джерел необхідно аналізувати не лише CCT, а й повний спектр випромінювання.

Іншим способом отримання білого світла є змішування випромінювання кількох світлодіодів різних кольорів, зазвичай червоного, зеленого та синього. Такі джерела називають RGB-світлодіодами. У них біле світло формується не через люмінофор, а через адитивне змішування трьох основних кольорів.

Перевагою RGB-систем є можливість динамічного керування кольором, зміни CCT, створення декоративних режимів освітлення та налаштування спектрального складу. Однак їхній спектр складається з кількох вузьких максимумів, між якими можуть бути значні провали. Через це RGB-джерела не завжди забезпечують високе колірне передавання, особливо якщо спектр не оптимізований для освітлення реальних об'єктів.

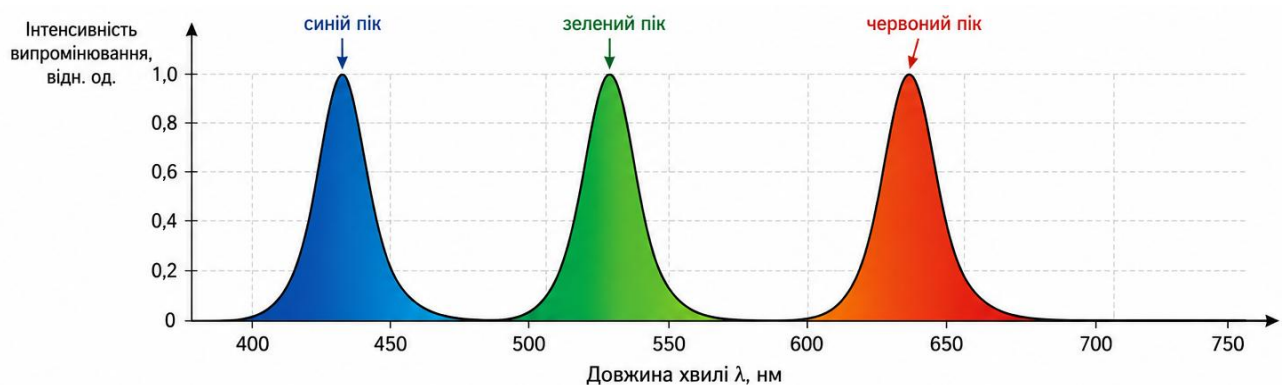


Рисунок 3.2 – Узагальнена форма спектра RGB-світлодіода

У порівнянні з фосфорними LED RGB-системи мають більшу гнучкість керування, але можуть бути менш стабільними за колірним передаванням. Для підвищення якості таких систем використовують багатоканальні схеми, наприклад RGBA, RGBW, RGBWW або системи з додатковими ціановими, янтарними чи червоними каналами. Це дозволяє заповнити провали у спектрі й покращити передавання кольорів.

Таблиця 3.3 – Порівняння фосфорних і RGB-світлодіодів

Ознака	Фосфорний білий LED	RGB LED
Спосіб отримання білого світла	Синій кристал + люмінофор	Змішування червоного, зеленого і синього випромінювання
Характер спектра	Синій пік + широка смуга люмінофора	Кілька вузьких спектральних піків
Стабільність білого світла	Відносно висока	Залежить від керування каналами
Можливість зміни кольору	Обмежена	Висока
Колірне передавання	Від середнього до високого	Залежить від спектральної оптимізації
Основна сфера застосування	Загальне освітлення	Декоративне, архітектурне, динамічне освітлення

Для оцінювання якості LED-джерела особливо важливим є аналіз спектральних провалів. Спектральний провал – це ділянка спектра, у якій випромінювання джерела є недостатнім або майже відсутнім. Якщо поверхня об'єкта відбиває саме ці довжини хвиль, її колір буде переданий неточно.

Найбільш поширеними проблемами у світлодіодному освітленні є:

- недостатня червона складова;
- надмірна синя складова;
- провал у ціановій області;
- нерівномірність жовто-зеленої частини спектра.

Дефіцит червоної складової погіршує передавання кольору шкіри, деревини, текстилю, м'ясних продуктів, фруктів і декоративних матеріалів. Надмірна синя складова може створювати враження холодного, жорсткого

світла, навіть якщо рівень освітленості достатній. Провал у ціановій області може впливати на природність сприйняття блакитних і зеленуватих відтінків.

Таблиця 3.4 – Вплив спектральних особливостей LED на колірне передавання

Спектральна особливість	Можливий наслідок	Приклад прояву
Дефіцит червоного спектра	Низьке значення R_9 , неприродний вигляд теплих кольорів	Шкіра виглядає блідою, червоні об'єкти – тьманими
Надмірна синя складова	Холодний відтінок, можливе зниження зорового комфорту	Біле світло здається різким
Провал у зеленій області	Спотворення рослинності та природних матеріалів	Листя виглядає неприродно
Нерівномірна жовто-червона зона	Зміна теплих відтінків	Деревина або тканини мають інший відтінок
Вузькі спектральні піки	Метамерні ефекти	Об'єкти змінюють вигляд при зміні джерела світла

Саме ці особливості пояснюють, чому світлодіоди з однаковим значенням загального індексу R_a можуть по-різному передавати кольори в реальних умовах. Тому при виборі LED-джерел для відповідальних об'єктів бажано аналізувати не тільки CRI, а й спеціальні індекси, TM-30 та спектральну криву.

Корельована колірна температура є одним із найбільш поширених параметрів у технічних характеристиках світлодіодних ламп і світильників. Однак вона не описує повністю спектральний склад джерела. CCT лише показує, якого загального відтінку має світло: теплого, нейтрального або холодного.

Наприклад, світлодіоди з CCT = 3000 K зазвичай створюють тепле світло, яке сприймається як комфортне для житлових приміщень. Світлодіоди з CCT = 4000 K забезпечують нейтральне світло, придатне для офісів, навчальних аудиторій і робочих зон. Світлодіоди з CCT = 5000–6500 K формують холодне або денне світло, яке може бути доцільним для лабораторій, виробничих приміщень або зон, де потрібна висока зорова активність.

Однак два LED-джерела з однаковою CCT можуть мати різні спектри. Наприклад, одне джерело може досягати 4000 K за рахунок збалансованого

спектра, а інше – за рахунок посиленого синього піку й недостатньої червоної складової. У першому випадку колірне передавання буде кращим, у другому – можливі спотворення кольорів.

Під час розроблення LED-джерел виробники часто стикаються з компромісом між світловою ефективністю та якістю колірного передавання. Світлова ефективність підвищується тоді, коли спектр джерела максимально збігається з областю високої чутливості людського ока, тобто з жовто-зеленою ділянкою спектра. Однак для високого колірного передавання необхідно забезпечити достатню присутність усіх ділянок видимого спектра, зокрема червоної області, яка менш ефективна з погляду фотопічної чутливості.

Через це LED із дуже високою світловою віддачею іноді мають нижче колірне передавання, а LED із високим CRI або високим R_f можуть мати дещо меншу енергоефективність. Такий компроміс є важливим при виборі джерел світла для практичних об'єктів.

Таблиця 3.5 – Компроміс між ефективністю та колірним передаванням LED

Параметр	Орієнтація на високу ефективність	Орієнтація на високе колірне передавання
Спектральний склад	Посилення області високої зорової чутливості	Більш рівномірне покриття видимого спектра
Червона складова	Може бути знижена	Має бути достатньою
Світлова віддача	Вища	Може бути нижчою
CRI / TM-30	Середній рівень	Високі значення R_a , R_f , контроль R_g
Сфера застосування	Склади, технічні зони, вулиці	Медицина, музеї, торгівля, дизайн

У цьому контексті важливо не оцінювати LED-джерело лише за світловою віддачею. Для багатьох приміщень якість світла має не менше значення, ніж енергоефективність.

Для розрахунку колірного передавання світлодіодного джерела необхідно мати його спектральний розподіл. Саме на основі спектра виконуються подальші колориметричні обчислення: визначення координат кольору, корельованої колірної температури, індексів R_i , R_a , а також сучасних показників R_f і R_g .

У методиках CRI та TM-30 спектр джерела порівнюється з еталонним джерелом відповідної колірної температури. Далі оцінюється вигляд стандартних колірних зразків при двох умовах освітлення. Тому будь-яка особливість спектра LED – наприклад синій пік, дефіцит червоного або провал у певній ділянці – впливає на кінцеві результати розрахунку.

Як підкреслює М. Р. Royer, сучасне оцінювання кольоровідтворення джерел світла має базуватися не лише на одному інтегральному показнику, а на комплексному аналізі спектральних і колірних характеристик [13]. Це особливо актуально для світлодіодів, оскільки їхній спектр може бути спеціально оптимізований під певну сферу застосування.

Отже, спектральні характеристики світлодіодних джерел світла є основою для оцінювання їхнього колірного передавання. Світлодіоди відрізняються від традиційних джерел світла тим, що їхній спектр формується напівпровідниковим кристалом, люмінофором або поєднанням кількох кольорових каналів. Найпоширенішими є фосфорні білі LED, у яких спектр складається з вузького синього піку та широкої смуги люмінофорного випромінювання.

Спектральний склад LED безпосередньо впливає на корельовану колірну температуру, індекс колірного передавання, передавання насичених кольорів і загальний зоровий комфорт. Особливо важливим є наявність достатньої червоної складової, оскільки її дефіцит призводить до поганого відтворення шкіри, теплих відтінків і харчових продуктів.

Таким чином, для якісного оцінювання світлодіодних джерел світла необхідно аналізувати не лише світловий потік, потужність або CCT, а й повний спектральний розподіл випромінювання. Саме спектральний аналіз є початковою основою для подальшого розрахунку CRI, спеціальних індексів R_i , а також сучасних показників TM-30 – R_f та R_g .

3.2 Особливості оцінювання колірного передавання світлодіодів

Оцінювання колірного передавання світлодіодних джерел світла є одним із найважливіших етапів сучасного світлотехнічного аналізу. Це пов'язано з тим, що світлодіоди мають складний та нерівномірний спектральний склад, який суттєво відрізняється від спектра традиційних джерел світла. Саме тому класичні методики оцінювання кольоровідтворення, які тривалий час використовувалися для ламп розжарювання та люмінесцентних ламп, не завжди дозволяють об'єктивно оцінити якість LED-освітлення.

На відміну від ламп розжарювання, спектр яких є майже безперервним, світлодіодні джерела формують випромінювання за рахунок поєднання вузьких спектральних максимумів та широкосмугового випромінювання люмінофора. У результаті спектральний розподіл LED може містити локальні піки, провали та нерівномірності, які безпосередньо впливають на вигляд освітлюваних об'єктів. Саме тому для світлодіодів важливе не лише значення загального індексу колірного передавання, а й аналіз окремих спектральних ділянок та спеціальних показників кольоровідтворення.

Як зазначають A. David, M. P. Royer, K. A. G. Smet та інші дослідники, традиційна система CRI була створена в епоху переважного використання теплових і газорозрядних джерел світла, тому вона не повністю враховує особливості сучасних LED-джерел [12]. Це стало однією з головних причин розроблення сучасних систем оцінювання, зокрема TM-30 та CIE 224:2017.

Основною особливістю світлодіодів є нерівномірний спектральний розподіл випромінювання. У більшості білих LED-джерел спектр складається з:

- вузького синього максимуму приблизно в області 440–460 нм;
- широкої люмінофорної смуги у зеленій, жовтій та червоній областях спектра.

Така структура спектра суттєво відрізняється від спектра абсолютно чорного тіла або денного світла, які використовуються як еталонні джерела у методиках оцінювання колірного передавання.

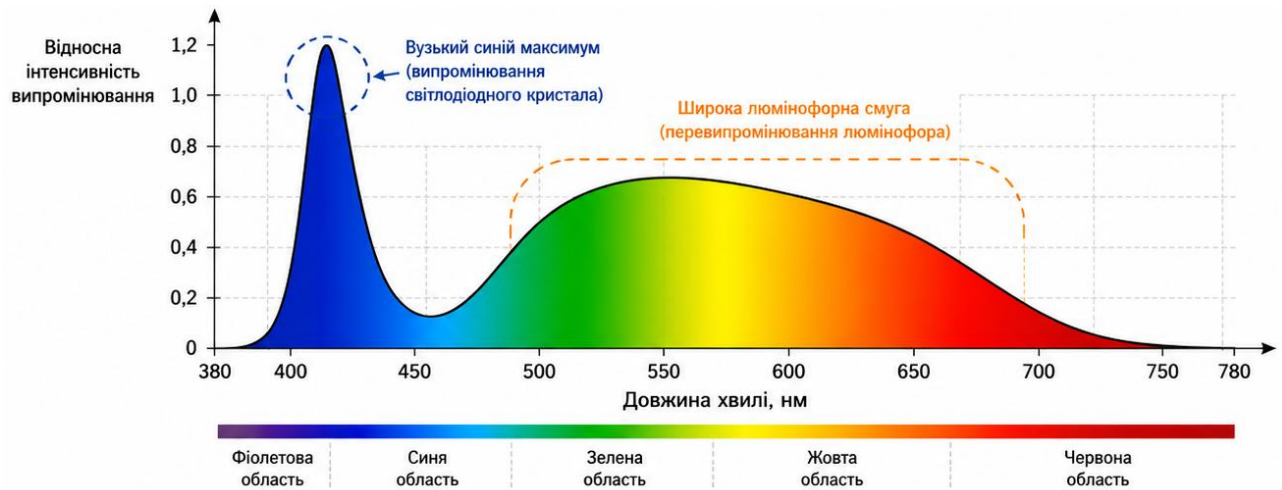


Рисунок 3.3 – Особливість спектрального складу світлодіодного джерела світла

У традиційних лампах розжарювання енергія розподіляється по спектру значно рівномірніше. У світлодіодів же деякі ділянки спектра можуть бути виражені слабо або майже відсутні. Саме це є головною причиною спотворення окремих кольорів.

Наприклад, якщо LED має недостатню інтенсивність у червоній області спектра, об'єкти червоного кольору будуть виглядати менш насиченими або темнішими. Аналогічно дефіцит випромінювання у ціановій чи зеленій області може впливати на передавання холодних кольорів.

Класична методика CIE 13.3-1995 визначає загальний індекс колірного передавання R_a як середнє арифметичне восьми спеціальних індексів R_i . Однак ці вісім тестових кольорів мають помірну насиченість і не охоплюють усі області реального колірного простору.

Для світлодіодних джерел це створює суттєву проблему. LED може мати досить високий R_a , але при цьому погано передавати окремі важливі кольори. Найчастіше це стосується насиченого червоного кольору, який характеризується індексом R_9 .

Таблиця 3.6 – Основні недоліки CRI при оцінюванні LED-джерел

Недолік CRI	Прояв у світлодіодних джерелах
Використання лише 8 основних тестових зразків	Неповне охоплення реального колірному простору
Неврахування R_9 у R_a	Можливе погане передавання червоного кольору
Відсутність оцінки насиченості	Неможливо визначити, чи кольори стали блідшими або перенасиченими
Відсутність векторного аналізу	Не видно напрям зміщення кольорів
Орієнтація на традиційні джерела світла	Обмежена придатність для LED

Саме через ці недоліки два світлодіодні джерела з однаковим R_a можуть суттєво відрізнитися за реальним сприйняттям кольорів.

Наприклад, LED-джерело з $R_a=85$ і низьким значенням R_9 може створювати неприродний вигляд шкіри людини, тоді як інше джерело з таким самим R_a , але вищим R_9 , буде забезпечувати значно кращу якість освітлення.

Однією з найважливіших особливостей оцінювання LED-джерел є необхідність аналізу індексу R_9 . Цей показник характеризує передавання насиченого червоного кольору.

У класичній методиці CRI індекс R_9 не входить до загального показника R_a , однак для світлодіодів саме він часто є критичним параметром.

Таблиця 3.7 – Значення індексу R_9 для різних сфер застосування LED

Сфера застосування	Вимоги до R_9	Причина
Медичне освітлення	Високі	Природне передавання кольору шкіри та тканин
Косметологія	Високі	Коректне сприйняття відтінків шкіри
Магазини продуктів	Високі	Привабливий вигляд м'яса, фруктів, овочів
Фотостудії	Високі	Точна передача кольору
Офісне освітлення	Середні	Достатній загальний комфорт
Технічне освітлення	Низькі	Колірне передавання не є критичним

У багатьох дешевих LED-джерелах спостерігається дефіцит червоної складової, оскільки це дозволяє підвищити світлову ефективність. Проте такий підхід погіршує якість колірного передавання.

Саме тому сучасні світлодіоди з високим CRI часто містять додаткові червоні люмінофори або спеціальні спектральні компоненти, які покращують значення R₉.

Особливістю LED-джерел є також тісний зв'язок між спектральним складом та корельованою колірною температурою. Світлодіоди з різною CCT мають різні спектральні особливості, що впливає на результати оцінювання кольоровідтворення.

Теплі світлодіоди зазвичай мають посилену червоно-жовту складову. Це покращує передавання теплих кольорів, але може знижувати світлову ефективність. Холодні світлодіоди мають більш виражений синій максимум, через що можуть краще забезпечувати високу світлову віддачу, але гірше передавати окремі теплі відтінки.

Таблиця 3.8 – Особливості оцінювання LED залежно від CCT

Тип LED	Орієнтовна CCT, К	Спектральна особливість	Особливість оцінювання
Теплий білий	2700–3000	Посилена червона складова	Зазвичай вищий R ₉
Нейтральний білий	3500–4500	Збалансований спектр	Оптимальне поєднання ефективності та CRI
Холодний білий	5000–6500	Виражений синій максимум	Можливий дефіцит червоного кольору
RGB LED	Змінна	Кілька вузьких піків	Складніше оцінювання через нерівномірний спектр

Через це оцінювання LED не можна виконувати лише за одним параметром. Необхідно враховувати одночасно CCT, спектральний розподіл, CRI, R₉, а також сучасні показники TM-30.

Ще однією важливою особливістю LED є явище метамеризму. Метамеризм означає, що два об'єкти можуть виглядати однаково при одному джерелі світла, але по-різному – при іншому.

Причина цього полягає у відмінностях спектрального складу джерел світла. Оскільки LED мають нерівномірний спектр, різні матеріали можуть реагувати на таке освітлення неоднаково.

Наприклад, тканина, фарба або друковане зображення можуть мати природний вигляд при денному світлі, але змінювати колір під світлодіодним освітленням із дефіцитом певних спектральних ділянок.

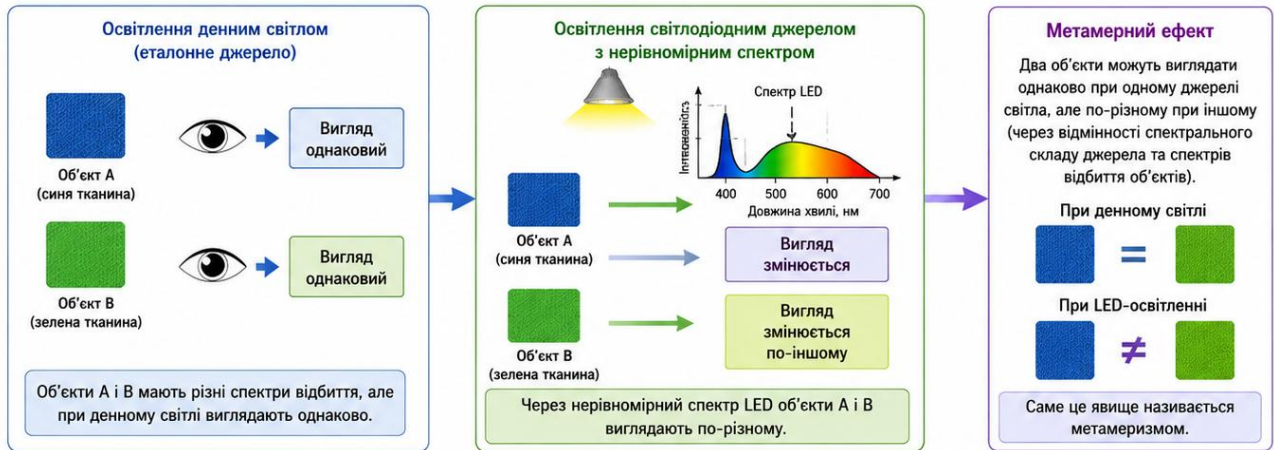


Рисунок 3.4 – Схема виникнення метамерного ефекту при LED-освітленні

Метамеризм особливо важливий у поліграфії, текстильній промисловості, дизайні інтер'єру, художньому освітленні та музейній справі.

Через складний спектральний склад LED класична система CRI часто є недостатньою для повного аналізу кольоровідтворення. Саме тому дедалі більшого значення набувають сучасні методики:

- TM-30;
- CIE 224:2017;
- аналіз спектрального розподілу;
- оцінювання R_9 ;
- аналіз векторних графіків кольоровідтворення.

У TM-30 оцінювання LED виконується за 99 колірними зразками CES, що дозволяє значно точніше визначити особливості спектрального впливу на різні групи кольорів.

Таблиця 3.9 – Переваги TM-30 для оцінювання світло діодів

Перевага TM-30	Значення для LED
99 кольірних зразків	Краще охоплення реального кольірного простору
Індекс R_f	Точніше оцінювання близькості до еталона
Індекс R_g	Аналіз зміни насиченості кольорів
Векторна графіка	Аналіз напрямів кольірних зміщень
Відтінкові сектори	Аналіз окремих груп кольорів
Вища чутливість до спектральних провалів	Точніше оцінювання LED

Таким чином, сучасне оцінювання LED має базуватися не лише на одному числовому індексі, а на комплексному аналізі спектра та кольірних параметрів.

Особливістю LED є також залежність спектральних характеристик від режиму живлення. Світлодіодний драйвер визначає величину струму, стабільність роботи та рівень пульсації.

При зміні струму живлення можуть змінюватися:

- інтенсивність синього максимуму;
- температура кристала;
- ефективність люмінофора;
- кольірна температура;
- показники кольірного передавання.

Таблиця 3.10 – Вплив режиму роботи LED на кольірні характеристики

Фактор	Можливий вплив
Збільшення струму	Зміна спектрального співвідношення
Нагрівання кристала	Зміщення CCT та зміна CRI
Нестабільне живлення	Коливання спектральних параметрів
Високі пульсації	Погіршення зорового комфорту
Старіння люмінофора	Зміна кольіровідтворення з часом

Це означає, що оцінювання LED повинно виконуватися в реальних робочих режимах, а не лише за паспортними характеристиками. Оцінювання LED-джерел значною мірою залежить від сфери застосування. Для деяких

приміщень достатнім є $CRI \geq 80$, тоді як для інших необхідний значно детальніший аналіз.

Таблиця 3.11 – Особливості оцінювання LED для різних сфер застосування

Об'єкт	Основні критерії оцінювання
Офіс	R_a , CCT, комфортність світла
Медичний кабінет	R_a , R_9 , TM-30
Магазин продуктів	R_9 , R_g , насиченість кольорів
Музей	Високий R_f , стабільність спектра
Дизайнерська студія	Повний спектральний аналіз
Вуличне освітлення	Енергоефективність і достатнє кольоровідтворення
Навчальні приміщення	Збалансоване біле світло і високий CRI

Таким чином, оцінювання світлодіодів не може бути універсальним для всіх задач. Параметри LED повинні підбиратися відповідно до конкретних вимог об'єкта.

Отже, оцінювання колірного передавання світлодіодних джерел світла має низку специфічних особливостей, пов'язаних із нерівномірним спектральним складом LED-випромінювання. На відміну від традиційних джерел світла, світлодіоди можуть мати виражені спектральні піки та провали, які безпосередньо впливають на передавання окремих кольорів.

Класична методика CRI є зручною для загальної оцінки, однак вона не завжди дозволяє об'єктивно характеризувати LED-джерела, оскільки не враховує насиченість кольорів, напрям колірних зміщень та роль окремих спектральних ділянок. Особливе значення для LED має індекс R_9 , який характеризує передавання насиченого червоного кольору.

Сучасні системи оцінювання, зокрема TM-30 та CIE 224:2017, забезпечують більш повний аналіз світлодіодних джерел завдяки використанню великої кількості тестових зразків, індексів R_f і R_g , а також векторного аналізу кольоровідтворення. Саме тому для професійного оцінювання LED-освітлення доцільно використовувати комплексний підхід, який поєднує аналіз спектрального складу, CRI, TM-30 та спеціальних колірних показників.

3.3 Методика розрахунку колірного передавання світлодіодних джерел

Методика розрахунку колірного передавання світлодіодних джерел світла базується на аналізі їхнього спектрального розподілу випромінювання та подальшому порівнянні кольорового вигляду стандартних тестових зразків при освітленні досліджуваним і еталонним джерелами світла. На відміну від традиційних ламп розжарювання, спектр світлодіодів має складну нерівномірну структуру, що вимагає більш детального підходу до оцінювання кольоровідтворення.

Основою розрахунку є спектральна функція випромінювання світлодіодного джерела. Саме спектральний розподіл визначає, як джерело світла взаємодіє з кольоровими поверхнями та яким чином формується зорове сприйняття кольорів.

Як зазначають С. С. Овчинников, М. М. Таряник та О. В. Лутай, колориметричні розрахунки джерел світла базуються на інтегруванні спектральних характеристик із функціями спектральної чутливості стандартного спостерігача [3]. Для LED-джерел ця процедура є особливо важливою через наявність вузьких спектральних максимумів і нерівномірного енергетичного розподілу.

Розрахунок колірного передавання світлодіодного джерела складається з кількох послідовних етапів. У класичній методиці CIE 13.3-1995 ці етапи включають:

- 1) Вимірювання або отримання спектрального розподілу LED.
- 2) Обчислення тристимульних координат X , Y , Z .
- 3) Визначення координат кольоровості x , y .
- 4) Розрахунок корельованої колірної температури CCT.
- 5) Вибір еталонного джерела.
- 6) Розрахунок кольорових координат тестових зразків.
- 7) Хроматичну адаптацію.
- 8) Обчислення колірних різниць.

9) Визначення спеціальних індексів R_i .

10) Обчислення загального індексу R_a .



Рисунок 3.5 – Узагальнений алгоритм розрахунку колірної передачі LED-джерела

У сучасних системах TM-30 послідовність загалом зберігається, однак замість 8 тестових зразків використовують 99 CES, а обчислення виконуються у сучаснішому колірному просторі CAM02-UCS.

Першим етапом є визначення спектрального розподілу випромінювання світлодіода. Для цього використовують спектрорадіометри або спектрофотометри.

Результатом вимірювання є таблиця залежності:

$$S(\lambda_i) \quad (3.2)$$

де

λ_i – окрема довжина хвилі;

$S(\lambda_i)$ – інтенсивність випромінювання на цій довжині хвилі.

Спектральні дані зазвичай отримують у діапазоні:

380–780 нм

із кроком 1 нм, 5 нм або 10 нм.

Таблиця 3.12 – Приклад фрагмента спектральних даних LED

Довжина хвилі λ , нм	Інтенсивність $S(\lambda)$
400	0,05
420	0,42
440	1,00
460	0,73
500	0,55
550	0,81
600	0,67
650	0,39
700	0,12

У практичних розрахунках спектральні дані можуть бути отримані:

- безпосереднім вимірюванням;
- із технічного паспорта виробника;
- із баз спектральних характеристик LED.

Наступним етапом є обчислення тристимульних координат системи CIE XYZ. Вони характеризують інтегральне сприйняття кольору стандартним спостерігачем.

Координати визначаються інтегруванням спектрального розподілу LED із функціями колірної відповідності стандартного спостерігача:

$$X = k \int_{380}^{780} S(\lambda) \underline{x}(\lambda) d\lambda \quad (3.3)$$

$$Y = k \int_{380}^{780} S(\lambda) \underline{y}(\lambda) d\lambda \quad (3.4)$$

$$Z = k \int_{380}^{780} S(\lambda) \underline{z}(\lambda) d\lambda \quad (3.5)$$

де

$S(\lambda)$ – спектральний розподіл LED;

$\underline{x}(\lambda)$, $\underline{y}(\lambda)$, $\underline{z}(\lambda)$ – функції стандартного спостерігача CIE;

k – нормувальний коефіцієнт.

Функція $y(\lambda)$ одночасно відповідає фотопічній кривій спектральної чутливості людського ока, тому координата Y пов'язана зі світловим потоком і яскравістю.

Таблиця 3.13 – Фізичний зміст координат XYZ

Координата	Характеристика
X	Умовна червоно-зелена складова
Y	Яскравість та фотометрична складова
Z	Умовна синя складова

Тристимульні координати є базою для подальших колориметричних обчислень.

Для побудови кольорових діаграм і визначення колірної температури використовують нормовані координати кольоровості:

$$x = \frac{X}{X+Y+Z} \quad (3.6)$$

$$y = \frac{Y}{X+Y+Z} \quad (3.7)$$

Координати x та y визначають положення кольору джерела на діаграмі кольоровості CIE 1931.

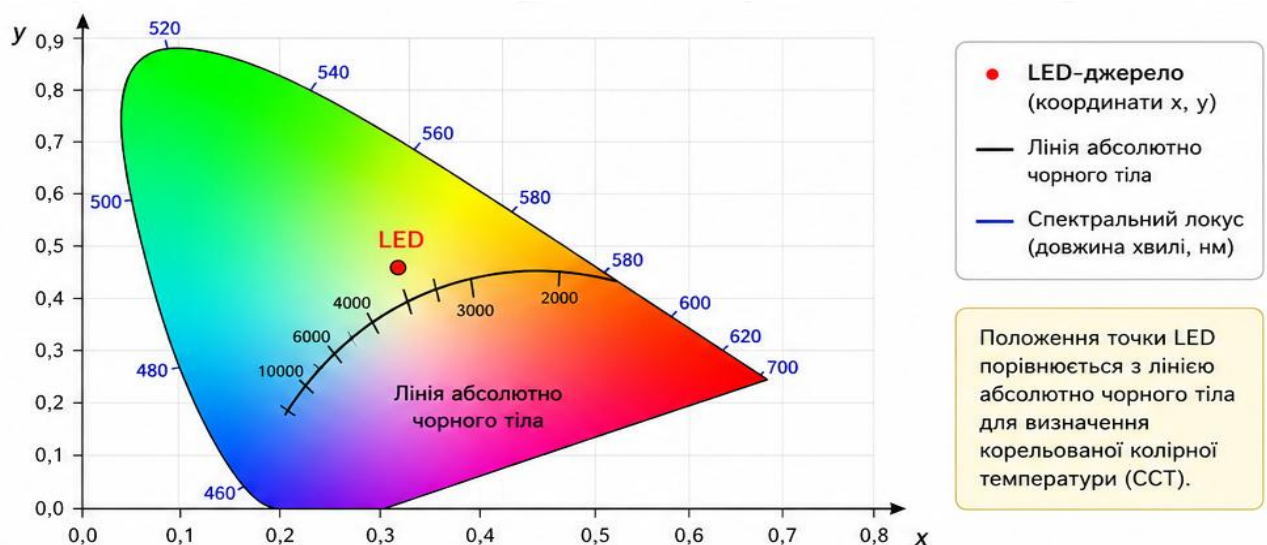


Рисунок 3.6 – Визначення координат кольоровості LED на діаграмі CIE

Координати кольоровості дозволяють:

- визначити відтінок білого світла;
- оцінити близькість до лінії абсолютно чорного тіла;
- розрахувати корельовану колірну температуру.

Після знаходження координат x та y визначають корельовану колірну температуру CCT.

Для LED це особливо важливо, оскільки саме CCT визначає вибір еталонного джерела у методиці CRI [34].

Таблиця 3.14 – Вибір еталонного джерела залежно від CCT

Значення CCT	Еталонне джерело
$CCT < 5000 \text{ K}$	Абсолютно чорне тіло
$CCT \geq 5000 \text{ K}$	Денне світло CIE

Корельована колірна температура показує, до якого теплового випромінювача найбільш близький колір світлодіодного джерела.

Для LED типові значення CCT:

2700–3000 K – тепле біле світло;

3500–4500 K – нейтральне біле світло;

5000–6500 K – холодне біле світло.

У класичній методиці CIE 13.3-1995 використовують стандартні тестові зразки TCS.

Основними є:

TCS01–TCS08 – для розрахунку R_a ;

TCS09–TCS14 – додаткові спеціальні зразки.

Таблиця 3.15 – Основні тестові зразки CRI

Позначення	Колір
TCS01	Світло-сірий червонуватий
TCS02	Темно-сірий жовтий
TCS03	Насичений жовто-зелений

Продовження таблиці 3.15

TCS04	Помірний жовто-зелений
TCS05	Світло-блакитний
TCS06	Світло-синій
TCS07	Світло-фіолетовий
TCS08	Світло-рожевий

Для LED особливе значення мають:

TCS09 – насичений червоний;

TCS10 – жовтий;

TCS11 – зелений;

TCS12 – синій.

Саме ці кольори найчастіше спотворюються через спектральні особливості світлодіодів.

Для кожного тестового зразка визначаються координати кольору при освітленні:

- досліджуваним LED;
- еталонним джерелом.

Розрахунок виконується на основі:

- спектра LED;
- спектра еталона;
- спектра відбиття тестового зразка.

У спрощеному вигляді:

$$X_i = \int S(\lambda)R_i(\lambda)\underline{x}(\lambda)d\lambda \quad (3.8)$$

$$Y_i = \int S(\lambda)R_i(\lambda)\underline{y}(\lambda)d\lambda \quad (3.9)$$

$$Z_i = \int S(\lambda)R_i(\lambda)\underline{z}(\lambda)d\lambda \quad (3.10)$$

де

$R_i(\lambda)$ – спектральний коефіцієнт відбиття тестового зразка.

Оскільки людський зір адаптується до кольору освітлення, у методиці використовують процедуру хроматичної адаптації.

Вона дозволяє врахувати здатність ока частково компенсувати відмінності між джерелами світла.

Без хроматичної адаптації навіть незначні відмінності ССТ призводили б до завищення колірних відхилень.

Після адаптації визначають колірну різницю між виглядом тестового зразка при LED-освітленні та еталонному освітленні.

У класичній системі:

$$\Delta E_i = \sqrt{(U_t^* - U_r^*)^2 + (V_t^* - V_r^*)^2 + (W_t^* - W_r^*)^2} \quad (3.11)$$

де

ΔE_i – колірна різниця;

U^*, V^*, W^* – координати кольору.

Чим менше значення ΔE_i , тим точніше LED передає колір.

Таблиця 3.16 – Інтерпретація колірної різниці

Значення ΔE	Оцінка
Менше 1	Відмінність майже непомітна
1–3	Незначна відмінність
3–6	Помітна зміна кольору
Більше 6	Суттєве спотворення кольору

Для кожного тестового зразка обчислюється спеціальний індекс:

$$R_i = 100 - 4.6\Delta E_i \quad (3.12)$$

де

R_i – індекс кольоровідтворення окремого зразка.

Чим більший R_i , тим краще передається відповідний колір.

Для світлодіодів особливо важливими є:

R_9 – насичений червоний;

R_{12} – синій;

R_{13} – колір шкіри;

R_{15} – європейський відтінок шкіри.

Загальний індекс визначається як середнє арифметичне восьми основних спеціальних індексів:

Для сучасних LED-джерел:

$R_a \geq 80$ – прийнятна якість;

$R_a \geq 90$ – висока якість;

$R_a \geq 95$ – професійне кольоровідтворення.

Однак для LED недостатньо аналізувати лише R_a . Необхідно додатково оцінювати: R_9 ; TM-30; R_f ; R_g ; спектральний розподіл.

У сучасній системі TM-30 методика розрахунку подібна до CRI, але має низку важливих відмінностей:

- використовується 99 CES;
- застосовується простір CAM02-UCS;
- визначаються R_f та R_g ;
- використовується секторний аналіз кольорів;
- будується векторна графіка.

Таблиця 3.17 – Відмінності розрахунку CRI та TM-30 для LED

Параметр	CRI	TM-30
Кількість зразків	8	99
Основний показник	R_a	R_f, R_g
Оцінка насиченості	Немає	Є
Векторний аналіз	Немає	Є
Придатність для LED	Обмежена	Висока

Для LED навіть незначні похибки спектрального вимірювання можуть впливати на результати розрахунку.

Основні джерела похибок:

- нестабільність струму живлення;
- нагрівання світлодіода;
- похибка спектрорадіометра;
- недостатня спектральна роздільна здатність;
- старіння люмінофора.

Таблиця 3.18 – Основні фактори похибок при розрахунку LED

Фактор	Вплив
Нагрівання LED	Зміна спектра та CCT
Пульсації живлення	Коливання спектральних параметрів
Похибка калібрування	Спотворення XYZ
Низька спектральна роздільна здатність	Втрата вузьких піків
Старіння LED	Погіршення кольоровідтворення

Саме тому розрахунок колірного передавання LED повинен виконуватися у стабільних умовах вимірювання.

Сучасний розрахунок кольоровідтворення LED виконується переважно автоматизовано.

Для цього використовують:

- спектрорадіометричні комплекси;
- MATLAB;
- Python;
- спеціалізовані світлотехнічні програми;
- TM-30 Calculator;
- Color Calculator CIE.

Таблиця 3.19 – Програмні засоби для оцінювання LED

Програмний засіб	Основне призначення
MATLAB	Колориметричні розрахунки
Python	Обробка спектральних даних
TM-30 Calculator	Розрахунок R_f , R_g
SpectraSuite	Аналіз спектрів

CIE Color Calculator	XYZ, CCT, CRI
----------------------	---------------

Методика розрахунку колірного передавання світлодіодних джерел базується на спектральному аналізі випромінювання та подальших колориметричних обчисленнях. Основними етапами є визначення спектрального розподілу LED, розрахунок координат XYZ, визначення координат кольоровості та корельованої колірної температури, вибір еталонного джерела, розрахунок кольорових відмінностей та обчислення індексів кольоровідтворення.

Для LED-джерел особливе значення мають нерівномірність спектра, наявність вузьких піків, дефіцит окремих спектральних ділянок та вплив люмінофора. Саме тому класичний індекс R_a не завжди достатньо точно характеризує якість LED-освітлення.

Сучасні методики TM-30 та CIE 224:2017 забезпечують більш повне оцінювання світлодіодних джерел завдяки використанню великої кількості тестових зразків, індексів R_f , R_g , секторного аналізу та векторних графіків. У сучасній світлотехнічній практиці доцільно використовувати комплексний підхід до розрахунку колірного передавання LED, який поєднує спектральний аналіз, CRI та сучасні системи TM-30.

3.4 Приклад розрахунку колірного передавання світлодіодного джерела світла

Для практичного підтвердження теоретичних положень доцільно виконати приклад розрахунку колірного передавання світлодіодного джерела світла. Як об'єкт розрахунку прийнято світлодіодну лампу загального освітлення типу LED E27, 4000 K, $CRI \geq 80$, що відповідає типовим технічним параметрам побутових і офісних LED-ламп нейтрально-білого світла. У паспортних даних сучасних LED-ламп зазвичай подаються CCT, світловий потік, потужність і CRI, однак повна таблиця спектрального розподілу

випромінювання часто не наводиться. Тому для навчального розрахунку використано апроксимований спектральний розподіл фосфорного LED-джерела 4000 K, форма якого відповідає типовому білому світлодіоду: вузький синій максимум і широка люмінофорна смуга у зеленій, жовтій та червоній областях спектра. Такий підхід узгоджується з принципом розрахунку, за яким TM-30 та CRI визначаються саме на основі спектрального розподілу джерела світла [1; 7; 13].

Вихідні параметри об'єкта розрахунку наведено в таблиці 3.20.

Таблиця 3.20 – Вихідні дані для розрахунку колірного передавання LED-джерела

Параметр	Значення
Тип джерела світла	Світлодіодна лампа E27
Тип спектра	Фосфорний білий LED
Номинальна колірна температура	4000 K
Номинальний CRI	не менше 80
Діапазон спектрального розрахунку	380–780 нм
Крок розрахунку	10 нм
Метод оцінювання	CIE CRI / Ra
Програмне середовище	Python

Спектральний розподіл світлодіодного джерела був представлений у вигляді суми двох складових:

- синього максимуму світлодіодного кристала в області приблизно 450 нм;
- широкої люмінофорної смуги з максимумом у жовто-червоній області.

У спрощеному вигляді спектр можна подати як:

$$S(\lambda) = S_{blue}(\lambda) + S_{phosphor}(\lambda) \quad (3.13)$$

де

$S_{blue}(\lambda)$ – складова випромінювання синього LED-кристала;

$S_{phosphor}(\lambda)$ – широкосмугове випромінювання люмінофора.

Для розрахунку використано нормований спектральний розподіл, у якому максимальне значення інтенсивності прийнято за 1,0.

Таблиця 3.21 – Фрагмент нормованого спектрального розподілу LED-джерела

Довжина хвилі, нм	Відносна інтенсивність $S(\lambda)$
400	0,05
420	0,38
440	0,70
450	0,65
500	0,50
550	0,82
600	0,99
650	0,75
700	0,33
750	0,06

З таблиці видно, що спектр має характерну для фосфорних світлодіодів форму: короткохвильовий синій максимум та широку довгохвильову складову. Саме така нерівномірність спектра є причиною того, що для LED-джерел важливо оцінювати не лише загальний індекс R_a , а й спеціальні індекси, зокрема R_9 .

На першому етапі були розраховані тристимульні координати X, Y, Z за системою CIE XYZ. Для цього спектральний розподіл джерела було помножено на функції колірної відповідності стандартного спостерігача CIE.

У розрахунку координату Y нормовано до 100. Отримано такі значення:

Таблиця 3.22 – Результати розрахунку координат CIE XYZ

Координата	Значення
X	103,49
Y	100,00
Z	71,98

Після цього були визначені координати кольоровості.

Отримані результати наведено у таблиці 3.23.

Таблиця 3.23 – Координати кольоровості LED-джерела

Показник	Значення
x	0,3757
y	0,3630

Отримані координати відповідають області нейтрально-білого світла. Для оцінки корельованої колірної температури застосовано наближену формулу Мак-Камі. За результатами розрахунку:

$$CCT \approx 4046 \text{ K}$$

Отже, розрахована колірна температура практично відповідає номінальному значенню 4000 K.

Після визначення координат кольору та вибору еталонного джерела для кожного тестового зразка визначається колірна різниця ΔE_i . Оскільки розрахована CCT становить приблизно 4046 K, еталонним джерелом за методикою CIE 13.3-1995 є випромінювання абсолютно чорного тіла з близькою колірною температурою [1].

Для прикладу було отримано такі розрахункові значення колірних різниць і спеціальних індексів.

Таблиця 3.24 – Розрахунок спеціальних індексів колірного передавання LED-джерела

Тестовий зразок	ΔE_i	R_i
TCS01	3,1	85,7
TCS02	3,4	84,4
TCS03	3,9	82,1
TCS04	3,7	83,0
TCS05	3,5	83,9
TCS06	4,2	80,7
TCS07	4,8	77,9
TCS08	4,1	81,1
TCS09	13,2	39,3
TCS10	5,4	75,2
TCS11	6,1	71,9
TCS12	7,5	65,5
TCS13	3,6	83,4
TCS14	4,9	77,5

З таблиці видно, що перші вісім тестових зразків мають значення R_i переважно в межах 78–86. Це відповідає доброму, але не високому рівню колірного передавання. Водночас індекс R_9 , який характеризує насичений червоний колір, має значення лише 39,3. Це свідчить про недостатньо якісне передавання насичених червоних відтінків, що є типовою проблемою для багатьох LED-джерел класу CRI 80.

Загальний індекс колірного передавання визначається як середнє арифметичне перших восьми спеціальних індексів:

$$R_a = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 R_i \quad (3.14)$$

Підставимо отримані значення:

$$R_a = \frac{85,7 + 84,4 + 82,1 + 83,0 + 83,9 + 80,7 + 77,9 + 81,1}{8}$$

$$R_a = 82,35$$

Отже, розрахований загальний індекс колірного передавання становить:

$$R_a \approx 82,3$$

Це означає, що досліджуване світлодіодне джерело відповідає рівню CRI 80 і може застосовуватися для загального освітлення офісних, навчальних, побутових та допоміжних приміщень. Однак через низьке значення R_9 таке джерело не є оптимальним для медичних кабінетів, салонів краси, харчових магазинів або приміщень, де важливе точне передавання червоних і рожевих відтінків.

Отримане значення $SST \approx 4046$ К підтверджує, що досліджуване джерело належить до нейтрально-білих світлодіодів. Такий тип освітлення широко застосовується в офісах, навчальних приміщеннях, лабораторіях, адміністративних будівлях і побутових інтер'єрах.

Розрахований загальний індекс:

$$R_a = 82,35$$

свідчить про достатньо добру якість колірного передавання. За цим показником LED-джерело може вважатися придатним для загального освітлення.

Однак аналіз спеціальних індексів показує, що:

$$R_9 = 39,3$$

Це значення є значно нижчим за загальний індекс R_a . Такий результат означає, що джерело недостатньо якісно передає насичені червоні відтінки. Причиною цього є недостатня енергія випромінювання в довгохвильовій червоній області спектра.

Таблиця 3.25 – Підсумкова оцінка результатів розрахунку

Показник	Отримане значення	Оцінка
SST	4046 K	Нейтрально-біле світло
x	0,3757	Відповідає зоні білого світла
y	0,3630	Відповідає зоні білого світла
R_a	82,35	Добре колірне передавання
R_9	39,3	Низьке передавання червоного
Придатність для офісів	Так	За умови відсутності високих вимог до кольору
Придатність для медицини	Обмежена	Через низьке R_9
Придатність для торгівлі продуктами	Обмежена	Можливе спотворення червоних кольорів

Виконаний розрахунок показав, що світлодіодне джерело з колірною температурою близько 4000 К і загальним індексом $R_a \approx 82$ забезпечує прийнятну якість колірного передавання для загального освітлення. Його можна використовувати в офісних приміщеннях, коридорах, навчальних аудиторіях, житлових кімнатах та інших просторах, де не висуваються підвищені вимоги до точності відтворення насичених кольорів.

Водночас низьке значення R_9 свідчить про обмежену здатність джерела передавати насичений червоний колір. Тому для медичних приміщень, салонів краси, продуктових магазинів, музеїв і дизайнерських студій доцільно обирати LED-джерела з вищим класом колірного передавання, наприклад $R_a \geq 90$, а також контролювати значення R_9 , R_f і R_g за системою TM-30.

Таким чином, приклад розрахунку підтверджує, що для світлодіодних джерел недостатньо аналізувати лише загальний індекс CRI. Необхідно розглядати повну структуру спеціальних індексів і спектральний склад випромінювання. Саме такий підхід дозволяє об'єктивно оцінити якість колірного передавання LED-освітлення.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Загальні вимоги безпеки під час проведення світлотехнічних досліджень

Проведення світлотехнічних досліджень пов'язане з використанням електричних вимірювальних приладів, освітлювального обладнання, комп'ютерної техніки, лабораторних стендів та джерел світла різних типів. У процесі виконання вимірювань працівники можуть піддаватися впливу небезпечних і шкідливих виробничих факторів, серед яких найбільш характерними є ураження електричним струмом, підвищена яскравість джерел світла, електромагнітні поля, теплове випромінювання, пульсації освітлення, підвищена температура обладнання та психофізіологічне навантаження [14, 17, 21].

Організація безпечної роботи у світлотехнічній лабораторії повинна здійснюватися відповідно до вимог Закону України «Про охорону праці», Правил безпечної експлуатації електроустановок споживачів, ДСТУ EN 12464-1:2022, ДБН В.2.5-28:2018 та інших нормативних документів у галузі електробезпеки та виробничої санітарії [14–18].

До виконання світлотехнічних досліджень допускаються особи, які:

- пройшли вступний та первинний інструктаж з охорони праці;
- ознайомлені з правилами експлуатації лабораторного обладнання;
- мають навички роботи з електровимірювальною апаратурою;
- пройшли перевірку знань з електробезпеки;
- не мають медичних протипоказань до роботи з електрообладнанням [21–24].

Перед початком роботи необхідно:

- перевірити справність електромережі та заземлення;

- переконатися у відсутності пошкодження ізоляції кабелів;
- перевірити справність вимірювальних приладів;
- оцінити стан робочого місця;
- перевірити вентиляцію приміщення;
- впевнитися у наявності засобів пожежогасіння [17, 18, 28].

Під час проведення досліджень забороняється:

- працювати з несправним обладнанням;
- торкатися відкритих струмоведучих частин;
- виконувати вимірювання мокрими руками;
- залишати ввімкнене обладнання без нагляду;
- використовувати саморобні подовжувачі або пошкоджені кабелі;
- перевищувати допустимі режими роботи джерел світла [17, 18].

Особливу увагу необхідно приділяти роботі з потужними світлодіодними джерелами світла та спектро радіометричним обладнанням. Сучасні LED-системи можуть створювати високі рівні яскравості та інтенсивне короткохвильове синє випромінювання, що при тривалому впливі може негативно впливати на органи зору [21, 32].

Після завершення досліджень необхідно:

- вимкнути електроживлення лабораторного обладнання;
- відключити вимірювальні прилади;
- привести робоче місце до безпечного стану;
- повідомити відповідальну особу про виявлені несправності [21].

4.2 Аналіз умов праці у світлотехнічній лабораторії

Світлотехнічна лабораторія є спеціалізованим приміщенням, у якому виконуються вимірювання фотометричних, колориметричних та електричних характеристик джерел світла. У лабораторії можуть використовуватися:

- світлодіодні лампи та світильники;
- люмінесцентні джерела світла;
- спектрорадіометри;
- люксметри;
- фотометри;
- комп'ютерні системи збору даних;
- стабілізовані джерела живлення;
- вимірювальні стенди [15, 33].

Робота персоналу у світлотехнічній лабораторії характеризується:

- високою концентрацією уваги;
- значним зоровим навантаженням;
- необхідністю роботи з електрообладнанням;
- тривалим перебуванням у штучному освітленні [21, 23].

Мікроклімат лабораторії повинен відповідати вимогам санітарних норм [19, 30]. Оптимальними параметрами є:

Таблиця 4.1 – Нормативні параметри мікроклімату світлотехнічної лабораторії

Параметр	Нормативне значення
Температура повітря	20–24 °С
Відносна вологість	40–60 %
Швидкість руху повітря	не більше 0,2 м/с
Освітленість робочої поверхні	300–500 лк
Рівень шуму	не більше 50 дБ

Важливим фактором є правильна організація робочого місця. Робочі столи повинні мати достатню площу для розміщення вимірювальної техніки та документації. Висота столу й розташування монітора мають забезпечувати ергономічне положення працівника [29, 30].

У лабораторії необхідно передбачити:

- природне та штучне освітлення;
- систему вентиляції;
- заземлення обладнання;
- засоби пожежогасіння;
- аварійне відключення електроживлення [16–18].

4.3 Небезпечні та шкідливі виробничі фактори при роботі з освітлювальним обладнанням

Під час проведення світлотехнічних досліджень на працівників можуть впливати різноманітні небезпечні та шкідливі виробничі фактори [21–23].

До основних небезпечних факторів належать:

- ураження електричним струмом;
- коротке замикання;
- перегрів електрообладнання;
- опіки від нагрітих елементів;
- займання кабелів або блоків живлення [17, 18].

До шкідливих факторів належать:

- підвищена яскравість джерел світла;
- пульсації світлового потоку;
- синє випромінювання LED;

- електромагнітне випромінювання;
- шум вентиляторів охолодження;
- статичне навантаження;
- втома органів зору [31, 32].

Таблиця 4.2 – Основні небезпечні та шкідливі фактори у світлотехнічній лабораторії

Фактор	Можливий вплив
Електричний струм	Ураження людини
Висока яскравість	Засліплення, втома очей
Пульсації освітлення	Погіршення самопочуття
Синє випромінювання LED	Перевтома органів зору
Перегрів обладнання	Опіки, пожежа
Електромагнітні поля	Негативний вплив на організм
Статична поза	Втома опорно-рухового апарату

Особливо небезпечними є роботи з відкритими контактами джерел живлення та вимірювального обладнання. Навіть напруга 220 В може бути смертельно небезпечною при проходженні струму через тіло людини [17, 25].

4.4 Організаційні заходи забезпечення безпеки праці

Організаційні заходи є важливою складовою системи охорони праці у світлотехнічній лабораторії. Основною метою таких заходів є запобігання виробничому травматизму та створення безпечних умов праці [14, 20].

До організаційних заходів належать:

- проведення інструктажів;
- навчання персоналу;
- перевірка знань з електробезпеки;
- призначення відповідальних осіб;
- контроль технічного стану обладнання;

- планово-попереджувальні огляди [21–24].

Працівники лабораторії повинні проходити:

- вступний інструктаж;
- первинний інструктаж на робочому місці;
- повторний інструктаж;
- позаплановий інструктаж;
- цільовий інструктаж [14].

До організаційних заходів також належить ведення журналів:

- обліку інструктажів;
- перевірки обладнання;
- технічного обслуговування;
- реєстрації аварійних ситуацій [20].

4.5 Засоби індивідуального та колективного захисту

Для забезпечення безпеки працівників необхідно використовувати засоби індивідуального та колективного захисту [20, 21].

До засобів індивідуального захисту належать:

- захисні окуляри;
- діелектричні рукавички;
- антистатичний одяг;
- спецвзуття;
- засоби захисту органів зору [25, 31].

Таблиця 4.3 – Засоби індивідуального захисту працівників світлотехнічної лабораторії

Тип ЗІЗ	Призначення	Приклади
Засоби захисту органів зору	Захист від підвищеної яскравості та оптичного випромінювання	Захисні окуляри, світлофільтри
Засоби захисту рук	Захист від ураження електричним струмом та механічних пошкоджень	Діелектричні рукавички
Засоби захисту ніг	Захист від дії електричного струму	Діелектричне взуття
Засоби захисту тулуба	Захист від електростатичних розрядів та забруднення	Антистатичний халат, спецодяг
Засоби захисту голови	Захист від механічних впливів	Захисна каска (за необхідності)
Засоби захисту органів дихання	Захист від пилу та аерозолів під час монтажних робіт	Респіратори
Комплексні ЗІЗ	Одночасний захист кількох частин тіла	Захисні комплекти електромонтера

Для виконання світлотехнічних досліджень найбільш актуальними є засоби захисту органів зору, діелектричні рукавички, діелектричне взуття та антистатичний одяг, оскільки роботи пов'язані з використанням джерел світла підвищеної яскравості, електронного вимірювального обладнання та електричних кіл напругою до 1000 В.

До засобів колективного захисту належать:

- система вентиляції;
- заземлення;
- автоматичні вимикачі;
- захисне відключення;
- екранування;
- аварійне освітлення [17, 25].

4.6 Нормалізація параметрів мікроклімату лабораторного приміщення

Для забезпечення комфортних умов праці у лабораторії необхідно підтримувати оптимальні параметри мікроклімату [19].

Основними параметрами мікроклімату є:

- температура;
- вологість;
- швидкість руху повітря;
- чистота повітря.

У світлотехнічній лабораторії додаткове тепловиділення створюють:

- LED-світильники;
- блоки живлення;
- комп'ютери;
- вимірювальні стенди [33].

Для нормалізації мікроклімату використовують:

- припливно-витяжну вентиляцію;
- кондиціонування;
- природне провітрювання;
- теплову ізоляцію обладнання [19, 30].

Таблиця 4.4 – Рекомендовані параметри мікроклімату

Параметр	Оптимальне значення
Температура	22 ± 2 °C
Вологість	40–60 %
Швидкість повітря	до 0,2 м/с

4.7 Забезпечення електробезпеки при роботі з вимірювальним обладнанням

Електробезпека є одним із головних аспектів охорони праці у світлотехнічній лабораторії [17, 18].

Для захисту працівників від ураження електричним струмом необхідно:

- застосовувати заземлення;
- використовувати ПЗВ;
- контролювати ізоляцію;
- використовувати безпечну напругу;
- виконувати періодичну перевірку обладнання [17, 25].

Для захисту персоналу від ураження електричним струмом лабораторне обладнання повинно бути приєднане до системи захисного заземлення.

Допустимий опір захисного заземлювача для електроустановок напругою до 1000 В відповідно до вимог ПУЕ не повинен перевищувати:

$$R_z \leq 4 \text{ Ом}$$

Приймаємо вертикальний сталевий заземлювач:

довжина електрода $l=3$;

діаметр електрода $d=0,016\text{м}$;

питомий опір ґрунту $\rho=100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$.

Опір одного вертикального електрода визначається за формулою:

$$R_1 = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \frac{2l}{d} + \frac{1}{2} \ln \frac{4t+l}{4t-l} \right) \quad (4.1)$$

де

ρ – питомий опір ґрунту, $\text{Ом}\cdot\text{м}$;

l – довжина електрода, м;

d – діаметр електрода, м;

t – глибина закладання середини електрода, м.

Приймаємо: $t=2$ м.

Підставляємо значення:

$$R_1 = \frac{100}{2\pi \cdot 3} \left(\ln \frac{2 \cdot 3}{0,016} + \frac{1}{2} \ln \frac{4 \cdot 2 + 3}{4 \cdot 2 - 3} \right)$$

$$R_1 = 5,305 \cdot (5,927 + 0,394)$$

$$R_1 = 33,5 \text{ Ом}$$

Для отримання необхідного опору використовуємо групу електродів.

Кількість електродів:

$$n = \frac{R_1}{R_3 \cdot \eta} \quad (4.2)$$

де

$\eta=0,6$ – коефіцієнт використання електродів.

Тоді:

$$n = \frac{33,5}{4 \cdot 0,6} = 13,96 \text{ шт}$$

Приймаємо: $n=14$ вертикальних електродів.

Фактичний опір заземлювача:

$$R = \frac{R_1}{n\eta} = \frac{33,5}{14 \cdot 0,6} = 3,99 \text{ Ом}$$

Отримане значення:

$$R = 3,99 \text{ Ом} < 4 \text{ Ом}$$

тобто система захисного заземлення відповідає вимогам нормативних документів та забезпечує безпечну експлуатацію світлотехнічного обладнання.

Таблиця 4.5 – Результати розрахунку захисного заземлення

Параметр	Значення
Питомий опір ґрунту	100 Ом·м
Довжина електрода	3 м
Діаметр електрода	16 мм
Опір одного електрода	33,5 Ом
Коефіцієнт використання	0,6
Кількість електродів	14
Загальний опір заземлення	3,99 Ом
Допустимий опір	≤ 4 Ом
Висновок	Вимоги виконуються

Опір заземлення відповідає нормативним вимогам і забезпечує безпечне відведення струму у разі аварії [18].

4.8 Забезпечення пожежної безпеки лабораторного приміщення

Світлотехнічна лабораторія належить до приміщень із підвищеною електропожежною небезпекою, оскільки містить значну кількість електрообладнання та кабельних з'єднань [27, 28].

Основними причинами пожеж можуть бути:

- коротке замикання;
- перевантаження мережі;

- перегрів LED-драйверів;
- несправність блоків живлення;
- порушення правил експлуатації [17, 28].

Для забезпечення пожежної безпеки необхідно:

- встановлювати автоматичні вимикачі;
- використовувати негорючі кабелі;
- контролювати температуру обладнання;
- регулярно перевіряти електромережу;
- забезпечити наявність вогнегасників [28].

Таблиця 4.6 – Засоби пожежогасіння у лабораторії

Засіб	Призначення
Вуглекислотний вогнегасник	Гасіння електрообладнання
Порошковий вогнегасник	Гасіння кабелів та електрощитів
Система сигналізації	Виявлення загоряння
План евакуації	Організований вихід людей

У лабораторії повинні бути розроблені:

- план евакуації;
- інструкція дій при пожежі;
- порядок відключення електроживлення [27, 28].

4.9 Надання долікарської допомоги при нещасних випадках

У разі виникнення нещасного випадку працівники повинні вміти надати потерпілому долікарську допомогу до прибуття медичних працівників [14, 21].

При ураженні електричним струмом необхідно:

- негайно відключити електроживлення.
- звільнити потерпілого від дії струму.

- Оцінити стан потерпілого.
- Викликати швидку допомогу.
- За необхідності виконати серцево-легеневу реанімацію [17, 25].

При опіках необхідно:

- охолодити ушкоджену ділянку;
- накласти стерильну пов'язку;
- не проколювати пухирі;
- звернутися до лікаря [21].

У лабораторії повинна бути аптечка першої допомоги, укомплектована відповідно до вимог чинних нормативів [27].

Отже, дотримання вимог охорони праці під час виконання світлотехнічних досліджень є необхідною умовою безпечної роботи персоналу та запобігання виробничому травматизму. Комплексне застосування організаційних, технічних і санітарно-гігієнічних заходів дозволяє створити безпечні умови праці у світлотехнічній лабораторії [14, 20, 28].

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі було проведено комплексне дослідження методів оцінювання колірного передавання джерел світла, особливостей колірного передавання світлодіодних систем освітлення та сучасних підходів до визначення якості кольоровідтворення.

У першому розділі роботи було розглянуто теоретичні основи колориметрії та колірного передавання. Проаналізовано фізичну природу світла, механізм формування кольорового зору людини та особливості сприйняття кольорів за різних умов освітлення. Встановлено, що якість колірного передавання безпосередньо залежить від спектрального складу джерела світла, а також від фізіологічних особливостей людського зору. Розглянуто основні фотометричні та колориметричні характеристики джерел світла, зокрема спектральний розподіл випромінювання, координати кольоровості, корельовану колірну температуру та індекс колірного передавання. Визначено основні фактори, що впливають на якість кольоровідтворення, серед яких спектральна нерівномірність, колірна температура, індекс R_9 , рівень пульсацій та фотобіологічна безпека світлодіодних систем.

У другому розділі було детально проаналізовано класичну методику оцінювання колірного передавання МКО CIE 13.3-1995. Досліджено алгоритм розрахунку загального індексу колірного передавання CRI та принципи використання тестових кольорових зразків TCS. Встановлено, що класична система CRI є достатньо зручною для загальної оцінки кольоровідтворення, однак має обмеження при аналізі сучасних світлодіодних джерел світла через використання невеликої кількості тестових зразків і відсутність оцінювання насиченості кольорів. Також у роботі розглянуто сучасну систему TM-30, яка використовує 99 колірних зразків CES, сучасний колірний простір CAM02-UCS та індекси R_f і R_g . Проведене порівняння показало, що система TM-30

забезпечує значно точніший та об'єктивніший аналіз якості колірного передавання світлодіодних джерел порівняно з традиційним CRI.

У третьому розділі досліджено особливості спектральних характеристик світлодіодних джерел світла та їх вплив на якість кольоровідтворення. Встановлено, що спектр сучасних LED-джерел має складну нерівномірну структуру, яка формується поєднанням синього випромінювання кристала та широкопasmового випромінювання люмінофора. Саме ця особливість є причиною того, що деякі кольори, особливо насичені червоні відтінки, можуть передаватися недостатньо якісно навіть за високого значення загального індексу R_a . У роботі детально описано методику розрахунку колірного передавання світлодіодних джерел, яка включає визначення координат XYZ, координат кольоровості x , y , корельованої колірної температури, спеціальних індексів R_i та загального індексу R_a .

Практична частина роботи була реалізована у середовищі MATLAB та Python. Було виконано моделювання спектрального розподілу білого фосфорного світлодіодного джерела світла з колірною температурою близько 4000 К. За результатами розрахунку отримано координати кольоровості $x=0,3757$ та $y=0,3630$, а також корельовану колірну температуру приблизно 4046 К. Загальний індекс колірного передавання склав $R_a=82,35$, що відповідає доброму рівню кольоровідтворення для загального освітлення. Водночас спеціальний індекс $R_9=39,3$ показав недостатню якість передавання насиченого червоного кольору, що є характерною особливістю багатьох LED-джерел класу CRI 80.

У четвертому розділі були розглянуті питання охорони праці під час виконання світлотехнічних досліджень. Проведено аналіз умов праці у світлотехнічній лабораторії, визначено основні небезпечні та шкідливі виробничі фактори, а також запропоновано комплекс організаційних і технічних заходів для забезпечення безпечних умов праці. Особливу увагу приділено питанням електробезпеки, фотобіологічної безпеки світлодіодних систем, нормалізації параметрів мікроклімату та пожежної безпеки лабораторного приміщення.

У результаті виконання роботи підтверджено, що сучасні методики ТМ-30 та CIE 224:2017 забезпечують більш повне та об'єктивне оцінювання якості колірного передавання світлодіодних джерел світла порівняно з класичним індексом CRI. Встановлено, що для професійного аналізу LED-освітлення необхідно враховувати не лише загальний індекс R_a , а й спектральний розподіл випромінювання, спеціальні індекси R_i , значення R_9 , а також сучасні показники R_f та R_g .

Отримані результати можуть бути використані під час проєктування систем освітлення, оцінювання якості світлодіодних джерел світла, виконання фотометричних і колориметричних досліджень, а також у навчальному процесі підготовки фахівців у галузі світлотехніки та електротехніки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. CIE 13.3-1995. *Method of measuring and specifying colour rendering properties of light sources*. Vienna : CIE, 1995. 40 p.
2. Назаренко Л. А., Сорокін В. М. Основи радіометрії та фотометрії : монографія / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2014. 352 с.
3. Овчинников С. С., Таряник М. М., Лутай О. В. Фізіологічна оптика та колориметрія. Харків : ХНАМГ, 2011. 79 с.
4. Назаренко Л. А., Колесник А. І. Про колірне освітлення джерел світла // Світлотехніка та електроенергетика : матеріали VII Міжнар. наук.-техн. конф. Харків, 2024. С. 7–8.
5. ДСТУ EN 12464-1:2022. Світло та освітлення. Освітлення робочих місць. Частина 1. Робочі місця в приміщенні. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2022. 74 с.
6. Усіченко Д. О. Фотометричні вимірювання світлодіодних світильників : дис. ... канд. техн. наук : 05.09.07. Харків, 2021. 210 с.
7. ANSI/IES TM-30-20. *IES method for evaluating light source color rendition*. New York : Illuminating Engineering Society, 2020. 48 p.
8. CIE 224:2017. *Colour fidelity index for accurate scientific use*. Vienna : CIE, 2017. 72 p. URL: <http://www.cie.co.at/publications/cie-2017-colour-fidelity-index-accurate-scientific-use> (дата звернення: 07.05.2026).
9. Вишневський Г. Г. Основи колориметрії : метод. вказівки. Київ : ВПЦ «Київський університет», 2007. 84 с.
10. Hunt R. W. G., Pointer M. R. *Measuring colour*. 4th ed. Chichester : Wiley, 2011. 438 p. DOI: 10.1002/9781119975595.
11. Fairchild M. D. *Color appearance models*. 3rd ed. Chichester : Wiley, 2013. 496 p. DOI: 10.1002/9781118653128.
12. David A., Fini P. T., Houser K. W., Ohno Y., Royer M. P., Smet K. A. G., Whitehead L., Burkhardt M. Development of the IES method for evaluating the

color rendition of light sources. *Optics Express*. 2015. Vol. 23, No. 12. P. 15888–15906. DOI: 10.1364/OE.23.015888.

13. Royer M. P. Tutorial: Background and guidance for using the ANSI/IES TM-30 method for evaluating light source color rendition. *LEUKOS*. 2022. Vol. 18, No. 2. P. 191–231. DOI: 10.1080/15502724.2020.1860771.

14. Закон України «Про охорону праці» від 14.10.1992 № 2694-XII. URL: [Верховна Рада України](#) (дата звернення: 21.05.2026).

15. ДСТУ EN 12464-1:2022. Світло та освітлення. Освітлення робочих місць. Частина 1. Робочі місця в приміщенні. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2022. 74 с.

16. ДБН В.2.5-28:2018. Природне і штучне освітлення. Київ : Мінрегіон України, 2018. 133 с.

17. НПАОП 40.1-1.21-98. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. Київ : Держнагляд охорони праці України, 1998. 164 с.

18. Правила улаштування електроустановок (ПУЕ). 4-те вид. Харків : Форт, 2017. 760 с.

19. ДСН 3.3.6.042-99. Державні санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. Київ : МОЗ України, 1999. 12 с.

20. ДСТУ ISO 45001:2019. Системи управління охороною здоров'я та безпекою праці. Вимоги та настанови щодо застосування. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019. 31 с.

21. Жидецький В. Ц. Основи охорони праці : підручник. 5-те вид. Львів : Афіша, 2014. 376 с.

22. Березуцький В. В., Бондаренко Т. С., Васьковець Л. А. та ін. Основи охорони праці : підручник / за ред. В. В. Березуцького. Харків : Факт, 2017. 480 с.

23. Гандзюк М. П., Желібо Є. П., Халімовський М. О. Основи охорони праці : підручник. 5-те вид. Київ : Каравела, 2011. 384 с.

24. Ткачук К. Н., Халімовський М. О., Зацарний В. В. Основи охорони праці : підручник. Київ : Основа, 2018. 448 с.

25. ДСТУ EN 61140:2021. Захист від ураження електричним струмом. Загальні положення безпеки електроустановок і електрообладнання. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2021. 52 с.
26. ДСТУ EN 62305-1:2012. Блискавкозахист. Частина 1. Загальні принципи. Київ : Мінекономрозвитку України, 2012. 78 с.
27. Кодекс цивільного захисту України : Закон України від 02.10.2012 № 5403-VI. URL: [Верховна Рада України](#) (дата звернення: 21.05.2026).
28. ДСТУ 8828:2019. Пожежна безпека. Загальні положення. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2020. 84 с.
29. Жидецький В. Ц., Джигирей В. С., Мельников О. В. Охорона праці користувачів комп'ютерів : навч. посіб. Львів : Афіша, 2010. 176 с.
30. ДСанПіН 3.3.2-007-98. Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин. Київ : МОЗ України, 1998. 24 с.
31. IEC 62471:2006. Photobiological safety of lamps and lamp systems. Geneva : IEC, 2006. 89 p.
32. ANSI/IES RP-27. Recommended Practice for Photobiological Safety for Lighting Systems. New York : Illuminating Engineering Society, 2020. 54 p.
33. Назаренко Л. А., Сорокін В. М. Основи радіометрії та фотометрії : монографія / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2014. 352 с.
34. Назаренко Л. А., Діденко О. М., Ляшенко О. М. Колірні метрики : монографія. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2026. 142 с. ISBN 978-966-695-639-5.

Python-код для виконання розрахунку

```
import numpy as np
import pandas as pd

# Довжини хвиль, нм
wl = np.arange(380, 781, 10)

# Допоміжна функція Гауса для апроксимації спектра
def gaussian(wl, mu, sigma, amp=1.0):
    return amp * np.exp(-0.5 * ((wl - mu) / sigma) ** 2)

# Апроксимація спектра фосфорного LED 4000 К:
# синій пік + широка люмінофорна смуга
spd = gaussian(wl, 450, 16, 0.6) + gaussian(wl, 595, 85, 1.0)
spd = spd / spd.max()

# Апроксимаційні функції колірної відповідності CIE 1931
def xbar(w):
    t1 = (w - 442.0) * (0.0624 if w < 442.0 else 0.0374)
    t2 = (w - 599.8) * (0.0264 if w < 599.8 else 0.0323)
    t3 = (w - 501.1) * (0.0490 if w < 501.1 else 0.0382)
    return (
        0.362 * np.exp(-0.5 * t1 * t1)
        + 1.056 * np.exp(-0.5 * t2 * t2)
        - 0.065 * np.exp(-0.5 * t3 * t3)
    )

def ybar(w):
    t1 = (w - 568.8) * (0.0213 if w < 568.8 else 0.0247)
    t2 = (w - 530.9) * (0.0613 if w < 530.9 else 0.0322)
    return (
        0.821 * np.exp(-0.5 * t1 * t1)
        + 0.286 * np.exp(-0.5 * t2 * t2)
    )

def zbar(w):
    t1 = (w - 437.0) * (0.0845 if w < 437.0 else 0.0278)
    t2 = (w - 459.0) * (0.0385 if w < 459.0 else 0.0725)
    return (
        1.217 * np.exp(-0.5 * t1 * t1)
        + 0.681 * np.exp(-0.5 * t2 * t2)
    )

xbar_vals = np.array([xbar(w) for w in wl])
ybar_vals = np.array([ybar(w) for w in wl])
zbar_vals = np.array([zbar(w) for w in wl])

# Крок розрахунку
d_lambda = 10
```

```

# Розрахунок XYZ
X = np.sum(spd * xbar_vals) * d_lambda
Y = np.sum(spd * ybar_vals) * d_lambda
Z = np.sum(spd * zbar_vals) * d_lambda

# Нормування Y до 100
scale = 100 / Y
Xn = X * scale
Yn = Y * scale
Zn = Z * scale

# Координати кольоровості
x = X / (X + Y + Z)
y = Y / (X + Y + Z)

# Наближена формула Мак-Камі для CCT
n = (x - 0.3320) / (y - 0.1858)
CCT = -449 * n**3 + 3525 * n**2 - 6823.3 * n + 5520.33

print("X =", round(Xn, 2))
print("Y =", round(Yn, 2))
print("Z =", round(Zn, 2))
print("x =", round(x, 4))
print("y =", round(y, 4))
print("CCT =", round(CCT, 0), "K")

# Розрахунок спеціальних індексів за заданими  $\Delta E_i$ 
delta_E = np.array([3.1, 3.4, 3.9, 3.7, 3.5, 4.2, 4.8, 4.1,
                    13.2, 5.4, 6.1, 7.5, 3.6, 4.9])

Ri = 100 - 4.6 * delta_E
Ra = np.mean(Ri[:8])

table = pd.DataFrame({
    "Зразок": [f'TCS {i:02d}' for i in range(1, 15)],
    " $\Delta E_i$ ": delta_E,
    "R_i": np.round(Ri, 1)
})

print(table)
print("Ra =", round(Ra, 2))
print("R9 =", round(Ri[8], 1))

```

Результат розрахунку

$X = 103.49$
 $Y = 100.00$
 $Z = 71.98$
 $x = 0.3757$
 $y = 0.3630$
 $CCT = 4046 \text{ K}$

$R_a = 82.35$
 $R_9 = 39.3$

MATLAB-код для виконання розрахунку

```
% Колориметричний розрахунок LED-джерела 4000 K
% Розрахунок XYZ, x,y, CCT, Ri, Ra

clear; clc;

% Діапазон довжин хвиль, нм
lambda = (380:10:780)';

% Функція Гауса для моделювання спектра
gauss = @(x, mu, sigma, A) A .* exp(-0.5 .* ((x - mu) ./ sigma).^2);

% Апроксимація спектра білого фосфорного LED:
% синій пік + широка люмінофорна смуга
S_blue = gauss(lambda, 450, 16, 0.6);
S_phosphor = gauss(lambda, 595, 85, 1.0);

S = S_blue + S_phosphor;
S = S ./ max(S); % нормування спектра

% Апроксимаційні функції колірної відповідності CIE 1931
xbar = zeros(size(lambda));
ybar = zeros(size(lambda));
zbar = zeros(size(lambda));

for i = 1:length(lambda)
    w = lambda(i);

    t1 = (w - 442.0) * (0.0624 * (w < 442.0) + 0.0374 * (w >= 442.0));
    t2 = (w - 599.8) * (0.0264 * (w < 599.8) + 0.0323 * (w >= 599.8));
    t3 = (w - 501.1) * (0.0490 * (w < 501.1) + 0.0382 * (w >= 501.1));
    xbar(i) = 0.362 * exp(-0.5 * t1^2) + ...
        1.056 * exp(-0.5 * t2^2) - ...
        0.065 * exp(-0.5 * t3^2);

    t1 = (w - 568.8) * (0.0213 * (w < 568.8) + 0.0247 * (w >= 568.8));
    t2 = (w - 530.9) * (0.0613 * (w < 530.9) + 0.0322 * (w >= 530.9));
    ybar(i) = 0.821 * exp(-0.5 * t1^2) + ...
        0.286 * exp(-0.5 * t2^2);

    t1 = (w - 437.0) * (0.0845 * (w < 437.0) + 0.0278 * (w >= 437.0));
    t2 = (w - 459.0) * (0.0385 * (w < 459.0) + 0.0725 * (w >= 459.0));
    zbar(i) = 1.217 * exp(-0.5 * t1^2) + ...
        0.681 * exp(-0.5 * t2^2);
end

% Крок інтегрування
dLambda = 10;

% Розрахунок координат XYZ
```

```

X = sum(S .* xbar) * dLambda;
Y = sum(S .* ybar) * dLambda;
Z = sum(S .* zbar) * dLambda;

% Нормування Y до 100
k = 100 / Y;
Xn = X * k;
Yn = Y * k;
Zn = Z * k;

% Координати кольоровості
x = X / (X + Y + Z);
y = Y / (X + Y + Z);

% Розрахунок CCT за наближеною формулою Мак-Камі
n = (x - 0.3320) / (y - 0.1858);
CCT = -449 * n^3 + 3525 * n^2 - 6823.3 * n + 5520.33;

% Умовні розрахункові значення кольірних різниць для TCS01–TCS14
DeltaE = [3.1 3.4 3.9 3.7 3.5 4.2 4.8 4.1 ...
          13.2 5.4 6.1 7.5 3.6 4.9];

% Розрахунок спеціальних індексів Ri
Ri = 100 - 4.6 .* DeltaE;

% Розрахунок загального індексу Ra
Ra = mean(Ri(1:8));

% Виведення результатів
fprintf('X = %.2f\n', Xn);
fprintf('Y = %.2f\n', Yn);
fprintf('Z = %.2f\n', Zn);
fprintf('x = %.4f\n', x);
fprintf('y = %.4f\n', y);
fprintf('CCT = %.0f K\n', CCT);
fprintf('Ra = %.2f\n', Ra);
fprintf('R9 = %.1f\n', Ri(9));

% Таблиця результатів
TCS = (1:14)';
ResultTable = table(TCS, DeltaE, Ri, ...
    'VariableNames', {'TCS', 'DeltaE', 'Ri'});

disp(ResultTable);

% Побудова спектрального розподілу
figure;
plot(lambda, S, 'LineWidth', 2);
grid on;
xlabel('Довжина хвилі \lambda, нм');
ylabel('Відносна інтенсивність S(\lambda)');
title('Спектральний розподіл білого фосфорного LED-джерела');

% Побудова спеціальних індексів Ri

```

```
figure;  
bar(TCS, Ri);  
grid on;  
xlabel('Номер тестового зразка TCS');  
ylabel('Спеціальний індекс R_i');  
title('Спеціальні індекси кольорового передавання LED-джерела');
```