

ЦВЕТОВАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ СВЕТОДИОДНЫХ ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

В.Ю. Павлов

В.Б. Пясецкий

А.М. Хорохоров

А.Ф. Ширанков

piasetsky@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Проведен анализ оценок цветового качества светодиодных источников белого излучения на основе общего и частных индексов цветопередачи (*CRI*). Отмечены существующие противоречия в оценке качества цветопередачи таких источников на основе стандартной методики определения общего и частных индексов цветопередачи, регламентированной ГОСТ Р 8.827–2013, и их визуальной оценки. Приведены некоторые рекомендации Международной комиссии по освещению к стандартной методике. Сделаны выводы о возможности применения стандартной методики для оценки цветового качества светодиодных источников белого излучения

Ключевые слова

Светодиодная осветительная система, диаграмма цветности, индекс цветопередачи

Поступила в редакцию 15.12.2016
© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017

Введение. Для решения многих практических задач, связанных с применением искусственных осветительных систем, необходимы источники белого света, обеспечивающие требуемый уровень цветопередачи. Кроме цветопередачи, к таким источникам предъявляются и другие требования: световая эффективность; экономичность; безопасность; приемлемые массогабаритные параметры; длительный срок службы. Светоизлучающие диоды (СИД) имеют преимущества по сравнению с такими источниками белого света, как лампы накаливания, включая галогенные, а также газоразрядные и люминесцентные лампы. Это более высокая световая эффективность при малых габаритах, отсутствие в конструкции высокотоксичных материалов, сравнительно низкие рабочие температуры, механическая прочность, большой срок службы, возможность управления световым потоком посредством широтно-импульсной модуляции силы питающего тока (диммирование) [1]. Вместе с тем СИД являются источниками квази-монохроматического излучения. Поэтому для обеспечения требуемого уровня цветопередачи в осветительных системах используют не собственно СИД, а светодиодные устройства, представляющие собой источники белого (или близкого к белому) излучения:

– фотолюминесцентные СИД коротковолнового излучения с люминофорным покрытием: голубого излучения (*B*) с двухкомпонентным красно-зеленым

(RG) люминофором; эквивалентные им голубого (B) излучения с желтым (Y) люминофором; ультрафиолетового (UV) излучения с трехкомпонентным (и более) красно-зелено-синим (RGB) люминофором;

– группы цветных красно-зелено-синих СИД (RGB-кластеры).

Цель настоящей работы — анализ возможности оценки цветовой эффективности «белых» СИД на основе стандартной методики определения общего и частного индексов цветопередачи.

Индекс цветопередачи. В соответствии с рекомендациями Международной комиссии по освещению (МКО) количественно уровень цветопередачи осветительных систем определяется общим (R_a) и частными (R_i) индексами цветопередачи (*Colour rendering index, CRI*). Общий индекс цветопередачи $R_a = 100 - 4,6 \Delta \bar{E}_{WUV}$, где $\Delta \bar{E}_{WUV}$ — среднее арифметическое для количественной оценки цветовых различий стандартных тест-объектов при их освещении эталонным и тестируемым источниками света [2]. Дискретный набор стандартных тест-объектов взят из каталога цветов Манселла [3] и включает в себя восемь основных цветов и шесть дополнительных. Параметр R_a определяют по серии измерений для первых восьми тест-объектов. Дополнительные тест-объекты (с 9 по 14) используют в специальных случаях, когда необходимо уточнить качество воспроизведения некоторых цветов. Качество цветопередачи для каждого i -го тест-объекта определяют частным индексом R_i . При этом стандартное цветовое различие находят как евклидову дистанцию между соответствующими цветовыми точками (цветностями тест-объекта при его освещении эталонным и тестируемым источниками) в равноконтрастном колориметрическом пространстве $CIE\ 1964\ U^*V^*W^*$. В качестве источника эталонного излучения с цветовой температурой до 5000 К применяют техническую модель АЧТ, а при цветовой температуре излучения более 5000 К — источники стандартного излучения D_{50} , D_{55} , D_{65} , D_{70} и D_{75} , имитирующие разные фазы дневного света. При измерении индексов цветопередачи цветовая температура эталонного излучения должна быть равна коррелированной цветовой температуре (CCT) тестируемого излучения. Это равенство устанавливают через определение положения точки цветности тестируемого излучения относительно линии АЧТ в равноконтрастном (UCS) колориметрическом пространстве $CIE\ 1960$ (рис. 1).

В методике определения параметра R_a следует отметить несоответствие дискретного набора тест-объектов и непрерывного спектра эталонного излучения. При этом стандартный расчет CRI проводят не по спектральным характеристикам эталонного и тестируемого излучений, а по колориметрическим координатам отражаемых излучений ограниченного набора стандартных тест-объектов. Параметр ΔE_{WUV} , как и Δ_{uv} (см. рис. 1), имеет знак «+» при расположении точек цветностей над линией АЧТ и «-» — под линией. Особенности стандартного определения качества цветопередачи на основе параметра R_a дают не вполне однозначные результаты во многих практических задачах, в частности, при тестировании источников излучения с «негладкими» и тем более с

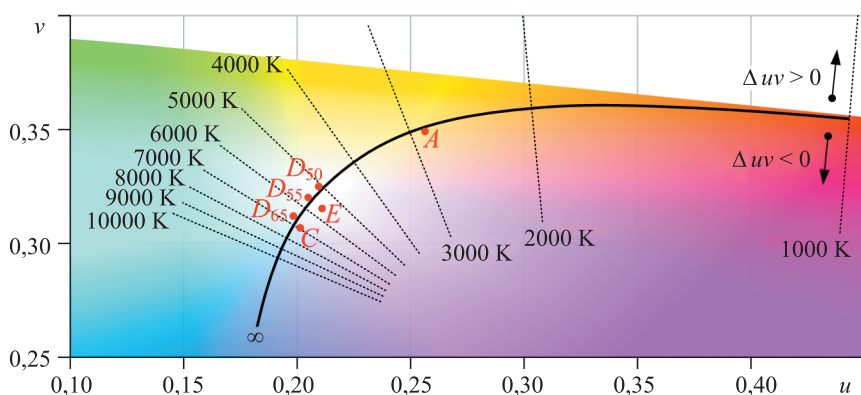


Рис. 1. Линия АЧТ и стандартные излучения A, C, E, D₅₀, D₅₅, D₆₅ в пространстве CIE 1960 UCS

линейчатыми спектрами излучения. Кроме того, для корректности получаемого результата точка цветности тестируемого источника должна быть расположена вблизи линии АЧТ так, чтобы евклидова дистанция от нее до линии АЧТ в пространстве CIE 1960 не превышала $5,4 \cdot 10^{-3}$. Методика определения CRI дает корректную оценку для источников излучения со сплошным спектром и изначально высоким качеством цветопередачи, когда $R_a > 90$. Если $R_a < 90$, то теоретически возможно существование двух источников излучения с одинаковыми индексами цветопередачи, но при этом по-разному передающими одни и те же цвета в реальных условиях. В этом случае на первый план выходит свойство метамерии цвета — способность излучений с различным спектральным составом вызывать одинаковое цветовое ощущение при наблюдении предметов с определенной монохроматической отражательной характеристикой. Это означает, что при переходе от эталонных объектов к реальным видимое качество цветопередачи освещаемого пространства предметов может оцениваться наблюдателем и как более низкое, и как более высокое по сравнению с ожидаемым его уровнем на основе оценки $R_a < 90$.

Цветовая эффективность «белых» светоизлучающих диодов. Параметр R_a приблизительно равен 100 для естественного дневного освещения, лампы накаливания с излучением типа A (коррелированная цветовая температура $SST = 2856$ K), излучения галогенных и металлогалогенных ламп, а также люминесцентных ламп с многокомпонентным люминофором. Наихудшее качество цветопередачи обнаруживается у источников света с линейчатым спектром. Например, для одной из самых экономичных с позиции световой эффективности (до 130 лм/Вт) натриевой лампы низкого давления $R_a < 20$.

Спектральное распределение потоков в излучении «белых» люминофорных СИД имеет характерную особенность — заметную «синюю» составляющую в области длин волн 400...480 нм (рис. 2), уровень которой зависит от цветовой температуры излучения СИД и со временем может постепенно увеличиваться в

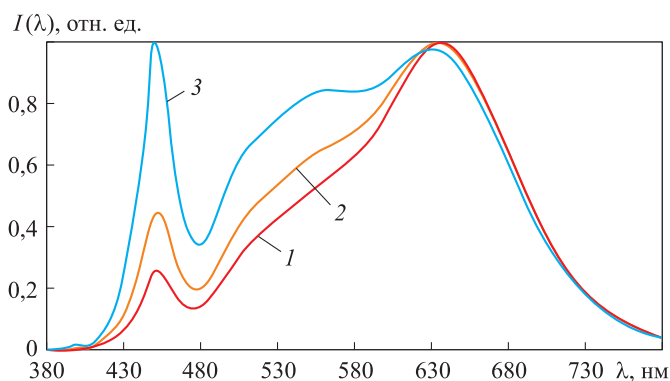


Рис. 2. Характерные спектры люминофорных «белых» СИД для 2700 (1), 3000 (2) и 4000 (3) К

связи с температурной и временной деградацией люминофора. Вследствие такой особенности излучения в технических описаниях люминофорных СИД наряду с параметром R_a производители указывают частный индекс цветопередачи R_9 , определяемый для девятого тест-объекта, обладающего насыщенным красным цветом.

Люминофорные «белые» СИД, обладая широким непрерывным спектром излучения, имеют высокое значение общего индекса цветопередачи $R_a = 75...98$ [4–6]. Светодиодные кластеры, состоящие из нескольких «цветных» СИД, могут иметь различные, в том числе низкие, значения индекса цветопередачи, характерные для источников излучения с линейчатым спектром $R_a = 25...95$ [7]. В связи с этим в настоящее время светодиодные осветительные системы в большинстве случаев создаются на базе «белых» люминофорных СИД. Однако светодиодные RGB-кластеры, несмотря на широкий разброс значений параметра R_a , находят широкое применение. Во-первых, спектры излучений «цветных» R, G, и B СИД могут быть подобраны так, чтобы цветность их излучений была близка к соответствующим единичным цветам стандартной модели CIE 1931 RGB ($\lambda_R = 700$ нм, $\lambda_G = 546,1$ нм, $\lambda_B = 435,8$ нм). Это позволяет сформировать оптимальный цветовой охват такого трехцветного источника — близкий к максимально возможному в RGB-пространстве. Во-вторых, спектры излучений СИД могут быть в значительной степени согласованы со спектральными характеристиками многоэлементных фотоприемных систем фото- и видеоустройств с мозаичными фильтрами Байера или их аналогами.

Для работы с фото- и киноаппаратурой выпускают специальные «белые» люминофорные СИД, для которых указывается соответствующий индекс цветопередачи — $TLCI$ (*Television lighting consistency index*) [8]. Теоретически значение индекса $TLCI$, как и параметра R_a , находится в пределах $0...100$. Индекс $TLCI$ измеряется аналогично параметру R_a с применением особых тест-объектов, отражающих специфику восприятия оптического излучения фотоприемными устройствами.

В этом отношении цветные кластеры представляют собой универсальные источники излучения, поскольку допускают раздельное управление по R , G и B составляющим.

Малые в некоторых случаях значения R_a не являются препятствием для применения светодиодных кластеров в осветительных системах, в том числе потому, что использование CRI для оценки качества цветопередачи излучения СИД не вполне корректно в силу представленных выше особенностей его определения. Кроме того, согласно результатам многих исследований в некоторых случаях белый свет, получаемый при смешении красных, зеленых и синих излучений СИД, предпочтительнее, чем свет, излучаемый галогенными лампами накаливания, даже если у последних более высокие показатели индексов цветопередачи. В техническом отчете МОК «Цветопередача белых светодиодных источников света» (*CIE Technical Report 177:2007*) указано: «Технический комитет заключил, что индекс цветопередачи, разработанный комиссией, обычно неприменим для прогнозирования параметров цветопередачи набора источников света, если в этот набор входят светодиоды белого цвета» [9]. Департамент энергетики США заявил: «Проводятся долгосрочные исследования и разработки в области создания обновленной метрической системы для оценки качества цвета, которая была бы применима ко всем источникам света. Пока же индекс цветопередачи можно считать одним из информационных параметров при оценке светодиодных изделий и систем на их основе. Он не должен использоваться для выбора конкретного светотехнического изделия без предварительных персональных оценок и тестирования изделия на предполагаемом месте эксплуатации» [1, 7]. Такие выводы основаны на результатах нескольких работ, в которых рассматривались и покрытые люминофором «белые» СИД, и светодиодные RGB-кластеры. В этих работах оценивалось цветовое качество освещаемого пространства предметов при использовании источников с различными индексами цветопередачи. Было обнаружено, что не существует точной взаимозависимости между визуальной оценкой качества цветопередачи и рассчитанными значениями R_a . В некоторых случаях светодиодные кластеры имели индексы цветопередачи в районе 20, но при этом хорошо показывали себя в передаче цветов. Одно из возможных объяснений этому заключается в том, что цветные СИД повышают воспринимаемую визуальную насыщенность R , G и B составляющих большинства цветов без смещения цветопередачи оттенков.

Следовательно, вопрос об уровне соответствия качества цветопередачи на основе значения CRI и прямого зрительного восприятия пространства предметов, освещаемого тем или иным источником излучения, не имеет однозначного решения. Наиболее противоречивые результаты при использовании CRI получаются в отношении излучений «белых» светодиодов. Поэтому в настоящее время в некоторых случаях в качестве дополнительного критерия определения качества цветопередачи светодиодных осветительных систем параллельно с параметром R_a используют один или несколько индексов цветопередачи Q_a (Q_p , Q_f) в рамках

методики *CQS* (*Color quality scale*), предложенной Национальным институтом стандартов и технологий США (см. [10]). Индексы *CQS* определяют на основе равноконтрастного колориметрического пространства *CIE 1976 L*a*b**. При этом, в отличие от методики определения *CRI* [2], используют набор иных тест-объектов, обладающих более насыщенными цветами, математически исключены отрицательные значения частных индексов цветопередачи, применяют другую методику учета цветовой адаптации и специальную поправку, связанную со значением коррелированной цветовой температуры излучения. Качество цветопередачи осветительных систем на основе «белых» светодиодов и светодиодных кластеров, определяемое по методике *CQS*, оказывается более высоким, чем оценка на основе R_a . Однако до настоящего времени *CQS* не имеет статуса официальной методики МКО. Кроме того, в настоящее время кроме методики *CQS* МКО рассматривает еще несколько вариантов оценки качества цветопередачи. Поэтому зарубежные производители «белых» СИД приводят в качестве параметров цветопередачи индексы R_a и R_9 [4–7], а в Российской Федерации оценка качества цветопередачи осветительных систем регламентируется ГОСТ Р 8.827–2013 (также на основании расчета *CRI*).

Как уже было отмечено ранее, белый цвет излучения может быть получен, во-первых, при использовании СИД, излучающих коротковолновое (синее или ультрафиолетовое) излучение, покрытых многокомпонентным люминофором, преобразующим коротковолновое квазимонохроматическое излучение в широкополосное белое; во-вторых, белое излучение может быть получено в рамках *RGB*-модели смешиванием квазимонохроматических излучений в определенных пропорциях — двух дополнительных или трех линейно независимых. Следует отметить, что излучение белого цвета может быть получено в светодиодных кластерах с любым числом «цветных» СИД — 4, 5 и более, несмотря на то, что теоретически любой четвертый цвет не рассматривается как линейно независимый относительно трех таковых. Главным достоинством многоэлементных кластеров (с числом СИД более трех) является расширенный цветовой охват.

Следовательно, на основе изложенного выше можно сделать следующие выводы:

1) для проектирования осветительных систем чаще всего используют люминофорные СИД, что обусловлено их высокой световой эффективностью и высоким качеством цветопередачи;

2) цветовое качество «белых» СИД заявляется производителями путем указания индексов цветопередачи R_a и R_9 ;

3) в некоторых случаях при создании осветительных систем предпочтение может быть отдано светодиодным кластерам, при этом могут учитываться такие их качества, как:

- возможность реализации высококачественной цветопередачи;
- возможность контролируемого изменения уровня цветопередачи;
- возможность получения освещения с заданным цветовым смещением;
- универсальность и возможность многоканального управления параметрами цветности (число каналов соответствует числу «цветных» СИД кластера);

– потенциально больший срок службы по сравнению с люминофорными СИД.

Методика определения индексов цветопередачи. Как было отмечено выше, методика определения частных и общего индексов цветопередачи в Российской Федерации регламентируется ГОСТ Р 8.827–2013. При этом следует отметить, что современные рекомендации МКО для определения *CRI* несколько отличаются от порядка расчета, представленного в упомянутом стандарте. Стандартная методика определения индекса цветопередачи с некоторыми пояснениями приведена ниже.

В колориметрической системе *CIE 1931 RGB* любой цвет, в том числе белый, может быть выражен тремя линейно независимыми цветами. В качестве основных цветов в этой системе приняты монохроматические излучения: красное R ($\lambda_R = 700$ нм); зеленое G ($\lambda_G = 546,1$ нм); синее B ($\lambda_B = 435,8$ нм) [11]. Для получения белого света соотношение световых потоков излучений основных монохроматических цветов должно быть следующим: $F_R : F_G : F_B \approx 1 : 4,5907 : 0,0601$.

Монохроматическому световому потоку излучения F_V , лм, соответствует монохроматический энергетический поток, Вт:

$$F_E(\lambda) = \frac{F_V(\lambda)}{680V(\lambda)}.$$

Здесь 680 лм/Вт — максимальное значение световой эффективности видимого излучения; $V(\lambda)$ — относительная функция спектральной световой эффективности излучения, или относительная спектральная чувствительность зрительной системы человека, соответствующая понятию «стандартный фотометрический наблюдатель» *CIE 1924* и «стандартный колориметрический наблюдатель» *CIE 1931*. Значения функции $V(\lambda)$ для длин волн основных монохроматических излучений системы *RGB*: $V(700 \text{ нм}) \approx 0,0041$; $V(546,1 \text{ нм}) \approx 0,979$; $V(435,8 \text{ нм}) \approx 0,0182$. В связи с этим для энергетических потоков излучений основных цветов условие получения белого цвета может быть представлено в виде $F_R : F_G : F_B \approx 243,9 : 4,66 : 3,38$.

Основные цвета R , G и B , взятые при указанных соотношениях потоков монохроматических излучений, называются единичными основными цветами, а любой цвет может быть выражен соотношением

$$C = r'R + g'G + b'B,$$

где r' , g' , b' — коэффициенты цвета, определяющие количество единичных основных цветов для получения цвета C .

Величину $m = r' + g' + b'$ называют цветовым модулем, а нормированные на модуль коэффициенты цвета — коэффициентами (координатами) цветности:

$$r = \frac{r'}{m}; \quad g = \frac{g'}{m}; \quad b = \frac{b'}{m}.$$

В частности, для белого цвета E : $r' = g' = b' = 1$ и $r = g = b = 1/3$.

В системе *CIE 1931 RGB* определены функции сложения цветов $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$, $\bar{b}(\lambda)$, представляющие собой координаты цветности, необходимые для получения монохроматического излучения единичной мощности с длиной волны λ (рис. 3, а). Более универсальная колориметрическая система *CIE 1931 XYZ* представляет собой соответствующие функции сложения цветов $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ и $\bar{z}(\lambda)$ (рис. 3, б), причем $\bar{y}(\lambda) = V(\lambda)$.

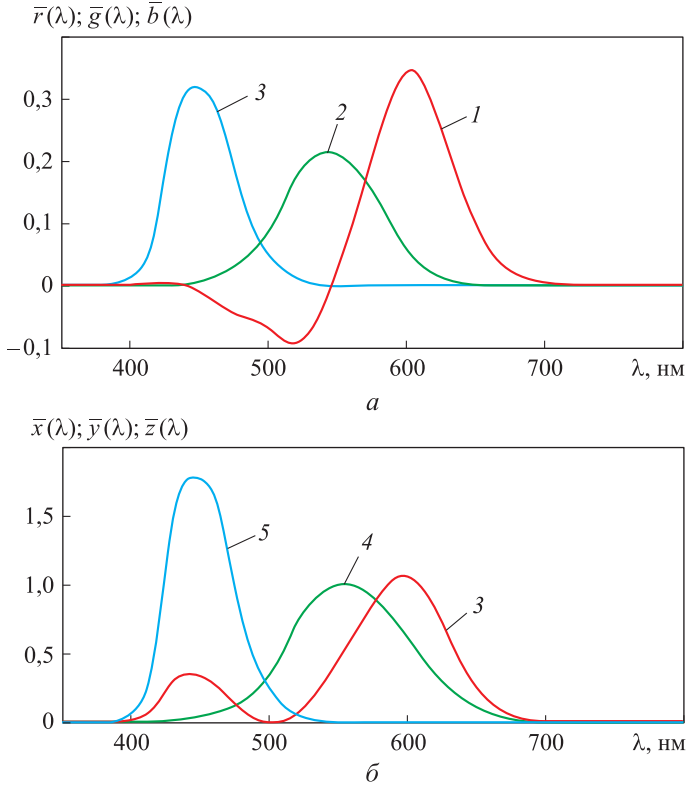


Рис. 3. Функции сложения цветов в системе *CIE 1931 RGB* $\bar{r}(\lambda)$ (1), $\bar{g}(\lambda)$ (2), $\bar{b}(\lambda)$ (3) (а) и в системе *CIE 1931 XYZ* $\bar{x}(\lambda)$ (4), $\bar{y}(\lambda)$ (5) и $\bar{z}(\lambda)$ (6) (б)

Все возможные цветности формируют палитру человеческого зрения, ограниченную кривой, называемой спектральным локусом и определяющей координаты цветности всех видимых монохроматических излучений (рис. 4). Следует отметить, что функция $V(\lambda)$ *CIE 1931* года определена для условий наблюдения цветных предметов с угловым размером 2° . В 1964 г. МКО приняла дополнительную модель стандартного колориметрического наблюдателя для условий наблюдения цветных предметов с угловым размером 10° , в которой условие $\bar{y}(\lambda) = V(\lambda)$ не выполняется.

Связь между основными цветами *RGB* и *XYZ* определяется по соотношениям:

$$X = 2,7689R + 1,7517G + 1,1302B; \quad Y = 1,0000R + 5,5907G + 0,0601B;$$

$$Z = 0,0565G + 5,5943B.$$

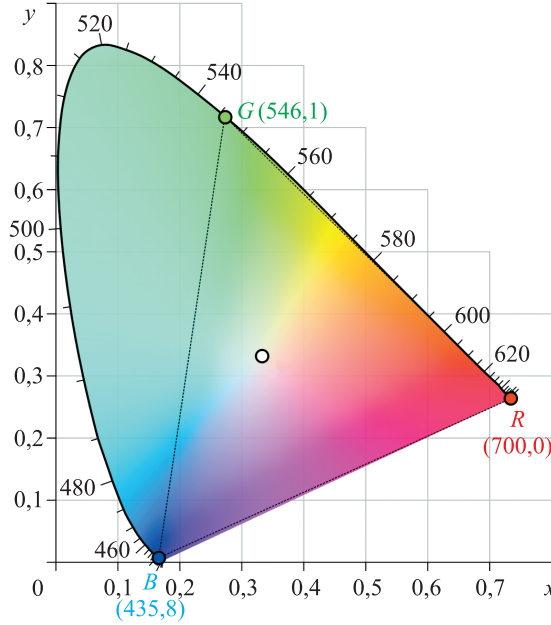


Рис. 4. Диаграмма цветности xy CIE 1931

Компоненты X , Y и Z излучения с известной нормированной функцией спектральной плотности потока излучения $\varphi(\lambda)$ имеют вид

$$X = k \int_0^{\infty} \bar{x}(\lambda) \varphi(\lambda) d\lambda; \quad Y = k \int_0^{\infty} \bar{y}(\lambda) \varphi(\lambda) d\lambda; \quad Z = k \int_0^{\infty} \bar{z}(\lambda) \varphi(\lambda) d\lambda.$$

Коэффициент k , %, находится по соотношению

$$k = \frac{1}{\int_0^{\infty} \bar{y}(\lambda) \varphi(\lambda) d\lambda}, \quad \text{или} \quad k = \frac{100\%}{\int_0^{\infty} \bar{y}(\lambda) \varphi(\lambda) d\lambda}.$$

Для прозрачных или отражающих свет объектов с монохроматическими характеристиками пропускания $\tau(\lambda)$ и отражения $\rho(\lambda)$ компоненты Y в процентах находят

$$Y = 100\% \cdot \frac{\int_0^{\infty} \bar{y}(\lambda) \varphi(\lambda) \tau(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} \bar{y}(\lambda) \varphi(\lambda) d\lambda}, \quad Y = 100\% \cdot \frac{\int_0^{\infty} \bar{y}(\lambda) \varphi(\lambda) \rho(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} \bar{y}(\lambda) \varphi(\lambda) d\lambda}.$$

При такой нормировке для любого источника излучения компонента равна $Y = 1$ в относительных единицах ($Y = 100$ в процентном измерении). Для про-

зрачных и отражающих свет объектов компонента Y численно равна визуальному интегральному коэффициенту пропускания или отражения, в процентном измерении или в относительных единицах, в отношении падающего на такой предмет потока излучения с исходным спектральным распределением $\varphi(\lambda)$.

Координаты цветности в системе XYZ :

$$x = \frac{X}{X+Y+Z}; \quad y = \frac{Y}{X+Y+Z}.$$

Переход к параметрам цветности равноконтрастной системы CIE 1960 проводится по формулам:

$$u = \frac{4x}{-2x+12y+3}; \quad v = \frac{6y}{-2x+12y+3}.$$

Для определения цветового различия тестируемого и эталонного излучений на основе данных об их спектрах, либо с помощью методов объективной колориметрии необходимо вычислить координаты цветности u и v для сравниваемых излучений и определить цветовое смещение

$$\Delta_{uv} = \sqrt{(u_t - u_r)^2 + (v_t - v_r)^2},$$

где t, r — индексы, относящиеся к параметрам тестируемого и референтного (эталонного) источникам. Цветовое смещение Δ_{uv} позволяет оценить степень соответствия цветностей излучений тестируемого источника и АЧТ: необходимо выполнение условия $\Delta_{uv} \leq 5,4 \cdot 10^{-3}$.

Отметим, что параметры цветности x и y также позволяют найти значение коррелированной цветовой температуры (CCT) исследуемого источника (погрешность 0,2 К) [12]:

$$CCT(x, y) = -449n^3 + 3525n^2 - 6823,3n + 5520,33,$$

$$\text{где } n = \frac{x - 0,3320}{y - 0,1858}.$$

Найденное значение CCT соответствует температуре АЧТ, излучение которого должно быть референтным (эталонным) для нахождения искомого параметра цветопередачи.

Точного совпадения цветностей исследуемого и эталонного излучений в большинстве случаев получить невозможно, поэтому в методике CIE 1995 года для определения CRI введены поправки на цветовую адаптацию зрительного аппарата человека для каждого эталонного тест-объекта. Это связано с тем, что при изменении спектрального состава наблюдаемого излучения зрение человека сохраняет цветовое ощущение неизменным в пределах некоторого диапазона такого изменения. Поправка на цветовую адаптацию вводится через расчет коэффициентов Иоганнеса фон Криса для каждого i -го тест-объекта [13]:

$$u'_{c,i} = \frac{10,872 + 0,404 \left(\frac{c_r}{c_t} \right) c_{t,i} - 4 \left(\frac{d_r}{d_t} \right) d_{t,i}}{16,518 + 1,481 \left(\frac{c_r}{c_t} \right) c_{t,i} - \left(\frac{d_r}{d_t} \right) d_{t,i}};$$

$$v'_{c,i} = \frac{5,520}{16,518 + 1,481 \left(\frac{c_r}{c_t} \right) c_{t,i} - \left(\frac{d_r}{d_t} \right) d_{t,i}};$$

$$c = \frac{4,0 - u - 10,0v}{v}; \quad d = \frac{1,708v - 1,481u + 0,404}{v}.$$

Координаты цветностей в системе CIE 1960 UCS для каждого тест-объекта и для исследуемого ($u_{t,i}, v_{t,i}$) и референтного ($u_{r,i}, v_{r,i}$) источников находят путем их предварительного расчета в пространстве XYZ с последующим переходом в пространство CIE 1960 UCS. Определение параметров x и y базируется на монохроматических отражательных характеристиках $\rho_i(\lambda)$ тест-объектов (рис. 5) и функциях спектральной плотности потоков излучений референтного $\phi_r(\lambda)$ и тестируемого $\phi_t(\lambda)$ источников.

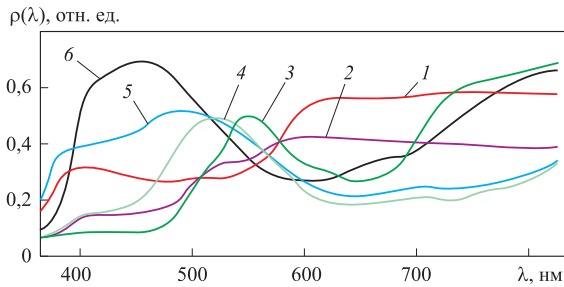


Рис. 5. Монохроматические отражательные характеристики первых шести (1–6) стандартных тест-объектов для определения CRI

Отметим, что в настоящих рекомендациях МКО предлагается иной порядок учета цветовой адаптации [14, 15], который, в отличие от метода коэффициентов фон Криса, учитывает различие реакций зрительного аппарата человека при разных уровнях яркости цвета. При этом метод учета цветовой адаптации фон Криса не отвергается, а лишь уточняется.

После определения скорректированных параметров $u'_{c,i}$ и $v'_{c,i}$ проводят расчет параметров цветности каждого i -го тест-объекта в равноконтрастном пространстве CIE 1964 ($U^*V^*W^*$):

– для исследуемого источника

$$W_{ii}^* = 25(Y_{ii})^{\frac{1}{3}} - 17; \quad U_{ii}^* = 13W_{ii}^*(u'_{c,i} - u_t); \quad V_{ii}^* = 13W_{ii}^*(v'_{c,i} - v_t);$$

– для референтного источника

$$W_{ri}^* = 25(Y_{ri})^{\frac{1}{3}} - 17; \quad U_{ri}^* = 13W_{ri}^*(u_{ri} - u_r); \quad V_{ri}^* = 13W_{ri}^*(v_{ri} - v_r).$$

Наконец, определяют цветовой сдвиг для каждого i -го тест-объекта в пространстве CIE 1964 ($U^*V^*W^*$)

$$\Delta E_{iWUV} = \sqrt{(U_{ri}^* - U_{ti}^*)^2 + (V_{ri}^* - V_{ti}^*)^2 + (W_{ri}^* - W_{ti}^*)^2}$$

и частный индекс цветопередачи $R_i = 100 - 4,6\Delta E_{iWUV}$.

Общий индекс цветопередачи находят как среднее арифметическое восьми частных индексов $R_a = 100 - 0,575 \sum_{i=1}^8 \Delta E_{iWUV}$.

В настоящее время МКО предлагает проводить расчет значения цветового сдвига в равноконтрастном пространстве CIE 1976 $L^*a^*b^*$ [16]:

$$L^* = 116f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - 16; \quad a^* = 500\left[f\left(\frac{X}{X_n}\right) - f\left(\frac{Y}{Y_n}\right)\right]; \quad b^* = 200\left[f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - f\left(\frac{Z}{Z_n}\right)\right].$$

Здесь L^* , a^* , b^* — цветовые координаты пространства $L^*a^*b^*$; X, Y, Z и X_n, Y_n, Z_n — координаты рассматриваемого и белого цветов в пространстве CIE 1931 XYZ;

$$f\left(\frac{G}{G_n}\right) = \begin{cases} \left(\frac{G}{G_n}\right)^{\frac{1}{3}}, & \text{если } \frac{G}{G_n} > \left(\frac{24}{116}\right)^{\frac{1}{3}}; \\ \frac{841}{108}\left(\frac{G}{G_n}\right) + \frac{16}{116}, & \text{если } \frac{G}{G_n} \leq \left(\frac{24}{116}\right)^{\frac{1}{3}}, \end{cases}$$

где $G = X, Y, Z$; $G_n = X_n, Y_n, Z_n$.

В этом случае цветовой сдвиг определяют как

$$\Delta E_{iLab} = \sqrt{(L_{ri}^* - L_{ti}^*)^2 + (a_{ri}^* - a_{ti}^*)^2 + (b_{ri}^* - b_{ti}^*)^2}.$$

Приведенную методику можно применять для оценки частных и общего индексов цветопередачи путем объективного определения координат цветности стандартных тест-объектов при поочередном освещении их тестируемым и эталонным источниками излучения.

Выводы. Представленные в настоящей работе результаты анализа качества цветопередачи светодиодных осветительных систем позволяют сделать следующие выводы:

- наиболее простыми с позиции технической реализации светодиодных осветительных систем являются люминофорные СИД;
- индексы цветопередачи люминофорных СИД имеют высокие значения ($R_a \geq 90$, $R_9 \geq 90$);

- индексы цветопередачи кластерных светодиодных осветительных систем могут иметь различные значения ($R_a \geq 20...90$);
- стандартные оценки качества цветопередачи светодиодных осветительных систем на основе *CRI* не могут рассматриваться в качестве единственного критерия их цветовой эффективности;
- светодиодные кластеры можно использовать при необходимости создания осветительных систем с управляемой цветностью излучения.

Рассмотренные методики позволяют рассчитать как стандартные, так и дополнительные параметры цветовой эффективности светодиодных осветительных систем, требуемые для получения излучения с заданными координатами цветности в пределах области цветowego охвата таких излучателей.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Comparing white light LEDs to conventional light sources*. U.S. // CoOl: веб-сайт компании. URL: http://cool.conserva-tion-us.org/byorg/us-doe/comparing_white_leds.pdf (дата обращения: 17.11.2016).
2. *Method of measuring and specifying color rendering properties of light sources* (CIE 13.3–1994). Vienna: CIE, 1994. 20 p.
3. *Munsell colour order system* // VCS: веб-сайт компании. URL: <http://www.vcsconsulting.co.uk/Colour/Help/ColourOrderSystems/Munsell.html> (дата обращения: 17.11.2016).
4. *Lighting LED* // Citizen: веб-сайт компании. URL: http://ce.citizen.co.jp/lighting_led/en/index.html (дата обращения: 17.11.2016).
5. *OSRAM opto semiconductors*. URL: http://www.osram-os.com/osram_os/ru/index.jsp (дата обращения: 17.11.2016).
6. *Lumileds*. URL: <http://www.philipslumileds.com> (дата обращения: 17.11.2016).
7. *Erdmann D. Color rendering index (CRI)*. URL: <https://ru.scribd.com/document/26303635/Color-Rendering-Index> (дата обращения: 17.11.2016).
8. *Television lighting consistency index 2012* // EBU: веб-сайт компании. URL: <https://tech.ebu.ch/tlci-2012> (дата обращения: 17.11.2016).
9. *Colour rendering of white LED light sources* // CIE: веб-сайт компании. URL: http://www.cie.co.at/index.php?i_ca_id=453 (дата обращения: 17.11.2016).
10. *Color rendering of light sources* // NIST: веб-сайт университета. URL: http://www.nist.gov/pml/div685/grp03/vision_color.cfm (дата обращения: 17.11.2016).
11. *Janos Schanda, ed. Colorimetry: Understanding the CIE system*. John Wiley & Sons, 2007. 467 p.
12. *McCamy Calvin S. Correlated color temperature as an explicit function of chromaticity coordinates* // Color Research & Application. 1992. Vol. 17. No. 2. P. 142–144. DOI: 10.1002/col.5080170211 URL: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/col.5080170211/full>
13. *Gegenfurtner K.R., Sharpe L.T. Color vision: From genes to perception*. Cambridge University Press, 2001. 492 p.

14. *A method of predicting corresponding colours under different chromatic and illuminance adaptations*. CIE Publication 109. Vienna: CIE, 1994. 18 p.
15. *Hunt R.W.G., Pointer M.R. Measuring colour*. John Wiley & Sons, 2011. 470 p.
16. *Colorimetry*. CIE Publication 15.2. Vienna: CIE, 1986. 72 p.

Павлов Виктор Юрьевич — инженер НИИ «Радиоэлектроники и лазерной техники» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Пясецкий Вячеслав Борисович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Хорохоров Алексей Михайлович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Ширанков Александр Федорович — канд. техн. наук, начальник отдела НИИ «Радиоэлектроники и лазерной техники» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Павлов В.Ю., Пясецкий В.Б., Хорохоров А.М., Ширанков А.Ф. Цветовая эффективность светодиодных осветительных систем // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2017. № 5. С. 54–69. DOI: 10.18698/0236-3933-2017-5-54-69

LED LIGHTING SYSTEMS COLOR EFFICIENCY

V.Yu. Pavlov

V.B. Piasetsky

A.M. Khorokhorov

A.F. Shirankov

piasetsky@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The study analyzed the estimates of white LED sources color quality according to the common and private color rendering index (*CRI*). When performing the analysis we identified the existing contradictions between the estimates of color rendering quality of such sources using a standard method for determining the *CRI*, regulated by the State Standard R 8.827–2013, and its visual estimates. Moreover, we give some recommendations from Commission International d'Eclairage (*CIE*) to the standard method and make conclusions on the possibility of using the standard method for estimating the white LED sources color quality

Keywords

LED lighting system, chromaticity diagram, color rendering index

Received 15.12.2016

© BMSTU, 2017

REFERENCES

- [1] Comparing white light LEDs to conventional light sources. U.S. CoOl: company website. Available at: http://cool.conservation-us.org/byorg/us-doe/comparing_white_leds.pdf (accessed: 17.11.2016).
- [2] Method of measuring and specifying color rendering properties of light sources (CIE 13.3–1994). Vienna, CIE, 1994. 20 p.
- [3] Munsell colour order system. VCS: company website. Available at: <http://www.vcsconsulting.co.uk/Colour/Help/ColourOrderSystems/Munsell.html> (accessed: 17.11.2016).
- [4] Lighting LED. Citizen: company website. Available at: http://ce.citizen.co.jp/lighting_led/en/index.html (accessed: 17.11.2016).
- [5] OSRAM opto semiconductors. Available at: http://www.osram-os.com/osram_os/ru/index.jsp (accessed: 17.11.2016).
- [6] Lumileds. Available at: <http://www.philipslumileds.com> (accessed: 17.11.2016).
- [7] Erdmann D. Color rendering index (CRI). Available at: <https://ru.scribd.com/document/26303635/Color-Rendering-Index> (accessed: 17.11.2016).
- [8] Television lighting consistency index 2012. EBU: company website. Available at: <https://tech.ebu.ch/tlci-2012> (accessed: 17.11.2016).
- [9] Colour rendering of white LED light sources. CIE: company website. Available at: http://www.cie.co.at/index.php?i_ca_id=453 (accessed: 17.11.2016).
- [10] Color rendering of light sources. NIST: university website. Available at: http://www.nist.gov/pml/div685/grp03/vision_color.cfm (accessed: 17.11.2016).
- [11] Janos Schanda, ed. Colorimetry: Understanding the CIE system. John Wiley & Sons, 2007. 467 p.
- [12] McCamy Calvin S. Correlated color temperature as an explicit function of chromaticity coordinates. *Color Research & Application*, 1992, vol. 17, no. 2, pp. 142–144. DOI: 10.1002/col.5080170211 Available at: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/col.5080170211/full>
- [13] Gegenfurtner K.R., Sharpe L.T. Color vision: From genes to perception. Cambridge University Press, 2001. 492 p.
- [14] A method of predicting corresponding colours under different chromatic and illuminance adaptations. CIE Publication 109. Vienna, CIE, 1994. 18 p.
- [15] Hunt R.W.G., Pointer M.R. Measuring colour. John Wiley & Sons, 2011. 470 p.
- [16] Colorimetry. CIE Publication 15.2. Vienna, CIE, 1986. 72 p.

Pavlov V.Yu. — engineer at the Research Institute for Radio Electronics and Laser Technology, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Piasetsky V.B. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor of Laser and Optoelectronic Systems Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Khorokhorov A.M. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor of Laser and Optoelectronic Systems Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Shirankov A.F. — Cand. Sc. (Eng.), Head of the Department of the Research Institute for Radio Electronics and Laser Technology, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Pavlov V.Yu., Piasetsky V.B., Khorokhorov A.M., Shirankov A.F. LED Lighting Systems Color Efficiency. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Priborostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng.], 2017, no. 5, pp. 54–69.

DOI: 10.18698/0236-3933-2017-5-54-69



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана
вышло в свет учебное пособие авторов

**Л.И. Пономарева, В.А. Вечтомова,
А.С. Милосердова**

**«Бортовые цифровые
многолучевые антенные решетки
для систем спутниковой связи»**

Рассмотрены возможности спутниковых многолучевых зеркальных и линзовых антенн, а также особенности построения бортовых цифровых многолучевых антенных решеток на основе крупноапертурных зеркальных и линзовых излучателей. Приведены результаты оптимизации структуры и характеристик крупноапертурных излучателей, а также антенных решеток из них. Показаны преимущества многолучевых крупноапертурных излучателей при построении антенных решеток для глобальных систем спутниковой связи и возможные схемотехнические и конструктивные решения по построению цифровых антенных решеток.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1
+7 (499) 263-60-45
press@bmstu.ru
www.baumanpress.ru