

Оценка погрешности определения координат цветности светодиодных излучателей на основе спектрорадиометрического подхода

Р.И. СТОЛЯРЕВСКАЯ, А.А. ШАРАКШАНЭ, А.С. ШАРАКШАНЭ¹

ООО «Редакция журнала «Светотехника» и Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова, Москва

Аннотация

Рассмотрены предельные оценки погрешности определения координат цветности x и y осветительных приборов со светодиодами на основе изменений спектрального распределения плотности энергетической освещённости с учётом погрешности спектральной характеристики эталонного источника, используемого для калибровки спектрометра. Исследования выполнены посредством анализа линейных погрешностей и методом стохастического моделирования.

Ключевые слова: спектральная плотность энергетической освещённости, эталонная лампа, предельные оценки погрешностей, координаты цветности, случайные погрешности, стохастическое моделирование.

Введение

В случае прямых измерений цветности на основе детекторного подхода теория и практика световых и цветных измерений предполагает использование эталонных светоизмерительных ламп, работающих в режиме источника типа A , для калибровки фотометров. При этом необходимо вводить поправочные множители [1, 2], исключая систематическую составляющую погрешности качества коррекции приёмных каналов под табулированные функции МКО.

В случае спектрорадиометрического подхода [3] к измерению цветности основной неисключённой систематической погрешностью измерения является погрешность эталонной светоизмерительной лампы спектральной плотности энергетической величины (энергетической яркости (СПЭЯ), энергетической освещённости (СПЭО), энергетической силы света (СПСИ) или потока излучения,

воспроизведение которого отсутствует в поверочной схеме [4], (СППИ)). В пределах видимого диапазона спектра пределы погрешности рабочих средств измерения СПЭЯ, СПЭО и СПСИ не превышают $\pm 4\%$ для абсолютных значений.

Основными задачами данного исследования являлись:

– определение максимально возможных пределов систематической составляющей погрешности, связанной с эталонной лампой для калибровки спектрометра, в данном случае светоизмерительной лампой СПЭО на уровне рабочего средства измерения;

– сопоставление результатов анализа с пределами погрешности поверочной схемы для средств колориметрических измерений в части самосветящихся объектов;

– сопоставление результатов анализа с допусками, регламентируемыми ГОСТ Р 54350–2011 «Приборы осветительные. Светотехнические требования и методы испытаний».

Анализ

Координаты цветности x , y источника вычисляются по формулам:

$$x = \frac{X}{X+Y+Z}, \quad y = \frac{Y}{X+Y+Z}, \quad (1)$$

где X , Y , Z , – координаты цвета. В свою очередь, координаты цвета зависят от функции СППИ $\phi_{e\lambda}(\lambda)$:

$$X = \int_{380}^{780} \phi_{e\lambda}(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda,$$

$$Y = \int_{380}^{780} \phi_{e\lambda}(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda,$$

$$Z = \int_{380}^{780} \phi_{e\lambda}(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda,$$

где $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ – функции сложения в стандартной колориметрической системе МКО 1931 [4].

Практически вместо интегралов используются интегральные суммы

$$\begin{aligned} X &= \sum_{\lambda} \phi_{e\lambda}(\lambda) \bar{x}(\lambda) \Delta\lambda, \\ Y &= \sum_{\lambda} \phi_{e\lambda}(\lambda) \bar{y}(\lambda) \Delta\lambda, \\ Z &= \sum_{\lambda} \phi_{e\lambda}(\lambda) \bar{z}(\lambda) \Delta\lambda, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\Delta\lambda$ – шаг по длине волны λ .

В качестве примера источника излучения авторы использовали светодиод $CREE$ серии $MK-R$ с коррелированной цветовой температурой $3500 K$ и относительным спектром излучения согласно рис. 1.

Координаты цветности x и y , вычисленные по этому спектру и формулам (1) и (2) при $\Delta\lambda=5$, равны $0,405001$ и $0,389928$ соответственно.

Предположим, что при некотором значении λ в измерениях $\phi_{e\lambda}$ допущена ошибка $\delta\phi_{e\lambda}$ и в формулах (2) использовано значение $\phi_{e\lambda} + \delta\phi_{e\lambda}$ вместо точного $\phi_{e\lambda}$. При данном значении λ про-

изводные $\frac{\partial x}{\partial \phi_{e\lambda}}$ и $\frac{\partial y}{\partial \phi_{e\lambda}}$ характеризуют

значение и знак малых изменений в x и y , соответственно, вследствие малого изменения $\phi_{e\lambda}$.

Обращает на себя внимание сложный, немонотонный характер спектральной зависимости этих произво-

дных (рис. 2), особенно $\frac{\partial x}{\partial \phi_{e\lambda}}$.

Предположим, что в измерении $\phi_{e\lambda}$ при каждом значении λ возможна ошибка в пределах $\pm 4\%$ от измеряемой величины. Тогда, в рамках дискретной модели (2), наибольшая суммарная ошибка в x образует, если при каждом λ ошибка в $\phi_{e\lambda}$ равна $0,04\phi_{e\lambda}$ и имеет тот же знак, что и

$\frac{\partial x}{\partial \phi_{e\lambda}}$. Аналогично, знак $\frac{\partial y}{\partial \phi_{e\lambda}}$ опреде-

ляет относительный спектр излучения $\phi_{e\lambda}(\lambda)$ с 4-% ошибками, «максимально неблагоприятными» для расчёта y .

¹ E-mail: anton.sharakshane@gmail.com

Для *CREE MK-R3500K* соответствующие оценки показаны на рис. 3.

Соответственно находятся координаты цветности точки *P*, которая реализует максимально завышенное значение координаты *x* (0,412957) в результате 4-% ошибки в $\phi_{e\lambda}$, а максимальная суммарная ошибка в *x* составляет 0,007956, или около 1,96% от истинного значения. Аналогично находятся координаты точки *Q*, имеющей максимально завышенную координату *y* (0,398099), а максимальная суммарная ошибка в *y* составляет 0,008171, или 1,98% от истинного значения.

На рис. 4 показаны точки *P*, *Q* и точки *R*, *S*, симметричные им относительно точки истинной цветности светодиода *CREEMK-R3500K* и реализующие максимально заниженные значения *x* и *y*, соответственно.

Горизонтальные и вертикальные прямые, проведённые через точки *P*, *Q*, *R*, *S* ограничивают прямоугольник, в который заведомо должна попасть вычисляемая точка (*x*, *y*) при любых ошибках в спектральной плотности излучения, лежащих в пределах $\pm 4\%$ от $\phi_{e\lambda}$ для каждой λ . В действительности не весь этот прямоугольник «достижим» для точки (*x*, *y*). Примерная граница области, в которой может лежать точка (*x*, *y*) при 4-% ошибке показана на рисунке пунктиром; её точная форма и возможная связь с эллипсами Мак-Адама требует дополнительного исследования. Штриховой линией на рис. 4 представлен также четырёхугольник допустимых отклонений от точки АЧТ 3500 К по рекомендациям МКО [7]. Показательно, что возможные отклонения вследствие 4-% ошибки в $\phi_{e\lambda}$ как раз укладываются в этот четырёхугольник.

Максимальные ошибки в координатах *x*, *y*, порождаемые специально сконструированными возмущёнными функциями $\phi_{e\lambda}(\lambda)$ являются лишь теоретически возможными; на практике ошибки в определении $\phi_{e\lambda}$ имеют случайный характер и не следуют за

знаками производных $\frac{\partial x}{\partial \phi_{e\lambda}}$ и $\frac{\partial y}{\partial \phi_{e\lambda}}$; бо-

лее того, ошибки на разных λ во многом компенсируют друг друга. Этот эффект максимально выражен, если эти ошибки являются независимыми случайными.

Предположим, что при каждой λ ошибка $\delta\phi_{e\lambda}$ является случайной ве-

личной, распределённой по нормальному закону с нулевым математическим ожиданием: $\mu_{\delta\phi_{e\lambda}} = 0$ (несистематическая нормальная ошибка). Зададим среднее квадратическое отклонение $\sigma_{\delta\phi_{e\lambda}}$, равным одной трети от $0,04\phi_{e\lambda}$.

Расчёт для *CREE MK-R3500K* даёт $\sigma_{\delta x_{\xi}} = 0,000456$ и $\sigma_{\delta y_{\xi}} = 0,000523$.

Сравнивая эти результаты с найденными выше максимальными суммарными ошибками в *x* и *y*, можно заключить, что при случайных независимых ошибках в $\phi_{e\lambda}$ ошибки в *x*, *y* будут примерно на два порядка меньше.

Воздействие случайных ошибок в измерении $\phi_{e\lambda}$ на координаты *x*, *y* можно стохастически смоделировать с помощью генератора случайных чисел (рис. 5 и 6).

Заключение

Линейный анализ и стохастическое моделирование позволили оценить погрешности определения координат цветности светодиодных излучателей на основе измерения их относительных спектральных характеристик в предположении, что пределы допусаемых относительных погрешностей рабочих средств измерений СПЭО не должны превышать $\pm 4\%$ в диапазоне длин волн 0,3–1 мкм [4].

Результаты анализа свидетельствуют о том, что пределы погрешности измерения координат цветности на основе измерения СПЭО не превышают примерно $\pm 0,008$. Это соответствует требованиям стандарта [5] для рабочих средств измерений координат

цветности самосветящихся объектов и гораздо уже допусков, регламентируемых стандартом [8], а именно, допустимых четырёхугольников координат цветности для осветительных приборов.

Также это значение согласуется с предельной величиной отклонения результатов измерения координат *x*,

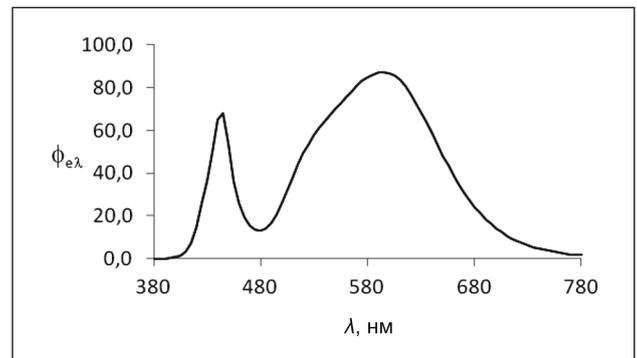


Рис. 1. Относительный спектр излучения светодиода *CREE MK-R3500K*, полученный посредством интерполяции по данным [6]

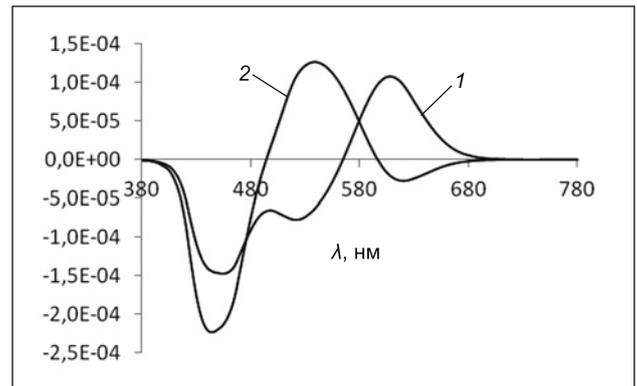


Рис. 2. Светодиод *CREE MK-R3500K*: спектральная зависимость производных $\frac{\partial x}{\partial \phi_{e\lambda}}$ (1) и $\frac{\partial y}{\partial \phi_{e\lambda}}$ (2)

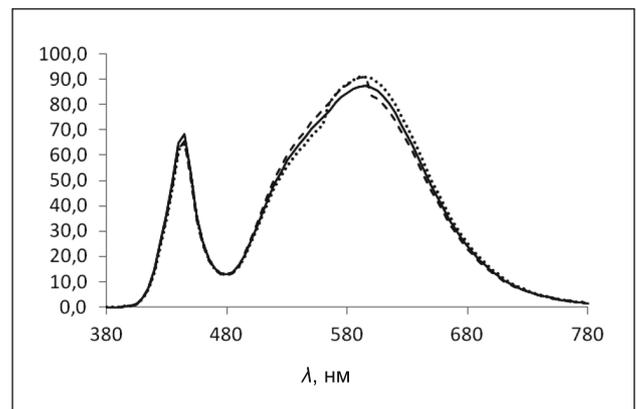


Рис. 3. Относительный спектр излучения светодиода *CREE MK-R3500K* с 4-% ошибками, приводящими к максимальному завышению координаты *x* (пунктирная линия) и *y* (штриховая линия), в сравнении с истинным распределением (сплошная линия)

Рис. 4. Возможные ошибки в расчёте координат x, y вследствие 4-% ошибки в $\phi_{e\lambda}$ для светодиода CREE MK-R3500K

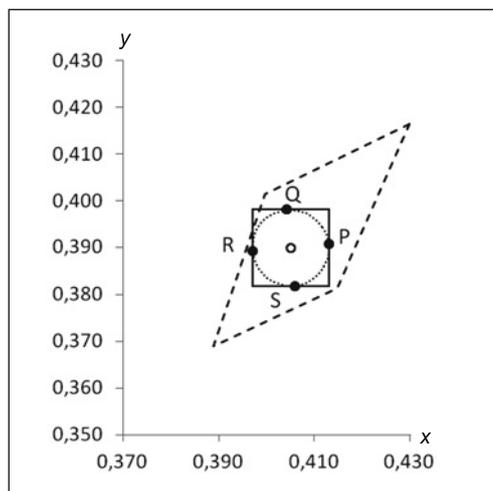


Рис. 5. Относительный спектр излучения светодиода CREE MK-R3500K со случайными независимыми ошибками, распределёнными по нормальному закону с $\mu_{\delta\phi_{e\lambda}} = 0$, $\sigma_{\delta\phi_{e\lambda}} = \left(\frac{0,04}{3}\right)\phi_{e\lambda}$ (пунктирные линии), сплошная линия – истинное распределение

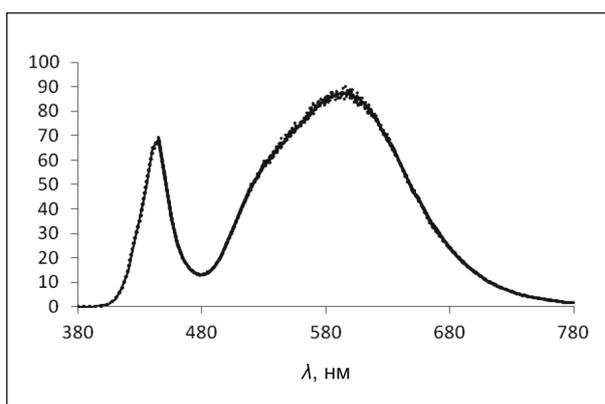
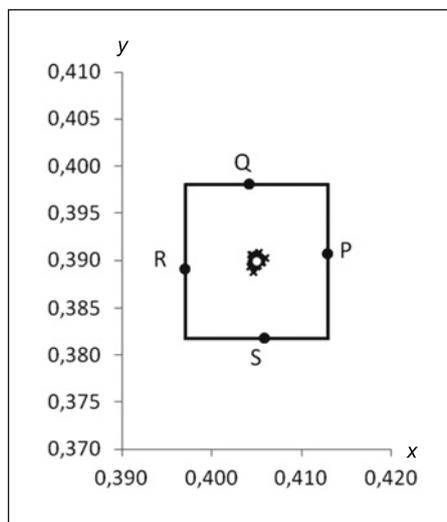


Рис. 6. Воздействие случайных ошибок в относительном спектре излучения светодиода на координаты x, y . Кругик в центре – CREE MK-R3500K; крестики вокруг кружка – точки (x, y) , вычисленные по $\phi_{e\lambda}$ с независимыми случайными ошибками, распределёнными по нормальному закону с $\mu_{\delta\phi_{e\lambda}} = 0$ и

$$\sigma_{\delta\phi_{e\lambda}} = \left(\frac{0,04}{3}\right)\phi_{e\lambda}$$



у при международных межлабораторных сличениях IC2013, равной $\pm 0,005$, [9] и существенно меньше естественного разброса значений цветности серийно производимых светодиодов [10].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. CIE S023/E:2013 Characterization of The Performance of Illuminance Meters and Luminance Meters. 2. CIE179:2007 Methods

for Characterising Tristimulus Colorimeters for Measuring the Colour of Light.

3. Михайлов О.М. Проблемные вопросы радиометрических измерений // Светотехника. – 2015. – № 2. – С. 61–65.

4. ГОСТ 8.195–2013 Государственная система обеспечения единства измерений

Государственная поверочная схема для средств измерений спектральной плотности энергетической яркости, спектральной плотности силы излучения, спектральной плотности энергетической освещённости, силы

излучения и энергетической освещённости в диапазоне длин волн от 0,2 до 25,0 мкм.

5. ГОСТ 8. 205–2014 Государственная система обеспечения единства измерений

Государственная поверочная схема для средств измерений координат цвета и координат цветности, показателей белизны и блеска.

6. URL: <http://www.cree.com/~media/Files/Cree/LED Components and Modules/XLamp/Data and Binning/XLampMKR.pdf> (дата обращения: 30.09.2015).

7. Рекомендации МКО 15:2004. Колориметрия – 3-е изд. (Colorimetry, 3rded.)

8. ГОСТ Р 54350–2011. Группа Е 83. Национальный стандарт Российской Федерации. Приборы осветительные. Светотехнические требования и методы испытаний.

9. Барцев А.А., Беляев Р.И., Столяревская Р.И. Международные межлабораторные сличения – 2013 (IC2013). Опыт и результаты участия ИЦ ВНИСИ // Светотехника. – 2015. – № 5. – С. 35–41.

10. Богданов А.А. Контроль параметров и качества светодиодов и изделий с ними при серийном производстве // Светотехника. – 2015. – № 1. – С. 13–22.



Раиса Иосифовна Столяревская, доктор техн. наук. Окончила в 1968 г. физический факультет Казанского государственного университета.

Научный редактор ООО «Редакция журнала «Светотехника», старший менеджер ООО «ВНИСИ». Представитель Российского национального комитета МКО в Отделении 2 МКО



Шаракшанз Александр Абович, кандидат физ.-мат. наук, доцент. Преподаватель Российского экономического университета им. Г.В. Плеханова



Шаракшанз Антон Сергеевич, кандидат физ.-мат. наук. Научный редактор ООО «Редакция журнала «Светотехника»