

ЭЛЕКТРОНИКА, ФОТОНИКА,
ПРИБОРОСТРОЕНИЕ
И СВЯЗЬ

ELECTRONICS, PHOTONICS,
INSTRUMENT MAKING
AND COMMUNICATIONS

УДК 628.9.041

DOI: 10.17212/2782-2001-2022-3-75-88

Оценка пространственного распределения спектроколориметрических характеристик светодиодных ламп в шагах МакАдама^{*}

М.В. АНДРЕЕВА^а, В.С. СОЛДАТКИН^б, В.И. ТУЕВ^с

634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, Томский государственный университет систем
управления и радиоэлектроники

^а mariya_andreeva_97@bk.ru ^б soldatkinvs@main.tusur.ru ^с vasilii.i.tuev@tusur.ru

Современные источники света, такие как светодиоды, позволяют создавать высокоэффективные световые приборы с высоким индексом цветопередачи (не менее 85) и световой отдачей до 250 лм/Вт. Недостаточное освещение может вызывать зрительный дискомфорт. Длительное пребывание в условиях зрительного дискомфорта и напряжения приводят к недостатку сосредоточенности, зрительному и общему утомлению. Главной задачей, которая стоит перед производителями светотехники, является сведение к минимуму различия цветов между отдельными осветительными приборами либо между партиями продукции. В настоящей работе необходимо было провести оценку пространственного распределения спектроколориметрических характеристик светодиодных ламп в шагах МакАдама. Для этого вначале рассматривались такие понятия, как комфортная световая среда, коррелированная цветовая температура и эллипсы МакАдама. Далее необходимо было измерить 10 образцов светодиодного излучающего элемента. Измерения проводились с помощью таких приборов, как гониофотометр и спектроколориметр. В результате получены основные колориметрические характеристики, такие как координаты цветности. На основе координат цветности рассчитано отклонение цвета в шагах МакАдама для каждого образца. Также проведен регрессионный анализ и получено аппроксимирующее выражение для координат цветности. На основе аппроксимирующего выражения для координат цветности рассчитано усредненное отклонение цвета в шагах МакАдама. Значение составило 5 шагов. Также было рассчитано отклонение для значений –40 и 40. Для того чтобы снизить цветовое отклонение (уменьшить количество шагов МакАдама), необходимо провести изменения в технологическом процессе изготовления люминофорной композиции (например, уменьшить толщину люминофорного покрытия или уменьшить концентрацию люминофора). Результаты данных исследований могут быть использованы разработчиками светодиодных ламп на основе светодиодных излучающих элементов с целью улучшения равномерности пространственного распределения цвета.

^{*} Статья получена 18 мая 2022 г.

Ключевые слова: комфортная световая среда, светодиодное освещение, коррелированная цветовая температура, индекс цветопередачи, эллипсы МакАдама, люминофорная композиция, коэффициент пульсаций, светодиодный излучающий элемент, регрессионный анализ, аппроксимация

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время люди используют множество видов энергии. Свет является наиболее востребованной энергией – ключевым элементом нашей жизни. Он позволяет видеть, оценивать форму и цвет предметов, которые окружают нас в повседневной жизни. Наибольшую часть информации, которая поступает из окружающего мира, а это примерно 80 %, человек получает с помощью зрения. Кроме того, от освещения зависит человеческое самочувствие, душевное состояние и степень усталости. Если смотреть со стороны безопасности труда, то зрительная способность и зрительный комфорт чрезвычайно важны.

Недостаточное освещение может вызывать зрительный дискомфорт. Длительное пребывание в условиях зрительного дискомфорта и напряжения приводят к недостатку сосредоточенности, зрительному и общему утомлению [1–3].

Главной задачей, которая стоит перед производителями светотехники, является сведение к минимуму различия цветов между отдельными осветительными приборами либо между партиями продукции.

Однородная цветность имеет очень важное значение, особенно в эстетическом плане. Например, непрерывная световая линия подсветки стен может выявить даже небольшие различия в цветности, особенно если стена будет белой и глянцевой [4].

Целью настоящей работы является проведение оценки соответствия пространственного распределения спектроколориметрических характеристик светодиодных ламп в шагах МакАдама.

Необходимо выполнить следующие задачи:

- 1) измерить основные пространственные спектроколориметрические характеристики светодиодных излучающих элементов (СИЭ) – светящихся тел светодиодных ламп;
- 2) рассчитать отклонения цвета в шагах МакАдама для каждого образца;
- 3) провести регрессионный анализ и получить аппроксимирующее выражение для координат цветности.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Современные источники света, такие как светодиоды, позволяют создавать высокоэффективные световые приборы с высоким индексом цветопередачи (не менее 85) и световой отдачей до 250 лм/Вт [5].

К сожалению, отклонений значений коррелированной цветовой температуры и яркости светодиодов не избежать. Наиболее оптимальный вариант – это максимально оптимизировать производственный процесс и произвести сортировку светодиодов после их изготовления. Данный процесс заключается в том, что происходит сортировка продуктов, и если обнаруживаются какие-

либо отклонения, то их сортируют по отделам. В один отдел попадают светодиоды, которые имеют одинаковую цветовую температуру. Данный процесс сортировки носит название биннинга.

Перед производителями светотехнических изделий стоит задача сведения к минимуму различия цветов между отдельными осветительными приборами либо между партиями продукции. Однако не все задачи анализа светодиодных светотехнических изделий в виде светодиодных ламп в части пространственного отклонения цвета в шагах МакАдама решены.

1.1. КОРРЕЛЛИРОВАННАЯ ЦВЕТОВАЯ ТЕМПЕРАТУРА

В документации на осветительный прибор, а также на сайте производителя должно быть указано, какой размер области цветности (допуск по КЦТ) используется для данного осветительного прибора (ОП): 4 или 7 шагов МакАдама.

Для создания комфортной светоцветовой среды следует применять области соответствующих наименьшему количеству шагов МакАдама, что позволяет снизить возможное цветовое различие между приборами, расположенными рядом. Применение областей цветности более 7 шагов МакАдама недопустимо [6].

Распределение светильников общего освещения по коррелированной цветовой температуре в помещении должно быть однородным, применение цветовых контрастов в рабочих помещениях не рекомендуется. Применение цветовых контрастов допускается в помещениях, где не требуется выполнять задания, связанные с высокой зрительной нагрузкой (например, холлы или фойе). В этом случае цветовые контрасты должны быть согласованы с дизайн-проектом помещения [7].

1.2. ЭЛЛИПСЫ МАКАДАМА

Эллипс МакАдама – это пространство на диаграмме цветности, которая содержит в себе все цвета, почти невидимые для глаза человека от цвета в центре эллипса. Поэтому контуры эллипса показывают едва заметные различия в цветности. Стандартное отклонение соответствия цветов в светодиодном освещении использует отклонения относительно эллипсов МакАдама для описания точности цвета источника [8, 9].

Дэвид МакАдам провел эксперимент, в котором наблюдатель видел два разных цвета при определенной яркости около 48 кд/м². Первый цвет, а именно «тестовый» цвет, был фиксированным, но другой настраивался наблюдателем, и его просили настраивать этот цвет до тех пор, пока он не будет совпадать с тестовым цветом. Глаз человека имеет ограниченную точность, поэтому совпадение не было идеальным. Однако Дэвид МакАдам обнаружил, что все совпадения, которые совершил наблюдатель, попадали в эллипс на диаграмме цветности CIE 1931 года. Измерения проводились в 25 точках на диаграмме цветности, и было обнаружено, что размер и ориентация эллипсов на диаграмме широко варьировались в зависимости от тестового цвета. Эти 25 эллипсов, измеренные Дэвидом МакАдамом для конкретного наблюдателя, показаны на диаграмме цветности (рис. 1) [10].

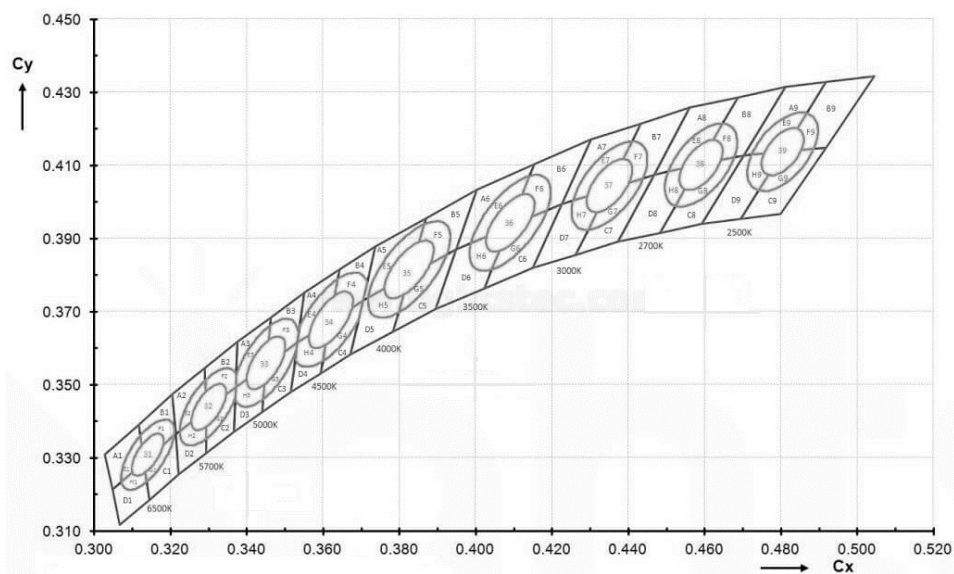


Рис. 1. График цветностей МКО 1931 года с линией абсолютно черного тела и семейством четырехугольников допустимых отклонений КЦТ (фрагмент в пределах диапазона цветových температур 2500...7100 K)

Fig. 1. The 1931 CIE chromaticity graph with a black body line and a family of CCT tolerance quadrangles (a fragment within the color temperature range of 2500-7100 K)

Цветовая температура источника света определяется точкой, соответствующей его цветности на линии черного тела, нанесенной на цветовом графике международной комиссии по освещению (МКО) [11].

Результаты МакАдама подтвердили прежние предположения, что разницу в цвете можно измерить с помощью метрики в пространстве цветности [12].

2. ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

2.1. ИЗМЕРЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СПЕКТРОКОЛОРИМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Для измерения основных характеристик лампы использовался спектроколориметр ТКА-ВД. Так как необходимо было измерить параметры светодиодного излучающего элемента в пространстве, лампа крепилась к гониофотометру. Напротив лампы устанавливался спектроколориметр и проводились измерения 10 образцов при диапазоне угла от -40 до 40 градусов.

Гониофотометрическая установка (рис. 2) представляет собой платформу, способную свободно поворачиваться вокруг вертикальной оси, на которой размещается исследуемый источник [13–15].

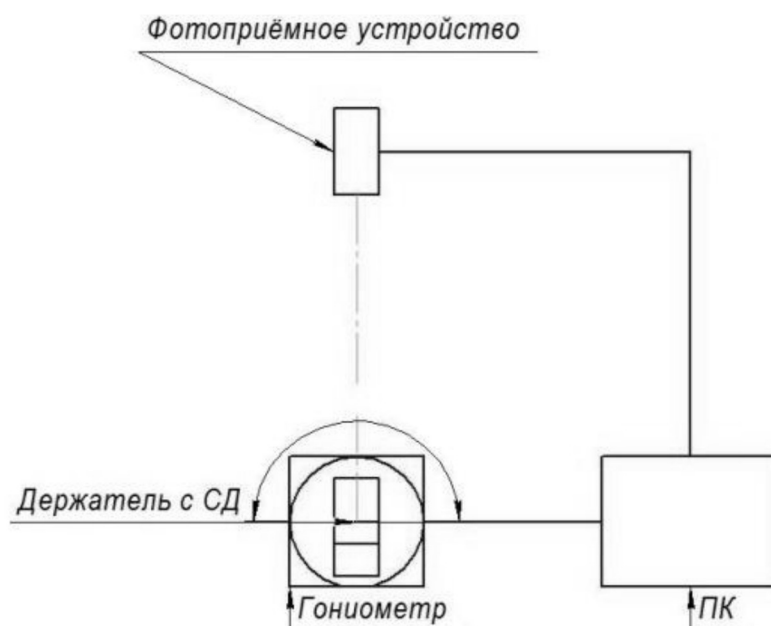


Рис. 2. Установка, необходимая для определения пространственного распределения координат цветности

Fig. 2. The setup required to determine the spatial distribution of chromaticity coordinates

Светодиодный излучающий элемент состоит из несущей конструкции, кристаллов и люминофора. В качестве материала несущей конструкции выступают керамика. На основание устанавливаются кристаллы синего цвета свечения методом COB (Chip-on-Board). Мощность данного СИЭ составляет 2 Вт. Располагают 28 кристаллов, соединенных последовательно (рис. 3) [16].

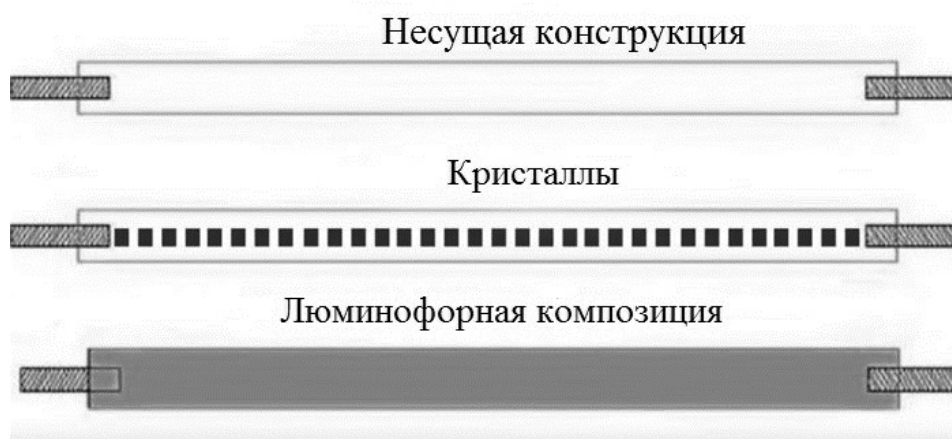


Рис. 3. Конструкция светодиодного излучающего элемента

Fig. 3. The design of the LED emitting element

Измерения координат цветности проводились в горизонтальной плоскости. В других плоскостях результаты измерений были недостоверны.

Результаты показаны на рис. 4 и 5. Пунктирной линией обозначены доверительные интервалы.

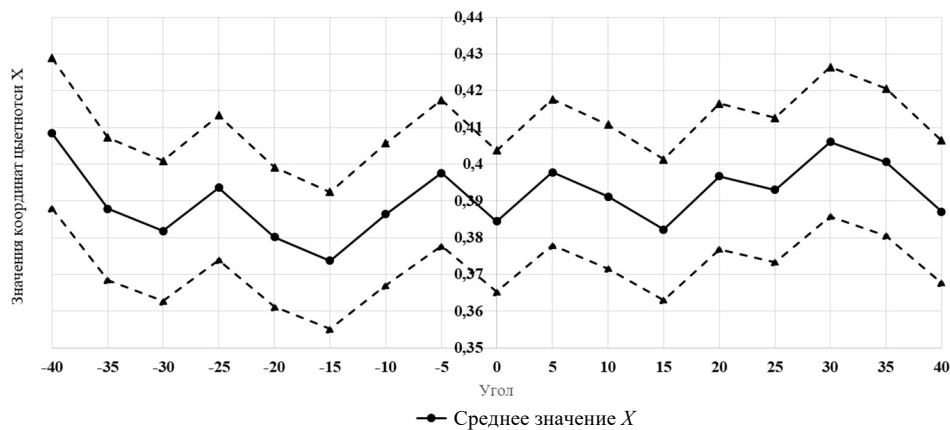


Рис. 4. Зависимость координат цветности X от угла излучения светодиодного излучающего элемента

Fig. 4. Dependence of the chromaticity coordinates X on the emission angle of the LED radiating element

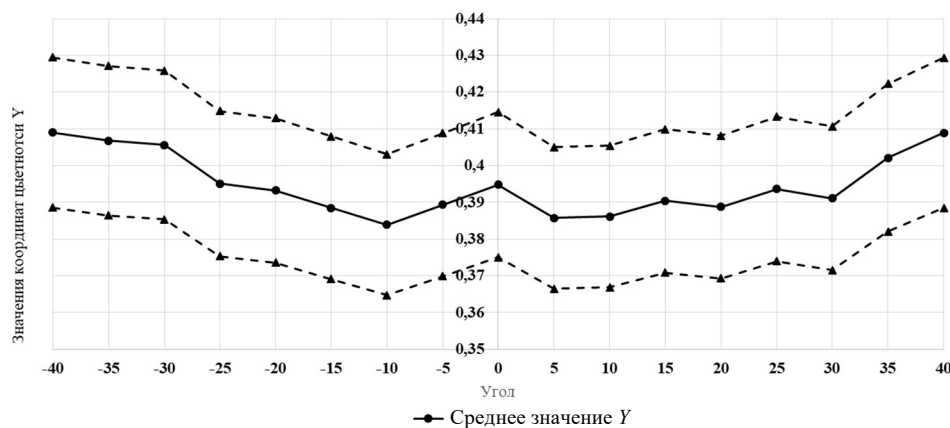


Рис. 5. Зависимость координат цветности Y от угла излучения светодиодного излучающего элемента

Fig. 5. Dependence of the chromaticity coordinates Y on the emission angle of the LED radiating element

2.2. ПРОВЕДЕНИЕ РЕГРЕССИОННОГО АНАЛИЗА И РАСЧЕТ ЭЛЛИПСОВ МАКАДАМА

Для того чтобы получить аналитическое выражение, которое аппроксимирует координаты цветности, нужно использовать полиномиальное приближение [17]:

$$I(\alpha) = \beta_0 + \beta_1\alpha + \beta_2\alpha^2 + \beta_3\alpha^3 + \beta_4\alpha^4 + \dots + \beta_n\alpha^n, \quad (1)$$

где $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \dots, \beta_n$ – коэффициенты, которые необходимо определить.

Для получения правильного аппроксимирующего выражения достаточно первых трех членов разложения

$$I(\alpha) = \beta_0 + \beta_1\alpha^2 + \beta_2\alpha^4. \quad (2)$$

Чтобы найти коэффициенты $\beta_0, \beta_1, \beta_2$ выражения (2), нужно использовать задачу множественной линейной регрессии. Чтобы это сделать, представим результаты измерений и коэффициенты модели (2) в виде матрицы [17]:

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}; \quad A = \begin{bmatrix} 1 & \alpha_1^2 & \alpha_1^4 \\ 1 & \alpha_2^2 & \alpha_2^4 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \alpha_n^2 & \alpha_n^4 \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \end{bmatrix}; \quad e = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix},$$

где x – вектор-столбец, который состоит из n измеренных значений координат цветности в интервале углов от -40° (α_1) до $+40^\circ$ (α_n); A – матрица, состоящая из независимых переменных; B – вектор-столбец, который включает в себя коэффициенты из выражения (2); e – вектор-столбец отклонений, предсказываемых выражением (2) значений координат цветности, от измеренных значений x_1, x_2, \dots, x_n .

В виде матрицы выражение для e имеет вид [17]

$$e = I - AB. \quad (3)$$

Используем метод наименьших квадратов:

$$\sum_{i=1}^n e_i^2 = e^T e = (I - AB)^T (I - AB) \rightarrow \min. \quad (4)$$

Условие (4) будет выполняться, если вектор-столбец B находим по формуле (5) [17]:

$$B = (A^T A)^{-1} A^T I. \quad (5)$$

Графики координат цветности состоят из $n = 17$ точек, шаг по углу α составляет 5° . Решение уравнения (5) при использовании значений углов и координат цветности графиков на рис. 3 и 4 дают коэффициенты.

Для координаты X :

$$\beta_0 = 3,88 \cdot 10^{-1};$$

$$\beta_1 = 1,623 \cdot 10^{-5} \text{ град}^{-2};$$

$$\beta_2 = -6,431 \cdot 10^{-9} \text{ град}^{-4}.$$

Для координаты Y :

$$\beta_0 = 3,9 \cdot 10^{-1};$$

$$\beta_1 = -8,754 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-2};$$

$$\beta_2 = 1,409 \cdot 10^{-8} \text{ град}^{-4}.$$

Соответственно, получим аппроксимирующие выражения для координат X (6) и Y (7) [17]:

$$x_{norm}(\alpha) = 3,88 \cdot 10^{-1} + 1,623 \cdot 10^{-5} - 6,431 \cdot 10^{-9}; \quad (6)$$

$$y_{norm}(\alpha) = 3,9 \cdot 10^{-1} - 8,754 \cdot 10^{-6} + 1,409 \cdot 10^{-8}. \quad (7)$$

Для оценки качества аппроксимации рассчитаем средние ошибки аппроксимации по формулам (8) и (9):

$$\eta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{x_i - \hat{x}_i}{x_i} \right| \cdot 100 \%; \quad (8)$$

$$\eta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \cdot 100 \%, \quad (9)$$

где n – количество точек графика, в которых измерялись координаты цветности ($n = 17$, шаг по углу α составляет 5°); x_i – измеренные координаты цветности; \hat{x}_i – рассчитанные с помощью аппроксимирующего выражения координаты цветности [17].

Средняя ошибка аппроксимации для выражения (8) составляет

$$\eta_{\text{polynomial}} = 2,6 \%.$$

Для выражения (9)

$$\eta_{\text{polynomial}} = 1,0 \text{ \%}.$$

Рассчитаем отклонение цвета в величинах МакАдама по формуле (10) [6]:

$$n = \frac{\sqrt{(u' - u'_c)^2 + (v' - v'_c)^2}}{0,0011}, \quad (10)$$

где n – отклонение цвета рассматриваемого ОП от номинального значения в шагах МакАдама; u' , v' – координаты цветности рассматриваемого ОП в колориметрической системе МКО 1976 года; u'_c , v'_c – координаты цветности номинальной КЦТ в колориметрической системе МКО 1976 года;

Перевод координат цветности колориметрической системы МКО 1931 года (x , y) в систему МКО 1976 года (u'_c , v'_c) производится по следующим формулам (11), (12):

$$u'_c = \frac{4x}{-2x + 12y + 3}; \quad (11)$$

$$v'_c = \frac{9y}{-2x + 12y + 3}. \quad (12)$$

Значения координат цветности номинальной КЦТ возьмем из стандарта СТО.69159079-01[18]. Данные значения представлены в таблице [19, 20].

**Координаты центра области цветности допустимых отклонений
коррелированной цветовой температуры**

**Coordinates of the center of the chromaticity region of the permissible deviations
of the correlated color temperature**

| Точки координат цветности четырех- угольников | | Координаты цветности при номинальном значении КЦТ, К | | | | | |
|---|-----|--|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | 3500 | 4000 | 4500 | 5000 | 5700 | 6500 |
| Центральная точка | x | 0,4078 | 0,3818 | 0,3613 | 0,3446 | 0,3287 | 0,3123 |
| | y | 0,3930 | 0,3797 | 0,3670 | 0,3551 | 0,3425 | 0,3283 |

На основании аппроксимирующих выражений (6) и (7) для координат цветности получены усредненные значения координат x и y . Их значения соответственно 0,388 и 0,390.

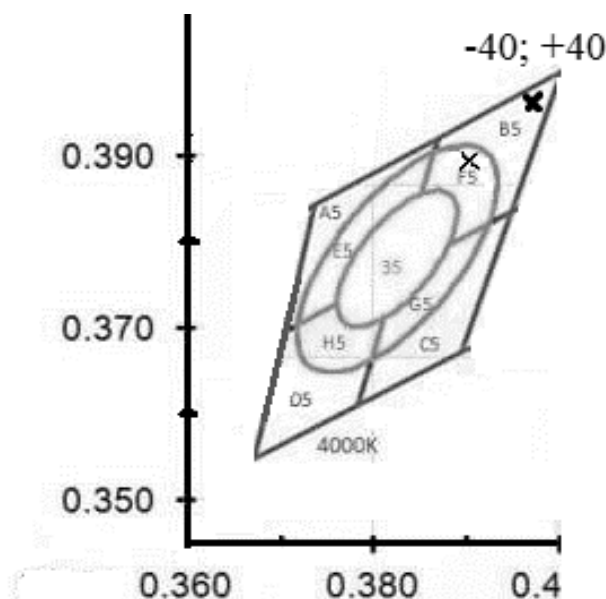


Рис. 6. Значения отклонения цвета в шагах МакАдама

Fig. 6. Color Deviation Values in MacAdam Steps

По полученным значениям рассчитано усредненное отклонение в шагах МакАдама. Усредненное значение приведено на рис. 6. Также приведено значение максимального отклонения цвета при углах $+40^\circ$ и -40° .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе рассмотрены характеристики осветительных приборов, которые оказывают визуальное влияние на человека: коррелированная цветовая температура (КЦТ), координаты цветности и отклонение цвета в шагах МакАдама.

Проведены измерения для 10 образцов светодиодного излучающего элемента. Измерения проводились на спектроколориметре и гониофотометре.

Был проведен регрессионный анализ для данных образцов. Получены аппроксимирующие выражения для координат X и Y . Рассчитаны средние ошибки аппроксимации для данных координат. Они составили 2,6 % и 1,0 % соответственно.

На основе аппроксимирующего выражения для координат цветности рассчитано усредненное отклонение цвета в шагах МакАдама. Значение составило 5 шагов.

На основе данных исследований можно сделать следующий вывод:

1) все образцы светодиодных излучающих элементов входят в допустимый интервал на основании СТО.69159079-05-2020;

2) для того чтобы снизить цветовое отклонение (уменьшить количество шагов МакАдама), необходимо провести изменения в технологическом процессе изготовления люминофорной композиции (например, уменьшить толщину люминофорного покрытия или уменьшить концентрацию люминофора).

Результаты данных исследований могут быть использованы разработчиками светодиодных ламп на основе светодиодных излучающих элементов с целью улучшения равномерности пространственного распределения цвета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Schubert E.F.* Light emitting diodes. – 2nd ed. – Cambridge: Cambridge University Press, 2006. – 422 p.
2. *Феоктистова Т.Г., Феоктистова О.Г., Наумова Т.В.* Безопасность жизнедеятельности. Производственная санитария и гигиена труда. Ч. 2. Защита от производственных излучений. – М.: МГТУ ГА, 2007. – 112 с.
3. *Thomas W., Murphy Jr.* Maximum spectral luminous efficacy of white light // *Journal of Applied Physics*. – 2012. – Vol. 111. – P. 104909.
4. Системы БИНов у разных производителей / ООО «Новолампа». – URL: <https://novo-lampa.ru/baza-znaniy/sistemy-binov-u-raznykh-proizvoditeley/> (дата обращения 26.08.2022).
5. White light emitting diodes with super-high luminous efficacy / Y. Narukawa, M. Ichikawa, D. Sanga, M. Sano, T. Mukai // *Journal of Physics: Applied Physics*. – 2010. – Vol. 43. – P. 354002.
6. СТО 69159079-05-2020. Приборы осветительные светодиодные. Требования к комфортной цветовой среде / Ассоциация производителей светодиодов и систем на их основе (АПСС). – М.: АПСС, 2020. – 76 с.
7. *Варфоломеев Л.П.* Элементарная светотехника. – М.: Световые технологии, 2013. – 285 с.
8. Теория цвета. Цветовые модели. CS255. Computer Graphics Introduction Course. – URL: <https://docplayer.com/91938902-Teoriya-cveta-cvetovye-modeli-cs255-computer-graphics-introduction-course-turlapov-vadim-evgenevich-prof-kaf.html> (дата обращения: 15.01.2022).
9. *Guild J.* The colorimetric properties of the spectrum // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character*. – 1932. – Vol. 230. – P. 149–187.
10. Что такое MacAdam Ellipses или цветные овалы? – URL: <https://svetorg.ru/informatsiya/novosti/cto-takoe-macadam-ellipses-ili-tsvetnye-ovaly/?ysclid=l7a1ewz3w1203149075> (дата обращения: 26.08.2022).
11. ГОСТ Р 54350-2015. Приборы осветительные. Светотехнические требования и методы испытаний. – М.: Стандартинформ, 2015. – 78 с.
12. Talking photometry: LED colour difference metrics: SDCM & MacAdam Ellipses. – URL: http://www.photometrictesting.co.uk/File/blog_LED_colour_difference.php (accessed: 26.08.2022).
13. *Пан Д., Ли К.* Универсальный гониофотометр // Полупроводниковая светотехника. – 2011. – Т. 3, № 11. – С. 36–38. – URL: <https://led-e.ru/measuring/universalnyj-goniotometr/> (дата обращения: 26.08.2022).
14. Спектроколориметр «ТКА–ВД». – URL: http://www.spectrocolorimeter.ru/modif/tka_vd.html (дата обращения: 26.01.2022).
15. Пространственное распределение коррелированной цветовой температуры светодиодной лампы общего применения / М.В. Андреева, Е.С. Ганская, Е.С. Гайбович, А.И. Черепнев // Электронные средства и системы управления: материалы докладов XIV Международной научно-практической конференции 28–30 ноября 2018 г.: в 2 ч. – Томск, 2018. – Ч. 1. – С. 249–252.
16. *Стасенко Ю.И., Андреева М.В., Юлаева Ю.В.* Исследование кривой силы света светодиодных ламп общего назначения // Научная сессия ТУСУР-2019: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 22–24 мая 2019 г.: в 4 ч. – Томск, 2019. – Ч. 2 – С. 44–47.
17. *Юлаева Ю.В., Хомяков А.Ю., Туев В.И.* Математическое моделирование пространственного распределения силы света нитевидного излучателя для светодиодных ламп // Электронные средства и системы управления: материалы докладов XVI Международной научно-практической конференции 18–20 ноября 2020 г.: в 2 ч. – Томск, 2020. – Ч. 1. – С. 241–245.
18. СТО 69159079-01-2018. Приборы осветительные светодиодные. Требования к техническим и эксплуатационным параметрам / Ассоциация производителей светодиодов и систем на их основе (АПСС). – М.: АПСС, 2018. – 25 с.

19. Расчет коэффициентов множественной линейной регрессии матричным способом. – URL: <http://univer-nn.ru/ekonometrika/raschet-koefficientov-mnozhestvennoj-linejnoy-regressii-matrichnym-sposobom/> (дата обращения: 26.08.2022).

20. Галочкин В.Т. Эконометрика. – М.: Юрайт, 2019. – 288 с.

Андреева Мария Владимировна, аспирант, ассистент кафедры радиоэлектронных технологий и экологического мониторинга Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. Основное направление научных исследований – проведение исследовательских испытаний светодиодных излучающих элементов. Имеет более 10 печатных работ. E-mail: mariya_andreeva_97@bk.ru.

Солдаткин Василий Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры радиоэлектронных технологий и экологического мониторинга Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. Основное направление научных исследований – технологии производства энергоэффективных световых устройств. Имеет более 40 печатных работ и учебных пособий. E-mail: soldatkinvs@main.tusur.ru.

Тувев Василий Иванович, доктор технических наук, доцент кафедры радиоэлектронных технологий и экологического мониторинга Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. Основное направление научных исследований – технологии производства энергоэффективных световых устройств. Имеет более 50 печатных работ и учебных пособий. E-mail: tvj_retem@main.tusur.ru

Andreeva Maria V., postgraduate student, teaching assistant at the department of radioelectronic technologies and environmental monitoring, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. The main field of scientific research is research testing of LED emitting elements. She has more than 10 publications. E-mail: mariya_andreeva_97@bk.ru.

Soldatkin Vasily S., PhD (Eng.), associate professor at the Department of Radioelectronic Technologies and Environmental Monitoring, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. The main field of his scientific research is the production technology of energy-efficient lighting devices. He has more than 40 publications and teaching aids. E-mail: soldatkinvs@main.tusur.ru.

Tuev Vasily I., D.Sc. (Eng.), associate professor at the Department of Radioelectronic Technologies and Environmental Monitoring, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. The main field of his scientific research is the production technology of energy-efficient lighting devices. He has more than 50 printed works and manuals. E-mail: tvj_retem@main.tusur.ru

DOI: 10.17212/2782-2001-2022-3-75-88

Estimation of spatial distribution of spectrophotometric characteristics of LED lamps in MacAdam steps*

M.V. ANDREEVA^a, V.S. SOLDATKIN^b, V.I. TUEV^c

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 40 Lenina Prospekt, Tomsk, 634050, Russian Federation

^a mariya_andreeva_97@bk.ru ^b soldatkinvs@main.tusur.ru ^c vasilii.i.tuev@tusur.ru

Abstract

Modern light sources, such as LEDs, make it possible to create highly efficient lighting devices with a high color rendering index (at least 85), and a luminous efficiency of up to 250 lm/W. Insufficient lighting can cause visual discomfort. A long stay in conditions of visual discomfort and tension leads to a lack of concentration, visual and general fatigue. The main

* Received 18 May 2022.

challenge facing lighting manufacturers is to minimize color differences between individual lighting fixtures or between production batches. In this work, it was necessary to evaluate the spatial distribution of the spectrophotometric characteristics of LED lamps in MacAdam steps. To do this, at the beginning, such concepts as a comfortable light environment, correlated color temperature and MacAdam ellipses were considered. Further, it was necessary to measure 10 samples of the LED emitting element. The measurements were carried out using such instruments as a goniophotometer and a spectrophotometer. As a result, the main colorimetric characteristics, such as color coordinates, were obtained. Based on the chromaticity coordinates, the color deviation in MacAdam steps was calculated for each sample. Also, a regression analysis was carried out and an approximating expression for the chromaticity coordinates was obtained. On the basis of the approximating expression for the chromaticity coordinates, the average color deviation in MacAdam steps was calculated. The value made up 5 steps. The deviation for the values -40 and 40 was also calculated. In order to reduce the color deviation (reduce the number of MacAdam steps), it is necessary to make changes in the technological process of manufacturing the phosphor composition. For example, to reduce the thickness of the phosphor coating or reduce the concentration of phosphor. The results of these studies can be used by the developers of LED lamps based on LED emitting elements in order to improve the uniformity of the spatial distribution of color.

Keywords: comfortable light environment, LED lighting, correlated color temperature, color rendering index, MacAdam ellipses, phosphor composition, ripple factor, LED emitting element, regression analysis, approximation

REFERENCES

1. Schubert E.F. *Light emitting diodes*. 2nd ed. Cambridge, Cambridge University Press, 2006. 422 p.
2. Feoktistova T.G., Feoktistova O.G., Naumova T.V. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti. Proizvodstvennaya sanitariya i gigiena truda*. Ch. 2. *Zashchita ot proizvodstvennykh izlucheni* [Life safety. Industrial sanitation and labor hygiene. Pt. 2. Protection from industrial radiation]. Moscow, MGTU GA Publ., 2007. 112 p.
3. Thomas W., Murphy Jr. Maximum spectral luminous efficacy of white light. *Journal of Applied Physics*, 2012, vol. 111, p. 104909.
4. *Sistemy BINov u raznykh proizvoďtelei* [BIN systems from different manufacturers]. Novolampa LLC. (In Russian). Available at: <https://novolampa.ru/baza-znaniy/sistemy-binov-u-raznykh-proizvoďtelei/> (accessed 26.08.2022).
5. Narukawa Y., Ichikawa M., Sanga D., Sano M., Mukai T. White light emitting diodes with super-high luminous efficacy. *Journal of Physics: Applied Physics*, 2010, vol. 43, p. 354002.
6. STO 69159079-05-2020. *Pribory osvetitel'nye svetodiodnye. Trebovaniya k komfortnoi tsvetovoi srede* [Standard organization 69159079-05-2020. LED lighting devices. Requirements for a comfortable color environment]. Association of Manufacturers of LEDs. Moscow, APSS Publ., 2020. 76 p.
7. Varfolomeev L.P. *Elementarnaya svetotekhnika* [Elementary lighting engineering]. Moscow, Svetovye tekhnologii Publ., 2013. 285 p.
8. *Teoriya tsveta. Tsvetovye modeli*. CS255. *Computer Graphics Introduction Course* [Color theory. color models. CS255. Computer Graphics Introduction Course]. Available at: <https://docplayer.com/91938902-Teoriya-cveta-cvetovye-modeli-cs255-computer-graphics-introduction-course-turlapov-vadim-evgenevich-prof-kaf.html> (accessed 01.15.2022).
9. Guild J. The colorimetric properties of the spectrum. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character*, 1932, vol. 230, pp. 149–187.
10. *Chto takoe MacAdam Ellipses ili tsvetnye ovaly?* [What are MacAdam Ellipses or colored ovals?]. Available at: <https://svetorg.ru/informatsiya/novosti/chto-takoe-macadam-ellipses-ilitsvetnye-ovaly/> (accessed 26.08.2022).

11. GOST R 54350-2015. *Pribory osvetitel'nye. Svetotekhnicheskie trebovaniya i metody ispytaniy* [State Standard R 54350-2015. Lighting devices. Lighting requirements and test methods]. Moscow, Standartinform Publ., 2015. 78 p.
12. *Talking photometry: LED colour difference metrics: SDCM & MacAdam Ellipses*. Available at: http://www.photometrictesting.co.uk/File/blog_LED_colour_difference.php (accessed 26.08.2022).
13. Pan D., Li K. Universal'nyi goniofotometr [Universal goniophotometer]. *Poluprovodnikovaya svetotekhnika = Solid-State Lighting*, 2011, vol. 3, no. 11, pp. 36–38. Available at: <https://led-e.ru/measuring/universalnyj-goniofotometr/> (accessed 26.08.2022).
14. Spektrokolorimetr «TKA–VD» ["TKA–VD" Spectrocolorimeter]. Available at: http://www.spectrocolorimeter.ru/modif/uka_vd.html (accessed 26.08.2022).
15. Andreeva M.V., Ganskaya E.S., Gaibovich E.S., Cherepnev A.I. [Spatial distribution of the correlated color temperature of a general-purpose LED lamp]. *Elektronnye sredstva i sistemy upravleniya* [Electronic means and control systems]. Materials of reports of the XIV International Scientific and Practical Conference, November 28–30, 2018, Tomsk, 2018, pt. 1, pp. 249–252. (In Russian).
16. Stasenko Yu.I., Andreeva M.V., Yulaeva Yu.V. [A study of the luminous intensity curve of general purpose LED lamps]. *Nauchnaya sessiya TUSUR-2019* [Scientific session TUSUR-2019]. Materials of the International scientific and technical conference of students, graduate students and young scientists, Tomsk, May 22–24, 2019, pt. 2, pp. 44–47. (In Russian).
17. Yulaeva Yu.V., Khomyakov A.Yu., Tuv V.I. [Mathematical *Elektronnye sredstva i sistemy upravleniya* [Electronic means and control systems]. Materials of reports of the XVI International Scientific and Practical Conference November 18–20, 2020, Tomsk, 2020, pt. 1, pp. 241–245. (In Russian).
18. STO 69159079-01-2018. *Pribory osvetitel'nye svetodiodnye. Trebovaniya k tekhnicheskim i ekspluatatsionnym parametram* [Standard organization 69159079-01-2018. LED lighting fixtures. Requirements for technical and operational parameters]. Association of Manufacturers of LEDs. Moscow, APSS Publ., 2018. 25 p.
19. Raschet koeffitsientov mnozhestvennoi lineinoi regressii matrichnym sposobom [Calculation of coefficients of multiple linear regression in a matrix way]. Available at: <http://univer-nn.ru/ekonometrika/raschet-koefficientov-mnozhestvennoj-lineinoj-regressii-matrichnym-sposobom/> (accessed 26.08.2022).
20. Galochkin V.T. *Ekonometrika* [Econometrics]. Moscow, Yurait Publ., 2019. 288 p.

Для цитирования:

Андреева М.В., Солдаткин В.С., Туев В.И. Оценка пространственного распределения спектроколориметрических характеристик светодиодных ламп в шагах МакАдама // Системы анализа и обработки данных. – 2022. – № 3 (87). – С. 75–88. – DOI: 10.17212/2782-2001-2022-3-75-88.

For citation:

Andreeva M.V., Soldatkin V.S., Tuv V.I. Otsenka prostranstvennogo raspredeleniya spektrokolorimetricheskikh kharakteristik svetodiodnykh lamp v shagakh MakAdama [Estimation of spatial distribution of spectrophotometric characteristics of LED lamps in MacAdam steps]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*, 2022, no. 3 (87), pp. 75–88. DOI: 10.17212/2782-2001-2022-3-75-88.