

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЛОРИМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ СВЕТОДИОДНОЙ СИСТЕМЫ

Афонин В.В.¹, Борискина А.А.¹, Коваленко О.Ю.¹

¹Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева, Саранск, Россия (430005, Саранск, ул. Больше-
вистская, 68), e-mail: anna_a_medvedeva@mail.ru

В настоящее время большое внимание уделяется вопросам ресурсо- и энергосбережения. В частности, задача повышения энергосбережения и энергоэффективности в светотехнике решается путем внедрения светодиодных осветительных приборов. В данной работе освещается разработка математической модели с программной реализацией расчета количества светодиодов, необходимых для создания осветительной системы на базе светодиодов различной цветности, с целью получения спектра излучения с минимальным отклонением расчетных координат цветности от заданных значений. Расчеты, положенные в программную реализацию алгоритмов, основывались на полученной экспериментальным путем базе данных параметров светодиодов. Программа и пользовательское приложение на ее основе были созданы в инструментальной среде MATLAB R2012b. Предварительный анализ показывает, что при определении количества светодиодов для получения заданной цветности при условии относительной погрешности расчета порядка 0,5–1,5 % имеется возможность разработки осветительного прибора (системы) с высокой точностью воспроизведения цветовой температуры. Возможны также решения и при погрешности менее 0,5 %. Достоинством разработанной модели является то, что могут быть предложены множество различных режимов работы светодиодной осветительной системы, обеспечена подстройка цветности системы для различных интерьеров, для определенного времени суток и сезонов года, выполнена корректировка цветности при деградации светодиодов в результате старения. Разработана концептуальная, логическая, математическая модель расчета спектров с заданными координатами цветности и цветовой температурой.

Ключевые слова: светодиод, спектр, индекс цветопередачи, модель, расчет, алгоритм, погрешность.

MATHEMATICAL MODEL TO DETERMINE THE COLORIMETRIC CHARACTERISTICS OF LED SYSTEMS MULTICOMPONENT

Afonin V.V.¹, Boriskina A.A.¹, Kovalenko O.U.¹

¹Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia (430005, Saransk, Bolshhevistskaya, st., 68), e-mail: crystal2000@mail.ru

Currently, much attention is paid to the resource and energy conservation. In particular, the problem of increasing energy conservation and energy efficiency in lighting is achieved by implementation of LED lighting products. This paper highlights the development of a mathematical model to software calculate the number of LEDs needed to create a lighting system based on LEDs of different color, in order to obtain the spectrum with a maximum deviation calculated chromaticity coordinates of the given values. The calculations required in the software implementation of the algorithms, based on an experimentally derived data base parameters of LEDs. The program and the user application based on it were created in the workbench MATLAB R2012b. Preliminary analysis indicates that when determining the number of LEDs to obtain the desired color, provided the relative error calculation order of 0.5-1.5 % is possible to design the lighting device (systems) with high-fidelity color temperature. It is also possible solutions and the error is less than 0.5 %. The advantage of the model is that it can be offered a variety of different modes of LED lighting systems, provided the color adjustment system for a variety of interiors, for a specific time of day and seasons of the year, made adjustments to the color LEDs for degradation due to aging. The conceptual, logical, mathematical model to calculate the spectra of the target pixel color and color temperature.

Keywords: LED, range, color rendering index, the model calculation, the algorithm error.

Введение

В настоящее время большое внимание уделяется вопросам ресурсо- и энергосбережения. В частности, задача повышения энергосбережения и энергоэффективности в светотехнике решается путем внедрения светодиодных осветительных приборов. Сферы использова-

ния светодиодов за последнее время значительно расширились.

Для представления характеристик светодиодов не существует единой утвержденной международной системы, по которой строились бы все спецификации описания технических параметров светодиодной продукции. Однако можно отметить следующие важные группы характеристик, представляемых в спецификациях: группа электрических характеристик (1), группа фотометрических и энергетических характеристик излучения (2), группа спектральных и колориметрических характеристик излучения (3), группа общих температурных характеристик, условий хранения и эксплуатации (4). Для исследования характеристик 3 группы спектральный метод анализа является наиболее точным и более информативным относительно других. С помощью этого метода определяется спектральное распределение мощности излучения источника света $F(\lambda)$ [1]. Эта характеристика является исходной для определения координат цветности x , y , z , цветовой температуры T_{ce} , индекса цветопередачи (CRI), зависимости координат цветности от прямого тока, зависимости координат цветности от времени наработки и других.

Одними из основных колориметрических характеристик излучения являются координаты цветности. Они служат для расчета других колориметрических величин и применяются для описания световых характеристик светодиодов в спецификации. В национальном стандарте РФ ГОСТ Р 54350-2011 «Приборы осветительные. Светотехнические требования и методы испытаний» указаны границы сортировки координат цветности по бинам. Вопрос использования индекса цветопередачи для описания колориметрических свойств светодиодов является на данном этапе дискуссионным.

Постановка задачи

По сравнению с традиционными источниками света спектр белых светодиодов почти сплошной, однако существуют всем известные пики и провалы. Для более равномерного заполнения видимой области спектра авторами работы предлагается использовать в одном осветительном приборе наряду с белыми и цветные светодиоды. Поэтому при проектировании светового прибора целесообразно провести предварительный анализ и экспериментальные измерения параметров выборки светодиодов для усреднения результатов и расчета необходимого количества светодиодов каждого типа.

В данной работе освещается разработка математической модели с программной реализацией расчета количества светодиодов, необходимых для создания осветительной системы на базе светодиодов различной цветности, с целью получения спектра излучения с минимальным отклонением расчетных координат цветности от заданных значений.

Обсуждение результатов

Для расчета количества светодиодов разработана методика формирования базы дан-

ных, в основу которой положены экспериментально полученные спектральные распределения светодиодов различной цветности, нормированные и приведенные к функции чувствительности человеческого глаза, и функциональные зависимости освещенности светодиодов от тока [2].

Предлагаемый авторами алгоритм и программа предусматривают выбор стандартной цветовой температуры и координат цветности, которые рекомендованы ГОСТ Р 54350-2011, а также установление допустимых желаемых значений температуры цветности, что может быть использовано для создания различных режимов освещения [3]. Стандартные координаты цветности представляются центральными точками в плоскости XOY. В задачу входит расчет координат цветности, которые бы входили в допустимый (желаемый) четырехугольник вокруг центральных точек при той или иной цветовой температуре.

Спектральное распределение мощности излучения моделируемой осветительной системы определяется путем суммирования спектральных распределений отдельных групп (компонент) светодиодов разной цветности. Спектральное распределение каждой цветности определялось как произведение нормированной спектральной мощности излучения одного светодиода данной цветности, количества светодиодов, расчетного коэффициента, определяющего соотношение световых потоков, полученных с помощью ФЭС, скорректированного под чувствительность человеческого глаза и коэффициента, равного отношению значения освещенности светодиодов i -й цветности при соответствующем токе к значению освещенности светодиодов этой же цветности при номинальном токе.

Определение функции суммарной спектральной мощности излучения, обеспечивающей заданную цветовую температуру, сводилось к нахождению расчетного количества светодиодов каждой цветности и общего количества светодиодов многокомпонентной осветительной системы. Эта задача является многопараметрической, для решения которой могут быть использованы, как правило, только численные методы. В предлагаемом алгоритме применялся прямой метод случайного поиска по условиям заданных относительных погрешностей координат цветности с определением общего числа светодиодов и токов через каждый тип светодиода. Рассматриваются следующие варьируемые параметры:

- 1 температура цветности;
- 2 координаты цветности (X, Y);
- 3 допустимые относительные погрешности координат цветности (X, Y);
- 4 общее количество светодиодов;
- 5 количество светодиодов одного типа цветности.

Критерием останова поиска решения задачи служит допустимая относительная погрешность координат цветности при допустимых вариациях параметров. В качестве задавае-

мых параметров решения задачи принимались номинальные освещенности и номинальные токи светодиодов, массив табличных значений длины волны, значения световых потоков исследуемых светодиодов. На каждом шаге (итерации) поиска решения применялась аппроксимация экспериментальных зависимостей на основе метода наименьших квадратов. В частности, зависимость средней освещенности от тока светодиода определялась с помощью полиномиальной аппроксимации вида

$$f(x) = a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \dots + a_1 x + a_0.$$

Зависимость координат цветности от цветовой температуры определялась через гиперболическую формулу, параметры которой находились с помощью метода наименьших квадратов:

$$f(x) = a_0 + a_1/x.$$

В каждом из случаев решалось нормальное уравнение метода наименьших квадратов следующего вида:

$$(X^T X)B = X^T Y,$$

где X – матрица известных входных значений (например, тока), Y – вектор известных выходных значений (например, координаты цветности), B – вектор искомых коэффициентов регрессии.

Для исключения возможного вырожденного решения нормального уравнения применялась псевдообратная матрица Мура–Пенроуза.

Расчеты, положенные в программную реализацию алгоритмов, основывались на полученной экспериментальным путем базе данных параметров светодиодов, а именно: нормированных спектральных распределениях мощности излучения единичных светодиодов каждой цветности, расчетных коэффициентов для определения соотношений световых потоков и коэффициентов пересчета значений освещенности светодиодов i -ой цветности при соответствующем токе к значению освещенности светодиодов этой же цветности при номинальном токе m_i [4, 5].

Программа и пользовательское приложение на ее основе были созданы в инструментальной среде MATLAB R2012b. Программа работоспособна и в более ранних версиях MATLAB.

В окне (рисунок 1) созданного приложения показаны возможности в интерактивном режиме задавать значение цветовой температуры, рекомендованной ГОСТ Р 54350-2011, которой соответствуют определенные значения x и y и устанавливается допустимая относительная погрешность расчетов координат цветности. При нажатии кнопки **Расчет I** выполняется расчет, результатом которого является определение количества светодиодов в каждой группе n_i и общего количества светодиодов. В окне диаграмма появляется графическое изображение результирующей спектральной характеристики осветительной системы.

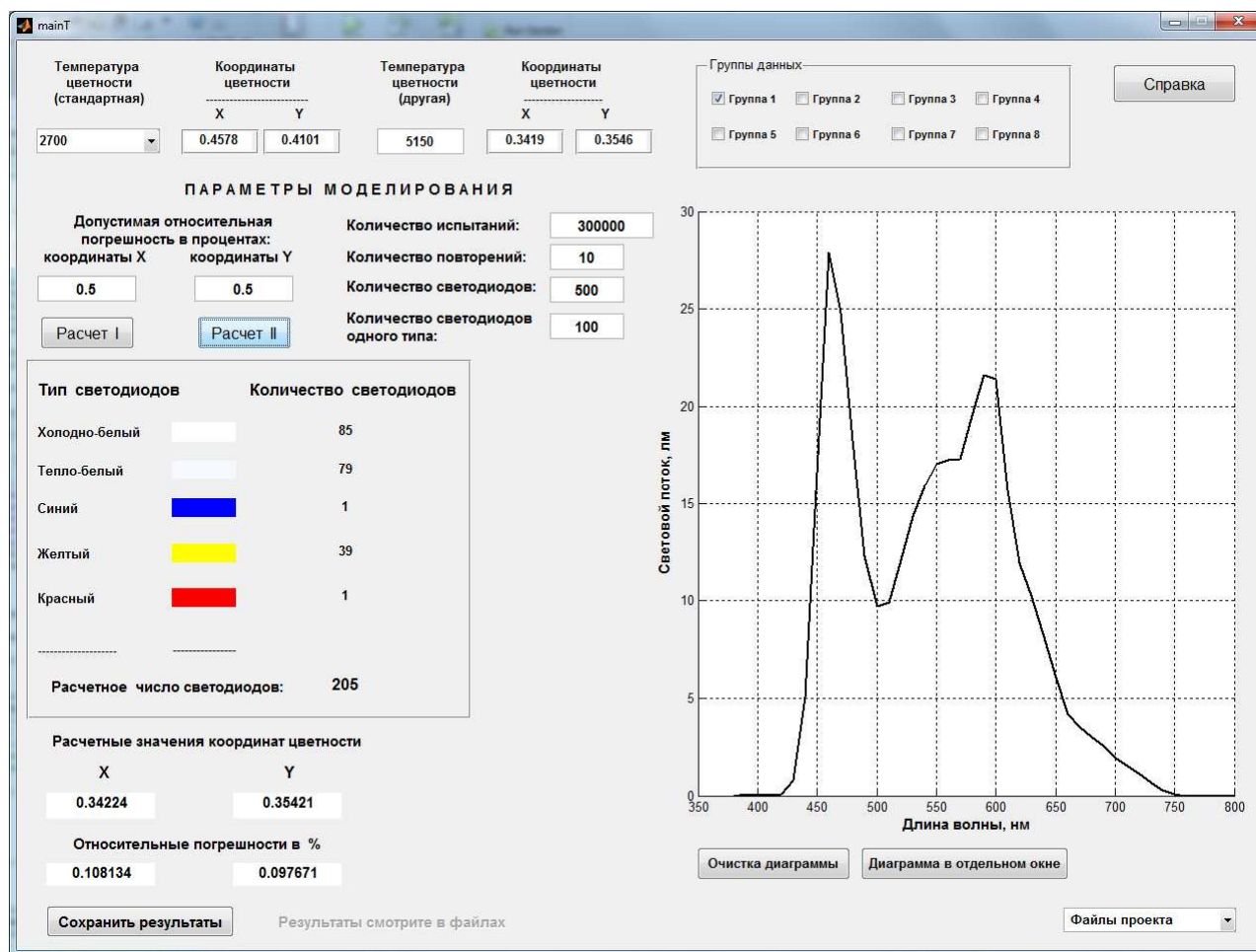


Рис. 1. Окно приложения с результатами

Возможности программы позволяют также задать значение цветовой температуры на усмотрение пользователя в некотором стандартном диапазоне значений. При нажатии кнопки **Расчет II** выполняется расчет (пример на рис. 2), аналогичный предыдущему, в результате которого определяются те же параметры и характеристики светодиодной системы при задании цветовой температуры на усмотрение пользователя также из некоторого допустимого диапазона значений. Переключатели блока «Группы данных» позволяют подключать различные данные для моделирования.

Для регулирования цветности созданной многокомпонентной светодиодной системы с зафиксированными n_i предполагается выполнение расчета с измененными значениями тока в

диапазоне $0 \div I_{ном.}$ и, соответственно, коэффициентами m_i для каждой группы светодиодов.

Предварительный анализ показывает, что при определении количества светодиодов для получения заданной цветности при условии относительной погрешности расчета порядка 0,5–1,5 % имеется возможность разработки осветительного прибора (системы) с высокой точностью воспроизведения цветовой температуры. Возможны также решения и при погрешности менее 0,5 %.

Достоинством разработанной модели является то, что могут быть предложены множество различных режимов работы светодиодной осветительной системы, обеспечена подстройка цветности системы для различных интерьеров, для определенного времени суток и сезонов года, выполнена корректировка цветности при деградации светодиодов в результате старения.

Выводы

Разработана концептуальная, логическая, математическая модель расчета спектров с заданными координатами цветности и цветовой температурой.

Модель основана на эмпирических данных зависимостей освещенности от тока и спектрального распределения светодиодов конкретных цветностей.

Разработана методика формирования базы данных для модели расчета спектров с заданными координатами цветности и цветовой температурой.

Список литературы

1. Борискина А. А. Светодиодные осветительные приборы с возможностью регулировки цветности / А. А. Борискина, А. А. Костычев // Светотехника, электротехника и метрология: Сб. науч-метод. тр. /// О.Е. Железникова (отв. ред.) – Саранск: СВМО, 2012. – С. 113–114.
2. Борискина А. А. Моделирование осветительной светодиодной системы с заданной цветностью /А. А. Борискина, О. Ю. Коваленко, Т. А. Чуваткина // Проблемы и перспективы развития отечественной светотехники, электротехники и энергетики: Сб. науч. тр. IX Междунар. науч.-техн. конф., Саранск, 14 декабря 2011 г. // редкол. : О. Е. Железникова (отв. ред.) [и др.]. – Саранск : СВМО : Афанасьев В. С., 2011. – С. 38-41.
3. ГОСТ Р 54350-2011 Приборы осветительные. Светотехнические требования и методы испытаний; введ. в действ. 2012-01-07. – М.: Стандартиформ. – 2011, 37 с.
4. Борискина А. А. Светодиодный прибор улучшенной цветопередачи / А. А. Борискина, О. Ю. Коваленко, Ю. А. Пильщикова // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 4 (часть 5). – стр. 1054-1058.
5. Патент РФ № 118719, 27.07.2012.

Рецензенты:

Корочков Ю.А., д.т.н, заведующий лабораторией газоразрядных ламп высокого давления
ГУП республики Мордовия «НИИИС им. Лодыгина», г. Саранск;

Данилов А.А., д.т.н, профессор, заместитель директора ФБУ «Пензенский ЦСМ», г. Пенза.