



МОДЕЛИРОВАНИЕ СПЕКТРА СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ СВЕТОДИОДОВ

*В.В.Афонин, к.т.н., О.Ю.Коваленко, д.т.н.,
Е.Д.Гусева, Ю.А.Пильщикова,
Мордовский государственный университет
им. Н.П.Огарева*

Задача воспроизведения спектра естественного солнечного света с помощью светодиодов решается путем комбинации состава массива излучателей или подбором соответствующей люминофорной смеси. Приведены результаты моделирования комбинации необходимого числа светодиодов для аппроксимации спектральной характеристики солнечного излучения и дана оценка относительной погрешности аппроксимации.

Как известно, интенсивность и спектральный состав солнечной радиации меняется в зависимости от высоты Солнца над горизонтом. Согласно общепринятой классификации выделяют: инфракрасное излучение 760–2600 (3000) нм; видимое излучение 400–760 нм; ультрафиолетовое излучение – на границе с атмосферой 400–100 нм; на поверхности земли 400–290 нм. И чем меньше длина волны излучения, тем выше энергия кванта и тем сильнее выражено биологическое действие данного излучения на живые системы.

Задача воспроизведения спектра естественного солнечного света достаточно актуальна. Ее решения ждут разработчики осветительных систем обеспечения жизнедеятельности человека, исследователи в области физиологии, зоологи и биотехнологий, разработчики беспроводных атмосферных оптических линий связи (FSO) [1]. Координаты цветности и значение индекса цветопередачи являются важнейшими характеристиками описания спектра излучения осветительного прибора. В работах [2, 3] рассматривалось использование указанных характеристик для синтеза спектральной характеристики светодиодного модуля. Для осветительных приборов, использующих светодиоды, в соответствии со стандартом [4] устанавливаются требования к допускаемым

MODELING OF SOLAR RADIATION SPECTRUM USING LIGHT-EMITTING DIODES

*V.V.Afonin, PhD, O.Yu.Kovalenko, Doctor of sc. (Eng.),
E.D.Guseva, Yu.A.Pilschikova, N.P.Ogarev
Mordovia State University*

The task of reproduction of the spectrum of natural sunlight using light-emitting diodes can be solved by the combination of composition of radiator array and selection of the proper luminiferous mixture. The results of modeling of the combination of required number of light-emitting diodes for the approximation of spectral characteristic of solar radiation are specified, and the evaluation of relative approximation error is given.

As it is known, the intensity and spectral composition of solar radiation varies depending on the height of the Sun over horizon. According to generally accepted classification, the following categories are determined: infrared radiation 760–2600 (3000) nm; visible radiation 400–760 nm; ultraviolet radiation – at the boundary with atmosphere 400–100 nm; on the ground surface 400–290 nm. And the less the radiation wavelength is, the higher the quantum energy is and the heavier the biological influence of this radiation on living systems is expressed.

The task of reproduction of the natural sunlight spectrum is quite topical. The developers of illumination systems for human life support, researchers in the area of physiology, zoology and biotechnology, developers of wireless atmospheric optical communication lines (FSO) are waiting for its solution [1]. Chromaticity coordinates and value of color rendering index are the major characteristics used for the description of radiation spectrum of lighting fixture. In the papers [2, 3] the use of specified characteristics for the synthesis of spectral characteristic of light-emitting diode module was considered. For the lighting fixtures using light-emitting diodes in accordance with the standard [4], the requirements to permissible deviations of correlated color temperature are established with the specification of the thresholds of deviations of chromaticity coordinates [5].

Computer simulation allows enhancing the qualitative parameters of lighting fixtures based

отклонениям коррелированной цветовой температуры с указанием границ отклонений значений координат цветности [5].

Компьютерное моделирование позволяет повысить качественные показатели осветительных светодиодных приборов. При суперпозиции учитываются значения энергетического (светового) потока от каждого исходного спектра и вычисляется полный поток. По полученным значениям потока и мощности можно оценить световую отдачу прибора и обеспечить при многовариантном расчете оптимизацию энергетических показателей.

В данной статье рассматривается процесс аппроксимации спектра солнечного излучения с помощью светодиодов 5-7 типов: холодного (ХБ), тепло-белого (ТБ), ультрафиолетового (УФ), синего, зеленого, желтого, красного. Спектральные характеристики светодиодов, выраженные в табличном и графическом виде, были получены в лаборатории светотехнического факультета Мордовского государственного университета им. Н.П.Огарева. Для удобства сравнения спектральных характеристик принято представлять их в относительных единицах (рис.1). В таблице приведены характеристики используемых светодиодов.

Применяемые в производстве светодиодов люминофоры холодного-белой и тепло-белой цветности не всегда обеспечивают комфортные условия освещения. Проблема улучшения цветопередачи может быть решена двумя путями. Во-первых, можно добиться нужной цветопередачи путем комбинирования в одном осветительном приборе различных светодиодов – белых и цветных. Во-вторых, достичь той же цели можно при использовании сложной комбинации люминофорной смеси, обеспечивающей излучение во всех областях спектра. Для повышения индекса цветопередачи необходимо в смеси использовать добавку, излучающую в красно-желтой области спектра. В некоторых случаях необходима добавка, обеспечивающая свечение в зеленой области спектра. Доля синей составляющей в спектре светодиодов с люминофорным покрытием высока в связи с неполным поглощением и преобразованием возбуждающего синего излучения кристалла светодиода люминофором. В некоторых сферах применения в люминофоры необходимо добавить компонент, соответствующий излучению в ультрафиолетовой области спектра.

on light-emitting diodes. Upon superposition, the values of energy (light) flux from every reference spectrum are recorded, and the total flux is estimated. On the basis of obtained values of flux and power, the light output ratio of fixture can be evaluated, and optimization of energy parameters can be provided in case of multi-variant estimation.

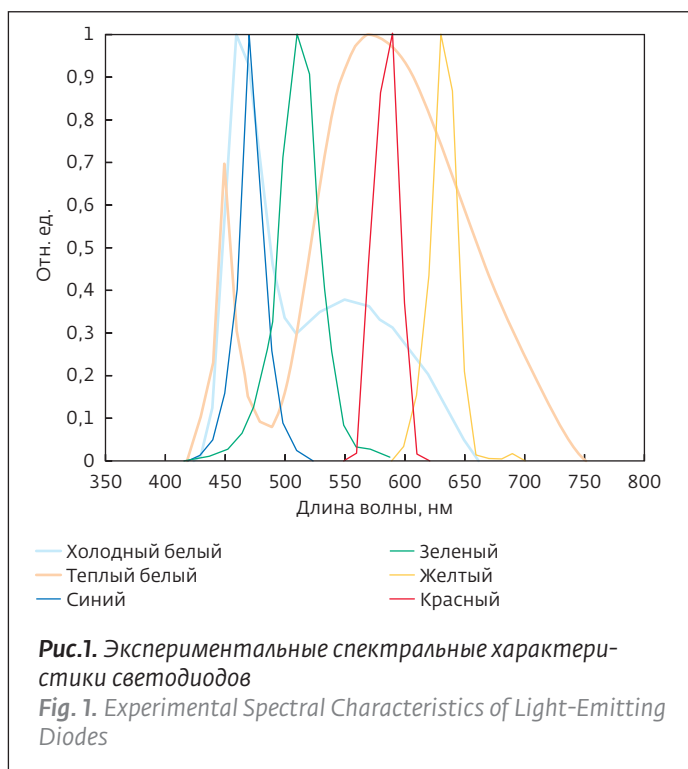
In this article, the approximation process of solar radiation spectrum is considered with the aids of light-emitting diodes of 5-7 types: cool white (CW), warm white (WW), ultraviolet (UV), blue, green, yellow and red. The spectral characteristics of light-emitting diodes expressed in tabular and graphic forms were obtained in the laboratory of Lighting Faculty of N.P. Ogarev Mordovia State University. It was accepted to express them in relative units for the convenience of comparison (Fig. 1). The characteristics of used light-emitting diodes are given in the table.

Luminophors with cool white and warm white chromaticity used in the production of light-emitting diodes do not always provide the convenient conditions of illumination. The problem of color

Параметры светодиодов

Table Parameters of Light-Emitting Diodes

Тип светодиода Type of light-emitting diode	Максимум спектральной характеристики, Вт/нм Maximum of spectral characteristic, W/nm	Пиковое значение длины волны, нм Peak value of wavelength, nm	Коэффициент Coefficient
Холодно-белый Cool white	0,299864	460	0,831350
Тепло-белый Warm white	0,101891	570	0,841500
Ультрафиолетовый Ultraviolet	6,114770	370	0,839254
Синий Blue	5,091750	460	0,832607
Зеленый Green	2,928090	520	0,753643
Желтый Yellow	0,200146	590	0,690000
Красный Red	0,529409	660	0,530000



Решение задачи получения заданного спектра излучения для осветительного прибора со светодиодами можно найти в результате создания математической модели, в которой в качестве исходных данных использованы спектры излучения всех составляющих смеси люминофора либо спектров разноцветных светодиодов. При моделировании процесса аппроксимации излучения проведено исследование процедуры улучшения цветопередачи для прибора, спектр излучения которого аналогичен спектру солнечного излучения.

За модель естественного солнечного света принимаем спектр, представленный на рис.2. Он имеет следующие спектральные характеристики:

- границы спектра: 345–800 нм;
- размерность массива данных: 92;
- максимум спектральной характеристики: 50,1725 отн.ед.;
- длина волны максимума спектральной характеристики: 480 нм.

Примем следующие обозначения спектральных характеристик светодиодов: f_1 –холодно-белого, f_2 – тепло-белого, f_3 – ультрафиолетового, f_4 – синего, f_5 – зеленого, f_6 – желтого, f_7 – красного. Соответственно, количество светодиодов каждого типа обозначим в виде: n_1 – холодно-

rendering improvement can be solved in two ways. Firstly, the needed light rendering can be achieved by the combination of different light-emitting diodes – white and color in one lighting fixture. Secondly, the same goal can be achieved with the use of complex combination of luminiferous mixture providing the radiation in all spectral regions. In order to increase the color rendering index, it is necessary to use the additive radiating in red-yellow spectral region in the mixture. In some cases, the additive providing the fluorescence in green spectral region is required. The share of blue component in the spectrum of light-emitting diodes with luminiferous coating is high in connection with incomplete absorption and transformation of exciting blue radiation of light-emitting diode crystal by luminophor. In some application scopes, the additive providing the radiation in ultraviolet spectral region is required.

Solution of the task aimed at the obtainment of set radiation spectrum for the lighting fixture based on light-emitting diodes can be found as a result of creation of the mathematical model, in which the radiation spectrums of all components of luminiferous mixture or spectrums of many-colored light-emitting diodes can be used in the capacity of source data. When modeling the radiation approximation process, the study of the procedure for color rendering improvement is performed for the fixture, the radiation spectrum of which is analogous to the spectrum of solar radiation.

The spectrum shown in Fig. 2 is accepted as the model of natural sunlight. It has the following spectral characteristics:

- Spectrum boundaries: 345–800 nm;
- Dimensions of data array: 92;
- Maximum of spectral characteristic: 50.1725 relative units;
- Wavelength of maximum of spectral characteristic: 480 nm.

Let us accept the following designations of the spectral characteristics of light-emitting diodes: f_1 – cool white, f_2 – warm white, f_3 – ultraviolet, f_4 – blue, f_5 – green, f_6 – yellow, f_7 – red. Accordingly, the number of light-emitting diodes of every type can be designated as follows: n_1 – cool white, n_2 – warm white, n_3 – ultraviolet, n_4 – blue, n_5 – green, n_6 – yellow, n_7 – red.

The task of reproduction of sunlight spectrum is the task, which is inverse in relation to the synthesis of light-emitting diode module. It was considered earlier by the authors [2, 3].

белого, n_2 – тепло-белого, n_3 – ультрафиолетового, n_4 – синего, n_5 – зеленого, n_6 – желтого, n_7 – красного.

Задача воспроизведения спектра солнечного света – это обратная задача синтезу светодиодного модуля. Она была рассмотрена авторами ранее [2, 3].

В основу моделирования процесса аппроксимации дневного света с помощью светодиодов при формировании спектра излучения светодиодного светильника по заданной цветовой температуре положено следующее соотношение:

$$FeSum = \sum_{i=1}^N f_i m_i n_i, \quad (1)$$

где $FeSum$ – световой поток светильника, состоящего из N (семи) типов светодиодов, m_i – дополнительные рабочие коэффициенты.

Спектральные характеристики светодиодов и дневного света в расчетах представляют собой массивы числовых данных. При этом размерности массивов, как правило, различаются. Для используемых ранее спектральных характеристик светодиодов размерность массивов принималась равной 46. Поэтому необходимо было для решения новой задачи привести размерности к одной величине. В данном случае за базу принят массив спектра светодиодов. Поэтому предварительно была решена задача интерполяции спектральной характеристики солнечного света. Практически это означает ранжирование спектральной характеристики солнечного света.

После приведения к единой размерности спектральных характеристик можно переходить к задаче среднеквадратичного приближения [4]. С учетом формулы (1) можно записать

$$S = \sum_{i=1}^n (f_i - FeSum_i)^2, \quad (2)$$

где f_i – элементы массива спектра дневного света, $FeSum_i$ – элементы спектральной характеристики всех светодиодов, n – размерность массивов.

Затем на основании выражения (2) вычисляется среднеквадратическая ошибка аппроксимации, при этом используется общепринятое выражение для оценки среднеквадратического приближения [6]:

$$E_2 = \sqrt{\frac{S}{n}}, \quad (3)$$

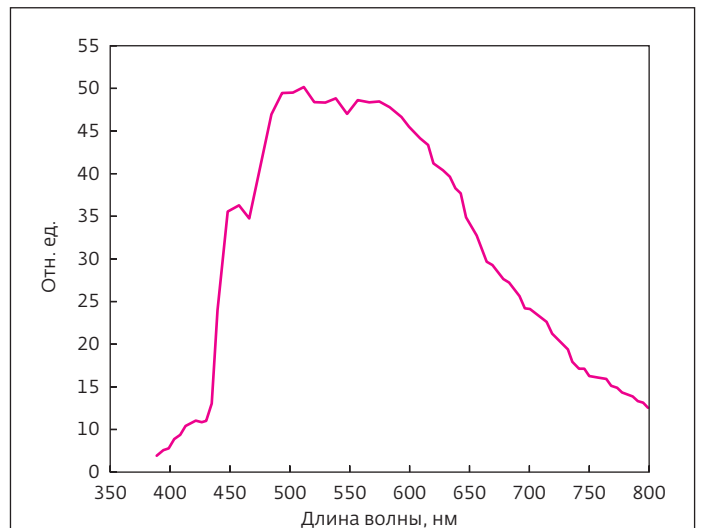


Рис.2. Спектр солнечного излучения
Fig. 2. Spectrum of Solar Radiation

The following ratio is taken as the basis of modeling of daylight approximation process using the light-emitting diodes during the formation of radiation spectrum of the lighting fixture with light-emitting diode on the basis of set color temperature:

$$FeSum = \sum_{i=1}^N f_i m_i n_i, \quad (1)$$

where $FeSum$ is the light flux of the lighting fixture consisting of N (seven) types of light-emitting diodes; m_i are the additional operational coefficients.

The spectral characteristics of light-emitting diodes and daylight are represented by the arrays of numerical data in estimations. At the same time, the dimensions of arrays are different, as a rule. Array dimensions were assumed to be equal to 46 for the spectral characteristics of light-emitting diodes, which have been used earlier. Therefore, it is necessary to reduce the dimensions to the same value for the solution of new task. In this case, the array of light-emitting diode spectrum is taken as the basis. Therefore, the task of interpolation of sunlight spectral characteristic was solved preliminarily. Practically, it means the ranking of sunlight spectral characteristic.

After the reduction to the common dimensions of spectral characteristic, we can proceed to the task of mean-square approximation [4]. Taking into account the formula (1) the following expression can be written

где n – размерность массива спектральной характеристики.

В силу того, что число светодиодов является переменной величиной, то есть имеет целочисленное значение, нельзя использовать условия экстремума, получаемые из выражения (2). Поэтому необходимо использовать процедуру перебора значений числа светодиодов каждого типа с последующей оценкой среднеквадратического приближения.

Очевидно, что для полного перебора всех типов светодиодов потребуется разработать алгоритм с вложенными циклами с уровнем вложенности, равным семи. Принимая изменения количества светодиодов от нуля до некоторого конкретного значения, в результате для минимизации выражения (2) получим крайне долговременную операцию поиска решения.

В модельном эксперименте число светодиодов каждого типа принято изменять от 0 до 400. При этом разработанный программный алгоритм напоминает известный метод оптимизации – метод покоординатного спуска. В качестве каждой координаты выступает число светодиодов соответствующего типа. Для каждого типа светодиода применяется своя пользовательская функция, в которой изменяется число светодиодов одного типа, а другие значения остаются постоянными. На каждой итерации цикла осуществляется расчет среднеквадратической ошибки по формуле (3). Далее отбирается тот набор светодиодов, который дает наименьшую ошибку. Величина ошибки и число светодиодов рассматриваемого типа возвращаются в основную программу, где последовательно вызывается аналогичная функция для светодиодов следующего типа. Для оценки приближения результирующего спектра светодиодов к спектру солнечного света использована приведенная относительная погрешность, оценивается в процентах. Приведение осуществлялось по максимуму спектральной характеристики солнечного света. Таким образом, в результате цикла изменения числа светодиодов вычисляется наименьшая погрешность приближения. Дополнительно рассчитывались спектральные мощности площади излучения по нормированию площади под кривыми спектральных характеристик. В результате моделирования и аппроксимации получены следующие значения: мощность излучения спектра – 14345,1 отн. ед.; мощность излучения светодиодов –



Рис.3. Результат аппроксимации спектра солнечного излучения

Fig. 3. Approximation Result of Solar Radiation Spectrum

$$S = \sum_{i=1}^n (f_i - FeSum_i)^2, \quad (2)$$

where f_i are the elements of daylight spectrum array; $FeSum_i$ refer to the elements of spectral characteristic of all light-emitting diodes; n refer to the array dimensions.

Then, on the basis of the expression (2) the mean-square error of approximation can be calculated using the commonly accepted expression for its evaluation of mean-square approximation [6]:

$$E_2 = \sqrt{\frac{S}{n}}, \quad (3)$$

where n refer to the array dimensions of spectral characteristic.

Due to the fact that number of light-emitting diodes is variable quantity or has integer value, the extremum conditions obtained from the expression (2) cannot be used. Therefore, it is necessary to use the procedure of search of the number of light-emitting diodes of every type with the following evaluation of mean-square approximation.

It is obvious that for the total search of all types of light-emitting diodes the algorithm with embedded loops with the nesting level of seven must be developed. Assuming the variation of number of light-emitting diodes from zero to some specific value, as a result, for the minimization of



11049,7 отн. ед.; приведенная относительная погрешность аппроксимации спектра солнечного излучения – 21,4204%. Число светодиодов каждого типа в светодиодном источнике: холодно-белых – 206; тепло-белых – 376; ультрафиолетовых – 4; синих – 0; зеленых – 11; желтых – 0; красных – 58; общее число светодиодов – 655. Сравнительная диаграмма характеристик представлена на рис.3.

В случае, когда в аппроксимации не участвуют ультрафиолетовые, а затем и зеленые светодиоды, относительная приведенная погрешность увеличивается до 22,6571% и, соответственно, до 24,4948%. В этих случаях значения погрешности оказываются выше (сравним с 21,4204%). Очевидно, что дополнительный ввод светодиодов специфического цвета приведет к уменьшению погрешности аппроксимации. Как показали численные эксперименты, основную долю в результирующем спектре берут на себя холодно-белые и тепло-белые светодиоды.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ Р 54164–2010 (ИСО 9050:2003). Стекло и изделия из него. Методы определения оптических характеристик. Определение световых и солнечных характеристик; Введ. 21.12.2010. – М.: Стандартинформ, 2010.
2. **Афонин В.В., Борискина А.А., Коваленко О.Ю.** Математическая модель для определения колориметрических характеристик многокомпонентной светодиодной системы. – *Современные проблемы науки и образования*, 2014, № 3; 21.05.2014. URL: www.science-education.ru/117-13174 (дата обращения: 25.11.2015).
3. **Коваленко О.Ю., Афонин В.В.** Программный синтез светодиодного модуля. – *Вестник ФГОУВПО Московский государственный агроинженерный университет им. В.П. Горячкина*, 2009, № 2, с. 52–54.
4. **Кобзарь А.И.** Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. – М.: Изд-во "Физматлит", 2006.
5. ГОСТ Р 54350–2011. Приборы осветительные. Светотехнические требования и методы испытаний; Введ. 01.07.2012. – М.: Стандартинформ, 2011.
6. **Мэтьюз Д.Г.** Численные методы. Использование MATLAB. – 3-е изд. / Пер. с англ. / Д.Г.Мэтьюз, К.Д.Финк. – М.: Вильямс, 2001.

the expression (2) we will obtain extremely long-term operation of solution search.

In the model experiment it is accepted to vary the number of light-emitting diodes of every type from 0 to 400. Developed software algorithm reminds of the known optimization method – method of coordinate-wise descent. Number of light-emitting diodes of the relevant type plays the role of every coordinate. Specific user-defined function, in which the number of light-emitting diodes of one type varies and other values remain constant, is used for every type of light-emitting diode. The calculation of mean-square error is performed at every loop iteration in accordance with the formula (3). Then, the set of light-emitting diodes, which gives the lowest error, is selected. Value of error and number of light-emitting diodes of considered type are reintroduced into the main program where the analogous function for the light-emitting diodes of next type is sequentially called for. For the evaluation of approximation of resulting spectrum of light-emitting diodes to the spectrum of sunlight the reduced relative error is used and evaluated in percentage. The reduction was performed by the maximum of sunlight spectral characteristic. Thus, as a result of the variation loop of number of light-emitting diodes the lowest approximation error is calculated. Additionally, the spectral powers of radiation area were calculated by the valuation of the area below the curves of spectral characteristics. As a result of modeling and approximation the following results were obtained: radiation power of spectrum – 14345.1 relative units; radiation power of light-emitting diodes – 11049.7 relative units; reduced relative error of approximation of solar radiation spectrum – 21.4204%. Number of light-emitting diodes of every type in light-emitting diode source: cool white – 206; warm white – 376; ultraviolet – 4; blue – 0; green – 11; yellow – 0; red – 58; total number of light-emitting diodes – 655. Comparative diagram of characteristics is shown in Fig. 3.

In case when ultraviolet and then green light-emitting diodes do not participate in approximation, the relative reduced error increases up to 22.6571% and 24.4948% respectively. In these cases the errors turn out to be higher (comparatively with 21.4204%). Obviously, the additional introduction of light-emitting diodes with the specific color will cause the decrease of approximation error. As numerical experiments showed, the main share in resulting spectrum belongs to cool white and warm white light-emitting diodes.