

Научная статья

УДК 621.516

doi: 10.28983/asj.y2023i8pp103-109

Анализ результатов лабораторных испытаний системы автоматического управления освещенностью светодиодного светильника

Анатолий Александрович Анашкин¹, Антон Анатольевич Анашкин¹, Геннадий Григорьевич Угаров², Сергей Мударисович Бакиров³, Владимир Александрович Стрельников³

¹ООО «КБ СпецПроект», г. Москва, Россия.

²Камышинский технологический институт ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», Волгоградская обл., г. Камышин, Россия.

³Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова, г. Саратов, Россия.

e-mail: s.m.bakirov@mail.ru

Аннотация. В статье рассмотрены результаты экспериментальных данных отклика фотопреобразователя при влиянии отраженного от рабочей поверхности излучения разных источников света (светодиодный источник света, лампа накаливания, люминесцентная лампа, естественный источник света – солнце). Представлены результаты математического планирования трех- и двухфакторным экспериментами. В результате проведенных испытаний установлено, что при калибровании автоматической системы управления освещенностью светодиодного светильника при создании одинаковой освещенности на рабочей поверхности следует учитывать коэффициент засветки. Если на рабочую поверхность дополнительно влияет солнечный источник света, то для расчета результирующего выходного сигнала принимается коэффициент засветки, равный 3,99; для люминесцентных ламп – 3,38; ламп накаливания – 1,71.

Ключевые слова: энергосбережение; источник света; фотодатчик; спектральная характеристика; система автоматизированного управления освещением; регрессионный анализ.

Для цитирования: Анашкин А.А., Анашкин А.А., Угаров Г.Г., Бакиров С.М., Стрельников В.А. Анализ результатов лабораторных испытаний системы автоматического управления освещенностью светодиодного светильника // Аграрный научный журнал. 2023. № 8. С. 103–109. <http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2023i8pp103-109>.

Analysis of the results of laboratory tests of the system of automatic control of the illumination of the led light

Anatoly A. Anashkin¹, Anton A., Anashkin¹, Gennady G. Ugarov², Sergey M. Bakirov³, Vladimir A. Strelnikov³

¹ООО KB SpetsProekt, Moscow, Russia

²Kamyshin Institute of Technology, Volgograd State Technical University, Volgograd region, Kamyshin, Russia.

³Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N.I. Vavilov, Saratov, Russia

e-mail: s.m.bakirov@mail.ru

Abstract. The article discusses the results of experimental data on the response of a photoconverter under the influence of radiation reflected from the working surface of various light sources (LED light source, incandescent lamp, fluorescent lamp, natural light source - the sun). The results of mathematical planning by three-factor and two-factor experiments are presented. As a result of the tests, it was found that when calibrating the automatic illumination control system for an LED lamp, when creating the same illumination on the working surface, the illumination coefficient should be taken into account. If the working surface is additionally affected by a solar light source, then an illumination coefficient of 3.99 is taken to calculate the resulting output signal; for fluorescent lamps - 3.38; incandescent lamps - 1.71.

Keywords: energy saving; light source; photosensor; spectral characteristic; automated lighting control system; regression analysis.

For citation: Anashkin A.A., Anashkin A.A., Ugarov G.G., Bakirov S.M., Strelnikov V.A. Analysis of the results of laboratory tests of the system of automatic control of the illumination of the led light // Agrarnyy nauchnyy zhurnal = The Agrarian Scientific Journal. 2023;(8):103–109. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2023i8pp103-109>.



Введение. Существенные достижения технологии изготовления светодиодных источников света в части конструктивных вариантов исполнения, а также в части управления параметрами светового потока, в том числе спектром излучения и яркостью свечения, значительно расширили сферу применения [1–4]. Наряду с этим, широкий диапазон плавного управления яркостью свечения светильника даёт возможность обеспечить значительное снижение потребления электроэнергии [5, 6].

Актуальность применения энергосберегающих систем автоматизированного управления освещением (САУ) стала особенно очевидной при активном внедрении во все сферы деятельности человека светодиодных светильников, обладающих по сравнению с традиционными источниками света низким потреблением электроэнергии и широким диапазоном регулирования яркости светового потока.

Основным элементом САУ освещением является фотопреобразователь (фотодатчик). В результате обзора предлагаемых различными производителями фотодатчиков и средств измерения освещённости потребители отдают предпочтение фотодатчику модели SFH5711-2/3-Z, спектральная характеристика которого практически полностью совпадает с графиком кривой CIE [7]. Требование к спектральным характеристикам фотодатчика САУ является первоочередным при разработке системы энергосберегающей автоматизированной системы управления светодиодным освещением.

При разработке САУ светодиодным освещением возникает вопрос о размещении фотопреобразователя, чтобы осуществлять обмен данными между фотопреобразователем и размещёнными на светильнике функциональными элементами САУ, обеспечивающим управление световым потоком светильника. Вариант размещения контроллера светильника на корпусе светильника существенно снижает стоимость, как фотопреобразователя, так и в целом САУ светильника. Однако воспринимаемый фотопреобразователем световой поток, возникающий как от самого светодиодного светильника, так и от других источников света, является отражённым от рабочей поверхности (РП) и, соответственно, разного спектрального состава (рис. 1).

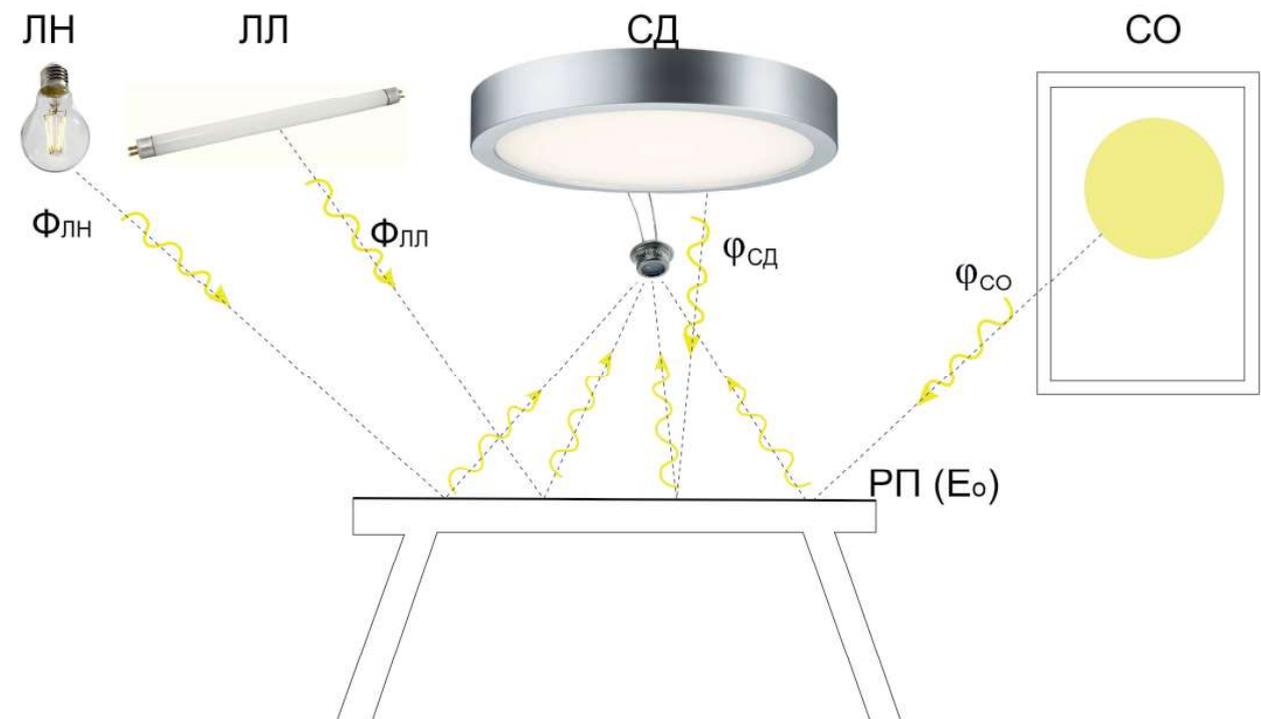


Рис. 1. Воздействие на фотопреобразователь САУ светодиодного светильника разных источников света:

ЛН – лампа накаливания; ЛЛ – люминесцентная лампа;
СД – светодиодный источник света; СО – солнечный свет; РП – рабочая поверхность;
 E_0 – норма освещенности; $\Phi_{ЛН}$; $\Phi_{ЛЛ}$ – стабильный световой поток от ЛН и ЛЛ;
 $\Phi_{СД}$ и $\Phi_{СО}$ – изменяющийся световой поток от СД и СО

Обеспечение стабилизации освещенности на рабочей поверхности при влиянии разных источников света (ламп накаливания, люминесцентных ламп, светодиодных источников света и естественного солнечного света) при разработке САУ светодиодного светильника требует проведение исследований.



Цель исследования – сведение к минимуму влияния на качество стабилизации освещённости РП смешанного фонового освещения, создаваемого несколькими посторонними источниками света различной природы (лампы накаливания, люминесцентные лампы, солнечный свет, светодиодные светильники) путем ввода коэффициента засветки при расчете результирующего выходного сигнала фотопреобразователя САУ, установленного на корпусе светодиодного светильника.

Методика исследований. С целью выяснения степени влияния различных по природе источников света на уровень выходного сигнала фотопреобразователя САУ при одновременном их воздействии на РП применим регрессионный анализ с проведением полного факторного эксперимента и построением математической модели в виде уравнения регрессии первого порядка.

В ходе проведения эксперимента использовано следующее оборудование: система дистанционного управления СДУ-СВ производства ООО «КБ СП»; светодиодные светильники модели ДСО 01 -65-850-Д120 производства ТД «Ферекс»; лампы накаливания производства РФ мощностью 20 Вт, 40 Вт, 60 Вт, 75 Вт, 100 Вт; компактные люминесцентные лампы производства РФ мощностью 9 Вт, 11 Вт, 15 Вт, 20 Вт, 23 Вт, люксметр [8] модели ДТ-8809А компании СЕМ КНР (рис. 2).

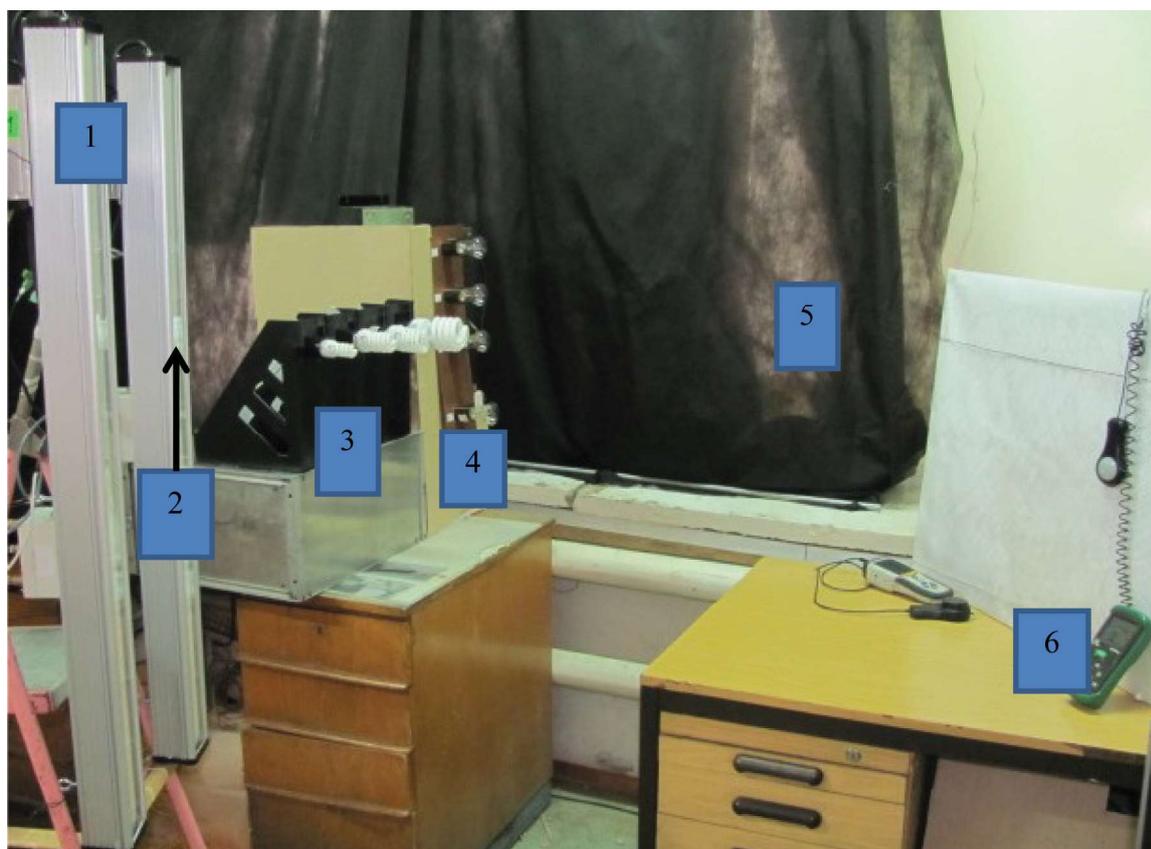


Рис. 2. Общий вид лабораторной установки:

1 – светодиодный источник света; 2 – фотопреобразователь; 3 – люминесцентный источник света; 4 – источник света в виде ламп накаливания; 5 – естественный солнечный свет; 6 – люксметр

Объектом исследования является фотопреобразователь, выходной величиной которого является напряжение. Функция отклика выходной величины Y зависит от входного воздействия факторов X в виде тестовых значений освещенности, создаваемых различными источниками света.

Установим параметры тестового значения освещенности при проведении исследования: минимальное значение освещенности – E_{\min} (80 лк); максимальным значением освещенности – E_{\max} (100 лк); значение нормы (нулевой) освещенности – E_0 (90 лк), численно равное среднему арифметическому значению между E_{\max} и E_{\min} , интервалом варьирования освещенности – ΔE (10 лк).

Результаты исследований. Поделим эксперимент на две части для детального учета факторов. В первой части рассмотрим влияние искусственных источников света, а во второй части – естественный источник света.

В табл. 1 приведён перечень и характеристики факторов воздействия на объект исследования.



Характеристики факторов эксперимента искусственных источников света

Фактор	Природа источника света	E_{\min} , лк	E_{\min} (код)	E_{\max} , лк	E_{\max} (код)	E_o , лк	ΔE , лк
X_1	Светодиодное освещение (СД)	80	-1	100	+1	90	10
X_2	Лампа накаливания (ЛН)	80	-1	100	+1	90	10
X_3	Люминесцентная лампа (ЛЛ)	80	-1	100	+1	90	10

Возможность любого из приведенных выше источников света создавать освещенность РП независимо от наличия или отсутствия других источников света показывает соответствие указанных в табл. 1 факторов критериям совместимости и независимости.

Общий вид уравнения регрессии имеет вид

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{23}X_2X_3 + b_{123}X_1X_2X_3, \quad (1)$$

где $b_0, b_1, b_2, b_3, b_{12}, b_{13}, b_{23}, b_{123}$ – коэффициенты уравнения регрессии.

Представим матрицу планирования полного факторного эксперимента для трёх искусственных источников света с результатами их воздействия на фотопреобразователь (табл. 2).

Таблица 2

Матрица результатов полного факторного эксперимента искусственных источников света

Номер опыта	Факторы			Взаимодействия				Результаты опытов			Ср. знач.
	X_1 СД	X_2 ЛН	X_3 ЛЛ	X_1X_2 СД, ЛН	X_1X_3 СД, ЛЛ	X_2X_3 ЛН, ЛЛ	$X_1X_2X_3$ СД, ЛН, ЛЛ	y_1 (мВ)	y_2 (мВ)	y_3 (мВ)	
1	-	-	-	+	+	+	-	799	798	799	798,7
2	+	-	-	-	-	+	+	807	806	806	806,3
3	-	+	-	-	+	-	+	810	810	811	810,3
4	+	+	-	+	-	-	-	816	817	817	816,7
5	-	-	+	+	-	-	+	826	827	827	826,7
6	+	-	+	-	+	-	-	831	831	831	831
7	-	+	+	-	-	+	-	836	835	835	835,3
8	+	+	+	+	+	+	+	840	840	840	840

Вычислим коэффициенты уравнения регрессии в соответствии с [9] и занесем в табл. 3.

Таблица 3

Значения коэффициентов уравнения регрессии

b_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}	b_{13}	b_{23}	b_{123}
820,62	2,88	4,95	12,62	-0,1	-0,63	-0,55	0,2

Для оценки значимости коэффициентов уравнения регрессии необходимо проведем обработку результатов эксперимента [9]: среднеквадратичного отклонения коэффициентов S_b , число степеней свободы при уровне значимости 0,05 и коэффициент Стьюдента $t_{кр}$ (табл. 4).

Таблица 4

Оценка значимости коэффициентов

b_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}	b_{13}	b_{23}	b_{123}
820,62	2,88	4,95	12,62	-0,1	-0,63	-0,55	0,2
$S_b t_{кр}$	0,212	0,212	0,212	0,212	0,212	0,212	0,212
Результат	Значим	Значим	Значим	Не значим	Значим	Значим	не Значим

Уравнение регрессии, откорректированное после проверки на значимость коэффициентов регрессии, имеет вид

$$y = 820,62 + 2,88X_1 + 4,95X_2 + 12,62X_3 - 0,63X_1X_3 - 0,55X_2X_3. \quad (2)$$



Для проверки уравнения регрессии (2) на адекватность по критерию Фишера вычислим остаточную дисперсию [9, 10]

$$s^2_{\text{ост}} = \frac{m}{n-r} \sum_{j=1}^n (\tilde{y}_j - \bar{y}_j)^2, \quad (3)$$

где n – число экспериментов, равное 8; m – число опытов в каждом эксперименте, равное 3; r – число значимых коэффициентов в уравнении регрессии, равное 6; \tilde{y}_j – значение изучаемого параметра, вычисленное по уравнению регрессии со значимыми коэффициентами для j -го эксперимента; \bar{y}_j – среднее выборочное значение наблюдений для j -го эксперимента.

$$S^2_{\text{ост}} = 1,5[(798,99 - 798,7)^2 + (806,01 - 806,3)^2 + (809,99 - 810,3)^2 + (817,01 - 816,7)^2 + (826,59 - 826,7)^2 + (831,09 - 831)^2 + (835,39 - 835,3)^2 + (839,89 - 840)^2] = 0,6. \quad (4)$$

Расчётное значение критерия Фишера имеет значение 2,35 в соответствии с [9]. Табличное значение критерия $F_{\text{табл}} = 3,63$ определено из таблиц Фишера, для уровня значимости $\alpha = 0,05$, по степеням свободы. Так как $F_{\text{расч}} = 2,35$ меньше $F_{\text{табл}} = 3,63$, то полученная математическая модель в виде уравнения регрессии (2) является адекватной.

Исследование степени влияния источника солнечного света на уровень выходного сигнала фотопреобразователя проведена в рамках дополнительного двухфакторного эксперимента, в котором в качестве второго фактора использовался наиболее перспективный вид искусственного источника света – светодиодный светильник.

Проведение второй части эксперимента объясняется необходимостью поддерживать в течение определённого времени тестовое значение освещённости РП. Однако, в силу естественных причин исключить в ходе проведения эксперимента изменение создаваемой солнечным источником света освещённости РП не представляется возможным (облачность, перемещение Земли и т.п.). В связи с этим для снижения влияния неуправляемого изменения солнечной освещённости при проведении эксперимента уменьшено количество исследуемых факторов.

Исходный вид уравнения регрессии для двухфакторного эксперимента имеет вид

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_{12} X_1 X_2, \quad (4)$$

где X_2 – фактор воздействия солнечного света на объект исследования.

Для корректности сопоставления результатов эксперимента обеспечена идентичность условий их проведения (табл. 5) и параметры варьирования тестовой освещённости ($E_{\text{min}} = 80$ лк; $E_{\text{max}} = 100$ лк; $E_0 = 90$ лк; $\Delta E = 10$ лк).

Таблица 5

Характеристики факторов эксперимента с солнечным светом

Фактор	Природа источника света	E_{min} , лк	E_{min} (код)	E_{max} , лк	E_{max} (код)	E_0 , лк	ΔE , лк
X_1	Светодиодное освещение (СД)	80	-1	100	+1	90	10
X_2	Солнечное освещение (СО)	80	-1	100	+1	90	10

Результаты эксперимента сведены в табл. 6.

Таблица 6

Матрица результатов полного факторного эксперимента с солнечным светом

Номер опыта J	Факторы		Взаимодействия	Результаты опытов			Среднее результатов
	X_1 СД	X_2 СО	$X_1 X_2$ СД, СО	y_1 (мВ)	y_2 (мВ)	y_3 (мВ)	\bar{y}_j (мВ)
1	-	-	+	737	738	737	737,3
2	+	-	-	747	747	747	747
3	-	+	-	781	783	782	782
4	+	+	+	796	795	796	795,7



Оценка значимости коэффициентов

b_0	b_1	b_2	b_{12}
765,7	5,85	23,35	1,0
$S_{b^*t_{кр}}$	0,43	0,43	0,43
результат	значим	значим	значим

Уравнение регрессии имеет вид

$$Y = 765,7 + 5,85X_1 + 23,35X_2 + X_1X_2. \quad (5)$$

Остаточная дисперсия в соответствии с [9] составит

$$S^2_{ост} = 3[(737,5 - 737,3)^2 + (747,2 - 747)^2 + (782,3 - 782)^2 + (795,9 - 795,7)^2] = 0,63.$$

Расчётное значение критерия Фишера в соответствии с [9] имеет значение 1,5. Табличное значение критерия $F_{табл} = 5,32$. Полученная математическая модель (5) является адекватной.

Как видно из приведённых математических моделей (2) и (5) степень влияния входного воздействия в виде заданного тестового значения освещенности на уровень выходного сигнала фотопреобразователя существенно зависит от вида источника света. Максимальную степень влияния имеет солнечное освещение, минимальную – светодиодное освещение. Из этого следует, что наиболее эффективное управление освещенностью, в том числе стабилизация заданного уровня освещенности, обеспечивается с помощью источника света, имеющего максимальную степень влияния на выходной сигнал фотопреобразователя. Из этого также вытекает ограничение для использования САУ светодиодным освещением при наличии в составе фонового освещения источников света с более высокой степенью влияния на выходной сигнал фотопреобразователя.

Влияние вида источника света на уровень выходного сигнала фотопреобразователя при создании идентичной по показаниям люксметра освещенности РП вызвано тем, что источники света различного вида имеют разный спектральный состав и разное значение энергии фотонов, количественная оценка которой для различных источников света приведена в [10]. Для сведения к минимуму ошибки, обусловленной разной степенью влияния источников света разного вида на выходной сигнал фотопреобразователя, введем в алгоритм управления САУ коэффициент засветки $K_{зсв}$

$$K_{зсв} = \frac{K_{\phi}}{K_{сд}}, \quad (6)$$

где K_{ϕ} – коэффициент уравнения регрессии, принадлежащий к источнику света с максимальной степенью влияния на выходной параметр из группы источников света, создающих фоновую засветку РП; $K_{сд}$ – коэффициент уравнения регрессии, принадлежащий к светодиодному светильнику.

Испытания САУ с модифицированным алгоритмом работы, учитывающим введение коэффициента засветки, при различных сочетаниях источников фоновой засветки, включая естественное солнечное освещение, показали работоспособность данного решения, в том числе в ходе эксплуатационных испытаний системы дистанционного управления СДУ-СВ, проведённых на производственных площадках и в складских помещениях различных промышленных предприятий.

Заключение. При разработке системы автоматического управления освещенностью с помощью светодиодного освещения следует учитывать влияние других источников света (солнечный свет, ламп накаливания, люминесцентных ламп), которые создают на рабочей поверхности дополнительную освещенность. В результате эксперимента установлено, что в связи с различными



спектральным составом и энергиями фотонов источников света для корректной работы системы автоматического управления следует ввести коэффициент засветки. Для создания на рабочей поверхности норму освещенности выходную величину фотопреобразователя, установленного на корпусе светодиодного светильника и принимающего отраженный световой поток от рабочей поверхности, корректировать с помощью коэффициента засветки при дополнительном влиянии солнечного света на величину $K_{зсв-СО} = 3,99$; люминесцентных ламп $K_{зсв-ЛЛ} = 3,38$; ламп накаливания $K_{зсв-ЛН} = 1,71$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bourgeois D., Reinhart K., McDonald I. Adding advanced behavioral models to whole building energy modeling: A study of the overall energy impact of manual and automated lighting control // *Energy and Buildings*. 2006. Vol. 38. No. 7. P. 814–823.
2. ГОСТ 8.332-2013. Световые измерения. Значения относительной спектральной световой эффективности монохроматического излучения для дневного зрения. Общие положения. М.: Стандартинформ, 2014. 12 с
3. Лейви А.Я., Шульгинов А.А. Основы светотехники. Челябинск, 2016. С. 4–13.
4. Tan F. et al. Sensor-controlled lighting control with human participation // *Research and technology in the field of lighting*. 2018. Vol. 50. No. 5. P. 660–680.
5. Park T.J., Hong S.H. An experimental study of a BACnet-based lighting control system // *IEEE transactions on automation science and engineering*. 2009. Vol. 6. No. 2. P. 322–333.
6. Popa M., Tsepishke S. Energy saving solutions based on an intelligent street lighting control system // *UPB Sci. Bull., Series C*. 2011. No. 4. P. 297–308.
7. SFH5711 Лист данных (PDF) OSRAM GmbH. URL: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/194271/OSRAM/SFH5711.html>.
8. Люксметр с режимом регистрации данных, модель DT-8809A. URL: https://cem-instruments.ru/images/pdf/DT-8809A_eac.pdf.
9. Соколовская И.Ю. Полный факторный эксперимент. Новосибирск, 2010. 36 с
10. Реброва И.А. Планирование эксперимента. Омск, 2010. С. 105–106.

REFERENCES

1. Bourgeois D., Reinhart K., McDonald I. Adding advanced behavioral models to whole building energy modeling: A study of the overall energy impact of manual and automated lighting control. *Energy and Buildings*. 2006; 38; 7: 814–823.
2. GOST 8.332-2013. Light measurements. Values of the relative spectral light efficiency of monochromatic radiation for daytime vision. General provisions. Moscow: Standartinform, 2014. 12 p.
3. Leyvi A. Ya., Shulginov A. A. Fundamentals of lighting engineering. Chelyabinsk, 2016: 4–13.
4. Tan F. et al. Sensor-controlled lighting control with human participation. *Research and technology in the field of lighting*. 2018; 50; 5: 660–680.
5. Park T.J., Hong S.H. An experimental study of a BACnet-based lighting control system. *IEEE transactions on automation science and engineering*. 2009; 6; 2: 322–333.
6. Popa M., Tsepishke S. Energy saving solutions based on an intelligent street lighting control system. *UPB Sci. Bull., Series C*. 2011; 4: 297–308.
7. SFH5711 Datasheet (PDF) OSRAM GmbH. URL: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/194271/OSRAM/SFH5711.html>.
8. Luxmeter with data logging mode, model DT-8809A. URL: https://cem-instruments.ru/images/pdf/DT-8809A_eac.pdf.
9. Sokolovskaya I. Yu. Full factorial experiment. Novosibirsk, 2010. 36 p.
10. Rebrova I. A. Experiment planning. Omsk, 2010: 105–106.

Статья поступила в редакцию 23.04.2023; одобрена после рецензирования 15.05.2023; принята к публикации 30.05.2023.
The article was submitted 23.04.2023; approved after reviewing 15.05.2023; accepted for publication 30.05.2023.

