

Влияние электрического режима работы светильников со светодиодами на изменение их коррелированной цветовой температуры в процессе эксплуатации

С.С. КАПИТОНОВ^{1,2}, А.С. ВИНОКУРОВ², С.В. ПРЫТКОВ^{1,2},
С.Ю. ГРИГОРОВИЧ¹, А.В. КАПИТОНОВА¹, Д.В. ГУЩИН²,
С.А. МЕДВЕДЕВ¹, Д.В. ВИЛЬГЕЛЬМ¹

¹ ФГБОУ ВО «МГУ им. Н.П. Огарёва», Саранск

² ООО «НИИИС им. А.Н. Лодыгина», Саранск

E-mail: kapitonov_ss@vniis.su

Аннотация

Описаны результаты комплексного исследования по повышению качества светильников со светодиодами в части установления характера изменения их коррелированной цветовой температуры (КЦТ) в процессе эксплуатации. При этом: получены зависимости КЦТ светильников со светодиодами с удалённым и ближним расположением люминофора в течение 10 тыс. ч эксплуатации в разных электрических режимах работы; представлены результаты сравнения начального и конечного спектров излучения светильников; спрогнозировано с помощью методов математической статистики изменение КЦТ светильников в течение заявленного производителем срока службы; определены наиболее неблагоприятные для светильников электрические режимы работы, в которых наблюдается наибольшее изменение КЦТ.

Полученные результаты подтвердили наличие проблемы изменения КЦТ светильников со светодиодами в процессе эксплуатации. Возможный путь её решения – применение более качественных и, соответственно, дорогих светодиодов с ближним расположением люминофора или светодиодов с удалённым люминофором.

Статья может быть интересна как производителям, так и потребителям светодиодных источников света и осветительных приборов с ними.

Ключевые слова: светильник со светодиодами, электрический режим эксплуатации, питающий ток, спектр излучения, поток излучения, коррелированная цветовая температура.

Введение

Проблемы развития освещения светодиодами (СД) в нашей стране во многом связаны с отсутствием соответствующей нормативно-технической базы, что позволяет недобросовестным производителям создавать некачественную светотехническую продукцию и вводить потребителей в заблуждение, заявляя, например, нереально высокий срок службы ОП с СД, в 70–100 тыс. ч [1, 2].

В 2018 г. вступил в действие стандарт Ассоциации производителей светодиодов и систем на их основе [3]. В нём удалось объединить общие требования к ОП, требования к их фотометрическим, колориметрическим и электрическим параметрам, к электромагнитной совместимости, безопасности, надёжности и гарантийным обязательствам. По стандарту, одним из нормируемых колориметрических параметров ОП является коррелированная цветовая температура (КЦТ), которая рассчитывается по спектру излучения ОП [4].

Значение КЦТ должно соответствовать диапазону допустимых отклонений от соответствующего номинального значения КЦТ [5], которое должно декларироваться производителем в ТУ и эксплуатационной документации с указанием размеров зон допустимых отклонений в шагах МакАдама [3].

На данный момент у производителей светильников с СД отсутствует информация о характере изменения КЦТ этих изделий в процессе эксплуатации из-за деградации СД с учётом электрических и тепловых режимов их работы [6, 7]. Таким образом, пока нельзя точно оценивать срок службы светильников с СД, т.к. производителям

не известно, через сколько времени КЦТ светильника выйдет за установленные пределы даже в номинальном режиме работы [8]. При этом часто СД в светильнике работают в электрических и тепловых режимах, отличных от номинального, и потому исследования спектра излучения и его временных изменений при разных режимах эксплуатации – задача актуальная.

В связи с этим целью работы являлось повышение качества светильников с СД путём определения характера изменения их КЦТ в процессе эксплуатации с учётом электрического режима работы. Для достижения цели ставились следующие задачи: 1) получение временных зависимостей КЦТ светильников в процессе 10 тыс. ч эксплуатации при разных электрических режимах работы; 2) сравнение спектров излучения светильников в начале и после 10 тыс. ч эксплуатации; 3) прогнозирование с помощью методов математической статистики изменения КЦТ светильников в течение заявленного производителями срока службы; 4) определение наиболее неблагоприятных для светильников электрических режимов работы, в которых наблюдается наибольшее изменение КЦТ в процессе эксплуатации.

Предполагалось, что результаты исследования помогут производителям СД и светильников с ними разобраться в причинах изменений спектра излучения и КЦТ этих изделий в процессе эксплуатации и предпринять соответствующие меры по повышению их срока службы [9].

Методы

Проведено исследование по временной зависимости спектра излучения и КЦТ партии светильников с СД двух российских производителей в разных электрических режимах их эксплуатации. По этическим соображениям названия производителей в статье не раскрыты. Светильники производителя 1 построены на СД с удалённым люминофором, что, по данным производителя, сохраняет их характеристики и значения параметров, близкими к номинальным на протяжении всего срока службы. В светильниках производителя 2 использованы СД с ближним расположением люминофора (наиболее распространённый вид СД). В табл. 1

представлены основные паспортные данные указанных светильников.

Для измерений спектров излучения и КЦТ применялась фотоколориметрическая установка (свидетельство об утверждении типа средств измерений RU.E.37.003.A NG 64752), предназначенная для измерений светового потока, КЦТ, координат цветности в системах XYZ (1931), uv (1960) и u'v' (1976). Принцип действия установки основан на определении значений радиометрических, фотометрических и колориметрических величин через измерение абсолютной спектральной плотности потока излучения в диапазоне длин волн 360–1100 нм. При этом определение КЦТ осуществлялось автоматически с помощью программного обеспечения, поставляемого с установкой. Последняя состоит из интегрирующей сферы OL IS-7600, многоканального спектро радиометра OL 770 VIS/NIR, вспомогательной лампы AUX LAMP A180 с источником питания OL 410–200. Интегрирующая сфера (алюминиевая) имеет диаметр 1950 мм и состоит из двух отдельных полушарий, двух портов выхода, порта лампы (дополнительного) и внутреннего крепежа патрона для лампы. Оба полушария легко разъединимы (для облегчения установки и замены лампы или частей крепежа). Диаметр сферы позволяет измерять светильники до 1800 мм в длину с максимальным световым потоком 200 клм. Один из портов выхода с помощью оптоволоконного кабеля соединён с входной щелью спектро радиометра. Свет, падающий на внутреннюю стенку сферы по оптоволоконному кабелю, попадает на эту щель. Далее он падает на вогнутую дифракционную решётку, выполняющую разложение света на монохроматические составляющие и фокусировку его на ПЗС-матрицу. (После отражения света от решётки каждая монохроматическая составляющая его падает на отведённый для неё участок ПЗС-матрицы). Перед выходным отверстием сферы и перед вспомогательной лампой внутри сферы установлены защитные экраны, исключающие выход любого прямого излучения.

Для исследования были выбраны следующие режимы работы светильников.

Режим 1. Номинальный режим работы, в котором ток СД в светильнике равен номинальному – 350 мА (производитель 1) или 260 мА (производи-

Рис. 1. Временные зависимости КЦТ светильников производителя 1 в разных режимах их работы: режим 1 (чёрный цвет); режим 2 (красный); режим 3 (синий); режим 4 (зелёный)

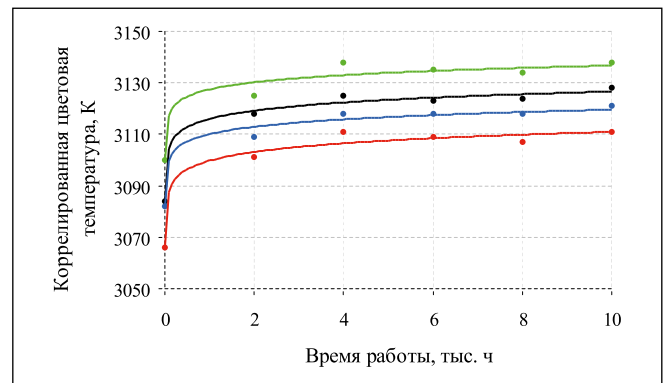
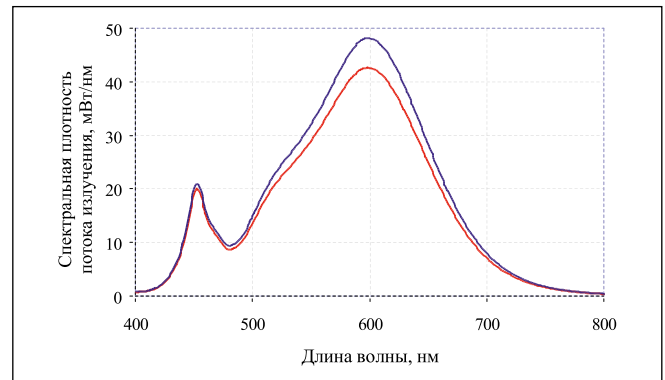


Рис. 2. Спектры излучения светильника производителя 1 в режиме 2: начальный (синий цвет) и после 10 тыс. ч работы (красный цвет)



тель 2), заявленному производителем, а коэффициент пульсации тока не превышает 1 %.

Режим 2. Режим токовой перегрузки, в котором ток СД в светильнике больше номинального. В светильниках производителя 1 этот ток был на 10 % выше номинального, составляя 390 мА (табл. 1). Поскольку номинальный ток СД в светильнике производителя 2 (260 мА) ниже паспортного (номинального) для этих СД (350 мА), то было решено в качестве токовой перегрузки СД в светильнике выбрать указанный паспортный ток (табл. 1). При этом коэффициент пульсации тока светильников обоих производителей не превышает 1 %.

Режим 3. Режим, в котором ток СД в светильнике равен номинальному току СД, а коэффициент пульсации тока равен 10 %. Частота пульсаций тока в режимах 3 и 4 равна 50 кГц.

Режим 4. Режим, в котором ток СД в светильнике равен номинальному току СД, а коэффициент пульсации тока составляет 40 %.

Нужные токи питания СД матрицы светильников задавались с помощью регулируемых УУ («драйверов»), выпускаемых компанией «Аргос-Трейд» (Санкт-Петербург), которые позволяют регулировать выходной ток от 240 до 390 мА [10], а нужные коэффициенты пульсаций тока – путём изменения

и подбора выходной индуктивности УУ по временной зависимости тока на экране цифрового осциллографа.

Результаты

Для проведения эксперимента были выбраны две партии из четырёх светильников каждого производителя. В первую очередь измерялись КЦТ светильников в номинальном режиме работы (табл. 2).

Диапазоны максимального отклонения значений КЦТ для её соответствующего номинального значения по стандарту [3] приведены в табл. 3. Из табл. 2 и 3 следует, что разброс значений КЦТ новых светильников производителя 1 полностью соответствует требованиям стандарта [3]. Отклонение значений КЦТ новых светильников производителя 2 существенно больше и выходит за пределы допустимых отклонений по табл. 3 для 4-шаговых зон (верхний предел 4139 К).

Исследовались изменения спектра излучения и КЦТ указанных светильников в течение 10 тыс. ч их работы с шагом измерений 2 тыс.ч. Время, затраченное на измерение, не учитывалось при расчёте общего времени работы светильников. Для каждого светильника по табл. 2 устанавливался соответствующий ему режим работы.

Паспортные данные испытуемых светильников

№ п/п	Наименование параметра	Производитель 1	Производитель 2
1	Номинальная мощность, Вт	24	19
2	Номинальный световой поток, лм	3750	2580
3	Номинальный ток светодиодов, указанный в их паспорте, mA	350	350
4	Номинальный ток светодиодов в светильнике, mA	350	260
5	КЦТ, К	3000	4000
6	Срок службы, тыс. ч	> 70	90

Рис. 3. Временные зависимости КЦТ светильников производителя 2 в разных режимах их работы: режим 1 (чёрный цвет); режим 2 (красный); режим 3 (синий); режим 4 (зелёный)

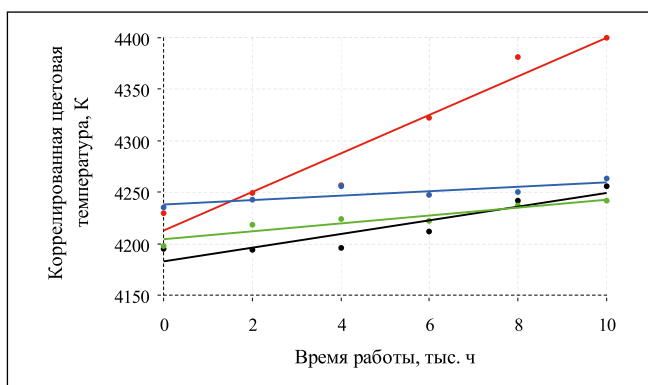
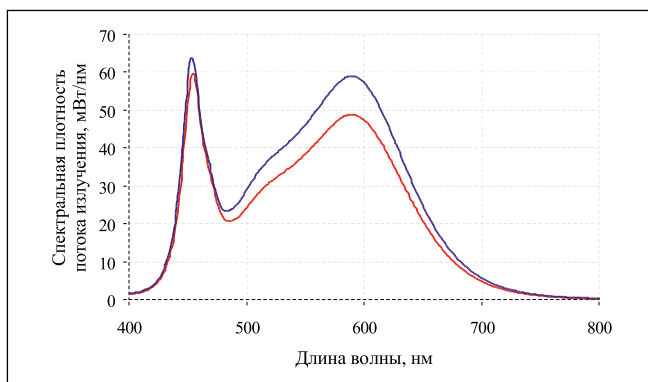


Рис. 4. Спектры излучения светильника производителя 2: начальный (синий цвет) и после 10 тыс. ч работы (красный цвет) в режиме 2



На рис. 1 представлены временные зависимости КЦТ светильников производителя 1 при разных режимах их работы. Оптимальные аппроксимации (логарифмические) этих зависимостей – КЦТ (К) от времени работы t (тыс. ч), полученные в среде «MS Excel», таковы: КЦТ = $4,5998 \cdot \ln(t) + 3115,9$ (режим 1); КЦТ = $4,8382 \cdot \ln(t) + 3099,7$ (режим 2); КЦТ = $4,1064 \cdot \ln(t) + 3110$ (режим 3); КЦТ = $4,0043 \cdot \ln(t) + 3127,4$ (режим 4).

Из рис. 1 видно, что скорость нарастания КЦТ светильников производителя 1 в разных режимах их работы примерно одинакова. После 10 тыс. ч работы значения КЦТ не вышли за пределы диапазонов допустимых отклонений для 4- и 7-шаговых зон (табл. 3), верхние

границы которых равны 3145 и 3220 К соответственно.

Наибольшее изменение КЦТ наблюдалось у светильника производителя 1, работающего в режиме 2 (при токовой перегрузке), а изменение спектра излучения этого светильника после 10 тыс. ч работы показано на рис. 2. Из рисунка видно, что за этот срок произошло снижение на 6 мВт/нм пика спектральной плотности потока излучения на длине волны около 600 нм, соответствующей оранжево-красному свету, а пик на длине волны около 450 нм (сине-голубой свет) практически не менялся. Эта закономерность и объясняет временной рост КЦТ – повышением доли синей составляющей в спектре излучения светильника.

Результаты испытания светильников производителя 2 при разных режимах их работы показаны на рис. 3. Оптимальные аппроксимации (линейные) этих зависимостей, также полученные в среде «MS Excel», таковы: КЦТ = $6,0359 \cdot t + 4184$ (режим 1); КЦТ = $16,978 \cdot t + 4216,9$ (режим 2); КЦТ = $1,807 \cdot t + 4239,5$ (режим 3); КЦТ = $3,4238 \cdot t + 4205,4$ (режим 4).

Характер изменения КЦТ в течение 10 тыс. ч эксплуатации светильников производителя 2 одинаков для всех режимов работы. Наибольшая скорость нарастания КЦТ наблюдалась в режиме 2.

КЦТ в этом режиме поднялась на 170 К и достигла 4400 К, что существенно выше верхних границ допустимых отклонений для 4- и 7-шаговых зон МакАдама (табл. 3).

Изменение спектра излучения данного светильника, проработавшего в режиме 2, после 10 тыс. ч работы показано на рис. 4. В области максимума на длине волны 590 нм снижение спектральной плотности потока излучения составило 10 мВт/нм, а в области пика на длине волны 450 нм эта величина снизилась на 4 мВт/нм. Как и в случае светильника производителя 1, этим и объясняется повышение КЦТ в данном случае.

Было интересно оценить пределы изменения КЦТ указанных светильников в течение заявленных их производителями сроков службы (табл. 1). С учётом огромности этих сроков были применены методы математического прогнозирования по результатам испытаний светильников в течение 10 тыс.ч. Возможность прогнозирования по достаточно короткому отрезку времени обусловлена тем, что после 10 тыс. ч непрерывной работы параметры и характеристики СД начинают существенно меняться из-за деградиционных процессов в люминофоре и кристалле, что обычно отражено в паспорте любых СД или ОП с СД. Поэтому, делая прогноз на основании результатов за первые 10 тыс. ч работы светильников, мы рассматриваем самый благоприятный вариант развития событий, и если при этом светильники не укладываются в установленные требования [3], то, очевидно, заявленные сроки службы светильников (табл. 1) не будут реальны.

Применялся один из самых популярных видов графического прогнозирования (реализованный в «MS

Excel») – экстраполяция, выполняемая построением линии тренда. Суть этого вида прогнозирования заключается в построении графика рассматриваемой зависимости на основе табличных данных, состоящих из аргументов и значений функции, наложении линии тренда и выборе одного из шести видов аппроксимации.

Результаты прогнозирования временной зависимости КЦТ светильников производителя 1 после 70 тыс. ч работы представлены на рис. 5, из которого видно, что «конечные» КЦТ светильников не вышли за пределы диапазонов допустимых отклонений, указанных в табл. 3 для 4- и 7-шаговых зон МакАдама (верхние пределы равны 3145 и 3220 К соответственно). Максимальная КЦТ, в 3143 К, зафиксирована у светильника, работающего в режиме 4. Наибольшее изменение КЦТ, в 50 К, наблюдается у светильника, работающего в режиме 2.

Результаты прогнозирования временной зависимости КЦТ светильников производителя 2 после 90 тыс. ч работы представлены на рис. 6, из которого видно, что КЦТ в каждом испытательном режиме значительно превысила верхние пределы диапазонов допустимых отклонений, указанных в табл. 3 для 4- и 7-шаговых зон МакАдама (верхние пределы равны 4139 и 4260 К соответственно). Максимальное изменение КЦТ, в 1650 К, при котором она достигла 5880 К, зафиксировано в испытательном режиме 2.

Заключение

По результатам проведённых исследований можно заключить следующее.

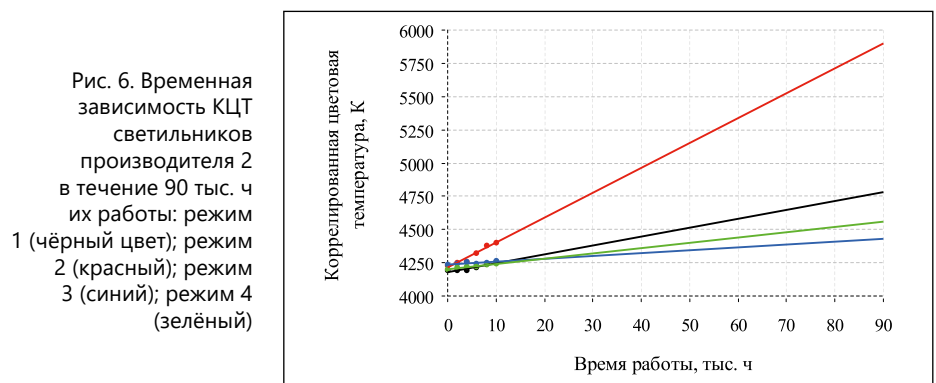
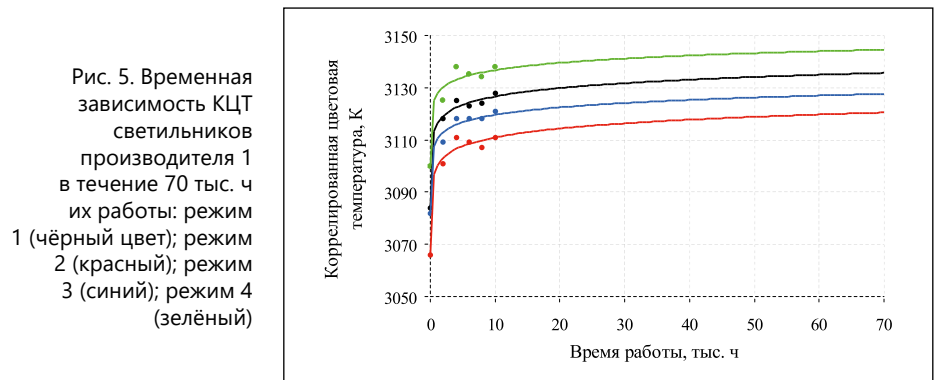
1. КЦТ светильников производителя 1, выполненных на СД с удалённым люминофором, ни в одном испытательном режиме не вышли за пределы диапазонов допустимых отклонений по стандарту [3]. КЦТ светильников производителя 2, выполненных на СД с ближним расположением люминофора, при каждом испытательном режиме значительно превышают верхние пределы диапазонов допустимых отклонений [3]. Объясняется это тем, что в СД с ближним расположением люминофора и последний, и кристалл испытывают большее тепловое воздействие, чем удалённый люминофор с соответствующим кристаллом, и поэтому, быстрее деградируя, быстрее изменяют КЦТ. Технология удалённого

Таблица 2
Результаты измерений КЦТ светильников в номинальном режиме работы

	Светильник № 1	Светильник № 2	Светильник № 3	Светильник № 4
КЦТ, К (производитель 1)	3084	3066	3082	3100
КЦТ, К (производитель 2)	4195	4230	4235	4198

Таблица 3
Диапазоны максимального отклонения значений КЦТ для соответствующего номинального значения

Номинальное значение КЦТ, К	Центральное значение КЦТ и диапазон допустимых отклонений для 7 шагов МакАдама, К	Центральное значение КЦТ и диапазон допустимых отклонений для 4 шагов МакАдама, К
3000	3045 ± 175	3045 ± 100
4000	3985 ± 275	3985 ± 154



люминофора позволила отчасти решить данную проблему.

2. Преимущественное снижение уровня спектральной плотности излучения светильников с СД в процессе их эксплуатации в диапазоне длин волн 500–700 нм, являясь следствием деградации люминофора и кристалла СД, изменяет (повышает) КЦТ этих изделий.

3. Наибольшие изменения КЦТ светильников обоих производителей наблюдались в режиме 2 (при токовой перегрузке), в котором СД испытывали тепловые перегрузки, ускорившие

деградационные процессы в кристалле и люминофоре. Однако для светильников производителя 1 данный режим не привёл к фатальным изменениям КЦТ, тогда как у светильников производителя 2 КЦТ вышла за пределы диапазонов допустимых отклонений уже через 10 тыс. ч их эксплуатации. Таким образом, режим, в котором питающий СД ток выше номинального и который часто используют производители для повышения светового потока светильников, является крайне нежелательным.

4. По скорости изменения КЦТ светильников обоих производителей режимы 3 и 4 (с коэффициентами пульсации питающего тока, существенно большими допустимых) лишь незначительно отличаются от режима 1 (номинального).

5. Возможный путь повышения стабильности КЦТ светильников в процессе эксплуатации – применение более качественных (и, соответственно, дорогих) СД с ближним расположением люминофора или же СД с удалённым люминофором.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Червинский М. Отказы светодиодных светильников: причины и способы предупреждения // Современная светотехника. – 2015. – № 4. – С. 42–52.

2. Никифоров С.Г. Актуальность изучения и необходимость совершенствования мето-

дик исследования деградации параметров светодиодов на основе твёрдых растворов AlGaInP и AlGaInN // Полупроводниковая светотехника. – 2012. – № 15. – С. 36–37.

3. СТО 69159079–01–2018 «Приборы осветительные светодиодные. Требования к техническим и эксплуатационным параметрам».

4. Никифоров С.Г. Разработка средств измерений и методов контроля параметров полупроводниковых излучателей на основе соединений AlInP, используемых в высоконадёжных приборах / Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – М.: 2015. – 39 с.

5. ANSI C78.377–2017 «American National Standard for Electric Lamps – Specifications for the Chromaticity of Solid State Lighting (SSL) Products».

6. Liu Z., Yang B., Zhang C.E., Li Y., Zou J., Shi M., Qian X., Zheng F. Model prediction on the correlated color temperature of white LED based on chromaticity coordinate // Journal of Luminescence. – 2019. – Vol. 216. – № 116652.

7. Lin D., Zheng P., He G. Color temperature tunable white LED cluster with color rendering

index above 98 // EEE Photonics Technology Letters. – 2017. – Vol. 29 (12). – P. 1050–1053.

8. Капитонов С.С., Прытков С.В., Григорович С.Ю., Капитонова А.В., Медведев С.А., Слугина Н.П. Исследование изменения цветовой температуры и спектра излучения светодиодных светильников в процессе их эксплуатации // Научно-технический вестник Поволжья. – 2019. – № 1. – С. 84–87.

9. Huang Y.-S., Luo W.-C., Wang H.-C., Feng S.-W., Kuo C.-T., Lu C.-M. How smart LEDs lighting benefit color temperature & luminosity transformation // Energies. – 2017. – 10(4). – № 518.

10. Беспалов Н.Н., Ильин М.В., Капитонов С.С. Оборудование для испытаний управляющих устройств для светильников со светодиодами и ЭПРА для люминесцентных ламп // Светотехника. – 2017. – № 4. – С. 42–46; Беспалов Н.Н., Ильин М.В., Капитонов С.С. Testing equipment for LED luminaire control devices and fluorescent lamp electron ballasts // Light & Engineering. – 2017. – Vol. 25 (4). – P. 86–91.



Капитонов Сергей Сергеевич, кандидат техн. наук. Окончил в 2010 г. Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва. Доцент кафедры электроники и нанoeлектроники ФГБОУ ВО «МГУ им. Н.П. Огарёва» и директор по научно-техническому развитию ООО «НИИИС им. А.Н. Лодыгина». Область научных интересов: агрофотоника, исследование и разработка светодиодных источников света и устройств управления для них, разработка и исследование разрядных ламп НД



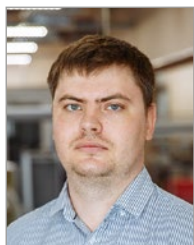
Капитонова Анастасия Владимировна, инженер. Окончила в 2013 г. Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва. Аспирант кафедры источников света ФГБОУ ВО «МГУ им. Н.П. Огарёва». Область научных интересов: исследование и разработка светодиодных источников света и устройств управления для них



Винокуров Алексей Сергеевич, инженер. Окончил в 2008 г. Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва. Генеральный директор ООО «НИИИС им. А.Н. Лодыгина». Область научных интересов: исследование и разработка светодиодных источников света и устройств управления для них, разработка и исследование разрядных ламп НД



Гузин Дмитрий Владимирович, инженер. Окончил в 2020 г. ФГБОУ ВО «МГУ им. Н.П. Огарёва». Инженер-радиоэлектронщик ООО «НИИИС им. А.Н. Лодыгина». Область научных интересов: исследование и разработка светодиодных источников света и устройств управления для них



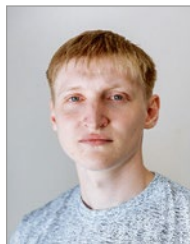
Прытков Сергей Владимирович, кандидат техн. наук. Окончил в 2010 г. Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва. Доцент кафедры светотехники ФГБОУ ВО «МГУ им. Н.П. Огарёва». Область научных интересов: фотометрия, исследование и разработка светодиодных источников света и устройств управления для них, разработка и исследование разрядных ламп НД



Медведев Сергей Антонович, бакалавр. Окончил в 2019 г. бакалавриат кафедры электроники и нанoeлектроники ФГБОУ ВО «МГУ им. Н.П. Огарёва». Область научных интересов: исследование и разработка светодиодных источников света и устройств управления для них



Григорович Сергей Юрьевич, инженер. Окончил в 2010 г. Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва. Аспирант кафедры электроники и электротехники ФГБОУ ВО «МГУ им. Н.П. Огарёва». Область научных интересов: исследование и разработка светодиодных источников света и устройств управления для них



Вильгельм Дмитрий Викторович, бакалавр. Окончил в 2019 г. бакалавриат кафедры электроники и нанoeлектроники ФГБОУ ВО «МГУ им. Н.П. Огарёва». Область научных интересов: исследование и разработка светодиодных источников света и устройств управления для них