

# Проектирование и разработка искусственного окна, работающего от солнечной энергии, с изменяющейся цветовой температурой на основе красного, синего и белого светодиодов<sup>1</sup>

Б. ДАС<sup>1</sup>, А.К. СУР, С. МАЗУМДАР<sup>2</sup>

Джадавпурский университет, Калькутта, Индия

<sup>1</sup> E-mail: basudebdas.1991@gmail.com

<sup>2</sup> E-mail: saswati.mazumdar@gmail.com

## Аннотация

Концепция искусственных окон применяется в дизайне внутреннего освещения на протяжении нескольких последних лет. Такие устройства можно без проблем найти на рынке. Основным недостатком искусственных окон является постоянная коррелированная цветовая температура (КЦТ) выходящего излучения. Разработанное искусственное окно представляет собой динамичную систему, КЦТ излучения которого повторяет изменение КЦТ естественного света. Это очень эффективно для тех, кто находится в помещении без окна или в закрытой комнате. Известно, что свет имеет не только визуальное воздействие на человека, но и фотобиологическое. Динамичный свет очень полезен для хорошего самочувствия, позитивного настроения, повышения концентрации, бодрости и, следовательно, повышения производительности. Разработанная система питается солнечной энергией в дневное время; это окно питается от модуля *SPV* напрямую без использования батареи. Одновременно заряжается небольшая батарея, которая питает систему в ночное время. Окно выполнено с использованием двух типов цветных СД (красного и синего) и тёплого белого СД. Новая концепция динамичного освещения обеспечивает очень широкий диапазон КЦТ от 2300 К до 10800 К.

**Ключевые слова:** искусственное окно, биодинамичное освещение, освещение с меняющейся КЦТ, системы на основе солнечной энергии, динамичное освещение, контроллер динамичного освещения.

## 1. Введение

Окно – очень важная часть любого здания. Оно оказывает психологическое воздействие на людей. Дневной свет может попасть в комнату через окно; это – главная цель окна. Дневной свет – естественный источник света, изменяющийся во времени как по количеству (освещённости), так и по качеству (цвету) [1, 2]. Комната может быть освещена дневным светом, который обладает положительным эффектом для человека [3]. Дневной свет оказывает большое влияние на циркадные ритмы человека [4], влияя на метаболизм и контролируя гормональный баланс [5, 6]. Многие современные городские многоэтажные здания, даже многие деревенские хижины не имеют окон. Люди в таких помещениях всегда находятся под искусственным освещением, и многие из них страдают сезонным аффективным расстройством (САР), вызванным отсутствием дневного света [7, 8].

В таких зданиях и комнатах могут использоваться искусственные окна, служащие для той же цели, создавая иллюзию обычного окна. Искусственные окна, доступные на индийском рынке, имеют постоянную коррелированную цветовую температуру (КЦТ). Такие типы окон не удовлетворяют требованию реального окна; они не дают динамический эффект дневного света. Спроектированное и разработанное искусственное окно создаёт динамический световой эффект в течение дня. Этот динамический свет напоминает дневной свет, т.е. окно следует за заданным характером изменения КЦТ дневного света весь день. В ночное время оно производит постоянную КЦТ (2900 К). КЦТ дневного света может варьироваться от 2000 К при восходе солнца до 5000 К в полдень в условиях ясного неба. Иногда она превышает 10000 К в условиях пасмурной погоды [9, 10]. Используя комбинацию светодиодов тёплого белого (2840 К) и холодного белого (5750 К) [11], невозможно получить КЦТ 10000 К. Было проведено множество экспериментов по получению широкого спектра КЦТ с использованием светодиодов красного, жёлтого, зелёного и синего цвета (RYGB) [9, 12, 13]. Чтобы получить этот широкий диапазон КЦТ в прототипе окна, использовалось сочетание красного, синего и тёплого белого светодиодов с КЦТ 2900 К, и эта комбинация светодиодов давала КЦТ до 10800 К.

Это окно питается непосредственно от солнечного фотоэлектрического СФЭ модуля в дневное время, а в ночное время оно получает питание от батареи, которая одновременно заряжается в дневное время с помощью СФЭ модуля. При меньшем уровне солнечного излучения падает и световой поток искусственного окна. В пасмурную погоду или в вечернее время, когда солнечный свет отсутствует, это окно обеспечивает постоянную КЦТ 2900

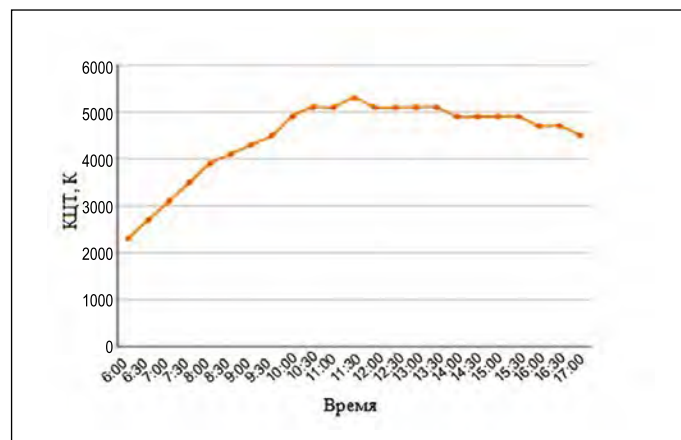


Рис. 1. КЦТ дневного света в марте 2017 года

<sup>1</sup> Перевод с англ. А.Ю. Басова

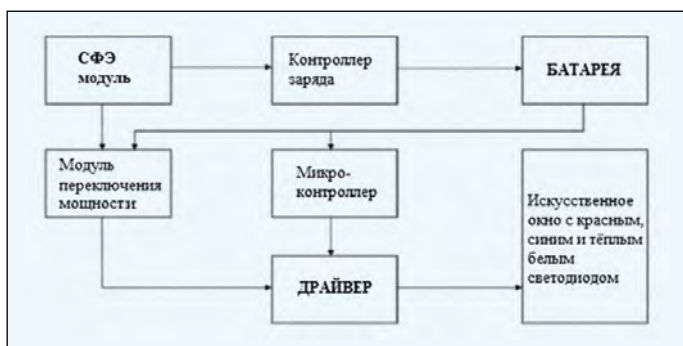


Рис. 2. Блок-схема системы

К. Конструкция искусственного окна описана в следующих разделах.

## 2. Измерения КЦТ дневного света

Поскольку дневной свет является динамичным по качеству и количеству, то есть спектральное распределение и световой поток дневного света меняются во времени [1, 2], КЦТ не может быть стандартизирована для конкретного дня или сезона. Для создания искусственного окна необходимо знать характер изменения дневного света. Измерения КЦТ дневного света были проведены в марте 2017 года на крыше кафедры электротехники Джадавпурского университета (Калькутта, Индия) в условиях чистого небосвода. Эксперимент проводился в течение 15 дней. Для измерений КЦТ дневного света использовался хроматр CL200A (Konica Minolta, Япония). Во время восхода КЦТ составляет около 2300 К, в полдень – около 5400 К и во время заката она падает до 4500 К. После сбора всех данных за 15 дней была создана закономерность, согласно которой изменяется КЦТ искусственного окна, которая представлена на рис. 1.

## 3. Концепция изменяющейся КЦТ на основе светодиодов

В этой системе смешение цветов подчиняется закону Грассмана. Согласно закону Грассмана, цвета смешиваются аддитивно. Если известны три стимула ( $X, Y, Z$ ) двух цветов, то они могут быть сложены для получения значений стимулов результирующего цвета. Обычно цвет задаётся координатой цветности ( $x, y$ ) и его яркостью ( $L$ ), которая пропорциональна значению  $Y$  [14, 16]. Цветность суммарного цвета можно получить по формуле:

$$x = \frac{\sum_1^n \left( x_k \frac{Y_k}{y_k} \right)}{\sum_1^n \frac{Y_k}{y_k}}, y = \frac{\sum_1^n \left( y_k \frac{Y_k}{y_k} \right)}{\sum_1^n \frac{Y_k}{y_k}}. \quad (1)$$

Координаты цветности ( $x, y$ ) этого смешанного цвета будут находиться где-то на прямой линии, соединяющей координаты цветности двух цветов на диаграмме цветности CIE1931. Спектральная плотность  $\bar{y}(\lambda)$  в точности

аналогична относительной спектральной световой эффективности  $V(\lambda)$ . Следовательно, любой фотометрический параметр, такой как световой поток ( $\Phi$ ), яркость ( $L$ ) или освещённость ( $E$ ), пропорционален значению стимула  $Y$  [14]. Поэтому цвет может быть задан координатами цветности ( $x, y$ ) и любым фотометрическим параметром [11]. В этой работе цвет задаётся координатами цветности ( $x, y$ ) и освещённостью ( $E$ ). Уравнение (1) можно переписать в виде

$$x = \frac{\sum_1^n \left( x_k \frac{E_k}{y_k} \right)}{\sum_1^n \frac{E_k}{y_k}}, y = \frac{\sum_1^n \left( y_k \frac{E_k}{y_k} \right)}{\sum_1^n \frac{E_k}{y_k}}. \quad (2)$$

## 4. Разработка схемы контроллера

### 4.1. Блок-схема системы

Блок-схема системы представлена на рис. 2.

В схеме есть три отдельных драйвера для трёх цветов светодиодов. Такой драйвер включает в себя схему отключения напряжения, преобразователь постоянного тока, ограничитель тока и т.д. Контроллер заряда заряжает батарею и состоит из преобразователя постоянного тока, схемы отключения напряжения, ограничителя тока, модуля защиты от перезарядки и модуля защиты от глубокого разряда. Когда солнечное излучение слабое, напряжение СФЭ модуля падает ниже 10 В, вся система отключается от СФЭ модуля с помощью схемы отключения напряжения и окно (при КЦТ 2900 К) питается от батареи мгновенно, что обеспечивается модулем переключения мощности. Модуль защиты от перезарядки защищает батарею от избыточной зарядки, а модуль защиты от глубокого разряда защищает аккумулятор от глубокой разрядки. В этой системе есть микроконтроллер (ATMEGA 32 от ATMEL), который генерирует сигнал ШИМ для трёх разных цветов светодиодов для конкретной КЦТ. Таким образом контролируется КЦТ в течение дня.

### 4.2. Описание драйвера и контроллера заряда

В схеме есть три отдельных драйвера для трёх цветов светодиодов. Дизайн и конструкция трёх драйверов аналогичны. В этом разделе рассматривается один из этих драйверов. Блок-схема драйвера изображена на рис. 3.

Драйвер состоит из преобразователя постоянного тока, ограничителя тока, схемы отключения напряжения и двухтактной коммутационной схемы для диммирования светодиода. Для любого светодиода драйвера необходимо выполнить настройку постоянного тока и постоянного напряжения. Для настройки постоянного напряжения был сконструирован двухтактный преобразователь постоянного напряжения с использованием интегральной схемы SG3525. Она представляет собой двухпроцессорный импульсный источник питания, работающий на частоте 100 кГц. В схеме ограничителя тока в качестве компаратора используется операционный усилитель LM 358, который сравнивает напряжение то-

кочувствительного резистора с опорным напряжением. Когда напряжение на резисторе превышает опорное напряжение, на интегральную схему SG3525 посылается большой сигнал и выходное напряжение уменьшается, как и ток. Схема отключения напряжения также является компаратором. Операционный усилитель LM 358 используется в качестве компаратора. Он сравнивает входное напряжение с опорным напряжением 10В. Всякий раз, когда входное напряжение падает ниже 10В, LM 358 генерирует большой сигнал. Этот сигнал подаётся на вывод 10 (закрывающий контакт) интегральной схемы SG3525. Пока контакт 10 находится под большим сигналом, схема будет полностью отключена, а выходное напряжение останется нулевым. Когда к этому выводу будет приложен низкий сигнал, схема перейдёт в рабочее состояние. Микроконтроллер (АТМЕГА 32) запрограммирован таким образом, что он выдаёт различные ШИМ сигналы для различных КЦТ. ШИМ сигнал управляет уровнем освещённости красного и синего светодиода. Продолжительность работы и паузы управляющего сигнала зависят от рабочего цикла ШИМ сигнала. Если рабочий цикл ШИМ сигнала дольше, продолжительность работы будет больше, а светодиод будет светиться ярче, освещённость будет выше. Если рабочий цикл короче, продолжительность работы будет меньше, а светодиод будет диммироваться, и освещённость будет ниже. Циклы работы и паузы меняются с большой частотой, так что их невозможно увидеть невооружённым глазом.

Работа схемы контроллера заряда такая же, как и драйвера. Он состоит из двухтактного преобразователя постоянного тока, ограничителя тока и цепи отключения напряжения. Кроме того, для защиты аккумулятора от повреждения предусмотрена схема защиты от перезарядки и схема защиты от глубокого разряда, что увеличивает срок службы батареи.

## 5. Разработанная система

Разработанное окно имеет 24 красных светодиода, 24 синих светодиода и 24 тёплых белых светодиода. Если его покрыть хорошим рассеивателем и повесить на стену, оно напоминает окно с непрозрачным стеклом. Разработанная система представлена на рис. 4.

## 6. Эксперимент смешения цветов для получения изменяющейся КЦТ

Для того чтобы получить изменяющуюся КЦТ путём смешивания цвета, необходимо использовать подходящий источник света с соответствующим цветом. В прошлом было сделано много работ, чтобы получить широкий диапазон КЦТ с использованием двух или более цветных источников. Путём смешивания светодиодов красного-синего-зелёного (RGB) [15] или красного-жёлтого-зелёного-синего (RYGB) светодиодов [9, 12, 13] были получены переменные КЦТ, но алгоритм смешивания сложный, и схема управления является дорогостоящей. Используя смеси холодного белого (6000 К) и тёплого белого (2700 К) светодиодов [11], невозможно создать широкий диапазон КЦТ. В этой разработанной системе два типа светодиодов – красный и синий – были смешаны с тёплым белым светодиодом с КЦТ 2900 К. Тёплый белый свето-

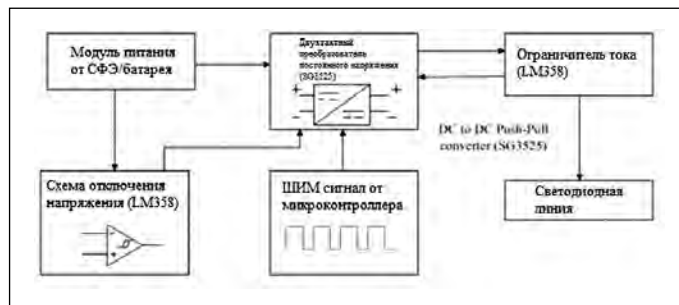


Рис. 3. Блок-схема драйвера

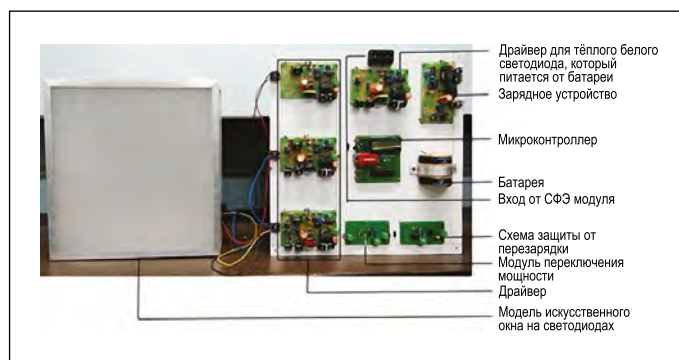


Рис. 4. Разработанная система

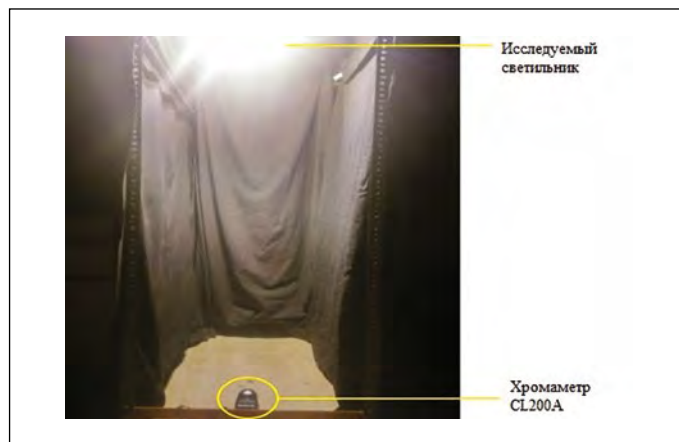


Рис. 5. Установка для экспериментов по смешению цветов

диод берётся за основу. Здесь КЦТ ниже 2900 К достигается за счёт смеси тёплых белых светодиодов и красных светодиодов, а КЦТ выше 2900 К достигается при использовании тёплых белых светодиодов и синих светодиодов. Алгоритм смешивания довольно прост, и был достигнут широкий диапазон КЦТ от 2300 К до 10800 К.

Результирующая КЦТ получается, когда два или более цветов смешиваются путём изменения входных токов светодиодов и, в конечном счёте, изменения освещённости ( $E$ ) отдельных источников света (уравнение 2). Входной ток можно изменить с помощью ШИМ. Если ширина импульса тока возрастает, ток увеличивается, а также увеличивается яркость источника света.

Эксперимент по смешиванию цветов был выполнен в Лаборатории инженерного освещения Электротехнического факультета Джадавпурского университета, Индия. Светильник, используемый в этом эксперименте, состоит из трёх тёплых белых светодиодов, трёх синих светодиодов и трёх красных светодиодов (всего девять

Результаты эксперимента по смешению цветов

Цикл ШИМ (в %)			Освещённость ( $E_v$ )	Координата цветности		КЦТ (К)
Красный СД	Тёплый белый СД	Синий СД		x	y	
10,2	100	0	27	0,4727	0,3834	2300
2,5	100	0	25,8	0,4122	0,3299	2700
0	100	0	25,6	0,3967	0,3170	2900
0	100	1,9	25,6	0,3736	0,2937	3300
0	100	2,8	25,8	0,3606	0,2838	3700
0	100	4,1	26,1	0,3445	0,2750	4500
0	100	4,5	26,3	0,3369	0,2704	4900
0	100	5,3	26,6	0,3272	0,2630	5700
0	100	5,4	26,6	0,3253	0,2606	6000
0	100	5,8	26,8	0,3204	0,2548	6600
0	100	6,2	27	0,3164	0,2500	7200
0	100	6,5	27,1	0,3132	0,2460	7800
0	100	6,8	27,2	0,3105	0,2429	8400
0	100	7,2	27,2	0,3076	0,2394	9200
0	100	7,5	27,2	0,3058	0,2372	9800
0	100	7,7	27,2	0,3047	0,2359	10200
0	100	8,0	27,3	0,3033	0,2342	10800

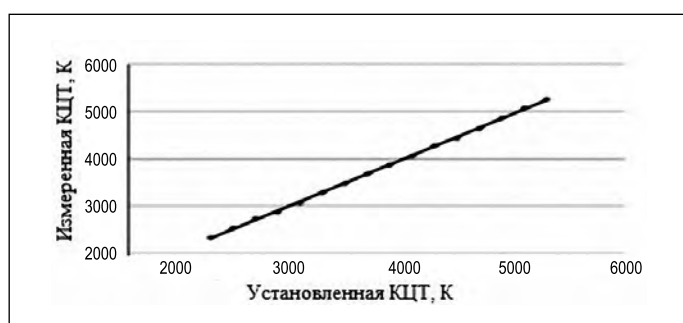


Рис. 6. Зависимость измеренной КЦТ от установленной КЦТ

светодиодов). Использовался светодиод типа P4 в форме купола мощностью 1 Вт. Размер светильника составляет 6 дюйм × 6 дюйм × 3 дюйм. Для каждого цвета светодиодов используются три схемы управления, рабочий цикл ШИМ управляется этими схемами. Рабочий цикл тёплых светодиодов сохранялся на уровне 100 %. Для измерения результирующей КЦТ использовался хроматр CL200A. Он размещается вертикально на расстоянии 6 футов от светильника. Экспериментальная установка показана на рис. 5.

В этом эксперименте были приняты изменения рабочего цикла ШИМ для красного и синего светодиодов, данные освещённости в фиксированной точке, координаты цветности ( $x$ ,  $y$ ) и результирующая КЦТ. Результат эксперимента по смешиванию цветов для получения переменной КЦТ приведён в табл. 1.

## 7. Фотометрические и колориметрические параметры системы

Исследуются колориметрические и фотометрические данные искусственного окна. Для динамичного освещения первоначально определяется КЦТ и, соответственно, программируется микроконтроллер. Необходимо наблюдать КЦТ искусственного окна и сравнивать наблюдаемые КЦТ с предустановленными. КЦТ измеряются с помощью хроматра CL200A и надлежащей экспериментальной установки. Горизонтальная и вертикальная освещённость также измеряется на расстоянии 1 м, 2 м, 3 м и 4 м от искусственного окна. Измеренные данные приведены в табл. 2.

Зависимость измеренной КЦТ от установленной КЦТ представлена на рис. 6.



Видно, что КЦТ искусственного окна близки к желаемым КЦТ. На рис. 7 представлено искусственное окно при различных КЦТ.

Графики зависимости горизонтальной освещённости от КЦТ представлены на рис. 8.

Из графика, приведённого на рис. 8, видно, что при КЦТ 2328 К горизонтальная освещённость максимальна, красный цвет смешивается с тёплым белым цветом. При уменьшении доли красного КЦТ увеличивается, а освещённость уменьшается. Когда измеренная КЦТ равна 2867 К, в излучении нет доли от красного и синего светодиодов, присутствует только тёплый белый. В это время освещённость меньше, чем в любых других случаях. Когда КЦТ увеличивается с ростом значения синего, освещённость также увеличивается. Поскольку изменение количества синего очень мало, освещённость увеличивается очень незначительно.

## 8. Заключение

Наша страна Индия расположена близко к экватору, где доступен солнечный свет с высокой интенсивностью и продолжительностью. Для удовлетворения растущего спроса на электроэнергию существенную роль может сыграть солнечная энергия. Солнечная энергия имеет некоторые недостатки: в пасмурные дни она не может произвести необходимую энергию. Разработанная система полностью основана на солнечной энергии. В пасмурную погоду эта система работать не будет.

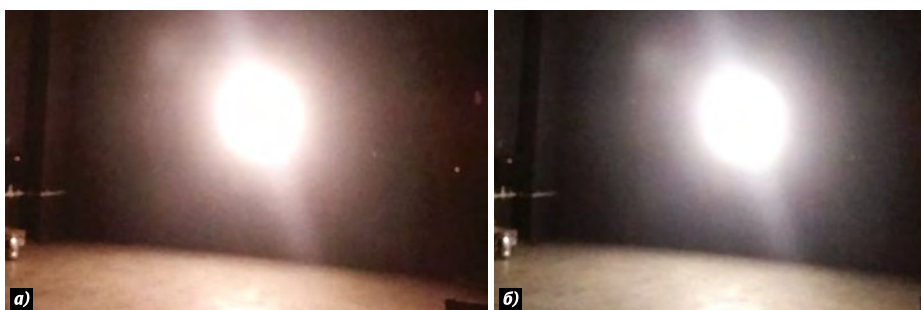


Рис. 7. Модель искусственного окна при КЦТ 2500 К (а) и 5300 К (б)

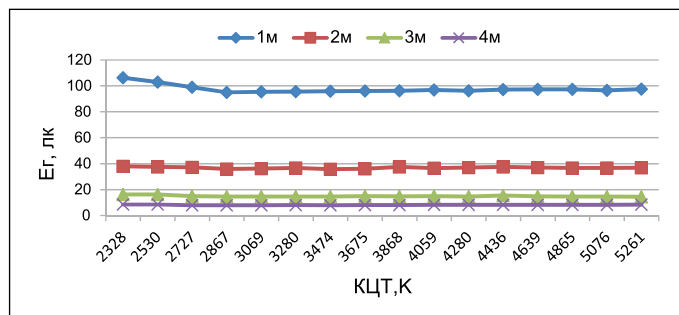


Рис. 8. Горизонтальная освещённость на разных расстояниях в зависимости от КЦТ

Разработанное искусственное динамическое окно следует за изменением КЦТ дневного света при чистом небе. Система будет более реалистичной и практичной, если КЦТ искусственного окна будет меняться согласно имеющейся КЦТ дневного света мгновенно с помощью системы обратной связи. Если КЦТ дневного света меняется, то КЦТ искусственного окна также меняется немедленно.

Таблица 2

Фотометрические и колориметрические данные спроектированного искусственного окна

КЦТ в К		Освещённость в лк							
		1 м		2 м		3 м		4 м	
устан.	измер.	верт.	гор.	верт.	гор.	верт.	гор.	верт.	Гор.
2300	2328	310	106,3	110,4	38	45,6	16,3	27,6	8,5
2500	2530	270	103	106	37,6	45,3	16,2	27,5	8,5
2700	2727	250,2	99	99	37,2	44,2	15	25,9	7,9
2900	2867	225,5	95	97,2	36	43	14,7	25,8	7,9
3100	3069	228,7	95,4	97,3	36,2	43,8	14,7	26,2	8,0
3300	3280	230	95,5	97,7	36,8	44,3	14,7	26,8	8,1
3500	3474	240,6	95,9	97,1	35,8	45,2	14,7	26,3	8,0
3700	3675	255,9	96	97,3	36,1	44,1	15	26,9	8,1
3900	3868	260,2	96,2	99,2	37,5	43,9	14,8	26,9	8,1
4100	4059	262,5	96,9	97,5	36,6	43,6	15	26,9	8,2

КЦТ в К		Освещённость в лк							
		1 м		2 м		3 м		4 м	
4300	4280	255,3	96,2	97,9	37,1	44,1	14,7	26,9	8,2
4500	4436	258,2	97,1	101,2	37,5	45,3	15,5	27	8,2
4700	4639	263,7	97,4	98,2	37	45,4	14,8	27	8,3
4900	4865	265,6	97,4	98	36,8	46	14,6	27,1	8,2
5100	5076	260,3	96,6	98,1	36,7	46,7	14,6	27,3	8,3
5300	5261	267,2	97,5	98,2	36,9	46,6	14,5	27,3	8,4

Таким образом, можно получить полное соответствие по КЦТ и освещённости в закрытой комнате, где солнечный свет недоступен.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *De Kort, Y., Smolders, K.* Effect of dynamic lighting on office workers: first results of a field study with monthly alternating settings // *Lighting Research & Technology*, 2010. – V. 42, No. 3, – pp. 345–360.
2. *Pinho, P., Hytonen, T., Rantanen, M., Eloma, P., Halonen, L.* Dynamic control of supplemental lighting intensity in a green house environment. // *Lighting Research & Technology*, 2013. – V. 45, No. 3, – pp. 295–304.
3. *Gelfand, L., Freed, E.* Sustainable School Architecture: Design for elementary and secondary school. John Wiley and Sons Inc.
4. *Friberg, O., Rosenvinge, J., Wynn, R., Gradisar, M.* Sleep Timing, phonotype, mood, and behavior at arctic latitude (69°N). // *Sleep Medicine*, 2014. – V. 15, – pp. 798–807.
5. *Altomonte, S.* Daylight and the occupant, visual and physiological well-being in built environment. Presented at 26<sup>th</sup> conference on Passive and Low Energy Architecture, Quebec city, Canada. 22–24 June, 2009.
6. *Van, W.J.M.* Non-visual biological effect of lighting and the practical meaning for lighting for work. // *Applied Ergonomics*, 2006. – V. 37, – pp. 461–466.
7. *Bouberki, M.* Daylighting, Architecture and health, NY: Architectural Press, 2008.
8. *Edwards, L., Torcellini P.A., N.R.E.* A literature review of the effects of natural light on building occupants, National Renewable Energy Laboratory, 2002.
9. *Gilman, J.M., Miller, M.E., Grimaila, M.R.* A simplified control system for a daylight-matched LED lamp. // *Lighting Research & Technology*, 2013. – V. 45, No. 5, – pp. 614–629.
10. *Hernandez-Andrés, J., Romero, J., Nieves, J.L.* Color and spectral analysis of daylight in southern Europe. // *J Opt Soc Am A*, 2001. – V. 18, No. 6, – pp. 1325–1335.
11. *Pradip, M.K., Biswanath, R.* Development of dynamic light controller for variable CCT white LED light source. // *Leukos*, 2015. – V. 11, No. 4, – pp. 209–222.
12. *Dikel, E.E., Burns, G.J., Veitch, J.A., Mancini, S., Newsham, G.R.* Preferred chromaticity of color tunable LED lighting. // *Leukos*, 2014. – V. 10, No. 2, – pp. 101–115.
13. *Wang, H.H., Luo, M.R., Liu, P., Yang, Y., Zheng, Z., Liu X.* A study of atmosphere perception of dynamic colored light. // *Lighting Res & Technology*, 2013. – V. 46, No. 2, – pp. 171–186.

14. *Murdoch, J.B.* Illumination engineering – from Edison’s lamp to laser. 1st ed. // Macmillan Publishing Company, New York (NY), 1985. – 541 p.

15. *Dyble, M., Narendran, N., Bierman, A., Klein, T.* Impact of dimming white LEDs: chromaticity shift due to different dimming methods. // *P Soc Photo-Opt Ins.* 5941, 2005. – pp. 291–299.

16. *Malik, R., Mazumdar, S.* Development of CCT tunable Led lighting system using red-blue-white Led. // *Light & Engineering*, 2017. – V. 25, No. 4, – pp. 99–108.



**Басудеб Дас (Basudeb Das)**, получил степень В. Tech. в области электроники и коммуникационной инженерии в Технологическом институте Гуру Нанак (Калькутта, Индия) и степень М.Е. Светотехники в Джадавпурском университете (Калькутта, Индия) в 2017 году. Сфера научных интересов: оптическая связь, динамичное освещение, системы на основе солнечного излучения



**Асум Кумар Сур (Asit Kumar Sur)**, приглашённый помощник (лаборант) для магистерского курса по светотехнике с 2014 года, Джадавпурского университета. Инженер-консультант по проектированию различных электронно-цифровых проектов на протяжении 35 лет в разных компаниях. Сфера научных интересов: электроника, силовая электроника, системы на основе солнечного излучения



**Сасвати Мазумдар (Saswati Mazumdar)**, М.Е., Ph.D. Профессор электротехники, Джадавпурского университета (Калькутта, Индия). Имеет 30-летний опыт работы в области освещения и обучения. Разработала модернизированную лабораторию освещения в отделе электротехники Джадавпурского университета. Основала два магистерских курса по технике освещения (дневное время) и технологии освещения и ди-зайна (вечер) в Джадавпурском университете. Выполнено большое количество научно-исследовательских и консультационных проектов по освещению и смежным областям