

Осветительный прибор с регулируемой цветовой температурой с красными, синими и белыми СД¹

Р. МАЛИК, С. МАЗУМДАР

Университет Джадавпур, Калькутта, Индия.

E-mail: rajib.diara@gmail.com; saswati.mazumdar@gmail.com

Аннотация

Предложен позволяющий регулировать коррелированную цветовую температуру (T_c) осветительный прибор с СД, который включает в себя красные, синие и белые СД, устройство управления и светорегулятор. При этом сначала имеющий разную интенсивность свет RGB СД смешивался со светом белых СД, что позволяло варьировать T_c . Было установлено, что для получения более высоких, чем у белых СД, значений T_c достаточно смешивать свет только синих и белых СД. С другой стороны, для получения более низких, чем у белых СД, значений T_c достаточно смешивать свет красных и белых СД. Этот новый алгоритм позволяет реализовывать T_c в интервале от 2700 до 9723 К. Максимальные отклонения значений T_c , полученных в результате добавления к свету белых СД света красных и синих СД, от заданных оказались равными 18 и 344 К соответственно. Устройство управления СД сконструировано таким образом, чтобы оно могло работать как в режиме защиты от перегрузок по напряжению, так и в режиме управления током. Режим управления током реализован при помощи пропорционально-интегрального регулятора на основе операционного усилителя.

Ключевые слова: светорегулятор, устройство управления для СД, $RGBW$ СД, управление током, светорегулирование при помощи ШИМ-сигналов, варьированная коррелированная цветовая температура.

1. Введение

Из-за увеличения цен на энергию исследователи стараются разработать новые методы и осветительные приборы, позволяющие эффектив-

но использовать электроэнергию [1]. В настоящее время СД постепенно становятся всё более популярной альтернативой традиционным источникам света, что обусловлено их очень высокой энергоэффективностью, мгновенным зажиганием, способностью работать при низких температурах и очень малым количеством УФ излучения, а также их большим сроком службы, малыми размерами и весом и высокой сопротивляемостью к разрушению; кроме того, ими легко управлять, и они безопасны для окружающей среды [1, 2, 13, 14].

Для экономии электроэнергии искусственное освещение следует совмещать с естественным. Цвет излучения искусственного источника света должен соответствовать цвету дневного света. Коррелированная цветовая температура (T_c) в течение дня изменяется от 2000 К на рассвете до 5000 К при наличии прямого солнечного света полдень и может достигать 10000 К в условиях сплошной облачности [3]. Так что для обеспечения такого же, как и при естественном освещении, зрительного ощущения, нужно создать искусственный источник света, допускающий регулирование цвета его излучения. Помимо имитации

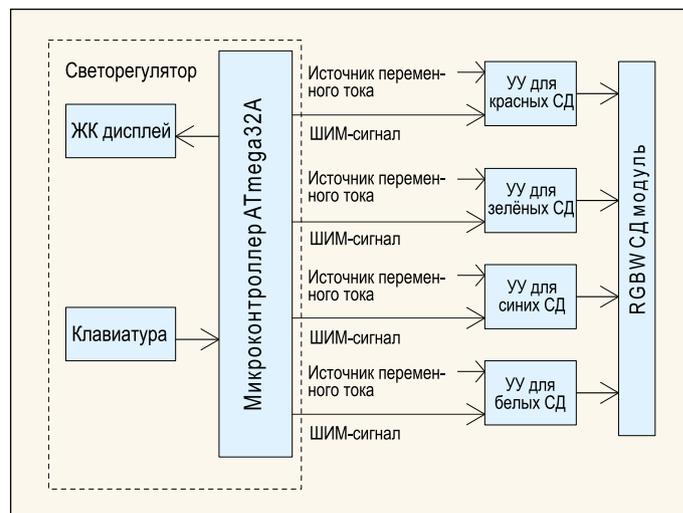
естественного освещения, регулируемые по цвету источники света могут использоваться для создания у людей определённого настроения [4].

Хорошо известно, что обширную цветовую гамму можно обеспечить посредством смешивания трёх основных цветов – красного, зелёного и синего. В ряде предшествующих исследований для получения разных оттенков белого света смешивали свет монохроматических красных, зелёных, синих и жёлтых СД [3]. Однако T_c монохроматического источника света измерить нельзя, а индекс цветопередачи получаемого подобным образом света оказывается очень низким. В данной работе для получения варьированной T_c имеющий разную интенсивность свет RGB СД смешивался со светом СД тёпло-белого света. И наконец, был предложен алгоритм, позволяющий варьировать T_c при помощи СД только красного, синего и тёпло-белого света.

2. Осветительный прибор с $RGBW$ СД

Экспериментальный осветительный прибор с $RGBW$ (красный-зелёный-синий-белый) СД состоял из одного светорегулятора, четырёх устройств управления (УУ) для СД и $RGBW$ СД модуля. Четыре УУ использовались для того, чтобы обеспечить независимые токовые режимы работы четырёх цепочек СД. Светорегулятор генерирует четыре независимых ШИМ-сигнала с разными коэффициентами заполнения, которые обеспечивают четыре независимых значения токов питания цепочек СД. Блок-схема разработанного прибора приведена на рис. 1.

Рис. 1. Блок-схема осветительного прибора с СД с регулируемой T_c



¹ Перевод с англ. Е.И. Розовского

Рис. 2. Прототип светильника RGBW

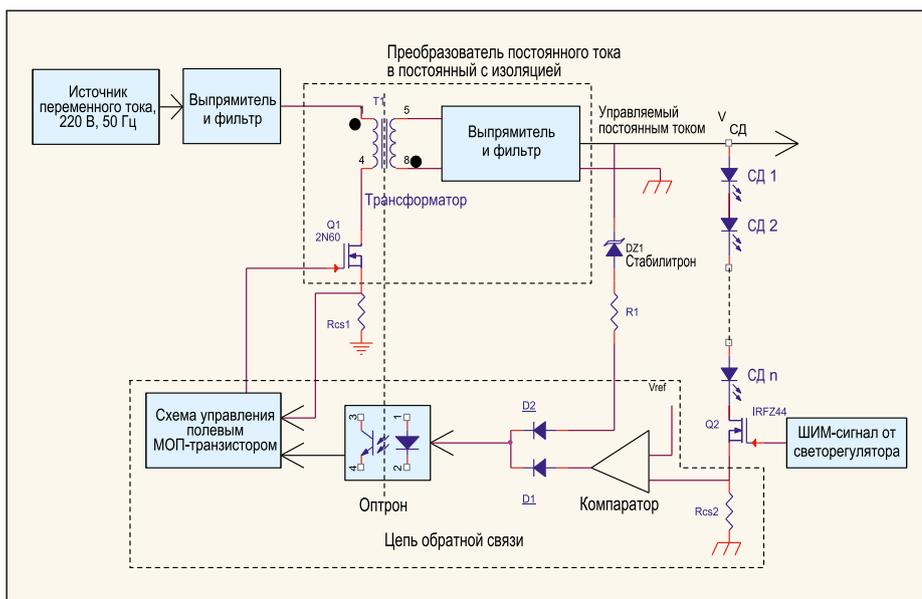
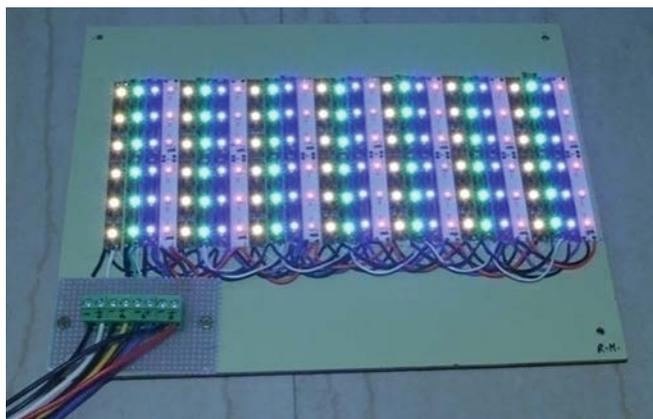


Рис. 3. Блок схема УУ для СД

2.1. Основы управления цветовой температурой

Основы работы блока управления цветовой температурой можно объяснить при помощи графика цветностей (x, y) МКО 1931, т.к. любой цветное восприятие может быть отображено при помощи двух координат (x, y) . $T_{ц}$ источника света – это температура идеального чёрного тела, излучение которого сопоставимо с излучением этого источника света. Свет с низкими (2700–3000 К) значениями $T_{ц}$ называют тёпло-белым, а свет с высокими (5000–6000 К) значениями $T_{ц}$ – холодно-белым.

Согласно закону Грассмана, цвета смешиваются линейно. Так что если известны координаты цветности (x_k, y_k) n первичных излучателей, то любые координаты цветности (x, y) , лежащие в пределах цветового пространства МКО 1931 г., могут быть записаны как [5]:

$$\begin{aligned} x &= \frac{\sum_1^n x_k \cdot Y_k}{\sum_1^n Y_k}, \\ y &= \frac{\sum_1^n y_k \cdot Y_k}{\sum_1^n Y_k}, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} x &= \frac{\sum_1^n x_k \cdot Y_k}{\sum_1^n Y_k}, \\ y &= \frac{\sum_1^n y_k \cdot Y_k}{\sum_1^n Y_k}, \end{aligned} \quad (2)$$

где Y_k – световой поток первичного излучателя k .

2.2. Конструкция прототипа светильника

Расположение СД ленты RGBW 3528 LED на бакелитовой плате показано на рис. 2. Каждая цепочка СД состоит из 14-ти параллельных дорожек, каждая из которых содержит 3 последовательно соединённых СД.

3. Конструкция УУ

В рамках данной работы был разработан основанный на обратноходовом преобразователе импульсный источник питания, схема которого была реализована на печатной плате. Линейный источник питания имеет низкий КПД, так как этот полупроводниковый прибор работает в активном режиме. Переключая (включая/выключая) активные приборы, можно обеспечить большее, чем у линейных источников питания, КПД преобразователя.

В качестве переключателя использовались полевые МОП-транзисторы 2N60 (ток 2 А, напряжение 600 В, N каналов).

3.1. Принцип действия разработанного УУ

Вначале переменный ток преобразуется в постоянный при помощи выпрямителя, а затем величина этого постоянного тока при помощи высокочастотного переключателя и трансформатора доводится до требуемого для работы СД уровня. Блок-схема УУ приведена на рис. 3.

Автоколебательный обратноходовой преобразователь является популярной схемой для бюджетных областей применения благодаря своим простоте и малому количеству деталей [6]. Подробный анализ стационарного режима работы и ориентированную на малые сигналы модель автоколебательного обратноходового преобразователя можно найти в [6].

В данной работе была разработана схема автоколебательного обратноходового преобразователя, которая была реализована для питания цепочек СД. При открывании полевого МОП-транзистора Q_1 ток начинает протекать по первичной обмотке трансформатора, в которой накапливается энергия. Ток в первичной обмотке I_p можно измерить при помощи низкоомного резистора R_{CS1} , расположенного между стоком полевого МОП-транзистора и землёй. При отсутствии обратной связи пиковое значение напряжения $I_p \cdot R_{CS1}$ достигает порогового значения напряжения между базой и эмиттером транзистора типа $n-p-n$, что приводит к уменьшению напряжения затвор-исток полевого транзистора Q_1 . Вследствие регенеративных процессов Q_1 быстро закрывается, и во вторичную обмотку передаётся накоплен-

ная в первичной обмотке энергия $1/2 L_p \cdot I_p^2$, где L_p – индуктивность первичной обмотки. При наличии обратной связи по току или напряжению значение $I_p \cdot R_{CS1}$ изменяется, что приводит к требуемому изменению тока во вторичной обмотке или напряжения на вторичной обмотке.

Схема управления полевым МОП-транзистором будет быстро открывать и закрывать полевой МОП-транзистор Q_1 под воздействием сигнала обратной связи или тока в первичной обмотке. Для изоляции вторичной обмотки трансформатора от первичной используется оптрон. Разработанный прототип УУ для СД показан на рис. 4, а в табл. 1 приведены характеристики этого УУ.

3.2. Работа УУ в режиме управления

Управляющая схема на вторичной стороне трансформатора позволяет работать в режиме защиты от перегрузок по напряжению и в режиме управления током. На протяжении типичного периода используемого для светорегулирования ШИМ-сигнала управляющий сигнал на вторичной стороне трансформатора проходит и через стадию защиты от перегрузок по напряжению, и через стадию управления током. В рамках этого цикла, при открывании полевого МОП-транзистора Q_2 схема управления током будет активирована для защиты СД, а при его закрывании будет активирована схема защиты полевого МОП-транзистора Q_1 от перегрузок по напряжению.

3.2.1. Работа УУ в режиме управления током

Т.к. СД представляет собой питаемый током полупроводниковый прибор, то его яркость пропорциональна протекающему через него току. Управление током осуществляется при помощи ПИ-регулятора (рис. 5). Приведённая на рис. 5 управляющая схема работает при закорачивании выходных контактов, при закорачивании СД или если ток нагрузки превысит своё максимальное допустимое значение.

Расположенная на вторичной стороне трансформатора схема управления с обратной связью реализована при помощи резистивного делителя с последующим усилением напряже-



Рис. 4. Прототип УУ для СД

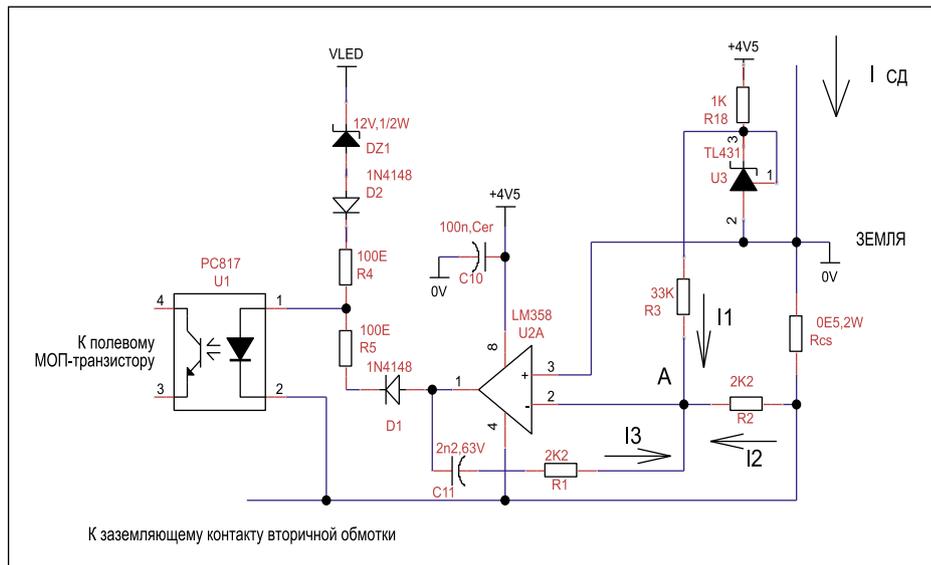


Рис. 5. Основанная на ПИ-регуляторе блок-схема управления током

Таблица 1

Характеристики УУ для СД

Параметр	Значение
Номинальное входное напряжение V_{in}	230 В, 50 Гц переменного тока
Номинальное выходное напряжение V_{out}	16 В
Индуктивность первичной обмотки $L1$	430 мкГн
Индуктивность вторичной обмотки $L2$	8 мкГн
Нормированный ток СД I_{LED}	312 мА
Тип СД и количество СД	СД лента 3528 LED (красные, зелёные, синие и белые СД)
Частота обеспечивающего светорегулирование ШИМ-сигнала F_{Dim}	244 Гц
Резистор R_{CS1}	0E5

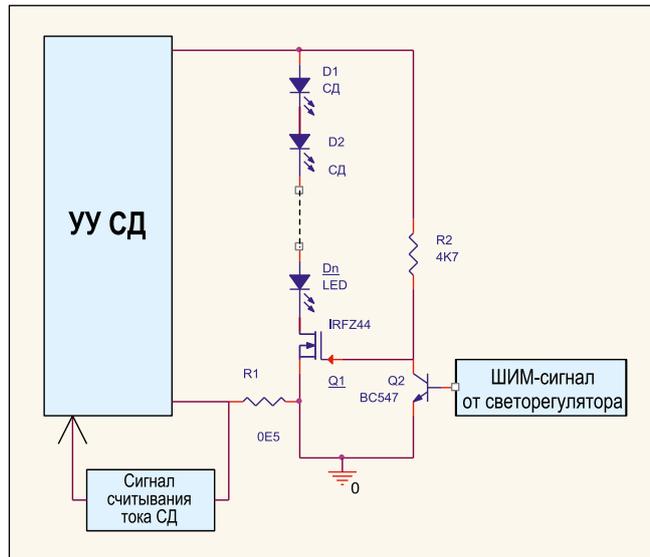
ния регулируемым стабилитроном ($TL431$) [6].

В данной работе схема управления с обратной связью модифицирована посредством включения в неё ПИ-регулятора, необходимого для точного управления током СД.

Применительно к узлу А на рис. 5, закон Кирхгофа записывается следующим образом:

$$I_1 + I_2 + I_3 = 0, \quad (3)$$

Рис. 6. Схема последовательного подсоединения переключателя для обеспечения светорегулирования



$$I_1 \frac{V_{ref}}{R_3}, \quad (4)$$

$$I_2 = -\frac{I_{LED} \cdot R_{CS}}{R_2}, \quad (5)$$

$I_3 = 0$ в установившемся режиме.

Максимальный выходной ток, который может обеспечивать УУ СД, можно рассчитать по формуле:

$$I_{LED} = \frac{R_2 \cdot V_{ref}}{R_3 \cdot R_{CS}}. \quad (6)$$

Таким образом, предельное значение максимального тока можно задать, изменяя любой из параметров R_2 , V_{ref} , R_3 или R_{CS} . Операционный усилитель LM358 используется для сравнения опорного напряжения V_{ref} и выходного тока. Рассчитанное по (6) значение I_{LED} равно 312 мА. Опорное напряжение 2,5 В генерируется с использованием прецизионного регулируемого стабилитрона TL431. В режиме управления током $I_1 < I_2$, так что коэффициент усиления компаратора будет высоким.

3.2.2. Режим защиты от перегрузок по напряжению

В режиме защиты от перегрузок по напряжению $I_1 > I_2$, так что коэффициент усиления компаратора будет низким.

Напряжение на выводах для подключения СД V_{LED} будет зависеть от падения напряжения на стабилитроне DZ_1 , D_2 и оптроне. V_{LED} ни при ка-

ких условиях не должно быть больше чем напряжение питания СД.

4. Конструкция светорегулятора

Светорегулятор используется для генерации четырёх независимых ШИМ-сигналов. Он состоит из микроконтроллера ATmega32A компании Atmel Corporation, жидкокристаллического (ЖК) дисплея 16x2 и клавиатуры 4X1. Для предотвращения мельканий, частота генерируемого светорегулятором ШИМ-сигнала должна превышать 100 Гц [7, 8, 15]. Поэтому для каналов RGBW она была установлена равной 244 Гц.

4.1. Принцип действия светорегулятора для СД

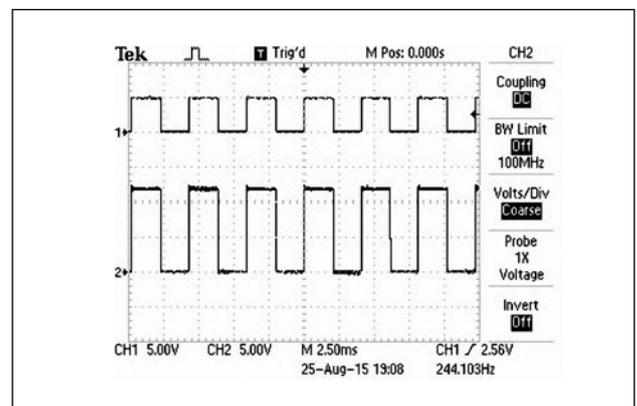
Т.к. СД представляет собой питаемый током полупроводниковый прибор, то его яркость пропорциональна протекающему через него току. Световой поток СД можно изменять посредством модуляции амплитуды тока.

Однако этот способ линейного светорегулирования не рекомендуется использовать в случае систем RGB, т.к. цветность их излучения зависит от амплитуды тока и температуры $p-n$ -перехода [9]. Для полупроводникового прибора, которым является СД, лучшим способом светорегулирования служит использование широтно-импульсной модуляции протекающего через него тока с варьируемым коэффициентом заполнения ШИМ-сигнала. Это позволит изменить освещённость протекающего через цепочку СД тока. Светорегулирование при помощи ШИМ обладает некоторыми преимуществами перед аналоговым или амплитудным светорегулированием, такими как стабильность цветности при изменении светового потока в интервале 0–100 % и линейная зависимость между коэффициентом заполнения и световым потоком СД. Результаты предшествующих исследований говорят о том, что подобное светорегулирование является в рассматриваемом случае самым подходящим, т.к. аналоговое светорегулирование приводит к изменению цвета излучения СД [9]. Так что в данном случае светорегулирование при помощи ШИМ было выбрано как наиболее подходящее решение стоящей перед нами задачи.

Для осуществляемого в соответствии с коэффициентом заполнения индивидуального включения и выключения СД использовались полупроводниковые переключатели, установленные последовательно с каждой из цепочек СД. Среднее значение обеспечиваемого УУ тока СД I_{avg} может быть записано как:

$$I_{avg} = \frac{I_{LED} \cdot T_{on}}{T_{on} + T_{off}}, \quad (7)$$

Рис. 7. Сигнал светорегулятора (CH1, 5В/дел.) и напряжение сток-исток (CH2, 5В/дел.) при коэффициенте заполнения 50 %. Временная шкала – 2,5 мс/дел.



Зависимость T_d от коэффициента заполнения для синего СД

№ п/п	Коэффициент заполнения для синего канала, %	T_d , К
1	0	3268
2	5	3394
3	10	3539
4	15	3692
5	20	3880
6	25	4100
7	30	4360
8	35	4664
9	40	4996
10	45	5420
11	50	5940
12	55	6581
13	60	7389
14	65	8341
15	70	9723

где I_{LED} – максимальный допустимый ток СД, который можно рассчитать по (6); T_{on} и T_{off} – продолжительности включения и выключения СД соответственно. Коэффициент заполнения можно менять в интервале от 0 до 100 %, в результате чего световой поток СД тоже будет меняться от 0 до 100 %. Схема последовательного подсоединения переключателя приведена на рис. 6, где переключатель Q_2 – это n -канальный мощный полевой МОП-транзистор *IRFZ44*. Для обеспечения требуемого включения и выключения подсоединённого последовательно светорегулирующего полевого МОП-транзистора Q_2 используется n - p - n транзистор Q_1 (*BC547*), который обеспечивает требуемое значение тока затвора Q_2 .

Из рис. 7 следует, что так как затвор полевого МОП-транзистора Q_2 заземлён через Q_1 , то при большой амплитуде сигнала светорегулятора напряжение на электроде стока МОП-транзистора Q_2 также будет большим, а при малой амплитуде сигнала светорегулятора напряжение на электроде стока этого МОП-транзистора также будет малым, в результате чего цепочка СД будет включена при малой амплитуде сигнала светорегулятора.

4.2. Генератор ШИМ-сигнала

ATmega32A – это имеющий низкое энергопотребление 8-битный AVR микроконтроллер на КМОП структурах со следующими характеристиками: внутрисистемно программируемая флэш-память ёмкостью 32 Кбайта с возможностью считывания и записи, четыре ШИМ-канала, 32 программируемых канала ввода-вывода, тактовая частота 0–16 МГц, электрически программируемое постоянное запоминающее устройство ёмкостью 1024 Кбайта, 32 резистора общего назначения и т.д. [10]. Генерация четырёх ШИМ-сигналов осуществляется посредством включения таймеров/счётчиков *Timer0*, *Timer1* и *Timer2* микроконтроллера *ATmega32A*.

Программа для генерации ШИМ-сигналов и программа для сопряжения клавиатуры и ЖК дисплея написаны при помощи *Atmel Studio 6.2* компании *Atmel Corporation* [11], а файл *HEX* загружается в микроконтроллер *ATmega32A* при помощи *USBASP* программатора для AVR микроконтроллеров.

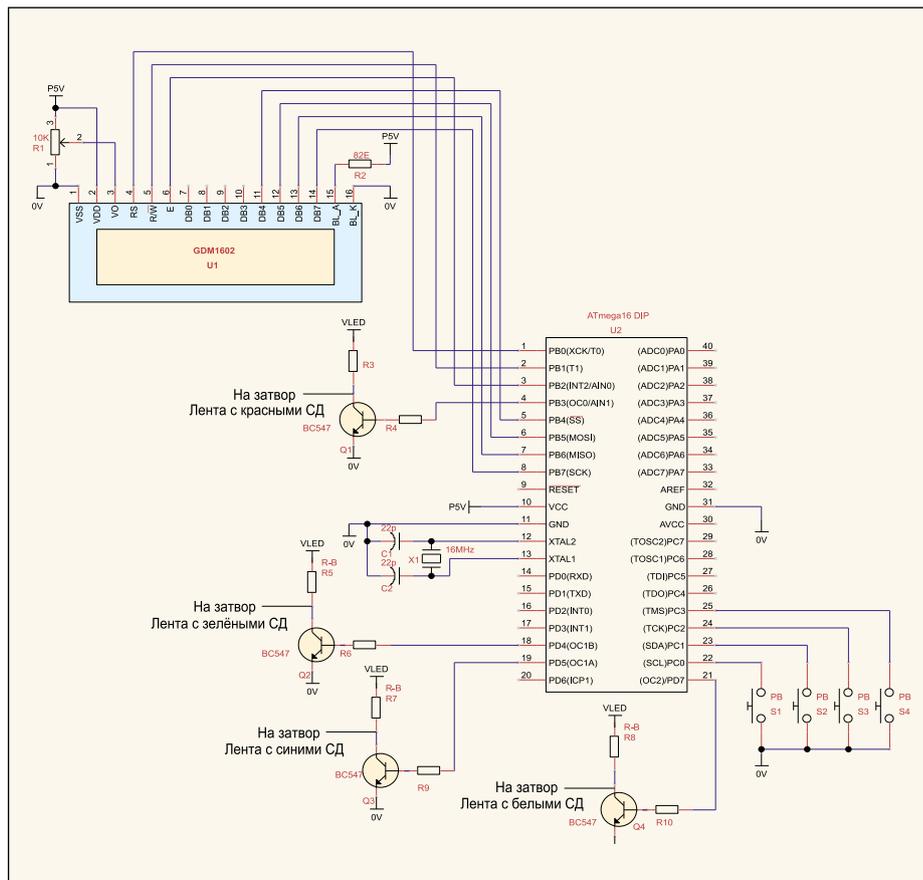


Рис. 8. Расположение выводов для подключения ЖК дисплея и клавиатуры к микроконтроллеру



Рис. 9. Установка для измерения T_c

Рис. 10. Связь между масштабированным смещением T_c и коэффициентом заполнения для синего канала

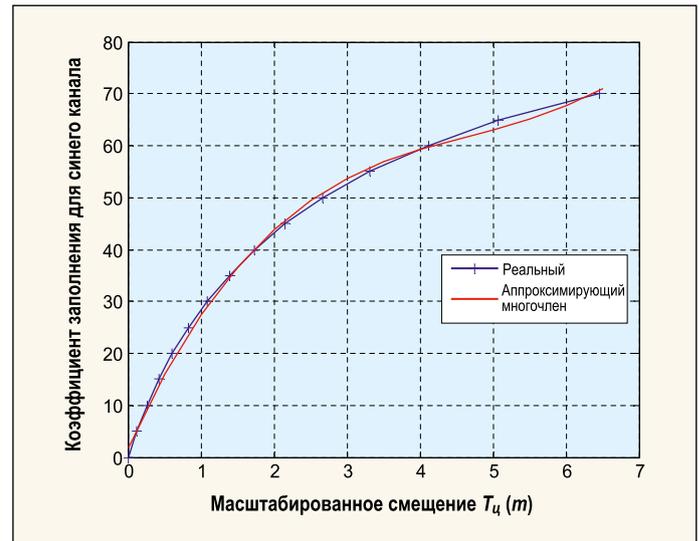


Рис. 11. Связь между масштабированным смещением T_c и коэффициентом заполнения для зелёного канала

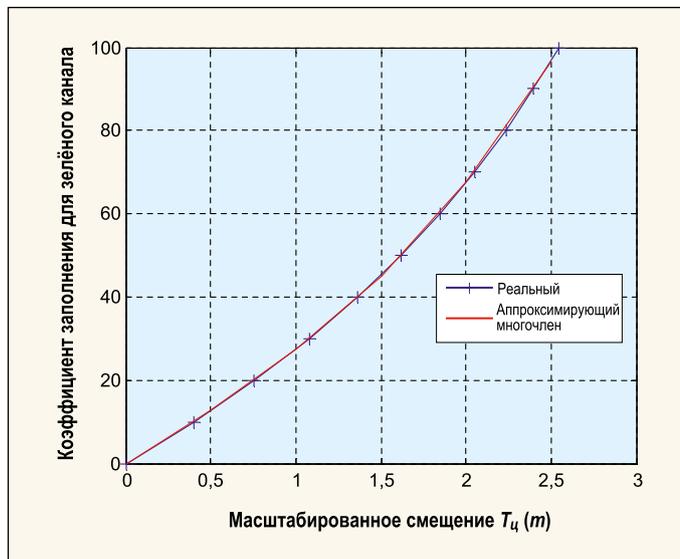
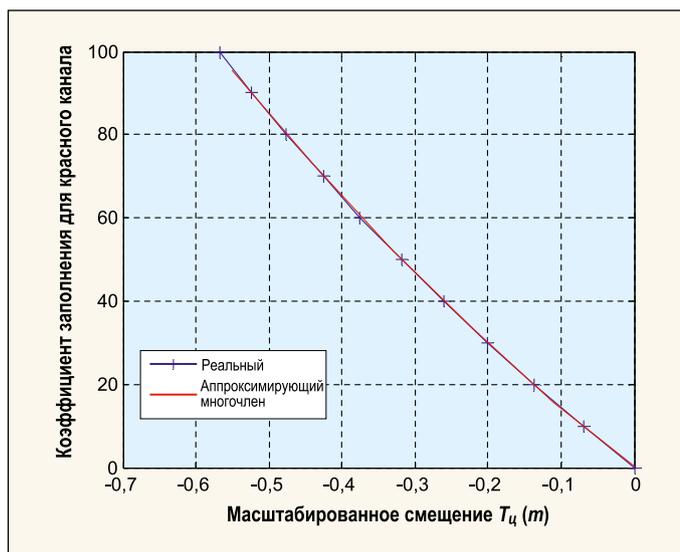


Рис. 12. Связь между масштабированным смещением T_c и коэффициентом заполнения для красного канала



Регистр $TCCR0$ управления таймером/счётчиком $Timer0$ микроконтроллера $ATmega32A$ используется для задания различных режимов

работы и выбора частоты. Регистр $OCR0$ используется для задания коэффициента заполнения генерируемого сигнала посредством срав-

нения данных в регистрах $OCR0$ и $TCNT0$.

Частоту генерируемого сигнала $F_{generated\ wave}$ можно рассчитать при помощи уравнения (8) [10]:

$$F_{generated\ wave} = \frac{F_{oscillator}}{256 \cdot N}, \quad (8)$$

где N – предварительно заданный масштабный множитель, который может быть равен 1, 8, 64, 256 или 1024 (было выбрано $N = 256$); $F_{oscillator} = 16$ МГц – частота генератора.

Таким образом, частота генерируемого сигнала будет равна 244,14 Гц.

Теперь можно определить коэффициент заполнения генерируемого сигнала [10]:

$$\begin{aligned} \text{Коэффициент заполнения} &= \\ &= \frac{OCR0 + 1}{256} \cdot 100, \quad (9) \end{aligned}$$

Параметр $OCR0$ может меняться в пределах от 0 до 255. Значение $OCR0$ можно задать при помощи клавиатуры в соответствии с нужным процентным составом $RGBW$ излучения. Для удобства пользователя, выраженные в процентах коэффициенты заполнения, соответствующие разным цепочкам $RGBW$ СД, выводятся на ЖК дисплей. То же самое можно повторить для $Timer1$ и $Timer2$.

Коэффициенты заполнения для цепочек $RGBW$ СД могут быть заданы посредством занесения при помощи клавиатуры соответствующих значений в регистры $OCR0$, $OCR1A$, $OCR1B$ и $OCR2$ соответственно.

Зависимости $T_{ц}$ от коэффициентов заполнения для зелёного и красного каналов СД

№ п/п	Коэффициент заполнения для зелёного/красного канала, %	$T_{ц}$ при добавлении излучения зелёного СД, К	$T_{ц}$ при добавлении излучения красного СД, К
1	0	3268	3268
2	10	3673	3198
3	20	4025	3132
4	30	4192	3067
5	40	4350	3008
6	50	4628	2950
7	60	4887	2893
8	70	5316	2842
9	80	5502	2791
10	90	5665	2745
11	100	5813	2700

4.3. Клавиатура и ЖК дисплей

Клавиатура используется для изменения коэффициентов заполнения для разных каналов в соответствии с требуемым составом смешанного излучения.

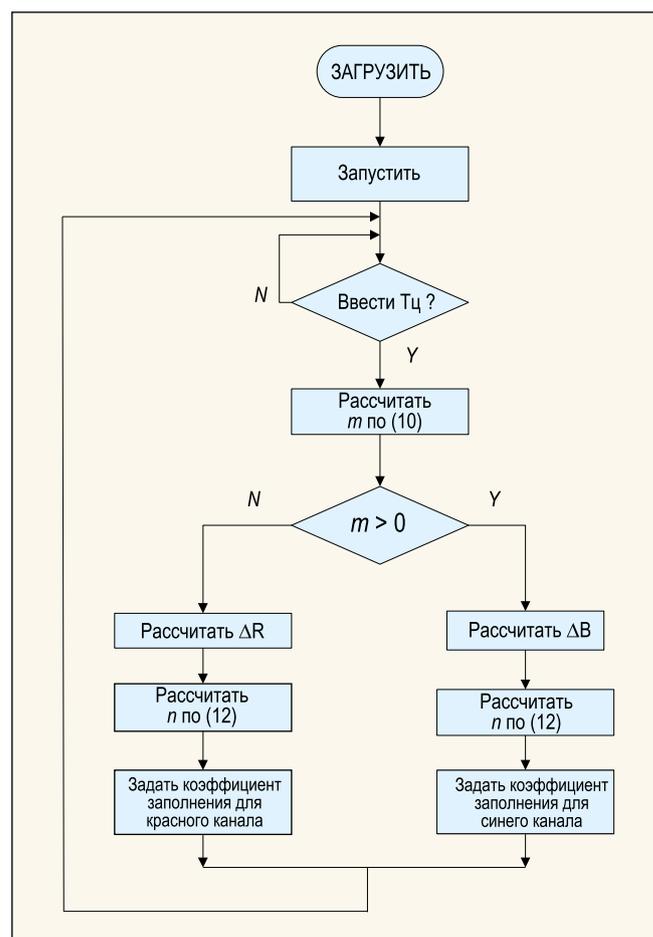
Расположение выводов для подключения к микроконтроллеру ЖК дисплея, клавиатуры и сигнала светорегулирования показано на рис. 8.

Для демонстрации параметров светорегулирования (т.е. процентного содержания компонентов в смеси) используется ЖК модуль *JHD162A*, способный демонстрировать 16 знаков и 2 строки [12]. Программа сопряжения клавиатуры написана таким образом, чтобы ограничить «дребезг» контактов и многократное нажатие клавиш клавиатуры.

5. Результаты экспериментов

Измерение $T_{ц}$ осуществлялось при изменении интенсивностей излучения красных, зелёных и синих СД по отношению к интенсивности излучения белых СД. $T_{ц}$ излучения светодиода *RGBW* измерялась при помощи прибора *Konica-Minolta CL200A Chroma Meter*. Эксперименты проводились в не имеющей окон комнате с окрашенными тёмной краской стенами, принадлежащей электротехническому факультету Университета Джадавпур, причём измерительный прибор располагался под *RGBW* источником света на расстоянии 1 м.

Рис. 13. Блок-схема алгоритма получения требуемого значения $T_{ц}$



Экспериментальная установка показана на рис. 9.

Так как $T_{ц}$ СД тёпло-белого света не сильно изменяется при светорегулировании в интервале 0–100 %, то показания снимали при 100 % яркости этих СД, что, к тому же, приводит к увели-

чению уровня освещённости. Другие уровни освещённости можно обеспечить, меняя коэффициент заполнения для белого канала. $T_{ц}$ измерялась при не превышающем 70 % коэффициенте заполнения для синего канала, так как при большем значении этого ко-

Таблица 4

Измеренные значения $T_{ц}$

№ п/п	Заданная $T_{ц}$, К	Измеренная $T_{ц}$, К	Ошибка, К
1	2700	2718	-18
2	3000	3011	-11
3	3500	3493	7
4	4000	3946	54
5	4500	4470	30
6	5000	5022	-22
7	5500	5601	-101
8	6000	6114	-114
9	6500	6620	-120
10	7000	7039	-39
11	7500	7370	130
12	8000	7745	255
13	8500	8170	330
14	9000	8656	344
15	9500	9433	67

эффицента заполнения $T_{ц}$ нельзя измерить при помощи *Konica-Minolta CL200A Chroma Meter* из-за большой синей составляющей. Зависимость измеренного значения $T_{ц}$ от коэффициента заполнения для синего канала представлена в табл. 2.

На основе табл. 2 можно автоматизировать процесс получения белого цвета с заданной $T_{ц}$. Для этого вводится новая переменная m , характеризующая масштабированное смещение $T_{ц}$:

$$m = (\theta(\Delta_B) - \theta(0)) / 1000, \quad (10)$$

где $\theta(\Delta_B) - T_{ц}$ излучения совокупности белых и синих СД при равном Δ_B коэффициенте заполнения для синего канала.

Теперь можно построить график зависимости Δ_B от m и при помощи *MATLAB®* аппроксимировать его кубическим многочленом (рис. 10):

$$\Delta_B = 0,4132 \cdot m^3 - 5,8318 \cdot m^2 + 31,0856 \cdot m + 1,8145. \quad (11)$$

Увеличивать порядок многочлена не стали по двум причинам: во-первых, это не приводит к увеличению точности аппроксимации во всём диапазоне изменения m , и во-вторых, это увеличивает продолжительность

проведения расчётов по приведённой ниже методике.

Регистры выбора коэффициента заполнения ШИМ-сигнала *OCR0*, *OCR1A*, *OCR1B* и *OCR2* микроконтроллера *Atmega32A* представляют собой 8-битовые регистры. Так что диапазон светорегулирования 0–100 % соответствует изменению содержимого регистра в интервале 0–255.

Содержащееся в регистре значение n можно рассчитать по формуле:

$$n = 2,55 \cdot \Delta_B, \quad (12)$$

входящий в которую коэффициент заполнения Δ_B рассчитывают по (11).

Ниже описан предлагаемый алгоритм выбора коэффициента заполнения, обеспечивающего получение требуемого значения $T_{ц}$.

Шаг 1: задайте требуемое значение $T_{ц}$ в интервале 3230–9723 К.

Шаг 2: при помощи уравнения (10) рассчитайте значение m .

Шаг 3: при помощи уравнения (11) рассчитайте значение Δ_B .

Шаг 4: при помощи уравнения (12) рассчитайте значение n .

Шаг 5: для получения требуемого значения $T_{ц}$ занесите полученное

значение n в 8-битовый регистр *OCR2* микроконтроллера *Atmega32A*.

Например, для получения $T_{ц} = 4100$ К при помощи тепло-белых и синих СД, коэффициент заполнения для синего канала должен быть равен 25 %, а содержащееся в регистре *OCR2* значение должно быть, соответственно, равно 64.

Этот процесс можно повторить для красного и зелёного каналов. Измеренные значения $T_{ц}$, полученные при смешивании излучения тепло-белого и зелёного и тепло-белого и красного излучения, лежали, соответственно, в интервалах 3268–5831 и 3268–2700 К при изменении коэффициентов заполнения для зелёного и красного каналов от 0 до 100 %. Зависимости $T_{ц}$ от коэффициентов заполнения для зелёного и красного каналов приведены в табл. 3.

Аппроксимирующие многочлены для зелёного (Δ_G) и красного (Δ_R) каналов имеют вид:

$$\Delta_G = 2,2750 \cdot m^3 - 0,4693 \cdot m^2 + 25,7082 \cdot m - 0,1606, \quad (13)$$

$$\Delta_R = 75,2395 \cdot m^2 - 132 \cdot m + 0,3191. \quad (14)$$

Эти полученные при помощи *MATLAB®* аппроксимирующие многочлены отображены графически на рис. 11 и 12.

Из данных, приведённых в табл. 2 и 3, следует, что для получения большего, чем у тепло-белого СД, значения $T_{ц}$ достаточно добавить излучение только синего СД, тогда как для получения меньшего, чем у тепло-белого СД, значения $T_{ц}$ можно использовать красный СД. Для автоматизации этого процесса разработан соответствующий алгоритм, блок-схема которого приведена на рис. 13.

Значения $T_{ц}$ были заданы при помощи клавиатуры с интервалом 500 К и измерены при помощи *Konica Minolta CL200A Chroma Meter* (табл. 4). Как следует из табл. 4, максимальные отклонения от заданных значений $T_{ц}$ при добавлении излучения красных и синих СД составили, соответственно, 18 и 344 К. Предложенный алгоритм автоматически выбирает синие СД для получения более высоких, чем у тепло-белых СД, значений $T_{ц}$ и красные СД для получения более низких значений $T_{ц}$.

6. Заключение

Показано, что для изменения $T_{\text{ц}}$ в интервале 2700–9723 К достаточно только тёпло-белых, красных и синих СД. Для получения $T_{\text{ц}}$ в ограниченном интервале 3268–5813 К можно использовать тёпло-белые и зелёные СД. Так что для имитации естественного света вместо $RGBW$ СД можно использовать RBW СД, что приводит к уменьшению суммарной стоимости СД. Следует отметить, что освещённость на рабочей поверхности в данной работе не рассматривалась. В настоящее время проводятся работы по одновременному выбору $T_{\text{ц}}$ и освещённости при использовании осветительных приборов аналогичного типа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kim, J.K., Schubert, E.F. Transcending the replacement paradigm of a solid-state lighting // *Opt. Express*. – 2008. – Vol. 16, No. 26. – P. 21835–21842.
2. Protzman, J.B., Houser, K.W. LEDs for general illumination: the state of the science // *LEUKOS*. – 2006. – Vol. 3, No.2. – P. 121–142
3. Gilman, J.M., Miller, M.E., Grimaila, M.R. A simplified control system for a daylight-matched LED lamp // *Lighting Res. & Technol.* – 2013. – Vol. 45, No. 5. – P. 614–629.
4. Lin, K. – C., Lin, C. – S. The study of a novel control method of the mood lighting emulator // *Optics Communications Elsevier*. – 2015. – No. 350. – P. 71–76.
5. Buso, S., Spiazzi, G. White light solid state lamp with luminance and color temperature control // *Power Electronics Conference (COBEP), Brazilian, 2011*. – P. 837–843.
6. Irving, B.T., Jovanović, M.M. Analysis and Design of Self-Oscillating Flyback Converter // *APEC17th Annual. Con. IEEE.*, 2002. – Vol. 2. – P. 897–903.
7. Bullough, J.D., Hickcox, K., Sweater, K., Klein, T.R., Narendran, N. Effects of flicker characteristics from solid-state lighting on detection, acceptability and comfort // *Lighting Res. & Technol.* – 2011. – Vol. 43, No. 2. – P. 337–348.
8. Wu, C. – C., Hu, N. – C., Chen, J. – N., Chang, H. – I. Parameterised LED current regulator for pulse width modulation switch delay for accurate color mixing in multi-LED light sources // *Lighting Res. & Technol.* – 2014. – Vol. 46, No. 2. – P. 171–186.
9. 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.* – 2005. – No. 5941. – P. 291–299.

10. 2015. Atmel ATmega32A [DATA-SHEET]. <<http://www.atmel.com/images/atmel-8155-8-bit-microcontroller-avr-atmega32a-datasheet.pdf>> Accessed 2015 December 11.

11. 05/2014. Atmel Studio 6.2 [RELEASE NOTES]. <http://www.atmel.com/images/as-studio6_2_1153-readme.pdf> Accessed 2016 January 23.

12. JHD162ASERIES datasheet <<http://pdf1.alldatasheet.com/datasheetpdf/view/127934/ETC1/JHD162A.html>> Accessed 2016 January 23.

13. Golder, S., Mazumdar, S., Ray, K. A high efficiency DC to DC boost converter for white LED based lighting systems. An energy-efficient, cost-effective approach for rural application // *Light & Engineering*. – 2007. – Vol. 15, No. 2. – P. 53–58.

14. Гольдер С., Мазумдар С., Рэй К. Светильник с белыми светодиодами и высокоэффективным повышающим преобразователем постоянного тока // *Светотехника*. – 2007. – № 2. – С. 38–41.

15. Malik, R., Saha, S., Mazumdar, S. Development of Discrete Component based LED Driver with RGB PWM dimming // *Proc. of LUX Pacifica 2015, Kolkata, 27–29 November*. – P. 635–641.



Сасвати Мазумдар (Saswati Mazumdar),

Ph.D. Профессор электротехнического факультета Университета Джадавпур, Индия, возглавляла Научно-техническую

и дизайнерскую светотехническую школу Университета Джадавпур (2006–2014 гг.) и Комиссию по образованию Общества инженеров-светотехников Индии. Имеет 29-летний опыт исследований и преподавания в области светотехники



Раджиб Малик (Rajib Malik),

М.Е. Аспирант электротехнического факультета Университета Джадавпур. Область научных интересов: интеллектуальные системы освещения

на солнечных батареях, электронные преобразователи для светотехники и управление цветом освещения

Институт им. Фраунгофера и компания Sefar разработали гибкий ОСД большой площади

Институт органической электроники, электронно-лучевой и плазменной техники им. Фраунгофера (*Fraunhofer Institute for Organic Electronics, Electron Beam and Plasma Technology FEP*) и компания Sefar AG разработали гибкий органический СД (ОСД) большой площади, изготавливаемый методом печати на непрерывной ленте-подложке, перематываемой с одного ролика на другой (метод «R2R»).



ОСД большой площади привлекательны для освещения многих жилых помещений, архитектурных объектов и автотранспортных средств. Однако проблемы с энергоэффективностью, сроком службы и стоимостью производства делают такое освещение слишком дорогим для массового применения.

Ранее компания Sefar разработала высокоэлектропроводные, прозрачные и гибкие электродные подложки, которые позволяют создавать равномерно светящиеся поверхности большой площади. И *Fraunhofer FEP* продемонстрировал соответствующий ОСД большой площади, изготовленный методом печатания схем на непрерывной ленте-подложке, перематываемой с одного ролика на другой.

Новая электродная подложка «SEFAR TCS Planar» имеет коэффициент пропускания выше 87%, её чрезвычайно высокая электропроводность обусловлена наличием встроенных металлических проводников, диаметр которых в настоящее время равен 40 мкм. Эти проводники уменьшают омические потери в электродной подложке. Кроме того, по мнению компании Sefar, такое уменьшение способствует созданию светотехнических изделий, имеющих большую площадь и более однородных по сравнению с обычными подложками (из чистого оксида индия и олова и т.п.). К тому же, встроенные металлические проводники более устойчивы к изгибу, чем нанесённые на плёнку толстые слои оксида индия и олова.

Sefar смогла решить проблемы, связанные с необходимостью сделать поверхность максимально гладкой в условиях, когда металлические проводники появляются на поверхности в качестве электрических контактов ОСД.

Штефан Могк, руководитель отделения печати органических материалов на непрерывной ленте: «Мы изготавливаем ОСД в вакууме методом «R2R» на подложках «SEFAR TCS Planar» с использованием специально разработанного процесса сушки и нанесения запирающего слоя. В результате мы наносим ОСД на ленту длиной 30 м и шириной 30 см, причём площадь ОСД достигает 250 см²».

solidstatelighting.net
30.06.2017