

УДК 681.511.22, 535.66

Коррекция ошибок цвета, вызванных взаимной индукцией в импульсных цепях питания светодиодных мультиспектральных осветителей

Арапова С. П. *, Арапов С. Ю., Москвичёв С. А., Дубинин И. С., Суворова Ю. Л.

*Уральский федеральный университет,
ул. Мира, 32, R041, Екатеринбург, Россия, 620002*

Аннотация. Экспериментальным путём установлено что индукционное взаимодействие цепей питания светодиодов, возникающее при применении ШИМ-регулирующего, может оказывать существенное влияние на реальное значение импульсного тока и яркость светодиодов. Это приводит к колориметрическим ошибкам. Предложен и опробован простой метод коррекции значений уровней ШИМ снижающий отклонение цвета. Метод основан на спектрофотометрическом анализе смешанного излучения компонентов. Метод актуален для таких популярных мультиспектральных излучателей как светодиодные ленты RGB и RGBW, в которых невозможно устранить индукционные наводки за счёт пространственно-геометрической оптимизации цепей питания.

Ключевые слова: СИД, осветитель, ШИМ-регулирование, цветовое отклонение, спектр, RGBW, цветовое различие.

Correction of color errors caused by mutual induction in pulsed power circuits of LED multispectral illuminators

Arapova S.P. *, Arapov S.Yu., Moskvichev S.A., Dubinin, I.S., Suvorova Y.L.

Ural Federal University, Mira, 32, R041, Ekaterinburg, Russia, 620002

Abstract. It was established experimentally that the induction interaction of the power supply circuits of the LEDs, there are concerned in the application of PWM-regulation may have a significant impact on the actual value of the pulse current and the brightness of the LEDs. This leads to

colorimetric errors. Proposed and tested a simple method of correction of the level values of PWM reduces the color deviation. The method is based on spectrophotometric analysis of mixed radiation components. The method is relevant to such popular multispectral slocatelay as led strip RGB and RGBW, which is impossible to eliminate induction interference due to spatial-geometric optimization of power circuits.

Keywords: LED, illuminator, PWM control, color deviation, spectra, RGBW, RGB, the color difference.

Введение

В работе [1] рассмотрен метод управления спектром источника света (ИС) на основе хроматических RGBW светоизлучающих диодов (СИД). Яркости СИД регулируются широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) электропитания. Достоинство метода — управление осветителем в комфортных для человека измерениях: яркость освещения, оттенок («тёплый – холодный», Ткц), насыщенность цвета освещённых предметов (индекс цветопередачи Ra). Насыщенность цвета варьируется за счёт эффекта кларификации [2, 3]. Применение этого подхода в промышленных и бытовых ИС даёт наблюдателю возможность самостоятельно определять комфортный для себя уровень насыщенности цветов [3, 4] в окружающей обстановке.

В процессе экспериментальной проверки метода [1] обнаружено визуально-различимое изменение цветности освещения при регулировке Ra. Этот факт предположительно объясняется явлениями, описанными в [5]. Отмечено, что стандартные методы оценки по измеренным спектрам показывают теоретическую неразличимость хроматического сдвига освещения, что не соответствует действительности.

Таким образом цель настоящей работы — установление причин перечисленных несоответствий и максимально возможное их устранение.

1. Взаимная индукция в импульсных цепях питания СИД

Проверка корректности функционирования элементов экспериментального стенда, описанного в работе [1], выявила, что наиболее вероятной причиной цветовых отклонений является взаимная индукция в импульсных цепях питания СИД. На рис. 1 представлены осциллограммы напряжений между выводами стока и истока управляющих транзисторов, и можно наблюдать взаимное влияние каналов друг на друга.

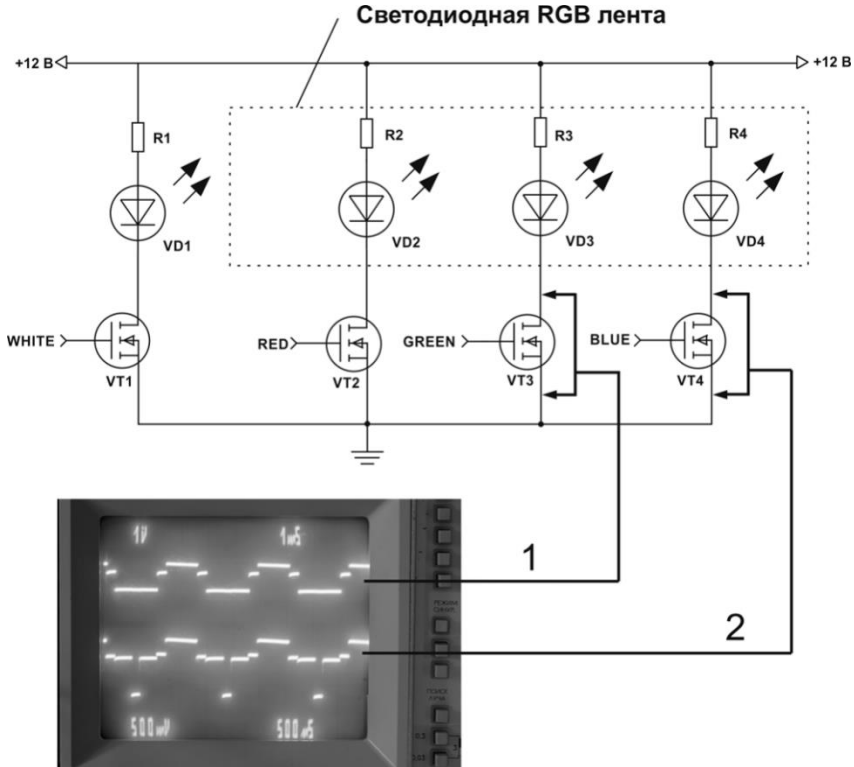


Рис. 1. Электрическая схема питания светодиодных лент White и RGB: 1 — осциллограммы напряжений сток-исток на управляющем транзисторном ключе канала Green; 2 — осциллограммы напряжений сток-исток на управляющем транзисторном ключе канала Blue

Осциллограммы напряжений исток-сток на управляющих транзисторных ключах сильно отличаются от ожидаемых прямоугольных импульсов, при полностью корректных осциллограммах напряжений на затворах. Устранение таких искажений конструктивными решениями возможно далеко не во всех случаях. Особенно это актуально для подсветки, выполненной из параллельных светодиодных лент, как, например, у лайтбоксов с тыльной подсветкой. На рис. 2. Представлен световой короб (лайтбокс) со снятой передней панелью. Видно, что светодиодные ленты приклеены к задней стенке вплотную друг к другу, это может дополнительно усилить взаимные индуктивные наводки, возникающие в близко расположенных проводниках внутри ленты.

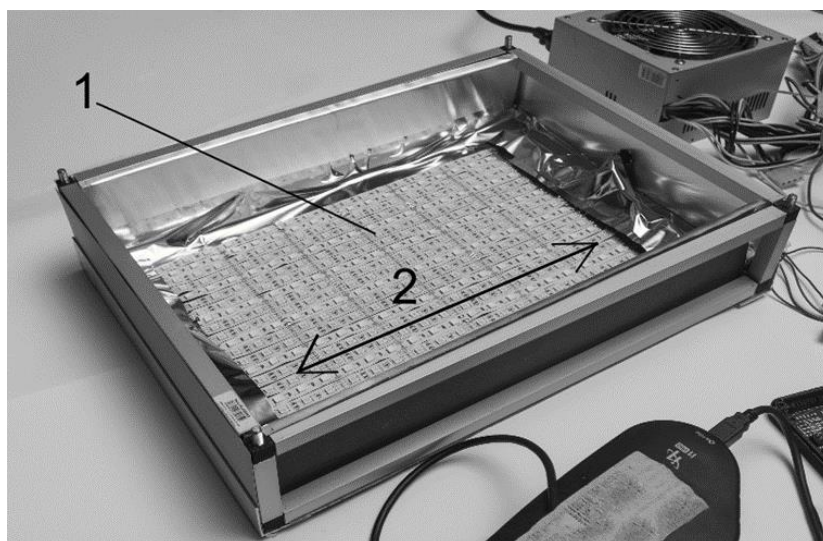


Рис. 2. Лайтбокс со снятой передней панелью: 1 — светодиодные ленты, приклеенные к задней стенке лайтбокса; 2 — направление светодиодных лент

Данная конструкция, как и у ИС [1] не позволяет полноценно устранить взаимную индукцию каналов, таким образом задача настоящей работы — уменьшение её влияния на цветность освещения внесением изменений в систему управления яркостями СИД.

2. Способ коррекции цветового сдвига

В [1] предполагается, что управление R_a осуществляется изменением доли спектра s_w белого светодиода в общем спектре s_{led} . Задача заключается в определении таких нормированных яркостей СИД R, G и B, чтобы координаты цвета ИС (X, Y, Z) оставались при этом постоянными. Целевым спектром s_D для определения цветности выбирался осветитель серии D. По аналогии с [1] все спектры рассматриваются как вектора-столбцы.

Спектр ИС лежит в подпространстве с базисом из спектров компонентов s_r, s_g, s_b, s_w :

$$s_{led} = a_1 s_r + a_2 s_g + a_3 s_b + a_4 s_w = S_{rgbw} a, \quad (1)$$

где $S_{rgbw} = [s_r s_g s_b s_w]$ — матрица из перечисленных векторов-столбцов, a_i — искомые значения нормированных яркостей СИД RGBW, изменяющиеся в пределах от 0 до 1. Если учесть (1) и обозначить как $X = [\bar{x} \bar{y} \bar{z}]$ матрицу, столбцы

которой — спектральные значения функций сопоставления цвета (ФСЦ) стандартного наблюдателя системы XYZ (МКО 1964), то задача сводится к решению уравнения:

$$X^T(S_{rgbw}a - s_D) = 0, \quad (2)$$

означающего, что разность векторов s_{led} и s_D должна быть ортогональна ФСЦ наблюдателя, то есть не восприниматься им. Решение уравнения (2) в работе [1] найдено в виде:

$$a = B_{rgbw}k = B_{rgbw}[k_1k_2]^T, \quad (3)$$

где B_{rgbw} — вычисляемая в процессе решения матрица, k_1 и k_2 — параметры, управляющие R_a и общей яркостью освещения.

Предлагаемый способ коррекции искажений цвета построен на предположении, что экспериментально наблюдаемые значения яркостей b линейно зависят от яркостей a , заданных ШИМ-контроллером:

$$b = Ca, \quad (4)$$

где C — корректирующая матрица (4×4) . Тогда, вместо изначального уравнения (2), следует решать скорректированное:

$$X^T(S_{rgbw}Ca - s_D) = 0. \quad (5)$$

Остальное решение полностью аналогично работе [1].

Корректирующая матрица определялась из экспериментальных данных:

$$C = BA^+ = [b_1 \dots b_N][a_1 \dots a_N]^+, \quad (6)$$

где $(...)^+$ — операция псевдообращения матрицы Мура-Пенроуза, BA — матрицы $(4 \times N)$, составленные из столбцов соответствующих друг другу фактических b_i и заданных a_i яркостей. N — количество экспериментов. Каждый эксперимент состоял из задания контроллером яркостей a_i , полученных с помощью (3), измерения спектра $s_i^{\text{экс}}$ и расчёта b_i :

$$b_i = S_{rgbw}^+ s_i^{\text{экс}}. \quad (7)$$

Всего было проведено 154 эксперимента.

3. Результаты

Результаты описанной процедуры коррекции задаваемых ШИМ-контроллеров уровней яркости представлены на рис. 1. По данным измерений, хроматический сдвиг от целевого значения после коррекции в среднем становится меньше. Однако, большой разброс экспериментальных значений вынуждает считать это улучшение незначительным.

На рис. 1 также видно, что большинство измеренных значений хроматического сдвига лежат ниже общепринятого порога различимости $\Delta E_{u'v'} = 0,0038$.

Результаты визуального наблюдения применения коррекции (5), как и в экспериментах [1], существенно отличаются от приборной оценки. Субъективно-воспринимаемый эффект от коррекции стабилен и значительно заметнее чем можно представить по рис. 3.

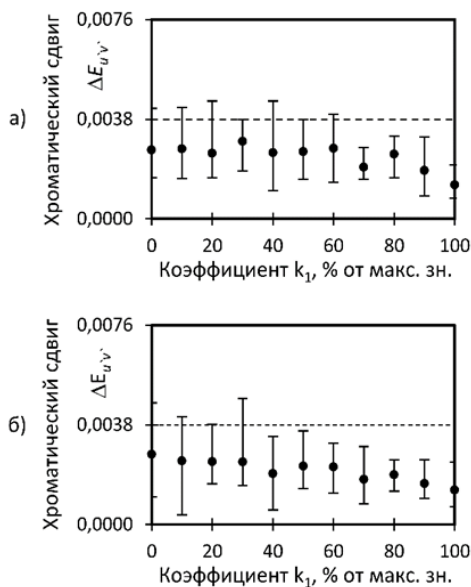


Рис. 3. Хроматический сдвиг в зависимости от k_1 в (3):
а) до коррекции; б) после коррекции

Увеличение k_1 соответствует увеличению насыщенности (уменьшению R_a). Точками показаны средние значения, разброс соответствует мин. и макс. наблюдавшимся значениям.

Уравнение (4) даёт наиболее общее решение проблемы, работоспособное во всём диапазоне возможных значений нормированных яркостей — от 0 до 1. Возможно более эффективной и точной будет коррекция для небольшого диапазона параметров (яркости, цветности и R_a), основанная на несколько другом выражении:

$$b = Ca + l, \quad (8)$$

где l — дополнительный параметр, задающий смещение относительно нулевой точки. Естественно, что в этом случае нулевые значения нормированных яркостей будут недостижимы.

Выводы

Представлен простой линейный метод коррекции искажений цвета вызванных взаимной индукцией в импульсных цепях питания СИД RGBW. Коррекция эффективна.

Расхождение визуальной оценки результата коррекции с объективными колориметрическими показателями встречалось в подобных экспериментах и раньше [1, 5]. Дополнительное исследование причин обнаруженных расхождений возможно в экспериментах с ИС, описанным в [6], конструкция которого предполагает минимизацию индуктивного взаимодействия каналов.

Список литературы

1. Арапова С. П., Арапов С. Ю., Суворова Ю. Л. Метод управления индексом цветопередачи для светодиодных модулей RGBW // Информация: передача, обработка, восприятие: материалы международной научно-практической конференции (Екатеринбург, УрФУ, 12–13 января 2016 г.). Екатеринбург: УрФУ, 2016. С. 91–103.
2. Автоматизированный просмотровый комплекс для исследований цветопередачи при RGB-светодиодном освещении / С. П. Арапова [и др.] // Известия высших учебных заведений. Проблемы полиграфии и издательского дела. 2015. № 6. С. 3–11.
3. Лебеждова С. М., Лузина Ю. А. Исследование эффекта «приукрашивания» цвета разносpectralными излучениями // Светотехника. 2016. № 1. С. 25–30.
4. Зрительный эксперимент по определению предпочтительной насыщенности цвета / К. Миллер [и др.] // Светотехника. 2015. № 5. С. 12–18.
5. Шанда Я., Шуты П. Улучшенное описание метамерного излучения светодиодных кластеров // Светотехника / пер. Е. И. Розовский. 2009. № 6. С. 8–12.
6. Арапова С. П., Арапов С. Ю., Мезенцева С. Г. Управляемый мультиспектральный светодиодный кластер для репродукционных исследований // Информация: передача, обработка, восприятие: материалы международной научно-практической конференции (Екатеринбург, УрФУ, 12–13 января 2016 г.). Екатеринбург: УрФУ, 2016. С. 104–111.