

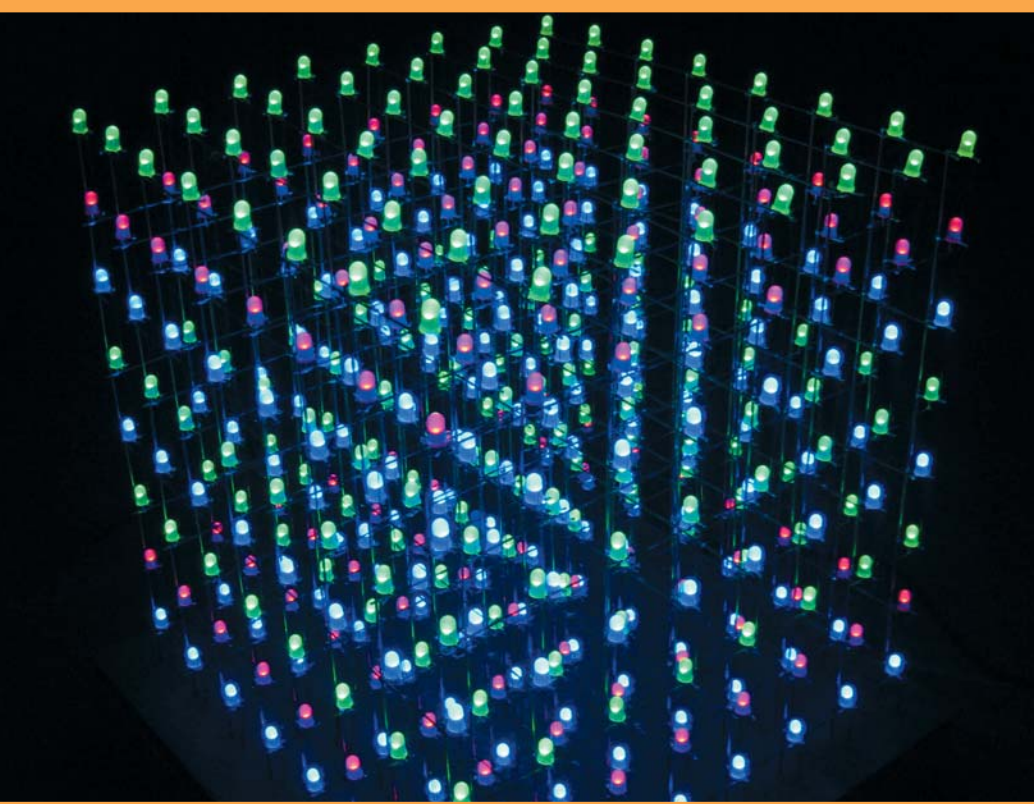
Томас Нимз (Thomas Nimz) | Фредрик Хайлер (Fredrik Hailer) |
 Кевин Янсен (Kevin Jensen) | Перевод и комментарии: Владимир Рентюк

Сенсоры и обратная связь в многоцветных светодиодных системах

В светодиодных системах освещения, особенно когда речь идет о системах на основе технологии RGB, получение стабильных и устойчивых параметров освещения, аналогичных спектру излучения «абсолютно черного тела», — весьма непростая задача. Использование в таких системах обратной связи для управления параметрами света является хотя и дорогим, но наиболее эффективным решением. Однако здесь возникает проблема выбора типа датчика, который наиболее полно подходит для наилучшего использования в каждом конкретном приложении. Авторы статьи — специалисты из компании MAZeT (ФРГ) — обсуждают различные варианты решения данной проблемы, основываясь на собственных научных исследованиях по светодиодным системам с четырьмя или более светодиодами. Кроме решения основной задачи, авторы затрагивают вспомогательные, но не менее важные моменты, такие как выполнение требований по индексу цветопередачи (Color Rendering Index, CRI).

Несмотря на неоспоримые преимущества светодиодов в целом, индустрия систем освещения сталкивается с трудностями поддержания стабильных и постоянных характеристик их светового потока. При необходимости объединения в излучателе светодиодов различного качества и от разных производителей, обычной процедурой до недавнего времени была отсортировка светодиодов по спектральным и иным характеристикам. Благодаря этому достигалось обеспечение стабильной светоотдачи. Для таких приложений, как, например, медицина, важно не только выполнение требований по точности передачи спектра цветового излучения относительно излучения абсолютно черного тела, но также его стабильность, в том числе и в долговременной перспективе. Посредством реализации решений управления цветом с обратной оптической связью можно напрямую управлять условиями освещения с колориметрическими характеристиками, близкими к кривой цветных температур излучения абсолютно черного тела.

В настоящее время для реализации управления через контур обратной связи наиболее подходящим решением является применение специальных датчиков или детекторов цвета — цветных сенсоров. Они проводят измерения фактического спектра излучения и настраивают выходные токи светодиодных драйверов на соответствующие заданному спектру значения. Бесспорно, наиболее точными являются измерения спектральных характеристик, проведенные с помощью спектрометра, тем не менее эта технология зачастую оказывается слишком медленной и весьма дорогостоящей для удовлетворения широких потребностей рынка. Таким образом, цветные сенсоры являются наиболее экономичным решением как во время начальной фазы работы над созданием прототипа, так и непосредственно в ходе всего проведения ОКР, а спектрометры используются лишь для определения эталонных значений. Рынок цветных сенсоров предлагает технологии с различными спектральными свойствами. Наиболее распространенными являются традиционные RGB-сенсоры и сенсоры истинного цвета, их обычно называют True Color сенсоры, которые специально нормированы по восприятию



цвета человеческим глазом. Такие сенсоры основаны на стандарте CIE 1931¹, нормирующем функции цветового соответствия стандартного колориметрического наблюдателя в диапазоне длин волн 380–780 нм.

Авторами предлагается проведенная ими оценка использования цветковых сенсоров, основанная на изучении поведения прототипа системы освещения, состоящей из нескольких светодиодов с различными спектральными характеристиками. Для этого ими из двух групп были отобраны десять различных светодиодных источников: узкоспектральные светодиоды с излучаемым спектром в красной, зеленой и синей областях; широко-спектральные светодиоды со сложными «белыми» спектрами — теплый белый, холодный белый и нейтральный белый. В ходе этих исследований моделировался предварительный отбор возможных для применения цветковых сенсоров. Цель исследований состояла в том, чтобы добиться наилучшего качества передачи исследуемого спектра, основанного на максимальном приближении положения его коррелированной цветовой температуры к графику цветковых температур абсолютно черного тела. Таким образом, нами будут рассмотрены и проведены сравнения цветковых сенсоров типов RGB и True Color. Впоследствии нам нужно будет ответить на следующий вопрос: можно ли улучшить общее восприятие света, основанное на индексе цветопередачи, путем внедрения интеллектуальных алгоритмов управления с обратной связью?

Зачем использовать управление с обратной связью

Общезвестно, что температура и старение вызывают сдвиг характеристик светодиодов. Наблюдение за поведением светодиодных систем первого поколения показало, что, в зависимости от наработки, не только яркость, но и характеристики цветопередачи имеют тенденцию к изменению. Рис. 1 демонстрирует изменения заданного спектра обычной RGB светодиодной системы, вызванные сдвигом спектральных характеристик отдельных светодиодов. В этом примере показано изменение физических свойств светодиодов в части изменения положения (смещения) одной цветовой

точки в зависимости от температуры и тока. В ходе тестирования температура приведенной в качестве примера светодиодной системы постепенно увеличивалась с +20 до +80 °C (68–176 °F).

Решения через измерение рабочей температуры иногда используются для установок необходимого тока и напряжения светодиодных драйверов. Этот метод является косвенным способом контроля заданного спектра. При его использовании система все же не имеет достаточной информации о фактическом спектре излучения. Эти результаты основаны на аппроксимации, а не на реальном определении цвета. А вот управление с оптической обратной связью, базирующееся на сенсорах, детектирующих цвет, с одной стороны, гарантирует, что имеется возможность достичь точно заданного значения цвета, а с другой — позволяет подключить опцию активного управления цветом. Например: если один светодиод в системе отказывает, эту ошибку можно обнаружить и непосредственно отреагировать на возникшие негативные побочные эффекты. Так, реакция системы на измерение потенциала на выходе измерителя фототока в ответ на отказ красного светодиода будет заключаться в увеличении уровня желтого цвета в спектре. Управление с использо-

ванием петли обратной связи позволяет реализовать много новых возможностей, которые направлены на повышение качества и увеличение времени эксплуатации светодиодных систем.

Система управления с обратной оптической связью

Светодиодные системы с управлением при помощи обратной оптической связи, упомянутые в настоящей статье, состоят из источника питания, драйвера светодиодов, микроконтроллера и цветкового сенсора (рис. 2). Их задача состоит в том, чтобы обычный пользователь не вникал в тонкости работы такой системы управления или в ее алгоритмы. Как правило, пользователь устанавливает только требуемые для него цветовые характеристики, например цветовую температуру или непосредственно необходимую ему цветовую точку. Система сама вычисляет первый светодиод в комбинации ее излучателей и начинает первый этап процесса управления светом. Далее цветовой сенсор измеряет заданные конкретные значения спектра излучения, а микроконтроллер сравнивает эти реальные значения цветовой температуры с назначенными. Если имеет место чрезмерное отклонение спектра от заданного значения, то используется специальный алгоритм коррекции

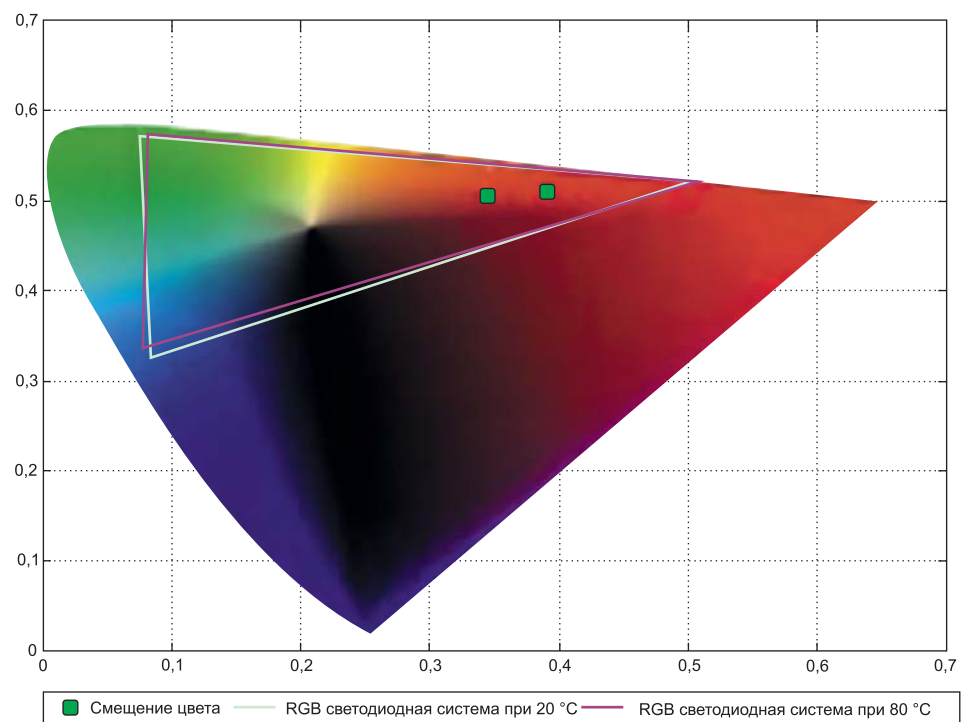


Рис. 1. Пример смещения цветов на основе системы RGB

¹ Имеется в виду стандарт, разработанный в 1931 г. Международной комиссией по освещению CIE (МКО), которая занимается фотометрическими стандартами.

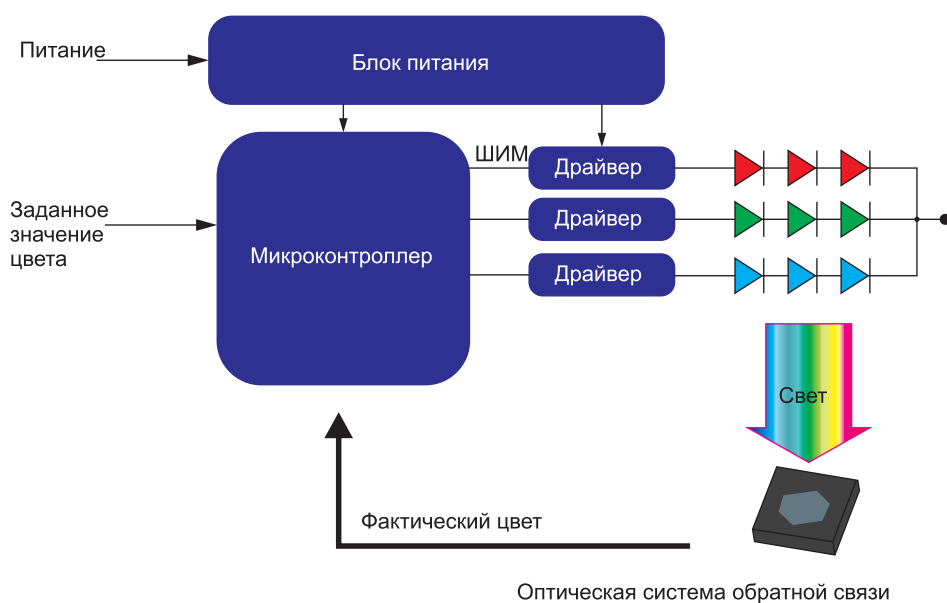


Рис. 2. Блок-схема системы освещения с управлением в виде оптической обратной связи

для соответствующего управления током и питанием светодиодов, который минимизирует эти выявленные отклонения. Таким же образом светодиодная система автоматически реагирует и на внешние воздействия. То есть она позволяет увеличить такую важную характеристику системы, как долговременная стабильность, или избежать негативного влияния температурного сдвига спектра без каких-либо видимых для пользователя изменений цветопередачи.

RGB или True Color сенсор?

Точность работы всей светодиодной системы во многом зависит от цветового сенсора, который осуществляет детектирование света. Система не может быть более точной или реагировать на отклонения быстрее, чем это делает ее основной компонент. Поэтому важно выбрать из доступных цветовых сенсоров такой, который соответствует именно конкретному применению. Как уже упоминалось выше, рынок предлагает в основном две

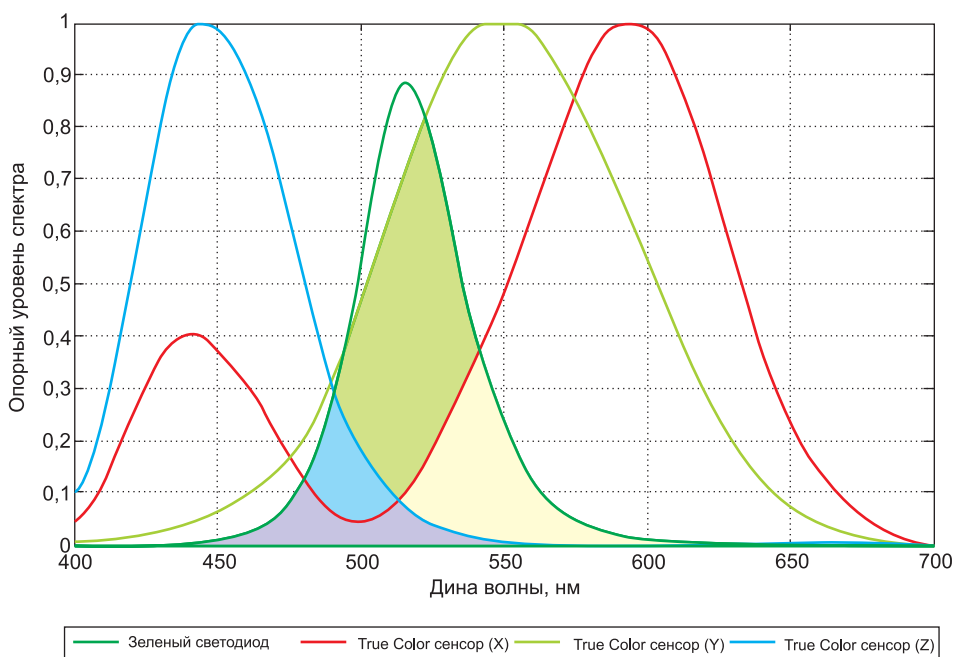


Рис. 3. Характеристика цветного сенсора типа True Color

разновидности таких цветовых сенсоров — RGB и True Color.

Сенсоры типа RGB имеют три отдельные характеристические кривые — по одной для красного, зеленого и синего цветов соответственно. Измеренные значения в формате RGB могут быть переданы через значения координат цветности X , Y и Z (рис. 3). Измеренные же цветовым сенсором типа True Color значения уже непосредственно соответствуют требованиям стандарта CIE 1931 и соответствующим значениям распределения трехцветных уровней. Особенностью сенсоров типа True Color является то, что их характеристические кривые соответствуют восприятию света человеческим глазом. Значения координат XYZ позволяют совершить преобразование для цветовой точки во всем пространстве цветового спектра.

Выбор оптимального цветового сенсора для данной статьи был выполнен после рассмотрения целого ряда различных моделей. Цель заключалась в том, чтобы вычислить значения коррелированных цветовых температур, расположенных вдоль кривой излучения абсолютно черного тела, с помощью RGB и True Color сенсоров. Для этого были использованы три светодиодные системы: первая — типа RGB (с красными, зелеными и синими светодиодами); вторая — типа RGB с дополнительным светодиодом холодного свечения, третья — из восьми различных светодиодов (табл. 1). Чтобы компенсировать и исключить начальные отклонения, потребовалась предварительная калибровка системы. Она была основана на измеренных координатах цветности встроенных светодиодов. Таким образом, были вычислены три калибровочные матрицы для каждого датчика. Калибровка проводилась при температуре $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$, в то время как измерения проводились уже при температуре $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$.

На следующем этапе был произведен расчет параметров 450 значений цветности вдоль кривой излучения абсолютно черного тела, который был выполнен для каждой светодиодной системы (напомним, финальные измерения проводились при температуре $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$). Впоследствии полученные данные использовались для генерации спектра и были измерены с помощью сенсора типа RGB, True Color сенсора и спектрометра. Результаты спектрометра в дальнейшем использовались в качестве эталонных опорных значений.

Таблица 1. Вариация цвета по кривой излучения абсолютно черного тела

Светодиодная система, тип	RGB (красный, зеленый, синий)		Красный, зеленый, синий и холодный белый		8 разных светодиодов	
	Макс.	Среднее	Макс.	Среднее	Макс.	Среднее
True Color сенсор	0,0021	0,0012	0,0072	0,0035	0,0088	0,0037
RGB сенсор	0,0210	0,0153	0,0512	0,0239	0,0360	0,0151

Примечание: $\Delta u'v'$ — цветовая разность измерения.

Результаты моделирования показывают, что отклонение при измерении спектра цветовым сенсором типа True Color было меньше, чем отклонения цвета через измерения сенсорами по технологии RGB. Общеизвестно, что человеческий глаз не может обнаружить цветовые отклонения меньше, чем $0,003 \Delta u'v'$. Измерения показали, что RGB-сенсоры не способны измерять значения цвета с необходимой точностью. Но если используется светодиодная система технологии RGB с цветовыми сенсорами True Color, то при стандартной калибровке предел $0,003 \Delta u'v'$ быстро достигается. Светодиодная система с большим количеством светодиодов, чем просто красный, зеленый и синий, дает более высокий уровень отклонения — это относится как к цветовым сенсорам RGB, так и к цветовым сенсорам типа True Color. Таким образом, в системе по технологии RGB с добавкой светодиодов холодно-белого спектра излучения максимальное значение $\Delta u'v'$ оказывается в два раза выше, чем у стандартной осветительной системы типа RGB. Однако через оптимизацию калибровки (которая описана выше) с использованием цветовых сенсоров True Color недостижение требуемого предела $0,003 \Delta u'v'$ все еще остается возможным. Моделирование показало, что только при использовании цветовых сенсоров True Color в приложениях, требующих высокого качества освещения, достигается наивысшая точность передачи цветового спектра (табл. 2).

Управление с использованием обратной связи

Системы с четырьмя и более различными светодиодами

В светодиодной системе, построенной по технологии RGB с использованием для целей вычисления контура обратной связи, имеются три входных параметра (цвет — например, по $L u'v'$) и три выходных параметра (регулировка путем широтно-импульсной модуляции тока RGB-светодиодов). Так что в этом случае всегда существует одно точное решение, которое можно определить с помощью линейного преобразования. А вот

для систем с более чем тремя различными светодиодами, например RGB и светодиодом со спектром теплый белый, уже возможны несколько решений. Это происходит из-за того, что такая система для целей вычисления состоит из трех входных параметров, но имеет четыре выходных для регулировки. Это приводит к большей детерминированности результатов вычислений. Таким образом, для одной цветовой точки могут быть вычислены различные комбинации для внесения управляющей корректировки режимами светодиодов, имеющими эквивалентный итоговый результат по формированию необходимой коррелированной цветовой температуры. Результат корректировки — это изменение спектра, который зависит от широтно-импульсной модуляции тока

каждого светодиода, а каждый такой спектр имеет свои собственные свойства. Для систем с использованием пяти или более светодиодов различного типа возможны совершенно различные комбинации в части особенностей построения их управления. Таким образом, найти оптимальное решение, не определяя дополнительные конкретные условия, оказывается весьма затруднительно.

Качество цвета зависит не только от выбранных светодиодов, но также и от соответствующего решения в части управления светодиодами в целом. Примеры, приведенные на рис. 4, показывают различия цветовосприятия по отношению к спектру освещения. Несмотря на то, что был использован один и тот же спектр излучения для тестирования, а именно — холодный белый оттенок

Таблица 2. Комбинация светодиодов для восприятия спектра по D65* (дневной рассеянный белый) под углом 10°

Красный	Зеленый	Синий	Холодный белый	Теплый белый	CRI**
14,4%	45,6%	25,1%	91,8%	82,0%	92,85
27,9%	53,9%	33,0%	59,6%	70,8%	80,90
36,7%	59,5%	40,0%	45,8%	70,3%	71,00
52,2%	69,1%	48,8%	32,7%	56,4%	56,80

Примечание: * — D65 — стандартный источник с CCT=6500 К, эквивалентный по спектральному составу рассеянному дневному свету по CIE; ** — CRI — индекс цветопередачи

Система освещения	Спектры излучения	Воспринимаемый цвет
Холодный белый D65 CRI: 100 (D65 — стандартный источник, эквивалентный дневному свету по CIE)		
Холодный белый RGB CRI: 90,9088		
Холодный белый RGB CRI: 71,4813		

Рис. 4. Цветовосприятие в различных системах освещения

для светодиодной системы RGB, результаты ясно показывают отклонения восприятия цвета в пределах видимого спектра при освещении с различными комбинациями светодиодов для одного значения цвета.

Задачей является определение наилучшей комбинации ШИМ-управления током с учетом таких вспомогательных факторов, как индекс цветопередачи (CRI) или уровень яркости. Алгоритм должен быть независимым от количества светодиодов, также должна быть предусмотрена возможность учитывать и физические свойства самих светодиодов.

Подходы к выбору решения

Наиболее простым алгоритмом является решение с использованием контрольной матрицы в системе обратной оптической связи. Такая матрица рассчитывается с использованием линейного преобразования. Входными параметрами являются данные от сенсоров, полученные от нескольких цветowych мишеней.

Как правило, для первоначального расчета используются заданные светодиодами цвета. Иногда результат может быть оптимизирован, если используются дополнительные комбинации нескольких светодиодов, например по значению распределения спектра возле кривой излучения абсолютно черного тела. Этот метод дает достаточно информации по таким вспомогательным параметрам, как оптимизированный индекс цветопередачи (CRI). Исходя из этого, ожидается, что качество спектров для некоторых значений цвета в области кривой цветowych температур, пропорциональных распределение спектра излучения абсолютно черного тела, является оптимальным. Это весьма удобно для того, чтобы найти наилучшие алгоритмы для обработки, которые учитывают выбранные вспомогательные условия.

Одним из решений является разделение цветового охвата или, как принято в компьютерной обработке изображений, цветовой гаммы светодиодной системы на множество небольших поддиапазонов. Каждый такой цветовой поддиапазон формируется при помощи трех угловых точек (координат). Каждая такая угловая точка соответствует цветовой точке с координатами цветности светодиода. Чем больше используется в системе светодиодов, тем больше цветowych поддиапазонов будет существовать. Если точка целевого цвета является частью поддиапазона, то ее светодиодные комбинации будут рассчитываться с использованием

простого линейного преобразования. Результатами являются различные комбинации для каждого отдельного поддиапазона. На втором этапе каждая комбинация будет сочетаться с предыдущими результатами, в зависимости от вспомогательных условий, и уже она будет использоваться в качестве расчетной базы. Например, так можно использовать один алгоритм и для объединения результатов измерений, и для того, чтобы гарантировать оптимальное значение индекса цветопередачи.

Полученный результат вычисления комбинации используется в качестве начальных значений в системе управления. Через эту комбинацию можно подойти к заданной цветовой точке. Внешние факторы, воздействующие на светодиодные системы, такие как температуры, потребление тока или эффекты, вызванные старением, также вызывают некоторые отклонения цвета в спектре передачи цветовой гаммы. Таким образом, для окончательного устранения сдвига спектра излучения будет необходимо провести еще один небольшой корректировочный расчет в системе управления.

Заключение

Моделирование и итоговые измерения показали, что если основной целью является долговременная стабильность цветопередачи, то для ее реализации необходимо использовать решения общей системы управления путем введения в нее оптической обратной связи. Результаты, полученные при сравнении RGB и True Color сенсоров, показали, что в большинстве случаев сенсоры на основе технологии RGB оказываются недостаточно точными, чтобы обеспечить оптимальные значения ввода параметров для должного регулирования цвета. А это, например, требуется для ряда медицинских приложений. Таким образом, чтобы достичь наилучшего качества освещения, необходимо сосредоточить свое внимание на следующих аспектах:

- правильный выбор сенсора для детектирования цвета для каждого конкретного применения (в приведенном тесте сенсоры технологии True Color оказались более предпочтительными);
- правильный выбор светодиодов в отношении их качественных характеристик, количества и с точки зрения общей экономической целесообразности;
- калибровка выбранных для конкретного применения датчиков;

- определение оптимального для данного приложения метода управления и алгоритма регулирования.

Возвращаясь к первоначальному вопросу об интеллектуальных алгоритмах управления с оптической обратной связью, направленных на улучшение общего восприятия на основе индекса цветопередачи (CRI), можно сказать, что качество цветопередачи можно улучшить не только за счет увеличения количества используемых светодиодов. Качество цветопередачи зависит также и от спектра, полученного при помощи различных светодиодных комбинаций. Используя алгоритмы управления с обратной оптической связью, оптимизированные с учетом соответствующих дополнительных условий (например, по CRI), можно также улучшить качество выпускаемой продукции, улучшить ее цветопередачу. При оценке этих аспектов в процессе разработки решения управления с обратной связью можно свести к минимуму необходимое количество светодиодных источников света в системе, что позволит с меньшими затратами достичь такого же или даже лучшего значения CRI. Другие варианты дадут возможность уменьшить общее количество выбранных светодиодных источников света, достигнув при этом требуемых значений выходных характеристик. Эти варианты управления через оптимизированные алгоритмы регулирования позволяют сократить расходы или адаптировать решения светодиодных систем освещения под требования стандартов из области внедрения так называемых зеленых технологий, например таких, как общеизвестный стандарт Energy Star, направленный на уменьшение общего потребления электроэнергии. ●

Оригинал статьи опубликован на сайте www.led-professional.com

Литература

1. Calibration of JENCOLOR sensors based on the example of LED light sources. Application note. MAZeT GmbH. 2012.
2. DIN-Taschenbuch 49, Farbmittel 1 – Pigmente, Füllstoffe, Farbstoffe DIN 5033-1 bis DIN 55929. Deutsches Institut Für Normung. 2000.
3. Friedhelm König, Die Charakterisierung von Farbsensoren, Logos Verlag Berlin, 2001
4. Franke Jahn, Grunert Krumbein, Sie and Stüpmann. Moderne Methoden der Farberkennung, TU Ilmenau / ZBS e.V., MAZeT GmbH, SilicANN Technologies, 49. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium / TU Ilmenau. 2004.