

набора выходных напряжений датчика. Например, белый цвет D65 конкретной яркости может задаваться следующим образом: $(V_R, V_G, V_B) = (2,0; 2,2; 1,9)$ В (рис. 6).

Обратимся к рис. 5 и предположим, что в качестве целевого выбран цвет D65. Система обратной связи будет периодически брать отсчеты выходных сигналов красного, зеленого и синего фотодатчиков (называемых в совокупности трехцветным фотодатчиком) и сравнивать измеренный цвет с целевым. Задача системы обратной связи — свести разницу между измеренным и целевым цветом (сигнал ошибки) к нулю.

Рис. 6 иллюстрирует эту идею по-иному. Все возможные рабочие точки целевого цвета задаются в виде координат в пространстве цветов RGB-датчика, образуемом красным, зеленым и синим датчиками. С изменением характеристик светодиодов измеренный цвет удаляется от целевого. Микросхема ASSP обнаруживает этот факт и настраивает соответствующим образом ШИМ-сигналы, используемые для управления светодиодами.

Важно понимать, что по мере старения светодиодов интенсивность их свечения уменьшается. Следовательно, максимально достижимая яркость светодиодной RGB-системы со временем будет снижаться. В большинстве приложений постепенное снижение яркости приемлемо, недопустимым является изменение цвета свечения светодиодной RGB-системы. Микросхема ASSP контролирует снижение яркости светодиодной RGB-системы таким образом, что цветность остается постоянной (в пределах допуска) даже при уменьшении максимально достижимой яркости.

В тех областях применения, где необходимо поддерживать яркость системы на постоянном уровне в течение всего срока службы изделия, пользователь должен позаботиться о том, чтобы максимально устанавливаемая яркость была меньше максимально достижимой в течение требуемого срока, как показано на рис. 7.

При всей привлекательности светодиодных RGB-систем имеется ряд трудностей, препятствующих широкому применению этой техно-

логии. Существует потребность в устройстве, которое бы «скрывало» сложность трехцветной оптической обратной связи за простым пользовательским интерфейсом. Далее описано, как эта цель достигается в микросхеме ASSP. Пример: данной точке пространства цветов соответствует набор значений $(V_R, V_G, V_B) = (2,0; 2,2; 1,9)$ В.

Для ясности это трехлинейное представление используется только для яркости, но не для цветности. На практике система обратной связи исправляет любые отклонения от рабочей точки целевого цвета, в том числе отклонения по яркости.

Отсутствие необходимости во внешней обработке

В микросхеме ASSP реализован набор алгоритмов, анализирующих информацию о цвете, которая содержится в выходных сигналах трехцветного фотодатчика, и вычисляющих управляющие ШИМ-сигналы для установки целевого цвета свечения (рис. 8). Микросхема ASSP берет отсчеты выходных сигналов фотодатчика с частотой около 100 раз в секунду, чтобы периодическая корректировка управляющих ШИМ-сигналов не была заметна человеческому глазу. Как уже отмечалось выше, в ASSP реализован также алгоритм, предотвращающий изменение цветности свечения RGB-системы при ухудшении характеристик светодиодов. Никаких других вычислений для достижения и поддержания целевого цвета не требуется.

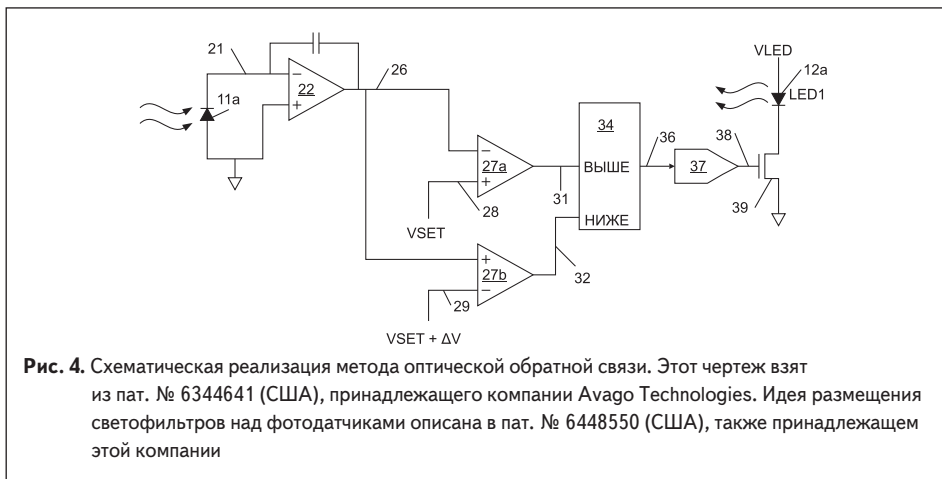


Рис. 4. Схематическая реализация метода оптической обратной связи. Этот чертеж взят из пат. № 6344641 (США), принадлежащего компании Avago Technologies. Идея размещения светофильтров над фотодатчиками описана в пат. № 6448550 (США), также принадлежащем этой компании

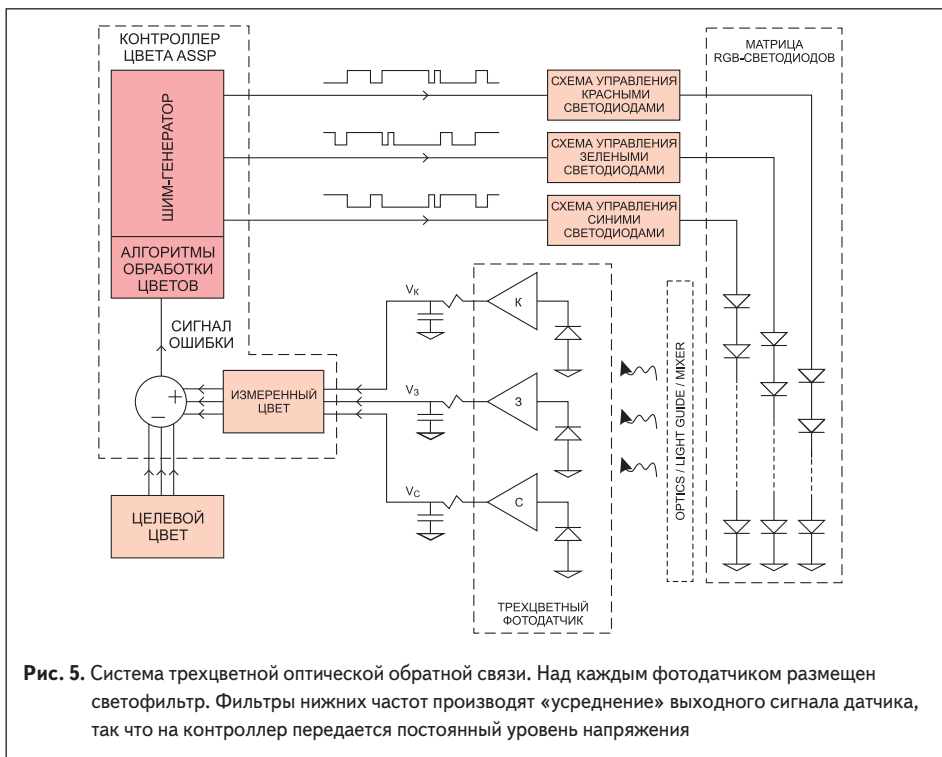


Рис. 5. Система трехцветной оптической обратной связи. Над каждым фотодатчиком размещен светофильтр. Фильтры нижних частот производят «усреднение» выходного сигнала датчика, так что на контроллер передается постоянный уровень напряжения

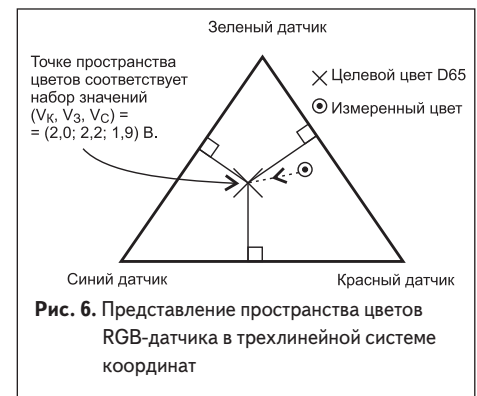


Рис. 6. Представление пространства цветов RGB-датчика в трехлинейной системе координат

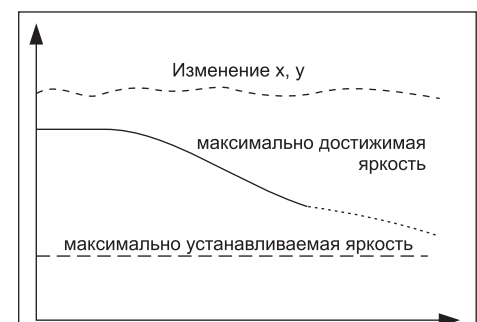


Рис. 7. Микросхема ASSP поддерживает постоянную (в пределах допуска) цветность RGB-источника света (определенную здесь как координаты x и y в пространстве цветов CIE 1931) даже при снижении с течением времени максимально достижимой яркости

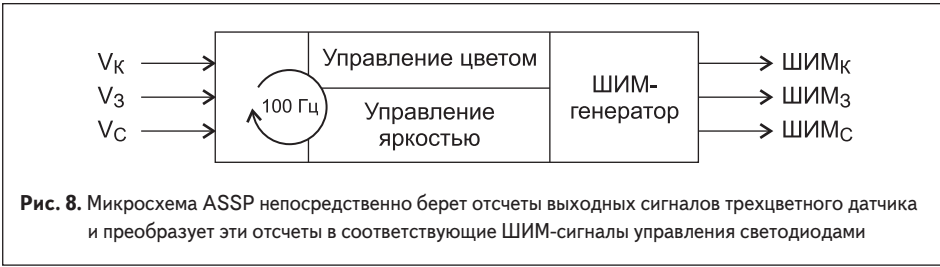


Рис. 8. Микросхема ASSP непосредственно берет отсчеты выходных сигналов трехцветного датчика и преобразует эти отсчеты в соответствующие ШИМ-сигналы управления светодиодами

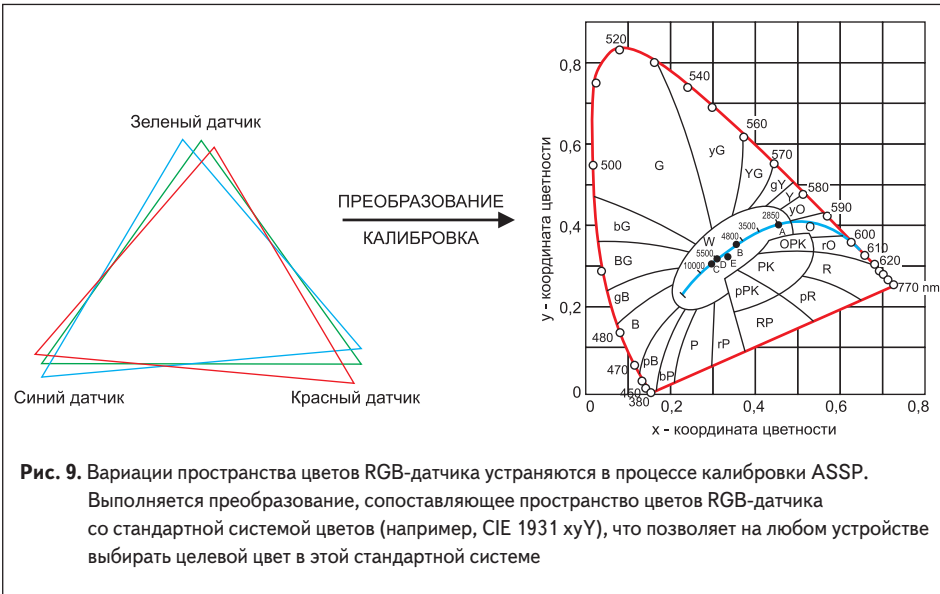


Рис. 9. Вариации пространства цветов RGB-датчика устраняются в процессе калибровки ASSP. Выполняется преобразование, сопоставляющее пространство цветов RGB-датчика со стандартной системой цветов (например, CIE 1931 xyY), что позволяет на любом устройстве выбирать целевой цвет в этой стандартной системе

Стандартизация пространства цветов

Этот вопрос касается аппаратной независимости при выборе рабочей точки целевого цвета. Пространство цветов RGB-датчика может варьироваться из-за различия выходных сигналов фотодатчиков, их местоположения, характеристик светодиодов и схем управления, а также других параметров. Эту проблему иллюстрирует рис. 9. В каждой системе пространство цветов RGB-датчика будет несколько отличаться. Соответственно, спецификация цвета D65 для системы А будет отличаться от спецификации того же цвета для системы В.

Пример:

Система А: $(V_K, V_3, V_C)_{D65} = (2,0; 2,2; 1,9)$ В.
Система В: $(V_K, V_3, V_C)_{D65} = (2,1; 2,4; 2,3)$ В.

Под действием света с цветностью D65 трехцветный датчик в системе А будет вырабатывать напряжения, указанные в первой строке выше. Фотодатчик системы В под действием такого же света будет вырабатывать другие напряжения, указанные во второй строке. Иными словами, система спецификации цветов, определяемая пространством цветов RGB-датчика, оказывается уникальной для каждой системы.

В микросхеме ASSP реализована процедура калибровки, позволяющая в каждом случае использовать стандартную систему специфика-

кации цветов. Таких систем в ASSP предусмотрено две: CIE 1931 xyY и CIE RGB. Имея входной сигнал в стандартном пространстве цветов, пользователь может быть уверен, что, воздействуя одним и тем же целевым цветом на каждую систему, он будет получать одинаковый цвет на выходе (в пределах допуска).

Простота в проектировании

Как правило, в дополнение к ASSP требуются только пассивные вспомогательные компоненты (рис.10) и внешнее ППЗУ для хранения данных калибровки. В большинстве случаев память может использоваться совместно с другими периферийными устройствами на системном уровне, поскольку данные калибровки занимают всего 31 байт. Микросхема ASSP имеет стандартный двухпроводной интерфейс I²C с тактовой частотой 100 кГц, и все основные функции отображены в 8-разрядное адресное пространство (рис.11). Например, для запуска калькулятора калибровки достаточно записать значение 0x01 в регистр CTRL2. Детали реализации можно найти в паспорте устройства.

На этапе изготовления система калибруется с использованием стандартной камеры CIE. Данные калибровки должны храниться во внешней энергонезависимой памяти. После установки системы в изделие калибровка не требуется. В готовом изделии пользователь сначала настраивает устройство, а затем записывает ранее сохраненные данные калибровки в калибровочные регистры. Это простой процесс чтения с последующей записью. После этого система готова к приему целевого цвета.

Выбор цвета осуществляется просто (рис.12). В приведенных выше примерах D65 задавался в виде набора выходных напряжений датчика. На практике целевой цвет можно задавать в виде координат в системе CIE 1931 xyY. Можно использовать и другие системы, такие как CIE uvY и CIE RGB. Например, чтобы принять в качестве целевого цвет стандартного источника света «Е», в соответствующие регистры ASSP необходимо записать набор значений $(x, y, Y) = (330, 330, 250)$. Последовательность действий следующая:

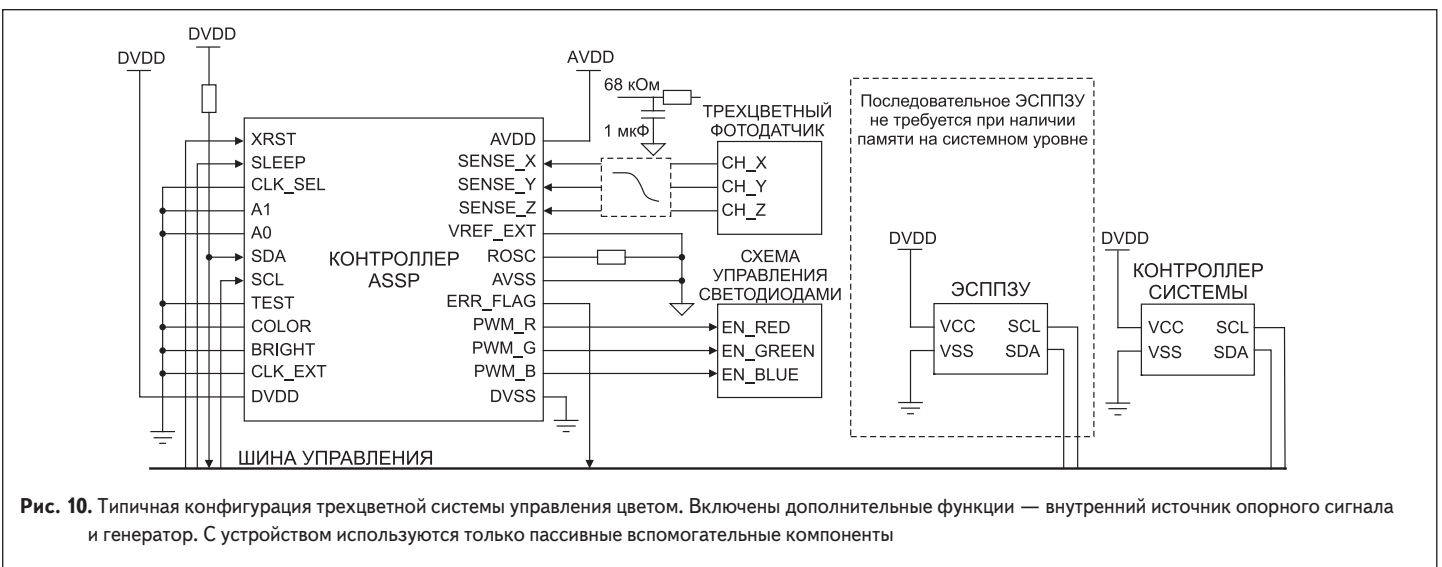


Рис. 10. Типичная конфигурация трехцветной системы управления цветом. Включены дополнительные функции — внутренний источник опорного сигнала и генератор. С устройством используются только пассивные вспомогательные компоненты



Рис. 11. Фрагмент регистрового пространства ASPP. Каждому биту сопоставлена функция

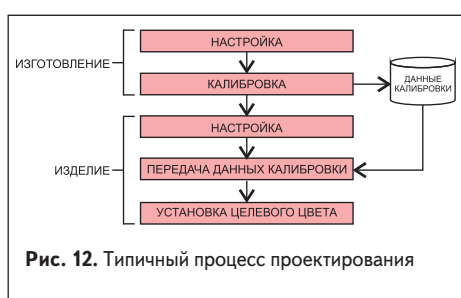


Рис. 12. Типичный процесс проектирования

- Координаты x, y для стандартного источника света CIE «Е» равны 0,33; 0,33.
- Умножаем на 1000, получаем 330, 330.
- Выбираем относительный уровень яркости $Y = 250$.
- Записываем 250 в регистры с адресом 237 и 236 для установки яркости (значения Y).
- Записываем значение 330 в регистры с адресом 235 и 234 для установки x -координаты цветности.
- Записываем значение 330 в регистры с адресом 233 и 232 для установки y -координаты цветности.
- Записываем значение 0×12 в регистр с адресом 1 (CTRL1) для обновления целевого цвета.

Микросхема ASPP изменит выходной цвет RGB-источника сразу после установки бита обновления в регистре.

Экспериментальные результаты

На рис. 13 показаны различия в характеристиках между светодиодной RGB-системой с незамкнутым контуром и с обратной связью. Для эксперимента в качестве целевого был принят белый цвет температурой 9000 К. За показатель качества была взята величина duv , рассчитываемая по следующей формуле:

$$duv = [(u_T - U_{25})^2 + (v_T - v_{25})^2]^{1/2},$$

где (u_{25}, v_{25}) — координаты цветности u, v в системе 1976 CIE при температуре $+25^\circ\text{C}$; (u_T, v_T) — координаты цветности u, v в системе 1976 CIE при температуре T . Хорошее практическое правило для оценки характеристик — принять значение $duv = 0,005$ как минимальное изменение цветности, заметное человеческому глазу.

Рис. 14 иллюстрирует серьезный спектральный сдвиг светодиода с ростом температуры. Данные были получены в системе с обратной связью, в ко-

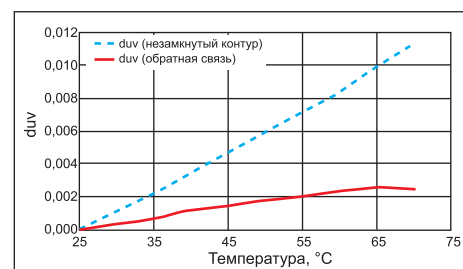


Рис. 13. Измеренное изменение цветности в зависимости от температуры

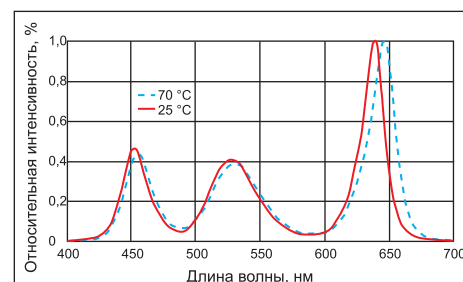


Рис. 14. Спектральный сдвиг в зависимости от температуры ($duv < 0,005$)

торой за целевой был принят белый цвет температурой 9000 К. Хотя спектральные кривые существенно сдвинулись, значение duv было удержано системой обратной связи на уровне ниже 0,005.

Заключение

Конструирование источников света на базе RGB-светодиодов является привлекательным решением. Однако вариации характеристик светодиодов приводят к тому, что цвет источника отклоняется от целевого. Проверенным решением этой проблемы является трехцветная оптическая обратная связь, но она трудна в реализации. Контроллер обратной связи Avago Technologies упрощает реализацию такой системы.