

Светодиод — такой знакомый и неизвестный.

Часть 3. Управление яркостью

➔ Во введении к первой части статьи [1] было указано, что светодиоды «используются в самых разнообразных лампах бытового, уличного и промышленного освещения, прожекторах и автомобильных фарах. Светодиоды широко используются в архитектуре, искусстве и даже применяются для повышения урожайности в теплицах. На базе светодиодов выполнены знаковые индикаторы, матрицы, панели и большие телевизионные экраны». Чем же это вызвано? Этому вопросу и посвящен настоящий материал.



Итак, зададим вопрос: чем обусловлена популярность светодиодов (СИД)? Может быть, исключительной их дешевизной? Нет, есть источники света и подешевле, да и в управлении попроще, то есть имеются вообще не требующие управления. Высоким КПД и надежностью? Несомненно, но только при правильном применении и должном подходе к проектированию драйверов, о чем говорилось во второй части [2]. Тем, что СИД — это практически точечный источник света с широкой диаграммой направленности, световой поток которого удобно формировать линзами? Это реально большой плюс для многих применений, но для многих и большой минус. И опять же, почему «в архитектуре, искусстве и даже для повышения урожайности в теплицах»? Может, из-за их уникального светового спектра? Но нам доступны СИД только красного, желтого (оранжевого), зеленого, синего и белого свечения. Тогда в чем же дело? Ответ простой: в их безынерционности и относительной простоте управления яркостью или как это называют специалисты, в диммировании, или димминге. Буквально этот термин означает «затенение» и происходит от английского слова dimming, нам же более удобно называть это регулировкой яркости. Немаловажен и тот факт, что при регулировке яркости у СИД не происходит смещение спектра, как у ламп накаливания, то есть белый остается белым, а не смещается в сторону синего или красного. СИД не генерируют нежелательное ультрафиолетовое и инфракрасное излучение, но если это нужно — то вопросов нет, пожалуйста. Именно все эти перечисленные факторы, учитывая особенности СИД в части светоизлучения, ставят его вне конкуренции по сравнению со всеми другими источниками света, и этот вопрос будет рассмотрен в данной части статьи. За основу публикации взяты отдельные главы из [3] в авторском переводе с комментариями и дополнениями автора.

Если вернуться к первой части [1] и посмотреть на вольт-амперную характеристику (ВАХ) СИД, то мы увидим, что его рабочая область для управления яркостью по напряжению узкая, и такое решение трудно реализуемо, соответственно, оно не используется. Все сводится к управлению током через СИД, о чем мы, собственно, и будем говорить. И нас интересует не только и не столько простота

реализации управления яркостью, хотя это, несомненно, важно, а ее линейность и обеспечение глубины регулирования.

Методы регулирования яркости

Регулирование яркости СИД, или димминг, может осуществляться разными способами: аналоговым напряжением с диапазоном, принятым в качестве промышленного стандарта (1–10 В); фазовым регулированием; отсечкой сетевого напряжения; через управление питанием; цифровыми способами, например через цифровой интерфейс освещения с возможностью адресации DALI (Digital Addressable Lighting Interface) или через WLAN (англ. WLAN (Wireless Local Area Network)). Однако на самом деле фактически имеется только два способа регулировки яркости СИД — это либо линейное регулирование тока через СИД (аналоговый димминг), либо путем быстрого чередования включения/выключения СИД с различным соотношением длительности (изменением скважности), которое достигается широтно-импульсной модуляцией (ШИМ), так называемым ШИМ-диммингом. Хотя оба этих метода направлены на достижение одного и того же эффекта, на практике между ними имеются существенные различия, которые необходимо учитывать при выборе технологии регулирования для конкретных приложений.

Аналоговый димминг

Как уже говорилось выше, СИД работает в очень узком диапазоне прямого напряжения своей ВАХ. Типичный сверхъяркий светодиодный чип начнет светиться при прямом напряжении около 2,5 В, достигнет 10% своей номинальной яркости при напряжении 2,7 В и начнет светиться на полную яркость при напряжении 3,1 В. При использовании драйвера в виде генератора тока для поддержания заданного постоянного тока через СИД, даже в случае дрейфа его параметров под воздействием температуры и времени, он должен непрерывно регулировать подаваемое на светодиод напряжение. В настоящее время, как правило, ток контролируют путем измерения напряжения на включенном последовательно с СИД или СИД-линейкой токоизмерительном низкоомном резисторе. Для повышения стабильности результат измерения подается через петлю аналоговой обратной

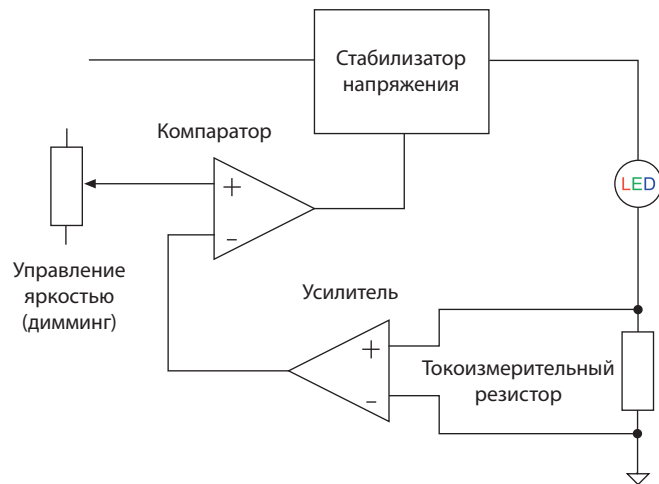


Рис. 1. Простая реализация аналогового димминга с использованием линейного стабилизатора

связи с относительно медленным временем отклика, что связано с недопущением возникновения автоколебательных процессов. При необходимости канал для аналогового димминга может быть реализован путем добавления дополнительного компаратора в цепь этой обратной связи линейного стабилизатора напряжения (рис. 1).

Аналоговый димминг может обеспечить кривые управления с высокой линейностью во всем диапазоне регулирования — от почти полной яркости до почти полного затемнения. Однако на самых высоких уровнях яркости эффект насыщения в компараторе может привести к нелинейности регулирования, а на низких уровнях яркости ток через измерительный резистор настолько мал, что существенным источником ошибок может быть входное напряжение смещения измерительного усилителя. Общий результат неизбежной нелинейности в нижней области находится на уровне 3% и до 3% в верхней. Эта нелинейность характерна даже для хорошо

спроектированной схемы аналогового диммирования (рис. 2).

ШИМ-димминг

Альтернативой аналоговому диммированию является ШИМ-димминг (рис. 3). Здесь также, чтобы контролировать максимальный ток через СИД или СИД-линейку, требуется последовательный токоизмерительный резистор и усилитель, но приложенное к СИД напряжение питания включается и выключается через вход разрешения EN (от англ. *enable* — «разрешение») путем ШИМ. Из-за своей простоты такой подход очень широко используется для однокристальных микросхем драйверов управления СИД.

ШИМ-димминг не отличается такой высокой линейностью управления, как аналоговый. Когда управляющий вход, на который подается ШИМ-сигнал, переходит в низкое состояние, то выходное напряжение драйвера сразу не выключается. Причина кроется в том, что при выключении для

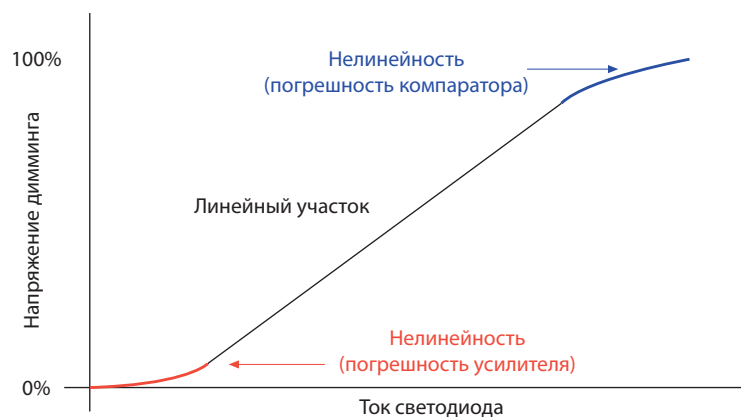


Рис. 2. Нелинейность регулирования яркости при аналоговом димминге

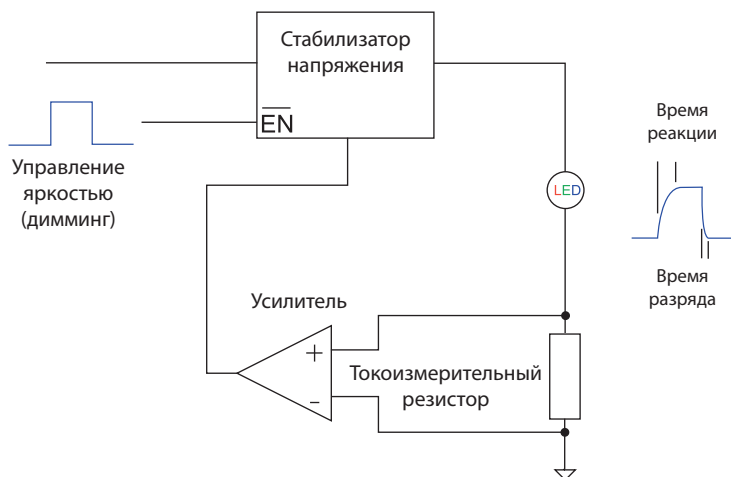


Рис. 3. Реализация управления при ШИМ-димминге

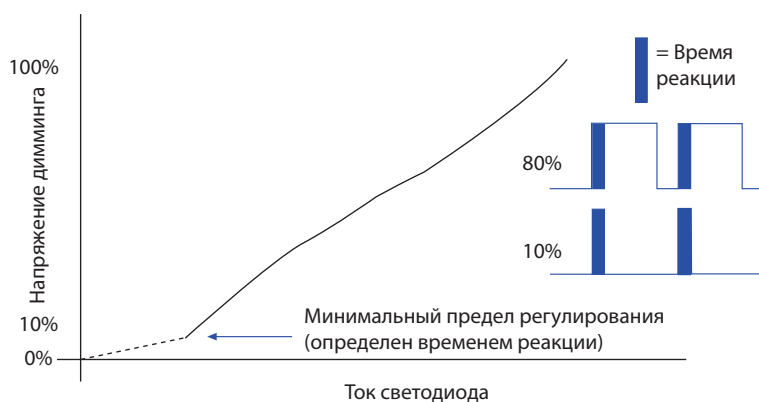


Рис. 4. Нелинейность регулирования яркости при ШИМ-димминге

выходной емкости драйвера необходимо некоторое время, чтобы она успела разрядиться через светодиодную нагрузку. С другой стороны, когда вход ШИМ переходит на высокий уровень, стабилизатору напряжения требуется некоторое время для

восстановления напряжения, что не может произойти мгновенно. Для исключения автоколебательных процессов в петле регулирования всегда имеется определенная задержка, то есть имеется некоторое время от подачи команды разрешения

включения до установки заданного уровня напряжения на выходе и, следовательно, тока СИД. Из-за наличия этих неизбежных задержек включения и выключения приходится использовать управляющие ШИМ-сигналы относительно низкой частоты, как правило, не выше двух-трех сотен герц, а ответная реакция на такое регулирование оказывается нелинейной (рис. 4). Во многих конструкциях эти задержки приводят к тому, что реализовать ШИМ-димминг ниже 10% яркости вообще не представляется возможным. Это связано с тем, что драйвер просто не сможет реагировать на такой короткий входной сигнал управления.

Альтернативой управлению по входу разрешения EN (иногда он называется полным именем Enable) с использованием ШИМ-димминга является включение между цепочкой СИД и общим проводом (землей, GND) дополнительного полевого транзистора в виде управляемого ключа (рис. 5). Такое решение избавит нас от проблем со временем выключения и восстановления импульсного преобразователя. Поскольку полевой транзистор реагирует гораздо быстрее, чем петля обратной связи стабилизации по току, то более глубокое регулирование, ниже 5%, здесь становится уже вполне реальным фактом. Тем не менее в этой бочке меда имеется и ложка дегтя: при отключении светодиодной нагрузки выходное напряжение драйвера будет увеличиваться до максимального уровня, так что при повторном включении СИД, чтобы выходной ток снова стабилизировался, опять потребуется некоторое время. Этот эффект токового перерегулирования происходит в каждом цикле включения

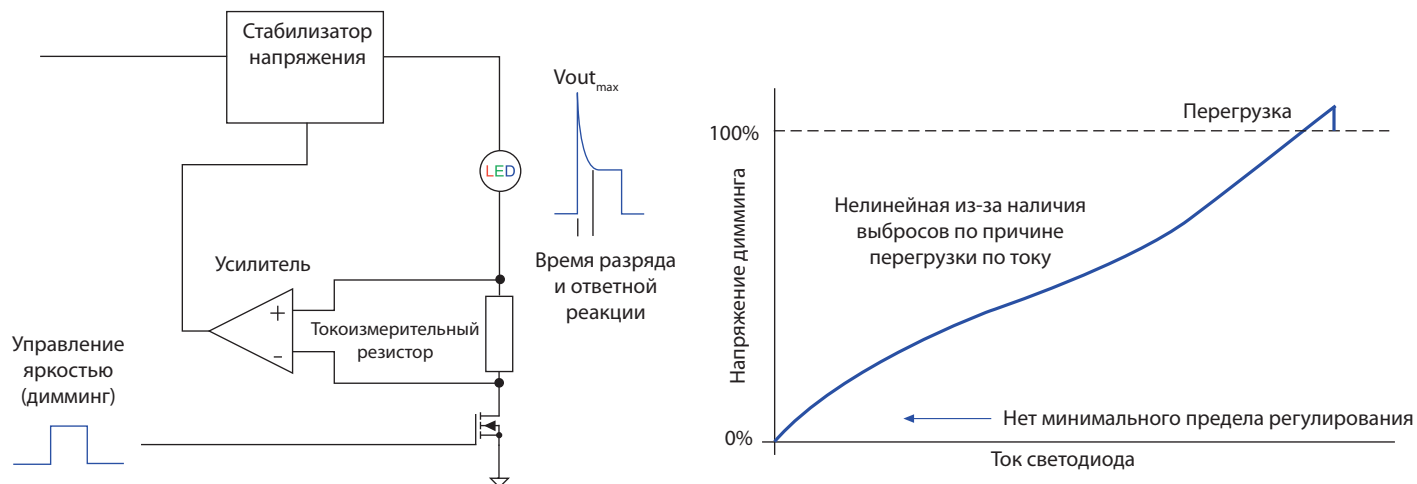


Рис. 5. Димминг с добавочным ключом.

при ШИМ-управлении, так что влияние этого негативного воздействия необходимо учитывать при планировании срока службы СИД (рис. 5). Решить эту проблему можно, используя ограничитель напряжения на СИД-цепочке, или включением дополнительной нагрузки, которая используется при выключении СИД, но такое решение усложняет схему и снижает КПД устройства.

Визуальное восприятие яркости

Если бы проблемы на этом и заканчивались... Установив тот факт, что не существует идеального способа управления яркостью СИД, мы сталкиваемся со следующей проблемой, а именно — с нашими глазами. Дело в том, что мы стараемся реализовать линейное управление яркостью, но человеческое визуальное восприятие яркости не является линейным! Для того чтобы при низких уровнях освещенности передать на сетчатку больше света, наши зрачки автоматически расширяются. Поэтому мы воспринимаем СИД с низкой яркостью ярче, чем это показывает нам измерительный прибор. Чтобы выработать связь между воспринимаемой и измеренной яркостью, мы должны взять квадратный корень из нормированного измеренного уровня света. Например, мы снизили яркость СИД до 25% от номинального тока. А для наших глаз это оказалось $\sqrt{0,25} = 0,5$, т. е. до 50%. Именно так восприняли наши глаза изменение яркости до 25%.

Так что, хотя почти все разработчики и производители светодиодных драйверов проявляют завидное упорство в том, чтобы сделать, насколько это возможно, их диммеры математически точно линейными, наши глаза предпочитают нелинейную кривую изменения яркости, близкую к поведению лампы накаливания (рис. 6). Именно это соответствует нашему восприятию яркости гораздо более близкой, чем реакция на линейное регулирование яркости у СИД. И так сложилось на рынке светодиодного освещения, что в настоящее время спрос на системы с высокой линейностью регулирования превышает спрос на системы с естественным регулированием. Причина этого кроется в том, что при линейном регулировании достигается более простое согласование по управлению СИД различных типов с различными спектрами. Но эта ситуация

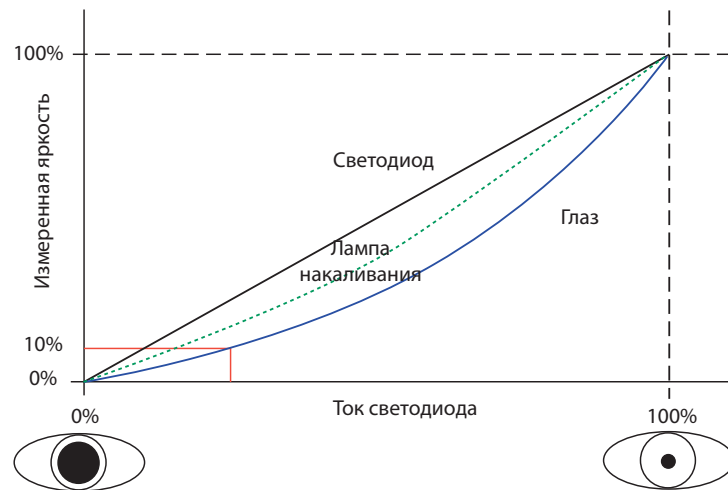


Рис. 6. Визуальное восприятие яркости человеком

может измениться в будущем, когда рынок постепенно созреет и спрос на системы с более естественным регулированием увеличится.

Функция димминга многими поставщиками драйверов может рекламироваться как нечто полностью реализованное — берите и пользуйтесь. Они уверенно указывают в спецификации коэффициенты регулирования в 1:1000, даже если при этом точность регулирования составляет всего $\pm 5\%$ (1:20). Но приведенное выше короткое обсуждение показывает, что точные линейные и немерцающие системы димминга СИД до сих пор не могут быть восприняты как уже свершившийся и устоявшийся факт. И это так, несмотря на то, что на рынке драйверов СИД уже имеются тысячи, если не десятки тысяч различных диммеров. Однако, поскольку светодиодная технология постоянно развивается, стараясь предложить потребителю большую интенсивность света при меньших уровнях тока, потребители вскоре станут уже не так заинтересованы в уровнях доступной для них мощности освещения, их гораздо больше будет интересовать

контроль и управление этой мощностью. Таким образом, диммируемые СИД станут еще большей нормой, особенно с учетом влияния таких новых факторов, как принятие директив в части энергоэффективности. Эти директивы будут все чаще требовать диммирования освещения для снижения общего энергопотребления.

Варианты реализации димминга: плюсы и минусы

Как же практически организовано диммирование? Самый простой вариант — это аналоговое диммирование с ручным управлением. С помощью серии светодиодных драйверов RCD-24 от компании RECOM [4] это осуществляется предельно просто (рис. 7), что связано не только с наличием входа аналогового управления, но и с наличием выхода со стабильным напряжением для подключения регулятора яркости. Последнее избавляет нас от внешней стабилизации напряжения.

Но, как обычно, простота — это ограничения в гибкости. В представленном примере регулирование осуществляет пользователь. Утрируя, представим

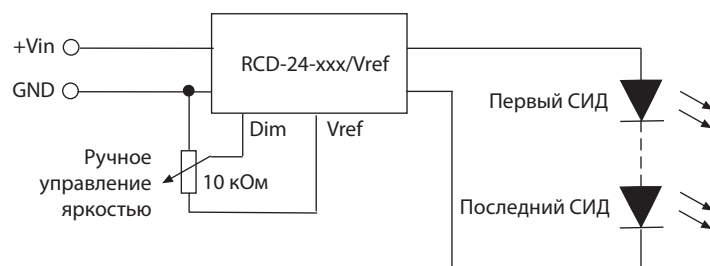


Рис. 7. Точный регулятор яркости на основе потенциометра

этот простой способ так: вы смотрите телепередачу и вам нужно приглушить освещение, для чего вы должны встать, подойти к выключателю с регулятором и уменьшить освещенность. Вам нужно что-то глянуть в журнале, вы опять должны встать, и так по кругу. То есть такое решение явно пришло из 80-х годов прошлого века. И годится оно для дешевой настольной лампы, без удобного сенсорного опрвления. Мы уже не говорим о надежности недорогих потенциометров. И так, нам нужно что-то иное. Это «иное» — регулирование путем подачи внешнего управляющего напряжения. Здесь можно реализовать простой вариант с регулированием

от 0 В (яркость 0%) до 10 В (яркость 100%), и он тоже не отличается особой сложностью (рис. 8) [4].

На этом можно было бы поставить точку, если бы не одно «но»... Такая регулировка не вписывается в требования, сложившиеся в виде стандарта по регулированию в индустрии. Он требует диапазон регулирования 1–10 В, а не 0–10 В. И здесь нам потребуется уже более сложное решение (рис. 9).

Операционный усилитель типа rail-to-rail (с полным размахом выходного напряжения, равным напряжению питания микросхемы) сконфигурирован в качестве инвертирующего усилителя. Его неинвертирующий вход приводится к «виртуальной земле»

напряжением 2,25 В, которое формируется резистивным делителем, состоящим из резисторов номиналом в 100 кОм. Если входное напряжение равно 1 В, то делитель входного напряжения из резисторов номиналом в 1 кОм уменьшает входное напряжение до 0,5 В. Входы операционного усилителя будут сбалансированы только в том случае, если выходное напряжение будет равно 4,5 В. Если входное напряжение будет равно 10 В, то делитель входного напряжения уменьшает его до 5 В. Здесь входы операционного усилителя сбалансированы, только если выходное напряжение равно 0 В.

Аналоговое управление, несомненно, удобно, но при его использовании линии передачи сигналов управления ограничены по длине, и оно не отличается высокой помехоустойчивостью. Здесь преимущество у ШИМ-регулирования. Но, как было сказано выше, у чистого ШИМ-управления, без внешнего ключа, имеются ограничения в части неизбежных задержек включения/выключения. А при использовании внешнего ключа мы будем иметь проблемы с бросками тока через светодиоды и регулированием. Поэтому, как правило, приходится использовать управляющие ШИМ-сигналы относительно низкой частоты, не выше двух-трех сотен герц. При использовании драйверов, имеющих аналоговый вход управления, это ограничение можно обойти (рис. 10).

Предлагаемое решение достаточно простое и позволяет избежать максимального предела частоты по входу ШИМ, что полезно при использовании микроконтроллеров, которые имеют выходы ШИМ, основанные на их внутренних таймерах, но которые не могут так легко выводить низкочастотные сигналы с ШИМ. Недостатком этого способа является то, что время реакции светодиодного выхода на изменение уровня яркости происходит медленнее, чем при чисто аналоговом управлении, поскольку это определяется средним уровнем напряжения, которое получается путем заряда и разряда конденсатора. Но в общем, если рассматривать системы освещения, а не светодиодные экраны, требующие качественной передачи динамически меняющегося изображения, то такая задержка является не столь существенной.

Имеется еще проблема, которая заключается в необходимости фиксировать

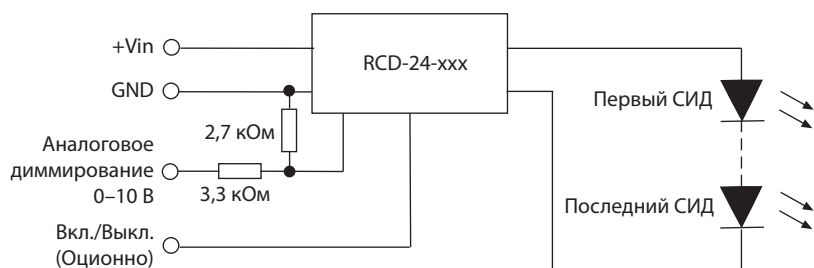


Рис. 8. Аналоговое управление яркостью 0–10 В (0 В = 0%, 10 В = 100%)

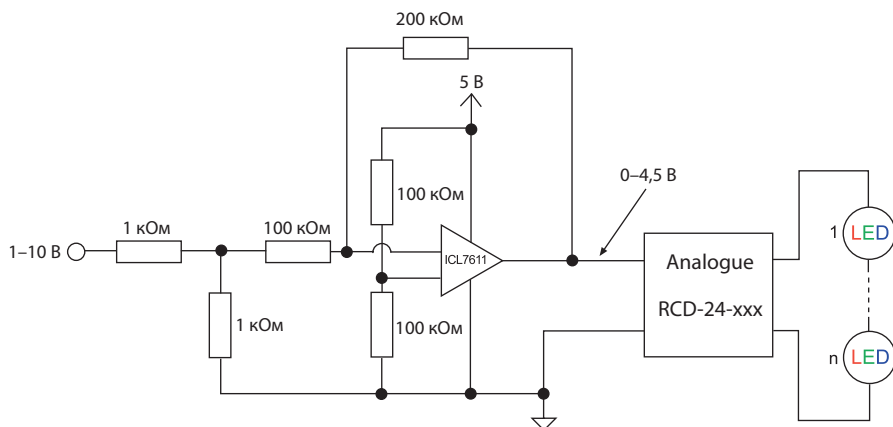


Рис. 9. Аналоговое управление яркостью 1–10 В (1 В = 0%, 10 В = 100%)

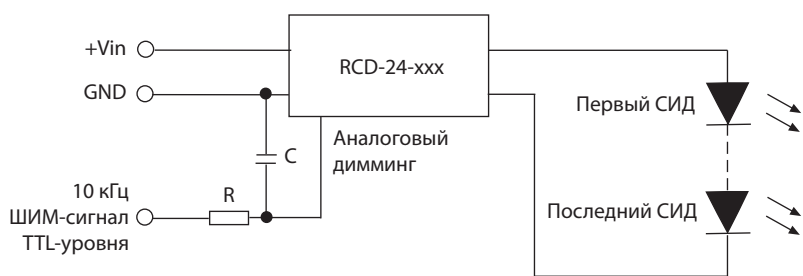


Рис. 10. Преобразование ШИМ-управления яркостью в аналоговое

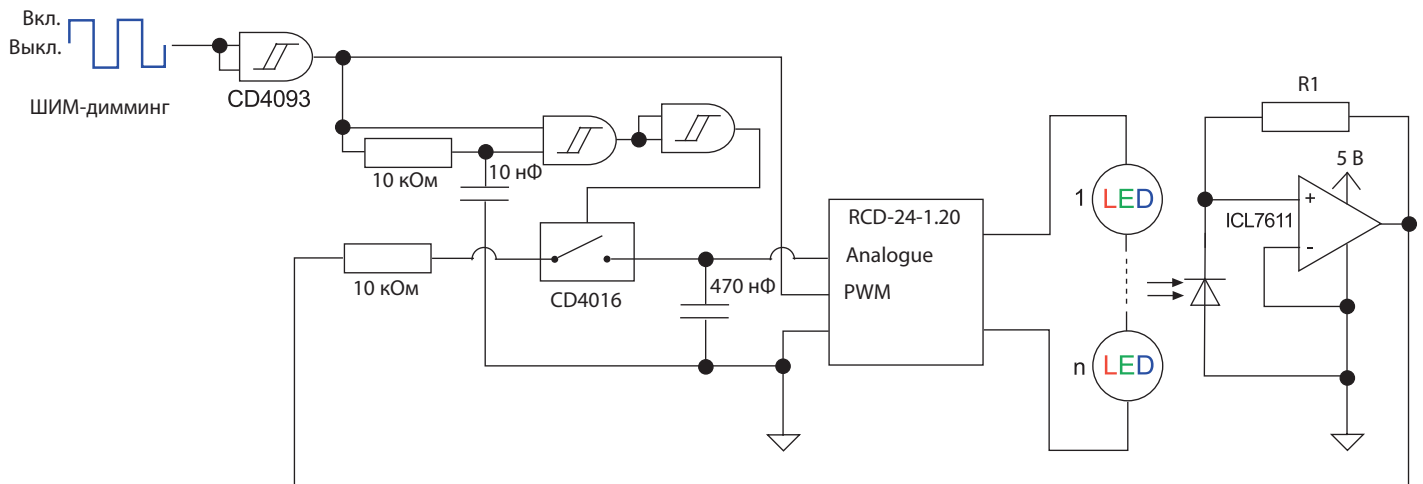


Рис. 11. Диммируемая схема с датчиком освещенности и обратной связью по уровню освещенности с запоминанием

заданный уровень светоотдачи (зачем, мы детально поговорим позже) и иметь при этом независимое управление яркостью. Идея такой необычной схемы показана на рис. 11.

Особенности светодиодных драйверов RECOM

Серия светодиодных драйверов RCD уникальна тем, что в ней предусмотрены два входа для управления светом, которые могут быть использованы одновременно. Таким образом, аналоговый вход управления может быть использован для компенсации яркости СИД, в то время как вход с ШИМ-управлением может быть использован, чтобы независимо от действия цепи компенсации регулировать общую яркость СИД.

Для запоминания текущего уровня напряжения обратной связи управления яркостью при включенном СИД здесь используется технология слежения и запоминания (track-and-hold). Благодаря этому игнорируется уровень света в момент, когда СИД выключены. Таким образом, напряжение обратной связи, передаваемое на драйвер RCD, не зависит от регулирования по входу ШИМ-управления. Небольшая задержка, создаваемая резистором номиналом 10 кОм и конденсатором емкостью в 10 нФ, дает гарантию того, что время реакции выхода светодиодного драйвера было учтено еще до того, как выходное напряжение операционного усилителя было выбрано (семплировано) и зафиксировалось на запоминающем конденсаторе емкостью 470 нФ. Тем не менее точные значения номиналов элементов схемы

могут потребовать некоторой оптимизации, исходя уже из ее конкретного применения.

Другим распространенным применением для оптической обратной связи является датчик внешней освещенности. То есть световой поток должен быть не постоянным, а должен меняться в зависимости от измерения уровня наружного освещения, а яркость свечения светодиодов для поддержания постоянной освещенности должна уменьшаться при наличии яркого дневного света, а затем постепенно увеличиваться по мере того, как сгущаются сумерки.

Широко распространенным и недорогим устройством для реализации изложенной выше идеи является фоторезистор LDR. Он имеет линейную зависимость в виде натурального логарифма от уровня освещенности ($R = Lux \times e^{-b}$) и, совместно с резистором смещения, легко может быть использован для установки требуемого значения светового потока в зависимости от уровня окружающей освещенности. Простейший вариант такого решения приведен на рис. 12.

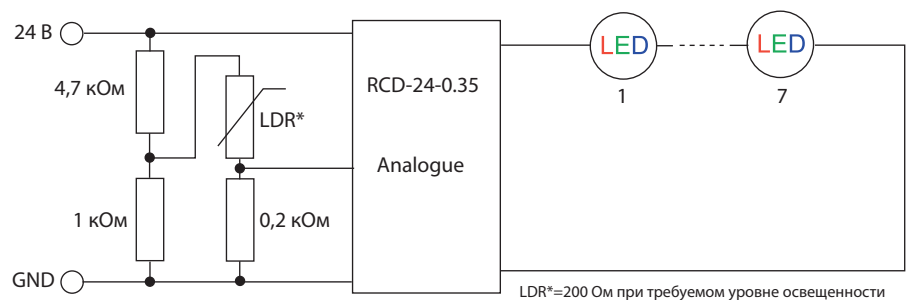


Рис. 12. Схема с обратной связью от датчика освещенности

Польза регулируемого освещения

Но и зачем мы городили весь этот огород? Что мы с этого имеем и где архитектура, искусство и повышение урожайности в теплицах? У украинцев есть такая любимая поговорка: «Не повірю доки не перевірю» («Не поверю до тех пор, пока (сам) не проверю»). Так что в завершение этой части статьи давайте посмотрим и проверим, что нам реально дает регулируемое и управляемое светодиодное освещение.

Аграрная промышленность

Начнем с насущного — с урожая. В настоящее время наиболее распространенным источником света для освещения парников, которые обычно используются в дополнение к дневному свету в течение зимних месяцев, являются натриевые лампы высокого давления (High-Pressure Sodium Lamp, HPS, или НЛВД). Однако по отношению к растениеводству, которое опирается исключительно на электрическое освещение, СИД обладают многими преимуществами. Это особенно верно для систем выращивания овощей в многоуров-

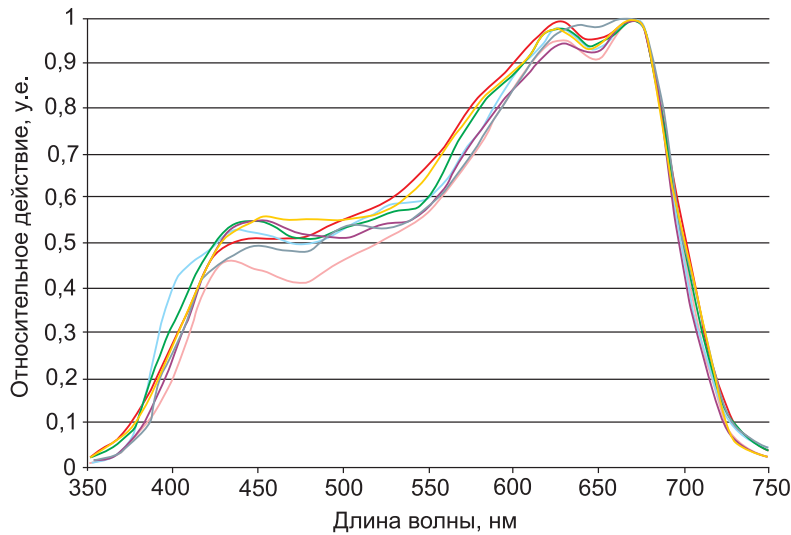


Рис. 13. Показатель активности спектра четко объясняет логику поведения в спектральном диапазоне 400–700 нм



Рис. 14. Использование светодиодного освещения в растениеводстве. Фото с сайта компании Black Dog LED



Рис. 15. Подсветка Национального художественного музея в Киеве, проект реализован компанией «Комплекс-В»

невых теплицах, в которых для повышения эффективности использования площади используются близкорасположенные стойки с поддонами, на которых выращиваются растения в виде многоуровневых вертикальных конструкций. В таких условиях применение натриевых ламп высокого давления является непрактичным.

Фотосинтетически активное излучение (PAR) определяется как электромагнитное излучение в спектральном диапазоне 400–700 нм, которое фотосинтезирующие живые организмы способны использовать в процессе фотосинтеза, чтобы превратить углерод из CO_2 в углеводы. А эффективный в части воздействия спектр имеет вид, представленный на рис. 13. Он был получен в результате сложных исследований при измерениях на 22 наиболее распространенных сельскохозяйственных культурах, как при естественном освещении, так и в лабораторных условиях [5].

Относительный квантовый выход излучения спектра, влияющего на урожайность фотосинтеза, имеет два пика с длинами волн в 440 и 620 нм. Эффективность так называемого «эффекта Эмерсона» (наличие двух и более световых волн с разной длиной волны делает фотосинтез более эффективным, чем в случае суммарного воздействия множества отдельных световых волн) может быть усилена добавлением белого или синего света к источнику длинноволнового красного света, что может с успехом увеличить скорость фотосинтеза. Кроме того, здесь имеется еще целый ряд важных моментов, но не будем загружать ими читателя. Это все достаточно сложно для неспециалистов в области растениеводства, главное для нас, что при использовании СИД мы можем предложить им любые желаемые спектры и потом буквально вкушать плоды своих трудов в виде высоких урожаев уже на своем обеденном столе. Пример использования СИД-освещения PhytoMAX компании Black Dog LED в теплице приведен на рис. 14. Здесь выигрыш и в части энергоэффективности, и в урожайности.

Архитектурная подсветка

Что касается архитектуры и искусства, как известно, архитектура — это «музыка, застывшая в камне» (И. В. Гете). Использование СИД в этой области стало уже обыденным, как и новогодние светодиодные гирлянды, но светодиодное освещение позволяет оживить старые застывшие архитектурные

формы (рис. 15) и создать новые, более необычные (рис.16).

Концепция светодиодного освещения (рис. 16) разработана экспертами компании Philips (светодизайнер М. Иванов), реализация выполнена техническим партнером компании Philips — компанией «Стройтех». Для освещения используются компактные светодиодные прожекторы DecoFlood (с цветными лампами и фильтрами) и ClearFlood. Инновационные технологии позволяют сотрудникам администрации дистанционно управлять освещением сада с помощью iPad или iPhone. При этом запрограммированные специалистами Philips разнообразные световые сценарии могут меняться всего за несколько секунд из любой точки сада.

Интеллектуальные здания

Светодиодное освещение, благодаря своей непревзойденной гибкости, является основным для «умных» домов (рис. 17): оно включается по вашему желанию с желаемой для вас в конкретный момент времени интенсивностью освещения и спектром.

Светодиодное искусство

Приведенные на рис. 15–17 примеры, в общем, уже привычны, чего не скажешь о светодиодном искусстве, получившем название LED art. Бывает, что шедевр LED art просто недоступен для фиксации человеческим зрением. Поэтому, чтобы дать возможность полюбоваться произведением искусства, художник использует приемы фотографирования, то есть такой LED art-объект создается на стыке разных видов искусства: фотографии и световой динамической LED art-композиции (рис. 18) [6]. В этом случае художник фотографирует свет в движении на длинной выдержке. В качестве носителя выступает штанга с интегрированными в определенной последовательности СИД.

Торговля

Еще одной областью использования светодиодного освещения является торговля. Именно этот тип освещения, благодаря высокому индексу цветопередачи и регулируемому спектру, делает оптимальной и привлекательной демонстрацию товара [7], следовательно, увеличивает продажи. Тут можно перефразировать известный постулат: «Освещение — двигатель торговли». И именно это является источником вашего разочарования, когда вы соблазнились



Рис. 16. Сад имени Н. Э. Баумана (Москва)

и выбрали на витрине красивейший кусочек говяжьей вырезки, а он при дневном освещении оказался не совсем тем, что вы ожидали. В данном случае украинская поговорка «бачили очі, що купували» («видели глаза, что покупали») не подходит: стараниями разработчиков освещения ваши глаза видели совсем иное. Иначе синюшный кусок мяса с зеленоватым оттенком вы уж точно бы не купили. Но торговля — это, как Восток, — дело тонкое, тут зачастую «не обманешь — не продашь».

* * *

Как же создается такая красота и сложные статические и динамические спектры? Как сохранить заданные и необходимые спектральные характеристики светодиодных светильников? Ведь известно, что температура и старение вызывают постепенный сдвиг характеристик СИД. При этом меняется не только интенсивность их светоизлучения, но и спектр. В общем, эта проблема, в той или иной мере, касается всех источников света, но для СИД, на наше счастье, ситуация исправима. Поскольку спектр получается путем смешивания базовых цветов, то, изменяя эти составляющие, спектр светильника можно не только задать, но и автоматически корректировать к заданным характеристикам. Обо всем этом, и не только, мы поговорим в последней, четвертой части статьи. ●

Литература

1. Рентюк В. Светодиод — такой знакомый и неизвестный. Часть 1. История, особенности применения // Полупроводниковая светотехника. 2017. № 1.
2. Рентюк В. Светодиод — такой знакомый и неизвестный. Часть 2. Эффективное управление, драйверы // Полупроводниковая светотехника. 2017. № 2.
3. Steve Roberts. DC/DC BOOK OF KNOWLEDGE: Practical tips for the User. Second Edition, 2015.

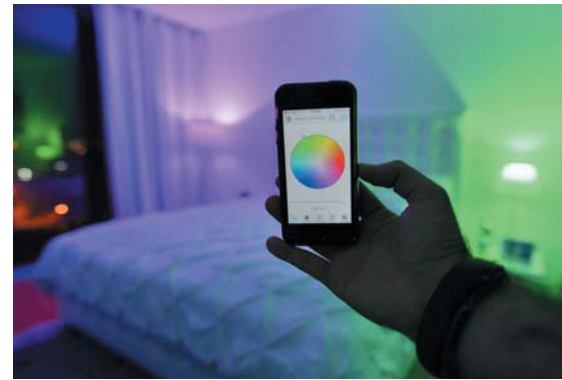


Рис. 17. Управление освещением в системе «умный дом»



Рис. 18. Световые зарисовки Дэвида Гилливера (David Gilliver)

4. Constant Current LED Driver, REV: 1/2016, Recom. www.recom-power.com/pdf/Lightline/RCD-24.pdf
5. Эшдаун Я. Светодиодное освещение для растениеводства // Полупроводниковая светотехника. 2015. № 4.
6. Световые зарисовки Дэвида Гилливера. <http://newsinphoto.ru/iskusstvo/svetovye-zarisovki-devida-gillivera/>
7. Виноградова К. Передовые светодиодные продукты от Samsung Electronics: мощные светодиодные сборки chip-on-board серий В, С и D // Полупроводниковая светотехника. 2016. № 6.