

Стив Робертс (Steve Roberts) | info@recom-electronic.com

Драйверы RCD для мощных светодиодов

Как известно, первое правило на войне — знать своего врага. В твердотельном освещении тот же принцип: если вы не знаете, как ведет себя светодиод, то не удивляйтесь, что ваша разработка не будет успешна.

Характеристики светодиодов

Светодиод является нелинейным устройством. Если к нему приложить низкое напряжение, то он не будет проводить электрический ток. Если напряжение повышать, то, как только оно превысит пороговое значение, светодиод станет излучать, а ток резко возрастет. Если продолжить увеличение напряжения, ток будет возрастать, а полупроводниковый прибор быстро перегреется и сгорит. Нюанс заключается в поддержании светодиода в узкой области между полностью закрытым и полностью открытым состояниями (рис. 1).

Здесь есть одна сложность. Напряжение полезной рабочей области у разных экземпляров различается (даже у приборов одной группы и одного производителя), кроме того, оно меняется в зависимости от окружающей температуры и степени деградации прибора. На рис. 2 рабочая область показана более де-

тально. В этом примере мы рассматриваем четыре идентичных светодиода, которые, согласно техническим данным, имеют одинаковые характеристики. Все производители подобных приборов сортируют их по цвету излучаемого света (это называется типизация, бининг (binning) — в процессе производства проводится проверка и светодиоды разделяются по бункерам, бинам (bin), согласно их цветовой температуре). Впоследствии все диоды смешиваются и в одной поставке могут оказаться приборы из разных производственных партий, и следовательно, можно ожидать большого разброса порогового или прямого (V_f) напряжений. Большинство технических характеристик устройств декларируют 20%-й допуск на V_f , поэтому столь широкий разброс, показанный на рис. 2, не является преувеличением.

Если мы увеличим напряжение примерно до, скажем, 3 В, то первый диод будет пере-

гружен, ток второго составит 300 мА, третьего — 250 мА, а четвертого — только 125 мА.

Более того, эти характеристики и в дальнейшем изменяются. Когда светодиод прогревается до своей рабочей температуры, кривые дружно дрейфуют влево (прямое напряжение V_f с повышением температуры падает). Однако интенсивность излучения света светодиодов прямо пропорциональна проходящему через них току (рис. 3). Так, в приведенном выше примере при напряжении питания 3 В первый светодиод будет сверкать как совершенно новый, второй окажется немного ярче, чем третий, а вот четвертый будет восприниматься весьма тусклым.

Управление светодиодами постоянным током

Путем решения проблемы разного прямого напряжения V_f при одинаковом токе является использование для управления постоянного тока, а не напряжения. Для поддержания по-

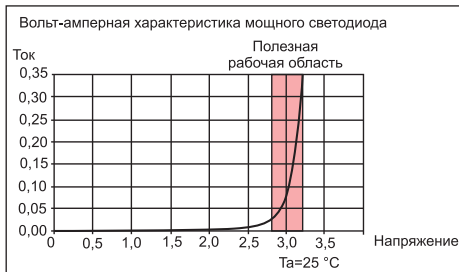


Рис. 1. Полезная рабочая область мощного светодиода

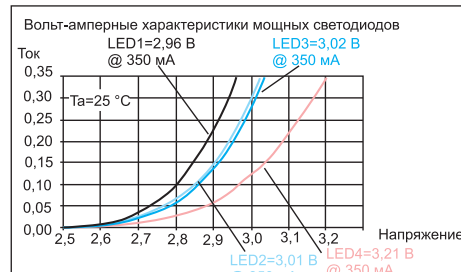


Рис. 2. Характеристики светодиодов в деталях

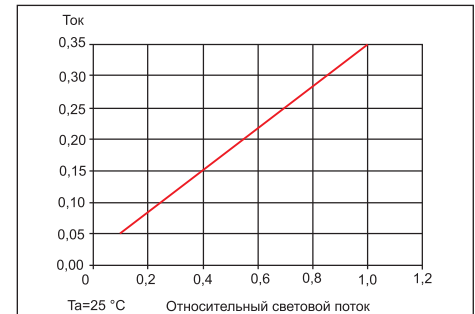


Рис. 3. Зависимость между выходом света и током светодиода

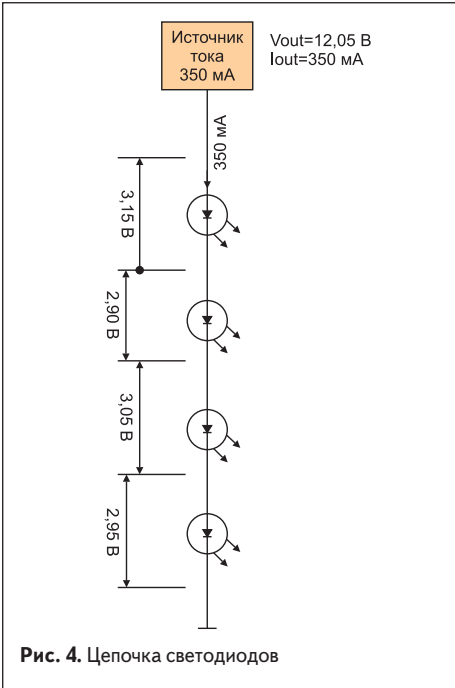


Рис. 4. Цепочка светодиодов

стоянного тока, а следовательно, и силы света, драйвер светодиода автоматически подстраивает выходное напряжение. Такой подход можно использовать в случае единичного твердотельного излучателя или при их последовательном соединении. Если ток через все светодиоды одинаков, то, несмотря на различия в V_f , они будут иметь одинаковую яркость (рис. 4).

Если излучатели прогрелись до рабочей температуры, то для поддержания величины тока неизменной источник постоянного тока автоматически уменьшит напряжение управления. Это делает их яркость не зависящей от температуры.

Еще одним значительным преимуществом является то, что источник стабильного тока не позволяет какому-то отдельному светодиоду в цепи быть перегруженным. Это гарантирует, что все они будут иметь большой срок службы. Если один из полупроводниковых излучателей окажется пробитым (накоротко замкнутым), то остальные продолжают функционировать с корректным рабочим током.

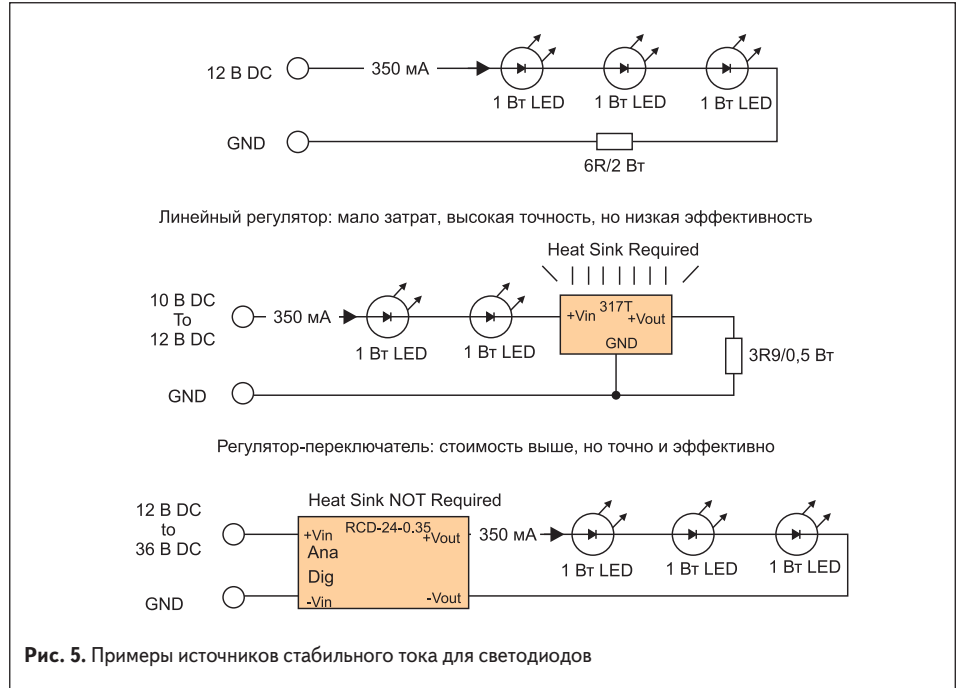


Рис. 5. Примеры источников стабильного тока для светодиодов

Некоторые источники стабильного постоянного тока

Простейшим источником постоянного тока является генератор постоянного напряжения, управляющий светодиодом через резистор. Если падение напряжения на сопротивлении примерно равно прямому напряжению на светодиоде, то 10%-е изменение V_f вызовет аналогичное по величине изменение тока через него (сравните это с кривыми, приведенными на рис. 2, показывающими, что изменение V_f на 10% вызовет 50%-е изменение тока на излучателе). Такое решение очень дешево, но обладает плохими характеристиками регулирования тока и весьма расточительно по мощности. Многие дешевые светодиодные лампы типа кластера, предлагаемые в качестве замены низковольтных галогенных ламп, используют этот метод. Нечего и говорить, что в случае замыкания в одном из светодиодов резистор перегорит относительно быстро и таким же относительно коротким будет время жизни всего кластера.

Другим простейшим источником постоянного тока является его линейный регулятор. На рынке доступны несколько дешевых драйверов светодиодов, использующих этот метод. Для этой же цели могут применяться и линейные стабилизаторы напряжения, работающие в режиме постоянного тока. Внутренняя обратная связь поддерживает управляемый ток внутри 5%-го коридора, но тепловая мощность выделяется в виде тепла, и для ее рассеяния требуется хороший теплоотвод. Плохая эффективность этого метода слабо согласуется с принципом высокой эффективности твердотельного освещения.

Лучшим источником постоянного тока является импульсный стабилизатор (switching regulator). Цена такого драйвера выше, чем у других решений, но точность в широком диапазоне нагрузок находится в пределах 3%, а эффективность преобразования превышает 96%, это означает, что только 4% энергии расходуется бесполезно и устройство может работать при высоких температурах окружающей среды (рис. 5).

Таблица 1. Зависимость числа управляемых светодиодов в цепочке от входного напряжения

Входное постоянное напряжение, В	5	12	24	36	54
Типовое число светодиодов в цепочке	1	3	7*	10*	15

Одно важное отличие между альтернативными подходами, приведенными выше, — диапазон входного и выходного напряжений.

Так, DC/DC-регулятор-переключатель имеет большой диапазон входных и выходных напряжений, в котором он обеспечивает стабильный ток (например, RCD-24.0.35 при изменении постоянного напряжения от 5 до 36 В может давать на выходе 2–34 В). Большой диапазон выходных напряжений позволяет использовать различные комбинации светодиодных линеек, но кроме того дает возможность в широких пределах регулировать яркость.

Два других альтернативных решения, приведенных выше, в случае, если нужен только один светодиод, приведут к проблемам с рассеиваемой мощностью, поскольку падение напряжения на резисторе или регуляторе будет больше, соответственно вырастут и потери энергии. Диапазон входных напряжений также ограничен по тем же соображениям.

Последовательное соединение светодиодов

Большинство мощных белых светодиодов разрабатываются на рабочий ток 350 мА. Происходит это потому, что по законам химии их прямое напряжение должно быть порядка 3 В, а $3,0 \times 0,35 \approx 1$ Вт, что является удобной для светодиодов мощностью. Большинство DC/DC-драйверов стабильного тока для твердотельных излучателей света являются дробящими или понижающими (buck or step-down) преобразователями. Это означает, что максимальное выходное напряжение меньше, чем входное. Число светодиодов, которые могут управляться заданным напряжением, приведено в таблице 1.

Если входное напряжение нельзя менять (например, батарея), то максимальное число светодиодов должно быть сокращено в зависимости от минимального значения доступного входного напряжения.

Пример: сколько одноваттных светодиодов может управляться от 12-В свинцового кислотного аккумулятора?

Диапазон напряжений аккумулятора — 9–14 В.

Ограничение DC/DC-драйвера — 1 В. Следовательно, диапазон выходных напряжений драйвера — 8–13 В.

Если типовое* прямое напряжение $V_f = 3,3$ В, то максимальное число светодиодов, которыми можно управлять — 2.

Два излучателя — это не слишком много! Обойти данную проблему можно, используя

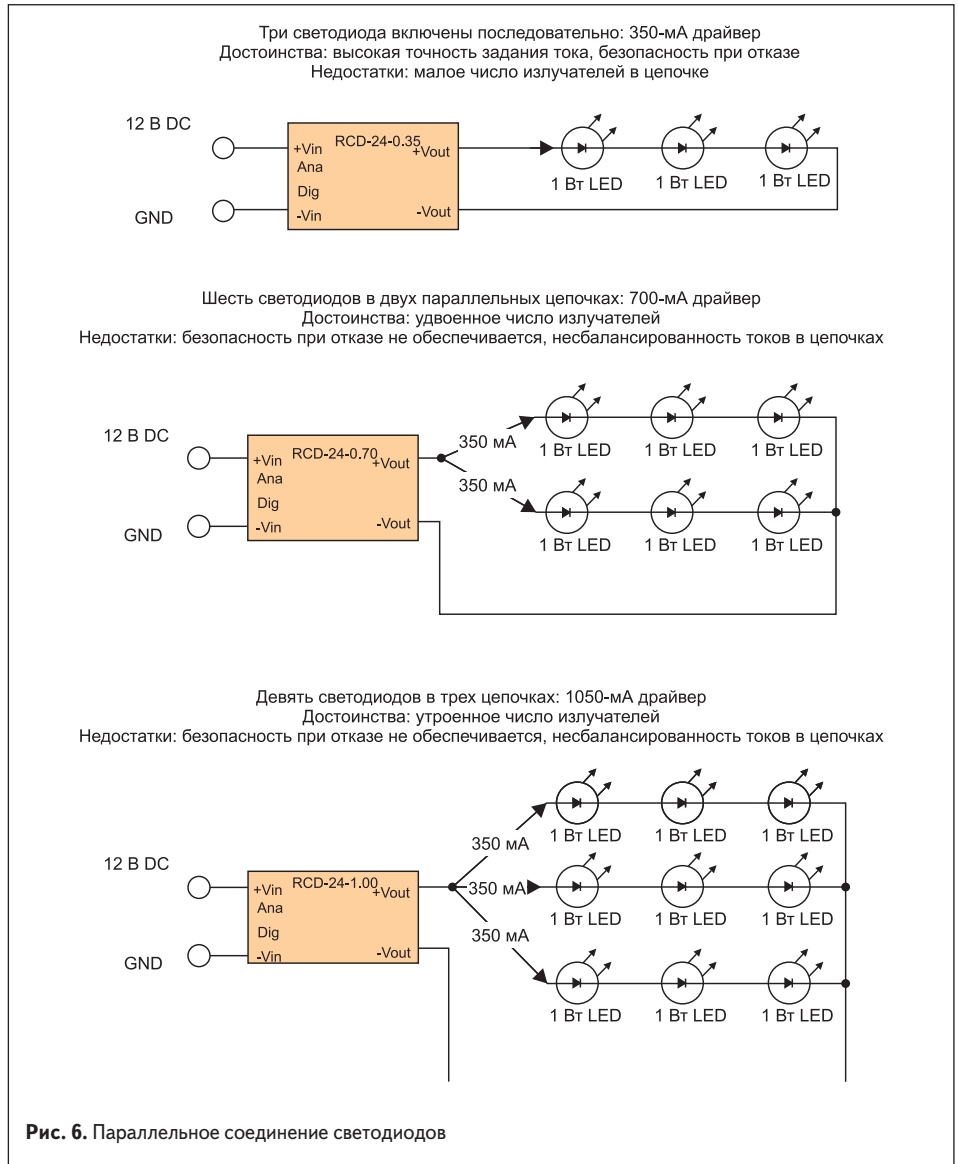


Рис. 6. Параллельное соединение светодиодов

повышающий преобразователь, у которого выходное напряжение превышает входное, или поставить в параллель две или более цепочки. Для каждой из них драйвер будет обеспечивать требуемые 350 мА; две, включенные в параллель, будут снабжаться током 700 мА, три — 1,05 А и т. д. Следовательно, выбор источника питания для светодиодов должен учитывать доступное входное напряжение и число цепочек, которыми необходимо управлять. На рис. 6 показаны некоторые варианты подключения типичных одноваттных белых светодиодов к 12-В источнику постоянного напряжения.

Наиболее безопасным и надежным методом является подключение к драйверу одной цепочки светодиодов. Если какой-то излучатель выйдет из строя и разомкнет цепь, подача тока к остальным прекратится. Если же один из них выйдет из строя и станет короткозамкнутой цепью, то оставшиеся по-прежнему будут снабжаться тем же током.

Достоинством управления многими светодиодами с помощью одного драйвера является собственно большое число излучателей, а недостатком — незащищенность в случае отказа. В случае двух параллельных цепочек при таком отказе светодиода, когда он разрывает цепь, все те же постоянные 700 мА потекут через оставшуюся цепочку, которая спустя весьма короткое время также прикажет долго жить. При трех параллельно включенных линейках в случае отказа одного излучателя две оставшиеся цепи будут делить между собой ток в один ампер. Обе окажутся перегруженными током в 500 мА. Возможно, что некоторое время они еще продержатся, это будет зависеть от качества теплоотвода, но со временем большой ток вызовет отказ другого светодиода, после чего третья цепочка примет на себя весь ток в один ампер и почти сразу же выйдет из строя.

Если же какой-то светодиод откажет и превратится в короткозамкнутую цепь, это вызовет перераспределение токов между цепями, но самый большой потечет через цепь со «старшим» прибором. В конце концов последняя откажет и вызовет «эффект домино», аналогичный описанному выше.

* Довольно распространено заблуждение, что число светодиодов, которыми можно управлять, зависит от максимального значения V_f , приведенного в технических характеристиках. На практике оказывается, что это не так, поскольку при достижении светодиодом рабочей температуры V_f значительно снижается. Поэтому вполне надежно можно использовать типовое значение, приведенное в технических характеристиках. Там, например, может быть указано, что минимальное значение $V_f = 3,0$ В, типовое — 3,3 В, максимальное — 3,6 В. Следовательно, даже при наличии падения на самом драйвере постоянный 24-В источник напряжения может надежно питать семь светодиодов, а 36-В — 10.

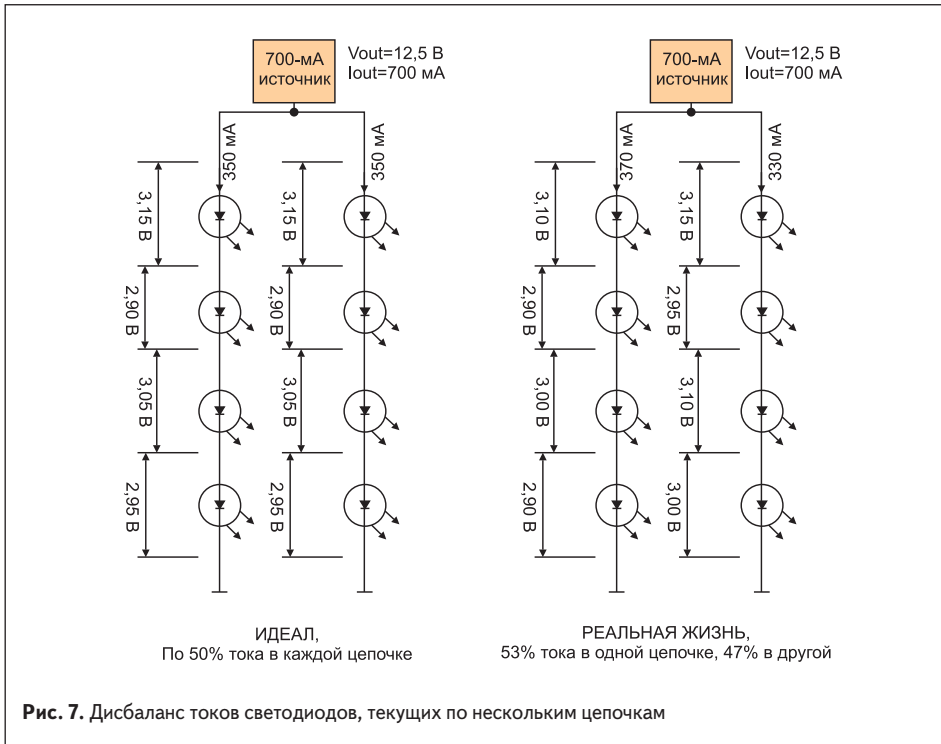


Рис. 7. Дисбаланс токов светодиодов, текущих по нескольким цепочкам

Мощные светодиоды надежны, поэтому описанные выше отказы могут происходить не слишком часто. Исходя из этого, большинство разработчиков твердотельного освещения выбирают удобный и дешевый вариант питания нескольких цепочек светодиодов от одного драйвера, хотя и осознают риск того, что при отказе одного из строя выйдут и многие другие излучатели.

Балансировка токов светодиодов в параллельных линейках

Еще одним важным предметом заботы разработчиков является балансировка токов, текущих по разным цепочкам. Мы знаем, что две или три цепи последовательно включенных светодиодов будут иметь различное общее, комбинированное (combined) прямое напряжение. Драйвер будет выдавать постоянный ток при напряжении, являющемся средним среди комбинированных прямых напряжений каждой цепочки. Это напряжение будет слишком высоко для одних цепочек и слишком низко для других, что приведет к неравномерному распределению тока (рис. 7).

Дисбаланс токов в приведенном выше примере не столь существен, чтобы вызвать отказ цепочки по причине перегрузки, и обе линейки будут работать надежно. Однако различие в интенсивности свечения составит 6%.

Решением проблемы несбалансированности токов является либо применение одного драйвера на цепочку либо добавление внешней схемы для уравнивания токов в них. Такая схема называется токовым зеркалом.

Первый NPN-транзистор работает как эталон. Второй — «отражает» этот ток. При таком включении токи в линейках автоматически делятся поровну. Одноомные резисторы в эмит-

терах теоретически не являются необходимыми для токового зеркала, но на практике помогают сбалансировать разницу в величинах V_{be} транзисторов и повышают точность уравнивания токов.

Также токовые зеркала могут защитить при отказе. Если какой-то светодиод в первой цепочке выйдет из строя и превратится в разомкнутую цепь, то вторая будет защищена (поскольку эталонный ток равен нулю, то токи в других линейках также падают до нуля). Если какой-либо светодиод превратится в короткозамкнутую цепь, то токи останутся равными. Однако при отказе светодиода во второй цепочке с превращением его в разомкнутую цепь токовое зеркало не сможет защитить светодиоды в первой линейке от перегрузки. Модификация схемы сможет помочь и в этой ситуации. Также возможно расширение токового зеркала на три и более последовательные цепи.

Некоторые производители светодиодов заявляют, что светодиоды автоматически делят ток поровну и такая внешняя «зеркальная» цепь не нужна. Это не так. Несмотря на то, что комбинированное прямое напряжение линеек излучателей абсолютно равно, дисбаланс всегда существует.

Если, к примеру, две параллельные линейки смонтированы на общем теплоотводе и по одной из них течет больший ток, то она будет светить ярче и иметь более высокую температуру. Температура теплоотвода будет расти медленно, постепенно вызывая уменьшение напряжения V_f второй линейки, что также приведет к ее попытке проводить больший ток. В теории из-за отрицательной обратной связи по температуре две цепочки должны выровнять свои токи. На практике этот эффект действительно имеет место, но его недостаточно для того, чтобы гарантировать точную балансировку. Более того, если две цепочки представляют из себя две отдельные светодиодные лампы, то они не будут иметь компенсирующей обратной связи по температуре. Одна из них, имеющая самое низкое значение комбинированного напряжения V_f , будет проводить наибольший ток, нагреется до большей температуры, и это напряжение продолжит снижаться. Это усугубит дисбаланс, и может привести к неконтролируемому росту температуры и отказу.

Когда схема, изображенная на рис. 8, впервые была опубликована, это вызвало критические замечания в Интернете, сводившиеся к тому, что токовое зеркало не является идеальным решением, а простая установка одноомных резисторов могла бы помочь уравнять токи. Это очевидно для экспертов, но если нужен точный баланс токов, то токовое зеркало все же является наилучшим и простым решением в противовес питанию каждой лампы от своего собственного драйвера.

Параллельные линейки или решетчатый массив — что лучше?

В главе «Последовательное соединение светодиодов» были рассмотрены последствия

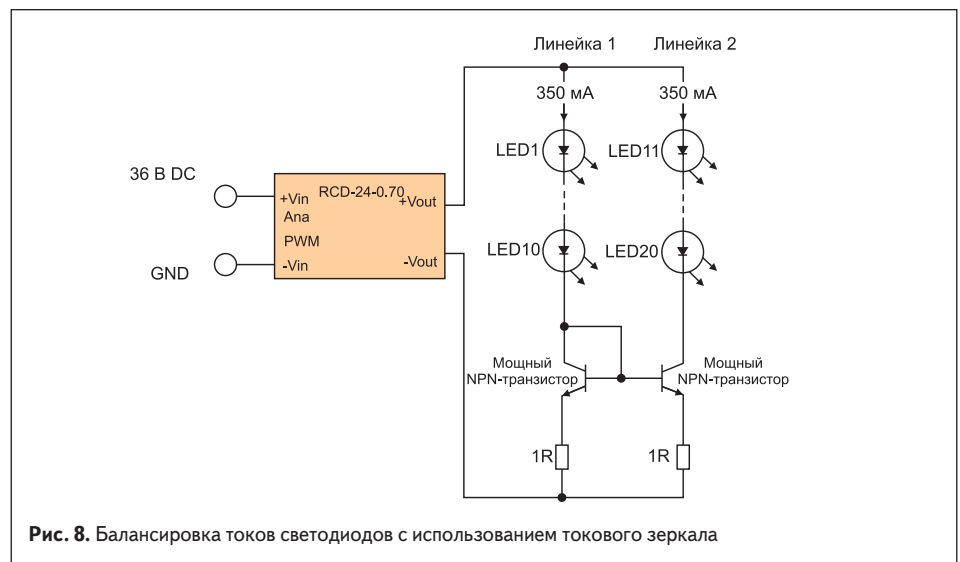


Рис. 8. Балансировка токов светодиодов с использованием токового зеркала

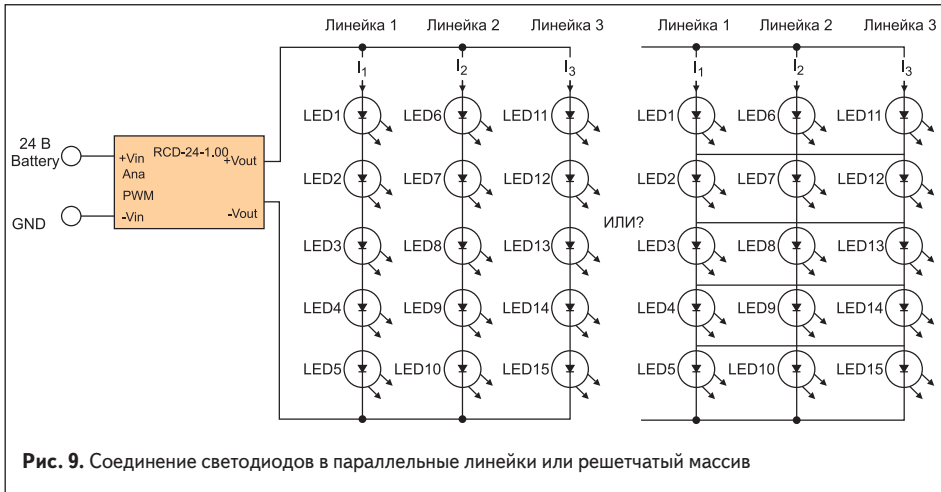


Рис. 9. Соединение светодиодов в параллельные линейки или решетчатый массив

отказа светодиода с превращением его в разомкнутую или короткозамкнутую цепь. Чем больше число параллельных линеек, тем меньше опасность отказа оставшихся излучателей в случае выхода из строя одного. Так, если в параллель включены пять цепочек, то в случае отказа одного светодиода с превращением его в разомкнутую цепь оставшиеся четыре будут нагружены на 125% каждая. Излучатели засияют ярче, но, если теплоотвод адекватный, вряд ли выйдут из строя. Недостатком параллельного соединения нескольких цепочек является необходимость установки способного обеспечить ток в несколько ампер драйвера, который может оказаться дорогим или труднодоступным. Перед включением такого драйвера все контактные устройства обязательно нужно прозвонить. Немало дорогих устройств на светодиодных лампах, питающихся от мощных драйверов, было выведено из строя из-за плохой электропроводки! Со светодиодными сборками, потребляющими большие токи, вообще следует обращаться аккуратно: так, например, неправильное подключение элементов может повлечь за собой нарушение предельных режимов работы и ускоренный износ.

На практике более безопасно ограничить количество параллельных цепочек, подключенных к одному драйверу, до пяти или менее; если необходимо управлять большим количеством светодиодов, лучше применять несколько менее мощных источников взамен одного с большим током. Хорошей идеей является использование более длинных цепочек, поскольку при закорачивании одного ток через оставшиеся излучатели увеличится тем меньше, чем больше будет составляющих ее элементов.

Следующий вопрос — что лучше: соединять светодиоды в отдельные цепочки или, добавив перекрестные контакты, получить массив (рис. 9)? Следующий пример, в котором использованы 15 светодиодов, иллюстрирует эти две возможности (в обоих случаях использо-

вался один и тот же драйвер). Можно было бы соединить эти 15 излучателей в пять столбцов по три светодиода, но, согласно приведенным выше соображениям, три столбца по пять будет более надежным монтажом.

Преимуществом решетчатого массива является то, что в случае единичного отказа все остальные его колонки не выйдут из строя, и только строка, где произошло ЧП, окажется перегружена. Если же какой-то излучатель выйдет из строя, превратившись в короткозамкнутую цепь, то его соседи по строке светить более не станут, но токи через остальные все равно останутся корректными. Важно, что 15 светодиодных ламп являются надежными, и даже в случае превращения одного светодиода в короткозамкнутую или разомкнутую цепь они будут продолжать излучать свет. Таким образом, решетчатый массив является наилучшим способом соединения светодиодов.

Недостатком решетчатого массива является то, что V_f усредняется по всем строкам и наличие допуска в 20% на прямое напряжение отдельного светодиода может означать, что не все они будут светить одинаково. Это может привести к наличию более ярких, чем остальные, точек и сокращению времени жизни некоторых излучателей.

Важно отметить, что поскольку 15 светодиодных ламп имеют очень ровный выход света без ярких точек, то наилучшим решением будет их монтаж в параллельные цепочки. Если необходимо обеспечить как защиту от отказов, так и ровное свечение, то лучше включить три линейки и три драйвера с током по 350 мА.

Температурный анализ. Практические примеры

Чтобы мощные светодиоды имели время жизни, близкое к указанному в их технических характеристиках, необходим хороший теплоотвод. Первый вопрос, который приходит

на ум, — почему высокоэффективные полупроводниковые источники света нагреваются? Может показаться противоречащим здравому смыслу то, что светодиод со световой эффективностью около 50 лм/Вт нуждается в более тщательном температурном дизайне, чем, скажем, прожектор, обладающий лишь частью такой эффективности.

Ясность может внести следующий пример. 100-Вт галогенный прожектор будет излучать 5 Вт света (мощность излучения). Из оставшихся 95 Вт потребленной мощности 80 Вт уйдет вовне в виде инфракрасного излучения и только 15 Вт будет рассеиваться корпусом в виде тепла. 50-Вт светодиод также будет излучать 5 Вт полезного света, но все оставшиеся 45 Вт мощности будут в виде тепла подведены к его конструктивному окружению. Следовательно, хотя эффективность светодиодного светильника в два раза выше, чем у лампы накаливания, его корпус должен быть разработан так, чтобы справиться с в три раза большим потоком подводимого тепла.

Другим существенным отличием светильника на светодиоде и лампы накаливания является то, что последней высокая температура необходима для функционирования (нить накаливания раскаляется добела), в то время как при температуре перехода более 100 °C время жизни светодиода резко сокращается (табл. 2).

С повышением температуры у мощных светодиодов снижается также и световая эффективность. Приведенные в технических характеристиках цифры выходного светового потока обычно даются только для 25 °C. При 65 °C происходит потеря 10% яркости, а при 100 °C — 20% (рис. 10).



Рис. 10. Зависимость светового потока светодиода от температуры его перехода

Таким образом, хорошо спроектированная светодиодная лампа будет работать при температуре подложки, не превышающей примерно 65 °C. Единственной гарантией от перегрева полупроводникового излучателя являются меры по ограничению роста температуры. В следующем разделе будут приведены некоторые практические примеры.

Таблица 2. Зависимость времени жизни светодиода от температуры перехода

Температура перехода, °C	<100	100–115	115–125	>125
Время жизни светодиода 50-Вт: 50% показатель долговечности, тыс. часов	100	75	50	20

Продолжение следует.