

# Светодиод — такой знакомый и неизвестный.

## Часть 1: история, особенности применения

С 1960 г. светодиоды прошли путь от не особо ярких индикаторов красного цвета свечения до приборов, чей спектр излучения простирается от ультрафиолета (GaN) до среднего инфракрасного диапазона (PbS); от источников красного света до монохроматических красных, зеленых и синих лазеров и до светодиодов на основе органических соединений; по яркости — от еле видимой до уже достаточной для обычных индикаторов и до сверхъярких мощных светодиодов, которые 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 [10]. На базе светодиодов выполнены знаковые индикаторы, матрицы, панели и большие телевизионные экраны. За основу данной публикации взяты отдельные главы из [4] в авторском переводе с комментариями и дополнениями автора статьи.



Сказать, что тема светодиодов сегодня в тренде, — это нечего не сказать. После того как в начале 1990-х исследователи и ученые из университета Нагоя Исаму Акасаки (Isamu Akasaki), Хироши Аmano (Hiroshi Amano) и Сюдзи Накамура (Shuji Nakamura), работавший в то время исследователем в японской корпорации Nichia Chemical Industries, изобрели дешевый синий светодиод (на базе нитрида галлия), светодиоды из элементов индикации ворвались в такие области, как автомобильная промышленность и системы освещения. За это открытие всем троим была присуждена Нобелевская премия по физике в 2014 г. [1]. Изобретение недорогих синих светодиодов открыло путь к созданию и успешному коммерческому применению белых светодиодов на основе частичного переизлучения голубой части спектра в свет с большими длинами волн (желтый, красный) при помощи люминофоров.

Можно подумать, что светодиоды — это, в общем, достаточно новое направление в электронике. Но если заглянуть в историю, то читатели будут весьма удивлены. Действительно, для инженеров старой школы история светодиодов началась в 70-х годах прошлого века с АЛ102 (первым был АЛ101) и более поздних, в трех цветовых вариантах, АЛ307 (красный, желтый и зеленый) или такого «шедевра» советской промышленности, как АЛ310, и уже вполне приличных, имеющих варианты исполнения с высокой, как на уровне начала 80-х годов, яркостью — АЛ336 (к сожалению, выпускавшихся только в прозрачных желтых корпусах). Однако история светодиодов началась задолго до их широкого применения, еще на самой заре даже не электроники, а радиотехники.

Первое известное сообщение об излучении света твердотельным прообразом диода было сделано в 1907 г. британским экспериментатором Генри Раундом (Henry Joseph Round), который обнаружил эффект электролюминесценции. Позже, в 1923 г., эти эксперименты были независимо повторены Олегом Владимировичем Лосевым [2] во время его работы в нижегородской радиолaborатории. Для исследований он использовал карбид кремния (SiC) и обнаружил в точке контакта двух разнородных материалов (известной нам сейчас, как полупроводниковый переход) слабое желтое и оранжевое свечение. Результаты

исследования были опубликованы, но теоретического объяснения явлению тогда не было, оно не было понято и не исследовалось в течение многих десятилетий. Тем не менее О. В. Лосев вполне оценил практическую значимость своего открытия, позволявшего создавать малогабаритные твердотельные (безвакуумные) источники света с очень низким напряжением питания (менее 10 В) и очень высоким быстродействием. Им были получены два авторских свидетельства на «Световое реле» (первое заявлено в феврале 1927 г.). К сожалению, в 38 лет ученый умер от голода во время блокады Ленинграда, и даже место захоронения этого талантливого советского физика неизвестно.

Первый в мире практически применимый светодиод, а более правильно — светоизлучающий диод, полупроводниковый прибор с электронно-дырочным переходом, создающий оптическое излучение при пропускании через него электрического тока в прямом направлении (Light-Emitting Diode, LED), был разработан в 1962 г. для компании General Electric. Его изобрел работающий в Университете Иллинойса Ник Холоньяк (Nick Holonyak Jr.). А инфракрасный светодиод на основе арсенида галлия (GaAs) был запатентован еще на год раньше — в 1961 г. Его открыл инженер Роберт Байард (James R. «Bob» Biard) из компании Texas Instruments. Светоизлучающий диод Холоньяка был выполнен на структурах GaAsP/GaP и излучал красный свет. Таким образом, Ник

Холоньяк по праву считается «отцом современного светодиода», как источника видимого света. Мы не будем вдаваться в тонкости, кто здесь важнее, и поставим имена этих ученых и инженеров в один ряд (рис. 1), ибо все они внесли свой незаменимый вклад в развитие этой важной и динамически развивающейся отрасли электроники.

Цель данной публикации — не история, хотя и она интересна (достаточно подробно она изложена в [3]) и не рассмотрение чисто конструктивных особенностей светодиодов различных типов и технологий, хотя эта тема также заслуживает внимания. Этим проблемам и возникающим вопросам применения светодиодов и светодиодного освещения на профессиональном уровне посвящено большое число статей в специализированных изданиях, например таких, как русскоязычные «Полупроводниковая светотехника», «Современная светотехника» или зарубежные, как, например, *LED Magazine* и *LED professional*. Схемотехнические проблемы управления светодиодами рассматриваются в узконаправленных изданиях компаний — изготовителей микросхем драйверов, например в *LT Journal of Analog Innovation* компании Linear Technology (с недавних пор русскоязычная версия доступна на сайте компании ГАММА: [www.icgamma.ru/news1](http://www.icgamma.ru/news1)). Задача нашей статьи скромнее, а именно — не вдаваясь в излишнюю детализацию, предоставить непрофессионалам в данной области базовые знания по особенностям применения этих,

безусловно, одних из самых популярных электронных компонентов.

Поскольку первое правило войны гласит: «знай своего врага», и этот принцип касается светодиодов как приборов твердотельного освещения SSL (Solid State Lighting, SSL), начнем рассмотрение особенностей их применения с азов. Никто же не начинает изучение математики с решения дифференциальных уравнений... Если вы не понимаете, как ведет себя светодиод, то не удивляйтесь тому, что ваше приложение окажется неработоспособным.

Светодиоды являются нелинейными устройствами, причем если к ним приложено низкое напряжение, то ток через светодиод не проходит, и он не светится. По мере увеличения напряжения, когда будет пройдено его некоторое пороговое значение, светодиод внезапно начинает излучать свет, а ток через него резко возрастает. Если напряжение продолжает увеличиваться, то светодиод быстро перегревается и выходит из строя. Так что проблема заключается в том, чтобы управлять светодиодом в узком диапазоне между его полным включением и выключением. Это поясняет вольт-амперная характеристика (ВАХ) светодиода, приведенная на рис. 2.

Однако здесь не все так просто, как на первый взгляд может показаться. Рабочая область напряжения у различных светодиодов, особенно мощных, использование которых представляет для применения наибольший интерес, отличается. Это



Рис. 1. Первооткрыватель светодиода О. В. Лосев, изобретатель первого в мире инфракрасного светодиода Роберт Байард и разработчик светоизлучающего диода практического применения Ник Холоньяк (слева направо)

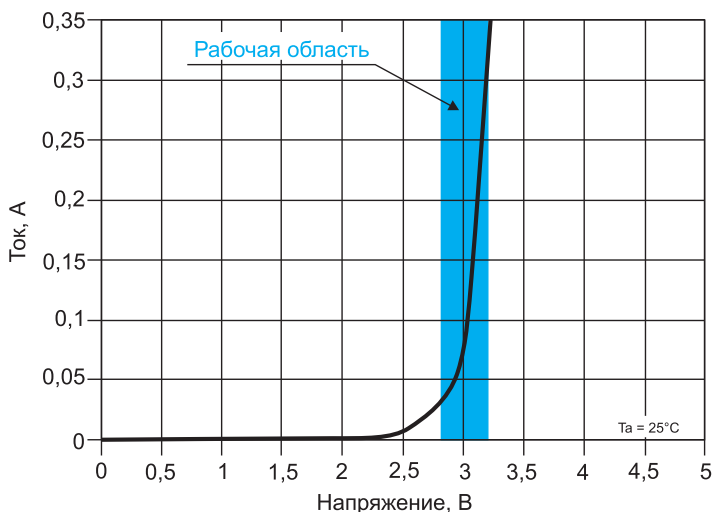


Рис. 2. Рабочая область ВАХ типowego мощного светодиода (при температуре окружающей среды  $T_{AMB} = +25\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

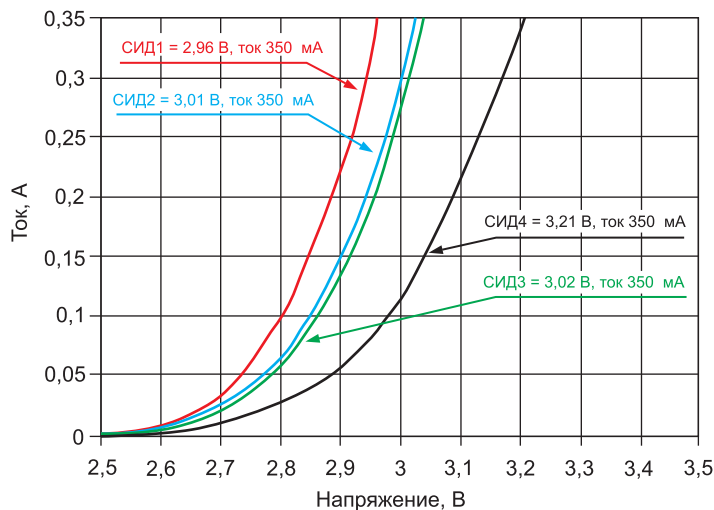


Рис. 3. Разброс ВАХ светодиодов

различие имеется даже в пределах светодиодов от одного поставщика и даже одной партии. Кроме того, изменение рабочей точки по напряжению тесно связано с температурой самого светодиода и температурой окружающей среды, также она изменяется в зависимости от времени наработки светодиода.

На рис. 3 рабочая область ВАХ светодиода показана более подробно. В этом примере были исследованы четыре одинаковых светодиода, которые, если верить их техническому описанию, имеют одинаковые электрические параметры. Кроме того, все производители светодиодов вынуждены сортировать свою продукцию, причем вне зависимости от цвета излучения. Этот процесс сортировки называется «биннинг» — светодиоды тестируются в процессе производства и разбраковываются на группы в соот-

ветствии с их коррелированной цветовой температурой, которая обычно обозначается CCT (Correlated Color Temperature).

Следствием этого является то, что светодиоды, даже в пределах одной партии, оказываются смешанными, и такая партия может включать в себя несколько различных серий продукции. Следовательно, ее электрические характеристики колеблются в более широких пределах пороговых значений, или более правильно говорить — по прямому падению напряжения  $V_F$ , чем этого хотелось бы. Для большинства светодиодов высокой мощности в спецификациях указывается допуск  $V_F$ , который обычно составляет около 20%, так что те широкие разбросы по ВАХ, которые показаны на рис. 3, — далеко не преувеличение.

В этом примере (рис. 3), если мы выбираем рабочую точку по напряжению, скажем, равную 3 В, то светодиод 1 оказывается перегруженным, так как через него начнет течь очень высокий ток, через светодиод 2 проходит ток 300 мА, через светодиод 3 — ток 250 мА, а через светодиод 4 проходит ток всего в 125 мА.

Кроме того, приведенные ВАХ не являются чем-то неизменным и фиксированным.

По мере того как светодиоды нагреваются до своих рабочих температур, кривые ВАХ смещаются влево. Причина кроется в том, что с ростом температуры прямое напряжение светодиодов  $V_F$  уменьшается.

Яркость свечения светодиода прямо пропорциональна протекающему через него току (рис. 4), так что в приведенном выше примере с рабочей точкой по напряжению в 3 В светодиод 1 будет гореть, как сверхновая, но не долго, светодиод 2 будет светиться немного ярче, чем светодиод 3, а светодиод 4 будет светиться совсем тускло.

Какой же выход из положения? Решение проблемы, связанной с непостоянством прямого падения напряжения  $V_F$ , заключается в использовании для управления светодиодами постоянного (в данном контексте — стабилизированного) тока, а не привычного стабильного напряжения.

Самый простой источник стабилизированного тока получается в том случае, если питание светодиодов осуществляется через резистор от источника стабилизированного напряжения (рис. 5).

Но все ли так просто? Если падение напряжения на таком токостабилизирующем резисторе примерно такое же, как и прямое

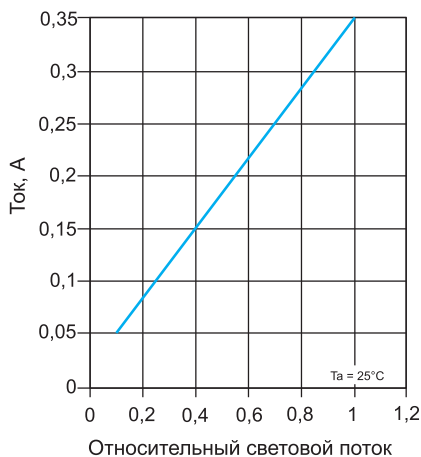


Рис. 4. Зависимость светового потока светодиода от прямого тока

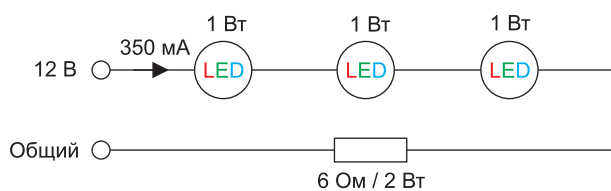


Рис. 5. Использование токостабилизирующего резистора

напряжение светодиода, то изменение  $V_F$  на 10% вызывает аналогичное изменение тока светодиодов (сравните это с кривыми, показанными на рис. 3, где изменение  $V_F$  на 10% вызывает изменение тока светодиода на 50%). Это решение является наиболее дешевым, но имеет плохую стабилизацию тока и крайне низкий КПД. Из-за низкой стоимости этого решения оно часто используется в кластерных светодиодных лампах, то есть лампах с несколькими работающими совместно светодиодами, которые представляют собой единый управляемый светодиодный излучатель. Лампы этого типа часто предлагаются в качестве замены галогенных ламп с низким рабочим напряжением. Само собой разумеется, если при использовании такого решения имеет место внутреннее короткое замыкание светодиода, токостабилизирующий резистор будет перегружен, и, как правило, он сгорит в течение относительно короткого времени; таким образом, срок службы этих кластерных светодиодных ламп является относительно коротким.

На первый взгляд все понятно. Поэтому, чтобы прояснить ситуацию, выполним несложные расчеты. Допустим, имеется источник напряжения постоянного тока с напряжением 10–14 В (обычный 12-В свинцово-кислотный аккумулятор), и мы подключаем к нему цепочку из последовательно соединенных светодиодов с токоограничивающим резистором (без него, как уже было пояснено, использовать светодиоды просто нельзя). Максимально возможное количество последовательно включенных светодиодов определяется исходя из минимально возможного напряжения питания и величины прямого падения напряжения на светодиоде:

$$N \leq (V_{IN-MIN} / V_F - 0,5),$$

где:  $N$  — количество светодиодов в последовательной цепочке (берется целая часть числа);  $V_{IN-MIN}$  — минимально возможное напряжение питания, для рассматриваемого случая равно 10 В;  $V_F$  — типовое падение напряжения на светодиоде при выбранном прямом токе.

При прямом токе, например 10 мА, прямое падение напряжения для обычных светодиодов красного и зеленого цветов свечения равно 2 В (если быть более точным, то типовое значение составляет 1,85 В). Таким образом, при минимальном напряжении 10 В количество последова-

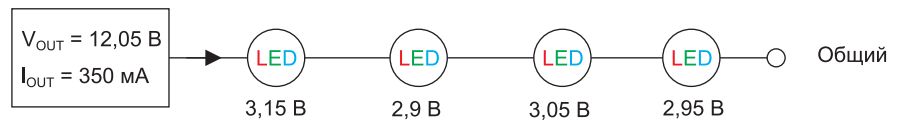


Рис. 6. Последовательное включение светодиодов с драйвером тока

тельно включенных светодиодов не может быть более:

$$N \leq (10 / 2 - 0,5) = 4,5 = 4.$$

Для обеспечения нормальной работы этой цепочки из четырех светодиодов потребуется токоограничивающий резистор с номинальным значением сопротивления:

$$R_{LIM} = (V_{IN-MIN} - N \times V_F) / I_{LED},$$

где  $I_{LED}$  — выбранный прямой ток через светодиод.

$$R_{LIM} = (10 - 4 \times 2) / 0,010 = 200 \text{ Ом}.$$

Однако при этом резисторе ток через цепочку при максимально возможном напряжении 14 В составит не выбранные нами 10 мА, а

$$I_{LED-MAX} = (V_{IN-MAX} - N \times V_F) / R_{LIM} = (14 - 4 \times 2) / 0,20 = 30 \text{ мА}.$$

При входном напряжении 18 В, а это в автомобилях вполне реальная ситуация, ток через светодиоды будет равен уже 50 мА, т. е. ток возрастет от выбранного нами в пять раз! Как результат, светодиоды будут перегружены и быстро выйдут из строя.

Для того чтобы сохранить ток через светодиод постоянным, а следовательно, и обеспечить постоянной яркостью свечения светодиода, его схема управления, называемая драйвером, должна автоматически регулировать прилагаемое к светодиоду

напряжение, то есть стабилизировать ток. Такое решение работает как с одним светодиодом, так и с цепочкой последовательно соединенных светодиодов. До тех пор пока ток через все светодиоды сохраняется на заданном уровне, они будут иметь одинаковую яркость, даже если значение  $V_F$  каждого отдельного светодиода отличается (рис. 6).

По мере того как светодиоды нагреваются до рабочей температуры, драйвер со стабилизацией тока автоматически снижает свое выходное напряжение. Это необходимо для того, чтобы через светодиоды протекал неизменный ток, который и обеспечит заданную яркость свечения светодиодов вне зависимости от их рабочей температуры и напряжения питания.

Еще одним важным преимуществом является то, что драйвер со стабилизацией тока гарантирует, что ни один из светодиодов в последовательной цепи не будет перегружен по мощности, т. е. все они будут иметь характерный для этих полупроводниковых приборов продолжительный срок службы. Если какой-либо светодиод откажет и этот отказ вызовет короткое замыкание, то все остальные светодиоды продолжат работать с заданным для них током.

Простейшим решением источника стабильного постоянного тока является использование специальных линейных стабилизаторов тока. На рынке имеется несколько бюджетных светодиодных драйверов, которые используют этот метод. Кроме того, здесь часто используют стандартный линейный стабилизатор напряжения (рис. 7), который может

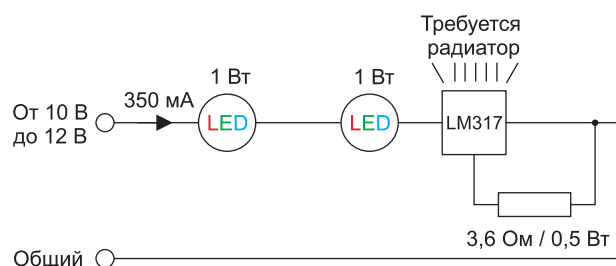


Рис. 7. Линейный стабилизатор тока на примере интегрального стабилизатора напряжения

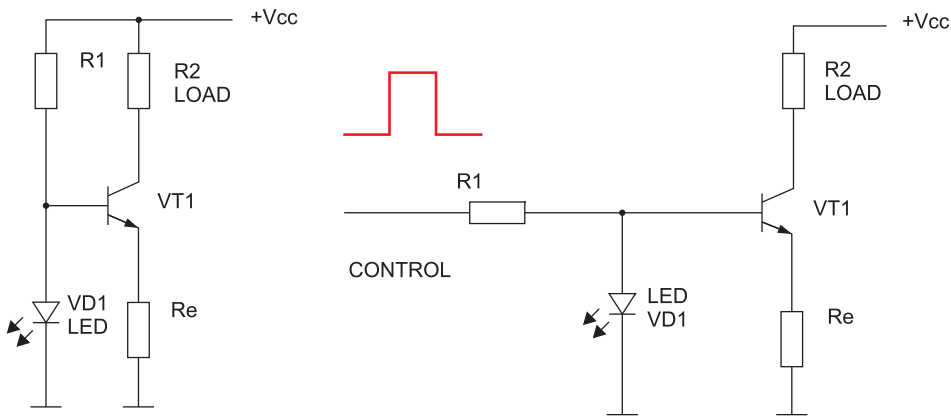


Рис. 8. Статический (а) и динамический (б) варианты исполнения термокомпенсированного стабилизатора тока с использованием светодиода в качестве источника опорного напряжения

быть включен в режим стабилизации тока, а не напряжения. Например, LM317 от компании Texas Instruments [5], рассчитанный на рабочий ток 1,5 А. В этом случае схема внутренней обратной связи сохраняет ток на заданном уровне с точностью около  $\pm 5\%$ . Ток в такой схеме задается резистором, номинал которого, согласно [5], рассчитывается как  $R = 1,2/I_{LIM} = 1,2 \text{ В}/0,35 \approx 3,6 \text{ Ом}$ . Но избыточная мощность, характерная для этого решения, переходит в тепло, так что здесь для микросхемы стабилизатора требуется хороший теплоотвод. Недостатком является низкий КПД решения, что идет вразрез с концепцией использования источников твердотельного освещения именно как высокоэффективных устройств.

Для ярких светодиодов малой мощности с рабочими токами до 50 мА, которые используются в индикаторных информационных панелях и световых надписях, можно использовать стабилизаторы тока светодиодов, выполненные на основе... самих светодиодов. Описание решений со всеми необходимыми сопутствующими расчетами приведено в [6, 7]. В основу решения положена известная схема стабилизатора тока, использующая в качестве источника опорного напряжения два последовательно включенных диода, которые заменены на светодиод (рис. 8), а генератором тока выступает соответствующий биполярный транзистор.

Ток задается эмиттерным резистором  $R_e$ , а нагрузка  $R_2$  (LOAD) — это один или более последовательно включенных светодиодов. Динамический режим осуществляется подачей напряжения логического уровня на вход CONTROL. Номинал

резистора  $R_1$  выбирается из расчета тока через опорный светодиод VD1 (LED), равного 3–5 мА. Преимущество схемы — ее простота и хорошая температурная стабильность. Это связано с тем, что ТКН (температурный коэффициент напряжения) по  $V_F$  маломощного светодиода достаточно точно соответствует зависимости изменения напряжения «база–эмиттер» у кремниевых транзисторов, чем, собственно, и достигается температурная компенсация (традиционные два диода и стабилитрон этого не обеспечивают, так как у них ТКН иной). Ток задается исходя из условия:

$$I_{LED} = (1 - 1/h_{FE}) \times (V_F - V_{BE}) / R_e,$$

где:  $V_{BE}$  — напряжение «база–эмиттер» транзистора, для маломощных кремниевых транзисторов можно брать равным 0,68 В;  $h_{FE}$  — коэффициент усиления транзистора по току. Если для выбранного транзистора  $h_{FE} \geq 50$  (например, BC817-40 [9]) с  $h_{FE}$  в пределах 250–600, то множитель  $(1 - 1/h_{FE})$  можно принять равным единице.

Решение подходит для опорных светодиодов с небольшим  $V_F$  — от 1,5 до 2 В. Например, автором статьи в последних разработках использовались светодиоды типа KP-2012SURCK компании Kingbright для поверхностного монтажа типоразмера 0805 с типовым  $V_F = 1,85 \text{ В}$  (экспериментально определенное значение для тока опорного светодиода 3–5 мА). В этом случае для тока светодиодной цепочки 18 мА при  $V_F = 1,85 \text{ В}$  имеем  $R_e = 63 \text{ Ом}$ .

Критерием реализуемости схемы является превышение минимально допустимого напряжения на регулирующем транзисторе

VT1  $V_{VT-MIN}$ , равного 0,75 В при минимальном напряжении питания, то есть:

$$0,75 \text{ В} \leq V_{IN-MIN} - (N \times V_F + R_e \times I_{LED}).$$

Для варианта с напряжением питания  $V_{CC}$ , равным  $V_{IN-MIN} = 10 \text{ В}$ , с четырьмя диодами в цепочке, при токе 18 мА правая часть формулы равна:

$$10 - (4 \times 2 \text{ В} + 63 \text{ Ом} \times 0,018 \text{ А}) = 0,9 \text{ В}.$$

Это означает, что такое решение в заданных условиях является технически реализуемым, так как превышает предельные 0,75 В.

Недостаток данного решения, как и предыдущего, — это невысокий КПД, что становится критическим на высоких мощностях, и здесь, возможно, потребуются использование теплоотвода. Достоинство — опорный светодиод является не только индикатором включения, что удобно при управлении инфракрасными светодиодами и знако-цифровыми индикаторами, но и индикатором отсутствия обрыва в нагрузке, в этом случае он не светится. Кроме того, имеется возможность подключения к одному опорному светодиоду нескольких цепочек светодиодов с отдельными управляющими транзисторами, доступна и простая реализация динамического режима, в том числе регулировка яркости цифровым сигналом с широтно-импульсной модуляцией. Описанные в [6, 7] решения неоднократно и с неизменным успехом использовались автором статьи на практике, в том числе и для создания светодиодных статических и динамических надписей, кластерных бестеневых инфракрасных прожекторов, в системах машинного зрения для управления включением и током инфракрасной импульсной подсветки (фотовспышки) и еще целого ряда применений. Для предлагаемого решения с транзисторами BC817-40 и  $I_{LED} = 18 \text{ мА}$  экспериментально установлено, что в условиях «четыре светодиода в цепочке» при изменении напряжения питания от 10 до 18 В ток, в отличие от варианта с токоограничивающим резистором, изменяется менее чем на 15% без заметного изменения яркости с минимальным изменением во всем диапазоне рабочих температур.

Справедливости ради следует отметить, что имеется еще целый ряд решений для

стабилизации тока на основе исключительно резисторов и конденсаторов, которые используются в ретрофитных светодиодных лампах, то есть предназначенных для прямой замены устаревших типов ламп, например ламп с нитью накаливания, работающих от сети переменного тока 230 В/50 Гц. Бездрайверные решения для таких ламп, приведенные в [8], отличаются высоким КПД и отсутствием характерного для недорогих светодиодных (и не только светодиодных) ламп такого вредного явления, как мерцание.

Однако какой бы ни была простота приведенных выше решений, их применение ограничено максимальным током, напряжением питания или КПД.

Наилучшим решением в части получения стабильного тока является импульсный преобразователь, и эта тема будет затронута в следующей части данной публикации. ●

*Продолжение следует.*

### Литература:

1. [www.bbc.com/russian/science/2014/10/141007\\_nobel\\_physics\\_led](http://www.bbc.com/russian/science/2014/10/141007_nobel_physics_led)
2. <http://r3i.qrz.ru/losev.htm>
3. [www.electronicweeky.com/news/products/led/50-year-history-of-the-led-2-2010-09](http://www.electronicweeky.com/news/products/led/50-year-history-of-the-led-2-2010-09)
4. Steve Roberts. DC/DC BOOK OF KNOWLEDGE: Practical tips for the User. Second Edition. 2015.
5. [www.ti.com/lit/ds/symlink/lm317.pdf](http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm317.pdf)
6. Rentyuk Vladimir. The Simple Temperature-Stabilised Constant-Current Source // Electronics World. NOVEMBER, 2006.
7. Рентюк В. Использование светодиодов в устройствах индикации // Электрик. 2011. № 7,8.
8. Шекл Питер. Бездрайверные светодиодные излучатели с КПД до 93% и без видимого мерцания // Полупроводниковая светотехника. 2014. № 6.
9. [www.nxp.com/documents/data\\_sheet/BC817\\_BC817W\\_BC337.pdf](http://www.nxp.com/documents/data_sheet/BC817_BC817W_BC337.pdf)
10. Эшдаун Ян «Светодиодное освещение для растениеводства» // Полупроводниковая светотехника, 2015 №4