

Ф. Цваненберг (V. Zwanenberg) |

Эффективные драйверы для СИД с регулируемой яркостью

В последние годы производительность светодиодов постоянно возрастает. Эти устройства достигли достаточного уровня зрелости в области общего освещения, и рынок начинает активно принимать данную технологию. Основным преимуществом светодиодных приборов по сравнению с обычными лампами является возможность регулировки яркости в сочетании с экономией электроэнергии и значительно большим сроком их службы. Но это может быть реализовано лишь при оптимизации температурного, светотехнического и электронного аспектов. Есть несколько факторов, относящихся к электронной части, которые влияют на эффективность светодиодных ламп.

Выбор топологии

Для подключения светодиодной лампы требуется электрическая цепь, которая адаптировала бы напряжение сети к электрическим характеристикам СИД (светоизлучающий диод). Хотя последовательное соединение большого числа слаботочных СИД может избавить от необходимости импульсного преобразования, этот метод неприменим для выпускаемых сегодня высокоомощных силовых светодиодов. Для них чаще всего используются следующие преобразователи:

- понижающий, в котором входное напряжение преобразуется в необходимый ток нагрузки с помощью катушки индуктивности (рис. 1);
- обратноходовой, в котором мощность преобразуется трансформатором (рис. 2).

Понижающий преобразователь напрямую регулирует выходной ток, обеспечивая тем самым максимальную эффективность, однако у него отсутствует гальваническая развязка. Обратноходовой преобразователь имеет гальваническую

развязку и дает большую свободу регуляции, но ему требуется опосредованный способ определения характеристик тока, подаваемого на СИД. Соотношение между входным и выходным напряжением определяет коэффициент заполнения и влияет на пиковый ток и эффективность. При использовании обратноходового преобразователя можно откорректировать число витков обмотки, чтобы снизить пиковый ток и тем самым оптимизировать продолжительность включения. Снижение пикового тока первичной обмотки также позволяет уменьшить стоимость и сложность сетевого фильтра. Для иллюстрации сказанного приведем расчеты, основанные на упрощенной модели, не учитывающей потери емкости и на переменном токе.

Пример 1

$$V_{in} = 300 \text{ В}, V_{fСИД} = 3 \text{ В}, I_{led} = 2 \text{ А}, P_{out} = 7 \text{ Вт}.$$

Понижающая топология: $R_1 = 1 \text{ Ом}, R_s = 5 \text{ Ом}, U_d = 0,7 \text{ В}$, продолжительность включения — $3/300 = 1\%$, $I_{peak} = 4 \text{ А}$ (режим ВСМ).

$$P_{ri} = 1/3 \times 4^2 \times 1 \times 100\% = 5,33 \text{ Вт};$$

$$P_{rs} = 1/3 \times 4^2 \times 5 \times 1\% = 0,27 \text{ Вт};$$

$$P_d = 0,7 \times 2 \times 99\% = 1,39 \text{ Вт};$$

$$P_{in} = 14 \text{ Вт}, \eta = 50\%.$$

Обратноходовая топология: $R_p = 6 \text{ Ом}, R_s = 0,1 \text{ Ом}$, соотношение — 50:1, $T_1 = 33\%, T_2 = 66\%$, $I_{peaksec} = 6 \text{ А}, I_{peakprim} = 120 \text{ мА}$ (режим ВСМ).

$$P_{rp} = 1/3 \times 0,12^2 \times 6 \times 33\% = 10 \text{ мВт};$$

$$P_{rs} = 1/3 \times 6^2 \times 0,1 \times 66\% = 0,792 \text{ Вт};$$

$$P_d = 3 \times 0,7 \times 66\% = 1,39 \text{ Вт};$$

$$P_{in} = 9,19 \text{ Вт}, \eta = 76\%.$$

Пример 2

$$V_{in} = 175 \text{ В}, V_{fСИД} = 35 \text{ В}, I_{led} = 200 \text{ мА}, P_{out} = 7 \text{ Вт}.$$

Понижающая топология: $R_1 = 1 \text{ Ом}, R_s = 5 \text{ Ом}, U_d = 0,7 \text{ В}$, продолжительность включения — $35/175 = 20\%$. $I_{peak} = 0,4 \text{ А}$ (режим ВСМ).

$$P_{ri} = 1/3 \times 0,4^2 \times 1 \times 100\% = 53 \text{ мВт};$$

$$P_{rs} = 1/3 \times 0,4^2 \times 5 \times 20\% = 53 \text{ мВт};$$

$$P_d = 0,7 \times 0,2 \times 80\% = 112 \text{ мВт};$$

$$P_{in} = 7,218 \text{ Вт}, \eta = 97\%.$$

Обратноходовая топология: $R_p = 6 \text{ Ом}, R_s = 1 \text{ Ом}$, соотношение — 5:1, $T_1 = 50\%, T_2 = 50\%$. $I_{peaksec} = 0,8 \text{ А}, I_{peakprim} = 160 \text{ мА}$ (режим ВСМ).

$$P_{rp} = 1/3 \times 0,16^2 \times 6 \times 50\% = 26 \text{ мВт};$$

$$P_{rs} = 1/3 \times 0,8^2 \times 1 \times 50\% = 106 \text{ мВт};$$

$$P_d = 0,4 \times 0,7 \times 50\% = 140 \text{ мВт};$$

$$P_{in} = 7,27 \text{ Вт}, \eta = 96\%.$$

Таким образом, выбор между понижающей или обратноходовой топологиями обусловлен рядом факторов, а именно: конструкцией лампы, потребностью в гальванической развязке и используемыми СИД. Соотношение между входным и выходным напряжением в значительной мере влияет на эффективность светодиодных ламп.

Работа в режиме пониженной яркости

СИД имеют значительное преимущество по сравнению с лампами накаливания с регулируемой яркостью, которые при понижении яркости свечения имеют низкий КПД (рис. 3). Сила света, излучаемого СИД, почти прямо пропорциональна силе проходящего через них тока, и это соотношение может даже повыситься в режиме пониженной яркости за счет более низкой температуры. Флуоресцентным лампам с горячим катодом (НСФЛ) требуется дополнительная мощность для нагрева нитей;

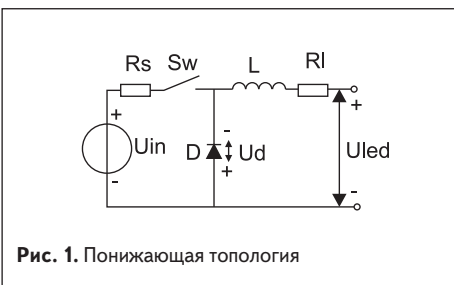


Рис. 1. Понижающая топология

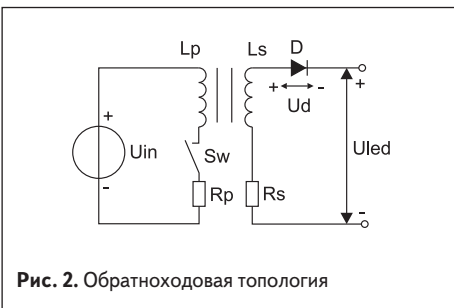


Рис. 2. Обратноходовая топология

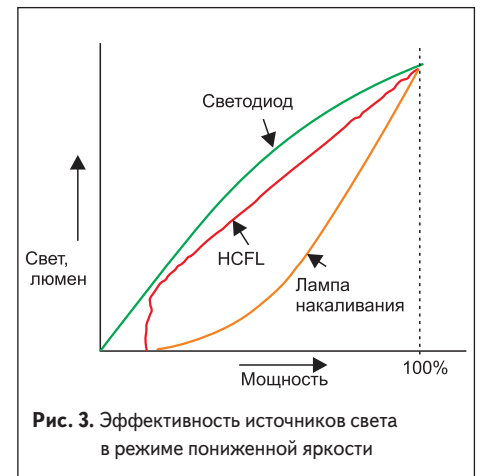


Рис. 3. Эффективность источников света в режиме пониженной яркости

у них короче срок службы при работе в режиме пониженной яркости; они характеризуются цветовым сдвигом, противоположным таковому у ламп с холодным катодом. Кроме того, снижение их светового потока до сверхнизкого уровня (<1%) невозможно. При замене ламп накаливания с обычным световым потоком (200–1000 лм) на светодиодные потребляемая мощность падает на 3–30 Вт.

Системы освещения на СИД, способные работать с диммерами и регулировать яркость с их помощью, относятся к бюджетному сегменту рынка и предоставляют все преимущества светодиодных ламп. Тем не менее, поскольку существующие диммеры рассчитаны на работу с лампами накаливания, которые имеют резистивный характер нагрузки примерно в 20–50 Вт, для подключения СИД требуются дополнительные электроцепи. Стандарты для регуляторов яркости ламп накаливания не существует, поэтому они характеризуются значительным разбросом производительности. По режиму работы диммеры можно разделить на две категории:

- С положительной фазой, когда диммер переключается из положения «выключено» в положение «включено» после определенного периода времени, в течение которого напряжение не равно 0 (рис. 4).
- С отрицательной фазой, т. е. диммер переключается из положения «включено» в положение «выключено».

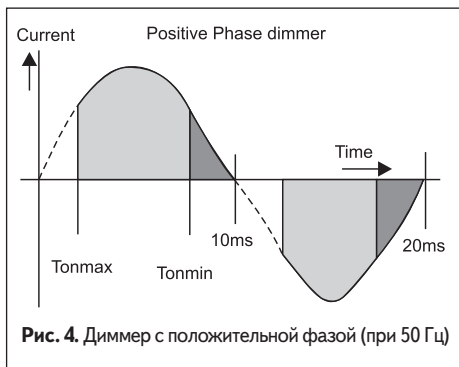


Рис. 4. Диммер с положительной фазой (при 50 Гц)

Следует различать два вида переключения: тиристорную и транзисторную регулировку яркости. Тиристорная всегда работает с положительной фазой, в то время как транзисторные диммеры могут работать и с отрицательным углом. Преимущество последних заключается в способности переключать емкостную нагрузку, однако среди устанавливаемых в настоящее время диммеров все еще преобладают тиристорные.

Принцип работы тиристора

Тиристор — это четырехуровневый полупроводник с определенными свойствами. Он имеет функцию фиксации состояния, которая действует следующим образом:

- При включении во всех цепях устройства должно присутствовать напряжение, и для полной фиксации состояния устройства в течение определенного отрезка времени через него должен проходить ток достаточной силы. Такой ток называется током замыкания (latch

current — I_{latch}) и соотносится с током затвора (gate current).

- При фиксации состояния устройства, т. е. замыкании, через него должен непрерывно в одном и том же направлении проходить электрический ток, который называют током удержания (hold current — I_{hold}). При смене полярности происходит размыкание выключателя. Тиристор — не полностью симметричное устройство. Вышеуказанные параметры зависят от направления и температуры. Помимо них в тиристорных диммерах присутствует генератор меток времени, который необходимо обнулять при пересечении напряжением нулевой отметки. Он обычно состоит из комбинации конденсатор-резистор. Для нормальной работы требуется разрядка конденсатора.

В случае невыполнения указанных условий могут возникнуть проблемы, способные привести к нестабильной работе лампы. Светодиодные системы без достаточно большого буфера не выдерживают этого, поскольку они реагируют на изменения мощности гораздо быстрее, чем лампы накаливания. Даже небольшие колебания яркости ниже воспринимаемой человеческим глазом частоты (200–120 Гц) вызывают дискомфорт. При более крупных и резких колебаниях изменения высоких частот заметны человеческому глазу. Этот эффект называется мерцанием.

В транзисторных диммерах применяется выпрямительный мост в сочетании с переключателем типа биполярного или МОП-транзистора для включения/выключения подачи электропитания. В них также имеются дополнительные цепи питания этих устройств. При открытом ключе энергия запасается в конденсаторе. В диммере рассеивается незначительная мощность, и количество проходящего через переключатель тока может быть значительно больше, чем при использовании пассивного генератора меток времени.

Распространенным способом выполнения этих требований является приложение к диммерам достаточно большой резистивной нагрузки. Тем не менее излишнее рассеивание мощности в светодиодных светильниках оказывается неприемлемым с точки зрения энергосбережения и обеспечения температурного режима. Кроме того, светильник, состоящий из светодиода и формирователя тока, с точки зрения вольт-амперной характеристики ведет себя иначе, чем резистор. Работа СИД обычно обеспечивается путем регулировки тока. Система ведет себя как потребитель постоянной мощности, поэтому для наиболее эффективной работы светодиодов необходим непрерывный ток. Чтобы эти устройства работали с полной отдачей, необходимо обеспечить аккумулирование энергии с помощью конденсатора. Однако из-за емкостной нагрузки на входе светильника тиристорные диммеры использовать нельзя. Входной ток присутствует лишь ограниченный отрезок времени, пока входное напряжение выше напряжения конденсатора. Поступающий на конденсатор зарядный ток может быть очень высоким в момент переключения тиристора, а скачок пускового тока может вывести из строя диммер и весь светильник. Для предотвращения этого можно установить резистор, ограничиваю-

щий пусковой ток, что, однако, приведет к потере мощности. Другие варианты — использование повышающего преобразователя перед цепью или установкой на вторичной цепи обратногоходового преобразователя с емкостным буфером. Однако оба варианта требуют большого числа электронных компонентов, поэтому для устройств малой мощности (<25 Вт) наиболее рентабельным решением остается резистор.

Для нормальной работы диммера необходима подача постоянного тока через цепь делителя напряжения. При низком напряжении сети эта схема должна обладать малым собственным сопротивлением, чтобы обеспечить возможность сброса резистивно-емкостного генератора меток времени. Для большинства тиристорных диммеров подходит ток в 100 мА. При более высоком напряжении его подача отключается во избежание излишнего рассеивания мощности. При размыкании тиристорного диммера необходимо поддерживать ток удержания (обычно 35 мА). Непрерывный переменный ток силой 35 мА при эффективном напряжении в 120 В соответствует рассеиванию 4,2 Вт. При понижении яркости СИД уровень поглощаемой мощности может с легкостью упасть ниже этого уровня, тогда потребуются дополнительное гасящее сопротивление. Для предотвращения разрядки конденсатора в это сопротивление применяется блокирующий диод.

Последняя функция, которую необходимо добавить, — это коррекция кривой затемнения. Кривая затемнения светодиодной лампы должна быть логарифмической, если требуется, чтобы она была такой же, как и у лампы накаливания. Использование для СИД линейной функции затемнения даст экспоненциальный эффект (рис. 5). Как показывает практика, снижение силы тока до 20% от первоначального приводит к снижению воспринимаемой яркости наполовину. А снижение силы тока до уровня 0,8% обеспечит яркость до уровня 1/8 от первоначальной.

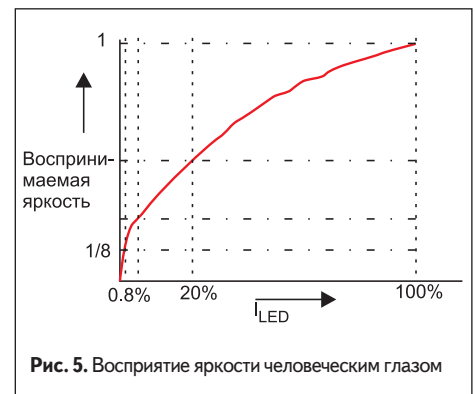


Рис. 5. Восприятие яркости человеческим глазом

В настоящее время в продаже имеется одна интегральная микросхема (SSL2101 производства компании NXP), предлагающая все эти функции и позволяющая использовать понижающую или обратногоходовую топологии. На рис. 6 показана стандартная схема последней.

Помимо МОП-транзистора, интегральная схема имеет два выключателя высокого напряжения для работы гасящего сопротивления и входной контакт, который позволяет измерять объемы потребляемой лампой мощности и активировать дополнительное гасящее сопро-

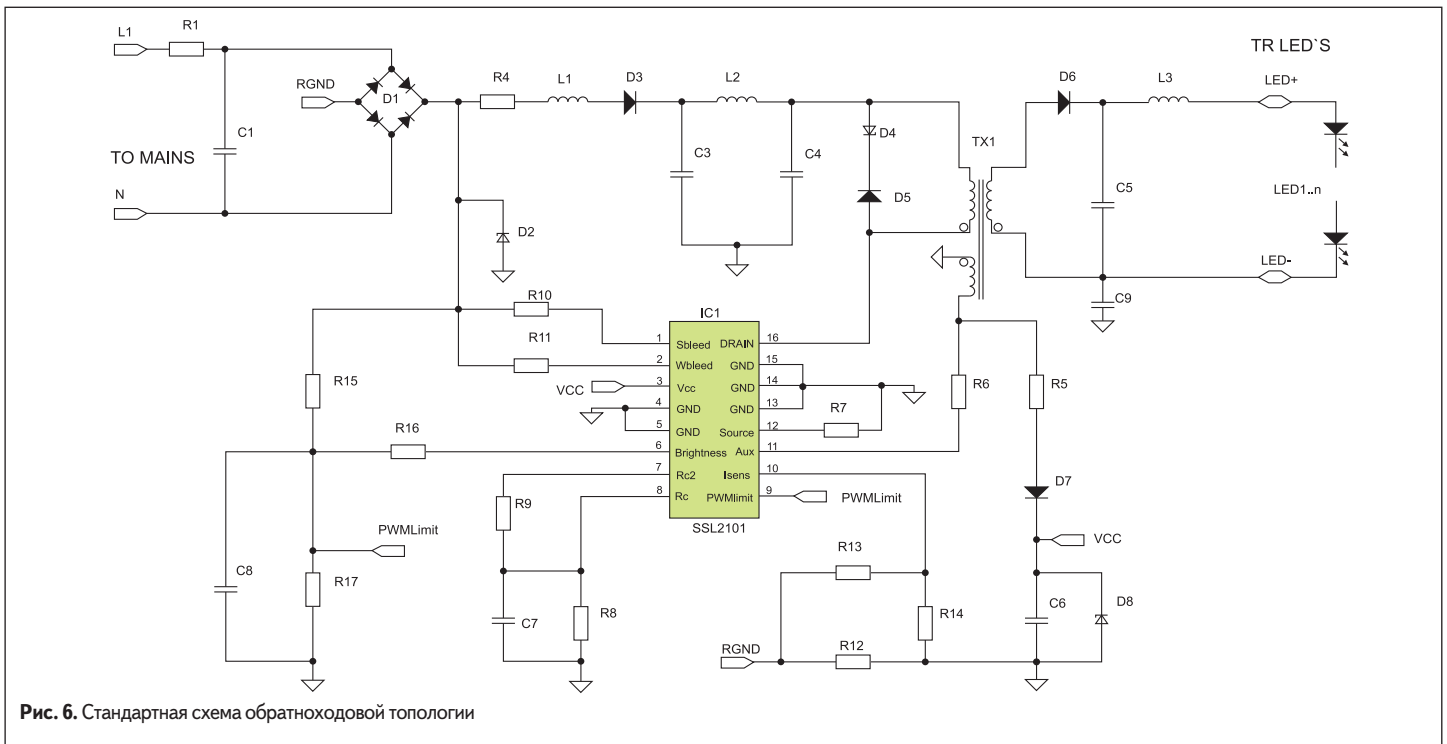


Рис. 6. Стандартная схема обратногоходовой топологии

тивление. Это позволяет разработчикам создавать недорогие интегральные микросхемы, требующие минимум места для установки.

SSL2101 имеет два метода регулировки выходной мощности и, тем самым, изменения силы тока, подаваемого на СИД:

- вход контроля яркости, обеспечивающий регулировку рабочей частоты;
- вход PWM_{Limit} регулирующий время открытого состояния ключа.

Зависимость силы тока, подаваемого на СИД, от характеристик работы преобразователя определяется следующей формулой:

$$I_{LED} = P_{out} / V_{LED} = (0,5fL_p \hat{I}^2) / V_{LED},$$

Поскольку пиковый ток первичной обмотки регулируется длительностью включения, сила тока, подаваемого на СИД, равна квадрату тока на входе PWM_{Limit}. Внутренние цепи интегральной микросхемы регулируют частоту преобразователя логарифмически. Что в сочетании как раз и дает кривую затемнения как у ламп накаливания. Применение обоих методов также позволяет разработчикам снижать пиковый ток до достижения преобразователем слышимого частотного диапазона. Это позволяет снизить шум от трансформатора или катушки индуктивности и обеспечивает максимально эффективное использование этого компонента.

Поскольку при регулировке яркости светодиодного освещения используется высокий уровень затемнения (глубокое затемнение), эффективность управляющей электроники также становится крайне важной и при часто используемых низких мощностях. Интегральная микросхема SSL2101 имеет встроенный источник тока высокого напряжения, способный запускать ее, благодаря чему внешняя пусковая цепь не требуется. Во время работы более эффективная вспомогательная обмотка может принимать и передавать точное

количество энергии, необходимое интегральной микросхеме для работы без перерасхода. Снижение частоты в сочетании с текущей регулировкой также обеспечивают в этом режиме сокращение емкостных потерь при переключении.

Стабилизация тока

Интегральная микросхема SSL2101 имеет дополнительный входной контакт — Aux, который может использоваться для обнаружения размагничивания индуктивного элемента. Это позволяет преобразователю работать с максимальной эффективностью — в режиме BCM (boundary-conduction mode), когда следующий цикл работы преобразователя запускается лишь в случае полного размагничивания индуктора. Это не только обеспечивает максимальное использование магнитного материала и предотвращает «жесткое переключение» (фактор, также повышающий эффективность), но имеет и еще одно значительное преимущество: благодаря такому режиму работы изменения частоты преобразователя обратно пропорциональны вы-

ходному напряжению на нагрузке. При снижении сопротивления нагрузки частота снижается, при повышении выходного напряжения — растет. Такая компенсация обеспечивает большую стабильность выходного тока без дополнительных датчиков или обратной связи.

Еще одна функция интегральной микросхемы SSL2101, позволяющая создавать эффективные преобразователи мощности на низких уровнях мощности, — это квазирезонансное переключение (valley switching). Эта функция позволяет сократить емкостные потери при включении в момент минимального напряжения на стоке ключевого транзистора (рис. 7).

В преобразователе часть энергии теряется вследствие разрядки паразитной емкости через переключатель преобразователя во время включения:

$$P_{caploss} = 0,5fC_{par}U_{swon}^2.$$

Для снижения этих потерь необходимо свести к минимуму все паразитные емкости, подключенные к стоку. Сюда относятся: обратный заряд в сглаживающем блокирующем диоде, емкость катушки индуктивности и отраженная выходная емкость обратногоходовой вторичной цепи.

Заключение

Совокупность правильно выбранной топологии, оптимизированного подключения диммера и эффективной работы преобразователя позволит создать эффективную электронную схему для управления светодиодными светильниками с регулировкой яркости. Хотя обеспечение совместимости с существующими фазовыми диммерами предполагает дополнительные затраты, в целом это позволяет добиться значительной экономии электроэнергии и повышения надежности в сравнении с лампами накаливания с регулировкой яркости.

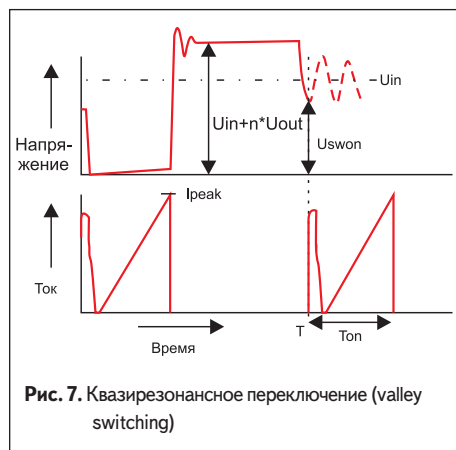


Рис. 7. Квазирезонансное переключение (valley switching)