

Александр Махлин | sanya-t@yandex.ru

Особенности проектирования блока питания для светодиодных ламп

Электрической лампочке как осветительному прибору уже немногим более 100 лет. За это время ее конструкция и принцип действия многократно менялись, и лишь назначение оставалось прежним. В середине XX века лампу накаливания потеснила люминесцентная лампа, обладающая большей эффективностью и долговечностью. А в начале XXI в. появилась так называемая светодиодная лампа. Необходимо отметить, что под этим названием в действительности скрывается довольно сложная система, состоящая из нескольких элементов, среди которых основными являются: блок питания, светодиодная матрица, система охлаждения и оптическая система. В статье затрагиваются вопросы, связанные с проектированием блока питания для светодиодных ламп.

Типичная схема блока питания светодиодной лампы показана на рис. 1.

Сетевое переменное напряжение проходит через фильтр электромагнитных помех (ЭМП) на выпрямитель. Затем выпрямленное напряжение проходит через ступень коррекции коэффициента мощности (ККМ) и питает, собственно, импульсный стабилизатор тока, к выходу которого подключены светодиоды.

Фильтр ЭМП

Входной помехоподавляющий фильтр обладает свойством двунаправленного помехоподавления, то есть предотвращает проникновение высокочастотных импульсных помех как из сети в блок питания, так и наоборот — из блока питания в сеть. Помехи в сети появляются, например, при подключении к ней мощных нагрузок. Помехи в блоке питания обусловлены, прежде всего, импульсным режимом работы транзистора, резонансом в силовых цепях блока в моменты коммутации и работой выпрямителя. Электромагнитные помехи, созда-

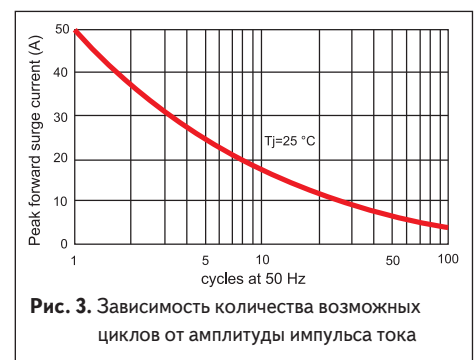
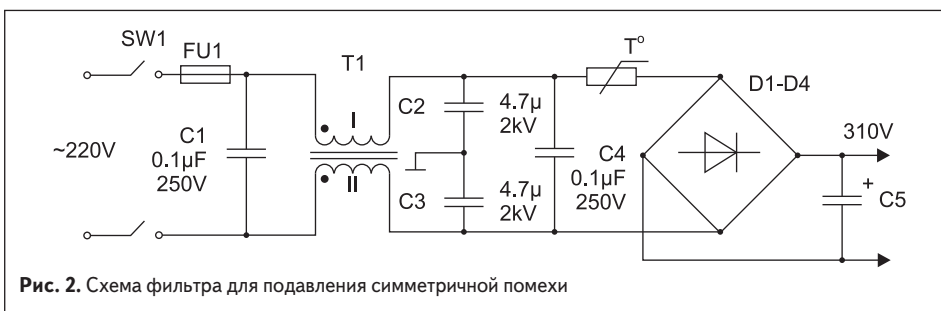
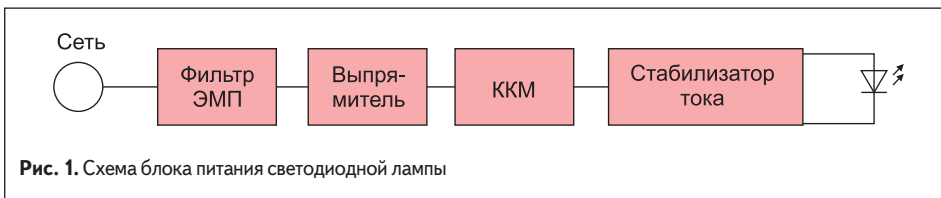
ваемые импульсным блоком питания, подразделяются на два типа: симметричная (помеха измеряется между двумя полюсами шин питания) и синфазная (напряжение между каждым проводом питания и землей).

Для подавления симметричной помехи применяется фильтр со двоянным дросселем и двумя конденсаторами, шунтирующими шины питания (рис. 2). Конденсатор C1 представляет собой очень большое сопротивление для питающего тока сетевой частоты (50 Гц), и поэтому этот ток через конденсатор C1 не ответвляется. Для импульсного высокочастотного тока помехи этот конденсатор, напротив, имеет очень малое сопротивление, и поэтому большая часть тока помехи замыкается через него. Однако, как показывает практика, этого не всегда достаточно. Поэтому далее включается двухобмоточный дроссель T1 (нейтрализующий трансформатор), обмотки которого имеют одинаковое число витков и намотаны на одном сердечнике согласно. Из этого следует, что полезный ток сетевой частоты, протекающий по обмоткам I и II в противоположных направлениях, будет соз-

давать в сердечнике T1 два равных встречно-направленных магнитных потока, взаимно компенсирующих друг друга. Поэтому независимо от величины потребляемого от сети тока сердечник T1 не будет намагничиваться, а значит, индуктивность обеих обмоток будет максимальной. Основное назначение конденсатора C4 — фильтрация помех, создаваемых диодным мостом. Дело в том, что процесс восстановления обратного сопротивления диодов при переключении не является мгновенным, и при смене полярности приложенного напряжения через диоды протекают импульсные обратные токи, обусловленные рассасыванием избыточных носителей. Эти импульсные токи и являются помехами, генерируемыми сетевым выпрямителем. Конденсатор C4, включенный в диагональ диодного моста, замыкает через себя токи этих импульсных помех, препятствуя их проникновению в питающую сеть и нагрузку блока питания. Также, если есть провод заземления, то конденсаторы C2 и C3 позволяют подавить синфазную помеху.

Выпрямитель

Выпрямитель выполняется по схеме диодного моста. Если вместо обыкновенных установить в мост так называемые «быстрые диоды», то уровень помех, создаваемых выпрямителем, значительно уменьшится. Также при разработке лампы следует учесть, что диоды выпрямителя испытывают значительную нагрузку импульсным током заряда конденсатора C5 при включении. Например, диодный мост DB107 (номинальный ток 1 А) выдерживает импульс тока с амплитудой, в 50 раз превышающей номинальный ток в одном цикле или полуцикле сетевого напряжения. Зависимость количества возможных циклов от амплитуды импульса тока показана на рис. 3.



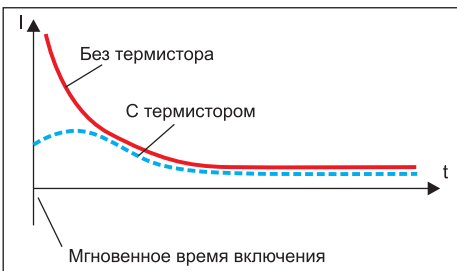


Рис. 4. График тока в цепи «диодный мост – конденсатор» с термистором (пунктир) и без термистора (сплошная линия)

Поэтому в цепь заряда $C5$ необходимо включить термистор. Этот элемент имеет сопротивление порядка нескольких Ом во время заряда конденсатора и, следовательно, ограничивает импульсный ток через диодный мост. С другой стороны, через одну-две секунды проходящий через термистор ток разогревает его и приводит к снижению сопротивления. Таким образом, в штатном режиме сопротивление термистора стремится к нулю. График тока в цепи «диодный мост – конденсатор» с термистором (пунктир) и без термистора (сплошная линия) показан на рис. 4

Расчет сопротивления термистора производится следующим образом. Во-первых, по закону Ома выбирается минимальное сопротивление при температуре $25\text{ }^\circ\text{C}$.

$$R = 1,414 \times V_{in} / I_{max}$$

где V_{in} — входное переменное напряжение, I_{max} — максимальный допустимый ток диодного моста в одном цикле.

Затем определяется максимальная энергия, которую должен поглотить термистор в момент включения:

$$E = C \times U^2 / 2,$$

где C — емкость входного конденсатора, U — выпрямленное напряжение ($1,414 \times V_{in}$).

Затем определяется ток, который потечет через термистор в штатном режиме. Указанных параметров вполне достаточно, чтобы правильно выбрать термистор по каталогам производителей.

Еще одним важным параметром, который стоит принимать во внимание (особенно для светодиодных ламп, где рабочая температура весьма высока), является срок жизни электролитического конденсатора. Как правило, конденсаторы снабжаются информацией о максимальной рабочей температуре. Срок жизни или, другими словами, срок, за который емкость конденсатора снизится в два раза, при этой температуре колеблется от 2 до 7 тыс. ч. В сравнении со светодиодами, которые имеют срок жизни 50–100 тыс. ч, это очень мало. Однако производители конденсаторов утверждают, что со снижением температуры на каждые 10 градусов относительно максимальной срок жизни увеличивается в два раза. Поэтому входную емкость необходимо выбирать с учетом окружающей температуры конденсаторов.

ККМ

Несмотря на то, что выпрямитель является чуть ли не самым простым элементом схемы блока питания, физические процессы, происходящие в его нелинейных элементах (диодах), создают эффект реактивной мощности, которую потребляет лампа. Коэффициентом мощности называется отношение активной (полезной) мощности к суммарной (активная + реактивная). У резистивной нагрузки ККМ = 1, т. е. реактивная составляющая равна 0. Активная мощность полностью потребляется нагрузкой и совершает полезную работу. Реактивная же сперва запасается, а затем снова возвращается в сеть. В этой ситуации в сети текут большие токи, чем требовалось бы для данной нагрузки. Таким образом, главная задача ступени ККМ — сократить величину реактивной составляющей мощности до минимума. Разберемся теперь в предпосылках ее появления в источнике питания.

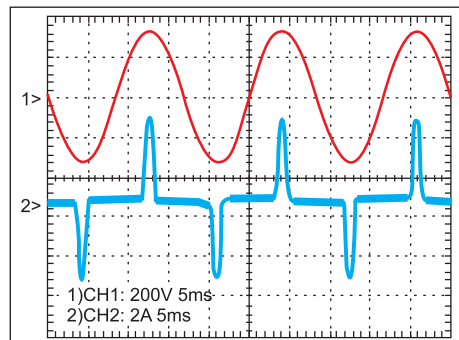


Рис. 5. Графики тока и напряжения

На рис. 5 показаны графики тока и напряжения, которые потребляет от сети обычный нагруженный выпрямитель с конденсатором значительной емкости.

В такой схеме ток потребляется короткими импульсами в моменты, когда мгновенное значение напряжения в питающей сети максимально. В промежутках нагрузка питается напряжением, запасенным в конденсаторе, и напряжение на нем постепенно падает. Так происходит до тех пор, пока мгновенное значение сетевого напряжения не превысит снова напряжение, оставшееся на конденсаторе. В этот момент открываются диоды выпрямительного моста, и происходит короткий бросок тока подзарядки. Такой режим работы порождает нежелательную реактивную мощность, которая, не выполняя полезной работы, разогревает питающие сети.

Однако причины ее появления на первый взгляд неочевидны. Попробуем в них разобраться.

Рассмотрим передачу энергии от источника к нагрузке через некоторую поверхность S . Форма напряжения задается источником, форма тока — реакцией нагрузки. Ток и напряжение могут быть представлены рядами Фурье. Мгновенная мощность, которая является, очевидно, произведением рядов тока и напряжения, может принимать как положительные, так и отрицательные значения. То есть энергия может течь через поверхность в обоих направлениях.

В случае, когда ток и напряжение не имеют общих гармоник, мощности, передаваемые в обоих направлениях через поверхность S , равны. Другими словами, нагрузка потребляет столько же, сколько и отдает, мощность является чисто реактивной и полезная работа в нагрузке не совершается. Если же гармоники тока и напряжения полностью совпадают по частоте, то вся энергия источника передается в нагрузку и совершает полезную работу. При разложении в ряд Фурье импульсного тока видно, что кроме гармоники частотой 50 Гц, на которой, собственно, и передается полезная энергия, в спектре тока присутствуют гармоники 100, 150 Гц и так далее, практически до бесконечности. Для повышения ККМ их следует подавить.

Для импульсных стабилизаторов без ККМ значение коэффициента мощности, как правило, колеблется около значения 0,6. Простейшим ККМ является так называемая схема Valley Filler, которая фактически просто расширяет импульсы тока, приближая, таким образом, их форму к синусоидальной, и, следовательно, сокращает количество гармоник тока и увеличивает ККМ. Схема такого устройства изображена на рис. 6. Как правило, с этой схемой удается достичь значений ККМ 0,7–0,75.

В первый момент времени конденсаторы заряжаются до пика сетевого напряжения — 310 В. Однако благодаря диоду $D6$ ток разряда через них не потечет, пока мгновенное значение сетевого напряжения не упадет до 155 В. Все это время нагрузка питается сетевым напряжением, за счет чего и удается расширить импульсы тока. После этого открываются диоды $D5$ и $D7$, позволяя включенным параллельно конденсаторам разряжаться через нагрузку. Далее цикл снова повторяется. Иногда вводится резистор $R1$ небольшого сопротивления, чтобы еще больше растянуть время заряда конденсаторов и увеличить значение ККМ. Форма напряжения и тока в схеме с таким

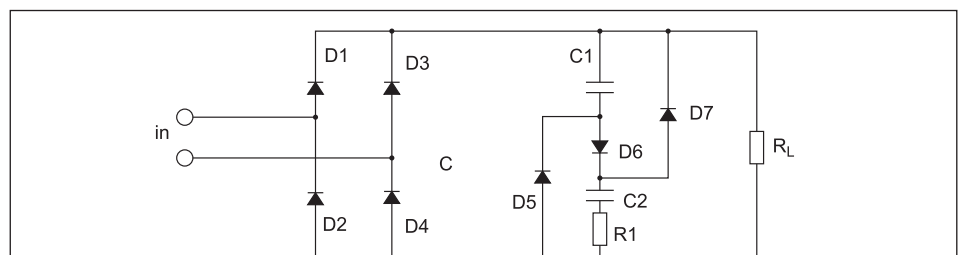


Рис. 6. Схема устройства, увеличивающего ККМ

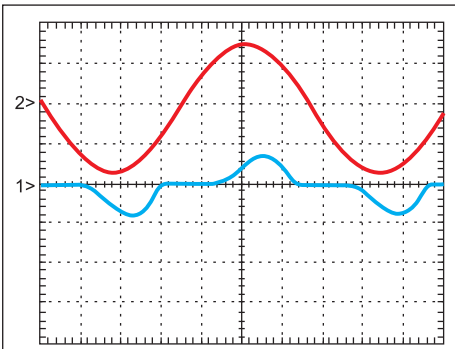


Рис. 7. Форма напряжения и тока в схеме рис. 6

ККМ показана на рис. 7. Однако следует помнить, что в данной схеме пульсации напряжения достигают амплитуды 150 В!

Еще одной разновидностью ККМ является активный ККМ. Он представляет собой повышающий импульсный преобразователь, причем скважность импульсов на его выходе зависит от мгновенного значения питающего напряжения. На его вход подается пульсирующее напряжение непосредственно с диодного моста (без входного конденсатора). Пульсации в выходном напряжении отсутствуют — в отличие от предыдущей схемы. Применение такого ККМ требуется, если мощность лампы превышает 25 Вт. Форма тока на его входе обычно близка к синусоидальной, а КМ стремится к 1.

Источник тока

Яркость светодиода сильно зависит от тока, через него протекающего. Ток же, в свою очередь, определяется многими параметрами, важнейшими из которых являются питающее напряжение и температура *p-n*-перехода светодиода. Поэтому первая и основная функция блока питания светодиодной лампы — обеспечивать стабильный ток, вне зависимости от изменения внешних параметров. При конструировании лампы обычно выбирают метод импульсной стабилизации, так как он обеспечивает достаточную точность и высокую эффективность (около 90%).

Рассмотрим схему стабилизатора тока на примере микросхемы HV9910 (или HV9961),

изображенную на рис. 8. В принципе, все нижеследующее относится к большому количеству подобных микросхем. HV9910 выбрана из-за наглядности, предельной простоты и доступности.

HV9910 — это драйвер светодиодов с широтно-импульсной модуляцией. В первый момент времени открывается силовой транзистор, и ток в цепи светодиодов линейно нарастает. Как только напряжение, вызванное протеканием этого тока через резистор-датчик тока в цепи истока транзистора, достигнет порогового значения, микросхема закрывает транзистор, и ток в светодиодах начнет линейно уменьшаться. Диаграмма работы драйвера показана на рис. 9.

Существует два метода управления: с постоянной частотой *f* и постоянным *T_{off}*, то есть, с постоянным временем, в течение которого транзистор закрыт. Рассмотрим их особенности. Режим с постоянной частотой ограничивает выходное напряжение до величины, составляющей 50% от питающего. Режим с постоянным *T_{off}* позволяет получать выходные напряжения до 80% от питающего, однако в данном случае пульсации выходного тока растут пропорционально выходному напряжению. Следовательно, управляемость по току падает. Таким образом, существуют пределы максимального тока для обоих режимов, которые рассчитываются согласно следующим формулам:

- режим с постоянным *T_{off}*

$$\Delta I = (V_{0max} T_{off})/L; I_{LED} = V_{cs}/R_{cs} - \Delta I/2;$$

максимальная частота переключения — $\{1 - V_{0max}/V_{imin}\}/T_{off}$;

- режим с постоянной *f*

$$\Delta I = V_{0max} \{1 - V_{0max}/V_{imin}\}/L f_s; I_{LED} = V_{cs}/R_{cs} - \Delta I/2,$$

где ΔI — ток пульсации, а I_{LED} — максимальный ток светодиодов, который, как видно, ограничивается током пульсаций. Однако следует иметь в виду, что эффективность драйвера тем больше, чем больше его выходная мощность. Поэтому следует находить баланс между указанными значениями выходного тока и напряжения.

Методы расчета номиналов основных элементов этой схемы подробно описаны в докумен-

тации на сайте производителя, поэтому не будем останавливаться на них подробно. Несмотря на то, что данная схема обладает многими достоинствами, среди которых стабильность, доступность и простота, однако необходимо указать на некоторые нюансы проектирования ламп на основе HV9910 или любого другого подобного драйвера.

Во-первых, следует обратить внимание на максимальную рассеиваемую корпусом микросхемы мощность. Корпус SO8 рассеивает 650 мВт, SO16 — 1000 мВт. Практически половина мощности тратится на управление затвором полевого транзистора. Причем определяется эта мощность питающим напряжением, частотой коммутации и зарядом затвора полевого транзистора согласно формуле:

$$P = V_{in}(1 \text{ мА} + Q_g F_s),$$

где V_{in} — входное напряжение, Q_g — заряд затвора, F_s — частота коммутации, 1 мА — ток, потребляемый логикой микросхемы. Таким образом, для частот до 100 кГц верхней границей заряда затвора является значение 25 нКл, для частот больше 100 кГц — 15 нКл. В некоторых случаях можно снизить потребляемую микросхемой мощность, поставив в цепь ее питания стабилитрон с напряжением стабилизации 100 В. Мощность стабилитрона рассчитывается по формуле:

$$P = V_{cm}(1 \text{ мА} + Q_g F_s),$$

где V_{cm} — напряжение стабилизации. Этот стабилитрон необходим в случае, когда микросхема HV9910 включается после ступени активной коррекции коэффициента мощности с выходным напряжением 400–420 В. При этом следует учесть, что на конденсаторе в цепи питания будет оставаться высокое напряжение, поскольку микросхема прекращает работу, когда напряжение упадет ниже напряжения пробоя стабилитрона. Поэтому необходимо шунтировать конденсатор сопротивлением порядка 1 МОм.

Во-вторых, кроме ограничений входного напряжения, вызванных максимально возможной рассеиваемой мощностью, существует также минимально возможное выходное напряжение, при котором все еще осуществляется адекватная регулировка тока. Его зависимость от входного напряжения и выбранного значения *T_{off}* определяется формулой:

$$V_{0min} = V_{in} D_{min},$$

где $D_{min} = 1 \text{ мкс}/(1 \text{ мкс} \times T_{off})$. Несоблюдение этого условия приведет к неконтролируемому повышению тока через светодиоды и выходу их из строя.

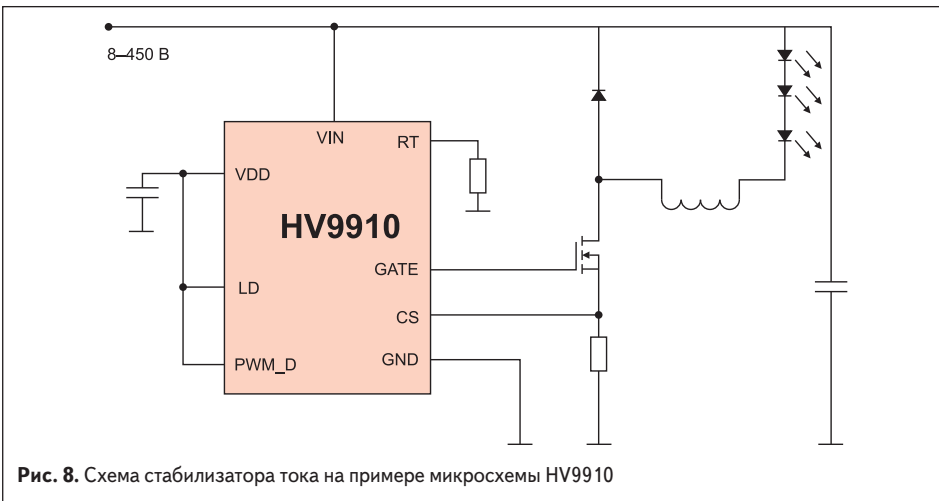


Рис. 8. Схема стабилизатора тока на примере микросхемы HV9910

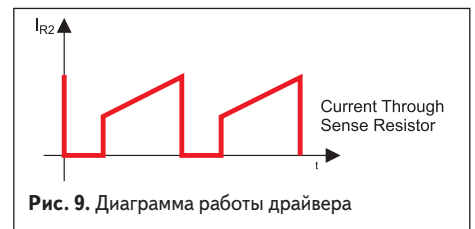


Рис. 9. Диаграмма работы драйвера

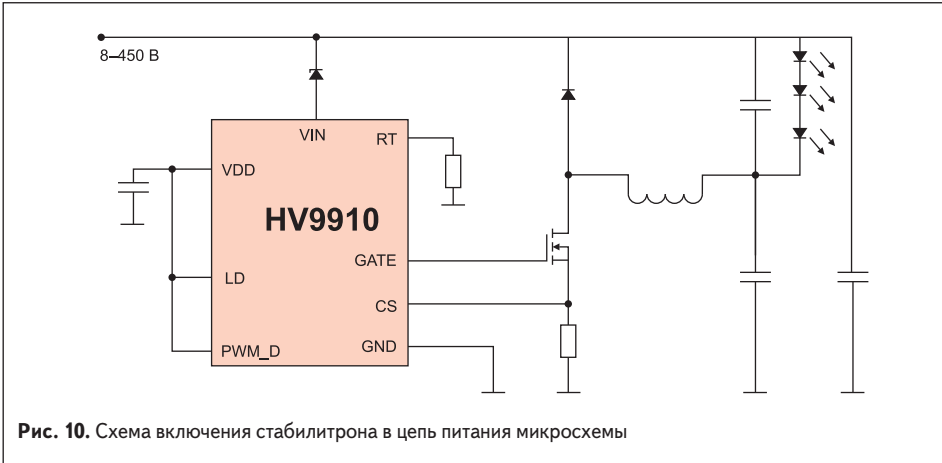


Рис. 10. Схема включения стабилитрона в цепь питания микросхемы

В-третьих, показанная на рис. 8 схема генерирует электромагнитные помехи в радиовещательном и телевизионном диапазонах. Чтобы значительно снизить уровень ВЧ-помех, необходимо установить шунтирующие конденсаторы небольшой емкости. Емкость выбирается в пределах 1–10 нФ. Схема включения стабилитрона в цепь питания микросхемы и расположения блокировочных конденсаторов показана на рис. 10.

Также, в случае использования ККМ, появляется возможность применить модуляцию рабочей частоты импульсного преобразователя, используя пульсации питающего напряжения, согласно схеме на рис. 11. Таким образом можно распределить мощность помех,

создаваемых преобразователем по всему спектру радиочастот. Модулирующее напряжение снимается непосредственно с диодного моста.

Поскольку частото задающий резистор подключен к делителю, на который подается пульсирующее напряжение амплитудой 310 В, в этой схеме период коммутации рассчитывается с использованием мгновенного значения питающего напряжения по формуле:

$$T_s = (1 - K_i V_{AC} \sqrt{2} / 6,5 \text{ В}) \times R_1 \times 40 \text{ пФ} + 0,88 \text{ мс};$$

$$K_i = R_{11} / (R_{11} + R_{12A} + R_{12B}).$$

Инженерам, проектирующим блоки питания, следует напомнить, что эффективность данной

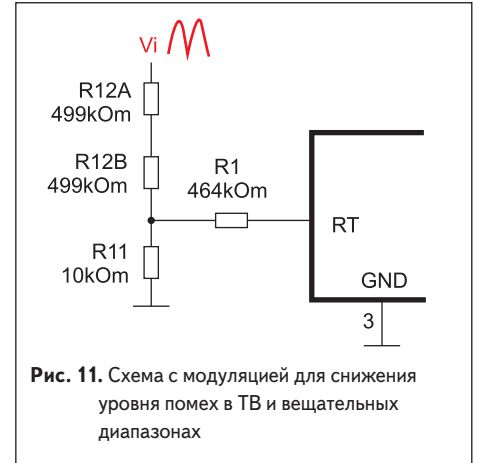


Рис. 11. Схема с модуляцией для снижения уровня помех в ТВ и вещательных диапазонах

схемы тем больше, чем меньше время восстановления диода, сопротивления открытого канала транзистора, а также сопротивления постоянному току у индуктивности.

Разумеется, в статье были описаны далеко не все нюансы проектирования блоков питания для светодиодных ламп. Однако надеемся, что приведенный обзорный материал поможет найти ответ хотя бы на некоторые общие вопросы. ●

Литература

1. <http://www.supertex.com>
2. <http://www.diode.com>
3. <http://www.epcos.com>
4. <http://www.coilws.com/Publications/ImprVF.pdf>