

Двухканальный стабилизированный диммер

Михаил Милославский

г. Москва

E-mail: MMiloslavsky@yandex.ru

3.5. Выходной каскад

Нагрузка коммутируется N-канальными MOSFET транзисторами VT1 и VT2. Особенностью схемы является отсутствие драйвера, что в соответствии с требованием проекта уменьшает количество используемых компонентов. Транзисторы управляются напрямую выходами МК.

Как выяснилось, при напряжении на затворе 5 В и мощности нагрузки 60 Вт канал транзистора почти полностью открывается, даже несмотря на достаточно высокое сопротивление резистора в цепи затвора. Это происходит благодаря тому, что ток нагрузки (около 0,25 А) составляет величину примерно в 20 раз меньшую максимально допустимого тока стока транзистора. При таких условиях падение напряжения на переходе сток-исток транзистора составляет менее 1 В, что не приводит к заметному на глаз снижению максимальной яркости лампы.

Тока выхода МК оказывается достаточно для перезарядки емкости затвора благодаря невысокой частоте переключения (100 Гц). Это примерно на два порядка меньше частоты, на которой работают транзисторы в традиционных переключательных схемах, например в импульсных источниках питания.

Отсутствие драйвера может привести к самопроизвольному включению транзистора в случае резкого всплеска напряжения на стоке. Этот эффект, известный под названием $CdVdt$ turn-on, вызван наличием емкости между затвором и стоком транзистора (емкость Миллера). Иногда вернуть транзистор в нормальный режим работы удается лишь после отключения схемы от сети на несколько минут (на время остывания транзистора). Одним из лучших способов предотвратить случайное включение является выбор транзистора, у которого соотношение Q_{gd}/Q_{gs1} составляет величину менее 1,4 [10]. Здесь Q_{gd} – это величина заряда затвор-сток, Q_{gs1} – это величина заряда, при котором напряжение на затворе достигает порогового значения (определяется по графику Total Gate Charge). К сожалению, транзисторы, соответствующие данному правилу, встречаются крайне редко. С другой стороны, случаи резких всплесков напряжения на стоке тоже крайне редки.

При резком спаде напряжения на стоке и отсутствии драйвера емкость Миллера не приводит к самопроизвольному включению транзистора, но на затворе может возникнуть отрицательный потенциал, превышающий допустимое напряжение затвор-исток [11, раздел 3]. Это может стать причиной выхода транзистора из строя. Поэтому одним из критериев при выборе транзистора стало наличие встроенного ограничителя напряжения на затворе. Такое решение позволило отказаться от дополнительных внешних компонентов. Кроме этого, встроенный ограничитель предохраняет затвор от воздействия статического электричества, к которому MOSFET транзисторы как класс приборов имеют высокую чувствительность.

При напряжении ограничения встроенного в транзистор ограничителя около 30 В и сопротивлении резистора в цепи затвора 10 кОм ток через выход МК составит примерно 3 мА,



Продолжение. Начало в №10-11/2008

что в три раза превышает допустимый. Поэтому для повышения надежности схемы между затвором и истоком транзистора можно поставить дополнительный ограничитель с максимальным напряжением ограничения до 10 В. При таком напряжении ток через внутренние защитные диоды МК будет находиться на безопасном уровне 1 мА. Впрочем, вряд ли в бытовой электросети встретятся ситуации, вызывающие резкий спад напряжения на стоке.

Также для повышения надежности можно поставить высокоомный резистор (порядка 100 кОм) между затвором и истоком транзистора. Это предотвратит включение транзистора, когда выходы МК находятся в высокоимпедансном состоянии, например при срабатывании супервизора питания (BOD) или сторожевого таймера (WDT). Поскольку такие ситуации кратковременны и маловероятны, резисторы затвор-исток на схеме не показаны.

3.5.1. Транзисторы

Для того, чтобы транзистор был пригоден для использования в данном устройстве, он должен обладать следующими характеристиками:

- ток стока – не менее 6 А, типовое сопротивление канала – не более 1 Ом;
- напряжение сток-исток – не менее 600 В;
- наличие двустороннего ограничителя напряжения на затворе;
- максимальное пороговое напряжение затвор-исток – меньше 5 В;
- график зависимости тока стока от напряжения на затворе – нормирован для напряжения затвора 5 В или меньше. То же относится к графику зависимости тока стока от напряжения сток-исток.

Кроме этого, в соответствии с требованием к проекту транзистор не должен сильно нагреваться, в идеале – не нагреваться вообще. Величина нагрева T_{ja} характеризуется формулой:

$$T_{ja} = P \cdot R_{th} = R \cdot I^2 \cdot R_{th} + 25^\circ\text{C}, \text{ где}$$

R – сопротивление канала сток-исток,

I – ток нагрузки,

R_{th} – тепловое сопротивление транзистора (корпус-окружающая среда).

Так как частота переключения транзистора не превышает 100 Гц, его динамические потери малы, на нагрев не влияют, и поэтому в формуле не учитываются.

Из формулы следует, что транзистор должен иметь как можно меньшее значение теплового сопротивления. Выбранный транзистор имеет корпус практически идентичный корпусу TO220, и обладает относительно невысоким тепловым сопротивлением 62,5°C. Эксплуатация выбранного транзистора в составе устройства показала полное отсутствие нагрева при любом уровне яркости.

По причине, указанной далее в разделе *Защита от превышения сетевого напряжения*, транзистор должен быть рассчитан на напряжение сток-исток не менее 600 В. Помимо

этого, в случае обрыва защитного диода транзистор не выйдет из строя при аварийном повышении напряжения сети вплоть до 380 В ±10%.

По результатам изучения продукции основных производителей MOSFET транзисторов (Infineon, International Rectifier, Ixys, Fairchild, NEC, NXP, ON Semiconductors, Renesas, Toshiba, Vishay) выяснилось, что встроенный ограничитель напряжения на затворе имеется только у транзисторов фирмы Toshiba. Далее перечислены транзисторы этой фирмы, подходящие по остальным параметрам и рекомендуемые в качестве замены: 2SK2544, 2SK2777, 2SK3130, 2SK3947, 2SK4013, 2SK4014, 2SK3799, 2SK2843, 2SK2866, 2SK2889, 2SK2996, 2SK3265, 2SK3797. Следует отметить, что рекомендация основана только на изучении описаний транзисторов. На практике их работа не проверялась. В частности, может потребоваться подбор резистора в цепи затвора.

Теоретически в устройстве можно применить и IGBT транзисторы. Однако найти такие, которые удовлетворяли бы всем вышеперечисленным требованиям, не удалось. Кроме того, MOSFET транзисторы, как правило, дешевле. К сожалению, так называемые logic level транзисторы, управляемые цифровыми уровнями сигналов и подходящие по остальным параметрам, в частности, рассчитанные на напряжение 600 В, пока не существуют.

3.5.2. Резисторы в цепи затвора

Сопротивление резисторов R5 и R6 оказывает влияние на следующие факторы:

- защиту выхода МК от броска тока при перезарядке входной емкости транзистора (чем больше сопротивление, тем меньше ток);
- защиту выхода МК от превышения напряжения на затворе, которое возникает из-за емкости Миллера (чем больше сопротивление, тем лучше защита);
- степень нагрева транзисторов (чем меньше сопротивление, тем меньше нагрев);
- уровень помех радио- и ИК-приему, а также в электросети (чем больше сопротивление, тем меньше помех);
- силу звона нитей ламп накаливания (чем больше сопротивление, тем меньше звон).

Влияние сопротивления на ток потребления, а также на падение напряжения на переходе сток-исток транзистора в силу малых величин не учитывается.

Анализируя перечисленные факторы, приходим к очевидному выводу, что, в целом, чем больше сопротивление, тем лучше. Однако слишком сильно его увеличивать тоже нельзя – это приведет к нагреву транзистора.

Для начала выясним минимально допустимое сопротивление резистора. Оно определяется безопасным уровнем тока выхода МК при перезарядке емкости затвора транзистора. В этот момент выход МК оказывается кратковременно замкнут на землю. Учитывая ток выхода по описанию МК 20 мА и напряжение питания 5 В, по закону Ома получаем минимально допустимое сопротивление 250 Ом.

Теперь попробуем определить номинальное сопротивление резистора с точки зрения ограничения напряжения на выходе МК. В описании МК сказано, что уровень безопасного тока, протекающего через внутренние диоды, составляет 1 мА. Максимально допустимое напряжение на затворе транзистора, указанное в его описании, составляет ±30 В. Встроенный в транзистор двусторонний ограничитель не

позволяет напряжению превысить эту величину. Следовательно, чтобы обеспечить безопасный ток через внутренние диоды МК, потребуется сопротивление $R = 30 / 0,001 = 30 \text{ кОм}$. При таком высоком сопротивлении в цепи затвора увеличится сопротивление канала сток-исток транзистора. Это приведет к уменьшению яркости лампы и нагреву транзистора. Кроме того, как было отмечено ранее, вряд ли в бытовой электросети встретятся ситуации, вызывающие значительное повышение напряжения на затворе. Следовательно, выбирать сопротивление по данному критерию нельзя.

Остается выбирать сопротивление, ориентируясь на степень нагрева транзисторов, уровень помех и силу звона нити лампы. Два последних фактора требуют высокое сопротивление, а первый – низкое. Получается, что сопротивление надо выбирать как компромисс. Поскольку готовых формул, учитывающих все три фактора, найти не удалось, сопротивление подбиралось экспериментальным путем.

Подбор сопротивления по степени нагрева транзистора более затратный по времени, поэтому резистор подбирался по отсутствию слышимых помех. Для этого использовался встроенный в носимый плеер радиоприемник АМ диапазона, настроенный на частоту 520 кГц. На самом деле, спектр излучаемых помех достаточно широк, поэтому частота настройки радиоприемника значения не имеет, она может быть в диапазоне от 520 до 1710 кГц. Яркость лампы во время подбора сопротивления может быть любая, кроме максимальной, т.к. в этом случае помехи исчезают даже при нулевом сопротивлении. Сопротивление резистора увеличивалось, начиная с нуля, до тех пор, пока в расположенном на расстоянии 5 см от устройства радиоприемнике не перестал слышаться низкочастотный фон, причем при любой ориентации плоскости радиоприемника относительно плоскости устройства. После этого яркость лампы устанавливалась на уровень примерно 75% (это точка наибольшего нагрева транзистора), и через 15 минут контролировалась температура корпуса транзистора. Если она превышала температуру окружающей среды более чем на 1°C, сопротивление резистора уменьшалось. В завершение устройство располагалось так, чтобы лампа оказывалась на расстоянии примерно 5 см от уха. Если во время изменения яркости от минимума до максимума и наоборот был слышен звон нити лампы, сопротивление резистора увеличивалось. Последняя настройка производилась со штатной лампой светильника и его проводкой. Иначе результат подбора сопротивления искажался из-за отличающегося типа лампы и другой индуктивности проводников, соединяющих лампу со схемой.

Следует иметь в виду, что помимо неприятного жужжания, звон нити лампы резко сокращает ее ресурс. Тестирование ламп различных производителей на минимальный уровень звона нити позволило расположить их в следующем порядке: Osram, Philips, General Electric. В результате выбор остановился на матовых лампах Osram Classic B FR 60 230V E14/SES, 660lm, Energy index E.

3.6. Цепь защиты

Предохранитель F1 и защитный диод VD1 формируют цепь защиты, которая предохраняет устройство от выхода из строя при коротком замыкании нагрузки, превышения ее мощности, а также при бросках напряжения в сети и аварийного повышения ее напряжения до 380 В.

Предохранитель рассчитывается, исходя из максимальной нагрузки, по стандартной формуле $I = P / U$. Отсюда $I = 2 \cdot 60 / 220 = 0,55$ А. Ток потребления схемы при этом не учитывается, т.к. он пренебрежимо мал. Вполне допустимо выбрать предохранитель на 0,5 А. Эксплуатация устройства подтвердила, что такой номинал выдерживает долговременную (не менее 24 часов) максимальную яркость обеих ламп при максимальном напряжении сети.

Чтобы защитить чувствительные полупроводниковые приборы, используется быстродействующий предохранитель. Для отечественного предохранителя серии ВП2Б-1В время срабатывания при превышении номинального тока в 2,75 раза равно 1 секунде. Предохранители с замедленным временем срабатывания (в керамическом или стеклянном корпусе) при выходе из строя издают резкий и громкий звук, оставляя на плате (или на стене ☺) черное пятно (проверено на практике ☹). Выбор сделан в пользу керамического корпуса, т.к. стеклянные корпуса при срабатывании иногда рассыпаются (что тоже проверено на практике).

Использовать современные полимерные предохранители в данной схеме не представляется возможным из-за их сильного нагрева и невысокой скорости срабатывания. Например, для предохранителя LB600LV время срабатывания при токе нагрузки 3 А составляет 36 секунд.

3.6.1. Защита от короткого замыкания нагрузки и превышения ее мощности

Возможны два варианта короткого замыкания: при выключенной нагрузке и при включенной нагрузке.

В первом случае ток возрастает медленно, т.к. нагрузка всегда включается при нулевом напряжении в сети, и яркость лампы всегда увеличивается плавно. Поскольку в устройстве применен быстродействующий предохранитель, он успевает перегореть, защищая другие элементы схемы.

Во втором случае ток мгновенно возрастает настолько, что предохранитель не успевает защитить чувствительный к перегрузкам транзистор. В результате транзистор выходит из строя первым. Теоретически это говорит о том, что транзистор может не выдержать перегрузку, которая возникает, если лампа перегорит во время работы, т.к. ток при этом достигает нескольких десятков ампер. Однако на практике с таким явлением встречаться не приходилось, поскольку срок службы ламп в устройстве намного превышает стандартный.

В первоначальной версии устройства, где транзисторы управлялись драйвером IR4427, был случай перегорания лампы. При этом все компоненты остались невредимы. Однако нет полной уверенности в том, что перегорание тогда произошло во время работы лампы.

Короткое замыкание в цепи питания +5 В устройству не страшны, т.к. в этом случае роль ограничителя тока играет балластный резистор.

При повышенной мощности нагрузки устройство ведет себя так же как в случае короткого замыкания при выключенной нагрузке. Это было подтверждено подключением к одному каналу двух ламп общей мощностью 200 Вт + 60 Вт.

Экспериментально установлено, что при выходе из строя транзистора все его выводы оказываются замкнутыми между собой. Поскольку в этом случае на затворе будет потенциал земли, предпринимать дополнительные меры по защите выходов МК не требуется.

3.6.2. Защита от превышения сетевого напряжения

Для защиты от высоковольтных помех, возникающих в электрической сети, например при грозовых разрядах, применяется двусторонний полупроводниковый ограничитель напряжения – защитный диод. По сравнению с варисторами защитные диоды обладают более высоким быстродействием, что позволяет использовать их для предохранения высокочувствительных полупроводниковых приборов, к которым, в частности, относятся и микроконтроллеры. Кроме того, в отличие от варисторов их характеристики не ухудшаются со временем [12]. Справедливости ради следует отметить, что среди примеров использования защитных диодов (application notes) таких производителей, как ON Semiconductors и ST Microelectronics, нет ни одного примера, в котором на защитный диод подавалось бы сетевое напряжение.

Защитный диод устанавливается параллельно входу устройства непосредственно за предохранителем. Выводы защитного диода служат теплоотводом. В соответствии с описанием, длина каждого вывода должна составлять 10 мм.

Если в течение некоторого времени ток через защитный диод будет превышать ток срабатывания предохранителя, последний перегорает, защищая устройство. Чем больше превышение тока, тем быстрее сработает предохранитель. Как уже упоминалось, примененный в схеме быстродействующий предохранитель имеет время срабатывания 1 сек. при превышении номинального тока в 2,75 раза.

Если мощность высоковольтного импульса будет больше мощности защитного диода (например, при аварийном повышении сетевого напряжения до 380 В), защитный диод может выйти из строя (на практике не проверялось). При этом его выводы окажутся замкнутыми накоротко, что приведет к перегоранию предохранителя. Остальные элементы схемы останутся неповрежденными. В данном случае для восстановления работоспособности устройства потребуется заменить и предохранитель, и защитный диод.

При воздействии высоковольтного импульса напряжение на входе диодного моста не превысит максимальное напряжение ограничения защитного диода. Это подтвердилось в ходе экспериментов с низковольтным аналогом на примере P6KE6.8A.

Напряжение ограничения защитного диода зависит от длительности импульса, и для примененного в схеме экземпляра составляет 548 В для 1000 мкс и 706 В для 20 мкс (указаны амплитудные значения из описания). В большинстве случаев, описанных в [12], при выборе защитного диода следует руководствоваться напряжением, которое соответствует длительности импульса 1000 мкс. Поэтому будем считать, что напряжение на входе диодного моста ни при каких обстоятельствах не превысит 548 В.

Теперь проанализируем, выдержат ли компоненты устройства напряжение ограничения 548 В. Лампы и предохранитель не учитываются, т.к. их выход из строя не является фатальной неисправностью и легко устраняется заменой. Также можно не учитывать балластный резистор и резистор верхнего плеча делителя напряжения, поскольку высоковольтные и углеродистые (film) резисторы хорошо переносят кратковременные (до 5 секунд) перегрузки, превышающие номинальное напряжение в 1,5 и 2,5 раза соответственно [5]. Долговременной перегрузки в данном случае не будет, т.к. срабатывает предохранитель.

Диодный мост и транзисторы рассчитаны на 600 В. Как было показано ранее при расчете балластного резистора, при напряжении 548 В ток через ИОН не превысит 7 мА, что на 5 мА меньше его максимального рабочего тока 12 мА. Ток внутренних диодов МК при сопротивлении верхнего плеча делителя напряжения 620 кОм не превысит $I = 548 / 620000 = 0,88$ мА, что укладывается в допустимый предел 1 мА.

Таким образом, повышение сетевого напряжения до уровня ограничения защитного диода не приведет к выходу из строя элементов схемы.

Заменять выбранный диод, например на 1.5KE350CA нежелательно. Во-первых, номинальное рабочее напряжение последнего составляет 300 В, что меньше номинального напряжения питания устройства ($220\text{В} \cdot 1,41 = 310\text{В}$). Во-вторых, минимальное напряжение, при котором он начинает пропускать ток, равно $332\text{В} / 1,41 = 236\text{В}$. Это меньше максимально допустимого напряжения питания устройства ($220\text{В} \cdot 1,1 = 242\text{В}$). Обе причины могут привести к возрастанию тока и нагреву диода (проверено экспериментально), что противоречит требованиям проекта. Также нежелательно использовать R6KE400CA, т.к. он имеет в 2,5 раза меньшую мощность. В качестве замены можно выбрать 1.5KE400C, 1.5KE440CA, 1.5KE440C. Но тогда все компоненты устройства должны быть рассчитаны на амплитудное напряжение 572 В, 600 В и 630 В соответственно.

3.7. Расчет потребляемой мощности

Как следует из анализа принципиальной схемы, потребляемый ток складывается из следующих составляющих: ток делителя напряжения I_d , ток стабилитрона $I_{ст}$, и ток нагрузки блока питания I_n . В силу малых величин, обратные токи защитного диода, выпрямительного моста, транзисторов, а также токи утечки конденсаторов не учитываются. Итого, $P = U_{вх} \cdot (I_d + I_{ст} + I_n)$.

Ток делителя напряжения определим по закону Ома с учетом падения напряжения на диодах выпрямительного моста: $P = U_{вх} \cdot (((U_{вх} - U_d) / R_d) + I_{ст} + I_n)$.

Для расчета тока стабилитрона и тока нагрузки преобразуем формулу, использованную при расчете балластного резистора, к виду: $I_{ст} + I_n = (U_{вх} - 2 \cdot U_d - U_{ст}) / R_б$.

С учетом коэффициента, учитывающего отклонение сопротивлений резисторов, конечная формула будет иметь вид: $P = U_{вх} \cdot [((U_{вх} - 2 \cdot U_d) / R_d + K_r) + ((U_{вх} - 2 \cdot U_d - U_{ст}) / R_б + K_r)]$.

Рассчитаем максимальную мощность, потребляемую устройством в ждущем режиме, при номинальном напряжении сети $U_{вх} = 220\text{В}$ и минимальном напряжении стабилизации $U_{ст} = 4,95\text{В}$.

Падение напряжения на диоде выпрямительного моста составит $U_d = 0,65\text{В}$.

Общее сопротивление делителя напряжения определяется суммой последовательно включенных сопротивлений: $R_d = 620000 + 9100 = 629100$. По аналогии: $R_б = 30000 + 30000 = 60000$.

Отклонение номиналов резисторов 5%, т.е $K_r = 0,95$.

Подставляем данные в формулу:

$P = 220 \cdot [(((220 - 2 \cdot 0,65) / 629100 \cdot 0,95) + ((220 - 2 \cdot 0,65 - 4,95) / 60000 \cdot 0,95))] = 220 \cdot [0,00037 + 0,0038] = 0,92\text{ВА}$.

По данным измерений ток, потребляемый устройством от сети в ждущем режиме при номинальном напряжении,

составил 4,0 мА. Отсюда $P = 220 \cdot 0,004 = 0,88\text{ВА}$, что находится в пределах рассчитанной величины.

Поскольку в ждущем режиме устройство представляет собой чисто активную нагрузку, активная мощность в данном случае эквивалентна полной мощности: $P = 0,92\text{ВА} = 0,92\text{Вт}$.

4. КОНСТРУКЦИЯ

Учитывая малое количество деталей, печатная плата не разрабатывалась. Устройство собрано на односторонней макетной плате, выпиленной лобзиком по габаритным размерам светильника (см. рис. 4).

Соединения элементов выполнены навесным монтажом, с помощью термостойкого провода марки МГТФ, а также путем наплавления припоя между соседними дорожками.

Для исключения короткого замыкания, между платой и корпусом проложен термоустойчивый диэлектрический материал. В качестве последнего автор использовал кондитерскую бумагу для запекания.

Провода сетевого шнура заведены в клеммник, но перед этим они проходят сквозь отверстия в плате. Такая мера повышает защиту сетевого шнура от обрыва.

Для удобства монтажа все компоненты выбраны в выводном исполнении. Единственное исключение – SMD конденсатор С3. Он припаян непосредственно к соответствующим выводам панельки МК со стороны монтажа.

МК установлен в цанговую панельку. Конденсатор С2 располагается внутри нее. Благодаря малым габаритам, конденсатор не мешает корпусу МК до конца садиться в панельку.

Транзисторы закреплены в винтовых клеммниках серии 308-031. Это удобно, т.к. для замены транзистора не нужно извлекать плату из корпуса светильника и заниматься пайкой – достаточно открутить три винта клеммной колодки.

Верхняя часть платы зарезервирована для дальнейшего расширения возможностей устройства, например для установки модуля ZigBee.

Отдельный выключатель питания не требуется, поскольку ток утечки канала сток-исток транзистора по описанию не превышает 100 мкА. Измеренный мультиметром ток через лампу в дежурном режиме составил 11 мкА. Однако может случиться так, что лампа будет включена на минимальной яркости, незаметной при дневном освещении. Поэтому в целях безопасности на время замены ламп светильник следует отключать от сети.

Желательно, чтобы конструкция светильника, в особенности его плафонов, не препятствовала отводу тепла,

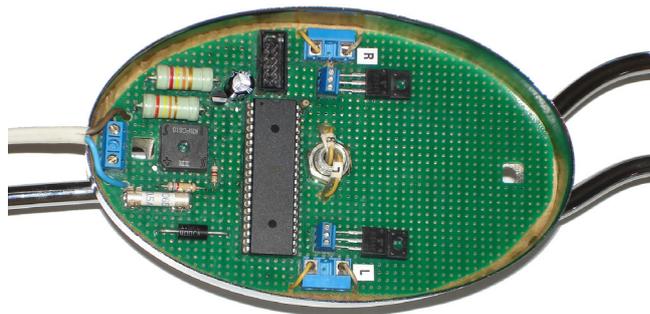


Рис. 4. Вид со стороны деталей

т.к. высокая температура сокращает срок службы ламп [13]. В этом отношении вариант, выбранный автором, следует признать не слишком удачным.

Поскольку светильники, как правило, оформлены в металлических корпусах, следует принять меры по защите устройства от воздействия статического электричества [14].

Полный перечень использованных компонентов (файл *bill_of_materials.zip*); описания активных компонентов, задействованных в схеме (файл *datasheet_dimmer.zip*); основные расчеты (файл *calculations.zip*) вы можете загрузить с сайта нашего журнала:

<http://www.radioliga.com> (раздел "Программы")

а также с сайта автора:

<http://mmiloslavsky.narod.ru>

Литература

10. J. Israelsohn "Miller on edge: The role of Miller capacitance in nonlinear circuits" // EDN, 3/29/2007, <http://www.edn.com/contents/images/6426883.pdf>

11. "The Do's and Don'ts of Using MOS-Gated Transistors" – Application Note AN-936, International Rectifier, <http://www.irf.com/technical-info/apnotes/an-936.pdf>

12. "TVS/Zener Theory and Design Considerations" - Handbook, Rev. 0, Jun, 2005, On Semiconductor, <http://www.onsemi.com/pub/Collateral/HBD854-D.pdf>

13. "Frequently asked questions about dimmers", http://www.lutron.com/product_technical/faq.asp

14. Л.Н. Кечиев, Е.Д. Пожидаев. "Защита электронных средств от воздействия статического электричества" - М.: ИД "Технологии", 2005.



Продолжение в №1/2009