

# Двухканальный стабилизированный диммер

Михаил Милославский

г. Москва

E-mail: MMiloslavsky@yandex.ru

## 3. АППАРАТНАЯ ЧАСТЬ

Устройство предназначено для управления стандартными лампами накаливания. Подключение другой нагрузки, например энергосберегающей лампы или электродвигателя, может вывести устройство и (или) нагрузку из строя.

**ВНИМАНИЕ!** Устройство не имеет гальванической развязки от сети. Элементы схемы находятся под сетевым напряжением! Поэтому до закрепления светильника на стене следует соблюдать соответствующие меры предосторожности.

### 3.1. Диодный мост

Применение диодного моста VD2, рассчитанного на ток 6 А, для работы с небольшим током нагрузки (максимум 0,55 А) объясняется тем, что лампы иногда перегорают во время работы. Возникающий при этом импульс тока амплитудой более 10...20 А способен повредить одноамперные мосты, такие как КЦ402 или КЦ405.

Еще одна причина большого запаса по току – это гораздо меньшая степень нагрева моста. Впрочем, полностью устранять нагрев не имеет смысла, т.к. корпус устройства все равно немного нагревается от ламп, особенно работающих на максимальной яркости.

По причине, указанной в разделе **Защита от превышения сетевого напряжения**, диодный мост должен быть рассчитан на обратное напряжение не менее 600 В. Использование моста на 1000 В вызвано отсутствием в продаже на момент сборки устройства экземпляров с меньшими напряжениями.

### 3.2. Блок питания

#### 3.2.1. Источник опорного напряжения

Особенностью схемы является использование для питания МК не обычного стабилизатора, а интегрального источника опорного напряжения DA1 параллельного типа. Как уже отмечалось, это позволяет отказаться от отдельного ИОН и снизить потребляемый ток. Помимо этого, если напряжение на выходе параллельного ИОН повысится по каким-либо причинам, возникшим со стороны шины питания схемы, это не приведет к нарушению стабилизации, а лишь увеличит ток через ИОН. Это общая особенность стабилизаторов напряжения параллельного типа [3].

Нерегулируемый двухвыводной ИОН выбран специально – нет необходимости подбирать и устанавливать два дополнительных высокоточных резистора. Для стабильной работы данного ИОН не требуется конденсатор с низким эквивалентным последовательным сопротивлением (ESR), что является дополнительным плюсом.

ИОН серии LM4040 выпускаются с различным классом точности и, соответственно, стоимости. Для данного применения достаточно класса точности 1%.

В качестве замены можно порекомендовать более дорогой прибор LT1634, хотя на практике его работа не проверялась.



Продолжение. Начало в №10/2008

#### 3.2.2. Балластный резистор

Для гашения избытка сетевого напряжения, поступающего на вход ИОН, используется балластное сопротивление, образованное резисторами R1 и R2. Принцип действия ИОН параллельного типа совпадает с обычным стабилизатором, поэтому для расчета гасящего резистора можно применить классическую формулу:

$$R = (U_{вх} - U_{ст}) / (I_n + I_{ст}), \text{ где}$$

$U_{вх}$  – входное (ограничиваемое) напряжение, снимаемое с выхода диодного моста;

$U_{ст}$  – напряжение стабилизации стабилизатора;

$I_n$  – ток нагрузки;

$I_{ст}$  – ток стабилизатора.

Изменим формулу с учетом падения напряжения на двух диодах диодного моста:

$$R = (U_{вх} - 2 \cdot U_d - U_{ст}) / (I_n + I_{ст}).$$

Падение напряжения на предохранителе не учитываем, т.к. по результатам измерений оно составило всего 0,2 В при максимальной нагрузке. Добавив коэффициент, учитывающий разброс сопротивления резистора, получаем конечную формулу:

$$R = [(U_{вх} - 2 \cdot U_d - U_{ст}) / (I_n + I_{ст})] \cdot K_r.$$

Сопротивление резистора должно быть, с одной стороны, достаточно низким, чтобы обеспечить минимальный ток стабилизатора при максимальном токе нагрузки и минимальном напряжении сети, но, с другой стороны, достаточно высоким, чтобы при максимальном напряжении сети и минимальном токе нагрузки не превысить максимально допустимый ток стабилизатора.

Начнем с выяснения максимального сопротивления резистора, обеспечивающего минимальный ток стабилизатора при наихудших условиях.

Минимальное среднее значение выпрямленного напряжения  $U_{вх}$  при 10%-ном допуске на напряжение сети [4] составит 198 В. Но здесь следует также учесть снижение напряжения под воздействием мощной нагрузки. В расчете максимальной яркости лампы указано снижение на 4 В. Значит  $U_{вх} = 198 - 4 = 194$  В.

Наибольшее падение напряжения на диодном мосту будет при максимальной нагрузке. Согласно графику из описания моста, при токе нагрузки 0,55 А, когда обе лампы включены на максимальную яркость, прямое напряжение для одного диода составляет около 0,73 В.

Отклонение стабилизированного напряжения равно 1% (по описанию LM4040, класс точности D). Значит  $U_{ст} = 5 + 0,05 = 5,05$  В.

Минимальный ток, требуемый для работы стабилизатора, в соответствии с его описанием, составляет  $I_{ст} = 0,1$  мА.

Поскольку в схеме используются два резистора, каждый из которых имеет допуск 5%, принимаем  $K_r = 0,9$ . Старение резисторов (увеличение сопротивления со временем) не учитывается, т.к. они не будут подвергаться ни максимально допустимому напряжению, ни высокой температуре.

Измеренный мультиметром ток потребления схемы при напряжении 5,0 В составил 2,2 мА. Практическая проверка показала, что установка различных экземпляров Atmega16, в т.ч. без индекса L, имеющих revision J и дату производства 2006-2007 гг., практически не влияет на ток потребления. Небольшим влиянием (десятки микроампер), которые вызваны разбросом тактовой частоты внутреннего генератора, можно пренебречь.

Потребляемый ток также почти не зависит от того, включены ли каналы, в каком количестве и на какой яркости.

В силу малых величин обратные токи защитного диода, диодного моста, транзисторов, а также токи утечки конденсаторов не учитываются.

В значительной степени на ток потребления влияет нажатие кнопок. В этом случае ток протекает от плюса источника питания через внутренний (pull-up) резистор МК и замкнутую кнопку на землю. Указанное в описании МК минимальное сопротивление внутреннего резистора составляет 20 кОм. Если нажаты обе кнопки, ток составит  $2 \cdot (5 / 20000) = 0,5$  мА.

Таким образом, суммарный максимальный ток потребления по цепи +5 В (при напряжении ровно 5,0 В) равен  $2,2 + 0,5 = 2,7$  мА (напомним, что это без учета тока стабилизатора).

Значит, в худшем случае, т.е. при напряжении 5,05 В, потребляемый ток составит  $I_n = 5,05 \cdot 2,7 / 5 = 2,73$  мА.

Если бы в схеме использовался однополупериодный выпрямитель, этот ток нужно было бы удвоить.

Подставим полученные данные в исходную формулу:

$$R = [(194 - 2 \cdot 0,73 - 5,05) / (0,00273 + 0,0001)] \cdot 0,9 = [187,49 / 0,00283] \cdot 0,9 = 66251 \cdot 0,9 = 59626 \text{ Ом.}$$

Таким образом, балласт должен иметь сопротивление не более 60 кОм. Его можно получить, соединив последовательно два резистора по 30 кОм. То, что это сопротивление немного больше расчетного, допустимо. По теории вероятности, вряд ли возможна ситуация, когда сопротивление обоих резисторов на 5% меньше, и вместе с этим напряжение стабилизатора на 1% больше.

Теперь рассчитаем, не выйдет ли из строя стабилизатор, если сетевое напряжение увеличится до уровня ограничения защитного диода VD1, а также при воздействии других неблагоприятных факторов. Преобразуем ранее использованную формулу к следующему виду:

$$I_{ст} = [(U_{вх} - 2 \cdot U_d - U_{ст}) / (R \cdot K_r)] - I_n.$$

Для расчета принимаем следующие численные значения:

Максимальное напряжение ограничения защитного диода  $U_{вх} = 548$  В.

При отсутствии нагрузки падение напряжения на одном диоде диодного моста составит  $U_d = 0,65$  В.

Минимальное напряжение стабилизации стабилизатора  $U_{ст} = 5 - 0,05 = 4,95$  В.

Так как шунт составлен из двух резисторов,  $R (\text{Ом}) = 30000 + 30000$ .

Коэффициент сопротивления  $K_r$  принимаем равным 0,95, т.к. при этом ток стабилизатора будет больше.

Минимальный ток нагрузки будет при не нажатых кнопках. При номинальном напряжении питания 5 В этот ток равен 2,2 мА. Значит при минимальном напряжении 4,95 В ток будет равен  $I_n = 4,95 \cdot 2,2 / 5 = 2,18$  мА.

$$I_{ст} = [(548 - 2 \cdot 0,65 - 4,95) / ((30000 + 30000) \cdot 0,95)] - 0,00218 = [541,75 / 57000] - 0,00218 = 7,3 \text{ мА.}$$

Полученное значение меньше 12 мА – величины максимального тока ИОН, рекомендованного в его описании. Мощность ИОН, рассеиваемая при таком токе, составит  $5 \cdot 0,007 = 35$  мВт. Это более чем на порядок меньше его максимальной мощности 500 мВт. Следовательно, выбранное сопротивление балластного резистора нам подходит.

Переходим к расчету мощности балластного резистора. На первый взгляд, казалось бы, резистора 0,5 Вт будет вполне достаточно, ведь он выдерживает напряжение до 350 В. На самом деле это не так. В [5] сказано, что мощность резистора, указываемая в его описании, действительна лишь в том случае, если его сопротивление выше так называемого критического. Последнее вычисляется по формуле:  $R_k = U_{пасп}^2 / P_{пасп}$ , где  $U_{пасп}$  – паспортное рабочее напряжение резистора,  $P$  – его паспортная мощность. Для резистора серии C2-23 мощностью 0,5 Вт критическое сопротивление  $R_k = 350^2 / 0,5 = 245$  кОм. Если сопротивление резистора, как в нашем случае, меньше критического, расчет мощности следует производить по формуле:  $P = U^2 / R$ . Учитывая максимальное напряжение сети, минимальное падение напряжения на диодном мосту, и минимальное напряжение стабилизации, мощность резистора будет равна:

$$P = (U_{вх} - 2 \cdot U_d - U_{ст})^2 / R.$$

$$P = (242 - 2 \cdot 0,65 - 4,95)^2 / 60000 = 0,93 \text{ Вт.}$$

Однако мощности резистора 1 Вт тоже оказалось недостаточно. Экспериментальная проверка показала, что даже резистор 2 Вт (отечественный, серии МЛТ) сопротивлением 56 кОм сильно нагревается. Согласно требованиям проекта, это недопустимо. Нагрев балластного резистора является единственной причиной нагрева корпуса устройства в ждущем режиме. Поэтому очень важно этот нагрев устранить.

Попытка использования 5 Вт импортного резистора серии SQP сопротивлением 50 кОм проблемы не решила – он нагревается почти до той же температуры, что и 2 Вт МЛТ.

В результате было решено использовать два 2 Вт резистора, соединенных последовательно. Помимо снижения температуры, это повышает надежность устройства, т.к. в случае пробоя одного из резисторов, второй предотвратит выход ИОН из строя. Чтобы обеспечить равномерный нагрев, номиналы резисторов должны быть одинаковыми.

Используются отечественные 2 Вт резисторы серии МЛТ. Их габариты несколько больше импортных аналогов серии C2-23, зато они меньше нагреваются.

Численные значения температуры для различных резисторов не приводятся в связи с большой погрешностью измерений. Показания менялись от случая к случаю, причем независимо от типа измерительного прибора – термopара, подключенная к цифровому мультиметру, или цифровой термометр.

### 3.2.3. Фильтрующий конденсатор

Конденсатор C1 сглаживает пульсации выпрямленного напряжения. Хотя для расчета его емкости можно было воспользоваться методикой из [6, стр. 52, раздел 1.27 "Фильтрация в источниках питания"], конденсатор подбирался эмпирическим путем. Это вызвано следующим обстоятельством.

Через несколько секунд после окончания регулировки яркости ее значение запоминается в EEPROM. Согласно описанию МК, ток программирования составляет 6 мА (при 5 В, 25°C). Отсюда следует, что по сравнению с током потребления в обычном режиме ток возрастает почти в четыре раза:

$(2,2 \text{ мА} + 6 \text{ мА}) / 2,2 \text{ мА} = 3,7$ . Цикл записи, согласно описанию МК, длится 8,5 мс, т.е. почти целый полупериод (10 мс). При таких условиях накопленный заряд конденсатора быстро истощается, что приводит к уменьшению напряжения питания МК и образцового напряжения АЦП. Визуально это выглядит как кратковременное однократное моргание лампы через несколько секунд после окончания регулировки яркости (эффект заметен при уровне яркости выше среднего).

Код программы построен таким образом, что циклы записи в EEPROM следуют друг за другом через каждые 10 мс. Если регулировка яркости прекращается одновременно для двух каналов, запись в память будет длиться на 8,5 мс больше. За 1,5 мс (10 мс – 8,5 мс) конденсатор не успеет полностью зарядиться, соответственно, напряжение опустится еще ниже, и моргание лампы будет еще заметнее, особенно при пониженном напряжении сети.

Поскольку заранее неизвестно, при какой амплитуде моргание становится заметно (а именно к амплитуде пульсаций привязана формула в [6]), проще подобрать конденсатор экспериментально.

Конденсатор подбирался при минимальном напряжении сети 198 В и окончании регулировки яркости по достижении максимального значения на обоих каналах. Номинал 1000 мкФ позволил устранить моргание после окончания регулировки яркости одного канала, и сделать моргание почти не заметным после одновременного окончания регулировки яркости обоих каналов. Дальнейшему повышению емкости препятствуют малые габариты устройства.

Конечно, можно было организовать задержку между последовательными записями в EEPROM. Однако увеличение времени выполнения основной программы за счет добавления кода в данном случае не оправдано. Во-первых, мала вероятность того, что обе кнопки будут отпущены одновременно, причем на уровне яркости выше среднего для обеих ламп. Во-вторых, невелика вероятность того, что напряжение в сети упадет до 198 В. Наконец, в-третьих, эффект моргания слишком мало заметен, чтобы уделять этому внимание.

На функционировании ИОН большая величина емкости не отражается, т.к. в его описании сказано, что допустима емкостная нагрузка любого номинала.

После подключения устройства к сети, чтобы к началу основного цикла программы напряжение питания МК успело стабилизироваться на номинальном уровне, требуется организовать задержку старта. Если этого не сделать, то вследствие заниженного опорного напряжения АЦП нарушится плавность автоматического включения каналов.

Время задержки старта определялось экспериментально (хотя правильнее было бы найти подходящую для расчета формулу). Согласно показаниям мультиметра, напряжение питания МК достигало 5 В через примерно 3 секунды после подключения устройства к сети с минимальным напряжением 198 В. Учитывая прямую зависимость частоты внутреннего RC-генератора МК от напряжения питания, а также погрешность измерений, была выбрана задержка с запасом, равная 4 сек. Часть этой задержки обеспечивается внутренними узлами МК Power-on Reset и Brown-out Detection. Оставшаяся часть реализована программно.

Переходим к выбору номинального напряжения конденсатора. Этот параметр в значительной степени определяет

срок его службы. В [7] рекомендуется, чтобы рабочее напряжение на конденсаторе составляло 80...100% от номинального. С другой стороны, в [8] рекомендуется, чтобы рабочее напряжение было в два раза меньше номинального. Поскольку экземпляр, рассчитанный на 10 В, все равно не подходит по своим габаритам (если устанавливать его как положено вертикально), выбираем конденсатор с номинальным напряжением 6,3 В.

Здесь имеет смысл обратить внимание на следующий факт. В описаниях электролитических конденсаторов фирмы Jamicon указано, что, начиная с рабочего напряжения 25 В, их емкость изменяется со временем на 20%. Для меньших же напряжений это значение равно 25%.

Верхний предел температурного диапазона, на который рассчитан выбранный конденсатор, составляет 105°C. Это еще один параметр, в значительной степени влияющий на срок службы конденсатора. Выбор обусловлен также тем, что корпус устройства немного нагревается от ламп, диодного моста и балластного резистора.

Уменьшение емкости конденсатора, связанное с разбросом номинала или старением, не нарушит работоспособность устройства. Возможно лишь чуть более заметное моргание ламп в момент запоминания яркости.

### 3.3. Микроконтроллер

Несмотря на то, что напряжение питания схемы составляет 5 В, используемый МК U1 имеет индекс L, означающий возможность работы при напряжении питания от 2,7 до 5 В. Это связано с большой емкостью фильтрующего конденсатора, т.е. с плавным нарастанием напряжения питания при подключении устройства к сети.

Порог встроенного в МК супервизора питания выставлен в соответствии с описанием на 2,7 В. Если же этот порог сделать равным 4,0 В, или использовать обычный МК (без индекса L) с порогом 4,0 В, или вообще отказаться от встроенного супервизора, некоторые экземпляры МК могут не запуститься, особенно при минимальном напряжении сети 198 В. Использовать же обычный МК с порогом 2,7 В нельзя, т.к. это может привести, в частности, к искажению данных EEPROM, если во время сохранения информации произойдет отключение питания.

МК тактируется внутренним RC генератором на частоте 1 МГц. Этого достаточно, чтобы получить среднее время выполнения основной программы 0,5 мс. Здесь важно помнить о том, что повышение тактовой частоты увеличивает ток потребления. Стабилизировать частоту кварцевым или керамическим резонатором не требуется, т.к. в данном применении высокая точность не нужна. Также не требуется калибровка внутреннего генератора.

Производитель МК рекомендует предпринять следующие меры при работе с АЦП:

- установить между выводом REF и землей фильтрующий конденсатор;
- соединить вывод AGND с аналоговой землей;
- использовать LC фильтр питания в цепи AVCC;
- при измерении не переключать выводы АЦП порта, если они настроены как цифровые выходы.

Поскольку высокая достоверность результата измерения не требуется, то с целью упрощения схемы, вышеуказанные меры не соблюдаются. Калибровка АЦП тоже не требуется,

в том числе потому, что используется обычный канал, а не дифференциальный [9, раздел 2.3].

Несмотря на принятые упрощения, точность, т.е. повторяемость схемы, от этого не ухудшается. Благодаря внешнему ИОН, используемому также в роли стабилизатора питания МК, результаты измерений АЦП всегда остаются стабильными вплоть до младшего значащего разряда, даже при 10-битном разрешении АЦП.

По рекомендации ATMEL, для обеспечения надежной работы МК, в непосредственной близости от его выводов питания установлены блокировочные конденсаторы C2 (керамический) и C3 (танталовый электролитический). В данной схеме это особенно актуально, т.к. при коммутации затворов транзисторов, обладающих довольно высокой емкостью, возникают значительные импульсные токи.

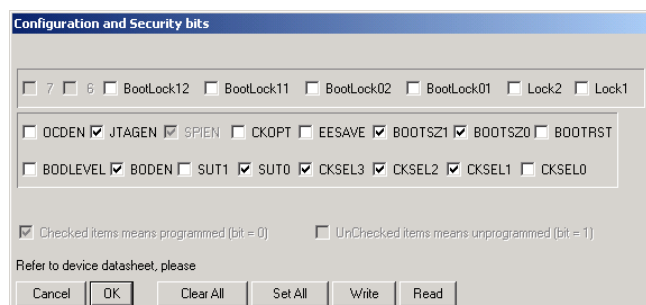
Для программирования МК предусмотрен разъем JS4 "ISP" (In-System Programming, внутрисхемное программирование). Также как и при программировании EEPROM самой программой во время работы, во время внутрисхемного программирования ток МК, согласно его описанию, составляет 6 мА (при 5 В и 25°C). По результатам измерений максимальный потребляемый ток находился в интервале от 4,3 мА до 5,8 мА. Из-за малой мощности блока питания напряжение во время программирования снижалось примерно до 3,3 В. Однако многократный опыт прошивки МК показал, что это безвредно. Более того, в Интернете встречаются сообщения о том, что МК нормально программируется при напряжении вплоть до 3 В.

При программировании МК в составе устройства важно обратить внимание на следующие моменты:

- требуется гальваническая развязка программатора, поскольку схема находится под потенциалом сети;
- может потребоваться внешний блок питания (тоже с гальванической развязкой), если программатору будет недостаточно тока, вырабатываемого блоком питания схемы;
- желательна установка высокоомных резисторов (порядка 100 кОм) между затворами и истоками транзисторов, чтобы не допустить их возможного перегрева, а также выхода из строя из-за самопроизвольного открывания и увеличения сопротивления канала, вызванного тем, что во время программирования выводы МК находятся в высокоимпедансном состоянии.

Поэтому лучшим вариантом, возможно, окажется запрограммировать МК до установки в схему.

Состояние фьюзов МК соответствует значениям по умолчанию, за исключением запрограммированного фьюза BODEN, разрешающего использование встроенного супервизора питания (рис. 3).



**Рис. 3.** Программирование фьюзов МК.

Ранее отмечалось, что МК с незадействованным супервизором питания может не запуститься. Чтобы обойти это ограничение и иметь возможность запрограммировать фьюз, следует после появления напряжения питания кратковременно соединить вывод Reset МК с общим проводом.

Несмотря на то, что скриншот (рис. 3) получен из программатора PonyProg2000, пользоваться им не рекомендуется. Эта программа до сих пор находится в статусе бета-версии, редко обновляется, и нестабильно работает, особенно если компьютер параллельно занят выполнением других задач. Были случаи вывода МК из строя. Вместо PonyProg2000 автор рекомендует использовать другой свободно распространяемый программатор – avrdude. В частности, он входит в состав бесплатной среды разработки WinAVR.

Заменить МК можно на ATmega16 (без индекса L). Но в этом случае потребуется внешний супервизор питания (встроенный супервизор следует отключить). Дополнительные сведения о замене приведены в описании **Программной части**.

Не показанные на схеме (рис. 2) выводы МК никуда не подключены.

### 3.4. Делитель напряжения

Резисторы R3 и R4 образуют делитель, необходимый МК для измерения напряжения сети и определения момента перехода фазы через ноль. Обычно резистор между выходом диодного моста и входом МК рекомендуется составлять из двух включенных последовательно (на случай пробоя одного из них), но поскольку перед диодным мостом установлен защитный диод, эта рекомендация не выполняется.

Делитель должен быть рассчитан таким образом, чтобы при максимальном входном напряжении  $U_{вх}$  выходное напряжение делителя  $U_{вых}$  не превышало напряжение питания МК. В противном случае синусоидальный сигнал будет ограничен по амплитуде внутренним диодом МК, что исказит измерения. В действительности ограничение наступает, когда входное напряжение превышает напряжение питания МК на 0,5 В или больше. Эта величина определяется прямым напряжением внутреннего диода МК. В данной схеме важно, чтобы входной сигнал не превышал минимальное напряжение питания МК, потому что это напряжение является опорным для АЦП. Иначе результатом АЦП будут коды, соответствующие опорному напряжению, а не истинному значению входного сигнала.

Согласно описанию МК, АЦП рассчитан на обработку низкоомных сигналов (10 кОм и менее). Поэтому для нижнего плеча делителя напряжения выберем номинал равный 9,1 кОм, чтобы предусмотреть 5%-ный допуск сопротивления.

Для вычисления минимального сопротивления верхнего плеча делителя воспользуемся стандартной формулой:

$$U_{вых} = (U_{вх} \cdot R_2) / (R_1 + R_2). \text{ Отсюда: } R_1 = ((U_{вх} - U_{вых}) \cdot R_2) / U_{вых}.$$

Введем коэффициент  $K_{вх}$ , определяющий максимальное отклонение сетевого напряжения:

$$R_1 = ((U_{вх} \cdot K_{вх} - U_{вых}) \cdot R_2) / U_{вых}.$$

Поскольку нас интересует полный размах сетевого напряжения, перепишем формулу с учетом амплитудного значения:

$$R_1 = ((U_{вх} \cdot K_{вх} \cdot 1,41 - U_{вых}) \cdot R_2) / U_{вых}.$$

Учтем падение напряжения на двух диодах диодного моста:

$$R1 = ((U_{вх} \cdot K_{вх} \cdot 1,41 - 2 \cdot U_d - U_{вых}) \cdot R2) / U_{вых}.$$

Падение напряжения на предохранителе не учитывается, т.к. по результатам измерений оно составило всего 0,2 В при максимальной нагрузке.

Осталось добавить коэффициенты  $K_r$ , определяющие отклонение резисторов от номинала:

$$R1 = ((U_{вх} \cdot K_{вх} \cdot 1,41 - 2 \cdot U_d - U_{вых}) \cdot R2 \cdot K_{r2}) \cdot K_{r1} / U_{вых}.$$

Переходим к подстановке численных значений.

Входное напряжение и его отклонение равны  $U_{вх} = 220$  В и  $K_{вх} = 10\%$  соответственно.

В качестве значения  $U_d$  берем минимальное падение напряжения, т.к. в этом случае сопротивление резистора  $R1$  будет больше. Минимальное падение напряжения на диодах моста будет при минимальном токе, т.е. при отключенной нагрузке. Судя по графику из описания диодного моста, падение напряжения на одном элементе при токе нагрузки 10 мА равно примерно  $U_d = 0,65$  В.

Благодаря использованию фильтрующего конденсатора большой емкости, пульсациями БП можно пренебречь. Поэтому минимальное напряжение питания МК определяется минимальным напряжением стабилизации ИОН, что, согласно описанию последнего, равно  $U_{вых} = 5$  В  $- 1\% = 4,95$  В.

Стандартный допуск на отклонение сопротивления резисторов равен  $K_r = 5\%$ . Нужно предусмотреть ситуацию, когда сопротивление  $R2$  ( $R3$  по схеме) будет больше, т.к. при этом  $U_{вых}$  тоже увеличится. Это, как было отмечено ранее, может привести к неверному результату измерения. Поэтому при-

нимаем  $K_{r2} = 0,95$ . С сопротивлением  $R1$  ( $R4$  по схеме) ситуация противоположная – важно учесть уменьшение сопротивления. Поэтому  $K_{r1} = 1,05$ .

Подставляя численные значения в формулу, получаем:

$$R1 = ((220 \cdot 1,1 \cdot 1,41 - 2 \cdot 0,65 - 4,95) \cdot 9,1 \cdot 10^3 \cdot 0,95) \cdot 1,05 / 4,95 = (334,97 \cdot 8,65 \cdot 10^3) \cdot 1,05 / 4,95 = 3042,37 \cdot 10^3 / 4,95 = 614,6 \cdot 10^3 \text{ Ом}.$$

Ближайшим сопротивлением из стандартного ряда, превышающим полученное значение, является номинал 620 кОм.

Поскольку падение напряжения на резисторе верхнего плеча делителя может достигать  $242$  В  $\cdot 1,41 = 341$  В, резистор должен иметь мощность 0,5 Вт.

## Литература

4. ГОСТ13109-97. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
5. G. Howell. "Five questions about resistors" // EDN, 9/28/2006, <http://www.edn.com/contents/images/6372835.pdf>
6. П. Хоровиц, У. Хилл. "Искусство схемотехники" - Изд. 6-е, М.: Мир, 2003.
7. C. Hillman. "Common mistakes in electronic design" // EDN, 12/14/2007, <http://www.edn.com/contents/images/6512156.pdf>
8. А. Колпаков. "Особенности применения электролитических конденсаторов" // Схемотехника, 2000г., №2, стр.30.
9. "Characterization and Calibration of the ADC on an AVR" - Application Note AVR120, 02/06, Atmel Corporation, [http://www.atmel.com/dyn/resources/prod\\_documents/doc2559.pdf](http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc2559.pdf)



**Продолжение в №12/2008**