

## Двухканальный стабилизированный диммер

Михаил Милославский

г. Москва

E-mail: MMiloslavsky@yandex.ru

### 6. ОСОБЕННОСТИ СТАБИЛИЗАЦИИ ЯРКОСТИ

Исследование выявило две причины непостоянной яркости освещения в наших домах: изменение формы сетевого напряжения и включение мощной нагрузки. Первая причина заметна тем больше, чем меньше яркость. Вторая причина заметна при любой яркости. Примененный в устройстве алгоритм устраняет последствия обеих причин. При этом обеспечивается одинаково хорошее качество стабилизации при любом уровне яркости.

В ходе разработки выяснилось, что наибольшее влияние на колебание яркости оказывает включение мощной нагрузки при максимальном напряжении на лампе. Это позволило сделать вывод, что если обеспечить стабилизацию яркости для данного случая, то во всех других случаях стабилизация будет обеспечена автоматически.

Чтобы максимальная яркость оставалась неизменной при включении мощной нагрузки, максимальное напряжение на лампе должно быть изначально ограничено. За счет образовавшейся разницы напряжений как раз и осуществляется стабилизация при уменьшении сетевого напряжения. Отсюда следует, что выбирать уровень максимального напряжения на лампе нужно как компромисс между максимальной яркостью и степенью ее стабилизации.

Решением послужила наиболее часто встречающаяся бытовая ситуация – включение электрочайника. Путем измерений было установлено, что при включении на кухне чайника мощностью 2 кВт, напряжение в комнатной розетке, предназначенной для подключения светильника, падает с 233 до 228 В. Значит в худшем случае, т.е. при напряжении сети 198 В, напряжение упадет до  $(198 \cdot 228) / 233 = 193,75$  В. Следовательно, для обеспечения стабилизации максимальное напряжение на лампе должно быть ограничено уровнем 194 В. Разумеется, такое напряжение должен поддерживать и блок питания, что было учтено при его расчете.

Практическая проверка использованного алгоритма, выбранного компромиссного решения и методики подбора максимального напряжения показала, что при изменении напряжения сети в диапазоне от 198 до 242 В напряжение на лампе изменяется всего лишь на 1 В, что совершенно не заметно для глаза. Более того, при включении пылесоса мощностью 1,5 кВт, подсоединенного к тому же удлинителю, что и светильник, практически не заметно моргание лампы, работающей на полной яркости.

На основании полученных данных нетрудно оценить качество стабилизации количественно. Разница между максимальным и минимальным входным напряжением составляет  $242 - 198 = 44$  В. Если бы при изменении входного напряжения выходное оставалось неизменным, качество стабилизации составило бы 100%, т.е. было бы идеальным. Однако выходное напряжение изменяется на 1 В, отсюда  $44 - 1 = 43$  В. Для перевода этой разности в проценты, составим пропорцию:  $(43 \cdot 100) / 44 = 97,73\%$ . Округлив результат, получаем качество стабилизации на уровне 98%.



Окончание. Начало в №10-12/2008; №1/2009

По отношению к номинальному напряжению сети (220 В) максимальное напряжение на лампе оказывается уменьшенным на  $(220 - 194) \cdot 100 / 220 = 12\%$ . Здесь полезно вспомнить, что снижение напряжения всего на 10% увеличивает срок службы лампы приблизительно в два раза, на 25% – в четыре раза [18]. И наоборот, повышение напряжения всего на несколько вольт сверх того, что указано на лампе, значительно сокращает ее ресурс [19].

Чтобы выяснить, насколько оказалась уменьшена максимальная мощность лампы, необходимо узнать сопротивление ее нити. Это можно сделать по формуле  $R = U^2 / P$ . Поскольку мощность лампы нормируется при напряжении 230 В (и это подтверждено экспериментально), сопротивление нити  $R = 230^2 / 60 = 882$  Ом. Тогда при напряжении 194 В мощность будет равна  $P = 194^2 / 882 = 43$  Вт, что ощутимо меньше исходных 60 Вт. По этой причине увеличивать допуск сетевого напряжения свыше  $\pm 10\%$  нежелательно, т.к. в этом случае придется еще больше ограничить максимальное напряжение на лампе, что приведет к еще большему снижению ее мощности.

Минимальная яркость не имеет ограничивающих факторов, т.к. промежуток времени, в течение которого лампа находится во включенном состоянии, невелик. За счет получаемого в данном случае большого запаса по напряжению, для любого значения минимальной яркости обеспечивается отличная стабилизация во всем диапазоне напряжения сети. По этой причине выбор минимальной яркости – исключительно дело вкуса.

С порядком перевода максимального и минимального напряжения на лампе в соответствующие значения ячеек eBrightnessMax и eBrightnessMin можно ознакомиться в разделе **Настройка**. По умолчанию первый канал (ячейка eBrightnessMaxCh1) настроен на максимальное выходное напряжение 194 В в соответствии с вышеприведенным расчетом. Второй канал (ячейка eBrightnessMaxCh2) настроен на 215 В, в расчете на то, что напряжение сети не опустится ниже номинала 220 В. Значение ячейки eBrightnessMinCh1 обеспечивает минимальное напряжение на лампе 33 В, eBrightnessMinCh2 – 35 В. Интересно отметить, что для едва заметного в полной темноте свечения нити накала требуется напряжение 27 В, т.е. 12% от номинального напряжения сети.

Следует иметь в виду, что на уровень яркости (и минимальный, и максимальный) оказывает влияние разброс номинала резисторов делителя напряжения. Поэтому после сборки устройства его выходные напряжения могут немного отличаться от указанных значений по умолчанию. Если требуется точное соответствие, следует подобрать значения eBrightnessMax и eBrightnessMin, руководствуясь методикой, приведенной в разделе **Настройка**.

Уровень яркости не зависит от конкретного экземпляра МК.

## 7. НАСТРОЙКА

Устройство не нуждается в настройке. Собранное безошибочно и из исправных деталей оно начинает работать сразу. При желании можно отрегулировать параметры, задаваемые пользователем, например уровень максимальной яркости.

Следует помнить, что фьюз, разрешающий работу встроенного в МК супервизора питания, должен быть запрограммирован. При этом порог срабатывания супервизора должен составлять 2,7 В.

### 7.1. Подбор максимальной яркости

Предположим, требуется обеспечить стабилизацию яркости при воздействии мощной нагрузки, когда минимально допустимое напряжение сети (198 В) снижается до 194 В. Первым делом убеждаемся, что запоминание яркости для данного режима данного канала активировано (соответствующий бит `ebSaveBright` равен 1). После этого программируем ячейку `eBrightnessMax` значением `$FF`. Затем подключаем устройство к ЛАТРу, на котором выставляем напряжение 198 В. Далее подключаем параллельно лампе TrueRMS AC+DC вольтметр. Регулируя яркость лампы удерживанием кнопки, добиваемся показания вольтметром 194 В. После паузы, необходимой для запоминания текущей яркости (не менее 2,5 секунд), считываем с помощью программатора содержимое ячейки `eLastBright`. Полученное значение записываем в ячейку `eBrightnessMax`. При необходимости осуществляем конвертацию между шестнадцатеричным и десятичным форматом. Для удобства можно на время подбора уменьшить скорость регулирования яркости, присвоив ячейке `eBrightChangeSpeed` максимальное значение (5).

Необходимо помнить, что блок питания рассчитан на минимальное сетевое напряжение 194 В. Поэтому воздействие мощной нагрузки не должно вызывать уменьшение напряжения сети ниже этого значения. В противном случае стабилизация яркости будет нарушена из-за снижения опорного напряжения АЦП.

### 7.2. Подбор минимальной яркости

По аналогии с подбором максимальной яркости, первым делом убеждаемся, что запоминание яркости для данного режима данного канала активировано (соответствующий бит `ebSaveBright` равен 1). После этого программируем ячейку `eBrightnessMin` значением `$00`. Затем, регулируя яркость лампы удерживанием кнопки, выбираем желаемую минимальную яркость. После паузы, необходимой для запоминания текущей яркости (не менее 2,5 секунд), считываем содержимое ячейки `eLastBright`. Полученное значение записываем в ячейку `eBrightnessMin`. При необходимости осуществляем конвертацию между шестнадцатеричным и десятичным форматом. Для удобства можно на время подбора уменьшить скорость регулирования яркости, присвоив ячейке `eBrightChangeSpeed` максимальное значение (5).

### 7.3. Выбор константы `sADCsSamplesCount`

В случае модификации программного кода основного цикла программы необходимо заново рассчитать значение константы `sADCsSamplesCount`. Данная константа определяет количество проходов процедуры `ADCsSampling`,

т.е. продолжительность измерения сетевого напряжения, в т.ч. при выключенных каналах, когда значения `rChXOffTime` равны нулю. В целом, чем больше значение константы, тем лучше, т.к. лампа будет дольше находиться во включенном состоянии, что позволит достичь большей максимальной яркости. Однако суммарная длительность процедуры `ADCsSampling`, определяемая константой `sADCsSamplesCount`, ограничена длительностью выполнения основной программы. Например, если основная программа выполняется в течение `Top = 500` мкс, то суммарная длительность процедуры `ADCsSampling` не может быть больше 9500 мкс, т.к. один полный цикл выполнения всего кода программы при частоте сети 100 Гц занимает `T = 10000` мкс. Если же процедура `ADCsSampling` будет выполняться дольше, возникнут сбои, проявляющиеся в виде моргания ламп.

Чтобы определить значение константы `sADCsSamplesCount`, требуется знать время `Tпр`, затрачиваемое на однократное выполнение процедуры `ADCsSampling`. Таким образом, первоначально формула для вычисления константы выглядит следующим образом:

$$sADCsSamplesCount = (T - Top) / Tпр.$$

Помимо времени выполнения основной программы, формула должна также учитывать время, затрачиваемое на процедуру `PhaseDetect`. Поскольку эта процедура основана на сравнении двух чисел, последовательно получаемых с АЦП, минимальное время ее выполнения равно удвоенному времени преобразования АЦП `тацп`, плюс время `to`, необходимое для обработки результата:

$$sADCsSamplesCount = (T - (Top + 2 \cdot Тацп + To)) / Tпр.$$

Еще один участок кода, который должен быть учтен в формуле, это команды, находящиеся между процедурами `PhaseDetect` и `ADCsSampling`. С учетом времени их выполнения `Tд`:

$$sADCsSamplesCount = (T - (Top + 2 \cdot Тацп + To + Tд)) / Tпр.$$

Коэффициент `Kч` учитывает отклонение частоты сети от номинальной:

$$sADCsSamplesCount = (T \cdot Kч - (Top + 2 \cdot Тацп + To + Tд)) / Tпр$$

Полученная формула пригодна для расчета, если время выполнения одной команды составляет ровно 1 мкс. Но поскольку тактовая частота МК не стабилизирована кварцевым резонатором, для обеспечения хорошей повторяемости устройства требуется ввести поправочный коэффициент `Krc`, учитывающий погрешность внутреннего генератора МК:

$$sADCsSamplesCount = (T \cdot Kч - (Top \cdot Krc + 2 \cdot Тацп \cdot Krc + To \cdot Krc + Tд \cdot Krc)) / (Tпр \cdot Krc)$$

Теперь можно перейти к подстановке числовых значений. Расчет следует вести, исходя из минимального значения константы `sADCsSamplesCount`, т.к. именно в этом случае можно быть уверенным, что никакие обстоятельства не приведут к морганию ламп.

Под временем выполнения основной программы `top` подразумевается максимальное время ее выполнения за один проход. В силу разветвленности алгоритма и отсутствия пригодного профайлера, определить аналитически, в каком именно случае программа выполняется дольше всего, чрезвычайно сложно. Поэтому был применен эмпирический метод. Было установлено, что максимальное время выполнения основной программы соответствует режиму, когда яркость обоих каналов регулируется одновременно. Конкретное численное

значение времени можно определить при симуляции этого режима в среде VMLab. Измерение следует повторить не менее eBrightChangeSpeedCh1+eBrightChangeSpeedCh2+1 раз подряд. Значения eLastBright и eBrightnessMax при этом могут быть любыми. Из полученных результатов нужно выбрать наибольший. В текущем варианте программы измеренное время принимало значения от 311 мкс до 351 мкс. Поэтому топ = 351 мкс. Ниже для справки приведено максимальное время выполнения основной программы в различных режимах (без учета команды Idi Temp, 255, расположенной перед процедурой PhaseDetect, и выполняемой за 1 мкс):

- при выключенных каналах 223 мкс;
- при включении одного канала 254 мкс;
- при включенном одном канале 257 мкс;
- при включенных обоих каналах 291 мкс;
- при одновременной регулировке яркости обоих каналов

до начала ее изменения 335 мкс;

- при одновременной регулировке яркости обоих каналов во время ее изменения 351 мкс.

При допуске на частоту сети 0,4 Гц [4] ее максимальное значение составит  $50,4 + 50,4 = 100,8$  Гц. Значит, период будет равен  $T = 1 / 100,8 = 9920$  мкс.

Согласно описанию МК, допуск на отклонение частоты внутреннего RC генератора составляет  $\pm 3\%$ . Добавим сюда еще 1%, чтобы учесть влияние температуры, а также допуск на напряжение питания МК. Одного процента вполне достаточно, т.к. нагревание компонентов устройства и его корпуса невелико, равно как невелико и отклонение напряжения питания, благодаря использованию прецизионного ИОН. Графики зависимостей частоты МК показывают, что влияние температуры и напряжения питания не слишком значительно. Суммируя изложенное, принимаем  $K_{гс} = 1,04$ , чтобы учесть максимальное время выполнения команд.

Предделитель АЦП запрограммирован на деление входной частоты в два раза. Входной частотой предделителя является тактовая частота МК 1 МГц. Значит, на выходе предделителя будут импульсы с периодом следования 2 мкс. Длительность одного преобразования АЦП в режиме Free Running Mode составляет 13,5 тактов предделителя. Отсюда время преобразования  $T_{ацп} = 13,5 \cdot 2 = 27$  мкс. В процедуре PhaseDetect время обработки результата преобразования АЦП  $t_0$  определяется для худшего случая, когда результат второго преобразования становится доступен на следующей команде после чтения АЦП. Поэтому  $T_0 = 7$ .

Между процедурами PhaseDetect и ADCSampling находят ся всего две команды. Значит  $T_d = 2$ .

Время  $T_{пр}$ , затрачиваемое на однократное выполнение процедуры ADCSampling, нетрудно подсчитать вручную или с помощью симулятора. Задача облегчается тем, что, несмотря на наличие команд условного перехода, процедура всегда выполняется в течение одного и того же времени. Для этого применяются выравнивающие команды пор. Время выполнения процедуры ADCSampling составляет  $T_{пр} = 21$  мкс.

Подставляя полученные данные в формулу, получаем:

$$cADCSamplesCount = (9920 - (351 \cdot 1,04 + 2 \cdot 27 \cdot 1,04 + 7 \cdot 1,04 + 2 \cdot 1,04)) / (21 \cdot 1,04) = 434,49$$

Для надежности значение константы следует округлить в меньшую сторону, даже если это противоречит правилам арифметики.

После изменения константы cADCSamplesCount подстройка значений eBrightnessMin и eBrightnessMax не требуется.

Интересно заметить, что при значении константы cADCSamplesCount=434, т.е. когда длительность включенного состояния канала составляет примерно  $434 \times 21 = 9114$  мс, и при eBrightnessMax=255, т.е. когда эта длительность не ограничена, максимальное напряжение на лампе меньше номинального напряжения сети всего приблизительно на 1 В. Таким образом, эффективность диммера равна  $(219 \cdot 100) / 220 = 99,6\%$ . Если замкнуть выводы сток-исток транзистора, можно убедиться, что разница в яркости при уменьшенном на 1 В сетевом напряжении практически незаметна.

Также интересно отметить, что при тех же условиях уменьшение константы cADCSamplesCount на 7 единиц почти не уменьшает напряжение на лампе.

## 8. ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

### 8.1. Возможные неисправности и способы их устранения

*Симптом:* если при включенном канале сетевое напряжение пропадает более чем на секунду, то после его возобновления лампа загорается не сразу, а через 4 секунды.

*Причина:* идет зарядка фильтрующего конденсатора до номинального напряжения питания схемы. Также требуется время на инициализацию внутренних узлов МК.

*Решение:* это схемотехническая особенность, неисправностью не является.

*Симптом:* при записи данных в EEPROM (например через 2,5 секунды после окончания регулировки яркости) сильно заметно моргание ламп(ы).

*Причина:* уменьшилась (высохла) емкость электролитического конденсатора фильтра питания.

*Решение:* заменить фильтрующий конденсатор.

*Симптом:* после изменения кода программы при одновременной регулировке яркости обоих каналов наблюдаются срывы синхронизации в виде моргания ламп.

*Причина:* на выполнение основной программы отведено недостаточное количество времени.

*Решение:* уменьшить значение константы cADCSamplesCount.

### 8.2. Недостатки

В дежурном режиме корпус устройства слегка нагревается от тепла, рассеиваемого балластным резистором.

Включение лампы происходит при напряжении в сети на 12 В выше нуля.

Большая емкость конденсатора фильтра и как следствие, задержка старта устройства при подключении к сети (около 4 секунд).

Нет полной уверенности в том, что транзистор выдержит перегорание лампы при включенном канале.

Небольшой нагрев диодного моста при включенной нагрузке недостатком можно не считать. Несмотря на то, что степень нагрева моста зависит от количества включенных каналов и величины их яркости, корпус светильника в любом случае нагревается больше, когда рассеивает тепло, создаваемое включенными лампами. Однако недостаток состоит

в том, что этот нагрев, пусть и небольшой, не учитывается при расчетах. Тем не менее, все компоненты устройства имеют паспортные значения температуры, превышающие максимальную температуру корпуса светильника.

Недостаток описания проекта: лимит времени не позволил привести формулы и код html в более приглядный вид.

### 8.3. Что следовало бы сделать иначе

В списке рекомендаций производителя МК по работе с АЦП имеется такой пункт: выводы АЦП, сконфигурированные как цифровые выходы, не должны переключаться во время процесса измерения. В данной схеме эта рекомендация не соблюдается. Это связано с исторически сложившейся неправильной по сути, но удобной с точки зрения разводки платы, конфигурацией выводов МК, изначально выбранной автором. Впрочем, на качестве стабилизации это не отражается.

Функция автоотключения использует ту же таблицу яркости, которая используется в других режимах. Поскольку таблица содержит участки с одинаковыми значениями, на малых уровнях яркости автоотключение как бы затормаживается. Чтобы этого не происходило, требуется либо отдельная таблица яркости, либо исключение одинаковых значений в имеющейся таблице.

Функция ИГХ не учитывает повторяющиеся последовательности чисел, возвращаемые подпрограммой RandomNumber8bit (об этом шла речь в конце раздела Описание программы). Кроме этого, в текущей реализации случайные значения времени работы во включенном и выключенном состояниях, а также уровня яркости вычисляются на основе одной и той же последовательности. Лучшим решением было бы использование отдельных последовательностей для каждого из этих трех случайных значений.

### 8.4. Дальнейшие усовершенствования

Заменить кнопки энкодерами. С точки зрения эргономики они предпочтительнее.

Добавить датчик освещенности, например на основе обычного светодиода. Попутно светодиод можно использовать как индикатор наличия напряжения питания. Если применить двух- или трехцветный светодиод, можно отображать различные режимы работы устройства. Также его можно использовать для подсветки органов управления. Наличие датчика освещенности позволит функции ИГХ работать только в темное время суток, что устранил напрасный расход электроэнергии в дневное время. Еще одно применение фотодатчика – функция поддержания освещенности на заданном уровне.

Реализовать плавное автоматическое включение в течение 20 минут через заданный интервал времени после выключения (имитация рассвета). Например, светильник выключается кнопкой в 24:00. В 7:40, когда зимой за окном еще темно, он автоматически включается на минимальную

яркость, и к 8:00 достигает полной яркости. Такая условная имитация “восхода солнца” позволит глазам легче адаптироваться к моменту просыпания, снизив или исключив полностью неприятную резь в глазах. Впрочем, это предположение еще предстоит проверить на практике.

Внедрить беспроводной интерфейс, например, на основе модуля ZigBee, для оперативного изменения параметров настройки и обновления прошивки МК.

Уменьшить энергопотребление за счет снижения напряжения питания схемы, например до 3,3 В. При этом также уменьшится нагрев балластного резистора. Кроме того, можно перейти на более экономичные МК, например ATmega164P(V), имеющие к тому же меньшее время и ток записи EEPROM. Это позволит сократить время готовности устройства к работе после подключения к сети за счет меньшей емкости фильтрующего конденсатора.

Устранить нагрев диодного моста, изменив схемотехнику выходного каскада. Вместо диодного моста применить схему из пары транзисторов с объединенными истоками (на каждый канал).

### 8.5. Перечень измерительных приборов и оборудования

При разработке устройства использовались следующие приборы и оборудование:

Мультиметр – Uni-Trend UT71E TrueRMS AC+DC. Высокая точность позволила не учитывать в расчетах погрешность измерительного прибора (в частности, при измерении постоянного тока отклонение не превышает 0,15%).

Осциллограф – С1-94.

Автотрансформатор лабораторный (ЛАТР) – TDGC2-1A. Термометр цифровой – Velleman DTP3.

Программатор – самодельный, с гальванической развязкой сигнальных цепей и шины питания. За основу был взят программатор из <http://algrom.net/pgm.pdf>

### 8.6. Условия распространения

Полная и обновляемая версия проекта размещена по адресу <http://mmiloslavsky.narod.ru>

Проект распространяется свободно для применения в некоммерческих целях. Исходный код может быть модифицирован без ограничений. При использовании материалов проекта ссылка на оригинал обязательна. Коммерческое использование допускается только после письменного согласования с автором.

### 8.7. Благодарности

Автор благодарит тех, кто помогал в работе над проектом: Васильчикова Н.В., Веселовацкая Е.В., Екимов И.Б., Корнюхин С.В., Милославский В.Ю.

Отдельная благодарность Леониду Ивановичу Ридико за ценные замечания по технической части проекта.



### Литература, ссылки по теме

18. “Four Great Reasons to Dim” - Lutron Electronics, <http://www.lutron.com/dim.htm>
19. “LEDs move from indication to illumination” // EDN, 8/2/2001, <http://www.edn.com/contents/images/149134.pdf>
20. Lights and electronics - <http://www.epanorama.net/links/lights.html>
21. Light dimmer circuits - <http://www.epanorama.net/documents/lights/lightdimmer.html>
22. The Great Internet Light Bulb Book, Part I - <http://members.misty.com/don/bulb1.html>
23. Lamp Experimental Data - <http://alumni.imsa.edu/~ejohnson/light/>