

«Горячее подключение»: теория и пример конструкции

Маркус О'САЛЛИВАН
(Marcus O'SULLIVAN)

Перевод: Алексей ВЛАСЕНКО

Системы высокой готовности, такие как серверы, сетевые коммутаторы, устройства хранения данных RAID и другие устройства коммуникационной инфраструктуры, разрабатываются таким образом, чтобы обеспечить нулевое время простоя в течение всего их жизненного цикла. Если компонент такой системы выходит из строя или требует замены по другой причине, он должен быть заменен без прерывания работы всей системы. Плата или модуль должны быть извлечены и заменены, в то время как система остается включенной и работающей. Этот процесс называют «горячее подключение».

Для того чтобы горячее подключение было безопасным для аппаратуры, применяются разъемы с длинными контактами, которые обеспечивают подключение «земли» и питания прежде остальных линий. Кроме того, на каждой подключаемой плате или модуле имеется «контроллер горячего подключения», который отвечает за безопасное извлечение и подключение модуля к системе, находящейся под напряжением. Во время работы этот контроллер также обеспечивает непрерывную защиту от короткого замыкания и от перегрузки по току.

Несмотря на то, что ток при подключении модуля может быть весьма большим, часто случается, что разработчик не уделяет должного внимания всем тонкостям проектирования таких схем. Однако известно, что «дьявол — в деталях», поэтому в данной статье мы рассмотрим работу схемы контроллера горячего подключения и постараемся осветить принципы проектирования и критерии оптимального выбора компонентов на примере разработки устройства с контроллером ADM1177 фирмы Analog Devices.

Топология схемы «горячего подключения»

Напряжение питания в системах высокой готовности обычно составляет -48 или $+12$ В, и поэтому необходима различная конфигурация схем горячего включения. Для системы с напряжением -48 В нужен контроллер отрицательного провода питания, для системы $+12$ В — положительного, кроме того, нужны соответствующие ключевые транзисторы MOSFET.

Напряжение -48 В традиционно для систем телекоммуникации. Примеры — это системы АТСА, оптические сети, базовые станции и блэйд-серверы (серверы с высокой плотностью компоновки). Так как напряжение питания обеспечивалось аккумулятора-

ми, было выбрано напряжение -48 В как достаточно высокое для передачи питания и сигнала на большие расстояния и в то же время достаточно низкое для обеспечения безопасности при работе. Отрицательная полярность была выбрана потому, что в присутствии влаги и при движении ионов металла от анода к катоду устройство меньше подвергается коррозии, если на массу подключен положительный электрод.

Однако в системах передачи данных, где расстояние — не определяющий фактор, более разумно было использовать напряжение $+12$ В, что сделало это напряжение популярным в блэйд-серверах и сетевых устройствах.

Эта статья посвящена 12-вольтовым системам.

Момент «горячего подключения»

Рассмотрим систему с питанием 12 В и заменяемыми модулями, которые монтируются в стойке. Каждый модуль должен обеспечивать возможность извлечения из стойки и замены на новый так, чтобы не влиять на нормальную работу остальных модулей в стойке. При отсутствии контроллера каждый модуль будет представлять собой значительную емкостную нагрузку на линию питания, порядка тысяч микрофарад. Когда модуль вставляется в стойку, незаряженные конденсаторы потребляют весь доступный ток для заряда. Если этот ток ничем не ограничить, он может привести к провалу напряжения питания системы, что повлечет за собой перезапуск смежных модулей и, возможно, повреждение разъема из-за большого импульсного тока.

Эта проблема решается с помощью контроллера горячего подключения (рис. 1), который надежно ограничивает начальный ток и обеспечивает безопасный процесс включения. Также контроллер после включения непрерывно отслеживает потребляемый ток

с целью защиты от коротких замыканий и перегрузок по току во время нормальной работы модуля.

Контроллер на базе ADM1177 состоит из трех основных узлов (рис. 2): n -канальный полевой транзистор MOSFET в качестве ключа питания, резистор для измерения протекающего тока и сам контроллер (в котором имеется токоизмерительный усилитель), управляющий транзистором MOSFET и, таким образом, замыкающий петлю регулирования.

Внутри контроллера имеется токоизмерительный усилитель, который контролирует ток, протекающий через внешний резистор. Небольшое напряжение (обычно в пределах 100 мВ) усиливается до рабочего уровня. Коэффициент усиления в ADM1177 равен 10, и, например, напряжение 100 мВ на резисторе после усиления будет составлять 1 В. Это напряжение сравнивается с опорным, которое может быть фиксированным или изменяться. При опорном напряжении 1 В и токе, который, протекая через шунт, вызывает падение напряжения более 100 мВ ($\pm 3\%$), срабатывает компаратор, индицирующий перегрузку по току. Таким образом, максимальный ток определяется сопротивлением шунта, коэффициентом усиления усилителя и опорным напряжением. Сопротивлением шунта можно задать максимальный ток. Встроенная

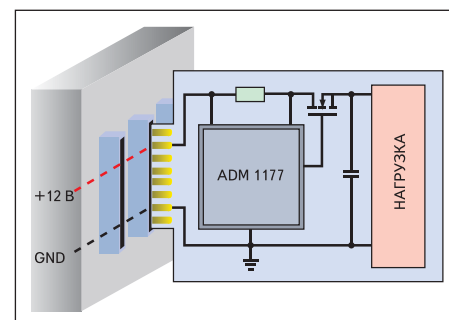


Рис. 1. Схема устройства с «горячим подключением»

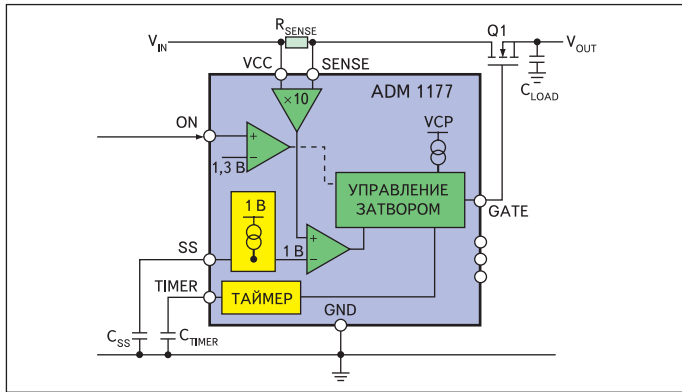


Рис. 2. Функциональная схема ADM1177

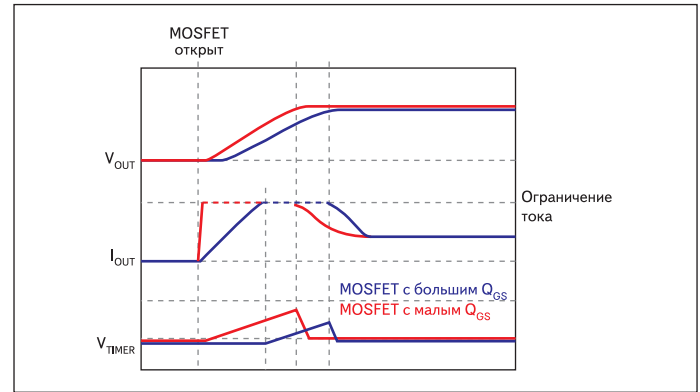


Рис. 4. Влияние емкости затвора на профиль включения

схема-таймер определяет допустимую продолжительность периода перегрузки по току.

В ADM1177 имеется функция «мягкого старта»: напряжение опорного источника не включается мгновенно, а линейно растет, и, таким образом, ток нагрузки ведет себя аналогично. Подачей тока от источника тока на внешний конденсатор (вывод SS) обеспечивается линейное повышение опорного напряжения от 0 до 1 В. Емкость внешнего конденсатора определяет скорость нарастания напряжения. Если необходимо, можно подавать на вывод SS внешнее напряжение, таким образом устанавливая ограничение по току.

Схема включения, состоящая из компаратора и опорного источника, разрешает работу устройства. Она точно задает уровень, которого должно достичь напряжение питания, чтобы контроллер разрешил работу устройства. Когда работа разрешена, подается напряжение на затвор полевого транзистора MOSFET. Напряжение на затворе *n*-канального транзистора должно превышать напряжение на источке. Для того чтобы обеспечить такое превышение во всем диапазоне напряжения питания (V_{CC}), в контроллере горячего включения имеется схема зарядового насоса, которая обеспечивает напряжение на затворе, превышающее V_{CC} на величину до 10 В. Вывод GATE обеспечивает подачу высокого напряжения на затвор MOSFET для его открытия, а также отвод тока для закрытия транзистора. Управление затвором транзистора используется для управления током или для быстрого запырания транзистора, если это необходимо.

И еще один важный блок в контроллере — это таймер, который ограничивает допустимое время, в течение которого контроллер находится в режиме ограничения максимального тока. Транзисторы MOSFET разработаны так, что могут рассеивать определенную мощность в течение определенного времени. Производители транзисторов MOSFET приводят графики допустимых режимов и очерчивают область безопасной работы (SOA), подобно тому, как показано на рис. 3.

На графике SOA (рис. 3) показано соотношение напряжения сток-исток, тока стока и времени, в течение которого транзистор

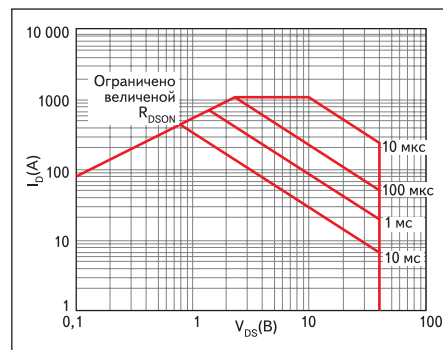


Рис. 3. Область безопасной работы (SOA) транзистора MOSFET

может успешно работать при данной мощности. Например, MOSFET на рис. 3 может обеспечивать ток 85 А при напряжении 10 В (это 850 Вт) в течение 1 мс. Если этот режим продлится дольше, транзистор выйдет из строя. Таймер может ограничить время, в течение которого транзистор MOSFET находится в тяжелых условиях работы, это время устанавливается с помощью внешнего конденсатора. Например, если таймер установлен на 1 мс, а время перегрузки продолжается дольше 1 мс, контроллер закроет полевой транзистор MOSFET.

В контроллере ADM1177 для того, чтобы обеспечить некоторый запас надежности, таймер активируется при достижении напряжения 92 мВ на токоизмерительном входе. Таким образом, таймер начнет работать несколько ранее, чем напряжение на токовом шунте достигнет предельного значения 100 мВ.

Пример разработки

Контроллеры, подобные ADM1177, обеспечивают довольно большую гибкость, поэтому мы приведем пример расчета схемы «горячего включения» для 12-вольтовой системы.

Предполагаем следующие условия для нашего примера:

- контроллер ADM1177;
- напряжение $V_{IN} = 12 \text{ В} (\pm 10\%)$;
- $V_{MAX} = 13,2 \text{ В}$;
- $I_{TRIP} = 30 \text{ А}$;

- $C_{LOAD} = 2000 \text{ мкФ}$;
- $V_{ON} = 10 \text{ В}$ (уровень напряжения, который считается достаточным для включения контроллера);
- $I_{POWERUP} = 1 \text{ А}$ (ток, который потребляет нагрузка во время включения).

Чтобы упростить пример, мы не будем учитывать разброс параметров компонентов. Хотя эти разбросы необходимо учитывать и производить расчет для худшего случая.

Вывод ON

Рассмотрим условия включения контроллера при напряжении питания более 10 В. Пороговое напряжение на входе ON составляет 1,3 В, тогда соотношение сопротивлений делителя напряжения должно составлять 0,13:1. Для достижения хорошей точности нужно также учитывать ток вывода при подборе величин сопротивления делителя.

Делитель из сопротивлений 10 и 1,5 кОм обеспечит требуемый коэффициент 0,13.

Выбор резистора токового шунта

Выбираем величину шунта исходя из тока нагрузки, при котором запускается таймер:

$$R_{SENSE} = V_{SENSETIMER} / I_{TRIP} = 0,092 / 30 \approx 3 \text{ мОм},$$

где $V_{SENSETIMER} = 92 \text{ мВ}$, $I_{TRIP} = 30 \text{ А}$.

Максимальная мощность, рассеиваемая резистором при токе 30 А, составляет:

$$P_{SENSE} = I_{TRIP}^2 \times R_{SENSE} = 30^2 \times 0,003 = 2,7 \text{ Вт}.$$

Таким образом, резистор должен рассеивать мощность 3 Вт. Если один резистор соответствующего сопротивления и мощности недоступен, он может быть составлен из нескольких резисторов.

Время заряда емкости

Время, требуемое для заряда емкости, необходимо рассчитать до выбора транзистора MOSFET. Во время фазы включения кон-

троллер обычно ограничивает ток, заряжающий конденсаторы. Если времени, установленного для таймера, будет недостаточно для заряда емкостей, то транзистор будет закрыт и система не запустится вовсе. Можно воспользоваться следующим уравнением для расчета:

$$t_{\text{CHARGE}} = [C_{\text{LOAD}} \times V_{\text{MAX}}] / [(V_{\text{REGMIN}}/R_{\text{SENSE}}) - I_{\text{POWERUP}}] = [2000 \times 10^{-6} \times 13,2] / [32,33 - 1] \approx 842 \text{ мкс.}$$

Здесь $V_{\text{REGMIN}} = 97 \text{ мВ}$ — минимальное напряжение, при котором контроллер начинает ограничение тока.

Это уравнение предполагает идеальные условия, при которых ток нагрузки линейно нарастает от 0 до 30 А. В реальности заряд затвора Q_{GS} мощного транзистора ограничивает скорость нарастания напряжения затвора, а, следовательно, и скорость нарастания тока, так что затвор заряжается без включения таймера. На рис. 4 при использовании транзистора MOSFET с большим зарядом затвора таймер активен в течение менее продолжительного периода времени, T1–T3. Транзистор с меньшим зарядом затвора обеспечивает более продолжительную работу таймера, T0–T2.

Это происходит потому, что за время заряда T0–T1 лимит тока не превышает. Таким образом, подсчитанное время должно быть соответственно уменьшено. Эту величину трудно рассчитать; она зависит от тока, который обеспечивает контроллер, от требуемого заряда затвора и от емкости затвора. Так как эта поправка может составлять до 30% от общего времени, ее надо учитывать, особенно в схемах, где имеется большой ток и применяются мощные транзисторы.

В схемах, где применяются транзисторы с небольшим зарядом затвора, можно предполагать быстрый рост напряжения на затворе. Это приведет к быстрому росту тока от 0 до I_{TRIP} , что может вызвать нежелательные переходные процессы; в таком случае надо использовать «мягкий старт».

«Мягкий старт»

В режиме «мягкого старта» ток заряда линейно возрастает от нуля до максимального тока в течение времени, определяемого емкостью конденсатора C_{SS} . Этот плавный рост позволяет избежать резкого скачка тока и обеспечивается за счет плавного роста опорного напряжения. Обратите внимание, что ток ограничивается во время «мягкого старта», и таймер запускается уже в начале «мягкого старта», как показано на рис. 5.

Рекомендуется устанавливать время «мягкого старта» не более 10–20% от общего времени работы таймера. В нашем примере мы можем выбрать время 100 мкс. Емкость конденсатора определяется следующим образом:

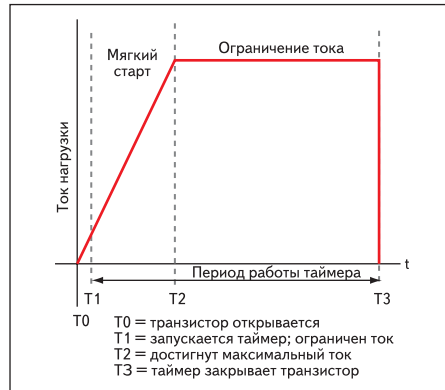


Рис. 5. «Мягкий старт» и запуск таймера

$$C_{\text{SS}} = t_{\text{SS}} \times I_{\text{SS}} / V_{\text{SS}} = (100 \times 10^{-6}) \times (10 \times 10^{-6}) / 1 = 1 \text{ нФ,}$$

где $I_{\text{SS}} = 10 \text{ мкА}$, $V_{\text{SS}} = 1 \text{ В}$.

Выбор транзистора и длительности работы таймера

При выборе транзистора, прежде всего, руководствуются допустимым напряжением V_{DS} и током I_{D} . Для 12-вольтовой системы рекомендуется V_{DS} порядка 30–40 В; для того, чтобы транзистор успешно выживал при переходных процессах, которые могут повредить транзистор. Ток стока I_{DMAX} должен быть гораздо больше рассчитанного максимума (рис. 3).

В схемах с большим током одним из главных параметров транзистора является $R_{\text{DS(ON)}}$ — сопротивление открытого канала. Низкое значение $R_{\text{DS(ON)}}$ означает малые потери мощности при работе и малый нагрев транзистора.

Температура и мощность

Прежде чем рассматривать область безопасной работы SOA и рассчитывать время работы таймера, следует оценить мощность, рассеиваемую транзистором при полной нагрузке в рабочем режиме, с целью избежать перегрева. Когда температура транзистора MOSFET повышается, его допустимая рассеиваемая мощность снижается, кроме того, работа транзистора при повышенной температуре снижает его время жизни.

Напоминаем, что контроллер запускает таймер при напряжении на токоизмерительном входе 92 мВ. Для расчетов нам нужно знать максимальный постоянный ток, не вызывающий запуска таймера. Предположим, $V_{\text{REGMIN}} = 97 \text{ мВ}$ (для худшего случая). Тогда

$$I_{\text{MAXDC}} = V_{\text{REGMIN}} / R_{\text{SENSE}} = 0,097 / 0,003 = 32,33 \text{ А.}$$

При условии, что сопротивление канала MOSFET $R_{\text{DS(ON)}} = 0,002 \text{ Ом}$, рассеиваемая транзистором мощность составит:

$$P_{\text{MOSFET}} = I_{\text{MAXDC}}^2 \times R_{\text{DS(ON)}} = (32,33)^2 \times 0,002 \times 2,1 \text{ Вт.}$$

Температурное сопротивление транзистора MOSFET приведено в техническом описании транзистора. Размер площадки на печатной плате и дополнительная медь влияют на этот параметр. Предположим, $R_{\text{thJA}} = 60 \text{ }^\circ\text{C/Вт}$. Если на транзисторе рассеивается 2,1 Вт, то рост температуры по сравнению с температурой окружающей среды составит $126 \text{ }^\circ\text{C}$:

$$T_{\text{RISE}} = R_{\text{thJA}} \times P_{\text{MOSFET}} = 126 \text{ }^\circ\text{C.}$$

Один из путей уменьшения температуры — включение транзисторов в параллель. Это уменьшит $R_{\text{DS(ON)}}$ и рассеиваемую мощность. При использовании двух таких транзисторов рост температуры составит всего $32 \text{ }^\circ\text{C}$, если предположить, что ток разделится между транзисторами поровну (некоторый разброс все-таки будет). Мощность на каждом транзисторе будет следующей:

$$P_{\text{MOSFET}} = (I_{\text{MAXDC}} / \text{число транзисторов})^2 \times R_{\text{DS(ON)}} = (32,33/2)^2 \times 0,002 = 0,5227 \text{ Вт,}$$

$$T_{\text{RISE}} = R_{\text{thJA}} \times P_{\text{MOSFET}} = 31,36 \text{ }^\circ\text{C.}$$

При таком росте температуры и при температуре окружающей среды $30 \text{ }^\circ\text{C}$ ожидаемая температура транзисторов составит $62 \text{ }^\circ\text{C}$:

$$T_{\text{MOSFET}} = T_{\text{RISE}} + T_{\text{A}} = 32 + 30 = 62 \text{ }^\circ\text{C.}$$

Область безопасной работы транзистора

Следующий этап — это обзор графиков SOA с целью поиска транзистора, способного работать в самых тяжелых условиях. В самом худшем случае, при замыкании линии питания на «землю», напряжение V_{DS} достигнет V_{MAX} и составит 13,2 В — это случай, когда исток транзистора замкнут на «землю». В режиме ограничения тока максимальный ток будет определяться спецификациями контроллера. В худшем случае падение напряжения на шунте составит 103 мВ. Тогда ток можно рассчитать следующим образом:

$$I_{\text{MAX}} = V_{\text{REGMAX}} / R_{\text{SENSE}} = 0,103 / 0,003 = 34,33 \text{ А.}$$

Прежде чем заглядывать в графики SOA на транзисторы, мы должны учесть температуру транзистора, так как графики SOA (рис. 3) относятся к температуре среды $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Сначала рассчитаем рассеиваемую мощность при $T_{\text{C}} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$:

$$P_{\text{D25}} = (T_{\text{JMAX}} - T_{\text{C}}) / R_{\text{thJC}} = (150 - 25) / 1,6 = 78,125 \text{ Вт,}$$

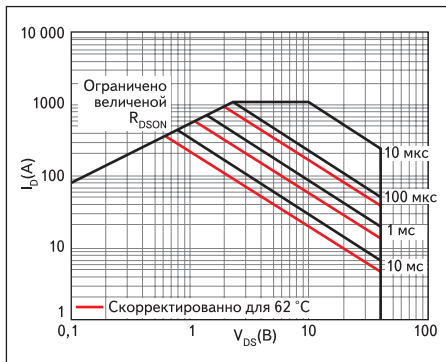


Рис. 6. Графики областей безопасной работы и с поправкой на температуру 62 °C

где R_{thJC} взято из технического описания транзистора. Теперь рассчитаем то же самое для $T_C = 62\text{ °C}$:

$$P_{D62} = (T_{jMAX} - T_C) / R_{thJC} = (150 - 62) / 1,6 = 55 \text{ Вт.}$$

Как видно из расчета, мощность уменьшилась в 1,42 раза:

$$D_F = P_{D25} / P_{D62} = 78,25 / 55 = 1,42.$$

Этот коэффициент необходимо учесть на графиках SOA (рис. 3). Диагональные линии, которые показывают максимальную мощность, должны быть сдвинуты вниз на соответствующую величину.

Мы ранее брали в качестве примера линию, соответствующую времени 1 мс. Например, возьмем точку на этой линии, скажем, ток 20 А, напряжение 40 В; это соответствует мощности 800 Вт. Применим рассчитанный коэффициент D_F :

$$P_{DERATED} = P_{ORIGINAL} / D_F = 800 / 1,42 = 563 \text{ Вт.}$$

При напряжении 40 В соответствующий ток будет равен 14 А. Помещаем эту точку на график SOA, она будет соответствовать ли-

нии 1 мс с поправкой на температуру 62 °C. Новые линии, соответствующие 10 и 100 мс, будут сдвинуты аналогичным образом. Они показаны красным на рис. 6.

Выбор конденсатора для таймера

Новые скорректированные линии на графике SOA теперь можно использовать для расчета времени работы таймера. Начертим горизонтальную линию на уровне $I_{MAX} = 35\text{ А}$ и вертикальную линию, соответствующую $V_{MAX} = 13,2\text{ В}$ (голубые линии на графике), затем смотрим на положение точки пересечения относительно красных линий. Видно, что точка пересечения находится между линиями 1 и 10 мс, где-то около 2 мс. Трудно более точно определить время в такой маленькой области на логарифмической шкале, поэтому руководствуемся консервативными предположениями, чтобы иметь некоторый запас, ну и, разумеется, учитываем другие параметры и стоимость транзистора.

Напоминаем, что мы рассчитали время заряда, и оно составило приблизительно 850 мкс. Так как «мягкий старт» представляет собой линейное нарастание тока, заряд конденсатора займет большее время, чем при подаче сразу максимального тока. Чтобы оценить время заряда, прибавим половину времени «мягкого старта» (это 50 мкс) к рассчитанному времени и получим $850 + 50 = 900\text{ мкс}$. Если MOSFET требует большого заряда затвора (скажем, 80 нКл и выше), то время заряда конденсаторов еще несколько увеличится, это мы уже обсуждали. Если время заряда меньше, чем допустимое время по графикам SOA, то данный транзистор подходит. В нашем случае он подходит по данному критерию ($0,9 < 2\text{ мс}$).

Время работы таймера менее 2 мс достаточно, чтобы защитить транзистор, и оно должно быть больше 0,9 мс, чтобы конденсаторы успели зарядиться. Если выбрать достаточно консервативное значение 1 мс, то емкость рассчитывается следующим образом:

$$C_{TIMER} = t_{TIMER} \times I_{TIMER} / V_{TIMER}.$$

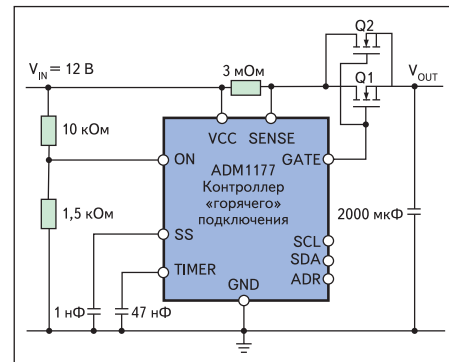


Рис. 7. Разработанная схема

Если $I_{TIMER} = 60\text{ мкА}$ и $V_{TIMER} = 1,3\text{ В}$, то:

$$C_{TIMER} = (1 \times 10^{-3}) \times (60 \times 10^{-6}) / 1,3 \times 47 \text{ нФ.}$$

При использовании параллельно включенных транзисторов время работы таймера останется таким же. При расчете времени работы таймера и защиты от короткого замыкания нужно исходить из того, что транзистор один. Причина этого в том, что пороговое напряжение V_{Gsth} может значительно различаться у разных экземпляров транзисторов, поэтому может случиться так, что в режиме регулирования значительная часть общего тока пойдет через один транзистор.

Разработка схемы «горячего подключения» завершена

Схема «горячего подключения» с параллельными транзисторами и с рассчитанными величинами показана на рис. 7. Контроллер ADM1177 обеспечивает дополнительные функции. В нем имеется встроенный АЦП, преобразующий измеренное значение напряжения питания и тока нагрузки в цифровой код, который может быть считан через интерфейс I²C. Таким образом, обеспечивается полноценный мониторинг тока и напряжения в схеме. ■