

# Подавление эффекта Миллера

## в схемах управления MOSFET/IGBT

**Одной из основных проблем, с которой часто приходится сталкиваться разработчикам преобразователей частоты, является возникновение сквозного тока в полумостовых каскадах, вызванное ложным отпиранием транзистора из-за наличия емкости Миллера в структуре IGBT. В предлагаемой статье анализируются технические и экономические аспекты четырех различных способов подавления эффекта паразитного включения транзистора, причиной которого является емкость Миллера «коллектор — затвор».**

Гери О  
(Gary Aw)

support@macrogroup.ru

Чаще всего IGBT с рабочим напряжением 1200 В используются в трехфазных инверторах промышленных приводов. Для подобных применений в первую очередь требуется надежная электрическая изоляция и минимальный уровень шумов. Кроме того, силовая часть инвертора должна хорошо управляться и иметь специальную схему защиты, обеспечивающую надежное функционирование изделия. В типовых схемах промышленных приводных инверторов наличие емкости Миллера в модулях IGBT может привести к возникновению сквозных токов при больших скоростях переключения  $dV/dt$  транзисторов. Этот эффект неоднократно наблюдался разработчиками, особенно при использовании драйверов с однополярным выходным напряжением (0/+15 В). Большая скорость переключения IGBT (высокое значение  $dV/dt$ ) приводит к возникновению тока в цепи затвора. При высокой скорости переключения этот ток будет протекать через емкость Миллера, расположенную между коллектором и затвором транзистора. Данный эффект способен вызвать ложное открывание IGBT и появление сквозного тока через оба транзистора полумоста, следствием которого может быть выход их из строя.

При открывании IGBT верхнего плеча напряжение «коллектор – эмиттер» противоположного транзис-

тора уменьшается со скоростью  $dV_{CE}/dt$ . Фронт этого напряжения наводит ток, протекающий через емкость Миллера, затворный резистор и выходной каскад драйвера, что создает падение напряжения на активном сопротивлении в цепи затвора (рис. 1). Если образующийся потенциал превысит пороговое напряжение затвора IGBT  $V_{GE(th)}$ , произойдет ложное открывание транзистора.

Необходимо принять во внимание, что для порогового напряжения отпирания характерен отрицательный температурный коэффициент (как правило, он составляет несколько мВ/°C), и данное напряжение падает по мере нагрева кристаллов IGBT. Соответственно с ростом температуры увеличивается вероятность ложного открывания транзистора из-за тока, наведенного фронтом напряжения  $V_{CE}$ .

В технической литературе приводится три классических способа преодоления указанной проблемы:

- разделение резисторов включения и выключения  $R_{Gon}/R_{Goff}$  в цепи затвора;
- включение конденсатора между затвором и эмиттером;
- использование отрицательного напряжения записания.

Существует еще одно, простое и эффективное решение, заключающееся в активном ограничении наведенного на затвор напряжения.

### Разделение резисторов включения и выключения в цепи затвора

Величина резистора включения  $R_{Gon}$  в цепи затвора IGBT существенно влияет на его динамические характеристики. Увеличение  $R_G$  уменьшает изменение напряжения и тока в цепи затвора, но одновременно приводит к росту потерь включения  $E_{on}$ . Разделенные резисторы в цепи затвора  $R_{Gon}/R_{Goff}$  показаны на рис. 2.

Снизить вероятность ложного включения можно за счет снижения номинала резистора  $R_{Goff}$  в цепи выключения затвора. Использование меньшего значения  $R_{Goff}$  позволяет также снизить потери выключения  $E_{off}$ . Однако в этом случае возрастает и скорость выключения  $dI/dt$ , что приводит к возникновению перенапряжений и осцилляций в цепи коллектора из-за наличия паразитной распределенной индуктивнос-

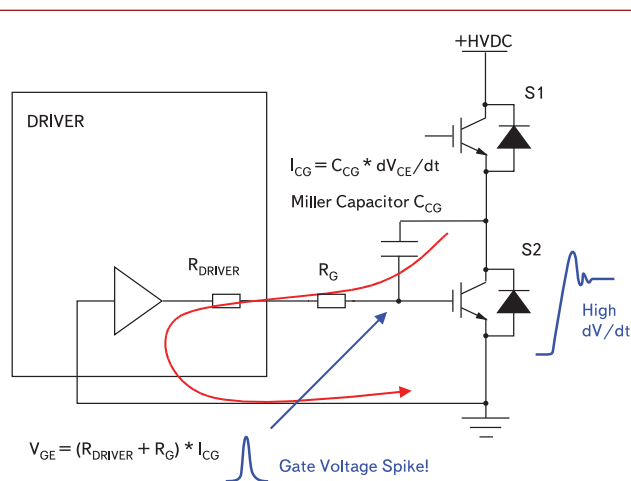


Рис. 1. Ложное включение IGBT нижнего уровня из-за влияния емкости Миллера

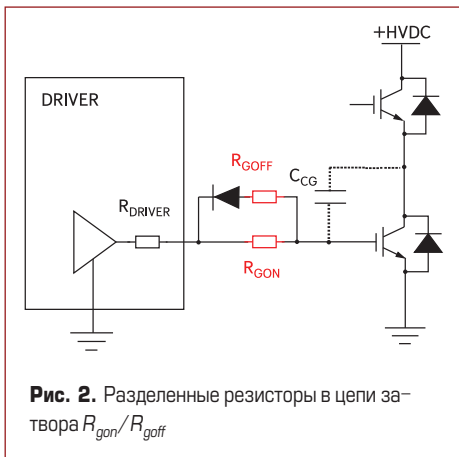


Рис. 2. Разделенные резисторы в цепи затвора  $R_{gon}/R_{goff}$

ти силовой шины  $L_S$ . При неудачной конструкции шин значение  $L_S$  может оказаться так велико, что перенапряжение  $\Delta V$ , пропорциональное скорости выключения и индуктивности  $\Delta V = L_S \times di/dt$ , способно привести к пробое транзистора. Чтобы избежать этого, в ряде случаев приходится использовать IGBT с большим значением рабочего напряжения  $V_{CE}$ .

Таким образом, основной задачей при проектировании силового импульсного каскада является нахождение компромисса между динамическими характеристиками и надежностью, поиск оптимального сочетания параметров схемы управления, динамических потерь и безопасного уровня переходных перенапряжений. Поиск оптимума подразумевает, что идеального решения здесь быть не может.

**Конденсатор в цепи «затвор – эмиттер»**

Установка дополнительного конденсатора между затвором и эмиттером IGBT (рис. 3) неизбежно влияет на его динамические свойства. При установке  $C_{ge}$  увеличивается суммарный заряд затвора, необходимый для достижения порогового напряжения отпирания IGBT. Емкость  $C_{ge}$  ослабляет влияние эффекта Миллера, заряжаясь создаваемым им током и препятствуя таким образом возникновению тока в цепи затвора.

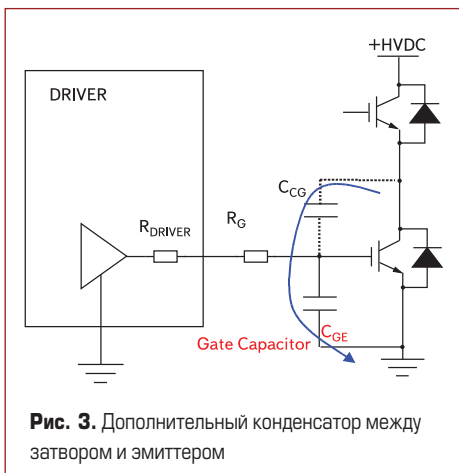


Рис. 3. Дополнительный конденсатор между затвором и эмиттером

Однако описанный способ очень редко используется на практике, поскольку увеличение емкости в цепи затвора приводит к повышению мощности, рассеиваемой схемой управления, и росту потерь переключения IGBT.

**Отрицательное напряжение запирания IGBT**

Отрицательное напряжение  $V_{Goff}$  для безопасного выключения IGBT наиболее часто используется в мощных схемах, работающих с токами более 100 А (рис. 4). Такое решение является наиболее простым и надежным, так как при наличии достаточного отрицательного напряжения на затворе паразитный импульс, наведенный через емкость Миллера, не способен сместить потенциал  $V_G$  до порогового значения.

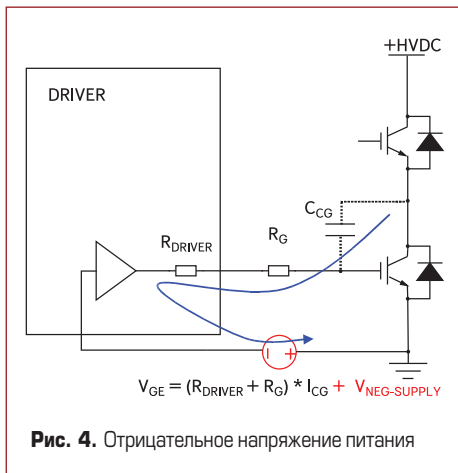


Рис. 4. Отрицательное напряжение питания

Однако применение данной схемы несколько повышает стоимость преобразователя, так как требует дополнительного источника питания и повышает потери схемы управления. Именно поэтому такое решение, как правило, не используется в маломощных инверторах.

**Активное подавление эффекта Миллера**

Очевидным способом предотвращения ложного срабатывания из-за эффекта Миллера является активное ограничение напряжения на затворе IGBT (рис. 5). Схема реализуется с помощью внешнего биполярного  $p-n-p$  транзистора, замыкающего цепь «затвор – эмиттер» при достижении напряжением  $V_{GE}$  определенного значения. В этом случае ток, навводимый через емкость Миллера, шунтируется открывающимся транзистором и течет через него, минуя цепь затвора IGBT.

В отличие от описанных выше схем с отдельными резисторами затвора и конденсатором  $C_{ge}$  при использовании метода активного подавления эффекта Миллера удастся ограничивать напряжение затвора на безопасном уровне при любых режимах работы. Таким образом, данная схема может рассматриваться как наиболее универсальное средство борьбы с ложными срабатываниями, пригодное для использования практически в любых импульсных преобразователях. Единственным и естественным недостатком данного решения является необходимость установки дополнительного транзистора и некоторого количества пассивных компонентов, что приводит к некоторому повышению стоимости схемы управления.

Первые два способа, описанные в данной статье, применяются в основном для относительно маломощных применений с током

не более 25 А, когда стоимость готового устройства в значительной мере зависит от цены комплектующих. Использование отрицательного напряжения запирающего затвора и метод активного ограничения являются оптимальными решениями для более мощных преобразовательных устройств, таких как промышленные приводы, источники бесперебойного питания, мощные преобразователи частоты, в которых надежность и безотказность имеют решающее значение.

Вариант устройства с шунтированием цепи «затвор – эмиттер» для подавления эффекта Миллера аппаратно является более дешевым, чем схема с отрицательным напряжением выключения IGBT. Однако в применениях с током более 100–120 А, как правило, используются готовые драйверы с встроенным источником отрицательного напряжения и двуполярным выходным сигналом, что исключает необходимость в применении каких-либо внешних узлов. Тем не менее, в ряде случаев в преобразователях большой мощности, в которых устанавливаются силовые ключи с очень высоким значением емкости Миллера, может возникнуть необходимость в применении режима активного ограничения.

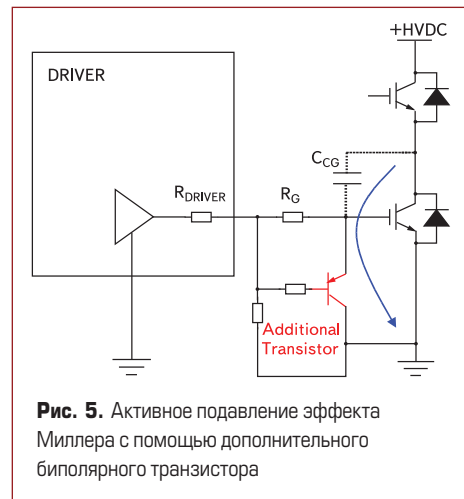


Рис. 5. Активное подавление эффекта Миллера с помощью дополнительного биполярного транзистора

В интеллектуальных силовых модулях IGBT, популярность которых в последние годы неуклонно растет, схема активного ограничения эффекта Миллера, как правило, является встроенным узлом драйвера, интегрированным вместе с другими необходимыми видами защит: от перегрузки по току (OCP, DESAT) и падения напряжения управления (UVLO). Возможность применения подобных интеллектуальных силовых ключей высокой степени интеграции позволяет упростить процесс разработки и снизить стоимость готовых изделий для широкого класса промышленных и бытовых применений силовой электроники.

**Литература**

1. Avago Gate Optocoupler Datasheet ACPL-332J / ACPL-331J.
2. Active Miller Clamp, Avago Application Note AN5315.
3. Semikron Application Manual, Chapter 3.5. Driver.
4. Semikron Application Manual, Chapter 1. Power Semiconductor Basics.