

Лекция 6 из курса «Силовая электроника»

Двадненко В.Я.

IGBT ТРАНЗИСТОРЫ В СИЛОВЫХ КЛЮЧАХ

На предыдущих лекциях были рассмотрены силовые управляемые ключи на биполярных транзисторах, тиристорах и полевых транзисторах. В силу своих особенностей соответствующие ключи нашли применение в импульсных устройствах, различных по назначению, стоимости, мощности, напряжению, рабочей частоте и по другим, менее значимым качествам. Однако во всех применениях очень важно правильно выбрать управляемые силовые ключи, чтобы добиваться максимальной эффективности (максимального КПД) этих импульсных устройств, поскольку от этого зависит их нагрев, система охлаждения, конструкция и в конечном счете стоимость этих устройств. Биполярные транзисторы хорошо подходят для недорогих маломощных устройств и напряжений до 400 - 500В (зарядные устройства для малогабаритных аккумуляторов, энергосберегающие лампы и другие маломощные импульсные устройства). Полевые силовые MOSFET транзисторы, способные работать на более высоких частотах и с более высокими значениями мощности и КПД, они занимают нишу более дорогих устройств средней мощности (блоки питания компьютеров, телевизоров, инверторов низковольтных вентильных двигателей для велосипедов, мотоциклов, гольфкаров, складских электрокаров, погрузчиков и т.д.).

IGBT транзисторы сочетает достоинства этих двух видов силовых транзисторов и позволяют разрабатывать устройства большой мощности.

На рис.1 приведены условные обозначения IGBT транзисторов.

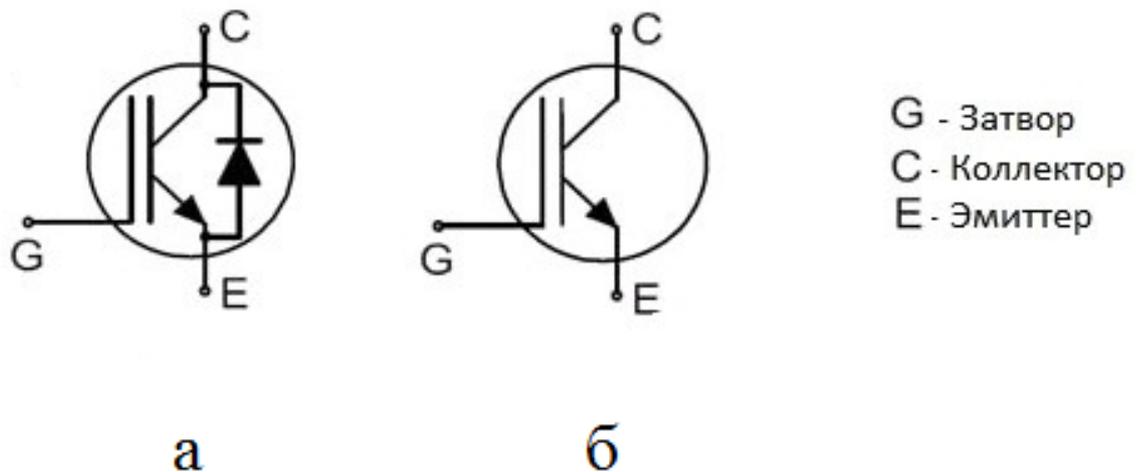


Рис.1 Условные обозначения IGBT транзисторов: а – с антипараллельным быстродействующим диодом; б – без диода.

Применение IGBT-модулей в системах управления тяговыми двигателями позволяет (по сравнению с электромеханическими и тиристорными устройствами) обеспечить высокий КПД, высокую плавность хода машины и возможность применения рекуперативного торможения практически на любой скорости.

IGBT применяют при работе с высокими напряжениями (более 1000 В), высокой температурой (более 100 °С) и высокой выходной мощностью (более 5 кВт). IGBT-транзисторы используются в схемах управления двигателями (при рабочей частоте до 20 кГц), источниках бесперебойного питания (с постоянной нагрузкой и низкой частотой) и сварочных аппаратах (где требуется большой ток и низкая частота — до 50 кГц).

IGBT и MOSFET в диапазоне средних мощностей и частот, частично «перекрывают» друг друга. В общем случае, для высокочастотных низковольтных каскадов наиболее подходят MOSFET, а для высоковольтных и более мощных — IGBT.

Принцип действия IGBT транзисторов

На рис.2 приведена схема внутреннего строения IGBT транзистора. В неё входит MOSFET транзистор VT, биполярный n-p-n и биполярный p-n-p транзисторы, соответственно VT1 и VT2. Кроме того, схема содержит два резистора R1 и R2. Силовые выводы называются эмиттер и коллектор, а управляющий вывод – затвор. Структура из биполярных транзисторов VT1 и VT2 имеет положительную обратную связь, похожую на эквивалентную схему тиристора. Однако выбором номиналов резисторов R1 и R2 эта положительная обратная связь уменьшена до уровня не позволяющего этой структуре защелкиваться. Величина резистора R2 получается очень малой, (миллиомы), поэтому основной ток течет через него и транзистор VT2. Эмиттер VT2 является коллектором IGBT транзистора, поэтому ток эмиттера VT2 является одновременно током коллектора IGBT транзистора, $i_{э2} = i_{к}$. Обозначения и направления всех токов приведены на рис.2. Запишем выражения для токов коллекторов биполярных транзисторов.

$$i_{к1} = i_{э1}\alpha_1, \quad i_{к2} = i_{э2}\alpha_2, \quad (1)$$

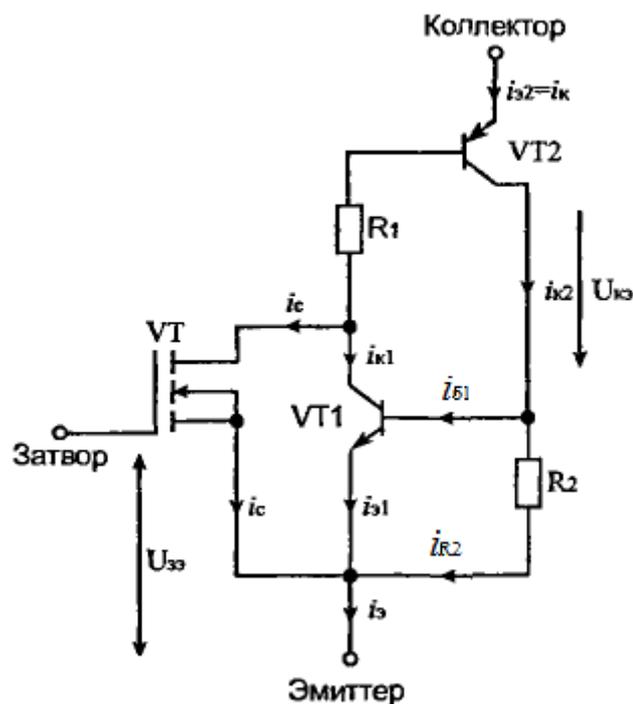


Рис.2. Принцип действия IGBT транзисторов

где α_1 и α_2 коэффициенты передачи тока эмиттера транзисторов VT1 и VT2 соответственно.

Ток стока транзистора VT i_c равен току истока $i_{и}$, т.е. $i_c = i_{и}$, поэтому по второму закону Кирхгофа можно записать:

$$i_{э} = i_{R2} + i_{э1} + i_c$$

с учетом того, что также по второму закону Кирхгофа $i_{э1} = i_{к1} + i_{б1}$ и $i_{R2} = i_{к2} - i_{б1}$, запишем выражение для тока стока полевого транзистора VT:

$$i_c = i_{э} - i_{к1} - i_{к2} \quad (2)$$

Подставив в (2) токи коллекторов биполярных транзисторов из (1) и учитывая, что $i_{э2} = i_{к} = i_{э}$ имеем:

$$i_c = i_{э} - i_{э}\alpha_2 - i_{э1}\alpha_1, \quad (3)$$

Слагаемое с током эмиттера VT1 является функцией F , которая зависит от $R1, R2, \alpha_1$ и $i_{э}$, следовательно

$$i_c = i_{э}(1 - \alpha_2 - F)$$

Ток стока i_c является произведением напряжения затвор-эмиттер $U_{зэ}$ на крутизну S полевого транзистора VT, поэтому

$$i_{к} = i_{э} = SU_{зэ}/(1 - \alpha_2 - F) = S_{экв}U_{зэ},$$

где $S_{\text{экв}} = S/(1 - \alpha_2 - F)$ эквивалентная крутизна IGBT транзистора. Регулируя в процессе производства резисторы R1 и R2 можно менять крутизну $S_{\text{экв}}$ в широких пределах. Однако с увеличением крутизны IGBT транзистора хотя и ускоряется открывание транзистора, но одновременно увеличивается время рассасывания неосновных носителей в базе р-п-р транзистора, что образует так называемый «хвост», увеличивающий время запираения и повышающий нагрев IGBT транзистора. Кроме того, требуется увеличение так называемого «мертвого времени» в полумостовых сборках. Поэтому IGBT транзисторы имеют более низкие рабочие частоты, чем полевые MOSFET транзисторы. Однако частотные свойства IGBT транзисторов намного лучше, чем у тиристоров.

Применение

В настоящее время в силовой электронике IGBT транзисторы имеют большую популярность. Он применяется в виде электронного мощного ключа для систем управления приводами механизмов, в источниках питания, но наибольшей популярностью пользуются IGBT в силовых цепях преобразователей частоты электродвигателей переменного тока мощностью до 1 мегаватта. По вольтамперным свойствам эти транзисторы аналогичны биполярным транзисторам, но мощностные параметры и эффективность коммутации у них намного выше. Современные технологии изготовления дают возможность оптимизировать транзисторы по функциональным характеристикам для самых разнообразных задач силовой электроники. Уже разработаны IGBT транзисторы, способные работать при напряжении до нескольких тысяч вольт и величине тока в тысячи ампер. В силовой электронике применяются IGBT транзисторы с рабочей частотой в несколько десятков кГц.

IGBT транзисторы работают также в сетях высокого напряжения для надежной и безопасной работы электроустановок в том числе в аварийном режиме при коротких замыканиях. Свойства IGBT транзисторов дают

возможность использовать их в частотно-регулируемых приводах станков, инверторах, импульсных регуляторах тока, в сварочных аппаратах. Также IGBT применяются в системах управления мощными тяговыми приводами электровозов, троллейбусов, трамваев. Это повышает их КПД и обеспечивает повышенную плавность хода. Силовые транзисторы широко используются в цепях электрических бытовых устройств. Они входят в состав индукционных электропечей, посудомоечных и стиральных машин, бытовых кондиционеров. Широко применяют IGBT транзисторы в силовых ключах автомобильного зажигания, в тяговом электроприводе электромобилей и гибридных автомобилей. Кроме того, их применяют в зарядных устройствах электромобилей и подзаряжаемых гибридных автомобилей.

Основные параметры

- Управляющее напряжение – номинальная разность потенциалов, способная правильно управлять работой затвора.
- Емкость затвора.
- Заряд затвора.
- Наибольший допустимый ток в длительном режиме.
- Наибольший допустимый ток в импульсном режиме.
- Максимальное напряжение между эмиттером и коллектором.
- Максимальное напряжение между затвором и эмиттером.
- Напряжение насыщения эмиттер-коллектор.
- Входная емкость.
- Выходная емкость.
- Проходная емкость.
- Паразитная индуктивность вывода коллектора.
- Паразитная индуктивность вывода эмиттера.
- Время задержки включения.
- Время задержки выключения.
- Максимальная рассеиваемая мощность.
- Тепловое сопротивление.

Проверка исправности

IGBT транзисторы проверяются в случаях неисправности электрического устройства. Проверку проводят с помощью мультиметра путем прозвонки электродов эмиттера и коллектора в двух направлениях, чтобы проверить отсутствие замыкания в закрытом состоянии. Емкость входа эмиттер-затвор при этом необходимо зарядить отрицательным напряжением. Это делается кратковременным касанием щупа мультиметра «СОМ» затвора и щупа «V/Ω/f» эмиттера. Мультиметр должен быть в режиме прозвонки диодов.

Чтобы произвести проверку, также нужно убедиться, работает ли в открытом режиме транзистор. Для этого надо зарядить емкость затвор-эмиттер напряжением 5 – 15В (на затвор подавать плюс этого напряжения). Далее мультиметром в режиме прозвонки диодов проверить падение напряжения коллектор-эмиттер. Плюс омметра подключать к коллектору.

IGBT модули

Силовые транзисторы производятся не только в виде отдельных полупроводников, но и в виде модулей. В модуле содержатся IGBT транзисторы, с силовыми и управляющими выводами. Корпус модуля выполнен в виде конструкции, предназначенной для крепления на радиаторе с воздушным или жидкостным охлаждением. Модули бывают с одиночными транзисторами, в виде полумоста и в виде трехфазного моста. Такие модули входят в состав частотных преобразователей для управления электродвигателями.



Интеллектуальные модули (IPM)

– это модули с интегрированным драйвером затвора, защитными и диагностическими функциями.

Они отличаются следующими особенностями:



- модули изготавливаются по гибридной технологии;
- защита от КЗ использует сенсор тока эмиттера;
- защита по цепям питания;
- защита от перегрева;
- новый драйвер затвора управляет du/dt в зависимости от тока эмиттера;
- выход сигнала ошибки.

IPM выпускаются на напряжения 650/1200/1700 В в конфигурациях 3-фазный инвертор + тормозной ключ или 3-фазный инвертор.

Параллельное включение IGBT

При параллельном включении нескольких IGBT удается уменьшить потери проводимости и снизить тепловое сопротивление. В то же время потери при

переключениях, наоборот, увеличиваются. Таким образом, если основной вклад в общие потери вносит динамическая составляющая, то использование параллельного включения позволит улучшить только тепловые характеристики.

Параллельное включение МОП-транзисторов можно выполнить без особых проблем из-за положительного температурного коэффициента их потерь проводимости, в то время как потери на переключения для MOSFET в значительной степени не зависят от температуры. У IGBT наблюдается обратная картина – потери проводимости слабо зависят от температуры, зато потери на переключение имеют значительный положительный температурный коэффициент. По этой причине использование параллельного включения IGBT оказывается не таким простым, как для МОП-транзисторов.

Напряжение насыщения $V_{CE(on)}$ в IGBT слабо зависит от тока и температуры, в то время как для МОП-транзисторов падение напряжения на открытом канале сильно зависит от обоих параметров. Когда два IGBT работают параллельно, напряжение $V_{CE(on)}$ для обоих транзисторов будет одинаковым. Таким образом, при заданной нагрузке через один IGBT может протекать больше тока, чем через другой. Эта разбалансировка для малых значений токов очень часто оказывается достаточно значительной. Само по себе неравномерное распределение токов не является критическим, однако это оказывает значительное влияние на перегрев и потери на переключения. Поскольку падение напряжения одинаково для обоих IGBT, то транзистор, через который протекает больше тока, рассеивает большую мощность и имеет больший перегрев кристалла. Это смягчается тремя факторами:

1. Неравномерное распределение нагрузки имеет тенденцию к уменьшению по мере увеличения тока. Это связано с тем, что разница в напряжениях насыщения сокращается с ростом тока. Таким образом, значительная

разбалансировка при малых токах оказывается не такой значительной при больших токах.

2. Обеспечение хорошей тепловой связи между кристаллами транзисторов гарантирует, что, несмотря на значительный дисбаланс токов, температурный перепад будет находиться в пределах нескольких градусов.
3. Существуют IGBT с небольшим положительным температурным коэффициентом. Они становятся оптимальным выбором, если требуется параллельное включение транзисторов.

Рассмотрим потери на коммутацию при рассогласовании токов: Очевидно, что IGBT, который проводит больше тока, переключается также при большем токе. Следовательно, на него будет приходиться не только большая часть потерь проводимости, но большая часть динамических потерь на переключения. Казалось бы, существует лавинообразный процесс, который должен привести к тому, что из-за более высоких потерь температура перегруженного IGBT превысит допустимое значение. Однако аналитический и экспериментальный анализ показал, что с увеличением тока дисбаланс между транзисторами уменьшается, а отличие температур сокращается до нескольких градусов. Это, как было сказано выше, связано с выравниванием напряжений насыщения при увеличении токовой нагрузки.

Стоит отметить, что наиболее эффективным методом борьбы с неравномерным распределением токов при параллельном включении является отбор транзисторов с близкими значениями напряжения насыщения $V_{CE(on)}$. Еще одной важной причиной разбалансировки являются различия в пороговых напряжениях $V_{GS(th)}$, что особенно заметно у trench-IGBT. Таким образом, подбор транзисторов с согласованными значениями $V_{CE(on)}$ и $V_{GS(th)}$ является эффективным способом защиты от неравномерного распределения токов.

При параллельном соединении IGBT транзисторов следует:

- Убедиться, что транзисторы, включенные параллельно, имеют сильную тепловую связь.
- Выравнивать значения общей индуктивности эмиттера и уменьшать ее до величины, которая не оказывает большого влияния на общие потери коммутации на заданной частоте.
- Минимизировать индуктивность рассеяния до значения, которое обеспечивает допустимое значение выбросов напряжения при максимальном рабочем токе.
- Схема управления должна иметь минимальное выходное сопротивление.
- Конденсаторы в цепи затвора замедляют коммутацию, тем самым увеличивая рассогласование между устройствами, а также могут вызывать колебания.
- Паразитные составляющие должны быть минимизированы. Проводящий рисунок печатной платы и электрические соединения должны быть максимально симметричными для всех транзисторов.