

Параметр: температура корпуса $T_{case} = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Импульс прямого тока I_{FM} или прямой импульсный ток I_{Fpulse}

Импульсное значение тока диода при импульсной работе

Параметры: длительность импульса t_p , температура корпуса, например $T_{case} = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $80 \text{ }^{\circ}\text{C}$

2.3.2 Характеристики

Структура IGBT модулей

Напряжение пробоя коллектор-эмиттер $V_{BR(CES)}$

Напряжение пробоя коллектор-эмиттер, затвор-эмиттер закорочены ($V_{GE}=0$)

Параметры: ток запираания коллектора I_C , температура корпуса $T_{case} = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Пороговое напряжение затвор-эмиттер $V_{GE(th)}$

Напряжение затвор-эмиттер, при превышении которого потечет ток коллектора,

Параметры: напряжение коллектор-эмиттер $V_{CE}=V_{GE}$, ток коллектора I_C , температура корпуса $T_{case} = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Ток отсечки коллектор-эмиттер I_{CES}

Запирающий ток между коллектором и эмиттером при закороченных затвор-эмиттер ($V_{GE} = 0$) и напряжении коллектор-эмиттер $V_{CE}=V_{CES}$,

Параметр: температура кристалла $T_j = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ и $125 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Ток утечки затвор-эмиттер I_{GES}

Ток утечки между затвором и эмиттером при закороченных коллектор-эмиттер ($V_{CE} = 0$) и максимальном напряжении затвор-эмиттер V_{GE} ,

Параметры: напряжение затвор-эмиттер V_{GE} , температура корпуса $T_{case} = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Напряжение насыщения коллектор-эмиттер V_{CEsat}

Напряжение насыщения коллектор-эмиттер (падение напряжения на включенном IGBT) при определенном токе коллектора I_C (при номинальном токе, см.п.2.3.3, или максимальном токе коллектора). Для PT-IGBT V_{CEsat} будет падать пропорционально температуре в диапазоне номинальных токов, для NPT-IGBT, однако, будет расти пропорционально температуре.

Параметры: напряжение затвор-эмиттер V_{GE} , ток коллектора I_C , температура корпуса $T_{case} = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ и $125 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Для расчета потерь в открытом состоянии следующие параметры часто приводятся в справочных данных: $V_{CE(TO)}$ (постоянное пороговое напряжение коллектор-эмиттер) и r_{CE} (наклон характеристики сопротивления в открытом состоянии) замещаемой прямой линией.

$$V_{CEsat} = f(I_C) = V_{CE(TO)} + r_{CE} \cdot I_C$$

Для расчета характеристика напряжения насыщения аппроксимирована диодной характеристикой.

Характеристики прямой передачи g_{fs}

Коэффициент изменения напряжения затвор-эмиттер и тока коллектора при определенном токе стока I_C ,

Параметры: напряжение коллектор-эмиттер V_{CE} , ток коллектора I_C (номинальный ток), температура корпуса $T_{case} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Емкость кристалл-корпус C_{CHC}

Емкость между внутренними компонентами и основной пластиной корпуса или потенциалом теплоотвода,

Параметр: температура корпуса $T_{case} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$

Входная емкость C_{iss}

Емкость между затвором и эмиттером при закороченных коллектор-эмиттер для переменного тока и напряжении затвор и эмиттер $V_{GE} = 0$.

Параметры: напряжение коллектор-эмиттер, частота измерений f , температура корпуса $T_{case} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$

Выходная емкость C_{oss}

Емкость между коллектором и эмиттером при закороченных затвор-эмиттер ($V_{GE} = 0$),

Параметры: напряжение коллектор-эмиттер, частота измерений f , температура корпуса $T_{case} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$

Обратная передаточная емкость (емкость Миллера) C_{rss}, C_{mi}

Емкость между коллектором и затвором при закороченных коллектор-эмиттер на переменном токе и напряжении затвор и эмиттер $V_{GE} = 0$. Для измерения эмиттер должен подключаться экранированным к измерительному мосту.

Параметры: напряжение коллектор-эмиттер, частота измерений f , температура корпуса $T_{case} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$

Паразитная индуктивность коллектор-эмиттер L_{CE}

Индуктивность между коллектором и эмиттером

Времена переключения

Более применимы на практике, чем в MOSFET, времена переключения в справочных данных на IGBT определены измерительной цепью с активной нагрузкой в соответствии с рис.2.9а. Постоянная времени нагрузки L/R велика, по сравнению с длительностью коммутации $T = 1/f$, так что в индуктивной нагрузке возникает продолжительный нагрузочный ток.

Как и в MOSFET, времена коммутации IGBT определяется по характеристике затвор-эмиттер при включении и выключении, см рис.2.9b.

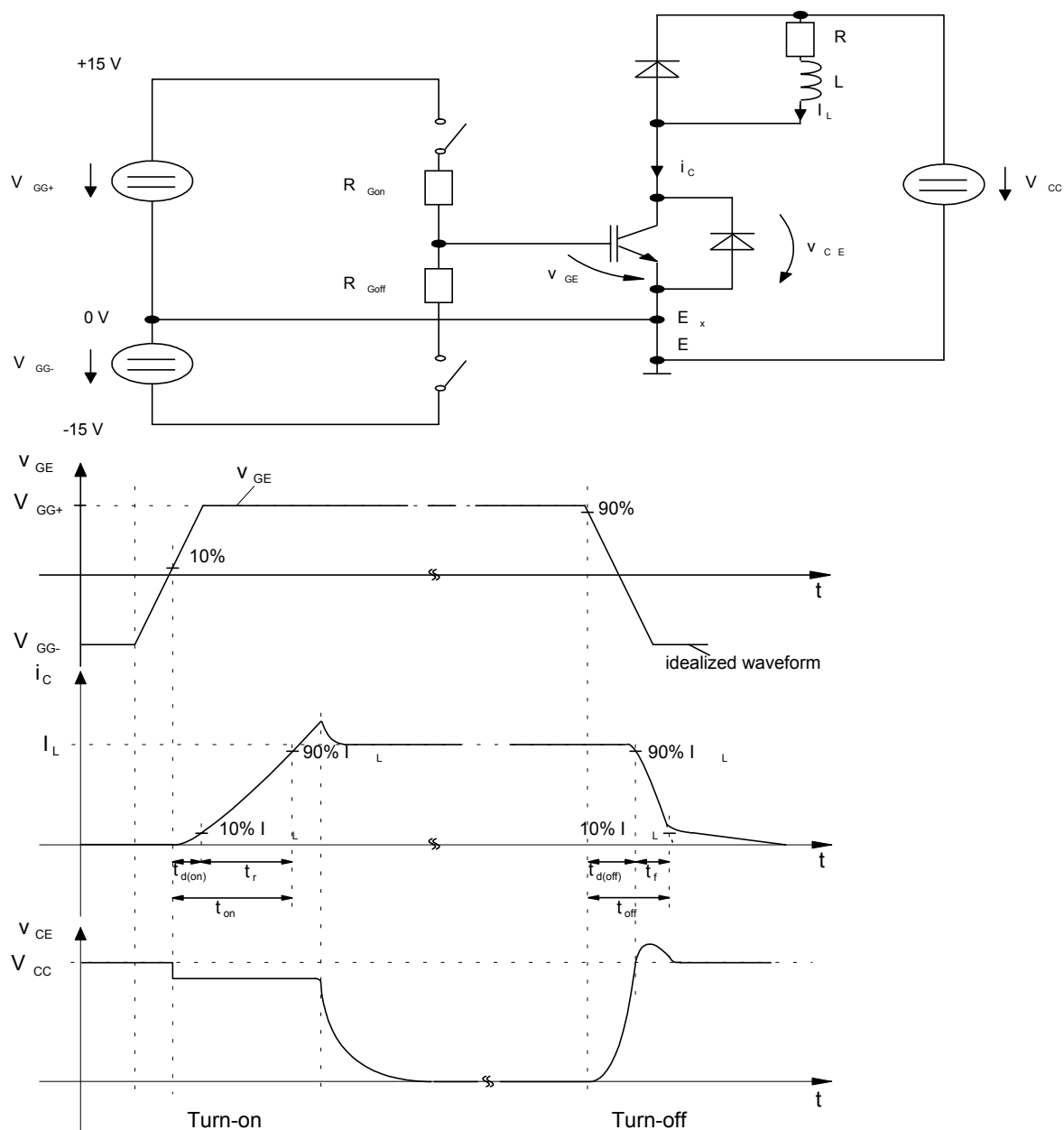


Рис.2.9 а) цепь измерения; б) определение времени переключения MOSFET с активно-индуктивной нагрузкой [264], [265]

Время переключения и реальные характеристики тока и напряжения определяются внутренними емкостями, индуктивностями и сопротивлениями цепей затвора и стока; по этой причине, все данные и характеристики в техническом описании могут служить только ориентиром.

Следующие параметры приведены по отношению к времени переключения:

цепь измерения, напряжение питания коллектор-эмиттер V_{CC} , напряжение управления затвор-эмиттер V_{GG+} , V_{GG-} , ток коллектора I_C , внешние последовательные сопротивления затвора R_{Gon} , R_{Goff} (сопротивление цепи управления при включении и выключении), температура корпуса $T_{case} = 25^{\circ}C$.

Время задержки включения $t_{d(on)}$

Как уже упоминалось, общий прямой ток в открытом состоянии IGBT перед включением проходит через индуктивную нагрузку.

После быстрого включения положительного напряжения затвор-эмиттер V_{GE} , напряжение затвор-эмиттер начнет возрастать с постоянной времени, которая определяется входной емкостью и сопротивлением затвора. Как только достигается пороговое напряжение $V_{GE(th)}$, начнет возрастать ток коллектора I_C .

Время задержки включения $t_{d(on)}$ определяется как временной интервал между моментами, когда напряжение затвор-эмиттер достигает 10 % от максимального значения, и когда ток коллектора I_C возрастет до 10 % от тока нагрузки.

Время нарастания t_r

Время нарастания t_r определяется временным интервалом, следующим за временем задержки включения, когда ток коллектора I_C возрастет с 10 % до 90 % от тока нагрузки. Основная часть потерь при включении возникает в IGBT в этот временной период, так как определенная доля I_L продолжает течь через обратный диод пока значение I_C ниже тока нагрузки. Поэтому напряжение коллектор-эмиттер не будет падать значительно ниже напряжения питания коллектор-эмиттер V_{CC} .

Различие между V_{CC} и V_{CE} , показанное на рис.2.9b в течение времени t_r , в основном определяется переходным падением напряжения на внутренней паразитной индуктивности цепи коммутации.

Сумма задержки включения $t_{d(on)}$ и времени нарастания t_r называется **временем включения t_{on}** .

Пока напряжение коллектор-эмиттер не достигло своего значения в открытом состоянии V_{CEsat} по окончании t_{on} , большая часть потерь возникнет по окончании t_{on} .

Выброс тока включения: после того, как через IGBT потечет весь ток нагрузки I_L , обратный диод закроется, в то же время рассеивая свой накопленный заряд Q_{rr} . Поэтому ток коллектора IGBT будет расти во время обратного восстановления диода (t_{rr}) до значения, пока импульсный ток восстановления I_{RPM} не превысит I_L (выброс тока включения, см.рис.2.10).

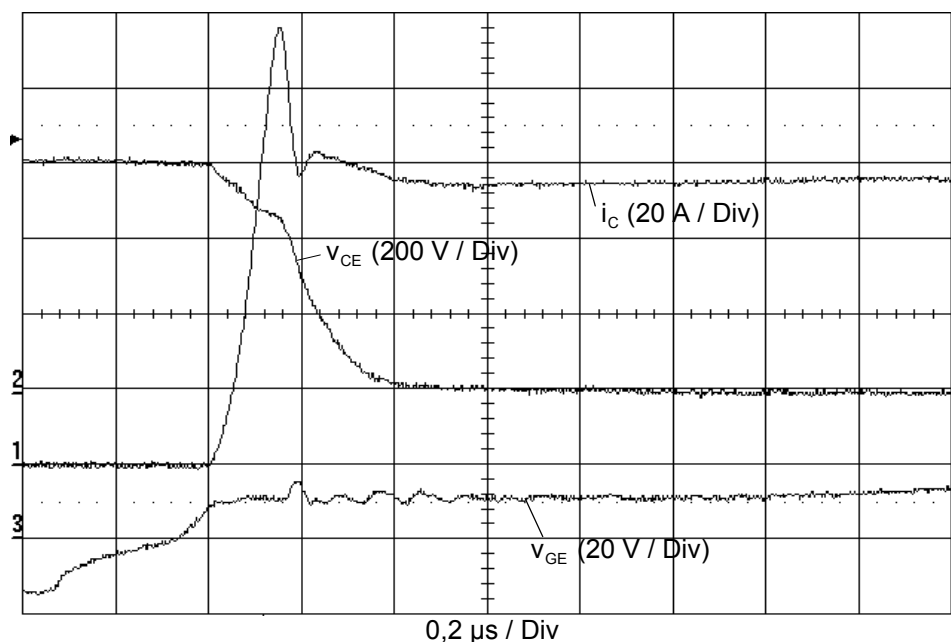


Рис.2.10 Переключение от обратного диода к IGBT (выброс тока включения) при открывании IGBT.

Напряжение динамического насыщения: после резкого падения при включении, напряжение коллектор-эмиттер будет снижаться относительно медленно (в пределах мкс) к своему постоянному значению V_{CEsat} . Эта «фаза динамического насыщения» необходима для наполнения широкой n^- -зоны IGBT неосновными (биполярными) носителями (модуляция проводимости).

Время задержки выключения $t_{d(off)}$

После выключения положительного управляющего напряжения и включения отрицательного управляющего напряжения затвор-эмиттер, напряжение затвор-эмиттер V_{GE} начнет падать с постоянной времени, которая определяется входной емкостью и сопротивлением затвора IGBT. Напряжение коллектор-эмиттер начнет возрастать. Ток коллектора в это время не может значительно упасть, так как обратный диод работает в обратном направлении пока V_{CC} больше чем V_{CE} и, следовательно, не может пропускать ток нагрузки.

Благодаря этому, время задержки выключения $t_{d(off)}$ определяется как временной интервал между моментами, когда напряжение затвор-эмиттер снизится до 90 % от значения во включенном состоянии, и когда ток коллектора упадет до 90 % от тока нагрузки.

Время спада t_f

Пока напряжение коллектор-эмиттер превышает напряжение V_{CC} при выключении IGBT, ток нагрузки может коммутировать обратный диод, который открыт в это время, и ток коллектора будет падать.

Время спада t_f определяется временным интервалом, когда ток коллектора будет падать с 90 % до 10 % от тока нагрузки.

Выброс V_{CE} над V_{CC} , показанный на рис.2.11, возникает из-за паразитных индуктивностей цепей коммутации и растет пропорционально скорости выключения di_C/dt IGBT.

Сумма задержки выключения $t_{d(off)}$ и времени спада t_f называется **временем выключения t_{off}** .

Пока ток коллектора не снизился до значения отсечки по окончании t_{off} , но все еще составляет 10 % тока нагрузки, потери по окончании t_{off} будут все еще превышать потери в закрытом состоянии.

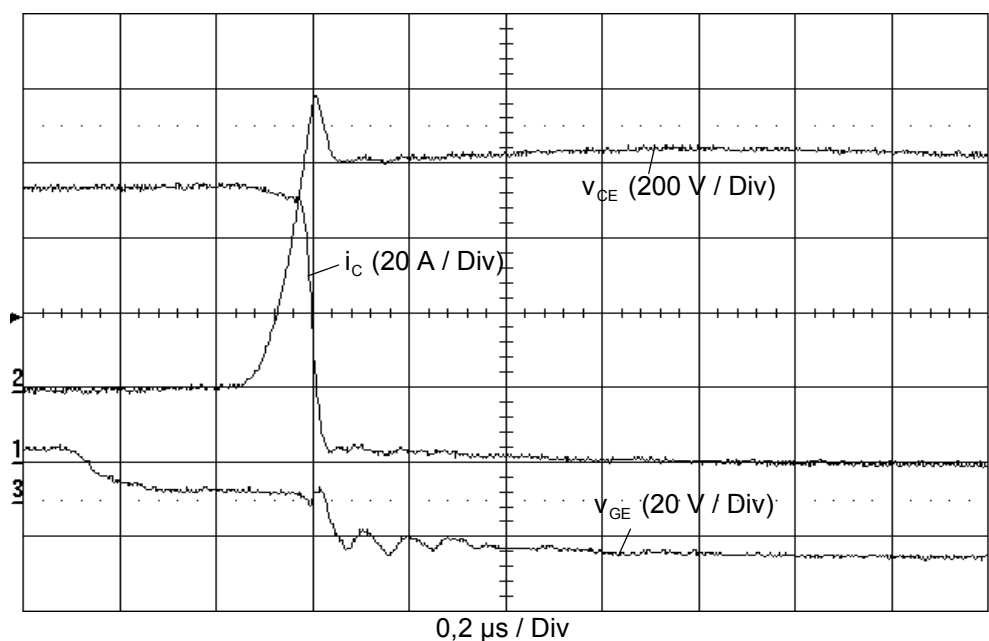


Рис.2.11 Характеристики выключения NPT-IGBT

Рассеивание энергии при включении E_{on} ; рассеивание энергии при выключении E_{off} за один цикл

Типичные значения E_{on} и E_{off} для IGBT показаны на диаграмме «энергия включения /выключения» в зависимости от тока коллектора в справочных данных.

Рассеиваемую мощность при коммутации можно рассчитать при умножении частоты коммутации f на E_{on} или E_{off} , соответственно: $P_{on} = f \cdot E_{on}$ или $P_{off} = f \cdot E_{off}$.

Рассеиваемая энергия при включении E_{on} обобщает эффекты выброса тока в обратном диоде, который интегрирован в силовом модуле. Рассеиваемую энергию при включении можно определить как состоящую из рассеиваемой мощности при включении P_{on} до момента, когда V_{CE} составит приблизительно 3 % от напряжения питания коллектор-эмиттер V_{CC} .

Кроме потерь мощности при активном времени выключения $t_{off} = t_{d(off)} + t_f$, рассеиваемая энергия выключения также состоит из потерь на ток «хвоста» во время t_t , до момента, когда коллекторный ток упадет ниже 1 % тока нагрузки.

Параметр: рабочее напряжение, температура кристалла $T_j = 125$ °С, управляющие напряжения, последовательные сопротивления затвора.

Внутреннее тепловое сопротивление переход-корпус R_{thjc} IGBT

Тепловое сопротивление R_{thjc} описывает распространение тепла между кристаллами IGBT (индекс j) и корпусом модуля (индекс c). Оно характеризует статическое распространение тепла системы IGBT внутри модуля (чаще с параллельными кристаллами) и зависит от размеров кристалла и конструкции модуля.

Разность температур ΔT_{jc} между температурой кристалла T_j и корпуса T_{case} при постоянной рассеиваемой мощности P определяется как: $\Delta T_{jc} = T_j - T_{case} = P \cdot R_{thjc}$.

Тепловое сопротивление контакта корпус-теплоотвод R_{thch} IGBT модуля

Тепловое сопротивление R_{thch} описывает распространение тепла между корпусом модуля (индекс c) и теплоотводом (индекс h). Оно характеризует статическое распространение тепла IGBT модуля (чаще с несколькими IGBT ключами) и зависит от размеров модуля, теплоотвода и поверхности корпуса, толщины и параметров термослоя (паста, фольга, прокладка) между модулем и теплоотводом, а также от силы прижимания крепежными винтами.

Разность температур ΔT_{ch} между температурой корпуса T_{case} и теплоотвода T_h при постоянной общей единичной рассеиваемой мощности P_n внутри модуля определяется как: $\Delta T_{ch} = T_{case} - T_h = P_n \cdot R_{thch}$.

Раздельное нахождение R_{thjc} и R_{thch} не возможно для модулей без основной пластины. Для таких модулей R_{thjh} показан на IGBT и на модуль. Разность температур можно рассчитать аналогично.

Механические данные

Кроме типа конструкции модуля, приведенные механические данные обычно отображают:

Момент вращения M_1 крепежных винтов (минимальное и максимальное значения) в Нм или фунт.дюйм;

Момент вращения M_2 выводов (минимальное и максимальное значения) в Нм или фунт.дюйм;

Масса w модуля в г;

Допустимое **ускорение при вибрации** в $m \cdot c^{-2}$.

Обратные диоды

Прямое напряжение обратного диода (обратное напряжение эмиттер-коллектор)
 V_{ES}, V_F

Обратное напряжение эмиттер-коллектор падает при закороченных затвор-эмиттер. V_{SD} описывает прямую характеристику паразитного обратного диода, которые не параллельны IGBT.

Параметры: прямой ток I_F , температура корпуса $T_{case} = 25 \text{ }^{\circ}C$

Пороговое напряжение обратного диода $V_{(T0)}$

Крутизна характеристики прямого сопротивления обратного диода r_T

С помощью порогового напряжения и крутизны характеристики прямого сопротивления можно получить упрощенную аппроксимацию прямой характеристики. Пороговое напряжение показывает точку пересечения с осью напряжений, крутизна характеристики прямого сопротивления определяет скорость нарастания характеристики.

Время восстановления обратного диода t_{rr}

Время восстановления внутреннего IGBT обратного диода, когда большой ток коллектора $-I_C = I_F$ коммутируется с большой di_F/dt и высоким обратным напряжением $V_R = V_{CC}$.

Примечание: t_{rr} очень сильно зависит от температуры (обычно значение удваивается между $25 \text{ }^{\circ}C$ и $150 \text{ }^{\circ}C$).

Параметры: прямой ток I_F , обратное напряжение V_R , скорость снижения прямого тока $-di_F/dt$, температура кристалла $T_j = 25 \text{ }^{\circ}C$ и $150 \text{ }^{\circ}C$.

Восстанавливаемый заряд обратного диода Q_{rr}

Восстанавливаемый заряд внутреннего IGBT обратного диода, когда большой ток коллектора $-I_C = I_F$ коммутируется с большой di_F/dt и высоким обратным напряжением $V_R = V_{CC}$.

Примечание: Q_{rr} очень сильно зависит от температуры (значение удваивается или иногда может вырасти в восемь раз больше между $25 \text{ }^{\circ}C$ и $150 \text{ }^{\circ}C$).

Параметры: прямой ток I_F , обратное напряжение V_R , скорость снижения прямого тока di_F/dt , температура кристалла $T_j = 25 \text{ }^{\circ}C$ и $150 \text{ }^{\circ}C$.

Внутреннее тепловое сопротивление переход-корпус R_{thjc} диода