

Использование встроенного NTC-резистора

для измерения температуры IGBT-модулей

В статье описаны особенности использования встроенного в силовой модуль терморезистора с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления (NTC-резистора) для измерения температуры; рассмотрены аспекты изоляции измерительной цепи от высокого напряжения, связь сопротивления NTC с температурой перехода кристаллов IGBT; приведены примеры практической реализации схемы измерений.

Анатолий Бербенец

berben@efo.ru

Введение

Одним из наиболее важных и критичных параметров, определяющих работоспособность силовых полупроводниковых приборов, является температура перехода кристалла. В международном стандарте IEC 60747-9 для характеристики IGBT-транзисторов введено по определению несколько параметров, связанных с этой величиной:

- T_{vj} — температура в области перехода полупроводникового кристалла. Значение используется для определения теплового сопротивления переход-корпус модуля R_{thjC} , которое в свою очередь используется для тепловых расчетов. T_{vj} не привязана жестко к температуре перехода конкретного кристалла в модуле, поэтому и получила название «температура виртуального перехода» (отсюда индекс «v» в обозначении).
- $T_{vj\max}$ — значение максимальной рабочей температуры перехода кристалла, которая используется для определения максимально допустимой рассеиваемой мощности IGBT-транзистора во включенном состоянии (статический и динамический режимы). В режиме переключения (а также в режимах импульсного включения IGBT, например, при воздействии импульса тока короткого замыкания), необходимо быть уверенным, что параметры переходного режима (мгновенные значения напряжения, температуры с учетом неоднородности динамического теплового распределения в модуле) не выходят за границы области безопас-

ной работы кристалла. А это значит, что расчетная величина $T_{vj\max}$ и в динамических режимах не должна превышать.

- $T_{vj\text{op}}$ — рабочая температура перехода кристалла — наиболее часто используемый практически температурный параметр. Этим параметром специфицируется минимальная и максимальная рабочие температуры кристалла, в пределах которых он может работать. Максимальные значения рабочей температуры IGBT-транзисторов и модулей на их основе зависят от технологии изготовления кристаллов и для современных поколений достигают +150 °C. В таблице в качестве примера приведены $T_{vj\text{op}}$ для IGBT-модулей Infineon (www.infineon.com).

Измерение температуры перехода T_{vj}

Измерить температуру полупроводникового кристалла в IGBT-модулях можно либо встроив датчик температуры непосредственно в силовой кристалл, либо измерив температуру подложки (основания корпуса), на которой располагается кристалл, в последующем пересчитав ее в температуру перехода, используя известные зависимости тепловой модели и теплового сопротивление переход – корпус R_{thjc} . Встраивание структуры температурного датчика в силовой кристалл отнимает от силовой части объем кристалла,

Таблица. $T_{vj\text{op}}$ для IGBT-модулей Infineon

Максимальное значение $T_{vj\text{op}}$	Серии IGBT-модулей Infineon
$T_{vj\text{op}} = 125\text{ °C}$	600 В IGBT2 DLC, KL4; 1200 В IGBT2 DN2, DLC, KF4, KL4C и KS4; 1200 В IGBT3 KE3 и KT3; 1600/1700 В IGBT1 DN2 и KF4; 1700 В IGBT2 DLC и KF6; 1700 В IGBT3 KE3; 3300 В IGBT2 KF2C; 6500 В IGBT2 KF2.
$T_{vj\text{op}} = 150\text{ °C}$	600 В IGBT3 E3; 1200 В IGBT4 P4, E4, T4; 1700 В IGBT4 P4, E4; 3300 В IGBT3 L3, E3.

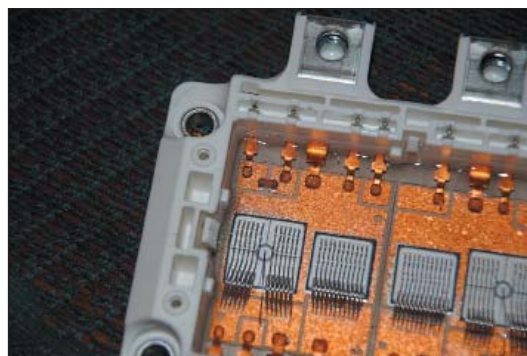


Рис. 1. Размещение NTC-резистора на поверхность керамической DCB-подложки

который более необходим для достижения максимальных характеристик по мощности, поэтому наибольшее распространение получил второй способ, где в качестве датчика температуры используется терморезистор с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления (NTC-резистор).

Для достижения наилучшей тепловой связи с кремниевым кристаллом, температуру которого требуется измерить, NTC-резистор монтируется в максимальной близости от него. В зависимости от типа IGBT-модуля применяются два способа монтажа: непосредственно на поверхность керамической DCB-подложки, где также смонтированы силовые кристаллы (рис. 1), и посредством промежуточной изолированной керамической подложки, монтируемой на основание корпуса.

Качество изоляции NTC-резистора

Так как силовые модули предназначены для работы с высокими рабочими напряжениями (от 600 В и выше), все измерительные и управляющие цепи должны быть изолированы от силовых цепей, это отражено в спецификации модулей введением параметра «напряжение изоляции». В процессе изготовления все модули проверяются на электрическую прочность изолированных цепей в соответствии со стандартом EN50187, регламентирующим несколько качественных уровней изоляции, разделенных на функциональный и усиленный. Усиленная изоляция является обязательной для модулей, работающих в составе инверторов. В стандарте она определена как «улучшенная базовая изоляция с такими механическими и электрическими свойствами, что сама по себе обеспечивает такую же защиту от пробоя как двойная изоляция. Она может состоять из одного или более слоев изоляционного материала».

Независимо от способа размещения терморезистора, он покрывается защитным гелем в составе модуля. Но, тем не менее, в случае пробоя силового кристалла модуля существует вероятность возникновения проводящей перемычки между цепью с высоким напряжением и NTC-резистором (рис. 2). В качестве проводящей перемычки могут выступать сместившиеся в процессе короткого замыкания проволочные проводники, соединяющие контакты силового чипа с контактами модуля, а также дуга, образовавшаяся в процессе пробоя. Таким образом, в терминах стандарта EN50187, вследствие указанных причин изоляция NTC-резистора может быть квалифицирована только как функциональная. В тех случаях, когда по условиям применения (например, инвертор) модуль должен обеспечивать усиленную изоляцию измерительной цепи, применяются дополнительные изоляционные барьеры. Среди них наиболее часто используют следующие способы:

- Применение изоляционного барьера между управляющей цифровой схемой в целом и силовым модулем (цифровые изоляторы по всем входам-выходам контроллера).

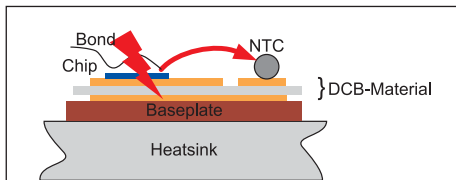


Рис. 2. Пример возникновения проводящей перемычки между цепью с высоким напряжением и NTC-резистором

- Использование изолирующего аналогового измерительного усилителя, обрабатывающего сигналы NTC-резистора.
- Преобразование сигнала NTC-резистора в цифровой вид непосредственно у модуля с последующей передачей в контроллер с трансформаторной или оптической изоляцией.

Что измеряет NTC-резистор?

Рассмотрим NTC-резистор, смонтированный на керамическую DCB-пластину совместно с силовым чипом. Распределение тепловых потоков внутри модуля для этого случая приведено в упрощенном виде (рис. 3). Практически весь объем выделяющегося в силовом кристалле тепла «стекает» на радиатор и далее рассеивается в окружающую среду. Небольшое количество попадает через DCB-подложку на NTC-резистор. Тепловые потоки не могут изменяться мгновенно, поэтому NTC-резистор пригоден для измерения температуры корпуса IGBT-модуля только в установившихся стационарных режимах. В переходных режимах, например, при коротком замыкании, терморезистор мгновенно не отреагирует на резкое изменение температуры силового кристалла в силу большой тепловой постоянной времени измерительной цепи. И как следствие этого важный вывод: NTC-резистор не пригоден для схем защиты IGBT-модулей от короткого замыкания.

На рис. 4 приведена эквивалентная тепловая схема, отражающая распределение тепловых потоков в IGBT-модуле с терморезистором. На основе этой схемы можно сделать два важных заключения:

- В силу падения температуры (R_{thJNTC}) вдоль пути передачи тепла от кристалла к термо-

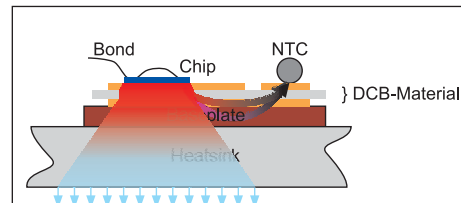


Рис. 3. Распределение тепловых потоков внутри модуля

- резистору температура последнего должна быть меньше температуры перехода.
- По тем же причинам температура терморезистора должна быть выше температуры радиатора.

Из опытных данных разница температур между радиатором и NTC-резистором IGBT-модулей (в частности, Infineon) составляет около 10 К в рабочем диапазоне температур модулей. Используя приведенную эквивалентную тепловую схему, нетрудно вычислить температуру перехода кристалла через температуру NTC-резистора и полную среднюю мощность рассеяния модуля P_V . Для этого только потребуется знать значения тепловых сопротивлений R_{thJC} , R_{thCH} . А эти значения приводятся в справочных данных на IGBT-модуль:

$$T_J = T_C + P_V \times R_{thJC}$$

$$T_C = T_H + P_V \times R_{thCH}$$

$$T_H = T_{amb} + P_V \times R_{thHA}$$

$$T_H = T_{amb} + P_V \times \sum R_{th} =$$

$$= T_{amb} + P_V \times (R_{thJC} + R_{thCH} + R_{thHA});$$

$$T_{NTC} \sim T_H + 10 \text{ K} = T_{amb} + P_V \times R_{thHA} + 10 \text{ K},$$

где T_p , T_C , T_H , T_{NTC} , T_{amb} — температуры перехода, корпуса, радиатора, NTC-резистора и окружающей среды соответственно; R_{thJC} , R_{thCH} , R_{thHA} — тепловые сопротивления переходов кристалл – корпус, корпус – радиатор, радиатор – окружающая среда соответственно.

Таким образом, встроенный в IGBT-модуль NTC-резистор показывает температуру радиатора, увеличенную приблизительно на 10 К, или, с учетом приводящегося в справочных данных на модуль теплового сопротивления радиатор – корпус R_{thCH} , можно сказать, что встроенный NTC-резистор позволяет контролировать температуру корпуса IGBT-модуля.

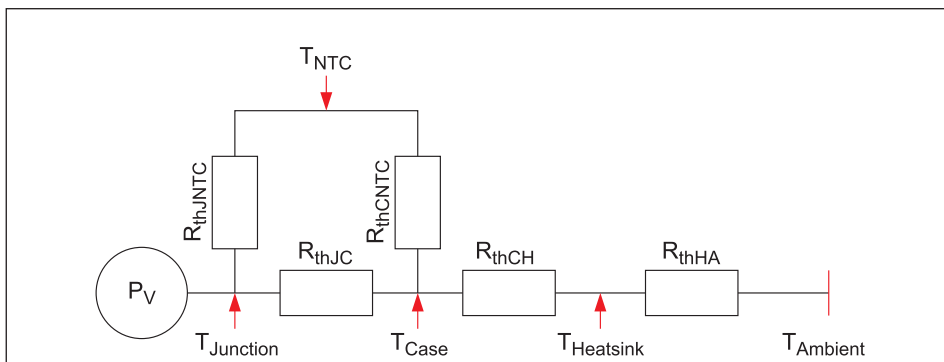


Рис. 4. Эквивалентная тепловая схема

**Измерение температуры
NTC-резистором.
Аналоговый подход**

Базовый принцип измерения температуры в этом подходе основан на схеме резистивного делителя напряжения, в нижнее плечо которого включен NTC-резистор (рис. 5), сопротивление которого уменьшается с увеличением температуры, уменьшая соответственно и напряжение U_R .

Это напряжение после преобразования в цифровую форму подается на микропроцессор и пересчитывается в значение температуры. Формула пересчета выводится из базовой зависимости сопротивления терморезистора от температуры, которая приводится в справочных данных:

$$R(\vartheta) = R_{25} \times e^{B(1/T_2 - 1/T_1)}, \quad (1)$$

где параметры для диапазона температур +25...100 °C приведены в справочных таблицах:

$$B_{25/100} = 3433 \text{ К}, R_{25} = 5 \text{ кОм}, T_1 = 298,15 \text{ К}.$$

Измерив значение U_R , можно рассчитать величину сопротивления, соответствующего температуре NTC-резистора. А определив U_R из выражения (1), логарифмируя, можно рассчитать температуру терморезистора (2). Эти вычисления легко могут быть выполнены микропроцессором схемы управления.

$$T_2 = \frac{1}{\frac{\ln\left(\frac{R(\vartheta)}{R_{25}}\right)}{B} + \frac{1}{T_1}}. \quad (2)$$

Если нет необходимости измерять температуру корпуса (радиатора) в диапазоне рабочих температур, а требуется только определить момент превышения некоторого порогового значения, достаточно дополнить схему (рис. 6) компаратором. Необходимо обратить внимание на выбор резистора R1 в делителе. Дело в том, что его величина не должна быть настолько малой, чтобы протекающий через делитель ток вызывал само-

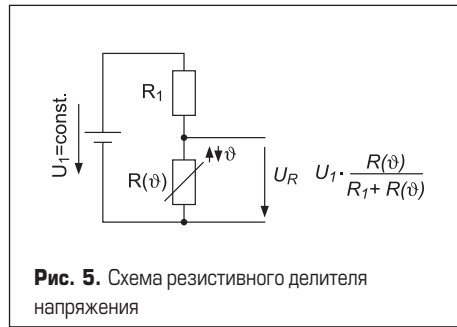


Рис. 5. Схема резистивного делителя напряжения

разогрев терморезистора и вносил погрешность в измерение температуры. В то же время очень большой номинал R1 значительно уменьшит полезный сигнал и увеличит погрешность измерений. Для выбора оптимальной величины R1 применим тепловой подход. Предположим, что погрешность измерения в 1 К достаточна. Тогда, зная тепловое сопротивление NTC-резистора (для IGBT-модулей Infineon $R_{thCH} = 145 \text{ К/Вт}$), легко вычислить максимальную мощность P_{max} , которую можно рассеять в нем. В нашем примере $P_{max} = 6,9 \text{ мВт}$. Теперь определим максимальный ток делителя (мА):

$$I_{max} = \sqrt{P_{max}/R_{100}} = 3,74,$$

где $R_{100} = 493 \text{ Ом}$ — величина сопротивления NTC-резистора при температуре 100 °C (из справочных таблиц). 100 °C — это наихудший случай, когда сопротивление NTC-резистора минимально, и в нем рассеивается максимальная мощность. Далее, если принять напряжение питания делителя равным 5 В и ток делителя в 3 мА, можем рассчитать оптимальную величину $R_1 = 843 \text{ Ом}$, которая обеспечивает погрешность измерения температуры, обусловленную током делителя, в 1 °C.

Существуют и другие схемотехнические подходы измерения температуры с использованием NTC-резистора, например, схема, приведенная на рис. 6, где терморезистор включен в состав RC-цепочки, подключенной к одному из входов компаратора.

Ко второму входу подключен резистивный делитель, задающий порог включения компаратора. Напряжение с выхода компарато-

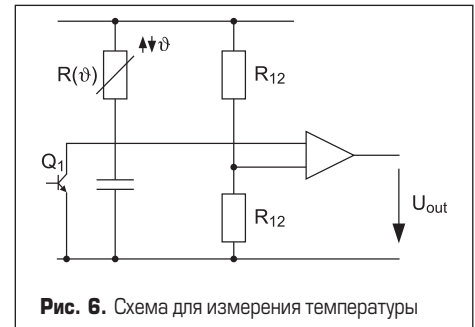


Рис. 6. Схема для измерения температуры

ра используется для включения транзистора Q1, обнуляющего конденсатор. Время заряда конденсатора зависит от величины сопротивления NTC-резистора, которое уменьшается с увеличением температуры. На выходе такой схемы возникает последовательность импульсов, количество которых за фиксированное время зависит от температуры терморезистора (например, растет с увеличением температуры). Далее достаточно подсчитать количество импульсов за какой-либо промежуток времени с последующим пересчетом в температуру.

Выводы

- Мгновенное максимальное значение температуры перехода силового кристалла в наиболее напряженном режиме работы — главный критерий работоспособности силового модуля.
- NTC-резисторы, встроенные в IGBT-модули, не могут быть использованы для измерения мгновенных значений температуры (например, для защиты модулей от токов короткого замыкания). Они предназначены для мониторинга усредненной температуры корпуса (радиатора) в стабильных режимах работы.
- Использование встроенных NTC-резисторов для измерения температуры IGBT-модулей в составе силовых преобразовательных устройств (например, инверторов) требует применения дополнительных мер по гальванической изоляции силовых и измерительных цепей.