

# Нормирование теплового сопротивления IGBT:

## базовые принципы и некоторые особенности

Выбор модуля IGBT для конкретных условий применения требует анализа его тепловых характеристик с учетом системы охлаждения и оценки их соответствия техническим требованиям, предъявляемым к системе (мощность, температура окружающей среды, профиль нагрузки, срок службы).

Для сопоставления тепловых свойств различных силовых ключей необходимо учесть следующие факторы:

- особенности конструкции модуля (наличие или отсутствие базовой платы, наличие интегрированного теплостока);
- особенности нормирования тепловых характеристик конкретного производителя (варианты опорных точек измерения температуры [11]);
- различия в методиках определения тепловых сопротивлений (условия измерений, привязка параметра  $R_{th}$  к модулю или входящим в него ключам, учет тепловой связи между ключами, тепловое моделирование);
- теплопроводность и толщина слоя теплопроводящего материала (TIM) между модулем и радиатором.

В данной статье описаны типовые методы определения характеристик IGBT и их влияние на параметры, приводимые в технических спецификациях. Изложены существующие и перспективные способы нормирования теплового сопротивления  $R_{th}$  для модулей SEMIKRON. Физические принципы передачи тепла и методы совершенствования систем охлаждения силовых электронных преобразователей подробно рассмотрены в [2].

Арендт Винтрих  
(Arendt Wintrich)

П. Бекедаль  
(P. Beckedahl)

Перевод и комментарии:  
Андрей Колпаков

Andrey.Kolpakov@semikron.com

### Методы определения теплового сопротивления

#### Измерение температуры кристалла $T_j$ , корпуса $T_c$ и радиатора $T_s$

Известны различные способы измерения температуры чипов IGBT и диодов, например с помощью инфракрасных камер или термопар, установленных на поверхности чипа. Однако чаще всего используется косвенный метод, основанный на физическом свойстве полупроводниковых кристаллов: при про-

пуске малого фиксированного тока биполярные полупроводники демонстрируют линейную зависимость между прямым падением напряжения и температурой чипа. Данная методика описана в стандарте IEC 60747 [3], важно, что для ее применения не требуется специальная подготовка модуля.

Калибровочная кривая  $V_{CEon} = f(T_j)$  или  $V_f = f(T_j)$  строится путем измерения падения напряжения при различных температурах чипа. Ключ X (IGBT или диод) работает при постоянном токе нагрузки, нагревая его до наступления теплового равновесия,

#### Основные определения:

**Модуль IGBT (IGBT module):** содержит один или более электронных ключей, изолированных от охлаждающей поверхности, называемой «корпусом», при допущении, что все тепло рассеивается через эту поверхность.

**Ключ (Switch):** элемент электрической схемы, в нашем случае — IGBT с антипараллельным диодом (FWD).

**IGBT-ключ (IGBT-switch):** транзистор IGBT как часть схемного «ключа», состоящий из одного или нескольких параллельных чипов и работающий как один функциональный элемент схемы.

**Диод-ключ (diode-switch):** антипараллельный диод IGBT как часть схемного «ключа», состоящий из одного или нескольких параллельных чипов и работающий как один функциональный элемент схемы.

**Модуль с корпусом в качестве базового элемента (Case rated module):** модуль, номинальный ток которого указан для определенной температуры корпуса, что требует определения теплового сопротивления IGBT-ключа и диода-ключа относительно корпуса. Понятие, как правило, относится к модулям с толстой базовой платой.

**Модуль с радиатором в качестве базового элемента (heatsink rated module):** модуль, номинальный ток которого указан для определенной температуры радиатора, что требует определения теплового сопротивления IGBT-ключа и диода-ключа относительно радиатора, а также условий монтажа, для которых эта величина  $R_{th}$  справедлива. Данное понятие, как правило, относится к модулям без базовой платы.

мощность рассеяния рассчитывается по формуле  $P_x = V_x \times I_{DC}$ . После отключения нагрузки через открытый IGBT пропускается стабильный тестовый ток от специального источника. Величина  $T_j$  определяется по калибровочной кривой путем измерения падения напряжения на транзисторе спустя несколько сотен микросекунд после выключения. Данная пауза необходима для того, чтобы закончился процесс переноса носителей заряда в полупроводнике. Описанная методика позволяет достаточно точно определить среднюю температуру кристалла IGBT.

Измерение температуры корпуса  $T_c$  стандартных модулей производится с помощью термодпары, размещаемой под базовой платой по центру чипа. Температура радиатора определяется в соответствии со стандартом IEC 60747-15 [4], предусматривающим два варианта размещения термодатчика: рядом с модулем  $T_{s1}$  или в отверстии в радиаторе, просверленном по центру кристалла  $T_{s2}$  (рис. 1 и табл. 1).

Рассмотрим три метода измерения температуры корпуса  $T_{cn}$  и радиатора  $T_{s2n}$  в вертикальной области, находящейся под кристаллами. Недосток первых двух состоит в необходимости демонтажа и снятия модуля, что может привести к ошибочным результатам, третий дает небольшую погрешность за счет отклонения от центральной оси чипа:

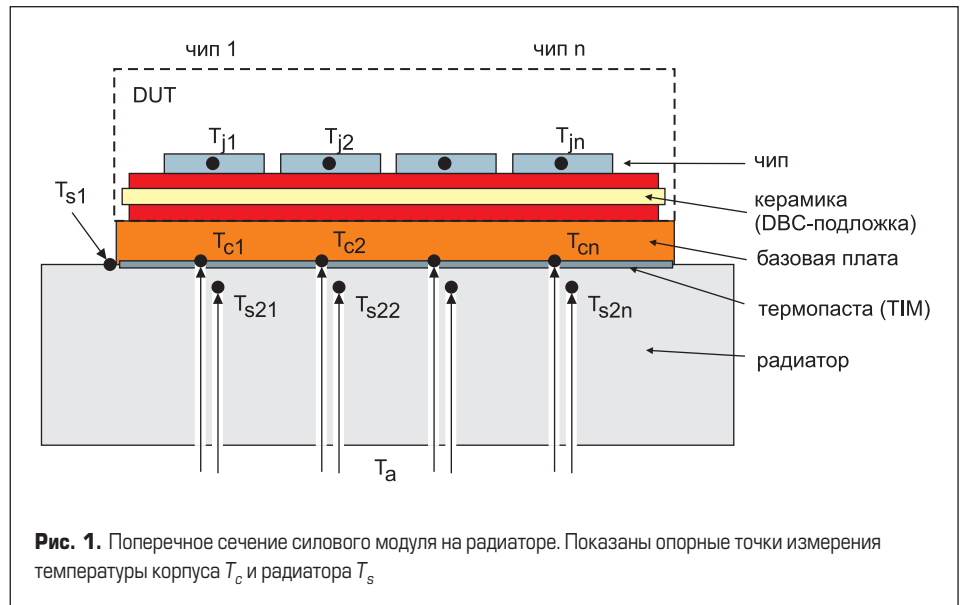
- Используются два радиатора с отверстиями в одних и тех же зонах: в одном они просверлены под чипами для измерения  $T_{cn}$  во втором — это глухие отверстия для измерения  $T_{s2n}$
- При симметричном положении кристаллов в ключе половина отверстий в радиаторе служит для измерения  $T_{c1...n/2}$ , другая половина — для измерения  $T_{s2n/2...n}$ . После первого измерения модуль разворачивают на 180° и повторяют замеры температуры.
- Отверстия для измерения  $T_s$  и  $T_c$  немного сдвигают относительно друг друга.

В модулях, не имеющих базовой платы, невозможно измерить температуру корпуса без искажения нормального теплового потока от чипов к радиатору. Поэтому для таких компонентов определяется только температура радиатора (снизу  $T_{s2n}$  или рядом с модулем  $T_{s1}$ ).

**Определение теплового сопротивления**

Формулы для расчета тепловых сопротивлений  $R_{th(j-s)}$ ,  $R_{th(j-c)}$  и  $R_{th(c-s)}$  на отдельный ключ или на модуль М, использующие измеренные значения градиента температуры и рассеиваемой мощности, приведены в таблице 2. Переменная X в отношении IGBT или диода применима к любому другому силовому полупроводнику внутри модуля. Выражения, помеченные SK, применяются SEMIKRON до сих пор.

Стандарт оставляет производителю модуля возможность выбора положения опорной точки для измерения температуры радиатора  $T_s$ , однако оно должно быть указано в спецификации или в руководстве по применению (Technical Explanations, Application Notes).



**Рис. 1.** Поперечное сечение силового модуля на радиаторе. Показаны опорные точки измерения температуры корпуса  $T_c$  и радиатора  $T_s$

**Таблица 1.** Положение опорных точек для измерения температуры по стандарту IEC 60747-XX

Область измерения	Обозначение	Опорная точка
Температура кристалла 1...n	$T_{j1...n}$	Определяется с помощью методов, описанных в отдельных документах (например, диод – [2], IGBT – [9]).
Температура корпуса под чипами 1...n	$T_{c1...n}$	Определяется в области корпуса, заданной производителем, измерение производится снизу через небольшое отверстие в радиаторе (1–2,5 мм) под чипом.
Температура радиатора в заданной точке поверхности	$T_{s1}$	Метод 1: температура $T_s$ измеряется на монтажной поверхности радиатора в доступной и наиболее горячей точке, расположенной максимально близко к кристаллу.
Температура радиатора под чипом 1...n	$T_{s21...2n}$	Метод 2: температура $T_s$ измеряется в глухом отверстии в радиаторе ( $\varnothing = 1-2,5$ мм), заканчивающемся в $(2 \pm 1)$ мм от его поверхности.

Внимательный анализ спецификаций показывает, что тепловые сопротивления одинаковых модулей, выпущенных разными производителями, могут существенно отличаться. Причиной этого является разница составля-

ющих  $R_{th}$ , находящихся на пути распространения тепла от кристалла до окружающей среды (рис. 2).

Контрольная точка  $T_{s1}$  на поверхности радиатора оказывается намного «холоднее», чем

**Таблица 2.** Определение параметров  $R_{th(j-s)}$ ,  $R_{th(j-c)}$ ,  $R_{th(c-s)}$  по стандарту IEC 60747-15\*

Тепловое сопротивление $R_{th}$	Модули с базовой платой	Модули без базовой платы
На IGBT-ключ или FWD-ключ для модулей с одним чипом на ключ	$R_{th(j-c)} = \frac{T_j - T_c}{P}$ (SK) $R_{th(c-s)} = \frac{T_c - T_{s1}}{P}$ или $R_{th(c-s)} = \frac{T_c - T_{s2}}{P}$	$R_{th(j-s)} = \frac{T_j - T_{s1}}{P}$ или $R_{th(j-s)} = \frac{T_j - T_{s2}}{P}$ (SK)
На IGBT-ключ или FWD-ключ для модулей с n-чипами на ключ	$R_{th(j-c)} = \frac{T_j - \sum_{i=1}^n T_{ci} / n}{P}$ (SK) $R_{th(c-s)} = \frac{\sum_{i=1}^n T_{ci} / n - T_{s1}}{P}$ или $R_{th(c-s)} = \frac{\sum_{i=1}^n T_{ci} / n - \sum_{i=1}^n T_{s2i} / n}{P}$	$R_{th(j-s)} = \frac{T_j - T_{s1}}{P}$ или $R_{th(j-s)} = \frac{T_j - \sum_{i=1}^n T_{s2i} / n}{P}$ (SK)
На модуль М (потери $P_M = \sum P_m$ ) с n-чипами	$R_{th(j-c)} = \frac{T_j - \sum_{i=1}^n T_{ci} / n}{P}$ (SK) $R_{th(c-s)} = \frac{\sum_{i=1}^n T_{ci} / n - T_{s1}}{P}$ или $R_{th(c-s)} = \frac{\sum_{i=1}^n T_{ci} / n - \sum_{i=1}^n T_{s2i} / n}{P_M}$	Не определяется

\* **Примечание:** В стандарте IEC не делается четкого различия между одиночным чипом и мультичиповым ключом и не объясняется, что делать при отличии температур корпуса или радиатора, измеренных под чипами, входящими в один ключ. Поправка к международному стандарту, предусматривающая использование среднего значения результатов измерений, рассматривается в данной статье (см. раздел «Мультичиповые приборы»).

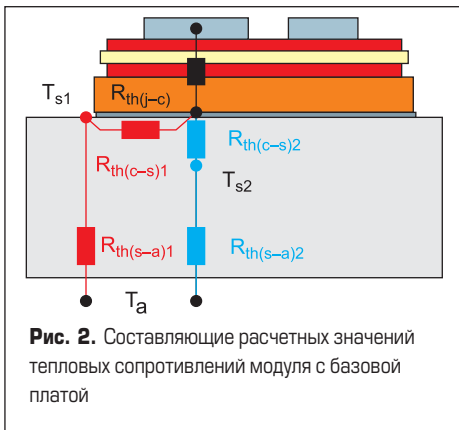


Рис. 2. Составляющие расчетных значений тепловых сопротивлений модуля с базовой платой

расположенная под модулем зона  $T_{s2}$ , последствия чего показаны в таблице 3. Чем лучше радиатор рассеивает мощность, тем больше оказывается разница результатов измерений. При фиксированном значении температуры окружающей среды  $T_a$ , одинаковых тепловых характеристиках и условиях измерения величина  $R_{th(s-a)}$  может меняться в зависимости от выбранной контрольной точки измерения  $T_s$ , однако суммарное тепловое сопротивление  $R_{th(j-a)} = R_{th(j-c)} + R_{th(c-a)}$  должно оставаться неизменным.

Подробно о проблемах сопоставления параметров силовых ключей и распространенных ошибках рассказано в [11].

**Мультичиповые приборы**

Ключи в мощных силовых модулях, как правило, состоят из нескольких параллельно соединенных кристаллов IGBT/FWD. Они устанавливаются на изолирующие подложки DBC (Direct Bonded Copper) методом пайки или спекания. Из-за разброса электрических и механических свойств рассеиваемая мощность и температура чипов несколько отличается.

Стандарт IEC оставляет за производителем методику нормирования некоторых параметров модулей, в том числе положение контрольной точки для измерения температуры корпуса  $T_c$  и теплоотода  $T_s$ , которые должны указываться в технических спецификациях. Например,  $T_c$  может определяться по температуре под самым нагретым кристаллом или по средней температуре под параллельными

Таблица 3. Влияние положения контрольной точки  $T_s$  на величину  $R_{th(c-s)}$  и  $R_{th(s-a)}$

Метод измерения $T_s$	Контрольная точка	Соотношение $\Delta T_{(c-s)}/R_{th(c-s)}$	Соотношение $\Delta T_{(s-a)}/R_{th(s-a)}$	Преимущества	Недостатки	SEMIKRON
Метод 1	$T_{s1}$	Выше	Ниже	Доступная контрольная точка, одно измерение	Сильная зависимость от радиатора	Для модулей с базовой платой, выпущенных до 2014 г.
Метод 2	$T_{s2n}$	Ниже	Выше	Слабая зависимость от свойств радиатора	Специальная подготовка радиатора, два измерения	Для модулей без базовой платы; для модулей с базовой платой, выпускаемых с 2015 г.

чипами. Причем в спецификациях и технических описаниях зачастую отсутствует информация о методе измерения этой величины.

Для определения параметра  $T_j$  необходимо измерить температуру (т. е. падение напряжения) всех параллельных чипов IGBT/FWD, входящих в ключ. Таким образом, мы получаем усредненную по площади величину, учитывающую тепловую связь между параллельными кристаллами. Поэтому результат измерений не является точным температурным эквивалентом напряжения на одном конкретном или наиболее нагретом чипе.

Температура корпуса  $T_c$  и сопротивление «кристалл–корпус» модулей с базовой платой, содержащих несколько параллельных чипов, определяется несколько иначе. Для этого нужно измерить  $T_{cn}$  под каждым чипом и использовать среднее значение  $T_c$  вместе с  $T_j$  для расчета  $R_{th(j-c)}$  на ключ. В противном случае тепловое сопротивление будет «позиционно-зависимым», т. е. будет определяться положением датчика под наиболее нагретым кристаллом, дающим наименьшее значение  $R_{th(j-c)}$ .

Пример для модуля SEMiX 3 (рис. 3) демонстрирует, что разница температур трех чипов одного ключа составляет 10–15%. То же самое относится к температуре радиатора  $T_s$  и тепловому сопротивлению  $R_{th(c-s)21...23}$ , поэтому для расчетов следует использовать средние значения.

В «безбазовых» модулях перепад температуры на радиаторе оказывается даже выше из-за отсутствия эффекта распространения тепла, обеспечиваемого базовой платой. В этом случае позиция датчика под самым нагретым чипом дает минимальное значение  $R_{th(j-s)}$ . Поэтому величина  $T_s$  здесь также должна находиться по среднему значению температуры, измеренному под параллельными кристаллами. Для решения этой задачи SEMIKRON использует специализированный теплосток с жидкостным охлаждением, имеющий отверстия во всех возможных позициях чипов.

**Тепловая связь между ключами**

Уровень тепловой связи между кристаллами, входящими в ключ, зависит от дистанции

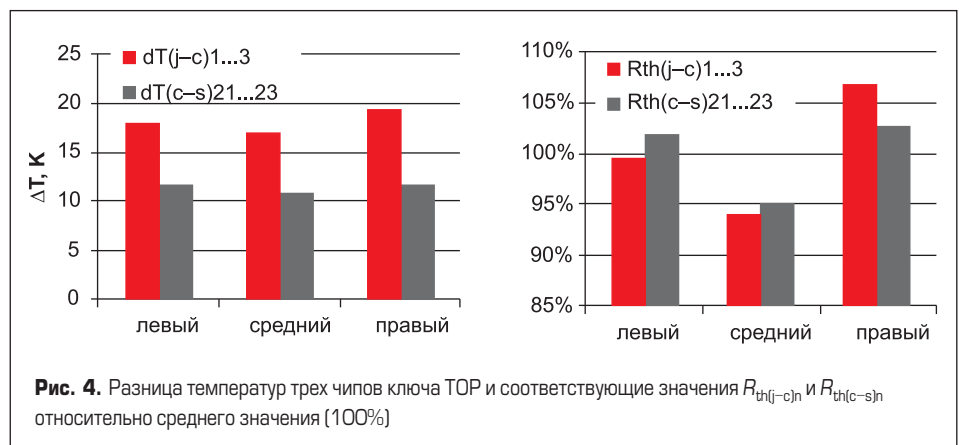


Рис. 4. Разница температур трех чипов ключа TOP и соответствующие значения  $R_{th(j-c)}$  и  $R_{th(c-s)}$  относительно среднего значения (100%)

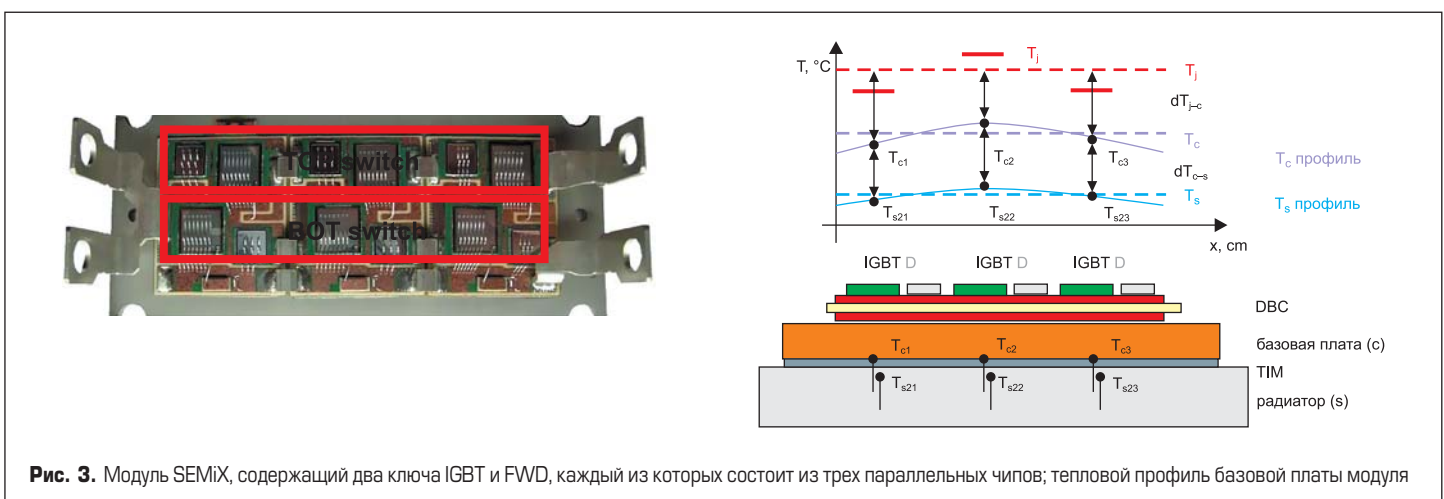


Рис. 3. Модуль SEMiX, содержащий два ключа IGBT и FWD, каждый из которых состоит из трех параллельных чипов; тепловой профиль базовой платы модуля

между ними, а также от толщины и теплопроводности расположенных ниже слоев. В модулях с расстоянием между ключами менее 3 мм взаимодействие должно происходить по DBC-подложке, однако тепло, в основном, распространяется в более теплопроводящих слоях, расположенных под ней (базовая плата, радиатор).

При использовании описанных выше методик потери рассчитываются отдельно для транзисторов и диодов. Тепловая связь между IGBT и FWD в пределах одного ключа не определяется, однако она приводит к тому, что кристаллы нагреваются до более высоких температур. Заштрихованная область (рис. 5, слева), соответствующая «индивидуальным» измерениям, не может быть использована для оценки тепловых характеристик в том случае, если оба полупроводниковых прибора рассеивают мощность и получают дополнительный нагрев (рис. 5, справа).

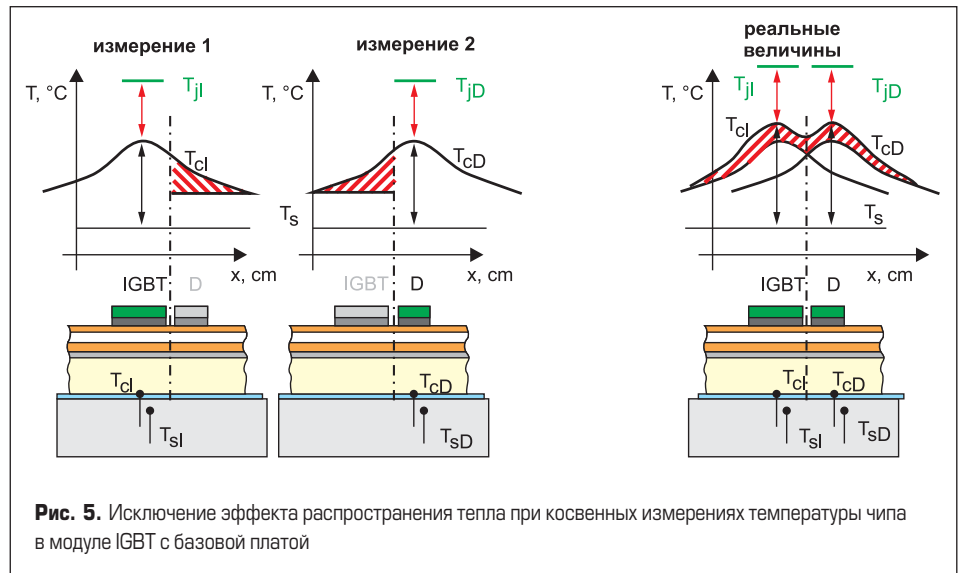


Рис. 5. Исключение эффекта распространения тепла при косвенных измерениях температуры чипа в модуле IGBT с базовой платой

**Определение  $R_{th(j-c)}$**

Эффект теплового взаимодействия двух IGBT-ключей в стандартном полумостовом модуле SEMiX был исследован с помощью описанного выше метода, результаты представлены на рис. 6. Расстояние между TOP и BOT IGBT в этом случае составляет несколько миллиметров (рис. 3).

Измерения показывают, что значение  $R_{th(j-c)}$  меняется всего на несколько процентов, что можно объяснить низкой тепловой связью по DBC-подложке. При одновременной работе двух ключей температура медной базовой платы возрастает на такую же величину, что и температура кристаллов. Градиент  $\Delta T$  и тепловое сопротивление «кристалл–корпус» при этом изменяются незначительно, поэтому определение  $R_{th(j-c)}$  для одного ключа (IGBT или диода) без учета эффекта теплового взаимодействия в данном случае допустимо.

**Определение  $R_{th(j-s)}$**

Сопротивление «кристалл–радиатор» нормируется, как правило, для модулей без базовой платы, у которых существует очень ограниченная тепловая связь между кристаллами на изолирующей DBC-подложке. Величина  $R_{th(j-s)}$  находится для одиночного IGBT- или FWD-ключа по температуре, измеряемой в отверстии в радиаторе под чипом. Для данного случая нет необходимости в адаптации методики измерений или справочных значений.

**Определение  $R_{th(c-s)}$  с учетом тепловой связи между ключами**

Из рассмотрения рис. 6 видно, что величина  $R_{th(c-s)}$  изменяется от 15% (работают два IGBT-ключа,  $T_s$  измеряется по методу 2) до 35%, если  $T_s$  измеряется на поверхности радиатора по методу 1. Однако тепловое сопротивление может повыситься до 100%, если ключ FWD также рассеивает мощность. Определение теплового сопротивления  $R_{th(c-s)}$  без учета коэффициента тепловой связи приводит к слишком низкому прогнозу по перегреву в том случае, если работают все ключи. В та-

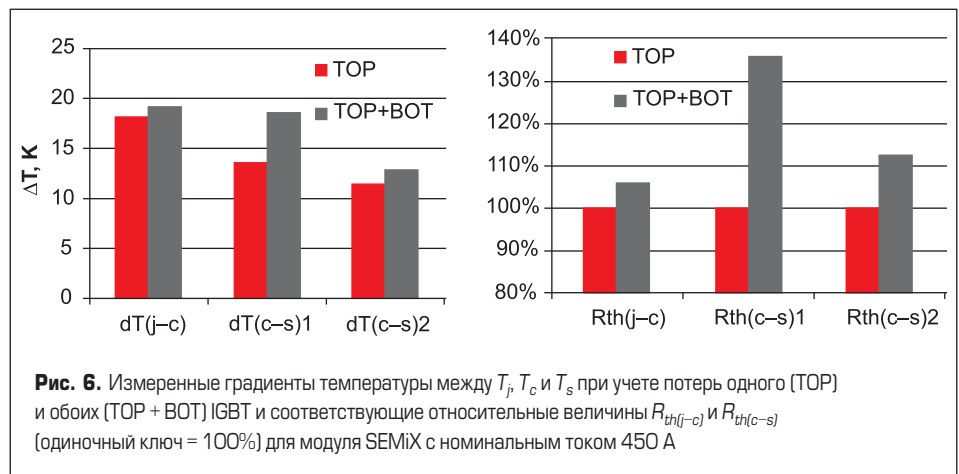


Рис. 6. Измеренные градиенты температуры между  $T_j$ ,  $T_c$  и  $T_s$  при учете потерь одного (TOP) и обоих (TOP + BOT) IGBT и соответствующие относительные величины  $R_{th(j-c)}$  и  $R_{th(c-s)}$  (одиночный ключ = 100%) для модуля SEMiX с номинальным током 450 А

блице 4 приведены условия моделирования и оценка влияния эффектов тепловой связи на  $R_{th(c-s)}$  для полумостовых модулей SEMiX 3 и SEMITRANS 3.

На рис. 7 представлены расчетные значения  $R_{th(c-s)}$  ключа IGBT,  $R_{th(c-s)D}$  ключа FWD и  $R_{th(c-s)M}$  всего модуля. Для нахождения  $R_{th(c-s)M}$  максимальная разница температур  $dT_{(c-s)X}$  определенная для одного ключа, делится на общие потери модуля. Рабочие точки 1, 2, 3 и 4, равные по измеренным значениям, используются для верификации модели. Рабочая точка 3 соответствует состоянию, когда IGBT и диод одновременно генерируют потери. Она проверяется для модуля SEMiX с помощью АС-теста путем подачи переменного тока частотой 50 Гц на IGBT и диод от сильноточного источника.

Для разных условий эксплуатации можно сделать следующие выводы, учитывая, что величина  $R_{th}$  обратно пропорциональна площади поверхности  $A$ , через которую идет теплопередача ( $R_{th} \sim 1/A$ ):

- Модуль имеет самое высокое значение  $R_{th(c-s)M}$ , если только один IGBT- или один FWD-ключ рассеивает мощность (OP1 и OP5), поскольку лишь небольшая часть монтажной поверхности модуля используется для передачи тепла.  $R_{th(c-s)X} = R_{th(c-s)M}$  потому что один источник тепла находится внутри модуля. Этот наихудший случай примерно соответствует справочным данным модулей SEMIKRON, выпускавшихся до 2014 г. Использование этих параметров для вычисления  $T_j$  дает хорошее согласование между расчетными и реальными зна-

Таблица 4. Определение рабочей точки для моделирования и оценка влияния тепловой связи на  $R_{th(c-s)}$ ; 100% соответствует примерно 1 Вт/мм<sup>2</sup> (плотность мощности по используемой поверхности чипа)

№	Практическая ценность	Потери мощности IGBT и диода, %			
		T TOP	T BOT	D BOT	D TOP
1	Полумост в режиме тормозного чоппера в приводе мотора	100	0	0	0
2	Режим инвертора при макс. напряжении АС, низкой частоте коммутации и $\cos(\phi) = 1$	100	100	0	0
3	Режим инвертора при низком напряжении АС, высокой частоте коммутации и $\cos(\phi) = -0,8...+0,8$	50	50	50	50
4	Режим инвертора при макс. напряжении АС, низкой частоте коммутации и $\cos(\phi) = -1$	0	0	100	100
5	Режим бустера при входном напряжении, близком к выходному	0	0	0	100



чениями в точках OP1 и OP5, но при этом градиент  $dT_{(c-s)}$  в точках OP2...4 получается слишком большим.

- Сопротивление  $R_{th(c-s)M}$  уменьшается, если два IGBT-ключи или два FWD-ключи (OP2 и OP4) рассеивают мощность, т. к. при этом большая площадь используется для передачи тепла. Снижение  $R_{th(c-s)M}$  зависит от расстояния между ключами, например TOP и BOT IGBT в полумостовом модуле SEMITRANS находятся далеко друг от друга, и тепловой связи между ними нет. В этом случае площадь теплопередачи удваивается, поэтому величина  $R_{th(c-s)M}$  может сократиться до 50%. Сопротивление  $R_{th(c-s)I}$  является постоянным и незави-

мым, если используются один или два ключа. Тепловая связь внутри модуля SEMiX сильнее, поэтому  $R_{th(c-s)M}$  уменьшается только на 60%, когда работают оба ключа.  $R_{th(c-s)I}$  увеличивается на 15–30%, поскольку TOP и BOT IGBT расположены близко друг к другу и для передачи тепла они используют части одной и той же поверхности.

- Тепловое сопротивление  $R_{th(c-s)M}$  имеет минимальное значение, если работают все ключи (OP3), поскольку в этом случае для передачи тепла используется наибольшая площадь монтажной поверхности модуля. Величина  $R_{th(c-s)M}$  измеренная по методу 1, оказывается на 30% больше для SEMITRANS

и на 50% больше для SEMiX, чем при измерении по методу 2. Индивидуальные значения  $R_{th(c-s)X}$  увеличиваются в гораздо большей степени в точке OP3, чем OP2. Наибольший эффект можно увидеть на антипараллельном диоде модуля SEMITRANS, т. к. он нагревается от соседнего кристалла IGBT.

- Определение параметра  $R_{th(c-s)X}$  для одиночного ключа IGBT и FWD недостаточно для описания тепловых характеристик силового модуля, поскольку учет теплового взаимодействия кристаллов и ключей здесь обязателен.

Величина  $R_{th(c-s)}$  зависит от распределения рассеиваемой мощности между ключами

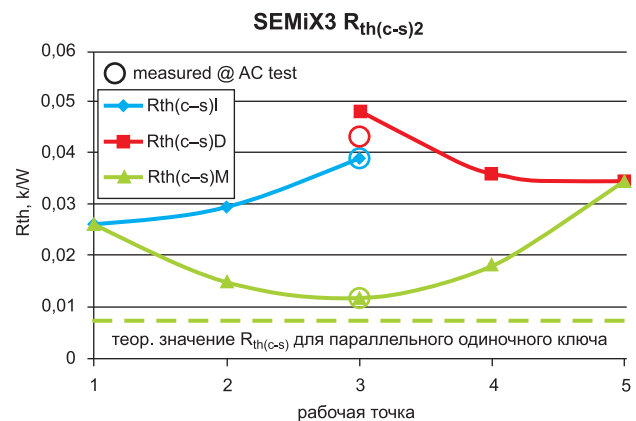
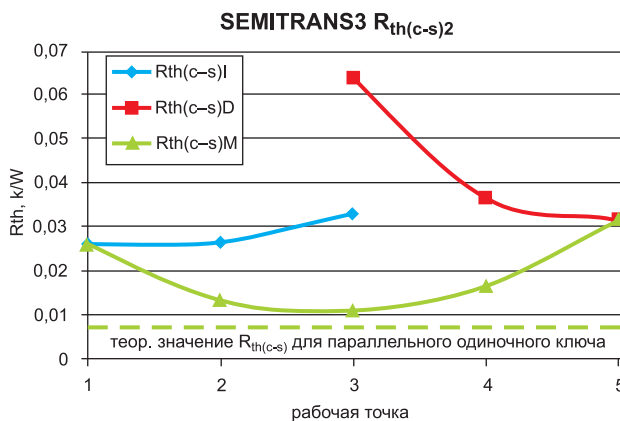
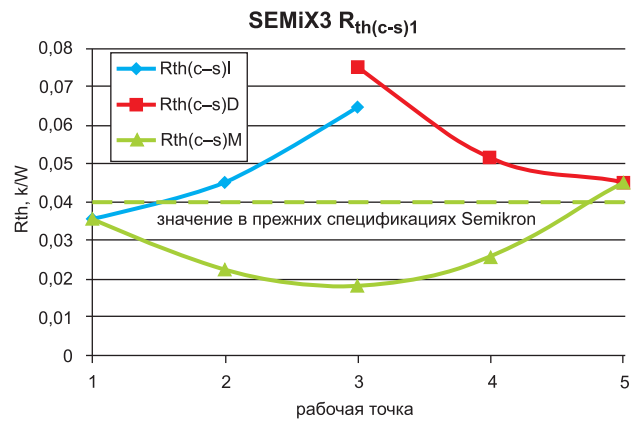
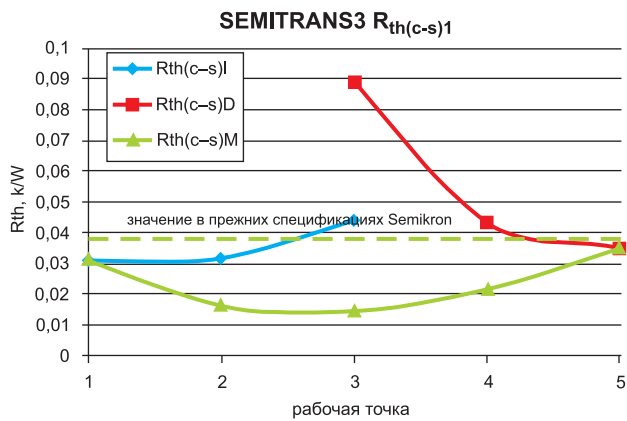
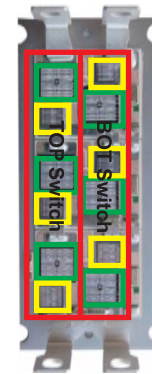
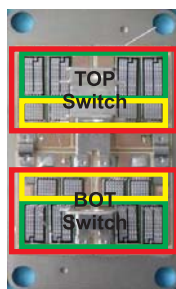


Рис. 7. Тепловое сопротивление  $R_{th(c-s)}$  450-А модуля SEMITRANS (слева) и SEMiX (справа) при различных уровнях тепловой связи между ключами (табл. 4)

внутри модуля. Рабочая точка OP3 отображает состояние при одинаковых удельных потерях на 1 мм<sup>2</sup> используемой площади кристалла. Однако в реальных условиях эксплуатации, в зависимости от коэффициента мощности, диапазона модуляции и рабочей частоты, доля потерь может варьироваться от 80% на IGBT (20% на диоде) до 40% на IGBT (60% на диоде). Данный эффект продемонстрирован на рис. 8. Наименьшее значение теплового сопротивления достигается, когда температура кристаллов IGBT и диода одинакова, что в данном примере соответствует распределению потерь 60% IGBT и 40% диод. Определение  $R_{th(c-s)M}$  в точке OP3 позволяет описать разность температур «корпус–радиатор» для широкого ряда типичных условий работы инвертора с ошибкой менее 10%.

**Определение  $R_{th(c-s)}$  без учета тепловой связи между ключами**

Если сопротивление  $R_{th(c-s)}$  нормируется отдельно для каждого ключа IGBT и FWD, то тепловой связью между ними можно пренебречь. Некоторые производители определяют теоретическое значение  $R_{th(c-s)M}$  модуля на основе виртуального параллельного соединения всех составляющих  $R_{th(c-s)}$ :

$$R_{th(c-s)M} = \left( \frac{n}{R_{th(c-s)I}} + \frac{n}{R_{th(c-s)D}} \right)^{-1}$$

где  $n$  — количество ключей в модуле.

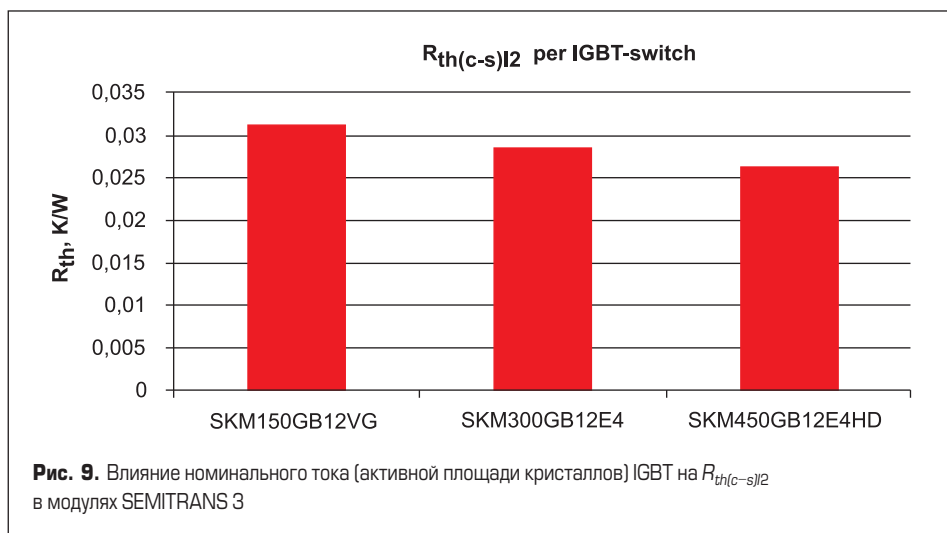
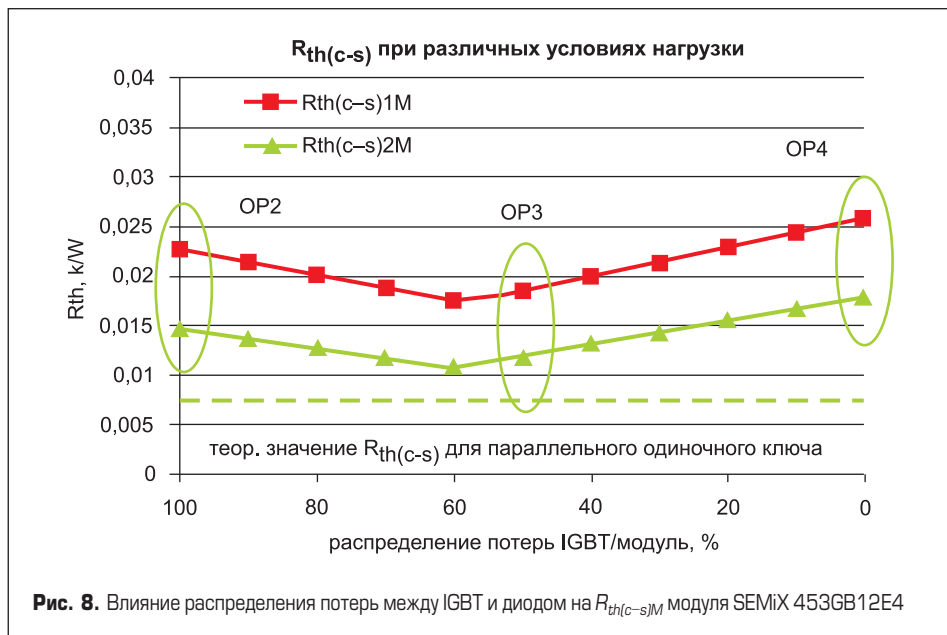
Эта величина может быть достигнута только в том случае, если расстояние между ключами в три-четыре раза превышает толщину соединительного слоя «кристалл–радиатор» (15–20 мм), т. е. гораздо больше, чем в существующих силовых модулях. Поэтому данное теоретическое значение на практике нереализуемо (см. пунктирную линию на рис. 7 и 8).

**Определение  $R_{th(c-s)}$  ключа в зависимости от размера кристалла**

Ранее SEMIKRON определял сопротивление  $R_{th(c-s)M1}$  для семейства модулей, имеющих одинаковый конструктив, независимо от номинального тока. Более детальное проектирование системы с учетом различных условий эксплуатации требует конкретизации теплового сопротивления для каждого ключа. Величина  $R_{th(c-s)X2}$  зависит от площади используемых в модуле чипов, в качестве примера на рис. 9 показаны значения  $R_{th}$  IGBT-ключей модулей SEMITRANS 3 с номинальным током 150–450 А.

**Влияние условий монтажа на  $R_{th(j-s)}$  и  $R_{th(c-s)}$**

Тепловые сопротивления «кристалл–радиатор» и «корпус–радиатор» зависят от особенностей сборки силового каскада, например моментов затяжки, эффективности радиатора, толщины слоя и теплопроводности терморасты (ТИМ). При определении



параметров модулей IGBT с базовой платой производители используют различные контрольные точки измерения температуры, материалы ТИМ с разной теплопроводностью, совершенно отличаются и подходы к нормированию  $R_{th(c-s)}$  с учетом или без учета тепловой связи ключей внутри модуля, как показано в таблице 5.

Величины тепловых сопротивлений  $R_{th(j-s)}$  и  $R_{th(c-s)}$  в технической документации SEMIKRON являются справедливыми только при соблюдении требований инструкции по монтажу IGBT в отношении моментов крепления, качества обработки радиатора, материала и толщины слоя ТИМ. Для достижения оптимальных тепловых

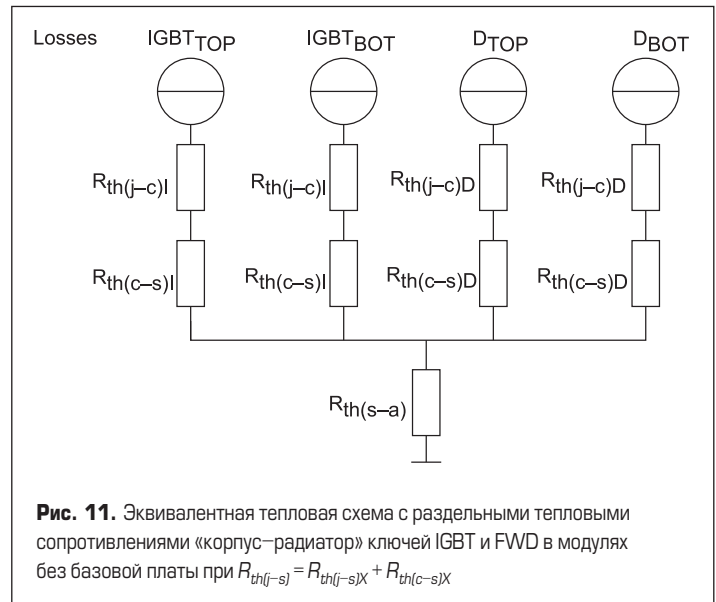
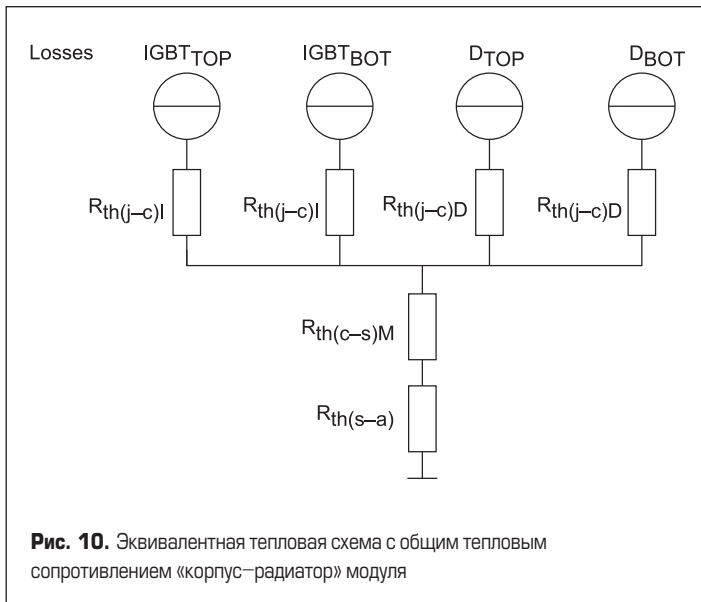
характеристик сборку «силовой модуль–радиатор» перед испытаниями необходимо подвергнуть воздействию трех температурных циклов. Измерения проводятся на теплостоеке с жидкостным охлаждением, при использовании менее эффективного воздушного радиатора значение  $R_{th(c-s)M}$  оказывается ниже из-за расширения области распространения тепла.

**Моделирование эквивалентной тепловой схемы**

Для моделирования параметров модулей без базовой платы определяются отдельные значения  $R_{th(j-s)X}$  на ключи IGBT или FWD. Такой

Таблица 5. Определение  $R_{th(c-s)}$  в документации разных производителей

Производитель	Теплопроводность ТИМ ( $\lambda$ ), Вт/(м·К)	Определение $R_{th(c-s)}$ на IGBT/FWD	Определение $R_{th(c-s)}$ на модуль	Учет тепловой связи ключей
SEMIKRON	0,81		X	Есть
Infineon	1,0	X		Нет
ABB	1,0	X		Нет
Mitsubishi	0,9/1,0		X	Есть
Fuji	Нет данных		X	Есть



**Рис. 11.** Эквивалентная тепловая схема с отдельными тепловыми сопротивлениями «корпус–радиатор» ключей IGBT и FWD в модулях без базовой платы при  $R_{th(j-s)} = R_{th(j-s)X} + R_{th(c-s)X}$

способ хорошо известен, проверен и не нуждается в корректировке. Тепловая связь внутри модуля низкая, поэтому ее влияние анализируется на уровне радиатора.

На сегодня широко используются два вида тепловых моделей:

1. определенное для ключа значение  $R_{th(j-c)X}$  + общее сопротивление модуля  $R_{th(c-s)M}$  (рис. 10);
2. определенное для ключа значение  $R_{th(j-c)X} + R_{th(c-s)X}$  (рис. 11).

Оба способа имеют свои преимущества и недостатки и работают только в определенных условиях. Трехмерные структуры преобразуются в одномерные модели, что неизбежно ведет к ошибкам при расчете температуры. Более точные результаты можно получить при использовании метода конечных элементов, который является наиболее предпочтительным.

Модель «а» включает в себя полную тепловую связь между всеми ключами, в то время как «б» полностью ее игнорирует. Если, например, используется общее значение  $R_{th(c-s)M}$  и потери равномерно распределены между чипами, то модель демонстрирует хорошее согласование с тепловыми режимами модуля. В случае очень несимметричной нагрузки, когда потери генерирует только один ключ, моделирование будет показывать низкую температуру при реалистичном значении  $R_{th(c-s)M}$ . Чтобы минимизировать эту ошибку, SEMIKRON в прошлом указывал максимальное сопротивление  $R_{th(c-s)M1}$ , которое почти совпадало со значением, определенным для одиночного ключа. Однако в этом случае более точным было бы использование параметра  $R_{th(c-s)X}$ .

С другой стороны, тепловое сопротивление одиночного ключа  $R_{th(c-s)X}$  не отражает влияние тепловой связи и дает слишком низкую расчетную температуру кристалла в случае, когда другие ключи также рассеивают мощность. Данный факт может стать критическим при определении предельного перегрева чипов, он же даст меньший перепад температуры при циклическом измене-

нии нагрузки. Это недопустимая ситуация, поскольку ошибка при определении градиента термоцикла не позволяет корректно провести расчет показателей надежности и срока службы инвертора в реальных условиях применения.

Чтобы сделать систему экономически эффективной, разработчик должен определить необходимый и достаточный «запас по надежности». Это требует тщательного моделирования режимов работы при различных условиях эксплуатации. Для упрощения данной задачи SEMIKRON изменил способ нормирования характеристик для новых модулей IGBT, выпускаемых с 2015 г. Специфические тепловые сопротивления  $R_{th(j-c)X}$  и  $R_{th(c-s)X}$ , определенные для ключей IGBT и FWD, могут быть использованы для одного цикла коммутации модуля. Дополнительно указывается сопротивление  $R_{th(c-s)M2}$ , учитывающее полную тепловую связь и необходимое для анализа работы инвертора с заданным распределением потерь между ключами внутри модуля. Для упрощения сопоставления параметров с модулями других производителей также определяются теоретические значения  $R_{th}$ . В любом случае наиболее корректные результаты дает программа теплового расчета SEMISEL, позволяющая рассчитать температуру перегрева кристаллов в реальных условиях эксплуатации и доступная на сайте компании.

**Действующие и будущие принципы нормирования  $R_{th}$  в документации SEMIKRON**

Информация о положении контрольных точек при нормировании тепловых сопротивлений различных групп модулей IGBT SEMIKRON включена в техническую документацию [5–10]. Размещение датчика  $T_s$  отличается для «безбазовых» модулей (метод 2,  $T_{s2}$ ) и стандартных компонентов с базовой платой (метод 1,  $T_{s1}$ : на поверхности радиатора, рядом с продольной стороной модуля, примерно на 1/3 ее длины от угла).

У мультичиповых ключей для расчета  $R_{th}$  используются средние значения температур  $T_j$ ,  $T_{cn}$  и  $T_{s2n}$ .

**Модули без базовой платы**

Положение датчика температуры радиатора, размещаемого в отверстии под кристаллами, не меняется. До начала измерения теплового сопротивления модуль подвергается воздействию трех термоциклов, что гарантирует хорошее распределение термопасты. Величина прямого падения напряжения, необходимая для расчета рассеиваемой мощности, измеряется как можно ближе к чипам у силовых выводов.

Сопротивление  $R_{th(j-c)}$  приводится для одного цикла коммутации.

Ранее измерялись параметры всех ключей в небольшом количестве модулей; наибольшее полученное значение использовалось в качестве типового с добавлением некоторого запаса.

Начиная с 2015 г. измеряются параметры всех ключей; определяется ключ с наибольшим значением  $R_{th(j-c)}$ , его параметры анализируются в большом количестве модулей. Средняя величина  $R_{th(j-s)}$  для данного «наихудшего случая» приводится в качестве типовой в технической спецификации.

**Модули с базовой платой**

Величина теплового сопротивления  $R_{th(j-c)}$  как и прежде, нормируется для одного ключа, рассеиваемая мощность измеряется на силовых терминалах. Для модулей с несколькими одинаковыми ключами (например, полумостовой IGBT) в спецификации указываются параметры ключа с самым высоким значением  $R_{th(j-c)}$ , эта величина рассматривается как максимальная на основе большего числа измерений.

Ранее сопротивление модуля  $R_{th(j-s)M}$  определялось по методу 1 (измерение температуры рядом с модулем) для наилучшего случая, соответствующего очень асимметричному рас-

пределению рассеиваемой мощности между ключами.

Начиная с 2015 г. тепловое сопротивление определяется по методу 2 (измерение температуры под модулем) для одиночного ключа  $R_{th(c-s)X}$  и дополнительно для модуля  $R_{th(c-s)M}$ . Эта величина учитывает влияние тепловой связи между ключами при типовом распределении рассеиваемой мощности. Для упрощения сопоставления параметров с модулями других производителей также дается теоретическое значение.

Новая методика описания тепловых свойств модулей имеет три основных преимущества:

- При измерении  $T_s$  в отверстиях под модулем снижается зависимость от условий охлаждения, конструкции радиатора и его материала.
- SEMIKRON использует одинаковую контрольную точку  $T_s$  для «базовых» и «безбазовых» модулей, что облегчает сравнение различных типов силовых ключей.
- Использование контрольной точки  $T_s$  под модулем является самым распространенным способом нормирования величины  $R_{th(c-s)}$  для большинства выпускаемых в мире модулей. Это облегчает сравнение компонентов, выпускаемых разными производителями. Кроме того, параметр  $R_{th(c-s)M}$  учитывает полную тепловую связь между ключами внутри модуля.
- Нормирование величины  $R_{th(c-s)}$  для IGBT- и FWD-ключа, а также для модуля позволяло выбирать наиболее подходящую модель

теплового сопротивления для различных условий эксплуатации.

Это дает возможность адаптировать характеристики радиатора с учетом контрольной точки измерения температуры  $T_s$ . Для модулей, тепловые параметры которых определяются по новой методике (в спецификации  $R_{th(c-s)}$  в графе «условия измерений» это отмечается фразой « $T_s$  from underneath»), сопротивление радиатора  $R_{th(s-a)}$  также должно нормироваться по контрольной точке  $T_{s2}$  (см. раздел «Определение теплового сопротивления»).

### Заключение

Грамотный анализ тепловых характеристик имеет решающее значение для обеспечения надежной и долговременной работы силового электронного преобразователя. Попытка сравнения параметров IGBT-модулей различных производителей только на основе технических спецификаций, без тщательного анализа условий измерения, почти всегда вводит в заблуждение. Без учета этих факторов невозможно корректно рассчитать важнейший для обеспечения надежности показатель — температуру перегрева кристаллов.

Только при использовании одинаковых контрольных точек  $T_c$  и  $T_s$ , идентичных условий измерения и методов нормирования параметров выбор и сравнение силовых модулей будет правильными. Поскольку условия охлаждения, конструкция радиатора, материал и метод нанесения термопасты и прочее у разных

производителей могут отличаться, рекомендуется, а в ряде случаев является необходимым проведение собственных измерений теплового сопротивления.

### Литература

1. AN1404, [www.semikron.com](http://www.semikron.com)
2. A. Wintrich, U. Nicolai, W. Tursky, T. Reimann. Application Manual Power Semiconductors // ISLE Verlag. 2011.
3. IEC Standard 60747-9 «Semiconductor Devices». Discrete Devices. Part 9: Insulated-gate bipolar transistors (IGBTs).
4. IEC Standard 60747-15 «Semiconductor Devices». Discrete Devices. Part 15: Isolated power semi-conductor devices.
5. SEMiX IGBT Modules & Bridge Rectifier Family. Technical Explanations. Version 3.0. October, 2009.
6. SEMITOP Technical Information. Version 2. January, 2008.
7. MiniSKiiP Generation II Technical Explanations. Version 3.3. August, 2012.
8. SKiM IGBT Modules Technical Explanations. Version 1.5. July, 2011.
9. SKiiP Technical Explanations. [www.semikron.com](http://www.semikron.com)
10. Technical Explanations SKiiP 4. Rev. 2.0. July, 2012.
11. А. Колпаков. Контрольная точка, или Как читать Datasheet между строк // Электронные Компоненты 2005. №6. 2006. № 9..