

Взаимосвязь разброса параметров силовых транзисторов

и температуры их полупроводниковой структуры

В статье рассмотрена зависимость температуры силовых транзисторов от их параметров. Приведены результаты измерения различных параметров у 50 случайно отобранных IGBT-транзисторов одной серии. По измеренным параметрам рассчитываются мощность потерь и температура полупроводниковой структуры транзистора для статического режима работы при постоянном токе, строятся гистограммы распределения параметров по группе испытываемых транзисторов. Делаются выводы о зависимости распределения температур силовых транзисторов от разброса их параметров.

**Вадим Бардин,
к. т. н., профессор**

Дмитрий Новиков

Любая, даже самая совершенная технология не обеспечивает полной идентичности характеристик изделий. В некоторых случаях и нет такой необходимости. Но по ряду изделий, к числу которых относятся силовые транзисторы, значительный разброс параметров может привести к существенному снижению показателей их надежности. Известно, что повышение температуры полупроводниковой структуры силовых приборов на каждые 20 °С снижает их надежность в два раза [1]. Поэтому при комплектовании транзисторных модулей преобразователей электрической энергии необходимо стремиться к обеспечению примерно равного теплового режима для всех транзисторов.

Критический параметр для транзисторов — предельно допустимая температура их полупроводниковых элементов, которая для большинства современных IGBT-транзисторов составляет 150 °С. Она зависит от параметров U_0 , R_d прямой вольт-амперной характеристики (ПВАХ) транзистора, величины тока нагрузки, теплового сопротивления прибора и температуры охладителя, на котором установлен транзистор. Зависимость записывается следующим образом:

$$T_j = T_c + P \times R_{jC}, \quad (1)$$

где T_j — температура структуры, °С; T_c — температура корпуса, °С; P — мощность потерь в транзисторе,

Вт; R_{jC} — тепловое сопротивление переход-корпус транзистора, °С/Вт.

Мощность потерь в транзисторе зависит от среднего значения протекающего тока и параметров ПВАХ транзистора:

$$P = U_0 \times I + P \times R_d, \quad (2)$$

где U_0 — пороговое напряжение выходной вольт-амперной характеристики; R_d — динамическое сопротивление.

Также мощность потерь определяют по формуле

$$P = I \times \Delta U_0, \quad (3)$$

где $\Delta U = U_0 + I \times R_d$.

Для того чтобы выяснить, насколько может быть велик разброс температур транзисторов одной партии в зависимости от различия их ПВАХ, был проведен эксперимент с партией из 50 IGBT-транзисторов IRG4PH50UD производства International Rectifier с номинальным напряжением 1200 В и током 45 А. Для каждого транзистора снимались вольт-амперные характеристики при 20 и 100 °С, напряжении $U_{3Э} = 14$ В. Данные обрабатывались с использованием математических программ [2].

Характерный вид этих зависимостей и построения для получения значений U_0 и R_d путем аппроксимации ПВАХ приведены на рис. 1. Из рис. 1 можно сделать вы-

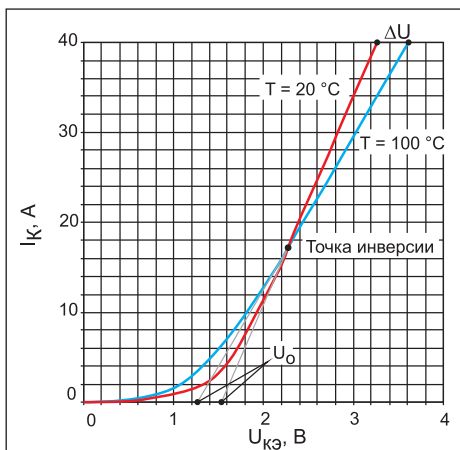


Рис. 1. Выходные вольт-амперные характеристики транзисторов IRG4PH50UD

вод, что характеристики при 20 и 100 °C заметно различаются. Видна точка инверсии, где температурный коэффициент напряжения изменяет знак с отрицательного на положительный.

На рис. 2 приведены гистограммы распределений измеренных параметров U_0 и R_d , ΔU и температурного коэффициента напряжения (ТКН). Из этих гистограмм видно, что их огибающая при увеличении количества измерений должна приближаться к функции нормального закона Гаусса. В таблице приведены математическое ожидание и дисперсия этих функций. Эти данные сами по себе еще не определяют степень нагрева транзисторов, они характеризуют лишь качество технологического процесса их изготовления. Чтобы определить температуру, необходимо знать мощность потерь в транзисторе при протекании заданного тока и тепловое сопротивление каждого транзистора [3].

Мощность потерь при токе $I_K = 30$ А была оценена по выражению (2). Для расчета разницы температур между полупроводниковой структурой и корпусом транзистора были измерены тепловые сопротивления каждого образца. Чтобы уменьшить погрешность оценки теплового сопротивления, измерения проводили по построенным для каждого прибора градуировочным зависимостям. Распределение тепловых сопротивлений переход-корпус R_{JC} показано на рис. 3.

На рис. 4 приведены расчетные гистограммы для мощности потерь и температуры перегрева полупроводниковой структуры относительно температуры корпуса. Математические ожидания этих величин и дисперсии:

- для мощности потерь P : $M[X] = 78,87$; $D[X] = 5,12$;
- для температуры структуры T : $M[X] = 43,42$; $D[X] = 6,5$.

Таблица. Приближенные количественные параметры функций: математическое ожидание и дисперсия

Параметр	U_0 , В (20 °C)	R_d , мОм (20 °C)	U_0 , В (100 °C)	R_d , мОм (100 °C)	ΔU , В	ТКН, мВ/°C	R_{JC} , °C/Вт
$M[X]$	1,406	41,5	1,216	50,5	0,202	-2,1	0,557
$D[X]$	0,0023	0,00188	0,001	0,0031	0,0045	$1,2 \cdot 10^{-4}$	0,0013

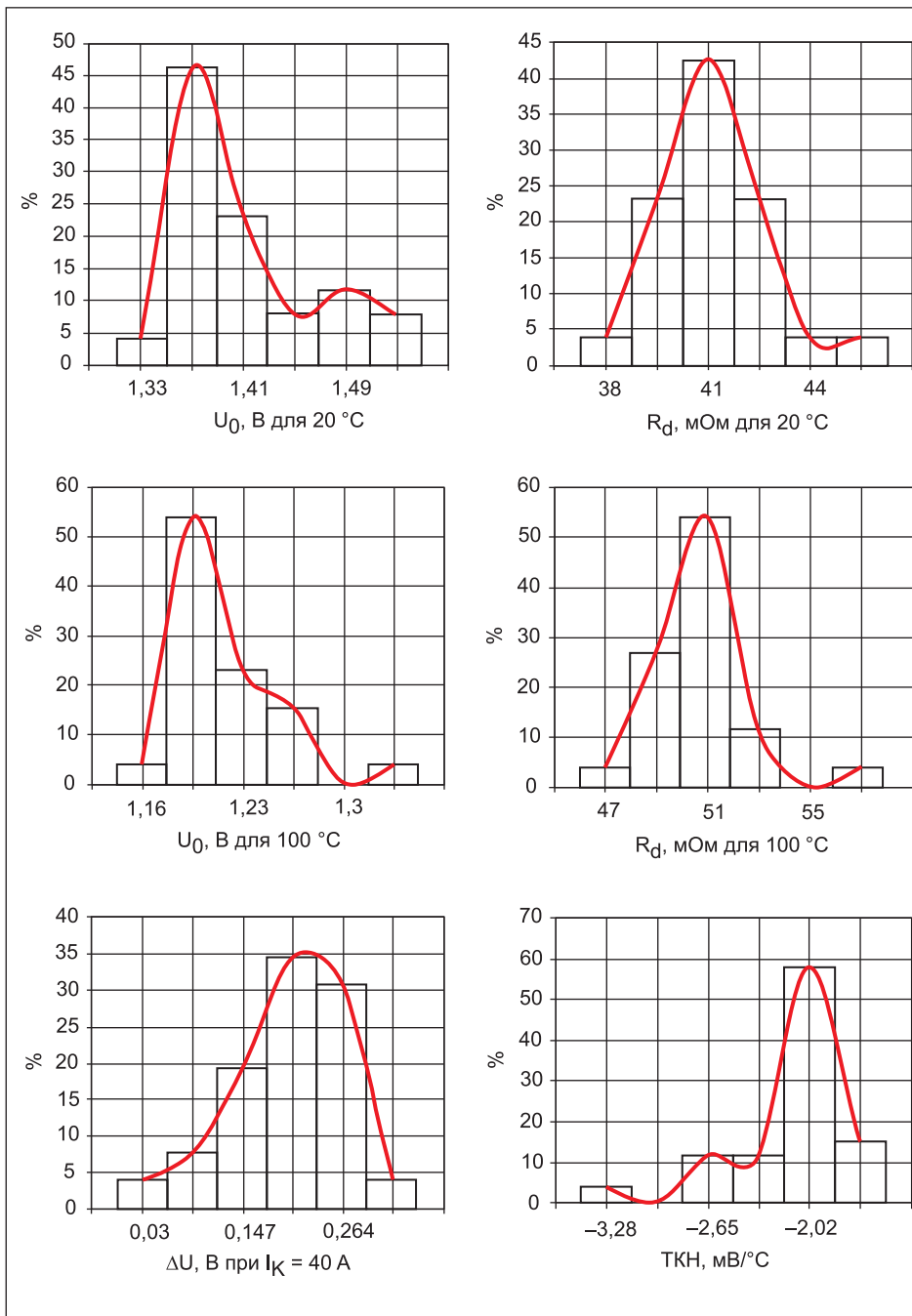


Рис. 2. Гистограммы распределения параметров транзисторов, измеренных по вольт-амперным характеристикам, и их огибающие

Из гистограмм следует, что разброс параметров транзисторов существенно влияет на температуру их полупроводниковой структуры. Даже при установке транзисторов на один теплоотвод и равенстве температур их корпусов разница температур полупроводниковых кристаллов может составлять более 10 °C. Поэтому при параллельном соединении транзисторов и их нагрузке током, близким к номинальному, часть приборов

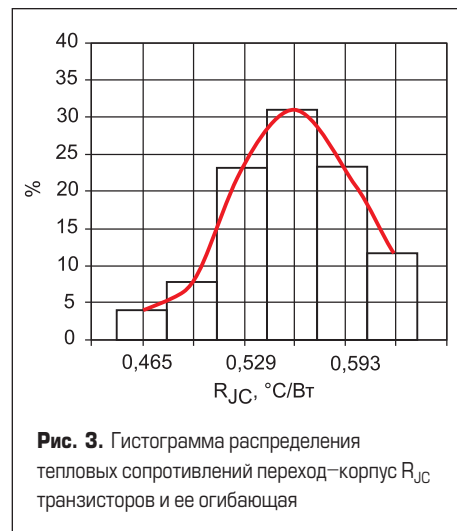


Рис. 3. Гистограмма распределения тепловых сопротивлений переход-корпус транзисторов и ее огибающая

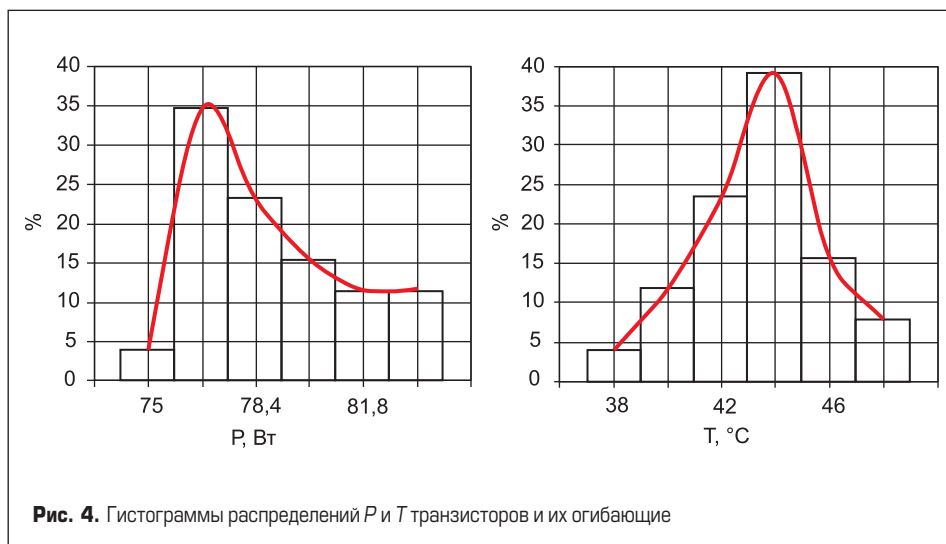


Рис. 4. Гистограммы распределений P и T транзисторов и их огибающие

могут оказаться перегретыми, что повышает вероятность их отказа. Высокая надежность при групповой работе транзисторов может быть обеспечена либо снижением их нагрузки, либо специальным подбором приборов по комбинации их параметров.

Литература

1. Колпаков А. И. Методы оценки надежности силовых модулей IGBT SEMIKRON в предельных режимах // Силавая электроника. 2004. № 1.
2. Егоров Н. М. Исследование параметров и характеристик полупроводниковых приборов с применением интернет-технологий / М.: ДМК-Пресс, 2008.
3. Колпаков А. И. Особенности теплового расчета импульсных силовых каскадов // Компоненты и технологии. 2002. № 1.