

# Циклонагрузочная способность IGBT-модулей ABB серии HiPak

В статье рассматриваются способы определения износостойкости IGBT-модулей ABB серии HiPak.

**Nando Kaminski**

nando.kaminski@abb.ch.com

**Алексей Чекмарев**

chekmarev@fmccrustel.ru

## 1. Введение

В эксплуатации полупроводниковые приборы подвергаются различным температурным изменениям. Некоторые из них вызваны работой самих приборов (потерями в проводящем состоянии и на переключения), а другие — внешними факторами, например, изменениями погоды или снижением уровня охлаждения приводов электроподвижного состава в тоннелях или на больших высотах над уровнем моря. Амплитуда температурных изменений может изменяться от долей градуса до 100 К и выше. Кроме этого, временной интервал этих изменений может меняться от нескольких микросекунд до месяцев. В принципе, количество изменений настолько вели-

ко, что двум модулям трудно оказаться под воздействием одинаковых комбинаций температурных изменений.

Каждое температурное изменение является стрессом для полупроводника, приводящим к тому, что припаянные проводники отслаиваются, чипы или субстраты расслаиваются, внутренние соединения разрываются, а корпус или основание трескаются и т. д. В любом случае прибор выйдет из строя. Для пользователя важно знать, когда это может произойти. К сожалению, на процесс износа оказывают влияние элементы случайности, возникающие вследствие небольших технологических отличий приборов, поэтому невозможно сказать точно, когда определенный прибор выйдет из строя. Таким образом, для одиноч-

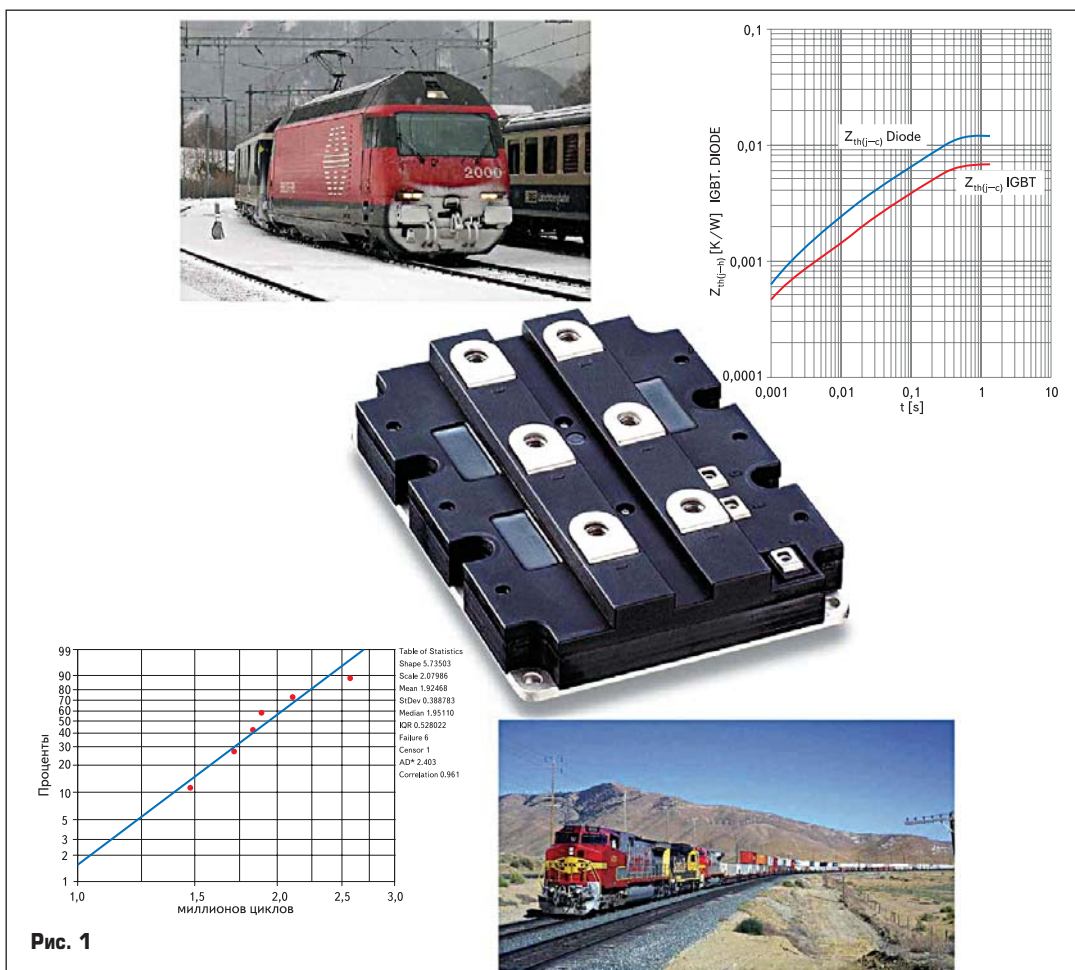


Рис. 1

ных приборов определяют вероятность повреждения, а для совокупности приборов — процент поврежденных приборов от общей численности.

## 2. Измерение циклонагрузочной способности

### 2.1. Концепция испытаний

Несмотря на то, что целью испытаний является определение общего срока службы модуля, который должен составлять десятки лет, их продолжительность не превышает нескольких месяцев, в противном случае полученная информация станет устаревшей и бесполезной. Кроме того, испытания дают достаточно обобщенную информацию, так как бессмысленно испытывать приборы для каждой сферы применения отдельно. Поэтому для определения циклонагрузочной способности модулей HiPak проводятся соответствующие ускоренные стандартизованные испытания.

Обычно проводится циклическое тестирование с постоянным температурным диапазоном. Это ограничивает число параметров до двух: температурный диапазон и абсолютная температура. Во время испытаний модули включаются и выключаются, отчего нагреваются и остывают таким образом, что их температура колеблется между двумя неизменными значениями. Ускорение испытаний достигается за счет увеличения температурного диапазона по сравнению со значениями в нормальной эксплуатации. Конечно, эта методика вносит ошибку при пересчете для нормальной эксплуатации (см. далее пп. 3.1 и 3.2), но это единственный способ получения актуальных результатов.

Нужно отметить, что конструкция модуля вносит определенные сложности при проведении вышеописанных испытаний. Фактически, во время эксплуатации температура полупроводниковых чипов значительно выше температуры основания. Поэтому, если модуль работает на высокой частоте, температурный диапазон основания может быть меньше, чем у полупроводниковых чипов. Это объясняется наличием теплового сопротивления между чипами и основанием. Вследствие наличия теплового сопротивления тепловой поток от чипа через основание к охлаждающему индуктору температурную разницу, что в свою очередь приводит к возникновению теплового емкостного фильтра на высоких частотах коммутаций. Поэтому испытания проводятся либо для оценки чипа, его пайки и проводников, либо для оценки основания, корпуса и пайки субстратов. Испытания для паяных проводников могут проводиться с импульсами длительностью 1 с ( $t_{on} + t_{off}$ ), в то время как основание модуля является термически более инертным и для него требуются импульсы около 1 мин. Кроме того, температура при короткоимпульсных испытаниях измеряется относительно перехода, в то время как температура длинноимпульсных испытаний измеряется относительно корпуса, то есть основания.

### 2.2. Анализ статистики повреждений. Распределение Вейбула

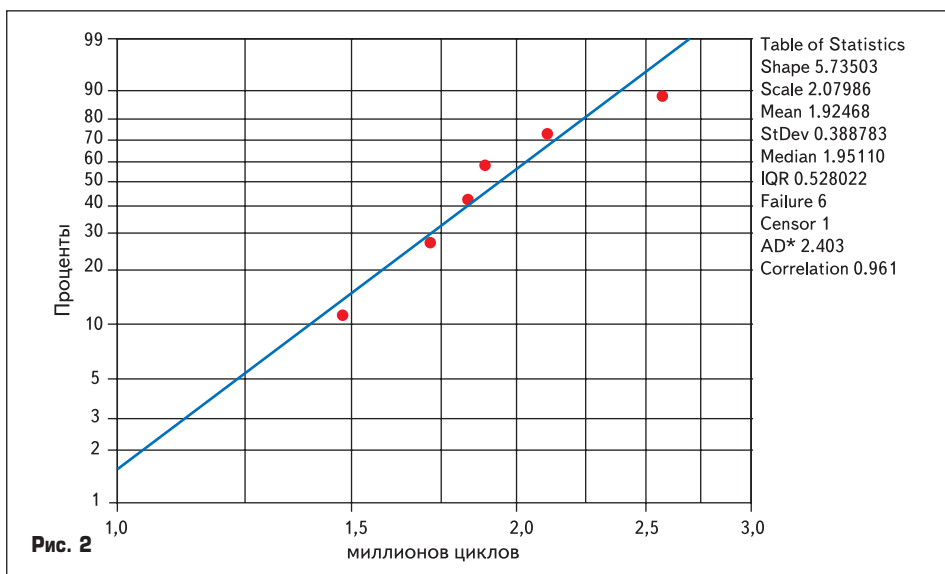


Рис. 2

Приборы, подвергнутые вышеописанным испытаниям, в конечном итоге станут выходить из строя. Прибор считается вышедшим из строя, если падение напряжения в проводящем состоянии во время тестов у него увеличивается более чем на 5%, его тепловое сопротивление увеличивается более чем на 20% или прибор больше не переключается соответствующим образом. Вследствие наличия небольших технологических разбросов некоторые модули выходят из строя быстрее, а другие остаются работоспособными несколько дольше. К сожалению, невозможно учесть некоторые различия между отдельными модулями и определить зависимость испытательного времени жизни отдельного модуля от его свойств. Единственное, что можно сделать — это статистически описать, как ведет себя семейство этих модулей, после чего уже делается прогноз по выходу из строя отдельного модуля.

Обычно износ полупроводниковых модулей может быть смоделирован с помощью распределения Вейбула (названо в честь шведского инженера Вейбула, открывшего это соотношение во время изучения износа металлов; опубликовано впервые в 1936 году). Вероятность повреждения по Вейбулу:

$$F(N) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{N}{N_c}\right)^\beta\right]$$

$F(N)$  может быть интерпретирована двумя способами: первый — это вероятность того, что отдельный прибор выйдет из строя раньше достижения  $N$  температурных циклов; второй — это процент от большого количества таких приборов, который выйдет из строя после  $N$  циклов. Два параметра распределения Вейбула являются характеристиками жизненного цикла:  $N_c$  (масштабный параметр) и наклон  $\beta$  (параметр формы). Чем выше  $N_c$ , тем позднее прибор начнет повреждаться, и чем выше  $\beta$ , тем короче время между двумя повреждениями с момента их начала. Поэтому предпочтительней иметь большее значение  $N_c$  и  $\beta$ .

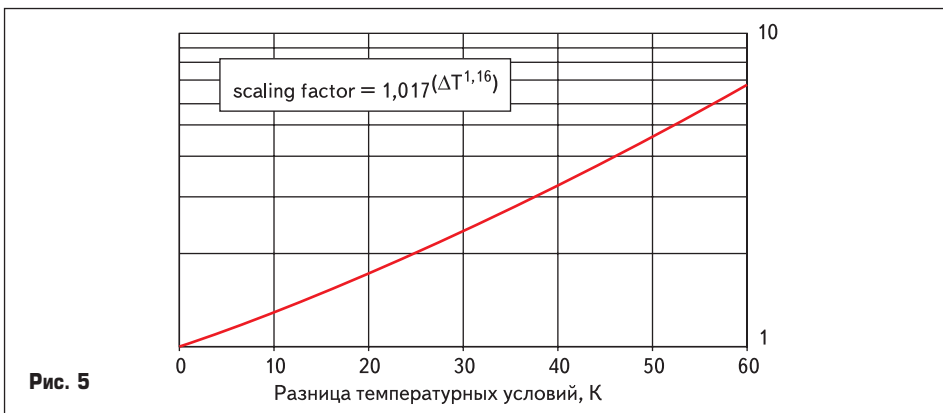
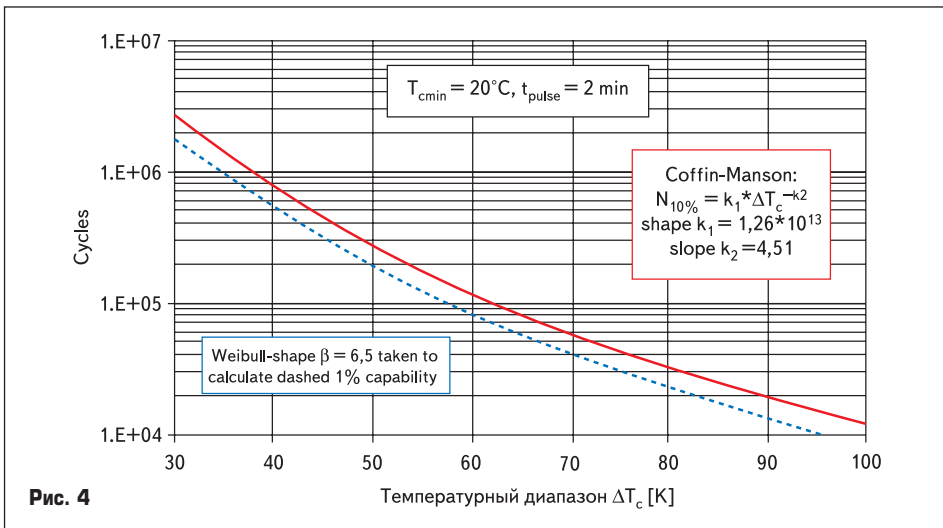
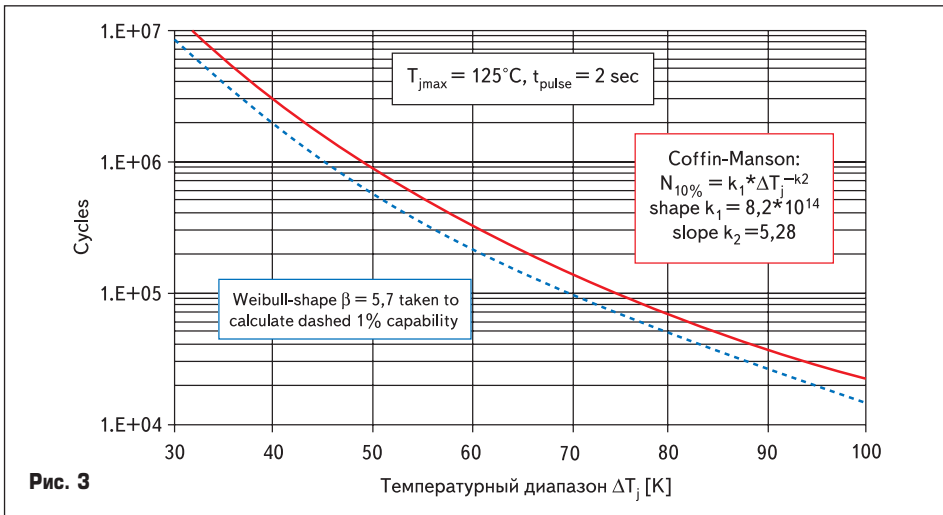
До повсеместного применения компьютеров для определения этих двух параметров на

основе измерений обычно использовалась специально масштабированная бумага, на которой кривая Вейбула проецировалась в виде прямой линии. Сегодня такое программное обеспечение, как Minitab, позволяет использовать распределение Вейбула для обработки экспериментальных данных методом наименьших квадратов. Пример такого графика Вейбула показан на рис. 2. На нем распечатаны повреждения (красные точки) при испытаниях, проводимых с субстратами модулей HiPak для определения долговечности паяных проводников. Как видно из таблицы статистики, параметр  $\beta$ , то есть наклон полученной прямой линии, имеет значение 5,7, а масштаб  $N_c$ , то есть положение линии по горизонтали, составляет примерно 2 млн циклов.

Полученная линия также позволяет увидеть или рассчитать циклонагрузочную способность испытываемых модулей. Типичное значение этой характеристики — это 10%-ная циклонагрузочная способность  $N_{10\%}$ , то есть число циклов, при котором выходит из строя 10% модулей. В нашем примере это значение — примерно 1,4 млн циклов. Конечно, другие значения циклонагрузочной способности, например 5% или даже 1%, будут также хорошо характеризовать модули, и иногда пользователи даже предпочитают именно эти значения, потому что они находятся ближе к ранним повреждениям в сложных преобразователях или совокупности преобразователей. Однако при тестировании 6 модулей, как это сделано на представленном графике, 1%-ная способность является экстраполяцией, и, таким образом, точность такого метода снижается по мере удаления от реальных эксплуатационных данных. Испытание большего количества приборов увеличит точность экстраполяции, но, в целом, это непрактично с точки зрения затрат. И, наконец, нужно четко понимать, что перенос данных испытаний на реальную эксплуатацию представляет собой еще один источник ошибки.

## 3. Расчет циклонагрузочной способности

К сожалению, одиночный тест полностью не характеризует циклонагрузочную способ-



ность модуля. Фактически существует сильная зависимость этой способности от температурного диапазона. Более широкий температурный диапазон приводит к уменьшению числа температурных циклов до повреждения прибора, поэтому эта зависимость должна быть также рассмотрена.

В дополнение к температурному диапазону, важную роль играют абсолютные значения температур. Замечено, что если абсолютные температуры ниже, то при данном температурном диапазоне повреждения наступают позднее.

### 3.1. Зависимость от температурного диапазона. Формула Коффина-Менсона

Обычно зависимость от температурного диапазона описывается законом Коффина-Менсона, который был сформулирован в 1954 году.

Число циклов  $N$  до определенного процента повреждений модулей может быть рассчитано исходя из температурного диапазона  $\Delta T$ :

$$N = k_1 \Delta T^{-k_2}$$

Два параметра характеризуют формулу Коффина-Менсона: коэффициент  $k_1$  (масштабный параметр) и степень  $k_2$  (параметр формы, который отвечает за интенсивность температурной зависимости). Оба параметра зависят от прибора и должны определяться на основании измерений. Очевидно, что результаты формулы Вейбула являются входными данными для идентификации параметров Коффина-Менсона, и должно быть проведено по крайней мере два циклонагрузочных испытания для различных значений

температурного диапазона. Важно убедиться в том, что механизм повреждений один и тот же для всех поврежденных приборов, так как разные механизмы повреждений могут иметь разные зависимости от температурных диапазонов. Использование кривой Коффина-Менсона для разных механизмов повреждений может привести к бессмысленным результатам.

Два графика, представленные на рис. 3–4, иллюстрируют циклонагрузочную способность модулей HiPak. Необходимо принять во внимание, что температурный диапазон  $\Delta T$  для коротких импульсов дается для условия измерений относительно температуры перехода, в то время как  $\Delta T_c$  для длинных импульсов дается для условия измерений относительно температуры корпуса.

График справедлив для HiPak-модулей ABB 5SNA 1800E170100, 5SNA 2400E170100, 5SNA 1200E250100 и 5SNA 1200E330100. Однако данные значения являются усредненными и могут значительно изменяться.

### 3.2. Зависимость от абсолютных температур

Для модулей температурный диапазон  $\Delta T = 50$  K в промежутке  $25\text{--}75^\circ\text{C}$  и  $75\text{--}125^\circ\text{C}$  оказывает различное действие. Наблюдения показывают, что если абсолютная температура выше, то это приводит к сокращению числа циклов до повреждения. Чтобы учесть этот эффект, должен быть введен масштабный, или корректирующий коэффициент. График, представленный на рис. 5, дает грубую оценку этого коэффициента, поскольку эффект пока еще продолжает тщательно исследоваться.

Входными данными для расчета масштабного коэффициента является разница между фактической температурой и температурой, необходимой для графика циклонагрузок ( $T_{jmax} = 125^\circ\text{C}$  и  $T_{cmin} = 20^\circ\text{C}$  соответственно). Так, например, если максимальная температура перехода  $110^\circ\text{C}$ , разница с требуемой температурой  $T_{jmax} = 125^\circ\text{C}$  составляет 15 K и масштабный коэффициент, получаемый по графику, приблизительно равен 1,5. Расчет этого коэффициента по формуле, представленной на графике, дает 1,48. Из-за того, что измеряемая температура ниже требуемой для измерений по графику, циклонагрузочная способность модуля выше (пропорционально коэффициенту). Если, например, измеренная температура  $140^\circ\text{C}$  (та же разница 15 K), циклонагрузочная способность будет меньше пропорционально коэффициенту 1,48.

### 3.3. Пример расчета

Примем, что HiPak-модуль подвергается действию температурных циклов. Измерения температуры основания (то есть температуры корпуса) показывает минимальное значение  $45^\circ\text{C}$ , а максимальное —  $95^\circ\text{C}$ , время цикла около 1 мин. Определим количество циклов для 10% вероятности повреждения этих модулей.

Очевидно, что импульсы длинные и  $\Delta T = 50$  K дается относительно корпуса. Таким образом, требования для графика длинного импульса выполняются, и 10%-ная циклонагрузочная способность может быть определена на уровне чуть менее 300 тыс. циклов. При использовании формулы, данной на графике, получаем:

$$N_{10\%, \Delta T=50 \text{ К}} = 1,26 \times 10^{13} 50^{-4,51} \approx 274 \text{ тыс. циклов.}$$

Однако график и формула используют минимальное значение температуры корпуса  $T_{\text{сmin}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ , а в примере  $T_{\text{сmin}} = 45 \text{ }^\circ\text{C}$ . Следовательно, необходимо откорректировать значения, полученные выше, с помощью масштабного коэффициента, описанного в п. 3.2. Разница минимальных температур составляет 25 К. Из графика масштабного коэффициента найдем его значение (примерно 2). Таким образом, 10%-ная циклонагрузочная способность составляет порядка 150 тыс. циклов. Используя формулу, получим:

$$\text{масшт. коэф.} = 1,017^{(25/16)} \approx 2,02.$$

Итак, 10%-ная циклонагрузочная способность составит 274 тыс. циклов/2,02  $\approx$  136 тыс. циклов (150 тыс. циклов было получено при помощи графика).

#### 4. Дополнительные замечания

##### 4.1. Комбинация различных температурных диапазонов

Как уже указывалось во введении, полупроводниковые приборы подвергаются разнообразным конфигурациям нагрузок и ни одна из них не гарантирует постоянного температурного диапазона. Поэтому число, полученное в разделе 3, может дать только грубую оценку циклонагрузочной способности в определенных индивидуальных условиях эксплуатации. Однако на основании данных

раздела 3 и конфигурации нагрузки вполне возможно улучшить качество оценки.

Основным предположением является то, что каждый температурный цикл отбирает определенную часть жизненного цикла модуля. Например, если 10%-ная циклонагрузочная способность модуля при  $\Delta T = 50 \text{ К}$  составляет 100 тыс. циклов, то каждый температурный цикл составляет 1/100 000 этого жизненного цикла. Таким образом, 50 тыс. циклов отберут только 50% жизненного цикла прибора. Если этот же модуль имеет 10%-ную способность 300 тыс. циклов при  $\Delta T = 40 \text{ К}$ , то один цикл отберет только 1/300 000 от жизненного цикла модуля, соответственно 50 тыс. циклов будут составлять только 16,7% жизненного цикла модуля. Очевидно, что сумма отбираемых жизненных циклов не может превысить 100%. Выраженное в виде формулы для 10%-ной циклонагрузочной способности, это условие выглядит следующим образом ( $n$  — число циклов для определенного температурного диапазона):

$$\frac{n_{\Delta T_1}}{N_{10\%, \Delta T=\Delta T_1}} + \frac{n_{\Delta T_2}}{N_{10\%, \Delta T=\Delta T_2}} + \dots \\ \dots + \frac{n_{\Delta T_x}}{N_{10\%, \Delta T=\Delta T_x}} < 100\%.$$

Для приведенного примера имеем:

$$\frac{n_{50 \text{ К}}}{N_{10\%, \Delta T=50 \text{ К}}} + \frac{n_{40 \text{ К}}}{N_{10\%, \Delta T=40 \text{ К}}} = \\ = \frac{50 \times 10^3 \text{ циклов}}{100 \times 10^3 \text{ циклов}} + \frac{50 \times 10^3 \text{ циклов}}{300 \times 10^3 \text{ циклов}} = \\ = 50\% + 16,7\% < 100\% \Rightarrow \text{О.к.}$$

Конечно, этот пример достаточно упрощен, но он иллюстрирует сам принцип. Можно улучшить качество этой оценки даже после суммирования отбора жизненного цикла всех возможных температурных диапазонов [1]. Однако определение таких тонкостей требует точных знаний о конфигурации нагрузки. Кроме того, расчет индивидуальных температурных диапазонов из конфигурации нагрузок — достаточно сложная процедура. Сложность в том, что нужно решить, как считать для ситуации, когда температура растет от 50  $^\circ\text{C}$  до 100  $^\circ\text{C}$  и потом снижается обратно до 70  $^\circ\text{C}$  до того, как начнет возрастать снова. Будет это диапазон  $\Delta T = 50 \text{ К}$ , или  $\Delta T = 30 \text{ К}$ , или какой-то еще? Наилучшим решением для этого является Модель Rainflow [2], которая идентифицирует гистерезис в процессе продолжительного роста и спада температуры. Помимо этого, как было показано в п. 3.2, абсолютные температуры играют важную роль и должны также приниматься во внимание.

Материал подготовлен с согласия компании ABB Switzerland Ltd Semiconductors.

#### Литература

1. Schlegel R., Herr E., Richter F. Reliability of non-hermetic pressure contact IGBT modules. Microelectronics Reliability. Vol. 41 (2001).
2. Johannesson F. Rainflow Analysis of Switching Markov Loads. PhD-thesis at the Lund Institute of Technology. Lund, Sweden. ISBN 91-628-3784-2. 1999. [www.maths.lth.se/matstat/staff/pj](http://www.maths.lth.se/matstat/staff/pj)