

# Воздействие космического излучения

## на интенсивность отказов IGBT

**Нандо Камински  
(Nando Kaminski),  
Томас Стясни  
(Thomas Stiasny)**  
Перевод:  
Инна Корзина

innak@fmccrustel.ru

**Алексей Чекмарев**

chekmarev@fmccrustel.ru

### Введение

В начале 1990-х годов был обнаружен новый источник повреждений мощных высоковольтных полупроводниковых элементов, который стал причиной достаточно большого количества отказов при эксплуатации оборудования. Этим источником оказалась космическая радиация, оказывающая влияние на все виды приборов: диоды, тиристоры, GTO, IGBT, IGBT и т. д. Действие космического излучения вызывает локальные нарушения полупроводниковой структуры, при этом положение участка повреждения носит случайный характер. Изменения в структуре не выявляются в течение нескольких наносекунд, на начальной стадии эксплуатации не наблюдается видимого повреждения полупроводника. Интенсивность отказов постоянна по времени, существенное влияние на нее оказывает приложенное напряжение, а зависимость от температуры практически отсутствует.

Испытания в немецкой соляной шахте, проведенные на глубине 140 м ниже уровня моря, вообще не показали таких повреждений, в то время как во время тестов в Швейцарских Альпах (3480 м над уровнем моря) количество отказов было намного выше, чем в лабораториях, расположенных близко к уровню моря. Подобный эффект вызывает также иррадиация тяжелыми частицами. На основе этих наблюдений был сделан вывод: космическое излучение является основной причиной отказов такого рода, что теперь подтверждается многочисленными экспериментами по всему миру.

В основном космическое излучение образуется частицами с высоким уровнем энергии, преимущественно протонами, которые существуют в космическом пространстве и пронизывают атмосферу. Они распространяются во всех направлениях и обладают достаточно высоким уровнем энергии. Большая часть излучения обязана своим происхождением сверхновым звездам. Изначально австрийский физик Виктор Гесс (нобелевский лауреат 1936 года) обнаружил данный эффект по ионизации, производимой в атмосфере. В действительности большая часть космического излучения обычно не достигает непосредственно поверхности Земли, однако его частицы сталкиваются с частицами атмосферы. В результате такого взаимодействия образуется множество других энергетически заряженных частиц, которые впоследствии сталкиваются с другими атмосферными частицами. Воздействие космического излучения на атмосферу и расщепление ее атомов на пионы, мюоны, нейтроны и т. п. вызывает так называемый космический дождь. Большинство генерируемых частиц безобидно для полупроводни-

ковых устройств, но некоторые, преимущественно нейтроны, могут быть опасны. В ряде случаев космическое излучение медленно выводит из строя полупроводники, не вызывая их ощутимых повреждений. Результатом этого являются случайные отказы приборов, происходящие несмотря на наличие быстродействующих предохранителей и других элементов защиты.

В настоящее время конструкция мощных высоковольтных полупроводников АВВ разрабатывается таким образом, чтобы уменьшить вероятность повреждения до допустимого уровня. Тем не менее, отказы, вызванные космическим излучением, необходимо учитывать при проектировании мощных электрических цепей. В частности, полупроводники, используемые на предельных рабочих напряжениях, а также применяемые в оборудовании, эксплуатируемом на больших высотах над уровнем моря, нужно выбирать более тщательно. Данная статья призвана оказать помощь при оценке интенсивности отказов, выборе полупроводниковых приборов и определении безопасных режимов их работы.

### Моделирование интенсивности отказов

Для обеспечения пользователей простым средством расчета частоты отказов создана математическая модель, которая охватывает три наиболее важных фактора: рабочее напряжение, температуру перехода и высоту над уровнем моря. Модель частоты отказов состоит из трех множителей:

1. Зависимость от постоянного напряжения ( $V_{DC}$  в вольтах,  $V_{DC} > C1$ ) при номинальных условиях, то есть при 25 °C на уровне моря.
2. Зависимость от температуры ( $T_{vj}$  в градусах Цельсия). Условие равно единице, если  $T_{vj}$  равно 25 °C.
3. Зависимость от высоты ( $h$  в метрах над уровнем моря). Условие равно единице, если  $h$  равняется 0, то есть уровню моря. Полностью формула выглядит так:

$$\lambda(V_{DC}, T_{vj}, h) = C_3 \times \underbrace{\exp\left(\frac{C_2}{C_1 - V_{DC}}\right)}_1 \times \underbrace{\exp\left(\frac{25 - T_{vj}}{47,6}\right)}_2 \times \underbrace{\exp\left(\frac{1 - \left(1 - \frac{h}{44\,300}\right)^{5,26}}{0,143}\right)}_3$$

Множители 2 и 3 равняются единице при нормальных условиях (25 °С, высота уровня моря соответственно), при определенных условиях формула может быть упрощена. Если, например, преобразователь работает только на высоте уровня моря, множителем 3 можно пренебречь. Выражение справедливо при работе на постоянном напряжении питания; изменяющееся рабочее напряжение, вид циклограммы и всплески перенапряжений при коммутациях должны быть учтены в соответствии с п. 4.1. Модель позволяет рассчитать интенсивность отказов в FIT (количество за 1 млрд часов наработки). Формула действительна, если напряжение звена постоянного тока  $V_{DC}$  превышает величину  $S1$ . Для значений  $V_{DC}$  ниже  $S1$  значение частоты отказов считается равным нулю. Модель описывает только отказы, вызванные космическим излучением, и не распространяется на повреждения, происходящие по другим причинам.

**Зависимость от напряжения**

Формула зависимости от напряжения (множитель 1) хорошо подходит для использования величин, измеренных при постоянном напря-

жении питания. Выражение не имеет физического смысла, но позволяет вычислять данные с высокой степенью точности. Параметры модели  $S1$ ,  $S2$  и  $S3$ , таким образом, являются характеристическими величинами для отдельных приборов, и их можно найти в таблице.

**Температурная зависимость**

В формуле для оценки температурной зависимости (множитель 2) также можно использовать измеренные данные. Однако эксперименты показывают, что интенсивность отказов уменьшается экспоненциально от температуры, и что эта зависимость практически не зависит от типа прибора, поэтому формула не содержит каких-либо параметров полупроводника.

**Зависимость от высоты**

Выражение зависимости от высоты над уровнем моря (множитель 3) учитывает фильтрацию космического излучения атмосферой и, таким образом, основывается на барометрической формуле. Это означает, что на все приборы оказывается одинаковое влияние, по-

этому данное соотношение также не содержит специфических параметров прибора.

**Интенсивность отказов отдельных типов IGCT**

В таблице даны параметры различных типов силовых ключей IGCT (Insulated Gate Controlled Thyristor). Космическое излучение, вызывающее отказы драйверов, не учитывается, однако предполагается, что в типовых условиях применения им можно пренебречь. Измерения космического излучения были сделаны на самом маленьком приборе (корпус D) на уровне кристалла. Параметры модели были оптимизированы для получения значения частоты отказов, масштабированного для IGCT больших размеров. Все значения являются номинальными и могут варьироваться в широком диапазоне.

**Примеры расчета**

Пример дается для IGCT с рабочим напряжением 4,5 кВ в корпусе L (5SHY 35L4510), используемым в звене постоянного тока 3400 В при

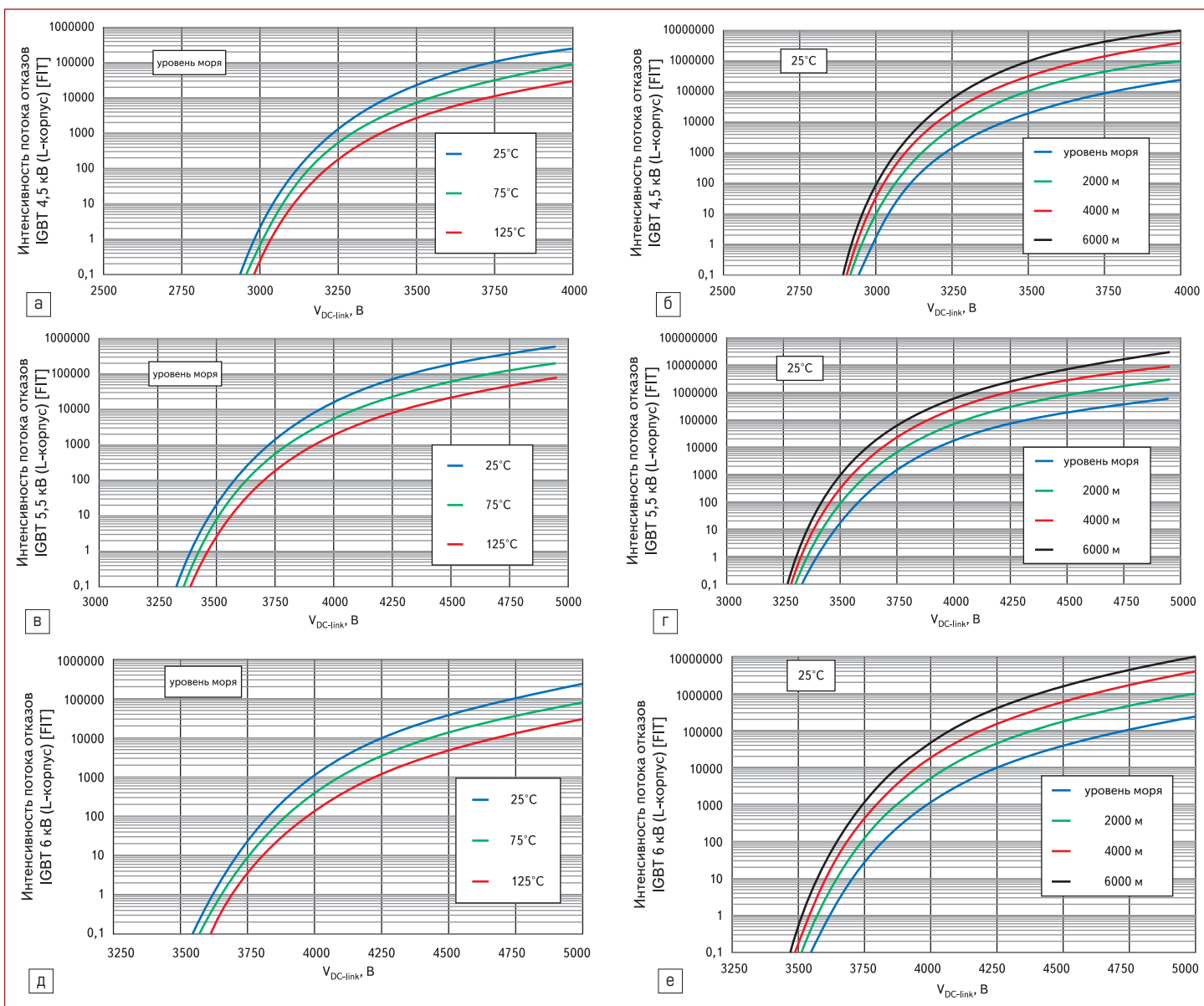


Рис. Интенсивность отказов в функции приложенного постоянного напряжения для IGCT: 5SHY 35L45xx и 5SHX26L4510 (а, б); 5SHX19L6010 (в, г); 5SHY30L60xx (д, е)

Таблица

| Модель                                 | C1, В | C2, В  | C3, FIT  |
|--|-------|--------|----------|
| 5SHX 04D4502                           | 2650  | 5500   | 2,28E+06 |
| 5SHX 08F4510                           | 2650  | 5500   | 4,22E+06 |
| 5SHX 14H4510                           | 2650  | 5500   | 7,66E+06 |
| 5SHX 26L4510 5SHY 35L45xx 5SHY 55L4500 | 2650  | 5500   | 1,39E+07 |
| 5SHX 03D6004                           | 2900  | 8700   | 6,88E+06 |
| 5SHX 06F6010                           | 2900  | 8700   | 1,27E+07 |
| 5SHX 10H6010                           | 2900  | 8700   | 2,31E+07 |
| 5SHX 19L6010                           | 2900  | 8700   | 4,21E+07 |
| 5SHY 30L60xx                           | 3050  | 9900   | 3,66E+07 |
| 5SHY 42L65xx                           | 3100  | 16 800 | 8,52E+07 |

температуре 0 °С на высоте уровня моря. Так как высота равняется номинальному значению, то последним множителем можно пренебречь. После подстановки соответствующих значений из приведенной таблицы формула приобретает следующий вид:

$$\lambda(3400 \text{ В}, 0 \text{ }^\circ\text{C}, 0_m) = 1,39 \times 10^7 \text{ FIT} \times \exp\left(\frac{5500}{2650 - 3400}\right) \times \exp\left(\frac{25 - 0}{47,6}\right) \approx 15400 \text{ FIT}$$

Интенсивность отказов 15 400 FIT означает 15 400 отказов за 10 млрд часов наработки, что соответствует наработке на отказ МТТФ = 1/l = 65 000 ч, то есть 7,4 г. Поскольку на вы-

ходе преобразователя стоят шесть IGCT, МТТФ уменьшается до 1,2 г, то есть надежность изделия невысока. Очевидно, что заданное напряжение звена постоянного тока слишком велико.

Рассмотрим тот же модуль IGCT (4,5 кВ в корпусе L — 5SHY 35L4510), работающий со звеном постоянного тока при напряжении 2800 В, температуре 25 °С на высоте 6000 м. Так как температура имеет номинальное значение, то множителем 2 в этом случае можно пренебречь. Подставив параметры из таблицы, получим:

$$\lambda(2900 \text{ В}, 25 \text{ }^\circ\text{C}, 6000_m) = 1,39 \times 10^7 \text{ FIT} \times \exp\left(\frac{5500}{2650 - 2900}\right) \times \exp\left(\frac{1 - \left(1 - \frac{6000}{44\,300}\right)^{5,26}}{0,143}\right) \approx 0,16$$

В этом примере наработка на отказ получается равной  $6,1 \times 10^9$  ч или 700 000 лет. Даже если схема содержит несколько приборов, на общую надежность не будут влиять повреждения, вызванные космическим излучением. Тем не менее, благодаря статистической природе этого эффекта, подобные отказы все же могут происходить. Более того, принятое допущение, что постоянное напряжение является константой, не соответствует действительности в реальных условиях эксплуатации. Изменение напряжения звена постоянного тока из-за, например, разброса входного напряжения или

специфических режимов работы (отключение) также необходимо учитывать. Еще более важное воздействие на показатели надежности оказывают коммутационные перенапряжения, этот вопрос более детально рассмотрен в п. 4. Графики по результатам испытаний семейства IGCT ABB приведены на рисунке.

### Дополнительные замечания

#### Разброс напряжений

Рассмотрим, к примеру, преобразователь, работающий со звеном постоянного тока с напряжением 2800 В. Из-за коммутационных перенапряжений прибор подвергается перенапряжению на уровне 3500 В в течение 0,3% от общего времени работы (что в основном определяется параметрами снабберной цепи). Преобразователь построен на IGCT с напряжением 4,5 кВ в корпусе L (5SHY 35L4510) и эксплуатируется при температуре 60 °С на уровне моря. Если один из IGCT 50% времени находится в проводящем состоянии (в течение проводящего состояния отказы из-за воздействия космического излучения невозможны из-за низкого приложенного напряжения), то формула для этого прибора выглядит следующим образом:

$$49,7\% \times \lambda(2800 \text{ В}, 60 \text{ }^\circ\text{C}) + 0,3\% \times \lambda(3500 \text{ В}, 60 \text{ }^\circ\text{C}) \approx 49,7\% \times 0 \text{ FIT} + 0,3\% \times 10\,300 \text{ FIT} \approx 0 \text{ FIT} + 31 \text{ FIT} \approx 31 \text{ FIT}$$

Это означает, что интенсивность отказов от воздействия космического излучения в большинстве своем определяется перенапряжением при коммутациях.