

# О климатике, механике, космическом излучении

## и прочих полезных вещах

**Предлагаемая вашему вниманию статья посвящена классификации и описанию условий эксплуатации изделий силовой электроники, изложенных в стандартах EN 50178, EN 60721 (IEC 721-3), включая разделы EN 60721-3-1 (хранение), EN 60721-3-2 (транспортирование) и EN 60721-3-3 (использование в местах, защищенных от внешних воздействий).**

**Арендт Винтрих  
(Arendt Wintrich)**

**Ульрих Николаи  
(Ulrich Nicolai)**

**Вернер Турски  
(Werner Tursky)**

**Тобиас Рейман  
(Tobias Reimann)**

**Перевод и комментарии:  
Андрей Колпаков**

Andrey.Kolpakov@semikron.com

Как можно видеть на рис. 1, электронные устройства подвергаются различным типам воздействий окружающей среды, изложенным в EN 60721, которые должны быть учтены при проектировании преобразовательных устройств. Особое внимание при этом следует обращать на выбор полупроводниковых элементов, системы охлаждения и технологии сборки. Готовое изделие должно не только обеспечивать заданные технические параметры в определенных режимах эксплуатации, но и соответствовать условиям хранения и транспортирования, которые могут быть даже более жесткими, чем рабочие. При этом следует учитывать все особенности силовых ключей, например способность геля, заполняющего корпус полупроводниковых модулей, адсорбировать влагу.

В соответствии со стандартом 60721-3 условия эксплуатации определяются классификационным кодом в формате nAxY:

- Первая цифра (n) задает область воздействий, уточняемых последующими частями кода: 1 — хранение, 2 — транспортирование, 3 — эксплуатация.
- Большая буква (A) соответствует типу воздействия окружающей среды: К — климатические, М — механические, В — биологические, С — химически активные субстанции, S — механически активные субстанции, Z — другие климатические условия.

- Третья часть кода (x) определяет пределы воздействий, относящихся к конкретному типу (A): x — нумерация по возрастанию степени жесткости.
- Y — дополнительная спецификация.

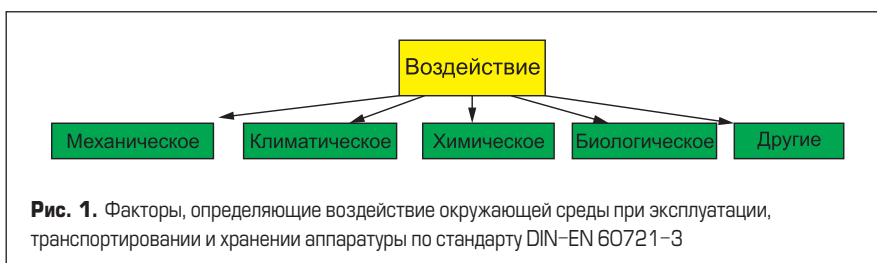
В большинстве случаев более высокий класс воздействия включает требования, действующие для низших классов. Необходимо также принять во внимание условия монтажа, обслуживания и ремонта, поскольку они отличаются от условий хранения и эксплуатации. Семь комбинаций указанных типов воздействий (обозначенных IExx) определены в упомянутом выше стандарте EN, дающем подробное описание 4 типовых условий окружающей среды с примерами.

Соответствие требованиям по стойкости к внешним воздействиям подтверждается тестами образцов в определенных условиях, создаваемых испытательной аппаратурой. Правила проведения подобных процедур оговорены в стандартах IEC 60068-x-x и IEC 60749. Для выбора нужной методики испытаний и уровня воздействия можно использовать документ «Guide on the correlation and transformation of environmental condition classes of IEC 60721-x to the environmental tests of IEC 60068» (проект стандарта DIN 40046-721-x, отдельные документы по условиям хранения (-1), транспортирования (-2), эксплуатации в защищенных условиях (-3) и т. д.).

В последующих разделах дана общая характеристика наиболее важных классов воздействий с примерами условий эксплуатации электронной аппаратуры в защищенных пространствах по стандарту EN 60712-3-3. Более подробную информацию по предельным режимам можно найти в EN 60721-3-3.

### Климатика

К климатическим воздействиям относятся температура, абсолютная и относительная влажность, конденсация, скорость изменения температуры, давле-



**Рис. 1.** Факторы, определяющие воздействие окружающей среды при эксплуатации, транспортировании и хранении аппаратуры по стандарту DIN-EN 60721-3

ние, солнечное и тепловое излучение, движение воздуха, дождь с ветром, вода (исключая осадки) и образование льда. Климатические условия эксплуатации классифицируются с помощью 11 категорий, обозначаемых кодами 3К1...3К11, которые сортируются по степени воздействия в порядке возрастания:

- 3К1 — полностью кондиционированное помещение с постоянной влажностью и регулируемой температурой;
- 3К2 — закрытое помещение с постоянной регулируемой температурой, нерегулируемой влажностью, конденсация исключена;
- 3К3 — закрытое помещение с регулируемой температурой, нерегулируемой влажностью, конденсация исключена;
- 3К4 — закрытое помещение с регулируемой температурой и широким диапазоном изменения относительной влажности (нерегулируемой). Аппаратура должна работать при наличии конденсации и воды (осадки исключены);
- 3К5 — закрытое помещение с нерегулируемой температурой и влажностью. Отопление может использоваться, если климатические режимы для данного класса сильно отличаются от условий вне помещения. Аппаратура должна работать в условиях обледенения;
- 3К6, 3К7, 3К8 — помещения, защищенные от воздействия окружающей среды, но контактирующие с ней, то есть частично открытые.

Изделия (кроме класса 3К7L) могут работать в условиях солнечной радиации различной интенсивности, при этом воздействие носимых ветром осадков (включая снегопад) допустимо в определенных пределах. Классы (кроме 3К1) коррелированы с климатическими условиями вне помещений по стандарту EN 60721-3-1:

- предельно холодный климат (кроме Антарктики);
- холодный климат;
- умеренный климат;
- умеренно сухой климат;
- сухой и жаркий климат;
- предельно сухой и жаркий климат;
- влажно-жаркий климат;
- умеренно влажно-жаркий климат.

Климатические классы, относящиеся к условиям работы «вне помещений», а также различным эксплуатационным режимам, определяются с помощью приложения «А» и климатограмм, приведенных в стандарте EN 60721-3-3.

**Механика**

На рис. 2 показаны основные виды механических воздействий по стандарту EN 60721-3-3.

Условия эксплуатации в отношении механических нагрузок задаются предельными уровнями следующих видов воздействий:

- вибрация: смещение или амплитуда и частотный диапазон синусоидальной вибрации, спектральная плотность ускорения, частотный диапазон вибрационных шумов;

- удар: общий спектр ударного отклика, пиковое ускорение, длительность и направленные воздействия, количество ударов по каждой оси.

Механические воздействия классифицируются с помощью 8 категорий, которые сортируются по степени воздействия в порядке возрастания:

- 3М1 — зоны, не подвергаемые воздействию вибраций и ударов;
- 3М2 — зоны с незначительным уровнем вибраций;
- 3М3 — зоны с незначительным уровнем вибраций, но с риском низкоэнергетических ударов, вызванных, например, удаленными взрывами или проведением сваебойных работ;
- 3М4 — зоны со значительным уровнем вибраций и ударов, возникающих, например, при проведении ремонтных работ или движении транспорта;
- 3М5 — зоны со значительным уровнем высокоэнергетических вибраций и ударов, возникающих, например, при работе тяжелых станков, конвейеров;
- 3М6 — зоны со значительным уровнем вибраций и высокоэнергетических ударов, например расположенные рядом с тяжелыми станками;
- 3М7 — зоны с очень высоким уровнем вибраций и высокоэнергетических ударов, например имеющие непосредственную связь с тяжелыми станками;
- 3М8 — зоны с предельно высоким уровнем вибраций и высокоэнергетических ударов, например непосредственно связанные с молотковыми дробилками.

В дополнение к уровню вибрации и энергии удара определение соответствующего класса механического воздействия зависит от типа электронного устройства и способа его крепления (жесткое, гибкое, на амортизаторах). Выбор класса может проводиться на основе максимальных уровней воздействия, приведенных в приложении «А» стандарта EN 60721-3-3.

**Биологические воздействия**

Биологическая активность окружающей среды классифицируется с помощью 3 категорий, которые сортируются в порядке возрастания по опасности загрязнения плесневыми

грибками, наличием грызунов или паразитических организмов:

- 3В1 — зоны, не подвергаемые явному вредному биологическому воздействию;
- 3В2 — зоны, подверженные риску образования плесени и заражения паразитами от животных (кроме термитов);
- 3В3 — зоны, подверженные риску образования плесени и заражения паразитами от животных, включая термитов.

Выбор подходящего класса биологического воздействия может проводиться на основе максимальных величин, приведенных в приложении «А» стандарта EN 60721-3-3.

**Химические воздействия**

Влияние химически активных субстанций, таких как морская и дорожная соль, двуокись серы, сероводород, хлор, хлористый водород, фторид водорода, аммиак, озон и азотистые газы, классифицируется с помощью 6 категорий, которые сортируются по степени воздействия в порядке возрастания:

- 3С1R — зоны с полным атмосферным контролем и мониторингом состояния (категория «чистое помещение»);
- 3С1L — зоны с постоянным атмосферным контролем;
- 3С1 — зоны с невысоким уровнем промышленности и умеренной плотностью движения транспорта; зимой повышается риск загрязнения воздуха в более населенных местах из-за включения отопления; в прибрежных районах и негерметичных помещениях на море есть риск проникновения соляного тумана;
- 3С2 — зоны с уровнем загрязнения, типичным для населенных промышленных районов с интенсивным движением транспорта;
- 3С3 — зоны, находящиеся в непосредственной близости от предприятий химической промышленности;
- 3С4 — зоны на территории предприятий с высокой концентрацией химических загрязнений.

Настоящий стандарт не учитывает химически активные жидкости и твердые вещества. Выбор подходящего класса химического воздействия может проводиться на основе максимальных величин, приведенных в приложении «А» стандарта EN 60721-3-3.

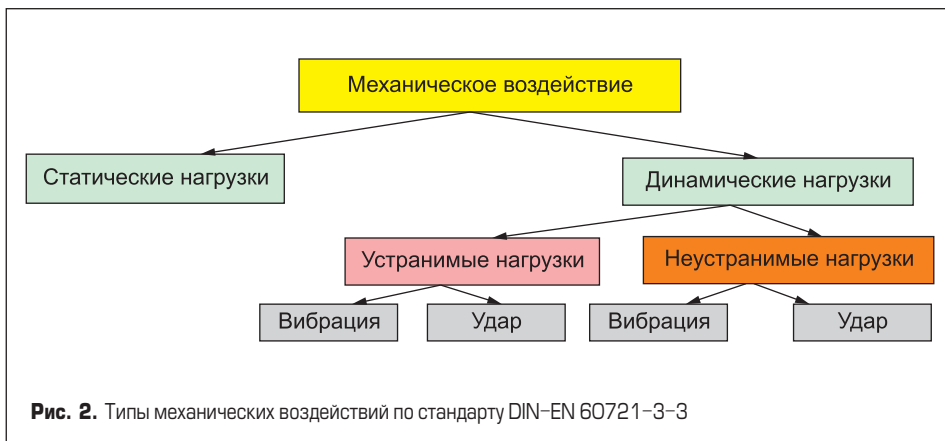


Рис. 2. Типы механических воздействий по стандарту DIN-EN 60721-3-3

**Механически активные субстанции**

Влияние механически активных субстанций, например частиц песка или пыли в воздухе, а также осадков классифицируется с помощью 4 категорий, которые сортируются по степени воздействия в порядке возрастания:

- 3S1 — зоны с минимальной запыленностью, проникновение песка исключено;
- 3S2 — зоны, в которых не принимается специальных мер по снижению запыленности, но отсутствуют близкорасположенные источники пыли;
- 3S3 — зоны, в которых не принимается специальных мер по снижению запыленности, но находящиеся вблизи источников пыли;
- 3S4 — зоны, подверженные запылению из-за наличия соответствующих технологических процессов, или расположенные в географических регионах с высокой концентрацией песка или пыли в воздухе.

Выбор подходящего класса воздействия может проводиться на основе максимальных величин, приведенных в приложении «А» стандарта EN 60721-3-3.

**Высота над уровнем моря**

В зависимости от типа и назначения электронных устройств, при их эксплуатации на высоте 2000 м и более над уровнем моря в некоторых случаях необходимо ограничивать предельные рабочие режимы:

- выходную мощность или максимальную рабочую температуру системы с воздушным охлаждением — из-за снижения плотности воздуха и атмосферного давления;
- напряжение изоляции — из-за снижения диэлектрической прочности воздуха (пропорционально уменьшению атмосферного давления).

Большинство силовых модулей SEMIKRON удовлетворяет условиям стандарта EN 50178, определяющего требования по длине пути тока утечки. Однако при установке оборудования на высоте более 2000 м над уровнем моря эти требования ужесточаются. Длина пути тока утечки должна увеличиваться в соответствии с коэффициентами, приведенными в таблице 1.

**Космическая радиация и интенсивность отказов**

Космическая радиация образуется частицами высокой энергии, проникающими в воздушное пространство из открытого космоса. Первичное

**Таблица 1.** Корректирующие коэффициенты для изоляционных расстояний (стандарт IEC 60664-1, A2)

Высота над уровнем моря, м	Барометрическое давление, кПа	Коэффициент коррекции
2000	82	1,00
2500	76	1,075
3000	70	1,14
4000	62	1,29
5000	50	1,48

излучение, создаваемое Солнцем и сверхновыми звездами, состоит в основном из электронов и ионизированных атомов. Внешние слои атмосферы подвергаются воздействию примерно 1000 частиц/м<sup>2</sup> в секунду, однако только очень малая их доля достигает поверхности Земли. Основное количество сталкивается с молекулами атмосферных газов (O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>), получающиеся вследствие этого вторичные частицы снова соударяются с газовыми молекулами, что приводит к их дезинтеграции и образованию огромного количества микрочастиц (пионов, мюонов и нейтронов), создающих так называемые космические ливни (рис. 3).

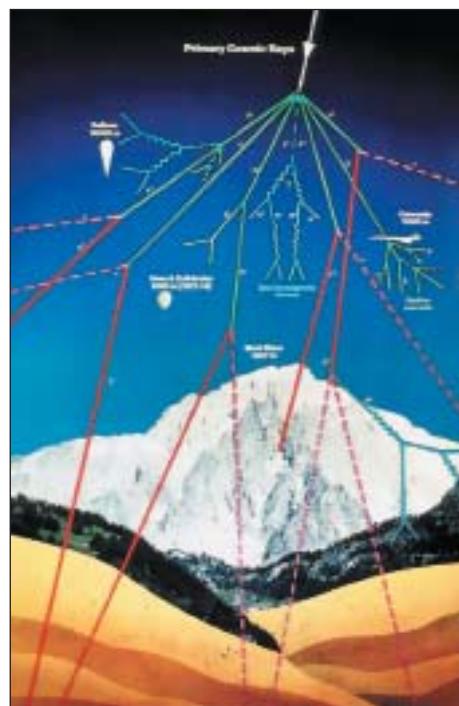
Хотя силовые модули невосприимчивы к большинству этих частиц, некоторые из них (в основном нейтроны) могут вызвать локальный пробой материала полупроводника, выражающийся в наносекундном зашелкивании. Интенсивность отказов зависит от высоты над уровнем моря, рабочего напряжения, температуры кристалла. Модификация структуры кристалла способна повысить стойкость силовых чипов к космическому излучению. Для осуществления подобной оптимизации создаются соответствующие модели, например, ABB так описывает свойства HiPak IGBT с напряжением V<sub>CES</sub> = 1700–6500 В:

$$\lambda(V_{DC}, T_v, h) = K1 \times K2 \times K3;$$

$$K1 = C_3 \times \exp\left(\frac{C_2}{C_1 - V_{DC}}\right);$$

$$K2 = \exp\left(\frac{25 - T_v}{47,6}\right);$$

$$K3 = \exp\left(\frac{1 - \left(1 - \frac{h}{44300}\right)^{5,26}}{0,143}\right);$$



**Рис. 3.** Космическая радиация на разных высотах

где λ — интенсивность отказов (FIT); C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub> — специфические параметры модели; h — высота над уровнем моря; K1 — зависимость FIT от напряжения; K2 — зависимость FIT от температуры; K3 — зависимость FIT от h.

На практике величина FIT удваивается при подъеме над уровнем моря на каждые 1000 м. Параметр V<sub>DC</sub> в коэффициенте K1 представляет собой реальную величину напряжения между коллектором и эмиттером IGBT, то есть интенсивность отказов должна определяться отдельно для каждого рабочего режима (включая закрытое состояние) с учетом его продолжительности и добавляться к общему значению.

**Влажность воздуха и защита от конденсации**

Технология герметизации на основе однослойных кремниевых покрытий все чаще используется для обеспечения электрической изоляции элементов на поверхности керамических DBC-подложек. Это обусловлено множеством причин, в частности требованиями защиты от внешних загрязнений при производстве, пригодностью для повторной переработки, минимизацией механических стрессов, снижением веса.

В подобных герметичных системах удается сбалансировать различные уровни влажности. Так, скорость диффузии ионов воды в силиконовом геле, которая составляет около 0,04 мм/с при температуре 18 °С, увеличивается до 1 мм/см при нагреве до 100 °С. При толщине слоя геля в 5 мм состояние насыщения наступает через 5 ч. Например, у модуля SKiiP 3 постоянная времени (для данного процесса) τ = 8 ч, при этом остаточное количество влаги в геле после 4 ч сушки составляет 40%.

Накопление ионов воды приводит к изменению диаграммы силовых линий поля в барьерном слое между полупроводником и защитным компаундом, так же как и в полиимидном изолирующем слое чипов. При этом могут происходить и электролитические процессы. Большинство силовых модулей SEMIKRON удовлетворяет требованиям климатического класса 3К3 стандартов EN 60721-3-3, EN 50178. При существующих изоляционных свойствах (обусловленных длинами токов утечки) они могут работать при уровне загрязнения 2, описанном в стандартах EN 50178 и EN 61800-5-1. Недавно в производственной программе SEMIKRON появились новые интеллектуальные силовые ключи SKiiP-X [6], разработанные с применением технологии SKiN и допускающие наличие конденсата в рабочем состоянии (уровень загрязнения 3).

Установка оборудования недопустима в местах, где возможно брызгообразование или конденсация влаги, способная ухудшить изоляционные свойства элементов преобразовательного устройства. При уровне загрязнения 2 образование конденсата возможно в течение короткого времени и только при обесточенной системе. Накопление остаточной влаги недопустимо при всех обстоятельствах.

Конструкция приборов должна предотвращать отказы силовых полупроводниковых мо-

дулей из-за наличия конденсата. Для решения этой проблемы принимаются различные меры, например прогрев в нерабочем состоянии, кондиционирование воздуха, непрерывная эксплуатация, контроль температуры охлаждающей жидкости и т. д. Климатический класс 3К3 допускает работу аппаратуры в защищенных от погодных воздействий зонах, при максимальной допустимой относительной влажности  $RH = 85\%$  и абсолютной  $26 \text{ г/м}^3$ . В соответствии с климатограммой, показанной на рис. 4, это означает, что, например, при температуре  $40^\circ\text{C}$  величина  $RH$  не должна превышать  $50\%$ .

Абсолютная влажность может меняться более чем на  $1 \text{ г/м}^3$  в течение суток (наибольшие изменения наблюдаются после выпадения осадков). Если оборудование негерметично, то состояние воздуха во внутреннем объеме соответствует окружающим условиям, следовательно, абсолютная влажность внутри и снаружи теоретически одинакова. Однако на практике существует разница, обусловленная изменениями температуры, взаимосвязь которой с влажностью определена правилами климатограммы.

Пример: при  $T_a = 40^\circ\text{C}$  и  $RH = 20\%$  абсолютная влажность составляет  $10 \text{ г/м}^3$  (характеристика проходит через точку пересечения  $40^\circ\text{C}/20\%$ , отмеченную в верхней части диаграммы). В областях, где воздух охлаждается до  $20^\circ\text{C}$ , величина  $RH$  вырастает до  $58\%$  (точка пересечения кривых  $10 \text{ г/м}^3$  и  $20^\circ\text{C}$ ). Чтобы оставаться в допусках климатического класса 3К3, окружающая температура не должна падать ниже  $13^\circ\text{C}$  (пересечение характеристики  $10 \text{ г/м}^3$  и кривой  $RH = 85\%$ ). Процесс конденсации начинается, как только  $T_a$  станет менее  $11^\circ\text{C}$  (пересечение характеристики  $10 \text{ г/м}^3$  и кривой  $RH = 100\%$ ).

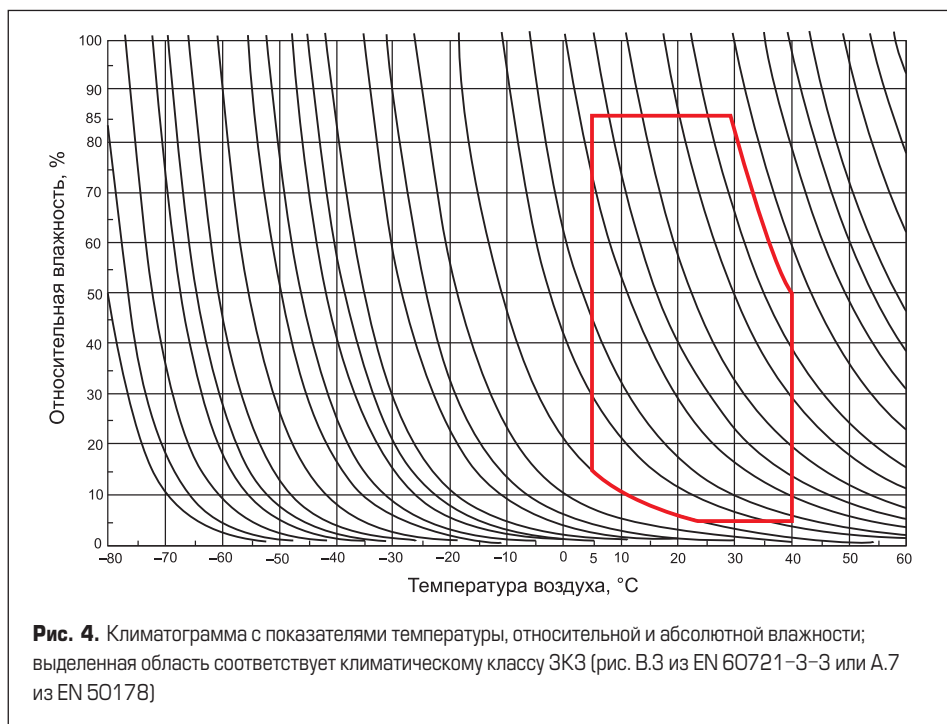
### Вопросы проектирования

Риск образования конденсата появляется в тех случаях, когда температуры элемента и окружающего воздуха отличаются на определенную величину. В предельных случаях конденсация приводит к образованию и накоплению капель воды, что очень опасно для силовых полупроводниковых модулей. Проектирование оборудования следует проводить с учетом климатических особенностей региона применения таким образом, чтобы вероятность отказов, вызванных наличием влаги, была сведена к минимуму.

Существует ряд специальных мер, повышающих стойкость преобразовательной техники к воздействию конденсата:

- Независимая циркуляция воздуха внутри корпуса преобразователя:
  - замкнутая система (min класс защиты IP65) с теплообменником «воздух-воздух» или «жидкость-воздух»;
  - замкнутая система с внутренним кондиционированием воздуха (с регулированием температуры и влажности);
  - открытая система с принудительной вентиляцией.

Для отвода тепла от силовых модулей в этих случаях, как правило, используется жидкостное охлаждение, возможен также вариант,

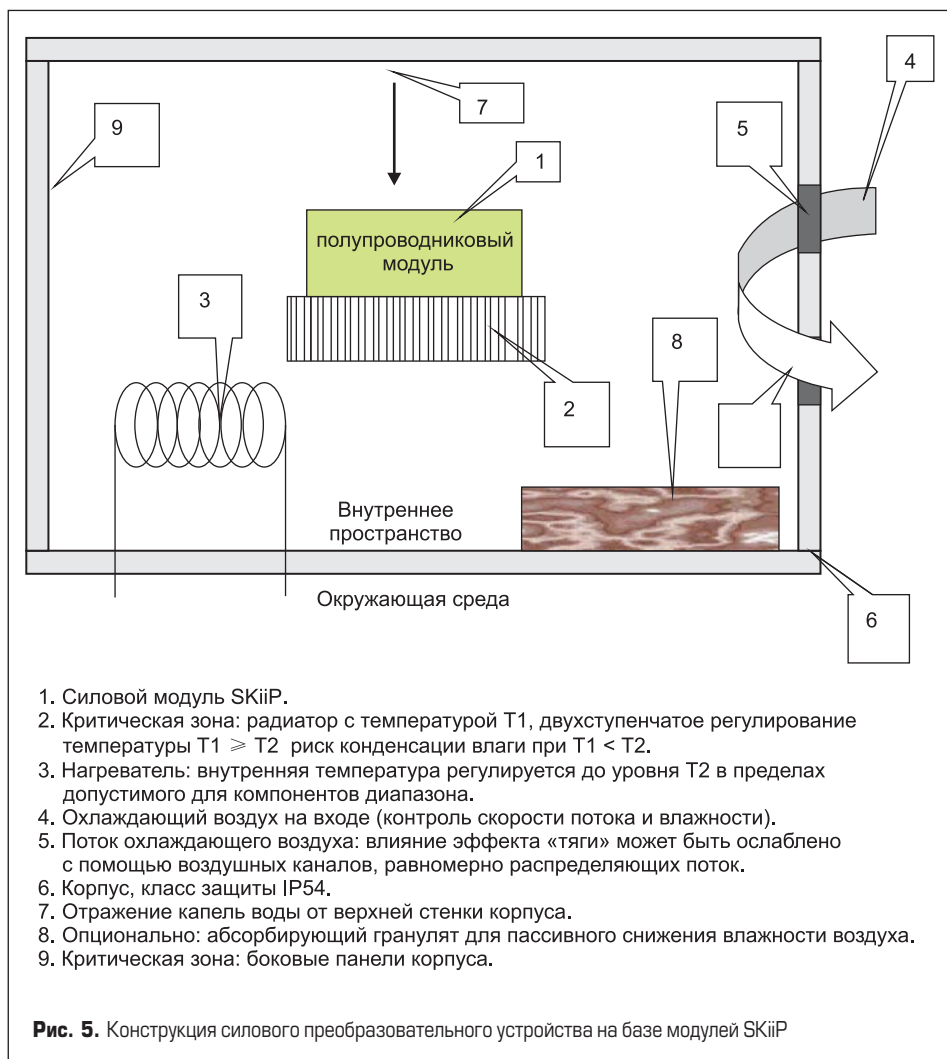


когда радиатор располагается вне герметизированного корпуса:

- Регулирование температуры радиатора с помощью встроенной системы воздушного охлаждения (контроль скорости вентилятора или продолжительности его работы).

- Регулирование внутренней температуры системы с помощью встроенной системы нагрева.

На рис. 5 показан пример конструкции силового преобразовательного устройства на базе модулей SKiiP.



**Таблица 2.** Требования по качеству обработки радиаторов для стандартных и безбазовых модулей

Тип модуля SEMIKRON	Неровность (на длине 10 см)	Шероховатость RZ	Ступенчатость
	DIN EN ISO 1101 А	DIN EN ISO 4287 В	DIN EN ISO 4287 С
<b>Стандартные модули</b>			
SEMITRANS	≤ 50 мкм	≤ 10 мкм	≤ 10 мкм
SEMIACK, SEMIX, SEMIPONT 1...4	≤ 50 мкм	≤ 10 мкм	≤ 10 мкм
<b>Безбазовые модули</b>			
MiniSKiiP, SEMIPONT 5, 6, SKiM 4/5	≤ 50 мкм	≤ 6,3 мкм	≤ 10 мкм
SKiM 63/93	≤ 50 мкм	≤ 10 мкм	≤ 10 мкм
SEMITOP	≤ 50 мкм	≤ 6,3 мкм	0

При определенных условиях на поверхностях закрытых корпусов возможна конденсация влаги и даже образование льда. Это происходит в случае, если внутреннее пространство охлаждается до точки, в которой показатель RH достигает 100%. Конденсат появляется на поверхностях с температурой, меньшей, чем во внутреннем пространстве (входное и выходное отверстие для охлаждающего воздуха, панели корпуса, радиатор).

Без активного контроля влажности воздух в замкнутой системе способен впитывать воду вплоть до состояния насыщения. Количество абсорбированной жидкости ограничено внутренним объемом. Если температура меняется, данный процесс может идти в прямом и обратном направлении, то есть вода будет накапливаться в воздухе или конденсироваться из него. Для предотвращения этого, как правило, применяется пассивный, абсорбирующий влагу гранулят. Чтобы вода не попадала во внутреннее пространство прибора (из-за флуктуаций температуры), используются вентиляционные клапаны с определенной способностью компенсации влажности.

В замкнутых системах рекомендован контроль температуры радиатора. Для предотвращения отказов герметизированных устройств необходим постоянный мониторинг влажности внутреннего пространства. Системы, работающие в экстремальных условиях тропиков, должны быть снабжены блоками активного контроля RH.

В устройствах, не имеющих замкнутых внутренних объемов, области конденсации появляются вследствие постоянного притока свежего воздуха. Подобные системы следует проектировать таким образом, чтобы зоны возможного образования конденсата, попадания капель воды или обледенения находи-

лись на безопасном удалении от электронных компонентов. Температура критических элементов (радиатор, силовые модули) всегда должна быть выше окружающей. Это достигается за счет применения предварительного подогрева, вентиляции внутреннего объема, активной циркуляции воздуха.

При мониторинге температуры радиатора необходимо принимать во внимание переходные состояния, такие как малая нагрузка (или ее отсутствие) и переход в рабочий режим, поскольку упомянутые выше требования в этих состояниях могут обеспечиваться только при низкой температуре охлаждающей среды. Поэтому, например, в режиме холостого хода рекомендуется поддерживать температуру внутри устройства на необходимом уровне за счет нагрева радиатора и внутреннего пространства.

**Рекомендации по сборке и монтажу**

Одним из важнейших условий обеспечения надежной работы преобразовательных устройств является соблюдение правил монтажа силовых модулей. Соответствующие инструкции выпускаются для каждой группы компонентов, в этих документах оговариваются следующие вопросы:

- качество обработки радиатора;
- правила нанесения и тип теплопроводящей пасты;
- моменты крепления корпуса и силовых терминалов модуля.

Для того чтобы тепловые характеристики модуля соответствовали величинам, указанным в технической документации, необходимо обеспечить хороший тепловой контакт основания силового ключа и теплостока. Поверхность радиатора должна быть чистой, обезжиренной, а ее качество соответствовать

требованиям по неоднородности и шероховатости (табл. 2 и пример на рис. 6).

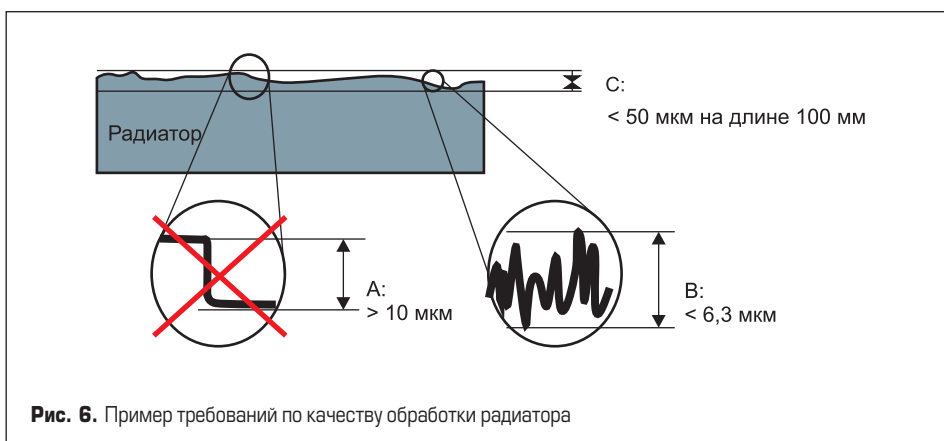
Способы нанесения теплопроводящей пасты, а также характеристики различных материалов TIM (Thermal Interface Material) подробно рассмотрены в [4]. Для некоторых типов модулей SEMIKRON предлагает в качестве опции нанесение термопасты в процессе производства. Наиболее интересной является новая технология материалов с изменяемым фазовым состоянием (PCM), отличающихся высокой теплопроводностью и простотой применения. При комнатной температуре PCM находится в твердом состоянии, его переход в жидкую фазу происходит при нагреве. Это позволяет безопасно транспортировать компоненты с нанесенным слоем, который разжижается и заполняет зазор между базовой платой и радиатором только при эксплуатации или испытаниях силовых модулей.

При нанесении TIM в заводских условиях используются очень жесткие технологические нормы, исключающие появление воздушных пустот (минимальный предел) или отсутствие зон контакта «металл-металл» (максимальный предел). Соблюдение столь точных допусков достигается только при полностью автоматизированном контроле с использованием новейших оптических измерительных средств.

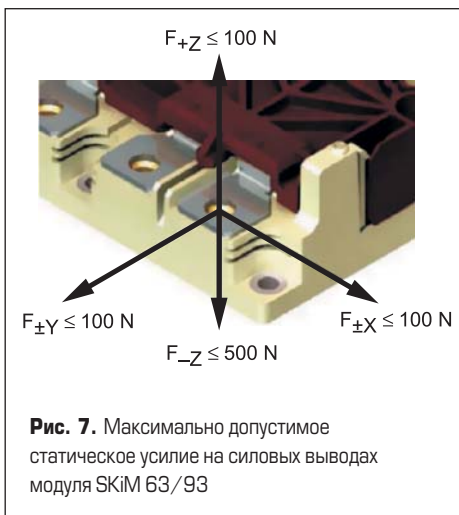
Для установки модулей на радиатор рекомендуется использовать винты стандарта DIN (класс прочности 4.8) с пружинными шайбами или комбинированное крепление «винт-шайба». При сборке следует строго соблюдать требования по монтажному моменту  $M_t$ , затяжка должна производиться равномерно и диагонально, в несколько этапов. Для стандартных модулей с базовой платой рекомендуется выждать несколько часов после первичной установки для лучшего распределения пасты в зазоре и после этого повторить затяжку с номинальным моментом. Указания по монтажу модулей SEMIKRON различного типа приводятся в документах «Mounting Instruction», «Technical Explanations», доступных на сайте [www.semikron.com](http://www.semikron.com).

Нарушение рекомендаций при установке безбазовых силовых ключей, в основании которых находится тонкая керамическая плата, приводят к еще более серьезным последствиям. Для некоторых типов подобных модулей затяжка в обязательном порядке должна производиться в 2 этапа. Допускается использование автоматических отверток с плавным ограничением момента и максимальной скоростью вращения не более 250 об/мин. Следует учитывать эффект релаксации корпуса и процесс начального распределения теплопроводящей пасты в зазоре.

Надежное подключение электрических цепей безбазовых силовых модулей (MiniSKiiP, SKiM) может обеспечиваться только после монтажа на радиатор с использованием рекомендованных моментов крепления. Сказанное относится и к прижимным компонентам в дисковых корпусах. Выводы модуля ни в коем случае не должны подвергаться механической нагрузке до его установки на теплоотвод.



**Рис. 6.** Пример требований по качеству обработки радиатора

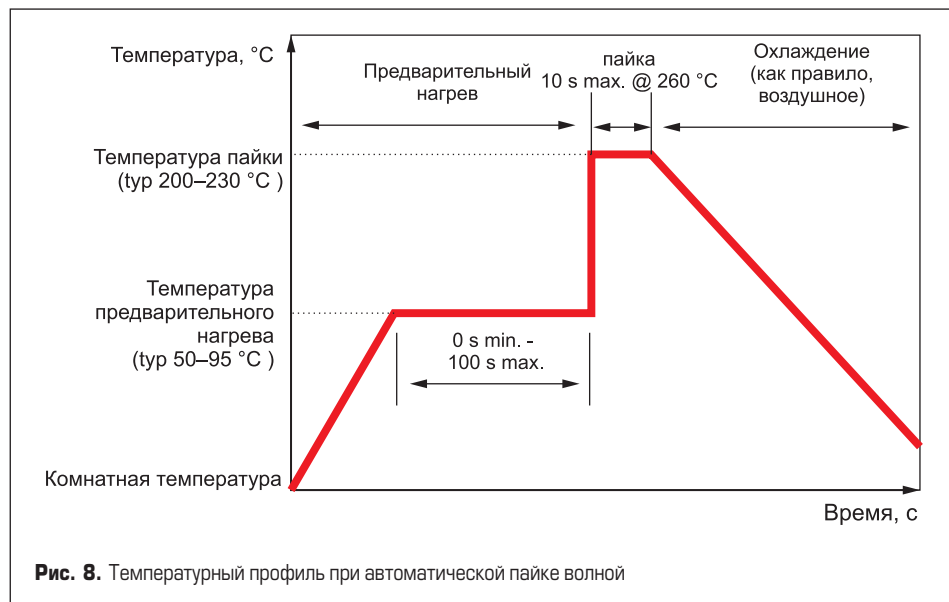


Следует неукоснительно соблюдать требования по предельной глубине и допустимому моменту затяжки крепежных винтов силовых модулей, приводимые в их спецификациях и соответствующих руководствах по применению. В этих же документах указывается допустимая механическая нагрузка на силовые терминалы по трем направлениям (пример на рис. 7). Особенно опасно превышение этих требований по отношению к выводам модулей прижимной конструкции (SKiP, SKiM), в которых перегрузка по усилию приводит к смещению терминалов и ухудшению контактных свойств.

При проектировании звена постоянного тока необходимо использовать симметричные копланарные шины с низким значением распределенной индуктивности. С целью минимизации уровня коммутационных перенапряжений и исключения паразитных осцилляций непосредственно на выводах питания модулей устанавливаются пленочные снабберные конденсаторы [5].

Для снижения паразитной индуктивности цепей управления расстояние от выходов драйвера до затворов IGBT/MOSFET должно быть как можно меньше. Задача упрощается при использовании модулей с пружинными контактными площадками, таких как SEMiX, SKiM, MiniSKiP. В этом случае связь изолированных затворов с устройством управления производится по кратчайшему пути через пружинные выводы и контактные площадки на печатной плате (PCB) драйвера, к которой предъявляются следующие требования:

- рекомендуемый материал PCB — FR4;
- толщина проводников: в соответствии со стандартом IEC 326-3;
- рекомендуемые виды покрытия контактных площадок: сплав никель-иммерсионное золото (нанесение методом химического восстановления) с толщиной никеля > 5 мкм, олово с выравниванием горячим воздухом (HAL Sn), химическое олово, сплав олово-свинец (Sn-Pb);
- SEMIKRON не рекомендует применение органических защитных материалов (OSP) для покрытия контактных площадок из-за врожденной нестабильности их свойств;
- низкоиндуктивная топология соединений (копланарные ± дорожки с максимально



возможной толщиной слоя меди, проводники в сигнальных цепях затвора и эмиттера располагаются параллельно, как можно ближе друг к другу);

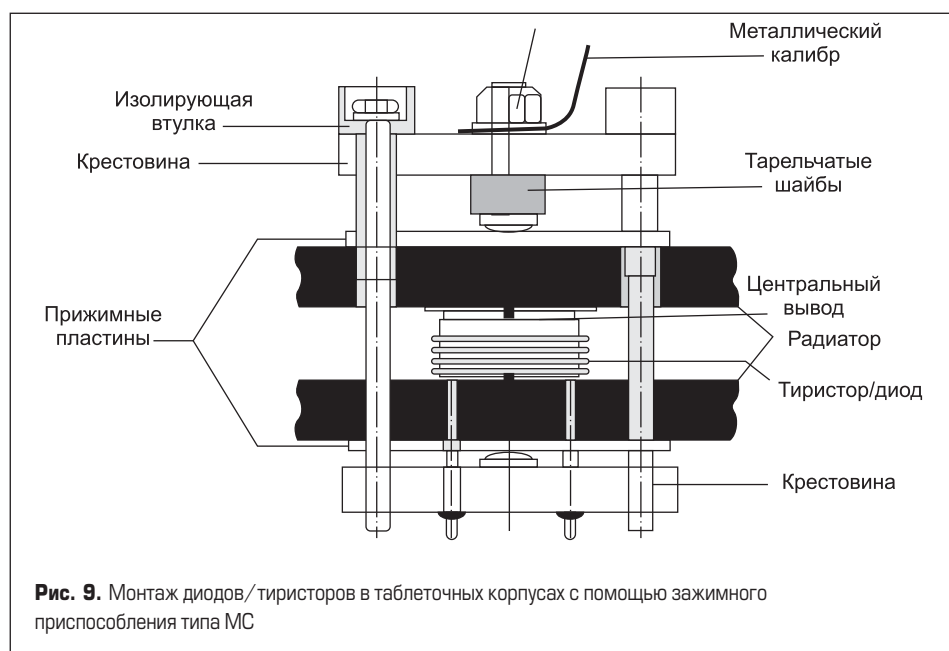
- отсутствие переходных отверстий в проводящих слоях на печатной плате;
- равномерная поверхность контактных площадок, отсутствие вздутий и утолщений, которые могут ухудшить контакт с пружинной;
- отсутствие остатков флюса, фоторезиста, масляных и других загрязнений (очистка платы может не проводиться при использовании специальных, неочищаемых флюсов);
- соответствие требованиям стандарта EN 50178 — A7.1.8.5, например использование запрессованных втулок для улучшения контакта силовых терминалов и исключения проблем, связанных с нестабильностью свойств материала PCB.

Для подключения сигнальных (не пружинных) контактов модулей SEMIKRON можно применять пайку волной. При использовании

неавтоматического паяльного оборудования температура выводов в месте соединения должна удовлетворять следующему условию:  $T_{solder} = 235 \pm 5 \pm C / \le 5$  с. Силовые выводы миниатюрных модулей SEMITOP 5/6 и сигнальных контактов SEMiX 33 допускают  $T_{solder} = (260 \pm 5) \text{ } ^\circ\text{C} / \le 10$  с.

При автоматической пайке SEMIKRON рекомендует температурный профиль, показанный на рис. 8. При этом максимальное значение  $T_{preheating}$  не должно превышать предельной температуры хранения  $T_{stg}$  (режим пайки  $T_{solder} = (260 \pm 5) \text{ } ^\circ\text{C} / \le 10$  с).

Силовые ключи в дисковых (таблеточных) корпусах в отличие от стандартных изолированных модулей имеют две симметрично расположенные теплоотводящие поверхности. Это дает возможность использовать режим двустороннего охлаждения (DSC) и повысить токовую отдачу. Для реализации такого способа отвода тепла дисковые корпуса зажимаются между двумя радиаторами с помощью специального приспособления (рис. 9).



Теплоотводящие поверхности дисковых элементов являются и их силовыми выводами, поэтому двусторонний радиатор одновременно выполняет функции, например, катода и анода. Соответственно, качество контактных поверхностей силовых ключей данного типа должно быть очень высоким (максимально допустимая неравномерность — 10 мкм, шероховатость — 6,3 мкм). Допускаются одиночные царапины, зазубрины, раковины, не ухудшающие контактные свойства.

В течение нескольких минут нахождения на открытом воздухе на алюминии образуется оксидный слой. Вследствие этого контактное сопротивление возрастает в несколько раз, что может привести к коррозии контакта после определенного времени протекания тока, поэтому поверхность не оцинкованных алюминиевых радиаторов должна очищаться непосредственно перед монтажом. С этой целью можно использовать тонкопроволочную щетку, смоченную в теплопроводящей пасте, или абразивную губку (например, Scotchbride компании 3M). Остатки абразива с контактных поверхностей должны быть полностью удалены, сразу после этого на них следует нанести тонкий слой термопасты без порошкового наполнителя, например ELECTROLUBE GX.

Зажимное приспособление должно быть разработано таким образом, чтобы одна часть радиатора при монтаже сохраняла подвижность. Одна из двух монтажных клипс образует поворотный подшипник (обеспечиваю-

щий контакт между сферической и плоской поверхностью), другая соединяется с теплоотводом таким образом, чтобы не происходило ее деформации при затяжке винтов.

Необходимо исключить возможность свободного движения части радиатора, выполняющей совместно с зажимным устройством функцию поворотного подшипника. Она не должна иметь жесткой механической связи с другой половиной теплоотвода или с установленными на ней элементами. Для обеспечения электрического контакта данной части радиатора с силовой шиной следует использовать гибкие токоподводы.

Зажимное приспособление должно создавать контактное усилие, оговоренное в спецификации соответствующего дискового диода/тиристора. После очистки поверхности и нанесения пасты следует плотно прижать элемент к радиатору вручную. При этом рекомендуется слегка проворачивать сопрягаемые элементы для лучшего распределения термопасты. Первым устанавливается центральный вывод (9). При контрольном демонтаже диода/тиристора на теплоотводе должен оставаться равномерный слой теплопроводящего материала. Если это не так, необходимо очистить контактные поверхности и повторно нанести пасту.

Далее зажимное приспособление позиционируется таким образом, чтобы крестовина (5) и прижимная плата (4) со стягивающими болтами (10) находились сверху. Крестовина (3) и вторая плата (4) вставляются снизу, по-

сле чего болты (10) затягиваются поочередно до появления легкого сопротивления. Далее необходимо убедиться в том, что крестовины (3) и (5) расположены параллельно, что можно проверить по расстоянию между ними в противоположных точках. Теперь следует вновь затягивать болты (10) до того момента, пока калибр (8), имеющий защиту от выпадения, может свободно перемещаться. Ни в коем случае нельзя использовать более высокое усилие, поскольку это означает превышение момента затяжки. По той же причине гайка фиксации набора тарельчатых шайб (7) никогда не регулируется.

## Литература

1. Wintrich A., Nicolai U., Tursky W., Reimann T. Application Notes for IGBT and MOSFET modules. SEMIKRON International, 2010.
2. Lehmann J., Netzl M., Pawel S., Doll Th. Method for Electrical Detection of End-of-Life Failures in Power Semiconductors. Semikron Elektronik GmbH.
3. Freyberg M., Scheuermann U. Measuring Thermal Resistance of Power Modules. PCIM Europe journal, 2003.
4. Колпаков А. Возвращаемся к термопасте // Силовая электроника. 2015. № 2.
5. Колпаков А. Снабберы и перенапряжения // Компоненты и технологии. 2008. № 5.
6. Колпаков А. SKiiP-X — силовой интеллектуальный модуль XXI века // Силовая электроника. 2014. № 4.