

# Еще раз про надежность

## Часть 1

**Арендт Винтрих**  
(Arendt Wintrich)

**Ульрих Николаи**  
(Ulrich Nicolai)

**Вернер Турски**  
(Werner Tursky)

**Тобиас Райманн**  
(Tobias Reimann)

**Перевод и комментарии:**  
**Андрей Колпаков**

Andrey.Kolpakov@semikron.com

**Н**адежность, понимаемая как способность полупроводниковых элементов сохранять свои свойства в течение определенного периода времени, является одной из важнейших характеристик силовых модулей. От прочих электронных компонентов они отличаются высокой тепловой и электрической нагрузкой, а их преждевременный отказ может иметь очень тяжелые прямые и косвенные последствия, как в техническом, так и в экономическом плане. Из-за сравнительно малых объемов производства, высоких ресурсных требований и сложных методик тестирования показатели надежности таких элементов плохо поддаются точной численной оценке. Для ее корректного проведения требуется наличие следующих факторов:

- тщательный контроль всех производственных процессов;
- проведение испытаний в условиях, близких к рабочим, что позволяет выявлять типовые механизмы отказа;
- мониторинг наиболее важных параметров компонентов в составе системы.

В настоящее время часто используется термин «надежностное проектирование», означающий, что при выборе силовых полупроводниковых модулей и расчетах режимов работы принимаются во внимание факторы и механизмы, влияющие на процессы старения (рис. 1). Необходимо учесть, что срок службы наименее надежного и, как правило, наиболее нагруженного элемента определяет ресурс всей системы.

### Общие положения и основные термины: MTBF, MTTF, FIT

В рамках данной статьи будут описаны некоторые специфические тесты силовых модулей SEMIKRON, обеспечивающие соответствие стандартам ISO 9001 и VDA 6 (часть 1).

Одним из основных параметров, характеризующих надежность работы любого изделия, является

интенсивность (или частота) отказов  $\lambda$ . График, характеризующий зависимость частоты отказов от времени эксплуатации, показан на рис. 2.

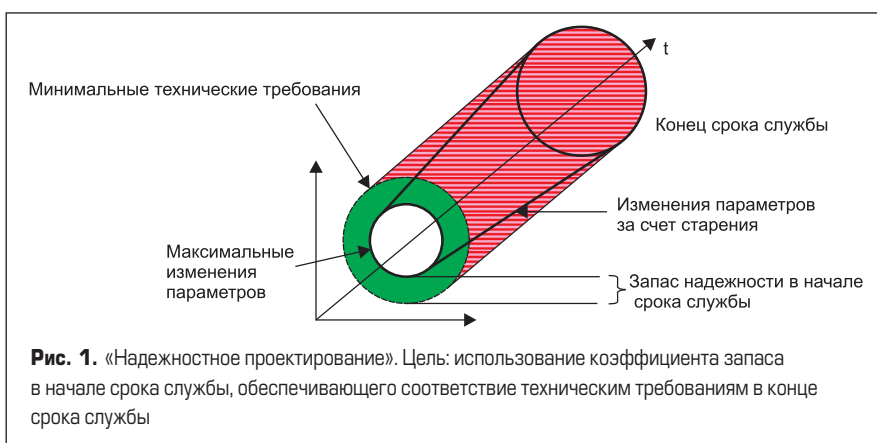
Эпюра, приведенная на рис. 2, называемая кривой надежности, имеет три ярко выраженных участка. Первый, определяющий область ранних неисправностей, характеризуется спадом частоты отказов. Скорость спада зависит в основном от конструкции изделия, свойств примененных материалов и технологии изготовления. На форму кривой в данной части заметное влияние оказывают методы испытаний и контроля качества, используемые в процессе производства. Основным способом снижения количества отказов на ранней стадии эксплуатации является электротермотренировка. Статистические отказы в средней части графика характеризуются практически неизменной интенсивностью. Данный участок, имеющий максимальную длительность, представляет собой основное время нормальной эксплуатации изделия. И, наконец, последняя область графика с возрастающей частотой отказов соответствует окончанию срока службы изделия. Для силовых модулей IGBT этот участок отмечается лавинообразным ростом теплового сопротивления кристаллов, разрывом электрических связей, потерей управляемости.

Основными параметрами, используемыми для описания надежности изделий, являются FIT (Failure In Time) и MTBF (Mean Time Between Failure). FIT характеризует количество отказов в час, наблюдаемых при эксплуатации некоторого числа компонентов в течение определенного времени.

$$FIT = \lambda = n_f / (N \times t),$$

где  $n_f$  — количество обнаруженных отказов;  $N$  — количество испытываемых компонентов;  $t$  — время наблюдений.

Как правило, параметр FIT, относящийся к горизонтальному участку кривой надежности (рис. 2), дается в спецификациях при температуре окружающей среды +40 °С. Обобщенная зависимость интен-



сивности отказов от температуры приведена на рис. 3.

MTBF — величина, обратная значению интенсивности отказов, она характеризует среднее время между двумя отказами аналогичных компонентов:

$$MTBF = MTTF = 1/\lambda.$$

Как видно на графике (рис. 3), при увеличении температуры от +40 до +60 °C значение MTBF уменьшается вдвое.

В отношении силовых модулей, как правило, употребляется термин MTTF (среднее время наработки на отказ), поскольку MTBF определяет интервал времени между двумя ремонтами. Однако после окончания времени ремонта эти показатели становятся идентичными. В отличие от, например, сигнальных процессоров, выпускаемых миллионами, база статистических данных для силовых модулей намного беднее. Кроме меньшего объема выпуска проблемой также является отсутствие достоверной информации о режимах работы в момент отказа.

В «Википедии» дается значение FIT силовых транзисторов  $50-60 \times 10^{-9}$ , что соответствует  $MTTF = 2 \times 10^7$  ч. Однако эти величины применимы только к дискретным элементам и модулям, содержащим не более двух интегральных чипов; при их увеличении соответственно возрастает и интенсивность отказов.

Методики ускоренных испытаний на надежность предполагают, что процессы, инициируемые энергией активации, экспоненциально зависят от температуры (закон Аррениуса). Например, «медленный» тест на активное термоциклирование при  $\Delta T = 30$  К будет продолжаться 30–100 лет, однако это время можно существенно сократить, увеличив градиент температуры. После окончания испытаний полученные результаты надо будет пересчитать с учетом нормальных условий эксплуатации.

Общий вид формулы для определения количества циклов до отказа  $N$ :

$$N = B \times e^{\frac{-E_A}{k_b \times T}},$$

где  $E_A$  — энергия активации,  $k_b$  — постоянная Больцмана,  $T$  — абсолютная температура,  $B$  — эмпирический коэффициент. Если известна интенсивность отказов для определенного температурно-зависимого механизма, то можно построить соответствующую кривую для всего диапазона рабочих температур путем изменения величин  $B$  и  $E_A$ .

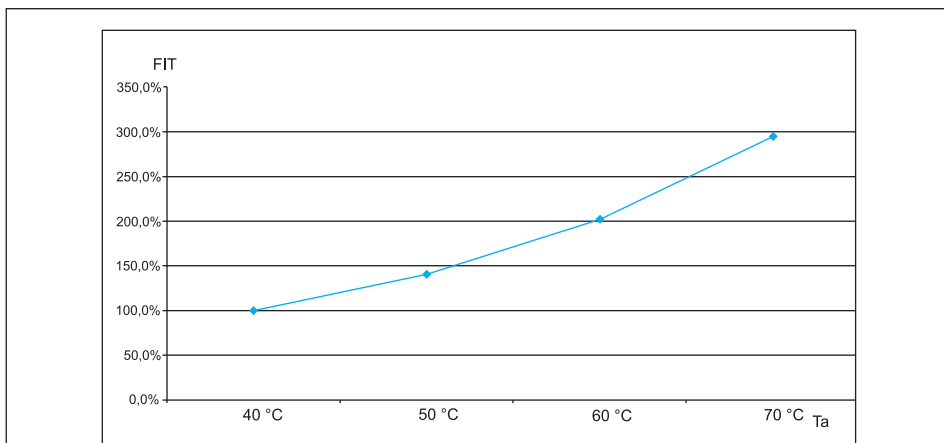


Рис. 3. Зависимость параметра FIT от температуры окружающей среды  $T_a$

### Стандартные виды квалификационных тестов

Целью проведения испытаний на надежность является:

- обеспечение качества и надежности продукции;
- определение предельных возможностей готовых изделий путем проведения тестов в различных условиях, включая наиболее жесткие;
- обеспечение стабильности и воспроизводимости производственных процессов;
- оценка влияния изменения параметров компонентов и технологических процессов на надежность.

В таблице приведены стандартные виды квалификационных тестов, описывающих минимальные требования к надежности и необходимым для обеспечения серийного производства. В отличие от них испытания на надежность являются разрушающими, они проводятся только на небольшом количестве образцов.

До начала испытаний, в процессе их проведения, а также по завершении производятся измерения основных параметров компонентов, позволяющие оценить влияние условий тестов на ресурс силовых ключей. Отказ фиксируется при выполнении следующих условий:

- Тиристоры/диоды:
  - обратный ток/ток утечки  $I_{RD}/I_{DD} + 100\%$  от верхнего предела;
  - напряжение/ток включения  $V_{GT}/I_{GT} + 10\%$  от верхнего предела;
  - прямое напряжение  $V_T/V_F + 10\%$  от верхнего предела.
- IGBT/MOS:

- сопротивление открытого канала/напряжение насыщения  $R_{DS(on)}/V_{CE(sat)} + 20\%$  от начального значения;
- максимальное изменение порогового напряжения включения  $V_{GS(th)}/V_{GE(th)} \pm 20\%$  от предельного значения;
- ток утечки затвора  $I_{GSS}/I_{GES} + 100\%$  от верхнего предела;
- ток утечки сток-исток/коллектор-эмиттер  $I_{DSS}/I_{CES} + 100\%$  от верхнего предела.

- Все модули:
  - тепловое сопротивление «кристалл–корпус»  $R_{th(j-c)} + 20\%$  от начального значения;
  - тестовое напряжение изоляции  $V_{iso}$  — превышение предельного значения.

Справочные значения параметров электронных компонентов, приведенные в спецификациях, являются начальными, они не описывают изменения, происходящие в течение срока службы. Отметим, что это находится в противоречии с рядом требований, изложенных в стандарте IEC 60747, который требует (в последней редакции), чтобы верхние пределы характеристик обеспечивались даже после окончания испытаний на долговечность.

### Особенности квалификационных тестов

НТРВ, НТГВ, ТНВ используются для оценки блокирующей способности кристаллов, а также качества пассивации и оксидного слоя затвора. Тесты проводятся в климатической камере при приложенном обратном напряжении. В процессе испытаний идет мониторинг тока утечки (обратного тока), после их завершения производится проверка статических характеристик.

Таблица. Виды и условия испытаний модулей SEMIKRON

Тест на надежность, стандарт	Стандартные условия испытаний:	
	MOSFET/IGBT	Диоды/тиристоры
Повышенная температура при обратном напряжении (НТРВ), IEC 60747	1000 ч; 95% $V_{DC(max)}/V_{CE(max)}$ ; $+125^\circ C \leq T_c \leq +145^\circ C$	1000 ч, DC; 66% $V_{DPR}$ ; $+105^\circ C \leq T_c \leq +120^\circ C$
Повышенная температура при максимальном напряжении на затворе (НТГВ), IEC 60747	1000 ч; $\pm V_{GS(max)}/V_{GE(max)}$ ; $T_{j(max)}$	Не производится
Повышенная влажность и температура при обратном напряжении (НТВ), IEC 60068-2-67	1000 ч; $+85^\circ C$ ; 85% RH; $V_{DC}/V_{CE} = 80\%$ от макс. значения, но не более 80 В; $V_{GE} = 0$	1000 ч, $+85^\circ C$ , 85% RH, $V_D/V_R = 80\%$ от макс. значения, но не более 80 В
Повышенная температура хранения (НТС), IEC 60068-2-2	1000 ч; $T_{stg(max)}$	
Пониженная температура хранения (ЛТС), IEC 60068-2-1	1000 ч; $T_{stg(min)}$	
Пассивное термоциклирование (ТЦ), IEC 60068-2-14 Test Na	100 циклов; $T_{stg(max)} - T_{stg(min)}$	25 циклов; $T_{stg(max)} - T_{stg(min)}$
Активное термоциклирование (ПЦ), 3IEC 60749-34	20 000 циклов; $\Delta T_j = 100$ К	10 000 циклов; $\Delta T_j = 100$ К
Вибрация, IEC 60068-2-6 Test Fc	Синусоидальная; 5g; 2 ч по каждой оси	
Удары, IEC 60068-2-27 Test Ea	Полусинусоидальные импульсы; 30g; три раза по каждой оси	

HTS, LTS — хранение при экстремальных температурах обеспечивает максимальный тепловой стресс для корпусов модулей. После окончания испытаний корпуса не должны иметь следов повреждения (трещин, вздутий и т. д.).

ТС — в ходе этого теста компоненты с помощью специального лифта перемещаются между климатическими камерами с высокой и низкой температурой (рис. 4). Таким образом производится «пассивное» термоциклирование, которое отнимает достаточно много времени, необходимого для нагрева и охлаждения модулей до установившейся температуры. Испытания позволяют выявить критический уровень механических стрессов внутри корпуса, а также между слоями с разным коэффициентом теплового расширения (КТР). Наиболее критичным является паяное соединение базовой платы с изолирующей DBC-подложкой.

Тест ТС имитирует пассивные перепады температуры, вызванные дневными и ночными колебаниями, а также изменением условий охлаждения. Как правило, для общепромышленных применений используется 100 испытательных циклов с градиентом  $-40 \dots +125 \text{ }^\circ\text{C}$ . Современные транспортные модули «безбазовой» конструкции со спеченными кристал-

лами подвергаются воздействию 1500 и более циклов.

РС — в ходе этого теста кристаллы силового модуля нагреваются до заданной температуры  $T_{j\max}$  за счет протекания фиксированного постоянного тока, после чего ток прерывается, включается система жидкостного охлаждения, и температура понижается до минимального уровня  $T_{j\min}$  (рис. 5). Длительность цикла составляет от нескольких секунд до минуты.

В отличие от предыдущего случая, «активное» термоциклирование создает градиент температуры между кристаллами и окружающей средой. При этом термомеханическому напряжению подвергаются все конструктивные слои с разным КТР, участвующие в передаче тепла от чипов в окружающую среду. Основным стресс испытывают соединения кристаллов с DBC-подложкой и их алюминиевые сварные выводы, поскольку они нагреваются в наибольшей степени.

Тест ТС имитирует активные перепады температуры, вызванные потерями мощности полупроводниковых ключей. Результаты испытаний представляются в виде семейства графиков зависимости максимального количества циклов до отказа от градиента температуры  $\Delta T$ . При построении кривых используется

упрощенное предположение о равномерном распределении механизмов отказа в диапазоне рабочих температур. Для сокращения времени испытаний они проводятся при повышенном значении  $\Delta T$  (например, 80 и 100 К), после чего производится экстраполяция, позволяющая оценить срок службы для реальных условий эксплуатации (например,  $\Delta T = 40 \text{ К}$ ).

**Вибрационные воздействия**

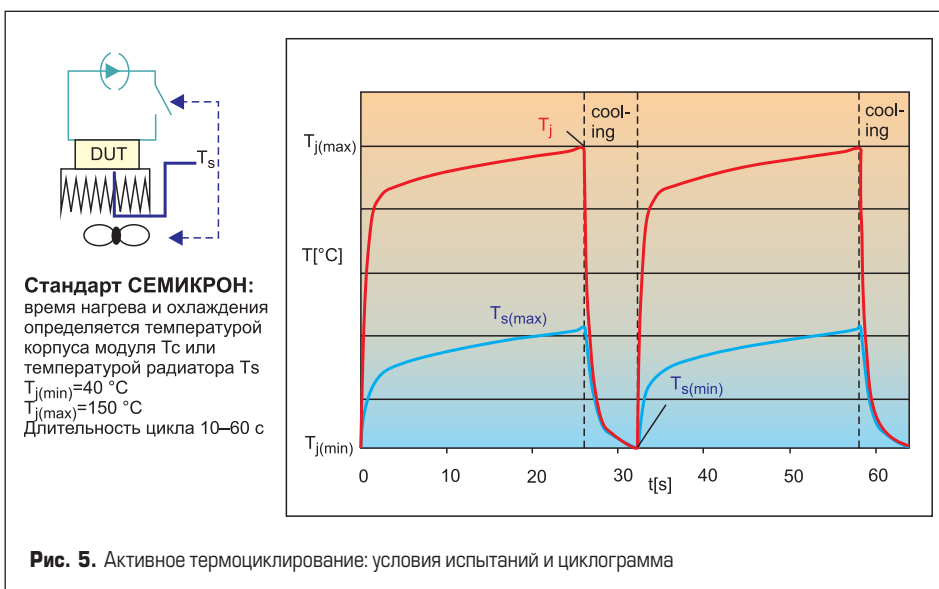
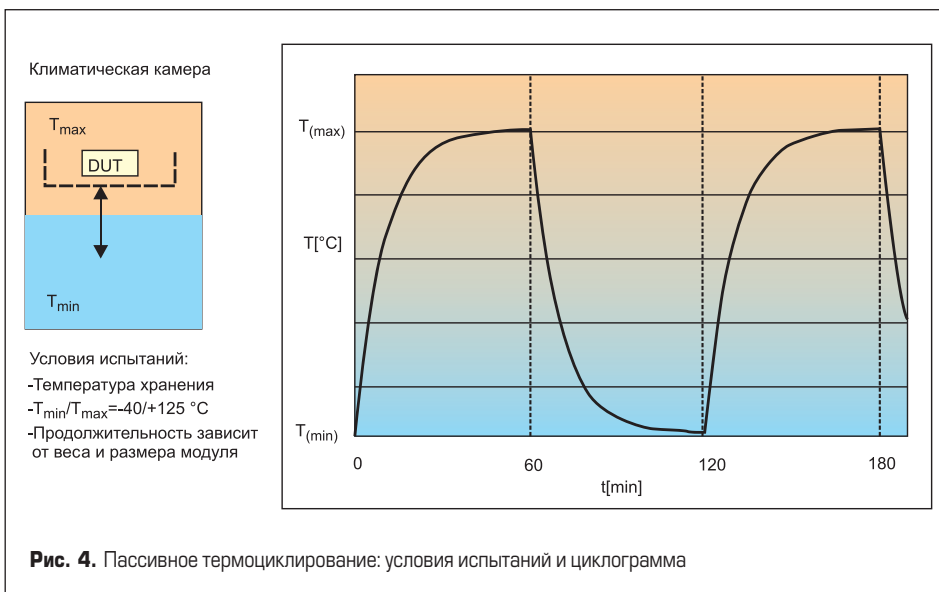
Тест на стойкость к воздействию вибраций проводится в диапазоне частот 10–1000 Гц при ускорении 5g или выше, что определяется возможностями оборудования (рис. 6). Задачей испытаний является выявление потенциально слабых точек конструкции, к которым относятся:

- пружинные контакты (механическое старение);
- паяные соединения (особенно при наличии дополнительных вибрационных масс);
- материал корпуса (растрескивание, деформация).

В процессе тестирования через сигнальные и силовые контакты пропускается небольшой испытательный ток, что позволяет контролировать стабильность контактных свойств по прерыванию тока. В отличие от реальных применений испытываемые образцы модулей не имеют дополнительных вибрационных масс (кабели, конденсаторы DC-шины), поэтому рекомендуется проведение дополнительных вибрационных испытаний готового изделия.

**Пружинные соединения**

Силовые модули, имеющие пружинные сигнальные или силовые выводы (SEMiX, MiniSKiiP, SKiM), подвергаются дополнительным тестам для проверки стабильности контактных свойств (рис. 7).



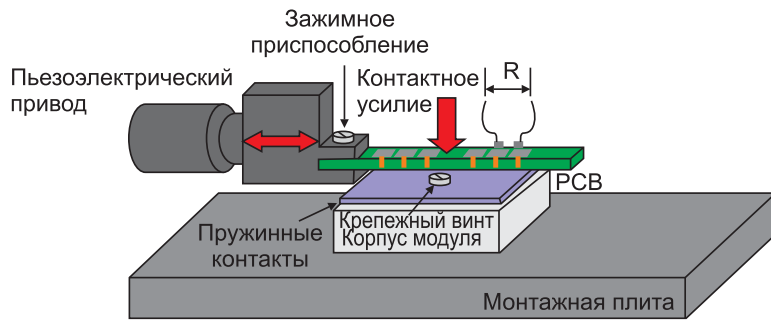


Рис. 7. Испытания на воздействие микровибраций (модуль MiniSKiiP)

**Микровибрация (фреттинг-коррозия)**

Контактные поверхности могут подвергаться так называемой фреттинг-коррозии при воздействии микровибраций в условиях электрической нагрузки. Ее причиной является попадание непроводящих частиц окислов в зону контакта. Цель теста — проверка способности соединения надежно работать при определенном сочетании материалов пружины и металлизации печатной платы (PCB) в течение срока службы.

В тестовом модуле все контакты соединяются последовательно, через них пропускается постоянный измерительный ток, который ограничивается на уровне 20 мА (при напряжении не более 20 мВ), чтобы исключить подгорание контактов. Микровибрации с частотой 1 Гц и амплитудой 50 мкм создаются пьезокерамическим приводом (рис. 7). В ходе испытаний производится постоянный мониторинг контактного сопротивления, определяемого по суммарному падению напряжения в измерительной цепи. Испытания считаются успешными, если после 100 000 циклов вибраций изменение сопротивления не превышает 10 мОм. Тесты пружинных соединений модулей MiniSKiiP показали, что они сохраняют свои контактные свойства после более чем 4,5 млн микроперемещений.

**Коррозионно-активная атмосфера (агрессивные газы)**

В ходе проведения тестов компоненты на несколько сотен часов помещаются в герметичную камеру, заполненную агрессивным газом. Данный вид испытаний относится к ускоренным, позволяющим имитировать коррозионное воздействие экстремально жесткой окружающей среды.

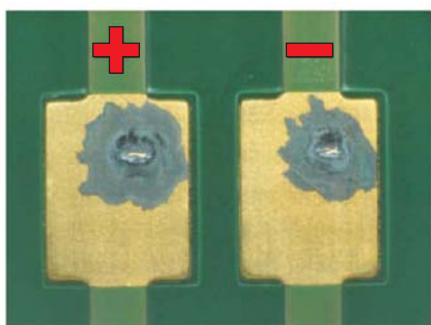


Рис. 8. Воздействие агрессивных газов на пружинные соединения MiniSKiiP/PCB (3 ppm H<sub>2</sub>S, +40 °C, 80% RH, 2000 ч, 15 В)

На рис. 8 показана контактная поверхность печатной платы, к которой были подключены пружинные выводы модуля MiniSKiiP, после успешного завершения теста. Для одновременной проверки влияния эффекта электромиграции у используемого сочетания «материал пружины-покрытие PCB» на контакты было подано напряжение 15 В. Оптический анализ показал отсутствие следов миграции ионов в направлении электромагнитного поля.

На фотографии видны серые пятна на покрытии контактной площадки печатной платы (никель-золото), возникающие в результате воздействия коррозионно-активной среды на оксидный защитный слой пружин, а также черные следы окисления. Однако область контакта «металл-металл» в центре пятна остается чистой благодаря высокому прижимному давлению, создающему герметичную область и не допускающему проникновения агрессивной среды в зону контакта.

**Термоциклирование контактной пары «пружина-печатная плата»**

В ходе этого теста выводы силового полупроводникового модуля (в сборе) подвергаются предельно высоким колебаниям температуры. На рис. 9 представлены сравнительные результаты испытаний паяных и прижимных соединений, полученные на сборке модуля MiniSKiiP с интерфейсной платой. Для мак-

симальной корректности результатов был изготовлен тестовый силовой ключ, в котором каждый штатный пружинный вывод дублировался паяным контактом. Как видно из показанных на рисунке графиков, жесткие паяные соединения разрушаются примерно в середине процесса испытаний (синяя эпюра), в то время как пружинные контакты сохраняют свои свойства в течение 2000 термоциклов с градиентом от -40 до +125 °C.

*Продолжение следует*

**Литература**

1. Wintrich A., Nicolai U., Tursky W., Reimann T.. Application Notes for IGBT and MOSFET modules. SEMIKRON International. 2010.
2. Lehmann J., Netzel M., Pawel S., Doll Th. Method for Electrical Detection of End-of-Life Failures in Power Semiconductors. SEMIKRON Elektronik GmbH.
3. Scheuermann U. Reliability of Pressure Contacted Intelligent Power Modules. SEMIKRON Elektronik GmbH.
4. Scheuermann U., Hecht U. Power Cycling Lifetime of Advanced Power Modules for Different Temperature Swing. SEMIKRON Elektronik GmbH.
5. Колпаков А. И. Методы оценки надежности силовых модулей в предельных режимах // Силовая электроника. 2004. № 1.

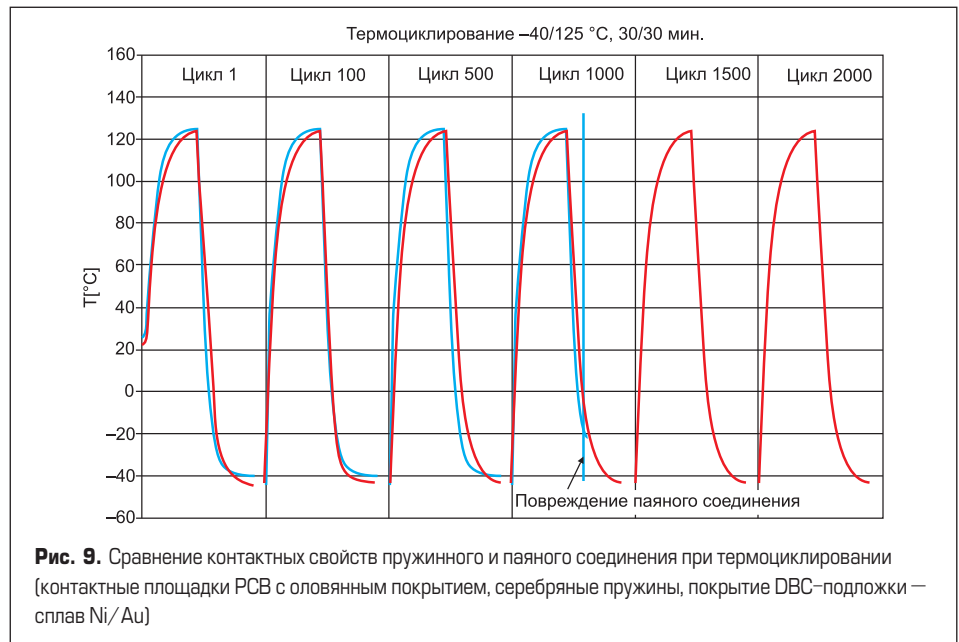


Рис. 9. Сравнение контактных свойств пружинного и паяного соединения при термоциклировании (контактные площадки PCB с оловянным покрытием, серебряные пружины, покрытие DBC-подложки — сплав Ni/Au)