

# Гибкость многослойных керамических конденсаторов

В статье представлены многослойные керамические конденсаторы с сопротивлением механическому растрескиванию, предназначенные для автомобильной промышленности.

Перевод:  
Сергей Шихов

sergey@aconf.ru

Сегодня с постоянно усиливающимся спросом на дополнительные технические возможности в обычных автомобилях и неизбежным ростом числа электромобилей увеличивается количество вызовов, с которыми сталкиваются разработчики электроники: при меньших затратах и сокращающихся конструктивных параметрах MLCC используются все в более жестких условиях и в больших количествах. Это заставляет увеличивать плотность установки компонентов на платы, а также добавляет беспокойства по поводу надежности и особенно вероятности механического растрескивания. Соответственно, разработчикам электроники теперь необходима большая гибкость, которая превышает требования по тесту на изгиб спецификации Совета по автомобильной электронике (AEC-Q200, версия D, 1 июня 2010 года).

Устойчивость к механическому растрескиванию может быть увеличена двумя способами:

- уменьшением механической нагрузки, оказываемой на конденсаторы в процессе производства/сборки печатных плат;
- увеличением механической прочности компонента.

В статье будут рассмотрены оба метода, а также проверен способ увеличения механической прочности с FlexiCap.

Материал для контактов FlexiCap — это гибкий оксидный полимер с серебряным наполнением, который поглощает механическое напряжение между печатной платой и керамическим компонентом. Компоненты с выводами из FlexiCap выдерживают более высокие нагрузки механического напряжения по сравнению с обычными выводами. Типы механической нагрузки, при которых конденсаторы с выводами FlexiCap создают улучшенную защиту, включают механическое растрескивание (что является самой частой причиной отказов керамических компонентов), а также быстрое изменение температуры.

При тестировании FlexiCap превысил минимальные требования спецификации в соответствии с AEC-Q200 более чем в 2 раза, таким образом, компания Knowles Precision Devices может предложить гарантированное отклонение в 5 мм при испытании на изгиб для компонентов AEC-Q200.

## Механическое растрескивание

Здесь мы обсудим некоторые причины механического растрескивания в многослойных конденсаторах и те меры, которые могут быть предприняты, чтобы избежать этого при производстве печатных плат.

Из-за хрупкости керамики многослойные керамические конденсаторы в большей степени подвержены избыточным механическим нагрузкам, чем другие компоненты, используемые в поверхностном монтаже. Одна из самых распространенных причин повреждений конденсаторов напрямую связана с изгибом печатной платы после нанесения припоя. Чрезмерный изгиб создает механические трещины в керамическом конденсаторе (рис. 1). Механические трещины (в зависимости от своей величины) могут и не вызвать повреждение конденсатора во время тестирования окончательной сборки. Но через

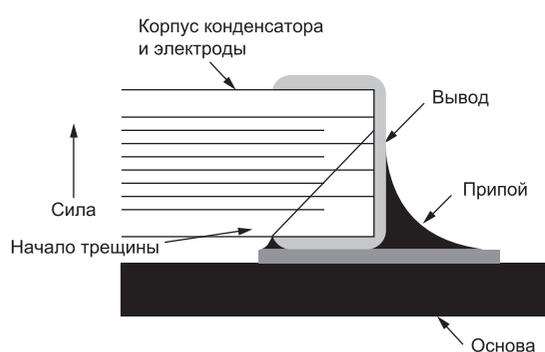


Рис. 1. Механическая трещина



Рис. 2. Пример конденсатора, произведенного клиентами Knowles Precision Devices

некоторое время влага, проникающая внутрь трещины, может снизить изоляционное сопротивление и вызвать пробой диэлектрика, что приведет к выходу конденсатора из строя.

Пример конденсатора, произведенного клиентами Knowles Precision Devices для изучения нарушений, приведен на рис. 2.

### Возможные причины

Механические трещины возникают из-за избыточной механической нагрузки после того, как конденсаторы припаяны на печатную плату.

Избыточная механическая нагрузка может быть результатом следующих факторов:

- Исключительные обстоятельства:
  - посадка с натягом — например, недопустимое физическое воздействие.
- Нормальные обстоятельства:
  - дизайн сборки;
  - депанелизация платы, вызвавшая изгиб платы;
  - автоматическое тестовое оборудование, использующее в качестве контактов матрицу игольчатых контактов «ложе гвоздей». Нарушения зачастую происходят в непосредственной близости или на поддерживающих стойках испытательного стенда. Вакуумные зажимы также могут быть причиной избыточного изгиба печатной платы;
  - искажение/деформация печатной платы, вызванная условиями хранения или особенностями конструкции печатной платы. Часто деформируемая печатная плата выпрямляется после пайки, что вызывает появление механических трещин в конденсаторах;
  - установка компонентов с использованием радиальных/сквозных отверстий, особенно если между радиальными выводами и отверстиями на плате имеется плотное соединение;
  - подсоединение жестких деталей, таких как теплоотводы;
  - установка микросхем, разъемов в гнезда для пайки без поддержки;
  - транспортировка/хранение и обработка печатной платы, позволяющие плате изгибаться;
  - установка собранных узлов на окончательную сборку — например, прицеливание или чрезмерное затягивание винтов.

### Меры по предотвращению

Тесты на избыточный изгиб, проведенные с помощью Knowles Precision Devices, включая анализ продуктов конкурентов, доказали, что:

- конденсаторы Knowles Precision Devices соответствуют международным требованиям, определяющим критерии надежности (об этом более подробно будет рассказано в разделе «Тестирование на изгиб»);
- результаты тестов на изгиб конденсаторов с использованием спеченного материала Knowles Precision Devices сопоставимы с результатами испытаний аналогичных устройств конкурентов.

Существует только два эффективных способа, позволяющих избежать проблем с механическими трещинами:

- снижение механической нагрузки, оказываемой на конденсаторы;
- увеличение технологического окна таким образом, чтобы механическая нагрузка, оказываемая на керамическую часть конденсатора, сократилась.

Автоматическое тестовое оборудование (АТЕ), функциональное тестирование и тестирование на надежность имеют ограниченные возможности в определении нарушений конденсаторов, возникших из-за механического растрескивания.

### Особенности сборки/производства

На механическую нагрузку может оказывать влияние ряд различных факторов, связанных с конструкцией и производством устройства. Эти факторы включают:

- Дизайн печатной платы — панели заземления и медная шина питания.
- Конструкция печатной платы, приводящая к неравномерному распределению металла (обычно по причине большой панели питания или заземления), может вызвать деформацию печатной платы во время пайки, что вызвано различными коэффициентами теплового расширения у меди и эпоксидного стекловолокна. Если необходимы большие панели питания/заземления, может оказаться полезной поперечная штриховка медной поверхности.
- Положение/ориентация конденсатора на печатной плате по отношению к краю печатной платы и другим компонентам.

На рис. 3–5 даны некоторые рекомендации по ориентации и размещению конденсатора для уменьшения вероятности механического повреждения.

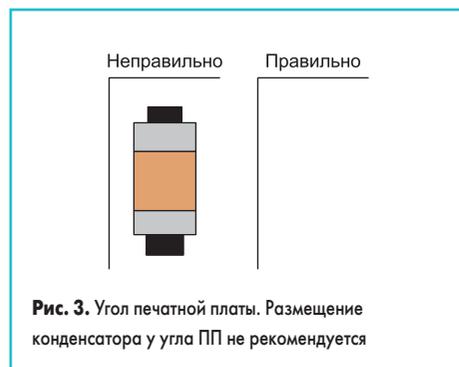
**Важно:** зона нагрузки обычно находится в пределах 5 мм от края платы или точки фиксации.

На рис. 6 даны рекомендации по форме площадки для конденсатора, что позволяет снизить вероятность механического повреждения.

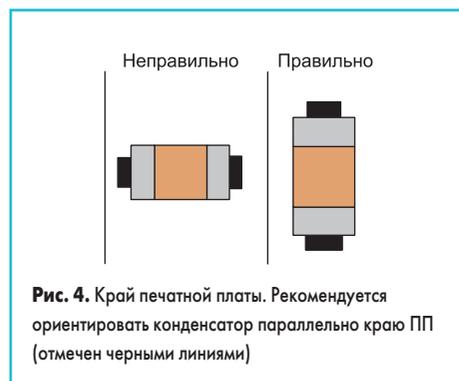
### Анализ процесса производства

Механическое растрескивание происходит после того, как конденсатор был припаян на свое место. Последующее изгибание печатной платы создает механическую нагрузку внутри конденсатора, и если она будет достаточно большой, это приведет к растрескиванию конденсатора.

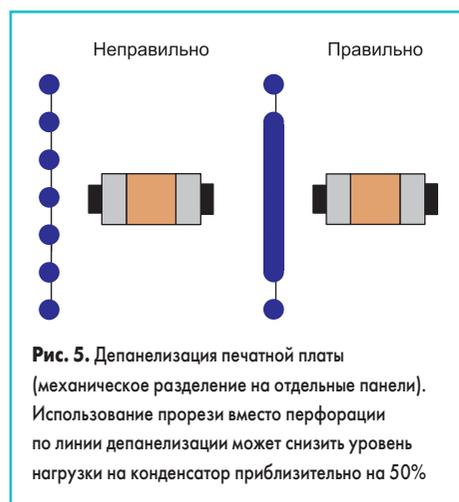
Когда механическое растрескивание становится причиной отказа конденсатора, потребитель обычно старается проанализировать все стадии производственного процесса, включая обработку и транспортировку, при которых возможны изгибы печатной платы. Если такой этап не очевиден, следующий шаг — удаление образцов конденсаторов с устройства на различных этапах процесса, а затем разделение на части/внутренний осмотр конденсаторов на наличие трещин. Форма механических трещин показана на рис. 1.



**Рис. 3.** Угол печатной платы. Размещение конденсатора у угла ПП не рекомендуется



**Рис. 4.** Край печатной платы. Рекомендуется ориентировать конденсатор параллельно краю ПП (отмечен черными линиями)



**Рис. 5.** Депанелизация печатной платы (механическое разделение на отдельные панели). Использование прорези вместо перфорации по линии депанелизации может снизить уровень нагрузки на конденсатор приблизительно на 50%



**Рис. 6.** Формы площадки и чипа. Уменьшение размера площадки может снизить уровень нагрузки на конденсатор примерно на 50%

Примером стандартного обследования может быть удаление конденсаторов из устройств после выполнения следующих шагов:

- пайка;
- депанелизация;
- установка радиальных компонентов, включая разъемы и ИС, в гнезда;
- автоматическое тестовое оборудование (АТЕ);
- установка готового узла на окончательную сборку.

**Определение механического отказа**

Не существует метода, способного на 100% гарантировать обнаружение механического растрескивания конденсатора. Успех проводимого тестирования зависит от величины механических трещин: чем шире трещины, тем больше вероятность отказа.

Приведем несколько примеров тестов, проводимых нашими клиентами:

- **Сухой жар/стабильное состояние.** На устройства, находящиеся в сухой горячей среде, подается питание для ускорения пробоя конденсаторов.
- **Влажный жар/стабильное состояние.** Питание подается на устройства, находящиеся во влажной горячей среде, с целью внедрения влаги в трещины, чтобы вызвать отказ конденсатора.
- **Циклическое изменение температуры.** Устройства подвергаются температурным циклам для расширения трещин, чтобы вызвать отказ конденсатора.
- **Вибрация и удар.** Устройства подвергаются испытаниям на вибрацию и удар с целью расширения трещины, чтобы вызвать отказ конденсатора.
- **Рентген.** Заказчики попробовали провести обнаружение механических трещин с помощью оборудования для рентген-исследования паяных соединений, но успех был очень незначительный.
- **Сканирующая акустическая микроскопия.** Проведение тестов зависело от имеющегося у заказчиков оборудования, и успешность этих тестов оказалась очень разной.

**Тестирование на изгиб**

Учитывая меры и анализы, обсужденные в предыдущей главе, иногда уже ничего нельзя сделать с точки зрения производственного процесса печатной платы, тогда внимание стоит переключить на физическую надежность самих конденсаторов. В этой и следующих главах мы рассмотрим несколько испытаний на изгиб, которым мы подвергали наши устройства, чтобы проверить их способность противостоять растрескиванию.

**Международные спецификации**

Международные требования к тестированию на изгиб содержатся в нескольких спецификациях:

1. IEC 60384-1:2001 Конденсаторы постоянной емкости для использования в электронном оборудовании. Часть 1. Общий раздел 4.35 «Испытания на изгиб» относится к IEC 60068-2-21.
2. IEC 60068-2-21: 2006 Испытания на воздействие внешних факторов. Тест U: прочность контактов и встроенных монтажных устройств. Раздел 8 теста Ue определяет испытание для оценки механической прочности контактов поверхностно монтируемых устройств при установке на подложку. Тест Ue1 определяет испытание на изгиб подложки. Цель теста Ue1 заключается в том, чтобы определить, могут ли конденсаторы выдерживать нагрузки от изгиба, которые будут возникать во время обычных операций при сборке или работе с устройством.
3. IEC 60068-2-21 относится к таким требованиям, как критерии отклонения и приемлемости, входящие в «соответствующую спецификацию». Компания Knowles Precision Devices поддерживает сертификацию продуктов IECQ CECC (Международная программа по сертификации качества Международной электротехнической комиссии — Комитета по электронным компонентам CENELEC), а «соответствующая спецификация» — QC 32100-A001:2007.
4. QC32100-A001:2007 «Таблица 2. Периодические испытания» — определяет минимальные требования к гибкости платы как Класс I COG/NP0 (1B/CG). Все типы. Класс II X7R (2R1): только Y и H (FlexiCap):
  - 3-мм отклонение — Класс I;
  - 2-мм отклонение — Класс II;
  - 1-мм отклонение — X7R (не FlexiCap-контакт).
5. AEC-Q200-005 Испытание на изгиб платы/прочность контактов. Минимальные требования, приведенные в таблице 2, эталонный тест на нагрузку 21: 2 мм (мин.) для всех, для Класс I — 3 мм.

**Метод испытания на изгиб**

Компания Knowles Precision Devices разработала серию испытаний на изгиб плат, выполненных из материалов FR4. Размеры платы составляют приблизительно 100×40×1,6 мм, толщина дорожек (35 ±10) мкм (рис. 7).

Образцы конденсаторов монтировались с помощью ручного манипулятора захвата

и установки деталей (рис. 8) на трафаретный припой SAC305 (96,5/3/0,5 Sn/Ag/Cu).

Затем печатная плата подвергалась испытанию на изгиб в соответствии с AEC-Q200-005 с использованием тестового устройства, специально созданного Knowles Precision Devices (рис. 9).

На рис. 10 показано приспособление для испытания на изгиб, прижимная головка из усиленной стали запрограммирована так, чтобы следовать профилю отклонения со скоростью линейного отклонения 1 мм/с и останавливаться в соответствии с AEC-Q200-005.

Требования AEC-Q200-005 определяют, что испытанию на изгиб должны подвергаться 30 компонентов из каждого образца продукта. Тестовые печатные платы Knowles Precision Devices монтируются с одним конденсатором и отклоняются автоматически, пока конденсатор не сломается. Компьютерная программа анализирует изменения емкости по данным измерителя емкости Agilent 4288A. Как только изменение емкости превышает 10%, величина отклонения изгиба записывается в миллиметрах. Максимальное отклонение машины составляет 10 мм.



Рис. 8. Способ установки конденсаторов



Рис. 9. Тестовая установка



Рис. 7. Пример используемой печатной платы

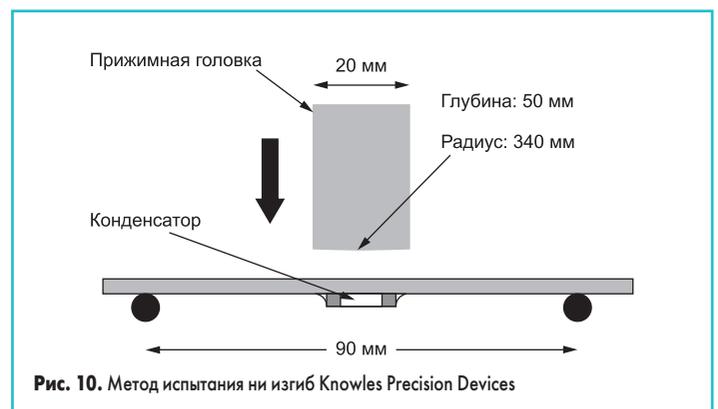


Рис. 10. Метод испытания на изгиб Knowles Precision Devices

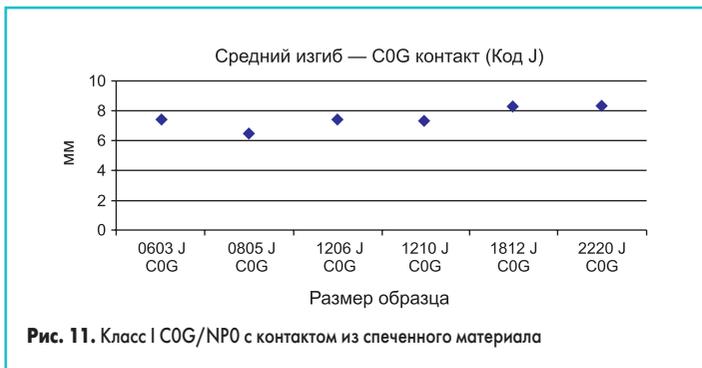


Рис. 11. Класс I C0G/NP0 с контактом из спеченного материала

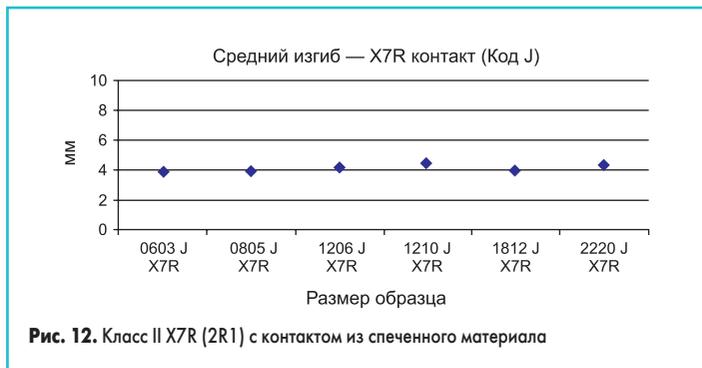


Рис. 12. Класс II X7R (2R1) с контактом из спеченного материала

Результат каждого из 30 компонентов сохранен как группа образцов в сети Knowles Precision Devices.

**Результаты испытания на изгиб**

**Диэлектрический анализ**

Основываясь на анализе данных по отказам, нельзя утверждать, что один любой размер чипа более подвержен отказу из-за трещин, чем другой. Однако выяснилось, что конденсаторы Класса I C0G/NP0 (1B/CG) редко встречаются в «случаях растрескивания».

Эта разница в механической прочности показана на анализе среднего изгиба контакта из спеченного материала для двух типов класса.

Можно видеть, что средний изгиб для Класса I C0G/NP0 (1B/CG) составляет обычно 7 мм, тогда как для диэлектриков Класса II среднее значение составляет 4 мм (рис. 11, 12).

**Усовершенствование гибкости конденсатора Knowles Precision Devices**

В 1999 году Knowles Ltd (Великобритания), ранее известная как Syfer Technology Ltd, представила свою линию материалов FlexiCap и стала первым производителем многослойных конденсаторов, который предложил заказчикам гибкие контакты.

В 2008 году ее величество королева Великобритании присудила премию Queen's Award за выдающиеся инновационные достижения Syfer Technology Ltd в отношении FlexiCap.

FlexiCap — полимерный контакт, который благодаря своей волокнистой структуре снижает механическую нагрузку, оказываемую на керамическую часть конденсатора, приблизительно на 50% (рис. 13).

Экстремальные температуры и химическая обработка не оказывают серьезного влияния

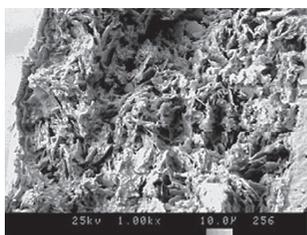


Рис. 13. Микроструктура полимерного контакта

на его механические и электрические свойства.

После полимеризации конденсаторы покрывают никелем и оловом, используя те же методы, что и для обычных конденсаторов с выводами из спеченного серебра/меди. Следовательно, характеристики пайки не меняются, а значит, нет необходимости в каких-либо изменениях процесса монтажа.

Было поставлено примерно 10 млн конденсаторов Класса II X7R (2R1) с полимерными контактами для оценки заказчиками. Анализируемые устройства имели много проблем, связанных с растрескиванием конденсаторов. Во время этих испытаний не было выявлено ни одной детали, которая бы сломалась из-за появления трещин.

**Анализ гибких контактов**

Использование материала для контактов FlexiCap для диэлектриков Класса II X7R (2R1) обеспечивает достаточную защиту диэлектрика от механической нагрузки при испытании на изгиб в соответствии с AEC-Q200-005.

На рис. 14 показаны результаты тестирования 160 образцов различных размеров из всей линейки материалов Knowles Precision Devices AEC-Q200 Класса II X7R (2R1). Можно видеть, что большинство деталей (примерно 95%) соответствует или превышает максимальное отклонение тестовой машины в 10 мм, которое обычно равно 10 кг веса, установленного на печатную плату. Важно также отметить, что оставшиеся 5% испытанных деталей превышают спецификацию AEC-Q200 по отклонению

в 2 мм более чем в 2 раза, причем самое малое отклонение в этой группе составляет 6,67 мм.

**Периодическое тестирование на изгиб**

Компания Knowles Precision Devices проводит периодическое тестирование образцов, что необходимо делать согласно всем спецификациям. Образцы отбираются из производственных партий и тестируются в соответствии с требованиями на стр. 10 Каталога Knowles Precision Devices MLC ([www.knowlesc capacitors.com/Support/Catalogs](http://www.knowlesc capacitors.com/Support/Catalogs))

Тестирование включает испытание P12, тест на изгиб платы по спецификации AEC-Q200-005. Это обеспечивает уверенность в том, что контакты Knowles Precision Devices FlexiCap соответствуют или превышают минимальные стандартные требования по гибкости.

**Заключение**

**Защита от механического растрескивания**

Для защиты конденсаторов от механического растрескивания после монтажа и депанелизации необходимо с помощью дополнительного оборудования проконтролировать изменение температуры, увеличение влаги, механическую нагрузку и вибрации, а также провести рентгеновский анализ, но все эти методы не дают полной гарантии обнаружения механических трещин. Поэтому целесообразнее сосредоточиться на увеличении сопротивления, чтобы снизить вероятность возникновения механических трещин.

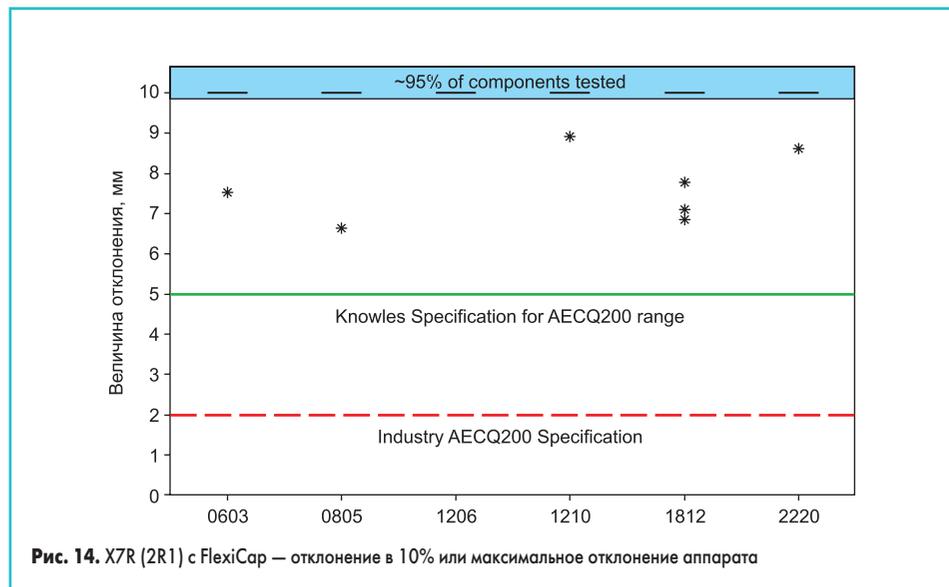


Рис. 14. X7R (2R1) с FlexiCap — отклонение в 10% или максимальное отклонение аппарата

**Сопrotивление механическому растрескиванию**

Сопrotивление механическому растрескиванию можно увеличить только двумя способами:

1. Снижение механической нагрузки, оказываемой на конденсаторы, в процессе производства и монтажа печатной платы.
2. Увеличение механической прочности компонента.

**Снижение механической нагрузки**

Хотя были рассмотрены некоторые потенциальные причины возникновения механических трещин и предложены меры по их корректировке, стремление электронщиков увеличивать плотность компонентов на платах не снизило механическую нагрузку, оказываемую на компоненты.

Поэтому сегодня проектировщики электроники испытывают потребность в компонентах с высокой механической прочностью, которая значительно превышает минимальный отраслевой стандарт.

**Увеличение механической прочности**

Диэлектрический анализ показал, что диэлектрические материалы Класса II X7R (2R1), использующие спеченные материалы для контактов, механически слабее, чем диэлектрические материалы с выводами со спеченным материалом Класса I C0G/NP0 (1B/CG). Фактически Класс I C0G/NP0 (1B/CG) имеет механическую прочность почти вдвое лучше, чем у Класса II X7R (2R1), таким образом, Класс II X7R (2R1) явно не соответствует требованиям проектировщиков в отношении повышенной сопротивляемости механическому растрескиванию.

Анализ материалов с полимерными контактами, описанный в статье, четко показал, что при выборе материала для контактов Knowles Precision Devices FlexiCar для диэлектриков Класса II X7R (2R1) сопротивление компонентов механическому растрескиванию значительно увеличивается за счет поглощения нагрузки материалом контакта. Таким образом, за счет достижения этого более высокого уровня механической эффективности материалы Knowles Precision Devices могут гарантировать отклонение в 5 мм при тесте на изгиб для компонентов АЕС-Q200.

Важно отметить, что FlexiCar может также применяться для компонентов Класса I C0G/NP0 (1B/CG) для достижения аналогичного отклонения, как и у компонентов Класса II X7R (2R1).

**Сергей ШИХОВ, технический директор «А-КОНТРАКТ»:**

Требования к надежности становятся очередным вызовом уже не только для производства специальной (авионика, космос) и автомобильной техники. Аналогичные требования предъявляются и к устройствам гражданского назначения, например к квадрокоптерам.

Разработчикам становятся доступны новые системы расчета параметров в современных средах проектирования, и они получают результаты по надежности, приближенные к «боевым». Производители же, как обычно, заинтересованы в расширении рынков сбыта за счет предложения новых возможностей за дополнительную плату.

История развития электроники показывает: процесс замещения старых типов компонентов на современные неизбежен. Поэтому надо обязательно пользоваться новыми возможностями там, где надежность стоит на первом месте.

**Резюме**

- Стремление к уменьшению форм-факторов в электронных функциональных возможностях привело к увеличению плотности установки компонентов на платы, что повысило механическую нагрузку на компоненты. Это в свою очередь привело к повышению требований инженеров-электронщиков к механической прочности компонентов.
- Knowles Precision Devices остается лидером в сфере гибких контактов, представив в 1999 году FlexiCar, завоевавший множество наград.
- Компоненты с контактами с FlexiCar имеют более высокую сопротивляемость механическому растрескиванию, отвечая потребностям проектировщиков в компонентах, значительно превышающих минимальные отраслевые стандарты по гибкости, что дает возможность Knowles Precision Devices гарантировать отклонение в 5 мм при тесте на изгиб для компонентов АЕС-Q200.