

Печатные платы для аэрокосмических систем терморегуляции

По мере развития летательных аппаратов, увеличения дальности и скорости полета и расширения их применения (например, в космосе) управление температурным режимом становится все более важной задачей. Системы терморегуляции (TCS) отвечают за поддержание желаемой температуры внутри аппарата вне зависимости от влияния внешних условий окружающей среды.

Команда Sierra Circuits

Перевод: Сергей Шихов

sergey@aconr.ru

Электронные системы являются главным элементом устройств, предназначенных для эксплуатации в аэрокосмической технике. Надежность и срок службы таких систем в первую очередь зависят от состояния используемых печатных плат. Постоянное воздействие колебаний температур может привести к их преждевременному выходу из строя, что неприемлемо для электроники ответственного применения, а значит, точный термоконтроль для этого вида устройств является критически важным фактором.

Пол Кук (Paul Cooke), руководитель департамента полевых тестирований компании AGC, рассказывает о различных методах управления отводом тепла в печатных платах, предназначенных для использования в аэрокосмической технике.

<https://www.protoexpress.com/blog/pcb-aerospace-thermal-control-system/>

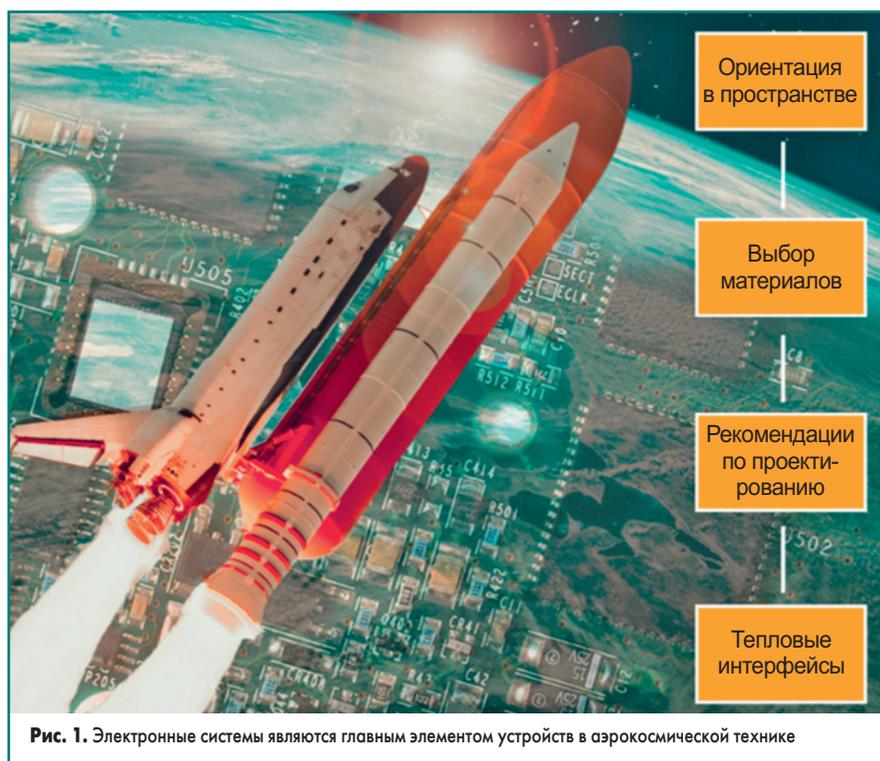


Рис. 1. Электронные системы являются главным элементом устройств в аэрокосмической технике

Что такое системы терморегуляции?

Системы терморегуляции космического аппарата предназначены для поддержания уровня температуры оборудования, систем полезной нагрузки (максимальной грузоподъемности) и пусковых установок на всех этапах космического полета. Эти системы защищают авиакосмическую технику и обеспечивают оптимальное и надежное выполнение операций, поддерживая желаемый диапазон температур в течение всего срока службы летательного аппарата. Более того, данные системы также обеспечивают эффективную работу чувствительных электронных компонентов.

Оптимальная температура воздушного судна/космического корабля зависит от количества тепла, поступающего в устройство, хранящегося в нем и выделяемого из него.

Структурные и электрические методы управления тепловой средой

Эффективное управление системами терморегулирования в аэрокосмической отрасли включает в себя следующие факторы.

Ориентация космических аппаратов в пространстве

- Ориентация космических аппаратов играет жизненно важную роль в обеспечении термической стабильности. Часто для удовлетворения эксплуатационных требований необходимо изменить направление движения аппарата. Направление определяется количеством рассеиваемого тепла. Даже если количество рассеиваемого тепла не определено, изменение ориентации позволяет контролировать температуру.
- Этот метод также можно комбинировать с другими элементами (например, радиатором).

Выбор материалов

Хорошей практикой является выбор материалов компонентов и печатных плат в соответствии с воз-

возможностями теплопередачи и тепловыми потерями в диэлектрике. Материалы плат должны соответствовать условиям СТЕ (коэффициент теплового расширения), подходящим для приложений с высокой надежностью. Лучше выбрать материал печатной платы с низкими потерями, чтобы уменьшить потери мощности.

Пол Кук считает, что полиимид — хрупкий материал, склонный к образованию микротрещин, особенно в случаях плоских печатных плат с большим количеством тяжелой меди. В идеале материалы плат для космического применения должны иметь низкий СТЕ с низким коэффициентом затухания и быть подходящими для использования с высокоскоростными контактами, что позволяет снизить вероятность образования микротрещин. Этим требованиям удовлетворяет, например, ПТФЭ.

Рекомендации по проектированию печатных плат для аэрокосмических применений

- Для увеличения оттока тепла от платы к корпусу установка ее в корпусе изделия может осуществляться с помощью специальных клиновых замков.
- Другой способ отвести тепло от элементов электронного модуля — увеличить количество медных слоев внутри каждой платы.

Тепловые интерфейсы

- Метод монтажа определяет тепловой контакт между компонентами и при необходимости облегчает теплообмен с элементом конструкции.
- Теплообмен можно увеличить за счет:
 - использования поверхностей из материалов с хорошей теплопроводностью;
 - крепления компонентов с помощью большего количества крепежных элементов (если позволяет конструкция платы).
- Уменьшить теплопередачу можно, установив компонент через стек прокладок с меньшей теплопроводностью.

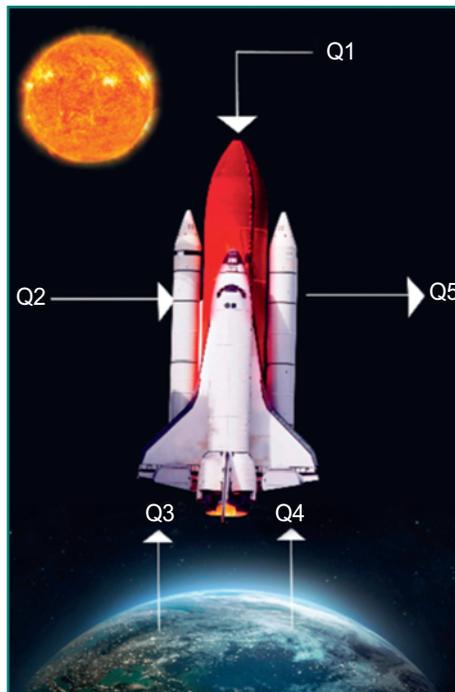


Рис. 2. Теплопередача на примере орбитального самолета

Q1 — тепло, вырабатываемое космическим кораблем, зависит от эффективности и мощности аэрокосмических компонентов;
 Q2 — тепло, полученное от Солнца, зависит от расстояния от Солнца и поглощающей способности поверхности космического корабля;
 Q3 — солнечное тепло, отраженное от планеты, зависит от поглощения солнечной энергии поверхностью и планеты;
 Q4 — инфракрасное тепло от планеты, которое складывается из инфракрасного излучения планеты и переизлучения (отраженного инфракрасного излучения от других поверхностей, например, облаков);
 Q5 — тепловое излучение от корабля, которое состоит из тепла от отраженного инфракрасного излучения и тепла, полученного от разницы температур между радиатором космического корабля и приемником отводимого тепла.

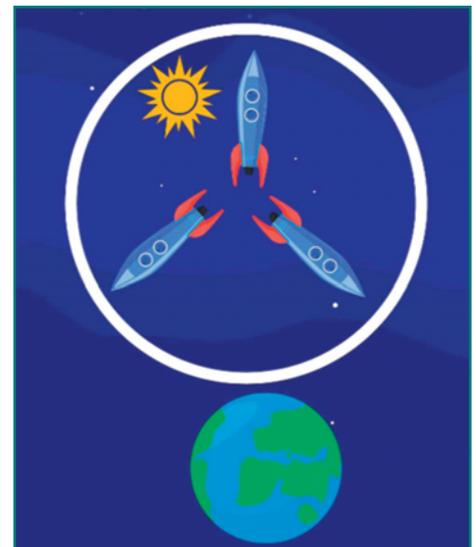


Рис. 3. Ориентация космического корабля в пространстве

Важные аспекты печатных плат в системах регулирования температуры

Надежность печатных плат чрезвычайно важна для эффективного функционирования аэрокосмических аппаратов. Ниже перечислены некоторые ключевые элементы сборок печатных плат, предназначенных для эксплуатации в системах терморегуляции.

Конформные покрытия

Конформное покрытие на печатной плате защищает ее от коррозии, суровых условий окружающей среды и агрессивных химикатов. Для таких покрытий используются различные материалы, например, акриловые полимеры, уретан, силиконовые и эпоксидные смолы, парилен и т. д. Выбор материала зависит от нескольких факторов: диапазона рабочих температур, образования конденсата, ремонтпригодности и снижения вероятности образования дефектов пайки, например, так называемых усов олова. Индивидуальное сочетание свойств каждого материала позволяет подобрать подходящий вариант для любого применения. Так, париленовое покрытие обеспечивает отличное проникновение в трещины, является идеальным барьером и изолятором, обладает высокой термической и УФ-стабильностью. Это оптимальный выбор для аэрокосмической отрасли.

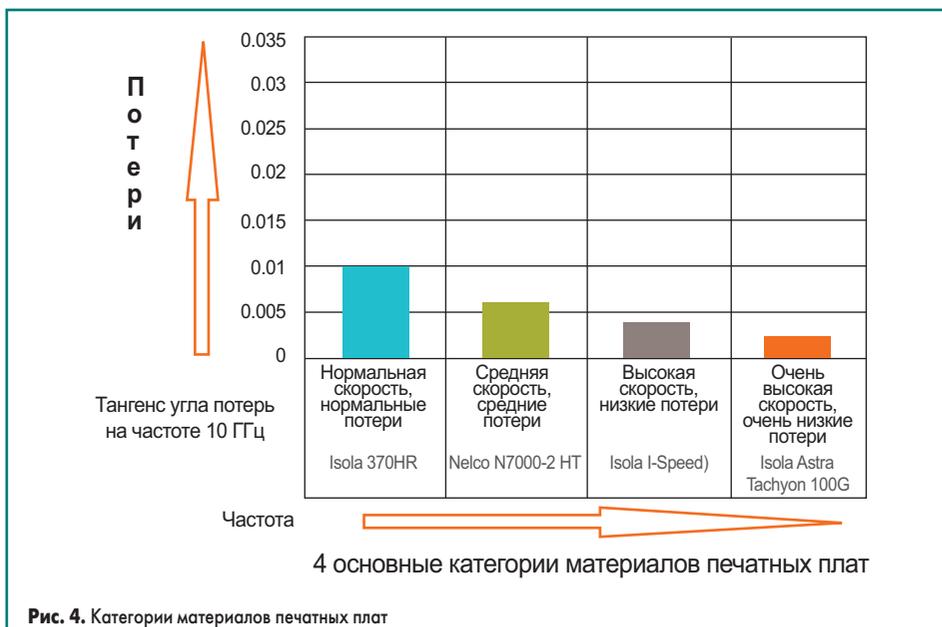


Рис. 4. Категории материалов печатных плат

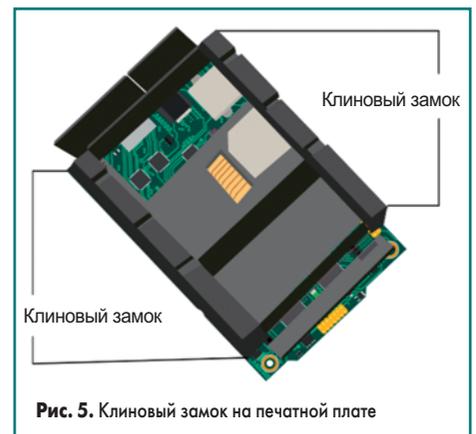


Рис. 5. Клиновый замок на печатной плате

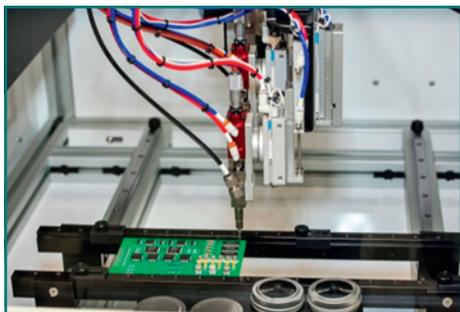


Рис. 6. Нанесение конформного покрытия с помощью роботизированной системы

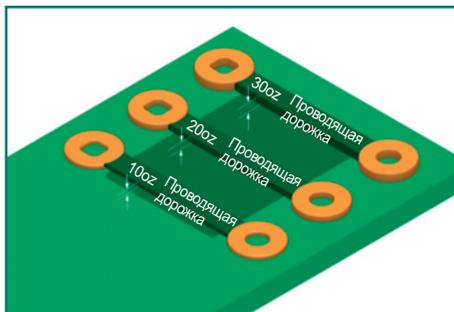


Рис. 7. Плата с толстым слоем меди. 1 oz соответствует ~35 мкм толщины

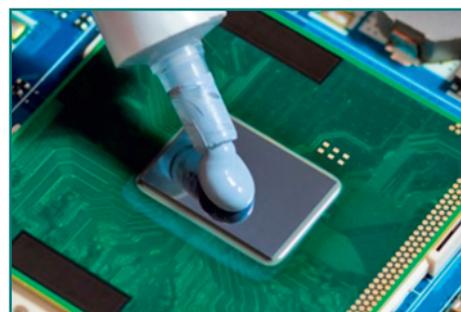


Рис. 8. Термопаста, нанесенная на чип

Рассеивание тепла

Рассеивание тепла — процесс удаления избыточного тепла с печатной платы, а также передача тепла путем управления тепловым сопротивлением (сопротивлением тепловому потоку). Для обеспечения хорошей теплопроводности необходимо:

- Выбирать компоненты, соответствующие стандартам аэрокосмического производства.
- Выбирать для изготовления печатных плат материалы, подходящие для использования в ограниченных пространствах.
- Тщательно анализировать температурные пределы уже на стадии проектирования.
- Проводить термический анализ для обеспечения рассеивания.

Эти меры способствуют хорошей проводимости, а значит, и лучшему рассеиванию тепла. Плохая теплопроводность, напротив, создает серьезные проблемы, такие как повреждение компонентов, деградацию, расслоение и даже воспламенение из-за чрезмерного нагрева.

Ниже перечислены некоторые способы отвода тепла на плате:

- Использование медного покрытия с большой толщиной.
- Установка теплоотводов.
- Использование вентиляторов для охлаждения.
- Оптимальное расположение компонентов на плате.
- Использование переходных отверстий для отвода тепла.
- Другие способы охлаждения.

При выборе способа охлаждения необходимо учитывать также и актуальные тенденции и технологии.

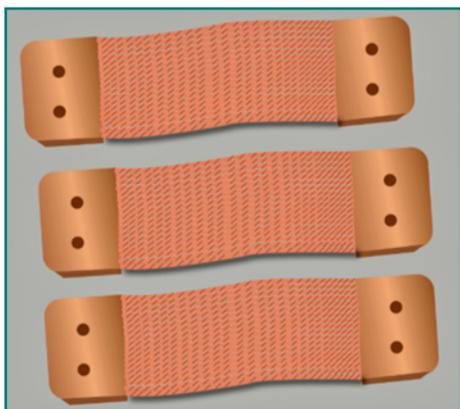


Рис. 9. Термопрокладки

По словам Пола Кука, наиболее эффективно тепло рассеивается при соединении переходных отверстий для отвода тепла с радиатором. Другой способ — вывод плоскости заземления на медные торцы плат, после чего плата вставляется в корпус и начинает рассеивать тепло.

Дополнительные элементы

При сборке печатных плат для систем терморегулирования в аэрокосмической технике следует выбирать компоненты с жесткими допусками (1–2%), способные выдерживать большие токи. Использование элементов с более высоким коэффициентом безопасности позволит гарантировать надежность печатных плат в экстремальных условиях и повысит долговечность и эффективность всей конструкции. Например, проводящая трасса, по которой протекает ток силой 1 А, может быть рассчитана на силу тока 2 А (соответствие коэффициенту безопасности 2), что предотвратит ее перегрев.

Соответствие нормативным требованиям

Аэрокосмическая отрасль очень требовательна, поэтому важно, чтобы все материалы, компоненты и технологические процессы соответствовали перечисленным ниже стандартам:

- AS 9100: Системы менеджмента качества в авиакосмической промышленности.
- IPC 2220: Проектирование и изготовление печатной платы.
- IPC-A-600: Критерии приемки печатных плат.

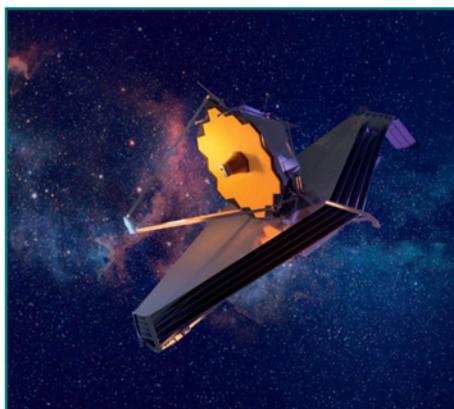


Рис. 10. Солнцезащитные щиты

- IPC-J-STD-001 и его версия H: Требования к электрическим и электронным сборкам, изготавливаемым с помощью пайки.

Типы систем терморегулирования

Существует два типа терморегулирования в аэрокосмической отрасли: пассивный и активный.

Пассивные системы контроля температуры

Такие системы контролируют постоянную температуру компонентов без использования устройств с питанием. Пассивные системы предпочтительны в тех случаях, когда установлены жесткие требования к низкой мощности, массе и объему изделия.

Многослойная изоляция

Многослойная изоляция MLI состоит из нескольких внутренних слоев тонкого материала с низким коэффициентом излучения и внешнего слоя (обычно это какой-то прочный материал). MLI действует как барьер для теплового излучения, который защищает космический корабль от поступающего солнечного и инфракрасного потока, а также предотвращает нежелательное рассеивание тепла и контролирует температурный диапазон всей электроники (включая печатные платы) и батарей на орбите. Но существуют и некоторые проблемы, связанные с MLI. Например, любое сжатие или повреждение слоев MLI может привести к коротким замыканиям, поэтому лучше избегать использования MLI на внешней поверхности небольших спутников, которые выводятся на орбиту с помощью устройств для развертывания.

Материалы для теплового обмена

Такие материалы увеличивают кондуктивную теплопередачу между двумя компонентами. Они выпускаются в различных формах: в виде смазки, пасты или листов. Например, для снижения температуры между монтажной поверхностью и теплоотводящей электроникой можно использовать тонкие листы такого материала.

Эффективность этих материалов зависит от контактного давления, необходимого для теплопередачи. Так, для чипов с высоким рассеиванием тепла необходимо применение контактных площадок большей толщины. Выбор

конкретного материала зависит от требуемых свойств: теплопроводность, толщина, электрическая изоляция, температурный диапазон и т. д.

По мнению Пола Кука, наилучшим материалом является COOLSPAN, поскольку он тепло- и электропроводен.

Термопрокладки

Термопрокладки — это гибкие элементы, передающие тепло от его источника к радиатору, используются между чипами или компонентами с высоким тепловыделением и стенкой корпуса или поверхностью радиатора. Благодаря гибкости такие элементы не создают нагрузки на конструкцию. Термопрокладки изготавливаются с использованием меди, алюминия или графита (из-за высокой проводимости) и состоят из кабелей или многочисленных листов фольги с концевыми блоками, удерживающими их на месте. Для больших космических аппаратов применяются комбинированные (из нескольких материалов) прокладки более чем с двумя концевыми блоками.

Солнцезащитные устройства

Солнцезащитные щиты представляют собой устройства, которые уменьшают солнечный поток, попадающий на космический корабль, закрывая обзор Солнца. Они могут работать несколько месяцев при температуре ниже 100 К на низкой околоземной орбите.

Тепловые трубки-передатчики

Этот способ пассивной передачи тепла представляет собой систему с замкнутым контуром, которая передает избыточное тепло от электрических узлов к более холодной поверхности (радиатору или теплоотводу).

Радиаторы

Радиаторы — элементы, передающие чрезмерное тепло через теплообмен излучением. Такие устройства обеспечивают терморегуляцию благодаря низкому поглощению солнечной энергии и высокой излучательной способности ИК-излучения. В аэрокосмической отрасли для улучшения тепловых характеристик часто применяются раздвижные радиаторы.

Активные системы термоконтроля

Такие системы требуют подвода напряжения и являются более эффективными для жесткого контроля температур.

Криохладители

Криохладители предназначены для криогенного охлаждения — метода, при котором охлаждение материала происходит при помощи чрезвычайно низких температур. Криохладители представляют собой устройства, охлаждающие до температуры ниже 100 К. В космосе такие охладители используются в высокоточных ИК-датчиках, интерферометрах и спектрометрах, эффектив-

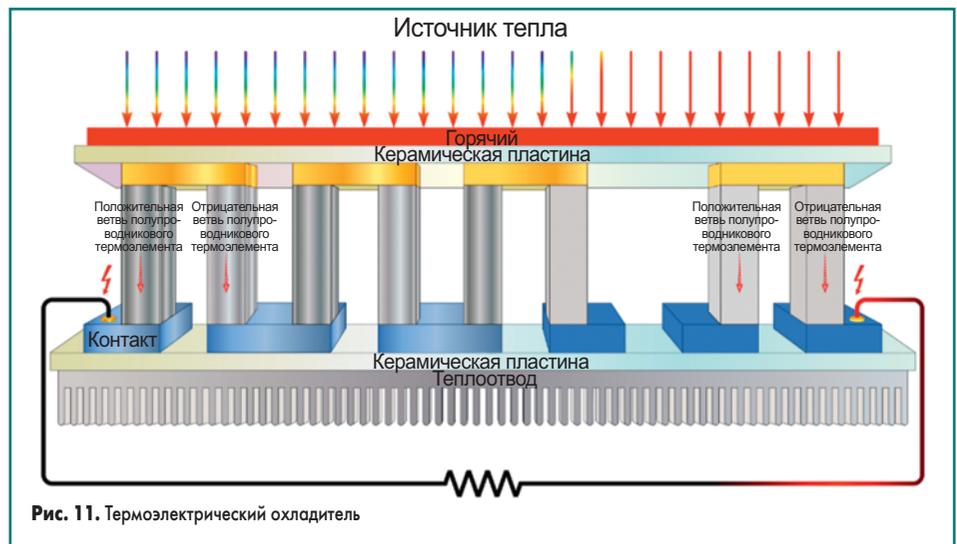


Рис. 11. Термоэлектрический охладитель

но работающих при низких температурах. Преимущества криохладителей:

- минимальные вибрации;
- высокая термодинамическая эффективность;
- длительный срок службы;
- температура охлаждения менее 50 К.

Нагреватели

Каптоновые нагреватели используются для поддержания температуры батарей небольших космических аппаратов, в электронике которых, как правило, предусмотрены печатные платы с подложкой из полиамида. Для терморегуляции в небольших спутниках обычно применяются маломощные нагреватели, способные контролировать температурный режим во время затмения Солнца и обеспечивать термическую стабильность биологических объектов.

Термоэлектрические охладители (ТЕС)

Такие системы используют эффект Пельтье — термоэлектрическое явление переноса энергии при прохождении электрического тока в месте контакта двух разнородных проводников, от одного проводника к другому. В результате происходит рассеивание избыточной температуры с помощью теплообменника. ТЕС работает за счет тока, который протекает через керамические подложки, вследствие чего возникает разница температур. Таким образом получается, что одна сторона ТЕС холодная, а другая горячая.

Активный тепловой контроль включает и другие методы — например, использование

жидкостных контуров, активное управление температурным режимом и т. д.

Три важных совета, касающихся проектирования и производства печатных плат для систем терморегулирования в аэрокосмической технике:

1. Классифицируйте компоненты по термическим характеристикам и при проектировании печатной платы группируйте вместе компоненты со схожими тепловыми свойствами. Всегда выбирайте комплектацию и материалы, предназначенные для использования в условиях космического пространства, это позволит обеспечить системе максимальную надежность.
2. Датчики положения размещайте вблизи целевой зоны. При конструировании датчиков крайне важно учитывать, в каком именно месте космического аппарата они будут использоваться.
3. При сборке печатных плат помните о производственных и эксплуатационных температурных ограничениях. Так, при выборе материалов следует учитывать устойчивость к нагрузкам в соответствии с температурными ограничениями.

В заключение Пол Кук говорит о том, что надежность печатных плат закладывается уже на этапе проектирования и сильно зависит от производственных характеристик, таких как минимальная толщина покрытия, качество поверхности и т. д. Перед изготовлением плат разработчику необходимо убедиться, что выбранный им производитель способен выпускать продукцию требуемого уровня, а именно класса 3.

Комментирует Сергей ШИХОВ, директор по управлению проектами «А-КОНТРАКТ»:

Методы терморегуляции для аэрокосмического применения сильно отличаются от способов контроля температуры в приборах, которые эксплуатируются в атмосферных условиях.

Практически единственным методом теплоотвода в электронных системах аэрокосмической техники является излучение. Для его реализации разработчику необходимо знать и применять соответствующие материалы, компоненты и технологии, а кроме того, следует учитывать параметры газовыделения материалов в условиях вакуума и при высокой термической нагрузке.

