ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ И ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ ВСТРАИВАЕМЫХ КОНДЕНСАТОРОВ И РЕЗИСТОРОВ

АЛЕКСАНДР ПОЛИКАРПОВ, инженер

Для обеспечения высокой плотности монтажа и повышения эффективности систем на основе многослойных печатных плат все чаще применяются встраиваемые конденсаторы и резисторы. Так, например, емкостные слои устанавливаются в вертикальную структуру печатной платы вместо уже созданных, а вместо традиционных проводников применяются встраиваемые резисторные элементы. В этой статье рассматриваются особенности и основные преимущества этих встраиваемых технологий.

Для корректной установки очень тонких слоев (около 25 мкм толщиной) в структуру платы требуется соответствующая технология. Во встраиваемых конденсаторах применяется планарный тонкий омедненный слоистый материал – ламинат (см. рис. 1). Эти ламинаты используются вместо развязывающих конденсаторов, которые обычно устанавливаются рядом с микросхемой. Эта ИС соединяется с емкостным слоем с помощью сквозных переходных отверстий. Ламинаты представляют собой вставные слои из разных диэлектриков и разной толщины, которые устанавливаются в многослойные платы взамен других слоев. Например, во встраиваемом планарном ламинате DuPont HK04 используется омедненный полиимидный внутренний слой толщиной 0,025 мм, который функционирует как идеальный конденсатор (см. рис. 2). Оба плакирующих слоя играют роль обкладки конденсатора: два

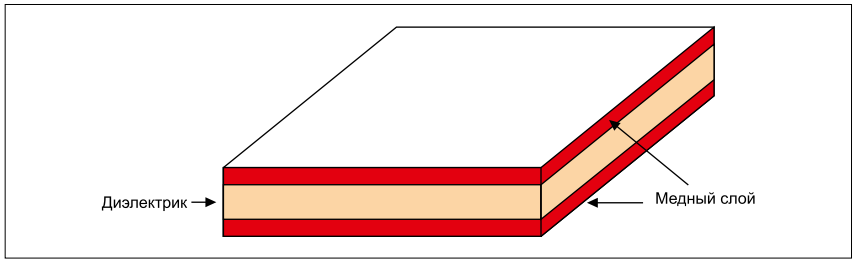

Рис. 1. **Базовая структура емкостного слоя – омедненный диэлектрик**

Рис. 2. **Эта более надежная технология позволяет решить многие проблемы проектирования печатных плат и обеспечить подачу питания при той же и даже меньшей стоимости**

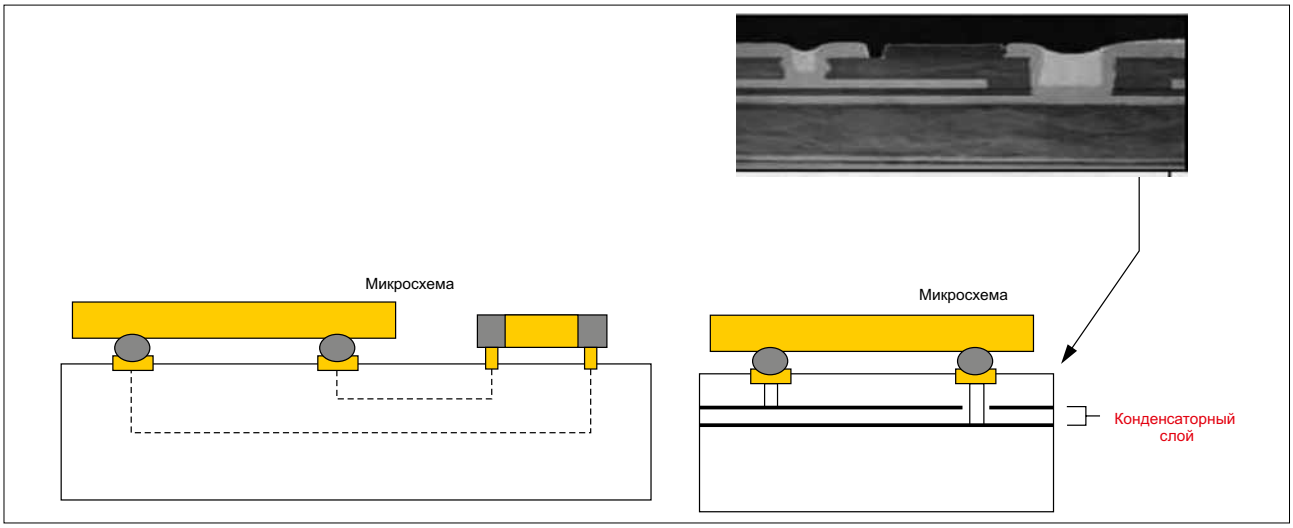

Рис. 3. **Слева: традиционный; справа: встраиваемый конденсатор**

глухих переходных отверстия (или два сквозных отверстия) соединяются с медными плоскостями, образуя конденсатор. Некоторые производители, например 3M и Oak-Mitsui, внутренние слои изготавливают из эпоксидного полимера, что обеспечивает высокую диэлектрическую проницаемость таких изделий, как например, МЭМС-микрофоны.

На рисунке 3 показана разница между традиционным и встраиваемым конденсаторами. Заметим, что в случае применения конденсаторного слоя площадь платы становится меньше.

УСТАНОВКА СЛОЯ

Как правило, емкостные слои устанавливаются, начиная с промежутка между вторым и третьим слоями. В общем случае, место установки емкостных слоев – между (n–2) и (n–1) слоями (см. рис. 4).

Наиболее крупными производителями встраиваемых ламинатов являются следующие компании:

- 3M: ламинаты ECM (очень тонкие эпоксидные слои с керамическим наполнителем);
- DuPont Interra: HK04J (диэлектрический слой только из полиимида);
- Oak-Mitsui: FaradFlex (эпоксидный ламинат или слой полимера другого типа на полимерной пленке).

ПРЕИМУЩЕСТВА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВСТРАИВАЕМЫХ ЛАМИНАТОВ

Известно немало преимуществ использования встраиваемых конденсаторов (а также других встраиваемых компонентов) на печатных платах (ПП). К этим достоинствам относятся механические и электрические характеристики.

ПРЕИМУЩЕСТВА ПРОЕКТИРОВАНИЯ С ПОМОЩЬЮ ВСТРАИВАЕМЫХ СЛОЕВ

Одной из главных причин использования встраиваемых ламинатов заключается в обеспечении экономии занимаемого пространства ПП за счет уменьшения числа компонентов на ее поверхности. Все развязывающие конденсаторы, а также более чем 40% шунтирующих конденсаторов можно заменить встраиваемыми.

Благодаря меньшему размеру платы сокращается ее вес и во многих случаях толщина, что позволяет задействовать больше функциональных возможностей и установить дополнительные слои. Однако при меньшем количестве слоев (и, следовательно, при более тонкой общей панели) уменьшается отношение высоты к диаметру сквозных металлизированных отверстий, а использование меньшего числа компонентов на поверхности платы позволяет уменьшить общее число этих отверстий. Кроме того, улучшается трассировка плат. Решение проблем с возникновением шума на ранних этапах разработки не только сокращает ее время, но и улучшает характеристики схемы. Все эти преимущества позволяют уменьшить стоимость реализации проекта.

УЛУЧШЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Помимо экономии материалов, занимаемого места на ПП, времени на проектирование и других упомянутых выше преимуществ имеются и другие факторы, благодаря которым предпочтение отдается использованию встраиваемых емкостных слоев. Главным из этих факторов является более высокая надежность за счет меньшего числа соединений. Имеется и немало других преимуществ, связанных с электротехнической частью проекта:

- значительно меньше шум шины питания;
- меньшая индуктивность;
- меньше шум между питанием и заземлением;
- меньше коммутационный шум;
- в схемах со смешанными сигналами в аналоговых цепях меньше помех от цифровых цепей;
- меньше импеданс и в меньшей мере выражен резонанс в цепях;
- благодаря более короткому тракту при необходимости осуществляется мгновенная зарядка;
- меньше потребность в мерах по обеспечению ЭМС;
- отсутствие проблем с анодно-проводящими волокнами базового материала ПП;
- повышаются функциональные возможности трассировки.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Благодаря большим допускам, более высокому температурному потенциалу и лучшим характеристикам, реализованным с помощью встроенных конденсаторов, соответствующие ПП можно применять в широком ряду приложений. К ним относятся: телекоммуникационные системы (маршрутизаторы, серверы), твердотельные накопители, МЭМС-микрофоны, торговое оборудование, носимая и потребительская электроника, ВЧ-фильтры, суперкомпьютеры, контрольно-измерительное оборудование, военная, авиакосмическая и медицинская техника.

ВСТРАИВАЕМЫЕ РЕЗИСТОРЫ

Идея использовать встраиваемые в платы резисторы в качестве нагревательных элементов не нова. В прошлом эти резисторы применялись для повышения температуры критически важных компонентов, чтобы оптимизировать рабочие характеристики. В качестве примеров можно привести платы с полуактивным лазером в управляемых боеприпасах и платы рентгеновского спектрометра в посадочном модуле «Бигль-2» для исследований в рамках миссии «Марс-экспресс» (см. рис. 5).

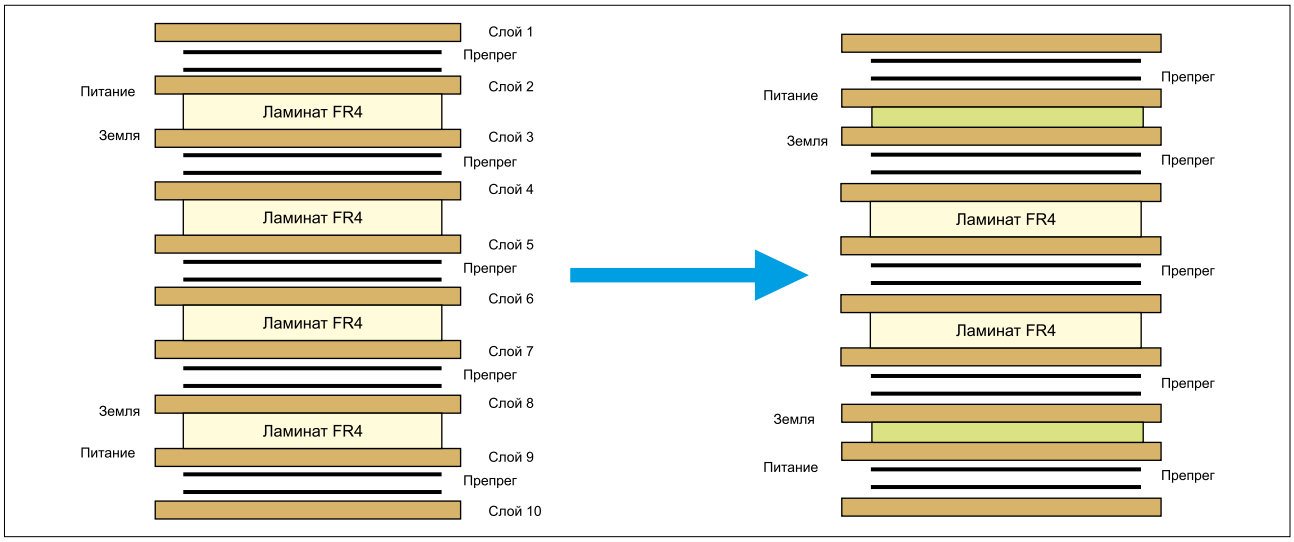

Рис. 4. **Омедненные внутренние слои (показаны зеленым цветом) устанавливаются вместо внешних слоев**

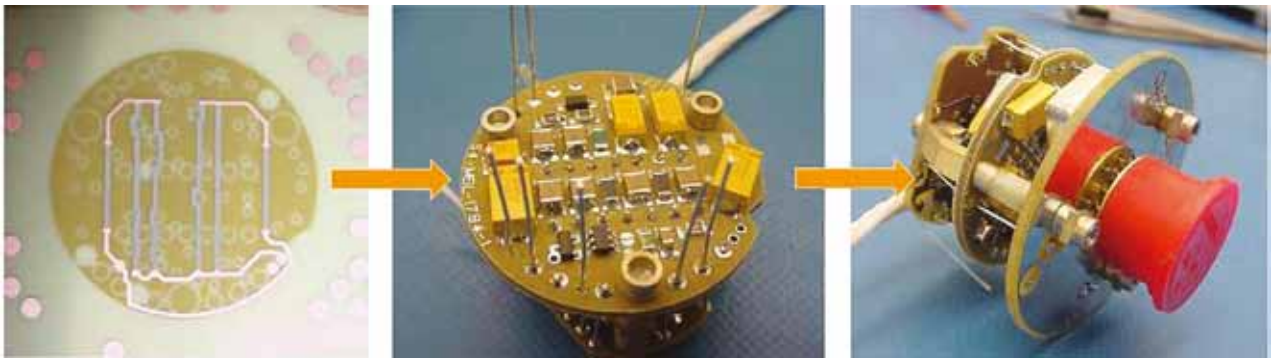

Рис. 5. **Плата рентгеновского спектрометра**

В еще одном приложении для космической техники потребовалось реализовать механизм расплавления пластиковых крепежных деталей солнечных панелей, которые удерживались в сложенном состоянии при запуске модуля и раскрывались после его выхода на орбиту. Размеры встроенного нагревателя должны были соответствовать определенным требованиям к занимаемому пространству, режиму питания и уровню надежности.

ВСТРАИВАЕМЫЙ РЕЗИСТОР И МАТЕРИАЛ НАГРЕВАТЕЛЯ

Тонкопленочный материал встраиваемого резистора состоит из слоя никель-фосфорного резистивного сплава, подложки и медной фольги [1] (см. рис. 6). Этот резистивный проводящий материал обрабатывается субтрактивным методом (печати и травления) до образования тонкопленочных резисторов, которые можно применять в качестве нагревательных элементов. Использование резистивного проводящего материала в схеме не требует добавления еще одного слоя в ПП, поскольку сформированные резисторы, как правило, входят в состав уже имеющегося на ней слоя.

РАЗРАБОТКА ВСТРАИВАЕМЫХ НАГРЕВАТЕЛЕЙ

В начале разработки требуется задать мощность нагревателя и размеры обогреваемой площади.

Рассмотрим подложку ПП, которая работает как канал для встраиваемого нагревателя. Основным параметром подложки является температура стеклования, или $T_{СТ}$. Прилегающие к подложке материалы выбираются так, чтобы обеспечить устойчивую рабочую температуру нагревателя. Например, если нагреватель непрерывно эксплуатируется при 200°C, материал основы выбирается так, чтобы достигалось именно это значение температуры. Максимальная номинальная температура стеклования, которую обеспечивают образцы FR-4, составляет 170°C, тогда как у полиимидов и полиимидных стеклопластиков она равна 250°C [2]. В таблице сравниваются значения $T_{СТ}$ нескольких материалов подложки. Производители ПП и ламинатов предоставляют более полную информацию по лучшим диэлектрикам для проектируемых приложений.

На следующем этапе разработки после выбора подходящего материала для изготовления подложки рассматривается размещение слоев ПП. Расположение нагревательного элемента под требуемым объектом на поверхности платы или на внутреннем слое непосредственно под этим объектом обеспечивает большее нагревание и меньшие потери в прилегающих материалах. Внутренние или поверхностные слои, толщина ПП и медные плоскости, работающие как теплоотводы, влияют на характеристики нагревателя. При использовании ПП с несколькими интерфейсами материалов оптимизация лучше всего обеспечивается с помощью средств моделирования динамики тепловых процессов.

Количество требуемой энергии определяет размер схемы нагревателя. При проектировании рассчитываются размеры нагревателей и требуемая мощность так, чтобы эти элементы помещались в заданном объеме. Резистивные проводящие NiP-материалы поставляются с разными значениями удельного сопротивления слоя.

Значения удельного сопротивления слоя находятся в диапазоне 10–250 Ом

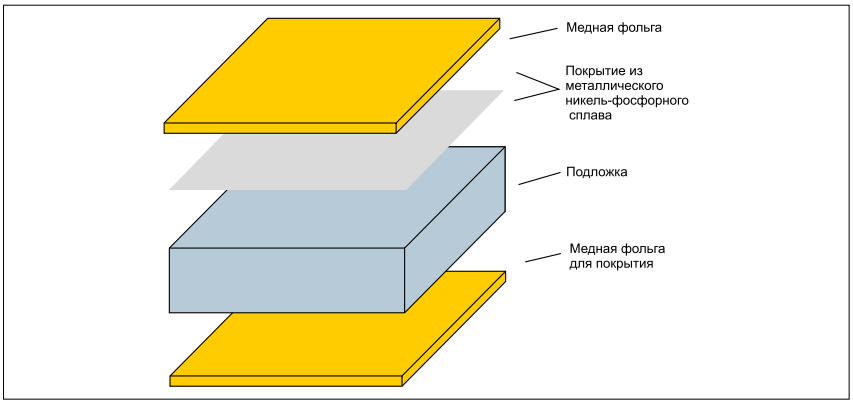

Рис. 6. **Строение резистивного проводящего ламината**

Таблица. **Сравнение значений температуры стеклования нескольких материалов, используемых для изготовления подложек [2]**

Спец. IPC	Усиление	Смоляной состав	ID	$T_{СТ}$, °C	Dk @ 1 МГц
IPC-4101B/21	стекловолокно из стекла марки E	дифункциональная эпоксидная смола*, многофункциональная эпоксидная смола**, негорючий	NEMA FR-4, UL/ANSI FR-4/21, MIL-S-13949/04 GF/GFN/GFK/GFP/GFM	110	5,4
IPC-4101B/24			NEMA FR-4, UL/ANSI FR-4/24, MIL-S-13949/04 GF/GFG/GFN	150	
IPC-4101B/26			NEMA FR-4, UL/ANSI FR-4/26, MIL-S-13949/04 GF/GFT	170	
IPC-4101B/40		полиимид	UL/ANSI GPY, MIL-S-13949/10 GI/GIN/GIJ/GIP/GIL	200	
IPC-4101B/41		полиимид	UL/ANSI GPY, MIL-S-13949/10 GIL/GIP	250	
IPC-4101B/42		полиимид*, эпоксидная смола**	UL/ANSI GPY, MIL-S-13949/10 GIJ	200	

* Основной смоляной состав

** Вспомогательный смоляной состав

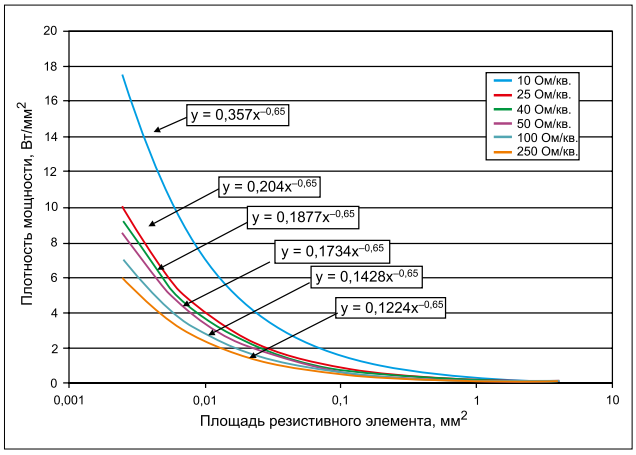

Рис. 7. **Зависимость плотности мощности NiP-материала от площади резистивного элемента**

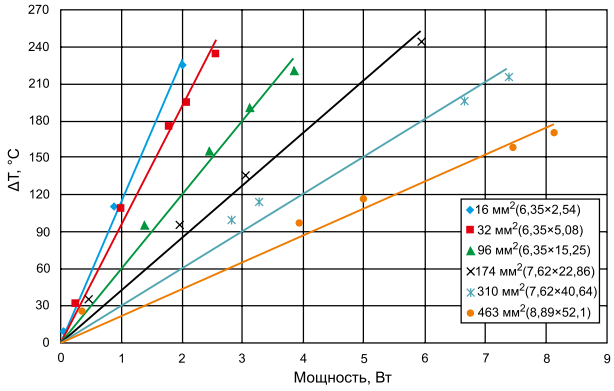

Рис. 8. **Зависимость температуры от мощности при использовании резистивных элементов разных размеров с удельным сопротивлением 10 Ом/кв.**

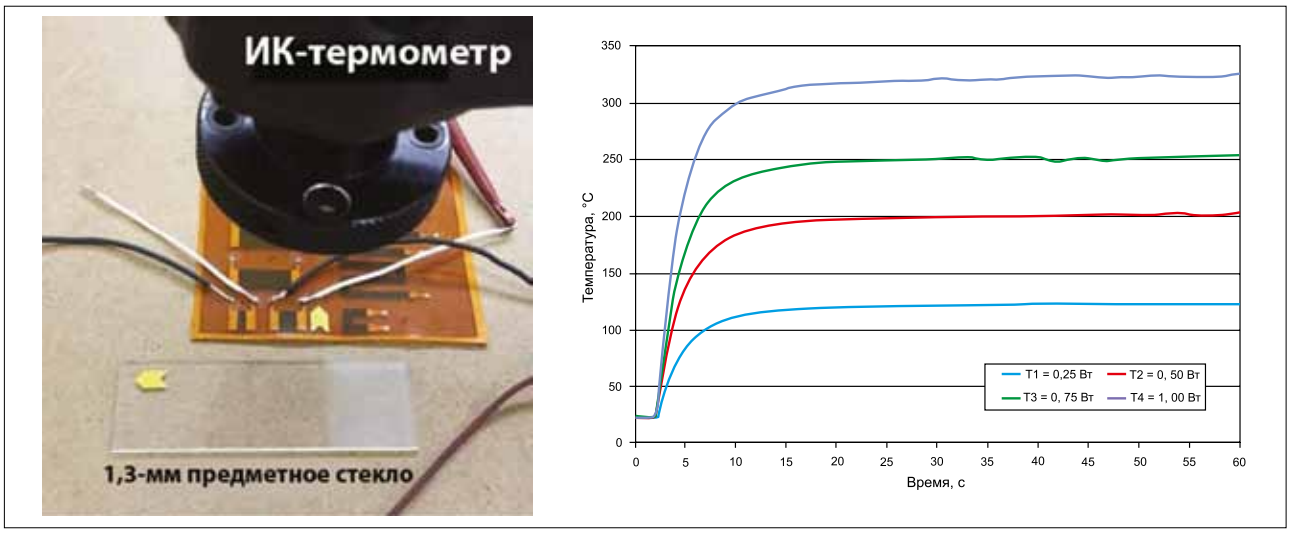

Рис. 9. **Повышение температуры NiP-резистора на гибкой подложке в зависимости от времени**

на квадрат [3]. Каждое значение удельного сопротивления соответствует номинальной плотности мощности, которая не вызывает перегрев резисторного слоя.

Из рисунка 7 видно, что слои с меньшим удельным сопротивлением могут работать при более высоких значениях удельной плотности. Рекомендуется выбирать такие значения удельного сопротивления, которые соответствуют как можно большей плотности мощности. Из рисунка 8 видно, как размер резистора/нагревательного элемента и мощность влияют на изменение температуры. Из графиков видно, что чем меньше площадь элемента, тем выше его температура при заданной мощности. Зависимость между температурой и мощностью является линейной.

На рисунке 9 представлены результаты измерения временной зависимости температуры NiP-резисторов, изготовленных из полиимидного гибкого материала. Рассмотрим следующий пример. Предположим, для нагревания кремниевого участка размером 12,7×12,7 мм толщиной 1 мм до 150°C менее чем за 60 с требуется мощность величиной 1 Вт. В этом приложении использовался источник с фиксированным напряжением 3,3 В. Применяя уравнения для расчета мощности и закон Ома, получаем, что сопротивление нагревательного элемента должно составлять около 10 Ом. Такой нагреватель в виде резистора размером 12,7×12,7 мм легко реализуется с помощью резистивного проводящего материала с удельным сопротивлением 10 Ом/кв. Для сравнения заметим, что для повышения температуры или мощности на ту же величину при использовании проводника шириной 0,254 мм его длина составит 2500 мм. При использовании проводника той же ширины, что

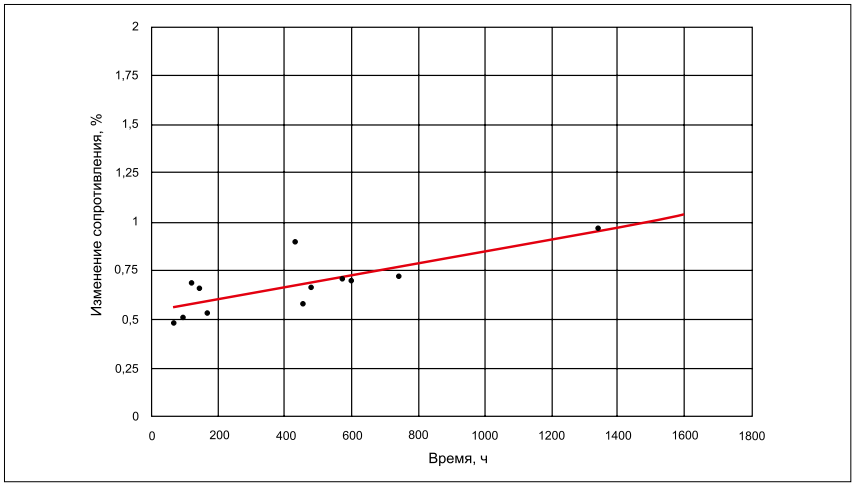

Рис. 10. **Изменение сопротивления резисторов при продолжительной эксплуатации при 150°C**

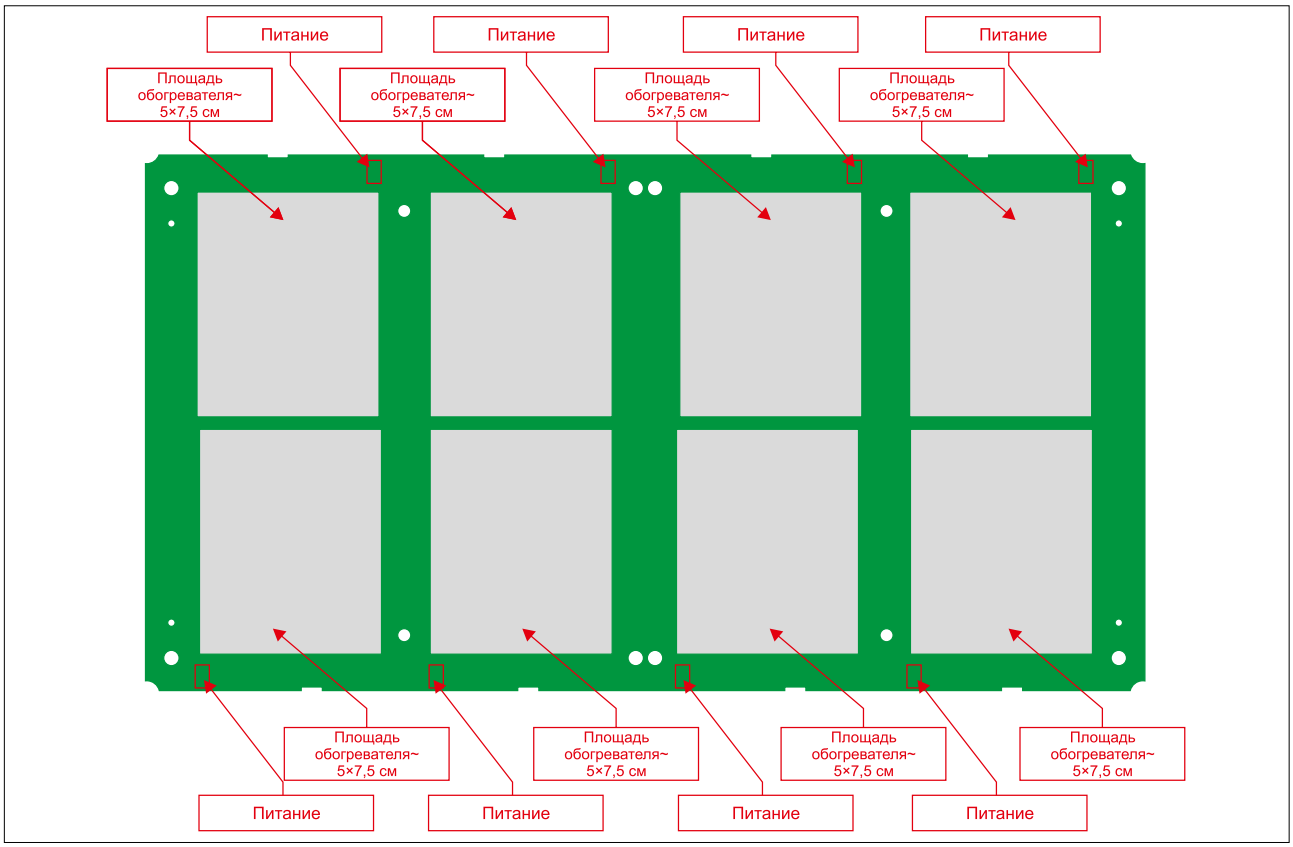

Рис. 11. **Пример платы для нагревания**

и ширина рассматриваемого резистора, длина проводника составит лишь около четверти от той, которая необходима для соответствия расчетной площади.

ДЛИТЕЛЬНАЯ ЭКСПЛУАТАЦИЯ ПРИ ВЫСОКОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

Для определения продолжительности эксплуатации тонкопленочного резистора при высокой температуре нагревания было осуществлено испытание. Через этот резистор пропускался ток таким образом, чтобы в устойчивом режиме эксплуатации температура этого элемента составила 150°C. Периодические измерения проводились в течение 1200 ч, чтобы проконтролировать любое изменение сопротивления. Оказалось, что это изменение не превысило 1% за указанное время (см. рис. 10). Устойчивость работы в течение продолжительного времени подтверждает возможность использования этих элементов в указанных приложениях, в которых на устройства оказывается достаточно продолжительное воздействие.

На рисунке 11 показана плата для приложения с нагревателем. Нагревательные элементы находятся во внутреннем слое под серыми прямоугольными участками. Как правило, такие платы позволяют гибче управлять бюджетом питания в сравнении с приложениями с батарейным питанием. Разумеется, площади этих участков в переносных и настольных системах, в первую очередь, определяются размером нагреваемого объекта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Mahler, Bruce. New Applications for Embedded Thin Film Heaters. Paper presented at BiTS Workshop. March. 2017.

2. IPC-4101B. Specification for Base Materials for Rigid and Mulitlayer Printed Boards. IPC-4101B Reference Chart.

3. Brandler, Daniel. The Performance of Embedded Resistors by Alloy Type and Film Thickness. The PCB Magazine. November 2011.