

УДК 621.365.31

М.В. Храмов, А.М. Заболоцкий

## Устройства подогрева электронной компонентной базы радиоэлектронной аппаратуры в условиях отрицательных температур

Известно, что современная электронная компонентная база (ЭКБ), применяемая в радиоэлектронной аппаратуре (РЭА) различного назначения, работоспособна только в определенном диапазоне температур. В то же время при разработке РЭА часто предъявляются требования к гарантированной работе в более жестких климатических условиях, в том числе и при воздействии отрицательных температур. В связи с этим необходимо обеспечивать заданные тепловые режимы РЭА. Для этого используют различные устройства подогрева, каждое из которых позволяет обеспечить работу РЭА в условиях воздействия отрицательных температур путем нагрева ЭКБ до рабочей температуры. В работе проведены обзор, сравнительный анализ и даны рекомендации по применению современных устройств подогрева ЭКБ РЭА в условиях воздействия отрицательных температур. Данный материал может быть использован при проектировании РЭА и помочь в обеспечении ее тепловых режимов.

**Ключевые слова:** радиоэлектронная аппаратура, электронная компонентная база, отрицательные температуры, устройства подогрева.

**DOI:** 10.21293/1818-0442-2022-25-3-28-36

Современная радиоэлектронная аппаратура (РЭА) используется в различных сферах жизнедеятельности человека, в том числе и в таких критичных областях промышленности, как военная, космическая, топливно-энергетическая, атомная и др. Это, в свою очередь, напрямую связано с эксплуатацией РЭА в условиях воздействия отрицательных температур. К таким условиям можно отнести условия Крайнего Севера и Арктики, где температура воздуха опускается намного ниже  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$  [1–3]. Также известно, что воздушные суда могут эксплуатироваться при температуре ниже  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  [4], что критично для авиационной РЭА. А в условиях космоса температура достигает еще более низких значений [5].

Любая РЭА проектируется на основе электронной компонентной базы (ЭКБ). Виды категории исполнения ЭКБ иностранного производства разделяются на Space, Military, Industrial, Commercial [6]. При этом каждое исполнение имеет свой диапазон рабочих температур [7], который изменяется от  $-55$  до  $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$ . На территории Российской Федерации виды климатического исполнения технических изделий определяются ГОСТ 15150–69 и имеют определенный диапазон рабочих температур [8]. Так, для изделий, предназначенных для эксплуатации в холодном климате (исполнение ХЛ), диапазон темпера-

туры воздуха при эксплуатации составляет от  $-60$  до  $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Однако чаще всего ЭКБ, применяемая в РЭА различного назначения, работоспособна в диапазоне температур от  $-40$  до  $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Следовательно, необходимо обеспечивать работоспособность РЭА при более низкой температуре, чем позволяет диапазон рабочих температур ЭКБ. Обычно это достигается путем нагрева ЭКБ до рабочей температуры на печатных платах (ПП), контактным или радиационным нагревом узлов РЭА. Для этого используют различные нагревательные элементы, такие как резистивный элемент в слоях ПП, нагревательные резисторы поверхностного монтажа, гибкие силиконовые нагреватели, нагревательные пластины и высокотемпературные нагреватели. Классификация нагревателей ЭКБ РЭА схематично представлена на рис. 1.

Целью работы является обзор устройств подогрева ЭКБ РЭА в условиях воздействия отрицательных температур.

### Резистивный элемент в слоях печатной платы

Один из наиболее эффективных способов нагрева элементов на ПП основан на пропускании электрического тока через плоский проводник, свернутый в меандр, расположенный на внутреннем слое и распределенный по всей площади ПП [9, 10].

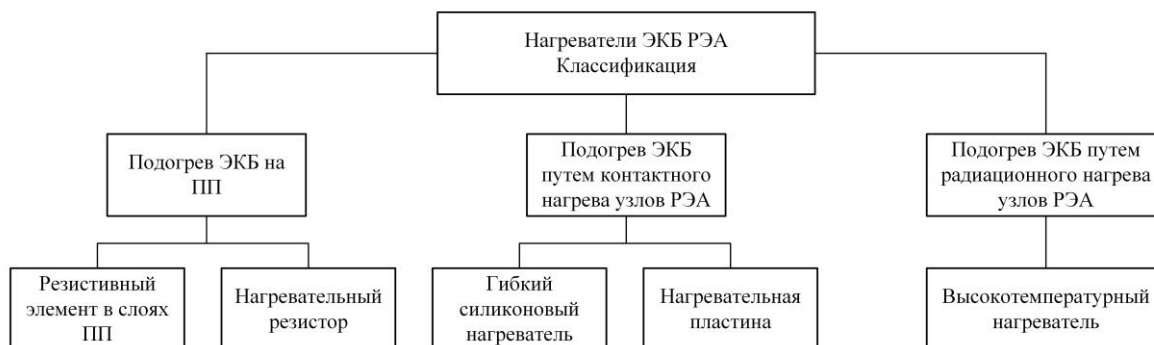


Рис. 1. Классификация нагревателей ЭКБ РЭА

В таком случае для нагрева используются только материалы, из которых изготовлена ПП, и не требуются дополнительные элементы.

Для надежной работы необходимо, чтобы нагрев проводников под действием тока не приводил к физико-химическим изменениям в окружающем их диэлектрике [11]. Резистивный элемент благодаря своей плоской форме хорошо отдает тепло и допускает большие плотности тока без каких-либо для них последствий.

При подаче тока на резистивный элемент в начальный момент времени тепловое сопротивление теплоотвода определяется сопротивлением теплопередачи от нагревающегося проводника в область диэлектрика, находящуюся в непосредственной близости от его поверхности. В этот момент нагревается преимущественно тело проводника. С течением времени нагреваются все большие и большие массы вокруг материала проводника, границы теплоотвода отодвигаются, следовательно, меняются значения теплоемкости и теплового сопротивления [12].

Идеальный резистивный элемент должен иметь компактный рисунок для уменьшения объема и снижения потребляемой мощности. Однако плотные изогнутые рисунки резистивного элемента приводят к неоднородному распределению плотности тока. На участках наибольшей кривизны, где обычно ток идет по наискратчайшему пути, по наименьшему радиусу, происходит неоднородное распределение плотности тока [13]. Это называется явлением «сжатия тока» и может привести к локальному перегреву и формированию тепловых горячих точек. Повышение температуры может также приводить к локальному тепловому расширению материалов. В результате возникает большое напряжение в стыкуемых частях и появляются некоторые трещины или разъединение соединений, что приводит к деструктивным изменениям или коротким замыканиям в ПП. Это может существенно сократить срок службы или даже вызвать отказ РЭА [14]. Скругление углов резистивного элемента уменьшает эти неравномерности, но лишь частично.

Нагрев ПП выше температуры стеклования ( $T_g$ ) опасен тем, что при таком нагревании коэффициент теплового расширения (КТР) диэлектрика, например FR-4, по оси  $Z$  резко меняется с 45–55 до 200–250 мкм/м°C, в то время как КТР меди остается прежним – около 15 мкм/м°C [15]. В этом случае сколь угодно длительное воздействие температур, превышающих  $T_g$ , неминуемо приводит к разрыву стенок металлизированных отверстий ПП [16]. Для FR-4  $T_g$  равна 130 °С. Перегрев может приводить к отслаиванию тонких проводников, а также к деформации ПП. Поэтому максимальная температура резистивного элемента и темп его нагрева ограничены плотностями тока, который можно пропустить через него, а также  $T_g$  материала диэлектрика ПП. Также необходимо обеспечить равномерность распределения температурного поля по поверхности. Удельная теплопроводность стеклотекстолита низкая и равна

0,3–0,45 Вт/м·К. Если нагревательный элемент находится, например, на нижнем слое, то подогрев осуществляется только с нижней стороны. Поэтому нижние слои текстолита ПП будут прогреваться быстрее, чем верхние. Тепловое линейное расширение нижних слоев больше, чем верхних, – это приводит к прогибу платы вниз. Эффект усугубляется с ростом толщины платы. Борьба с тепловыми деформациями следует путем снижения скорости нагрева ПП до приемлемой величины. Дополнительные проблемы возникают при подогреве ПП большой площади. Если такая ПП закреплена за края, то в процессе сильного подогрева ее центр будет прогибаться [17]. Следует обеспечить медленный равномерный нагрев, не перегревая ПП, либо в местах предполагаемого прогиба устанавливать дополнительные точки опоры.

В [18] представлена ПП с медным резистивным элементом. Схема резистивного элемента показана на рис. 2.

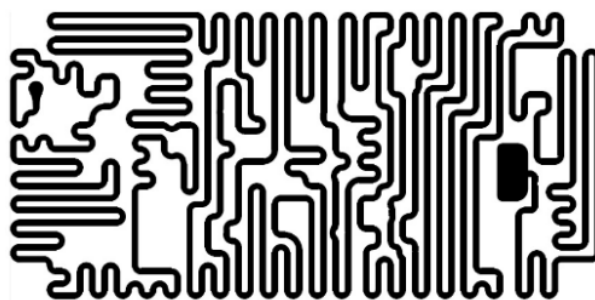


Рис. 2. Резистивный элемент, расположенный во внутреннем слое ПП

Резистивный элемент расположен на втором слое шестислойной ПП. Резистивный элемент огибает сквозные переходные отверстия ПП, тем самым имеет сложную геометрическую форму. Он проектировался по принципу максимального заполнения площади ПП под микросхемами или в их близости. Сопротивление резистивного элемента равно 0,875 Ом. В ходе экспериментальных исследований ПП предварительно охлаждалась в морозильной камере до температуры –55 °С. После этого на резистивный элемент подавалось напряжение 5 В, потребляемый ток был равен 5,71 А, а мощность 28,57 Вт. Таким образом, датчик температуры, расположенный на ПП, прогревался с –55 до –35 °С за 17 с.

Необходимо отметить, что для качественного нагрева ЭКБ на ПП до рабочей температуры необходима равномерность распределения температурного поля, на которую влияют расположение, размеры, количество, плотность размещения электронных компонентов. Если несколько массивных компонентов расположены рядом, то этот участок платы будет нагреваться медленнее, чем области с мелкими компонентами. Поэтому необходимо уменьшить скорость нагрева. Если на микросхемах установлены металлические радиаторы, то нужно учесть, что такой компонент будет потреблять большое количество тепла и долго нагреваться.

Также важным параметром является скорость нагрева, оптимальной можно считать 0,3–0,5 °С/с для сложных многослойных ПП и до 1 °С/с для простых плат. При таком режиме нагрева, меньше вероятность нанести деструктивные изменения ПП под действием высокой температуры. Кроме этого, важным условием являются внешние факторы, например, такие как наличие обдува воздухом которое отразится на скорости и равномерности нагрева [19].

#### Нагревательные резисторы

Для подогрева ЭКБ на ПП часто используют различные нагревательные резисторы. Одним из таких элементов является низкоомный резистор поверхностного монтажа, в корпусе DPAK серии DTO25 фирмы VISHAY [20], который показан на рис. 3.



Рис. 3. Резистор поверхностного монтажа в корпусе DPAK

Номинальная мощность такого резистора составляет 25 Вт. Он имеет металлизированный вывод увеличенных размеров для отвода тепла и подключается к контактной площадке на ПП, которая, в свою очередь, с помощью переходных металлизированных отверстий соединена с одним из внутренних слоев многослойной ПП [21, 22]. При этом медный слой, к которому подключен такой резистор, занимает всю площадь ПП или ту площадь, в области которой расположена ЭКБ, нуждающаяся в подогреве. Таким образом, пропуская через себя ток, резистор выделяет тепло, которое распределяется по медному слою, а тот в свою очередь, отдает тепло сначала в объем всей платы, а далее и к ЭКБ. Аналогичным устройством являются керамические нагревательные резисторы КРН-150 [23], которые показаны на рис. 4. Они работают по такому же принципу, но имеют большую надежность за счет того, что изготовлены из высокотемпературной прочной керамики, что позволяет повысить срок эксплуатации до 10 лет.

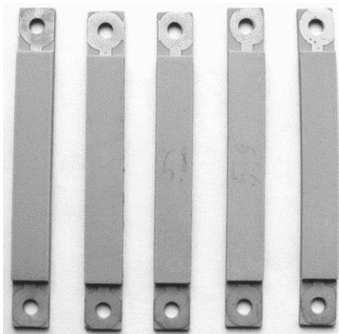


Рис. 4. Нагревательные керамические резисторы КРН-150

Недостатком такого решения является занимаемая площадь, что может быть недопустимо для малогабаритной РЭА.

#### Гибкий силиконовый нагреватель

Устройством для контактного подогрева узлов РЭА являются силиконовые нагреватели [24, 25], которые изготавливаются из термостойкого кремнийорганического полимера (силиконовой резины), усиленного в условиях промышленного производства слоем конструкционного стекловолокна. Силиконовый нагреватель показан на рис. 5.



Рис. 5. Силиконовый нагреватель

В качестве термоэлемента силиконового нагревателя используется расположенная в рядном порядке высокорезистивная нихромовая проволока (X12H75M) или термофольга (X20H80M) с вытравленным рисунком теплового контура. Варианты теплового контура показаны на рис. 6.

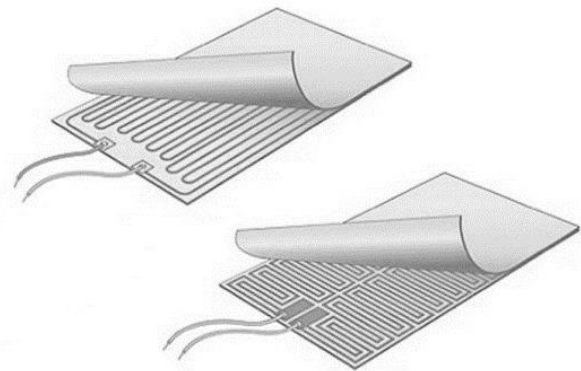


Рис. 6. Варианты теплового контура силиконового нагревателя

Особенность силиконовых нагревателей в их гибкости и устойчивости к воздействию жидкости и некоторых реагентов. Они обладают высокой атмосферной и бактерицидной стойкостью, могут эксплуатироваться практически в любых погодных условиях, обладают стойкостью к соляной (до 10%) и серной (до 20%) кислотам, стойкостью к озону, водяному пару (до 180 °С) и многим органическим и неорганическим химическим реагентам. Многие нагревательные элементы имеют контактный способ нагрева, но есть случаи, когда невозможно создать абсолютно идеальную ровную поверхность. В таких случаях целесообразно применять силиконовые нагреватели благодаря их высоким эластичным свойствам. Кроме того, они имеют различные варианты крепления, такие как самоклеящаяся пленка, наклеивание с помощью силиконового вулканизатора, запрессовка посредством прижимных пластин, крепление с помощью пружин растяжки. Рабочая температура силиконовых нагревателей при длительном ис-

пользовании не должна превышать 200 °С. Допускается кратковременный нагрев до 260 °С, но при достижении максимальной температуры в 300 °С происходят необратимые разрушения нагревателя.

### Нагревательные пластины

Следующим эффективным устройством нагрева являются нагревательные пластины, которые могут быть выполнены на различных подложках из нержавеющей стали [26], стекла [27], алюминия [28] или керамики [29]. Такие устройства изготавливаются по толстопленочной технологии. Нагревательная пластина на подложке из нержавеющей стали показана на рис. 7.



Рис. 7. Нагревательная пластина на подложке из нержавеющей стали

Нагревательные пластины предназначены для контактного нагрева плоских поверхностей. По сравнению с силиконовыми нагревателями нагревательные пластины обеспечивают существенно лучшую передачу температуры и более высокую мощность при компактных размерах. Эти элементы также могут быть полезны в приложениях, где важна малая толщина нагревательного элемента.

В патенте [30] нагревательная пластина использует алюминиевую подложку вследствие ее исключительно высокой теплопроводности и возможности однородного нагрева. Нагревательная пластина на алюминиевой подложке показана на рис. 8.

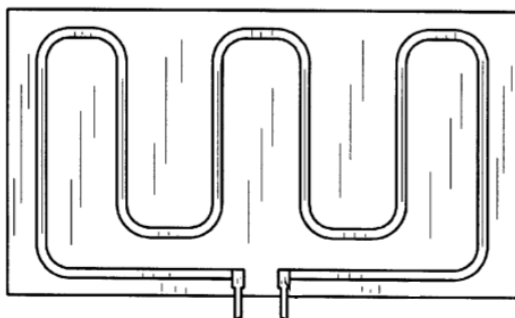


Рис. 8. Нагревательная пластина на алюминиевой подложке

Поскольку подложка имеет очень высокий КТР, то поверх подложки накладывается изолирующий слой. Однако важно отметить, что предлагаемые дополнительные слои приводят к большой теплоемко-

сти вследствие увеличения массы и объема, что нежелательно в связи с потребляемой мощностью и требуемым временем для достижения желаемых температур. Увеличенная масса и объем также делают нагревательную пластину непригодной для некоторых применений с малым объемом.

В [31] показан планарный нагревательный элемент с резисторной структурой с положительным температурным коэффициентом сопротивления (ТКС). Он представляет собой планарный нагревательный элемент, расположенный на заданной площади подложки. Планарный нагревательный элемент показан на рис. 9.

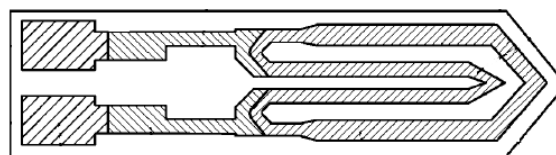


Рис. 9. Планарный нагревательный элемент с резисторной структурой с положительным ТКС

Его резистивный элемент, исходя от обоих соединительных электроконтактов, имеет внутреннюю токопроводящую дорожку и параллельно подключенную внешнюю токопроводящую дорожку. При этом сопротивление внутренней токопроводящей дорожки больше сопротивления внешней токопроводящей дорожки. Это сделано для того, чтобы при подведении напряжения обеспечить равномерное распределение температуры в границах заданной площади.

К преимуществам нагревательных пластин можно отнести равномерность теплоотдачи по всей рабочей поверхности, высокий уровень термостойкости, малую толщину, возможность изготовления в разных формах, длительный срок службы. Наличие крепежных отверстий, с одной стороны, является положительным фактором в удобстве эксплуатации и непосредственной установке. Но, с другой стороны, эти отверстия уменьшают рабочую зону и эффективный теплообмен.

К недостаткам можно отнести вероятность нарушения плотности контакта между нагревателем и объектом нагрева. Если она нарушается, то эффективность теплового воздействия значительно снизится и нагреватель может вскоре перегреться и выйти из строя. Для снижения вероятности появления такого явления необходимо соблюдать правила монтажа и эксплуатации и при необходимости использовать термопасту.

### Высокотемпературные нагреватели

Высокотемпературный нагреватель [32] предназначен для нагрева конструкций летального аппарата (ЛА), однако это устройство можно использовать и для нагрева узлов РЭА из состава ЛА. Высокотемпературный нагреватель обеспечивает радиационный нагрев с помощью пластинчатого тепловыделяющего токопроводника в форме меандра. Меандр выполнен со скругленными углами и имеет дополнительные продольные прорезы, образующие несколько параллельных токопроводников. Это необходимо для того,

чтобы устранить локальный перегрев и появление больших температурных напряжений по сечению. Локальный перегрев вызывается тем, что ток идет по наикратчайшему пути, по наименьшему радиусу образуя большие плотности тока. Высокотемпературный нагреватель показан на рис. 10.

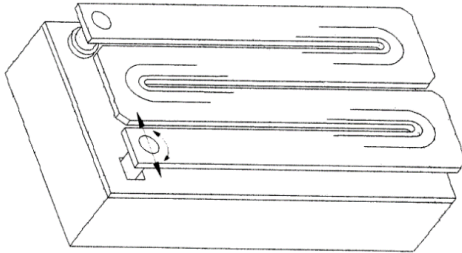


Рис. 10. Высокотемпературный нагреватель

Продольные прорезы расположены на участках наибольшей кривизны меандра. Количество, длины и площади поперечных сечений параллельных токопроводников определяются экспериментально. Это позволяет сократить неравномерность температуры по сечению с 300 до 100 °С и довести плотность тока до 100 А/мм<sup>2</sup>. Максимальная температура нагревателя и темп его нагрева ограничены плотностями тока, который можно пропустить через него, а также температурой 3000 °С.

Также к категории высокотемпературных относится графитовый нагреватель [33], который показан на рис. 11 и представляет собой нагревательный элемент из графитового материала, непосредственно подключаемого к электросети. От особенностей его устройства зависят температурные показатели, параметры теплового поля в зоне нагрева и массогабаритные характеристики. Изготавливают графитовые нагреватели из углеродных конструкционных или из углерод-углеродных композиционных материалов.

Значение потребляемого тока может составлять от единиц ампер до сотен килоампер. Высокая термостойкость, устойчивость к выгоранию обеспечивают высокий ресурс работы графитовых нагревателей. Они способны развивать предельно высокие темпе-

ратуры вплоть до 3000–4000 °С. При этом они сохраняют продолжительное время стабильность технических характеристик. К преимуществам можно отнести низкий КТР, устойчивость к температурным перепадам (тепловому удару), сохранение механической прочности при высокой температуре. Графитовые нагреватели считаются надежными и долговечными, характеризуются низким удельным весом, примерно на порядок меньшим, чем у металлических нагревателей.

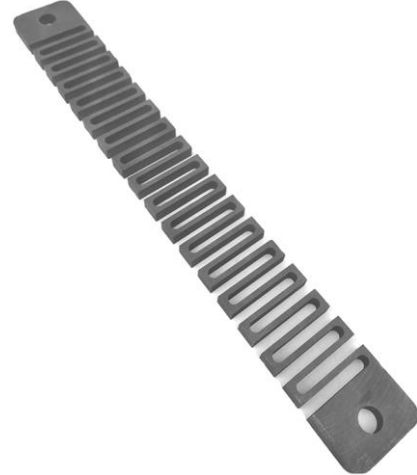


Рис. 11. Высокотемпературный графитовый нагреватель

#### Сравнительный анализ нагревательных элементов

Использование нагревательных элементов позволяет обеспечить работоспособность РЭА в условиях воздействия отрицательных температур ниже, чем рабочая температура современной ЭКБ. В зависимости от специфики применения и конструкции РЭА возможно использование различных нагревательных элементов, каждое из которых обладает своими параметрами. Этими параметрами являются максимальная температура нагревательного элемента, способ нагрева и стоимость. Для сравнительного анализа, параметры нагревательных элементов сведены в таблицу.

Сравнение нагревательных элементов

Параметр/тип нагревательного элемента	Резистивный элемент в слоях ПП	Нагревательный резистор	Гибкий силиконовый нагреватель	Нагревательная пластина	Высокотемпературный нагреватель
Способ подогрева	Нагрев резистивного элемента во внутренних слоях ПП	Подключение к внутренним слоям ПП и их нагрев	Контактный подогрев узлов РЭА	Контактный подогрев узлов РЭА	Радиационный подогрев узлов РЭА
Максимальная температура нагревательного элемента, °С	130*	130*	260	500	3000
Стоимость, Р	До 1000	До 1000**	До 10000**	До 3000**	До 7000**

\* При использовании FR-4 в качестве материала диэлектрика ПП.

\*\* В зависимости от материалов, формы и мощности нагревателя.

Из таблицы видно, что рассмотренные нагревательные элементы обладают различными способами подогрева, максимальной температурой и стоимо-

стью. При выборе нагревательного элемента необходимо ориентироваться на конкретные особенности РЭА.

Резистивный элемент в слоях ПП обеспечивает нагрев за счет выделения тепла сначала в область диэлектрика, а затем и к ЭКБ, установленной на ПП, что позволяет обеспечить быстрый нагрев. Так как резистивный элемент расположен во внутренних слоях, такое решение имеет минимальные габариты. За счет того, что этот нагревательный элемент представляет собой плоский проводник во внутреннем слое ПП, то имеет минимальную стоимость и габариты. Однако по сравнению с остальными нагревательными элементами он обладает низкой максимальной температурой, которая определяется  $T_g$  материала диэлектрика ПП. Для FR-4 это значение равно 130 °С. Поэтому очень важно следить за потребляемой мощностью и температурой ПП. Иначе циклический, неконтролируемый и неравномерный нагрев ПП может приводить к короблению ПП, необратимым деструктивным изменениям в диэлектрике, а также трещинам и разрыву переходных отверстий.

Другим устройством для подогрева ЭКБ РЭА является нагревательный резистор. Этот нагревательный элемент имеет малую стоимость среди рассмотренных вариантов. При его установке на ПП он подключается к внутреннему медному слою с помощью металлизированных переходных отверстий. За счет того, что медный слой распределен по всей площади ПП, нагрев происходит более равномерно, чем в предыдущем варианте. Однако такой способ подогрева ЭКБ РЭА имеет тот же недостаток в виде максимальной температуры нагревательного элемента, равной  $T_g$  материала диэлектрика ПП.

В случаях когда требуется контактный подогрев узлов РЭА и они имеют сложную форму, целесообразно применять гибкие силиконовые нагреватели. По сравнению с предыдущими устройствами максимальная температура такого нагревательного элемента выше, определяется материалом, из которого он изготовлен, и равна 260 °С. К тому же из-за гибкости такого нагревательного элемента он может принимать любую форму и иметь различные виды крепления. К недостаткам можно отнести высокую стоимость, а также расход части тепла на обогрев окружающего пространства.

В условиях, когда необходим контактный подогрев узлов РЭА через плоскость, используют нагревательные пластины. Они имеют значительно меньшую стоимость, чем гибкие силиконовые нагреватели, и более высокую максимальную температуру нагрева, которая может достигать до 500 °С. Это позволяет обеспечить более быстрый подогрев узлов РЭА. Однако нагревательные пластины также расходуют часть тепла в окружающее пространство. Кроме того, при нарушении плотности контакта нарушается эффективность теплового воздействия, что может привести к выходу нагревательной пластины из строя.

Высокотемпературный нагреватель не имеет непосредственного контакта с узлами РЭА и используется в случае, когда необходим их радиационный нагрев. Его максимальная температура может дохо-

дить до 3000 °С, что значительно выше, чем у остальных рассматриваемых нагревательных элементов. Стоимость высокотемпературного нагревателя немного ниже, чем гибкого силиконового нагревателя, но выше остальных нагревательных элементов. Однако необходимо отметить, что такое устройство нецелесообразно применять в РЭА с высокой плотностью компоновки и монтажа.

### Заключение

Таким образом, выполнен обзор устройств подогрева ЭКБ РЭА в условиях воздействия отрицательных температур. Представлены различные нагревательные элементы, кратко описан принцип их работы и определены условия применения. Проведен сравнительный анализ нагревательных элементов и выявлены их достоинства и недостатки. Если необходим нагрев ЭКБ на ПП, то целесообразно применять подогрев с помощью резистивного элемента во внутренних слоях или нагревательного резистора. Такие решения имеют малые габариты и низкую стоимость, однако их максимальная температура ограничивается  $T_g$  материала диэлектрика ПП. В условиях, когда необходим контактный нагрев узлов РЭА, стоит использовать гибкие силиконовые нагреватели или нагревательные пластины. Максимальная температура таких нагревателей значительно выше. Кроме того, гибкие силиконовые нагреватели позволяют обеспечивать подогрев узлов РЭА сложной формы.

Однако такие нагреватели имеют высокую стоимость. А в случае нагревательных пластин, при нарушении плотности контакта, нагревательный элемент может выйти из строя. Поэтому необходимо соблюдать правила монтажа, эксплуатации, а также применять дополнительные средства для улучшения плотности контакта, например термопасту. В случае когда необходим радиационный подогрев узлов РЭА, стоит использовать высокотемпературные нагреватели. Они имеют наибольшую максимальную температуру, устойчивы к температурным перепадам и сохраняют механическую прочность при высокой температуре. Но при этом высокотемпературные нагреватели нецелесообразно применять в РЭА с высокой плотностью монтажа.

Данный обзор может быть полезен при проектировании критичной РЭА, используемой в условиях воздействия отрицательных температур, и помочь в обеспечении тепловых режимов РЭА.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России по проекту FEWM-2022-0001.

### Литература

1. Горбунов В.П. Проблемы эксплуатации современных самолетов в условиях низких и сверхнизких температур Сибири, Севера и Арктики // Научный вестник МГТУ ГА. – 2014. – № 204. – С. 110–114.
2. High Strain-Rate Properties for SAC305 at Cold Operating Temperatures down to –65 C / P. Lall, V. Mehta, J. Suhling, K. Blecker // 19th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm). – Orlando, FL, USA, 2020. – P. 1073–1083.

3. Extreme Cold-Temperature High-Strain Rate Properties of SAC Solder Alloys / P. Lall, V. Yadav, V. Mehta, J. Suhling, K. Blecker // IEEE 70th Electronic Components and Technology Conference (ECTC). – Orlando, FL, USA, 2020. – P. 782–792.
4. Горбунов В.П. Метод поддержания летной годности воздушных судов с бортовым цифровым комплексом в условиях экстремально низких температур: дис. ... канд. техн. наук. – М., 2017. – 176 с.
5. Research Progress of Extreme Low Temperature Reliability of Typical Electronic Interconnection Structures / Z. Sun, X. Guo, Z. Zhao, Y. Ni, G. He // 22-nd International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT). – Xiamen, China, 2021. – P. 1–5.
6. Белоус А.И. Космическая электроника. – М.: Техносфера, 2015. – 696 с.
7. ГОСТ Р 56649–2015. Техника ракетно-космическая. Электронная компонентная база иностранного производства. Порядок применения. – М.: Стандартинформ, 2016. – 60 с.
8. ГОСТ 15150–69. Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды. – М.: Стандартинформ, 2010. – 71 с.
9. Пат. 166556 РФ, МПК H05K 3/46. Многослойная печатная плата с возможностью подогрева элементов радиоэлектронной аппаратуры в условиях воздействия экстремально отрицательных температур / А.В. Прыщак, А.Н. Егоров, В.Э. Иванов, А.В. Селифанов, С.В. Захарова, А.И. Дьянов (РФ). – № 2015149399; заявл. 17.11.15; опубл. 10.12.16.
10. Сокольский А.М. Методы и средства борьбы с электрохимической миграцией в устройствах авионики: дис. ... канд. техн. наук. – М., 2017. – 124 с.
11. Медведев А.М. Печатные платы. Конструкции и материалы. – М.: Техносфера, 2005. – 304 с.
12. Brooks D., Adam J. PCB Design Guide to Via and Trace Currents and Temperatures. – Norwood: Artech house Publ., 2021. – 271 p.
13. Pattnayak R.A. Thermal and Electro-Thermal Analysis of DC-DC convertor for 3 wheeler electric vehicle / R.A. Pattnayak, B.M. Baskar // 2020 IEEE 8th Electronics System-Integration Technology Conference (ESTC). – Tønsberg, Norway, 2020. – P. 1–5.
14. Сальников М.Ю. Организация разработки современных тепловых методов диагностики и контроля электронных устройств / М.Ю. Сальников, Н.М. Блажевич // Матер. 22-й Всерос. молодежной научной школы-семинара «Актуальные проблемы физической и функциональной электроники». – Ульяновск, Россия, 2019. – С. 60–62.
15. Пахнин А. Современные высокотемпературные материалы для производства высоконадежных многослойных печатных плат / А. Пахнин, П. Казаков // Производство электроники: технологии, оборудование, материалы. – 2011. – № 4. – С. 24–27.
16. Сергеев В.Я. Тепловая модель сквозного металлизированного отверстия печатной платы при одностороннем нагреве / В.Я. Сергеев, А.М. Ходаков, М.Ю. Сальников // Изв. высших учебных заведений. Электроника. – 2021. – Т. 26, № 5. – С. 426–431.
17. Tsenev V. Approach to reduce PCB distortion after heat treatment for soldering with reflow process / V. Tsenev, V. Videkov // 2020 XXIX International Scientific Conference Electronics (ET). – Sozopol, Bulgaria, 2020. – P. 1–4.
18. Храмов М.В. Оценка возможности использования печатной платы с резистивным элементом для подогрева микросхем промышленного назначения // Матер. междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР–2021». – Томск, 2021. – Т. 1. – С. 214–217.
19. Технология правильного подогрева печатных плат [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://termopro.ru/files/1512/Tehnologiya\\_podogreva.pdf](http://termopro.ru/files/1512/Tehnologiya_podogreva.pdf), свободный (дата обращения: 13.03.2022).
20. Vishay DTO 25 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.vishay.com/docs/51054/dto25.pdf>, свободный (дата обращения: 13.03.2022).
21. Zhang Y. Improved Numerical-Analytical Thermal Modeling Method of the PCB With Considering Radiation Heat Transfer and Calculation of Components Temperature // IEEE Access. – 2021. – Vol. 9. – P. 92925–92940.
22. Thermal Modeling and Design Optimization of PCB Vias and Pads / Y. Shen, H. Wang, F. Blaabjerg, H. Zhao, T. Long // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2020. – Vol. 35. – P. 882–900.
23. Керамический нагреватель KPH-150 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.edelbox.ru/product/bs150>, свободный (дата обращения: 13.03.2022).
24. Бюллер А.В. Разработка и исследование гибкого резистивного нагревателя на стеклотканевой основе / А.В. Бюллер, Е.А. Старостина // Сборник тезисов докладов XLV Междунар. молодежной науч. конф. «Гагаринские чтения». – М., 2019. – С. 835–836.
25. Обзор и анализ гибких нагревательных элементов для обогрева рабочих органов машин / В.А. Егоров, А.М. Воронович, И.А. Буглак, Д.Е. Иванов // Механика XXI века. – 2019. – № 18. – С. 228–234.
26. Thick-film heating element HTS-14 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.telpod.pl/\\_files/ugd/b5b7b4\\_117d64ec33e04ca8a766015be52fcc09.pdf](https://www.telpod.pl/_files/ugd/b5b7b4_117d64ec33e04ca8a766015be52fcc09.pdf), свободный (дата обращения: 13.03.2022).
27. Transparent Oxide/Metal/Oxide Thin Film Heater With Integrated Resistive Temperature Sensors / N. Lovetchio, V. Di Meo, D. Caputo, A. Nascetti, A. Crescitelli, E. Esposito, G. de Cesare // IEEE Sensors Journal. – 2021. – Vol. 21. – P. 18847–18854.
28. Тепловые и электрические характеристики плоских нагревателей из алюминия с нанопористым анодным оксидом алюминия и резистивным элементом из углеродной нити / И.А. Врублевский, К.В. Чернякова, Д.В. Горбачев, Е.Н. Муратова, В.А. Мошников // Матер. 28-й Междунар. Крымской конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». – Севастополь, Россия, 2018. – С. 1013–1016.
29. Thick-film heating element GBR-601 Series [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.telpod.pl/\\_files/ugd/b5b7b4\\_a1c5c0b8d6a643cabe8b11946a04cabe.pdf](https://www.telpod.pl/_files/ugd/b5b7b4_a1c5c0b8d6a643cabe8b11946a04cabe.pdf), свободный (дата обращения: 13.03.2022).
30. Пат. 6222166 США, H05B 3/02. Aluminum substrate thick film heater / H. Lin, T. Laskowski (US). – 2006.
31. Пат. 2668087 РФ, МПК H05B 3/20. Планарный нагревательный элемент с резисторной структурой с положительным ТКС / Х. Джири, Л. Мирко, Ф. Йозеф (СН). – № 2017100894; заявл. 12.06.15; опубл. 26.09.18. – Бюл. № 27.
32. Пат. 2483492 РФ, МПК H05B 3/00. Высокотемпературный нагреватель / А.В. Бобров, И.И. Лопухов, И.В. Петрова, А.Б. Филимонов, Ю.Ю. Ширинов (РФ). – № 2011153046; заявл. 27.12.2011; опубл. 27.05.13. – Бюл. № 15.
33. Нагреватель графитовый высокотемпературный [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://doncarb.com/articles/nagrevatel-grafitovyyu>, свободный (дата обращения: 13.03.2022).

**Храмов Максим Владимирович**

Аспирант каф. телевидения и управления (ТУ)  
Томского государственного ун-та  
систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)  
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050  
ORCID: 0000-0001-7901-0911  
Тел.: +7-923-311-68-69  
Эл. почта: khramtsovmaxim@yandex.ru

**Заболоцкий Александр Михайлович**

Зав каф. сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники (СВЧКР) ТУСУР  
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050  
ORCID: 0000-0002-1801-7922  
Тел.: +7 (382-2) 41-36-43  
Эл. почта: amz@tusur.ru

Khramtsov M.V., Zabolotsky A.M.

**Devices for heating the electronic component base of radio-electronic equipment in conditions of negative temperatures**

It is known that the modern electronic component base (ECB), used in radio electronic equipment (REE) for various purposes, is operable only in a certain temperature range. At the same time, during the development of REE, the requirements are often made for guaranteed operation in more severe climatic conditions, including when exposed to negative temperatures. In this regard, it is necessary to ensure the given thermal regimes of REE. To do this, various heating devices are used, each of them makes it possible to ensure the operation of the electronic equipment under conditions of exposure to negative temperatures, by heating the ECB to the operating temperature. The paper provides a review, a comparative analysis, and gives recommendations on the use of modern ECB heating devices for REE under conditions of exposure to negative temperatures. This material can be used in the design of REE and help to ensure its thermal conditions.

DOI: 10.21293/1818-0442-2022-25-3-28-36

*References*

1. Gorbunov V.P. *Problemi ekspluatatsii sovremennih samoletov v usloviyah nizkikh i sverhnizkikh temperature Sibiri, Severa b Arktiki* [Problems of operation of modern aircraft in conditions of low and ultra-low temperatures in Siberia, the North and the Arctic]. *Scientific Bulletin of MSTU GA*, 2014, no. 204, pp. 110–114 (in Russ.).
2. Lall P., Mehta V., Suhling J., Blecker K. High Strain-Rate Properties for SAC305 at Cold Operating Temperatures down to –65°C. *2020 19th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm)*, Orlando, FL, USA, 2020, pp. 1073–1083.
3. Lall P., Yadav V., Mehta V., Suhling J., Blecker K. Extreme cold-temperature high-strain rate properties of SAC solder alloys. *2020 IEEE 70th Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*, Orlando, FL, USA, 2020, pp. 782–792.
4. Gorbunov V.P. *Metod podderzhaniya letnoi godnosti vozdukhnykh sudov s bortovim cifrovim kompleksom v usloviyah ekstremalno nizkikh temperature* [Method for maintaining the airworthiness of aircraft with an on-board digital complex in conditions of extremely low temperatures]. Thesis. M., 2017, 176 p. (in Russ.).
5. Sun Z., Guo X., Zhao Z., Ni Y., He G. Research progress of extreme low temperature reliability of typical elec-

tronic interconnection structures. *2021 22nd International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT)*, Xiamen, China, 2021, pp. 1–5.

6. Belous A.I. *Kosmicheskaya elektronika* [Space electronics]. Moscow, Technosfera, 2015, 696 p. (in Russ.).

7. State standard 56649–2015 Rocket and space technology. Electronic component base of foreign production. Application procedure. Moscow, Standartinform Publ., 2016, 60 p. (in Russ.).

8. State standard 15150–69 Machines, devices and other technical products. Versions for different climatic regions. Categories, conditions of operation, storage and transportation in terms of the impact of climatic factors of the environment. Moscow, Standartinform Publ., 2010, 71 p. (in Russ.).

9. Prischak A.V., Egorov A.N., Ivanov V.E., Selifanov A.V., Zaharova S.V., Diyanov A.I. *Mnogosloynnaya pechatnaya plata s vozmozhnostiu podogreva elementov radioelektronnoy apparatury v usloviyah vozdeystviya ekstremalnih otricatelnykh temperature* [Multilayer printed circuit board with the possibility of heating elements of electronic equipment in conditions of exposure to extreme negative temperatures]. Patent RF, no. 166556, 2015.

10. Sokolsky A.M. *Metodi i sredstva borbi s elektrokhimicheskoy migratsiyey v ustroystvakh avioniki* [Methods and means of combating electrochemical migration in avionics devices]. Thesis. M., 2017. 124 p. (in Russ.).

11. Medvedev A.M. *Pechnatnie plati. Konstrukcii I materialy* [Printed circuit boards. Structures and materials]. M., Technosfera, 2005. 304 p. (in Russ.).

12. Brooks D., Adam J. *PCB Design Guide to Via and Trace Currents and Temperatures*. Norwood, Artech house Publ., 2021, 271 p.

13. Pattnayak R.A., Baskar R.A. Thermal and Electro-Thermal Analysis of DC–DC convertor for 3 wheeler electric vehicle. *2020 IEEE 8th Electronics System-Integration Technology Conference (ESTC)*. Tønsberg, Norway, 2020, pp. 1–5.

14. Salnikov M.U., Blazhevich N.M. *Organizatsiya razrabotki sovremennih teplovykh metodov diagnostiki i kontrolya elektronnykh ustroystv* [Organization of the development of modern thermal methods for diagnostics and control of electronic devices]. *Aktualnye problemi fizicheskoy i funktsionalnoy elektroniki. Materialy 22-i vserossiyskoy molodezhnoy nauchnoy shkoly-seminara* [Actual problems of physical and functional electronics. Proceedings of the 22nd all-Russian youth scientific school of the seminar]. Ulyanovsk, Russia, 2019, pp. 60–62 (in Russ.).

15. Pakhnin A., Kazakov P. *Sovremennye visokotemperaturnye materialy dlya proizvodstva visokonadezhnykh mnogosloynnykh pechatnykh plat* [Modern high-temperature materials for the production of highly reliable multilayer printed circuit boards] *Electronics Production: Technologies, Equipment, Materials*, 2011, no. 4, pp. 24–27.

16. Sergeev V.Y., Hodakov A.M., Salnikov M.U. *Teplovaya model skvoznogo metallizirovannogo otverstiya pechatnoi plati pri odnostoronnnem nagreve* [Thermal model of a through metallized hole of a printed circuit board with one-sided heating]. *News of Higher Educational Institutions. Electronics*, 2021, vol. 26, no. 5, pp. 426–431.

17. Tsenev V., Videkov V. Approach to reduce PCB distortion after heat treatment for soldering with reflow process. *2020 – XXIX International Scientific Conference Electronics (ET)*. Sozopol, Bulgaria, 2020, pp. 1–4.

18. Khramtsov M.V. *Ocenka vozmozhnosti ispolzovaniya pechatnoy plati s rezistivnim elementom dlya podogreva mikrochem industrialnogo naznacheniya* [Evaluation of the



- possibility of using a printed circuit board with a resistive element for heating industrial circuits]. *Materiali Mezhdunarodnoi nauchno-tehnicheskoi konferencii studentov, aspirantov i molodih uchenih «Nauchnaya sessiya TUSUR–2021»* [Proceedings of the international scientific and technical conference of students, graduate students and young scientists «TUSUR Scientific session – 2021»]. Tomsk, Russia, 2021, vol. 1, pp. 214–217 (in Russ.).
19. [Proper heating technology for printed circuit boards]. Available at: [http://termopro.ru/files/1512/Tehnolo-giya\\_podogreva.pdf](http://termopro.ru/files/1512/Tehnolo-giya_podogreva.pdf), free (Accessed: March 13, 2022) (in Russ.).
20. Vishay DTO 25. Available at: <https://www.vishay.com/docs/51054/dto25.pdf>, free (Accessed: March 13, 2022).
21. Zhang Y. Improved Numerical-Analytical Thermal Modeling Method of the PCB With Considering Radiation Heat Transfer and Calculation of Components Temperature. *IEEE Access*, 2021, vol. 9, pp. 92925–92940.
22. Shen Y., Wang H., Blaaberger F., Zhao H., Long T. Thermal Modeling and Design Optimization of PCB Vias and Pads. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020, vol. 35, pp. 882–900.
23. [Ceramic heater KRN-150]. Available at: <http://www.edelbox.ru/product/bs150>, free (Accessed: March 13, 2022) (in Russ.).
24. Buller A.V., Starostina E.A. *Razrabotka i issledovanie gibkogo rezistivnogo nagrevatelya na steklotkanevoy osnove* [Development and research of a flexible resistance heater based on glass fabric]. *Gagarinskie chteniya. Sbornik tezisev dokladov XLV mezhdunarodnoy molodezhnoy nauchnoy konferencii [Gagarin's Readings. Collection of abstracts of the XLV International Youth Scientific Conference]*, Moscow, Russia, 2019, pp. 835–836. (in Russ.).
25. Egorov V.A., Voronovich A.M., Buglak I.A., Ivanov D.E. Obzor i analiz gibkikh nagrevatelnykh elementov dlya obogreva rabochnykh organov mashin [Review and analysis of flexible heating elements for heating the working parts of machines] *Mechanics of the 21st Century*, 2019, no. 18, pp. 228–234.
26. Thick-film heating element HTS-14 Available at: [https://www.tel-pod.pl/\\_files/ugd/b5b7b4\\_117d64ec33e04ca8a766015be52fcc09.pdf](https://www.tel-pod.pl/_files/ugd/b5b7b4_117d64ec33e04ca8a766015be52fcc09.pdf), free (Accessed: March 13, 2022).
27. Lovecchio N., Di Meo V., Caputo D., Nascetti A., Crescitelli A., Esposito E., Cesare G. Transparent Oxide / Metal / Oxide Thin Film Heater With Integrated Resistive Temperature Sensors. *IEEE Sensors Journal*, 2021, vol. 21, pp. 18847–18854.
28. Vrublevskiy I.A., Chernyakova K.V., Gorbachev D.V., Muratova E.N., Moshnikov V.A. *Teplovie i elektricheskie kharakteristiki ploskikh nagrevateley iz aluminiya s nanoporistim anodnim oksidom aluminiya i rezistivnim elementom iz uglerodnoi niti* [Thermal and electrical characteristics of aluminum flat heaters with nanoporous anodic alumina and carbon filament resistive element]. *SVCH-tehnika i telekommunikacionnie tehnologii. Materiali 28-i mezhdunarodnoy krimskoy konferencii [Microwave Engineering and Telecommunication Technologies. Proceedings of the 28th International Crimean Conference]*. Sevastopol, Russia, 2018, pp. 1013–1016 (in Russ.).
29. Thick-film heating element GBR-601 Series Available at: [https://www.tel-pod.pl/\\_files/ugd/b5b7b4\\_a1c5c0b8d6a643cabe8b11946a04ca6e.pdf](https://www.tel-pod.pl/_files/ugd/b5b7b4_a1c5c0b8d6a643cabe8b11946a04ca6e.pdf), free (Accessed: March 13, 2022).
30. Lin H., Laskowski T. [Aluminum substrate thick film heater]. Patent US, no. 6222166, 2006.
31. Dzheri H., Mirko L., Yoizef F. Planarniy nagrevatelnyy element s rezistornoy strukturoy s polozhitelnim TKS [Planar heating element with PTC resistor structure]. Patent RF, no. 2668087, 2015.
32. Bobrov A.V., Lopuhov I.I., Petrova I.V., Filimonov A.B., Shirshov U.U. *Visokotemperaturniy nagrevatel [High temperature heater]*. Patent RF, no. 2483492, 2011.
33. [High-temperature graphite heater] Available at: <https://doncarb.com/articles/nagrevatel-grafitovyy>, free (Accessed: March 13, 2022) (in Russ.).

---

#### Maxim V. Khrantsov

Postgraduate student, Department of Television and Control, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)  
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
ORCID: 0000-0001-7901-0911  
Phone: +7-923-311-68-69  
Email: khrantsovmaxim@yandex.ru

#### Alexander M. Zabolotsky

Head, Department of Microwave and Quantum Radio Engineering, TUSUR  
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
ORCID: 0000-0002-1801-7922  
Phone: +7 (382-2) 41-36-43  
Email: amz@tusur.ru