

# Определение эффективных параметров теплоотводящих слоев в многослойных печатных платах

К. Хайрнатов, к. т. н.<sup>1</sup>

УДК 621.3.038:526.21:004.94 | ВАК 05.27.00

Наиболее удобным и действенным методом уменьшения температуры электронных компонентов, смонтированных на многослойных печатных платах, является отвод тепла с помощью теплоотводящих слоев, выполненных из материалов с высокой степенью теплопередачи: меди, алюминия, магния и др. Однако в практике встречаются случаи неоправданного увеличения толщины таких слоев, когда весовые характеристики многослойных плат ухудшаются, не давая значимой прибавки к снижению температуры нагретых компонентов. Этим определяется актуальность исследования эффективной толщины теплоотводящих слоев с учетом свойств материалов, из которых они изготавливаются.

**П**роблема отвода тепла от активно нагреваемых компонентов за счет теплопроводности металлизации многослойных печатных плат (МПП) рассматривалась автором в работе [1] применительно к бортовой радиоэлектронной аппаратуре, эксплуатирующейся в негерметичных отсеках космических аппаратов с централизованной системой обеспечения тепловых режимов. Исследовалось влияние толщины медной металлизации внутренних слоев МПП на тепловой режим базовой кассеты, представляющей собой печатный узел в сборе с необходимыми силовыми конструктивными элементами. Математическое моделирование, выполненное методом конечных элементов в программной системе ANSYS, показало, что введение в состав многослойных печатных плат дополнительных медных слоев обеспечивает требуемые по Техническим условиям значения температур теплонапряженных компонентов электронного модуля.

В статье [2] в результате проведенного по аналогичной методике исследования установлено, что толщина теплоотводящих слоев МПП влияет на теплоотвод нелинейно – его эффективность растет медленнее, чем суммарная масса все более толстых теплоотводящих слоев. Выявлена оптимальная толщина теплопроводящих слоев по критерию соотношения роста весовых характеристик МПП, с одной стороны, и величины снижения температуры компонентов – с другой.

Однако в процессе моделирования в работе [2] были приняты ограничения, не позволяющие распространить полученные результаты на значительное число ситуаций практического конструирования, поскольку диапазоны

изменения температур составляли не более 1,5 °С, а габариты платы не превышали 15 × 20 мм при толщине 1,6 мм. В настоящей работе рассмотрен результат решения той же задачи, но для модуля на печатной плате обычных для бортовой электроники габаритов, с различным количеством слоев, различным сочетанием их толщины, в широком диапазоне изменения температур.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Цель работы – определение эффективной толщины теплоотводящих слоев – достигается путем математического моделирования электронного устройства, в ходе которого рассчитывается максимальная температура компонентов при различной толщине слоев, выполненных из меди и алюминия.

Под эффективной толщиной теплоотводящего слоя понимается диапазон этой величины, в рамках которого каждое приращение толщины на 35 мкм обеспечивает снижение температуры в пределах от 3 до 1 °С. Снижение температуры на величину, превышающую 3 °С, свидетельствует об общей недостаточности теплоотвода; снижение на величину, меньшую 1 °С, – о несоответствии результата цене, выражающейся в ухудшении весовых характеристик конструкции.

## ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Исследовался тепловой режим модуля бортовой информационно-вычислительной машины. Основание модуля представляет собой многослойную конструкцию, сверху и снизу которой находятся слои со смонтированными на них компонентами (в дальнейшем – монтажные слои), а между ними – теплоотводящие слои в виде сплошных металлических полигонов, изолированные

<sup>1</sup> МАИ (НИУ), доцент, kamilh@mail.ru.

**Таблица 1.** Параметры материалов слоев основания модуля

Материал	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Теплопроводность, W/м·К
Алюминий	2800	205
Медь	8933	387
Диэлектрик (FR-4)	1250	0,35

друг от друга диэлектриком. Габариты основания в плоскости 154×180 мм, его толщина 1,6 мм. Рассматриваются два вида материала теплоотводящих слоев: медь и алюминий. Мощность, генерируемая компонентами модуля, составляет 10,4 Вт.

Модуль установлен на термостабилизационную платформу с температурой 40 °С. Температура окружающей среды ±40 °С (величина +40 °С выбрана потому, что такая температура среды создает для модуля наиболее тяжелые по тепловому нагружению условия работы из тех, которые встречаются при эксплуатации бортовой электроники). Модуль находится в негерметичном корпусе, при нормальном атмосферном давлении.

Параметры материалов слоев основания модуля, необходимые для расчета, приведены в табл. 1.

### МЕТОДИКА

Процесс моделирования состоял в проведении расчетов максимальной температуры компонентов T<sub>0</sub> по каждому из вариантов структуры основания модуля, отличающихся друг от друга толщиной слоев металлизации. При увеличении последней, исходя из условия сохранения общей толщины пакета, равной 1,6 мм,

толщина диэлектрика уменьшается. Это уменьшение учтено путем равномерного распределения дефицита толщины по всем слоям диэлектрика; пример такого распределения для одного из расчетных вариантов приведен в табл. 2.

Для всех вариантов структуры были проведены по две группы расчетов: для медных и алюминиевых теплоотводящих слоев.

Задача решалась методом конечных элементов. Модуль аппроксимировался совокупностью 20-узловых квадратичных гексаэдральных конечных элементов объемной проводимости. В ходе вычислений рассчитывалась температура в узлах конечных элементов.

Температура в узлах конечноэлементной аппроксимации электронного устройства определяется как решение системы уравнений

$$Q = C \times T, \tag{1}$$

где C – матрица проводимостей, описывающая теплообменные свойства материала (W/°C); T – температура в узлах, подлежащая определению (°C); Q – сумма векторов, учитывающих конвективный теплообмен, поток тепла через поверхность компонента и внутренние источники тепла компонентов.

В качестве характеристик тепловой нагрузки и температуры, прикладываемой к модулю, учитывались:

- интенсивность распределенной теплоты на единицу площади, применяемая к граням элементов конструкции (W/м<sup>2</sup>);
- интенсивность распределенной теплоты на единицу объема (W/м<sup>3</sup>), вычисляемая как отношение энергии, генерируемой компонентом, к объему этого компонента (принято равномерное распределение энергии по объему);

**Таблица 2.** Один из вариантов расчетной структуры основания модуля: минимальная толщина металлических слоев 18 мкм, толщина металла увеличивается на 35 мкм (кроме первого шага увеличения) как во внутренних (теплоотводящих слоях), так и во внешних (монтажных)

Материал слоя	Толщина слоя, мкм											
1 <sup>1</sup> Медь	18	35	70	105	140	175	210	245	280	315	350	
	FR-4	509	487	463	440	417	393	370	207	160	113	67
2 Медь/алюминий	18	35	70	105	140	175	210	245	280	315	350	
	FR-4	509	487	463	440	417	393	370	207	160	113	67
3 Медь/алюминий	18	35	070	105	140	175	210	245	280	315	350	
	FR-4	509	487	463	440	417	393	370	207	160	113	67
4 Медь	18	35	70	105	140	175	210	245	280	315	350	

<sup>1</sup> В дальнейшем описании исследования будут использоваться только значения толщины металла, поэтому слоям диэлектрика номера не присваиваются.

- внешняя температура +40 °С, применяемая к установочной поверхности.

Общее число конечных элементов разбиения составило 53 034. Точность полученных расчетов проверялась путем сгущения сетки конечных элементов. Максимальная разница между значениями температур, вычисленными для основного разбиения, и результатами, полученными при проверочном разбиении на 61220 элемента, составила ~2,5%; эта величина и является погрешностью вычислений при моделировании.

Картина распределения температур, построенная как совокупность температур в узлах разбиения, представлена на рис. 1.

**РЕЗУЛЬТАТЫ**

Результаты расчетов для структуры, описанной в табл. 2, приведены в табл. 3.

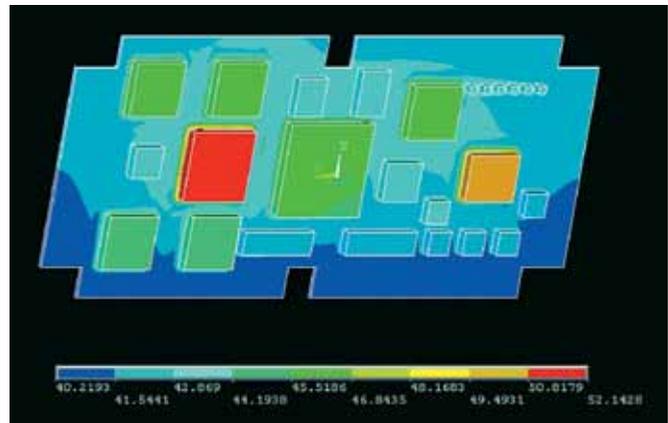
Моделирование проводилось и для других вариантов сочетания толщин металлических слоев, в частности, при постоянной толщине (35 мкм) монтажных слоев и ее наращивании у внутренних, теплоотводящих, при двух (табл. 4) и четырех (табл. 5) таких слоях в структуре основания модуля.

Обобщение результатов моделирования подтвердило вывод, сделанный в работе [2], о том, что максимальная температура компонентов находится в нелинейной зависимости от толщины теплоотводящих слоев многослойной печатной платы. Кроме того, основываясь на значениях температур, приведенных в табл. 3, 4, 5, установлено, что в условиях теплового нагружения, сравнимых с теми, которые приняты в качестве исходных при моделировании, эффективная толщина каждого из теплоотводящих слоев в многослойных структурах составляет:

- для слоев из меди: 70–175 мкм;
- для слоев из алюминия 105–245 мкм.

**Таблица 3.** Изменение максимальной температуры компонентов ( $T_0$ ) для модуля с двумя теплоотводящими слоями в основании. Значение толщины увеличивается на равную величину для всех металлических слоев, как теплоотводящих, так и монтажных. Приведены значения температуры для теплоотводящих слоев из алюминия и меди

Металлические слои	Толщина слоя, мкм										
	18	35	70	105	140	175	210	245	280	315	350
1 (монтажный)	18	35	70	105	140	175	210	245	280	315	350
2 (теплоотводящий)	18	35	70	105	140	175	210	245	280	315	350
3 (теплоотводящий)	18	35	70	105	140	175	210	245	280	315	350
4 (монтажный)	18	35	70	105	140	175	210	245	280	315	350
$T_0^2$ , °С. Алюминий	109,3	80,3	63,4	57,2	53,9	51,8	50,4	49,3	48,5	47,8	47,3
$T_0$ , °С. Медь	78,3	62,8	53,6	50,1	48,3	47,1	46,3	45,7	45,2	44,9	44,6



**Рис. 1.** Пример визуализации результатов моделирования: один из вариантов распределения температур на компонентах и основании модуля

При практическом проектировании электронных модулей следует учитывать, что вклад в теплоотвод тех слоев МПП, которые несут топологический рисунок, невозможно учесть с абсолютной точностью. Поэтому целесообразно считать, что металл распределен по ним с некоторой средней плотностью, характеризующей коэффициентом заполненности: отношением суммарной площади металла на данном слое к площади сплошного полигона в границах его топологического рисунка. Учесть при моделировании эффект снижения теплоотвода таким слоем можно, введя его эквивалентную толщину, определяемую как толщина фольги слоя, умноженная на коэффициент заполненности.

**ВЫВОДЫ**

Проведенное математическое моделирование тепловых режимов многослойной структуры основания модуля, работающего в нормальных атмосферных

**Таблица 4.** Изменение максимальной температуры компонентов в зависимости от толщины теплоотводящих слоев и вида материала, из которого они выполнены. В структуре – два монтажных слоя постоянной толщины и два теплоотводящих, с увеличивающейся толщиной

Металлические слои	Толщина слоя, мкм											
	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35
1 (монтажный)	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35
2 (теплоотводящий)	18	35	70	105	140	175	210	245	280	315	350	
3 (теплоотводящий)	18	35	70	105	140	175	210	245	280	315	350	
4 (монтажный)	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35
T <sub>0</sub> , °С. Алюминий	93,1	80,3	67,5	61,2	57,4	54,9	53,0	51,6	50,5	49,7	48,9	
T <sub>0</sub> , °С. Медь	70,6	62,8	55,4	51,9	49,8	48,4	47,4	46,7	46,1	45,6	45,2	

**Таблица 5.** Изменение максимальной температуры компонентов в зависимости от толщины теплоотводящих слоев и вида материала, из которого они выполнены. В структуре – два монтажных слоя постоянной толщины и четыре теплоотводящих, с увеличивающейся толщиной

Металлические слои	Толщина слоя, мкм											
	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35
1 (монтажный)	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35
2 (теплоотводящий)	18	35	35	53	70	88	105	123	140	158	176	
3 (теплоотводящий)	18	18	35	53	70	88	105	123	140	158	175	
4 (теплоотводящий)	18	35	35	53	70	88	105	123	140	158	175	
5 (теплоотводящий)	18	18	35	53	70	88	105	123	140	158	175	
6 (монтажный)	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35
T <sub>0</sub> , °С. Алюминий	79,4	74,1	69,9	64,7	61,7	59,6	58,1	56,9	56,0	55,2	54,6	
T <sub>0</sub> , °С. Медь	62,2	59,7	57,5	55,0	53,5	52,5	51,8	51,2	50,8	50,4	50,1	

условиях в негерметичном корпусе, установленного на термостабилизационную платформу с температурой +40 °С, показало, что:

- использование в составе МПП внутренних теплоотводящих слоев позволяет обеспечить температуры компонентов, требующиеся для их нормального функционирования;
- между суммарной толщиной теплоотводящих слоев и количеством отводимого тепла нет линейной зависимости, последняя величина растет медленнее, чем первая;
- наиболее эффективная толщина теплоотводящего слоя из меди находится в пределах 70–175 мкм, из алюминия – 105–245 мкм. Увеличение толщины теплоотводящих слоев сверх указанных значений не приводит к существенному улучшению

теплового режима, в то время как стоимость и вес платы увеличиваются. Последнее особенно нежелательно для приборов, применяемых в авиаракетной технике, где весовые характеристики имеют высокий приоритет.

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании многослойных печатных плат.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. **Хайрнатов К. З.** Моделирование и тепловой анализ электронных устройств космических аппаратов // М.: Вестник МАИ. 2013. № 3. Т. 20. С. 134–138.
2. **Хайрнатов К. З., Жанаштаева Т. М.** Влияние толщины слоев многослойной печатной платы на теплоотвод // Тезисы докладов 16-й Международной конференции «Авиация и космонавтика-2017». С. 386.