

УДК 631.7.04-197 : 631 : 7.019.11

В.О. ПОВГОРОДНИЙ*Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины***УПРАВЛЕНИЕ ТЕПЛОВЫМ РЕЖИМОМ ПЛАТЫ С РАЗМЕЩЕННЫМИ НА НЕЙ ЭЛЕКТРОННЫМИ РАДИОТЕХНИЧЕСКИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ**

Приведен расчет управления тепловым режимом для платы с размещенными на ней электрорадиоэлементами (ЭРЭ). Расчет был проведен с использованием стандартных зависимостей для расчета характеристик температурного поля. ЭРЭ на плате и критериев БИО и Фурье. ЭРЭ учитывались как тепло-рассеивающие элементы (источники теплоты), так и распределенные массы. Получены максимальные и минимальные значения температур и максимального температурного градиента на плате, что является необходимым для решения задачи управления температурным полем и полем температурных напряжений. В последующем полученные результаты по температурам можно использовать при проектировании системы охлаждения приборных отсеков бортовой аппаратуры, устанавливаемой на отечественные самолеты.

температура, расчет, критерий, плата, управление, авиация, бортовая аппаратура**Введение**

Важной составной частью проектирования бортовой радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) является задача обеспечения необходимого теплового режима [1]. Радиоэлектронные средства играют сегодня большую роль в различных областях науки и техники, а их отказы способны вывести из строя весьма серьезные системы, эксплуатируемые в очень жестких режимах работы, в том числе и климатических. В последние годы терморегулирование РЭА превращается в одну из наиболее важных областей военной и авиационно-космической техники. Разнообразные условия применения микроэлектронных устройств вызвали необходимость в создании печатных плат с высокой плотностью тепловой мощности, требующих минимального технического обслуживания в процессе нормальной эксплуатации (т.е. обладающих высокой надежностью). Широкое внедрение микроэлектронных устройств, кроме того, требует разработки методов оптимизации терморегулирования РЭА.

1. Формулирование проблемы

В настоящее время конструкции РЭА встречаются прямоугольной формы (модуль воздушных

параметров (МВП)). МВП устанавливается на самолетах АН-124 «Руслан», ИЛ-76 и предназначен для измерения основных параметров полета (высоты, истинной и приборной скорости и числа Маха, температуры заборного воздуха), размещаемый в кабинном отсеке самолета. Модель блока кассетной конструкции представляет собой пакет плат с размещенными на них электрорадиоэлементами (ЭРЭ).

Как показали предварительные исследования, отличительной особенностью теплового режима блоков кассетной конструкции является неравномерность температурных полей как в плоскости плат, так и в направлении, перпендикулярном платам (при равномерном тепловыделении на платах).

Нагретая зона состоит из кассет с платами. В каждую кассету входит одна, две или несколько плат. Общее количество плат в блоке определяется не только габаритными размерами блока, но также и высотой электрорадиоэлементов (ЭРЭ), устанавливаемых на платах. Платы в блоке могут располагаться горизонтально или вертикально, однако, преимущества вертикального положения плат (удобство в эксплуатации, устойчивость к механическим перегрузкам, возможность применения естественной вентиляции) заставляют конструкторов чаще

останавливаться именно на таком варианте. Нагретая зона каждой платы заполнена теплоотсеивающими и нетеплоотсеивающими элементами (микросхемами, микросборками, микромодулями или дискретными элементами малого размера). Принимается, что рассеиваемая нагретой зоной мощность распределена равномерно по платам. Электрическое соединение между микросхемами и ЭРЭ осуществляется печатными токопроводниками, нанесенными на плату.

Печатный монтаж может быть односторонний (на одной стороне платы), двухсторонний (на обеих сторонах платы) и многослойный (несколько тонких плат с одно- или двухсторонним печатным монтажом «склеены» в один пакет). Многослойные платы, содержащие как минимум один сплошной медный слой (толщина 0,07 мм), служащий в качестве шины питания или заземления.

Существующие зазоры между платами необходимо свести к минимуму, что диктуется соображениями сокращения массы и габаритов блока. В современных конструкциях зазор между установленными на плату ЭРЭ и соседней платой не превышает 2 – 3 мм.

Чаще всего отказ радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) происходит из-за несоблюдения при их проектировании требований по устойчивости к механическим и тепловым воздействиям.

В этой связи большое внимание сегодня уделяется разработке и внедрению методов теплофизического проектирования с учетом температурных напряжений [2, 3].

Таким образом, при эксплуатации бортовой аппаратуры возникают отказы, которые возникают вследствие температуры и температурных напряжений и их можно разбить на три группы:

- разрушение стеклотекстолитовой (гетинаксовой) пластины;
- разрыв контактной дорожки и нарушение крепления ЭРЭ и его внешних выводов;
- выпучивание (термодинамический изгиб) пластины (платы).

2. Решение проблемы

Пусть термоупругость в твердом теле следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned} \rho(x) \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} &= x^{-R} \frac{\partial}{\partial x} \left[x^R E(x) \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial x} (\beta T) + F_1(x, t); \\ C(x) \frac{\partial T}{\partial t} &= x^{-k} \frac{\partial}{\partial x} \left[x^R \lambda(x) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + F_2(x, t), \end{aligned} \quad (1)$$

где $x \in (0, l)$, $t > 0$, $F_i(x, t)$, $i = 1, 2$, $\beta(x) > 0$, $\rho(x) > 0$, $c(x) > 0$ – заданные непрерывные функции своих аргументов; $k, l > 0$ – заданные положительные числа; $E(x)$ и $\lambda(x)$ – отыскиваемые положительные и непрерывные функции; $u = u(x, t)$, $T = T(x, t)$ – решение системы уравнений (1). При $k = 0$, $k = 1$, $k = 2$ система (1) описывает процесс термоупругости соответственно в отрезке, цилиндре и шаре.

Задача теплопроводности в пластине решается с использованием уравнения теплопроводности для прямоугольной пластины (платы из стеклотекстолита СТЭФ) в декартовых координатах в двумерной постановке. В данной задаче используются граничные условия третьего рода на торцах платы. Применяется четырехугольный КЭ с 12-ю степенями свободы.

Исходные данные:

- длина платы $a = 0,14$ м;
- ширина платы $b = 0,12$ м;
- толщина платы $h = 0,0015$ м;
- неравномерность температурного поля платы $A = 0,3$;
- коэффициент теплопроводности платы $K_{\text{тепл}} = 7,3 \cdot 10^{-8}$ м²/с;
- коэффициент конвективного теплообмена плоскости платы $h_{s1} = 1$;
- коэффициент конвективного теплообмена плоскости платы $h_{s2} = 1$;
- коэффициент конвективного теплообмена плоскости платы $h_e = 1$;
- коэффициент линейного температурного расширения материала платы $\alpha = 1,78 \times 10^{-5} \frac{1}{K}$;
- модуль упругости (Юнга) материала платы $E = 2,1 \times 10^9$ Па;

коэффициент Пуассона материала платы $\mu = 0,15$.

Зависимость предела прочности стеклотекстолита СТЭФ от температуры описывается зависимостью

$$[\sigma(t)] = 459000 - 81,2t - 0,156t^2.$$

При расчете используются граничные условия 3-го рода на торцах платы радиационно-конвективный теплообмен [4].

Для конечно-элементного представления системы разрешающее уравнение процесса теплопередачи имеет вид:

$$[C] \{T'\} + [K] \{T\} = \{Q\},$$

где $[C]$ – матрица удельных теплоемкостей; $\{T'\}$ – производная по времени температуры в узле; $[K]$ – матрица эффективной теплопроводности; $\{T\}$ – вектор узловых температур; $\{Q\}$ – вектор эффективного теплового потока в узле;

$$[K] \{T\} = \{Q\}.$$

Термосиловая нагрузка на плату:

$$F(x, y, t) = (1 - e^{-At}) \cdot (x - a)^2 \cdot (x + a)^2 \cdot (y - b)^2 \cdot (y + b)^2.$$

$A = 0,3$ – неравномерность температурного поля.

Квадрат каждого сомножителя обозначает жесткую заделку.

Задание нагрузки – кинематическое через опоры.

Поле температур определяется по зависимости

$$T(x, y) = T_0 + \frac{R_m}{1 - \mu^2} \cdot \frac{1}{\alpha} \cdot \left(\frac{h}{b}\right)^2 \times \\ \times \cos \left[\left((\pi(m+2))^{0,5} \right) \cdot \left(0,318 - \frac{0,6366x}{a} \right) \right] \times \\ \times \cos \left[\left((\pi(n+2))^{0,5} \right) \cdot \left(0,318 - \frac{0,6366y}{b} \right) \right].$$

Температурное поле (изотермы) определяется согласно приведенной выше аналоговой зависимости и представлено на рис. 1.

Поле температурных деформаций определяется

$$\varepsilon(x, y) = \frac{\alpha}{\mu - 1} \cdot \left[T_0 + \frac{R_T}{1 - \mu^2} \cdot \left(\frac{h}{b}\right)^2 \right] \times \\ \times \cos \left[\left((\pi(m+2))^{0,5} \right) \cdot \left(0,318 - \frac{0,6366x}{a} \right) \right] \times \\ \times \cos \left[\left((\pi(n+2))^{0,5} \right) \cdot \left(0,318 - \frac{0,6366y}{b} \right) \right].$$

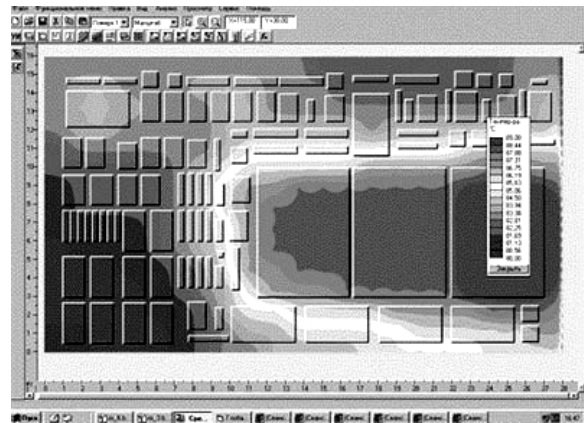


Рис. 1. Изотермы на плате

Поле температурных напряжений

$$G(x, y) = \frac{\alpha \cdot E}{\mu - 1} \cdot \left[T_0 + \frac{R_m}{1 - \mu^2} \cdot \frac{1}{\alpha} \cdot \left(\frac{h}{b}\right)^2 \right] \times \\ \times \cos \left[\left((\pi(m+2))^{0,5} \right) \cdot \left(0,318 - \frac{0,6366x}{a} \right) \right] \times \\ \times \cos \left[\left((\pi(n+2))^{0,5} \right) \cdot \left(0,318 - \frac{0,6366y}{b} \right) \right].$$

Максимальная температура на поверхности платы – 118,96 °С. Минимальная температура на поверхности платы – 90,42 °С. Максимальный градиент температур – 5,0 °С/мм.

Решение уравнений (1) с граничными тепловыми и механическими условиями при решении обратной задачи термоупругости можно заменить задачей поиска минимума функционала

$$\Phi(T) = \frac{1}{2} \int_V \lambda \left[\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 \right] dV + \\ + \sum_{i=0}^2 \int_{S_{qi}} q_i T dS + \frac{1}{2} \sum_{i=3}^5 \int_{S_{\alpha i}} \alpha_i (T - T_f)^2 dS.$$

Решать поставленную задачу будем с помощью метода конечных элементов. Элементы задачи управления температурными напряжениями при расчете системы охлаждения по известным зависимостям. Определим основные характеристики: критерий БИО: $Bi = 0,00225$ 1/с; время появления максимальных сжимающих напряжений (критерий Фурье): 22,3 мин; продолжительность инерционного этапа нагрева при малом БИО – 1,28 с; максималь-

ные растягивающие напряжения – 1,26 кПа; темп охлаждения – 2,7.

В настоящее время освоена технология изготовления стеклотекстолитовых плат с расположенными внутри микроканалами, способными пропускать охлаждающую жидкость. Применение таких плат перспективно как в бортовой, так и наземной аппаратуре. Институт проблем машиностроения НАН Украины совместно с Научно-исследовательским технологическим институтом приборостроения (г. Харьков) занимается проектированием, изготовлением и исследованием стеклотекстолитовых плат со встроенными в них резистивными элементами (нагреватели для систем термостабилизации РЭА) и микроканалами для внутреннего конвективного охлаждения (платы для РЭА) (рис. 2, 3).



Рис. 2. Принудительная вентиляция платы

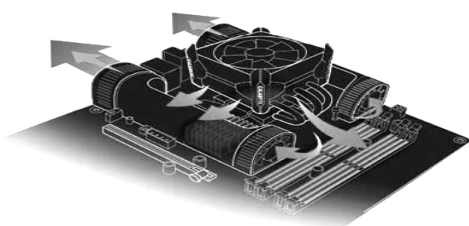


Рис. 3. Направление потока воздуха в системе охлаждения

Здесь нужно правильно разместить в платах контактные дорожки, обеспечивающие заданное выделение тепловой энергии, или микроканалы для эффективного и равномерного охлаждения плат с учетом мощности и месторасположения элементов РЭА, учитывая требования не только теплопроводности, но и термочувствительности. Расчеты тепловых ре-

жимов являются частью процесса проектирования и включаются в проектные сравнения, проводимые при формировании технических характеристик аппаратуры, объема, необходимой для работы системы кондиционирования, охлаждения и т.д.

Выводы

Экономичность состоит в том, что дороговизна и сложность экспериментальных исследований вызывает необходимость создания расчетно-теоретических методик исследования данных технических объектов. Один из перспективных способов обеспечения теплового режима – жидкостное охлаждение [4] при проектировании таких устройств возникает комплексная задача размещения РЭА как, во-первых, тепловыделяющих элементов (источников теплоты) и, во-вторых, сосредоточенных масс, так и охлаждающих каналов (стоков теплоты).

Литература

1. Дульнев Г.Н., Парфенов В.Г., Сигалов А.В. Методы расчета теплового режима приборов. – М.: Радио и связь, 1990. – 312 с.
2. Алексеев В.А. Расчет нестационарной теплопередачи многослойной стенки с неодинаковыми площадями контакта между слоями // Инж.-физ. журнал. – 1985. – Т. 39, № 3. – С. 491-496.
3. Алексеев В.А., Чукин В.Ф., Митрошкина М.В. Математическое моделирование тепловых режимов аппаратуры на ранних этапах ее разработки. – М.: Информатика – Машиностроение, 1998. – С. 17–22.
4. Повгородний В.О. Определение температурного поля платы с размещенными на ней электронными радиотехническими элементами // Авиационно-космическая техника и технология. – 2007. – № 2/38. – С. 85-88.

Поступила в редакцию 5.06.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. П.Д. Доценко, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.