

УДК 631.7.04-197:631:7.019.20

В.О. ПОВГОРОДНИЙ

*Институт проблем машиностроения НАН Украины им. А.Н. Подгорного, Украина***РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ И ТЕРМОУПРУГОСТИ
ДЛЯ ПЛАТЫ С ЭЛЕКТРОННЫМИ РАДИОТЕХНИЧЕСКИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ**

Приведен тепловой и механический расчет для платы с расположенными на ней электрорадиоэлементами (ЭРЭ). Расчет был проведен с использованием аналоговой зависимости для расчета температурного поля. ЭРЭ на плате рассматривались как теплорассеивающие элементы (источники теплоты), так и распределенные массы. Получены значения температур и максимального температурного градиента на плате, что является необходимым для решения задачи термоупругости, а, именно, определения температурных напряжений. В последующем полученные результаты по температурам можно использовать при проектировании системы охлаждения на отечественных самолетах.

Ключевые слова: температура, градиент, плата, электрорадиотехнический элемент, авиация, бортовая аппаратура.

Введение

При форсированных циклических теплопрочностных испытаниях конструкций требуется по заданной величине температурных напряжений установить условия нагрева некоторого расчетного элемента. Возникает необходимость в решении обратной задачи термоупругости, в которой по заданному во времени закону изменения температурных напряжений в некоторой точке конструктивного элемента определяются граничные условия первого, второго или третьего рода. Как и при решении обратных задач теплопроводности [1], при решении обратных задач термоупругости возникают известные трудности. Для решения обратной задачи термоупругости на задаваемый закон изменения напряжений должны быть наложены некоторые ограничения.

Пусть элемент конструкции, вид и размеры его показаны на рис. 1, представляет собой термически тонкие пластины 1 и подкрепление 2, изготовленные из разных материалов и соединенные между собой. Элемент конструкции подвергается симметричному нагреву со стороны пластин. Будем считать, например, что нагрев осуществляется при граничных условиях третьего рода, причем температура среды T и коэффициент теплообмена являются заданными функциями времени.

Пусть из общей электрической схемы устройства выделена ее часть, представляющая некоторый конструктивный узел (блок), который можно представить на данном этапе разработки. В его состав может входить одно или несколько ЭРИ, которые через ряд конструктивных связей заканчиваются

стоком тепла, на границах которого можно задать некоторую условную температуру окружающей среды и интенсивность теплообмена на его границах. И здесь можно предположить, что перенос тепла от его источника (ЭРЭ) к основному стоку происходит в одном направлении, а в двух других направлениях (y и z) во всех составных телах отсутствует, т.е. рассматриваем поле температур в одномерной модели узла с ЭРЭ.

Теплоперенос в такой системе может происходить от ЭРИ через теплопроводный компаунд к печатным платам и через них к металлическим рамкам, а затем к металлическому корпусу или другим конструктивным элементам. Расчет таких систем можно свести к решению краевой задачи, системы сосредоточенных тел или приближенных аналитических решений. Для этого можно воспользоваться классическими решениями задач теплообмена в радиоэлектронной технике. Здесь важно создать тепловую модель теплопереноса, пусть грубую, но позволяющую отразить основные теплофизические процессы, происходящие в рассматриваемом узле с ЭРИ, если не сквозные, то заканчивающиеся на границе системы тел условиями теплообмена, при которых тепловые балансы отдельных узлов можно сложить и перейти от детализации тепловых режимов к синтезу всех составных частей аппаратуры с тем, чтобы можно было составить тепловой баланс аппаратуры с учетом временного фактора, определить необходимую интенсивность теплообмена отдельных конструктивных узлов электрической схемы с силовой конструкцией разрабатываемой аппаратуры. Пользуясь этими результатами расчета отдельных узлов, можно определить схему построения системы обеспечения тепло-

вого режима аппаратуры. На следующих этапах, по-видимому, при конструировании можно пользоваться методом поэтапного моделирования в классическом его понимании [1].

Порядок расчета

В основе приближенного аналитического метода расчета, приведенного ниже, используется метод мгновенного регулярного режима Э.М. Гольдфарба [2], разработанный им для процессов переноса тепла в металлургических печах, вследствие чего мало распространенный в других отраслях теплотехники. Этот метод исследовался и применительно к процессам переноса тепла в системах охлаждения радиоэлектронных устройств и показывает его применимость [3], особенно для процессов переноса тепла в конструкциях, в которых используются тепловые трубы (ТТ) и тепловые аккумуляторы (ТА), как наиболее прогрессивные средства обеспечения теплового режима бортовой аппаратуры. При этом модифицированный вид этого метода можно использовать и при решении классических задач теплообмена в радиоэлектронной технике.

Одномерную модель, состоящую из ЭРЭ и соединенных друг с другом тел конструкций узла вплоть до некоторого основного стока (теплоотвода) в этом узле с учетом ранее принятых допущений, можно представить в виде набора соприкасающихся пластин или теплоизолированных с боковых сторон стержней с неодинаковыми поверхностями контакта между собой и эквивалентной толщиной, температура которых изменяется только в направлении движения теплового потока (оси x). В общем виде такая тепловая модель представлена на рис. 1.

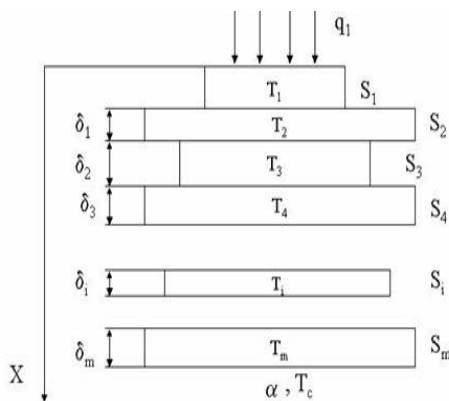


Рис. 1. Модифицированная тепловая модель узла с ЭРИ с неодинаковыми поверхностями контакта между слоями (для произвольного количества слоев)

Математическое описание процессов теплопередачи в таких моделях приведено в [3], однако здесь имеет практический смысл привести его при-

ближенное аналитическое решение. Отличие этой модифицированной модели от принятой у Э.М. Гольдфарба многослойной стенки состоит в неравенстве площадей контакта между соприкасающимися телами.

Если пренебречь временем инерционного периода, то начальную температуру по всем слоям Температуру можно принять равной температуре окружающей среды $T_i = T_c$. Тогда перепады температур и соответствующие им температуры на границах слоев в регулярном периоде определяем в следующей последовательности.

1. Вычисляются плотности тепловых потоков q_i на границах эквивалентных слоев (соприкасающихся тел, тепловые потоки через некоторые передаются только в направлении основного стока (теплоотвода)) по следующим аналитическим зависимостям (для простоты здесь принято, что процесс теплопередачи осуществляется через четыре слоя, а наружная поверхность последнего взаимодействует с окружающей средой):

$$\begin{aligned} q_5 &= q_1 \left[1 - \exp\left(-\frac{\tau}{\tau_0}\right) \right]; \\ q_4 &= q_1 - \frac{E_1 + E_2 + E_3}{\sum_{i=1}^4 E_i} (q_1 - q_5); \\ q_3 &= q_1 - \frac{E_1 + E_2}{\sum_{i=1}^3 E_i} (q_1 - q_5); \\ q_2 &= q_1 - \frac{E_1}{\sum_{i=1}^2 E_i} (q_1 - q_5). \end{aligned} \quad (1)$$

2. Время аккумуляции τ_a определяется из следующего выражения:

$$\begin{aligned} \tau_a &= E_1 \left(\frac{1}{n_m \alpha} + \frac{\delta_4}{\lambda_4 n_4} + \frac{\delta_3}{\lambda_3 n_3} + \frac{\delta_2}{\lambda_2 n_2} + \frac{1}{2} \frac{\delta_1}{\lambda_1 n_1} \right) + \\ &+ E_2 \left(\frac{1}{n_m \alpha} + \frac{\delta_4}{\lambda_4 n_4} + \frac{\delta_3}{\lambda_3 n_3} + \frac{1}{2} \frac{\delta_2}{\lambda_2 n_2} \right) + \\ &+ E_3 \left(\frac{1}{n_m \alpha} + \frac{\delta_4}{\lambda_4 n_4} + \frac{1}{2} \frac{\delta_3}{\lambda_3 n_3} \right) + \\ &+ E_4 \left(\frac{1}{n_m \alpha} + \frac{1}{2} \frac{\delta_4}{\lambda_4 n_4} \right). \end{aligned} \quad (2)$$

3. Температуры на границах слоев T_i в зависимости от времени τ вычисляются из следующих выражений (3).

Смысл приведенных величин рассмотрен ниже:

$$E_i = c_i \rho_i \delta_i n_i; \quad R_i = \frac{\delta_i}{\lambda_i} n_i;$$

$$R_m = \frac{1}{\alpha} n_m; \quad n_i = \frac{S_i}{S_1},$$

где $i = 1, 2, 3, 4$ – количество слоев;

m – порядковый номер наружной поверхности последнего слоя;

$c_i, \rho_i, \lambda_i, \delta_i$ – соответственно удельные теплоемкости, плотности, теплопроводности и эквивалентные толщины i -х слоев системы тел;

α – коэффициент теплообмена наружной поверхности последнего слоя с условной окружающей средой в районе размещения рассматриваемого узла (блока) в составе аппаратуры.

$$\begin{aligned} T_5 &= T_c + \frac{q_1}{n_4 \alpha} \left[1 - \exp \left(-\frac{\tau}{\tau_a} \right) \right]; \\ T_4 &= T_5 + \frac{(q_4 + q_5) \delta_4}{2 n_4 \lambda_4}; \\ T_3 &= T_4 + \frac{(q_3 + q_4) \delta_3}{2 n_3 \lambda_3}; \\ T_2 &= T_3 + \frac{(q_2 + q_3) \delta_2}{2 n_2 \lambda_2}; \\ T_1 &= T_2 + \frac{(q_1 + q_2) \delta_1}{2 n_1 \lambda_1}. \end{aligned} \quad (3)$$

Для стационарного состояния системы получим следующее выражение

$$\begin{aligned} T_{\text{лст}} - T_c &= q_1 \left(\frac{\delta_1}{\lambda_1 n_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2 n_2} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{\delta_3}{\lambda_3 n_3} + \frac{\delta_4}{\lambda_4 n_4} + \frac{1}{n_m \alpha} \right). \end{aligned} \quad (4)$$

Примеры типичных тепловых моделей отдельных узлов с ЭРИ представлены на рис. 2.

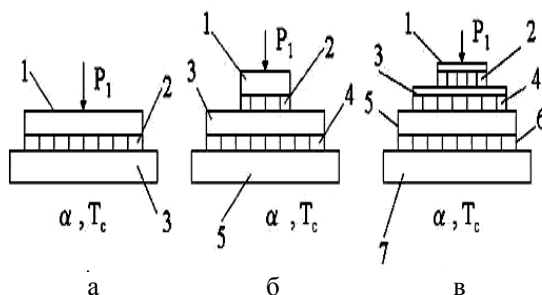


Рис. 2. Типичные тепловые модели отдельных узлов с ЭРИ:

- а: 1 – корпус ЭРИ; 2 – теплопроводный компаунд; 3 – сток тепла (теплоотвод);
 б: 1 – корпус ЭРИ; 2 – компаунд; 3 – одностойная или многослойная плата; 4 – компаунд; 5 – металлическая плата-рамка (сток тепла);
 в: 1 – корпус ЭРИ; 2 – компаунд; 3 – плата; 4 – компаунд; 5 – металлическая пластина; 6 – компаунд; 7 – теплоотвод.

А теперь вернемся к анализу введенного безразмерного параметра $n_i = S_i/S_1$, выражающего отношение площади поверхности i -го слоя к 1-му слою, к которому непосредственно подводится удельный тепловой поток от ЭРЭ $q_1 = P_1/S_1$ (P_1 – мощность, рассеиваемая ЭРЭ). Безразмерный параметр n_i учитывает различие в площадях контакта отдельных соприкасающихся слоев между собой. С физической стороны его можно назвать коэффициентом трансформации плотности тепловых потоков по слоям вплоть до основного стока рассеиваемой ЭРЭ мощности, наглядно демонстрирующим эффект снижения температуры ЭРЭ от введения дополнительных (или традиционных) конструктивных элементов.

Недостатком предлагаемой методики является то обстоятельство, насколько справедливо допущение об изотермичности поля температур в направлении осей y и z , однако этот вопрос следует решать в каждом конкретном примере [4].

Представленная тепловая модель, в аналитическом решении которой введен безразмерный параметр, оценивающий эффект снижения температуры от введения в конструкцию узла вблизи тепловыделяющих ЭРЭ традиционных или дополнительных конструктивных элементов, удобна для инженерной практики. Этот эффект означает, что уже на самых начальных этапах конструирования можно с помощью грубых расчетных моделей заранее выбрать средства снижения перегревов наиболее теплонапряженных ЭРИ, например, до среднего по сравнению с перегревами других ЭРЭ уровня. Это, в свою очередь, позволит уменьшить интенсивность теплообмена в теплонапряженных узлах и блоках и упростить средства обеспечения теплового режима аппаратуры в целом.

В тех случаях, когда в результате тепловых расчетов конструктивных узлов электрической схемы получаются недопустимые перегревы из-за неудовлетворительных стоков тепла, то взамен их можно использовать более эффективные средства, лучше пассивного характера, к которым следует отнести тепловые трубы и тепловые аккумуляторы, не требующие для своей работы дополнительных энергетических затрат, связанных с бортовым электрическим питанием. В обоих случаях можно использовать приведенные аналитические решения. Также следует отметить, что предлагаемую модифицированную тепловую модель удобно использовать при расчете теплового режима мощных ЭРЭ, охлаждаемых с помощью ТТ.

В радиоэлектронике из-за действия внешних нагрузок или несовершенных технологий изготовления в изделиях возникают напряжения от действия которых происходит отклонение их параметров

за пределы технических условий, что зачастую приводит к отказам еще задолго до поломок. Цена таких отказов бывает очень высокой. (Так, разрушение резистора стоимостью в 0,5 доллара привело в США к гибели ракеты стоимостью 140 миллионов долларов, поломка вывода одной из недорогих микросхем привела к потере связи с опущенным на Венеру и работавшим там аппаратом). При анализе причин отказов в радиоэлектронной аппаратуре (РЭА) традиционно считают, что 40 – 45% всех отказов в эксплуатации происходит от ошибок, допущенных на этапе их проектирования, 20% обусловлено несовершенством технологических процессов изготовления, а также недостаточным уровнем технологической дисциплины, 30% вызвано неправильными режимами эксплуатации и нарушениями правил технического обслуживания и около 5 – 7% связано с естественным износом составных частей и старением материалов. В приведенной классификации, однако, не учитывается тесная взаимосвязь, например, конструкторских и технологических причин отказов РЭА. Решение же проблемы обеспечения качества РЭА требует не только учета всех этапов их «жизненного цикла» (проектирование, доводка, производство и эксплуатация), но и взаимного влияния этих этапов. В процессе ударных воздействий, возникающих при транспортировке, монтаже или эксплуатации, при действии ударной волны и т. д., нагрузки к элементам аппаратуры прикладываются в течение короткого промежутка времени. Вследствие этого возникающие ускорения, перемещения и напряжения в элементах аппаратуры могут достигать больших значений и вызывать различные повреждения. Для повышения надежности работы изделия необходимо изучить взаимодействие объединительной платы с элементами навесного монтажа в различных условиях, определить возникающие при этом деформации и напряжения как в самих платах, так и в контактных узлах и элементах

Рассмотрим общий случай несимметричного нагревания неограниченной пластины в рамках модели термического слоя (рис. 1).

В инерционный период $0 \leq \tau \leq \tau_0$ сечение пластины имеет три термически разные зоны, каждая из которых находится в условиях плоского напряженного состояния с отличными от нуля компонентами тензора напряжений $\omega_y = \sigma_z = \sigma(\sigma_x = 0)$. В этом случае известные (например, [1, 2]) условия совместности деформаций, расписанные в рамках модели термического слоя, приводят к известным уравнениям термоупругости [3].

Используя условия силового баланса по сечению платы получим значения для температурных напряжений в непрогретой зоне

$$\sigma^{(0)} = 874177,34 \text{ Па.}$$

В то же время максимальные растягивающие напряжения, которые возникают в момент окончания инерционного этапа нагрева, составляют приблизительно $\sigma_{\max} \approx 2,4 \text{ МПа}$.

И условия сопряжения полей напряжений на границах стыков прогретых и непрогретых зон по известным зависимостям. Далее определяем функции интегрирования. После этого можем получить решение поставленной задачи термоупругости для произвольно нагреваемой неограниченной пластины на инерционном этапе:

Выводы

Экономичность состоит в том, что дороговизна и сложность экспериментальных исследований вызывает необходимость создания расчетно-теоретических методик исследования данных технических объектов.

Одним из перспективных способов обеспечения теплового режима является жидкостное охлаждение [4]. При проектировании таких устройств возникает комплексная задача размещения РЭА таких, как тепловыделяющие элементы (источники теплоты) и сосредоточенные массы такие, как охлаждающие каналы (стоки теплоты). Для ее решения так же, как в случае размещения только источников теплоты, удобно пользоваться аппаратом геометрических обратных задач теплопроводности и термоупругости.

Кроме того, из решения множественной обратной задачи назначены допуски на значения физико-механических характеристик резисторов и конденсаторов, а также герметизирующих компаундов, при которых обеспечивается их прочность и герметичность.

Литература

1. Алексеев В.А. Расчет нестационарной теплопередачи многослойной стенки с неодинаковыми площадями контакта между слоями / В.А. Алексеев, В.О. Повгородний // Инж.-физ. журнал. – Минск, 1985. – Т. XLIX, № 3. – С. 491-496.
2. Алексеев В.А. Математическое моделирование тепловых режимов аппаратуры на ранних этапах ее разработки / В.А. Алексеев, В.Ф. Чукин, М.В. Митрошкина // Информатика – Машиностроение. – М.: Вирав – Центр, 1998. – С. 17-22.
3. Алексеев В.А. Расчет устройств охлаждения электронной аппаратуры с использованием плавающих веществ / В.А. Алексеев, В.В. Антонов // Электронная техника в автоматике: сб. науч. тр. – М.: Радио и связь, 1985. – Вып. 16. – С. 147-155.

4. Дульнев Г.Н. Методы расчета теплового режима приборов / Г.Н. Дульнев, В.Г. Парфенов, А.В. Сигалов. – М.: Радио и связь, 1990. – 312 с.

Поступила в редакцию 15.05.2009

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

ВИРШЕННЯ ЗАДАЧ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ ТА ТЕРМОПРУЖНОСТІ ДЛЯ ПЛАТИ З ЕЛЕКТРОННИМИ РАДІОТЕХНІЧНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ

В.О. Повгородний

Розглядаються питання визначення температурного поля та температурних напружень механічних конструкцій (пакетів плат з розміщеними на них електронними радіотехнічними елементами) бортової апаратури вітчизняних літаків. Температурне поле та поле температурних напружень визначаються за допомогою чисельних методів скінчених та граничних елементів та аналітичного методу. Результати одержані для реальної конструкції за допомогою аналогового методу порівнюються з результатами, одержаними за допомогою іншого комплексу програм. Основні результати роботи знайшли промислове застосування в проектуванні систем нового приладового устаткування для літаків України.

Ключові слова: температура, градієнт, плата, електрорадіотехнічний елемент, термопружність, авіація, бортова апаратура.

THE DIVISION PROBLEM OF THERMO AND THERMOELASTICITY FOR PLATE WITH ELECTRONIC'S RADIOTECHNICAL ELEMENTS

V.O. Povgorodny

The article devoted to problems of definition and study of mechanical characteristics and temperature field of damption of mechanical constructions of airborne hardware of home-made aircraft. The temperature field is definite with account temperature stress. The results for real rubber damption compare with statistics of normative technical documents (the technical problem and the technical conditions). The results of calculations of the thermal and stress state's are received by the method and finite element's and boundary element's method. The main results of the work have been implemented in the project of the damping system's industrial production in developing new device aircraft's in Ukraine.

Key words: temperature, gradient, plate, electroradiotechnical element, thermoelasticity, aviation, airborn apparatuses.

Повгородний Владимир Олегович – канд. техн. наук, мл. научн. сотр. института проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков, Украина, e-mail: povgorod@ipmach.kharkov.ua.