

CALCULATION OF THERMAL MODES AND CHARACTERISTICS OF PRINTED-CIRCUIT BOARDS OF RADIO ELECTRONIC MEANS AND COMPUTER EQUIPMENT IN THE CONDUCTION COOLED HEAT EXCHANGE

© 2014

A. I. Tuishchev, doctor of technical sciences, associate professor, professor-consultant of the department «Automation of technological processes and productions»

Togliatti State University, Togliatti (Russia)

I. O. Gubanov, candidate of technical sciences, senior lecturer

Togliatti College of design and management, Togliatti (Russia)

V. M. Plekhanov, candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the department «Automation of technological processes and productions»

Togliatti State University, Togliatti (Russia)

D. G. Tokarev, candidate of technical sciences, associate professor of the department «Automation of technological processes and production»

Togliatti State University, Togliatti (Russia)

Annotation. Micro-miniaturization designs of radio electronic devices leads to thermal loading. Printed-circuit board is considered as a heat source, in which electric energy is converted into heat. Its elements in the laden condition are the sources and sinks of thermal energy. Present the calculation of thermal modes and characteristics of printed-circuit boards in the conduction cooled heat exchange.

Keywords: printed-circuit board, heat energy, conductive heat transfer, thermal conductivity, calculation of heat flux, heat sink.

УДК 621.396.6

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ ПРИ КОНВЕКЦИОННОМ И РАДИАЦИОННОМ ТЕПЛООБМЕНАХ

© 2014

A. И. Туищев, доктор технических наук, доцент, профессор-консультант кафедры «Автоматизация технологических процессов и производств»

Тольяттинский государственный университет, Тольятти (Россия)

И. О. Губанов, кандидат технических наук, старший преподаватель

Тольяттинский колледж дизайна и управления, Тольятти (Россия)

В. М. Плеханов, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Автоматизация технологических процессов и производств»

Тольяттинский государственный университет, Тольятти (Россия)

Д. Г. Токарев, кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизация технологических процессов и производств»

Тольяттинский государственный университет, Тольятти (Россия)

Аннотация. Конвекция в радиоэлектронных средствах представляет процесс переноса тепла между поверхностью твердого тела и воздушной средой. Теплообмен излучением осуществляется за счет электромагнитных колебаний в широком диапазоне длин волн. Представлен расчет тепловых режимов печатных плат при конвекционном и радиационном теплообмене.

Ключевые слова: радиоэлектронные средства, печатная плата, тепловой поток, теплоотдача, теплопроводность, конвекционный теплообмен, радиационный теплообмен, расчет тепловых режимов.

Конвекция в различных РЭС представляет процесс переноса тепла между поверхностью твердого тела и воздушной средой за счет перемещения макроскопических частей воздуха.

Как правило, в РЭС редко используется жидкостное охлаждение, поэтому в качестве среды используется воздух. Движение воздуха может быть свободным и вынужденным.

Свободное движение обуславливается естественной конвекцией, а вынужденное – принудительной вентиляцией.

Распространение тепла путем сочетания теплопроводности и конвекции называют конвекционным теплообменом.

Практические расчеты конвекционного теплообмена производят на основании закона Ньютона–Рихмана

$$Q = \alpha_K (\theta_o - \theta_c) S, \quad (1)$$

Где α_K – коэффициент конвективного теплообмена, $Bm / m^2 \cdot ^\circ C$;

θ_o и θ_c – соответственно температуры твердого тела конструкции РЭС и среды (воздуха);

S – площадь поверхности соприкосновения, m^2 .

Коэффициент α_K представляет собой количество тепла, переданного в единицу времени через единицу поверхности при разности температур между поверхностью и воздухом в один градус. Конвективная теплоотдача в РЭС определяется характером движения воздуха, который может быть представлен двумя режимами – ламинарным и турбулентным. Первый режим определяется спокойным, струйным течением воздуха, второй – вихревым, неупорядоченным течением воздуха.

Коэффициент α_K есть функция многих параметров: характера и скорости движения, охватывающего стенку воздуха v ; коэффициента теплопроводности λ , удельной теплоемкости c ; кинематической вязкости воздуха ν , разности температур стенки θ_o и окружающей среды θ_c ; формы и размера тела l ; коэффициента объемного расширения воздуха β ; ускорения силы тяжести g ; коэффициента температуропроводности α ; плотности воздуха ρ ; давления p .

С учетом перечисленного уравнение (1) для свободной конвекции можно записать в виде

$$Q = f(v, x, c, \nu, \theta_o, \theta_c, l, \beta, g, \alpha, \rho) \cdot (\theta_o - \theta_c) \quad (2)$$

Как видно из уравнения (2), такое обилие факторов, влияющих на коэффициент α_K , делает практически невозможным аналитическое решение задач конвективного теплообмена, поэтому в большинстве случаев расчеты выполняются на основе экспериментов. Обработка экспериментальных данных дала возможность получить общие закономерности, относящиеся к широкому классу явлений конвективного теплообмена, что позволило производить расчеты без проведения трудоемких и дорогостоящих опытов на основе теории подобия. Использование современной вычислительной техники позволило, применяя методы моделирования тепловых полей, рассчитывать тепловые характеристики РЭС.

Сущность подобия двух явлений заключается в разнзначности одноименных физических величин, определяющих эти явления. Так для конвективного теплообмена θ, v, p , а в ряде случаев и другие параметры (ν, λ, ρ и т. д.) в различных точках теплового потока могут иметь различные значения. Подобие двух таких процессов характеризует равноценность этих величин во всем объеме рассматриваемых систем, что означает разнзначность полей этих величин. Из анализа математического описания конвективного теплообмена выводятся строго определенные соотношения – инварианты или критерии (числа) подобия. Критерии подобия представляют безразмерные комплексы, составленные из параметров, характеризующих рассматриваемое явление. Критерии подобия называют именами ученых, внесших вклад в развитие науки о теплопередаче.

Обычно при расчете конвективного теплообмена используют критерии: nu (*nusselt*) – нуссельта; gr (*grashof*) – грасгофа; pr (*prandtl*) – прандтля.

В соответствии с [2] указанные критерии определяются из следующих соотношений

$$Nu = \frac{\alpha_K \cdot l}{\lambda}; Gr = \beta g \frac{l^3}{\nu^2} (\theta_o - \theta_c);$$

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha}; \alpha = \frac{\lambda}{c\rho}, \quad (3)$$

где α_K – коэффициент теплоотдачи, $Bm / m^2 \cdot ^\circ C$;

L – определяющий линейный размер, м;
 λ – коэффициент теплопроводности воздуха, $\text{Вт}/\text{м} \cdot ^\circ\text{C}$;

ν – коэффициент кинематической вязкости воздуха, $\text{м}^2/\text{с}$;

α – коэффициент теплопроводности воздуха, $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{с}$.

Для печатной платы, расположенной горизонтально, определяющим размером будет наименьшая сторона, а для электрического двигателя – диаметр. Зависимость α_K от ряда параметров (2) представляют уравнением подобия или критериальным уравнением

$$Nu = f(Gr, Pr). \quad (4)$$

Уравнение (4) носит общий характер. Для РЭС при свободной конвекции вводят постоянные – электрические коэффициенты c и n и индекс m .

Значение постоянных зависят от аргумента ($gr \cdot pr$), а индекса от значений α , ν , λ , β воздуха.

$$Nu_m = c(Gr \cdot Pr)_m^n. \quad (5)$$

Выражение $(gr \cdot pr)_m$ зависит от вида движения воздуха – переходный к ламинарному, ламинарный и турбулентный. В [1, 2] приводятся следующие данные:

$(gr \cdot pr)_m$	n
$1,1 \cdot 10^{-3} \dots 5 \cdot 10^2$	
1,18	1/8
$5 \cdot 10^2 \dots 2 \cdot 10^7$	
0,54	1/4
$2 \cdot 10^7 \dots 1 \cdot 10^{13}$	
0,135	1/3

Указанные значения справедливы для средней температуры

$$\theta_m = 0,5(\theta_o + \theta_c).$$

В случае выполнения условия [2]

$$(\theta_o - \theta_c) < [840 \div l \cdot 10^{-3}]^3 \quad (6)$$

Коэффициент теплоотдачи α_K можно найти из выражения

$$\alpha_K = (1,42 + 1,4 \cdot 10^{-3} \theta_m) Nu \left[\frac{(\theta_o - \theta_c)}{l} \right]^{1/4}. \quad (7)$$

Если условие (9.68) не выполняется, величину α_K находят по формуле

$$\alpha_K = (1,67 + 3,6 \cdot 10^{-3} \theta_m) Nu (\theta_o - \theta_c)^{1/3}. \quad (8)$$

Поскольку РЭС работают в условиях средней температуры воздуха

$\theta_c = 20^\circ\text{C}$ и нормальном давлении

$p = 10^5 \text{ Па}$ значения параметров уравнений (2) и (3) можно считать равными:

$$\lambda = 2,59 \cdot 10^{-2} \text{ Вт}/\text{м} \cdot ^\circ\text{C};$$

$$\nu = 1,51 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2 \cdot \text{с};$$

$$C = 1,005 \text{ кДж}/\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}; \rho = 1,205 \text{ кг}/\text{м}^3;$$

$$\alpha = 21,4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с};$$

$$g = 9,81 \text{ м}^2/\text{с}, \beta = 0,00366 \text{ и } Pr = 0,7.$$

Пример. Определить тепловой поток от горизонтально расположенной печатной платы вычислительного устройства, имеющей размеры $0,330 \times 0,240$ м. В рабочем режиме плата нагрелась до температуры $\theta_o = 70^\circ\text{C}$ температура окружающего воздуха $\theta_c = 20^\circ\text{C}$. Расчет проведен на основании формулы (5). Определим значение критерия pr по средней температуре воздуха

$$\theta_m = 0,5(70 + 20) = 45^\circ\text{C}.$$

Для $\theta_m = 45^\circ\text{C}$ имеем следующие значения параметров:

$$\lambda = 2,8 \cdot 10^{-2} \text{ Вт}/\text{м} \cdot ^\circ\text{C};$$

$$\nu = 1,746 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2 \cdot \text{с}; Pr = 0,7 \text{ и } Pr_c/Pr_o = 1.$$

Для определения значения критерия gr в качестве определяющего размера принимаем ширину печатной платы $l = 0,24$ м. Тогда на основании выражения (3) имеем

$$Gr = \beta \cdot g \cdot l^3 \cdot \frac{(\theta_o - \theta_c)}{(\nu^2)} =$$

$$= 0,0366 \cdot 9,81 \cdot 0,24^3 \times (70 - 20) \frac{1}{(1,746 \cdot 10^{-5})^2}$$

$$Gr \cdot Pr = 6,88 \cdot 10^7 \cdot 0,7 = 4,8 \cdot 10^7.$$

При турбулентном режиме значение критерия нуссельта будет равно

$$Nu = c(Gr \cdot Pr)^n = 0,135(4,8 \cdot 10^7)^{1/3} = 1,79$$

Тогда

$$\alpha_K = \frac{Nu \cdot \lambda}{l} = \frac{1,79 \cdot 0,028}{0,24} = 2,09 \text{ Вт}/\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

Если теплоотдающая поверхность печатной платы обращена кверху, значение α_K необходимо увеличить на 30 % т. е.

$$\alpha_{K_B} = \alpha_K \cdot 1,3 = 2,09 \cdot 1,3 = 2,72 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°C}.$$

Если же теплоотдающая поверхность печатной платы обращена книзу, то α_K необходимо уменьшить на 30 %, т. е.

$$\alpha_{K_H} = \alpha_K \cdot 0,7 = 2,09 \cdot 0,7 = 1,46 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°C}.$$

Соответственно тепловые потоки для первого и второго случая будут равны

$$\begin{aligned} Q_B &= \alpha_{K_B} \cdot S(\theta_O - \theta_C) = \\ &= 2,72 \cdot 0,33 \cdot 0,24(70 - 20) = 10,77 \text{ Вт} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_H &= \alpha_{K_H} \cdot S(\theta_O - \theta_C) = \\ &= 1,46 \cdot 0,33 \cdot 0,24(70 - 20) = 5,78 \text{ Вт}. \end{aligned}$$

Тепловое сопротивление при конвективном теплообмене представляет следующее соотношение

$$R_{T_k} = l / (S \alpha_K). \quad (9)$$

Используя выражение (3), значение сопротивления r_{T_k} примет вид

$$R_{T_k} = \frac{l}{\lambda \cdot S \cdot Nu}. \quad (10)$$

Или

$$R_{T_k} = \frac{l}{\lambda \cdot S \cdot c(Gr \cdot Pr)^n}. \quad (11)$$

Теплообмен излучением в РЭС осуществляется за счет электромагнитных колебаний в широком диапазоне длин волн от долей микрометра до нескольких километров.

В процессах лучистого теплообмена наибольший интерес представляют видимые (световые) и тепловые (инфракрасные) лучи с длинами волн от 0,4 до 800 мкм.

Тепловые излучения (радиация) свойственна всем телам. Каждое тело не только непрерывно излучает, но и непрерывно поглощает энергию, которая определяется температурами тел, участвующих в лучистом теплообмене.

Суммарное излучение, проходящее через произвольную поверхность s в единицу времени, называется потоком излучения q . Плотность потока излучения с единицы поверхности по всем направлениям полусферического пространства определяется по формуле

$$q = \frac{dQ}{dS}. \quad (12)$$

Поток излучения q , падающий на тело (например, на печатную плату), частью поглощается – Q_{Π} , частью отражается – Q_O и частью проходит сквозь тело – $Q_{СКВ}$ (рисунок 1). Таким образом

$$Q = Q_{\Pi} + Q_O + Q_{СКВ}. \quad (13)$$

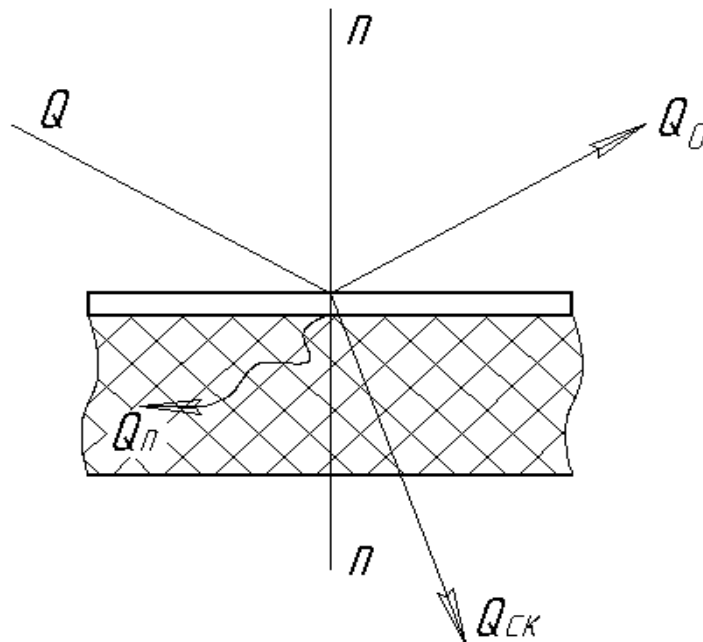


Рисунок 1 – Распределение лучистой энергии, падающей на печатную плату

Если падающий поток q полностью проходит сквозь тело, то оно прозрачно или диатерминично. Если же поток q полностью погло-

щается телом, то такое тело называют абсолютно черным. В случае полного отражения телом потока Q оно называется зеркальным. Абсо-

лютно прозрачных, черных и зеркальных тел в природе не существует.

Методы расчета лучистого теплообмена строятся на использовании законов Планка, Кирхгофа, Ламберта, Стефана-Больцмана.

Закон Стефана-Больцмана представляет соотношение, показывающее долю результирующего потока с поверхности i , попавшую на поверхность j

$$Q_{ij} = \varepsilon_{\text{пр}} \cdot G S_i \alpha_{ij} \left[\left(\frac{273 + \theta_i}{100} \right)^4 - \left(\frac{273 + \theta_j}{100} \right)^4 \right] \quad (14)$$

где $\varepsilon_{\text{пр}}$ – приведенная степень черноты поверхностей двух тел, между которыми установлен лучистый теплообмен;

G – постоянная Больцмана для абсолютно черного тела,

$$G = 5,7 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4};$$

θ_i и θ_j – температуры $i^{\text{ой}}$ и $j^{\text{ой}}$ поверхностей, участвующих в лучистом теплообмене, в град. К;

S_i – площадь поверхности тела с температурой θ_i , м^2 ;

α_{ij} – коэффициент, зависящий от расстояния, относительного положения и формы тел, участвующих в лучистом теплообмене.

Представим лучистый теплообмен в форме уравнения Ньютона-Рихмана.

$$Q_{ij} = \alpha_{\lambda ij} (\theta_i - \theta_j) \cdot S_i, \quad (15)$$

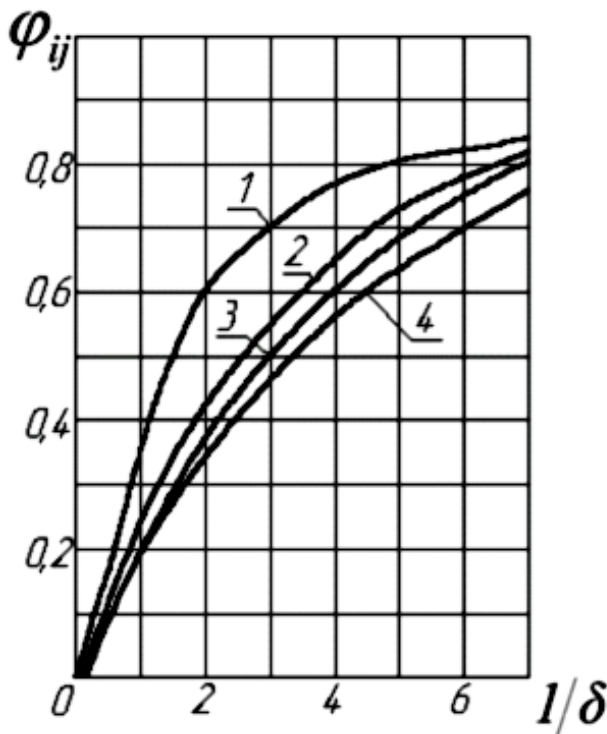
где $\alpha_{\lambda ij}$ – коэффициент отдачи излучением,

$$\alpha_{\lambda ij} = \varepsilon_{\text{пр}} \varphi_{ij} f(\theta_i, \theta_j). \quad (16)$$

Значение приведенного коэффициента черноты тел для двух неограниченных плоскопараллельных плоскостей находят из соотношения

$$\varepsilon_{\text{пр}12} = \left(\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)^{-1}, \quad (17)$$

где ε_1 и ε_2 – соответственно степень черноты полного излучения для двух тел.



1 – полосы $l_2 > l_1$;

2 – полосы с соотношением сторон $l_1/l_2 = 2$;

3 – квадраты $l_1 = l_2$;

4 – круги.

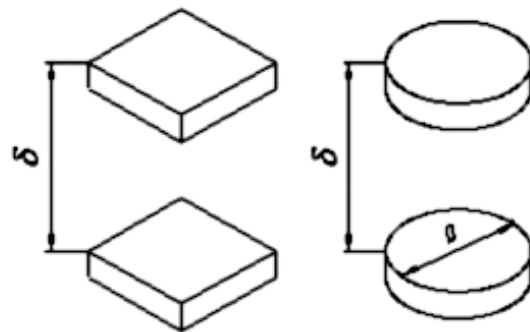


Рисунок 2 – График зависимости коэффициента облученности от расстояния между телами

Так для: меди электролитической полированной печатных плат $\varepsilon = 0,025 \dots 0,061$; алюминия полированного $\varepsilon = 0,030 \dots 0,057$; алю-

миния окисленного $\varepsilon = 0,11 \dots 0,19$; дюралия $\varepsilon = 0,11$; алюминия $\varepsilon = 0,25$; лака черного блестящего

$\varepsilon = 0,875$; лака черного матового
 $\varepsilon = 0,96...0,98$.

Если ε_1 и ε_2 более 0,8, то тогда

$$\varepsilon_{\text{ПР12}} \approx \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2. \quad (18)$$

Величина φ_{ij} является коэффициентом облученности, который показывает долю энергии, излучаемой i поверхностью, попадающую на j поверхность. Величину φ_{ij} для двух тел, участвующих в лучистом теплообмене, находят по графикам. Кривые 1, 2, 3 и 4 показаны на рисунке 2 для поверхностей тел, имеющих формы полосы или круга.

Функция $f(Q_1, Q_2)$ табулирована.

Менее точное значение $f(Q_1, Q_2)$ можно найти из выражения (19)

$$f(Q_1, Q_2) = 2,88 \cdot 10^{-8} (Q_1 + Q_2)^3, \quad (19)$$

где Q_1, Q_2 – температуры поверхностей тел, участвующих в радиационном теплообмене, κ ;

S_i – поверхность теплообмена, m^2 .

Тепловое сопротивление лучистого теплообмена между двумя телами можно представить в виде

$$R_{T_x} = (S_i \cdot \alpha_{\lambda ij})^{-1}. \quad (20)$$

Мощность, передаваемую радиацией от источника нагрева к поверхности тела, определяют из выражения (21)

$$P = \int_{S_i} \sigma(S_i) G \theta^4(S_i) dS_i, \quad (21)$$

где g – постоянная Больцмана,

θ – температура поверхности S_i ; в град κ ;

σ – эмиссионная способность через поверхность S_i .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Туищев А. И. Методы и средства компьютерного управления радиационным нагревом. М. : ГАСБУ. 1998. 317 с.
2. Туищев А. И. Проектирование бытовых радиоэлектронных средств. М. : МГУС, 2002. 488 с.

INVESTIGATION OF THERMAL REGIMES OF PRINTED CIRCUIT BOARDS OF RADIO-ELECTRONIC MEANS AND COMPUTER EQUIPMENT IN CASE OF CONVECTION AND RADIATION HEAT EXCHANGE

© 2014

A. I. Tuishchev, doctor of technical sciences, associate professor, professor-consultant of the department «Automation of technological processes and productions»

Togliatti State University, Togliatti (Russia)

I. O. Gubanov, candidate of technical sciences, senior lecturer

Togliatti College of design and management, Togliatti (Russia)

V. M. Plekhanov, candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the department «Automation of technological processes and productions»

Togliatti State University, Togliatti (Russia)

D. G. Tokarev, candidate of technical sciences, associate professor of the department «Automation of technological processes and production»

Togliatti State University, Togliatti (Russia)

Annotation. Convection in radio-electronic means is the process of heat transfer between a solid surface and air environment. Radiative heat exchange is carried out at the expense of electromagnetic oscillations in a wide range of wavelengths. Present the calculation of thermal modes of printed circuit boards in case of convection and radiation heat exchange.

Keywords: radio-electronic means, printed-circuit board, heat flow, heat emission, heat conductivity, convection heat exchange, radiation heat exchange, calculation of heat modes.