

## Взаимное влияние печатных проводников плат, установленных на металлическое основание и работающих в условиях космического вакуума

**А. В. Костин**, к. т. н., [kostin.av@samspace.ru](mailto:kostin.av@samspace.ru)

АО «Ракетно-космический центр “Прогресс”», Самара, Российская Федерация

**В. А. Кутурин**, [vitallek57@gmail.com](mailto:vitallek57@gmail.com)

АО «Ракетно-космический центр “Прогресс”», Самара, Российская Федерация

**В. А. Фомин**, [vladimir.fomin.1999@gmail.com](mailto:vladimir.fomin.1999@gmail.com)

АО «Ракетно-космический центр “Прогресс”», Самара, Российская Федерация

**Аннотация.** Целью описываемой в настоящей статье работы являлся анализ взаимного теплового влияния двух печатных проводников печатной платы, закрепленной на металлическом основании в условиях космического вакуума в зависимости от расстояния между проводниками при их нахождении в различных слоях печатной платы, а также определение расстояния, при котором взаимное влияние оказывается пренебрежимо мало. Приводятся результаты задач, которые были решены для достижения цели: выполнен расчет значений разности температур между печатными проводниками и металлической подложкой при разном заданном расстоянии между двумя печатными проводниками при их расположении на различных слоях; выполнена аппроксимация результатов расчета; найдено расстояние, при котором взаимное тепловое влияние печатных проводников становится пренебрежимо малым. Для расчета использовался численный метод, реализованный в САПР. Приводится пример конечно-элементной сетки и температурного поля печатной платы. Приводятся результаты расчета в виде значения перегрева проводников. Описывается методика, использованная для обработки результатов расчетов в САПР, учитывающая температурный коэффициент сопротивления материала печатных проводников. Приводятся функции с числовыми значениями всех коэффициентов, которыми была проведена аппроксимация. Приведены примеры графиков, построенных по результатам аппроксимации, и значения, полученные в САПР в одной системе координат. Производится сравнение обоих результатов и приводится погрешность аппроксимации. Погрешность лежит в пределах  $\pm 3^\circ\text{C}$ , что для технических расчетов приемлемо. По функциям, полученным при аппроксимации, найдены и построены графики зависимостей расстояния между печатными проводниками, при котором взаимное влияние практически исчезает, от эквивалентной толщины слоев изоляционных материалов между печатным проводником и основанием. Совокупность этих материалов названа пакетом. Эквивалентная толщина пакета — величина, приведенная к единому коэффициенту теплопроводности. В реальных платах могут использоваться разные материалы с разными коэффициентами теплопроводности. Приводится объяснение этих зависимостей. Обсуждается вопрос применения полученных результатов при проектировании печатных плат. Приводится пример конкретного применения полученных результатов на практике.

**Ключевые слова:** печатный проводник, печатная плата, металлическое основание, космический вакуум, перегрев, сила тока

**Для цитирования:** Костин А. В., Кутурин В. А., Фомин В. А. Взаимное влияние печатных проводников плат, установленных на металлическое основание и работающих в условиях космического вакуума. *Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы*. 2025. Т. 12. № 1. С. 87–98.

## Mutual Influence of Printed Conductive Paths of Circuit Boards Installed on a Metal Base and Operating in the Conditions of Space Vacuum

A. V. Kostin, *Cand. Sci. (Engineering), kostin.av@samspace.ru*  
*JSC "RSC "Progress", Samara, Russian Federation*

V. A. Kuturin, *vitalek57@gmail.com*  
*JSC "RSC "Progress", Samara, Russian Federation*

V. A. Fomin, *vladimir.fomin.1999@gmail.com*  
*JSC "RSC "Progress", Samara, Russian Federation*

**Abstract.** The purpose of the work described in this article was to analyze the mutual thermal effect of conductive paths of a printed circuit board mounted on a metal base in a vacuum environment, depending on the distance between the conductors when they are located in different layers of the printed circuit board, as well as to determine the distance at which the mutual effect is negligible. The results of the tasks that were solved to achieve the goal are presented: the calculation of the temperature difference between conductive paths and a metal substrate is performed at a different set distance between the two conductive paths when they are located on different layers; approximation of the calculation results is performed; the distance at which the mutual thermal effect of conductive paths becomes negligible is found. For calculation, the numerical method implemented in the CAE system was used. The example of the finite element mesh and the temperature field of the printed circuit board is given. Results of calculation in the form of value of the overheat of conductors are given. The technique used for processing of results of calculations in CAE, considering the temperature coefficient of resistance of material of conductive paths is described. Functions, with numerical values of all coefficients which carried out approximation are given. Examples of the diagrams constructed by results of approximation and the values received in CAE in one coordinate system are given. Comparison of both results is made and the approximation error is given. The error lies within  $\pm 3^\circ\text{C}$  that is acceptable for technical calculations. On the functions received at approximation diagrams of dependences of distance between conductive paths at which mutual influence practically disappears, from the equivalent thickness of layers of insulating materials between the conductive path and the basis are found and constructed. A set of these materials is named the package. Equivalent thickness of the package is the size specified to the uniform heat transfer coefficient. In real payments different materials with different thermal conductivities can be used. The explanation of these dependences is given. The question of application of the received results at design of printed circuit boards is discussed. The example of specific application of the received results in practice is given.

**Keywords:** conductive path, printed circuit board, metal base, space vacuum, overheat, current intensity

**For citation:** Kostin A. V., Kuturin V. A., Fomin V. A. Mutual Influence of Printed Conductive Paths of Circuit Boards Installed on a Metal Base and Operating in the Conditions of Space Vacuum. *Rocket-Space Device Engineering and Information Systems*. 2025. Vol. 12. No. 1. P. 87–98. (in Russian)

## Введение

В приборостроении получил широкое распространение печатный монтаж. Он позволяет сократить трудоемкость и автоматизировать производство. Космическое приборостроение не является исключением. В данной сфере получила широкое распространение такая типовая конструкция, как печатная плата, зафиксированная на металлическом основании. В герметичных отсеках может быть принудительная конвекция. Однако отсеки автоматических космических аппаратов стараются делать негерметичными. Отсутствие газа внутри отсека делает любую конвекцию невозможной. Это затрудняет отвод тепла. От печатных плат тепло отводится через металлическое основание, на которое они приклеиваются. Отвод тепла от печатных плат излучением менее эффективен. Это связано с тем, что температура поверхностей, окружающих печатный узел, несущественно отличается от температуры элементов самого печатного узла, да и их степень черноты не всегда высока. Следует отметить, что и в наземной аппаратуре все чаще применяются подобные платы.

Среди задач, решаемых конструктором в ходе проектирования печатных узлов, существует задача определения минимально допустимой ширины печатного проводника (ПП). Одним из критериев, определяющих этот параметр ПП, является максимальная токовая нагрузка. Температура нагрева ПП пропорционально зависит от величины силы тока, протекающего по этому ПП. При достижении определенной температуры ПП происходит его отклеивание от платы. Отвод тепла от ПП резко ухудшается. Он нагревается еще сильнее и расплавляется, разрывая электрическую цепь. Однако на перегрев (разность температур ПП и температуры основания) определенного ПП влияет не только сила тока, протекающего по рассматриваемому ПП, но и перегрев прочих печатных проводников, находящихся в пределах того же печатного узла. При этом взаимное расположение ПП может быть самым разнообразным, но наиболее сильное тепловое влияние оказывают друг на друга проводники, расположенные параллельно как на одном, так и на разных слоях. В отечественной [1,2] и зарубежной [3,4] нормативно-технической документации рекомендации для выбора ширины ПП

не применимы для рассматриваемой конструкции металл — печатный узел. Существует достаточно много зарубежных публикаций, таких как [5,6]. Но и там конструкции металл — печатный узел не рассматриваются. Формулы расчета для вышеупомянутой конструкции приведены в [7]. Результаты аналогичных исследований приведены в [8] в виде графиков. Однако в данных источниках рассматривается теплообмен в условиях газовой среды с протеканием конвекционных процессов. Один из авторов настоящей статьи в [9] рассматривает данную конструкцию в условиях космического вакуума, но не учитывает взаимного влияния нагрева ПП в печатном узле. Некоторые экспериментальные исследования взаимного теплового влияния ПП были предприняты А. Лезе и У. Шойерманом [10], но для наземной аппаратуры. Отсутствие подходящих методов описания тепловых процессов для двух ПП рассматриваемой конструкции и в заданных условиях ее эксплуатации в русско- и англоязычной литературе побудило авторов на проведение работы, описанной в статье.

Целью описываемой в настоящей статье работы являлся анализ взаимного теплового влияния двух ПП печатной платы, закрепленной на металлическом основании в условиях космического вакуума в зависимости от расстояния между проводниками при их нахождении в различных слоях печатной платы, а также определение расстояния, при котором взаимное влияние оказывается пренебрежимо мало.

В ходе выполнения работы были поставлены и решены следующие задачи:

- выполнен расчет значений разности температур между ПП и металлической подложкой при разном заданном расстоянии между двумя ПП при их расположении на различных слоях;
- выполнена аппроксимация результатов расчета;
- найдено расстояние, при котором взаимное тепловое влияние ПП становится пренебрежимо малым.

## Данные о методике исследования

В [9] приведена система уравнений теплопроводности для одиночного ПП. Она достаточно сложная. Для большего количества ПП система

уравнений будет еще сложнее. Решать ее аналитически слишком сложно. Воспользуемся конечно-элементным методом, реализованным в САПР. В [9] не учитывается излучение. В настоящей работе оно также не учитывается. Расчеты показывают, что даже при введении излучения тепла от платы в свободное пространство перегрев падает не более чем на 15 % [11]. Конечно, это зависит от температуры основания и самого перегрева.

Расчеты проводились на фрагменте печатной платы. Он имитировал два бесконечно длинных прямых ПП. При рассмотрении бесконечно длинных ПП задача сводится к двумерной. Поэтому рассматривать можно малый по длине ПП. Длина фрагмента ПП была выбрана равной 0,5 мм. ПП находились как на одном слое, так и на разных, в том числе на внешнем (см. рис. 1).

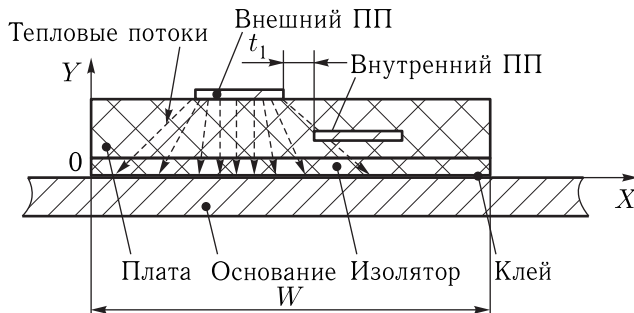


Рис. 1. Схематическое изображение поперечного сечения печатной платы

Fig. 1. Schematic representation of the cross-section of the printed circuit board

Расчеты проводились в двух режимах. В первом режиме один из ПП был обесточен (№ 1). По другому проводнику тек ток (№ 2). Во втором режиме по обоим ПП тек ток. Перегрев определялся с учетом температурного коэффициента сопротивления (ТКС) по выражениям:

$$\Delta T_{П1} = \frac{F_{21}P' + \alpha \Delta T_{П2}P'F_{21} + F_{11}P'}{1 - \alpha F_{11}P'}; \quad (1)$$

$$\Delta T_{П2} = \frac{P'(1 - \alpha F_{11}P')(F_{12} + F_{22}) + \alpha P'^2 F_{12}(F_{21} + F_{11})}{(1 - \alpha F_{22}P')(1 - \alpha F_{11}P') - \alpha^2 P'^2 F_{12}F_{21}}, \quad (2)$$

где  $P'$  — мощность, выделяемая ПП, если бы его сопротивление не увеличивалось при увеличении температуры (ТКС = 0);

$\alpha$  — ТКС;

$F_{11}, F_{12}, F_{21}, F_{22}$  — тепловые коэффициенты.

Тепловые коэффициенты найдем из результатов, полученных при расчетах в САПР. Они не зависят ни от температуры, ни от мощности источников [12]:

$$F_{22} = \frac{\Delta T_{П2}^{(2)}}{P'}; \quad F_{12} = \frac{\Delta T_{П2}'}{P'} - F_{22};$$

$$F_{21} = \frac{\Delta T_{П1}^{(2)}}{P'}; \quad F_{11} = \frac{\Delta T_{П1}'}{P'} - F_{21},$$

где  $\Delta T_{П2}^{(2)}$  — перегрев второго ПП при протекании тока только через второй ПП, ТКС = 0;

$\Delta T_{П2}'$  — перегрев второго ПП при протекании токов через оба ПП, ТКС = 0;

$\Delta T_{П1}^{(2)}$  — перегрев первого ПП при протекании тока только через второй ПП, ТКС = 0;

$\Delta T_{П1}'$  — перегрев первого ПП при протекании токов через оба ПП, ТКС = 0.

Мощность  $P'$  определяется как произведение значения квадрата силы тока на значение электрического сопротивления, рассчитанное при фиксированном значении температуры (обычно при 20 °C):

$$P' = I^2 R_0,$$

где  $I$  — сила тока, через ПП;

$R_0$  — электрическое сопротивление, рассчитанное при фиксированном значении температуры (обычно при 20 °C).

В ходе проведения вычислений по (1) и (2) температура основания принята равной температуре, при которой определено  $R_0$ . В [2] не указано, для какой температуры приведено значение удельного электрического сопротивления. Но значение удельного электрического сопротивления, приведенное в [2], соответствует значению, приведенному в [13] для катодной переплавленной меди марки М1 ( $1,724 \cdot 10^{-8}$  Ом·м) при температуре 20 °C. Будем считать, что принятое значение удельного электрического сопротивления соответствует температуре 20 °C;  $\alpha$  принят равным 0,0043 1/K согласно [13].

Рассматривались три случая для двух параллельных ПП:

- на внешних слоях 4-слойной, 6-слойной, 8-слойной плат;

- на одном из внутренних слоев 8-слойной платы;
- на разных слоях 8-слойной платы, причем ПП № 2 внешний (на слое 8).

Схемы расположения слоев согласно [9]. Геометрические размеры и характеристики материалов следующие:

- ширина изоляционных слоев ( $W$ ) — 21 мм;
- ширина ПП — 1 мм;
- толщина ПП выбрано равным 35 мкм;
- удельное электрическое сопротивление ПП —  $1,72 \cdot 10^{-8}$  Ом·м;
- сила тока ( $I$ ) — 5 А;
- расстояние между ПП разных слоев по оси  $OX$  ( $t_1$ ) — от минус 1 мм до плюс 10 мм с шагом 1 мм (минус 1 означает, что внутренний ПП находится под внешним);
- расстояние между ПП одного слоя по оси  $OX$  ( $t_1$ ) — от плюс 1 мм до плюс 10 мм с шагом 1 мм;

- температура основания составляет 0 °С (для определения перегрева без учета ТКС не критично, так как мощности, рассеиваемые проводниками, заданы для 20 °С);
- коэффициенты теплопроводности материалов согласно [9].

## Результаты исследования

Результаты расчета в виде перегрева ПП для рассматриваемых случаев представлены в табл. 1–3. В основе выбранного численного метода лежит решение традиционных уравнений теплопроводности. САПР, используемая для расчетов, аттестована в Госатомнадзоре России. Регистрационный номер ПС в ЦОЭП при РНЦ КИ № 490 от 10.09.2002, регистрационный номер паспорта аттестации ПС № 145 от 31.10.2002. Однако достоверность результатов определяется созданной моделью, в том числе и конечно-элементной сеткой. Это учитывалось при разбиении геометрической

Таблица 1. Результаты расчетов перегрева двух внешних ПП, °С

| Восьмислойная (тип 4 согласно [9])  |            |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|-------------------------------------|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Номер ПП                            | $t_1$ , мм |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|                                     | 1          | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      | 10     |
| 1                                   | 39,897     | 35,970 | 35,220 | 33,330 | 33,276 | 33,173 | 32,767 | 33,337 | 32,885 | 32,907 |
| 2                                   | 39,899     | 35,944 | 35,207 | 33,317 | 33,254 | 33,146 | 32,744 | 33,296 | 32,858 | 32,858 |
| Шестислойная (тип 3 согласно [9])   |            |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| Номер ПП                            | $t_1$ , мм |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|                                     | 1          | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      | 10     |
| 1                                   | 62,604     | 38,245 | 37,228 | 35,114 | 34,941 | 34,78  | 34,334 | 34,874 | 34,437 | 34,447 |
| 2                                   | 42,597     | 38,233 | 37,213 | 35,093 | 34,917 | 34,753 | 34,280 | 34,860 | 34,396 | 34,393 |
| Четырехслойная (тип 2 согласно [9]) |            |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| Номер ПП                            | $t_1$ , мм |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|                                     | 1          | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      | 10     |
| 1                                   | 31,140     | 28,912 | 27,560 | 27,555 | 27,520 | 26,589 | 27,459 | 27,383 | 27,095 | 27,554 |
| 2                                   | 31,143     | 28,909 | 27,559 | 27,556 | 27,519 | 26,588 | 27,460 | 27,381 | 27,097 | 27,558 |

Таблица 2. Результаты расчетов перегрева двух внутренних ПП одного слоя 8-слойной платы, °С

| Слой 2   |            |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|----------|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Номер ПП | $t_1$ , мм |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|          | 1          | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      | 10     |
| 1        | 10,110     | 9,356  | 9,124  | 9,034  | 8,949  | 8,901  | 8,898  | 8,904  | 8,910  | 8,908  |
| 2        | 10,116     | 9,374  | 9,137  | 8,994  | 8,956  | 8,895  | 8,926  | 8,918  | 8,909  | 8,891  |
| Слой 3   |            |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| Номер ПП | $t_1$ , мм |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|          | 1          | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      | 10     |
| 1        | 15,921     | 14,572 | 13,912 | 13,64  | 13,502 | 13,501 | 13,448 | 13,42  | 13,403 | 13,412 |
| 2        | 15,949     | 14,540 | 13,968 | 13,643 | 13,494 | 13,473 | 13,460 | 13,445 | 13,427 | 13,380 |
| Слой 4   |            |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| Номер ПП | $t_1$ , мм |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|          | 1          | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      | 10     |
| 1        | 17,337     | 15,707 | 15,046 | 14,706 | 14,58  | 14,533 | 14,516 | 14,477 | 14,456 | 14,506 |
| 2        | 17,332     | 15,779 | 15,102 | 14,716 | 14,503 | 14,502 | 14,480 | 14,541 | 14,528 | 14,459 |
| Слой 5   |            |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| Номер ПП | $t_1$ , мм |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|          | 1          | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      | 10     |
| 1        | 22,668     | 20,251 | 19,17  | 18,69  | 18,522 | 18,371 | 18,379 | 18,371 | 18,336 | 18,322 |
| 2        | 22,778     | 20,245 | 19,200 | 18,713 | 18,525 | 18,405 | 18,335 | 18,315 | 18,369 | 18,310 |
| Слой 6   |            |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| Номер ПП | $t_1$ , мм |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|          | 1          | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      | 10     |
| 1        | 24,645     | 21,968 | 20,753 | 20,147 | 19,904 | 19,865 | 19,769 | 19,762 | 19,748 | 19,779 |
| 2        | 24,659     | 22,012 | 20,682 | 20,222 | 19,940 | 19,847 | 19,803 | 19,781 | 19,678 | 19,761 |
| Слой 7   |            |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| Номер ПП | $t_1$ , мм |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|          | 1          | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      | 10     |
| 1        | 31,480     | 27,862 | 26,441 | 25,744 | 25,432 | 25,248 | 25,170 | 25,191 | 25,264 | 25,241 |
| 2        | 31,503     | 27,964 | 26,446 | 25,733 | 25,463 | 25,326 | 25,181 | 25,182 | 25,205 | 25,170 |

модели на конечные элементы. Ограничения подбирались таким образом, чтобы при дальнейшем уменьшении размеров конечных элементов значения температуры практически не менялись. Пример

конечно-элементной сетки и температурного поля представлены на рис. 2 и 3 соответственно.

Далее была проведена аппроксимация зависимости перегрева от  $t_1$ .

Таблица 3. Результаты расчетов перегрева двух ПП разных слоев 8-слойной платы, °C

| Слой внутреннего ПП 2 |            |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|-----------------------|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Номер ПП              | $t_1$ , мм |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|                       | –1         | 0      | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      | 10     |
| 1                     | 14,538     | 13,321 | 11,307 | 10,056 | 9,385  | 9,149  | 9,023  | 8,944  | 8,907  | 8,935  | 8,922  | 8,881  |
| 2                     | 37,853     | 37,114 | 35,018 | 33,971 | 34,233 | 32,734 | 33,014 | 32,110 | 32,499 | 33,218 | 32,692 | 32,844 |
| Слой внутреннего ПП 3 |            |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| Номер ПП              | $t_1$ , мм |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|                       | –1         | 0      | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      | 10     |
| 1                     | 24,485     | 21,556 | 17,638 | 15,460 | 14,462 | 14,026 | 13,790 | 13,622 | 13,705 | 13,534 | 13,635 | 13,629 |
| 2                     | 43,094     | 40,557 | 36,590 | 34,423 | 34,457 | 32,937 | 33,009 | 33,081 | 32,590 | 33,237 | 32,646 | 32,606 |
| Слой внутреннего ПП 4 |            |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| Номер ПП              | $t_1$ , мм |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|                       | –1         | 0      | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      | 10     |
| 1                     | 26,532     | 23,140 | 18,808 | 16,448 | 15,317 | 14,886 | 14,619 | 14,533 | 14,482 | 14,522 | 14,508 | 14,497 |
| 2                     | 44,276     | 41,229 | 36,719 | 34,600 | 34,609 | 33,025 | 32,968 | 32,911 | 32,519 | 33,236 | 32,616 | 32,638 |
| Слой внутреннего ПП 5 |            |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| Номер ПП              | $t_1$ , мм |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|                       | –1         | 0      | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      | 10     |
| 1                     | 36,400     | 30,400 | 23,936 | 20,849 | 19,407 | 18,792 | 18,542 | 18,390 | 18,238 | 18,355 | 18,390 | 18,264 |
| 2                     | 50,247     | 44,193 | 38,080 | 35,055 | 34,804 | 33,079 | 32,950 | 32,950 | 32,586 | 33,146 | 32,628 | 32,760 |
| Слой внутреннего ПП 6 |            |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| Номер ПП              | $t_1$ , мм |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|                       | –1         | 0      | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      | 10     |
| 1                     | 40,549     | 33,008 | 25,702 | 22,369 | 20,906 | 20,276 | 20,007 | 19,911 | 19,779 | 19,785 | 19,742 | 19,775 |
| 2                     | 53,562     | 45,404 | 37,832 | 35,808 | 34,151 | 33,445 | 33,545 | 33,293 | 33,305 | 32,957 | 32,775 | 33,210 |
| Слой внутреннего ПП 7 |            |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| Номер ПП              | $t_1$ , мм |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|                       | –1         | 0      | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      | 10     |
| 1                     | 55,442     | 41,548 | 31,915 | 28,106 | 26,514 | 25,691 | 25,468 | 25,299 | 25,250 | 25,192 | 25,213 | 25,183 |
| 2                     | 62,473     | 47,674 | 38,640 | 36,050 | 34,302 | 33,556 | 33,497 | 33,411 | 33,411 | 32,796 | 33,365 | 33,216 |

Для ПП на внешних слоях 4-слойной, 6-слойной, 8-слойной плат

$$\Delta T_{\Pi} = (\Delta T_{\max} - \Delta T_{\min})e^{-a_1 \cdot t_1} + \Delta T_{\min}. \quad (3)$$

Для ПП на одном из внутренних слоев 8-слойной платы

$$\Delta T_{\Pi} = (\Delta T_{\max} - \Delta T_{\min})e^{-a_2 \cdot t_1} + \Delta T_{\min}. \quad (4)$$

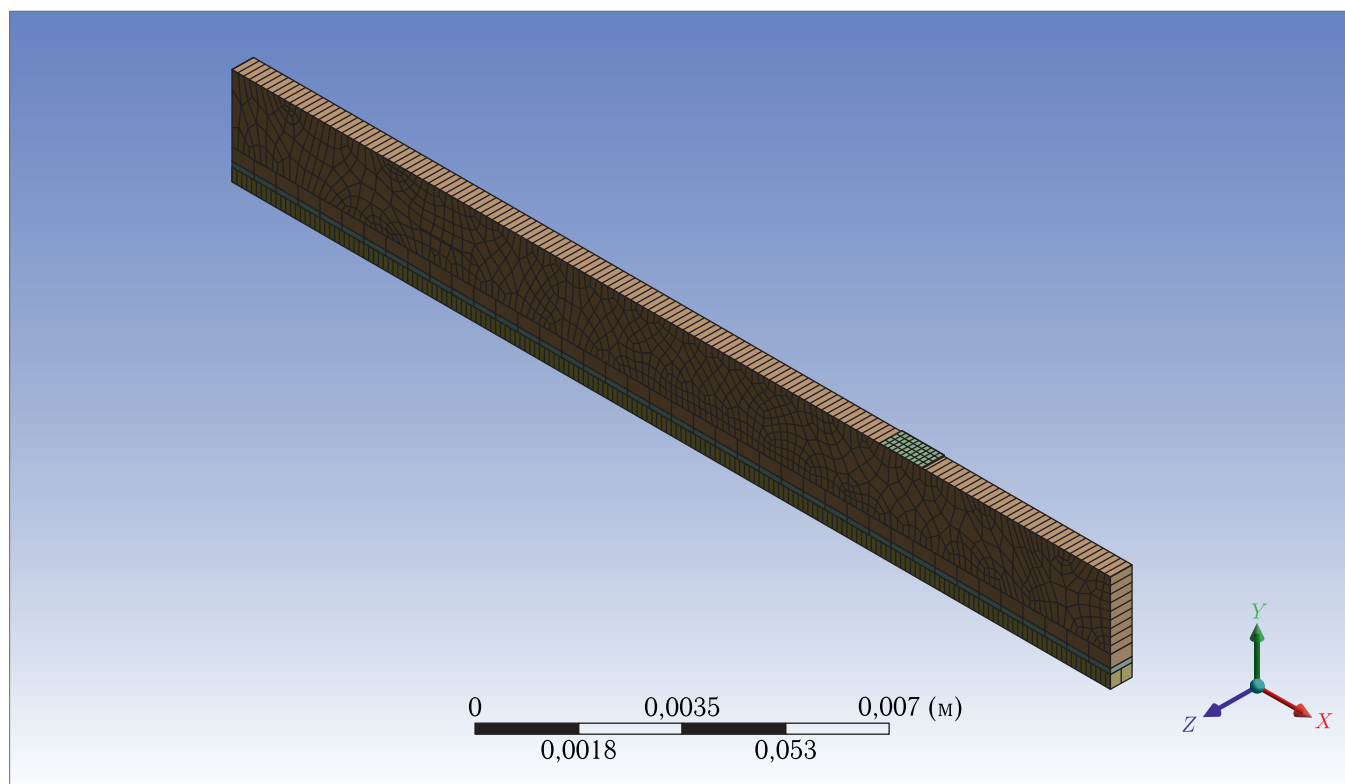
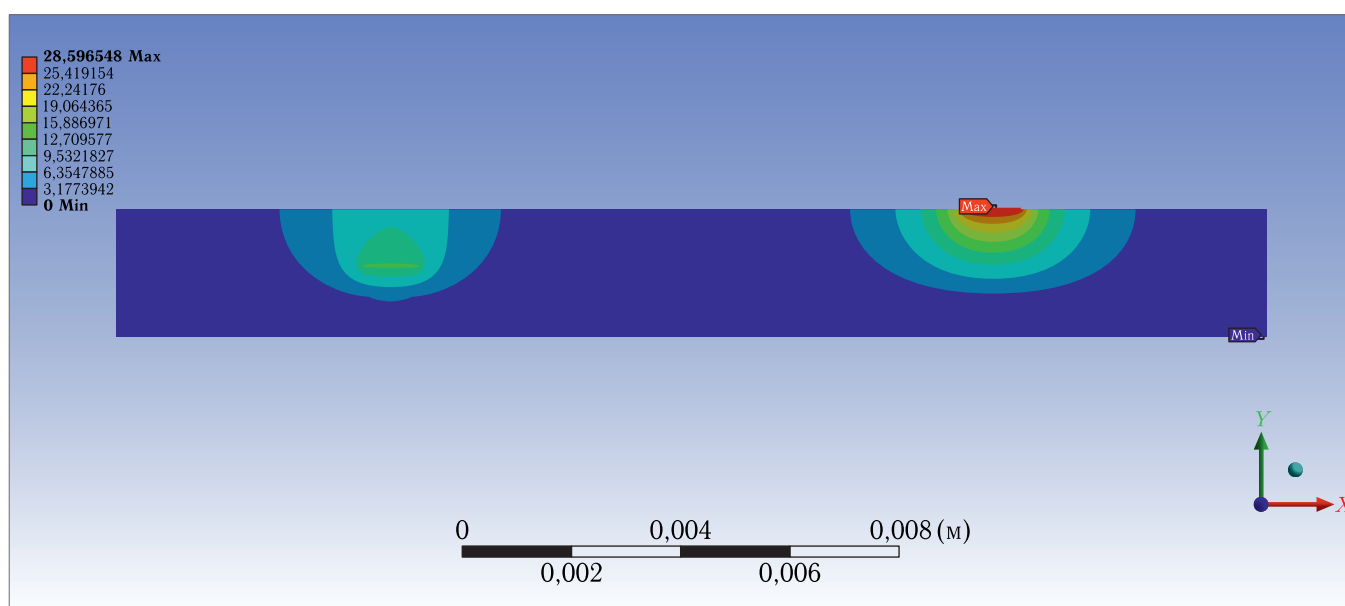


Рис. 2. Конечно-элементная сетка

Fig. 2. Finite element mesh

Рис. 3. Температурное поле, создаваемое ПП, расположенными на третьем слое (№ 1, слева) и внешнем, восьмом слое (№ 2, справа),  $t_1 = 10$  ммFig. 3. Temperature field created by the CPs located on the third layer (No. 1, left) and the outer, eighth layer (No. 2, right),  $t_1 = 10$  mm

Для ПП на разных слоях 8-слойной платы

$$\Delta T_{\Pi} = (\Delta T_{\Pi, \max} - \Delta T_{\Pi, \min}) e^{-\frac{(t_1 + \Delta t_1)^2}{a_3}} + \Delta T_{\Pi, \min} \quad (5)$$

В формулах с (3) по (5) используются разности температур и коэффициенты  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$ , значения которых приведены в табл. 4–6.  $\Delta t_1 = 1$  мм.

Таблица 4. Значения разностей температур и коэффициента  $a_1$  для формулы (3)

| Тип | $\Delta T_{\min}$ , °C | $\Delta T_{\max}$ , °C | $a_1$ , 1/м |
|-----|------------------------|------------------------|-------------|
| 4   | 32,958                 | 46,457                 | 662,900     |
| 3   | 34,474                 | 49,010                 | 627,130     |
| 2   | 27,264                 | 36,340                 | 881,859     |

Таблица 5. Значения разностей температур и коэффициента  $a_2$  для формулы (4)

| Слой | $\Delta T_{\min}$ , °C | $\Delta T_{\max}$ , °C | $a_2$ , 1/м |
|------|------------------------|------------------------|-------------|
| 2    | 8,899                  | 12,268                 | 993,920     |
| 3    | 13,410                 | 19,592                 | 864,287     |
| 4    | 14,447                 | 21,375                 | 853,650     |
| 5    | 18,285                 | 28,244                 | 812,119     |
| 6    | 19,702                 | 30,704                 | 792,882     |
| 7    | 25,134                 | 39,521                 | 817,456     |

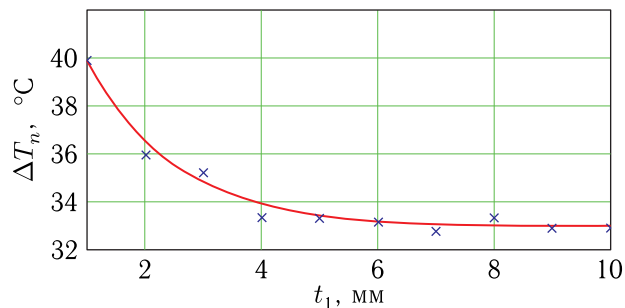


Рис. 4. Зависимость перегрева от расстояния между ПП, платы типа 4, внешний ПП  
Fig. 4. Dependence of overheating on the distance between the CPs, type 4 board, external CP

На рис. 4 и 5 представлены аппроксимированные графики (сплошная линия) и полученные при моделировании числовые значения (обозначены

Таблица 6. Значения разностей температур и коэффициента  $a_3$  для формулы (5)

| Слой | ПП         | $\Delta T_{\Pi, \min}$ , °C | $\Delta T_{\Pi, \max}$ , °C | $a_3$ , мм <sup>2</sup> |
|------|------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------|
| 2    | Внешний    | 32,882                      | 37,853                      | 5,324                   |
|      | Внутренний | 8,821                       | 14,538                      |                         |
| 3    | Внешний    | 32,700                      | 43,094                      | 4,372                   |
|      | Внутренний | 13,500                      | 24,485                      |                         |
| 4    | Внешний    | 32,751                      | 44,276                      | 4,04                    |
|      | Внутренний | 14,500                      | 26,532                      |                         |
| 5    | Внешний    | 32,751                      | 50,247                      | 3,367                   |
|      | Внутренний | 18,350                      | 36,400                      |                         |
| 6    | Внешний    | 33,071                      | 53,562                      | 3,054                   |
|      | Внутренний | 19,705                      | 40,549                      |                         |
| 7    | Внешний    | 33,101                      | 62,473                      | 2,132                   |
|      | Внутренний | 25,203                      | 55,442                      |                         |

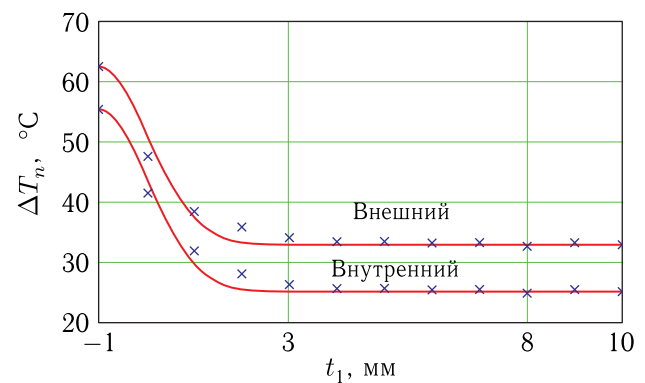


Рис. 5. Зависимость перегрева от расстояния между ПП, слой 7, внешний ПП  
Fig. 5. Dependence of overheating on the distance between the CPs, layer 7, external CP

крестами). Из графиков видно, что выражения с (3) по (5) не совсем точно описывают зависимость перегрева от расстояния между ПП. Погрешность лежит в пределах  $\pm 3$  °C. Однако для технических расчетов такое значение погрешности приемлемо. Согласно информации представленной на графиках на рис. 4 и 5, взаимное влияние ПП друг на друга уменьшается с ростом расстояния между ними. Это проявляется в том, что кривая вырождается в практически горизонтальную прямую линию. При определенных величинах  $t_1$  ПП перестают влиять друг на друга.

При использовании математических описаний, полученных при аппроксимации (формулы (3)–(5)) была определена величина расстояния между ПП, при которой их взаимное влияние друг на друга прекращается. Прекращение взаимного влияния считалось при снижении перегрева до порогового уровня  $0,05(\Delta T_{\max} - \Delta T_{\min}) + \Delta T_{\min}$  (уровень 0,05). Этот пороговый уровень был обозначен как  $t_{1,0,05}$ . Результаты расчетов пороговых уровней представлены в таблицах с 7 по 9.  $H_{\Xi}$  — эквивалентная толщина пакета печатной платы между слоем ПП

и основанием. Если ПП на разных слоях, то это толщина пакета между внутренним ПП и основанием. Слои материалов в пакете печатной платы могут иметь разные теплофизические свойства. Эквивалентная толщина пакета — величина, приведенная к единому коэффициенту теплопроводности. Подробнее о ней изложено в [14]. В табл. 4–6 значения приведены к  $\lambda_{i\Xi} = 0,3 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ . По этим таблицам построены графики зависимости  $H_{\Xi}$  от  $t_{1,0,05}$  (см. рис. 6).

Таблица 7. Значения  $t_{1,0,05}$  и  $H_{\Xi}$  для ПП на внешних слоях

| Тип               | 2     | 4     | 3     |
|-------------------|-------|-------|-------|
| $H_{\Xi}$ , мм    | 1,340 | 1,876 | 2,062 |
| $t_{1,0,05}$ , мм | 3,397 | 4,527 | 4,777 |

Таблица 8. Значения  $t_{1,0,05}$  и  $H_{\Xi}$  для ПП на одном из внутренних слоев

| Слой              | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $H_{\Xi}$ , мм    | 0,486 | 0,804 | 0,91  | 1,228 | 1,334 | 1,652 |
| $t_{1,0,05}$ , мм | 3,01  | 3,446 | 3,511 | 3,688 | 3,778 | 3,665 |

Таблица 9. Значения  $t_{1,0,05}$  и  $H_{\Xi}$  для ПП на разных слоях

| Слой внутреннего ПП | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $H_{\Xi}$ , мм      | 0,486 | 0,804 | 0,91  | 1,228 | 1,334 | 1,652 |
| $t_{1,0,05}$ , мм   | 4,993 | 4,619 | 4,478 | 4,176 | 4,025 | 3,527 |

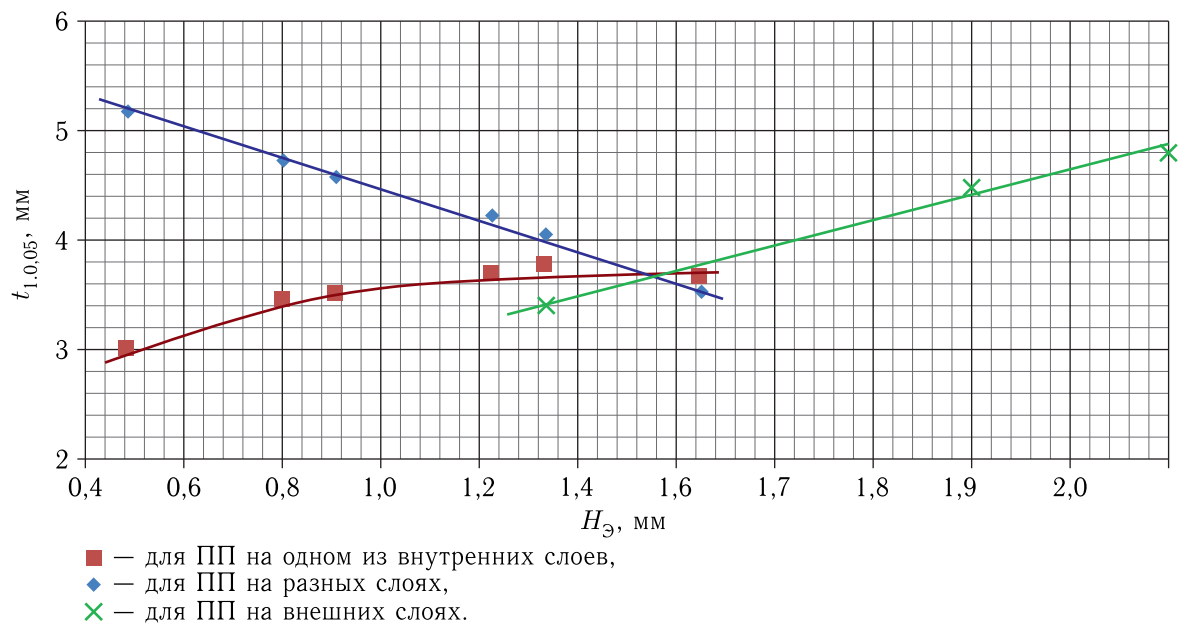


Рис. 6. Зависимости  $t_{1,0,05}$  от  $H_{\Xi}$   
 Fig. 6. Dependences of  $t_{1,0,05}$  on  $H_{\Xi}$

## Заключение

Из рис. 6 можно видеть, что для ПП, расположенных на одном слое, с увеличением  $H_3$  растет и  $t_{1,0,05}$ . Для ПП на разных слоях наблюдается обратная зависимость.

Возрастание  $t_{1,0,05}$  для ПП, расположенных на одном слое, можно объяснить следующим образом. С увеличением  $H_3$  будет расти и тепловое сопротивление канала отвода тепла между основанием и ПП (длина канала будет увеличиваться). При этом увеличивается и область вокруг ПП, в которой температура выше температуры основания (область повышенной температуры). Они хорошо видны на рис. 3. Тепловые потоки от ПП к основанию можно разделить условно на две группы: непосредственно под ПП (основные потоки) и от краев ПП (краевые потоки). Чем больше  $H_3$ , тем меньше становится основной поток и больше краевой. Последнее дает увеличение ширины (размера по оси  $OX$ ) области повышенной температуры. Это и приводит к тому, что при больших  $H_3$  увеличивается  $t_{1,0,05}$ . Для внутренних ПП форма графика отличается. Там включаются в процесс отвода тепла слои над ПП.

Убывание  $t_{1,0,05}$  для ПП, расположенных на разных слоях, можно объяснить следующим образом. Внутренний ПП расположен на пути теплового потока внешнего ПП (см. рис. 1). Он будет препятствовать отведению тепла от внешнего ПП, так как сам горячий. Этот эффект будет проявляться сильнее, чем ближе внутренний ПП будет к основанию (меньше  $H_3$ ). Значит, чем меньше  $H_3$ , тем больше  $t_{1,0,05}$ . Что и наблюдается на рис. 6. Более подробно с некоторыми отдельными частями, описываемыми в настоящей статье, можно ознакомиться в [15] и [16].

Полученный результат справедлив для ПП шириной 1 мм, да и схемы расположения слоев могут отличаться. Предполагалось, что проблема разогрева ПП более остро стоит для силовых цепей. По этой причине и рассматривались достаточно широкие ПП с существенной силой тока. Но были рассмотрены и тонкие ПП, два внешних ПП на плате типа 2 шириной 0,12 мм (минимальное значение для плат класса точности 4 с учетом допуска по [1]). При этом  $t_{1,0,05} = 5,052$  мм. Как видно,  $t_{1,0,05}$  не пропорциональна  $t$ . Следует отметить,

что сила тока была достаточно большой для такого ПП (1,5 А) и перегрев одиночного ПП достигал 37,102 °С. Для выявления зависимости  $t_{1,0,05}$  от  $t$  и  $I$  необходимо проводить отдельное более масштабное исследование, которое выходит за рамки настоящей статьи.

Рассмотреть все возможные ПП и платы в рамках настоящей работы не представляется возможным. Целесообразно в каждом предприятии, занимающимся проектированием печатных плат, произвести расчет для типовых используемых конструкций и применять его на практике. А как это сделать, было описано выше.

По результатам проделанной работы были сформулированы рекомендации по конструированию печатных плат:

- теплонагруженные ПП следует располагать на расстоянии 5 мм (это видно из графиков на рис. 6,  $t_{1,0,05}$  только в одном случае незначительно превышает 5 мм, и из результатов дополнительных исследований для ПП шириной 0,12 мм) или больше друг от друга для исключения их взаимного нагрева;
- допускается располагать ПП ближе 5 мм друг относительно друга, но для исключения их взаимного нагрева значение минимального расстояния между ними определять по графику на рис. 6 или аналогичному, построенному для используемых конструкций плат;
- для более плотной трассировки можно допустить взаимный нагрев ПП, не приводящий к их выходу из строя, при этом температуру следует определять по формулам (3)–(5) с коэффициентами, рассчитанными для используемых конструкций плат;
- допускается между теплонагруженными ПП проводить нетеплонагруженные ПП. При необходимости следует учитывать увеличение сопротивления последних при нагреве.

В АО «РКЦ «Прогресс» результаты проделанной работы использовались при проектировании приборов системы электропитания космических аппаратов типа «Аист». Так, на внешних слоях двусторонней платы из СФ-2-50Г-2.0 ГОСТ 10316-78 имелись ПП шириной 1,5 мм. Расстояние между ними составляло 0,5 мм. По ним протекал ток

силой 2,5 А. Платы были установлены на металлическое основание через стеклотекстолитовую прокладку толщиной 0,35 мм на герсиласт 137-182. Температура основания составляла  $(50 \pm 1)$  °С. Температура ПП не замерялась, но тепловакуумные испытания прибор выдержал. Плата не претерпела изменений.

Таким образом, были решены все задачи, а цель достигнута. Приведенный же в настоящей работе анализ позволит учесть при трассировке печатных плат взаимное тепловое влияние ПП друг на друга и получить дополнительную информацию о значении ширины ПП при требуемом перегреве и нагрузочной способности. Что, в свою очередь, позволит повысить надежность печатной платы и оптимизировать проводящий рисунок.

## Список литературы

1. Платы печатные. Основные параметры конструкции. ГОСТ Р 53429-2009. М.: Стандартинформ, 2018. 11 с.
2. Печатные платы. Требования к конструкции. Инструкция. РД 50-708-91. М.: Изд-во стандартов, 1992. 41 с.
3. Generic Standard on Printed Board Design. IPC-2221A. 2003. 124 p.
4. Standard for Determining Current-Carrying Capacity in Printed Board Design. IPC-2152. 2009. 89 p.
5. Brooks D., Adam J. Trace Currents and Temperatures Revisited. Published on the UltraCAD website, April 23–27, 2015. <https://www.ultracad.com/articles/pcbtempr.pdf>
6. Brooks D. "Temperature Rise in PCB Traces," published on the UltraCAD website and printed in the "Proceedings of the PCB Design Conference, West," Miller Freeman, Inc., March 23–27, 1998.
7. Муравьев Ю. Особенности проектирования и производства печатных плат на металлическом основании // Производство электроники: Технология, оборудование, материалы, 2010, № 2. С. 35–38.
8. Марущенко Д. Печатные платы с металлическим основанием // Электроника: наука, технология, бизнес, 2009, № 7. С. 100–101.
9. Костин А.В. Уточнение методики выбора ширины печатных проводников печатных плат на металлическом основании, работающих в условиях отсутствия конвекции // Физика волновых процессов и радиотехнические системы, 2021, т. 24, № 3. С. 80–91.
10. Лезе А., Шойерман У. Трассировка силовых цепей на печатных платах FR4: Рекомендации и ограничения / Пер. А. Колпакова // Компоненты и технологии, 2010, № 1. С. 90–93.
11. Костин А.В. Анализ влияния излучения на температуру печатных проводников печатных плат на металлическом основании для приборов космических аппаратов // Проектирование и технология электронных средств, 2021, № 4. С. 3–9.
12. Дульнев Г.Н., Семьяшкин Э.М. Теплообмен в радиоэлектронных аппаратах. Л.: «Энергия», 1968. 360 с.
13. Фридляндер И.Н., Сенаторова О.Г., Осинцев О.Е. и др. Машиностроение. Энциклопедия. Цветные металлы и сплавы. Композиционные металлические материалы. Т. II-3 / Под общ. ред. И.Н. Фридляндера. М.: Машиностроение, 2001. 880 с.
14. Костин А.В. Методика определения ширины печатных проводников плат на металлическом основании, работающих в условиях космического вакуума // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета, 2023, № 84. С. 246–255.
15. Костин А.В. Анализ теплового влияния двух внешних параллельных печатных проводников плат, установленных на металлическое основание и работающих в условиях космического вакуума друг на друга // Физика волновых процессов и радиотехнические системы, 2023, т. 26, № 4. С. 38–47.
16. Костин А.В., Богданов Д.С., Бобров И.С. Анализ теплового влияния двух внутренних параллельных печатных проводников платы, установленных на металлическое основание и расположенных в одном слое // Надежность и качество сложных систем, 2023, № 3. С. 90–99.

Дата поступления рукописи  
в редакцию 24.01.2025  
Дата принятия рукописи  
в печать 26.02.2024