

## Анализ нагрева печатных проводников печатных плат на металлическом основании для приборов космических аппаратов при импульсном токе

А.В. Костин

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева  
443086, Россия, г. Самара,  
Московское шоссе, 34

*Аннотация* – В статье приводятся результаты анализа нагрева печатных проводников печатных плат, установленных на металлическое основание, бортовых приборов космических аппаратов при протекании через них импульсного тока. Рассматриваются тепловые переходная и импульсная характеристики системы, состоящей из печатного проводника и печатной платы. Приводится анализ зависимости скорости нарастания температуры печатных проводников и длительности протекания переходных процессов от линейных размеров элементов системы. В статье отмечено, что сильнее всего время протекания переходных процессов зависит от толщины слоя изоляционных материалов. Все результаты получены в процессе моделирования переходных процессов в ANSYS 2019 R1 модуль Transient Thermal. Даны практические рекомендации по учету тепловых переходных процессов в печатных проводниках при проектировании печатных плат.

*Ключевые слова* – печатная плата; печатный проводник; импульсный ток; космический аппарат; металлическое основание; температура.

### Введение

В настоящее время в радиоэлектронной аппаратуре широко используются печатные платы. Причем повышение требований к снижению габаритов и массы аппаратуры и расширению ее функциональных возможностей привело к необходимости применения многослойных печатных плат с высокой степенью интеграции радиоэлементов и элементов проводящего рисунка. Не исключением являются и бортовые приборы космических аппаратов. Для них указанные выше требования более жесткие, чем для наземных. При проектировании печатных плат таких приборов необходимо выбирать оптимальную ширину печатных проводников (ПП). Если ширина ПП будет слишком малой, то он может перегреться и расплавиться. Это приведет к отказу канала или прибора в целом. Если он будет слишком широким, то это может повлечь увеличение габаритов платы и прибора в целом. Это менее критично, но нежелательно.

Ширина ПП главным образом определяется током, протекающим через него. Отечественная [1; 2] и зарубежная [3; 4] нормативно-техническая документация дает указания по расчету ширины ПП. В литературе, такой как [5–7], также имеются указания по расчету ширины ПП. Однако указания по расчету ПП при протекании через них

импульсного тока в литературе и стандартах освещены слабо. В космическом приборостроении получили широкое распространение печатные платы на металлическом основании. Причем такие платы чаще всего работают в условиях отсутствия конвекции. В некоторых публикациях приводятся формулы для расчета ПП печатных плат на металлическом основании, но работающих в условиях естественной конвекции [1]. В публикациях автора настоящей статьи [9–11] описываются методики расчета ширины ПП именно для приборов, работающих на борту космических аппаратов. Но они не рассматривают импульсный режим ПП. В целом для таких плат указаний по расчету ПП при протекании через них импульсного тока практически нет. Выходом может служить расчет по постоянному току. При этом значение постоянного тока приравнивается к максимальному значению импульсного тока. В ряде случаев это приведет к избыточной ширине ПП. Для разработки более точной методики необходимо понимание протекания процессов нагрева ПП.

### Ход исследования

Автором настоящей статьи была проведена работа, целью которой являлся анализ нагрева ПП печатных плат на металлическом основании для приборов космических аппаратов при импульсном токе.

Для достижения цели были решены следующие задачи:

- Построена уточненная математическая модель процесса кондуктивного теплообмена между ПП и металлическим основанием;
- Рассмотрены переходная и импульсная характеристики системы, состоящей из платы и ПП (далее – система);
- Проведен анализ зависимости скорости нарастания температуры ПП и длительности протекания переходных процессов;
- Разработаны практические рекомендации по учету тепловых переходных процессов в ПП.

Как и в [9; 10], разделим ПП на внутренние и внешние. Рассмотрим бесконечно длинный прямой ПП. Для удобства расчетов, как и в работах [9–11], предположим, что тепловыделяющий ПП в рассматриваемой области только один. Других ПП либо нет, либо они не выделяют тепло. Даже если они есть, но тепло не выделяют, их можно не учитывать. Их тепловое сопротивление будет значительно меньше теплового сопротивления изоляционных материалов. Главным образом это связано с разницей в коэффициентах теплопроводностей. Они отличаются на три, в редких случаях на два порядка. Предположим, что тепло от него отводится только на металлическое основание через слои изоляционных материалов между ними. При этом посредством излучения отвод тепла отсутствует. Температура окружающего ПП пространства будет отличаться от его температуры незначительно, а степень черноты поверхностей будет не всегда высокой. Поэтому отвод тепла на металлическое основание будет гораздо эффективнее излучения.

Процесс такого отвода тепла можно описать уравнениями теплопроводности. Поскольку температура будет зависеть только от двух координат (вдоль ПП распределение температур будет равномерным), то и уравнение будет двумерным. Для расчета значения температуры ПП в нестационарном режиме необходимо решить следующую систему уравнений:

$$\frac{\partial^2 T_1(x, y, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_1(x, y, \tau)}{\partial y^2} = \frac{1}{a_1} \frac{\partial T_1(x, y, \tau)}{\partial \tau}, \quad (1)$$

$$x \in [-W/2, W/2], \quad y \in [0, h_1];$$

$$\frac{\partial^2 T_2(x, y, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_2(x, y, \tau)}{\partial y^2} = \frac{1}{a_2} \frac{\partial T_2(x, y, \tau)}{\partial \tau},$$

$$x \in [-W/2, W/2], \quad y \in [h_1, h_2];$$

...

$$\frac{\partial^2 T_i(x, y, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_i(x, y, \tau)}{\partial y^2} = \frac{1}{a_i} \frac{\partial T_i(x, y, \tau)}{\partial \tau},$$

$$x \in [-W/2, W/2],$$

$$y \in [h_1 + h_2 + \dots + h_{i-1}, h_1 + h_2 + \dots + h_{i-1} + h_i];$$

...

$$\frac{\partial^2 T_{nj}(x, y, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{nj}(x, y, \tau)}{\partial y^2} = \frac{1}{a_{nj}} \frac{\partial T_{nj}(x, y, \tau)}{\partial \tau},$$

$$x \in [-W/2, W/2],$$

$$y \in [h_1 + h_2 + \dots + h_{nj-1}, y_{\min j});$$

$$\frac{\partial^2 T_{Пj}(x, y, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{Пj}(x, y, \tau)}{\partial y^2} =$$

$$= \frac{1}{a_{Пj}} \left( \frac{\partial T_{Пj}(x, y, \tau)}{\partial \tau} - \frac{q_{v.Пj}}{\lambda_{Пj}} \right),$$

$$x \in [-t_j/2, t_j/2], \quad y \in [y_{\min j}, y_{\max j});$$

$$\frac{\partial^2 T_{nj}(x, y, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{nj}(x, y, \tau)}{\partial y^2} = \frac{1}{a_{nj}} \frac{\partial T_{nj}(x, y, \tau)}{\partial \tau},$$

$$x \in [-W/2, -t_j/2), \quad y \in [y_{\min j}, y_{\max j});$$

$$\frac{\partial^2 T_{nj}(x, y, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{nj}(x, y, \tau)}{\partial y^2} =$$

$$= \frac{1}{a_{nj}} \frac{\partial T_{nj}(x, y, \tau)}{\partial \tau} = 0,$$

$$x \in (t_j/2, W/2], \quad y \in [y_{\min j}, y_{\max j});$$

$$\frac{\partial^2 T_{nj}(x, y, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{nj}(x, y, \tau)}{\partial y^2} = \frac{1}{a_{nj}} \frac{\partial T_{nj}(x, y, \tau)}{\partial \tau},$$

$$x \in [-W/2, W/2],$$

$$y \in [y_{\max j}, h_1 + h_2 + \dots + h_{nj});$$

...

$$\frac{\partial^2 T_n(x, y, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_n(x, y, \tau)}{\partial y^2} = \frac{1}{a_n} \frac{\partial T_n(x, y, \tau)}{\partial \tau},$$

$$x \in [-W/2, W/2],$$

$$y \in [h_1 + h_2 + \dots + h_{n-1}, h_1 + h_2 + \dots + h_{n-1} + h_n],$$

где  $T_i(x, y, \tau)$  – температуры в  $i$ -м слое изоляционного материала как функция от координат  $x$  и  $y$  и времени  $\tau$ ;  $T_{Пj}(x, y, \tau)$  – температуры в ПП  $j$ -го проводящего слоя как функция от координат  $x$  и  $y$  и времени  $\tau$ ;  $q_{v.Пj}(\tau)$  – объемная мощность тепло-

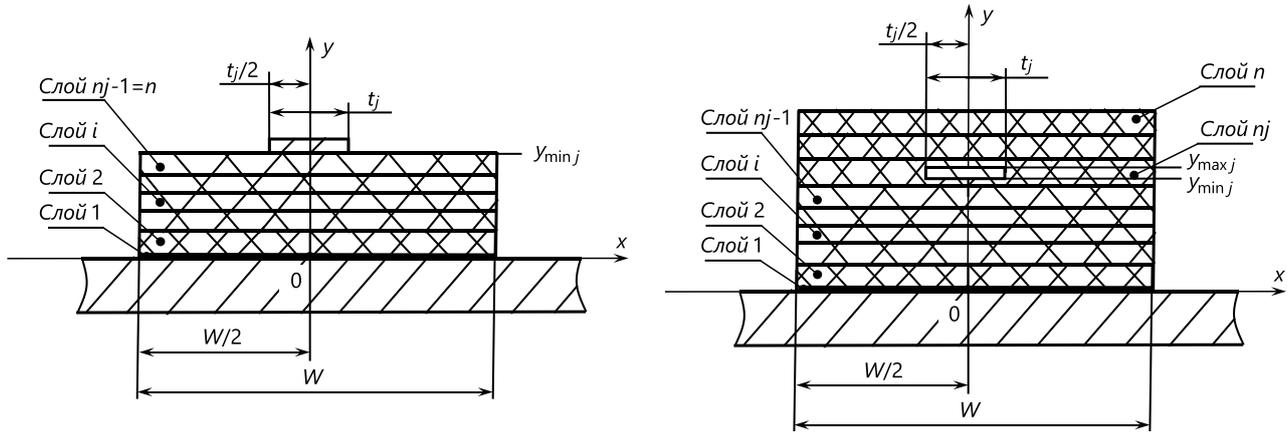


Рис. 1. Геометрия печатной платы с привязкой к системе координат для внешнего (а) и внутреннего (б) ПП  
 Fig. 1. The geometry of the printed circuit board with reference to the coordinate system for the external (a) and internal (b) PCB

выделения ПП  $j$ -го проводящего слоя как функция времени  $\tau$ ;  $a_p$ ,  $a_{Пj}$  – коэффициенты температуропроводности материала соответствующего слоя;  $W$  – ширина изоляционных слоев;  $j$  – номер текущего проводящего слоя;  $t_j$  – ширина ПП  $j$ -го проводящего слоя;  $n$  – общее число слоев изоляционного материала;  $n_j$  – слой изоляционного материала, в котором находится ПП  $j$ -го проводящего слоя;  $i$  – номер текущего слоя изоляционного материала ( $i = 1 \dots n$ , в том числе  $n_j$ );  $y_{\min j}$  – значение координаты  $y$  для нижней границы ПП  $j$ -го проводящего слоя;  $y_{\max j}$  – значение координаты  $y$  для верхней границы ПП  $j$ -го проводящего слоя;  $\lambda_{Пj}$  – коэффициент теплопроводности материала  $j$ -го проводящего слоя;  $h_i$  – толщина  $i$ -го слоя изоляционного материала.

Температуропроводность является справочным параметром материала, но часто задается через коэффициент теплопроводности, плотность и удельную теплоемкость.

Расположение осей системы координат, геометрические размеры и нумерация слоев показаны на рис. 1. В рассматриваемой системе источником тепла является ПП, за его пределами объемная мощность тепловыделения равна нулю.

Важно отметить, что на рис. 1 ПП изображен так, что он не примыкает к слоям  $n_j + 1$ ,  $n_j - 1$ . Это сделано для удобства записи (1). В реальных ПП один из слоев  $n_j + 1$  или  $n_j - 1$  будет фольгированным диэлектриком. Если фольгированный диэлектрик – это слой с номером  $n_j - 1$ , то  $y_{\min j} = h_1 + h_2 + \dots + h_{n_j-1}$ . Если фольгированный диэлектрик слой с номером  $n_j + 1$ , то  $y_{\max j} = h_1 + h_2 + \dots + h_{n_j+1}$ . Толщина ПП в общем случае состоит из толщины слоя фольги и толщины слоя гальванической меди. В [9; 10] показано, что их можно представить как единый слой с одинаковыми тепловыми и электрически-

ми характеристиками. При этом ошибка в расчетах будет незначительная. Тогда  $y_{\max j} = y_{\min j} + h_j$ .

Следует отметить, что система (1) описывает случай симметричного расположения ПП относительно краев печатной платы. То есть расстояние от края ПП до края слоев изоляционных материалов с одной и другой стороны равны.

Для решения дифференциальных уравнений важно задать граничные условия. Для внешних и внутренних ПП они будут отличаться. Рассмотрим граничные условия для внешних ПП. На внешних границах тепловой поток будет отсутствовать

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial T_i(x, y, \tau)}{\partial x} \right|_{x=-W/2} &= \left. \frac{\partial T_i(x, y, \tau)}{\partial x} \right|_{x=W/2} = \\ &= \left. \frac{\partial T_{Пj}(x, y, \tau)}{\partial y} \right|_{y=\sum_{i=1}^n h_i + h_j} = \\ &= \left. \frac{\partial T_n(x, y, \tau)}{\partial y} \right|_{y=\sum_{i=1}^n h_i, x \in [-W/2, -t_j/2]} = \\ &= \left. \frac{\partial T_n(x, y, \tau)}{\partial y} \right|_{y=\sum_{i=1}^n h_i, x \in [t_j/2, W/2]} = \\ &= \left. \frac{\partial T_{Пj}(x, y, \tau)}{\partial x} \right|_{x=t_j/2, y \in \left[ \sum_{i=1}^n h_i, \sum_{i=1}^n h_i + h_j \right]} = \\ &= \left. \frac{\partial T_{Пj}(x, y, \tau)}{\partial x} \right|_{x=-t_j/2, y \in \left[ \sum_{i=1}^n h_i, \sum_{i=1}^n h_i + h_j \right]} = 0. \end{aligned} \quad (2)$$

У основания

$$T_1(x, y, \tau) \Big|_{y=0} = T_0, \quad (3)$$

где  $T_0$  – температура основания.

Между изоляционными слоями тепловые потоки и температуры на границе равны:

$$\lambda_i \frac{\partial T_i(x, y, \tau)}{\partial y} \Big|_{y=h_1+h_2+\dots+h_i} = \quad (4)$$

$$\lambda_{i+1} \frac{\partial T_{i+1}(x, y, \tau)}{\partial y} \Big|_{y=h_1+h_2+\dots+h_i},$$

$$T_i(x, y, \tau) \Big|_{y=h_1+h_2+\dots+h_i} = T_{i+1}(x, y, \tau) \Big|_{y=h_1+h_2+\dots+h_i}, \quad (5)$$

где  $\lambda_i$  – коэффициент теплопроводности  $i$ -го слоя изоляционного материала.

Между ПП и слоем  $n$  тепловые потоки и температуры на границе равны:

$$\lambda_n \frac{\partial T_n(x, y, \tau)}{\partial y} \Big|_{y=\sum_{i=1}^n h_i, x \in [-t_j/2, t_j/2]} = \quad (6)$$

$$= \lambda_{Пj} \frac{\partial T_{Пj}(x, y, \tau)}{\partial y} \Big|_{y=\sum_{i=1}^n h_i, x \in [-t_j/2, t_j/2]},$$

$$T_n(x, y, \tau) \Big|_{y=\sum_{i=1}^n h_i, x \in [-t_j/2, t_j/2]} = \quad (7)$$

$$= T_{Пj}(x, y, \tau) \Big|_{y=\sum_{i=1}^n h_i, x \in [-t_j/2, t_j/2]}.$$

Рассмотрим граничные условия для внутреннего ПП. На внешних границах тепловой поток будет отсутствовать:

$$\frac{\partial T_i(x, y, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=-W/2} = \frac{\partial T_i(x, y, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=W/2} = \quad (8)$$

$$= \frac{\partial T_n(x, y, \tau)}{\partial y} \Big|_{y=\sum_{i=1}^n h_i} = 0.$$

У основания справедливо уравнение (3). Между слоями справедливы уравнения (4) и (5). Между ПП и слоем  $nj$  тепловые потоки и температуры на границе равны:

$$\lambda_{nj} \frac{\partial T_{nj}(x, y, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=t_j/2, y \in [y_{\min j}, y_{\max j}]} = \quad (9)$$

$$= \lambda_{Пj} \frac{\partial T_{Пj}(x, y, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=t_j/2, y \in [y_{\min j}, y_{\max j}]},$$

$$\lambda_{nj} \frac{\partial T_{nj}(x, y, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=-t_j/2, y \in [y_{\min j}, y_{\max j}]} = \quad (10)$$

$$= \lambda_{Пj} \frac{\partial T_{Пj}(x, y, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=-t_j/2, y \in [y_{\min j}, y_{\max j}]},$$

$$\lambda_{nj} \frac{\partial T_{nj}(x, y, \tau)}{\partial y} \Big|_{y=y_{\min j}, x \in [-t_j/2, t_j/2]} = \quad (11)$$

$$= \lambda_{Пj} \frac{\partial T_{Пj}(x, y, \tau)}{\partial y} \Big|_{y=y_{\min j}, x \in [-t_j/2, t_j/2]},$$

$$\lambda_{nj} \frac{\partial T_{nj}(x, y, \tau)}{\partial y} \Big|_{y=y_{\max j}, x \in [-t_j/2, t_j/2]} = \quad (12)$$

$$= \lambda_{Пj} \frac{\partial T_{Пj}(x, y, \tau)}{\partial y} \Big|_{y=y_{\max j}, x \in [-t_j/2, t_j/2]},$$

$$T_{nj}(x, y, \tau) \Big|_{y=y_{\min j}, x \in [-t_j/2, t_j/2]} = \quad (13)$$

$$= T_{Пj}(x, y, \tau) \Big|_{y=y_{\min j}, x \in [-t_j/2, t_j/2]},$$

$$T_{nj}(x, y, \tau) \Big|_{y=y_{\max j}, x \in [-t_j/2, t_j/2]} = \quad (14)$$

$$= T_{Пj}(x, y, \tau) \Big|_{y=y_{\max j}, x \in [-t_j/2, t_j/2]},$$

$$T_{nj}(x, y, \tau) \Big|_{x=-t_j/2, y \in [y_{\min j}, y_{\max j}]} = \quad (15)$$

$$= T_{Пj}(x, y, \tau) \Big|_{x=-t_j/2, y \in [y_{\min j}, y_{\max j}]},$$

$$T_{nj}(x, y, \tau) \Big|_{x=t_j/2, y \in [y_{\min j}, y_{\max j}]} = \quad (16)$$

$$= T_{Пj}(x, y, \tau) \Big|_{x=t_j/2, y \in [y_{\min j}, y_{\max j}]}$$

Уравнения с (4) по (7) и с (9) по (16) с математической точки зрения записаны несколько неточно, так как определяют температуры и тепловые потоки в точках, где  $T_i(x, y, \tau)$  и  $T_{Пj}(x, y, \tau)$  не существуют одновременно, согласно (1). Правильнее использовать пределы. Однако неточности в записи на результат не повлияют.

Не менее важно при решении нестационарной задачи задать начальные условия. В момент времени  $\tau = 0$  температура всей системы равна температуре основания.

Решать систему (1) аналитическим методом весьма сложно, особенно при проведении технических расчетов. Целесообразнее воспользоваться численным методом. Для этого используем ANSYS 2019 R1 модуль Transient Thermal.  $T_0$  целесообразно принять равной нулю. Тогда программа будет возвращать значения перегрева  $\Delta T_{Пj}(x, y, \tau)$  (разницу между температурами основания и ПП). При этом считать можно в °С. Разница температур

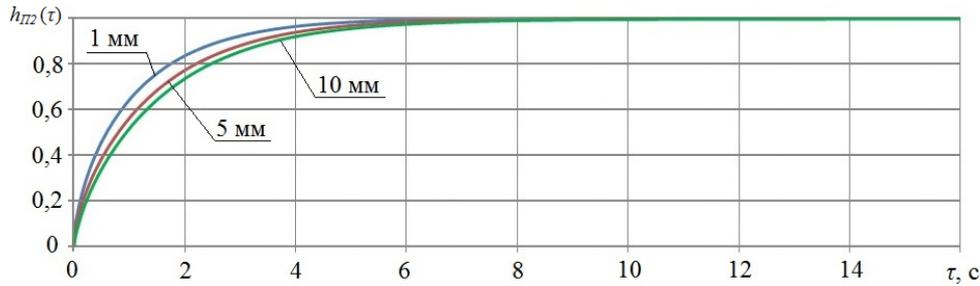


Рис. 2. Графики зависимости переходной характеристики от времени при  $W = 10$  мм и разных значениях  $t$   
 Fig. 2. Graphs of the dependence of the transient response on time at  $W = 10$  mm and different values of  $t$

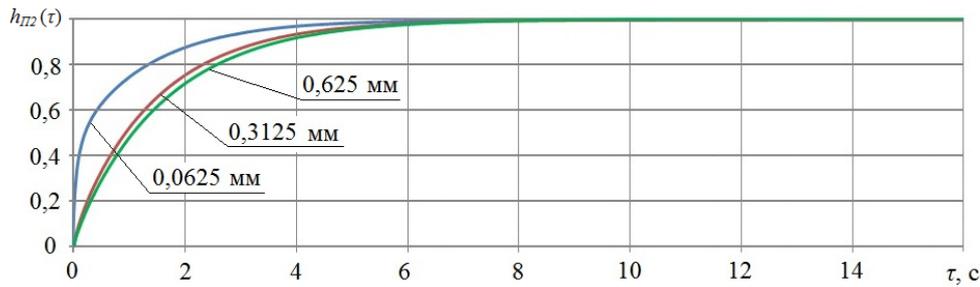


Рис. 3. Графики зависимости переходной характеристики от времени при  $W = 0,625$  мм и разных значениях  $t$   
 Fig. 3. Graphs of the dependence of the transient response on time at  $W = 0,625$  mm and different values of  $t$

в °С и К будет одинакова. При этом не будет учтен температурный коэффициент сопротивления, но его можно учесть, как указано в [12].

Предположим, что  $q_{v,Пj}(\tau) = q_{v,Пj} \cdot 1(\tau)$  (единичный скачок с амплитудой  $q_{v,Пj}$ ). Возьмем точку объема ПП с максимальным перегревом. Разделим зависимость этого перегрева от времени на его же значение  $\Delta T_{Пj}$  в стационарном режиме (при  $\tau \rightarrow \infty$ ). Получим переходную характеристику системы  $h_{Пj}(\tau)$ . Вычислив производную по времени от переходной характеристики получим импульсную характеристику  $g_{Пj}(\tau)$ . Зная импульсную характеристику, можно рассчитать температуру в условиях воздействия импульса произвольной формы:

$$\Delta T_{Пj}(\tau) = \Delta T_{Пj} \int_0^{\tau} f_{v,Пj}(s) g_{Пj}(\tau - s) ds, \quad (17)$$

где  $f_{v,Пj}(s)$  – нормированная зависимость  $q_{v,Пj}(\tau)$  (разделенная на амплитудное значение),  $s$  – переменная интегрирования.

На рис. 2 показаны графики зависимости переходных характеристик ПП от времени в условиях воздействия единичного скачка. Проводник внешний. При этом  $t = 1$  мм; 5 мм; 10 мм,  $W = 10$  мм,  $y_{\min} = 0,578$  мм (соответствует толщине пакета: стеклотекстолит СТФ-2-35-0,25, стеклоткань СТП-4-0,062, 4 слоя, пленка клеевая ПКС-171 0,08 × 400). Коэффициент теплопроводности материала ПП принят равным 390 Вт/м·К.

Коэффициенты теплопроводности изоляционных материалов приняты равными 0,3 Вт/м·К. Удельная теплоемкость материала ПП принята равной 380 Дж/кг·К. Удельная теплоемкость изоляционных материалов принята равной 1600 Дж/кг·К. Плотность материала ПП принята равной 8930 кг/м<sup>3</sup>. Плотность изоляционных материалов принята равной 1800 кг/м<sup>3</sup>. Теплофизические характеристики материала ПП соответствуют меди. Теплофизические характеристики изоляционных материалов соответствуют стеклотекстолиту. Толщина печатного проводника равна 55 мкм (35 мкм фольги и 20 мкм гальванической меди).

На рис. 3 показаны графики зависимости переходных характеристик ПП от времени в условиях воздействия единичного скачка. Та же система. При этом  $t = 0,0625$  мм; 0,3125 мм; 0,625 мм,  $W = 0,625$  мм.

Из рис. 2 и 3 видно, что времена протекания переходных процессов слабо зависят как от  $t$ , так и от  $W$ . Отличается лишь форма графиков. Чем меньше соотношение  $t/W$ , тем выше скорость нарастания  $h_{Пj}(\tau)$  в начальный момент времени (примерно от 0 до 1,5 с). При этом в последующие моменты времени (свыше 1,5 с) скорость нарастания  $h_{Пj}(\tau)$  снижается с повышением  $t/W$ . Примерно после 8 с наступает стационарный режим. Если сравнивать рис. 2 и 3, то можно видеть и тот факт, что чем ближе значение  $t$  к значению  $W$ , тем слабее зависимость  $h_{Пj}(\tau)$  от  $W$  и  $t$ . Возможно, это связано

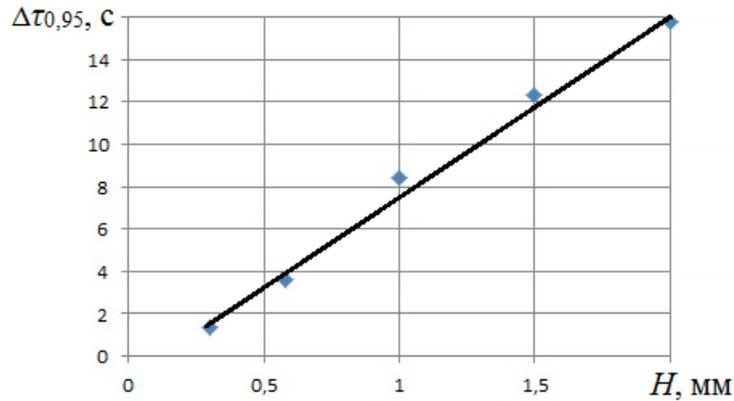


Рис. 4. Зависимость времени протекания переходных процессов по уровню 0,95 от толщины слоя изоляционных материалов  
Fig. 4. Dependence of the time of transient processes at the level of 0,95 on the thickness of the layer of insulating materials

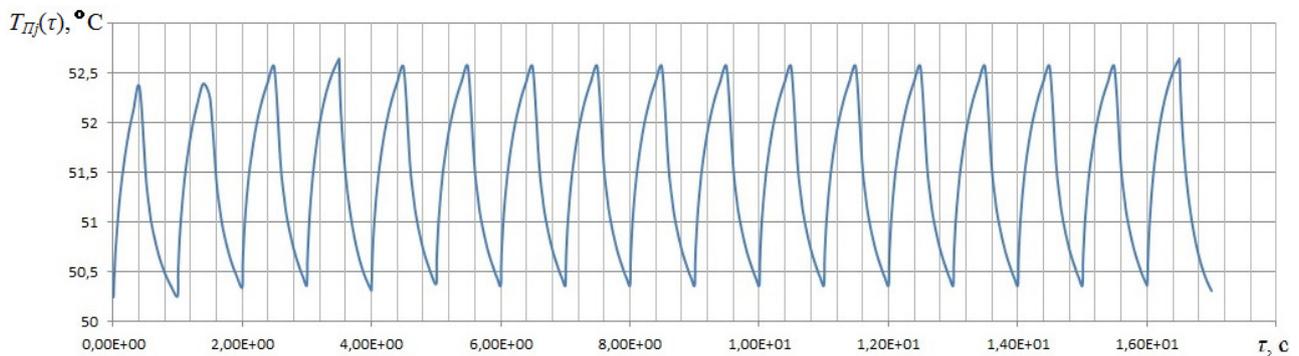


Рис. 5. Зависимость температуры ПП от времени в условиях воздействия периодической последовательности импульсов тока со скважностью, равной 2, и периодом следования 1 с  
Fig. 5. Temperature dependence of the PCB on time under the influence of a periodic sequence of current pulses with a duty cycle equal to 2 and a repetition period of 1 s

с тем, что при  $W = t$  система уравнений (1) становится одномерной и зависимость от координаты  $x$  пропадает. Соответственно,  $W$  и  $t$  не влияют ни на что. Для того чтобы понять, как зависит длительность переходного процесса от толщины слоев изоляционных материалов, проведем расчеты для плат разной толщины. А коэффициент теплопроводности слоев изоляционных материалов оставим равным  $0,3 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ . При этом  $W = 10 \text{ мм}$ ,  $t = 1 \text{ мм}$ . По результатам расчетов построим зависимость времени протекания переходных процессов по уровню 0,95 ( $\Delta\tau_{0,95}$ ) от толщины слоя изоляционных материалов. Результат представлен на рис. 4.

Из рис. 4 видно, что время протекания переходных процессов сильно зависит от толщины слоя изоляционных материалов. Причем эта зависимость практически линейная.

Таким образом, процесс нагрева ПП достаточно инертный по сравнению с процессами в электрических цепях. Однако и в электрических цепях бывают процессы, которые протекают достаточно медленно. Примером может служить включе-

ние питания или подключение нагрузки к шине питания. Переходной процесс протекает быстро, но далее следует длительный стационарный процесс. В течение стационарного процесса ПП успевает прогреться до максимальной температуры. Если такой стационарный процесс превышает 8 с, то можно считать, что температура ПП не зависит от времени. Она может быть найдена как температура при протекании постоянного тока.

Рассмотрим протекание тока в виде периодической последовательности импульсов. В этом случае ПП не будет успевать нагреваться и охлаждаться, причем чем выше частота, тем изменение температуры будет меньше. При достаточно малых длительностях это изменение температуры будет настолько мало, что температуру можно будет считать постоянной. Она может быть найдена как температура при протекании действующего значения силы тока. Длительности импульсов, при которой это условие будет выполняться, должна быть меньше 10 мс. При этом время паузы между импульсами не должно быть меньше 10 мс. Эти значения определены из условия того, что

перегрев ПП шириной 0,0625 мм за это время не должен превысить более чем 0,1 от максимального значения (значения при постоянном токе, равном амплитуде импульса). Если ширина ПП будет меньше, то и длительность импульса необходимо брать меньше. На практике такие случаи редки. Даже ширина 0,0625 соответствует седьмому классу точности, согласно [1]. Платы класса точности больше пятого встречаются крайне редко. Аналогичные выводы можно сделать для одиночного импульса.

Ситуация несколько осложняется, если оба приведенных выше условия не выполняются, тогда зависимость температуры ПП будет иметь вид, представленный на рис. 5.

В таком случае разница между максимальным и минимальным значениями температуры будет весьма велика. Для определения максимальной температуры можно воспользоваться формулой (17). Для этого необходимо знать  $g_{Пj}(\tau)$ . Если  $g_{Пj}(\tau)$  задана численно, то интеграл в фор-

муле (17) нужно решать численно. Задача это весьма непростая, поэтому делать это необходимо в исключительных случаях. В общем случае есть смысл рассмотреть импульсный сигнал как постоянный ток, значение которого равно значению амплитуды импульса.

## Заключение

В результате проделанной работы были получены данные, позволяющие проанализировать тепловые процессы, проходящие в ПП рассматриваемых плат в условиях протекания через них импульсных токов. Проведен анализ и выработаны некоторые рекомендации для разработчиков печатных плат. Материалы настоящей работы можно в дальнейшем использовать для разработки инженерной методики выбора ширины ПП в условиях протекания по ним импульсных токов.

Таким образом, в процессе работы были решены все поставленные задачи, а цель достигнута.

## Список литературы

1. Платы печатные. Основные параметры конструкции. ГОСТ Р 53429-2009. М.: Стандартиформ, 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. Пирогова Е.В. Проектирование и технология печатных плат. М.: Форум – Инфра-М, 2005. 250 с.
6. Белянин Л.Н. Конструирование печатного узла и печатной платы. Расчет надежности. Томск: ТПУ, 2008. 77 с.
7. Гормаков А.Н. Воронина Н.А. Конструирование и технология электронных устройств приборов. Печатные платы. Томск: ТПУ, 2006. 164 с.
8. Муравьев Ю. Особенности проектирования и производства печатных плат на металлическом основании // Производство электроники: Технология, оборудования, материалы. 2010. № 2. С. 35–38.
9. Расчет температуры печатных проводников плат, установленных на металлическое основание в бортовой аппаратуре космических аппаратов, работающей в условиях вакуума / А.В. Костин [и др.] // Актуальные проблемы ракетно-космической техники («VI Козловские чтения»): сб. мат. VI Всероссийской научно-технической конференции. Самара: Самарский научный центр РАН, 2019. Т. 2. С. 55–62.
10. Костин А.В., Шумских И.Ю., Рузанов А.В. Методика расчета ширины печатных проводников печатных плат на металлическом основании для приборов космических аппаратов // XLIV Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти С.П. Королева и других выдающихся отечественных ученых-пионеров освоения космического пространства: сб. тез. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020. Т. 2. С. 264–267.
11. Костин А.В. Методика расчета ширины печатных проводников печатных плат на металлическом основании для приборов космических аппаратов при переменном токе // Труды МАИ. 2020. № 114. DOI: <https://doi.org/10.34759/trd-2020-114-10>
12. Костин А.В. Учет влияния нагрева печатных проводников, работающих на борту космического аппарата, на выбор их ширины // Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций: мат. Всероссийской научно-технической конференции. Самара: ООО «Артель», 2021. С. 104–106.

## References

1. Printed Boards. Basic Design Parameters. GOST R 53429-2009. Moscow: Standartinform, 2018, 11 p. (In Russ.)
2. Printed Circuit Boards. Design Requirements. Instruction. RD 50-708-91. Moscow: Izd-vo standartov, 1992, 41 p. (In Russ.)
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. Pirogova E.V. *Design and Technology of Printed Circuit Boards*. Moscow: Forum – Infra-M, 2005, 250 p. (In Russ.)
6. Belyanin L.N. *Design of Printed Circuit Assembly and Printed Circuit Board. Reliability Calculation*. Tomsk: TPU, 2008, 77 p. (In Russ.)

7. Gormakov A.N., Voronina N.A. *Design and Technology of Electronic Devices. Printed Circuit Boards*. Tomsk: TPU, 2006, 164 p. (In Russ.)
8. Murav'ev Yu. Features of design and production of printed circuit boards on a metal base. *Proizvodstvo elektroniki: Tekhnologiya, oborudovaniya, materialy*, 2010, no. 2, pp. 35–38. (In Russ.)
9. Kostin A.V. et al. Calculation of the temperature of printed conductors of boards installed on a metal base in the onboard equipment of spacecraft operating in vacuum. *Aktual'nye problemy raketno-kosmicheskoy tekhniki («VI Kozlovskie chteniya»): sb. mat. VI Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii*. Samara: Samarskiy nauchnyy tsentr RAN, 2019, vol. 2, pp. 55–62. (In Russ.)
10. Kostin A.V., Shumskikh I.Yu., Ruzanov A.V. Method for calculating the width of printed circuit board conductors on a metal base for spacecraft instruments. *XLIV Akademicheskie chteniya po kosmonavtike, posvyashchennye pamyati S.P. Koroleva i drugikh vydayushchikhsya otechestvennykh uchenykh-pionerov osvoiniya kosmicheskogo prostranstva: sb. tez.* Moscow: MGTU im. N.E. Bauman, 2020, vol. 2, pp. 264–267. (In Russ.)
11. Kostin A.V. Method for calculating the width of printed circuit conductors of printed circuit boards on a metal base for spacecraft instruments at alternating current. *Trudy MAI*, 2020, no. 114. DOI: <https://doi.org/10.34759/trd-2020-114-10> (In Russ.)
12. Kostin A.V. Accounting for the influence of heating of printed conductors operating on board a spacecraft on the choice of their width. *Aktual'nye problemy radioelektroniki i telekommunikatsiy: mat. Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii*. Samara: OOO «Artel'», 2021, pp. 104–106. (In Russ.)

## Physics of Wave Processes and Radio Systems

2022, vol. 25, no. 4, pp. 59–66

DOI 10.18469/1810-3189.2022.25.4.59-66

Received 8 June 2022  
Accepted 11 July 2022

### Analysis of heating of printed circuit board conductors on a metal base for spacecraft devices at pulsed current

*Alexey V. Kostin*

Samara National Research University  
34, Moskovskoye shosse,  
Samara, 443086, Russia

*Abstract* – The article presents the results of the analysis of heating of printed circuit conductors of printed circuit boards mounted on a metal base, on-board device of spacecraft when pulsed current flows through them. Thermal transient and impulse characteristics of a system consisting of a printed conductor and a printed circuit board are considered. The analysis of the dependence of the temperature rise rate of printed conductors and the duration of transient processes on the linear dimensions of the system elements is given. It is noted in the article that the time of transient processes most strongly depends on the thickness of the layer of insulating materials. All the results were obtained in the process of modeling transients in the ANSYS 2019 R1 Transient Thermal module. Practical recommendations on the consideration of thermal transients in printed conductors in the design of printed circuit boards are given.

*Keywords* – printed circuit board; printed conductor; pulse current; spacecraft; metal base; temperature.

### Информация об авторе

Костин Алексей Владимирович, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры конструирования и технологии электронных систем и устройств Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева, г. Самара, Россия.

*Область научных интересов:* конструирование радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов.

*E-mail:* [electrodynamics27@yandex.ru](mailto:electrodynamics27@yandex.ru)

### Information about the Author

Alexey V. Kostin, Candidate of Technical Sciences, senior lecturer of the Department of Design and Technology of Electronic Systems and Devices, Samara National Research University, Samara, Russia.

*Research interests:* design of radio-electronic equipment of spacecraft.

*E-mail:* [electrodynamics27@yandex.ru](mailto:electrodynamics27@yandex.ru)