

## Анализ теплового влияния двух внешних параллельных печатных проводников плат, установленных на металлическое основание и работающих в условиях космического вакуума, друг на друга

А.В. Костин

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

**Аннотация – Обоснование.** Необходимость анализа теплового влияния двух внешних параллельных проводников обусловлена увеличением плотности проводящего рисунка. Для печатных плат, установленных на металлическое основание и работающих в условиях космического вакуума, эта необходимость обостряется слабостью проработки вопроса. **Цель.** Проведение анализа взаимного влияния двух внешних параллельных печатных проводников плат, установленных на металлическое основание и работающих в условиях космического вакуума, друг на друга для выявления зависимости их температуры от расстояния между ними и определения расстояния, при котором эта зависимость практически исчезает. **Методы.** Для достижения цели использовался расчет конечно-элементным методом, реализованный в программе ANSYS, модуль Steady-State Thermal. Расчету подвергались три многослойные печатные платы: 4-слойная, 6-слойная, 8-слойная. Температурный коэффициент сопротивления учитывался отдельно путем пересчета. **Результаты.** Были построены графики зависимостей перегрева (разницы между температурой печатного проводника и металлического основания) от расстояния между печатными проводниками. Проведена аппроксимация полученных результатов. По аппроксимированным зависимостям найдены минимальные значения расстояний между печатными проводниками, при которых взаимное влияние печатных проводников практически исчезает. С увеличением толщины печатной платы это расстояние увеличивается. **Заключение.** Полученные результаты могут помочь оценить влияние соседних печатных проводников при проектировании плат бортовой аппаратуры космических аппаратов.

**Ключевые слова** – тепловое влияние; внешние параллельные печатные проводники плат; металлическое основание; космический вакуум; численный метод; аппроксимация.

### Введение

В космическом приборостроении получили широкое распространение печатные платы на металлическом основании. Причем такие платы чаще всего работают в условиях отсутствия конвекции. Одной из задач, решаемой в процессе проектирования печатных плат, является выбор ширины печатных проводников (ПП). Ширина ПП в основном определяется током, протекающим через него. Отечественная [1; 2] и зарубежная [3; 4] нормативно-техническая документация дает указания по выбору ширины ПП, но не для плат на металлическом основании. В некоторых публикациях приводятся формулы для расчета ПП печатных плат на металлическом основании, но работающих в условиях естественной конвекции [5]. Автором настоящей работы в [6] приводится подобная методика, однако она не рассматривает влияние ПП друг на друга. В реальных печатных платах проводящий рисунок достаточно сложный. Соседние ПП могут подогревать друг друга. Самое большое влияние будут оказывать друг на друга ПП, идущие параллельно. Они могут находиться как на одном

слое, так и на разных. Могут быть внутренними и внешними. Автором настоящей публикации проводятся работы по анализу теплового влияния ПП друг на друга для плат, установленных на металлическом основании, работающих в условиях космического вакуума. Первой из озвученных работ является изучение взаимного влияния двух внешних параллельных ПП, описанию результатов которой посвящена настоящая статья.

Итак, целью работы являлось проведение анализа взаимного влияния двух внешних параллельных ПП плат, установленных на металлическое основание и работающих в условиях космического вакуума, друг на друга для выявления зависимости их температуры от расстояния между ними и определения расстояния, при котором эта зависимость практически исчезает.

Для достижения цели были решены следующие задачи:

- проведен расчет температур ПП для разных расстояний между ними и разных плат;
- проведена аппроксимация результатов расчета;
- определено расстояние между ПП, при котором взаимное влияние практически исчезает.

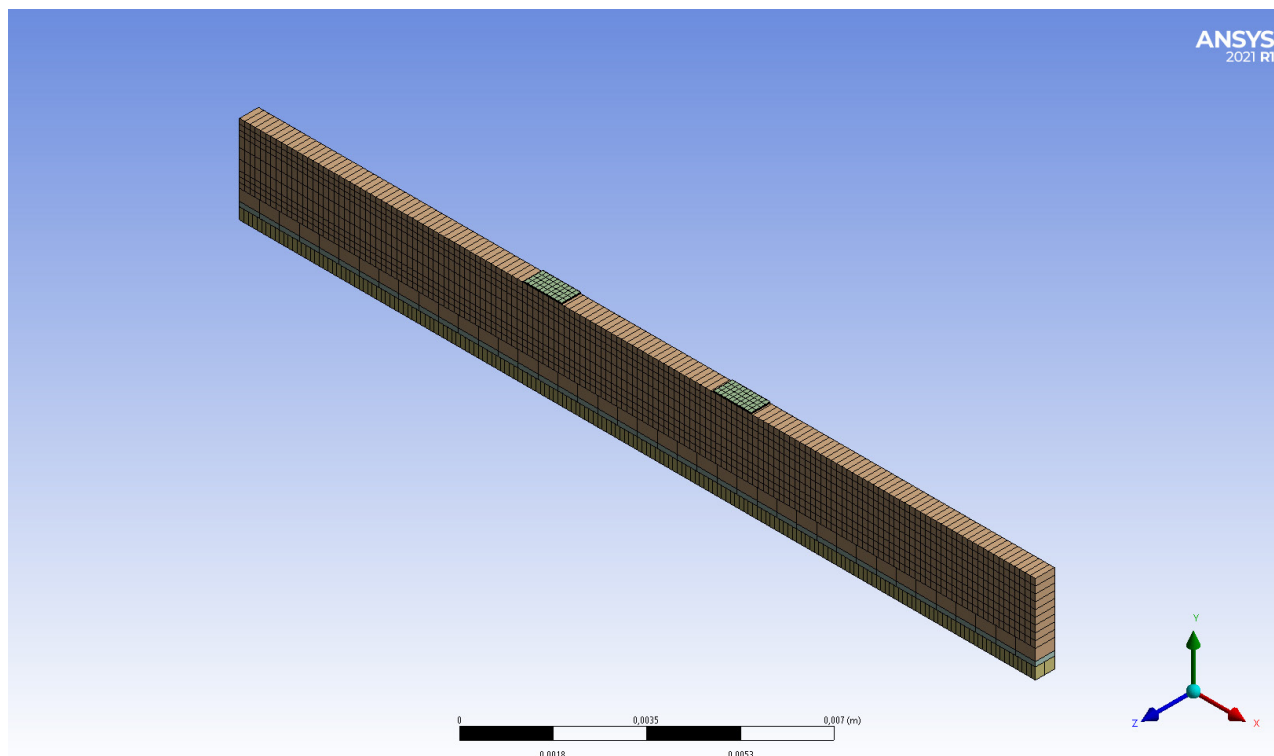


Рис. 1. Пример конечно-элементной сетки  
 Fig. 1. Example of a finite element grid

## 1. Описание модели

В [6; 7] было показано, что даже для одиночного ПП система уравнений теплопроводности будет достаточно сложной. Для двух ПП она будет еще сложнее. Решать такую задачу аналитически нецелесообразно. Для ее решения использовался конечно-элементный метод, реализованный в программе ANSYS 2020 R1 и ANSYS 2021 R1, модуль Steady-State Thermal. Проведение работы пришлось на период обновления программного обеспечения, поэтому использовались две версии.

Расчету подвергались три многослойные печатные платы: 4-слойная, 6-слойная, 8-слойная. Схемы расположения слоев соответствуют [6]. Как уже упоминалось, ПП внешние. Ширина изоляционных слоев ( $W$ ) выбрана такой, чтобы края печатной платы не влияли на температуру ПП. При этом она не должна быть слишком большой, чтобы не увеличивать количество конечных элементов. Исходя из указанных выше соображений, значение было выбрано равным 21 мм. Величина ширины ПП ( $t$ ) выбрана равной 1 мм. Значение толщины ПП ( $h_{ПП}$ ) выбрано равным 35 мкм. Величина удельного электрического сопротивления ПП ( $\rho$ ) принято равным  $1,72 \cdot 10^{-8}$  Ом·м, что соответствует медной фольге [2]. Коэффициенты теплопроводности материалов приняты равными, такими же, как

и в [6]. Значение плотности мощности, рассеиваемой ПП под действием тока, было выбрано равным  $3,51 \cdot 10^8$  Вт/м<sup>3</sup>, что соответствует значению силы тока 5 А при заданных размерах ПП. При такой силе тока температура ПП не слишком высокая (не превышает температуру стеклования материала платы) и не слишком низкая (перегрев не ниже 10 °С). При этом, длина фрагмента печатной платы составила 0,5 мм. Расстояние между ПП ( $t_1$ ) варьируется от 1 до 10 мм с шагом 1 мм. Значение температуры основания ( $T_0$ ) составляет 0 °С. При такой температуре основания температура будет численно равна перегреву (разнице между температурами ПП и основания).

## 2. Результаты расчетов

На рис. 1 представлен пример конечно-элементной сетки. На рис. 2–4 показаны температурные поля, создаваемые ПП. Печатная плата восьмислойная, соответствует типу 4 по [6]. На рис. 2, 3 значение  $t_1$  составляет 1 мм, а на рис. 4 – 10 мм. Результаты расчетов в виде перегрева ПП приведены в табл. 1.

Анализируя распределение теплового поля, представленного на рис. 2–4, можно сказать, что взаимное влияние ПП сильно зависит от  $t_1$ . На рис. 2 по ПП, расположенному слева, ток не про-

Таблица 1. Результаты расчетов перегрева без учета ТКС в °С

Table 1. Results of calculations of overheating without taking into account the temperature coefficient of resistance in °С

Восьмислойная (тип 4 согласно [6])											
Кол-во активных ПП (номер режима)	Номер ПП	$t_1$ , мм									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	5,471	2,450	1,043	0,460	0,212	0,089	0,040	0,019	0,011	0
	2	28,613	28,704	29,545	28,683	28,880	28,916	28,660	29,104	28,777	28,789
2	1	34,055	31,152	30,588	29,152	29,111	29,032	28,720	29,157	28,811	28,828
	2	34,056	31,132	30,578	29,142	29,094	29,011	28,703	29,126	28,790	28,790
Шестислойная (тип 3 согласно [6])											
Кол-во активных ПП (номер режима)	Номер ПП	$t_1$ , мм									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	6,283	3,005	1,377	0,654	0,325	0,157	0,079	0,036	0,018	0,009
	2	29,741	29,842	30,707	29,840	30,035	30,078	29,814	30,280	29,947	29,953
2	1	36,008	32,844	32,091	30,508	30,377	30,255	29,917	30,326	29,995	30,003
	2	36,002	32,835	32,080	30,492	30,359	30,235	29,876	30,316	29,964	29,962
Четырехслойная (тип 2 согласно [6])											
Кол-во активных ПП (номер режима)	Номер ПП	$t_1$ , мм									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	3,182	1,095	0,375	0,144	0,054	0,020	0,007	0,003	0,001	0
	2	24,300	24,624	24,266	24,494	24,553	23,84	24,553	24,494	24,268	24,638
2	1	27,463	25,715	24,640	24,636	24,608	23,861	24,559	24,498	24,268	24,635
	2	27,465	25,713	24,639	24,637	24,607	23,860	24,560	24,497	24,269	24,638

текает, он неактивен. Но хорошо видно, что он подогревается соседним ПП. Когда оба ПП активны, они нагревают друг друга. С ростом  $t_1$  взаимное влияние ПП друг на друга снижается. Это видно из рис. 4. Два ПП, расположенные достаточно далеко друг от друга, практически не взаимодействуют своими температурными полями. В процессе расчета один из ПП выключался, становился неактивным. Это был ПП, расположенный слева (первый ПП). Поэтому количество активных ПП составляло или 1 (только правый), или 2 (оба). Это хорошо видно из табл. 1. Вторым являлся правый ПП. Номер режима в табл. 1 соответствует количеству активных ПП.

Использованный расчетный модуль не позволяет учесть температурный коэффициент сопротивления (ТКС) материала ПП. В табл. 1 приведен перегрев без учета ТКС. Он был учтен путем пере-

счета. В печатных платах, установленных на металлическое основание и работающих в условиях отсутствия конвекции, отвод тепла происходит за счет теплопроводности на металлическое основание. Излучение отводит тепло незначительно по сравнению с теплопроводностью [8]. При расчете в ASYS эта особенность тоже была использована, излучение не моделировалось. Для одиночного ПП можно записать выражение для перегрева с учетом ТКС:

$$\Delta T_{II} = R_T P(\alpha) = R_T I^2 R_0 (1 + \alpha \Delta T_{II}), \quad (1)$$

где  $R_T$  – тепловое сопротивление между поверхностью ПП и основанием;  $\alpha$  – ТКС;  $P(\alpha)$  – тепловой поток как функция от ТКС;  $I$  – сила тока, текущего через ПП;  $R_0$  – электрическое сопротивление, рассчитанное при удельном электрическом сопротивлении, приведенном в справочной литературе или стандартах (обычно при 20 °С).

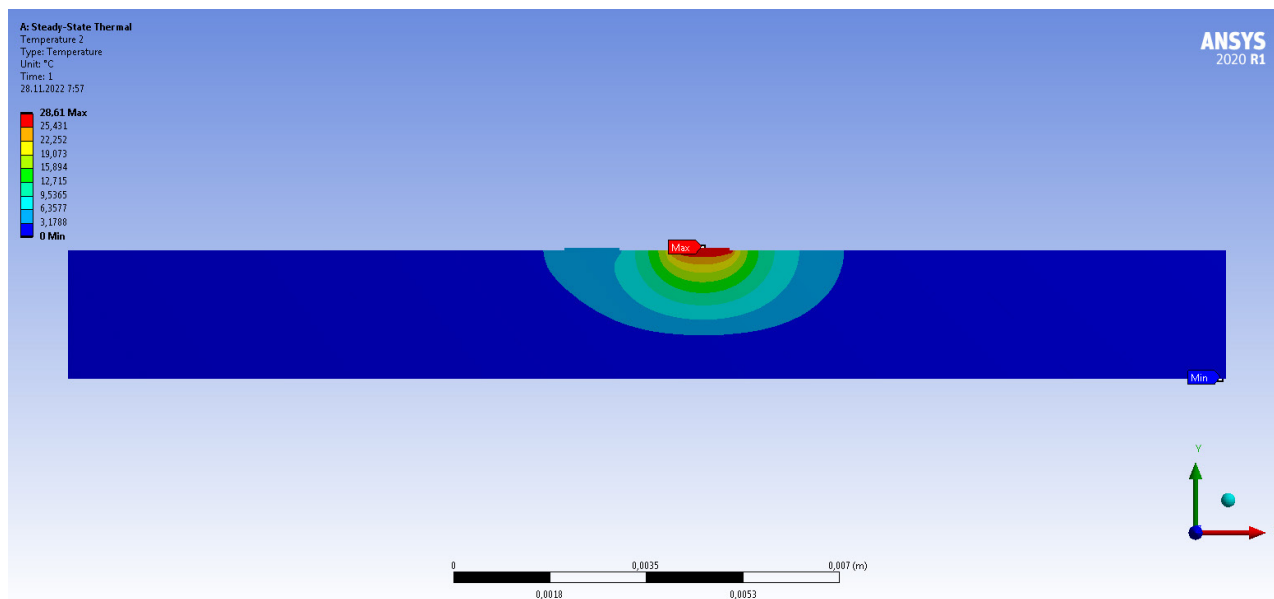


Рис. 2. Температурное поле, создаваемое ПП, расположенным справа, ПП слева неактивен,  $t_1 = 1$  мм  
 Fig. 2. The temperature field created by the printed conductors located on the right, the printed conductors on the left is inactive,  $t_1 = 1$  mm

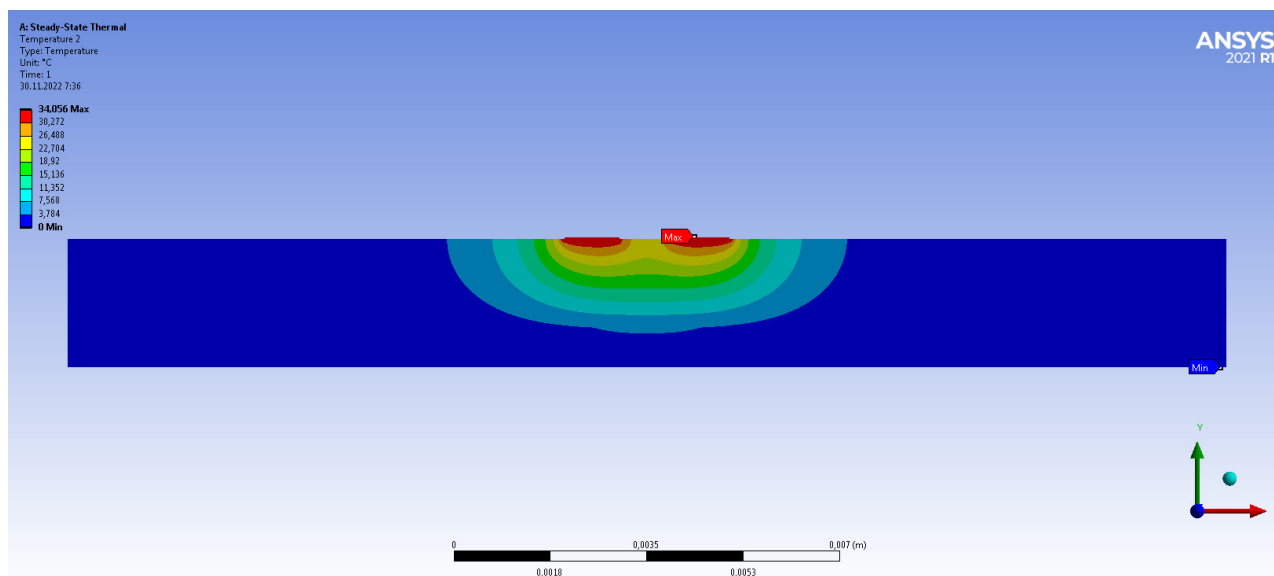


Рис. 3. Температурное поле, создаваемое обоими ПП, оба ПП активны,  $t_1 = 1$  мм  
 Fig. 3. The temperature field created by both printed conductors, both printed conductors are active,  $t_1 = 1$  mm

Как было показано в [6], поверхность ПП можно считать изотермической, так как она имеет примерно одинаковую температуру в любых точках. Если  $R_0$  рассчитано при  $20^\circ\text{C}$  ( $T_p$ ), то и перегрев должен быть рассчитан относительно этой температуры. Другими словами, температура основания должна быть равна  $20^\circ\text{C}$  ( $T_O = T_p$ ). В противном случае в формуле (1) ТКС нужно умножать не на перегрев, а на сумму  $\Delta T_{II} + (T_O - T_p)$ . Для простоты вычислений было принято  $T_O = T_p$ . В [2] не указано, для какой температуры приведено значение  $\rho$ . Но значение удельного электрического сопротивления, приведенное в [2], соответствует значению,

приведенному в [9] для катодной переплавленной меди марки М1 ( $1,724 \cdot 10^8$  Ом·м) при температуре  $20^\circ\text{C}$ .  $\alpha$  принят равным  $0,0043$  1/К согласно [9].

Перегрев без учета ТКС можно записать в виде  $\Delta T'_{II} = R_T I^2 R_0$ . (2)

Подставив (2) в (1) и выразив перегрев с учетом ТКС, получим:

$$\Delta T_{II} = \frac{\Delta T'_{II}}{1 - \alpha \Delta T'_{II}}. \quad (3)$$

Формула (3) позволяет рассчитать перегрев с учетом ТКС через перегрев без учета ТКС для одиночного ПП.

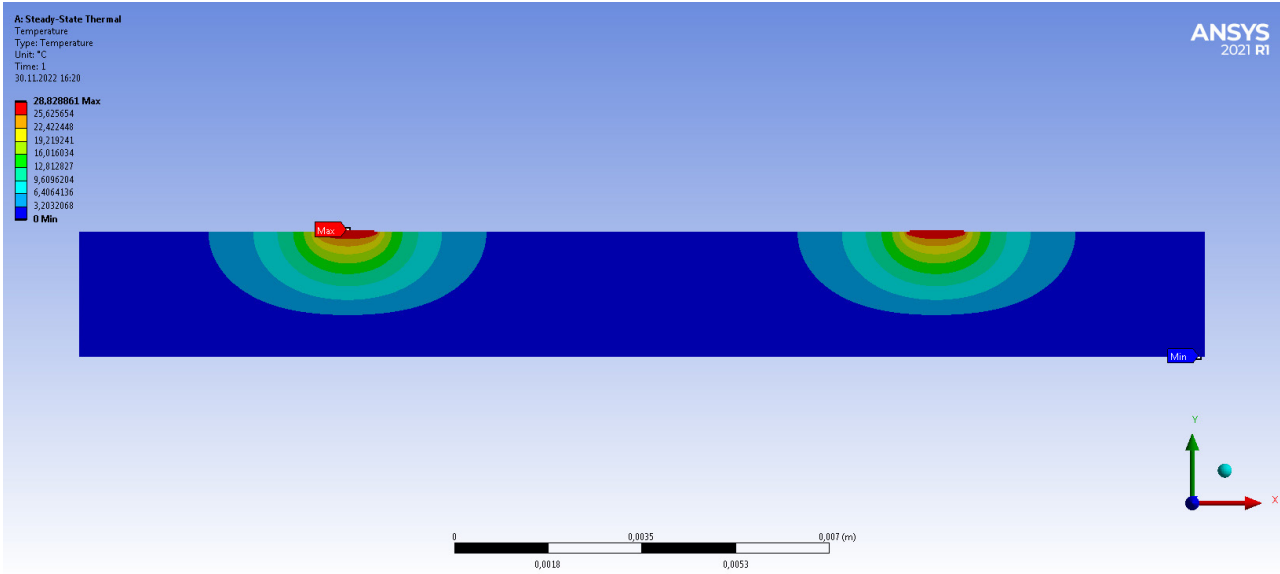


Рис. 4. Температурное поле, создаваемое обоими ПП, оба ПП активны,  $t_1 = 10$  мм  
Fig. 4. The temperature field created by both printed conductors, both printed conductors are active,  $t_1 = 10$  mm

Для вывода формулы, аналогичной (3), для двух ПП воспользуемся принципом суперпозиции температурных полей [10]:

$$T_j = T_C + \sum_{i=1}^n P_i F_{ij}, \quad (4)$$

где  $T_j$  – температура в  $j$ -й точке;  $T_C$  – температура внешней среды;  $P_i$  – мощность источников в  $i$ -й части системы;  $n$  – число характерных областей, из которых состоит система;  $F_{ij}$  – тепловые коэффициенты, не зависящие ни от температуры внешней среды, ни от величины мощности источников.

Для рассматриваемого случая выражение (4) можно записать в виде

$$\Delta T_{П1} = F_{21}P + F_{11}P; \quad (5)$$

$$\Delta T_{П2} = F_{12}P + F_{22}P,$$

где  $\Delta T_{П1}$  – температура левого ПП;  $\Delta T_{П2}$  – температура правого ПП;  $P$  – мощность, рассеиваемая в ПП, в обоих одинаковая.

ТКС влияет на мощность, рассеиваемую в ПП. Если температура ПП увеличивается, то его электрическое сопротивление растет. Рост электрического сопротивления приводит к росту рассеиваемой мощности. Поскольку мощность прямо пропорциональна произведению электрического сопротивления на квадрат силы тока, то и мощность будет увеличиваться в  $(1 + \alpha \Delta T_{П})$  раз. Тогда (5) можно записать в виде

$$\Delta T_{П1} = F_{21}(1 + \alpha \Delta T_{П2})P' + F_{11}(1 + \alpha \Delta T_{П1})P'; \quad (6)$$

$$\Delta T_{П2} = F_{12}(1 + \alpha \Delta T_{П1})P' + F_{22}(1 + \alpha \Delta T_{П2})P',$$

где  $P'$  – мощность без учета ТКС.

Решив систему алгебраических уравнений (6) относительно  $\Delta T_{П1}$ ,  $\Delta T_{П2}$ , получим:

$$\Delta T_{П1} = \frac{F_{21}P' + \alpha \Delta T_{П2}P'F_{21} + F_{11}P'}{1 - \alpha F_{11}P'}; \quad (7)$$

$$\Delta T_{П2} = \frac{P'(1 - \alpha F_{11}P')(F_{12} + F_{22}) + \alpha P'^2 F_{12}(F_{21} + F_{11})}{(1 - \alpha F_{22}P')(1 - \alpha F_{11}P') - \alpha^2 P'^2 F_{12}F_{21}}. \quad (8)$$

Тепловые коэффициенты можно найти по данным, приведенным в табл. 1, так как они не зависят ни от температуры, ни от величины мощности источников. Сделать это можно по экспериментальному методу, описанному в [10], только вместо экспериментальных данных будем использовать данные расчета. Итак, тепловые коэффициенты найдем по формулам:

$$F_{22} = \frac{\Delta T_{П2}^{(2)}}{P'}; \quad F_{12} = \frac{\Delta T_{П2}'}{P'} - F_{22}; \quad (9)$$

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

где  $\Delta T_{П2}^{(2)}$  – перегрев правого ПП при активном только правом ПП, без учета ТКС (режим 1, ПП № 2 табл. 1);  $\Delta T_{П2}'$  – перегрев правого ПП при обоих активных ПП, без учета ТКС (режим 2, ПП № 2 табл. 1);  $\Delta T_{П1}^{(2)}$  – перегрев левого ПП при активном только правом ПП, без учета ТКС (режим 1, ПП № 1 табл. 1);  $\Delta T_{П1}'$  – перегрев левого ПП при обоих активных ПП, без учета ТКС (режим 2, ПП № 1 табл. 1).

Таблица 2. Результаты расчетов перегрева с учетом ТКС в °С  
Table 2. Results of calculations of overheating taking into account the temperature coefficient of resistance in °С

Восьмислойная (тип 4 согласно [6])										
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 [6])										
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 [6])										
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

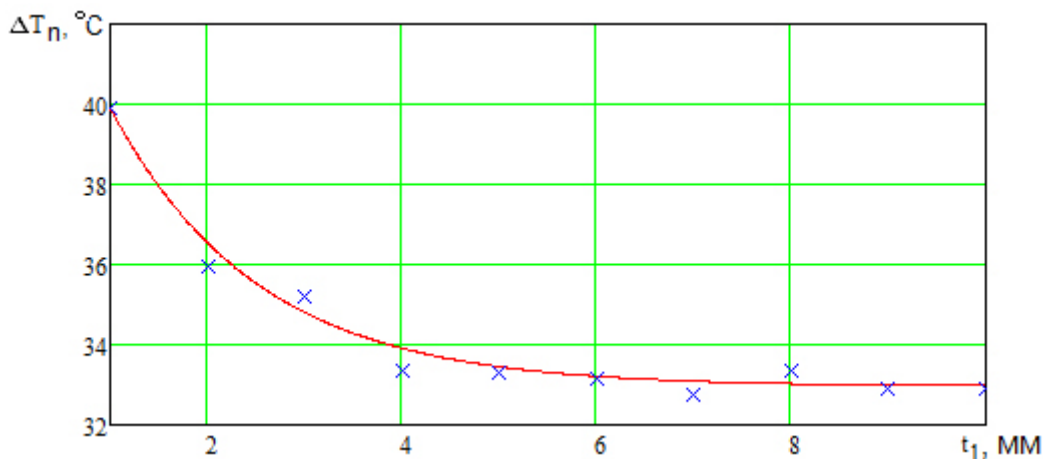


Рис. 5. Зависимость перегрева ПП платы типа 4 от  $t_1$   
Fig. 5. The dependence of the overheating of the printed circuit board conductors of type 4 on  $t_1$

Результаты расчета по формулам (7) и (8) с учетом (9) приведены в табл. 2.

### 3. Аппроксимация

На рис. 5–7 приведены точки, соответствующие значениям перегревов, приведенным в табл. 2, и графики зависимостей перегрева от расстояния между ПП. Графики получены путем аппроксимации методом наименьших квадратов. Если рассматривать данные, приведенные в табл. 2, то видно, что перегревы первого и второго ПП практически не отличаются. Это вполне логично, ведь они одинаковые. Для построения и аппроксимации взяты значения перегревов для левого ПП.

Функция, которой были аппроксимированы результаты, имеет вид

$$\Delta T_{П} = (\Delta T_{\max} - \Delta T_{\min}) e^{-at_1} + \Delta T_{\min}. \quad (10)$$

В формуле (10) используются разности температур и коэффициент  $a$ , значения которых приведены в табл. 3. Смысл выражения понятен из рис. 8.

### 4. Определено расстояние между ПП, при котором взаимное влияние практически исчезает

Как видно их графиков на рис. 5–7, при увеличении расстояния между ПП взаимное влияние их друг на друга уменьшается. При определенных



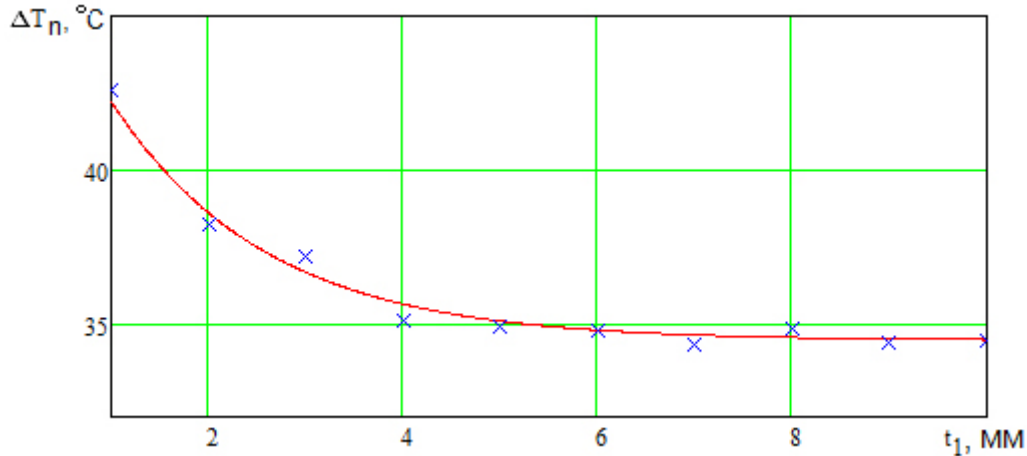


Рис. 6. Зависимость перегрева ПП платы типа 3 от  $t_1$   
Fig. 6. The dependence of the overheating of the printed circuit board conductors of type 3 on  $t_1$

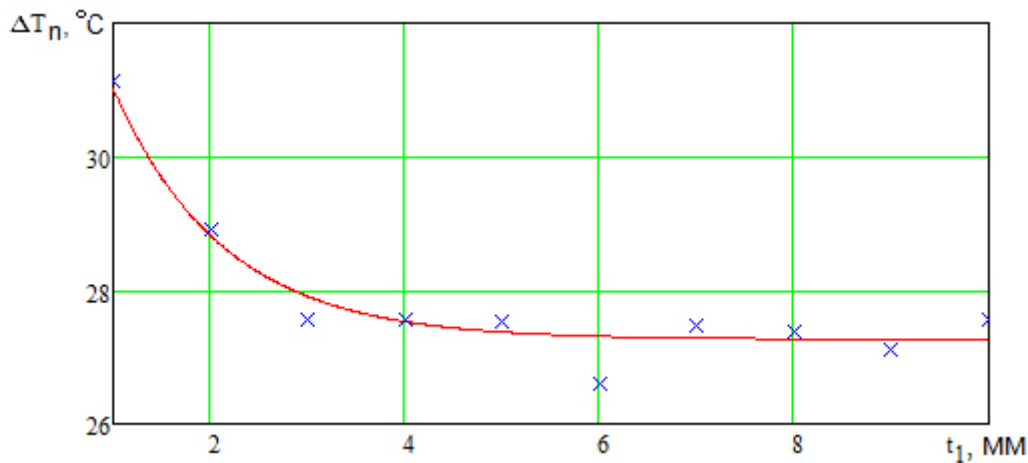


Рис. 7. Зависимость перегрева ПП платы типа 2 от  $t_1$   
Fig. 7. The dependence of the overheating of the printed circuit board conductors of type 2 on  $t_1$

Таблица 3. Значения разностей температур и коэффициентов  $a$   
Table 3. Values of temperature differences and coefficients  $a$

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

значениях  $t_1$  ПП практически перестают воздействовать друг на друга. Экспонента асимптотически приближается к температуре, соответствующей температуре одиночного ПП. Это также хорошо видно из рис. 3 и 4. При малом  $t_1$  (рис. 3) ПП взаимодействуют температурными полями. При достаточно больших  $t_1$  (рис. 4) ПП практически не взаимодействуют температурными полями.

Определим  $t_1$ , при котором взаимодействие ПП практически прекращается. Критерием прекращения взаимодействия будет являться снижение перегрева до уровня  $0,05(\Delta T_{\text{П. max}} -$

$-\Delta T_{\text{П. min}}) + \Delta T_{\text{П. min}}$ . Графически это проиллюстрировано на рис. 8. Значение расстояния, соответствующее уровню 0,05, обозначим как  $t_{1,0,05}$ . Итак, задача сводится к определению  $t_{1,0,05}$  из (10) с подстановкой  $0,05(\Delta T_{\text{П. max}} - \Delta T_{\text{П. min}}) + \Delta T_{\text{П. min}}$  вместо  $\Delta T_{\text{П.}}$ . Решив три алгебраических уравнения для трех типов печатных плат, получим результаты, приведенные в табл. 4.

В табл. 4  $H_{\text{Э}}$  – эквивалентная толщина пакета печатной платы. Как видно из [6], слои материалов в пакете печатной платы могут иметь разные теплофизические свойства. Эквивалентная толщина пакета – величина, приведенная к единому коэффициенту теплопроводности. Предположим, что  $i$ -й слой изоляционного материала толщиной  $h_i$  имеет коэффициент теплопроводности  $\lambda_i$ . Этот слой будет иметь тепловое сопротивление, такое же как некоторый эквивалентный слой с толщиной  $h_{i,\text{Э}}$  и коэффициентом теплопроводности  $\lambda_{i,\text{Э}}$ , если выполняется условие

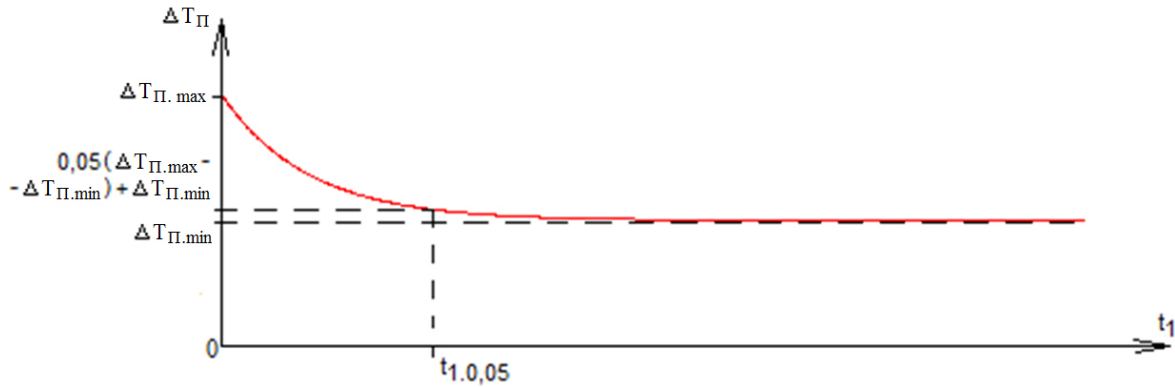


Рис. 8. Определение  $t_{1,0,05}$   
 Fig. 8. Definition  $t_{1,0,05}$

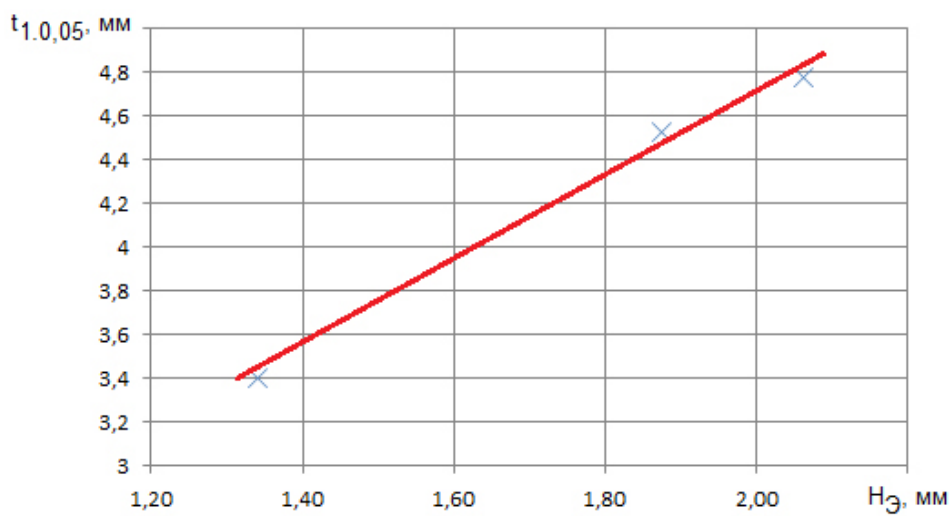


Рис. 9. Зависимость  $t_{1,0,05}$  от  $H_Э$   
 Fig. 9. Dependence of  $t_{1,0,05}$  on  $H_Э$

$$h_{i,Э} = \frac{\lambda_{i,Э}}{\lambda_i} h_i. \quad (11)$$

Тогда эквивалентную толщину пакета можно найти по формуле

$$H_Э = \sum_{i=1}^n h_{i,Э}, \quad (12)$$

где  $n$  – общее количество слоев в пакете. В табл. 3 значения приведены к  $\lambda_{i,Э} = 0,3 \text{ Вм}/(\text{м} \cdot \text{К})$ .

Подход, связанный с заменой фактической толщины на эквивалентную, позволит отойти от привязки к конкретным схемам расположения слоев, но вносит некоторые погрешности в вычисления. Это связано с тем, что граница раздела сред не является изотермической. График зависимости  $t_{1,0,05}$  от  $H_Э$  представлен на рис. 9. Зависимость аппроксимирована прямой. Из рис. 9 видно, что с ростом толщины пакета увеличивается  $t_{1,0,05}$ . Это вполне логично. С увеличением толщины изоляционных слоев увеличивается ширина растекания

Таблица 4. Значения  $t_{1,0,05}$  и  $H_Э$   
 Table 4. Values of  $t_{1,0,05}$  and  $H_Э$

Тип	2	4	3
$H_Э$ , мм	1,340	1,876	2,062
$t_{1,0,05}$ , мм	3,397	4,527	4,777

тепловых потоков вокруг ПП. Из-за этого на более «толстых» платах взаимодействие между ПП может наблюдаться на большем расстоянии. Полученный график (рис. 9) может помочь на практике оценить влияние соседних ПП при проектировании платы.

## Заключение

В целом проводящий рисунок платы весьма сложен. Между собой могут взаимодействовать и ПП, расположенные на разных слоях и идущие под углом относительно друг друга. Автор настоящей работы планирует провести расчеты и для других вариантов расположения ПП.



## 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. Муравьев Ю. Особенности проектирования и производства печатных плат на металлическом основании // Производство электроники: Технология, оборудования, материалы. 2010. № 2. С. 35–38.
6. Костин А.В. Уточнение методики выбора ширины печатных проводников печатных плат на металлическом основании, работающих в условии отсутствия конвекции // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2021. Т. 24, № 3. С. 80–91. DOI: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2021.24.3.80-91>
7. Костин А.В. Анализ нагрева печатных проводников печатных плат на металлическом основании для приборов космических аппаратов при импульсном токе // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2022. Т. 25, № 4. С. 59–66. DOI: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2022.25.4.59-66>
8. 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. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48407802>
9. Машиностроение. Энциклопедия. Цветные металлы и сплавы. Композиционные металлические материалы. Т. II-3 / под общ. ред. И.Н. Фридляндера. М.: Машиностроение, 2001. 880 с.
10. Дульнев Г.Н., Семяшкин Э.М. Теплообмен в радиоэлектронных аппаратах. Л.: Энергия, 1968. 360 с.

## 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)

## Physics of Wave Processes and Radio Systems

2023, vol. 26, no. 4, pp. 38–47

DOI [10.18469/1810-3189.2023.26.4.38-47](https://doi.org/10.18469/1810-3189.2023.26.4.38-47)

UDC 621.396+658.5

Original Research

Received 8 June 2023

Accepted 10 July 2023

Published 29 December 2023

# Analysis of the thermal effect of two external parallel printed circuit board conductors set on a metal base and operating in a space vacuum on each other

*Aleksey V. Kostin*

Samara National Research University

34, Moskovskoye shosse,

Samara, 443086, Russia

**Abstract – Background.** The need to analyze the thermal effect of two external parallel conductors is due to an increase in the density of the conductive pattern. For printed circuit boards set on a metal base and operating in the vacuum of space, this need is aggravated by the weakness of the issue's development. **Aim.** Analysis of the mutual influence of two external parallel printed circuit board conductors set on a metal base and operating in a space vacuum on each other to identify the dependence of their temperature on the distance between them and determine the distance at which this dependence practically disappears. **Methods.** To achieve the purpose, a finite element method calculation implemented in the ANSYS program, the Steady-State Thermal module, was used. Three multilayer printed circuit boards were calculated: 4-layer, 6-layer, 8-layer. The temperature coefficient of resistance was taken into account separately, by recalculation. **Results.** Graphs of the dependence of overheating (the difference between the temperature of the printed conductor and the metal base) on the distance between the printed conductors were constructed. The approximation of the obtained results is carried out. According to the approximated dependencies, the minimum values of the distances between printed conductors are found, at which the cross influence of printed conductors practically disappears. As the thickness of the printed circuit board increases, this distance increases. **Conclusion.** The results obtained can help to assess the influence of neighboring printed conductors in the design of the boards of the onboard equipment of spacecraft.

**Keywords** – thermal effect; external parallel printed circuit board conductors; metal base; space vacuum; numerical method; approximation.

## References

1. Printed circuit boards. Basic design parameters. GOST R 53429-2009. Moscow: Standartinform, 2018. (In Russ.)
2. Printed circuit boards. Design requirements. Instructions. RD 50-708-91. Moscow: Izd-vo standartov, 1992. (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. Yu. Murav'ev, "Features of the design and production of printed circuit boards on a metal base," *Proizvodstvo elektroniki: Tekhnologiya, oborudovaniya, materialy*, no. 2, pp. 35–38, 2010. (In Russ.)
6. A. V. Kostin, "Refinement of the method for selecting the width of the conductor of printed circuit boards on a metal base, working in the absence of convection," *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, vol. 24, no. 3, pp. 80–91, 2021, doi: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2021.24.3.80-91>. (In Russ.)
7. A. V. Kostin, "Analysis of heating of printed circuit board conductors on a metal base for spacecraft devices at pulsed current," *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, vol. 25, no. 4, pp. 59–66, 2022, doi: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2022.25.4.59-66>. (In Russ.)
8. A. V. Kostin, "Analysis of the influence of radiation on the temperature of printed conductors of printed circuit boards on a metal base for spacecraft instruments," *Proektirovanie i tekhnologiya elektronnykh sredstv*, no. 4, pp. 3–9, 2021, url: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48407802>. (In Russ.)
9. I. N. Friedlander, Ed. *Mechanical engineering. Encyclopedia. Non-ferrous metals and alloys. Composite metal materials*, vol. II-3. Moscow: Mashinostroenie, 2001. (In Russ.)
10. G. N. Dul'nev and E. M. Semyashkin, *Heat Transfer in Radio-Electronic Devices*. Leningrad: Energiya, 1968. (In Russ.)

## Information about the Author

**Kostin Aleksey Vladimirovitch**, 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)

## РЕКЛАМА

**Неганов, В.А.**

**Теория и применение устройств СВЧ: учебн. пособие для вузов / В.А. Неганов, Г.П. Яровой; под ред. В.А. Неганова.** – М.: Радио и связь, 2006. – 720 с.

В.А. Неганов, Г.П. Яровой

**ТЕОРИЯ И ПРИМЕНЕНИЕ  
УСТРОЙСТВ СВЧ**



ISBN 5-256-01812-4

УДК 621.396.67

ББК 32.840

Н 41

В учебном пособии рассматриваются методы проектирования и конструктивной реализации устройств СВЧ: линий передачи различных видов, резонаторов, согласующих и трансформирующих устройств, фильтров, фазовращателей, аттенюаторов, тройниковых соединений, направленных ответвителей, различных мостовых соединений, ферритовых устройств (вентилей, циркуляторов, фазовращателей) и СВЧ-устройств на полупроводниковых диодах (умножителей, смесителей, переключателей, выключателей). Приводятся примеры применения устройств СВЧ в радиосвязи, радиолокации, измерительной аппаратуре и т. д. В книгу вошел оригинальный материал, полученный авторами. Учебное пособие может использоваться как справочник по устройствам СВЧ.

Для специалистов в области теории и техники СВЧ, преподавателей вузов, докторантов, аспирантов, студентов старших курсов радиотехнического и радиофизического профиля.