

АНАЛИЗ ТЕПЛОВОГО ВЛИЯНИЯ ДВУХ ВНУТРЕННИХ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ПЕЧАТНЫХ ПРОВОДНИКОВ ПЛАТЫ, УСТАНОВЛЕННЫХ НА МЕТАЛЛИЧЕСКОЕ ОСНОВАНИЕ И РАСПОЛОЖЕННЫХ В ОДНОМ СЛОЕ

А. В. Костин¹, Д. С. Богданов², И. С. Бобров³

^{1,2,3} Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева, Самара, Россия
¹ electrodynamics27@yandex.ru, ² kipres@ssau.ru, ³ bobrov@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Приводится анализ теплового влияния двух внутренних параллельных печатных проводников платы, расположенных в одном слое, которые установлены на металлическое основание (друг на друга) и работают в условиях космического вакуума. Целью работы являлось проведение анализа взаимного влияния двух внутренних параллельных печатных проводников, расположенных на одном слое, 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. *Материалы и метод.* Рассмотрены результаты расчетов температуры печатных проводников при различных расстояниях между ними для разных печатных плат. Все расчеты выполнены численным методом, реализованным в программе ANSYS 2021 R1, модуль Steady-State Thermal. Даются результаты аппроксимации полученных данных. Приводятся расстояния между печатными проводниками, при которых их взаимное влияние практически полностью исчезает. *Вывод.* Проводящий рисунок платы весьма сложен. Между собой могут взаимодействовать и печатные проводники, расположенные на разных слоях и идущие под углом относительно друг друга. Произведено моделирование теплового процесса, произведен теоретический расчет и построены графики, которые помогут при практическом проектировании печатной платы.

Ключевые слова: печатный проводник, печатная плата, аппроксимация, тепловой процесс, металлическое основание

Для цитирования: 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. doi: 10.21685/2307-4205-2023-3-11

ANALYSIS OF THE THERMAL EFFECT OF TWO INTERNAL PARALLEL PRINTED CIRCUIT BOARD CONDUCTORS MOUNTED ON A METAL BASE AND LOCATED IN ONE LAYER

A.V. Kostin¹, D.S. Bogdanov², I.S. Bobrov³

^{1,2,3} Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev, Samara, Russia
¹ electrodynamics27@yandex.ru, ² kipres@ssau.ru, ³ bobrov@yandex.ru

Abstract. *Background.* An analysis is made of the thermal effect of two internal parallel printed circuit board conductors located in one layer, which are installed on a metal base (on top of each other) and operate in space vacuum conditions. The purpose of the work was to analyze the mutual influence of two internal parallel PCBs located on the same layer, boards installed on a metal base and operating in space vacuum conditions, on each other, in order to identify the dependence of their temperature on the distance between them and determine the distance at which this dependency almost disappears. *Materials and method.* The results of calculating the temperature of printed conductors at different distances between them for different printed circuit boards are considered. All calculations were performed numerically, implemented in the ANSYS 2021 R1 program, Steady-State Thermal module. The results of approximation of the obtained data are given. The distances between the printed conductors are given, at which their mutual influence almost completely disappears. *Conclusions.* The conductive pattern of the board is quite complex. PPs located on different layers and running at an angle relative to each other can also interact with each other. The simulation of the thermal process has been carried out, the theoretical calculation and the construction of graphs have been made, which will help in the practical design of the printed circuit board.

Keywords: printed conductor, printed circuit board, approximation, thermal process, metal base

For citation: Kostin A.V., Bogdanov D.S., Bobrov I.S. Analysis of the thermal effect of two internal parallel printed circuit board conductors mounted on a metal base and located in one layer. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2023;(3):90–99. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2023-3-11

Введение

В космическом приборостроении получили широкое распространение печатные платы на металлическом основании. Такие платы чаще всего работают в условиях отсутствия конвекции. Одной из задач, решаемых в процессе проектирования печатных плат, является выбор ширины печатных проводников (ПП), которая в основном определяется током, протекающим через него. Отечественная и зарубежная нормативно-технические документации дают указания по выбору ширины ПП, но не для плат на металлическом основании¹. В некоторых публикациях приводятся формулы для расчета ПП печатных плат на металлическом основании, но работающих в условиях естественной конвекции [1]. Автором настоящей работы в статье [2] 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.

Проводятся работы по анализу взаимного теплового влияния ПП друг на друга для плат, установленных на металлическом основании, работающих в условиях космического вакуума. Второй из озвученных работ является изучение взаимного влияния двух внутренних параллельных ПП, расположенных на одном слое, описанию результатов которой посвящена настоящая статья.

Методика и результаты расчетов

Проводится анализ взаимного влияния двух внутренних параллельных ПП, расположенных на одном слое 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 на разных слоях восьмислойной печатной платы;
- проведена аппроксимация результатов расчета;
- определено расстояние между ПП, при котором взаимное влияние практически исчезает.

В работе [2] 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 2021 R1, модуль Steady-State Thermal.

Расчету подвергалась 8-слойная печатная плата. Слои со 2 по 7 – внутренние слои. Схемы расположения слоев соответствуют [2]. 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 ($h_{\text{П}}$) выбрано равным 35 мкм. Величина удельного электрического сопротивления ПП (ρ) принята равной $1,72 \cdot 10^{-8}$ Ом·м, что соответствует медной фольге². Коэффициенты теплопроводности материалов приняты равными, такими же, как и в работе [2]. Значение плотности мощности, рассеиваемой ПП под действием тока, было выбрано равным $3,51 \cdot 10^8$ Вт/м³, 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 ниже 10 °С только на слое 2). 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

¹ ГОСТ Р 53429–2009. Платы печатные. Основные параметры конструкции ; РД 50-708-91. Печатные платы. Требования к конструкции ; IPC-2221A. Generic Standard on Printed Board Design ; IPC-2152. Standard for Determining Current-Carrying Capacity in Printed Board Design.

² РД 50-708-91. Печатные платы. Требования к конструкции.

температуре основания температура будет численно равна перегреву (разнице между температурами ПП и основания).

На рис. 1, 2 показаны температурные поля, создаваемые ПП, расположенными на слое 3 и 6 соответственно. В обоих случаях t_1 составляет 1 мм. По обоим ПП течет ток. Это видно из рисунков. Температура в зоне обоих ПП самая высокая. Из рисунков видно, что чем ближе ПП к основанию, тем ниже температура внешней поверхности платы над ними. Температурные поля ПП явно взаимодействуют друг с другом. Результаты расчетов в виде перегрева ПП приведены в табл. 1. Под активными понимаются те ПП, по которым течет ток. Моделирование проводилось в двух режимах. В первом режиме первый ПП (тот, что слева) был выключен (пассивный). Ток по нему не протекал. Во втором режиме первый ПП был включен (активный). Ток по нему протекал. По второму ПП (тот, что справа) ток протекал всегда. Количество активных ПП в первом режиме равно единице, только второй. Количество активных ПП во втором режиме равно двум.

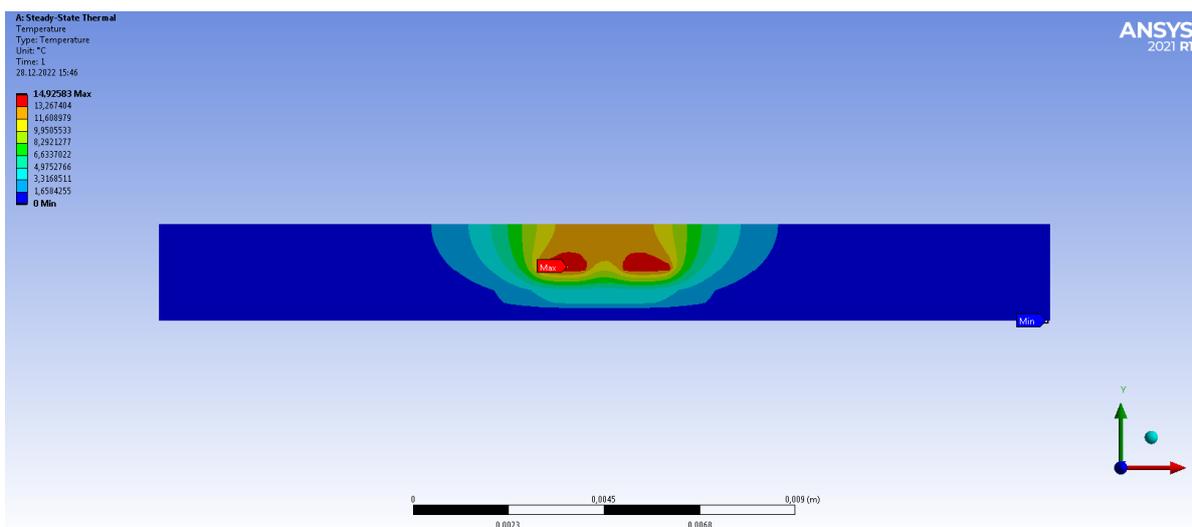


Рис. 1. Температурное поле, создаваемое ПП, расположенными на третьем слое, $t_1 = 1$ мм

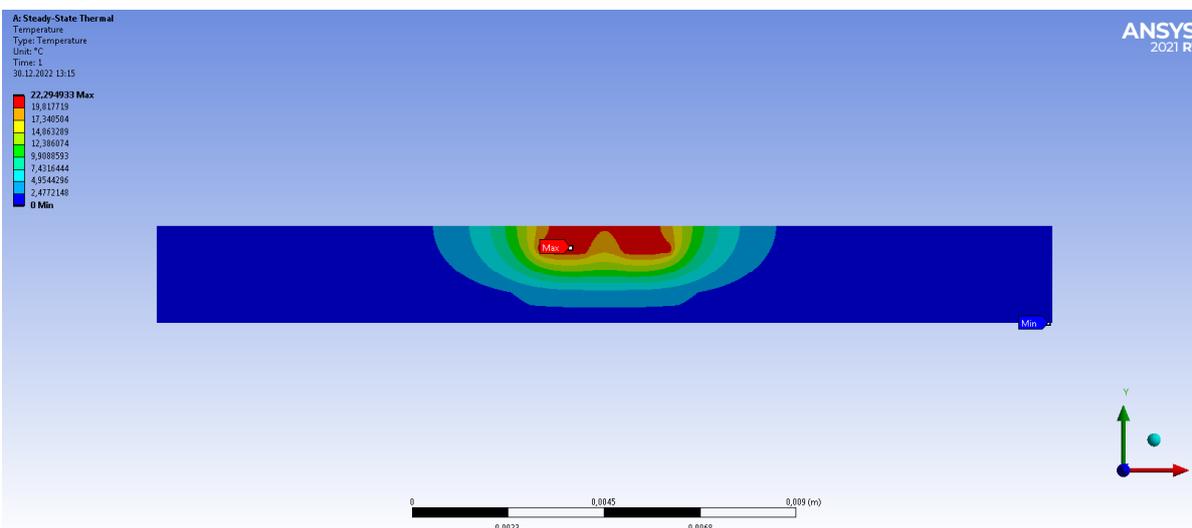


Рис. 2. Температурное поле, создаваемое ПП, расположенными на шестом слое, $t_1 = 1$ мм

Использованный расчетный модуль не позволяет учесть температурный коэффициент сопротивления (ТКС) материала ПП. В табл. 1 приведен перегрев без учета ТКС. Он был учтен путем пересчета. 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 [3]. При расчете в ANSYS эта особенность тоже была использована, излучение не моделировалось. Для одиночного ПП можно записать выражение для перегрева с учетом ТКС

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

где R_T – тепловое сопротивление между поверхностью ПП и основанием; α – 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).

Как было показано в работе [2], поверхность ПП можно считать изотермической, так как она имеет примерно одинаковую температуру в любых точках. Если R_0 рассчитано при 20 °С (T_p), то и перегрев должен быть рассчитан относительно этой температуры. Другими словами, температура основания должна быть равна 20 °С ($T_0 = T_p$). В противном случае в формуле (1) ТКС нужно умножить не на перегрев, а на сумму $\Delta T_{\Pi} + (T_0 - T_p)$. Для простоты вычислений было принято $T_0 = T_p$. В инструкции РД60-708-91 не указано, для какой температуры приведено значение ρ . Но значение удельного электрического сопротивления соответствует значению, приведенному в работе [4] для катодной переплавленной меди марки М1 ($1,724 \cdot 10^8$ Ом·м) при температуре 20 °С. α принят равным 0,0043 1/К согласно [4].

Таблица 1

Результаты расчетов перегрева без учета ТКС, °С

Слой 2											
Кол-во активных ПП (номер режима)	Номер ПП	t_1 , мм									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	1,146	0,474	0,204	0,090	0,040	0,018	0,008	0,004	0,002	0
	2	8,561	8,542	8,590	8,569	8,584	8,549	8,588	8,586	8,579	8,563
2	1	9,689	8,994	8,780	8,696	8,617	8,573	8,570	8,576	8,581	8,579
	2	9,694	9,011	8,792	8,659	8,624	8,567	8,596	8,589	8,580	8,564
Слой 3											
Кол-во активных ПП (номер режима)	Номер ПП	t_1 , мм									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	2,340	1,023	0,457	0,205	0,092	0,041	0,019	0,008	0,004	0,002
	2	12,606	12,669	12,723	12,684	12,662	12,694	12,705	12,702	12,691	12,651
2	1	14,901	13,713	13,127	12,884	12,761	12,760	12,713	12,688	12,673	12,681
	2	14,926	13,684	13,177	12,887	12,754	12,735	12,724	12,710	12,694	12,652
Слой 4											
Кол-во активных ПП (номер режима)	Номер ПП	t_1 , мм									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	2,705	1,186	0,533	0,240	0,107	0,051	0,018	0,006	0,003	0,001
	2	13,448	13,601	13,653	13,603	13,545	13,603	13,61	13,675	13,669	13,611
2	1	16,134	14,713	14,132	13,831	13,72	13,678	13,663	13,629	13,61	13,654
	2	16,130	14,777	14,181	13,84	13,652	13,651	13,631	13,685	13,674	13,613
Слой 5											
Кол-во активных ПП (номер режима)	Номер ПП	t_1 , мм									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	3,986	1,759	0,791	0,357	0,159	0,072	0,032	0,014	0,006	0,003
	2	16,790	16,878	16,951	16,965	17,001	16,984	16,963	16,964	17,017	17,008
2	1	20,653	18,629	17,710	17,300	17,156	17,026	17,033	17,026	16,996	16,984
	2	20,748	18,624	17,736	17,319	17,158	17,055	16,995	16,978	17,024	16,974

Слой 6											
Кол-во активных ПП (номер режима)	Номер ПП	$t_1, \text{ мм}$									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	4,409	1,938	0,866	0,386	0,173	0,078	0,035	0,016	0,007	0,003
	2	17,916	18,185	18,133	18,220	18,193	18,208	18,215	18,215	18,136	18,210
2	1	22,283	20,072	19,053	18,541	18,335	18,302	18,220	18,214	18,202	18,229
	2	22,295	20,109	18,993	18,604	18,365	18,286	18,249	18,230	18,143	18,213
Слой 7											
Кол-во активных ПП (номер режима)	Номер ПП	$t_1, \text{ мм}$									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	5,361	2,325	1,026	0,458	0,205	0,092	0,041	0,019	0,008	0,004
	2	22,417	22,654	22,726	22,715	22,746	22,748	22,680	22,703	22,732	22,708
2	1	27,726	24,88	23,742	23,178	22,925	22,775	22,712	22,729	22,788	22,770
	2	27,745	24,963	23,746	23,169	22,95	22,839	22,721	22,722	22,740	22,712

Перегрев без учета ТКС можно записать в виде

$$\Delta T_{\Pi}' = R_{\Gamma} I^2 R_0. \tag{2}$$

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

$$\Delta T_{\Pi} = \frac{\Delta T_{\Pi}'}{1 - \alpha \Delta T_{\Pi}'}. \tag{3}$$

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

Для вывода формулы аналогичной (3) для двух ПП воспользуемся принципом суперпозиции температурных полей [5]

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

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

$$\begin{cases} \Delta T_{\Pi 1} = F_{21} P + F_{11} P, \\ \Delta T_{\Pi 2} = F_{12} P + F_{22} P, \end{cases} \tag{5}$$

где $\Delta T_{\Pi 1}$ – температура левого ПП; $\Delta T_{\Pi 2}$ – 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 $(1 + \alpha \Delta T_{\Pi})$ раз. Тогда выражение (5) можно записать в виде

$$\begin{cases} \Delta T_{\Pi 1} = F_{21} (1 + \alpha \Delta T_{\Pi 2}) P' + F_{11} (1 + \alpha \Delta T_{\Pi 1}) P', \\ \Delta T_{\Pi 2} = F_{12} (1 + \alpha \Delta T_{\Pi 1}) P' + F_{22} (1 + \alpha \Delta T_{\Pi 2}) P', \end{cases} \tag{6}$$

где P' – мощность без учета ТКС.

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

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

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

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 работе [4], только вместо экспериментальных данных будем использовать данные расчета. Итак, тепловые коэффициенты найдем по формулам

$$F_{22} = \frac{\Delta T_{\text{П2}}^{(2)}}{P'}; F_{12} = \frac{\Delta T'_{\text{П2}}}{P'} - F_{22}; F_{21} = \frac{\Delta T_{\text{П1}}^{(2)}}{P'}; F_{11} = \frac{\Delta T'_{\text{П1}}}{P'} - F_{21}, \tag{9}$$

где $\Delta T_{\text{П2}}^{(2)}$ – перегрев правого ПП при активном только правом ПП, без учета ТКС (режим 1, ПП № 2 табл. 1); $\Delta T'_{\text{П2}}$ – перегрев правого ПП при обоих активных ПП, без учета ТКС (режим 2, ПП № 2 табл. 1); $\Delta T_{\text{П1}}^{(2)}$ – перегрев левого ПП при активном только правом ПП, без учета ТКС (режим 1, ПП № 1 табл. 1); $\Delta T'_{\text{П1}}$ – перегрев левого ПП при обоих активных ПП, без учета ТКС (режим 2, ПП № 1 табл. 1).

Результаты расчета по формулам (7) и (8) с учетом (9) приведены в табл. 2. На рис. 3–5 приведены точки, соответствующие значениям перегревов, приведенным в табл. 2 для слоев 2, 4, 7, и графики зависимостей перегрева от расстояния между ПП для тех же слоев. Графики приведены не все, чтобы не загромождать настоящую публикацию. Графики получены путем аппроксимации методом наименьших квадратов. Если рассматривать данные, приведенные в табл. 2, то видно, что перегрев правого и левого ПП практически не отличается. Это вполне логично, ведь они одинаковые. Для построения и аппроксимации взяты значения перегревов для первого ПП.

Таблица 2

Результаты расчетов перегрева с учетом ТКС, °С

Слой 2										
Номер ПП	$t_1, \text{ мм}$									
	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	$t_1, \text{ мм}$									
	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	$t_1, \text{ мм}$									
	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	$t_1, \text{ мм}$									
	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	$t_1, \text{ мм}$									
	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	

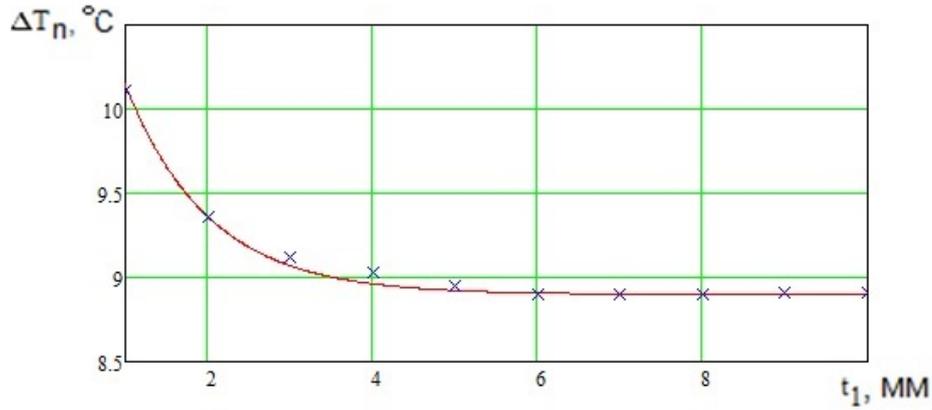


Рис. 3. Зависимость перегрева ПП слоя 2 от t_1

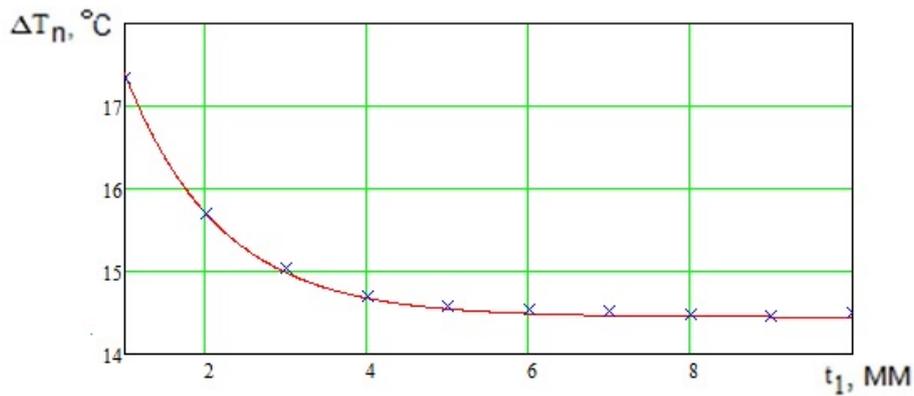


Рис. 4. Зависимость перегрева ПП слоя 4 от t_1

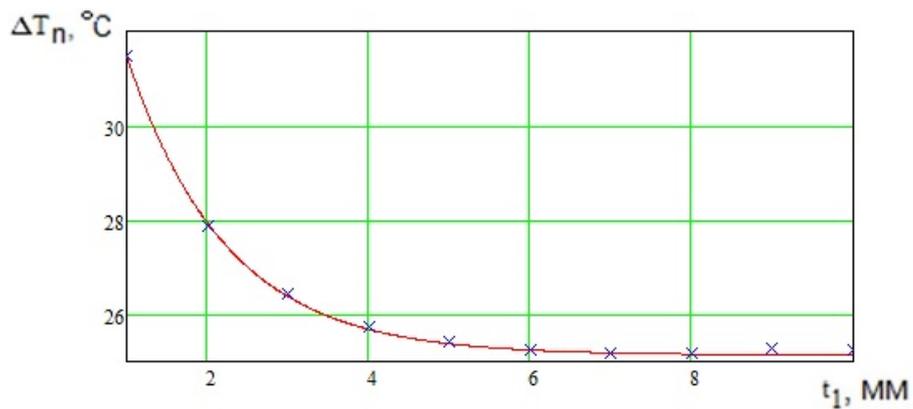


Рис. 5. Зависимость перегрева ПП слоя 7 от t_1

Функция, которой были аппроксимированы результаты, имеет вид

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

В формуле (10) используются разности температур и коэффициент a , значения которых приведены в табл. 3. Смысл выражения понятен из рис. 6.

Таблица 3

Значения разностей температур и коэффициента a

Слой	$\Delta T_{\min}, ^\circ\text{C}$	$\Delta T_{\max}, ^\circ\text{C}$	$a, 1/\text{м}$
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

Как видно их графиков на рис. 3–5, при увеличении расстояния между ПП взаимное влияние их друг на друга уменьшается. При определенных значениях t_1 ПП практически перестают воздействовать друг на друга. Экспонента асимптотически приближается к температуре, соответствующей температуре одиночного ПП.

Определим t_1 , при котором взаимодействие ПП практически прекращается. Критерием прекращения взаимодействия будет являться снижение перегрева до уровня $0,05(\Delta T_{\max} - \Delta T_{\min}) + \Delta T_{\min}$. Графически это проиллюстрировано на рис. 6. 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 $0,05(\Delta T_{\max} - \Delta T_{\min}) + \Delta T_{\min}$ вместо $\Delta T_{\text{п}}$. Решив шесть алгебраических уравнений для шести слоев, получим результаты, приведенные в табл. 3 [6].

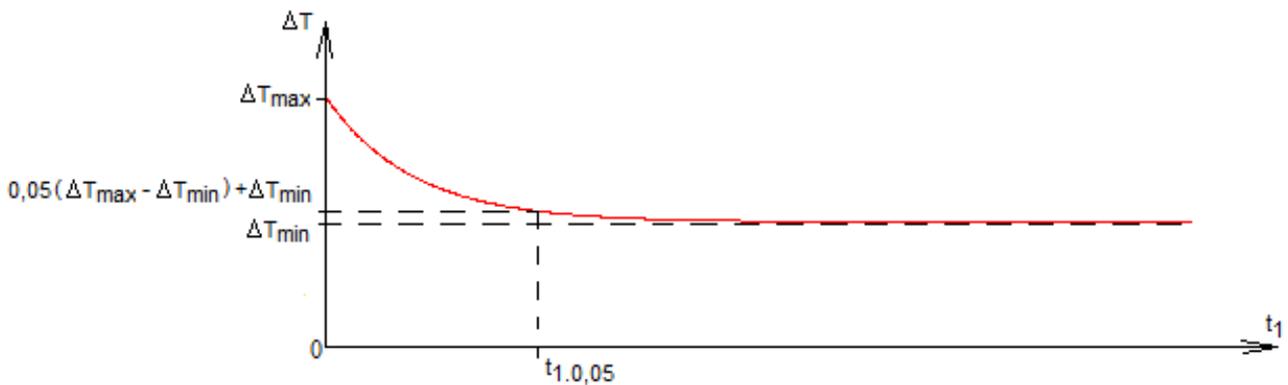


Рис. 6. Определение $t_{1,0,05}$

Таблица 3

Значения $t_{1,0,05}$ и $H_{\text{Э}}$

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

В табл. 3 $H_{\text{Э}}$ – эквивалентная толщина пакета печатной платы. Как видно из работы [2], 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 λ_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

$$h_{i,\text{Э}} = \frac{\lambda_{i,\text{Э}}}{\lambda_i} h_i. \tag{11}$$

Тогда эквивалентную толщину пакета можно найти по формуле

$$H_{\text{Э}} = \sum_{i=1}^n h_{i,\text{Э}}, \tag{12}$$

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

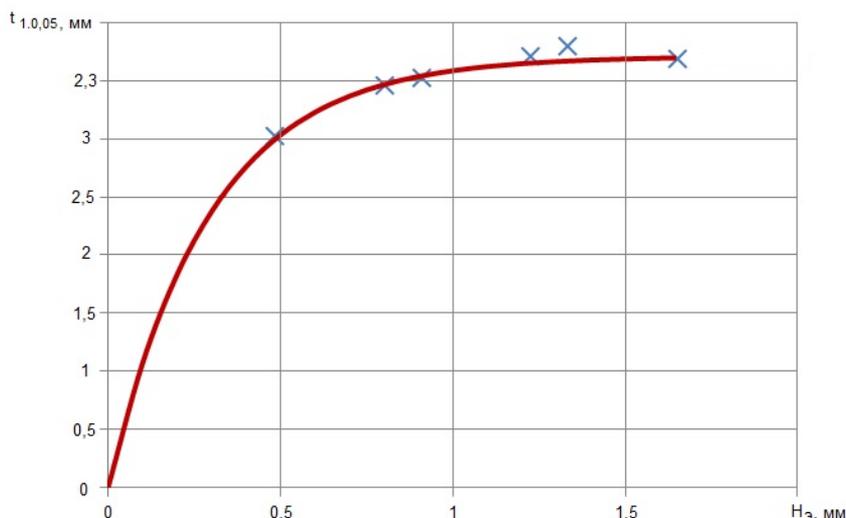


Рис. 7. Зависимость $t_{1,0,05}$ от $H_{Э}$

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. 7. Зависимость аппроксимирована следующим выражением:

$$t_{1,0,05} = 3,710 \cdot (1 - e^{-3,409 \cdot H_{Э}}). \quad (13)$$

В формуле (13) все размеры в мм.

Из рисунка видно, что с ростом $H_{Э}$ увеличивается $t_{1,0,05}$, несмотря на то, что общая толщина печатной платы остается неизменной. Это можно объяснить тем, что наибольший вклад в отвод тепла вносят слои между ПП и основанием. Там меньше тепловое сопротивление. При полном соприкосновении ПП с основанием $H_{Э} = 0$ (предельный случай, которого на практике быть не может) перегревы будут равны нулю при любом t_1 , даже если $t_1 = 0$. Таким образом, при $H_{Э} = 0$ и $t_{1,0,05}$ будет равно нулю. Поэтому график начинается из нуля. Следует отметить, что график, представленный на рис. 7, не справедлив для внешнего ПП. С увеличением $H_{Э}$ до значения равного полной эквивалентной толщины существенно изменится $t_{1,0,05}$. Это связано с тем, что слои над ПП хоть и в меньшей степени, но влияют на перегрев. Поэтому область определения графика лежит в интервале от 0 до 1,652 мм. Полученный график (рис. 7) может помочь на практике оценить влияние соседних ПП при проектировании платы [7].

Заключение

Проводящий рисунок платы весьма сложен. Между собой могут взаимодействовать и ПП, расположенные на разных слоях и идущие под углом относительно друг друга. Произведено моделирование теплового процесса, произведен теоретический расчет и построены графики, которые помогут при практическом проектировании печатной платы.

Список литературы

1. Муравьев Ю. Особенности проектирования и производства печатных плат на металлическом основании // Производство электроники: Технология, оборудования, материалы. 2010. № 2. С. 35–38.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. Дутьнев Г. Н., Семяшкин Э. М. Теплообмен в радиоэлектронных аппаратах. Л. : Энергия, 1968. 360 с.

6. Данилова Е. А., Кочегаров И. И., Трусов В. А. Модели технологических дефектов проводящего рисунка печатных плат // Надежность и качество сложных систем. 2017. № 2. С. 68–76. doi: 10.21685/2307-4205-2017-2-10
7. Гриднев В. Н., Миронова Ж. А., Шахнов В. А. Обеспечение качества компоновки монтажных контактных площадок высокоплотной ктационной платы // Надежность и качество сложных систем. 2014. № 4. С. 19–25.

References

1. Murav'ev Yu. Features of design and production of printed circuit boards on a metal base. *Proizvodstvo elektroniki: Tekhnologiya, oborudovaniya, materialy = Production of electronics: Technology, equipment, materials*. 2010;(2): 35–38. (In Russ.)
2. Kostin A.V. Clarification of the methodology for choosing the width of printed circuit board conductors on a metal base operating in the absence of convection. *Fizika volnovykh protsessov i radiotekhnicheskie sistemy = Physics of wave processes and radio engineering systems*. 2021;24(3):80–91. (In Russ.)
3. Kostin A.V. Analysis of the effect of radiation on the temperature of printed circuit board conductors on a metal base for spacecraft instruments. *Proektirovanie i tekhnologiya elektronnykh sredstv = Design and technology of electronic means*. 2021;(4):3–9. (In Russ.)
4. Fridlyander I.N., Senatorova O.G., Osintsev O.E. et al. *Mashinostroenie. Entsiklopediya. Tsvetnye metally i splavy. Kompozitsionnye metallicheskie materialy. T. II-3 = Mechanical engineering. Encyclopedia. Non-ferrous metals and alloys. Composite metal materials. Vol. II-3*. Moscow: Mashinostroenie, 2001:880. (In Russ.)
5. Dul'nev G.N., Semyashkin E.M. *Teploobmen v radioelektronnykh apparatakh = Heat transfer in radio-electronic devices*. Leningrad: Energiya, 1968:360. (In Russ.)
6. Danilova E.A., Kochegarov I.I., Trusov V.A. Models of technological defects in the conductive pattern of printed circuit boards. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2017;(2): 68–76. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2017-2-10
7. Gridnev V.N., Mironova Zh.A., Shakhnov V.A. Ensuring the quality of the layout of mounting contact pads of a high-density CT board. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2014;(4):19–25. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Алексей Владимирович Костин

кандидат технических наук,
старший преподаватель кафедры конструирования
и технологии электронных систем и устройств,
Самарский национальный исследовательский
университет имени академика С. П. Королева
(Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34)
E-mail: electrodynamics27@yandex.ru

Aleksey V. Kostin

Candidate of technical sciences,
senior lecturer of the sub-department of design
and technology of electronic systems and devices,
Samara National Research University
named after Academician S.P. Korolev
(34 Moskovskoe highway, Samara, Russia)

Дмитрий Сергеевич Богданов

аспирант,
Самарский национальный исследовательский
университет имени академика С. П. Королева
(Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34)
E-mail: kipres@ssau.ru

Dmitriy S. Bogdanov

Postgraduate student,
Samara National Research University
named after Academician S.P. Korolev
(34 Moskovskoe highway, Samara, Russia)

Игорь Сергеевич Бобров

аспирант,
Самарский национальный исследовательский
университет имени академика С. П. Королева
(Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34)
E-mail: bobrov@yandex.ru

Igor S. Bobrov

Postgraduate student,
Samara National Research University
named after Academician S.P. Korolev
(34 Moskovskoe highway, Samara, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 15.05.2023

Поступила после рецензирования / Revised 13.06.2023

Принята к публикации / Accepted 17.07.2023