

Методика расчёта ширины печатных проводников печатных плат на металлическом основании для приборов космических аппаратов при переменном токе

Костин А.В.

Самарский национальный исследовательский университет

имени академика С.П. Королева,

Московское шоссе, 34, Самара, 443086, Россия

e-mail: Kostin.AV@samspace.ru

Статья поступила 12.10.2020

Аннотация

В статье предлагается методика расчёта ширины проводников печатных плат на металлическом основании для бортовых приборов космических аппаратов в зависимости от протекающего переменного тока. Описывается математическая модель, использованная при разработке методики. Проводится анализ влияния сделанных допущений на результат.

Ключевые слова: методика расчёта, космический аппарат, бортовая радиоэлектронная аппаратура, печатная плата, ширина печатного проводника, переменный ток, частота, поверхностный эффект, температура.

Введение

При разработке космических аппаратов (КА) приходится решать задачу обеспечения теплового режима его функциональных узлов. Эту задачу решают

системы обеспечения теплового режима (СОТР). Они несколько различаются по своей структуре, в зависимости от размера КА и его функционального назначения. СОТР постоянно развиваются и совершенствуются. Вопросам их построения проектирования, моделирования посвящено немало публикаций таких как [1-5]. Одной из задач, решаемой СОТР является отведение тепла от бортовой радиоэлектронной аппаратуры (БРЭА). В процессе функционирования БРЭА выделяется тепло. Причём оно выделяется не только электронной компонентной базой, но и всеми токоведущими частями, в том числе и печатными проводниками (ПП) печатных плат. Перегрев проводника может привести к его разрушению и отказу БРЭА. Требуемая температура ПП обеспечивается, главным образом, выбором его ширины в процессе проектирования печатной платы.

В космическом приборостроении получили широкое распространение печатные платы на металлическом основании. Причём такие платы, чаще всего, работают в условиях отсутствия конвекции. Отечественная [6, 7] и зарубежная [8, 9] нормативно-техническая документация даёт указания по расчёту ширины ПП. В литературе, такой как [10-12] также имеются указания по расчёту ширины ПП. Но все эти указания не касаются печатных плат на металлическом основании. В публикациях имеется методика расчёта ширины ПП для печатных плат на металлическом основании [13-15]. Однако, они разработаны исключительно для постоянного тока. В [14, 15] описывается методика расчёта ширины ПП именно для РЭА работающей на борту космических аппаратов. Как известно, переменный ток распределён по проводнику неравномерно. Наблюдается поверхностный эффект –

вытеснение тока из внутренней части проводника. Известно, что при достаточно низких частотах поверхностный эффект практически не проявляется, тогда как на сверхвысоких частотах он проявляется весьма сильно. Активное электрическое сопротивление проводника на таких частотах может быть существенно выше. А значит и мощность рассеиваемая проводником будет выше. Это приведёт к увеличению разницы температур, что может привести к разрушению проводника.

Автором была проведена работа, целью которой являлась уточнение методики расчёта ширины ПП, для печатных плат на металлическом основании РЭА, работающей на борту космических аппаратов, в части касающейся протекания переменного тока.

Для достижения цели были решены следующие задачи:

- Проведён анализ зависимости активного сопротивления ПП от частоты и определены граничные частоты, до которых возможно применение методики изложенной в [15];
- На базе методики приведённой в [15] разработано уточнение позволяющее учесть поверхностный эффект на частотах выше граничных;
- Проведён анализ влияния принятых допущений на точность расчётов.

В процессе разработки методики рассмотрен фрагмент ПП представленный на рис. 1. ПП по форме близок к шине прямоугольного сечения. Как в любом проводнике так и за его пределами существует электромагнитное поле. Для проводника круглого сечения задача отыскания поля внутри проводника решается довольно легко, т. к. имеется чёткое разграничение на внутренние и внешние

составляющие поля. Для проводника прямоугольного сечения такой чёткой границе нет. Для определения поля внутри него необходимо знать поле за его пределами. Такая задача решается крайне сложно. Для проведения инженерных расчётов такой подход неприемлем. Если допустить, что ширина ПП t много больше его толщины h_{II} , то задача существенно упрощается. Чаще всего это условие выполняется, особенно для проводников с достаточно большим током, у которых и ширина большая. Допущение позволяет пренебречь зависимостью поля от координаты y (рис. 1). Тогда поле будет зависеть только от координаты z . Математическое выражение поля для шины прямоугольного сечения, для которого выполняется указанное выше допущение приведено в [16]. Электрическая составляющая этого поля будет иметь вид

$$\dot{E}_x(z) = \frac{i\rho p \cdot \operatorname{ch}(pz)}{2t \cdot \operatorname{sh}\left(p \frac{h_{II}}{2}\right)}; \quad (1)$$

где i – комплексная амплитуда переменного тока, ρ – удельное электрическое сопротивление ПП, $p = \sqrt{\frac{i \cdot 2\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \mu_0}{\rho}}$, i – мнимая единица, f – частота переменного тока, μ – магнитная проницаемость, μ_0 – магнитная постоянная.

Комплексное сопротивление шины длиной l можно найти по формуле [16]

$$\dot{Z} = \frac{l\rho p \cdot \operatorname{cth}\left(p \frac{h_{II}}{2}\right)}{2t}; \quad (2)$$

где l – длина проводника. Мощность будет рассеиваться на активном сопротивлении ПП, которое можно найти как вещественная часть от комплексного

$$R = \operatorname{Re}\{\dot{Z}\} = \frac{l\rho k}{\sqrt{2t}} \cdot \sqrt{\frac{A_1^2 + B_1^2}{A_2^2 + B_2^2}} \cdot \cos\left(ARG_1 - ARG_2 + \frac{\pi}{4} \right); \quad (3)$$

где

$$A_1 = \cos\left(\frac{k \cdot h_{II}}{2}\right) \operatorname{ch}\left(\frac{k \cdot h_{II}}{2}\right),$$

$$B_1 = \sin\left(\frac{k \cdot h_{II}}{2}\right) \operatorname{sh}\left(\frac{k \cdot h_{II}}{2}\right),$$

$$A_2 = \cos\left(\frac{k \cdot h_{II}}{2}\right) \operatorname{sh}\left(\frac{k \cdot h_{II}}{2}\right),$$

$$B_2 = \sin\left(\frac{k \cdot h_{II}}{2}\right) \operatorname{ch}\left(\frac{k \cdot h_{II}}{2}\right),$$

$$k = \sqrt{\frac{\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \mu_0}{\rho}},$$

$$ARG_1 = \begin{cases} \operatorname{arctg}\left(\frac{B_1}{A_1}\right), A_1 \geq 0 \\ \operatorname{arctg}\left(\frac{B_1}{A_1}\right) - \pi, A_1 < 0 \wedge B_1 < 0, \\ \operatorname{arctg}\left(\frac{B_1}{A_1}\right) + \pi, A_1 < 0 \wedge B_1 \geq 0 \end{cases}$$

$$ARG_2 = \begin{cases} \operatorname{arctg}\left(\frac{B_2}{A_2}\right), A_2 \geq 0 \\ \operatorname{arctg}\left(\frac{B_2}{A_2}\right) - \pi, A_2 < 0 \wedge B_2 < 0. \\ \operatorname{arctg}\left(\frac{B_2}{A_2}\right) + \pi, A_2 < 0 \wedge B_2 \geq 0 \end{cases}$$

Формула (3) весьма сложная. В определённых диапазонах частот можно провести ряд упрощений. Когда рассматривают поверхностный эффект, то говорят о толщине поверхностного слоя, которую можно определить по формуле

$$\Delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \mu_0}}. \quad (4)$$

Если $h_{\text{П}} \gg \Delta$, то поверхностный эффект считается ярко выраженным и сопротивление ПП можно будет найти по приближённой формуле

$$R = \rho \frac{l}{2\Delta \cdot t}. \quad (5)$$

Если $h_{\text{П}} \ll \Delta$, то поверхностным эффектом можно пренебречь, тогда сопротивление ПП можно будет найти по формуле для постоянного тока

$$R = \rho \frac{l}{t \cdot h_{\text{П}}}. \quad (6)$$

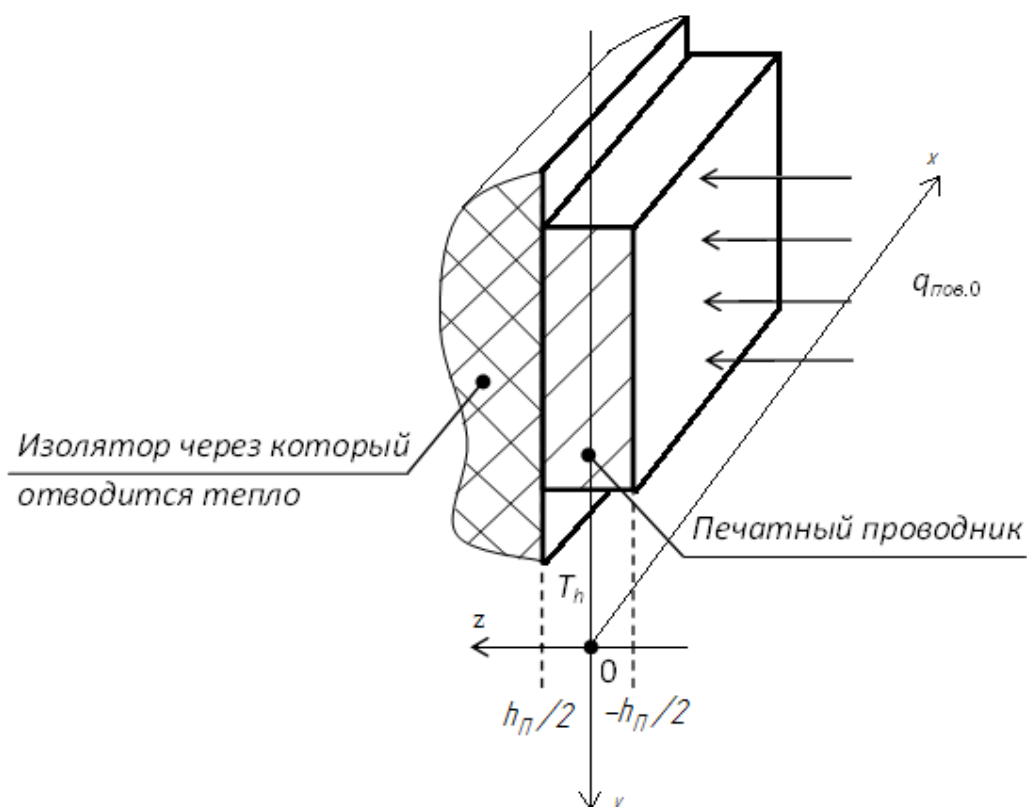


Рис. 1. Фрагмент ПП

Определим диапазоны частот, в которых применимы (5), (6). Чтобы одно число было много больше другого, как правило, они должны отличаться хотя-бы на

порядок. Расчёт будем вести для медного ПП. Считаем, что значение удельного электрического сопротивления медной фольги и гальванической меди одинаковое и равно $\rho=1,72 \cdot 10^{-8}$ Ом·м (значение для медной фольги [7]). Как сказано в [15] такое допущение не приводит к существенной ошибке. Магнитную проницаемость для медного ПП принимаем равной 1. Фактически она составляет 0,99999044 [17].

Формулы (5) и (6) неприменимы если выполняется условие

$$\frac{h_{\text{П}}}{10} < \Delta < 10h_{\text{П}}. \quad (7)$$

Решив неравенство (7) относительно частоты получим

$$\frac{\rho}{10\pi \cdot \mu \cdot \mu_0 h_{\text{П}}} < f < \frac{10\rho}{\pi \cdot \mu \cdot \mu_0 h_{\text{П}}}. \quad (8)$$

Таким образом в диапазоне частот ниже $f_{\text{min}} = \frac{\rho}{10\pi \cdot \mu \cdot \mu_0 h_{\text{П}}}$ применима формула (6), а

в диапазоне частот выше $f_{\text{max}} = \frac{10\rho}{\pi \cdot \mu \cdot \mu_0 h_{\text{П}}}$ применима формула (5). Таким образом,

методика изложенная в [15] применима в диапазоне частот ниже f_{min} . В таблице 1 представлены значения этих частот при разных значениях толщины печатного проводника. В диапазоне от f_{min} до f_{max} . Расчёт необходимо вести по формуле (3). Как видно из формулы (3), R прямо пропорционально l и обратно пропорционально t . Тогда целесообразно использовать приведённое значение сопротивления r , сопротивление одного метра ПП шириной 1 мм. Тогда сопротивление проводника можно будет найти по формуле

$$R = \frac{l}{t} r. \quad (9)$$

А само приведённое значение по формуле

$$r = \frac{t \cdot R}{l} = \frac{\rho k}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{\frac{A_1^2 + B_1^2}{A_2^2 + B_2^2}} \cdot \cos\left(ARG_1 - ARG_2 + \frac{\pi}{4} \right). \quad (10)$$

Построим график зависимости приведённого значения сопротивления от частоты при значениях $h_{П}$ представленных в таблице 1. Результат представлен на рис. 2. Диапазон частот выбран таким образом, чтобы f_{\min} и f_{\max} для всех толщин ПП попадали в него. При этом диапазон не должен быть чрезмерно широким.

Таблица 1 – значения f_{\min} и f_{\max} при разных значениях $h_{П}$

Частота	$h_{П}$, мкм						
	20	35	40	50	55	100	120
f_{\min} , кГц	1089,20	355,66	272,30	174,27	144,03	43,57	30,26
f_{\max} , МГц	108,92	35,57	27,23	17,43	14,40	4,36	3,03

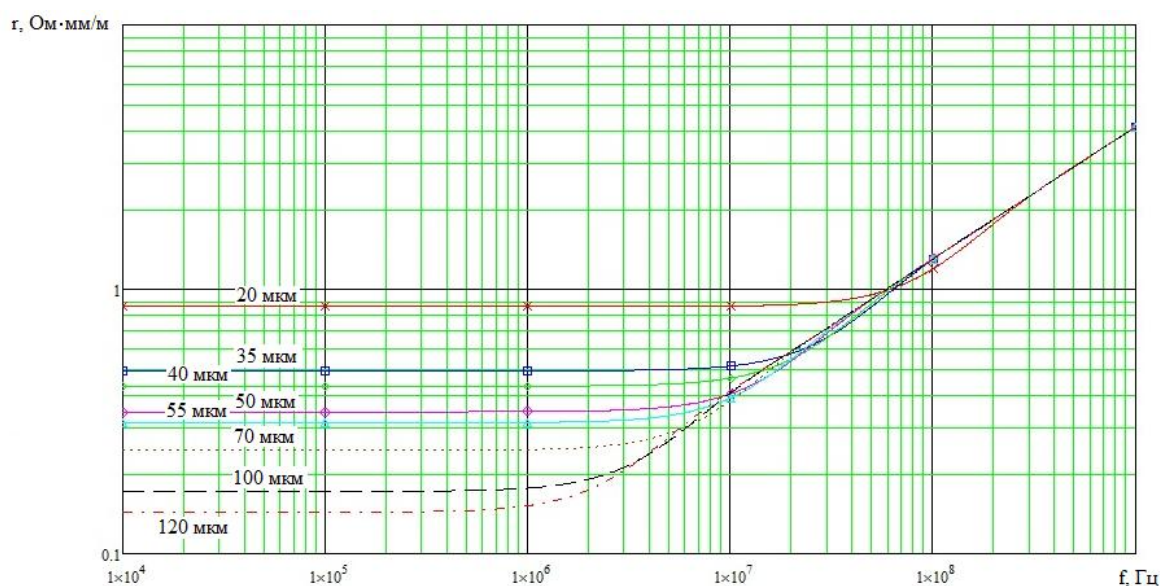


Рис. 2. Зависимость приведённого сопротивления от частоты

На рис. 2 приведены графики для следующих $h_{П}$: 20 мкм, 35 мкм, 40 мкм, 50 мкм, 55 мкм, 70 мкм и 100 мкм. При чём значения 20 мкм, 35 мкм, 50 мкм и 100 мкм приняты для медной фольги по аналогии с [7]. Остальные значения – проводники из той-же фольги, но покрытые слоем гальванической меди толщиной 20 мкм.

Согласно [15], тепловое сопротивление слоёв изоляционного материала определяется как геометрией их части, находящейся под ПП, так и теплофизическими свойствами самих материалов. При протекании тока ПП рассеивается мощность, которая определяется как произведение квадрата тока на активное электрическое сопротивление ПП. Эта мощность будет равна тепловому потоку. Тогда перегрев будет равен произведению теплового потока на тепловое сопротивление слоёв изоляционного материала

$$\Delta T_{II} = R_T P = \frac{I^2 R}{l \cdot t} \sum_{j=1}^n \frac{h_{IIj}}{\lambda_{IIj}}; \quad (11)$$

где h_{IIj} – толщина изоляционного материала j – ого слоя изоляционного материала, λ_{IIj} – коэффициент теплопроводности j – ого слоя изоляционного материала, n – количество слоёв изоляционного материала между ПП и металлическим основанием, I – действующее значение сила тока, текущего по ПП.

Выразив ширину ПП из полученной формы получаем зависимость для расчёта ширины ПП, при заданных значениях: перегрева, тока и толщины ПП (входит в формулы для расчёта r)

$$t = I \sqrt{\frac{r}{\Delta T_{II}} \sum_{j=1}^n \frac{h_{IIj}}{\lambda_{IIj}}}. \quad (12)$$

Очевидно, что чем дальше слой ПП от основания, тем выше его температура. Таким образом, температура в объёме ПП зависит от координат. Была проведена оценка справедливости первого допущения. Для определения распределения температур в объёме ПП было решено уравнение теплопроводности Фурье [18-20], которое для рассматриваемого случая будет иметь вид

$$-\lambda_{II} \frac{d^2 T_{II}(z)}{dz^2} = q_v(z); \quad (13)$$

где

$$q_v(z) = \frac{j^2(z)}{2} \cdot \rho = \frac{E^2(z)}{2\rho} = \frac{I^2 \rho}{4t^2} \left| \frac{p^2 \cdot \text{ch}^2(pz)}{\text{sh}^2\left(p \frac{h_{II}}{2}\right)} \right| = \frac{I^2 \rho \cdot k^2}{2t^2} \cdot \frac{\text{ch}(2kz) + \cos(2kz)}{\text{ch}(kh_{II}) - \cos(kh_{II})}. \quad (14)$$

При $z=h_{II}/2$ температура ПП будет равна сумме перегрева ПП и температуры основания. Обозначим эту величину как T_h . Имеем первое граничное условие. При $z=-h_{II}/2$ температура неизвестна, но известно, что тепловой поток равен нулю.

Имеем второе граничное условие

$$q_{нов0} = -\lambda_{II} \frac{dT_{II}(z)}{dz} \Big|_{z=-\frac{h_{II}}{2}} = 0. \quad (15)$$

Решение уравнения (13) с учётом (14) и граничных условий будет иметь вид

$$T_{II}(z) = -\frac{I^2 \rho \cdot k^2}{2t^2 \lambda_{II} (\text{ch}(kh_{II}) - \cos(kh_{II}))} \left(\frac{1}{4k^2} (\text{ch}(2kz) - \cos(2kz)) + C_1 z + C_2 \right); \quad (16)$$

где

$$C_1 = \frac{1}{2k} (\sin(kh_{II}) + \text{sh}(kh_{II})),$$

$$C_2 = -\frac{2t^2 \lambda_{II} (\text{ch}(kh_{II}) - \cos(kh_{II})) \cdot T_h}{I^2 \rho \cdot k^2} - \frac{h_{II}}{4k} (\sin(kh_{II}) + \text{sh}(kh_{II})) - \frac{1}{4k^2} (\text{ch}(kh_{II}) - \cos(kh_{II})).$$

Самая высокая температура будет при $z=-h_{II}/2$. Эта поверхность будет дальше всего от поверхности $z=h_{II}/2$, через которую отводится тепло от ПП. Построим график зависимости отношения $T_{II}(z)$ к $T_{II}(-h_{II}/2)$ от z при разных частотах (рис. 3). Такие приведённые графики позволят наглядно сравнить зависимости температуры ПП от координаты z при различных частотах. Из графиков видно, что при

относительно низких частотах распределение температур близко по форме к графику, приведённому в [15]. Это вполне понятно, ведь поверхностный эффект на этих частотах практически не проявляется и закон распределения температуры в ПП близок закону распределения для постоянного тока. При повышении частоты ток вытесняется на внешние поверхности ПП. Тогда ПП можно рассматривать, как объём без внутренних источников тепла. Источники тепла, в этом случае, можно рассматривать как, граничные условия. Температура в таком объёме будет распределяться по линейному закону (предельный случай, когда частота стремится к бесконечности). Из рис. 3 видно, что с повышением частоты кривая вырождается в прямую. На достаточно высоких частотах (при которых поверхностный эффект выражен ярко) вблизи поверхностей $z=-h_{II}/2$, $z=h_{II}/2$ плотность тока будет сильнее всего зависеть от z и будет самой большой. Поэтому отношение $T_{II}(z)$ к $T_{II}(-h_{II}/2)$ тоже сильно зависит от z , что видно из рис. 3 (кривые для 50 МГц и 1 ГГц).

В целом, как и для случая с постоянным током [15], расчёты температур ПП с переменным током показали, что относительная разница (отношение $\Delta T_{II\max} / \Delta T_{II}$), связанная с неравномерностью распределения температур в ПП, не будет превышать 0,01 %. $\Delta T_{II\max}$ – разность между $T_{II}(-h_{II}/2)$ и $T_{II}(h_{II}/2)$. Такая ничтожная разница оказать существенного влияния на результат не может и при расчётах её можно не учитывать.

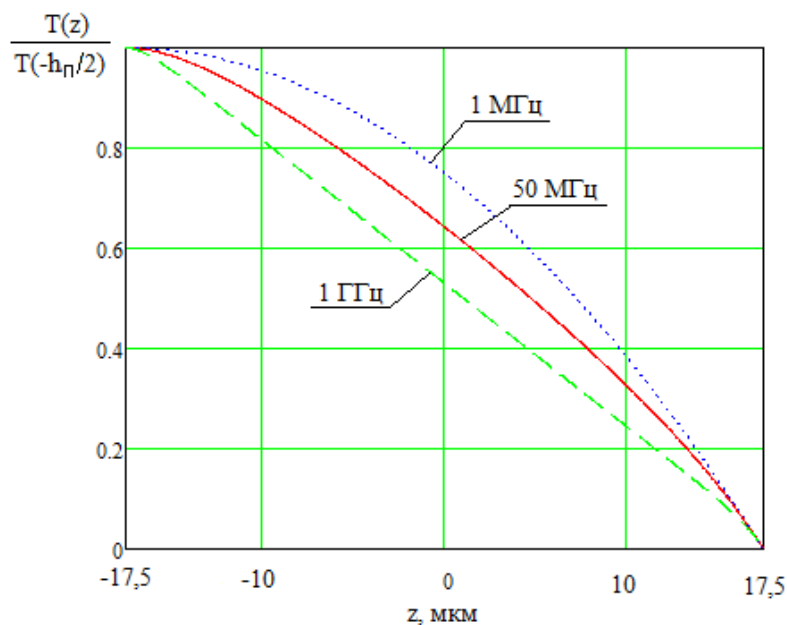


Рис. 3. Графики зависимости отношения $T_{\text{П}}(z)$ к $T_{\text{П}}(-h_{\text{П}}/2)$ от z при разных частотах

Изложенное выше, как отмечалось в самом начале, справедливо при $t \gg h_{\text{П}}$. Однако t является искомой величиной и до проведения расчёта выполнение, приведённого выше ограничения, проверить нельзя. Если ограничение $t \gg h_{\text{П}}$ не выполняется, то токами вдоль боковых стенок ПП пренебрегать нельзя. При этом активное электрическое сопротивление ПП будет меньше значения посчитанного по формулам (9, 10). Как следствие будет меньше мощность, рассеиваемая ПП. Уменьшение мощности приведёт к уменьшению температуры. Таким образом, целесообразно проводить расчёт не взирая на ограничение. Если после расчёта выяснится, что ограничение $t \gg h_{\text{П}}$ не выполняется, ничего менять в конструкции ПП не требуется. Необходимо только иметь введу, что реальный перегрев ПП будет ниже расчётного. С точки зрения надёжности ПП такой вариант будет даже лучше рассмотренного.

Таким образом, разработанная методика применима даже если ограничение $t \gg h_{\text{П}}$ не выполняется. Поскольку методика построена на базе данных

представленных в [15], то результаты анализа влияния всех остальных допущений (влияние краевых эффектов и разница между электрофизическими и теплофизическими свойствами медной фольги и гальванической меди) могут быть распространены на неё.

Заключение

Таким образом, была разработана инженерная методика, позволяющая рассчитывать ширину ПП РЭА космических аппаратов при протекании по ним переменного тока. Разработанная методика позволяет снизить количество ошибок при проектировании печатных плат, необходимость доработок и ремонта РЭА на стадии наземных испытаний, повышение надёжности космических аппаратов в целом. Все задачи были решены, а цель достигнута.

Библиографический список:

1. Белявский А.Е., Сорокин А.Е., Строгонова Л.Б., Шангин И.А. Выбор процессов теплоаккумулирования в системах обеспечения теплового режима космических аппаратов // Труды МАИ. 2018. № 103. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=100615>
2. Алексеев В.А., Карабин А.Е. Новый тип тепловых аккумуляторов для охлаждения радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов // Труды МАИ. 2011. № 49. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=28050>
3. Панин Ю.В., Коржов К.Н. Разработка теплопередающего устройства для альтернативного способа терморегулирования системы обеспечения теплового

режима космического аппарата // Труды МАИ. 2015. № 80. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=56911>

4. Палешкин А.В., Мамедова К.И. Моделирование расчетных внешних тепловых нагрузок к поверхности космического аппарата с помощью инфракрасных нагревателей // Труды МАИ. 2016. № 85. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=67483>

5. Ануров А.Е. Микросистема терморегуляции малых космических аппаратов // Труды МАИ. 2011. № 45. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=25349>

6. Платы печатные. Основные параметры конструкции. ГОСТ Р 53429-2009. – М.: Стандртинформ, 2018. – 11 с.

7. Печатные платы. Требования к конструкции. Инструкция. РД 50-708-91. – М.: Изд-во стандартов, 1992. – 41 с.

8. Generic Standard on Printed Board Design. IPC-2221A. 2003, 124 p.

9. Standard for Determining Current-Carrying Capacity in Printed Board Design. IPC-2152. 2009, 89 p.

10. Пирогова Е.В. Проектирование и технология печатных плат. – М.: ФОРУМ-ИНФРА-М, 2005. – 250 с.

11. Белянин Л.Н. Конструирование печатного узла и печатной платы. Расчёт надёжности. – Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – 77 с.

12. Гормаков А.Н. Воронина Н.А. Конструирование и технология электронных устройств приборов. Печатные платы. – Томск: Изд-во ТПУ, 2006. – 164 с.

13. Муравьёв Ю.В. Особенности проектирования и производства печатных плат на металлическом основании // Производство электроники: Технология, оборудования, материалы. 2010. № 2. С. 35 - 38.
14. Костин А.В., Шумских И.Ю., Бозриков В.С., Рузанов А.В., Никитин Д.А. Расчёт температуры печатных проводников плат, установленных на металлическое основание в бортовой аппаратуре космических аппаратов, работающей в условиях вакуума // VI Всероссийская научно-технической конференции «Актуальные проблемы ракетно-космической техники» («VI Козловские чтения»): сборник материалов. – Самара: Самарский научный центр РАН, 2019. Т. 2. С. 55 - 62.
15. Костин А.В., Шумских И.Ю., Рузанов А.В. Методика расчёта ширины печатных проводников печатных плат на металлическом основании для приборов космических аппаратов // XLIV Академические чтения по космонавтике, посвящённые памяти С.П. Королёва и других выдающихся отечественных учёных – пионеров освоения космического пространства: сборник тезисов. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020. Т. 2. С. 264 - 267.
16. Инкин А.И. Электромагнитные поля и параметры электрических машин. – Новосибирск: Издательство ЮКЭА, 2002. – 464 с.
17. Никольский В.В. Электродинамика и распространение радиоволн. – М.: Наука, 1978. – 544 с.
18. Дульнев Г.Н., Семяшкин Э.М. Теплообмен в радиоэлектронных аппаратах. – Л.: Энергия, 1968. – 360 с.

19. Пошихонов П.В., Соколовский Э.Н. Тепловой расчёт электронных приборов. – М.: Высшая школа, 1977. – 156 с.
20. John H. Lienhard IV, John H. Lienhard V. A heat transfer textbook. Thira edition, Cambridge, MA: Phlogiston Press, 2002, 750 p.

Design procedure for computing printed circuit conductors on metal base for AC spacecraft devices

Kostin A.V.

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

**e-mail: Kostin.AV@samspace.ru*

Abstract

The article suggests the technique for the design procedure of printed conductor (PC) width of the printed circuit board, being installed of the metal base, for the onboard spacecraft devices, depending on the flowing sinusoidal current of various frequency. The technique accounts for non-uniform current distribution in the PC volume due to the skin effect. The following problems were solved while this technique developing:

- Analysis of the PC active resistance dependence on frequency was performed;
- A refinement, allowing accounting for the skin effect, was developed base on the existing techniques;
- The analysis of the accepted assumptions impact on the calculations accuracy was performed.

The article presents the dependence of the PC active electrical resistance on frequency. This dependence was obtained under the condition that the PC width is much greater than its thickness. This condition is most often being fulfilled in practice. Such assumption was made with the purpose of simplifying the search for the dependence. As long as active resistance equation turned out to be rather complex even with account for the assumption, the article presents the graph of the reduced active resistance dependence.

To obtain the active resistance value, the value of the reduced active resistance should be multiplied by the PC length value and divided by the value of its width. The active resistance value is being determined graphically for the specified AC frequency. It simplifies the PC width calculation while printed circuit boards design.

Analysis of active electrical resistance dependence on the frequency was performed. It was established in the course of the analysis that at the frequencies up to 100 kHz active electrical resistance weakly depended on the frequency. The skin effect can be ignored at these frequencies. At the frequencies above 1 GHz, the active electrical resistance does not depend on the PCB thickness. This allows making a number of simplifications, and calculate the active resistance by the thickness of the skin layer.

The previously developed technique assumes the presence of heat removal only through the printed circuit board on the metal base. The article references the publications recounting its gist.

According to this technique, the thermal resistance of insulation material layers is determined by both the geometry of their part, located under the PC, and thermo-physical properties of the materials themselves. When the current flows through the PC, the dissipated power is determined as the product of the square of current and the PC active resistance. This power will be equal to the thermal flow. Then the overheating will be equal to the product of the thermal flow and the thermal resistance of the insulation material layers. Refinement for the AC consists in the electric resistance dependence on the frequency.

Analysis of temperature distribution in the PCB volume due to the current distribution non-uniformity and heat dissipation from the one side only, was performed

analytically by solving thermal conductivity equation. Calculations revealed that the skin effect would not be affecting the temperature distribution in the PCB volume significantly. Analysis of the frequency impact on the temperatures distribution was performed.

It was noted that the temperature distribution law became close to the linear with frequency increasing. This is associated with the fact that the AC is being pushed out to the PC surface, and heat sources inside PCB disappear.

It was noted that other assumptions made while developing the technique for the DC affect the calculation result for the AC as well. It is associated with the fact that the proposed technique is based on the previously developed one. First of all, this concerns the edge thermal fluxes effect to the PC temperature. The article stipulates that the method can be applied even if the PC width is not much great than its thickness. If the condition is met, the current flows along the lateral surfaces can be ignored. Non-fulfillment of this condition will lead to the situation when these currents will significantly affect the result. However, the presence of additional currents means that the larger PCB section will be employed while the current flowing. This will lead to the situation when actual active resistance will be less than the calculated one. Consequently, actual PCB temperature will be less than the calculated one. This will not degrade the PCB reliability, but even increase it.

The actual PC power will be less than the calculated one. And as a result the actual PC temperature will be less than the calculated one. This will not decrease the reliability of the PC and increase it instead.

Keywords: design procedure, spacecraft onboard electronic equipment, printed circuit board, printed conductor width, alternating current, frequency, skin effect, temperature.

References

1. Belyavskii A.E., Sorokin A.E., Strogonova L.B., Shangin I.A. *Trudy MAI*, 2018, no. 103. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=100615>
2. Alekseev V.A., Karabin A.E. *Trudy MAI*, 2011, no. 49. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=28050>
3. Panin Yu.V., Korzhov K.N. *Trudy MAI*, 2015, no. 80. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=56911>
4. Paleshkin A.V., Mamedova K.I. *Trudy MAI*, 2016, no. 85. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=67483>
5. Anurov A.E. *Trudy MAI*, 2011, no. 45. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=25349>
6. *Platy pechatnye. Osnovnye parametry konstruksii. GOST R 53429-2009* (Printed circuit boards. Basic parameters of structure. Russian State Standard 53429-2009), Moscow, Standartinform, 2018, 11 p.
7. *Pечатные платы. Trebovaniya k konstruksii. Instruktsiya. RD 50-708-91* (Printed circuit boards. Design specifications. Instruction manual. Guidance Document 50-708-91), Moscow, Izd-vo Standarty, 1992, 41 p.
8. *Generic Standard on Printed Board Design. IPC-2221A*. 2003, 124 p.
9. *Standard for Determining Current-Carrying Capacity in Printed Board Design. IPC-2152*. 2009, 89 p.

10. Pirogova E.V. *Proektirovanie i tekhnologiya pechatnykh plat* (Design and technology of printed circuit boards), Moscow, FORUM: INFRA-M, 2005, 250 p.
11. Belyanin L.N. *Konstruirovaniye pechatnogo uzla i pechatnoi platy. Raschet nadezhnosti* (Design of printed circuit assembly and printed circuit board. Reliability calculation), Tomsk, Izd-vo dom TPU, 2008, 77 p.
12. Gormakov A.N. Voronina N.A. *Konstruirovaniye i tekhnologiya elektronnykh ustroystv priborov. Pечатные платы* (Design and technology of electronic devices. Printed circuit boards), Tomsk, Izd-vo TPU, 2006, 164 p.
13. Murav'ev Yu.V. *Proizvodstvo elektroniki: Tekhnologiya, oborudovaniya, materialy*, 2010, no. 2, pp. 35 - 38.
14. Kostin A.V., Shumskikh I.Yu., Bozrikov V.S., Ruzanov A.V., Nikitin D.A. *VI Vserossiiskaya nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Aktual'nye problemy raketno-kosmicheskoi tekhniki» (“VI Kozlovskie chteniya”): sbornik materialov*, Samara, Samarskii nauchnyi tsentr RAN, 2019, vol. 2, pp. 55 - 62.
15. Kostin A.V., Shumskikh I.Yu., Ruzanov A.V. *XLIV Akademicheskie chteniya po kosmonavtike, posvyashchennye pamyati S.P. Koroleva i drugikh vydayushchikhsya otechestvennykh uchenykh – pionerov osvoeniya kosmicheskogo prostranstva: sbornik tezisov*, Moscow, MGTU im. N.E. Baumana, 2020, vol. 2, pp. 264 - 267.
16. Inkin A.I. *Elektromagnitnye polya i parametry elektricheskikh mashin* (Electromagnetic fields and parameters of electric motors), Novosibirsk, Izd-vo UKEA, 2002, 464 p.
17. Nikol'skii V.V. *Elektrodinamika i rasprostraneniye radiovoln* (Electrodynamics and radio wave propagation), Moscow, Nauka, 1978, 544 p.

18. Dul'nev G.N., Semyashkin E.M. *Teploobmen v radioelektronnykh apparatakh* (Heat-exchange in radio-electronic devices), Leningrad, Energiya, 1968, 360 p.
19. Poshekhonov P.V., Sokolovskii E.N. *Teplovoi raschet elektronnykh priborov* (Thermal calculation of electronic devices), Moscow, Vysshaya shkola, 1977, 156 p.
20. John H. Lienhard IV, John H. Lienhard V. *A heat transfer textbook*. Thira edition, Cambridge, MA: Phlogiston Press, 2002, 750 p.