

УДК 536.581:519.876.5+681.536.5

В.М. Карабан, М.П. Сухоруков, Е.А. Морозов

## Математические модели многослойных печатных плат для теплового моделирования электронных устройств и систем

Рассматриваются вопросы реализации тепловых моделей печатных плат, которые определяются объектом моделирования, требуемой точностью получения результатов, а также скоростью и трудоемкостью их получения.

**Ключевые слова:** математическая модель, печатная плата, трассировка, джоулево тепло.

Современные печатные платы (ПП) представляют собой конструкцию, состоящую из диэлектрического основания (стеклотекстолит, FR-4 и др.), на одной или обеих сторонах которого расположены изолированные слои проводящего материала (меди). С точки зрения теплового моделирования подобная конструкция ПП в первом приближении может рассматриваться упрощенно: как однородный материал с двунаправленной (анизотропной) теплопроводностью, т.е. когда значение коэффициента теплопроводности различно в направлении нормали к ПП и в ее плоскости. Данный подход является приемлемым до тех пор, пока распределение проводящего рисунка более или менее равномерно в любом слое или его плотность пренебрежимо мала.

Однако при сохраняющейся тенденции миниатюризации – увеличение функциональности при одновременном сокращении размера изделий – разработчики современных ПП (устройств) стараются увеличить степень интеграции, как следствие ПП становятся все более неоднородными и возникает необходимость учета локальной теплопроводности.

Зачастую ПП имеют большое количество меди в слоях питания и земли, что наряду с наличием переходных отверстий (особенно тепловых) может эффективно использоваться разработчиками ПП для отвода тепла от корпусов интегральных схем (микросхем). Подобная детальная информация о величине локальной проводимости ПП необходима для повышения точности (достоверности) моделирования процессов теплообмена.

Проведение теплового моделирования для каждого отдельного слоя ПП является дорогостоящим и непрактичным для модели системного уровня. Поэтому авторами в статье рассматривается подход к вычислению локальных анизотропных проводимостей ( $k_x$ ,  $k_y$ ,  $k_z$ ) ПП с использованием специальной (фоновой) сетки.

Также авторами приводятся три математические модели [1–4], каждая из которых применяется для решения тех или иных задач, будь то расчет блока радиоэлектронной аппаратуры, состоящего из десятков узлов, или же расчет теплового режима конкретного печатного узла, содержащего множество сложных элементов, в том числе интегрированных схем высокой степени интеграции.

### 1. Компактная (усредненная) тепловая модель ПП [1]:

- самая простая из доступных;
- представляет собой однородный материал, в котором проводимость в плоскости ПП ( $k_{in-plane}$ )  $\gg$  проводимости в направлении нормали к ПП ( $k_{normal}$ );
- проводящие слои (верхний, нижний и внутренние) задаются в процентном соотношении от величины поверхности диэлектрика;
- проводящие слои не моделируются (не рассматриваются) в отдельности.

$$k_{in-plane} = \sum k_i t_i / \sum t_i, \quad (1)$$

$$k_{normal} = \sum t_i / \sum (t_i / k_i), \quad (2)$$

$$k_i = f_i k, \quad (3)$$

где  $k$  – теплопроводность материала (Вт/м·К);  $t$  – толщина слоя (м);  $f_i$  – коэффициент покрытия меди.

На основании анализа выражений (1)–(3) видно, что наибольшее влияние на итоговую теплопроводность модели оказывает теплопроводность в плоскости, нежели по нормали. В свою очередь

на теплопроводность в плоскости, большее влияние оказывают слои меди, в то время как на теплопроводность по нормали влияет слой диэлектрика.

Приведем пример:

- количество внутренних проводящих слоев = 6;
- площадь покрытия каждого проводящего слоя = 40%;
- толщина верхнего, нижнего и внутренних слоев проводящего материала = 35 мкм;
- толщина слоя ПП = 145 мкм;
- теплопроводность проводящего материала (меди) = 388 Вт/м·К;
- теплопроводность диэлектрического основания (FR4) = 0,35 Вт/м·К.

На основании (1) теплопроводность в плоскости:

$$k_{in-plane} = (8 \cdot 35 \cdot 10^{-6} \cdot 388 \cdot 0,4 + 7 \cdot 145 \cdot 10^{-6} \cdot 0,35) / (8 \cdot 35 \cdot 10^{-6} + 7 \cdot 145 \cdot 10^{-6}) = 33,06 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}.$$

На основании (2) теплопроводность по нормали:

$$k_{normal} = 1,29 \cdot 10^{-3} / ((8 \cdot 35 \cdot 10^{-6} / 388) + (7 \cdot 145 \cdot 10^{-6} / 35)) = 0,44 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}.$$

Применение данной модели оправдано при проведении оценочного анализа теплового режима блока или стойки радиоэлектронной аппаратуры, когда погрешность порядка 15–20% не критична.

### 2. Компактная (слоистая) тепловая модель ПП [1]:

- имеет более детальное представление структуры, чем компактная (усреднённая) модель, поскольку ПП моделируется, как слой диэлектрического основания со слоями меди;
- проводящие слои задаются в процентном соотношении от величины поверхности диэлектрика;
- проводящие слои представляются тонкими пластинами и моделируются по отдельности.

Подобная модель, находит применение при расчетах многослойных печатных плат, на которых установлены сложные и чувствительные к температуре элементы (например, процессоры, «системы-на-кристалле»).

### 3. Тепловая модель ПП с импортом трассировки [1, 2]:

- локальная теплопроводность ПП оценивается на основе проводящего рисунка;
- геометрия трассировки не включается в физическую (расчетную) модель ПП и необходима лишь для определения значений локальной теплопроводности с применением фоновой сетки. Как следствие не требуется создание геометрической модели проводников и усложнение расчетной сетки;
- для проведения расчета значения локальной теплопроводности транслируются в физическую (расчетную) модель из фоновой сетки.

Матрица фоновой сетки (строки и столбцы) используется в модели ПП с импортом трассировки для определения (задания) ортотропной теплопроводности ПП, причем строки матрицы отвечают за направление  $x$ , а столбцы – за направление  $y$ . Размер матрицы зависит от размерности фоновой сетки. Значения ( $k_x, k_y, k_z$ ) в каждой ячейке определяются локальной плотностью проводящих слоев и их ориентацией в пространстве (рис. 1). Затем эти значения переносятся на расчетную сетку, которая строится без учета геометрии проводника, таким образом, теплопроводность проводника учитывается в структуре модели.

Рис. 1. Методика построения матрицы теплопроводности на основе фоновой сетки

0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
0,3	27	27	27	27	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
0,3	27	27	27	27	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
0,3	0,3	0,3	27	27	27	27	0,3	0,3	0,3
0,3	0,3	0,3	27	27	27	27	0,3	0,3	0,3
0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3

Как следствие, подобный подход (модель) позволяет более детально учитывать неоднородность трассировки, без необходимости дополнительного усложнения расчетной сетки, что в сравнении с компактными (усредненной и слоистой) моделями дает ей преимущество.

Причем для модели с импортом трассировки присутствует зависимость пространственного распределения температуры от разрешения фоновой сетки. На рис. 2 показаны расчетные примеры распределения температур на плате при различных разрешениях фоновой сетки.

Модель указанного типа также актуальна при расчете теплового режима высокоомощных устройств, в которых протекают большие токи.

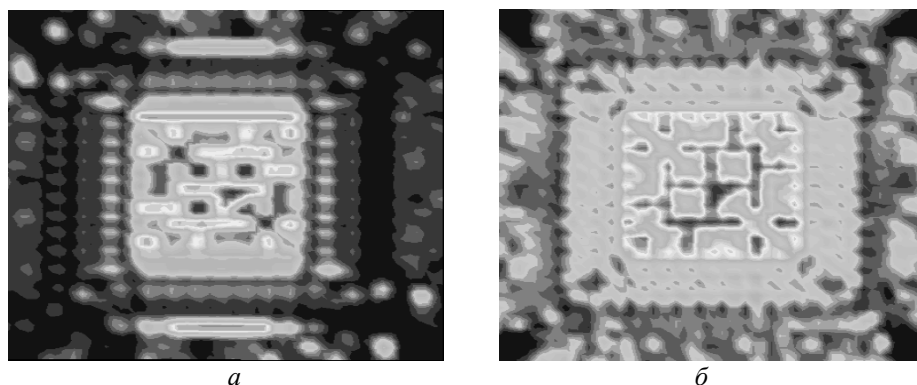


Рис. 2. Распределения температуры. Разрешения фоновой сетки: *a* – 50×50, *б* – 400×400

#### 4. Подробная модель ПП [1]

Для данной модели требуется создание геометрической модели трассировки и включение ее в физическую (расчетную) модель ПП. Как следствие, требуется значительное усложнение расчетной сетки [5].

Применение подробной модели может быть оправдано только при необходимости получения чрезвычайно точного распределения температур в устройстве [6].

Результаты проведенного сравнительного анализа сведены в таблицу.

**Сравнение достоверности результатов и вычислительных затрат**

Модель	Достоверность результатов	Вычислительные затраты
Компактная (усреднённая)	Низкая	Низкие
Компактная (слоистая)	Средняя	Средние
Импорт трассировки	Высокая	Высокие
Подробная	Очень высокая	Очень высокие

На основании тепловой модели ПП с импортом трассировки проведен расчет температурного поля печатного узла блока управления (рис. 3) с учетом и без учета джоулева тепла, выделяемого проводящим рисунком.

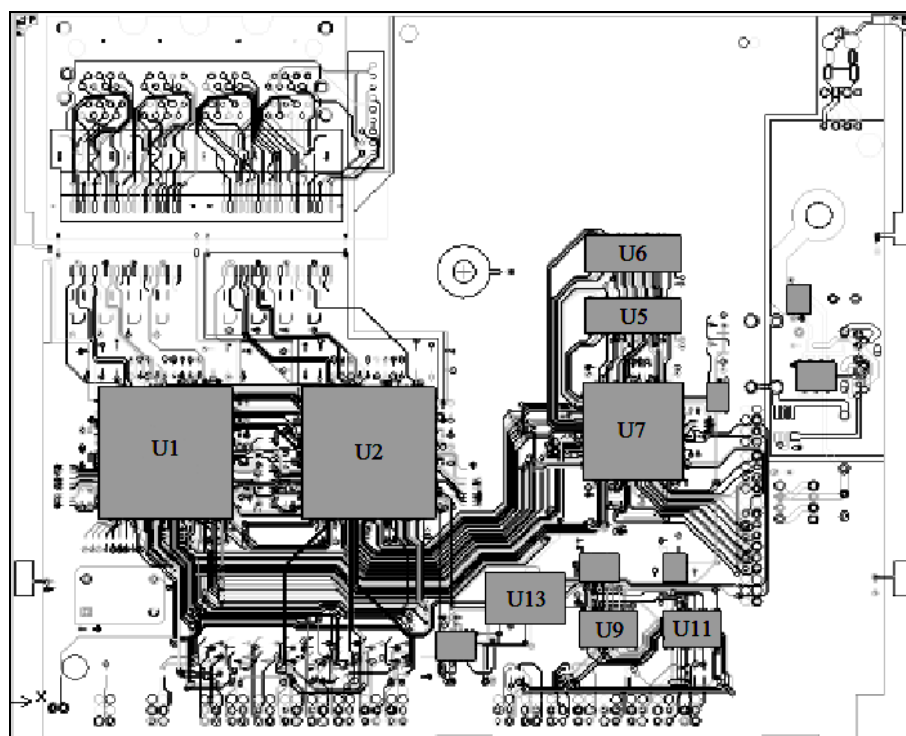


Рис. 3. Модель ПП блока управления с импортом трассировки, используемая в расчетах

Полученные численные результаты (рис. 4) свидетельствуют о значительном влиянии тепла на температурное поле печатного узла блока управления. Так, расхождение результатов моделирования для ПП составило 50 °С, а для элементов – от 2 до 11 °С.

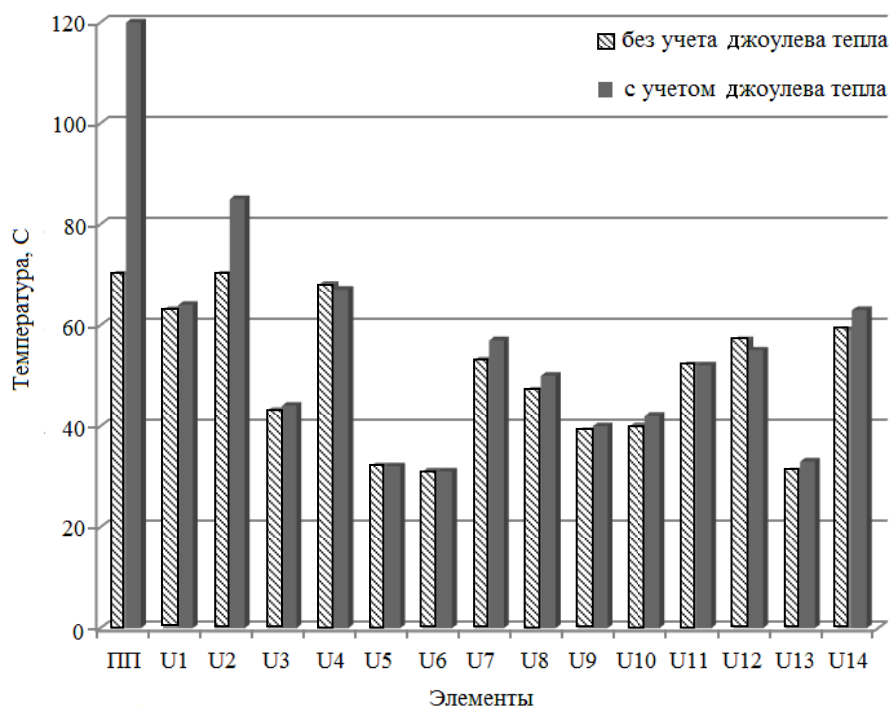


Рис. 4. Результаты теплового моделирования ПП с учетом и без учета тепла проводников

**Заключение.** В данной работе рассмотрены тепловые модели (подходы к представлению) ПП, которые определяются объектом моделирования, требуемой точностью результатов, а также скоростью и трудоемкостью их получения.

Применение компактной (усредненной) тепловой модели ПП оправдано при проведении оценочного анализа теплового режима блока или стойки радиоэлектронной аппаратуры, когда погрешность составляет порядка 15–20%, некритична.

Компактная (слоистая) тепловая модель ПП, находит применение при расчетах многослойных печатных плат, на которых установлены сложные и чувствительные к температуре элементы (например, процессоры, «системы-на-кристалле»).

Тепловая модель ПП с импортом трассировки позволяет более детально учитывать неоднородность трассировки без необходимости дополнительного усложнения расчетной сетки, что, в сравнении с компактными (усредненной и слоистой) моделями, дает ей преимущество. Модель указанного типа также актуальна при расчете теплового режима высокоомощных устройств силовой электроники, в которых протекают большие токи. Применение подробной модели, может быть оправдано только при необходимости получения чрезвычайно точного распределения температур в устройстве.

На основании тепловой модели ПП с импортом трассировки проведен расчет температурного поля печатного узла блока управления с учетом и без учета джоулева тепла. Результаты свидетельствуют о необходимости учета физических процессов саморазогрева проводников при протекании по ним электрического тока.

Работа выполнена в рамках реализации Постановления Правительства РФ от 09.04.2010 г. № 218 и договора между ОАО «ИСС» и Минобрнауки РФ от 12.02.2013 г. №02.G25.31.0042.

#### Литература

1. Карaban В.М. Модели печатных плат с повышенной вычислительной эффективностью / В.М. Карaban, И.О. Сулов // Матер. 17-го Междунар. молодежного форума «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке». – Харьков: ХНУРЭ, 2013. – Т. 2. – С. 127–128.

2. Карабан В.М. Модель печатного узла с учетом джоулевого тепла / В.М. Карабан, И.О. Суслон // Матер. 17-го Междунар. молодежного форума «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке». – Харьков: ХНУРЭ, 2013. – Т. 2. – С. 125–126.
3. Карабан В.М. Возможности проведения расчета теплового режима печатных плат в системе имитационного моделирования ANSYS Icerak / В.М. Карабан, И.О. Суслон // Матер. XVI Междунар. науч. конф., посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем акад. М.Ф. Решетнева. – 2012. – Ч. 1. – С. 179–180.
4. Карабан В.М. Возможности ANSYS Icerak в области теплового моделирования микросхем / В.М. Карабан, И.О. Суслон // Матер. XVI Междунар. науч. конф., посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева. – 2012. – Ч. 1. – С. 177–178.
5. Численное моделирование напряженно-деформированных состояний модуля из низкотемпературной совместно-обжигаемой керамики вследствие тепловых режимов работы бортовой радиоэлектронной аппаратуры. Ч. 1. Постановка задачи. Подготовка к моделированию / В.П. Алексеев, В.М. Карабан, С.Б. Сунцов, С.В. Пономарев // Доклады ТУСУРа. – 2010. – №2 (22), ч. 1. – С. 229–231.
6. Численное моделирование напряженно-деформированных состояний модуля из низкотемпературной совместно-обжигаемой керамики вследствие тепловых режимов работы бортовой радиоэлектронной аппаратуры. Ч. 2. Проведение численного моделирования / В.П. Алексеев, В.М. Карабан, С.Б. Сунцов, С.В. Пономарев // Доклады ТУСУРа. – 2010. – №2 (22), ч. 1. – С. 232–235.

---

**Карабан Вадим Михайлович**

Канд. физ.-мат. наук, зав. лаб. теплового и механического анализа и синтеза  
НИИ космических технологий ТУСУРа  
Тел.: (382-2) 90-01-62  
Эл. почта: karaban\_vm@mail.ru

**Сухоруков Максим Петрович**

Аспирант, науч. сотрудник лаб. теплового и механического анализа и синтеза  
НИИ космических технологий ТУСУРа  
Тел.: (382-2) 90-01-62  
Эл. почта: max\_sukhorukov@mail.ru

**Морозов Егор Александрович**

Вед. инженер-конструктор  
ОАО «Информационные спутниковые системы» им. акад. М.Ф. Решетнёва», г. Железногорск  
Эл. почта: morozov@iss-reshetnev.ru

Karaban V.M., Sukhorukov M.P., Morozov E.A.

**Mathematical models of multi-layer printed circuit boards for thermal modeling of electronic devices and systems**

The work deals with the implementation of thermal models of printed circuit boards, which are determined by the object model, the required accuracy of the results, as well as the speed and complexity of their receipt.

**Keywords:** mathematical model, circuit board, trace, Joule heat.

---