

УДК 536.24:519.9

**РАСЧЕТ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ  
НА ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЕ**

Г.В. Бирюлин, В.И. Егоров, С.Ю. Муров

На основе метода конечных разностей разработан алгоритм расчета температур корпусов электронных компонентов, устанавливаемых на печатной плате. Проведено сравнение результатов расчетов аналогичной программой, реализующей аналитический метод.

**Ключевые слова:** электронная аппаратура, печатная плата, численное моделирование, метод конечных разностей, тепловой режим.

**Введение**

На стадии проектирования тепловой режим электронной аппаратуры определяется на основе метода поэтапного моделирования [1]. Наиболее часто применяются конструкции аппаратуры, печатные платы в которых расположены вертикально и параллельно друг другу, образуя вертикальные каналы для движения воздуха при принудительной и естественной вентиляции. Все печатные платы посредством коммутационных разъемов соединяются с вертикальной кроссплатой.

В соответствии с уровнями конструктивной иерархии используются тепловые модели различной степени детализации. Сначала рассчитываются ориентировочные средние температуры корпуса, нагретой зоны и воздуха внутри прибора. На следующем этапе совместно решаются задача определения в каждом канале скорости и температуры протекающего воздуха и задача расчета средних температур печатных плат. Результаты, полученные на этом этапе, служат исходными данными при расчете температур электронных компонентов (ЭК) на исследуемой печатной плате. Приведенная в [1] методика расчета температур (ЭК) содержит приближенные аналитические решения для промежуточных величин (тепловых коэффициентов и фоновых температур), что увеличивает погрешность результатов.

**Методика расчета**

Принимаем, что температура воздуха в каналах, между которыми расположена печатная плата, известна и изменяется линейно вдоль вертикальной координаты. Также известны среднеповерхностные температуры соседних плат, кроссплаты, корпуса РЭА и величины скоростей воздуха в каналах. Печатные платы и расположенные на них ЭК обмениваются лучистой энергией с соседними печатными платами и элементами конструкции. Охлаждение ЭК происходит также путем конвекции в воздушной среде в каналах между платами. Часть теплоты, выделяемой ЭК, нагревает печатную плату. Тепловое сопротивление между ЭК и печатной платой в зоне установки ЭК зависит от способа крепления. Теплопередача от печатной платы к кроссплате через электрические разъемы происходит кондуктивным путем.

Основные допущения тепловой модели:

- плата представляет собой анизотропную пластину, тепловое поле которой изменяется по двум координатам, перепадом по толщине пренебрегаем;
- коэффициент лучистого теплообмена на каждой из сторон платы определяется как средний по поверхности;
- коэффициент конвективного теплообмена от платы к воздуху в канале для вертикальных плат изменяется по высоте платы;
- температура любого ЭК есть среднеповерхностная температура его корпуса;
- тепловой поток от ЭК к плате равномерно распределен по площади его крепления;
- скорость воздуха в канале постоянна, а температура изменяется линейно от входа в канал до выхода.

При определении лучистых тепловых проводимостей [2] между корпусом ЭК и соседними платами, а также конвективных тепловых проводимостей между корпусом ЭК, платами и воздухом необходимо знать температуры этих объектов. Температуры корпусов ЭК являются искомыми, поэтому решение задачи возможно только итерационным методом [3, 4]. Теплота, выделяемая ЭК, уносится воздухом и лучистым потоком, а также передается другим ЭК посредством теплопроводности материала печатной платы. Поэтому для нахождения параметров тепловой связи между ЭК необходимо рассчитывать температурное поле печатной платы.

Для определения температурного поля печатной платы авторами, в отличие от [1], использован численный конечно-разностный метод [3]. Применена двухмерная равномерная прямоугольная сетка (рис. 1). Величины шагов сетки по оси  $x$  и по оси  $y$  могут отличаться. Количество узлов по вертикальной оси  $x$  обозначим  $M_X$ , по горизонтальной оси  $y$  –  $M_Y$ . Общее количество узлов (ячеек) сетки –  $M_C$ . Ячейка платы может иметь тепловую связь с корпусом ЭК. Для всех ячеек и ЭК составляют алгебраические уравнения на основе метода теплового баланса. Число алгебраических уравнений системы равно  $KY$ , где  $KY=M_C+M_Э+M_P$ ,  $M_Э$  – общее число ЭК,  $M_P$  – число разъемов. Для ячеек платы уравнения на основе метода теплового баланса, как показано в [3], являются конечно-разностными уравнениями.

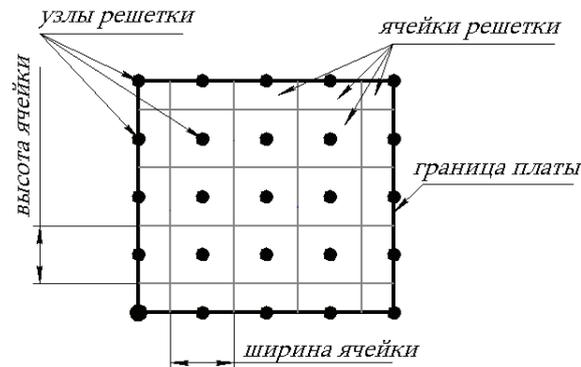


Рис. 1. Разбиение платы для метода конечных разностей

Для произвольно выбранной внутренней ячейки  $N$  (рис. 2) можем записать уравнение теплового баланса стационарного режима:

$$P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6 + P_7 + P_8 = 0. \quad (1)$$

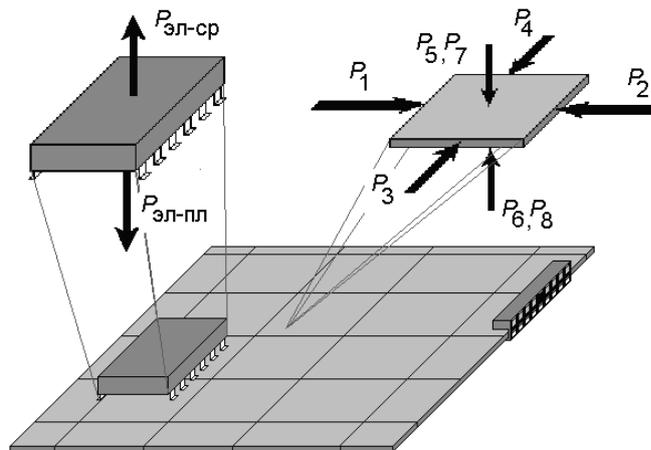


Рис. 2. Электронные компоненты (ЭК) и ячейки платы

Потоки, входящие в ячейку  $N$  от соседних ячеек за счет кондукции, определяются следующим образом:

$$P = \sigma_{\text{конд}} (T_1 - T_2); \quad (2)$$

$$P_1 = \lambda_x \cdot \delta \cdot \frac{ndx}{mdy} (T_{N-1} - T_N) - \text{поток через левую грань};$$

$$P_2 = \lambda_x \cdot \delta \cdot \frac{ndx}{mdy} (T_{N+1} - T_N) - \text{поток через правую грань};$$

$$P_3 = \lambda_y \cdot \delta \cdot \frac{mdx}{ndy} (T_{N-MY} - T_N) - \text{поток через верхнюю грань};$$

$$P_4 = \lambda_y \cdot \delta \cdot \frac{mdx}{ndy} (T_{N+MY} - T_N) - \text{поток через нижнюю грань};$$

$$P_5 = \sigma_{\text{пл-сп}}^n (T^n(x) - T_N) - \text{поток, входящий в ячейку } N \text{ от платы и воздуха на высоте } x \text{ слева};$$

$P_6 = \sigma_{пл-сп}^{np} (T^{np}(x) - T_N)$  – поток, входящий в ячейку  $N$  от платы и воздуха на высоте  $x$  справа;

$P_7 = \sigma_{M1}^i (\bar{T}_{M1} - T_N)$  – поток, входящий в ячейку  $N$  от элемента  $M1$ , установленного на ячейке, с левой стороны;

$P_8 = \sigma_{M2}^i (\bar{T}_{M2} - T_N)$  – поток, входящий в ячейку  $N$  от элемента  $M2$ , установленного на ячейке, с правой стороны.

Здесь  $\lambda_x, \lambda_y$  – теплопроводности печатной платы в направлениях  $x$  и  $y$  (постоянные по всей площади платы);  $\delta$  – толщина платы;  $ndx, mdy$  – размеры ячейки по  $x, y$  без учета крайних по положению ячеек;  $\sigma_{пл-сп}^l, \sigma_{пл-сп}^{np}$  – тепловая проводимость от окружающей среды к ячейке с левой (правой) стороны;  $\sigma_{M1}^i, \sigma_{M2}^i$  – тепловые проводимости от элемента, установленного на левой (правой) стороне к ячейке;  $T^l(x), T^{np}(x)$  – условные температуры окружающей среды у поверхности платы на высоте расположения ячейки.

Для каждого ЭК (рис. 3) составим уравнение на основе закона сохранения энергии:

$$P = P_{эл-сп} + P_{эл-пл}, \quad (3)$$

где  $P$  – мощность тепловыделений элемента;  $P_{эл-сп}$  – лучисто-конвективный поток, уходящий в окружающую среду (т.е. в воздушный канал конвективным путем, а в соседнюю плату и корпус – лучистым путем);  $P_{эл-пл}$  – поток, уходящий в плату.

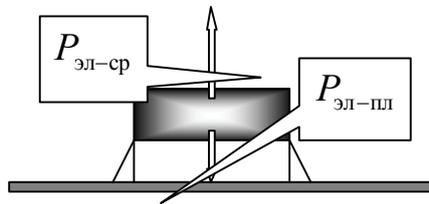


Рис. 3. Тепловой баланс электронного компонента

$$P_{эл-сп} = \sigma^l \cdot (T_M - \bar{T}^{пл}) + \sigma^k \cdot (T_M - \bar{T}^{возд}), \quad (4)$$

где  $\bar{T}^{пл}, \bar{T}^{возд}$  – средняя температура соседней платы и воздуха в канале на данной высоте;  $\sigma^l, \sigma^k$  – лучистая проводимость к соседней плате и конвективная к воздуху в канале на данной высоте.

Поток, уходящий в плату  $P_{эл-пл}$ , вычисляется как сумма потоков к каждой из ячеек платы, попадающих в проекцию элемента:

$$P_{эл-пл} = \sum \sigma_M^i \cdot (T_M - T_{N_i}). \quad (5)$$

Помимо ЭК, на печатной плате устанавливаются электрические разъемы. В работе [5] приведена методика расчета отвода теплоты в кроссплату.

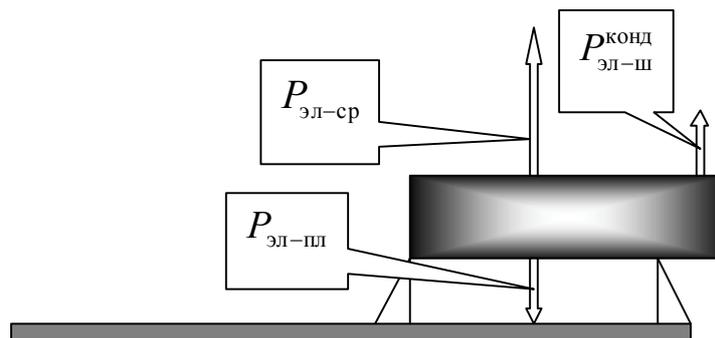


Рис. 4. Тепловой баланс разъема

Для каждого разъема (рис. 4) составим уравнение теплового баланса:

$$P = P_{эл-сп} + P_{эл-пл} + P_{эл-ш}^{конд}, \quad (6)$$

где  $P_{эл-ш}^{конд}$  – поток, уходящий через разъем в кроссплату.

Баланс тепловых потоков составлен аналогично вышеизложенным принципам:

$$\sigma^l \cdot (T_M - \bar{T}^{пл}) + \sigma^k \cdot (T_M - \bar{T}^{возд}) + \sum \sigma_M^i \cdot (T_M - T_{N_i}) + \sigma_{эл-ш}^{конд} \cdot (T_M - T_{ш}) - P = 0.$$

Проводимость к кроссплате  $\sigma_{\text{эл-ш}}^{\text{конд}}$  и температуру  $T_{\text{ш}}$  в месте контакта определяют в зависимости от типа разъема. Для расчета конвективного коэффициента теплоотдачи от ЭК, установленного на плате, согласно [1], следует использовать зависимость для коэффициента Нуссельта в виде  $Nu_l = 0,8\sqrt{Re_l}$ , где  $l$  – характерный размер, определяемый как длина обтекания корпуса компонента.

Алгоритм и программа

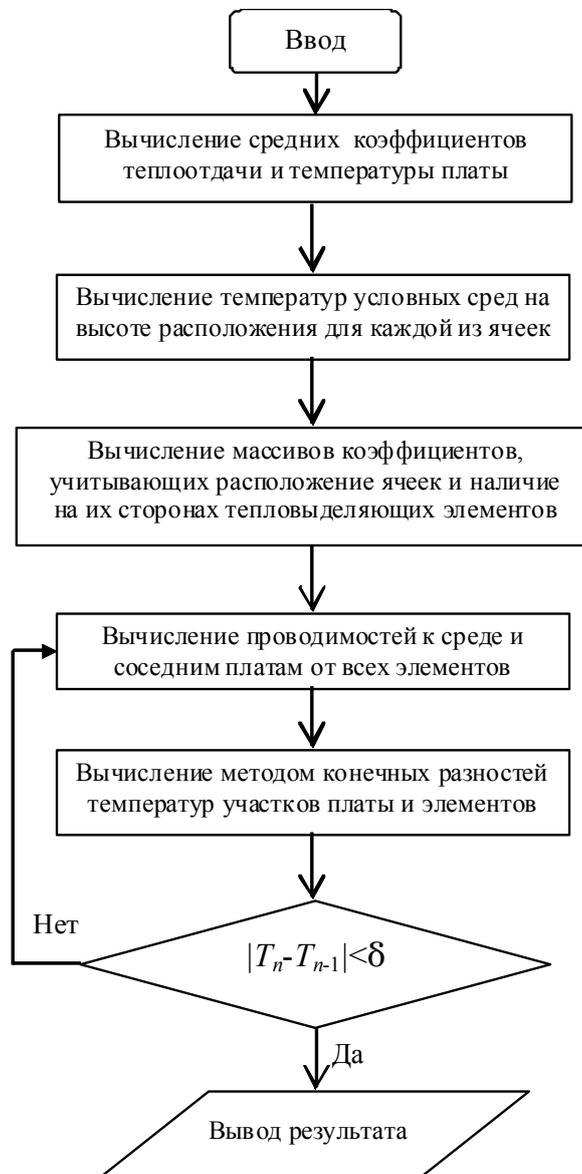


Рис. 5. Блок-схема алгоритма

Блок-схема алгоритма представлена на рис. 5. Предлагаемый алгоритм был реализован на языке C++. Приведенный алгоритм, в отличие от алгоритма [1], не содержит вычислений плохо сходящихся рядов при расчетах тепловых коэффициентов и фоновых температур.

Для печатной платы с габаритами 250×250×1,5 мм и общей мощностью тепловыделяющих ЭК 11 Вт с девятью ЭК мощностью от 0,5 до 3,0 Вт при температуре корпуса 40°C проведено сравнение результатов расчета по разработанной программе (№ 1), по программе (№ 2), реализующей методику, предложенную в [1], и результатов эксперимента. В таблице представлены перегревы элементов над температурой корпуса прибора для трех наиболее нагретых ЭК.

Расчетные перегревы ЭК над температурой корпуса прибора выше экспериментальных на 3–8% по программе № 1 и на 7–14% по программе № 2.

| № | Мощность,<br>Вт | Контактное тепловое<br>сопротивление ЭК, К/Вт | Перегревы ЭК над температурой корпуса прибора, К |              |              |
|---|-----------------|---|--|--------------|--------------|
|   |                 |   | Эксперимент                                      | Программа №1 | Программа №2 |
| 1 | 3               | 1,1   | 37,1   | 39,4         | 42,3         |
| 2 | 1               | 2,5   | 23,1   | 24,9         | 26,8         |
| 3 | 1,6             | 0,91  | 24,5   | 25,6         | 26,1         |

Таблица. Сравнение результатов расчетов и эксперимента

### Заключение

Современные многослойные печатные платы имеют коэффициенты теплопроводности порядка 10 Вт/(м·К) [5]. При вариации величины теплопроводности от 7 Вт/(м·К) до 15 Вт/(м·К) для печатной платы с габаритами 230×160×1,5 мм относительный перегрев уменьшается в среднем на 25% для ЭК с тепловыделениями порядка 0,5 Вт и тепловым сопротивлением от корпуса ЭК к печатной плате порядка 2,5 К/Вт. Величина теплопроводности печатной платы на стадии проектирования может быть оценена с большой погрешностью. В проведенной серии расчетов выявлено существенное влияние величины теплопроводности печатной платы на тепловой режим ЭК. Применение программы позволит разработчикам аппаратуры определить диапазон изменения температур ЭК.

Изложенный алгоритм предназначен для использования в системах автоматизированного проектирования печатных плат.

### Литература

1. Дульнев Г.Н., Парфенов В.Г., Сигалов А.В. Методы расчета теплового режима приборов. – М.: Радио и связь, 1990. – 312 с.
2. Дульнев Г.Н. Тепло- и массообмен в РЭА. – М.: Высшая школа, 1984. – 247 с.
3. Дульнев Г.Н., Парфенов В.Г., Сигалов А.В. Применение ЭВМ для решения задач теплообмена. – М.: Высшая школа, 1990. – 208 с.
4. Амосов А.А., Дубинский Ю.А., Копченова Н.В. Вычислительные методы для инженеров. – М.: Высшая школа, 1994. – 544 с.
5. Сушко В.Ю., Кораблев В.А., Шарков А.В. Методика расчета теплового сопротивления штыревых электрических разъемов // Известия вузов. Приборостроение. – 2005. – Т. 48. – № 9. – С. 51–54.

- Бирюлин Гавриил Владимирович** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, gavrila@bk.ru
- Егоров Владимир Иванович** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, ktf@gv.ifmo.ru
- Муров Святослав Юрьевич** – ОАО «БНТ Прибой», инженер, ncdf@mail.ru