

УДК 621.362: 537.322

*Евдулов Д.В., Евдулов О.В.*

## МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ НЕРАВНОМЕРНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ПЛАТ

*Yevdulov D. V., O. V. Yevdulov*

## ELECTRONIC CIRCUIT BOARDS NON-UNIFORM COOLING SYSTEM MODEL

*Аннотация.* В статье рассмотрена математическая модель неравномерного охлаждения электронных плат. Представлена структурная схема системы, реализующей данный подход, методика расчета температурного поля электронной платы, а также принцип оптимизации ее тепловых характеристик. В рассмотренной схеме основной отвод теплоты от электронной платы производится посредством радиаторной системы, а дополнительное охлаждение наиболее чувствительных к температурному режиму компонентов производится термоэлектрическими батареями. Приведены двумерные температурные поля электронной платы при ее равномерном и неравномерном охлаждении, осуществлено их сравнение. Как следует из результатов расчетов, при использовании равномерного общего охлаждения электронного узла имеет место трата энергии на охлаждение участков электронной платы, температура которых и без охлаждающей системы лежит в пределах допустимого температурного диапазона.

Подобный подход приводит к увеличению холодопроизводительности используемых термоэлектрических батарей по сравнению с требуемыми значениями. Это в большой степени снижает экономичность системы отвода тепла. Применение же для охлаждения электронной платы неравномерного локального отвода тепла устраняет этот недостаток.

Полученные зависимости показывают, что в этом случае энергия, требуемая для создания заданного температурного режима, меньше, чем при использовании общего равномерного охлаждения. При таком подходе температурное поле радиоэлектронной платы оказывается более однородным, и охлаждение является более эффективным.

**Ключевые слова:** электронная плата, неравномерное охлаждение, термоэлектрическая батарея, температурное поле, математическая модель.

**Abstract.** The paper considers a mathematical model of non-uniform cooling of electronic circuit boards. The block diagram of the system implementing this approach, the method of calculation of the electronic board temperature field, as well as the principle of its thermal performance optimizing are present-

*ed. In the considered scheme the main heat elimination from electronic board is produced by the radiator system, and additional cooling of the most temperature-sensitive components is produced by thermoelectric batteries. Are given the two-dimensional temperature fields of the electronic board during its uniform and non-uniform cooling, is carried out their comparison. As follows from the calculations results, when using a uniform overall cooling of electronic unit there is a waste of energy for the cooling of electronic board parts which temperature is within acceptable temperature range without the cooling system. This approach leads to the increase in the cooling capacity of used thermoelectric batteries in comparison with the desired values. This largely reduces the efficiency of heat elimination system. The use for electronic boards cooling of non-uniform local heat elimination removes this disadvantage. The obtained dependences show that in this case, the energy required to create a given temperature is smaller than when using a common uniform cooling. In this approach the temperature field of the electronic board is more uniform and the cooling is more efficient.*

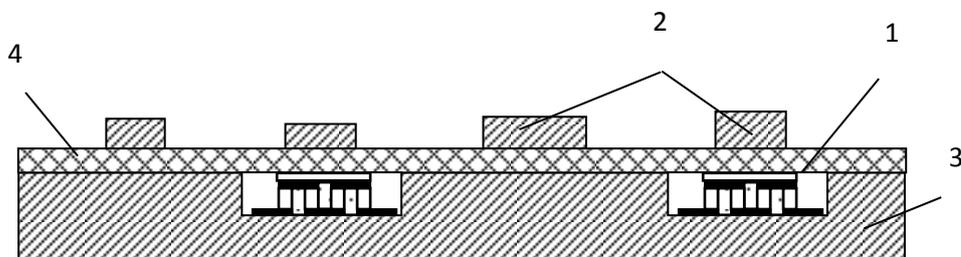
**Key words:** *electronic board, the non-uniform cooling, thermoelectric battery, temperature field, mathematical model.*

**Введение.** Наиболее распространенными элементами современной радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) являются электронные платы.

Среди них в зависимости от размещения проводящего рисунка выделяются односторонние, двусторонние и многослойные. Несмотря на тип электронной платы, основной их особенностью является рассредоточение по площади тепловыделяющих элементов. В указанных условиях температурное поле электронной платы является существенно неравномерным.

**Постановка задачи.** Для обеспечения нормальных тепловых условий функционирования такого радиоэлектронного прибора равномерное охлаждение, при котором все тепловыделяющие элементы охлаждаются с одинаковой интенсивностью, будет не целесообразным. Более рационально осуществлять неравномерный отвод теплоты. В этом случае радиоэлементы с большей величиной мощности рассеяния будут охлаждаться с большей интенсивностью, а элементы с меньшим уровнем тепловыделений – с меньшей.

Разработана конструкция теплоотводящей системы [1], изображенная на рис. 1, в которой реализован принцип неравномерного охлаждения.



**Рисунок 1. – Конструкция охлаждающей системы**

В данной схеме основной отвод теплоты от электронной платы 1 производится посредством радиаторной системы 2, а дополнительное охлаждение наиболее чувствительных к температурному режиму компонентов 3 производится термоэлектрическими батареями (ТЭБ) 4. Конструкция имеет упрощенную технологию изготовления, предусматривает возможность согласования режимов работы отдельных ТЭБ и энергосбережения.

Таким образом, при проектировании рассмотренной системы охлаждения для конкретного типа электронной платы основной задачей разработчика является оптимизация температурного поля последней.

**Методы исследования.** Оптимизация температурного поля электронной платы и определение холодопроизводительности ТЭБ.

Исходными данными для расчетов являются стационарные и нестационарные температурные поля электронной платы без системы теплоотвода. Их анализ проводится на модели пластины с дискретными источниками энергии.

Математическая формулировка задачи определения температурного поля в пластине при использовании представления дискретного источника энергии в виде ступенчатой функции имеет следующий вид [2]:

$$\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + q(x, y) - b^2 T = c\rho \frac{\partial T}{\partial \tau}, \quad (1)$$

$$q(x, y) = \sum_{j=1}^J q_j(x, y);$$

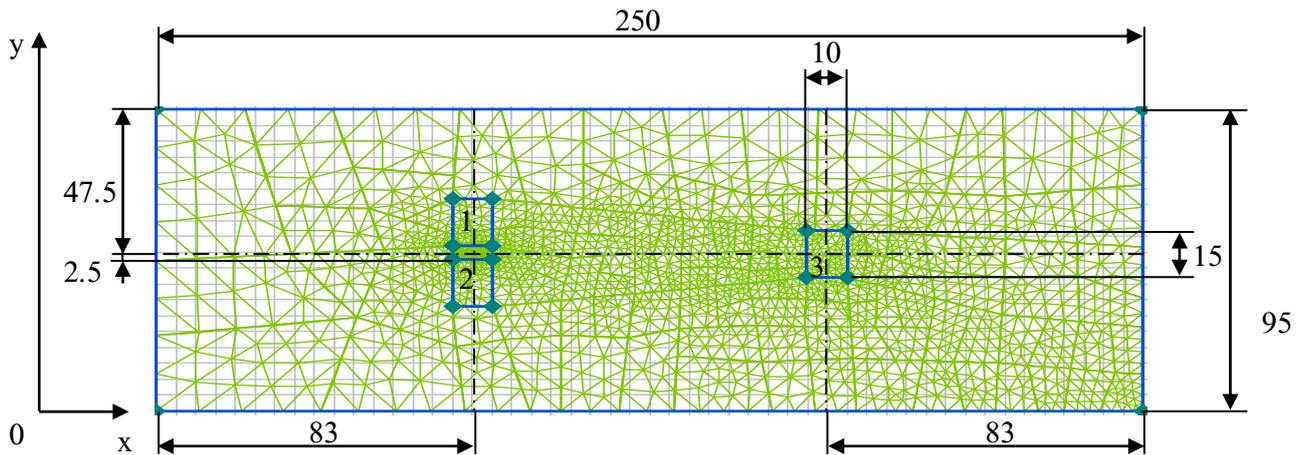
$$q(x, y) = \begin{cases} \frac{P_j}{4\Delta\xi_j \Delta\eta_j \delta \lambda} & \text{в области источника энергии} \\ 0 & \text{вне области источника энергии} \end{cases},$$

$$b^2 = \frac{\alpha}{\lambda \delta},$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=L_x} = \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=0} = \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=L_y} = \alpha(T - T_{cp}), \quad T = 293\text{K при } \tau = 0,$$

где,  $T$  – температура в любой точке пластины;  $x, y$  – пространственные координаты;  $T_{cp}$  – температура окружающей среды;  $\tau$  – время;  $L_x, L_y$  – размеры пластины;  $\delta$  – толщина пластины;  $\lambda$  – эффективный коэффициент теплопроводности пластины;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи ( $\alpha = \text{const}$ );  $c$  – теплоемкость пластины,  $\rho$  – плотность пластины,  $q(x, y)$  – поверхностная плотность теплового потока от локальных источников, равная нулю вне зон расположения источников и постоянная в пределах зоны действия каждого  $j$ -го источника;  $P_j$  – мощность, рассеиваемая  $j$ -м локальным источником;  $2\Delta\xi_j, 2\Delta\eta_j$  – размеры области, в которой расположен источник тепловыделений.

Для решения данной задачи применен численный метод конечных элементов, изложенный для задач подобного рода, например в [3].

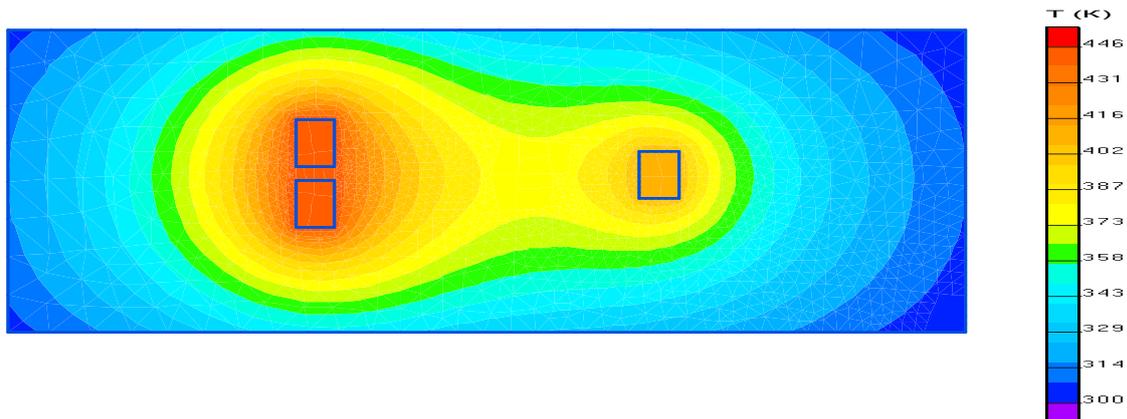


**Рисунок 2. – Упрощенная модель электронной платы**

На рис. 2 приведена упрощенная модель электронной платы в виде пластины с источниками теплоты, где указаны ее геометрические размеры и наложена конечноэлементная сетка.

**Обсуждение результатов.** В качестве расчетной исследовалась электронная плата высокочастотного усилителя мощности, проектируемого на ОАО «Избербашский радиозавод им. П.С. Плешакова».

В модели выделены 3 наиболее тепловыделяющих элемента – транзистора мощностью 120 Вт каждый. Мощность рассеяния остальных элементов электронной платы учтена в виде рассредоточенного по всей остальной площади электронной платы источника теплоты мощностью 20 Вт. В качестве исходных данных принималось:  $\lambda=0.3$  Вт/(м·К) (стеклотекстолит),  $\rho=1600$  кг/м<sup>3</sup>,  $c=950$  Дж/(кг·К),  $T_{cp}=293$  К,  $\alpha=5$  Вт/(м<sup>2</sup>·К), геометрические размеры на рис. 2 приведены в мм.



**Рисунок 3. – Температурное поле электронной платы без системы охлаждения**

На рис.3 приведено двумерное температурное поле такой электронной платы. Из представленных данных следует, что тепловыделяющие элементы на электронной плате имеют высокие пиковые значения температуры, а участки,

не содержащие тепловыделяющих элементов и отдаленные от них, имеют температуры, близкие к температуре окружающей среды.

Причем температура в области платы, соответствующей размещению рядом двух тепловыделяющих элементов 1 и 2, является наибольшей и превышает температуру области 3, соответствующей размещению одного элемента тепловыделения.

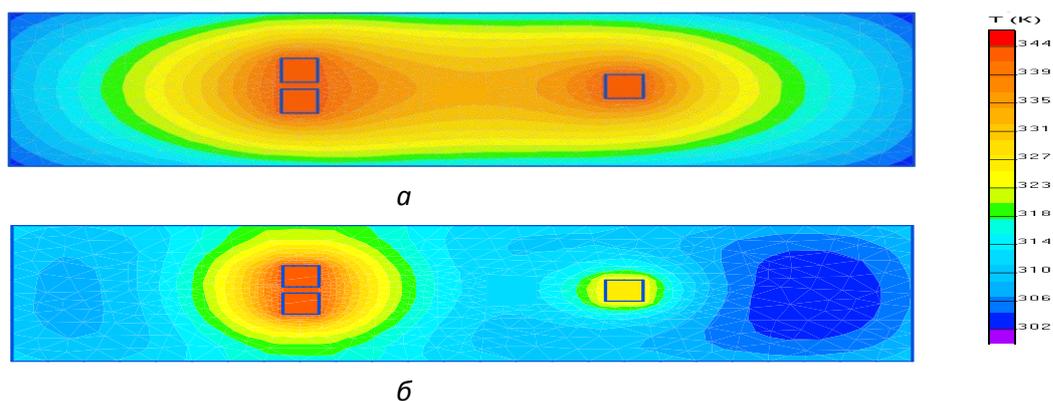
Данное обстоятельство связано с взаимным влиянием двух расположенных рядом источников теплоты в соответствии с принципом суперпозиции температурных полей. Указанное взаимное влияние необходимо учитывать при разработке и исследовании системы охлаждения.

Температурный рельеф электронной платы используется в качестве исходных данных для расчета холодопроизводительности ТЭБ. Целевая функция при этом представляет собой величину мощности, отводимой ТЭБ в окружающую среду для снижения температуры радиоэлементов до допустимых пороговых значений.

Численный расчет производится следующим образом.

1. Определяется количество компонентов электронной платы, имеющих значительную величину мощности рассеяния, температура которых лежит за диапазоном рабочих температур, а также их максимальный перегрев относительно допустимой рабочей температуры. Исходя из указанной информации, определяется количество теплопоглощающих элементов (ТЭБ), помещаемых под источниками теплоты – электронными компонентами платы.
2. Для остальных элементов электронной платы тепловая мощность суммируется и приводится к ее площади.
3. Основываясь на принципе суперпозиции температурных полей, составляется система уравнений, в которых величина необходимого значения температуры элемента электронной платы представляется как разность существующей температуры и температур, создаваемых теплопоглощающими элементами. В системе уравнений неизвестными являются величины мощностей теплопоглощающих элементов.
4. Осуществляется решение полученной системы уравнений.
5. Подбор рабочего вещества с соответствующей температурой плавления осуществляется в зависимости от требуемого температурного режима работы элементов платы. Его количество определяется продолжительностью их работы, а также мощностью тепловыделений.

По найденным значениям отводимых мощностей производится расчет параметров ТЭБ по известным соотношениям [2], либо с использованием программных средств для подбора типовых ТЭБ [4].



**Рисунок 4. – Температурное поле электронной платы при ее неравномерном (а) и равномерном охлаждении (б)**

На рис. 4а, изображено двумерное температурное поле электронной платы при ее неравномерном охлаждении, а на рис. 4б – при равномерном отводе теплоты.

В случае неравномерного охлаждения использовались два стока теплоты (ТЭБ), первый мощностью 148 Вт размещался под двумя тепловыделяющими элементами 1 и 2 (рис.2), второй, мощностью 77 Вт помещался под тепловыделяющий элемент 3. При равномерном охлаждении использовался сток теплоты мощностью 354 Вт.

Как следует из рисунков, при использовании равномерного общего охлаждения электронного узла имеет место трата энергии на охлаждение участков электронной платы, температура которых и без охлаждающей системы лежит в пределах допустимого температурного диапазона.

Подобный подход приводит к увеличению холодопроизводительности, а также габаритов ТЭБ по сравнению с необходимыми. Это в большой степени снижает экономичность системы отвода тепла. Так для приведенных расчетных данных в случае равномерного охлаждения электронной платы ТЭБ требуется в 1,57 раз больше мощности, чем при использовании неравномерного охлаждения. Соответственно увеличивается и потребляемая ТЭБ электрическая энергия.

Применение для охлаждения электронной платы неравномерного локального отвода тепла устраняет этот недостаток. Рисунки показывают, что в этом случае энергия, требуемая для создания заданного температурного режима, меньше, чем при использовании общего равномерного охлаждения. При таком подходе температурное поле радиоэлектронной платы оказывается более однородным, и охлаждение является более эффективным.

Основные характеристики в виде графиков зависимости холодопроизводительности, холодильного коэффициента и напряжения ТЭМ от силы электрического тока при различных значения температуры приведены в [4].

**Вывод.** В ходе исследования рассмотрена математическая модель неравномерного охлаждения электронных плат.

Представлена структурная схема системы, реализующей данный подход, методика расчета температурного поля электронной платы, а также принцип оптимизации ее тепловых характеристик.

Приведены двумерные температурные поля электронной платы при ее равномерном и неравномерном охлаждении, осуществлено их сравнение.

По известным величинам холодопроизводительности может быть осуществлен подбор ТЭБ из стандартного ряда выпускаемых промышленностью ТЭМ.

Для рассмотренного случая в качестве ТЭБ использованы ТЭМ, изготавливаемые ИПФ «Криотерм» типа DRIFT-08, имеющих максимальную холодопроизводительность  $Q_{x\max}=172$  Вт, оптимальный ток  $I_{\max}=11.3$  А, максимальный перепад температур между спаями  $\Delta T_{\max}=69$  К, максимальное напряжение, соответствующее  $I_{\max}$   $U_{\max}=24.6$  В.

#### **Библиографический список:**

1. Устройство для охлаждения электронных плат: пат. 2366130 Рос. Федерация: МПК<sup>7</sup> H05K7/20 / Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Евдулов Д.В., Агаев М.У.: заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет». – №2008129551; опубл. 27.08.2009, Бюл. №24.
2. Исмаилов Т.А. Термоэлектрические полупроводниковые устройства и интенсификаторы теплопередачи. – СПб.: Политехник, 2005. - 534 с.
3. Дульнев Г.Н. Теория тепло- и массообмена. – СПб.: СПбНИУИТМО, 2012. – 195 с.
4. <http://www.krioterm.ru>.

#### **References:**

1. Device for cooling electronic boards: Pat. 2366130 ROS. Federation: МПК7 H05K7/20
2. Ismailov T. A., Avdulov O. V., Avdulov D. V., Aslanov M. U.: The applicant and patent holder FGBOU VO "Dagestan state technical University". No 2008129551; publ. 27.08.2009, bull. No. 24. Ismailov T. A. semiconductor Thermoelectric devices properties and intensifiers of heat transfer. – SPb.: Polytechnic, 2005. - 534 p.
3. Dul'nev G. N. Theory of heat and mass transfer. – SPb.: Spbnet-MO, 2012. – 195p.
4. <http://www.krioterm.ru>.