

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Воронежский государственный технический университет»

Кафедра конструирования и производства радиоаппаратуры

**МЕТОД МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
ТЕПЛОВЫХ ОБРАЗОВ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ
ЭЛЕМЕНТОВ НА ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЕ**

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторной работы по дисциплинам
«Методы автоматизированного проектирования
радиоэлектронных средств» и «Современная методология
автоматизированного проектирования приборов и систем»
для студентов направлений 11.04.03 «Конструирования и тех-
нология электронных средств» и 12.04.01
«Приборостроение» всех форм обучения

Воронеж – 2021

Составители:

д-р техн. наук О.Ю. Макаров
канд. техн. наук И.С. Бобылкин

УДК 621.3

Метод математического моделирования тепловых образов радиоэлектронных элементов на печатной: плате методические указания к выполнению лабораторной работы по дисциплинам «Методы автоматизированного проектирования радиоэлектронных средств» и «Современная методология автоматизированного проектирования приборов и систем» для студентов направлений 11.04.03 «Конструирования и технология электронных средств» и 12.04.01 «Приборостроение» всех форм обучения/ ФГБОУ ВПО "Воронежский государственный технический университет"; сост. О.Ю. Макаров, И.С. Бобылкин. Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2021. 17 с.

Приводятся краткие теоретические сведения и методика моделирования тепловых образов и определения перегревов радиоэлектронных элементов на плате с помощью специализированного ПО при проектировании узлов на печатных платах.

Методические указания подготовлены в электронном виде и содержатся в файле ЛР-МАП РЭС-СМ АППиС.

Табл. 2. Ил. 7. Библиогр.: 6 назв.

Рецензент - Э.И. Воробьев, канд. техн. наук, доц.
кафедры систем автоматизированного
проектирования и информационных систем

Издается по решению редакционно-издательского совета Воронежского государственного технического университета

1. ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ

В последние годы проектирование и создание современных радиоэлектронных систем (РЭС) практически не возможен без предварительного исследования тепловых режимов радиоэлектронных элементов, так и устройства РЭС в целом. Среди различных видов исследования тепловых режимов устройства одним из перспективных является метод математического моделирования, позволяющий провести сравнительно быстро оценку работоспособности, как отдельно взятого радиоэлемента, так и устройства в целом, а также снизить затраты на его конструирование и получить высокую достоверность результатов моделирования.

В процессе выполнения лабораторной работы студент должен выполнить следующие виды работ:

1. Изучить математические методы моделирования тепловых образов;
2. Уяснить методику и структуру алгоритма расчета, необходимого для проведения моделирования теплового образа (теплового портрета) РЭС с учетом взаимного теплового влияния;
3. Согласно исходным данным с помощью программно-методического обеспечения сформировать тепловой портрет радиоэлектронных элементов печатной платы (ПП) и рассчитать собственный перегрев, наведенный перегрев и полный перегрев радиоэлектронных элементов ПП.

2. ЦЕЛЬ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

Получить представление о методе математического моделирования тепловых образов на основе аналитического метода модели пластины с локальными источниками тепла, изучить виды дефектов.

3. ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ЕГО ВЫПОЛНЕНИЮ

3.1. Теоретические сведения

Для выполнения задания необходимо проработать материал, изложенный в [1-6] и в данном разделе.

Основными вопросами, требующими проработки являются:

- тепловой образ элементов ПП;
- способы формирования тепловых образов;
- тепловые и математические модели формирования тепловых образов элементов ПП;
- формирование теплового образа на основе аналитического метода;
- виды дефектов.

3.1.1. Методы математического моделирования тепловых образов элементов ПП

Технология создания РЭС обладающих высокими характеристиками надежности предполагает, что в условиях их проектирования необходимо наличие широкого спектра диагностических процессов направленных на проверку соответствия рабочих характеристик отдельных элементов требуемым номиналам. Одним из таких процессов, который существенным образом влияет на характеристики надежности, является оценка тепловых режимов элементов РЭС и разработ-

ка рекомендаций по выбору номиналов и оптимизации их размещения на этапе эскизно-технического проектирования. Результаты в области экспериментальных исследований [1] показывают, что для блоков РЭС с воздушным охлаждением при изменении температуры от 40 до 70⁰С интенсивность отказов увеличивается в 2...6 раз (см. рис.1). В данных условиях становится очевидным необходимость проектирования таких РЭС, элементы которых могли бы функционировать в оптимальных тепловых режимах, обеспечивающих высокие надежность эксплуатационные характеристики. Одним из путей прогнозирования оптимальных тепловых режимов работы отдельных элементов РЭС является синтезирование и анализ теплового образа, отражающего их температурный режим в виде количественной характеристики.

Математически формировать тепловые образы можно двумя методами:

- Численный метод;
- Аналитический метод.

При расчете пространственных температурных полей в элементах приборов по моделям в основном применяются численные методы. Это связано с тем, что численные методы позволяют проводить расчеты температурных полей в телах сложной формы и в системах тел, учитывать любые пространственно- временные измерения внутренних и внешних тепловых воздействий, а также температурные зависимости и пространственную неоднородность теплофизических свойств. Аналитические решения наиболее часто используют для расчета температурных полей в телах канонической формы (пластин, параллелепипеды, цилиндры и цилиндрические оболочки) при постоянных теплофизических свойствах материалов и при определенных ограничениях на вид граничных условий.

При выполнении данной лабораторной работы используется аналитический метод.

Выбор аналитического описания процесса синтезирования теплового образа элементов печатных плат РЭС прежде

всего обусловлен тем, что при проектировании и оптимизации конструкций, требуются многовариантные расчеты, учитывающие различные комбинации технических характеристик применяемых элементов, их размещение и условия охлаждения.

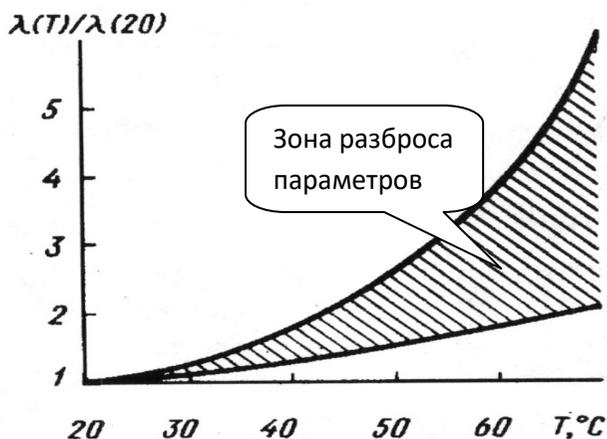


Рис. 1. Изменение интенсивности отказов λ радиоэлементов с температурой T для РЭС с воздушным охлаждением

Аналитическое описание процесса синтезирования теплового образа элементов печатных плат РЭС может быть представлено через модель пластины с локальными источниками теплоты. При этом двумерное стационарное распределение перегрева в пластине $\vartheta(x,y)$ определяется путем решения уравнения [2]:

$$\lambda_x \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial y^2} + \frac{q(x,y)}{\delta} = 0; \quad 0 < x < l_x; \quad 0 < y < l_y, \quad (1)$$

где l_x, l_y - размеры пластины, м;
 δ - толщина пластины, м;
 λ_x, λ_y - эффективные теплопроводности в направлении осей x и y , Вт/(м·К);

α - сумма коэффициентов теплоотдачи с обеих сторон боковой поверхности ($\alpha=\text{const}$), Вт/(м²·К);

$q(x,y)$ - поверхностная плотность теплового потока от локальных источников, равная нулю вне зон расположения источников и постоянная в пределах зоны действия каждого j -го источника, определяемая по формуле:

$$q(x, y) = \sum_{j=1}^{\infty} q_j(x, y); \quad (2)$$

$$q_j(x, y) = \begin{cases} P_j / \Delta x_j \cdot \Delta y_j & \text{при } x_{j1} < x < x_{j2}, \\ y_{j1} < y < y_{j2}; \\ 0, & \text{вне зоны источника.} \end{cases}$$

Во многих практически важных случаях теплоотдачей с торцов можно пренебречь по сравнению с теплоотдачей на боковой поверхности и тогда граничные условия имеют вид:

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial x} \Big|_{x=0} = \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \Big|_{x=l_x} = \frac{\partial \vartheta}{\partial y} \Big|_{y=0} = \frac{\partial \vartheta}{\partial y} \Big|_{y=l_y} = 0 \quad (3)$$

Применив к уравнению (1) конечное интегральное преобразование по переменным x и y , а так же учитывая граничные условия (3) перегрев элементов на плате рассчитывается по формуле:

$$\begin{aligned}
g(x, y) = & \frac{P_j}{\alpha l_x l_y} + \frac{4P_j}{l_x l_y \Delta y_j} \sum_{m=2}^{\infty} \frac{\cos(\beta_m y_{j0}) \sin(\beta_m \Delta y_j / 2)}{\beta_m (\alpha + \lambda_y \beta_m^2 \delta)} \times \\
& \times \cos(\beta_m y) + \frac{4P_j}{l_x l_y \Delta x_j} \sum_{n=2}^{\infty} \frac{\cos(\mu_n x_{j0}) \sin(\mu_n \Delta x_j / 2)}{\mu_n (\alpha + \lambda_x \mu_n^2 \delta)} \times \\
& \times \cos(\mu_n x) + \frac{16P_j}{l_x l_y \Delta x_j \Delta y_j} \sum_{n=2}^{\infty} \sum_{m=2}^{\infty} \frac{\sin(\mu_n \Delta x_j / 2) \sin(\beta_m \Delta y_j / 2)}{\mu_n \beta_m (\alpha + \lambda_x \mu_n^2 \delta + \lambda_y \beta_m^2 \delta)} \times \\
& \times \cos(\mu_n x_{j0}) \cos(\beta_m y_{j0}) \cos(\mu_n x) \cos(\beta_m y),
\end{aligned}$$

где P_j - рассеиваемая мощность, Вт;

β_m, μ_n -собственные числа, определяющие степень аппроксимации изображения;

$\Delta x_i, \Delta y_j$ – размер элемента, м.

Представленный аналитический метод расчёта температурного поля пластины с локальными источниками наиболее адекватно подходит для математической модели синтеза теплового образа различных узлов РЭС, включающих как элементарные резисторы, так и различные микросхемы и микросборки, установленные на общем основании (плате). Применение итогового выражения (4) позволяет рассчитывать любое количество источников. При этом следует заметить, что хотя выражение (4) является несколько громоздким, но обладает существенным достоинством - при ограниченном наборе исходных данных имеет достаточный уровень погрешности при воспроизведении количественных характеристик перегрева элементов РЭС [2].

3.1.2. Виды дефектов радиоэлементов РЭС

Современный уровень развития техники создает предпосылки для значительного увеличения выпуска высококачественных радиотехнической аппаратуры (РЭА). Изготовление любого из РЭА связано с выполнением ряда технологических операций, ориентированных на изготовление различных составляющих, например: сборка печатных узлов или узлов с проводным монтажом, сборку блоков РЭА и т.д. При этом на каждой технологической операции могут появляться дефекты, приводящие к нарушению работоспособности РЭА.

Так дефекты можно разделить на производственные и скрытые дефекты.

Производственные дефекты обусловлены ошибками в конструкторской и технологической документации, наличием на предприятии статистических методов входного контроля (ЭРЭ), нарушением технологического процесса подготовки ЭРЭ к сборке (лужение, формовка и комплектование), нарушением условий хранения и транспортировки ЭРЭ, нарушением технологического процесса изготовления, уровнем квалификации производственного персонала и другими причинами.

Виды производственных дефектов представлен на рис. 2.

Анализ ряда технологических процессов производства печатных узлов показал, что в среднем от 10 до 30% смонтированных радиотехнических печатных узлов, поступающих на операцию регулировки или проверки функционирования, являются дефектными или требуют определенного ремонта [3-6]

Скрытыми же дефектами являются дефекты которые обычно выявляются либо на стадии периодических испытаниях отобранной партии продукции, либо лишь при эксплуатации.

Примерами скрытых дефектов могут быть неустановленные защитные диоды, несоответствующие сопротивления ограничительных резисторов, отсутствие пасты между ЭРЭ и

радиатором, неправильная ориентация полярного ЭРЭ, попадание мусора между ЭРЭ и теплоотводом и т.д.

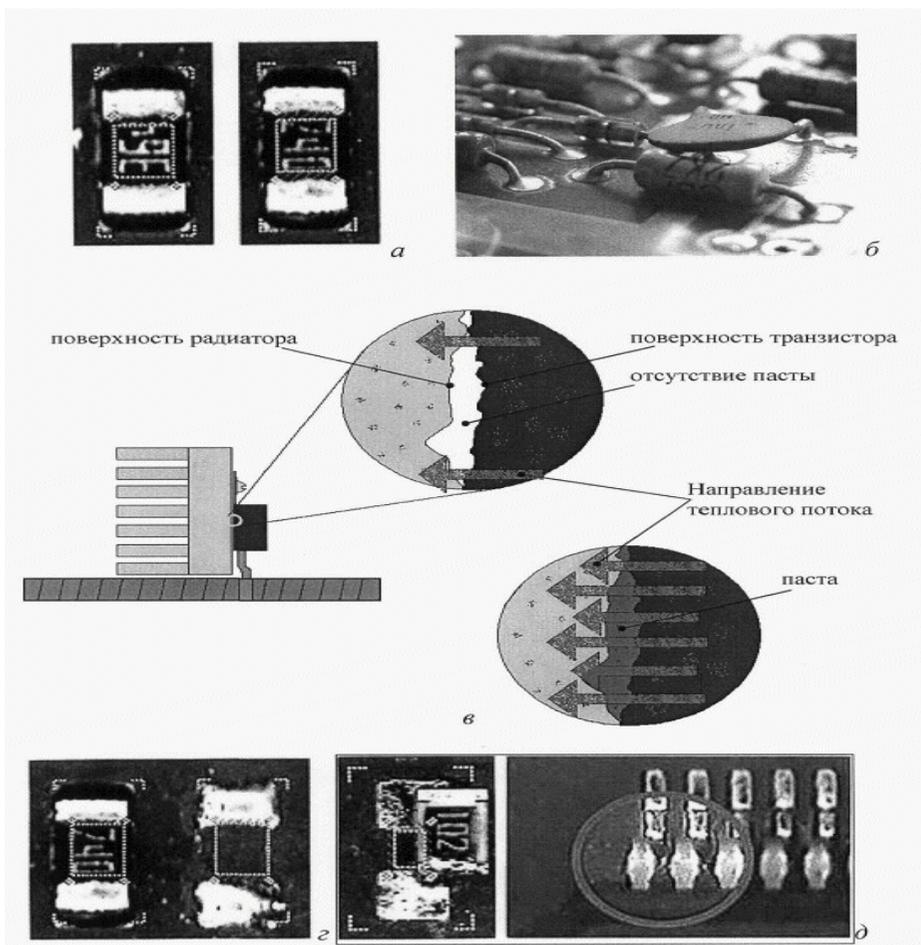


Рис. 2. Производственные дефекты: а – установка другого компонента, б – соприкосновение с другими элементами, в – отсутствие пасты между элементом и радиатором, г - отсутствие компонента, д – смещение компонента.

4. ЛАБОРАТОРНОЕ ЗАДАНИЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ЕГО ВЫПОЛНЕНИЮ

Задание 1 -Ознакомиться с программой моделирования теплового образа элементов ПП.

Загрузка программы осуществляется запуском исполнительного файла ProjectDiplom4.exe.

После запуска программы появляется стартовое диалоговое окно, изображенное на рис. 3. В данном окне осуществляется ввод и вывод данных, проводится диагностика и выводится температурное поле платы для которой будет производиться расчет.

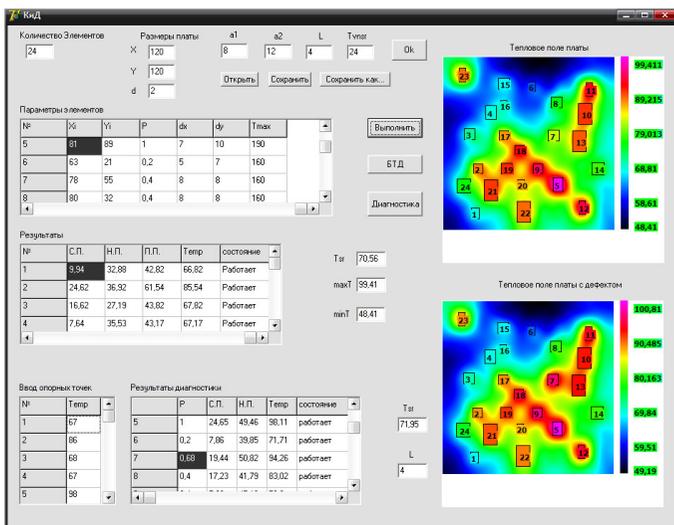


Рис. 3. Основное диалоговое окно программы

Ввод данных осуществляется с помощью полей ввода расположенных в верхней части окна программы, как показано на рис. 4. Здесь необходимо ввести следующие параметры: количество элементов на плате, длина, ширина и толщина платы в миллиметрах, ее теплопроводность и коэффициенты тепло-

отдачи, после чего для подтверждения ввода пользователь должен нажать кнопку «ОК». Далее, в таблице «Параметры элементов» вводятся данные для элементов: длина, мм; ширина, мм; координаты по оси x и y, мм; мощность, Вт; максимальная рабочая температура, К; Также пользователь может воспользоваться базой элементов, в этом случае вводятся только название элемента и его координаты, прочие же данные автоматически берутся из базы.

Количество Элементов: 24

Размеры платы: X: 120, Y: 120, d: 2

a1: 8, a2: 12, L: 4, T_{vnsr}: 24

Параметры элементов:

№	X _i	Y _i	P	dx	dy	T _{max}
5	81	89	1	7	10	190
6	63	21	0,2	5	7	160
7	78	55	0,4	8	8	160
8	80	32	0,4	8	8	160

Результаты:

№	С.П.	Н.П.	П.П.	Temp	состояние
1	9,94	32,88	42,82	66,82	Работает
2	24,62	36,92	61,54	85,54	Работает
3	16,62	27,19	43,82	67,82	Работает
4	7,64	35,53	43,17	67,17	Работает

Т_{ср}: 70,56
maxT: 99,41
minT: 48,41

Рис. 4. Ввод данных и вывод результатов расчета

Далее, в зависимости от стоящей задачи, пользователь может воспользоваться модулем расчета температурного поля, модулем диагностики, или модулем создания базы типовых дефектов.

Расчет температурного поля и первичная диагностика состояния элементов осуществляется при нажатии кнопки «Выполнить». В этом случае в таблице «Результаты» для каждого элемента будут выведены наведенный, собственный и

полный перегревы в кельвинах, в этой же таблице в колонке «состояние» в случае, если температура элемента выше максимально допустимой, будет выведено сообщение о неисправности, как показано на рис. 4. Также, в правом верхнем углу будет отображена температурное поле платы, изображенное на рис. 5, с помощью которой пользователь сможет увидеть картину распределения температуры на плате. Для удобства пользователя справа от рисунка платы расположена цветовая шкала температур, с помощью которой можно определить температуру в любой точке платы.

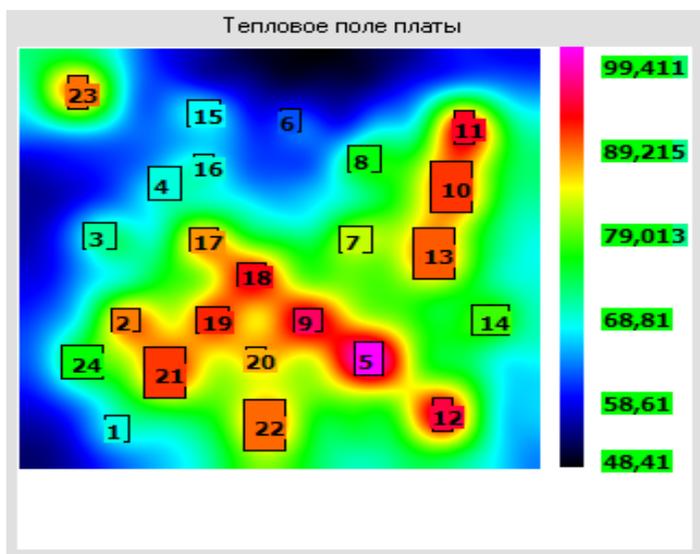


Рис. 5. Тепловое поле платы

Задание 2 - Изучить исходные данные для моделирования теплового образа элементов на ПП.

При выполнении лабораторной работы будет рассмотрен универсальный блок питания, принципиальная схема которого приведена на рис. 6.

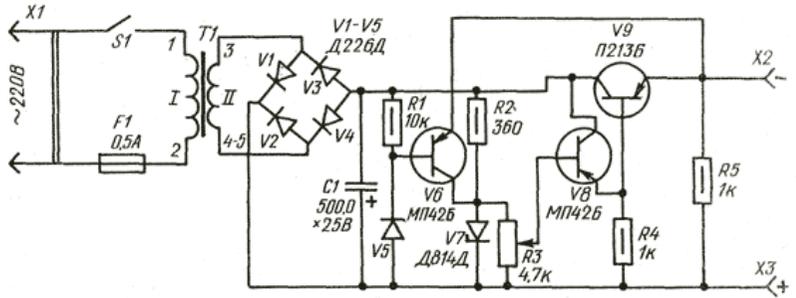


Рис. 6. Схема универсального блока питания
Расположение элементов на плате показано на рис. 7.

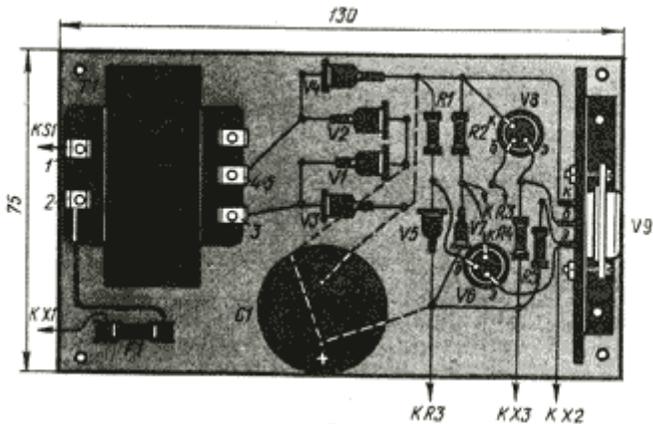


Рис. 7. Расположение деталей на плате

Транзистор V9 установлен на радиаторе и его влияние на нагрев платы незначительно, поэтому при моделировании он рассматриваться не будет. Исходные данные для моделирования представлены в таблице 1 и 2.

Таблица 1
Параметры элементов платы

Номер элемента	Обозначение на схеме	Наименование	Мощность, Вт.	Размер элемента по оси x, мм	Размер элемента по оси y, мм.	Координаты элемента		Максимальная рабочая температура, °С
						по оси x, мм	по оси y, мм	
1	T1	ТВК-110ЛМ	3	21	52	23	28	150
2	V1	Д226Д	0,3	8	4	72	25	80
3	V2	Д226Д	0,3	8	4	72	15	80
4	V3	Д226Д	0,3	8	4	64	35	80
5	V4	Д226Д	0,3	8	4	64	5	80
6	V5	Д226Д	0,3	4	8	83	40	80
7	V6	МП42Б	0,2	10	10	98	49	100
8	V7	Д814Д	0,34	3	6	92	41	125

9	V8	МП42Б	0,2	10	10	107	18	100
10	C1	K50-68	0,6	14	14	61	61	85
11	R1	МЛТ	0,5	3,2	9	88	19	155
12	R2	МЛТ	0,5	3,2	9	94	19	155
13	R3	СП5-16ВВ	0,2	8	8	100	34	125
14	R4	МЛТ	0,5	3,2	9	107	42	155
15	R5	МЛТ	0,5	3,2	9	113	46	155

Таблица 2
Параметры печатной платы

Теплопроводность, Вт/(м·К)	Теплоотдача		Длина, мм	Ширина, мм	Толщина, мм
	с нижней сто- роны, Вт/(м ² ·К)	с верхней сто- роны, Вт/(м ² ·К)			
0,175	10	10	130	75	2

Задание 3 - Сформировать тепловой образ универсального блока питания с использованием заданных выше исходных данных. Для чего необходимо использовать программу формирования тепловых образов элементов ПП, описание которой представлено в пункте 3.1.

Задание 4 - На основе рассчитанного теплового образа ПП провести анализ распределения теплоизлучающих радиоэлектронных элементов ПП и оценить влияние собственного, наведенного и полного перегревов на данные элементы (на основе изменения исходных данных и анализа изменения численных значений температуры радиоэлектронных элементов на ПП).

Кроме того провести анализ на превышение значений расчетных температур полного перегрева радиоэлементов $T_{п.п.}$ максимальных значений рабочих температур радиоэлементов T_{max} (выполнение условия $T_{п.п.} \leq T_{max}$ определяет работоспособность элементов и возможность дальнейшей эксплуатации).

Задание 5 - На основе рассчитанного теплового образа ПП провести анализ распределения теплоизлучающих радиоэлектронных элементов ПП по значению их перегревов. Для радиоэлектронных элементов у которых $T_{п.п.} \geq T_{max}$ разработать рекомендации по снижению их $T_{п.п.}$ до уровня обеспечивающего выполнение $T_{п.п.} \leq T_{max}$. Рекомендации разрабатываются на основе изменения исходных данных, например путем изменения номиналов радиоэлектронных элементов и их взаимного расположения (изменение координат расположения).

5. ОТЧЕТ И КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

5.1. Отчет по работе должен содержать:

- А) наименование работы и ее цель;
- Б) краткие сведения из теории;
- В) исходные данные;
- Г) результат выполнения задания;
- Д) заключение и выводы по результатам работы.

5.2. Контрольные вопросы к лабораторной работе

1. Что такое тепловой портрет печатной платы?
2. Какие существуют способы формирования тепловых образов печатной платы?
3. Что такое математическая модель?
4. Методы математического моделирования тепловых образов (достоинства и недостатки методов)?
5. Виды дефектов?
6. Что такое собственный перегрев, наведенный перегрев и полный перегрев?
7. Назовите основные характеристики влияющие на работу радиоэлемента?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ненашев А.П. Конструирование радиоэлектронных средств.-М.:Высшая школа, 1990г.
2. Дульнев Г.Н., Парфенов В.Г., Сигалов А.В. Методы расчета теплового режима приборов. М.: Радио и связь, 1990 г.
3. Бережной В.П., Дубицкий Л.Г. Выявление причин отказов РЭА. Под ред. Л.Г.Дубицкого. — М.: Радио и связь, 1983.(7)
4. Байда Н.П. и др. Микропроцессорные системы элементного диагностирования РЭА / Н.П.Байда,

И.В.Кузьмин, В.Т.Шпилевой. — М.: Радио и связь, 1987, 256 е.: ил.(2)

5. Пакет программ теплового расчета схемных плат с визуализацией температурных градиентов, // "Электроника". — М.: Мир, 1990, № 3, с.94.(4)

6. Глазунов Л.П., Смирнов А.Н. Проектирование технических систем диагностирования. — Л.; Энергоатомиздат, Ленинградскоеотд-е, 1982, 168 с.

МЕТОД МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ОБРАЗОВ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЕ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторной работы по дисциплинам
«Методы автоматизированного проектирования
радиоэлектронных средств» и «Современная методология
автоматизированного проектирования приборов и систем»
для студентов направлений 11.04.03 «Конструирования и тех-
нология электронных средств» и 12.04.01
«Приборостроение» всех форм обучения
и технология электронных средств» (магистерская программа
«Автоматизированное проектирование и технология
радиоэлектронных средств специального назначения») всех
форм обучения

Составители:

Макаров Олег Юрьевич
Бобылкин Игорь Сергеевич

Компьютерный набор И.С.Бобылкина

Подписано к изданию _____.

Уч.-изд. л. _____.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический
университет»

394026 Воронеж, Московский просп., 14