

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

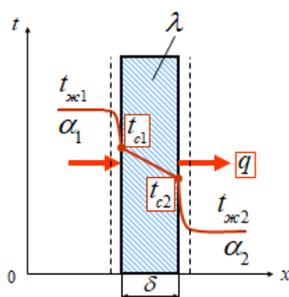
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Воронежский государственный технический университет»

Кафедра конструирования и производства радиоаппаратуры

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ И ПРИБОРОВ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ к лабораторным работам

по дисциплинам «Теплофизические процессы в приборах», «Теплофизические процессы в электронных средствах» для студентов направлений подготовки бакалавров 12.03.01 «Приборостроение» профиль «Приборостроение», 11.03.03, «Конструирование и технология электронных средств» профиль «Проектирование и технология радиоэлектронных средств» очной и заочной форм обучения.



Воронеж 2022

Составитель: канд. техн. наук Н.В. Ципина

УДК 621.3

Моделирование температурных полей микроэлектронных устройств и приборов: методические указания к лабораторным работам по дисциплинам «Теплофизические процессы в приборах», «Теплофизические процессы в электронных средствах» для студентов направлений подготовки бакалавров бакалавров 12.03.01 «Приборостроение» профиль «Приборостроение», 11.03.03 «Конструирование и технология электронных средств» профиль «Проектирование и технология радиоэлектронных средств» по дисциплинам «Теплофизические процессы в приборах», «Теплофизические процессы в ЭС» очной и заочной форм обучения/ ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»; сост. Н.В. Ципина. Воронеж, 2022. 53 с.

В лабораторных работах приводятся краткие теоретические сведения по моделированию температурных полей стоек, блоков, микросборок и модулей на печатных платах, температурных режимов и расчет надежности интегральных микросхем и микросборок с помощью программно-методических комплексов TPL и MSB.

Методические указания снабжены рекомендуемой литературой.

Методические указания подготовлены в электронном виде и содержатся в файле Лаб.раб_TPL_приборы.pdf.

Табл. 6. Ил.18. Библиогр.: 7 назв.

Рецензент д-р техн. наук, проф. О.Ю. Макаров

Ответственный за выпуск зав. кафедрой д-р техн. наук, проф. А.В. Башкиров.

Издается по решению редакционно-издательского совета Воронежского государственного технического университета

Лабораторная работа № 1

РАСЧЕТ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СТОЕК ЭС

1. ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ РАБОТЫ

1.1. Цель работы - изучение моделей и методов исследования теплового режима сложных систем ЭС и расчет их тепловых характеристик с использованием специализированного программного комплекса.

1.2. Содержание работы

Лабораторная работа состоит из домашнего и лабораторного заданий. Домашнее задание заключается в изучении методики расчета стационарного и нестационарного тепловых режимов стойки при использовании воздушного охлаждения, применяемых математических моделей и способов решения уравнений теплового баланса. При выполнении лабораторного задания проводится моделирование тепловых характеристик стойки для различных режимов работы при воздушном охлаждении.

2. ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ЕГО ВЫПОЛНЕНИЮ

Для выполнения задания необходимо проработать материал, изложенный в [1. с. 14-21. 26-30. 68-70. 75-79. 95-96. 163-166, 172- 177; 2 с.30-35, 60-65, 74-75, 84-923 и в данном разделе.

Основными вопросами, требующими проработки, являются:

- метод поэтапного моделирования;
- тепловые модели с неупорядоченным и упорядоченным расположением тел;
- метод электротепловой аналогии и тепловые схемы;

- математические модели с сосредоточенными параметрами;
- метод эффективного тела;
- тепловые проводимости конвекцией и излучением.

В соответствии с методом поэтапного моделирования исследование температурных полей комплекса РЭС начинается с верхнего уровня конструктивной иерархии - стойки. Расчет теплового режима стойки РЭС заключается в определении среднестатистических температур блоков, корпуса стойки и среднеобъемной температуры воздуха внутри корпуса. Теплового моделью стойки является система тел с сосредоточенными теплофизическими параметрами, показанная на рис. 1.

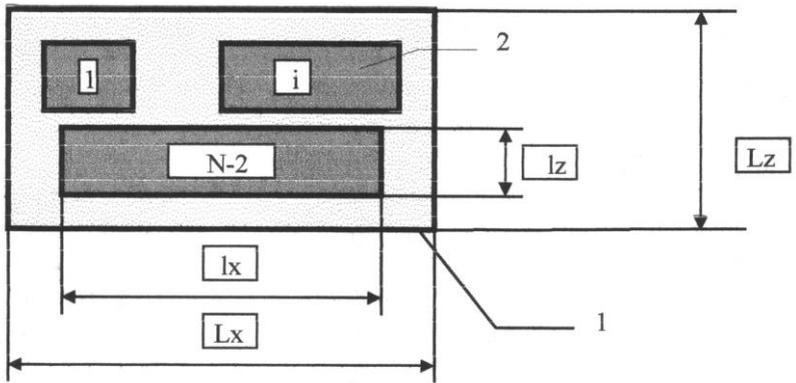


Рис. 1. Тепловая модель стойки:
1 - корпус стойки; 2 - блоки

Блоки моделируются параллелепипедами (1...N-2) с размерами $l_x \times l_y \times l_z$, находящимися внутри замкнутой прямоугольной оболочки N - корпуса стойки ($L_x \times L_y \times L_z$). Воздух, протекающий внутри стойки, рассматривается как тело с номером N-1. Теплообмен между блоками, воздухом внутри корпуса и корпусом, а также между блоками, корпусом и окружающей средой осуществляется путем конвекции и излучения. Выделяемая в блоках тепловая энергия передается воздуху, другим блокам, име-

ющим более низкую температуру, а также идет на нагревание самого блока. Математическая модель, описывающая процесс теплообмена в данной модели, составляется методом теплового баланса и представляет собой систему обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned}
 C_i \frac{dv_i}{d\tau} + \sigma_{ic} v_i + \sum_{j=1, j \neq i}^N \sigma_{ij} (v_i - v_j) &= P, i = 1, N-2, \\
 \sum_{j=1, j \neq N-1}^N \sigma(N-1)j(v_{N-1} - v_j) + 2C_p G v_{N-1} &= 2(C_p)G v_{ex}, \quad (1) \\
 C_B \frac{dv_N}{d\tau} + \sigma_{NC} v_N + \sum_{j=1}^{N-1} \sigma_{Nj} (v_N - v_j) &= P_n,
 \end{aligned}$$

с начальными условиями:

$$v_i(0) = 0, i = 1, N-2, \quad (2)$$

где C_i, C_N – полные теплоёмкости блоков и корпуса стойки;
 v_i, v_{N-1}, v_N – перегревы блоков, воздуха внутри стойкий корпуса;

τ – время;

σ_{ic}, σ_{Nc} – тепловые проводимости блок-среда и корпус-среда;

$\sigma_{ij}, \sigma(N-i)j, \sigma_{Nj}$ – тепловые проводимости блок-блок, воздух-блок и воздух-корпус, корпус-блок и корпус-воздух;

P_i, P_N – мощности, выделяемые в блоках, и суммарная мощность стойки;

c_p – удельная теплоемкость воздуха;

G – массовый расход воздуха.

Для решения системы (1) – (2) используются численные (например, метод Эйлера) или аналитические методы. Точные решения в аналитической форме могут быть получены для $N = 4$, при большей размерности задачи применяются приближенные способы, одним из которых является метод эффективного тела. Сущность данного метода заключается в поочередном выделении из всей совокупности тел одного i -го тела и расчете его температуры. При этом все остальные тела системы рассматриваются в качестве одного тела, называемого эффективным, т. е.

тепловые связи между ними считаются идеальными. В результате, вместо системы N уравнений получаем систему двух уравнений для перегревов выделенного тела v_i и эффективного – $v_{\mathcal{E}}$:

$$C_i \frac{dv_i}{d\tau} + (\sigma_{ic} + \sigma_{i\mathcal{E}})v_i - \sigma_{i\mathcal{E}}v_{\mathcal{E}} = P_i, \quad (3)$$

$$C_{\mathcal{E}} \frac{dv_{\mathcal{E}}}{d\tau} + (\sigma_{\mathcal{E}C} + \sigma_{i\mathcal{E}})v_{\mathcal{E}} - \sigma_{i\mathcal{E}}v_i = P_{\mathcal{E}},$$

с начальными условиями

$$v_i(0) = 0, v_{\mathcal{E}}(0) = 0, \quad (4)$$

где
$$C_{\mathcal{E}} = \sum_{j=1, j \neq i}^N C_j, P_{\mathcal{E}} = \sum_{j=1, j \neq i}^N P_j, \sigma_{\mathcal{E}C} = \sum_{j=1, j \neq i}^N \sigma_{jC}, \sigma_{i\mathcal{E}} = \sum_{j=1, j \neq i}^N \sigma_{ji},$$

Решение системы (3) – (4) для v_i имеет вид

$$v_i = v_i^{CT} + L \exp(-m_i \tau) + M \exp(-m_{\mathcal{E}} \tau), \quad (5)$$

где $v_i^{CT} = [P_{\mathcal{E}} + P_i(1 + \sigma_{\mathcal{E}C} / \sigma_{i\mathcal{E}})] / [\sigma_{ic} + \sigma_{\mathcal{E}C}(1 + \sigma_{ic} / \sigma_{i\mathcal{E}})]$ - стационарный перегрев i – го тела;

$$\begin{aligned} L &= -m_{\mathcal{E}} / (m_{\mathcal{E}} - m_i) v_i^{CT} + \sigma_{i\mathcal{E}} / C_i / (m_{\mathcal{E}} - m_i) P_i / \sigma_{i\mathcal{E}}; \\ m_i &= 0.5 [A - (A^2 - 4D)^{0.5}] \quad m_{\mathcal{E}} = 0.5 [A + (A^2 - 4D)^{0.5}] \\ A &= (\sigma_{i\mathcal{E}} + \sigma_{ic}) / C_i + (\sigma_{i\mathcal{E}} + \sigma_{\mathcal{E}C}) / C_{\mathcal{E}}; \\ D &= \sigma_{i\mathcal{E}} / C_i / C_{\mathcal{E}} (\sigma_{ic} + \sigma_{\mathcal{E}C} + \sigma_{ic} \sigma_{\mathcal{E}C} / \sigma_{i\mathcal{E}}); \\ M &= m_i / (m_{\mathcal{E}} - m_i) v_i^{CT} - \sigma_{i\mathcal{E}} / C_i / (m_{\mathcal{E}} - m_i) P_i / \sigma_{i\mathcal{E}}. \end{aligned}$$

Тепловые проводники, входящие в управление, вычисляются по формула

$$\sigma = (\alpha_l + \alpha_k)S. \quad (6)$$

где S - площадь поверхности корпуса стойки или блока при определении проводимостей блок-среда, корпус-среда, воздух-блок и воздух-корпус или площадь взаимодействующих поверхностей при определении проводимостей блок-блок и блок-корпус;

α_l, α_k - коэффициенты теплоотдачи излучением и конвекцией.

Определение α_l осуществляется на основании закона Стефана-Больцмана α_k - по критериальным уравнениям. Для оценочных расчетов рекомендуются следующие значения: $\alpha_l = 6 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$, $\alpha_k = 12; 9; 6 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$ - для верхних, боковых и нижних поверхностей, соответственно.

3. ЛАБОРАТОРНОЕ ЗАДАНИЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ЕГО ВЫПОЛНЕНИЮ

3.1.1 Общие сведения

Все модули АОС объединены в один исполняющий файл `tpl.exe`, их названия и назначения приведены в таблице 1.

Таблица 1

Используемые модули

Название модуля	Назначение модуля
Autors	Панель с краткими сведениями о программе

Продолжение табл. 1

Basa	Обеспечение выбора радиоэлементов из базы данных
lab1, lab 1_2	Выполнение лабораторной работы №1
lab2, lab2_2	Выполнение лабораторной работы №2
lab3, lab3_2, lab3_3	Выполнение лабораторной работы №3
lab4, lab4_2	Выполнение лабораторной работы №4
lab5, lab5_2	Выполнение лабораторной работы №5
Lib	Изменение базы данных радиоэлементов
Main	Главное меню
Soder	Содержание теоретического материала
Teoria	Панель с теоретическим материалом и средствами навигации в нем
Test	Контроль знаний
Topics	Выбор тем для самостоятельного изучения

При функционировании программы происходит обращение к базам данных. В табл. 2 перечислены названия баз данных и содержащиеся в них данные.

Используемые АОС базы данных

Название базы данных	Содержание базы данных
Элементы.txt	База данных параметров радиоэлементов
tree.txt	Перечень типов радиоэлементов
Вопросы.txt	Перечень контрольных вопросов
Лекции. txt	Теоретический материал
Темы.txt	Перечень тем для самообучения
lek.res	Рисунки для теоретического материала, выполненные в виде файла ресурсов

3.1.2 Используемые технические средства

Для полноценной работы с программой достаточно IBM-совместимого компьютера с вычислительной мощностью обеспечивающей приемлемую работу с операционной системой WINDOWS в графическом разрешении 700x600. Для печати результатов расчета необходим принтер с программным обеспечением позволяющим ему работать в операционной системе WMDOWS. Желательна возможность цветной печати.

3.1.3 Входные и выходные данные расчетных программ

Для выполнения расчета тепловых характеристик стойки РЭС (лабораторная работа №1) необходимы следующие данные: габаритные размеры стойки (длина, ширина, высота), значение теплоемкостей воздуха и корпуса, температура окружающей среды, тип охлаждения (естественное или принудительное), рас-

ход воздуха (в случае принудительного охлаждения), количество блоков в стойке, мощности тепловыделения блоков, тепловые проводимости блок-корпус, блок-воздух, блок-блок и значения теплоемкостей блоков. В результате расчетов будут получены значения перегревов для блоков, газовой среды и корпуса стойки с момента начала наблюдения и до установления стационарного режима.

Исследование теплового режима блока РЭС (лабораторная работа №2) потребует знания следующих параметров: размеры блока (длина, ширина, высота), тип охлаждения, расход воздуха, количество печатных плат в блоке, расстояние между платами, температура окружающей среды, размеры плат, мощности тепловыделения печатных плат. Результатами расчета будут значения среднеповерхностной температуры корпуса блока, средней температуры нагретой зоны, среднеобъемной температуры воздуха и средние температуры печатных плат.

Для моделирования температурных полей модулей на печатной плате (лабораторная работа №3) необходимы размеры печатной платы (длина, ширина, толщина), температура окружающей среды, тип охлаждения, скорость обдува, коэффициент теплопроводности платы, толщина зазора под элементами, теплопроводность материала зазора (воздуха), число элементов на плате, геометрические размеры элементов, координаты центров элементов и их мощность. В результате расчетов будут получены собственные перегревы и температуры радиоэлементов, а также температурная карта печатной платы.

Моделирование температурного поля и расчет надежности интегральной микросхемы (лабораторная работа №4) потребует введения размеров основания корпуса ИМС (длина, ширина, толщина), размеров кристалла (длина, ширина), также необходимо знать тип корпуса (пластмассовый или керамический), вид РЭА в которой используется данная ИМС (лабораторная, переносная, корабельная, автомобильная или железнодорожная), коэффициент теплопроводности основания, мощность рассеивания ИМС, число используемых выводов ИМС, площадь металлизации, температуру среды и корпуса, коэффициент нагрузки

наиболее нагруженного проводника, а также тип выполненных в кристалле элементов, их количество, коэффициент нагрузки, площадь металлизации, число стадий диффузии при изготовлении. Результаты расчета покажут температуру кристалла, интенсивность отказов, 95%-й ресурс, минимальную наработку на отказ, а также будет получен температурный профиль ИМС в виде таблицы и в виде графика.

3.2 Инструкция пользователя

Разработанная программа построена по принципу поэтапного выполнения лабораторных работ с постепенным изучением теоретического материала. Начало выполнения каждой лабораторной работы сопровождается перечнем тем и понятии необходимых для усвоения на данном этапе. Затем следует практическое расчетное задание и в заключение предлагаются контрольные вопросы для проверки усвоенного материала.

После запуска программы (tpl.exe) Вы увидите панель с рядом кнопок овальной формы , а в центре панели перечислены функции этих кнопок. В правом верхнем углу находятся кнопки справки  и выхода из программы  . При наведении курсора мыши на одну из этих кнопок всплывающие подсказки поясняют их назначение. При подведении курсора к одной из овальных кнопок она окрашивается в оранжевый цвет и в центре панели появляется картинка с текстом поясняющие назначение данной кнопки.

Нажатие верхней кнопки позволяет ознакомиться с теоретическим материалом представленным в данной программе. Сначала Вы попадаете в содержание. Выбрав курсором мыши интересующий Вас раздел (при этом выбранный пункт содержания окрасится в красный цвет, а курсор мыши поменяет форму) нажмите левую кнопку мыши и перед Вами появится нужная страница с текстом. Страница содержит кнопки скроллинга: вперед , назад , а также кнопка возврата в главное меню (исходную панель) .

Также возможен переход сразу на определённую страницу. Для этого нужно подвести курсор к текущему номеру страницы и нажать кнопку мыши. Не отводя курсор в сторону, наберите на клавиатуре номер нужной страницы и если такая страница существует, то она появится, в противном случае появится сообщение «Такой страницы не существует» и перехода не произойдет. После просмотра текста возвращайтесь в главное меню.

Вторая кнопка соответствует выполнению первой лабораторной работы. Её нажатие приводит к появлению перечня тем, изучение которых необходимо для выполнения этой работы. Вы можете либо совсем отказаться от их изучения, либо посмотреть материал по одной или нескольким пунктам. Выбор осуществляется также как и в случае с содержанием. При этом Вы попадаете в текст на нужной странице и указатель  показывает соответствующее место в тексте. Кнопка "меню" на этот раз возвращает пользователя не в главное меню, а в перечень тем

для проработки. Нажимаем кнопку , которая означает переход к выполнению лабораторной работы.

Далее будет рассмотрено выполнение первой лабораторной работы. Так как организационная структура всех лабораторных работ одинакова, то всё сказанное далее относится и к остальным лабораторным работам. Существующие отличия и дополнительные функции будут рассмотрены отдельно.

Экран лабораторной работы представляет собой пустой бланк, который необходимо заполнить информацией для расчета (рис.2). Если у Вас уже есть ранее сохранённые данные, то

воспользуйтесь кнопкой  для загрузки данных из файла в бланк. Все кнопки имеют всплывающие подсказки.

Заполнив бланк исходными данными жмите кнопку с изображением калькулятора . Если данные введены корректно, то начнется расчет, в противном случае появится сообщение об ошибке.

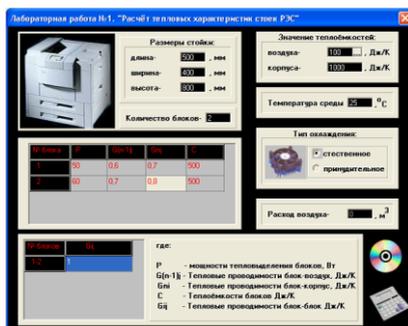


Рис. 2. Бланк с исходными данными

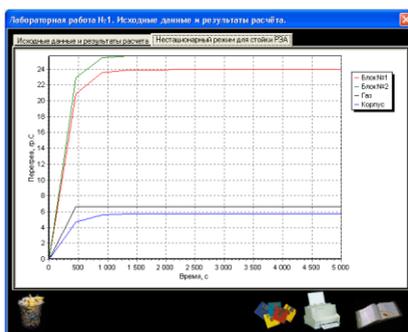


Рис. 3. Результаты расчета

После выполнения расчета Вы перейдете на экран с результатами расчёта рис. 3), которые можно распечатать кнопкой  и сохранить в файл кнопкой . Хотя в файл сохраняются, собственно говоря, не сами результаты расчета, а исходные данные, которые можно будет загрузить и повторно рассчитать. Такое построение позволяет отказаться от хранения излишних файлов. Сохранить непосредственно результаты расчета можно воспользовавшись стандартными средствами Windows.

Изменить исходные данные можно нажав кнопку с изображением мусорной корзины. После окончания работы с результатами переходите на завершающий контрольный этап нажати-



ем кнопки . Вам будет предложено несколько контрольных вопросов по пройденной теме и в случае успешного ответа на все вопросы можете приступать к выполнению следующей лабораторной. Если один из ответов будет неверен, то Вам будет предложено повторить материал.

Рассмотрим некоторые отличительные особенности лабораторных работ. В первой лабораторной работе значение теплоемкости воздуха можно выбрать из табличных значений для определенной температуры, для этого нужно нажать небольшую кнопку справа от окошка для ввода.

В четвертой лабораторной работе Вы увидите значок



, который означает возможность выбора радиоэлектронных элементов из базы данных. При его нажатии появится библиотека с набором диодов, микросхем и резисторов, которые Вы можете использовать в своем расчете. Наберите нужных элементов и жмите кнопку с надписью «закончить», параметры выбранных радиоэлементов появятся в таблице. Расчет в данной лабораторной работе занимает некоторое время в зависимости от количества рассчитываемых элементов, о выполнении расчета Вы сможете судить по полоске прогресса. Результатами расчета являются таблица перегревов и температурная карта печатной платы. Проводя курсором мыши по поверхности печатной платы Вы можете видеть ее температуры в каждой точке, значение которой показывается рядом со значком с изображением термометра. Переключив вид температурной карты с позиции «плата» в позицию «элементы» можно посмотреть значение температуры установленных на печатной плате радиоэлементов.

Выполнение комплекса лабораторных работ завершается тестированием по всему курсу «Теплофизика». Для начала тестирования выберите последний пункт в основном меню.

В верхней части панели расположен список тем по которым будут задаваться вопросы. По каждой теме необходимо ответить на пять теоретических вопросов, результаты ответа на них отображаются кружками синего и красного цвета. В случае

неправильного ответа на экране появляется страница теоретического материала на которой находится ответ на поставленный вопрос.

4. УКАЗАНИЯ ПО ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА И КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ПО ВЫПОЛНЕННОЙ РАБОТЕ

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- наименование и цель работы;
- используемые тепловые и математические модели стойки;
- исходные данные и результаты расчетов;
- заключение и выводы по результатам работы.

Контрольные вопросы к лабораторной работе:

- метод поэтапного моделирования;
- тепловые модели с неупорядоченным и упорядоченным расположением тел;
- метод электротепловой аналогии и тепловые схемы;
- тепловые и математические модели с сосредоточенными параметрами;
- метод эффективного тела;
- тепловые проводимости конвекцией и излучением.

Лабораторная работа № 2

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА БЛОКА ЭС

1. ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ РАБОТЫ

1.1. Цель работы - ознакомление с методом исследования температурного режима работы блоков радиоэлектронных устройств на ПЭВМ с использованием специализированного программно-методического комплекса tpl.exe.

1.2. Содержание работы

Лабораторная работа состоит из домашнего и лабораторного заданий. Домашнее задание заключается в изучение методики определения перегрева блока ЭС. Лабораторное задание заключается в расчете на ЭВМ температур корпуса блока, нагретой зоны, воздуха внутри блока и средних температур плат, входящих в блок.

1.3. Используемое оборудование

Для выполнения лабораторной работы используется ПЭВМ типа IBM PC, имеющая математический сопроцессор, цветной монитор с графическим адаптером VGA и принтер.

2. ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ЕГО ВПОЛНЕНИЮ

Для выполнения задания необходимо ознакомиться с методом определения перегрева корпуса блока РЭС и печатных плат в блоках [1, С. 172-191; 2, С. 6-14, 30-34, 215-228;].

Основными вопросами, требующими проработки, являются:

- применение метода поэтапного моделирования к исследованию температурного режима работы ЭС;
- тепловая и математическая модели блока;
- способ определения средних температур плат в блоках;
- тепловые проводимости конвекцией и излучением.

Для определения перегрева радиоэлемента или ИС необходимо учесть влияние температурных полей других составных частей РЭС. В связи с этим требуется проанализировать тепловой режим работы аппаратуры начиная с верхнего уровня иерархии (блок, плата в блоке, элемент на плате).

Тепловая модель блока представлена на рис. 4.

Реальные платы с элементами заменены пластинами с размерами l_x , l_y и с эффективными толщинами d_n , определяемыми из условия:

$$d_n = \delta_n + V_{ns}/l_x l_y, \quad (7)$$

где δ_n - толщина платы;

V_{ns} - суммарный объем всех элементов, установленных на плату.

Эффективная ширина b_n канала равна $b_n = h_n - d_n$, где h_n - шаг установки плат с номерами n и $n-1$.

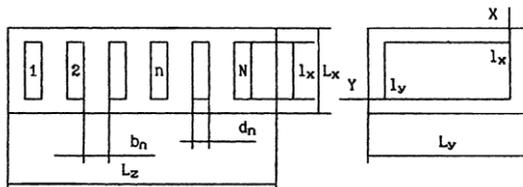


Рис. 4. Тепловая модель блока

Средние температуры корпуса, нагретой зоны и воздуха находятся как

$$T_k = T_{cp} + P_c / \sigma_{k,cp}, \quad (8)$$

$$T_B = T_k + \frac{P_c}{\sigma_{\text{э.к}} + (1/\sigma_{B,k} + 1/(\sigma_{\text{э.об1}} + \sigma_{\text{э.об2}}))^{-1}}. \quad (9)$$

$$U_{\text{э}} = (P_c - \omega_{\text{э.к}}(T_{\text{э}} - T_k)) / (\sigma_{\text{э.к}} + T_k). \quad (10)$$

где T_k , $T_{\text{э}}$ - средние температуры корпуса и зоны,

$U_{\text{в}}$ - средняя температура воздуха;

T_{cp} - температура окружающей среды;

P_c - суммарная мощность, выделяющаяся в блоке;

$b_{k,cp}$ - суммарная тепловая проводимость от корпуса в среду;

$b_{\text{э.к}}$ - лучистая тепловая проводимость между нагретой зоной и корпусом;

$b_{B,k}$ - конвективная тепловая проводимость между воздухом и корпусом;

$b_{\text{э.в1}}$, $b_{\text{э.в2}}$ - между зоной и воздухом на внутренней и наружной поверхности нагретой зоны.

Все тепловые проводимости вычисляются на основе формул вида $b_i = \alpha_i S_i$, где α_i - соответствующий коэффициент теплоотдачи; S_i - площадь поверхности, на которой происходит теплообмен.

Вводятся следующие характерные площади: S_k - площадь поверхности корпуса ($S_k = 2(L_x L_y + L_x L_z + L_y L_z)$); S_Σ - площадь излучающей поверхности нагретой зоны ($S_\Sigma = 2(l_x l_y + l_x l_z + l_y l_z)$); $S_{\Sigma, B1}, S_{\Sigma, B2}$ - площади внешней и внутренней поверхностей нагретой зоны, омываемой воздухом в каналах ($S_{\Sigma, B1} = 2(N-1)l_x l_y$; $S_{\Sigma, B2} = 2l_x l_y + 2Nd(l_x l_y)$) (см. рис. 5).

При неравномерном распределении мощностей по платам применяется соотношение

$$T_n = T_{cp} + (T_\Sigma - T_{cp})(0,85 + 0,12K_{pn}), \quad (11)$$

$$K_{pn} = P_n / P; P = P_c / N; \quad (12)$$

где K_{pn} - коэффициент неравномерности распределения мощностей по платам;

P - средняя мощность, приходящаяся на одну плату.

3. ЛАБОРАТОРНОЕ ЗАДАНИЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ЕГО ВЫПОЛНЕНИЮ

Ознакомиться с назначением, возможностями и порядком работы со специализированным программно-методическим комплексом (ПМК) `tpl.exe` и рассчитать стационарный тепловой режим блока РЭС при использовании естественного воздушного охлаждения.

Расчет теплового режима блока проводится в порядке, приведенном в п. 3 лабораторной работы № 1.

4. УКАЗАНИЯ ПО ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА И КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ПО ВЫПОЛНЕННОЙ РАБОТЕ

4.1 Отчет по лабораторной работе должен содержать

- наименование и цель работы;
- используемые тепловые и математические модели блока;
- исходные данные и результаты расчетов;
- заключение и выводы по результатам работы

4.2 Контрольные вопросы к лабораторной работе:

- тепловая модель блока;
- математические модели, описывающие тепловой режим блока;
- методика определения перегрева сложных комплексов РЭС;
- способ расчета средних температур печатных плат;
- тепловые проводимости конвекцией и излучением.

Лабораторная работа № 3

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ МОДУЛЕЙ НА ПЕЧАТНЫХ ПЛАТАХ

1. ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ РАБОТЫ

1.1. Цель работы - ознакомление с методами анализа температурных полей модулей на печатных платах и проведение моделирования на ПЭВМ с использованием специализированного ПМК.

1.2. Содержание работы

Лабораторная работа состоит из домашнего и лабораторного заданий. Домашнее задание заключается в изучении методики определения перегрева и температуры модулей на печатной плате аналитическим способом при естественном и принудительном охлаждении.

Лабораторное задание - в моделировании температурного поля платы для случаев естественного и принудительного воздушного охлаждения.

1.3. Используемое оборудование

Для выполнения лабораторной работы используется ПЭВМ типа IBM PC, имеющая математический сопроцессор, цветной монитор с графическим адаптером VGA и принтер.

2. ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ЕГО ВЫПОЛНЕНИЮ

Ознакомиться со способами расчета перегрева и температуры модулей, установленных на печатной плате.

Для выполнения задания необходимо проработать материал, изложенный В С1. С. 227-229; 2, с. 170-173, 228-238; 3, с 14-21. 89-95; 4. с. 98-102 3.

Основными вопросами, требующими проработки, являются:

принципы суперпозиции тепловых полей и местного влияния;

тепловые и математические модели узла на печатной плате;

расчет температурного поля ИС, установленной на плате, аналитическим методом при естественном и принудительном охлаждении;

способы охлаждения платы и ИС, установленных на ней.

Моделирование температурного поля узла на плате заключается в определении температур корпусов ИС T_k , установленных на плате.

При этом плата с элементами заменяется тепловой моделью, получаемой путем идеализации конструкции и процессов теплообмена. Тепловая модель платы представляет собой пластику с поверхностными источниками тепла (см. рис. 5). Теплообмен с окружающей средой происходит путем конвекции и излучения с верхней и нижней поверхности пластины. Каждый из установленных на плате элементов (ИС) представляется прямоугольным параллелепипедом с размерами (dX , dY , dZ) и внутренним источником тепловой энергии мощностью P . Этот тепловой поток частично передается в плату путем теплопроводности через зазор d , между дном корпуса ИС и платой (зазор может быть заполнен воздухом, клеем и т.д.); а частично рассеивается конвекцией и излучением непосредственно с поверхности корпуса элемента (см. рис. 6). Распределение потока теплоты зависит от величин тепловых проводимостей: корпус-среда ($b_{к-с}$), корпус-плата ($b_{к-п}$) и плата-среда ($b_{п-с}$). Тогда собственный перегрев элемента относительно окружающей среды T_c вычисляется

$$v_{ki} = P_i / (\sigma_{k-ci} + 1 / (1 / \sigma_{k-ni} + 1 / \sigma_{n-ci})), \quad (13)$$

где v_k – собственный перегрев корпуса i – го элемента;
 P_i – рассеиваемая элементом мощность.

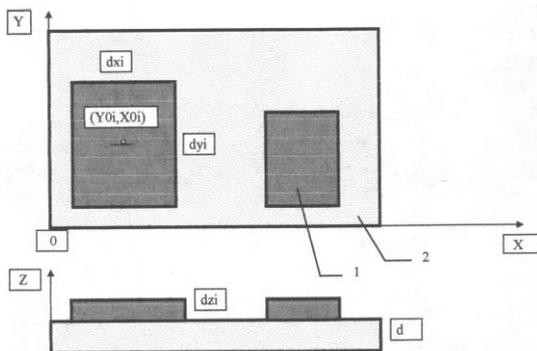


Рис. 5. Тепловая модель платы:
 1 – элемент (ИС); 2 – плата (пластина)

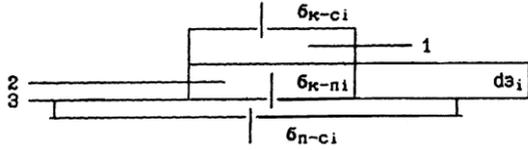


Рис. 6. Теплоотдача элемента:
1 - элемент; 2 - зазор; 3 - плата

Для учета взаимовлияния всех элементов, расположенных на плате, воспользуемся принципом суперпозиции температурных полей. Согласно ему температура корпуса i -го элемента представляется в виде

$$T_{k,i} = T_c + v_{k,i} + \sum_{j=1, i \neq j}^N v_{ji} \quad (14)$$

где $T_{k,i}$ - температура корпуса i -го элемента;
 T_c - температура окружающей среды (воздуха);
 $v_{k,i}$ - собственный перегрев i -го элемента;
 v_{ji} - наведенный перегрев i -го элемента, вызванный тепловыделением j -го элемента;
 N - число элементов на плате.

Для определения значения v_{ji} необходимо моделировать температурное поле пластины с плоскими историками тепла на поверхности (см. рис. 7). Температурное поле такой пластины описывается уравнением теплопроводности

$$\lambda \frac{d^2 v}{dX^2} + \lambda \frac{d^2 v}{dY^2} + \lambda \frac{d^2 v}{dZ^2} - \alpha v + \frac{q}{d} = 0, \quad (15)$$

где λ - коэффициент теплопроводности материала платы;
 α - суммарный коэффициент теплоотдачи конвекцией и излучением с поверхностями платы;
 d - толщина платы;

q - плотность теплового потока источника:
 $q = P/dX/dY$ - в области источника,
 $q = 0$ - вне источника.

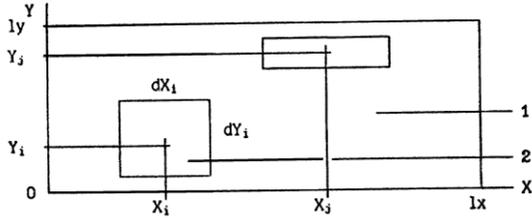


Рис. 7. Пластина с плоскими источниками тепла:
 1 - пластина; 2 - источник тепла

Теплоотдачей с торцов платы пренебрегаем, т. к. она незначительна, и граничные условия имеют вид:

$$\frac{dv}{dX}|_{X=0} = 0 = \frac{d}{dY}|_{Y=0} = \frac{dv}{dX}|_{X=lx} = \frac{dv}{dY}|_{Y=ly} = 0 \quad (16)$$

Уравнения (15) и (16) решаются методом конечных интегральных преобразований. Выражение для перегрева, создаваемого источником тепла с координатами (X_0, Y_0) , имеет вид

$$v(X, Y) = \frac{P}{\alpha l x l y} + A + B + C, \quad (17)$$

где

$$\begin{aligned}
 A &= \frac{4P}{l x l y d Y} \sum_{m=2}^{\infty} \frac{\cos(\beta_m Y_0) \sin(\beta_m d Y / 2)}{\beta_m (\alpha + \lambda \beta_m^2 d)} \cos(\beta_m Y); \\
 B &= \frac{4P}{l x l y d X} \sum_{n=2}^{\infty} \frac{\cos(\mu_n X_0) \sin(\mu_n d X / 2)}{\mu_n (\alpha + \lambda \mu_n^2 d)} - \cos(\mu_n X); \\
 C &= \frac{16P}{l x l y d X d Y} \sum_{n=2}^{\infty} \sum_{m=2}^{\infty} \frac{\sin(\mu_n d X / 2) \sin(\beta_m d Y / 2)}{\mu_n \beta_m (\alpha + \lambda (\mu_n^2 + \beta_m^2) d)} \times \\
 &\quad \times \cos(\mu_n X_0) \cos(\beta_m Y_0) \cos(\mu_n X) \cos(\beta_m Y); \\
 &\quad \beta_m = (m-1)\pi / l y; \\
 &\quad \mu_n = (n-1)\pi / l x;
 \end{aligned}$$

X, Y - координаты точки» где определяется перегрев.

Выражения (13) - (17) представляют собой математическую модель теплового режима модуля.

При различных видах охлаждения изменяются значения конвективных коэффициентов теплоотдачи с поверхностей модулей.

Для вычисления этих коэффициентов проверяется условие

$$T_{ki} - T_c < (0.84 / L)^3, \quad (18)$$

где T_{ki} - температура корпуса i -го элемента (T_{ki} задается, $T_{ki} > T_c$);

T_c - температура окружающей среды;

L - определяющий размер: dZi - для боковой поверхности i -го элемента; меньший размер из dXi и dYi - для верхней поверхности элемента.

Если (18) выполняется, то расчет ведется по формуле

$$\alpha_{ki} = A_2((T_{ki} - T_c) / L), \text{ Bm} / \text{m}^2 \text{K}, \quad (19)$$

если не выполняется, то по формуле

$$\alpha_{ki} = A_3(T_{ki} - T_c). \quad (20)$$

где α_{ki} - конвективный коэффициент теплоотдачи;

A_2, A_3 - коэффициенты, включающие физические параметры воздуха.

Значения параметров воздуха выбираются для температура $(T_c + T_{ki})/2$.

В случае принудительной вентиляции конвективные коэффициенты равны

$$\alpha_{k,\bar{\delta}} = \alpha_{\alpha,\bar{\delta}} = 0.8\sqrt{(vl/\lambda_g)(v_g/l)}, \quad (21)$$

где $\alpha_{к.бi}$, $\alpha_{к.вi}$ - конвективные коэффициенты теплоотдачи с боковой и верхней поверхностей элемента.

l - размер элемента в направлении обдува;

v - скорость обдува.

Значения параметров воздуха берутся для температуры T_c . Лучистый коэффициент теплоотдачи i -го элемента определяется как

$$\alpha_{лi} = 5,67 \frac{(T_{ки}/100) - (T_c/100)}{T_{ки} - T_c}, \text{Вт}/(\text{м}^2\text{К}). \quad (22)$$

Тепловые проводимости корпус-плата и корпус-среда для i -го элемента вычисляются по формулам

$$\sigma_{к-ни} = dz_i / \lambda_3 / S_{ни}, \quad (23)$$

$$\sigma_{к-ci} = \alpha_{ли}(S_{вi} + S_{бi}) + \alpha_{к.бi}S_{бi} + \alpha_{к.вi}S_{вi}, \quad (24)$$

где $S_{ни}$ - площадь нижней поверхности i -го элемента;

λ_3 - коэффициент теплопроводности материала, заполняющего зазор под элементом.

$S_{вi}$ и $S_{бi}$ - площади верхней и боковой поверхностей i -го элемента

Лучистый $\alpha_{п.л}$ и конвективный $\alpha_{п.к}$ коэффициенты теплоотдачи для платы определяются аналогично соответствующим коэффициентам для модуля.

Вычисляется перегрев платы $v(X_i, Y_i)$ под i -м элементом по выражению (5) при: $X_0 = X_i$; $Y_0 = Y_i$; $X = X_i$; $Y = Y_i$; $P = P_i$; $dX = dX_i$; $dY = dY_i$; $\alpha = \alpha_n = 2(\alpha_{п.л} + \alpha_{п.к})$

Проводимость плата-среда для i -го элемента определяется на основании найденного $v(X_i, Y_i)$

$$\sigma_{n-ci} = (P_i - 0.5\alpha_n dX_i dY_i v(X_i, Y_i)) / v(X_i, Y_i). \quad (25)$$

Наведенные перегревы v_{ij} ($j=1, N; i \neq j$) от элемента i на другие элементы j определяются по (5), где: $X_0 = X_i; Y_0 = Y_i; X = X_j; Y = Y_j; dX = dX_i; dY = dY_i; \alpha = \alpha_n; P = P_i K_i$.

$$K_i = \sigma' / (\sigma' + \sigma_{k-c}),$$

$$\sigma' = 1 / (\sigma_{k-n} + 1 / \sigma_{n-c}).$$

3. ЛАБОРАТОРНОЕ ЗАДАНИЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ЕГО ВЫПОЛНЕНИЮ

Ознакомиться с назначением, возможностями и порядком работы со специализированным программно-методическим комплекса (ПМК) `tpl.exe` и провести моделирование температурного поля платы.

Расчет проводится в порядке, приведенном в п. 3 лабораторной работы N 1.

4. УКАЗАНИЯ ПО ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА И КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ПО ВЫПОЛНЕННОЙ РАБОТЕ

4.1. Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- наименование и цель работы;
- тепловая и математические модели платы с установленными элементами;
- исходные данные и результаты расчетов;
- заключение и выводы по результатам работы.

4.2. Контрольные вопросы к лабораторной работе:

- тепловая модель платы;
- тепловая модель элемента, установленного на плате;
- математическая модель температурного поля платы;
- математическая модель перегрева элемента;
- принципы суперпозиции и местного влияния;
- конвективный и лучистый коэффициенты теплоотдачи.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ И РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ ИНТЕГРАЛЬНОЙ МИКРОСХЕМЫ

1. ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ РАБОТЫ

1.1. Цель работы - ознакомление с методами моделирования температурных полей и методами расчета надежности интегральных микросхем с использованием специализированного программно-методического комплекса (ПМК) tpl.exe.

1.2. Содержание работы

Лабораторная работа состоит из домашнего и лабораторного заданий. Домашнее задание заключается в изучении математических моделей, используемых для расчета теплового режима интегральной микросхемы (ИС) и определения показателей ее надежности. При выполнении лабораторного задания определяется перегрев и степень надежности ИС.

1.3. Используемое оборудование.

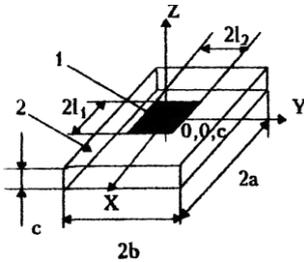
Для выполнения лабораторной работы используется ПЭВМ типа IBM PC с цветным монитором и принтером.

2. ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ЕГО ВЫПОЛНЕНИЮ

Для выполнения задания необходимо проработать материал, изложенный в [1-5] и в данном разделе.

- Основными вопросами, требующими проработки являются: теплофизическая модель ИС в керамическом корпусе;
- метод вычисления коэффициента теплоотдачи с поверхности корпуса ИС;
- метод дихотомии; расчет температурного поля ИС аналитическим методом;
- математическая модель для определения параметров надежности полупроводниковой ИС;
- метод физики отказов.

Для расчета температурного поля ИС в керамическом корпусе используется тепловая модель, изображенная на рис. 8. Как видно из рисунка, тепловая модель представляется в виде параллелепипеда, моделирующего корпус (2), с плоским источником тепла, имитирующим кристалл (1), на верхней грани. Тепловой поток отводится от кристалла к Корпусу путем теплопроводности, а от него - конвекцией и излучением в окружающую среду. Размеры корпуса: a - длина, b - ширина, c - высота. Размеры кристалла: $2l_1$, $2l_2$ длина и ширина соответственно. Все размеры представляются в миллиметрах. Тогда математическая модель запишется в виде:



$$\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial z^2} = 0, \quad (26)$$

$$\left. \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \right|_{x=0} = \left. \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \right|_{x=2a} = 0; \quad (27)$$

$$\left[\frac{\partial \vartheta}{\partial x} + \frac{\alpha x}{\lambda} \vartheta \right]_{x=a} = 0; \quad (28)$$

Рис 8. Тепловая модель ИС:
1 - источник тепла (кристалл);
2 - корпус ИС.

$$\left[\frac{\partial \vartheta}{\partial y} + \frac{\alpha y}{\lambda} \vartheta \right]_{y=a} = 0 \quad (29)$$

$$\left. \frac{\partial \vartheta}{\partial z} \right|_{z=c} = \frac{q(x, y)}{\lambda}; \quad \left[\frac{\partial \vartheta}{\partial z} - \frac{\alpha z}{\lambda} \vartheta \right]_{z=0} = 0; \quad (30)$$

где $\vartheta = T(x, y, z) - T_c$ - перегрев кристалла по отношению к окружающей среде;

$\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$ - коэффициенты теплоотдачи с поверхностями, перпендикулярных соответствующим координатным осям;
 λ - коэффициент теплопроводности материала корпуса;
 q - интенсивность источника тепла;

$$q = \begin{cases} P/4l_1l_2 & \text{при } |x| \leq l_1, |y| \leq l_1 \\ 0 & \text{в остальной области} \end{cases}$$

Решение этой системы получено методом интегральных преобразований и имеет следующий вид.

$$\vartheta\lambda = \sum_n \sum_k \frac{\cos \nu_n \frac{x}{a} \sin \mu_n \frac{l_1}{a}}{\mu_n + \sin \mu_n \cos \mu_n} \cdot \frac{\cos \nu_k \frac{y}{b} \sin \nu_k \frac{l_2}{b}}{\nu_k + \sin \nu_k \cos \nu_k} \cdot \frac{ch\gamma_{nk} \frac{z}{c} + \frac{Biz}{\gamma_{nk}} sh\gamma_{nk} \frac{z}{c}}{\gamma_{nk} sh\gamma_{nk} + Biz ch\gamma_{nk}}; \quad (31)$$

где μ_n, ν_k - корни трансцендентных уравнений:

$$ctg\mu_n = \frac{\mu_n}{Bi_x}; ctg\nu_k = \frac{\nu_k}{Bi_y}$$

$Bi_x = \alpha_x a / \lambda; Bi_y = \alpha_y b / \lambda; Bi_z = \alpha_z c / \lambda$ - критерий Био;

$$\gamma_{nk} = \sqrt{\mu_n^2 \frac{c^2}{a^2} + \nu_k^2 \frac{c^2}{b^2}}$$

При расчете полагаем, что $\alpha_x = \alpha_y$. В лабораторной работе возможны три варианта задания исходных данных: температура корпуса ИС; температура окружающей среды; обе температуры. В зависимости от варианта коэффициент теплоотдачи рассчитывается по - разному.

Сначала определяется закон теплообмена по критерию

$$(T_k - T_c) \leq (840/L)^3 \quad (32)$$

где L - определяющий размер пластины (наименьший размер корпуса) в миллиметрах.

Если равенства выполняется, то теплообмен подчиняется закону 1/4 степени, иначе - 1/3 степени. Так как коэффициент теплоотдачи складывается из лучистой и конвективной составляющих, то для первого случая (закон 1/4) получим:

$$\alpha_{zk} = (1,42 - 1,14 \cdot 10^{-3} T_M) [(T_k - T_c)/L]^{1/4}; \quad (33)$$

$$\alpha_{\lambda} = 5,67 \frac{\left(\frac{T_k + 273}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_c + 273}{100}\right)^4}{T_k - T_c} \varepsilon_{\eta} \quad (34)$$

где $\varepsilon_{\eta} = 0,6$ - приведена степень черноты.

$$\alpha_z = \alpha_{zk} + \alpha_{\lambda}; \quad (35)$$

$$\alpha_x = \alpha_y = \alpha_{\lambda k} + \alpha_{\lambda}. \quad (36)$$

Значения коэффициента теплоотдачи для закона 1/3 степени получаются аналогично, за исключением конвективной составляющей:

$$\alpha_{zk} = (1,67 - 3,6 \cdot 10^{-3} T_M)(T_k - T_c)^{1/3} \quad (37)$$

В случае задания и температуры корпуса и температуры среды расчет окончен. Иначе он осуществляется методом итераций. На первом шаге находят величину S_u :

$$S_u = \alpha_z 8ab + \alpha_x (4ac + 4bc), \quad (38)$$

где S_u - сумма произведений коэффициентов теплоотдачи на площади теплоотдающих поверхностей.

На следующем шаге определяется расчетная температура корпуса ($T_{кр}$) или среды ($T_{ср}$):

$$T_{кр} = T_c + P/S_u, \quad (39)$$

$$T_{ср} = T_k - P/S_u, \quad (40)$$

Если разность между расчетными температурами и исходными данными меньше некоторого ε , то расчет окончен. Иначе осуществляется новый расчет коэффициентов теплоотдачи, но вместо T_c , T_k используются значения $T_{ср}$, $T_{кр}$.

Для решения трансцендентных уравнений использовался метод дихотомии.

Как известно, температурный режим существенно влияет на надежность работы ИС. Для оценки надежности работы ИС применяются следующие параметры: интенсивность отказов (ч^{-1}), 95 %-й ресурс (ч). Определение указанных параметров для полупроводниковой ИС осуществляется на основе математической модели надежности ИС, полученной на основе причинного метода (метода физики отказов). Для построения модели выделяются компоненты ненадежности ИС, соответствующие различным деградационным процессам. К таким компонентам относятся; корпус, кристалл, внешние контактные соединения, металлизация. Модель для расчета надежности ИС имеет вид

$$\lambda = K_M \sum_{j=1}^m n_j g_j \lambda_j, \quad (41)$$

где K_M - коэффициент, учитывающий механические воздействия, его значение определяется объектом установки РЭА;

m - количество типов компонентов ненадежности;

n - число однотипных компонентов ненадежности;

g_j - коэффициенты нагрузки (электрической, тепловой, механической и т.д.);

λ_j - частные интенсивности отказов по соответствующим компонентам ненадежности.

Значения K_M определяются из табл. 1:

Таблица 3

Вид РЭА	Значение K_M
Лабораторная	1,0
Переносная	1,07
Корабельная	1,37
Автомобильная	1,46
Железнодорожная	1,54
Авиационная	1,65

Значения λ_j в выражении (41) для транзисторов, диодов, диффузионных резисторов, конденсаторов определяются по формуле

$$\lambda_j = \lambda_{\text{диф}} N_{\text{диф}_j} + \lambda_{\text{нв}} S_j, \quad (42)$$

где $\lambda_{\text{диф}}$ - интенсивность отказов, определяемая дефектами диффузии для одной стадии ($\lambda_{\text{диф}} = 0,42 \cdot 10^{-9} \text{ч}^{-1}$);

$N_{\text{диф}_j}$ - число стадий диффузии при изготовлении данного элемента;

$\lambda_{\text{пв}}$ - интенсивность отказов, определяемая дефектами от посторонних включений ($\lambda_{\text{пв}} = 0,65$ на 1мм^2 площади элемента).

Значения λ_j для металлизации, кристалла, корпуса и соединений вычисляются на основании выражений:

$$\lambda_{\text{мет}} = (\lambda_{\text{о.мет}} + \lambda_{\text{пв}}) S_{\text{мет}}, \quad (43)$$

$$\lambda_{\text{кр}} = \lambda_{\text{о.кр}} S_{\text{кр}} + \lambda_{\text{к.кр}}, \quad (44)$$

$$\lambda_{\text{соед}} = 2\lambda_{\text{о.соед}} N_{\text{с}}, \quad (45)$$

где $\lambda_{\text{о.мет}}$ - интенсивность отказов, обусловленная дефектами металлизации ($\lambda_{\text{о.мет}} = 3,4 \cdot 10^{-9} \text{ч}^{-1}$ на 1мм^2 площади металлизации);

$\lambda_{\text{ок}}$ - интенсивность отказов, обусловленная дефектами окисла ($\lambda_{\text{ок}} = 1,18 \cdot 10^{-8} \text{ч}^{-1}$ на 1 площади);

$S_{\text{мет}}$ - площадь металлизации, мм^2 ;

$\lambda_{\text{о.кр}}$ - интенсивность отказов, обусловленная дефектами кристалла ($\lambda_{\text{о.кр}} = 0,57 \cdot 10^{-9} \text{ч}^{-1}$ на 1мм^2 площади кристалла);

$S_{\text{кр}}$ - площадь кристалла;

$\lambda_{\text{к.кр}}$ - интенсивность отказов, обусловленная дефектами крепления кристалла к корпусу ($\lambda_{\text{к.кр}} = 6 \cdot 10^{-9} \text{ч}^{-1}$; $\lambda_{\text{к.кр}} = 8 \cdot 10^{-9} \text{ч}^{-1}$ для пластмассового корпуса; $\lambda_{\text{к.кр}} = 1,5 \cdot 10^{-9} \text{ч}^{-1}$ для керамического корпуса);

$\lambda_{\text{о.соед}}$ - интенсивность отказов термокомпрессионных соединений ($\lambda_{\text{о.соед}} = 0,37 \text{ч}^{-1}$ на 1 соединение);

$N_{\text{в}}$ - число выводов.

Коэффициенты нагрузки, учитывающие температурную зависимость интенсивности отказов, для транзисторов и диодов определяются и соотношений:

$$\alpha_T = 1 + 4.25 \cdot 10^{-2}(T - 293) + 1.125 \cdot 10^{-3}(T - 293)(T - 313) + 10^{-6}(T - 293) \times (T - 313)(T - 333); \quad (46)$$

$$\alpha_D = 1 + 3.4 \cdot 10^{-2}(T - 293) + 3 \cdot 10^{-4}(T - 293)(T - 313) + 7 \cdot 10^{-6}(T - 293) \times (T - 313)(T - 333) \quad (47)$$

Коэффициенты электрической нагрузки для всех компонентов (элементы и металлизация) вводятся программно. Коэффициенты нагрузки g_j вычисляются на основе коэффициентов тепловой и электрической нагрузки.

Зная интенсивность отказов ИС λ , вычисляют 95 %-й ресурс:

$$t_{95} = 1 / \lambda \ln(100/95); \quad (48)$$

3. ЛАБОРАТОРНОЕ ЗАДАНИЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ЕГО ВЫПОЛНЕНИЮ

Ознакомиться с назначением, возможностями и порядком работы со специализированным программно-методическим комплексом (ПМК) trl.exe и провести моделирование температурного поля ИС и расчет параметров ее надежности.

Расчет проводится в порядке, приведенном в п. 3 лабораторной работы № 1 методических указаний "Моделирование температурных полей микроэлектронных устройств и аппаратуры".

4. УКАЗАНИЯ ПО ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА И КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ПО ВЫПОЛНЕННОЙ РАБОТЕ

- 4.1. Отчет по выполненной работе должен содержать:
- наименование и цель работы;
 - теплофизическую модель ИС;
 - математическую модель расчета надежностных параметров ИС;
 - исходные данные и результаты расчетов;
 - заключение и выводы по результатам работы.
- 4.2. Контрольные вопросы к лабораторной работе:
- тепловая модель ИС;
 - математическая модель температурного поля ИС;
 - метод определения коэффициента теплоотдачи с поверхности корпуса ИС;
 - математическая модель для определения характеристик надежности ИС.

Лабораторная работа № 5

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ И РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ МИКРОСБОРКИ

1. ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ РАБОТЫ

1.1 Цель работы - ознакомление с методами моделирования температурных полей и методами расчета надежности микросборок (МСВ) с использованием специализированного ПМК МСБ.

1.2 Содержание работы

Лабораторная работа состоит из домашнего и лабораторного заданий. Домашнее задание заключается в изучении математических моделей, используемых для расчета теплового режима микросборки и определения показателей ее надежности. При выполнении лабораторного задания определяется перегрев элементов МСБ и степень ее надежности.

1.3. Используемое оборудование

Для выполнения лабораторной работы используется ПЭВМ типа IBM PC с цветным монитором и принтером.

2. ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ЕГО ВЫПОЛНЕНИЮ

Для выполнения задания необходимо проработать материал, изложенный в [1-5] и в данном разделе.

Основными вопросами, требующими проработки являются:

теплофизическая модель МСБ;

тепловые и математические модели пленочных и навесных компонентов МСБ;

расчет температурного поля элементов МСБ аналитическим методом;

математическая «модель для определения параметров надежности МСБ.

Тепловая модель МСБ приведена на рис. 9. В указанной тепловой модели влиянием корпуса пренебрегаем.

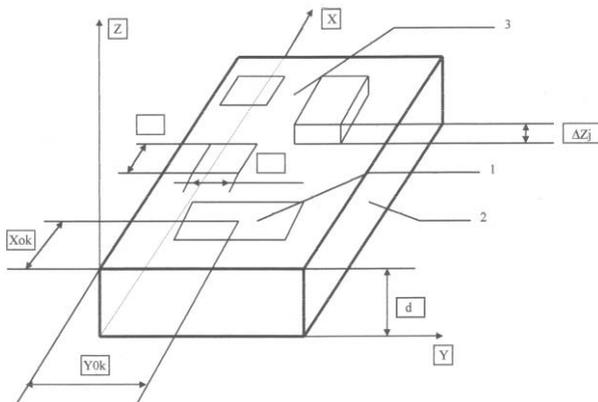


Рис. 9. Тепловая модель МСБ:

1 - подложка;

2 - пленочный элемент;

3 - навесной компонент

Установленные на пластине элементы можно разделить на пленочные элементы и навесные компоненты. К последним относятся бескорпусные транзисторы, микросхемы, диоды и др. Все элементы моделируются плоскими источниками тепла, однако из-за существенной разногабаритности элементов (особенно по толщине) расчет для пленочных и навесных компонентов осуществляется по - разному. В основу расчета положено аналитическое решение уравнения теплопроводности (1) для одного (1-го) источника тепла, полученное методом конечных интегральных преобразований:

$$\begin{aligned} \mathcal{G}(x, y, z) = & \frac{16L_x P_i}{\lambda \pi^2} \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \sin \frac{k\pi x}{L_x} \sin \frac{m\pi y}{L_y} \sin \frac{k\pi \Delta x_i}{2L_x} \sin \frac{m\pi \Delta y_i}{2L_y} \sin \frac{k\pi x_{0i}}{L_x} \times \\ & \times \sin \frac{m\pi y_{0i}}{L_y} \operatorname{sh} \left[\sqrt{k^2 + m^2 (L_x / L_y)^2} \frac{\pi z}{L_x} \right] : km \left\{ \pi \sqrt{k^2 + m^2 (L_x / L_y)^2} \times \right. \\ & \left. \times \operatorname{ch} \left[\sqrt{k^2 + m^2 (L_x / L_y)^2} \frac{\pi d}{L_x} \right] + \operatorname{Bish} \left[\sqrt{k^2 + m^2 (L_x / L_y)^2} \frac{\pi d}{L_x} \right] \right\}, \end{aligned} \quad (49)$$

где $\mathcal{G}(x, y, z)$ - перегрев в точке с координатами (x, y, z) , создаваемый i -м источником тепла;

L_x, L_y - длина и ширина подложки МСБ;

P_i - мощность i -го источника тепла;

$\Delta x_i, \Delta y_i$ - длина и ширина i -го источника тепла;

x_{0i}, y_{0i} - координаты центра источника тепла;

d - толщина подложки МСБ;

$Bi = L_{xc} / \lambda$ - критерий Био.

Используя (24) и применяя принцип суперпозиции температурных полей, получим температуру подложки в месте расположения i -го источника тепла:

$$T_i = T_c + \mathcal{G}(x_{0i}, y_{0i}, d) + \sum_{\substack{j=i \\ i \neq j}}^N \mathcal{G}_{ji}, \quad (50)$$

где T_i - температура в месте установки i -го элемента;

T_c - температура среды;

$\mathcal{G}(x_{0i}, y_{0i}, d)$ - перегрев в центре i -го элемента;

\mathcal{G}_{ji} - наведенный перегрев i -го элемента, вызванный тепловым делением j -го.

Для пленочных элементов температура определяется как сумма температуры среды и перегрева подложки в центре элемента, а для навесных - по следующей формуле:

$$T_i = T_c + \mathcal{G}(x_{0i}, y_{0i}, d) + P_i R_{\mathcal{E}-\Pi}, \quad (51)$$

где $R_{\mathcal{E}-\Pi}$ - тепловое сопротивление элемент-подложка (внутреннее тепловое сопротивление).

Определение коэффициента теплоотдачи с поверхности, корпуса МСБ осуществляется способом, описанным для ИС.

Как и для ИС, температурный режим оказывает существенное влияние на надежность МСБ. Для оценки надежности МСБ определим интенсивность отказов из формулы

$$\lambda_{МСБ} = N_{TaT} + \lambda_D N_{DaD} + \lambda_R N_{RaR} + \lambda_C N_{CaC} + \sum_{j=1}^{N_{КОМП}} \lambda_{компj} + \lambda_{соед} \times \\ \times [3N_T + 2(N_D + N_R + N_C) + N_{комп} n_{комп}], \quad (52)$$

где λ_T , λ_D , λ_R , λ_C - интенсивности отказов транзисторов, диодов, пленочных резисторов и конденсаторов;

$\lambda_{КОМП}$, $\lambda_{соед}$ - интенсивности отказов пассивных навесных компонентов и соединений;

N_T , N_D , N_R , N_C - количество транзисторов, диодов, пленочных резисторов и конденсаторов соответственно;

$N_{КОМП}$ - количество навесных пассивных компонентов;

$n_{\text{комп}}$ - количество выводов навесных пассивных компонентов;

a_T, a_D, a_R, a_C - коэффициенты режима работы (температурные коэффициенты).

Типичные интенсивности отказов, рекомендуемые для расчетов, представлены в табл. 4.

Таблица 4

Интенсивность отказов	λ_T	λ_D	λ_R	λ_C	$\lambda_{\text{соед}}$
Типичное значение, ч^{-1}	10^{-8}	$0.6 \cdot 10^{-8}$	10^{-9}	$0.5 \cdot 10^{-8}$	10^{-9}

Интенсивность отказов пассивных навесных компонентов зависит от типа компонентов. Примеры интенсивностей отказов навесных пассивных компонентов представлены в табл. 5.

Таблица 5

Тип компонента	$\lambda_{\text{компл}}, \text{ч}^{-1}$
Постоянные резисторы	10^{-8}
Переменные резисторы	10^{-7}
Керамические конденсаторы	10^{-8}
Электролитические конденсаторы	10^{-8}
Миниатюрные катушки индуктивности	10^{-5}

Коэффициенты режима работы зависят от температуры, их рекомендуемые значения представлены в табл. 6.

Таблица 6

Коэффициент режима	Температура, град С						
	20	30	40	50	60	70	80
a_T	1.0	1,35	1,85	2,6	3,6	4,9	6,2
a_D	1,0	1,27	1,68	2,0	2,6	3,4	4,1
a_R	1.0	1,15.	1,4	1,95	13	3,5	4,4
a_C	1.0	1,26	1,71	2,2	1,35	5,7	12,4

Как видно из табл. 6. пленочные конденсаторы имеют пониженную надежность при высокой температуре. Это объясняется ускорением процессов миграции атомов материалов обкладок на микродефектам в диэлектрике, что приводит к повышению токов утечки или пробую.

Расчет 95 %-го ресурса проводится аналогично случаю с ИС.

3. ЛАБОРАТОРНОЕ ЗАДАНИЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ЕГО ВЫПОЛНЕНИЮ

3.1 Алгоритмическое обеспечение автоматизированной системы проектирования температурного поля МСБ

3.1.1 Алгоритм расчета температурного поля подложки МСБ

Рассмотрим блок-схему алгоритма расчета температурного поля. Блок-схема реализована программно в модуле для конкретных значений параметров элементов происходит вызовом процедуры `RaschetPereg` из модуля `PROCUNIT`. При проведении расчета вся поверхность (на которой установлены элементы и компоненты) подложки разбивается на 50x50 областей, т.е. на 2500 участков в центре которых будет производиться расчет перегрева.

Содержание блоков схемы алгоритма состоит в следующем:

1. блок - начало алгоритма ;
2. блок - ввод числа источников n , коэффициента теплопроводности материала подложки λ , длины L_x , ширины L_y и высоты d подложки, температуры корпуса T_k и температуры среды T_c ;
3. блок - начало цикла, где величина i изменяется от 1 до числа элементов и компонентов на подложке ;

4. блок - ввод параметров каждого элемента: длину d_x , ширину d_y , координаты центра элемента x_i и y_i , рассеиваемую элементом мощность P_i ;
5. блок - открытие цикла, где E_1 изменяется от 1 до количества источников на подложке;
6. блок - открытие цикла от 1 до 50 для перебора всех значений по X;
7. блок - открытие цикла от 1 до 50 для перебора всех значений по Y;
8. блок - расчет в процедуре Rasch Peregr перегрева в точке с координатами $[i,j]$;
9. блок - суммирование перегрева наведенного в данной точке другими элементами со значением вычисленным процедурой Rasch Peregr (использование принципа суперпозиции);
10. блок - вывод величины T на экран в виде температурного поля процедурой SetImage;
11. блок - завершения алгоритма.

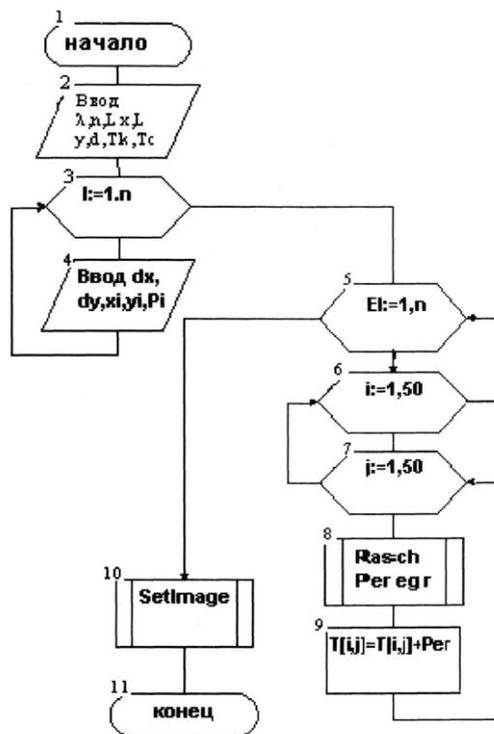


Рис. 10. Схема алгоритма расчета температурного поля подложки МСБ

3.1.2 Алгоритм расчета собственных перегревов элементов и компонентов

Алгоритм осуществляет расчет собственных и наведенных перегревов элементов и выдает в процедуре SetImage2 на экран макет подложки МСБ с расположенными на ней элементами, каждому из которых соответствует свой цвет (в зависимости от температуры элемента).

Содержание блоков схемы алгоритма состоит в следующем:

1. блок - начало алгоритма ;
2. блок ввод числа источников n, коэффициента теплопроводности материала подложки л, длины L_x , ширины L_y и высоты d подложки, температуры корпуса T_k и

- температуры среды T_c ;
3. блок - начало цикла, где величина i изменяется от 1 до числа элементов и компонентов на подложке ;
 4. блок - ввод параметров каждого элемента: длину d_x , ширину d_y , координаты центра элемента x_i и y_i , рассеиваемую элементом мощность P_i ;
 5. блок открывает цикл от 1 до количества элементов на подложке;
 6. блок открывает цикл от 1 до количества элементов на подложке для расчета перегревов наводимых элементом $i - m$ на j -й элемент;
 7. блок производит обращение к процедуре `RaschetPeregr` с параметрами i - го элемента $(x_i, y_i, d_{xi}, d_{yi}, P_i)$ в точке расположения j - го элемента (x_j, y_j) ;
 8. блок -здесь осуществляется суммирование температуры j – го элемента наведенной i - м элементом;
 9. блок - осуществляет вывод на экран макета подложки МСБ с расположенными на ней элементами с помощью процедуры `SetImage2`;
 10. блок - завершение алгоритма.

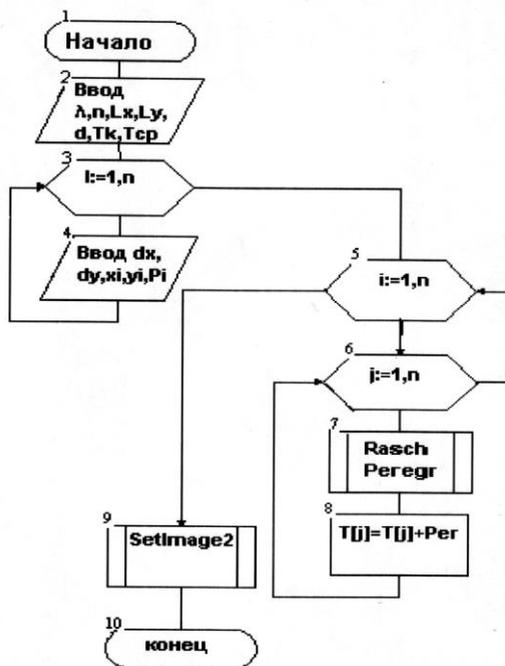


Рис. 11. Схема алгоритма расчета собственных и наведенных перегревов элементов

3.2 Описание программного продукта

3.2.1 Общие сведения

Программа моделирования температурного поля МСБ скомпилирована в один исполняемый файл MSB.EXE.

Файлы базы навесных элементов находятся в директории Vasa в каталоге установки программы.

3.2.2 Установка программы

Дистрибутив программы состоит из четырех дискет, на которых находятся файлы установочной программы, созданной с помощью программного продукта фирмы Borland InstallShield Wizard.

При установке программы с дискет следует запустить исполняемый файл на первой из них и далее по требованиям программы установки вставить последовательно остальные три.

Программа создает программную группу в директории установки и программную группу в меню Пуск. Кроме того, на машину устанавливается BDE фирмы Borland, которое позволяет обращаться программе к базам данных элементов.

3.2.3 Описание логической структуры программы

При разработке программного продукта использовалась визуальная среда программирования фирмы Borland Inspire Delphi 7.0 Studio Client/Server и язык программирования Object Pascal, который разработан программистами фирмы для упрощения создания приложений под Windows.

Тело программы структурировано, т.е. разделено на отдельные модули, каждый из которых выполняет определенные функции, которые в совокупности дают при компиляции тело исполняемой программы. Кроме того структуризация позволяет разбить решаемую задачу на несколько более простых, что дает возможность построить достаточно гибкую структуру связи модулей между собой.

Перечислим основные модули программы:

- UnitMain - модуль, содержащий основное окно программы;
- UnitVvod - модуль, содержащий окно ввода данных;
- UnitBasa - содержит окно работы с базой;
- PROC_UNIT- содержит математические процедуры, необходимые для расчетов.

3.2.4 Используемые технические средства

Для работы с программой моделирования температурного поля МСБ требуется IBM-совместимый компьютер с процессо-

ром не ниже Pentium200 (рекомендуется Pentium 950 и выше) и конфигурацией, позволяющей использовать многозадачную операционную систему типа Windows 98/2000/NT/XP с разрешением графического экрана не ниже 800 x 600 с цветовой палитрой установленной в 32 бита (требуется обязательно). Значение объема оперативной памяти не ниже 64 Мб, следует заметить, что для ускорения процесса расчета и уменьшения времени работы программы, рекомендуется не менее 128 Мб оперативной памяти. Для получения результатов расчета в виде распечаток требуется наличие принтера.

3.2.5 Загрузка программы

Загрузка программы осуществляется запуском исполняемого файла MSB.EXE из места установки программы на диске или же из меню Пуск>Программы>MSB.

3.2.6 Входные и выходные данные моделирования

Входными данными для расчета служат параметры МСБ, количество установленных элементов и их параметры. К параметрам МСБ относятся: длина, ширина, толщина подложки; температура корпуса и (или) среды; коэффициент теплопроводности материала подложки.

Параметры элементов вводятся в зависимости от их типа: конденсатор, транзистор, диод, резистор, навесной, пленочный. Для каждого из типов набор параметров для описания их модели отличается, но основными из них, которые присутствуют у всех вышеперечисленных групп, являются: длина, ширина, координаты центра по осям X и Y.

Результатом работы программы является карта температурного поля МСБ, распределение температур элементов установленных на подложке, текстовая информация о входных параметрах и результатах моделирования, а также оценка надежности МСБ в зависимости от температуры.

3.2.7 Область применения программы

Программа предназначена для сквозного конструкторско-технологического проектирования МСБ, для определения правильности компоновки элементов и компонентов на подложке по тепловому критерию.

Кроме всего, возможно использовать данный программный продукт для автоматизации проведения расчетов на лабораторных работах и курсовом проектировании.

3.8 Инструкция пользователя программы

Запуск программы осуществляется открытием файла MSB.EXE в каталоге установки программы или же из меню Пуск>Программы>MSB>MSB.

После запуска программы на экране появляется диалоговое окно, изображенное на рис. 12, в котором требуется ввести свои инициалы и группу.

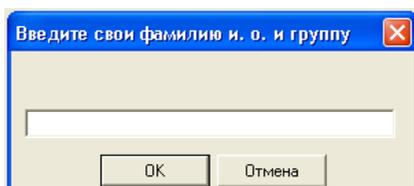


Рис. 12. Окно регистрации пользователя

После нажатия кнопки "Ок" появляется основное окно программы, которое изображено на рис. 13. В нем расположены все основные кнопки управления и, кроме того оно содержит окошки для ввода параметров МСБ (длина, ширина, толщина подложки, коэффициент теплопроводности материала подложки, температуры корпуса, температуры среды, количества элементов в МСБ). Внизу окна расположена таблица для наглядного отображения введенных параметров элементов.

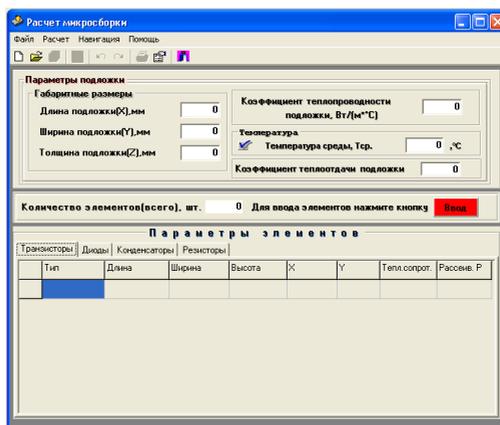


Рис. 13. Основное окно программы

В верхней части окна расположены кнопки управления программой и основное меню программы. Назначение кнопок меню:



"Новый" - устанавливает значения всех параметров (как для МСБ в целом, так и для каждого элемента отдельно) в нулевое значение;



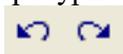
"Открыть" показывает диалоговое окно открытия ранее сохраненных файлов и позволяет выбрать и открыть файлов типа *.TMS;



"Сохранить" - показывает диалоговое окно сохранения файла;



"Расчет" - становится активной только после ввода всех параметров элементов. При ее нажатии начинается расчет температурного поля МСБ для введенных значений;



"Кнопки навигации" активны только после расчета теплового режима до внесения каких-либо изменений в параметры МСБ. Они позволяют переходить от окна ввода к окну показа результатов расчета тепловых параметров;

 "О программе" - при нажатии показывает окно с информацией о программе;

 "Печать" позволяет распечатать полученные результаты расчета (активно только после расчета теплового режима);

 "Выход" - закрывает программу.

Для проведения расчетов теплового режима необходимо сначала ввести все параметры МСБ в главном окне. Далее требуется нажать на кнопку "Ввод" и, если все параметры МСБ были введены правильно, появится окно ввода параметров элементов и компонентов расположенных на подложке (рисунок 14). Для подтверждения начала ввода нажмите кнопку "Начать ввод", которая активизирует панель ввода параметров элементов.

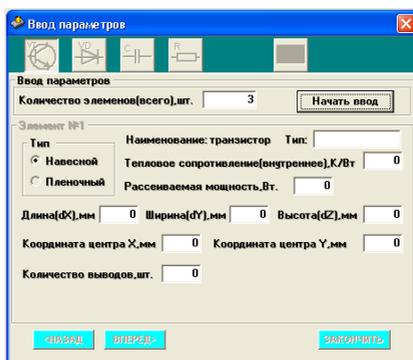


Рис. 14. Окно ввода параметров элементов

В верхней части окна расположены кнопки выбора наименования элемента, параметры которого вводятся на данный момент. В зависимости от элемента активизируется или отключается окно ввода теплового сопротивления, рассеиваемой мощности, количества элементов.

Переключатель типа элемента может принимать два положения: навесной и пленочный. В зависимости от того, какой элемент выбран навесной или пленочный становится активным окно ввода количества выводов и теплового сопротивления.

Кнопка "Библ." осуществляет открытие окна базы стандартных элементов, которое показано на рис. 15. С помощью этого окна возможно открытие одной из существующих баз элементов и вставка параметров выделенного элемента в окно ввода элементов нажатием кнопки "Вставить" на верхней панели.

Существует возможность пополнять и редактировать базу элементов. Для этого требуется нажать кнопку "Редактировать", при этом на экране появится диалоговое окно с требованием ввести пароль доступа к редактированию. Если введен неверный пароль в редактировании базы будет отказано.

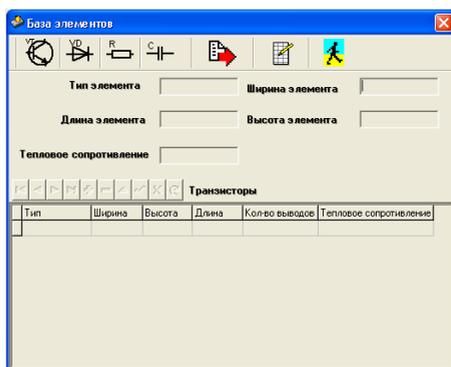


Рис. 15. Окно работы с базой элементов

При правильном вводе пароля доступа к базе активизируются дополнительные кнопки позволяющие добавлять новые значения и элементы, а также удалять те, которые уже не требуются.

После окончания работы с базой необходимо закрыть окно для продолжения ввода параметров элементов, для этого можно воспользоваться кнопкой "Закрыть".

В окне ввода параметров кнопки "Назад" и "Вперед" позволяют перемещаться к следующему вводимому элементу или предыдущему, при правильно введенных параметрах текущего. Если параметры какого-нибудь элемента введены не верно (например, элемент выходит за пределы подложки) на экран выдается сообщение, в котором указывается возможная ошибка.

Кнопка "Закончить" позволяет закончить ввод элементов, но только после введения всех параметров элементов.

После нажатия кнопки "Закончить", при правильном введении всех параметров элементов и компонентов происходит закрытие окна ввода и активизация основного окна программы, и активизация кнопки "Расчет". При нажатии этой кнопки начинается расчет теплового режима МСБ. После окончания расчета происходит активизация окна показывающего температурное поле МСБ. Окно изображенное на рис. 16 содержит две закладки. Если первая из них активна, то на экране будет изображено температурное поле подложки в виде цветного поля 50x50 точек.

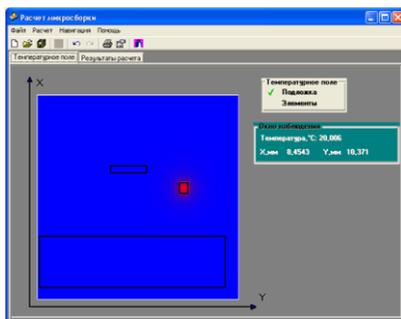


Рис. 16. Окно температурного поля МСБ

При перемещении указателя мыши над этим полем в окне наблюдения параметров будет показываться координата указателя в пересчете на координаты подложки и температура данной точки. При смене положения переключателя с "Подложка" на "Элементы", происходит смена изображения поля на поверхно-

сти подложки на графическое изображение элементов расположенных на подложке.

Каждый из элементов будет нарисован определенным цветом. Самый нагретый элемент будет изображен ярко красным, менее нагретый - синим. При прохождении указателя мыши над элементом в окне наблюдения параметров показывается температура этого элемента и координаты указателя мыши в пересчете на координаты подложки.

Активизация закладки "Результаты расчета" показывает окно, изображенное на рис. 17, в котором выведены результаты расчета параметров МСБ. При нажатии кнопки "Печать", возможно вывести результаты расчета на принтер.

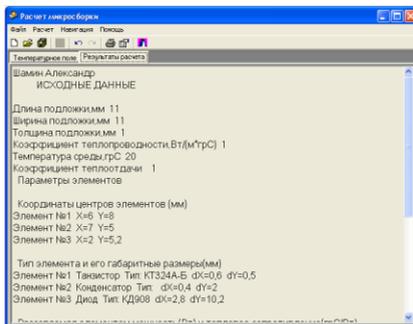


Рис. 17. Окно вывода результатов расчета

По окончании просмотра результатов расчета можно перейти к расчету теплового поля МСБ при других исходных данных. Для этого следует нажать кнопку "Новый", или "Назад", или "Открыть". В любом из случаев происходит показ основного окна программы и закрытие окна результатов.

4 УКАЗАНИЯ ПО ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА И КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ПО ВЫПОЛНЕННОЙ РАБОТЕ

4.1 Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- наименование и цель работы;

- тепловая и математические модели платы с установленными элементами;
 - исходные данные и результаты расчетов;
 - заключение и выводы по результатам работы.
- 4.2 Контрольные вопросы к лабораторной работе:
- тепловая модель платы;
 - тепловая модель элемента, установленного на плате;
 - математическая модель температурного поля платы;
 - математическая модель перегрева элемента;
 - принципы суперпозиции и местного влияния;
 - конвективный и лучистый коэффициенты теплоотдачи.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дульнев Г. Н. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре.- М.: ВУСШ. шк., 1984.- 247 с.
2. Дульнев Г. Н., Парфенов В. Г., Сигалов А. В. Методы расчета теплового режима приборов.- М.: Радио и связь, 1990.- 312 с.
3. Дульнев Г. Н., Тарновский Н. Н. Тепловые режимы электронной аппаратуры.- Л.: Энергия, 1971,- 248 с.
4. Дульнев Г. Н., Польшчиков Б. В., Левбарг Е. С. Температурное поле пластины с локальным источником тепла и теплообменом на торцах// Вопросы радиоэлектроники. Сер.ТРТО. 1976.Вып. 1. С.98-102.
5. Захаров А.Л., Асвадунова Е.А. Расчет тепловых параметров полупроводниковых приборов. М.: Радио и связь, 1983. 184 с.
6. Обеспечение тепловых режимов изделий электронной техники / А.А. Чернышев, В.И. Иванов, А.И. Аксенов, Д.Н. Глушкова. М.: Энергия, 1980. 216 с.
7. Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент: Справочник / Е.В. Аметистов, В.А. Григорьев, Б.Т. Емцев и др.; Под общ. ред. В.А. Григорьева и В.М. Зорина. М.: Энергоиздат, 1982. 512 с.

СОДЕРЖАНИЕ

1. Лабораторная работа №1. Расчет тепловых характеристик стоек	1
2. Лабораторная работа №2. Исследование теплового режима блока	14
3. Лабораторная работа №3. Моделирование температурных полей модулей на печатных платах.....	18
4. Лабораторная работа №4. Моделирование температурного поля и расчет надежности интегральной микросхемы.....	26
5. Лабораторная работа №5. Моделирование температурного поля и расчет надежности микросборки.....	34
Библиографический список.....	52

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ И ПРИБОРОВ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к лабораторным работам
по дисциплинам «Теплофизические процессы в приборах», «Теплофизические процессы в электронных средствах» для студентов направлений подготовки бакалавров 12.03.01 «Приборостроение», 11.03.03 «Проектирование и технология РЭС» соответственно, очной и заочной форм обучения.

Составитель:
Ципина Наталья Викторовна

В авторской редакции

Подписано к изданию . .2022
Уч.-изд. л.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
технический университет»
394026 Воронеж, Московский просп., 14