

На правах рукописи

Квинт Игорь Эдуардович

**РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ РАЗМЕЩЕНИЯ
ЭЛЕКТРОРАДИОЭЛЕМЕНТОВ НА МОДУЛЯХ
С КОНДУКТИВНЫМ ТЕПЛООТВОДОМ**

Специальность 05.13.12 – Системы автоматизации проектирования
(в промышленности)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук



Москва – 2011

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана.

Научные руководители: доктор технических наук, профессор

Кокотов Валерий Зямович,

Член-корреспондент РАН,

доктор технических наук, профессор

Шахнов Вадим Анатольевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор

Назаров Александр Викторович,

кандидат технических наук, доцент

Волков Андрей Валентинович

Ведущая организация: Открытое акционерное общество

«КОНЦЕРН «МОРИНФОРМСИСТЕМА-АГАТ»

Защита диссертации состоится «26» мая 2011 г. в 14 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.141.10 в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, 2-я Бауманская ул., д.5.

Ваши отзывы в двух экземпляра, заверенные печатью, просьба высылать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана.

Автореферат разослан «18» апреля 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к.т.н., доцент



Иванов С.Р.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Задача отвода тепла от тепловыделяющих элементов электронной аппаратуры всегда была актуальной и сложной, и от успешного ее решения зависели эксплуатационные характеристики изделий и, прежде всего, их надежность. Сложность решения этой задачи возрастала с ростом степени интеграции электронных схем, с повышением плотности компоновки тепловыделяющих и теплочувствительных элементов. Одним из методов эффективного охлаждения тепловыделяющих элементов и отвода тепловых потоков от них является использование в электронной аппаратуре модулей с кондуктивным теплоотводом с краев плат (на основе плат с металлическим основанием, сердечником или металлической подложкой) от расположенных на них электрорадиоэлементов (ЭРЭ).

В настоящее время для обеспечения работы ЭРЭ в допустимом диапазоне температур и их контроля, при проектировании модулей с кондуктивным теплоотводом, используются процессы макетирования и численного моделирования. Общие подходы и методы расчета тепловых режимов в радиоэлектронной аппаратуре и на модулях с кондуктивным теплоотводом изложены в работах Дульнева Г.Н., Семяшкина Э.Н., Тарановского Н.Н., Борисова В.Ф., Белоусова О.А., Шерстнева В.В., Кокотова В.З. и др.

Изменяя в процессах макетирования и численного моделирования установочные места элементов на модулях с кондуктивным теплоотводом, удастся существенно снизить рабочие температуры ЭРЭ и тем самым повысить надежность электронных устройств.

Однако макетирование требует относительно больших трудовых и временных затрат, а программные реализации численных методов (например, методов конечных элементов в САПР SolidWorks, ANSYS, ELCUT, PTC Pro/ENGINEER Wildfire и др.) при обеспечении высокой точности расчетов, чаще всего для сложных объектов, имеют малое быстродействие, а кроме того, их использование требует специальной подготовки. Таким образом, существующие подходы решения задачи и методы моделирования требуют значительных вычислительных и временных затрат. Кроме того, ручное изменение установочных мест элементов не всегда обеспечивает эффективный теплоотвод от ЭРЭ.

Применяющийся алгоритм автоматизированного размещения ЭРЭ по критерию эффективности теплоотвода только при четырехстороннем варианте кондуктивного теплоотвода с краев плат модулей имеет ограничение для различных конструктивных решений и требует расширения вариантов с целью повышения эффективности теплоотвода от ЭРЭ. Также требуется разработка и обоснование алгоритмов размещения ЭРЭ по критерию эффективности теплоотвода на модулях при одно-, двух- и трехсторонних вариантах кондуктивного теплоотвода с краев плат.

Кроме того, сложность при проектировании радиоэлектронной аппаратуры на основе модулей с кондуктивным теплоотводом состоит в отсутствии у разра-

ботчика единой программной среды моделирования и проектирования. Современное программное обеспечение, предназначенное для размещения ЭРЭ на монтажном пространстве, как правило, не учитывает тепловые режимы элементов и соответственно не проводит оптимизацию их размещения по тепловому критерию, а предполагает только топологическую оптимизацию для последующей трассировки печатного узла.

Поэтому задача разработки алгоритмов и программных средств проектирования электронной аппаратуры на основе модулей с кондуктивным теплоотводом, позволяющая рассчитывать сложные конструкции и выполнять автоматизированное размещение ЭРЭ по критерию эффективности теплоотвода при небольших затратах времени разработчиком, является актуальной.

Целью диссертационной работы является создание алгоритмов и программных средств автоматизированного размещения ЭРЭ по критерию минимизации температур элементов на модулях с кондуктивным теплоотводом с различными вариантами теплоотвода с краев плат.

Задачи исследования. Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

- разработка аналитических моделей для теплового расчета отдельных элементов на модулях с одно-, двух-, трех- и четырехсторонними вариантами кондуктивного теплоотвода с краев плат, позволяющих выполнять моделирование на ЭВМ тепловых полей модулей с кондуктивным теплоотводом;
- разработка алгоритмов размещения элементов на модулях с кондуктивным теплоотводом по критерию эффективности теплоотвода с учетом критерия плотной упаковки ЭРЭ для одно-, двух-, трех- и четырехсторонних вариантов кондуктивного теплоотвода с краев плат;
- разработка методов, позволяющих учитывать критерий трассируемости плат при выполнении размещения ЭРЭ по критерию эффективности теплоотвода;
- создание программного обеспечения, реализующего описанные модели и алгоритмы.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- разработаны аналитические модели, позволяющие вычислять температуры ЭРЭ на модулях с одно-, двух-, трех- и четырехсторонними вариантами кондуктивного теплоотвода с краев плат, а также выполнять моделирование тепловых полей на модулях с кондуктивным теплоотводом;
- установлены закономерности и предложены стратегии размещения ЭРЭ по критерию эффективности теплоотвода на модулях с одно-, двух-, трех- и четырехсторонними вариантами кондуктивного теплоотвода с краев плат;
- разработаны алгоритмы размещения ЭРЭ по критерию эффективности теплоотвода на модулях с одно-, двух-, трех- и четырехсторонними вариантами

кондуктивного теплоотвода с краев плат с учетом критерия плотной упаковки элементов;

- разработаны методы, позволяющие учитывать в заданной степени критерий трассируемости плат совместно с критерием эффективности теплоотвода.

Практическая значимость полученных в работе результатов:

- разработанные аналитические модели и программные средства позволяют в интерактивном режиме оценивать температуры ЭРЭ на модулях с различными вариантами кондуктивного теплоотвода с краев плат, проводить моделирование тепловых режимов, анализ и размещение ЭРЭ на монтажном пространстве, минуя трудоемкие и длительные процессы макетирования и численного моделирования;

- применение на модулях с кондуктивным теплоотводом автоматизированного размещения ЭРЭ по критерию эффективности теплоотвода с учетом критерия трассируемости плат позволяет снизить рабочую температуру корпусов ЭРЭ, это существенно повышает надежность работы электронной аппаратуры;

- разработанное программное обеспечение эффективно в применении, не требует длительного освоения, что позволяет сократить время проектирования электронных модулей с кондуктивным теплоотводом.

Степень достоверности результатов исследований. Сформулированные в диссертации научные положения, выводы и рекомендации обоснованы теоретическими решениями и экспериментальными данными, полученными в работе, и не противоречат известным научным положениям.

Реализация и внедрение результатов работы. Полученные в работе результаты внедрены в проектно-конструкторской деятельности ОАО «КОНЦЕРН «МОРИНФОРМСИСТЕМА-АГАТ» (г. Москва), а также в учебный процесс кафедры проектирования и технологии производства электронно-вычислительных и телекоммуникационных систем МГТУ им. Н.Э. Баумана (г. Москва).

Апробация работы. Результаты работы докладывались на «Первой российской мультиконференции по проблемам управления» (г. Санкт-Петербург, 2006); VII и X международных молодежных научно-технических конференциях «Наукоемкие технологии и интеллектуальные системы» (г. Москва, 2006, 2009); Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций» (г. Самара, 2007).

Публикации по теме работы. По теме диссертации опубликовано 7 научных работ, в том числе 1 статья в журнале по списку ВАК.

Структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении поставлены цель и задачи исследования, обоснованы актуальность темы, ее научная новизна и практическая ценность, сформулированы научные положения, выносимые на защиту, приведена структура диссертации, формы апробации и реализации результатов.

В первой главе с целью дальнейшей формализации математических моделей модулей с кондуктивным теплоотводом проведен обзор конструкций бортовых цифровых вычислительных систем, широко используемых в последние годы; описаны принципы охлаждения узлов традиционных и рамочных конструкций устройств, а также устройств, выполненных на основе конструкции «Евромеханика-6U»; показано наличие в рассматриваемых конструкциях преимущественно кондуктивного теплоотвода с плат модулей; произведена оценка возможности применения широко распространенных систем математического моделирования тепловых режимов работы радиоэлектронных систем в задачах размещения ЭРЭ; проведен обзор алгоритмов размещения ЭРЭ и обоснован выбор конструктивных методов при разработке алгоритмов «теплового размещения», а также выполнена постановка задачи диссертационной работы и анализ предшествующих работ по выбранной теме.

В рамочной конструкции с кондуктивным теплоотводом (рис. 1 а), отвод тепла осуществляется кондуктивно с одного края рельефных плат (РП) от, так называемой, «холодной стенки».

Теплоотвод от ЭРЭ в рамочных конструкциях с принудительным воздушным охлаждением (рис. 1 б), осуществляется кондуктивно с четырех краев плат от панелей теплоотвода.

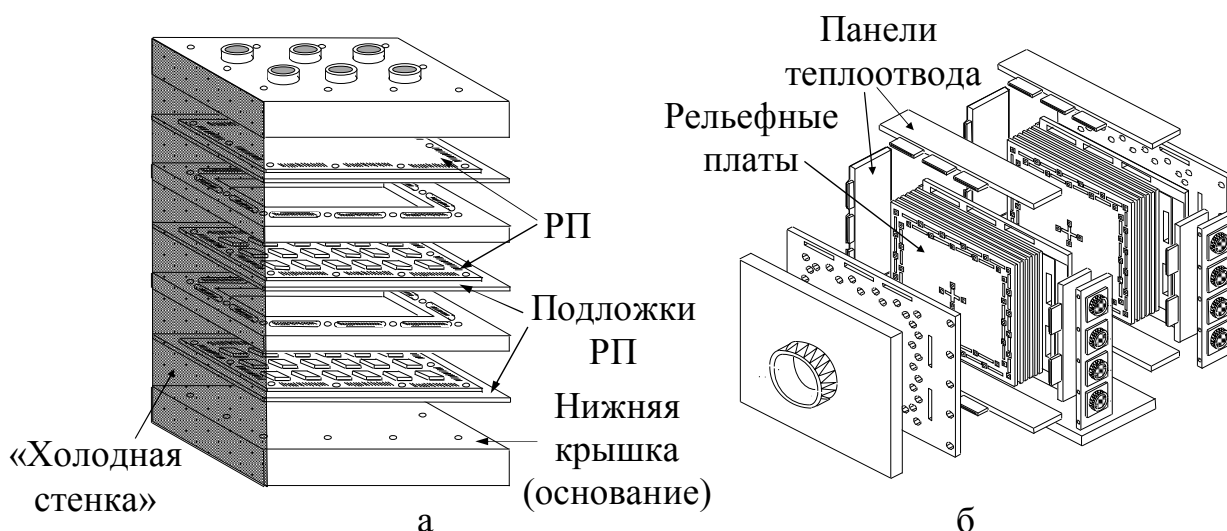


Рис. 1. Классическая рамочная конструкция и типовая рамочная конструкция с принудительным воздушным охлаждением (слева направо соответственно)

Для решения общего случая задачи размещения ЭРЭ по критерию эффективности теплоотвода в диссертационной работе рассматриваются также варианты кондуктивного теплоотвода с двух смежных, двух противоположных (используется в ЭВМ «Багет») и с трех краев плат.

Между модулями представленных конструкций имеется теплоизлучение, которое не учитывается в тепловых расчетах, поскольку тепло от ЭРЭ каждой платы, отдаваемое теплоизлучением к подложке (сердечнику или основанию) следующей платы, можно условно заменить собственной тепловой энергией, передаваемой теплоизлучением следующей плате.

Свободная конвекция в рассмотренных конструкциях отсутствует, так как

- конструктивы герметичны;
- между элементами конструкций имеется малый объем свободного пространства, что не позволяет воздуху циркулировать.

Вынужденной конвекции с ЭРЭ в приведенных конструкциях нет, что позволяет при выполнении тепловых расчетов учитывать теплопередачу только кондукцией.

Количество ЭРЭ, применяемых на модулях современных устройств, и степень их интеграции возрастает, следовательно, повышается плотность тепловых потоков. В связи с этим требуется контроль соблюдения допустимых рабочих температур элементов на модулях устройств.

Для получения перепадов температур элементов на модулях с кондуктивным теплоотводом, а также их оценке на соответствие допустимым нормам, используются:

- процесс макетирования (занимающий от двух до пяти дней);
- расчетные модели на основе численных методов, имеющих для сложных объектов малое быстродействие.

Кроме того, комплексность САПР неизбежно приводит к сложности ее освоения и длительному обучению. Все это значительно увеличивает время проектирования.

В диссертационной работе предлагается построение быстродействующих аналитических моделей с использованием ряда упрощений.

Специфика устройств на основе модулей с кондуктивным теплоотводом состоит в том, что, изменяя установочные места элементов, можно существенно снизить рабочие температуры ЭРЭ и, следовательно, повысить надежность устройств. Однако не автоматизированное размещение элементов на платах не всегда обеспечивает эффективный теплоотвод от ЭРЭ.

Принятые ранее подходы к решению задачи автоматизированного размещения элементов по критерию эффективности теплоотвода на основе генетических алгоритмов, представленные в работах Лебедева О.Б., Новикова И.С. и др., не могут быть использованы при размещении ЭРЭ на платах с доминирующим кондуктивным теплоотводом в связи с конструктивными ограничениями предложенных методов. Так, предложенный Лебедевым О.Б. метод размещения элементов осуществляет лишь расстановку равногабаритных элементов на заранее известные установочные места. Алгоритм размещения тепловыделяющих элементов в

модулях трехмерной компоновки, предложенный Новиковым И.С., может быть адаптирован только для «теплового размещения» ЭРЭ на модулях при одностороннем кондуктивном варианте теплоотвода с краев плат.

На основе проведенного в диссертационной работе обзора методов размещения элементов предлагается использовать быстродействующие конструктивные алгоритмы, позволяющие получать приемлемые решения задачи «теплового размещения» ЭРЭ на модулях с кондуктивным теплоотводом.

При решении задачи размещения ЭРЭ по критерию эффективности теплоотвода учитывается тот факт, что эффективность теплоотвода, в значительной степени, определяется перепадом температуры от «самого горячего» ЭРЭ до теплоотводящих краев платы. При этом чем меньше такой перепад температур, тем проще обеспечить теплоотвод от краев и тем выше эффективность системы теплоотвода всего устройства. В предположении равенства допустимых рабочих температур всех ЭРЭ для модулей с кондуктивным теплоотводом важным является обеспечение минимального перепада температур от теплоотводящих краев платы до «самого горячего» ЭРЭ (минимизация ΔT_{max}). При этом конкретное расположение ЭРЭ на плате может существенно влиять на ΔT_{max} , поэтому при реальном проектировании аппаратуры и использовании модулей с кондуктивным теплоотводом актуальной является, так называемая, задача «теплового размещения» ЭРЭ.

Во второй главе предложены модели и полученные расчетные аналитические выражения, позволяющие выполнять моделирование тепловых режимов ЭРЭ при различных габаритах платы, толщине подложки и коэффициенте теплопроводности, исключая трудоемкий этап решения систем уравнений. Приведена модель для расчета тепловых режимов модулей рамочных конструкций с теплоотводом на основание.

При «тепловом конструировании» модулей с кондуктивным теплоотводом, типовой задачей является определение перепадов температур для стационарного режима между проекцией каждого ЭРЭ на металлическую подложку (сердечник или основание) и теплоотводящими краями платы. Такая задача многократно решается при оптимизации системы теплоотвода всего устройства.

Рассматриваемые в диссертационной работе конструкции на основе модулей с кондуктивным теплоотводом имеют прямоугольные формы ЭРЭ и подложек (сердечников или оснований) плат, а система охлаждения конструктивов обеспечивает практически одинаковую температуру на теплоотводящих краях металлических подложек (сердечников или оснований) плат.

Подложка, металлический сердечник или основание платы (далее пластина) является достаточно тонкой ($\sim 1 \div 3$ мм), что позволяет при расчете перепадов температур использовать двухмерную модель модуля с последующей оценкой погрешности предложенной модели. Если на плате установлено более одного ЭРЭ, то, используя принцип суперпозиции тепловых полей, перепад температуры ΔT_i (разность между температурой ЭРЭ и теплоотводящим краем пластины) для

каждого i -го ЭРЭ можно представить суммой перепадов температур в области i -го ЭРЭ от всех ЭРЭ (включая i -ый), рассчитанных при условии присутствия на плате только одного i -го или j -го ЭРЭ $\Delta T_i = \sum_{j=1}^N \Delta T_{ij}$, где ΔT_{ij} – перепад температуры от j -го ЭРЭ в области i -го ЭРЭ, рассчитанный при условии установки на плате только j -го ЭРЭ; ΔT_i – перепад температуры для i -го ЭРЭ при установке на плате всех N ЭРЭ.

На рис. 2 изображены прямоугольные элементы, расположенные на пластине, часть из которых является нагревающими, а часть – пассивными.

Определение величины перепада температуры ΔT_i для i -го нагревающего элемента включает в себя внутреннюю и внешнюю задачи. Под внутренней задачей понимается вычисление среднего перепада температур, обусловленного самим нагревающим элементом (ΔT_{ii}). Для внешней задачи вычисляется средний перепад температур, обусловленный другими нагревающими элементами (ΔT_{ij} при $i \neq j$).

Таким образом, для пассивных ЭРЭ решается только внешняя задача.

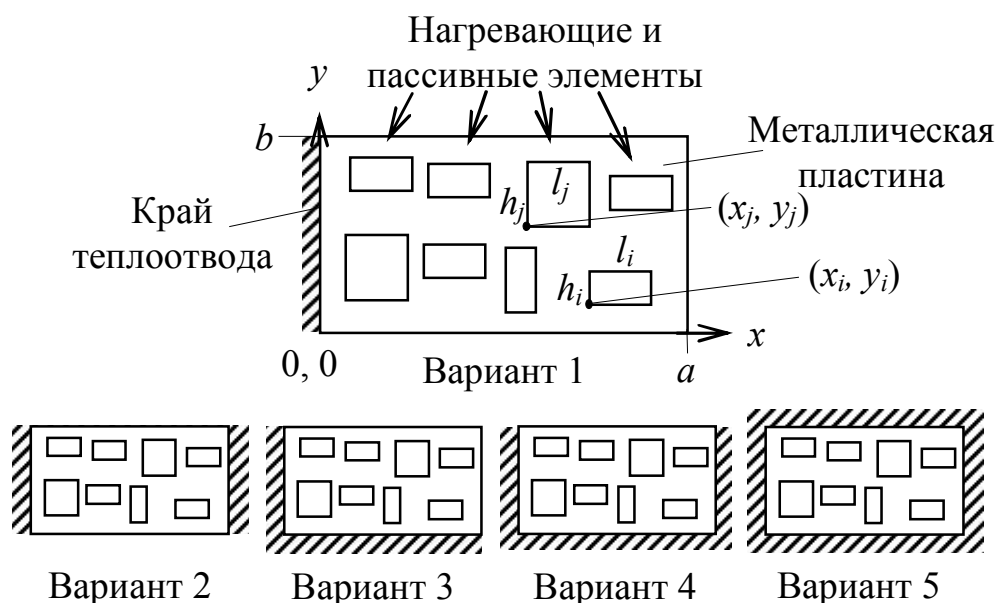


Рис. 2. Различные варианты теплоотвода с краев плат (граничных условий)

Распределение температуры от одного прямоугольного источника тепла, расположенного в теле однородной теплопроводной прямоугольной пластины, описывается уравнением Пуассона: $\frac{\partial^2 u(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u(x, y)}{\partial y^2} = \rho(x, y)$, где $u(x, y)$ – перепад температур в точке (x, y) , $\rho(x, y)$ – плотность теплового потока от прямоугольного источника тепла в точке (x, y) .

Используя метод предложенный Гринбергом, решение неоднородного урав-

нения Пуассона осуществляется решением соответствующего однородного уравнения Лапласа. Решение уравнения Лапласа осуществляется методом разделения переменных Фурье. Далее, выполняя интегрирование по площади корпуса ЭРЭ, для всех вариантов граничных условий (рис. 2) выражение для ΔT_{ii} имеет вид

$$\Delta T_{ii} = \frac{8b^4 P_i}{\pi^5 l_i^2 h_i^2 z \lambda} \sum_{n=r}^N \left\{ \frac{f_1\left(\frac{k\pi(y_i + h_i/2)}{b}\right) f_1\left(\frac{k\pi y_i}{b}\right) \sin^2\left(\frac{k\pi h_i}{2b}\right)}{k^5} \times \right. \\ \left. \times \left[\frac{4f_2\left(\frac{k\pi(x_i - a + l_i/2)}{b}\right) \operatorname{sh}\left(\frac{k\pi(x_i + l_i/2)}{b}\right) \operatorname{sh}^2\left(\frac{k\pi l_i}{2b}\right)}{\operatorname{sh}\left(\frac{k\pi a}{b}\right)} + \operatorname{sh}\left(\frac{k\pi l_i}{2b}\right) - \frac{k\pi l_i}{b} \right] \right\},$$

где a и b – габариты платы; z – толщина металлической пластины; λ – теплопроводность пластины; l и h – длина и высота ЭРЭ соответственно; P_i – мощность i -го элемента; N – количество членов ряда (определяемое заданной точностью); значение r , выражение для k и вид функций f_1 и f_2 определяются вариантами граничных условий.

Аналогичный вид имеет выражение для ΔT_{ij} . Значения ΔT_{ii} и ΔT_{ij} , позволяют определить средний перепад температуры ΔT_i для каждого i -го пассивного или нагревающего элементов.

В ряде конструкций на основе модулей с кондуктивным теплоотводом выделяющееся в каждой плате тепло передается с помощью теплопроводящего экрана на поверхность конструкции, а по ней – на основание и путем кондуктивного теплообмена уходит в окружающую среду.

Полученная в диссертационной работе модель

$$U(n) = \frac{l}{2\pi R k d_1} \left[n \sum_{i=n-1}^N Q_i + \sum_{i=1}^{n-1} i Q_i \right],$$

где Q_n – тепловыделение каждого слоя, k – коэффициент теплопроводности материала боковой поверхности, d_1 – толщина боковой стенки, $R = \frac{A+B}{\pi}$, A и B – длины сторон прямоугольной платы, позволяет вычислять температуры $U(n)$ в местах выхода слоев на боковую поверхность. Нумерация слоев производится с основания, первый тепловыделяющий слой имеет номер 1, а последний слой имеет номер N .

Таким образом, при известных расположениях и тепловыделениях активных элементов можно найти температурное поле в каждом слое.

В третьей главе предложен критерий выбора ЭРЭ в алгоритмах «теплого размещения», установлены закономерности и сформулированы алгоритмы «теплого размещения» ЭРЭ для одно-, двух-, трех- и четырехсторонних вариантов кондуктивного теплоотвода с краев плат модулей с учетом критерия плотной упаковки ЭРЭ. Предложен способ учета критерия трассируемости плат.

При выполнении «теплого размещения» принимается, что размещаются только ЭРЭ, выделяющие тепло, ЭРЭ не выделяющие тепловую энергию (конденсаторы, кварцевые резонаторы и т.д.), размещаются по традиционному критерию, с учетом уже размещенных ЭРЭ, рассеивающих тепловую энергию.

Поэтому при выборе критерия размещения ЭРЭ учитываются только тепловые характеристики устанавливаемых элементов и вычисление ΔT_i осуществляется следующим образом:

$$\Delta T_i = \Delta T_{ii} + \sum_{j=1}^n \Delta T_{ij},$$
 где ΔT_{ii} – перепад температур для

проекции корпуса i -го ЭРЭ на металлическую пластину при установке на плату одного i -го ЭРЭ; ΔT_{ij} – перепад температур, «наведенный» j -ым ЭРЭ на проекцию корпуса i -го ЭРЭ на пластину; n – число уже установленных ЭРЭ к моменту установки i -го ЭРЭ.

Поскольку перепад температур (ΔT_i) для каждого ЭРЭ определяется не только тепловым потоком от данного элемента, но и тепловыми потоками от остальных элементов платы, то в математической постановке задача «теплого размещения» является задачей двухмерного назначения, для которой известно, что полное решение ее может быть получено только полным (или почти полным) перебором вариантов размещения. Поэтому для большого числа ЭРЭ на плате представляется целесообразным использовать эвристические алгоритмы размещения, предварительно исследовав закономерности взаимного влияния тепловых потоков разных элементов. Неотъемлемой частью построения таких алгоритмов является анализ закономерностей различной установки одного и групп ЭРЭ.

Вычислительные эксперименты проводились на плате с габаритами 233×160 мм. Принятые габариты являются реальными на практике габаритами типоразмеров плат модулей конструктива «Евромеханика» высотой 6U и позволяют учитывать общий случай прямоугольной платы. Полученные результаты могут быть экстраполированы на случаи плат с различными габаритами.

В одной из групп вычислительных экспериментов, направленной на выявление закономерности размещения одного ЭРЭ на поле платы, устанавливался только один ЭРЭ в центре платы (рис. 3, а) и перемещался в трех направлениях (тонкая, штриховая и жирная линии соответствуют элементам с габаритами 40×35 мм, 50×45 мм и 55×50 мм, соответственно, штриховкой обозначены стороны теплоотвода).

На рис. 3, б–г представлено семейство зависимостей ΔT_{ii} от положения центра ЭРЭ на плате для элементов различных габаритов. Отсюда видно, что при любых габаритах элементов максимум ΔT_{ii} достигается при установке ЭРЭ в центре платы. Движение к краям платы монотонно уменьшает ΔT_{ii} . Наиболее интен-

сивное уменьшение ΔT_{ii} происходит при движении по диагонали платы. При этом для любой точки установки ЭРЭ на плате, значения ΔT_{ii} тем больше, чем меньше габариты ЭРЭ.

Подобным образом проводились вычислительные эксперименты с различными вариантами размещенных на плате ЭРЭ при перемещении элементов с различными габаритами и мощностями из центра платы в трех указанных направлениях.

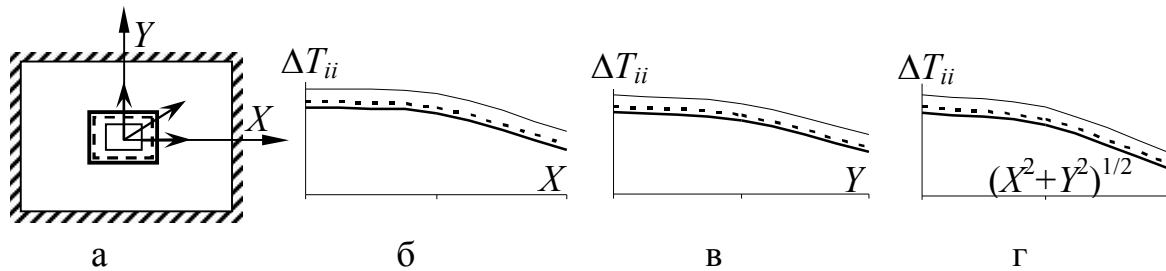


Рис. 3. Группа вычислительных экспериментов

По результатам проведенных вычислительных экспериментов были сформулированы стратегии «теплового размещения» ЭРЭ на модулях с четырехсторонним кондуктивным теплоотводом с краев плат, ряд из которых представлен ниже:

- доминирующие по тепловому потоку элементы, в целях получения $\min(\Delta T_{max})$, следует устанавливать ближе к теплоотводящим краям и наибольший приоритет задавать углам поля размещения;
- маломощные элементы целесообразно устанавливать ближе к центру поля размещения платы;
- изменение ориентации ЭРЭ в процессе «теплового размещения», позволяет снизить ΔT_{max} .

При проведении аналогичных экспериментов, были установлены закономерности размещения ЭРЭ на модулях при одно-, двух- и трехсторонних вариантах теплоотвода с краев плат.

Выявленные в диссертационной работе закономерности позволяют сформулировать алгоритм «теплового размещения» для модулей с четырехсторонним вариантом кондуктивного теплоотвода с краев плат в следующем виде (рис. 4).

Перед началом размещения для каждого ЭРЭ производится расчет значений L_i следующим образом. Элемент с индексом i помещается в центр платы (x_{1i}, y_{1i}) и рассчитывается его температура, затем изменяется ориентация ЭРЭ (поворот на 90 градусов), элемент снова ставится в центр (x_{2i}, y_{2i}) , рассчитывается его температура и находится среднее значение полученных температур: $L_i = (\Delta T_i(x_{1i}, y_{1i}) + \Delta T_i(x_{2i}, y_{2i})) / 2$.



Рис. 4. Алгоритм «теплового размещения» ЭРЭ на модулях с четырехсторонним вариантом кондуктивного теплоотвода с краев плат

После этого создается массив U , в котором фиксируются координаты x_{Uk} и y_{Uk} четырех углов поля размещения. При этом число элементов (N_U) в массиве U равно 4. По координатам (x_{Uk}, y_{Uk}) углов вычисляются значения x_{0i} и y_{0i} — координаты мест-претендентов на установку i -го ЭРЭ.

Далее для каждого i -го ЭРЭ осуществляется выбор по $\min(\Delta T_i)$ места установки. Поиск $\min(\Delta T_i)$ осуществляется по всем возможным координатам размещения элемента, находящихся в массиве U , с двумя возможными ориентациями ЭРЭ на этих местах. После чего элемент массива U , соответствующий выбранному месту, исключается, а в массив U добавляются обычно один или два новых элемента (соответствующие углам, образованным установленным ЭРЭ и ранее установленными элементами или границами поля размещения). Таким образом,

при установке очередного ЭРЭ изменяется содержание массива U и величина N_U .

Аналогичным образом формулируются алгоритмы «теплового размещения» на случаи одно-, двух- и трехсторонних вариантов кондуктивного теплоотвода с краев плат модулей.

«Тепловое размещение» ЭРЭ на модулях с кондуктивным теплоотводом, основанное на сформулированных принципах, помимо критерия эффективности теплоотвода, также учитывает критерий плотной упаковки элементов.

Для решения задачи «теплового размещения» ЭРЭ с учетом критерия обеспечения трассируемости плат применяется следующий прием. В углах платы (рис. 5) устанавливаются фиктивные точечные элементы (ФЭРЭ), обозначенные черными квадратами; затем элементы связываются фиктивными связями с фиктивными элементами; далее осуществляется размещение элементов уже созданной программой размещения по критерию трассируемости.

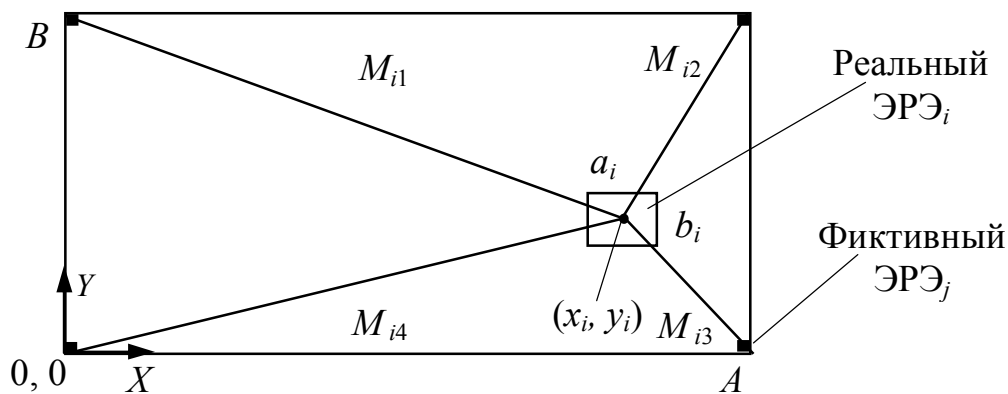


Рис. 5. Схема размещения ФЭРЭ на плате

Координаты (x_i, y_i) однозначно определяют расстояния (M_{ij}) от центра i -го ЭРЭ до каждого j -го ФЭРЭ. Тогда число фиктивных связей C_{ij}^1 от j -го ФЭРЭ до центра i -го ЭРЭ может быть задано следующим образом

$$C_{ij}^1 = M_{ij} / \sum_{p=1}^4 M_{ip}.$$

Для решения проблемы установки только целого числа связей между каждым ЭРЭ и ФЭРЭ, возникающей в значительной части программ размещения элементов, вводится коэффициент дискретизации (K_D), тогда $C_{ij} = [K_D C_{ij}^1]$, где $[]$ – округление до целого.

Такой подход к выбору числа фиктивных связей дает приемлемые результаты при «тепловом размещении» ЭРЭ.

При одновременном действии двух критериев размещения необходимо учитывать величину вклада каждого из них в общий критерий. Для этого вводится весовой коэффициент K_T , определяющий вклад «теплового размещения». При $K_T = 0$ – только «тепловое размещение», $K_T = 10$ – размещение только по критерию трассируемости.

Тогда C_{ij} представляется в следующем виде

$$C_{ij} = \left[(10 - K_T) \max(C_{ik}^P) C_{ij}^1 \right],$$

где C_{ik}^P – число реальных связей между i -м и k -м ЭРЭ, $k = 1..N$, N – число размещенных на плате реальных ЭРЭ.

При таком подходе препроцессорная обработка вводит не только фиктивные связи ЭРЭ с ФЭРЭ, но и изменяет количества связей между парами реальных ЭРЭ в K_T раз.

Размещение ЭРЭ на платах по двум критериям при этом может проводиться какой-либо существующей программой автоматического размещения по критерию трассируемости.

Постпроцессорная обработка состоит в устранении ФЭРЭ, фиктивных связей с ФЭРЭ и фиктивных дополнительных связей между ЭРЭ, введенных препроцессором.

В четвертой главе описаны назначение, состав и функции основных частей разработанного программного продукта. Приведены результаты эксплуатации разработанной программы и результаты экспериментальных исследований.

Программа для ЭВМ HeartOverlay написана на языке Visual C++ 2008, реализована под операционные системы Windows XP, Windows Vista и Windows 7, имеет объем ~ 14000 операторов. Интерфейс системы представлен на рис. 6.

Оценка точности полученных двухмерных аналитических моделей определялась посредством вычислительных экспериментов следующим образом. В САПР ELCUT 5.4 был смоделирован модуль с кондуктивным теплоотводом (количество узлов пространственной сетки задавалось не более 2000). Сравнение тепловых полей проводилось по значениям температур ряда точек на платах. Анализ полученных данных показал, что значения температур, рассчитываемые в САПР ELCUT 5.4 и моделями, реализованными в HeartOverlay, отличаются не более $\pm 5\%$.

Далее проводилось сравнение результатов численных экспериментов полученных в САПР PTC Pro/ENGINEER Wildfire 5.0 и данных полученных программным продуктом HeartOverlay для трехмерных моделей. Анализ данных показал, что аналитические матмодели, разработанные в диссертационной работе, имеют погрешность не более 10%.

Проведенные вычислительные эксперименты с использованием разработанной программы показали, что сложность алгоритмов размещения ЭРЭ является не выше квадратичной – $O(N^2)$ (рис 7.).

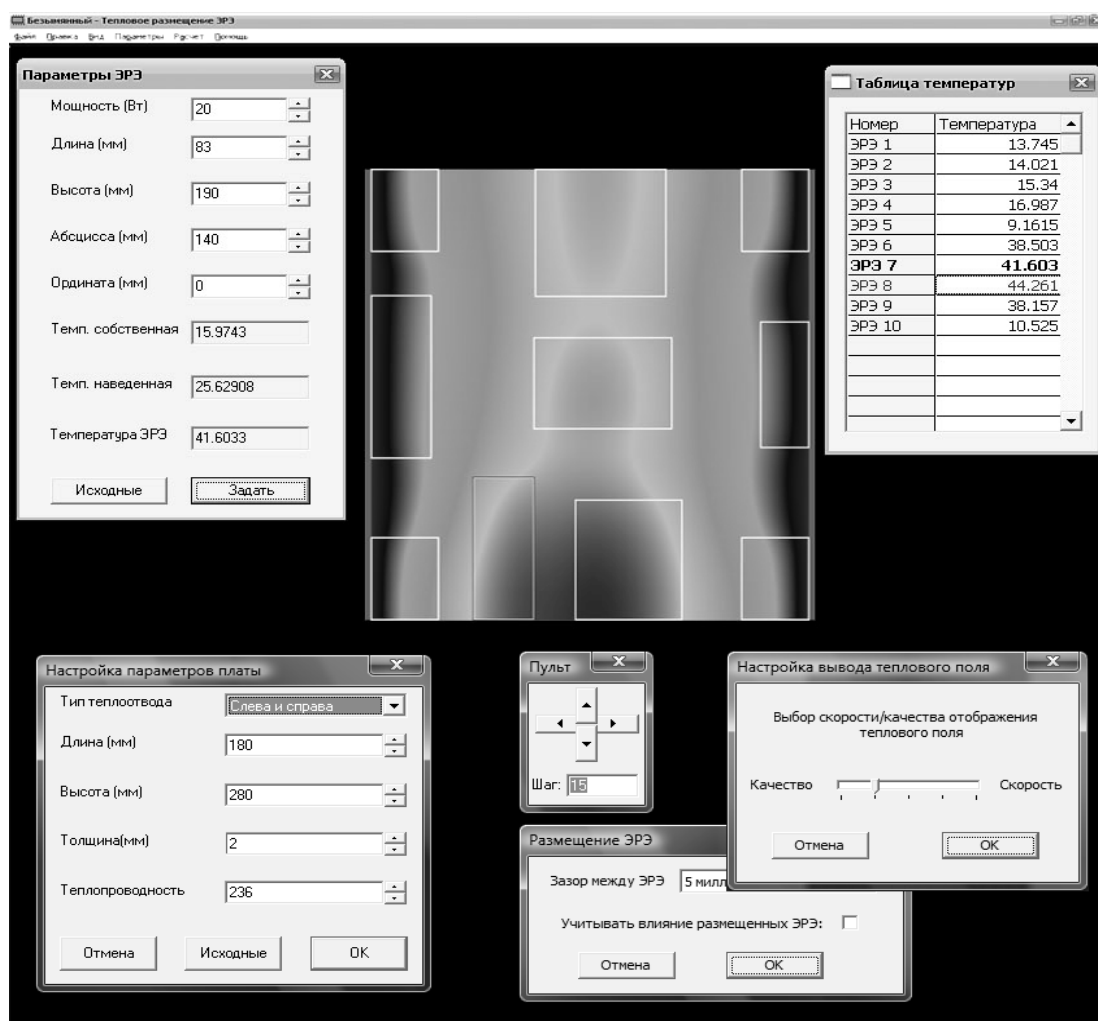


Рис. 6. Интерфейс программы для ЭВМ HeartOverlay

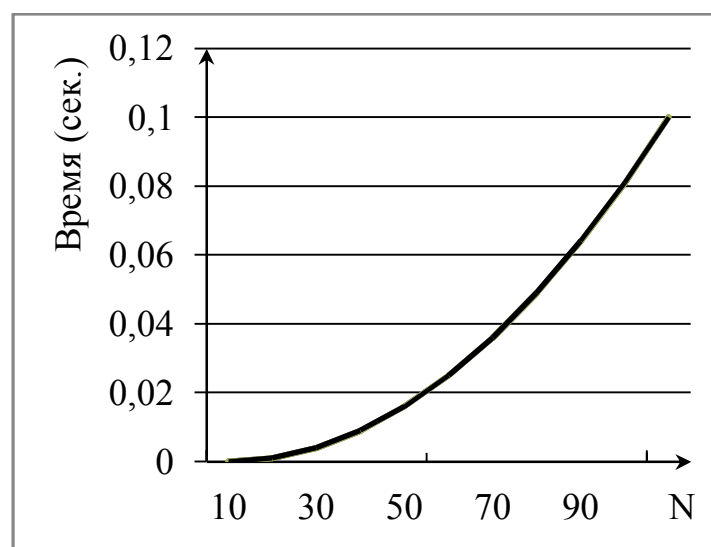


Рис. 7. Оценка временной сложности алгоритмов размещения ЭРЭ

Экспериментальная проверка разработанных аналитических моделей и алгоритмов, реализованных в программе, проводилась на моделях модулей ЭВМ «Багет-ВМФ», реализованного на основе конструктива «Евромеханика–6U».

Установившиеся тепловые режимы ЭРЭ (рис. 8) и точек на платах моделей модулей ЭВМ «Багет-ВМФ» отличались от результатов, полученных при эксплуатации разработанной системы в пределах $\pm 10\%$.

Проведенные эксперименты подтвердили результаты аналитических исследований, показали работоспособность программы HeartOverlay и ее высокую эффективность применения.

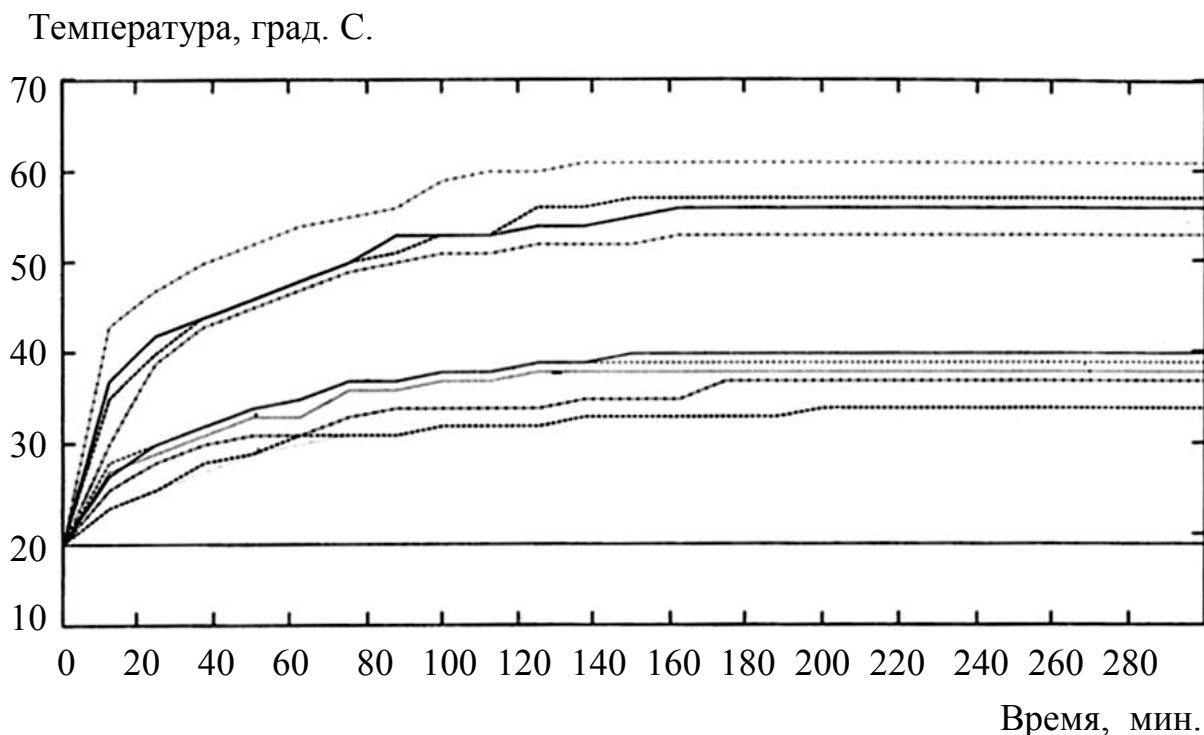


Рис. 8. Тепловые режимы ЭРЭ в ЭВМ «Багет-ВМФ»

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в работе.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработаны аналитические модели, позволяющие вычислять температуры ЭРЭ и температуры точек на модулях с одно-, двух-, трех- и четырехсторонними вариантами кондуктивного теплоотвода с краев плат.

2. Поставлена и решена задача «теплового размещения» ЭРЭ на модулях с одно-, двух-, трех- и четырехсторонними вариантами кондуктивного теплоотвода с краев плат. Предложен способ учета критерия трассируемости при «тепловом размещении» ЭРЭ.

3. Теоретические результаты работы доведены до практической реализации в виде программы для ЭВМ HeartOverlay, позволяющей моделировать тепловые

поля на модулях с кондуктивным теплоотводом, вычислять температуры ЭРЭ и температуры точек плат.

4. Произведена оценка точности разработанных аналитических моделей посредством вычислительных экспериментов для модулей с различными вариантами кондуктивного теплоотвода с краев плат. Результаты показали, что предложенные математические модели имеют погрешность не более 10%.

5. Экспериментальная проверка тепловых режимов ЭРЭ, выполненная на шкафе «Багет-ВМФ», и эксплуатация разработанного продукта подтвердили результаты теоретических исследований.

6. Созданный программный продукт внедрен в процесс автоматизированного проектирования на промышленном предприятии, а также в учебный процесс университета.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Квинт И.Э. Некоторые закономерности установки электрорадиоэлементов на платах с кондуктивным теплоотводом // Научные технологии и интеллектуальные системы 2006: Материалы VII международной молодежной научно-технической конференции. М., 2006. С. 168-173.

2. Кокотов В.З., Квинт И.Э. Моделирование тепловых полей от прямоугольных источников тепла в прямоугольной однородной пластине с краевым кондуктивным теплоотводом // Материалы 1-ой российской мультikonференции по проблемам управления. СПб, 2006. С. 202-207.

3. Кокотов В.З., Мейер А.А., Квинт И.Э. Аналитический способ расчета перепадов температур прямоугольных тепловыделяющих элементов в теле однородной теплопроводной прямоугольной пластины при теплоотводе с ее краев // Инженерно-физический журнал. Минск, 2007. №4. С. 156-166.

4. Квинт И.Э., Шахнов В.А. Расчет теплового режима рамочных конструкций электронной аппаратуры с теплоотводом на основание // Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций: Материалы Всероссийской научно-технической конференции. Самара, 2007. С. 19-21.

5. Квинт И.Э. Алгоритмы размещения электрорадиоэлементов на платах с кондуктивным теплоотводом // Научные технологии и интеллектуальные системы 2009: Материалы X международной молодежной научно-технической конференции. М., 2009. С. 160-165.

6. Программа для ЭВМ HeartOverlay: свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ №2009612243/ И.Э. Квинт заявл. №2009610883 от 10.03.09; зарег. 30.04.09.

7. Расчет тепловых режимов рамочных конструкций с теплоотводом на основание / Ю.А. Богданов, И.Э. Квинт [и др.] // Проектирование и технология электронных средств. М., 2007. №2. С. 10-13.