

На правах рукописи

Саратовский Николай Владимирович

ТЕПЛОВЫЕ МАКРОМОДЕЛИ КОНСТРУКЦИЙ БОРТОВЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ
СРЕДСТВ ДЛЯ САПР ИНЖЕНЕРНОГО АНАЛИЗА

Специальность 05.13.12 - "Системы автоматизации проектирования
(в электронике, радиотехнике и связи)"

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Москва – 2013

Работа выполнена на кафедре «Конструирование, технология и производство радиоэлектронных средств» Московского авиационного института (национального исследовательского университета)

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Ушкар Михаил Николаевич

Официальные оппоненты: Руфицкий Михаил Всеволодович
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» (ВлГУ),
профессор
Луценко Александр Владимирович
кандидат технических наук, ОАО "НПО "Лианозовский электромеханический завод", заместитель технического директора по информационным технологиям

Ведущая организация: ОАО «Радиотехнический институт имени академика А.Л. Минца»

Защита диссертации состоится “___” декабря 2013г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.02 в Московском авиационном институте (национальном исследовательском университете) по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МАИ.

Автореферат разослан “___” ноября 2013 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Петраков Александр Михайлович

Актуальность работы.

Развитие современных бортовых электронных средств (БЭС) характеризуется следующими тенденциями:

– рост степени интеграции элементной базы электронных средств (ЭС). Как показано в диссертации за период с 2005 по 2013гг. количество транзисторов в цифровых микропроцессорах увеличилось с 100 млн. до 2600 млн. Это обуславливает увеличение мощности, рассеиваемой микросхемами.

– увеличение доли цифровых устройств в составе бортовых радиолокационных станций. Проведенный в диссертации анализ бортовых радиолокационных станций (БРЛС), показал, что за период с 1995 по 2013гг. доля цифровых устройств в их составе возросла с 20% до 50%.

– рост быстродействия цифровых микросхем, таких как микропроцессоры, память и др., привел к повышению рассеиваемой ими мощности. Так за период с 2006 по 2013гг. быстродействие микропроцессоров возросла в 5 раз, а рассеиваемая мощность увеличилась в 4,3 раза.

Эти тенденции положительным образом сказались на массогабаритных характеристиках конструкций БЭС. В диссертации показано, что за период с 1995 по 2013гг. объем, занимаемый вертолетными многоцелевыми бортовыми радиолокационными станциями (МБРЛС), сократился почти в 20 раз.

Вместе с тем, снижение массогабаритных характеристик современных БЭС привело к повышению объемной плотности теплового потока. Так за период с 1995 по 2013 гг. значение объемной плотности теплового потока для вертолетных МБРЛС увеличилось в 4 раза. Аналогичная тенденция прослеживается и для авиационных МБРЛС. Например, увеличение объемной плотности привело к усложнению систем охлаждения МБРЛС. Так в БРЛС для летательных аппаратов (ЛА) пятого поколения системы охлаждения занимают 20% объема станции.

Рассмотренные тенденции развития современных БЭС обуславливают актуальность задач инженерного анализа их тепловых режимов.

В настоящее время, для решения задач анализа тепловых режимов БЭС, используется широкий спектр САПР инженерного анализа, в том числе ANSYS, ELCUT,

CATIA, SolidWorks и др. Анализ современных САПР теплового моделирования, проведенный в диссертации, показал, что в основе большинства решателей, данных САПР, лежит представление тепловой модели системой дифференциальных уравнений, решаемой с помощью метода конечных элементов (МКЭ) или метода конечных объемов (МКО).

В диссертации определены особенности конструкций современных БЭС и показано, что эти особенности (разнородность конструкционных материалов, большой разброс линейных размеров и многообразие форм БЭС) обуславливают резкий рост числа конечных элементов (КЭ), что в свою очередь приводит к снижению эффективности САПР при решении задач анализа тепловых режимов БЭС.

Выполненный в диссертации анализ методов повышения эффективности применения САПР инженерного анализа показал, что в настоящее время существует два основных направления повышения эффективности САПР:

- динамическое управление сеткой КЭ;
- тепловое макро моделирование.

Динамическое управление сеткой КЭ широко описано в литературе, посвященной МКЭ (работы Чернявского А.О., Шимановского А.О., Путято А.В.), диссертации и статьи Репнева Д.Н. и др. В последние годы этот метод в ограниченном виде вводится в САПР инженерного анализа, например, в САПР SolidWorks Flow Simulation.

Методы теплового макро моделирования рассмотрены в работах Дульнева Г.Н., Варламова Р.Г и др. В работах Дульнева Г.Н. рассмотрены теоретические основы и методы макро моделирования, для регулярных конструкций радиоэлектронных средств (РЭС) с источниками тепла, равномерно распределенными в объеме конструкции. Как показано в диссертации, современные конструкции отличаются большим разбросом значений рассеиваемой мощности источников тепла, что ограничивает область применения тепловых макромоделей (ТММ) конструкций с регулярной структурой. В диссертации Полушкина А.В. получена ТММ для герметичного блока и одного типа функциональной ячейки (ФЯ) с одним направлением распространения теплового потока и фиксированным расположением одного источника тепла, что ограничивает область применения этих результатов. Кроме того, эти методы не адаптированы к САПР инженерного анализа. В

диссертации Шалумовой Н.А. были получены ТММ только для базовых несущих конструкций электронных модулей второго уровня и не рассмотрены ТММ электронных модулей нулевого и первого уровней.

Анализ современного состояния САПР анализа тепловых режимов конструкций БЭС показывает, что задача повышения их эффективности путём разработки тепловых макромоделей является актуальной.

Выполненный в диссертации анализ особенностей конструкций современных БЭС, позволил определить самые распространённые конструкции электронных модулей нулевого уровня (ЭМ0) и электронных модулей первого уровня (ЭМ1), которые и стали объектом исследования:

1. БИС и СБИС, выполненные в корпусах BGA, PGA, QFP, SOT, SOP.

2. Несущие конструкции ЭМ1, выполненные по стандарту IEEE 1101.2, VITA 30.1 и VITA 20, с повышенным уровнем рассеиваемой мощности с различными системами кондуктивного охлаждения (СКО).

Кроме того, требование обеспечения высокой эффективности САПР анализа тепловых режимов конструкций БЭС на системном этапе проектирования приводит к необходимости постановки задачи анализа тепловых режимов ЭМ1, в условиях отсутствия решения задачи компоновки, что приводит к необходимости решения задачи анализа теплового режима для произвольного расположения источников тепла на печатной плате.

Цель диссертационной работы.

Повышение эффективности САПР инженерного анализа теплового режима конструкций БЭС на различных этапах проектирования путем разработки тепловых макромоделей ЭМ0 и ЭМ1, обеспечивающих существенное сокращение времени анализа теплового режима конструкций БЭС при заданной точности.

Задачи исследования. Для достижения поставленной в работе цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать метод теплового макромоделирования конструкций ЭМ0 и ЭМ1 с фиксированным расположением источников тепла, обеспечивающий возможность формирования макромоделей ЭМ0 и несущих конструкций ЭМ1;

2. Разработать тепловые макромоделли ЭМ0 и несущих конструкций ЭМ1 с фиксированными источниками тепла, позволяющие существенно сократить время инженерного анализа средствами САПР конструкций ЭМ0 и ЭМ1 с фиксированным расположением источников тепла;

3. Провести экспериментальные исследования адекватности и точности, разработанных ТММ ЭМ0 и ЭМ1, позволяющие связать время и точность анализа теплового режима конструкций ЭМ0 и ЭМ1;

4. Разработать метод теплового макромоделлирования ЭМ1 с произвольным расположением источников тепла, обеспечивающий получение ТММ ЭМ1 с учетом их местоположения на печатной плате (ПП);

5. Разработать ТММ конструкций ЭМ1 с произвольным расположением источников тепла, обеспечивающие существенное сокращение времени анализа теплового режима конструкций ЭМ1 с произвольным расположением источников тепла.

6. Исследовать адекватность и точность ТММ ЭМ1 с произвольным расположением источников тепла, позволяющие связать время и точность расчета теплового режима конструкций ЭМ0 и ЭМ1 на системном этапе проектирования;

7. Разработать метод адаптации реальных конструкций БЭС к задаче анализа их теплового режима, позволяющий упростить исходную модель, используемую в САПР инженерного анализа теплового режима, и сократить время анализа теплового режима средствами САПР.

Методы исследований.

При проведении исследований использовались основы теории тепломассообмена в РЭС, теория метода конечных элементов, теория оптимизации, теория планирования экспериментов, теория математической статистики и методы статистической обработки результатов эксперимента.

Научная новизна диссертационной работы:

Научной новизной обладают следующие результаты, полученные в диссертации:

1. Метод ТММ конструкций ЭМ1 с произвольным расположением источников тепла, отличающийся от известных, возможностью оценки теплового сопротивления и перегрева ЭМ0 и ЭМ1 в зависимости от местоположения источников тепла на ПП.

2. Тепловая макро модель несущей конструкции ЭМ1, отличающаяся от известных, возможностью оценки теплового сопротивления и перегрева элементов конструкции в зависимости от местоположения источников тепла на ПП, а так же адаптацией этих моделей к САПР.

3. Тепловые макро модели ЭМ0, отличающиеся от известных, возможностью корректировки точности и времени анализа теплового режима конструкций ЭС.

4. Тепловые макро модели несущих конструкций ЭМ1 с различными СКО, отличающиеся от известных, возможностью учета теплоотводящего мезонина, теплоотводящей рамки и комбинации теплоотводящего основания и мезонина, а так же возможностью корректировки точности и времени анализа теплового режима конструкций БЭС.

Практическая ценность.

1. Практической ценностью обладают ТММ: ЭМ0 и ЭМ1 с фиксированными источниками тепла; ФЯ с произвольным расположением источников тепла, позволяющие производить расчет конструкций РЭС в САПР при ограниченных аппаратных ресурсах, а также снизить трудоемкость использования САПР и затраты машинного времени при расчете показателей теплового режима БЭС.

2. Алгоритм перехода от полного факторного эксперимент (ПФЭ) к дробному факторному эксперименту (ДФЭ) средствами САПР SolidWorks Simulation, позволяющий сократить объем вычислений при сохранении точности решения. Разработанный алгоритм может использоваться для решения задач механической и электрической прочности средствами САПР SolidWorks.

Реализация и внедрение результатов работы:

Результаты работы были использованы на предприятии ОАО "Корпорация "Фазотрон-НИИР":

- при анализе теплового режима цифровой вычислительной машины Ц501;
- при разработке системы охлаждения для блока цифрового преобразователя Ц181 и блока цифровой вычислительной машины Ц501, входящих в состав МБРЛС "Бу-меранг";
- при анализе теплового режима модуля передатчика.

Что подтверждено соответствующим актом использования результатов работы.

Достоверность результатов

Обоснованность и достоверность полученных результатов подтверждается: путем корректного использования основ теории тепло-массообмена в РЭС, теории метода конечных элементов, теории оптимизации, теории планирования экспериментов, теории математической статистики и методов статистической обработки результатов эксперимента, апробацией результатов исследований на научно-практических конференциях и результатом экспериментальных исследований с помощью САПР SolidWorks и физических экспериментов.

На защиту выносятся следующие основные положения:

1. Тепловые макромодели ЭМ0, адаптированные к САПР и позволяющие вычислять тепловое сопротивление и коэффициент теплопроводности корпусов типа: PGA, BGA, QFP, SOP, SOT;

2. Тепловые макромодели несущих конструкций унифицированных ЭМ1 с СКО, выполненных в соответствии со стандартом IEEE 1101.2, VITA 30.1 и VITA 20, позволяющие вычислять тепловое сопротивление и коэффициенты теплопроводности несущих конструкций ЭМ1 с СКО;

3. Метод теплового макромоделирования ЭМ1 с произвольным расположением источников тепла, позволяющий формировать тепловые макромодели, содержащие до 10 источников тепла с учетом их произвольного расположения на печатной плате;

4. Тепловые макромодели ЭМ1 с произвольным расположением источников тепла, позволяющие вычислить величину перегрева и тепловое сопротивление между тепловым стоком и источником тепла, с учетом наведенного перегрева от соседних источников тепла, с учетом их произвольного расположения на ПП.

Апробация работы.

Основные результаты работы докладывались на следующих конференциях:

– Международной конференции "Авиация и космонавтика 2011", Москва, МАИ, 2011г.

– Международной молодежной конференции "XIX Туполевские чтения", Казань, 24-26 мая 2011г.

– Научно-практической конференции студентов и молодых ученых МАИ "Инновации в авиации и космонавтике - 2011", Москва, МАИ, 2011г.

– Научно-практической конференции студентов и молодых ученых МАИ "Инновации в авиации и космонавтике - 2012", Москва, МАИ, 2012г.

– Научно-практической конференции студентов и молодых ученых МАИ "Инновации в авиации и космонавтике - 2013", Москва, МАИ, 2013г.

Публикации.

Результаты диссертационной работы отражены в 10 научных работах, в том числе 3 статьи в периодических печатных изданиях входящих в перечень ВАК, тезисах 7 докладов на научно-технических конференциях.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка используемой литературы. Диссертация изложена на 127 листах основного текста, содержит 60 рисунков и 30 таблиц к основному тексту, список литературы из 86 наименований и 20 страниц приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, формируется цель и задачи работы, научная новизна, практическая значимость полученных результатов, а также положения, выносимые на защиту. Излагается краткое содержание работы.

В первой главе проанализированы методы теплового моделирования и САПР инженерного анализа теплового режима ЭС. Показано, что особенности конструкций современных БЭС приводят к увеличению размерности задачи анализа теплового режима БЭС и, как следствие, к снижению эффективности САПР инженерного анализа. Сформулирована цель и задачи исследования диссертационной работы, обеспечивающие повышение эффективности САПР инженерного анализа.

В диссертационной работе в результате анализа были выявлены следующие особенности ЭМ:

1. Большой разброс геометрических размеров конструктивных элементов. Как показано в диссертационной работе, для ЭМ0 разброс размеров составляет два порядка,

при переходе к ЭМ1 – три порядка; для ЭМ3 разброс размеров может достигать четырех порядков.

2. Неоднородность конструкций, под которой понимаем сочетание различных материалов, клеевых соединений, заливок компаундами и прочее.

3. Наличие криволинейных поверхностей, под которыми понимаем наличие в реальных конструкциях фасок, скруглений и других геометрических неровностей.

4. Разброс значений температур в пределах элемента конструкции. Как было показано в диссертационной работе, разброс температур в пределах кристалла процессора может достигать более 60°C.

5. Разброс мощностей рассеивания источников тепла в пределах конструкции. В диссертации, при анализе ЭМ1, было показано, что активные радиоэлементы, в пределах одного ЭМ1, имеют разброс рассеиваемых мощностей в пределах от одного до трех порядков.

6. Зависимость перегрева от местоположения источника тепла. В диссертации экспериментально показано, что в зависимости от места расположения источника тепла на ПП, разница между наилучшим и наихудшим случаем, в пределах одного ЭМ1, может достигать 54°C.

В диссертационной работе были проанализированы методы теплового моделирования. Проведен обзор современных САПР инженерного анализа (Ansys, Elcut, Catia, SolidWorks и др.). Выявлено, что рассмотренные САПР используют МКЭ и МКО для решения широкого спектра инженерных задач. Анализ применения вышеуказанных САПР показал, что особенности современных конструкций ЭС ограничивают эффективность применения данных САПР инженерного анализа. В диссертационной работе установлены следующие причины снижения эффективности применения САПР инженерного анализа: разброс диапазона линейных размеров, неоднородность конструкций и наличие криволинейных поверхностей конструкций ЭМ приводит к линейному увеличению КЭ.

В свою очередь, линейное увеличение количества КЭ приводит к резкому (не линейному) повышению затрат машинного времени на проведение анализа теплового режима.

Поэтому повышение эффективности применения САПР инженерного анализа является актуальной задачей.

Для повышения эффективности анализа теплового режима конструкций БЭС средствами САПР инженерного анализа, в диссертационной работе поставлены следующие задачи:

- разработать метод теплового макромоделирования конструкций ЭМ0 и ЭМ1 с фиксированным расположением источников тепла;
- разработать тепловые макромоделели ЭМ0 и несущих конструкций ЭМ1 с фиксированными источниками тепла;
- провести экспериментальные исследования адекватности и точности, разработанных ТММ ЭМ0 и ЭМ1;
- разработать метод теплового макромоделирования ЭМ1 с произвольным расположением источников тепла;
- разработать тепловые макромоделели конструкций ЭМ1 с произвольным расположением источников тепла;
- исследование адекватности и точности ТММ ЭМ1 с произвольным расположением источников тепла;
- разработать метод адаптации реальных конструкций БЭС.

Таким образом, в первой главе выявлены конструктивные особенности ЭМ0, ЭМ1 и ЭМ2 современных БЭС, такие как динамический диапазон линейных размеров конструкций ЭМ; неоднородность конструкций; наличие криволинейных поверхностей; разброс значений температур в пределах элемента конструкции; разброс мощностей рассеивания источников тепла в пределах конструкции; зависимость перегрева от местоположения источника тепла. Показано снижение эффективности применения САПР инженерного анализа, обусловленное линейным ростом числа КЭ и нелинейным ростом времени анализа теплового режима БЭС, вызванное конструктивными особенностями современных БЭС. Показано снижение эффективности применения современных САПР инженерного анализа, обусловленное ростом числа КЭ и потребностью проведения анализа теплового режима конструкций ЭС на системном этапе проектирования. Сформу-

лированы цель и задачи исследования диссертационной работы, обеспечивающие повышение эффективности САПР инженерного анализа.

Во второй главе разработан метод теплового макро моделирования конструкций ЭМ0 и ЭМ1 с фиксированным расположением источников тепла; ТММ ЭМ0 и несущих конструкций ЭМ1 с фиксированными источниками тепла; проведены экспериментальные исследования адекватности и точности, разработанных ТММ ЭМ0 и ЭМ1.

Разработана методика синтеза упрощенных ТММ ЭМ0 и ЭМ1. ЭМ0 и ЭМ1, рассмотренные в этой главе, имеют общий признак - фиксированное расположение источника тепла - это позволило разработать общий алгоритм теплового макро моделирования (рисунок 1).

Методика теплового макро моделирования ЭМ0 и ЭМ1 может быть представлена следующей последовательностью:

1. Задание уровня ЭМ (нулевой или первый), тип конструкции, информация о физических параметрах конструкции.
2. Анализ конструкции ЭМ. Формирование ограничений и допущений, принимаемых к конструкции.
3. Составление обобщенной ТММ, на основании допущений и ограничений.
4. Вычисление теплового сопротивления всей модели и теплового сопротивления всех элементов тепловой схемы. Определение коэффициентов влияния каждого элемента конструкции.
5. Упрощение обобщенной ТММ, в соответствие с заданной погрешностью.
6. Проверка адекватности полученной упрощенной ТММ.
7. Преобразование в исходные данные для использования ТММ в САПР. Так для использования в САПР SolidWorks такими выходными данными будут: количество тел, описывающих модель, их габариты, коэффициенты теплопроводности тел, описывающих модель, рассеиваемая мощность и плоскость, на которой следует задавать граничное условие типа "рассеиваемая мощность".

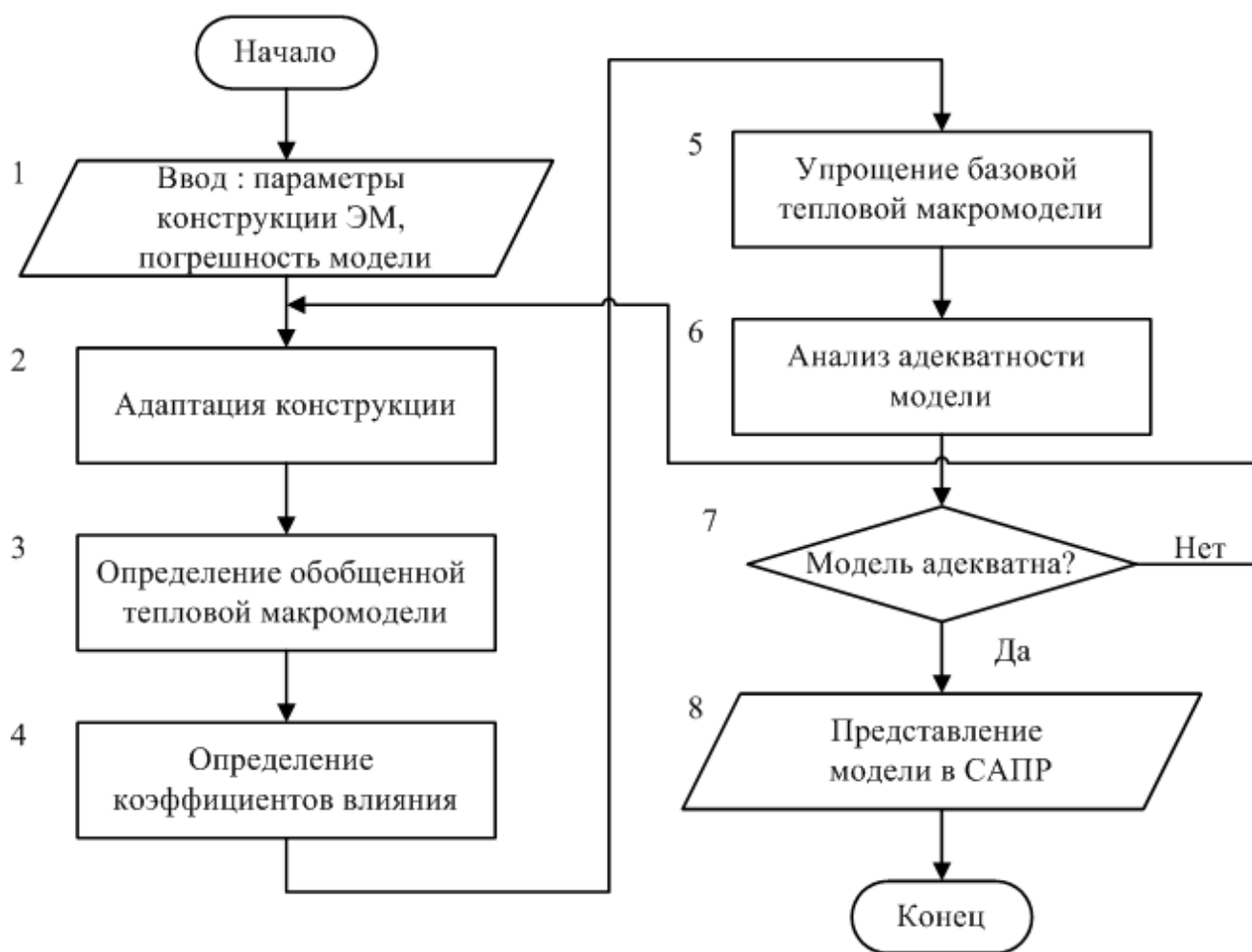


Рисунок 1 – Алгоритм разработки ТММ с фиксированным расположением источника тепла

Для решения задачи разработки ТММ ЭМ0 были проанализированы конструкции микросхем, выполненных в корпусах PGA, BGA, QFP, SOP и SOT. Данные типы корпусов микросхем (МС) выбраны из-за наиболее частого их использования в современных конструкциях БЭС. Исходя из анализа конструкций корпусов ЭМ0, были выявлены каналы отвода тепловой нагрузки от источников тепла. В результате для каждого типа корпусов ЭМ0 была составлена обобщенная ТММ. Для каждой базовой ТММ были рассчитаны тепловые проводимости всех элементов тепловой схемы и суммарная проводимость; вычислены коэффициенты влияния, т.е. доля каждого элемента тепловой цепи от результирующей тепловой проводимости. Для вышеуказанных типов корпусов ЭМ0, для погрешности 10% были получены следующие макромодели (таблица 1), так же получено аналитическое выражение, описывающее полученные ТММ и выражения для вычисления значения коэффициентов теплопроводности элементов ТММ.

Таблица 1 – ТММ ЭМ0

№ п/п	Тип корпуса	Структура корпуса	Тепловая схема макромодели	Математическое описание	Представление ТММ в САПР SolidWorks	
					Мо-дель	Коэффициент теплопро-водности
1.	BGA			$\sigma = \sigma_k + \sigma_p$		$\lambda'_p = \frac{\sigma_p \cdot h_p}{Lx_p \cdot Ly_p}$ λ_k материал крышки корпуса
2.	QFP с термоотводом			$\sigma = \sigma_k + \frac{\sigma_{kr} \cdot \sigma_{to}}{\sigma_{kr} + \sigma_{to}}$		λ_k материал крышки корпуса λ_{to} материал термоотвода
3.	QFP без термоотвода			$\sigma = \sigma_{kv} + \frac{\sigma_{kh} \cdot \sigma_{och}}{\sigma_{kh} + \sigma_{och}}$		$\lambda = \left(\frac{1}{\sigma_{kr}} + \frac{1}{\sigma_{och}} \right) \cdot \frac{l'}{S_{kr}}$ $l' = l_{kr} + l_{kl} + l_{och}$ λ_k материал крышки корпуса
4.	SOP			$\sigma = \sigma_{kv} + \frac{\sigma_{kh} \cdot \sigma_{och}}{\sigma_{kh} + \sigma_{och}}$		λ материал корпуса
5.	SOT					
6.	PGA			$\sigma = \sigma_{pv} + \frac{\sigma_{ph} \cdot \sigma_{sh}}{\sigma_{ph} + \sigma_{sh}}$		$\lambda = \sigma \cdot \frac{l_k}{S_k}$
7.						

Анализ адекватности ТММ ЭМ0 проводился путем сравнения значений, указанных в технических требованиях (Datasheet), со значениями, полученными с помощью ТММ при расчете теплового режима, выполненным с использованием САПР SolidWorks.

Расчетные значения тепловых сопротивлений с достаточной для практического применения точностью совпали со значениями, приведенными в техническом описании. Так, например, среднее значение погрешности теплового сопротивления перехода корпус – окружающая среда составило 4,83%, а для перехода поверхность нагретой зоны – поверхность корпуса – 9,87%. Так же наблюдался значительный выигрыш во времени, - среднее значение выигрыша во времени для корпусов типа QFP – 78 минут, а для BGA корпусов составляет 124 минуты, что в процентном соотношении составляет 64,43% и 83,91% соответственно.

Для решения задачи разработки ТММ теплонагруженных ЭМ1 с фиксированным расположением источников тепла были проанализированы современные ФЯ. Самым распространенным методом эффективного охлаждения тепловыделяющих элементов и отвода тепловых потоков от них является использование ФЯ с кондуктивным теплоотво-

дом. Кондуктивный метод охлаждения применяется в устройствах с высокой плотностью монтажа, где невозможно организовать воздушное охлаждение. Было выделено три типа несущих конструкций теплонапряженных ЭМ1: с теплоотводящим основанием и рамкой (ФЯ первого типа); с теплоотводящим мезонином (под мезонином будем понимать металлическую пластину, расположенную поверх ЭМ0) (ФЯ второго типа); ФЯ с теплоотводящим основанием и мезонином (ФЯ третьего типа).

Для выбранных типов ЭМ1 проанализирована структура и составлены их тепловые схемы и математические описания. Для каждого типа ЭМ1, используя полученное математическое описание, рассчитана суммарная тепловая проводимость, коэффициенты влияния каждого элемента на суммарную проводимость и рассеиваемые мощности в каждой ветви схемы. После чего были выбраны элементы тепловой схемы, вносящие основной вклад в результирующую тепловую проводимость, и на их основе составлены упрощенные тепловые схемы.

Перегрев каждого ЭМ0 относительно температуры корпуса блока рассчитывался как сумма собственного и наведенного перегревов:

$$\Delta t_i = \vartheta_i + \sum_{j=1, j \neq i}^N \vartheta_i^j \quad (1)$$

где ϑ_i – собственный перегрев i -го ЭМ0 от внутренних источников тепла; ϑ_i^j – наведенный тепловой перегрев на i -го ЭМ0 от $(N-1)$ внешних тепловых источников.

Собственные и наведенные перегревы ЭМ0 рассчитывались по формулам (2) и (3):

$$\vartheta_i = \frac{P_i}{\sigma_{\Sigma}^i} ; \quad (2)$$

$$\vartheta_i^j = R_j^i \cdot P_j ; \quad (3)$$

где P_i – мощность, выделяемая i -ым ЭМ0, Вт; σ_{Σ}^i – суммарная тепловая проводимость СКО от i -го ЭМ0 до корпуса блока, Вт/К; R_j^i – тепловое сопротивление между i -ым и j -ым ЭМ0, К/Вт; P_j – мощность, выделяемая j -ым ЭМ0, Вт.

С учетом наведенного перегрева в диссертационной работе разработаны тепловые макромодели несущих конструкций ЭМ1. Выполнен сравнительный анализ точности и эффективности разработанных тепловых макромоделей. Анализ проводился в САПР

SolidWorks Flow Simulation путем сравнения несущих конструкций реальных ЭМ1 и ЭМ1, разработанных с помощью макромоделей. Анализ полученных результатов показал, что среднее значение перегрева на поверхности корпуса ЭМ0 для ФЯ первого типа составило 2,4%, для ФЯ второго типа 1% , а для ФЯ третьего типа 0,3 %. При этом сократились затраты машинного времени: для ФЯ первого типа на 21%, для ФЯ второго типа на 38%, а для ФЯ третьего типа на 37%.

Таким образом, во второй главе решены следующие задачи: разработан метод теплового макромоделирования конструкций ЭМ0 и ЭМ1 с фиксированным расположением источников тепла, обеспечивающий возможность формирования макромоделей ЭМ0 и несущих конструкций ЭМ1; разработаны тепловые макромоделер ЭМ0 и несущих конструкций ЭМ1 с фиксированными источниками тепла, позволяющие существенно сократить время инженерного анализа средствами САПР конструкций ЭМ0 и ЭМ1 с фиксированными источниками тепла; получено представление ТММ ЭМ0 и ТММ1 для использования в САПР SolidWorks, позволяющее существенно сократить машинное время при анализе теплового режима конструкций РЭС; экспериментальные исследования адекватности и точности, разработанных ТММ ЭМ0 и ЭМ1, позволяющие связать время и точность расчета теплового режима конструкций ЭМ0 и ЭМ1.

В третьей главе разработаны: метод теплового макромоделирования ЭМ1 с произвольным расположением источников тепла; ТММ конструкций ЭМ1 с произвольным расположением источников тепла; выполнены экспериментальные исследования адекватности и точности ТММ ЭМ1 с произвольным расположением источников тепла.

Метод теплового макромоделирования ЭМ1 с произвольным расположением источника тепла, представлен на рисунке 2 блок-схемой алгоритма.

В основе методики лежит статистический метод. Это связано с тем, что при использовании аналитических методов построения ТММ с ростом количества источников тепла происходит резкое увеличение переменных и повышается сложность оценки наведенных перегревов. Поэтому в настоящее время существуют аналитические решения этой задачи с числом источников тепла не более трех, что для практического использования является существенным ограничением.

Метод теплового макро моделирования ЭМ1 с произвольным расположением источников тепла может быть представлен следующей последовательностью:

1. Задание исходной конструкции и погрешности ТММ.

2. На основе анализа конструкции выделяются влияющие факторы, т.е. происходит определение степеней свободы конструкции ФЯ.

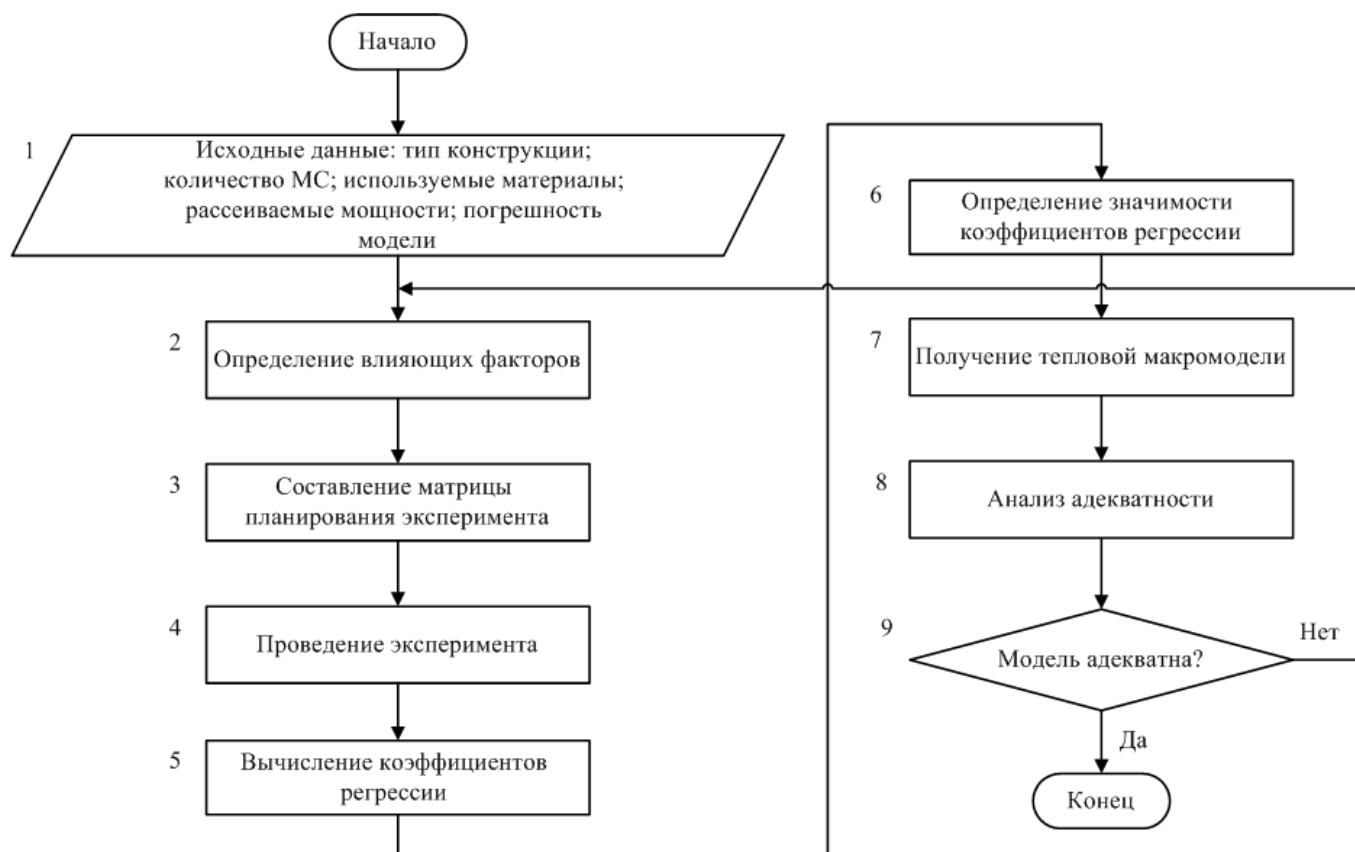


Рисунок 2 - Блок-схема алгоритма формирования ТММ с произвольным расположением источников тепла.

3. Составление матрицы планирования эксперимента. При составлении матрицы планирования эксперимента необходимо минимизировать количество экспериментов. С этой целью использовалось трехуровневое планирование эксперимента и D критерий оптимальности, суть которого заключена в том, что требуется выбирать планы, обеспечивающие минимальный объем эллипсоида рассеяния оценок коэффициентов математической модели, вычисляемых по экспериментальным данным. Так же для сокращения количества экспериментов будем использовать матрицу дробного факторного эксперимента.

4. Экспериментальное исследование с использованием САПР SolidWorks Simulation. Данная САПР позволяет за одно исследование проводить несколько расчетов с

варьируемыми переменными, например, с изменяемыми шагами установки ЭМО по осям X и Y. Реальный эксперимент заменен на эксперимент с использованием САПР из-за затрат времени на проведение макетирования, высокой стоимости цифровых ЭМО и других факторах сопутствующих макетированию и натурным экспериментам.

5. Вычисление коэффициентов регрессии. Для повышения эффективности и точности вычисления использовалась система STATISTICA. Так же использование данной математической программы обусловлено тем, что в случае неоднозначности типа математического распределения, требуется произвести вычисления с помощью всех видов распределений и выбрать, то, которое имеет минимальную ошибку. Такое исследование требует больших временных затрат, в то время как вышеуказанная система позволяет произвести этот расчет за несколько минут.

6. С учетом заданной погрешности вычисляется значимость каждого члена уравнения регрессии.

7. Сравнение экспериментальных значений и значений, рассчитанных с помощью ТММ, выраженных системой уравнений регрессии.

Для решения задачи разработки обобщенной ТММ ЭМ1 с произвольным расположением источника тепла за основу была взята ФЯ MB3S/C-K - высокопроизводительный вычислительный модуль на базе системы на кристалле с архитектурой "Эльбрус-2С+" в конструктиве "Евромеханика-6U" с СКО. Для того чтобы разрабатываемая ТММ была обобщенной, в качестве переменных, помимо позиционирования ЭМО по осям X и Y, были введены следующие переменные: геометрические размеры корпусов ЭМО по оси X и Y; коэффициент теплопроводности материала корпуса ЭМО; величина рассеиваемой мощности; коэффициент теплопроводности материала многослойной ПП; коэффициент теплопроводности термооснования; величина контактного сопротивления в местах перехода ПП - клиновый зажим, клиновый зажим - корпус блока и термооснование - корпус блока.

Для сокращения количества экспериментов был выбран ДФЭ (9-4), т.е. 4 переменных были рассмотрены как результат парного взаимодействия линейных членов. В качестве 4 реплик были взяты следующие переменные: величина рассеиваемой мощности; коэффициент теплопроводности материала многослойной ПП; коэффициент тепло-

проводности термооснования; величина контактного сопротивления в местах перехода ПП - клиновый зажим, клиновый зажим - корпус блока и термооснование - корпус блока.

Исследование адекватности и точности проводилось по методике, изложенной в главе 2. В результате исследования установлено, что в зависимости от числа рассматриваемых факторов погрешность может меняться от 1% до 30%. При этом время анализа сокращается на 50-85%. В диссертационной работе получены две системы уравнений для ЭМ1, позволяющие вычислять наведенные перегревы на корпуса ЭМ0 с погрешностью 10% (формула 4) и 5% (формула 5).

$$\begin{cases} B_0^1 + B_1^1 \cdot X_1^1 + B_2^1 \cdot X_2^1 + B_3^1 \cdot X_3^1 + B_4^1 \cdot X_4^1 + B_5^1 \cdot X_5^1 + B_6^1 \cdot X_6^1 + B_7^1 \cdot X_7^1 + B_8^1 \cdot X_8^1 + B_9^1 \cdot X_9^1 = Y1 \\ B_0^2 + B_1^2 \cdot X_1^2 + B_2^2 \cdot X_2^2 + B_3^2 \cdot X_3^2 + B_4^2 \cdot X_4^2 + B_5^2 \cdot X_5^2 + B_6^2 \cdot X_6^2 + B_7^2 \cdot X_7^2 + B_8^2 \cdot X_8^2 + B_9^2 \cdot X_9^2 = Y2 \\ B_0^3 + B_1^3 \cdot X_1^3 + B_2^3 \cdot X_2^3 + B_3^3 \cdot X_3^3 + B_4^3 \cdot X_4^3 + B_5^3 \cdot X_5^3 + B_6^3 \cdot X_6^3 + B_7^3 \cdot X_7^3 + B_8^3 \cdot X_8^3 + B_9^3 \cdot X_9^3 = Y3 \\ B_0^4 + B_1^4 \cdot X_1^4 + B_2^4 \cdot X_2^4 + B_3^4 \cdot X_3^4 + B_4^4 \cdot X_4^4 + B_5^4 \cdot X_5^4 + B_6^4 \cdot X_6^4 + B_7^4 \cdot X_7^4 + B_8^4 \cdot X_8^4 + B_9^4 \cdot X_9^4 = Y4 \\ B_0^5 + B_1^5 \cdot X_1^5 + B_2^5 \cdot X_2^5 + B_3^5 \cdot X_3^5 + B_4^5 \cdot X_4^5 + B_5^5 \cdot X_5^5 + B_6^5 \cdot X_6^5 + B_7^5 \cdot X_7^5 + B_8^5 \cdot X_8^5 + B_9^5 \cdot X_9^5 = Y5 \\ B_0^6 + B_1^6 \cdot X_1^6 + B_2^6 \cdot X_2^6 + B_3^6 \cdot X_3^6 + B_4^6 \cdot X_4^6 + B_5^6 \cdot X_5^6 + B_6^6 \cdot X_6^6 + B_7^6 \cdot X_7^6 + B_8^6 \cdot X_8^6 + B_9^6 \cdot X_9^6 = Y6 \end{cases}; (4)$$

$$\begin{cases} B_0^1 + \sum_{i=1}^5 B_i^1 \cdot X_i^1 + \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^5 B_{ij}^1 \cdot X_{ij}^1 + \sum_{u=1}^5 B_u^1 \cdot (X_u^1)^2 = Y1 \\ B_0^2 + \sum_{i=1}^5 B_i^2 \cdot X_i^2 + \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^5 B_{ij}^2 \cdot X_{ij}^2 + \sum_{u=1}^5 B_u^2 \cdot (X_u^2)^2 = Y2 \\ B_0^3 + \sum_{i=1}^5 B_i^3 \cdot X_i^3 + \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^5 B_{ij}^3 \cdot X_{ij}^3 + \sum_{u=1}^5 B_u^3 \cdot (X_u^3)^2 = Y3 \\ B_0^4 + \sum_{i=1}^5 B_i^4 \cdot X_i^4 + \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^5 B_{ij}^4 \cdot X_{ij}^4 + \sum_{u=1}^5 B_u^4 \cdot (X_u^4)^2 = Y4 \\ B_0^5 + \sum_{i=1}^5 B_i^5 \cdot X_i^5 + \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^5 B_{ij}^5 \cdot X_{ij}^5 + \sum_{u=1}^5 B_u^5 \cdot (X_u^5)^2 = Y5 \\ B_0^6 + \sum_{i=1}^5 B_i^6 \cdot X_i^6 + \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^5 B_{ij}^6 \cdot X_{ij}^6 + \sum_{u=1}^5 B_u^6 \cdot (X_u^6)^2 = Y6 \end{cases}, (5)$$

где B_0^l —свободный член уравнения; B_i^l —коэффициент, учитывающий линейные эффекты; B_{ij}^l —коэффициент, характеризующий эффекты парного взаимодействия; B_u^l —коэффициент, учитывающий квадратичные эффекты; $Y1 - Y6$ - значение максимальной температуры на поверхности корпусов МС1-МС6; X_1^l и X_2^l - позиционирование ЭМ0 на ПП по оси X и Y, соответственно; X_3^l и X_4^l - размеры корпуса ЭМ0 по оси X и Y, соответственно; X_5^l - коэффициент теплопроводности корпуса ЭМ1; X_6^l - рассеиваемая мощность ЭМ0; X_7^l - коэффициент теплопроводности материала ПП; X_8^l - коэффициент теплопроводности материала теплоотводящего основания; X_9^l - тепловое сопротивление контакта ПП - клиновый зажим; l – номер уравнения регрессии, входящего в систему уравнений.

Таким образом, в третьей главе решены следующие задачи: разработан метод теплового макро моделирования ЭМ1 с произвольным расположением источников тепла, обеспечивающий получение ТММ ЭМ1 с учетом их местоположения на ПП; разработа-

ны тепловые макромодели конструкций ЭМ1 с произвольным расположением источников тепла, обеспечивающие существенное сокращение времени анализа теплового режима конструкций ЭМ1 с произвольным расположением источников тепла на ранних этапах проектирования; исследована адекватность и точность ТММ ЭМ1 с произвольным расположением источников тепла, позволяющая связать время и точность расчета теплового режима конструкций ЭМ0 и ЭМ1.

В четвертой главе разработан метод адаптации реальных конструкций БЭС, позволяющий понизить размерность решаемой задачи инженерного анализа с помощью САПР. Выполнены экспериментальные исследования, целью которых было сопоставление расчета теплового режима блоков БРЛС в САПР SolidWorks, с применением ТММ нулевого и первого уровней, с результатами физических экспериментов.

Проанализированы конструкции ЭС, выполненные в виде моделей в САПР SolidWorks, выявлено влияние различных конструктивных элементов ЭМ на количество КЭ и, как следствие, на время проведения и точность анализа теплового режима конструкций ЭС. В результате анализа разработана последовательность упрощения реальных конструкций ЭМ, позволяющая сократить время инженерного анализа теплового режима конструкций ЭМ при сохранении заданной точности, которая представлена на рисунке 3.

Были выполнены экспериментальные исследования тепловых режимов следующих БЭС: блок бортовой цифровой вычислительной машины Ц501 и блок цифрового преобразователя Ц181, входящих в состав МБРЛС «Бумеранг», а так же модуля передатчика.

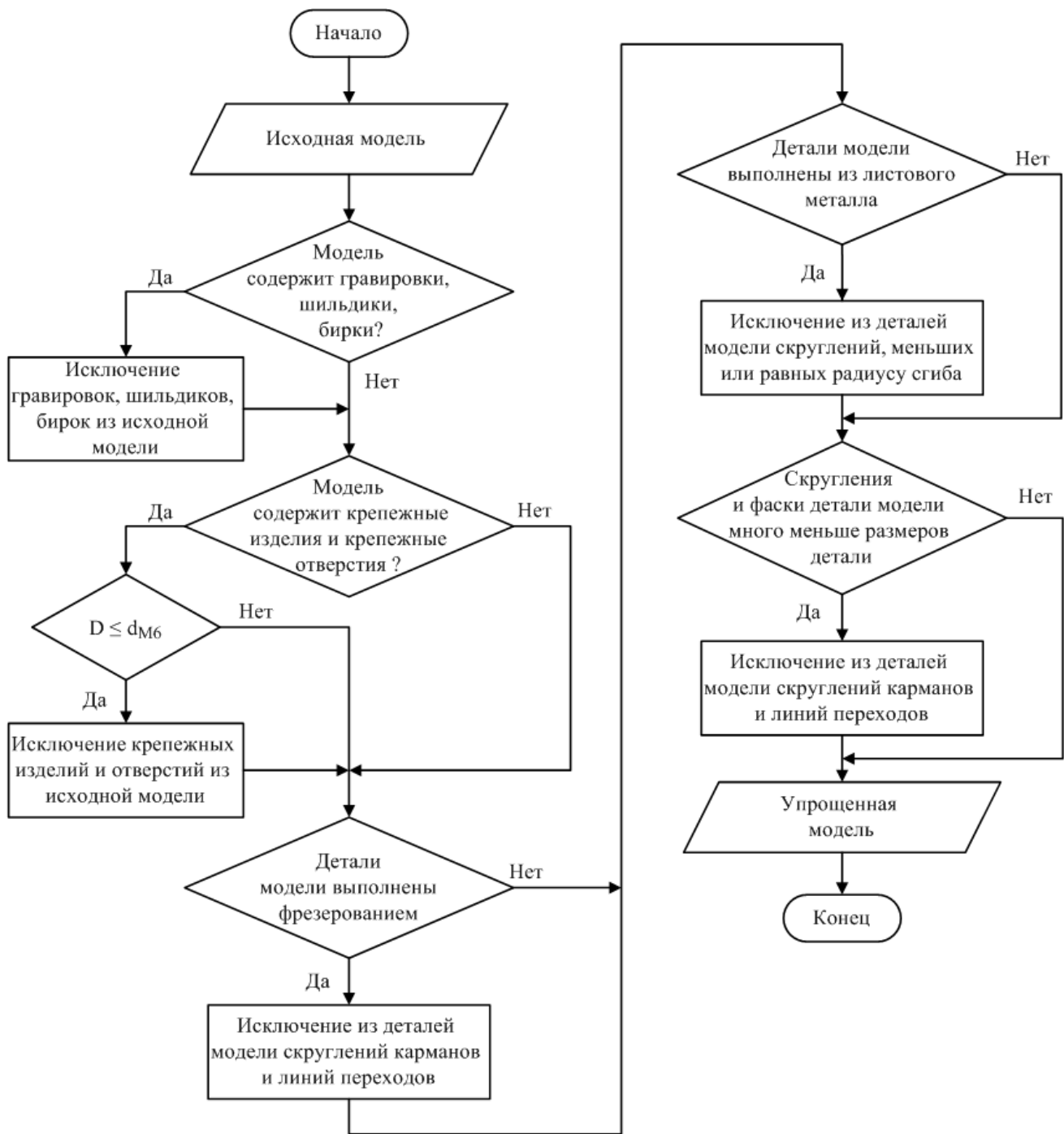


Рисунок 3 - Последовательность приведения подробной модели ЭМ к упрощенной

Для указанных БЭС проведено экспериментальное определение температур в соответствии со схемой эксперимента представленной на рисунке 4.

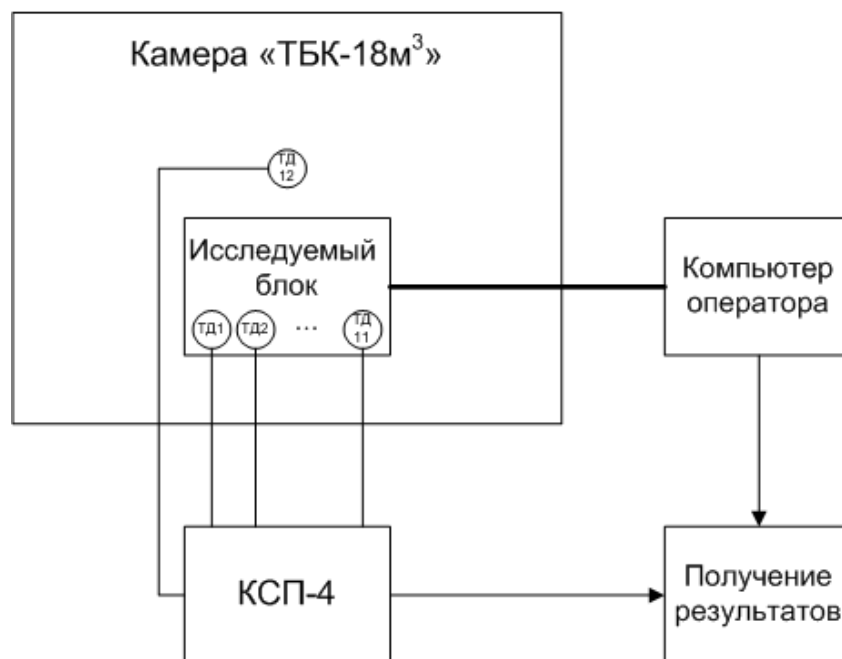


Рисунок 4 - Общая схема эксперимента

Исследуемые БЭС помещались в камеру тепла и холода "ТБК-18м³". В контрольные точки устанавливались термодатчики ТД 1 - ТД 11 (термодатчик ТД 12 измерял температуру внутри термокамеры). С помощью потенциометра КСП-4 данные с термодатчиков автоматически отслеживались и регистрировались на миллиметровой ленте, установленной внутри КСП-4. В экспериментальной установке предусмотрена возможность подключения персонального компьютера для снятия тепловой характеристики с ЭМО, в конструкцию которых входят терморезисторы.

Результаты экспериментальных исследований и оценка эффективности применения ТММ ЭМ0 и ЭМ1, приведены на рисунках 5-7.

На рисунке 5 представлена диаграмма, отражающая сокращение количества КЭ, полученная при сравнении подробных моделей БЭС с моделями с упрощенной конструкцией и моделями с совместным использованием упрощенных конструкций и ТММ ЭМ0 и ЭМ1. Результатом использования упрощенной конструкции ЭМ и ТММ стало сокращение КЭ в среднем на 45% и 89%, соответственно.

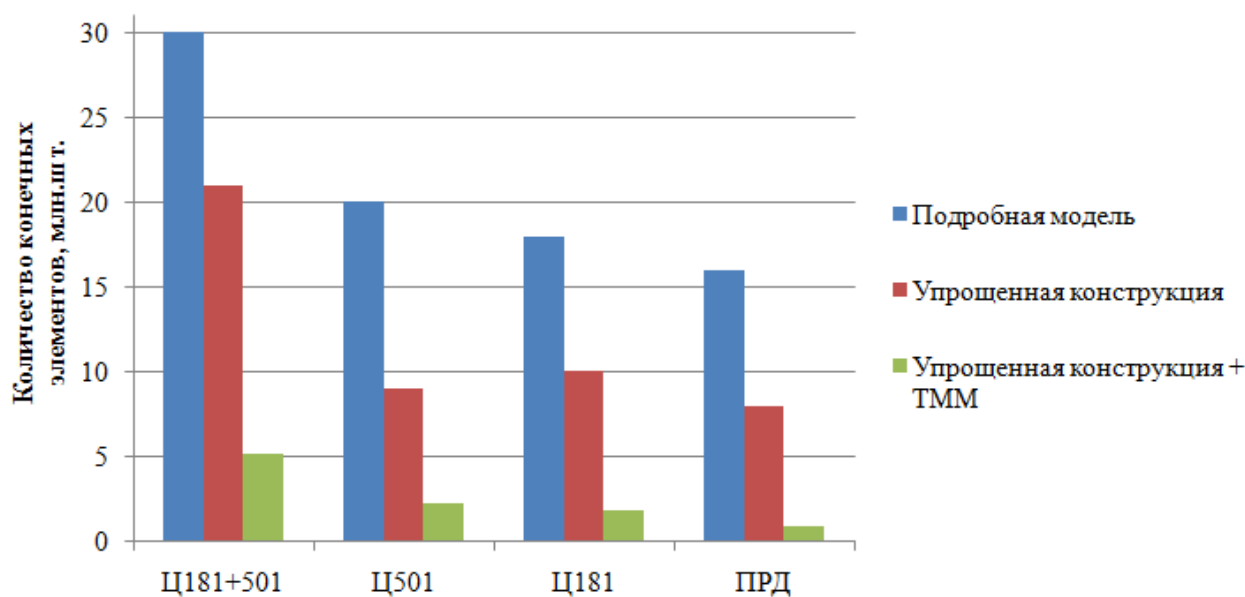


Рисунок 5 - Изменение количества КЭ от уровня детализации модели

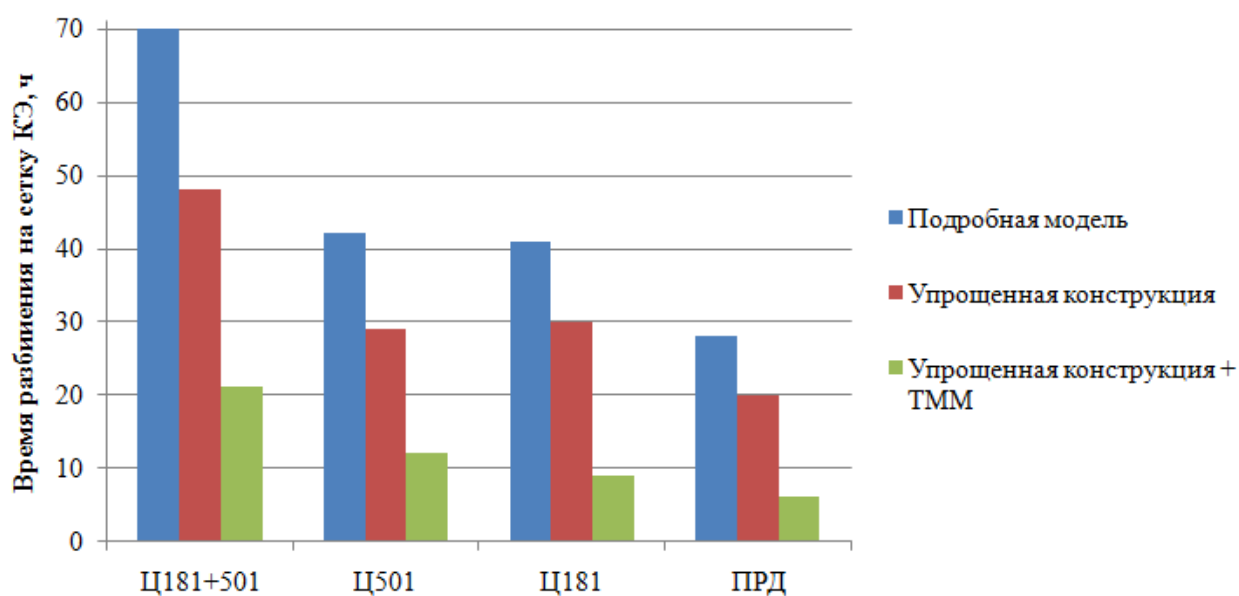


Рисунок 6 - Влияние детализации модели на время разбиения на сетку КЭ

На рисунке 6 представлена диаграмма, отражающая сокращение машинного времени, требуемого для построения сетки КЭ в САПР SolidWorks Flow Simulation, полученная для описанных выше случаев. Из диаграммы следует, что использование упрощенных конструкций ЭМ позволяет сократить затраты машинного времени требуемого для разбиения на сетку КЭ в среднем на 30%, а в случае совместного использования упрощенной конструкции и TMM ЭМ0 и ЭМ1 на 75%.

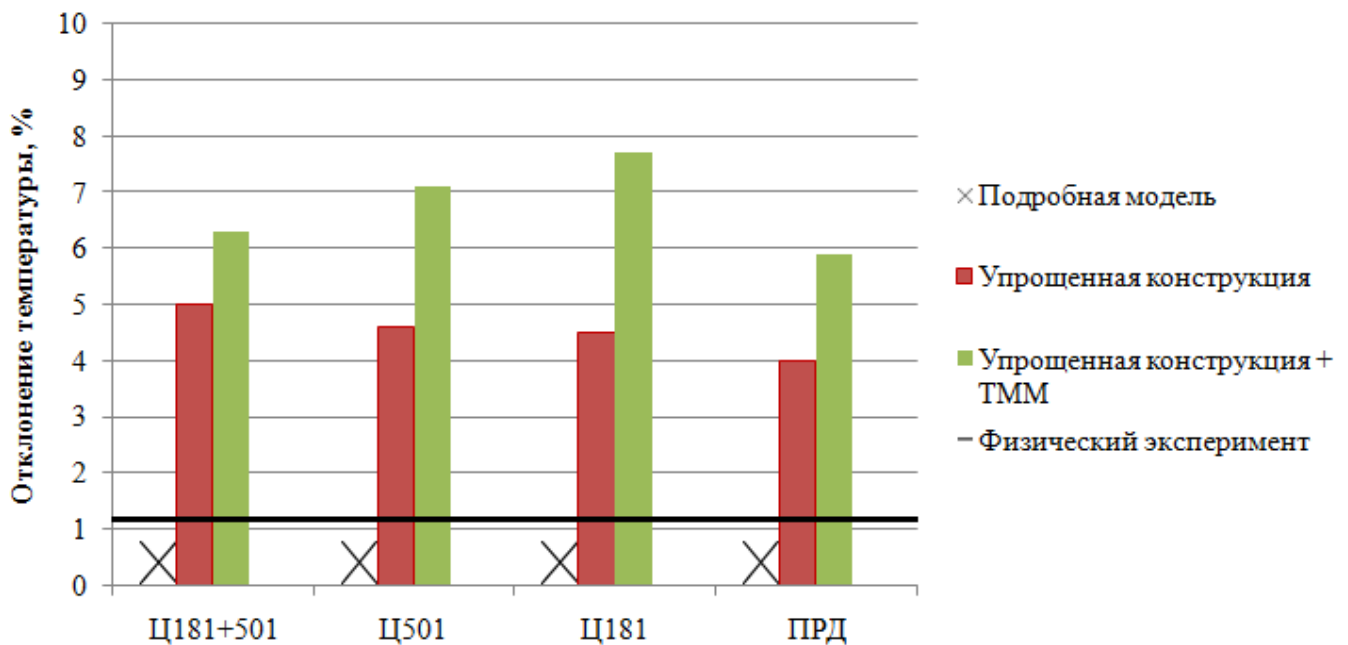


Рисунок 7 - Сравнение экспериментальных и расчетных значений

На рисунке 7 представлена диаграмма отклонений температур, отражающая изменение погрешности расчета теплового режима ЭС от уровня детализации. Следует отметить, что расчет теплового режима ЭС для подробных моделей выполнен не был вследствие остановки расчета из-за нехватки системных ресурсов, а в случае анализа теплового режима передатчика имело место принудительная остановка расчета, так как предполагаемое время анализа составило 11 дней. Таким образом, из диаграммы следует, что снижение точности, в зависимости от уровня детализации, в среднем не превышает 4,6% при использовании последовательного преобразования ЭМ, а в случае использования ТММ ЭМ0 и ЭМ1 – 6,8%.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о высокой эффективности применения теплового макромоделирования для расчета тепловых режимов РЭС.

В четвертой главе были решены следующие задачи: разработана последовательность преобразования моделей ЭМ для сокращения размерности задачи; выполнены экспериментальные исследования, в результате которых сопоставлены значения температур в контрольных точках блоков БРЛС в САПР SolidWorks, с применением ТММ ЭМ0 и ЭМ1, с результатами физических экспериментов.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в ходе выполнения диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Выявлены следующие особенности конструкций современных БЭС:

- разброс геометрических размеров конструктивных элементов;
- неоднородность конструкций, под которой понимаем сочетание различных материалов, клеевых соединений, заливок компаундами и прочее;
- наличие криволинейных поверхностей, под которыми понимаем наличие в реальных конструкциях фасок, скруглений и других геометрических неровностей;
- разброс значений температур в пределах элемента конструкции;
- разброс мощностей рассеивания источников тепла в пределах конструкции;
- зависимость перегрева от местоположения источника тепла.

2. Показано снижение эффективности применения САПР инженерного анализа, обусловленное линейным ростом числа КЭ и нелинейным ростом времени анализа теплового режима БЭС, вызванное конструктивными особенностями современных БЭС.

3. Метод теплового макро моделирования конструкций ЭМ0 и ЭМ1 с фиксированным расположением источников тепла, обеспечивающий возможность формирования макромоделей ЭМ0 и несущих конструкций ЭМ1;

4. Тепловые макро модели ЭМ0 и несущих конструкций ЭМ1 с фиксированными источниками тепла, позволяющие существенно сократить время инженерного анализа средствами САПР конструкций ЭМ0 и ЭМ1 с фиксированными источниками тепла;

5. Результаты экспериментальных исследований адекватности и точности, разработанных ТММ ЭМ0 и ЭМ1, позволяющие связать время и точность расчета теплового режима конструкций ЭМ0 и ЭМ1;

6. Метод теплового макро моделирования ЭМ1 с произвольным расположением источников тепла, обеспечивающий получение ТММ ЭМ1 с учетом их местоположения на ПП;

7. Тепловые макро модели конструкций ЭМ1 с произвольным расположением источников тепла, обеспечивающие существенное сокращение времени анализа теплового режима конструкций ЭМ1 с произвольным расположением источников тепла на ранних этапах проектирования;

8. Результаты экспериментального исследования адекватности и точности ТММ ЭМ1 с произвольным расположением источников тепла, позволяющее связать время и точность расчета теплового режима конструкций ЭМ0 и ЭМ1;

9. Алгоритм преобразования матрицы ПФЭ в ДФЭ, позволяющий повысить эффективность применения САПР SolidWorks Simulation.

10. Метод адаптации реальных конструкций БЭС, позволяющий упростить исходную модель, используемую в САПР инженерного анализа теплового режима конструкций БЭС, и сократить время анализа теплового режима средствами САПР.

11. Результаты экспериментального исследования адекватности тепловых моделей с помощью физического эксперимента и расчета теплового режима конструкций БЭС в САПР SolidWorks, подтверждающего адекватность и эффективность разработанных ТММ ЭМ0 и ЭМ1.

12. Основные результаты опубликованы в 10 научных работах и докладывались на 5 научно-технических конференциях.

13. Результаты диссертации внедрены на предприятии ОАО «Корпорация «Фазотрон-НИИР» при разработке БЦВМ Ц501 МБРЛС «Бумеранг» и модуля передатчика, что подтверждено соответствующим актом о внедрении.

Публикации по теме диссертации

Статьи, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Саратовский Н.В., Репнёв Д.Н., Филатова А.И., «Нелинейная дискретизация сетки конечных элементов как метод снижения размерности тепловой модели» // «Информационно-измерительные и управляющие системы», №12, т.9, 2011 г., стр. 142-145.

2. Саратовский Н.В., Репнёв Д.Н., Ушкар М.Н., «Библиотека тепловых макромоделей БИС и СБИС» // «Наукоемкие технологии», №1, т.13, 2012 г., стр. 15-26.

3. Саратовский Н.В., Апухтин М.С., Репнев Д.Н., «Разработка тепловых макромоделей функциональных ячеек» // «Информационно-измерительные и управляющие системы», №10, т.10, 2012 г., стр. 55-61.

Статьи, опубликованные в других изданиях:

4. Саратовский Н.В., Репнёв Д.Н., Филатова А.И., «Особенности применения SolidWorks при расчёте теплового режима сложных устройств» // Сборник тезисов науч-

но-практической конференции студентов и молодых ученых МАИ «Инновации в авиации и космонавтике - 2011», 2011г., стр.65.

5. Саратовский Н.В., Репнёв Д.Н., Ушкар М.Н., «Разработка библиотеки тепловых макромоделей БИС и СБИС» // Сборник тезисов научно-практической конференции студентов и молодых ученых МАИ «Инновации в авиации и космонавтике - 2011», 2011г., стр. 67-68.

6. Саратовский Н.В. «Тепловые макромоделели БИС и СБИС» // «XIX Туполевские чтения» Международная молодежная конференция 24-26 мая 2011 года, Казань, том IV, стр. 217-218.

7. Саратовский Н.В., Репнев Д.Н., Ушкар М.Н., «Разработка макромоделей БИС и СБИС для теплового анализа конструкций РЭС» // Международная конференция "Авиация и космонавтика 2011", 8-10 ноября 2011г., Москва, МАИ, стр. 211-212.

8. Саратовский Н.В., Репнёв Д.Н., Репнёва А.И., «Особенности систем охлаждения малогабаритных РЛС» // Сборник тезисов Московской молодежной научно-практической конференции «Инновации в авиации и космонавтике – 2012», Москва, МАИ, 2012г., стр. 120-121.

9. Саратовский Н.В., Апухтин М.С., Репнев Д.Н., «Разработка тепловых макромоделей функциональных ячеек, выполненных в соответствии со стандартом IEEE 1101.2.» // «Сборник тезисов Московской молодежной научно-практической конференции «Инновации в авиации и космонавтике – 2012», Москва, МАИ, 2012г., стр. 126-127.

10. Саратовский Н.В., «Тепловые макромоделели функциональных ячеек с произвольным расположением источников тепла» // «Сборник тезисов Московской молодежной научно-практической конференции «Инновации в авиации и космонавтике – 2013», Москва, МАИ, 2013г., стр. 258.