

УДК 621.396.6.049.75

И 74

Рецензенты:

Кафедра «Информационные технологии и автоматизированные системы» Московского института электроники и математики Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики»;

А. Т. Бекишев, д-р техн. наук, Генеральный директор-Генеральный конструктор ОАО «НПП «САЛЮТ».

Исследование тепловых характеристик РЭА с применением программного комплекса ТРiАНА [Электронный ресурс] : Монография /В. В. Воловиков, М. Л. Дектерев, Г. О. Преснякова и др.; Под ред. Ю. Н. Кофанова и А. В. Сарафанова. – Версия 1.0. – Электрон. дан. (28 Мб). – М. : Издательство «ДМК Пресс», 2014. – 1 электрон. опт. диск (DVD). – Систем. требования : *Intel Pentium* (или аналогичный процессор других производителей) 1 ГГц; 512 Мб оперативной памяти; привод *DVD*; операционная система *Microsoft Windows XP / Vista / 7 / 8*; *Adobe Reader 9.0* или выше (или аналогичный продукт для чтения файлов формата *pdf*).

№ гос.регистрации в НТЦ «Информрегистр» 0321401843.

ISBN 978-5-97060-124-2

Авторы:

Валерий Валерьевич Воловиков, Михаил Леонидович Дектерев, Юрий Николаевич Кофанов, Галина Олеговна Преснякова, Альберт Викторович Сарафанов, Александр Михайлович Фень

Под редакцией: Ю. Н. Кофанова, д-ра техн. наук, проф. (НИУ «Высшая школа экономики»),
А. В. Сарафанова, д-ра техн. наук, проф. (ЗАО «Ай-Теко»).

Изложены основные аспекты методического обеспечения проектных задач, связанных с анализом тепловых характеристик конструкций радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) средствами математического моделирования, в т. ч. с применением программного комплекса (ПК) ТРiАНА. Приводятся основные разделы программной документации «Руководство пользователя ПК ТРiАНА-2.10.0», набор методик по разработке моделей тепловых процессов, анализа тепловых режимов конструкций РЭА различных уровней иерархии, примеры применения ПК ТРiАНА в практике промышленного проектирования различных образцов РЭА, в т. ч. совместно с подсистемой АСОНИКА-К.

Предназначено для специалистов, занимающихся исследованием тепловых характеристик конструкций РЭА методами математического моделирования.

This book describes the practical heat transfer analysis of electronic equipment using different types of mathematical software including the TRiANA. The User's Guide introduces you to the capabilities of the TRiANA software. The set of instructions for thermal design and verification of electronic equipment and model examples and TRiANA application examples for thermal design of the electronic equipments (including ASONIKA-K software for reliability estimation) are also included.

The book is for mechanical engineers who in charge of the heat transfer simulation in electronic equipment.

ISBN 978-5-97060-124-2

© В. В. Воловиков, 2014

© М. Л. Дектерев, 2014

© Ю. Н. Кофанов, 2014

© Г. О. Преснякова, 2014

© А. В. Сарафанов, 2014

© А. М. Фень, 2014



© 1997-2014 Издательство «ДМК Пресс»

Содержимое ресурса охраняется законом об авторском праве. Несанкционированное копирование и использование данного продукта запрещается. Встречающиеся названия программного обеспечения, изделий, устройств или систем могут являться зарегистрированными товарными знаками тех или иных фирм.

Подписано к использованию 29.04.2014



Объем 28 Мб

ООО «ДМК пресс. Электронные книги», www.dmkpress.ru



		Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРИАНА	СОДЕРЖАНИЕ	3
---	---	---	------------	---

СОДЕРЖАНИЕ



ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ	7
ВВЕДЕНИЕ	9
1. МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РЭА СРЕДСТВАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ	12
1.1. Модель методики исследования ТХ РЭА.....	17
1.2. Основные характеристики ПКТРИАНА-2.10	42
2. АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНСТРУКЦИЙ РЭА ВЕРХНИХ УРОВНЕЙ ИЕРАРХИИ. КОМПЛЕКС ПРОГРАММ № 1	50
2.1. Условия применения комплекса	50
2.2. Режимы функционирования комплекса.....	50
2.3. Описание задачи.....	52
2.4. Исходная информация для моделирования.....	54
2.5. Выходная информация.....	67
2.6. Методика построения моделей тепловых процессов	67
2.6.1. Основные принципы иерархического моделирования тепловых процессов в РЭА.....	67
2.6.2. Иерархия конструктивного построения РЭА.....	68
2.6.3. Алгоритмы иерархического анализа тепловых характеристик РЭА.....	76
2.6.4. Методика построения топологических МТП	80
2.6.5. Особенности моделирования в различных	81
системах координат	81
2.6.6. Применение симметрии.....	107
2.6.7. Параметризации топологических моделей тепловых процессов.....	113
2.7. Подготовка информации средствами текстового редактора.....	117
2.7.1. Ключевая информация	118
2.7.2. Описание параметров ветвей	122
2.7.3. Описание таблиц	124
2.7.4. Начальные условия.....	126
2.8. Подготовка информации при помощи графического редактора <i>MTPEditor</i>	129
2.8.1. Создание и редактирование графов МТП	132
2.8.2. Применение базы данных «Материалы»	143
2.8.3. Работа с библиотеками фрагментов МТП.....	145
2.8.3.1. Формирование элемента библиотеки фрагментов МТП.....	147
2.8.4. Графический пост-процессор <i>MTPViewer</i>	153
2.9. Обращение к <i>Комплексу № 1</i>	157
2.10. Методика применения <i>Комплекса № 1</i>	157
2.11. Пример расчета.....	162
3. АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МИКРОСБОРОК, ПЕЧАТНЫХ УЗЛОВ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЯЧЕЕК. КОМПЛЕКС ПРОГРАММ № 2	176
3.1. Условия применения <i>Комплекса № 2</i>	176

		Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРИАНА	СОДЕРЖАНИЕ	4
---	---	---	-------------------	---

3.2.	Режимы функционирования <i>Комплекса № 2</i>	176
3.3.	Описание задачи.....	179
3.4.	Исходная информация для моделирования.....	179
3.5.	Выходная информация.....	185
3.6.	Подготовка исходных данных для моделирования.....	186
3.7.	Подготовка данных средствами текстового редактора.....	186
3.7.1.	Ключевая информация.....	187
3.7.2.	Геометрические и теплофизические параметры несущей конструкции.....	189
3.7.3.	Тепловые шины и вырезы.....	192
3.7.4.	Описание геометрических и теплофизических параметров ЭРЭ.....	194
3.7.5.	Условия охлаждения (граничные условия).....	196
3.7.6.	Начальные условия.....	197
3.8.	Подготовка данных средствами графического редактора <i>BoardEditor</i>	200
3.8.1.	Описание управляющей информации и использование конвертора из систем проектирования ПП.....	200
3.8.1.1.	Особенности конвертации схем размещения ЭРЭ из систем топологического проектирования печатных плат.....	205
3.8.2.	ГТФП несущей конструкции.....	210
3.8.3.	Описание ГТФП ЭРЭ.....	212
3.8.4.	Операции над ЭРЭ в процессе размещения.....	217
3.8.5.	Применение базы данных «Радиоэлементы».....	221
3.8.6.	Описание дополнительных параметров.....	225
3.8.7.	Формирование шин и вырезов.....	227
3.8.8.	Граничные и начальные условия.....	235
3.8.9.	Отображение результатов моделирования в графическом режиме.....	241
3.9.	Работа с 3D-моделью КУ.....	246
3.9.1.	Отображение результатов моделирования на 3D-эскизе КУ.....	248
3.10.	Обращение к комплексу.....	252
3.11.	Режим «Клиент-сервер».....	252
3.12.	Методика применения <i>Комплекса № 2</i>	254
3.13.	Пример расчета.....	256
4.	ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ ПК ТРИАНА В ПРАКТИКЕ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ.....	268
4.1.	Исследование тепловых характеристик стоечной конструкции гидроакустического комплекса.....	268
4.1.1.	Постановка задачи на моделирование.....	270
4.1.2.	Схема иерархического исследования тепловых характеристик стойки.....	273
4.1.2.1.	Моделирование теплового режима исходного варианта конструкции БНК-3....	274
4.1.2.2.	Моделирование теплового режима стойки в целом.....	277
4.1.2.3.	Модель теплового режима модуля в целом.....	279
4.1.2.4.	Моделирование теплового режима функциональной ячейки.....	280
4.1.3.	Моделирование теплового режима варианта конструкции БНК-3 при естественном воздушном охлаждении задней панели-радиатора.....	282
4.1.3.1.	Выбор параметров ребрения панели-радиатора.....	286
4.1.3.2.	Моделирование теплового режима стойки в целом.....	288

		Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРИАНА	СОДЕРЖАНИЕ	5
---	---	--	-------------------	----------

4.1.3.3. Моделирование теплового режима модуля в целом.....	290
4.1.3.4. Моделирование теплового режима функциональной ячейки	291
4.1.3.5. Моделирование теплового режима конструкции БНК-3 при принудительном воздушном охлаждении задней панели-радиатора	292
4.1.3.6. Исследование влияния геометрических и теплофизических параметров на тепловой режим стойки.....	294
4.1.3.7. Моделирование теплового режима стойки.....	295
4.1.3.8. Моделирование теплового режима варианта конструкции БНК-3 при водяном охлаждении задней панели.....	297
4.1.4. Сводные данные результатов исследования	301
4.2. Моделирование теплового режима работы системы электропитания ЭВМ «Электроника – СС-БИС»	303
4.2.1. Постановка задачи на моделирование	307
4.2.2. Разработка модели тепловых процессов БПН-8.....	307
4.2.3. Проведение исследований	314
4.3. Исследование тепловых характеристик системы электропитания космического аппарата.....	317
4.3.1. Постановка задачи на моделирование	318
4.3.2. Иерархическая схема исследования тепловых характеристик СЭП.....	321
4.3.3. Разработка МТП СЭП в целом	322
4.3.4. Разработка МТП блока	324
4.3.5. Модель тепловых процессов ФЯ PY_1	328
4.3.6. Исследование тепловых характеристик СЭП на основе разработанных моделей	330
4.4. Разработка МТП стойки модуля цифровой обработки сигналов	339
4.4.1. Идеализация конструкции модуля с точки зрения протекающих в нем тепловых процессов	339
4.4.2. Нумерация и обозначения узлов модели тепловых процессов.....	341
4.4.3. Обозначения ветвей модели тепловых процессов.....	342
4.4.4. Структура модели тепловых процессов	343
4.4.5. Параметризация модели тепловых процессов	346
4.4.6. Результаты расчета МТП модуля М-3КВЖ.32U.....	347
4.5. Пример обеспечения тепловых характеристик и показателей надежности устройства преобразования телевизионных сигналов	352
4.5.1. Требования по надежности.....	357
4.5.2. Проведение исследований	357
4.5.3. Расчет надежности составных частей УПТС	359
4.5.4. Исследование тепловых характеристик УПТС.....	363
4.5.5. Исследование тепловых характеристик блока УПТС в целом.....	363
4.5.6. Исследования тепловых характеристик печатных узлов.....	375
4.5.7. Расчет надежности УПТС в целом.....	387
4.5.8. Заключение.....	390
4.6. Исследование тепловых характеристик блока электронного регулирования, входящего в систему электропитания космического аппарата.....	393
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	477



		Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРИАНА	СОДЕРЖАНИЕ	6
---	---	---	------------	---

ПРИЛОЖЕНИЯ	480
Приложение 1. Теплофизические параметры конструкционных материалов РЭА	480
Приложение 2. Геометрические и теплофизические параметры некоторых электрорадиоэлементов	484
Приложение 3. Компоненты топологических моделей тепловых процессов	505
Приложение 4. Варианты установки ЭРЭ, поддерживаемые при расчете их ГТФП программой <i>BoardEditor</i>	519
Приложение 5. Некоторые экранные формы для расчета ГТФП ЭРЭ, поддерживаемые программой <i>BoardEditor</i>	523
Приложение 6. Интерактивный справочник по основным функциям ПК ТРИАНА	536
Приложение 7. Программные средства, используемые для моделирования аэродинамических, гидравлических и тепловых процессов в РЭА	545
Приложение 8. Руководство по инсталляции	552





ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ

- ГИМ** – гибридно-интегральный модуль /базовая конструкция микроэлектронной аппаратуры, представляющая собой корпус, полученный путем фрезерования или литья. На внутренних поверхностях корпуса при помощи клея крепятся бескорпусные МСБ, ПУ, микрокорпусные и корпусные ЭРЭ/
- ГТФП** – геометрические и теплофизические параметры
- КУ** – конструктивный узел
- КЭ** – конструктивный элемент
- МСБ** – микросборка /микроэлектронное изделие частного применения типа гибридно-интегральной схемы, состоящее из плоской подложки (несущей конструкции), на которой могут располагаться на любой ее поверхности элементы, компоненты и интегральные микросхемы (микрокорпусные и бескорпусные), различные пленочные элементы. МСБ может иметь собственный корпус (корпусные МСБ) или устанавливаться в РЭА путем непосредственного крепления при помощи клея или пайки подложки к месту установки (бескорпусные МСБ)/
- МТП** – модель тепловых процессов (топологическая) /Под топологической моделью тепловых процессов (МТП) понимается модель, представленная в виде ненаправленного графа. Вершины (узлы) такого графа в МТП моделируют соответствующие конструктивные элементы и узлы конструкции РЭА (представляются в виде условно нагретых зон). Ветви (ребра) графа отражают в МТП тепловые потоки. Переменными узлов МТП являются расчетные значения температур (T_i), переменными ветвей будут тепловые потоки (Ψ_{ij}), а параметрами ветвей – тепловые проводимости (X_{ij}). В общем случае при рассмотрении нестационарных тепловых процессов в МТП можно выделить два типа параметрических ветвей: 1-й тип – параметрические диссипативные ветви – ветви, для которых известны значения X_{ij} или аналитические выражения для расчета X_{ij} ; 2-й тип – параметрические консервативные ветви – ветви, для которых известны значения теплоемкостей (C_{ij}) или аналитические выражения для их расчета/
- МЭА** – микроэлектронная аппаратура
- НТР** – нестационарный тепловой режим
- ПК** – программный комплекс
- ПП** – печатная плата

		Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРИАНА	ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ	8
---	---	--	----------------------------	----------

- ППП** – пакет прикладных программ
- ПУ** – печатный узел /ПУ – ПП (*является несущей конструкцией*) с расположенными на одной или двух ее поверхностях ЭРЭ. Способ крепления ЭРЭ – *распайка в отверстиях или монтаж на поверхность. Крепление ПУ в РЭА – произвольное/*
- ПЭВМ** – персональная ЭВМ
- РЭА** – радиоэлектронная аппаратура
- САУ** – система алгебраических уравнений
- СЛАУ** – система линейных алгебраических уравнений
- СНАУ** – система нелинейных алгебраических уравнений
- СОДУ** – система обыкновенных дифференциальных уравнений
- СТР** – стационарный тепловой режим
- ТЗ** – техническое задание
- ТР** – тепловой режим
- ТУ** – технические условия
- ТФП** – теплофизические параметры
- ТХ** – тепловые характеристики (*температуры корпусов и активных зон ЭРЭ, тепловые поля НК и тепловых шин, коэффициенты тепловой нагрузки ЭРЭ, графики зависимости температур КЭ, КУ и ЭРЭ от времени и т.п.*)
- УР** – узел радиатора /радиатор с размещенными на нем различными элементами (*полупроводниковыми приборами, микросборками, интегральными схемами, трансформаторами, гибридно-интегральными модулями и др.*). Радиаторы могут быть различного конструктивного исполнения: *в виде плоских пластин, лепестковые, петельно-проволочные, с игольчатопырьевым и пластинчатым ребрением и др./*
- ФПЧ** – функция параметрической чувствительности
- ФЯ** – функциональная ячейка /КУ в виде металлической пластины (*основание ФЯ является несущей конструкцией*) с приклеенными с одной или двух сторон многослойными ПП (*гибкими ПП*) с установленными на них ЭРЭ. ЭРЭ также могут устанавливаться непосредственно на металлическое основание через вырезы в ПП. Обычный способ крепления ФЯ в РЭА – *установка на термостатирующее основание или в блоки, имеющие панели-теплотоки/*
- ЭРЭ** – электрорадиоэлемент (используется также термин «ЭРИ»)
- ЭРИ** – электрорадиоизделие (используется также термин «ЭРЭ»)



		<p>Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРИАНА</p>	<p>ВВЕДЕНИЕ</p>	<p>9</p>
---	---	--	-----------------	----------

ВВЕДЕНИЕ

Постоянное усовершенствование РЭА, направленное на расширение спектра решаемых задач, увеличение степени миниатюризации узлов и блоков, ужесточение внешних дестабилизирующих факторов, повышение требований к надежности, приводит к необходимости уделять особое внимание проблеме обеспечения тепловых режимов разрабатываемой РЭА. Это связано с тем, что тепловые процессы, протекающие в современной аппаратуре, для которой характерны высокие удельные показатели, достаточно тесно связаны с другими физическими процессами (электрическими, механическими, электромагнитными, радиационными и т. д.), протекающими в РЭА, и, как следствие, в значительной степени определяют надежность и ряд других показателей технического уровня разрабатываемых образцов РЭА.

Современный подход к исследованию тепловых характеристик (ТХ) РЭА основывается на методах математического моделирования [1–5]. При этом программное обеспечение соответствующих специализированных пакетов прикладных программ, комплексов и подсистем, применяемых для моделирования тепловых режимов работы РЭА (прил. 7) базируется на различных математических подходах к моделированию. Большую роль при реализации исследований ТХ РЭА автоматизированными методами играет математическое [1, 3, 4, 7, 9, 16, 24], информационное [13, 15] и методическое обеспечения [1, 3], которые позволяют реализовать принципы системного подхода к проектированию РЭА в рамках современных интегрированных компьютерных технологий [2, 3, 15, 19], направленных на непрерывную информационную поддержку всех этапов жизненного цикла РЭА [3]. Математическое и информационное обеспечения процесса автоматизированного исследования ТХ РЭА с применением программного комплекса (ПК) ТРИАНА подробно рассмотрены в [1, 2]. В данной книге раскрыты методические аспекты исследований ТХ РЭА в т. ч. с применением ПК ТРИАНА [1, 2, 8], а также подсистемы АСОНИКА-К [2, 22] при совместном исследовании ТХ и показателей надежности РЭА.





ПК ТРИАНА [www.triana.su] входит в состав системы АСОНИКА (автоматизированная система обеспечения надежности и качества аппаратуры [www.asonika.ru]) и предназначен для моделирования на ПЭВМ стационарных и нестационарных тепловых процессов, протекающих в конструкциях РЭА, таких как стоечные конструкции, блоки с регулярной и нерегулярной структурами, печатные узлы, функциональные ячейки, микросборки. ПК рассчитан на инженеров-конструкторов промышленных предприятий, НИИ, КБ, занимающихся разработкой РЭА.



		<p>Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРиАНА</p>	<p>ВВЕДЕНИЕ</p>	<p>10</p>
---	---	---	------------------------	-----------

В целом ПК *TRuANA* позволяет решать следующие задачи:

- определение тепловых режимов работы всего множества радиокомпонентов и несущих конструкций с учетом конструктивно-технологических и эксплуатационных особенностей РЭА различного назначения (авиационной, космической, морской, автомобильной и др. РЭА) и внесение изменений в конструкцию с целью обеспечения необходимого (с точки зрения электрических характеристик или показателей надежности и т. п.) теплового режима работы РЭА;
- выбор из нескольких имеющихся лучшего, с точки зрения тепловых характеристик, варианта конструкции РЭА;
- обоснование необходимости дополнительной защиты РЭА от температурных воздействий;
- создание эффективной программы испытаний РЭА на тепловые воздействия (выбор параметров испытательных воздействий, наиболее удобное расположение мест установки регистрирующих датчиков и т. п.).

ПК *TRuANA-2.10* состоит из ряда как автономно функционирующих, так и в составе ПК следующих программных единиц: *MTPEditor*, *MTPViewer*, *BoardEditor*, *Conv2 triana*, *Triana*.



-  *графический редактор топологических моделей тепловых процессов (МТП) MTPEditor*, позволяющий: формировать МТП конструкций РЭА с параметрическим описанием их компонентов, использующих геометрические и теплофизические параметры графических образов исследуемых узлов и/или конструкций РЭА в целом; отображать результаты моделирования непосредственно на топологической модели;
-  *графический редактор конструкций РЭА типа «печатный узел», «функциональная ячейка», «гибридно-интегральная схема или микросборка» BoardEditor*, который позволяет создавать геометрические модели конструкций ПУ, ФЯ, МСБ с позиций исследования в них тепловых процессов; вести базу данных по геометрическим и теплофизическим параметрам электрорадиоэлементов (ЭРЭ); отображать результаты моделирования на геометрической модели исследуемого конструктивного узла;
-  *конвертор топологий печатных плат Conv2 triana*, реализующий функции автоматического преобразования основных параметров несущей конструкции (НК) ПУ, ФЯ или МСБ, а также схемы размещения ЭРЭ на НК из форматов систем топологического проектирования печатных плат (*OrCAD*, *PROTEL*, *AltiumDesigner* и др.) в формат ПК *TRuANA*;
-  *математическое ядро Triana*, включающее в свой состав: набор специализированных программ, реализующих функции автоматического син-

		<p>Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРИАНА</p>	<p>ВВЕДЕНИЕ</p>	<p>11</p>
---	---	---	------------------------	------------------

теза моделей тепловых процессов конструктивных узлов РЭА на основе их геометрической модели и температурных условий их эксплуатации (граничные и начальные условия); набор модулей, выполняющих функции: формирования математических моделей для моделирования тепловых процессов исследуемой конструкции в стационарном и нестационарном режимах; анализа математической модели, которая может быть сформирована в виде системы линейных алгебраических уравнений, системы нелинейных алгебраических уравнений или системы обыкновенных дифференциальных уравнений; библиотеку аналитических моделей (набор критериальных уравнений) для анализа различных видов теплообмена и их модификаций (в библиотеке содержится около 70 разделов).

Книга имеет следующую структуру:

- в 1-й главе детально рассмотрены основные методические аспекты исследований ТХ РЭА средствами математического моделирования;
- 2-я и 3-я главы содержат описания методического и информационного обеспечений компонентов ПК *ТРИАНА-2.10*, обеспечивающих моделирование тепловых режимов РЭА различных уровней конструктивной иерархии; описания содержат информацию по составу компонентов, реализуемым ими функциям, методики подготовки данных, методики построения МТП и проведения моделирования ТР РЭА различных уровней конструктивной иерархии, примеры моделирования ТР РЭА;
- 4-я глава книги посвящена описанию применения ПК *ТРИАНА* в практике промышленного проектирования образцов РЭА различного назначения (РЭА стационарного исполнения, авионики, РЭА морского и космического исполнения) [[11–13](#)];
- в приложениях приводится информация справочного характера, а также компоненты информационного обеспечения ПК *ТРИАНА*.

		<p>Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРИАНА</p>	<p>1. МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РЭА СРЕДСТВАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ</p>	<p>12</p>
---	---	---	---	-----------

1. МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РЭА СРЕДСТВАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Процесс исследования тепловых характеристик РЭА с применением методов математического моделирования [1–5] связан с решением, со стороны разработчика, комплекса задач, среди которых, в качестве примера, можно привести следующие:

1. Анализ технического задания на разработку РЭА и формирование постановки задачи на выполнение исследований тепловых характеристик конструкции проектируемой РЭА. *Детально процесс решения данной задачи приведен в [п. 1.1](#).*

2. Расчет мощностей тепловыделений в конструктивных узлах, отдельных ЭРЭ, коммутационных элементах РЭА (разъемы, жгуты, печатные проводники и т. п.). *Примеры расчета мощностей тепловыделений рассматриваются в [п. п. 1.1](#), [2.7.3](#).*



3. Декомпозиция конструкции РЭА с позиций *принципа местного влияния* и разработка нисходящего или восходящего алгоритма моделирования тепловых процессов в РЭА. *Описание данного процесса приведено в [п. п. 2.6.1–2.6.3](#).*

4. Идеализация конструкции РЭА и разработка ее модели(ей) тепловых процессов (МТП), в т. ч. с учетом симметрии в МТП РЭА и ее параметризации [2]. *Особенности перечисленных аспектов рассматриваются в [п. п. 2.6.4–2.6.7](#), [п. 2.11](#), [п. 4.4.4](#).*

5. Наложение (учет в МТП РЭА) граничных и начальных условий. *Применительно к ПК ТРИАНА примеры решения данной задачи рассмотрены в [п. п. 3.7.5](#), [3.7.6](#) и в [главе 4](#).*

6. Проведение моделирования тепловых режимов РЭА. Получение в результате моделирования комплекса тепловых характеристик РЭА. *Различные ТХ РЭА, получаемые в результате математического моделирования (при помощи ПК ТРИАНА) приводятся в [п. п. 2.11](#), [3.13](#) и в [главе 4](#).*

7. Выбор способов отвода тепловой энергии от наиболее нагретых ЭРЭ или от конструктивных узлов (тепловые трубы, слоистые конструкции плат, гиперпроводящие поверхности, элементы Пельтье и т. д.) [[11](#), [13](#), www.mp.dpt.ustu.ru, www.hyperheat.ru], в т. ч. выбор способов отвода тепловой энергии по различным параметрам (эффективность, масса, плотность теплового

		<p>Исследование тепловых характеристик РЭА с применением ПК ТРИАНА</p>	<p>1. МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РЭА СРЕДСТВАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ</p>	<p>13</p>
---	---	---	---	-----------

потока и т. д.). *Примеры решения отдельных моментов данной задачи рассматриваются в [главе 4](#).*

В целом этап исследования тепловых характеристик РЭА средствами математического моделирования можно представить ([рис. 1.1](#)) совокупностью процессов (1–5) и подпроцессов (Т1.1, Т1.2, Т1.3, Т2.1, ..., Т5.3), которые отражают последовательность этапов, и решаемых в их рамках задач. Задачи решаются в определенной последовательности, которая определяется методикой проведения исследований ТХ РЭА, которая, в свою очередь, зависит как от конструкторско-технологической реализации конкретной РЭА (см., например, [рис. 1.3](#)), так и от применяемой технологии математического моделирования. Последняя зависит от используемых методов моделирования (автономное исследование ТХ или совместно с другими характеристиками РЭА) [[2, 3, 10, 15, 16, 21](#)], степени интеграции информационных потоков на уровне реализуемого проекта РЭА [[3, 15, 19](#)] и т. п. Обратные связи (отражают изменения, вносимые в проект РЭА) и их количество приведенных на [рис. 2.1](#) подпроцессов, зависят от постановки задачи на проведение исследований ([п. 1.1](#)) и уровней разукрупнения исследуемого варианта конструкции РЭА ([рис. 1.3](#), см. также [рис. 2.2](#)), принимаемых в процессе моделирования.

На [рис. 1.2](#) приведены связанные между собой обратными связями совокупности процессов, отражающие исследования ТХ РЭА на различных уровнях ее конструктивной иерархии (с позиций исследования тепловых характеристик на основе принципа местного влияния [[4, 1](#)]). Распределение входящих в состав анализируемой конструкции конструктивных узлов по различным уровням иерархии носит условный характер и отражает генеральную последовательность поэтапно решаемых задач по анализу и обеспечению ТХ составных узлов конструкции РЭА на основе нисходящего или восходящего алгоритмов моделирования тепловых процессов [[1](#)]. В [табл. 1.1](#) приведено иерархическое описание нескольких наиболее типовых вариантов конструкции РЭА, выполняемое для поэтапного моделирования тепловых процессов в РЭА.

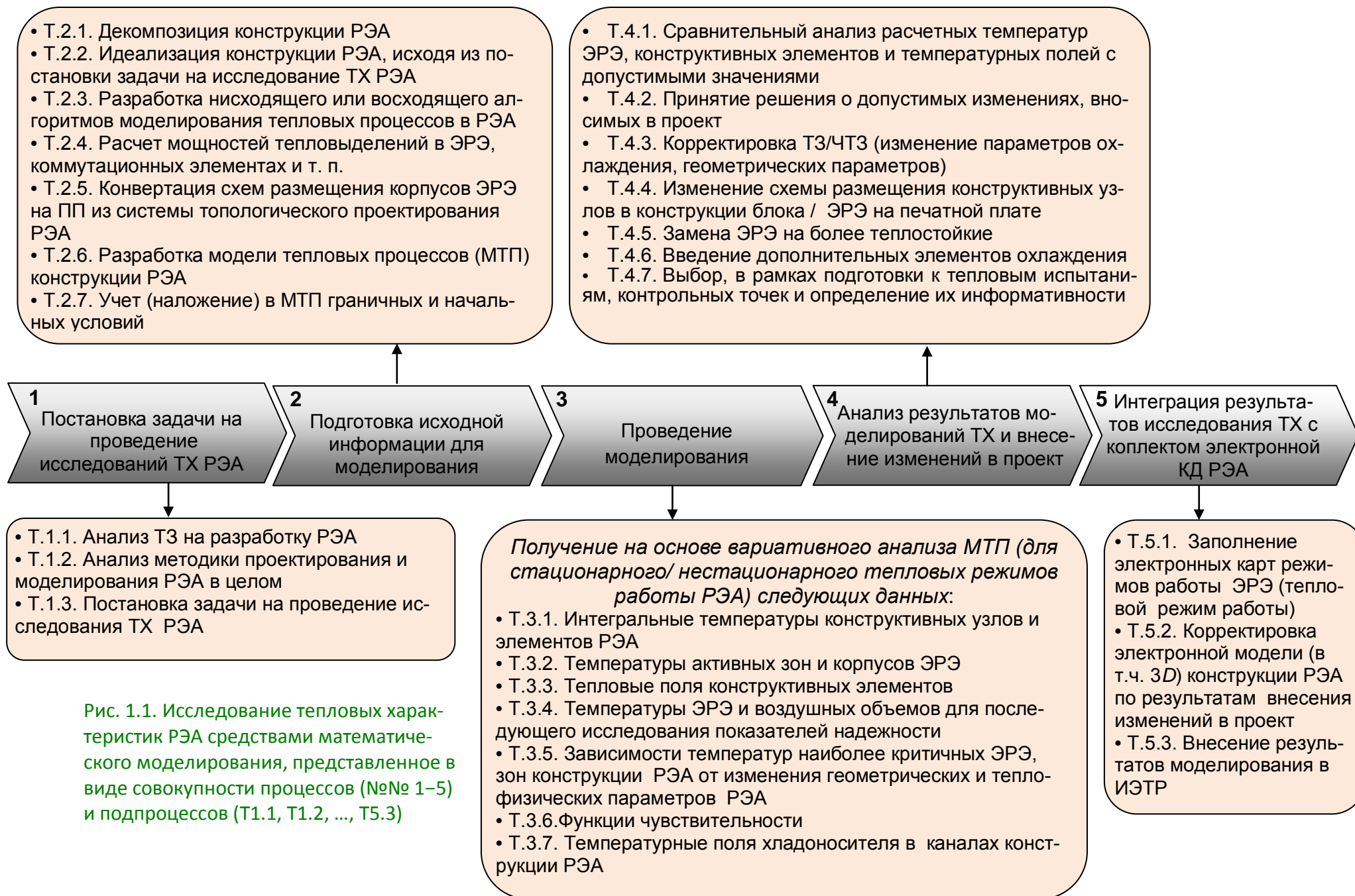


Рис. 1.1. Исследование тепловых характеристик РЭА средствами математического моделирования, представленное в виде совокупности процессов (№№ 1–5) и подпроцессов (Т1.1, Т1.2, ..., Т5.3)