

На правах рукописи



Белоусов Александр Владимирович

**Модели и комплекс программ
связанного электрического и теплового анализа
электронных устройств космического аппарата**

05.13.18 — математическое моделирование, численные методы и
комплексы программ

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск — 2007

Работа выполнена
в Открытом Акционерном Обществе
"Научно-производственный Центр "Полнос" (г. Томск)

Научный руководитель доктор технических наук
Казанцев Юрий Михайлович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Сарафанов Альберт Викторович

доктор физико-математических наук, профессор
Кузнецов Гений Владимирович

Ведущая организация: Научно-исследовательский институт прикладной
математики и механики при Томском
государственном университете (г. Томск)

Защита состоится 9 ноября 2007 года в 14:00 на заседании диссертационного совета Д 212.099.06 при ФГОУ ВПО "Сибирский федеральный университет" по адресу: ул. академика Киренского, 26, Красноярск, 660074.

Факс: (3912) 43-06-92 (для каф. САПР)

E-mail: sovet@front.ru

Телефон: (391-2) 912-295 (каф. САПР)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Политехнического института Сибирского федерального университета.

Автореферат разослан «_____» октября 2007 года.

Учёный секретарь
диссертационного совета
д.т.н.



С. А. Бронов

Общая характеристика работы

Актуальность работы. Необходимым этапом процесса проектирования электронных устройств (ЭУ) космического аппарата (КА) является анализ тепловых режимов, по результатам которого оценивается работоспособность ЭУ. Особенно актуален анализ тепловых режимов электрорадиоизделий (ЭРИ) при размещении ЭУ вне гермоконтейнера и увеличении требуемого срока активного существования КА до 10 и более лет.

Характерной особенностью электронных устройств на борту КА является их работа в динамических режимах, когда в зависимости от орбитального положения КА попеременно работают электронные устройства систем электроснабжения, координации орбиты и другие. Соответственно изменяется мощность тепловыделения и температурные поля в узлах и блоках ЭУ, что требует исследования динамических тепловых режимов ЭУ и его элементов.

Эту проблему можно решить только с использованием передовых технологий многодисциплинарных расчетов, в данном случае связанного электрического и теплового анализа, позволяющего учитывать взаимное влияние электрических и тепловых режимов ЭУ.

Имеющееся в настоящее время программное обеспечение (*BETASoft*, *SINDA*, *MENTORGRAPHICS*, *SOLVIA-TEMP*, *CosmosWorks*, *Ansys*, *Nastran*, *T-Flex*, *ABAQUS* и др.) не позволяет проводить связанный электрический и тепловой анализ с определением трехмерных полей температуры по конструкции ЭУ КА, выполненного вне гермоконтейнера и температуры на теплонагруженных элементах устройства в одном пакете.

В то же время, современные пакеты схемотехнического моделирования позволяют исследовать переходные и установившиеся процессы электрических схем и на основе физических аналогий динамику тепловых режимов ЭУ. Однако, при таком подходе не формализована процедура формирования тепловой модели ЭУ и нет функционала взаимной передачи данных между электрическими и тепловыми моделями, а также остается открытым вопрос точности расчета. Поэтому, создание тепловых моделей ЭРИ, элементов конструкции устройства и программного обеспечения, позволяющих решить задачи связанного анализа, является актуальным.

Научная проблема связана с созданием выполненных на макроуровне тепловых моделей, учитывающих особенности процессов теплопередачи и теплообмена в элементах конструкции электронных устройств, образованных сочетанием разнородных сред в пространстве.

Объект исследования – теплопроводящие и теплообменные элементы конструкции электронных устройств космического аппарата негерметичного исполнения.

Предмет исследования – моделирование процессов теплопередачи и теплообмена в конструкциях электронных устройств космического аппарата в условиях отсутствия гравитации и конвекции.

Целью исследования является разработка методики моделирования, моделей, алгоритмов и программного обеспечения для проведения связанного анализа электрических и тепловых режимов ЭУ КА, выполненных вне гермоконтейнера, имеющих существенное значение при проектировании электронных устройств космического аппарата.

Для достижения цели решены следующие **задачи**:

1. Проведен анализ методов моделирования тепловых режимов ЭУ КА и дано обоснование использования моделей макроуровня.

2. Разработаны модели тепловых нагрузок, элементов конструкции и ЭРИ ЭУ КА. Созданы библиотеки тепловых моделей ЭРИ.

3. Разработана процедура автоматического формирования эквивалентной схемы тепловой модели ЭУ по 3D-модели устройства.

4. Разработан алгоритм формирования циклограммы рассеиваемой мощности на теплонагруженных ЭРИ по результатам схемотехнического моделирования схемы устройства при заданной циклограмме нагрузки ЭУ КА.

5. Разработан комплекс программ расчета параметров эквивалентной схемы и проведения связанного теплового и электрического анализа динамических режимов работы ЭУ КА по заданной циклограмме нагрузки.

Диссертация выполнена в соответствии с планами научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ проводимых ОАО "НПЦ "Полюс" по постановлениям Правительства и в рамках целевой Федеральной космической программы Российского авиационно-космического агентства по теме "Гироскоп".

Основная идея диссертационной работы заключается в создании методики проведения связанного электрического и теплового анализа электронных устройств КА негерметичного исполнения на основе экономичных моделей макроуровня, позволяющей проводить исследования тепловых режимов ЭУ с точностью моделей микроуровня при пространственной компоновке и разнородности материалов конструкции устройства.

Методы исследования. Для достижения поставленной цели используются методы теории электрических цепей, теории моделирования, алгоритмизации, методы вычислительной математики. При создании комплекса программ использовались методы структурного, объектно-ориентированного и модульного программирования. Проверка основных теоретических положений осуществлялась путем экспериментальных исследований, в том числе на физических моделях и промышленных образцах.

Основные результаты, выносимые на защиту.

1. Разработанная методика позволяет проводить связанный электрический и тепловой анализ ЭУ КА, выполненных вне гермоконтейнера, в пакете схемотехнического моделирования с заданной точностью и сократить время на создание и модификацию моделей исследуемых объектов.

2. Реализованная на основе допущения об отсутствии градиента температуры по толщине тонкостенных деталей процедура позволяет автоматизировать формирование эквивалентной схемы тепловой модели ЭУ по трехмерной геометрической модели устройства.

3. Разработанные макромоделли ЭРИ, элементов конструкции и теплообмена излучением дают возможность автоматизировать формирование эквивалентной схемы устройства и исследовать тепловые режимы ЭУ КА с точностью моделей микроуровня.

4. Разработанный программный комплекс позволяет рассчитывать динамические тепловые режимы ЭУ по 3D-модели с учетом компоновки теплонагруженных элементов.

Научная новизна.

1. Созданы тепловые модели макроуровня элементов конструкции, ЭРИ и теплообмена излучением, позволяющие исследовать динамические тепловые режимы ЭУ с точностью моделей микроуровня.

2. Впервые на базе моделей макроуровня и пакета схемотехнического моделирования *Spice* разработана методика связанного электрического и теплового анализа, позволяющая рассчитывать динамику тепловыделения теплонагруженных ЭРИ по циклограмме нагрузки.

3. Впервые разработана процедура автоматического формирования эквивалентной схемы тепловой модели макроуровня по трехмерной геометрической модели электронного устройства.

Значение для теории.

Разработан подход, позволяющий расширить область применения моделей макроуровня для проведения связанного электрического и теплового анализа электронных устройств с учетом пространственной компоновки ЭРИ, разнородности материалов элементов конструкции и эксплуатации в вакууме.

Практическая значимость диссертационной работы.

1. Разработано программное обеспечение, позволяющее рассчитывать стационарные и нестационарные поля температуры по конструкции устройства с учетом компоновки теплонагруженных ЭРИ и условий эксплуатации ЭУ КА, выполненного вне гермоконтейнера, что существенно снижает трудоемкость теплового проектирования.

2. Сформирована библиотека тепловых моделей ЭРИ и элементов конструкции электронных устройств КА. В этих моделях учтены кондукция и нелинейность теплообмена излучением.

3. Разработан программный модуль "Потери", позволяющий формировать циклограмму рассеиваемой мощности на ЭРИ по результатам схемотехнического моделирования схемы устройства при заданной циклограмме нагрузки.

Достоверность полученных результатов.

Достоверность результатов подтверждается теоретическим обоснованием разработанных моделей, непротиворечивостью результатов и выводов с ранее полученными результатами исследований, совпадением результатов расчета полученными в других программных комплексах и экспериментальными данными.

Использование результатов диссертации.

Разработанный программный комплекс внедрен в ОАО "НПЦ"Полюс". С помощью программного комплекса созданы тепловые модели и проведен связанный электрический и тепловой анализ комплексов автоматики и стабилиза-

ции систем электроснабжения космических аппаратов "Электро-Л" и "Гло-насс-К" метеорологического и навигационного назначения.

Личный вклад автора.

1. Разработаны модели тепловых нагрузок, элементов конструкции и электрорадиоизделий ЭУ КА.

2. Доработаны электрические модели ЭРИ для проведения связанного электрического и теплового анализа в пакете схемотехнического моделирования *Spice*.

3. Разработана процедура формирования эквивалентной схемы тепловой модели ЭУ, выполненного вне гермоконтейнера по 3D-модели устройства.

4. Разработаны методика, алгоритмы и программное обеспечение, позволяющее рассчитывать тепловые режимы ЭУ, выполненного вне гермоконтейнера.

Рекомендации по использованию результатов диссертации.

Результаты работы могут быть использованы на предприятиях и НИИ, занимающихся разработкой электронной аппаратуры, при проведении анализа проектных решений.

Апробация результатов диссертации. Результаты диссертационных исследований докладывались: на городской научно-технической конференции по приборостроению, посвященной сорокалетию полета Гагарина Ю.А. в космос (Томск, ТПУ, 2001 г.); технологическом конгрессе "Современные технологии при создании продукции военного и гражданского назначения" (Омск, 2001 г.); международной научно-технической конференции "Электромеханические преобразователи" (Томск, ТПУ, 2001 г.); 7-й международной научно-практической конференции "Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (СИБРЕСУРС-7-2001)" (Барнаул, 2001 г.); Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 40-летию ТУСУРа (Томск, ТУСУР, 2002 г.); VIII международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых "СТТ'2002" на русском и английском языках (Томск, ТПУ, 2002 г.); международной научно-практической конференции "САКС 2002" (Красноярск, 2002 г.), международной научно-практической конференции ТУСУР (Томск, 2004 г.), IX международной научной конференции "Решетневские чтения" (СибГАУ, Красноярск, 2005 г.), XVII научно-технической конференции "Электронные и электротехнические системы и устройства" (ФГУП "НПЦ "Полюс", Томск, 2006 г.), 5-й международной конференции "Авиация и космонавтика-2006" (МАИ, Москва, 2006 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 17 научных работ, из которых: 2 статьи в периодических изданиях по перечню ВАК, 1 в научно-техническом издании, 2 депонированных статьи.

Общая характеристика диссертации. Диссертация состоит из 4 глав, содержит основной текст на 132 с., 66 иллюстраций, 8 таблиц, 3 приложения на 14 с., список использованных источников из 90 наименований.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы и научная новизна диссертации. Определены суть проблемы, цель диссертационной работы и основные задачи исследования, сформулированы положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены конструктивные особенности ЭУ КА, выполненных вне гермоконтейнера, с учетом которых обоснованно допущение об отсутствии градиента температуры по толщине несущих конструкций устройства, позволившее перейти к макромоделям элементов конструкции.

Показано, что для ЭУ КА выполненных вне гермоконтейнера, основной способ охлаждения – кондуктивный, при котором сброс тепла осуществляется по несущим элементам конструкции устройства на теплоплиту и теплообмен излучением.

Показано, что современные программные комплексы не позволяют в полной мере проводить связанный электрический и тепловой анализ в одном пакете с возможностью определения трехмерных полей температуры по конструкции ЭУ и температуры на теплонагруженных элементах устройства.

На основе приведенного обзора и анализа существующих методов и моделей, используемых в моделировании тепловых режимов электронных устройств, обоснован выбор метода физических аналогий и моделей макроуровня.

Во второй главе решены следующие задачи:

- разработана процедура анализа проектных решений по результатам связанного электрического и теплового моделирования ЭУ (рисунок 1).

- разработана методика связанного электрического и теплового анализа ЭУ КА;

- разработан алгоритм расчета теплового режима ЭУ с автоматической дискретизацией трехмерной геометрической модели устройства и автоматическим формированием эквивалентной схемы (рисунок 2);

- разработаны тепловые модели источников температуры и мощности, ЭРИ, элементов конструкции, теплообмена излучением;

- разработан алгоритм формирования циклограммы рассеиваемой мощности на теплонагруженных ЭРИ по результатам схемотехнического моделирования схемы устройства при заданной циклограмме нагрузки ЭУ КА.

Показано, что схемотехническое моделирование схемы устройства проводится в соответствии с известными методами и алгоритмами, а тепловое моделирование динамических режимов ЭУ КА по разработанному алгоритму (рисунок 2).



Рисунок 1 – Процедура анализа проектных решений по результатам связанного электрического и теплового моделирования ЭУ КА

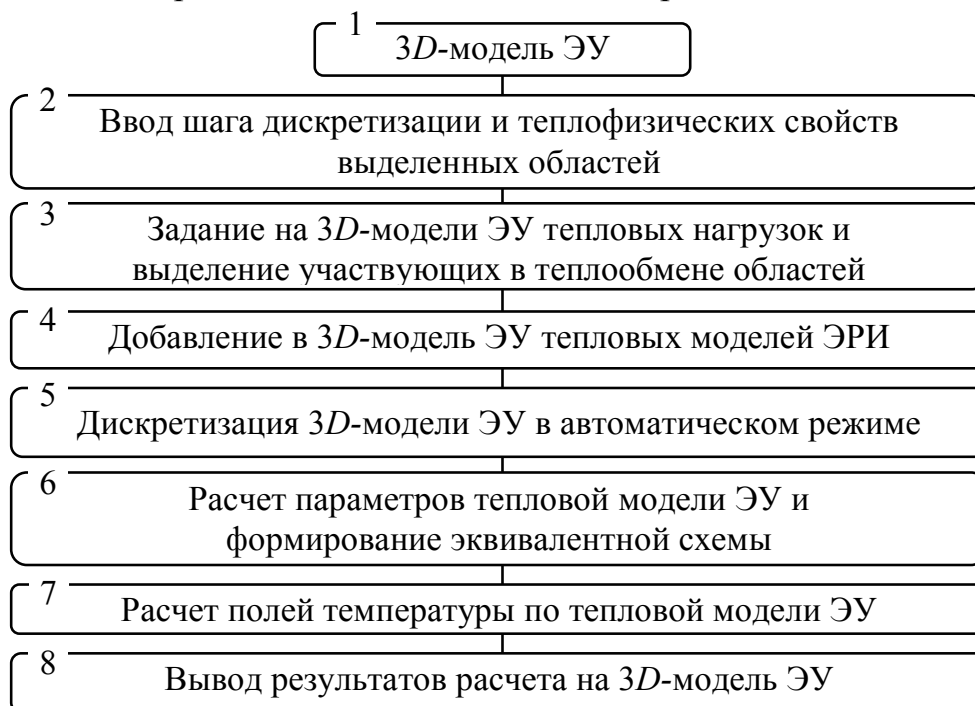


Рисунок 2 – Алгоритм расчета теплового режима ЭУ

Эквивалентная схема тепловой модели формируется по трехмерной геометрической модели устройства – 3D-модели ЭУ, рисунок 3, а, представленной набором тонкостенных пластин (модель термически тонкого тела), рисунок 3, б.

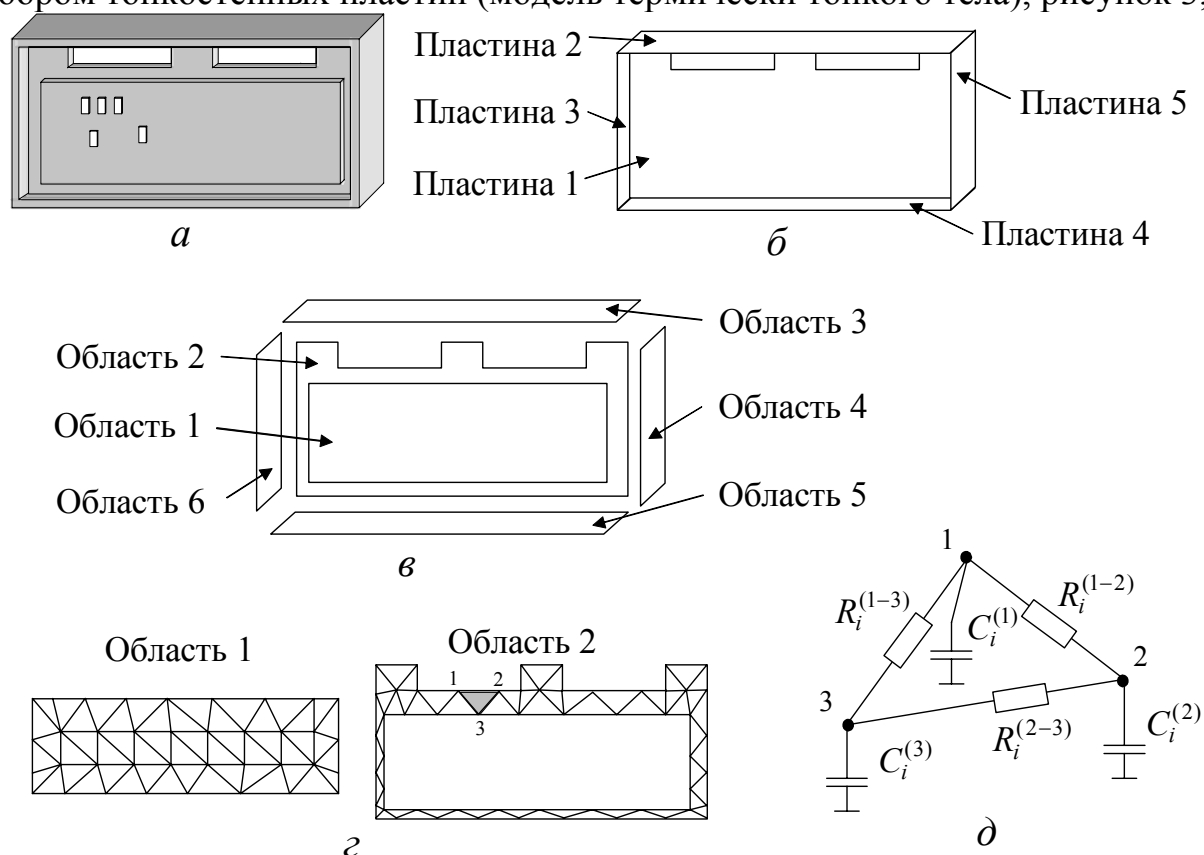


Рисунок 3 – Этапы формирования эквивалентной схемы тепловой модели: а – объемная модель; б – конструкция, представленная в виде тонких пластин; в – на тонких пластинах определены области; г – области, разбитые на треугольные элементы; д – часть эквивалентной схемы области 2

На заданных тонкостенных пластинах в интерактивном режиме выделяются области (рисунок 3, в), для каждой из которых задаются теплофизические свойства материала и шаг дискретизации. Области задаются набором вершин, соединенных между собой прямыми линиями, и образующих замкнутую фигуру.

В интерактивном режиме на 3D-модели задаются следующие тепловые нагрузки:

- *точечный источник температуры или мощности*, т.е. на области указывается точка с координатами (x, y, z) , в которой фиксируется температура или мощность;

- *распределенная по области температура или мощность*, т.е. выбирается область, на которой фиксируется температура или мощность.

Учет областей участвующих в теплообмене излучением проводится в интерактивном режиме.

Из библиотеки ЭРИ вызываются тепловые модели элементов и размещаются в областях 3D-модели ЭУ в соответствии с местоположением элемента в конструкции. Для каждого ЭРИ задается значение рассеиваемой мощности или подключается файл с записанными в него значениями мощности.

В каждой области, в соответствии с заданным шагом дискретизации, автоматически создается треугольная сетка (рисунок 3, *з*), удовлетворяющая критерию Делоне, согласно которому внутрь окружности, описанной вокруг любого треугольного элемента, не должны попадать никакие другие узлы этой сетки.

Выбор треугольного элемента связан с тем, что он является универсальным и простым в реализации алгоритма дискретизации плоской конструкции любой сложности.

Каждый i -й треугольный элемент сетки задан тремя узлами (вершинами), которые также являются узлами в эквивалентной схеме (рисунок 3, *д*). В эти узлы для имитации инерционности тепловых процессов устанавливаются теплоемкости $C_i^{(1)}$, $C_i^{(2)}$, $C_i^{(3)}$, которые соединяются тепловыми сопротивлениями $R_i^{(1-2)}$, $R_i^{(2-3)}$, $R_i^{(1-3)}$. Данные сопротивления имитируют кондуктивную теплопередачу по конструкции устройства.

Создание эквивалентной схемы области сводится к сквозной нумерации узлов сетки и подключению к ним подсхемы треугольного элемента. За счет общих узлов, расположенных на границах областей, производится автоматическое объединение эквивалентных схем областей, в результате чего формируется эквивалентная схема ЭУ. Здесь же производится подключение к эквивалентной схеме моделей точечных и распределенных источников температуры и мощности, моделей ЭРИ, моделей теплообмена излучением.

Расчет полей температуры проводится с помощью пакета *Spice* по загруженной в него эквивалентной схеме формата *.*cir*.

Результаты расчета отображаются на 3D-модели ЭУ.

Эквивалентная схема тепловой модели треугольного элемента показана на рисунке 4, где к узлу Nv подключен элемент $E1$ – источник напряжения, управляемого напряжением на котором по значениям температур в узлах 1, 2 и 3, определяется средняя температура в треугольном элементе. С помощью $G1$, $G2$, $G3$ – источников тока, управляемых напряжением, осуществляется равномерное распределение мощности в узлы треугольного элемента, значение которой считывается с элемента $V1$ подключенного к узлу Np .

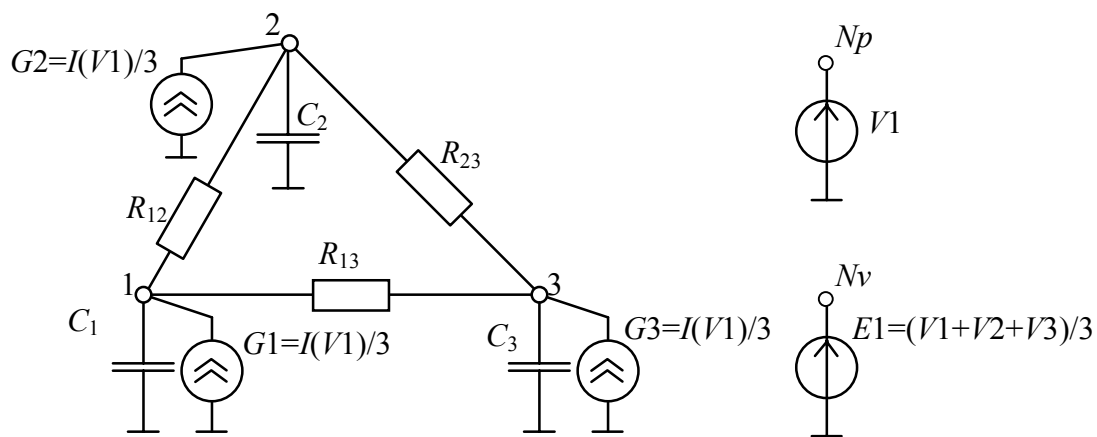


Рисунок 4 – Эквивалентная схема треугольного элемента

Значения тепловых сопротивлений R_{12} , R_{23} и R_{13} , °C/Вт, рассчитываются по формулам:

$$\begin{cases} R_{12} = \frac{4S}{\delta\lambda((y_2 - y_3)(y_3 - y_1) + (x_3 - x_2)(x_1 - x_3))}; \\ R_{23} = \frac{4S}{\delta\lambda((y_3 - y_1)(y_1 - y_2) + (x_1 - x_3)(x_2 - x_1))}; \\ R_{13} = \frac{4S}{\delta\lambda((y_2 - y_3)(y_1 - y_2) + (x_3 - x_2)(x_2 - x_1))}; \end{cases} \quad (1)$$

где δ – толщина элемента, м; λ – коэффициент теплопроводности материала элемента, Вт/(м·°C), S – площадь треугольного элемента, м².

Значения теплоемкостей C_1 , C_2 и C_3 , Дж/°C, рассчитывается по формуле

$$\begin{cases} C_1 = \frac{c_{уд}\rho\delta S}{3}; \\ C_1 = C_2 = C_3, \end{cases} \quad (2)$$

где $c_{уд}$ – удельная теплоемкость материала элемента, Дж/(кг·°C); ρ – удельная плотность материала элемента, кг/м³.

Эквивалентная схема модели теплообмена излучением показана на рисунке 5, где нелинейное тепловое сопротивление реализовано на источнике тока, управляемом напряжением между узлами 3 и 4 – G_i , и шунтирующем тепловом сопротивлении $R_{s1} = 10^{10}$ °C/Вт.

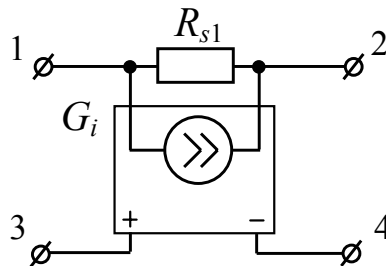


Рисунок 5 – Модель теплообмена излучением

Тепловая мощность, рассеиваемая с поверхности треугольного элемента, рассчитывается по известной формуле

$$G_i = \frac{\left(\frac{t_1 + 273}{100}\right)^4 - \left(\frac{t_2 + 273}{100}\right)^4}{K_R}, \quad (3)$$

где K_R – коэффициент, зависящий от геометрических параметров тела и условий теплообмена излучением, °C⁴/Вт; t_1 – температура элемента, °C; t_2 – температура среды, °C.

Для ЭРИ, по поверхностям которых не требуется определения поля температуры, целесообразно применять упрощенную тепловую модель, рисунок 6.

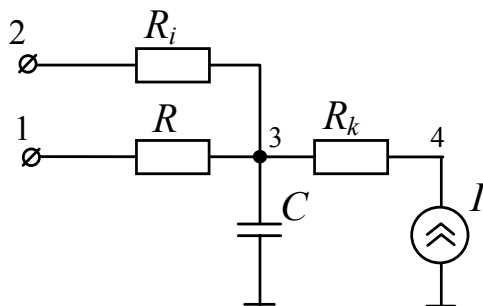


Рисунок 6 – Тепловая модель ЭРИ

Эквивалентная схема такой модели состоит из теплового сопротивления R , имитирующего кондуктивную теплопередачу по корпусу и креплению ЭРИ, нелинейного теплового сопротивления R_i , имитирующего теплообмен излучением, теплового сопротивления R_k , имитирующего теплопроводность между кристаллом и корпусом ЭРИ, теплоемкости C и источника электрических потерь I . В тепловых моделях, кроме транзистора и диода, тепловое сопротивление $R_k = 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C/Вт}$.

Разработан алгоритм формирования циклограммы рассеиваемой мощности на ЭРИ по результатам схемотехнического моделирования схемы ЭУ в пакете *Spice*.

Схема ЭУ составляется из встроенных в пакет *Spice* моделей диодов и транзисторов, в которых учтены объемные сопротивления, емкости переходов, ток утечки перехода, температурные коэффициенты и доработанных электрических моделей конденсаторов и дросселей, учитывающих потери и ток утечки для конденсатора, и потери в обмотке и сердечнике для дросселя.

Для задания тепловых нагрузок при проведении связанного теплового и электрического анализа разработан алгоритм, на первом этапе которого формируется циклограмма режимов работы $[T_i, P_{нi}]$, определяющая последовательность режимов работы ЭУ, рисунок 7. После этого проводится схемотехническое моделирование в пакете *Spice*, где каждый режим исследуется на интервале времени τ , соответствующем времени установления переходных процессов в схеме, рисунок 8.

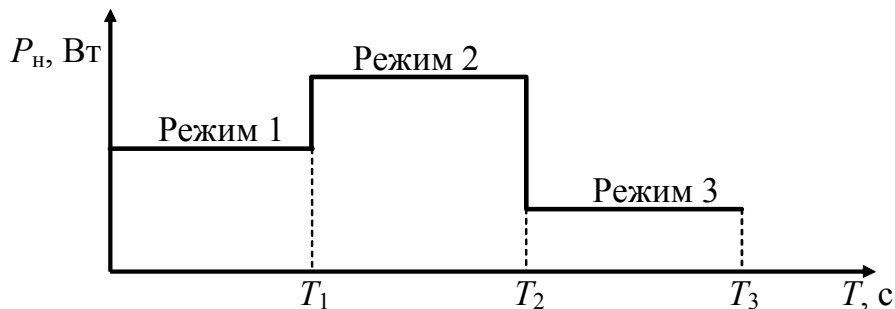


Рисунок 7 – Циклограмма режимов работы ЭУ

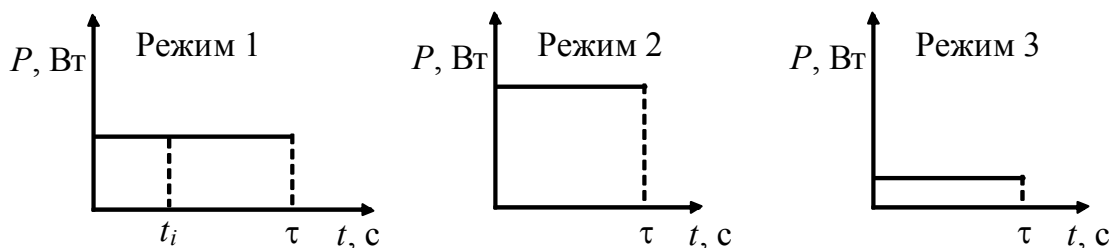


Рисунок 8 – Электрические потери для каждого режима работы ЭУ

Результаты моделирования в пакете *Spice* сохраняются в файле формата *CSDF*, в котором содержится информация о токах, напряжениях и мощностях.

Для каждого режима работы ЭУ создается отдельный файл формата *CSDF*, из которого считываются соответствующие i -му шагу по времени t_i значения мощности $P_{i,j}$, где $i = 1 \dots N$ – число шагов по времени; $j = 1 \dots M$ – количество учитываемых источников тепловыделения, и формируется двумерный массив $[t_i, P_{i,j}]$ размерностью $N \times M$.

По полученному массиву $[t_i, P_{i,j}]$ производится расчет значения рассеиваемой мощности для j -го ЭРИ по формуле

$$P_j = \frac{1}{\tau} \sum_{i=2}^N P_{i,j} (t_i - t_{i-1}), \quad (4)$$

где $P_{i,j}$ – мгновенная рассеиваемая мощность на j -м источнике тепловыделения (ЭРИ) на t_i шаге по времени, Вт; P_j – рассеиваемая мощность на j -м источнике, Вт.

Полученное значение P_j за время τ для j -го ЭРИ, работающего в k -м режиме, экстраполируется от начала режима работы до времени T_k его окончания, рисунок 9.

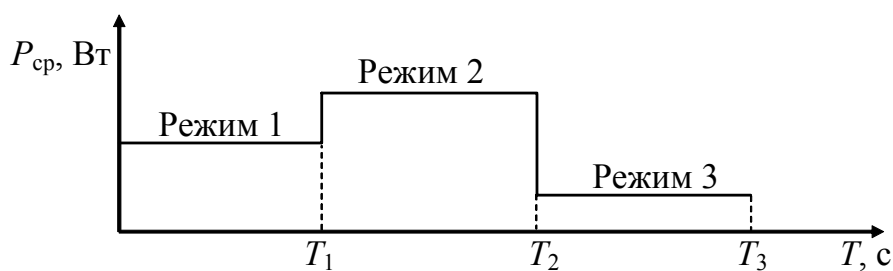


Рисунок 9 – Циклограмма рассеиваемой мощности на ЭРИ

В результате формируется двумерный массив $[T_i, P_j]$, по которому для j -го источника тепловыделения создается текстовый файл **.in* в формате: $(T_0, P_j) (T_1, P_j) (T_2, P_j)$ и т.д.

В тепловой модели ЭРИ устанавливается ссылка на файл **.in*, содержимое которого считывается автоматически в процессе расчета теплового режима ЭУ по его тепловой модели.

Третья глава посвящена разработке программного комплекса, включающего программу "ИРиЭС" и программный модуль "Потери", реализующих методику связанного электрического и теплового анализа ЭУ КА. Определены

специфические требования к комплексу, разработана его структурная схема, формат входных и выходных данных и интерфейсы программ, входящих в комплекс. Структурная схема программного комплекса представлена на рисунке 10.

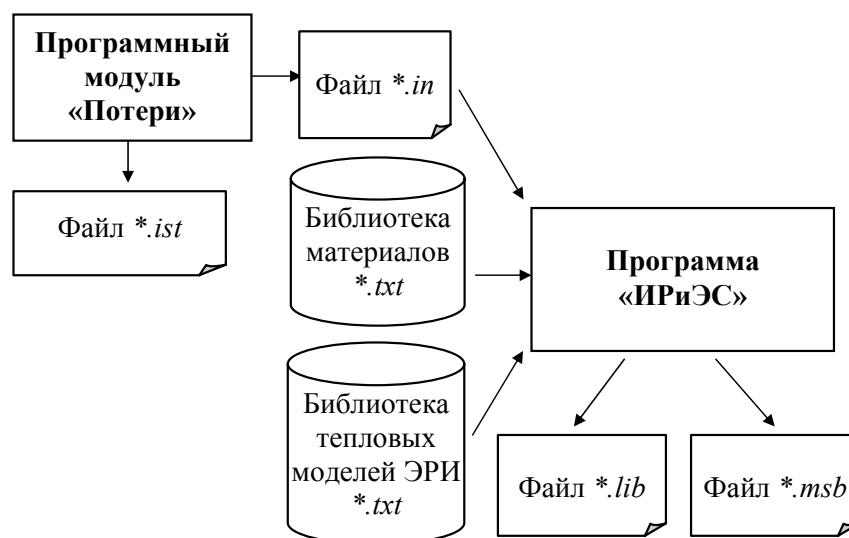


Рисунок 10 – Структурная схема программного комплекса

Программный комплекс состоит из программы "ИРиЭС", программного модуля "Потери" и библиотек материалов и тепловых моделей ЭРИ.

"ИРиЭС" – программа, являющаяся ядром комплекса. Она выполняет ключевые функции по созданию тепловой модели и запуска расчета в пакете *Spice* с визуализацией результатов на трехмерной модели ЭУ. С помощью этой программы в интерактивном режиме предусмотрено редактирование 3D-модели ЭУ, задание теплофизических свойств материала областей модели ЭУ, тепловых моделей ЭРИ и тепловых нагрузок: источников температуры и мощности.

Программный модуль "Потери" предназначен для формирования циклограммы рассеиваемой мощности по результатам моделирования электрической схемы ЭУ при заданной циклограмме нагрузки. Для каждого теплонагруженного ЭРИ, по сформированной циклограмме, создается файл *.in, содержащий последовательность значений рассеиваемой мощности на ЭРИ от времени. Этот файл включается в соответствующую тепловую модель ЭРИ.

Комплекс программ позволяет: считывать и редактировать 3D-модель ЭУ; подключать тепловые модели ЭРИ и элементов конструкции ЭУ; проводить дискретизацию конструкции ЭУ на треугольные элементы; формировать тепловую модель устройства с учетом источников тепловыделения; рассчитывать стационарные и нестационарные поля температуры по конструкции ЭУ; рассчитывать температуры на теплонагруженных ЭРИ; формировать циклограмму рассеиваемой мощности на теплонагруженных ЭРИ по результату схемотехнического моделирования в соответствии с циклограммой нагрузки.

В четвертой главе приведены расчеты полей температуры по конструкции тестового макета (рисунок 11) и комплекса автоматики и стабилизации сис-

темы электроснабжения КА глобальной навигационной спутниковой системы Глонасс с учетом компоновки теплонагруженных ЭРИ (рисунок 13).

Сравнение расчетных и экспериментальных значений температуры, полученных на тестовом макете при температуре на термоплите 20 °С, приведено в таблице 1.

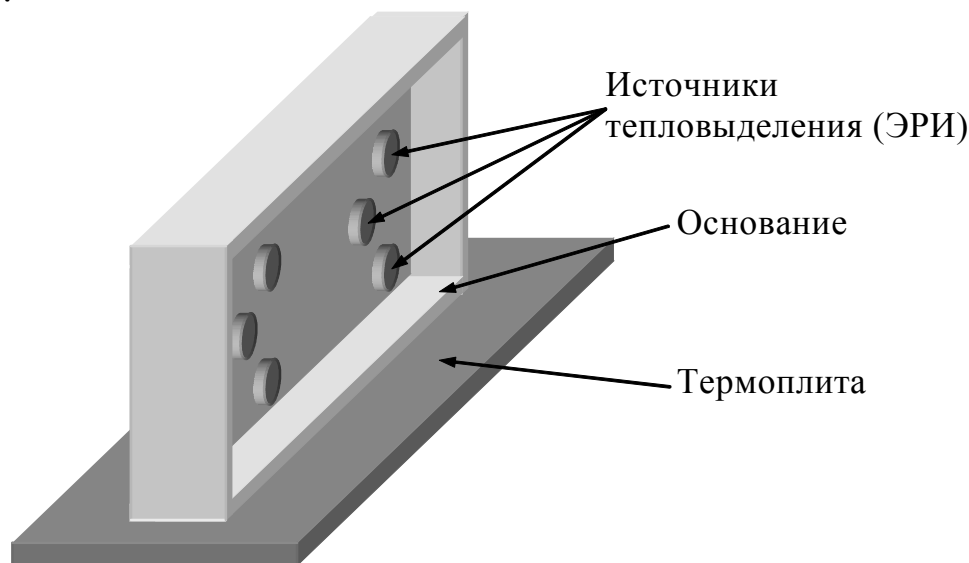


Рисунок 11 – Тестовый макет

Таблица 1. Расчетные и экспериментальные значения температуры

№ контрольной точки	Экспериментальное значение температуры в контрольной точке, °С	Программа "ИРиЭС"		Конечно-элементный пакет	
		Значение температуры, °С	Относит. погреш., %	Значение температуры, °С	Относит. погреш., %
1	46,8	48,84	7,6	49,84	11,3
2	45,4	47,53	8,4	48,54	12,4
3	42,3	44,08	8,0	45,15	12,8
4	42,4	43,70	5,8	44,55	9,6
5	43,4	44,62	5,2	45,04	7,0
6	42,6	43,71	4,9	44,04	6,4
7	42	44,08	9,5	44,85	13,0
8	42	43,4	6,4	43,4	6,4
9	39,6	41,0	7,1	41,1	7,7
10	34,5	35,5	6,9	35,53	7,1

Погрешность расчета температуры в программе "ИРиЭС" не более 9,5 %, в конечно-элементном пакете не более 13,0 %, относительная разница результатов полученных в "ИРиЭС" и конечно-элементном пакете не более 2,4 %.

Сравнение результатов расчета по конечно-элементной модели и тепловой модели, созданной в "ИРиЭС" показало, что последняя имеет устойчивое решение при изменении шага дискретизации h в широком диапазоне (рисунок 12).

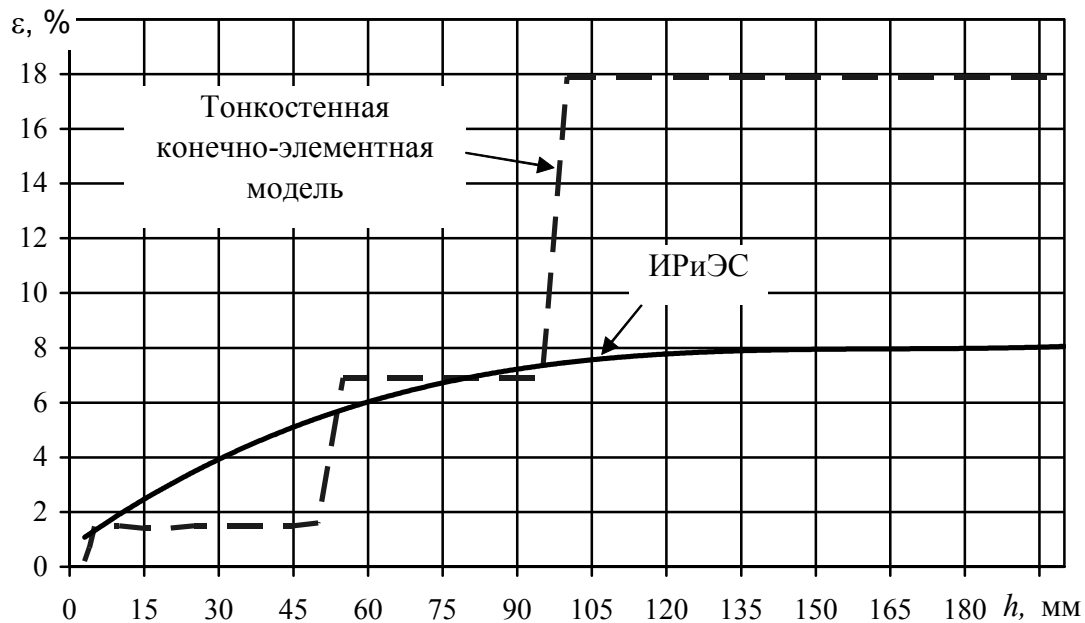


Рисунок 12 – Точность расчета по конечно-элементной модели и модели созданной в "ИРИЭС"

На рисунке 13 приведены результаты расчета температуры на теплонагруженных ЭРИ силовой части комплекса автоматика и стабилизации системы электроснабжения КА Глонасс.

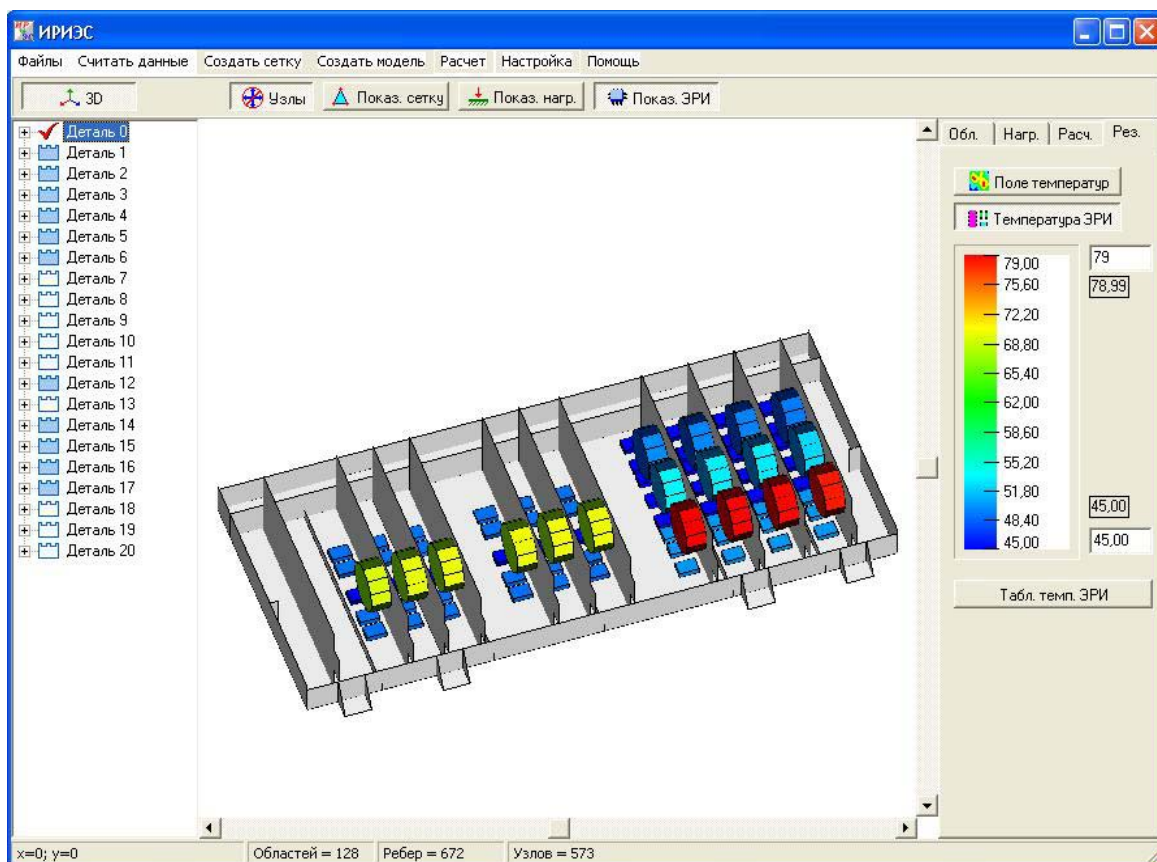


Рисунок 13 – Температура на теплонагруженных ЭРИ

В заключении сформулированы выводы по диссертационной работе.

В приложении приведены конструкция тестового макета, результаты экспериментальных и расчетных значений температуры исследуемых тепловых моделей и акт о внедрении результатов диссертационной работы.

Заключение

Основные результаты диссертационной работы представляют собой решение важной научно-технической задачи разработки методики связанного электрического и теплового анализа электронного устройства КА, выполненного вне гермоконтейнера с учетом компоновки теплонагруженных ЭРИ по ее 3D-модели и заключаются в следующем:

1. Разработаны модели тепловых нагрузок, элементов конструкции и ЭРИ электронного устройства КА. Сформирована библиотека тепловых моделей ЭРИ и элементов конструкции.

2. На основе принятого допущения об отсутствии градиента температуры по толщине несущих конструкций и оснований блоков ЭУ, тепловых моделей ЭРИ, элементов конструкции и теплообмена излучением разработана процедура автоматического формирования эквивалентной схемы тепловой модели ЭУ КА, по которой проводится исследование динамических тепловых режимов устройства.

3. Разработан алгоритм формирования циклограммы рассеиваемой мощности на теплонагруженных элементах по результатам схмотехнического моделирования схемы устройства при заданной циклограмме нагрузки ЭУ КА и доработанных электрических моделей ЭРИ, обеспечивающий адекватность расчета тепловых режимов исследуемого устройства.

4. Разработана методика проведения связанного электрического и теплового анализа электронного устройства, выполненного вне гермоконтейнера, обеспечивающая возможность определения полей температуры по конструкции и пиковых значений температуры с подтверждением необходимых запасов по перегревам на теплонагруженных ЭРИ.

5. Создан программный комплекс, позволяющий считывать 3D-модель ЭУ из программных комплексов "Компас" или *SolidWorks*, создавать тепловую модель ЭУ с учетом компоновки теплонагруженных ЭРИ, формировать циклограммы рассеиваемой мощности на ЭРИ, проводить связанный электрический и тепловой анализ устройства на базе пакета схмотехнического моделирования *Spice*.

Публикации автора по теме диссертации

Публикации в изданиях по перечню ВАК:

1 Белоусов А.В. Анализ тепловых режимов электронных устройств на моделях макроуровня // Приборы и системы. Контроль. Диагностика. — 2007. — №5. — С.25—28.

2 Белоусов А.В. Методика анализа тепловых режимов электронных устройств космического аппарата // Известия ТПУ. — 2007. — №3. — С.95—98.

Прочие публикации:

3 Белоусов А.В. Казанцев Ю.М. Исследование тепловых режимов электронных устройств с помощью макромоделей // Электронные и электромеханические системы и устройства: Сб. науч. трудов. Новосибирск: Наука, 2007. — С.354—361.

4 Белоусов А.В., Поспелов В.В., Самодуров Д.В. Комплексное обеспечение надежности космической РЭА на основе моделирования тепловых и электромагнитных процессов: Сб. докладов технологического конгресса "Современные технологии при создании продукции военного и гражданского назначения". Омск: ОмГТУ, 2001. — С.344—346.

5 Белоусов А.В., Поспелов В.В. Моделирование тепловых процессов в устройствах электрооборудования автономных систем методом электротепловой аналогии: Сб. докладов международной научно-технической конференции "Электромеханические преобразователи". Томск: ТПУ, 2001. — С.157.

6 Алексеев В.П., Белоусов А.В., Озеркин Д.В. Системное проектирование термоустойчивых бортовых радиотехнических устройств // 7-я международная науч.-практ. конф. "Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (Сибресурс-7-2001)". Барнаул: ТПУ, 2001. — С.209—212.

7 Алексеев В.П., Белоусов А.В. Особенности компьютерного моделирования тепловых режимов космической РЭА методом электротепловой аналогии // Труды Всероссийской науч.-практ. конф., посвященной 40-летию ТУСУР. Томск: ТУСУР, 2002. — С.114—116.

8 Белоусов А.В. Моделирование тепловых процессов в РЭА космического назначения // Труды Международной науч.-практ. конф. "САКС 2002". Красноярск: СибГАУ, 2002. — С.332—334.

9 Белоусов А.В. Моделирование тепловых режимов теплонагруженных элементов силовых электронных устройств космического аппарата // Материалы международной науч.-практ. конф. Томск: ТУСУР, 2004. — С.69—71.

10 Белоусов А.В. Казанцев Ю.М. Моделирование тепловых режимов электронной аппаратуры космического аппарата // Материалы IX международной науч. конф. "Решетневские чтения". Красноярск: СибГАУ, 2005. — С.249—250.

11 Белоусов А.В. Казанцев Ю.М. Применение макромоделей в анализе тепловых режимов электронных устройств космического аппарата // Тез. докл. 5-й международной конф. "Авиация и космонавтика-2006". Москва: МАИ, 2006. — С. 306—307.

12 Белоусов А.В. Автоматизация анализа тепловых режимов электронных устройств космического аппарата // Тез. докл. XVII науч.-техн. конф. "Электронные и электромеханические системы и устройства". Томск: ФГУП "НПП"Полус", 2006. — С.222—225.

13 Комплекс автоматизированного теплового проектирования. В.П. Алексеев, А.В. Белоусов, В.В. Поспелов, Н.С. Несмелов // Труды городской науч.-техн. конф. по приборостроению, посвященной сорокалетию полета Гагарина Ю.А. в космос. Томск: ТПУ, 2001. — С.7—8.

14 Alexseev V.P., Belousov A.V. Features of electric and mechanical systems electrothermal models in the method of electrothermal analogy // Proc. of the 8th international scientific and practical conference of students, post-graduates and young science "МТТ'2002". Tomsk: TPU, 2002. — С.93—95.

15 Белоусов А.В. Обеспечение теплового режима в комплексе автоматизированного проектирования электромеханических систем // Труды VIII международной науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых "СТТ'2002". Томск: ТПУ, 2002. — С.20—22.

16 Белоусов А.В. Интегрированные электротепловые модели температурных полей блоков космических радиотехнических устройств. — М., 2003. — Деп. в ВИНТИ 09.04.03 №667–В2003. — 21 с.

17 Белоусов А.В. Особенности электротепловых моделей для расчета температурных полей космических радиотехнических устройств. — М., 2003. — Деп. в ВИНТИ 09.04.03 №668–В2003. — 14 с.