На правах рукописи

Карабан Вадим Михайлович

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ТЕРМОСТАТИРОВАНИЯ

01.04.14 - Теплофизика и теоретическая теплотехника

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Томск – 2009

Работа выполнена на кафедрах прикладной информатики и математики, конструирования и производства радиоаппаратуры Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор Тимченко Сергей Викторович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
доцент Крайнов Алексей Юрьевич

кандидат физико-математических наук,
ст.н.с. Казаков Вениамин Юрьевич

Ведущая организация: ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнева»,
г. Железногорск.

Защита состоится « 04 » декабря 2009 г. в 14 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.267.13 при ГОУ ВПО «Томский государственный университет» по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 36.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке ГОУ ВПО «Томский государственный университет» по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 34а.

Автореферат разослан « 03 » ноября 2009 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.267.13
доктор технических наук

Ю. Ф. Христенко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

В своей работе радиоэлектронная аппаратура (РЭА) специального назначения подвергается воздействию самых разнообразных факторов, в том числе и – температуры среды, которая в значительной степени влияет на параметры, как отдельных элементов, так и устройств в целом. Микроэлектронная элементная база III и IV поколений, выполненная с помощью методов интегрально-групповой технологии, позволяет достигнуть высокой стабильности параметров работы РЭА, однако в ряде случаев требования к стабильности таковы, что для обеспечения заданной надежности и режима функционирования необходимо применять специальные методы термостабилизации, одним из которых является микротермостатирование.

Развитие микроэлектроники предоставляет возможность более широкого и эффективного использования микротермостатирования, обусловленную тем, что термостабилизируемые элементы РЭА и само устройство микротермостатирования – микротермостат (МТ) может выполняться за единый технологический цикл, в едином корпусе.

Обоснованное и рациональное использование микротермостатирования, как перспективного метода термостабилизации, позволяет улучшить параметры РЭА. Однако в настоящее время не нашли в полной мере обоснования и отражения вопросы:

- определения влияния дестабилизирующих факторов на основные параметры системы микротермостатирования;
- определения влияния конструктивно-технологических факторов МТ на точностные параметры системы микротермостатирования;
- определения области оптимальных значений конструктивно-технологических факторов МТ.

Количественной оценке этих вопросов предшествует анализ температурных состояний МТ. В настоящее время одним из наиболее перспективных направлений такого анализа является математическое моделирование, под которым понимают замену существующего или создаваемого объекта адекватной ему математической моделью и последующее ее количественное исследование путем вычислительного эксперимента с привлечением средств современной вычислительной техники.

Целью диссертационной работы является численное моделирование теплофизических процессов в гибридно-пленочных микротермостатах, обеспечивающих повышенную и заранее прогнозируемую температурную стабильность РЭА.

Для достижения обозначенной цели проводится:

1. Численное моделирование температурных полей в термостабильных подложках гибридно-интегральных схем, с учетом тепловой обратной связи и

реальных режимов работы микротермостата.

2. Анализ влияния внешних и конструктивно-технологических факторов термостабильной подложки на точностные параметры регулирования температуры.

3. Оптимизация конструктивно-технологических решений подложек гибридно-пленочных МТ на основании полученных результатов численного моделирования теплофизических процессов.

Научная новизна работы.

Получено численное решение двух- и трехмерной задач теплопереноса в гибридно-пленочном микротермостате, учитывающих тепловую обратную связь. Получены нестационарные пространственные распределения температур в термостабильной подложке гибридно-интегральных схем, согласующиеся с результатами экспериментальных исследований.

При помощи математического моделирования теплофизических процессов исследовано влияние внешних и конструктивно-технологических факторов и параметров работы микротермостатов.

Впервые проведена топологическая термокомпенсация с учетом уравнения температурной погрешности и картины пространственного распределения статической ошибки регулирования температуры.

Практическая значимость работы.

Разработана методика расчета температурных полей в термостабильных подложках гибридно-интегральных схем, которая может быть использована при проектировании радиоэлектронной аппаратуры специального назначения. По результатам работы приведены рекомендации по выбору оптимальных конструктивно-технологических решений. По результатам работы получены два патента Российской Федерации.

Защищаемые положения.

На защиту выносятся:

1. Неодномерные нестационарные нелинейные модели теплопереноса с учетом тепловой обратной связи.
2. Результаты численного моделирования температурных полей термостабильной подложки гибридно-интегральных схем.
3. Результаты проведения топологической термокомпенсации на основании данных о пространственном распределении статической ошибки регулирования температуры.

Достоверность полученных результатов основана на исследовании используемых методов на сеточную сходимость на последовательности вложенных пространственно-временных сеток, сравнении результатов численного моделирования с экспериментальными данными, сравнении с численными решениями, полученными при помощи пакета ANSYS.

Личный вклад автора.

Состоит в постановке задачи, разработке метода и алгоритма ее решения, проведении численного анализа исследованных процессов, обработке и обобщении результатов теоретических исследований, анализе и обобщении полученных результатов, формулировке выводов и заключения по диссертации.

Внедрение результатов работы. Основные результаты работы внедрены в учебный процесс кафедры Конструирования и производства радиоаппаратуры Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники при подготовке инженеров по специальности 210201 «Проектирование и технология радиоэлектронных средств» в качестве двух учебных пособий:

- **«**Математическое моделирование процессов термоустойчивости в конструкциях РЭС» – Томск: ТУСУР, 2007. – 140 с.;
- «Метод электротепловой аналогии в моделировании тепловых режимов РЭС» – Томск: ТУСУР, 2007. – 93 с.

Апробация работы.

Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР-2006» (Томск, 2006); IV международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления. Опыт инновационного развития» (Томск, 2007); Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР-2008» (Томск, 2008), Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР-2009» (Томск, 2009).

Публикации.

Основные результаты диссертации представлены в журналах: «Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники», «Известия Томского политехнического университета», «Russian Journal of Engineering Thermophysics», «Известия вузов. Радиоэлектроника». Также опубликованы материалы трех Всероссийских и одной международной конференций.

Всего опубликовано 13 работ, 7 из которых в журналах входящих в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Министерства образования и науки Российской Федерации.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов, заключения и списка цитируемой литературы. Материал изложен на 137 листах, включает 98 рисунков, 6 таблиц. Список цитируемой литературы составлен из 69 источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность темы исследования, сформулирована цель и основные задачи диссертации.

В **первой главе** проводится аналитический обзор состояния обеспечения температурной устойчивости радиоэлектронной аппаратуры на современном этапе, в ходе которого выясняется, что вопросы выбора схемы регулятора в научно-технической литературе по термостатированию преобладают над вопросами выбора оптимальных конструктивных параметров. Около 80% всех публикаций в этой области посвящено разработке и исследованию схем регулирования с высокой точностью и только в части работ указывается на тесную связь конструктивных и схемных параметров МТ.

Количественной оценке указанных параметров предшествует анализ температурных состояний конструкции МТ. В настоящее время одним из наиболее перспективных направлений такого анализа является математическое моделирование, под которым понимают замену существующего или создаваемого объекта адекватной ему математической моделью и последующее ее количественное исследование путем вычислительного эксперимента с привлечением средств современной вычислительной техники.

Большими возможностями решения краевых задач теплопроводности обладают численные методы, которые основаны на замене непрерывной математической модели процесса приближенной дискретной моделью. Проводимый информационный анализ моделирования тепловых режимов элементов РЭА первого уровня иерархии, к которым относится МТ: интегральные микросхемы, микросборки и дискретные ЭРЭ, являющиеся элементной базой РЭА, показывает их сводимость к расчету пространственных температурных полей в телах или системе тел канонической формы с помощью конечно-разностного метода.

Во **второй главе** реализуется математическая модель термостатирования и приводится численный метод ее решения. В качестве объекта исследования рассматривается гибридно-пленочный микротермостат, содержащий термостабильную подложку, то есть подложку, на которой совместно с термостатируемой схемой в едином технологическом цикле выполнена и схема регулирования температуры (рис. 1). Температура такой подложки поддерживается постоянно в заданном диапазоне изменения температуры внешней среды с погрешностью, определяемой как выбранным законом регулирования температуры, так и конструкционно-технологическими особенностями микротермостата.

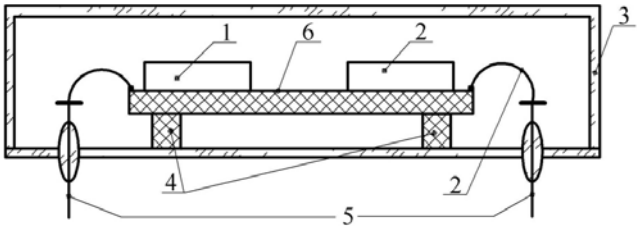

Рис. 1. Физическая модель гибридно-пленочного микротермостата:
1) термостатируемая схема; 2) схема регулирования температуры;
3) корпус; 4) теплоизоляция;
5) выводы; 6) подложка

Численное исследование проводится с учетом следующего комплекса теплофизических процессов: кондуктивного теплопереноса между элементами конструкции термостабильной подложки, лучистого теплообмена с внешней средой.

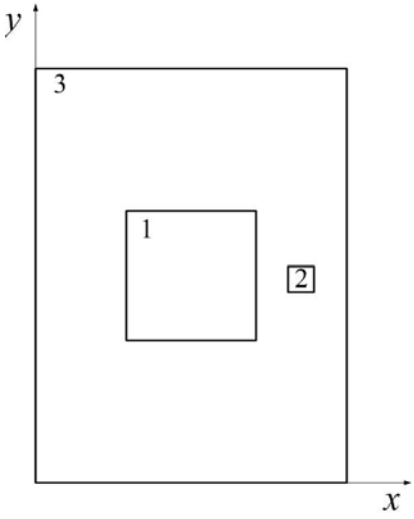

Рис. 2. Геометрия области решения (вид сверху): 1 – нагреватель; 2 – датчик температуры; 3 – подложка ГИС

Так как все элементы термостабильной подложки геометрически представляют собой параллелепипеды, с размерами по осям x, y превосходящими размер по оси z, задача регулирования температуры такой конструкции рассматривается в двумерной постановке (рис. 2).

При реализации двухмерной задачи используются следующие допущения:

1. Тепловыделениями термостатируемых элементов на подложке по сравнению с мощностью нагревателя можно пренебречь;

2. Подложка представляет собой однородное изотропное тело, теплофизические характеристики которого (ТФХ) не зависят от координат и температуры;

3. Тепловой контакт на границах между телами (областями) считается идеальным. Снижение теплового сопротивления между элементами термостабильной подложки достигается за счет применения серебросодержащего припоя;

4. Сток тепла с верхней и нижней поверхности термостабильной подложки во внешнюю среду за счет радиационного теплообмена учитывается в уравнении теплопроводности дополнительными источниками тепловыделения. Сток тепла во внешнюю среду за счет механизмов конвекции отсутствует, это допущение обусловлено расстоянием до поверхности корпуса МТ не более 5 мм;

5. Теплообмен с боковых граней, учитывается в уравнении теплопроводности за счет увеличения (пропорционально отношению площадей боковых и верхней грани) мощности дополнительных источников тепловыделения (см. допущение 4).

В рассмотренной постановке задача сводилась к решению двумерного нелинейного нестационарного уравнения теплопроводности термостабильной подложки совместно с уравнением пропорционального регулятора температуры, модель работы которого представлена на рис. 3.

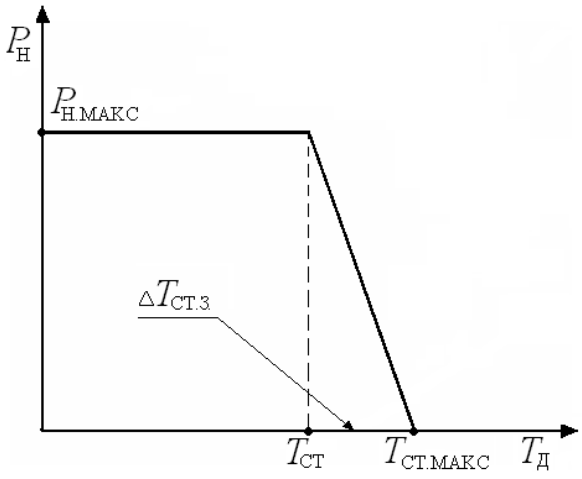

Рис. 3. Модель пропорционального регулятора температуры

$$\begin{cases} C\rho\dfrac{\partial T}{\partial t}=\lambda\left(\dfrac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\dfrac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right)+\dfrac{P_{\text{Н}}\left(x,y,T_{\text{Д}}\right)}{S_{\text{Н}}h}-k\left(x,y\right)\dfrac{\varepsilon_{\text{ПР}}\sigma\left[T^4-T_{\text{ВН}}^4\right]}{h} \\ P_{\text{Н}}\left(T_{\text{Д}}\right)=P_{\text{Н.МАКС}}\text{ , при } T_{\text{Д}}\le T_{\text{СТ}} \\ P_{\text{Н}}\left(T_{\text{Д}}\right)=P_{\text{Н.МАКС}}-\dfrac{P_{\text{Н.МАКС}}}{\Delta T_{\text{СТ.З.}}}\left(T_{\text{Д}}-T_{\text{СТ}}\right)\text{ , при } T_{\text{СТ}}<T_{\text{Д}}<T_{\text{СТ.МАКС}} \\ P_{\text{Н}}\left(T_{\text{Д}}\right)=0\text{ , при } T_{\text{Д}}\ge T_{\text{СТ.МАКС}} \\ P_{\text{Н}}\left(x,y\right)=P_{\text{Н}}\left(T_{\text{Д}}\right)\text{ , при } x,y\in\left[S_{\text{Н}}\right] \\ P_{\text{Н}}\left(x,y\right)=0\text{ , при } x,y\notin\left[S_{\text{Н}}\right] \end{cases} \quad (1)$$

где x, y – пространственные координаты (в декартовой системе координат); C, ρ, λ – удельная теплоемкость, плотность и коэффициент теплопроводности материала подложки, соответственно; T, $T_{\text{ВН}}$, $T_{\text{Д}}$ – температура подложки, внешней среды и датчика температуры; $T_{\text{СТ}}$, $\Delta T_{\text{СТ.МАКС}}$, $\Delta T_{\text{СТ.З.}}$ – температура статирования, максимальная температура статирования и заданный диапазон температуры статирования; t – текущее время расчета; $S_{\text{Н}}$ – площадь подложки, занимаемая нагревателем; h – толщина подложки; σ, $\varepsilon_{\text{ПР}}$ – постоянная Стефана-Больцмана и приведенный коэффициент черноты поверхности и окружающей среды; k – коэффициент; $P_{\text{Н}}$, $P_{\text{Н.МАКС}}$ – текущая и максимальная мощность нагревателя; L_x, L_y – размеры подложки по осям x и y.

Третье слагаемое в правой части дифференциального уравнения теплопроводности (1) учитывает сток тепловой энергии во внешнюю среду за счет механизмов лучистого теплообмена. С помощью коэффициента k учитывается теплообмен с боковых граней датчика температуры и нагревателя.

Решение задачи (1) рассматривается при:

$$t\in[0;t_{\text{МАКС}}],x\in[0;L_x],y\in[0;L_y], \quad (2)$$

где $t_{\text{МАКС}}$ – максимальное время расчета.

При задании начальных условий считается, что температура подложки в начальный момент времени (T_0) распределена равномерно:

$$T\big|_{t=0}=T_0\left(x,y\right). \quad (3)$$

В граничных условиях учитывается лучистый теплообмен на поверхности термостабильной подложки по закону Стефана-Больцмана:

$$x=0,y\in\left[0;L_y\right]:\quad -\lambda\frac{\partial T}{\partial x}=\varepsilon_{\text{ПР}}\sigma\left(T^4-T_{\text{ВН}}^4\right); \quad (4)$$

$$x=L_x,y\in\left[0;L_y\right]:\quad -\lambda\frac{\partial T}{\partial x}=\varepsilon_{\text{ПР}}\sigma\left(T^4-T_{\text{ВН}}^4\right); \quad (5)$$

$$y = 0, x \in [0; L_x]: \quad -\lambda \frac{\partial T}{\partial y} = \varepsilon_{\text{ПР}} \sigma \left(T^4 - T_{\text{ВН}}^4 \right); \tag{6}$$

$$y = L_y, x \in [0; L_x]: \quad -\lambda \frac{\partial T}{\partial y} = \varepsilon_{\text{ПР}} \sigma \left(T^4 - T_{\text{ВН}}^4 \right). \tag{7}$$

Приведенный коэффициент черноты поверхности тела и окружающей среды вычисляется по формуле:

$$\varepsilon_{\text{ПР}} = \left(\frac{1}{\varepsilon_{\text{П}}} + \frac{1}{\varepsilon_{\text{ВН}}} - 1 \right)^{-1}, \tag{8}$$

где $\varepsilon_{\text{П}}$ – коэффициент черноты поверхности тела; $\varepsilon_{\text{ВН}}$ – коэффициент черноты внешней среды.

Сформулированное дифференциальное уравнение (1) с соответствующими начальными (2-3) и граничными (4-7) условиями решается методом конечных разностей. При этом для производных по пространству использовалась центрально-разностная аппроксимация второго порядка точности, а для производных по времени применялась неявная аппроксимация первого порядка точности.

Для решения разностных аналогов двумерного уравнения теплопроводности используется схема расщепления по координатам (локально-одномерная) и метод прогонки. Нелинейности в граничных условиях преодолеваются при помощи итераций, проводимых до получения заданной точности:

$$\frac{\max \left| T^{(n+1)} - T^{(n)} \right|}{\max \left| T^{(n+1)} \right|} \le \xi, \tag{9}$$

где n – номер итераций; ξ – заданная точность вычислений.

При выполнении условия (9) осуществляется переход к следующему временному слою.

Для тестирования используемой численной модели и метода решения разностных задач проводится исследование пространственной конечно-разностной сетки, и величины шага по времени.

Анализ полученных результатов решения на разных размерностях пространственно-временных конечно-разностных сетках позволяет выявить оптимальный вариант размерности сетки для дальнейшего проведения численных исследований.

Сопоставление результатов численного моделирования с экспериментальными данными показывает, что отклонение теоретических результатов от опытных данных не превышает ±2 К при абсолютных значениях температуры до 320 К.

В **третьей главе** приводятся численные исследования теплофизических процессов регулирования температуры подложки гибридно-пленочного МТ основанные на применении двухмерной нестационарной нелинейной математической модели теплопереноса.

Проводится выбор закона регулирования температуры термостабильной подложки для минимального и максимального расстояния взаимного пространственного размещения датчика температуры и нагревателя, результаты которого позволяют говорить о нецелесообразности применения более сложных законов регулирования, таких как пропорционально-интегральный, пропорционально-дифференциальный, интегрально-дифференциальный или пропорционально-интегрально-дифференциальный, так как наличие каждой составляющей требует дополнительных пространственно-временных затрат на размещение элементов схемы регулирования и настройку параметров работы. Вследствие значительной тепловой инерционности объекта регулирования (низкое давление в камере МТ и, как следствие, отсутствие конвекции) применение дифференциальной составляющей регулятора требуется в переходные моменты пуска, которые могут достигать всего лишь нескольких процентов от времени регулятора. Все остальное время работа ПИД-регулятора осуществляется за счет ПИ-составляющей. К тому же наличие интегральной составляющей не позволяет исключить статическую ошибку в области подложки не занятой датчиком температуры и приводит к затянутому времени выхода на режим ($\tau_{\text{ВЫХ}}$).

Также было установлено, что применение того или иного закона регулирования не оказывает влияния на величину температурного перепада ($\Delta T_{\text{П}}$), а, следовательно, и на диапазон изменения статической ошибки регулирования температуры ($\Delta\delta_{\text{СТ}}$) по поверхности подложки (табл. 1).

В дальнейшем, на основании выбранного закона регулирования, проводятся исследования зависимостей времени выхода на режим, температурных перепадов, а также диапазона изменения статической ошибки регулирования температуры по подложке, от основных значимых факторов и параметров: габаритных размеров ($V_{\text{П}}$) и коэффициента температуропроводности (a) подложки; коэффициента усиления по замкнутому контуру (K); взаимного пространственного размещения датчика температуры и нагревателя (r); диапазона изменения температуры внешней среды ($\Delta T_{\text{ВН}}$):

$$\tau_{\text{ВЫХ}},\ \Delta T_{\text{П}},\ \Delta\delta_{\text{СТ}} = f(V_{\text{П}}; a; K; r; \Delta T_{\text{ВН}}), \tag{10}$$

либо, если сделать более подробную запись каждого параметра:

$$\tau_{\text{ВЫХ}}, \Delta T_{\text{П}}, \Delta\delta_{\text{СТ}} = f\left[\underbrace{(l, b, h)}_{V_{\text{П}}}; \underbrace{(\lambda, \rho, C)}_{a}; \underbrace{(P_{\text{Н МАКС}}, \Delta T_{\text{СТЗ}})}_{K}; \underbrace{(x, y)}_{r}; \underbrace{(T_{\text{ВН. МИН}}, T_{\text{ВН. МАКС}})}_{\Delta T_{\text{ВН}}}\right], \tag{11}$$

где l, b, h – линейные размеры подложки; x, y – координаты пространственного размещения датчика температуры; $T_{\text{ВН. МАКС}}$ и $T_{\text{ВН. МИН}}$ – максимальная и минимальная температуры внешней среды.

Рассматриваются альтернативные направления повышения точности регулирования температуры посредством варьирования коэффициентом усиления по замкнутому контуру регулирования, взаимным пространственным размещением датчика температуры и нагревателя, а также теплопроводностью материала подложки.

Таблица 1. Сводная таблица результатов численного исследования различных законов регулирования

Координаты размещения датчика температуры, мм	[10;8]					
Температура внешней среды, К	223			323		
Закон регулирования	Двух-позиц.	П	ПИД	Двух-позиц.	П	ПИД
$\tau_{ВЫХ}$, с	-	404	781	-	61	89
Σδ*, К	0.01+0	0+0.32	0+0	0.08+0	0+0.05	0+0
$\Delta T_{П}$ **, К	-	1.3	1.3	-	0.2	0.2
Координаты размещения датчика температуры, мм	[11;15]					
Температура внешней среды, К	223			323		
Закон регулирования	Двух-позиц.	П	ПИД	Двух-позиц.	П	ПИД
$\tau_{ВЫХ}$, с	-	565	496	-	221	131
Σδ*, К	0.67+0	0+0.33	0+0	1.58+0	0+0.05	0+0
$\Delta T_{П}$ **, К	-	1.1	1.1	-	0.2	0.2

Примечание:
* Σδ – сумма динамической и статической ошибки регулирования температуры в области датчика с течением времени, т.е. $\Sigma\delta = \delta_{ДИН} + \delta_{СТ}$.
** $\Delta T_{П}$ – температурный перепад, под которым понимается разница между максимальным ($\Delta T_{П.\,МАКС}$) и минимальным ($\Delta T_{П.\,МИН}$) значением температуры по поверхности подложки в конечный момент времени, т.е. $\Delta T_{П} = \Delta T_{П.\,МАКС} - \Delta T_{П.\,МИН}$.

Так, например, изменение схемных параметров ($P_{Н.МАКС}$ и $\Delta T_{СТ.З.}$), входящих в состав коэффициента усиления ($K_{Р}$) по замкнутому контуру регулирования, приводит к изменению величины управляющего воздействия. Это в свою очередь сказывается на изменении величины времени выхода на режим и статической ошибки регулирования температуры подложки в области датчика:

$$P_{УПР} = P_{Н} = K_{Р}\delta = \frac{P_{Н.МАКС}}{\Delta T_{СТ.З.}}\delta, \text{ при } T_{СТ} < T_{Д} < T_{СТ.МАКС}. \quad (12)$$

Результаты моделирования показывают прямую зависимость величины времени выхода на режим (рис. 4) и статической ошибки регулирования температуры в области датчика (рис. 5) от заданного диапазона температуры статирования. Однако, температурный перепад, а, следовательно, и диапазон изменения статической ошибки регулирования температуры по поверхности

подложки, является величиной постоянной и не зависит от величины заданного диапазона температуры статирования, то есть зависимостью $\Delta T_{\text{П}}$, $\Delta\delta_{\text{СТ}} = f\left(\Delta T_{\text{СТ.З.}}\right)$ можно пренебречь. Имеет место лишь позиционирование указанных величин: $\Delta T_{\text{П}}$ и $\Delta\delta_{\text{СТ}}$ относительно отметки заданного диапазона статической ошибки регулирования.

Проводимое численное моделирование температурных полей подложек из материалов различной теплопроводности (13.4, 31 и 131 Вт/(м·К)) показывает, что в широком диапазоне изменения температуры внешней среды влияние точечного нагревателя на величину температурного перепада, а, следовательно, и диапазона изменения статической ошибки регулирования по поверхности подложки, значительно и сравнимо с заданным диапазоном температуры статирования (рис. 6). Керамику с низкой теплопроводностью можно использовать лишь в узком диапазоне температуры внешней среды (рис. 7).

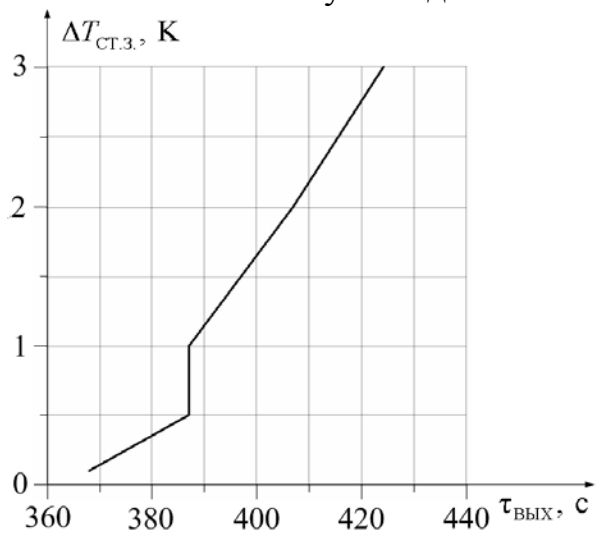

Рис. 4. График зависимости $\tau_{\text{вых}} = f\left(\Delta T_{\text{СТ.З.}}\right)$

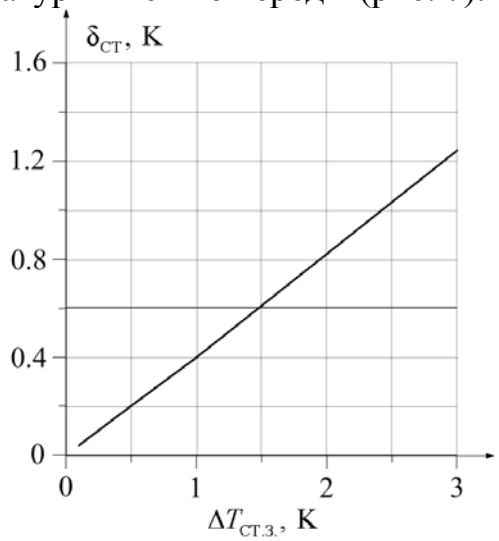

Рис. 5. График зависимости $\delta_{\text{СТ}} = f\left(\Delta T_{\text{СТ.З.}}\right)$

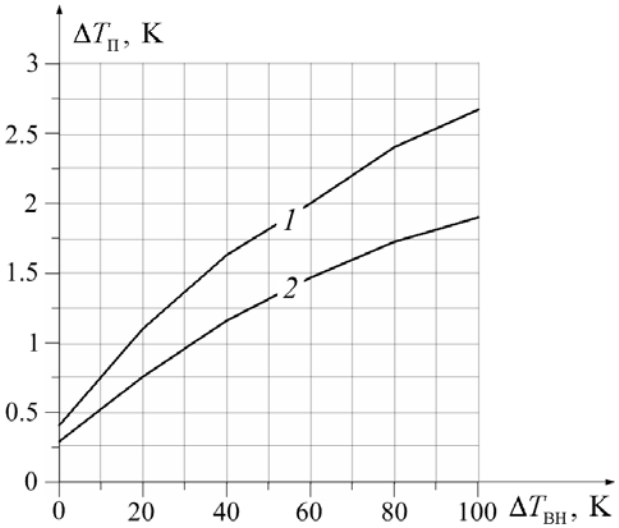

Рис. 6. Графики зависимости $\Delta T_{\text{П}} = f\left(\Delta T_{\text{ВН}}\right)$, при *1* – $x = L_x/2$; $y = L_y$; *2* – $x = L_x$; $y = L_y/2$

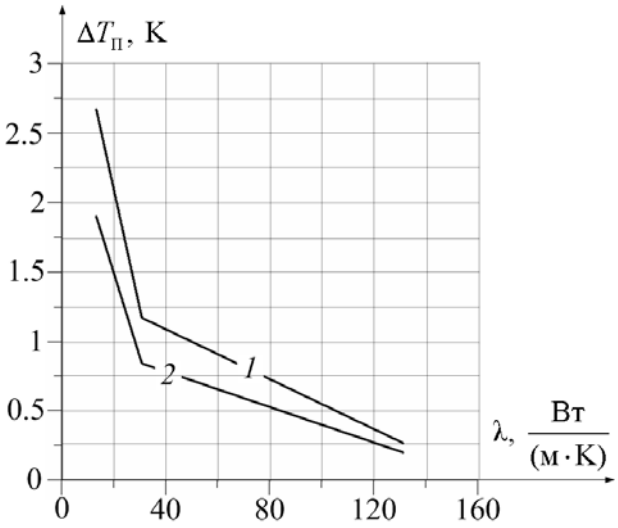

Рис. 7. Графики зависимости $\Delta T_{\text{П}} = f\left(\lambda\right)$, при $\Delta T_{\text{ВН}}$ = 100 К: *1* – $x = L_x/2$; $y = L_y$; *2* – $x = L_x$; $y = L_y/2$

Исходя из сопоставления полученных результатов исследований можно констатировать, что такой параметр, как взаимное пространственное размещение датчика температуры и нагревателя, оказывает несущественное (в пределах нескольких десятых градуса) влияние на величину температурного перепада, а, следовательно, и диапазона изменения статической ошибки регулирования, по поверхности подложки, т.е. зависимостью типа $\Delta T_{\text{П}}$, $\Delta\delta_{\text{СТ}} = f(r)$ также можно пренебречь.

В работе определяется, что на термостабильной подложке имеется область минимальной статической ошибки регулирования, площадь которой зависит от: применяемого закона регулирования, коэффициента усиления по замкнутому контуру, взаимного пространственного размещения датчика и нагревателя, и от теплопроводности материала подложки.

Представленные результаты могут быть использованы при проектировании термостабильной РЭА с использованием гибридно-пленочных МТ. Так, если в распоряжении проектировщика имеется уравнение температурной погрешности термостатируемого объекта РЭА, то элементы с максимальным температурным коэффициентом необходимо располагать в зоне минимальной статической ошибки (рис. 8-9).

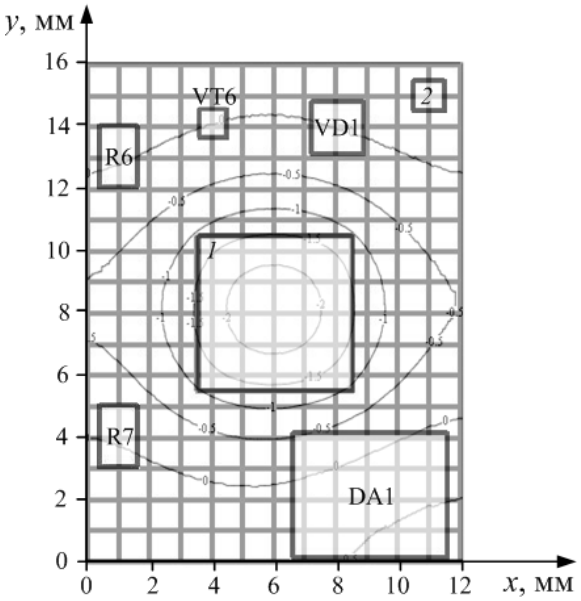

Рис. 8. Результат проведения топологической термокомпенсации

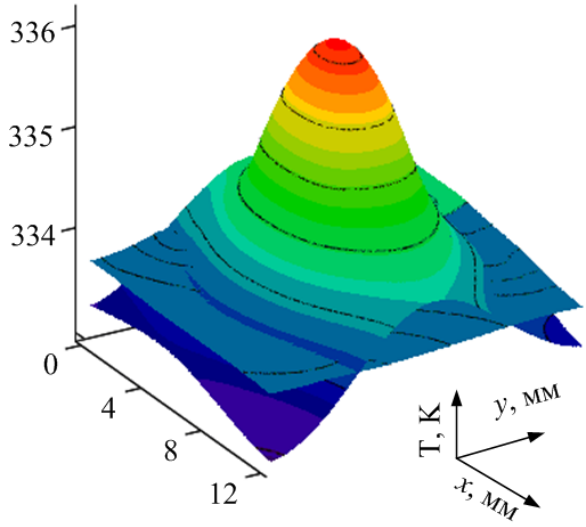

Рис. 9. Распределение температур поверхности подложки с учетом тепловыделений ЭРЭ

Представленные результаты проведения топологической термокомпенсации основаны на получении пространственной картины статической ошибки регулирования температуры и уравнения температурной погрешности термозависимых электрорадиоэлементов (ЭРЭ), например:

$$\frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВЫХ}}} = \frac{\Delta T_{i\ \text{ЭРЭ}}}{T_{\text{СТ.МАКС}}} = 0.02149\frac{\Delta T_{\text{R6}}}{T_{\text{СТ.МАКС}}} - 0.02149\frac{\Delta T_{\text{R7}}}{T_{\text{СТ.МАКС}}} +$$

$$+0.00239\frac{\Delta T_{\text{VD1}}}{T_{\text{СТ.МАКС}}} - 0.00293\frac{\Delta T_{\text{VT6}}}{T_{\text{VT6}}} - 0.0000021\frac{\Delta T_{\text{DA1}}}{T_{\text{DA1}}}, \qquad (13)$$

где, $U_{\text{ВЫХ}}$ – выходное напряжение; $\Delta T_{i\ \text{ЭРЭ}}$ – интервал варьирования равный величине статической ошибки регулирования температуры термостабильной подложки в зоне размещения ЭРЭ при граничных значениях температуры внешней среды; $T_{\text{СТ.МАКС}}$ – максимальная температура статирования (см. рис. 3).

Температурная погрешность различных вариантов размещения термозависимых ЭРЭ при проведении топологической термокомпенсации, а также результаты других направлений проектирования термоустойчивой РЭА доступны в табл. 2-3, соответственно.

Таблица 2. Температурная погрешность по вариантам размещения ЭРЭ

Вариант	Температурная погрешность элементов $\Delta T_{i\ \text{ЭРЭ}}/T_{\text{СТ.МАКС}}$					Суммарная температурная погрешность $\Delta U_{\text{ВЫХ}\ T}/U_{\text{ВЫХ}}$
	R6	R7	VD1	VT6	DA1	
1	$2.99\cdot10^{-4}$	$2.99\cdot10^{-4}$	$1.5\cdot10^{-3}$	$8.98\cdot10^{-4}$	$2.7\cdot10^{-3}$	$9.4\cdot10^{-7}$
2	$-2.99\cdot10^{-4}$	$-2.99\cdot10^{-4}$	$-2.99\cdot10^{-4}$	$-2.99\cdot10^{-4}$	$2.99\cdot10^{-4}$	$1.6\cdot10^{-7}$

Таблица 3. Температурная погрешность по направлениям проектирования

Вариант исполнения	Температурная погрешность, мкВ	Диапазон изменения температуры внешней среды, К
Исходный вариант	-203	10
Вариант с применением топологической термокомпенсации	-87	10
Вариант с применением микротермостатирования	-9.4	10
Вариант с применением топологической термокомпенсации в МТ на основании эффекта минимальной статической ошибки	1.6	100

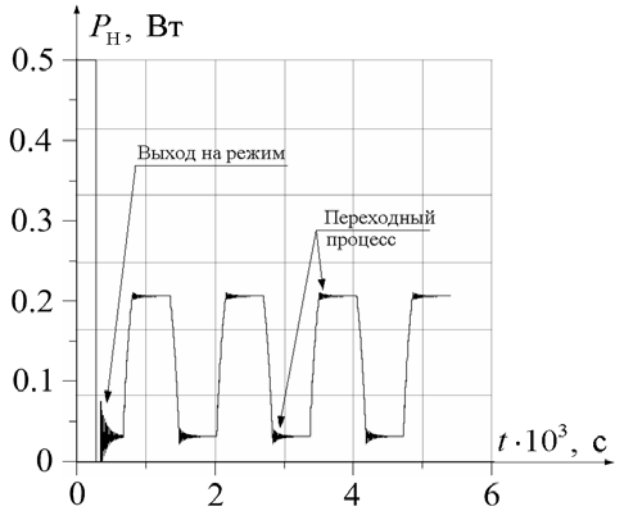

Рис. 10. Изменение мощности нагревателя под воздействием $T_{ВН}$

В заключительной части третьей главы рассмотрены процессы термостатирования с учетом наиболее значимых в работе МТ дестабилизирующих воздействий: изменения температуры внешней среды и изменения мощности нагревательного элемента с течением времени, которые позволяют на этапе проектирования оценить устойчивость работы системы регулирования температуры при заданных уровнях воздействия дестабилизирующих факторах.

Пример работы регулятора температуры при изменении температуры внешней среды с течением времени приведен на рис. 10.

В **<u>четвертой главе</u>** рассмотрена пространственная постановка задачи термостатирования, которая сводится к решению трехмерного нелинейного нестационарного уравнения теплопроводности совместно с уравнением пропорционального регулятора температуры термостабильной подложки при следующих допущениях:

1. Все элементы исследуемой конструкции представляют собой однородные изотропные тела ТФХ которых не зависят от координат и температуры;

2. На границах между элементами (телами) считается идеальный тепловой контакт.

$$\begin{cases} C\rho\dfrac{\partial T}{\partial t} = \lambda\left(\dfrac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \dfrac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \dfrac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) + \dfrac{P_{Н}\left(x, y, z, T_{Д}\right)}{V_{Н}} \\ P_{Н}\left(T_{Д}\right) = P_{Н.МАКС}\ , \text{ при } T_{Д} \le T_{СТ} \\ P_{Н}\left(T_{Д}\right) = P_{Н.МАКС} - \dfrac{P_{Н.МАКС}}{\Delta T_{СТ.З.}}\left(T_{Д} - T_{СТ}\right)\ , \text{ при } T_{СТ} < T_{Д} < T_{СТ.МАКС}\ , \\ P_{Н}\left(T_{Д}\right) = 0\ , \text{ при } T_{Д} \ge T_{СТ.МАКС} \\ P_{Н}\left(x, y, z\right) = P_{Н}\left(T_{Д}\right)\ , \text{ при } x, y, z \in \left[V_{Н}\right] \\ P_{Н}\left(x, y, z\right) = 0\ , \text{ при } x, y, z \notin \left[V_{Н}\right] \end{cases} \qquad (14)$$

где x, y, z – пространственные координаты; $V_{Н}$ – объем нагревателя.

Решение задачи (14) рассматривается при:

$$t \in [0; t_{МАКС}], \qquad (15)$$

и в области (согласно рис. 11):

$$\begin{cases} x \in [x_{Н1}; x_{Н2}], y \in [y_{Н1}; y_{Н2}], z \in [z_1; z_2]; \\ x \in [x_{Д1}; x_{Д2}], y \in [y_{Д1}; y_{Д2}], z \in [z_1; z_2]; \\ x \in [0; L_x], y \in [0; L_y], z \in [0; z_1]. \end{cases} \quad (16)$$

Здесь $x_{Н1}$, $x_{Н2}$, $y_{Н1}$, $y_{Н2}$, z_1, z_2 – координаты размещения нагревателя и $x_{Д1}$, $x_{Д2}$, $y_{Д1}$, $y_{Д2}$, z_1, z_2 – датчика температуры, в соответствии с выбранным направлением.

На поверхности в области контакта твердых тел задаются граничные условия IV рода:

$$z = z_1, x \in [x_{Н1}; x_{Н2}], y \in [y_{Н1}; y_{Н2}]: \quad \lambda_П \frac{\partial T_П}{\partial z} = \lambda_Н \frac{\partial T_Н}{\partial z}; \quad \left(T_П = T_Н\right)\Big|_{z=z_1} \quad (17)$$

$$z = z_1, x \in [x_{Д1}; x_{Д2}], y \in [y_{Д1}; y_{Д2}]: \quad \lambda_П \frac{\partial T_П}{\partial z} = \lambda_Д \frac{\partial T_Д}{\partial z}; \quad \left(T_П = T_Д\right)\Big|_{z=z_1} \quad (18)$$

На остальной области поверхности задан лучистый теплообмен по закону Стефана-Больцмана подобно (4-7).

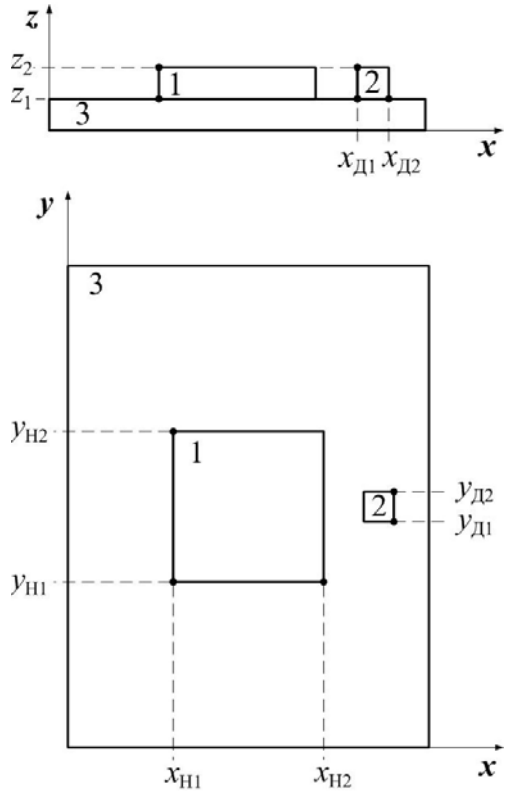

Рис. 11. Геометрия решения: 1 – нагреватель; 2 – датчик; 3 – подложка

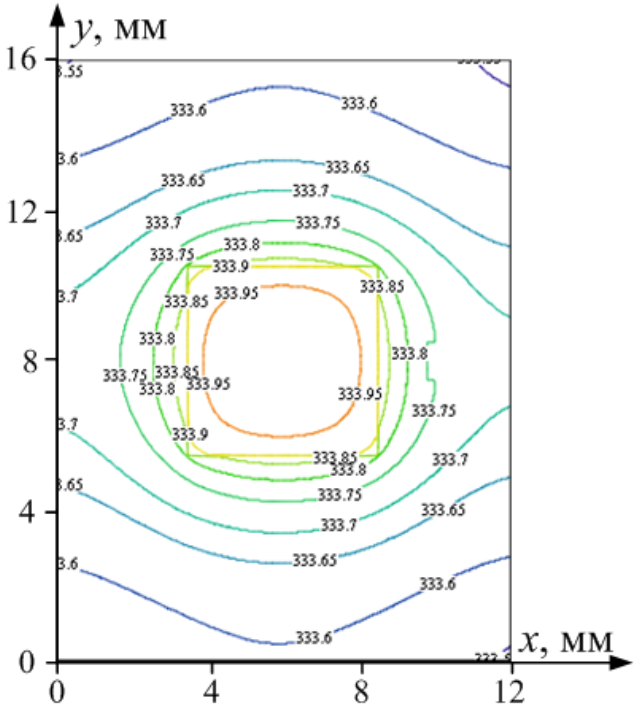

Рис. 12. Пространственная картина распределения температуры подложки в плоскости $z = z_1$, в конечный момент времени, при $T_{ВН}$=323 K

В целом, метод решения системы уравнений (14), с соответствующими условиями (15-18), аналогичен методу решения системы (1) – применяется метод конечных разностей, совместно со схемой расщепления по координатам и метода прогонки.

Результаты трехмерного моделирования при толщине термостабильной подложки 1.0 мм и координатах пространственного размещения датчика температуры [10;8] мм приведены на рис. 12.

Исследования показали, что увеличение толщины подложки приводит к росту времени выхода на режим (рис. 13*а*, 14), увеличению температурного перепада, а, следовательно, и диапазона изменения статической ошибки регулирования температуры, по толщине (рис. 16) термостабильной подложки и, к сокращению температурного перепада по поверхности (рис. 13*б*, 15) подложки.

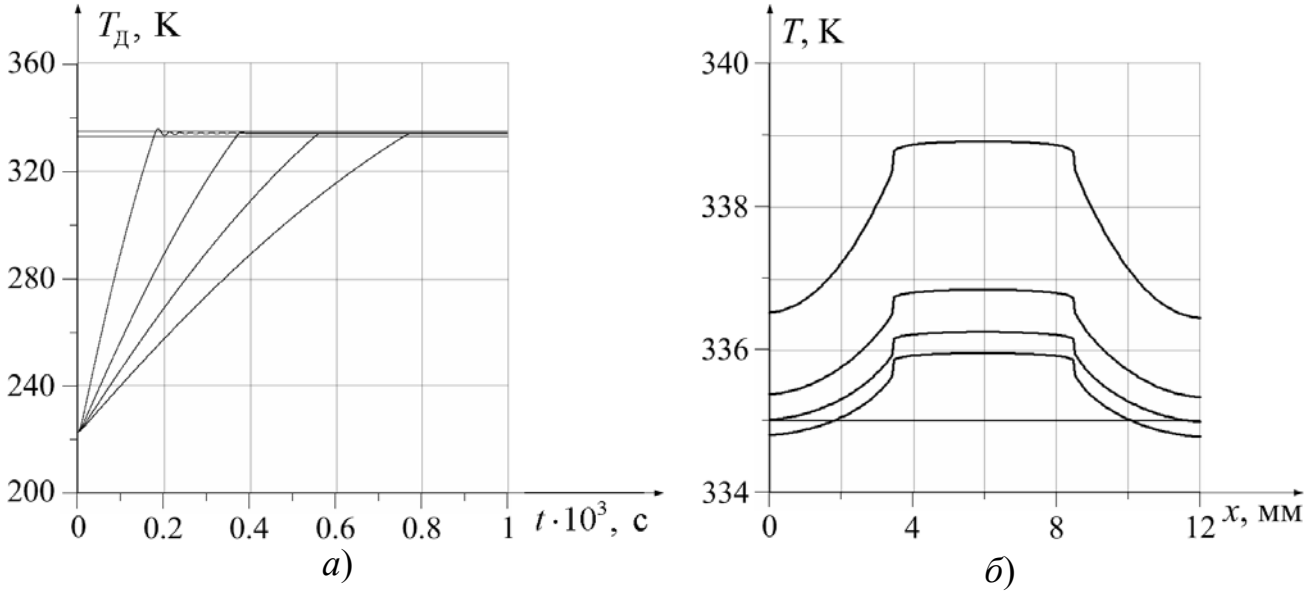

Рис. 13. Изменение температуры датчика (*а*) и распределение температуры вдоль оси x ($y = L_y/2$, $z = z_1$) (*б*) в зависимости от толщины подложки: $h = 0.5$, 1.0, 1.5, 2.0 мм (слева направо). Температура внешней среды 223 K

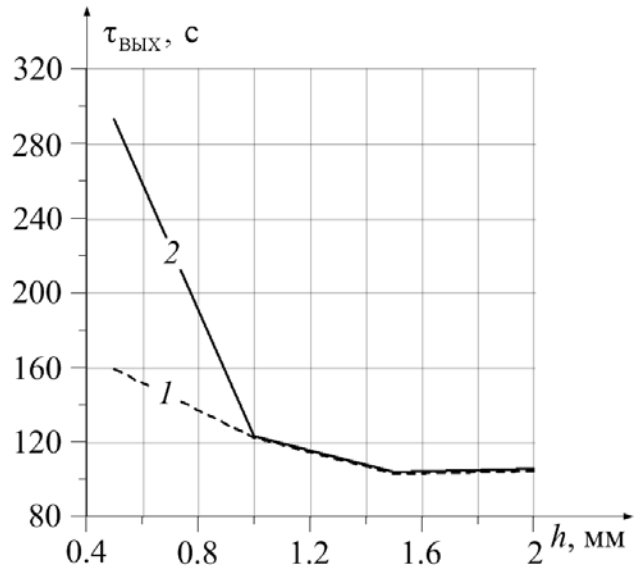

Рис. 14. Графики зависимости $\tau_{вых} = f(h)$, при $T_{ВН}$=323 K: *1* – двухмерная, *2* – трехмерная модель

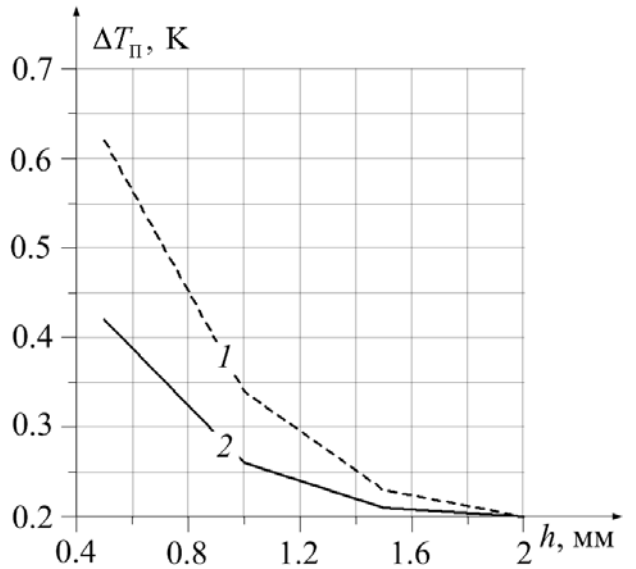

Рис. 15. Графики зависимости $\Delta T_П = f(h)$ вдоль оси x ($y = L_y/2$, $z = z_1$), при $T_{ВН}$=323 K: *1* – двухмерная, *2* – трехмерная модель

Наличие оптимального времени выхода на режим, которое согласно рис. 14 соответствует толщине 1.5 мм, указывает на необходимость варьирования коэффициентом усиления по замкнутому контуру, который при толщинах до 1.5 мм велик (время выхода на режим составляет 293 с), а свыше - мал.

Сопоставление результатов численного моделирования по двух и трехмерным математическим моделям показало, что расхождение значений температурного перепада по поверхности подложки не превышает ±2 К при абсолютных значениях температуры 333 К.

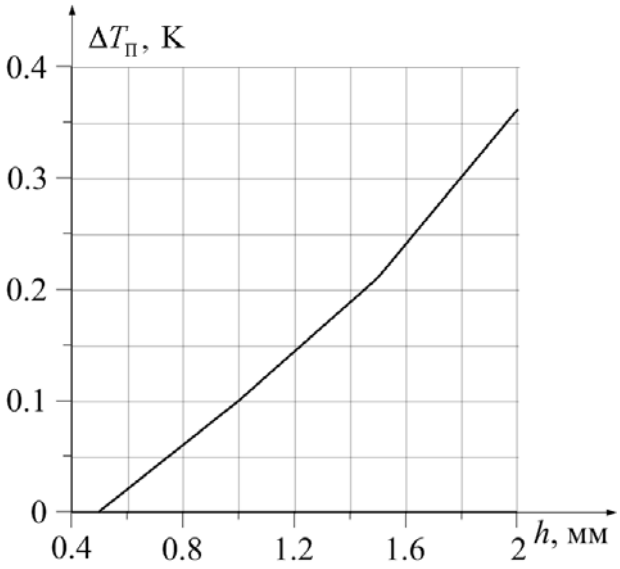

Рис. 16. График зависимости $\Delta T_{П} = f(h)$ вдоль оси z ($x = L_x/2$, $y = L_y/2$), при $T_{ВН}$=223 К

Выводы

1. Численно решена нелинейная нестационарная задача теплопереноса в конструкции гибридно-пленочного микротермостата совместно с учетом тепловой обратной связи.
2. Получены нестационарные пространственные распределения температур термостабильной подложки гибридно-интегральных схем.
3. Проведены исследования влияния внешних и конструктивно-технологических факторов и параметров подложки микротермостата на основании численного моделирования теплофизических процессов его работы.
4. Приведены рекомендации по выбору оптимальных конструктивно-технологических решений на основании численного моделирования температурных полей в конструкциях исследуемого класса микротермостата.
5. Впервые проведена топологическая термокомпенсация на основании уравнения температурной погрешности и картины пространственного распределения статической ошибки регулирования температуры.

Публикации по теме диссертации

1. Карабан В.М. Моделирование нестационарных температурных полей подложки гибридных толстоплёночных ИМС // Тезисы всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР-2006». – Томск, 2006. – С. 179-182.
2. Алексеев В.П. Вопросы численного моделирования двумерного нестационарного температурного поля подложки гибридно-плёночного микротермостата / В.П. Алексеев, В.М. Карабан // Журнал «Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники». – Томск, 2006. – С. 5-9.

3. Карабан В.М. Влияние температуры внешней среды на устойчивость работы пропорционального регулятора температуры гибридно-плёночного микротермостата // Тезисы IV международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления. Опыт инновационного развития». – Томск, 2007. – С. 108-110.
4. Карабан В.М. Математическая модель учёта изменения мощности нагревателя для пропорционального регулятора температуры гибридно-плёночного микротермостата // Известия Томского политехнического университета, 2007. Т.311. №4. – С. 104-107.
5. Карабан В.М. Влияние температуры внешней среды на устойчивость работы пропорционального регулятора температуры гибридно-плёночного микротермостата // Журнал «Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники». – Томск, 2007. – С. 68-73.
6. Alekseev V.P. Simulation of nonstationary temperature fields of a thermostable substrate for a proportional temperature regulator / V.P. Alekseev, V.M. Karaban // Journal of Engineering Thermophysics, 2008, Vol. 17, No. 3, pp. 253-257.
7. Карабан В.М. Топологическая термокомпенсация в гибридно-плёночном микротермостате, содержащем термостабильную подложку / В.П. Алексеев, В.М. Карабан // Известия вузов. Радиоэлектроника, 2008. Т.51. №11. С. 12-18.
8. Karaban V.M. Topological Thermal Compensation in a Hybrid-Film Micro Thermostat Containing Thermally Stable Substrate / V.P. Alekseev, V.M. Karaban // Radioelectronics and Communications Systems, 2008, Vol. 51, No. 11, pp. 585–589.
9. Карабан В.М. Выбор закона регулирования температуры подложки гибридно-интегральных схем на основании численного моделирования теплофизических процессов / В.М. Карабан, С.В. Тимченко // Тезисы всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР-2009». – Томск, 2009. – С. 206-208.
10. Карабан В.М. Исследование влияния конструктивно-технологических факторов на точностные параметры гибридно-пленочного микротермостата / В.П. Алексеев, В.М. Карабан // Известия вузов. Приборостроение, 2009. №7. – С. 70-75.
11. Карабан В.М. Вопросы численного прогнозирования отказов термостабильной РЭА на основании теплонапряженного анализа // Материалы молодежной пятой научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления. Итоги реализации программы развития электроники и IT-технологий в Томской области». – Томск, 2009. – С. 164-169.
12. Карабан В.М. Устройство для стабилизации температуры электрорадиоэлементов / В.П. Алексеев, В.М. Карабан, В.Г. Козлов. Патент Российской Федерации на изобретен[illegible] № 2355016. – М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности, [illegible]там и товарным знакам, 2009.
13. Карабан В.М. Устройство для стабилизации температуры элементов микросхем и микросборок / В.П. Алексеев, В.М. Карабан, В.Г. Козлов. Патент Российской Федерации на изобретение № 2348962. – М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам, 2009.